

坐标测量机实用技术

塑造测量的未来
shaping the future of measurement



- 拥有众多测量机著名品牌的跨国公司
- 171 年历史的精密制造经验
- 世界最大的测量机制造集团
- 世界领先的测量技术
- 中国领先的世界级测量机合资制造企业
- 完善的质量保证体系
- 全系列测量机产品
- 拥有超过 45,000 家的全球客户
- 在中国拥有 55% 以上的市场占有率
- 真正拥有本地化的销售、服务、应用培训、备件供应的完整体系

Logos: brown & sharpe, Sheffield, DE A, Leitz, pc-dmis, TESA TECHNOLOGY, CHOPARTS

海克斯康测量技术(青岛)有限公司

 **HEXAGON** 海克斯康
METROLOGY

第一章 坐标测量技术概述.....1	12 测量软件的发展方向.....48
1 近代坐标测量技术的发展.....1	13 超级报告应用示例——VB 高级应用编程.....49
2 现代坐标测量技术与传统测量技术的比较.....3	第五章 探测系统.....51
3 中国坐标测量机技术发展的历史.....4	1 测头的分类.....51
第二章 测量机分类及机械结构.....8	2 接触式触发测头的基本原理.....51
1 坐标测量机的主要结构形式.....8	3 常用接触式触发测头.....52
2 对测量机的总体要求.....11	4 接触式扫描测头.....55
3 整体结构形式的考虑和选择.....13	5 选择测头的几点考虑.....59
4 温度问题的考虑.....13	6 光学测头分类及原理.....60
5 测量机的材料.....15	7 光学测头存在的特殊问题.....60
6 测量机的导轨及轴承.....16	8 测座的选择.....62
7 传动机构.....17	9 测头和探针自动更换系统.....64
8 测量机的平衡机构.....18	10 测头参数对精度的影响.....65
9 光栅尺.....19	11 探测系统有何最新发展.....68
第三章 控制系统.....21	第六章 测量机的精度评定标准.....70
1 控制系统分类.....21	1 现有国内的测量机国家标准及校准规范.....70
2 CNC 数控系统的组成.....24	2 ISO 现有坐标测量机国际标准简介.....70
3 数控系统的结构.....26	3 其他的外国标准.....70
4 HEXAGON 计量集团数控系统的功能.....27	4 ISO 标准及国家标准的主要内容.....71
5 控制系统的发展方向.....30	5 VDI/DE2617 标准的主要内容.....74
第四章 三坐标测量机软件.....32	6 美国 B89 的主要内容.....77
1 综述.....32	7 英国 BS6808 的主要内容.....77
2 三坐标测量机软件分类.....32	8 日本 JIS B7440 标准 (Test Code for Accuracy Of Coordinate Measuring Machines)77
3 测量软件的发展历史.....32	9 主要测量机标准对照表.....79
4 测量软件的 CAD 核心.....33	10 光学测头的检测标准 (VDI/DE 2617-6, 6.1, 6.2)80
5 测量软件功能与应用的分类.....35	11 坐标测量机的 21 项几何误差.....82
6 测量误差与采样策略.....37	12 水平臂测量机的特殊误差.....82
7 测量编程的几种模式.....42	13 两台水平臂测量机的相向成对使用, 软件及验收标 准要作相应的调整.....83
8 在测量平台上进行二次开发.....42	14 阿贝测长原则.....83
9 测量软件 DCI/DCT 与 CAD 的直接接口.....45	15 被测零件公差要求与测量精度的关系.....83
10 薄壁件测量.....46	第七章 测量机的安装与维护.....85
11 逆向工程中比较常用的 CAD 软件.....48	

1 选择测量机安装地点的一般原则·····	85
2 安装及短途运输时应注意的问题·····	85
3 过渡间·····	86
4 地面墙体天花板·····	86
5 温度和湿度·····	86
6 供气系统·····	87
7 振动·····	88
8 地基·····	88
9 电气要求·····	88
10 检定验收环境要求·····	89
11 测量机的日常维护·····	89
12 测量机正常工作对环境的要求·····	89
13 制订测量机操作规程应考虑的项目·····	90
14 用户进行测量机的自检·····	90
15 三坐标测量机的日常维护及保养注意事项举例·····	91

第八章 坐标测量机的选择及应用·····92

1 选择测量机需要考虑的因素·····	92
2 坐标测量机的典型应用·····	96

第九章 坐标测量机的发展趋势·····106

1 物理层·····	106
2 应用层·····	107
3 扩展层·····	110

附录：·····112

坐标测量技术英中名词对照表（一）·····	112
-----------------------	-----

坐标测量技术中英名词对照表（二）·····	117
-----------------------	-----

第一章、坐标测量技术概述

自古以来，人们就用到了几何量测量的标准量值及器具，人们惊异的发现，古代人在建长城、金字塔时所用的工具及测量方法都已经达到了很先进的水平；埃及的建筑工人只有简单的铅垂线、木制方尺和直尺，但他们的测量可精确到毫米。Gizeh 金字塔是由上千个只有极少建筑常识的工人完成，它的尺寸，边线差异不超过平均长度的 0.05 %——这意味着在横跨 230 米的区间内，只有 0.11 米的偏差。

手指的宽度、脚的长度、步幅的距离、犁沟的长度，在古代，都被创造性地用于几何量测量。古代的埃及人定义了手指、手掌、手、肘作为长度单位；罗马人将脚和步长定为长度单位，也就是我们现在所说的英尺。随后，人们又定义了重量单位，发明了关于测量温度和压力的方法，公布了关于度量衡的法定标准，推出了各种长度和内径、外径测量仪器，所有这些科学技术的发展构成了我们今天坐标计量技术的基础。

自工业化以来，尤其是国防军工的需要，要求零件的高度互换性，对尺寸、位置、形状公差的要求，推动了几何量计量的发展；



图1.1 千分尺



工业革命的兴起，伴随着众多制造业如汽车、机床及模具工业的涌现和大规模生产的需要，在加工设备提高工效、自动化更强的基础上，要求计量检测手段应当高速、柔性化、通用化，而固定的、专用的或手动的工量具大大限制了大批量制造和复杂零件加工业的发展；平板加高度尺加卡尺的检验模式已完全不适用，所有这些促成了坐标测量行业的形成。

几何量不能数字化的表示和传递是一个技术瓶颈，当时人们只能借助于光学游标的技术来提高工业测量的精度及分辨力，因而亦限制了计算机在长度等几何量测量中的应用。

基于以上诸多方面的要求，从而促使和推动了近代坐标测量技术的发展。

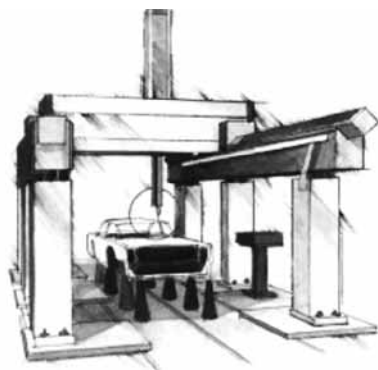
1. 近代坐标测量技术的发展

坐标测量技术的原理：任何形状都是由空间点组成，所有的几何量测量都可以归结为空间点的测量，因此精确进行空间点坐标的采集，是评定任何几何形状的基础。

坐标测量机的基本原理是将被测零件放入它允许的测量空间，精密地测出被测零件表面的点在空间三个坐标位置的数值，

将这些点的坐标数值经过计算机数据处理，拟合形成测量元素，如圆、球、圆柱、圆锥、曲面等，经过数学计算的方法得出其形状、位置公差及其它几何量数据。

在测量技术上，光栅尺及以后的容栅、磁栅、激光干涉仪的出现，革命性的把长度信息数字化，不但可以进行数字显示，而且为长度量的计算机处理、进而用作控制打下了基础。



世界上第一台现代三坐标测量机：1956 年世界上出现了由英国 Ferranti 公司发展的首台用光栅作为长度基准、并用数字显示的现代意义上的三坐标测量机，如下图所示：



图1.2 英国 Ferranti 公司的测量机

1962年，作为 FIAT 汽车公司质量控制工程师的 Frairino Sartorio 先生，在意大利都灵市创建了 DEA (Digital Electronic Automation) 公司，成为世界上第一家专业制造坐标测量设备公司，同时在公司的命名上还富有前瞻性地预见到数字技术的广泛应用，并继而在推动坐标测量机在制造业，尤其是汽车、航空航天等大型零部件精密测量方面发挥着重要作用。

1963 年 10 月，DEA 的第一台行程为 2500X1600X600 mm 的龙门式测量机 ALPHA (也是世界上第一台龙门式测量机) 出现在米兰的欧洲机床展览会上，从而开创了坐标测量技术的新领域，并使得几何量质量控制技术成为工业生产的重要因素。

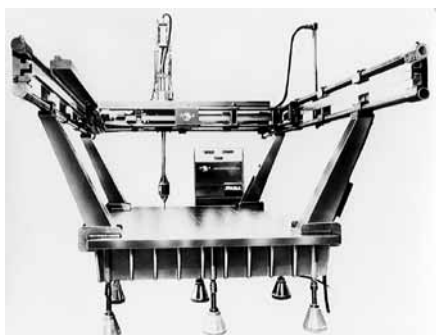


图1.3 世界上第一台龙门式测量机

在随后的年代里，DEA 相继推出其手动和数控测量机，并率先采用气浮技术，配备了各种触发、扫描测头、非接触光学测头，开发了具有强

大 CAD 功能的通用测量软件；先后推出系列桥式测量机和大型水平臂、龙门式测量机，并在推动汽车车身研究和“白车身”的尺寸检测方面作出了突出贡献，成为世界上最大的测量机供应商之一。

世界上第一个触发式测头：虽然第一台测量机已应用了数显技术，但在测量零件时仍用硬测头接触零件，然后用脚踏开关来锁存坐标读数，测量圆孔位置则要用圆锥形硬测头，测量尺寸时则用球形硬测头，这些都使得操作复杂，特别是从不同方位测量大型复杂零件时更是如此。测头补偿困难、受人为因素影响较大、测量精度不高、精度只能达到 0.025 mm，硬测头还限制了数控技术在测量机上的应用。

1972 年，当时身为 Rolls-Royce 公司副总设计师的 David McMurtry (Renishaw 公司现任董事长及首席执行官) 为了帮助解决协和号飞机发动机上直径为 6.35 mm 复杂形状的油管直径，发明了世界上第一个接触式触发测头，由于应用了三点支撑的静定结构、测头对所面临的测量任务有足够的精度和稳定性，精度能达到 0.01 mm 以内。

由于触发测头的出现，使得测量机从只能静态测量，发展到在运动中测量，同时根据被测物体不同的形状、材料和测量要求，又相继推出各种接触和非接触测头；其中又有触发、扫描方式之分；我们将在第五章《探测系统》中进行详细的描述。



图1.4 世界第一个触发测头

控制技术的发展：随着测量系统机械性能的提高，伴随着控制和软件技术的迅猛发展，测量机已从早期的手动状态、机动型迅速转化为数控型；使得速度更快，精度更高，并大大简化了测量操作人员日常的工作强度。

软件在测量机上的应用日趋重要：鉴于几何物体都是一些空间点的集合，坐标测量机归根到底，只是获取空间点的坐标值的仪器设备，只有用软件对这许多点进行处理、计算才能给出测量对象的位置、尺寸、形状，而且也可以进行测头、温度、几何量误差的补偿；软件的第一功能是进行数据处理；另一方面，数控测量机的软件不仅

用于数据处理，还和控制系统结合在一起，指挥和控制测量机的运行。

坐标测量技术与软件技术的日益紧密结合，使得测量机的用途日益强大，从单纯的测量设备转化为设计、工艺、制造和检测环节中不可缺少的重要设备。尤其是伴随着数字技术和 CAD 技术的广泛发展和应用，测量软件成为测量机与其他外设、加工设备和 CAD 系统沟通的桥梁。

测量机外设/服务更加完善：测量机在技术上更加贴近应用。测量机制造商根据被测量工件的形状、材料、测量环境、测量目的以及和生产线的配套情况，在机械结构、软件和测头的配套等方面更趋多样化。这包括各种柔性夹具、手动/自动上下料系统、测量机的配套、测量机机房的规划建设、完善合理的检测方案 and 为客户提供的检测咨询，可保证用户最大限度地发挥测量机的效用，提高效率，节约成本。

同时，深层次的服务项目变得更加重要，专业的测量机厂商已经突破了一般意义上的技术服务，他们正在试图采用更新更专业的手法使得客户服务的效率更高、更全面、更及时，这包括网络技术的应用，如在线技术支持、在线软件升级、在线故障诊断、网上技术论坛以及网上会员俱乐部等等。

售后增值服务：根据目前国外的统计数据，售后增值服务项目在测量机制造商提供产品方面所占比重越来越大。所谓售后增值服务，指的是面向超过产品保修期的所有产品和服务项目以及为满足客户需要而提供相应的产品与服务。专业的测量机制造商提供了伴随整个测量机生命周期的产品技术服务。除了保修期内的机器安装、培训、技术支持和产品保修项目外，售后增值服务涉及了产品保修期后的所有服务项目，包括测量

软件升级、机器维修校准、合同服务、合约检测以及各种零备件供应等等。

2. 现代坐标测量技术与传统测量技术的比较

坐标测量机的特点是高精度（达到 μm 级）、高效率（数十、数百倍于传统测量手段）、万能性（可代替多种长度计量仪器）。因而多用于产品测绘，复杂型面检测，工夹具测量，研制过程中间测量，CNC 机床或柔性生产线在线测量等方面；只要测量机的测头能够瞄准（或感受）到的地方（接触法与非接触法均可），就可测出它们的几何尺寸和相互位置关系，并借助于计算机完成数据处理。这种三维测量方法具有极大的万能性。同时可方便地进行数据处理与过程控制。因而不仅在精密检测和产品质量控制上扮演着重要角色，同时在设计、和生产过程控制、模具制造方面发挥着越来越重要的作用，并在汽车工业、航空航天、机床工具、国防军工、电子和模具等领域得到广泛应用。

传统测量技术	坐标测量技术
对工件要进行人工的精确及时的调整	不需对工件要进行特殊调整
专用测量仪和多工位测量很难适应测量任务的改变	简单的调用所对应的软件完成测量任务
与实体标准或运动标准进行测量比较	与数学的或数字模型进行测量比较
尺寸、形状和位置测量在不同的仪器上进行	尺寸、形状和位置的评定在一次安装中即可完成
不相干的测量数据	产生完整的数字信息，完成报告输出、
手工记录测量数据	统计分析和 CAD 设计

3. 中国坐标测量机技术发展的历史

3.1. 70 年代的先行者

中国三坐标测量机的研制开始于七十年代中期，这些研制单位包括北京航空精密技术研究所、上海机床厂、北京第二机床厂、北京机床研究所、上海第三机床厂、新天光学仪器厂、天津大学等等，由于测量机技术密集性较高，涉及光、机、电等技术领域，限于当时封闭式的研制与管理方法，遇到较大困难，离真正的测量机产品还相去甚远。

3.2. 80 年代

70 年代以仿制为主的测量机，由于面临各种困难，并没有形成产品，到 80 年代，许多公司转而引进国外的生产许可证进行生产，如北京航空精密技术研究所取得意大利 DEA 的许可证，生产 IOTA 系列测量机；上海机床厂及新天光学仪器厂分别购买了德国 Leitz 的 PMM 许可证，可惜由于成本太高，除 IOTA 机型以外，其它机型均没有进入批量生产。

1984 年 11 月，在进行广泛市场调研的基础上，当时的青岛前哨机械厂明晰了对测量机这种高科技产品广阔市场发展前景的认识，在资金和技术实力明显弱于国内许多机床专业生产厂家的情况下，凭借十六万八千人民币和 5 人组成的科研小组，利用有限的关于测量机的认识，于 1984 年开始了对测量机项目的研制工作。经过三年多的艰苦摸索，终于在 1988 年成功研制出全花岗石固定桥式的高精度三坐标测量机 ZC 8645，在当年组织的专家评审中，包括国家计量院专家在内的专家组所做出的评审结果为“29 项精度指标全部达到规定要求，精度已达到国际先进国家同类产品的水平”。在成功推出 ZC 系列测量机的基础上，前哨不断加快产品技术开发和市场拓展的步伐，此后相继开发成功数控型 ZOO、ZC 以及水平臂等不同系列、不同尺寸的测量机，开发了有自主知识产权的控制系统 ZCSK 和通用测量软件 QS-3D，到 1993 年，青岛前哨已经从原有 10 多家国内测量机生产商中脱颖而出，成为国内两大制造商之一。



图1.5 84-88 年前哨研制的 ZC 测量机

3.3. 90 年代

为满足制造技术的发展和客户对三坐标测量机的广泛需求，仅凭现有的产品和技术是远远不够的。而要在测量机制造技术上有更大的突破和更快的发展，就必须借力发展，寻找快捷而又稳健的发展道路。经过反复权衡，前哨于 1993 年与荷兰英狄沃斯公司合资成立了中国第一家测量机合资公司——青岛前哨英柯发设备有限公司（QI TECH）。通过这种合资与更深层次的技术合作，给企业打开了一扇通向外部世界的大门，不仅在测量机产品和技术上寻求到了与国际接轨的通路，同时，更为重要的是为公司管理方式、人员意识以及企业文化方面注入了新的观念。合资公司成立后，借助世界级的测量机产品开发理念，通过中外工程技术人员共同努力，先后推出了具备国际先进水平的 ZOO2、ZOO3、ZOO3L 多个系列测量机产品、具有自主知识产权的 QIC 控制系统和世界上第一个采用基于 WINDOWS 95 平台和 DMIS 标准写成的测量软件 EZ-DMIS，从 1996 年起，当时的 QI TECH 开始稳居国内测量机市场占有率第一位，产品销往英国、韩国、新加坡等 9 个国家和地区。

3.4. 前哨朗普公司

新的起点往往伴随着新的挑战，不断进取的前哨人并不满足于国内测量机行业排名第一的位置，又在希冀着更高更远的目标。凭借其雄厚的技术实力和专业的测量机人才队伍，1999 年 8 月，前哨与世界三大测量机制造公司之一的 Brown &

Sharpe 集团合资，成立了青岛前哨朗普测量技术有限公司（Brown & Sharpe 前哨），从而成为这个具有 171 年历史，世界知名测量机集团全球战略的一部分，同时，更为重要的是公司的设计、制造、软件开发、技术服务、产品应用以及公司的管理体制，全部融入到世界级公司中，通过矩阵式的管理，具备了同世界级的测量机公司同步发展的机会与可能。新的合资公司成立以来，不断取得骄人的业绩，2003 年的销售收入达到近 3 亿元，市场占有率达到 55%，实现了稳步的发展和提高，并稳步向着世界级测量机供应商的发展目标迈进。

3.5 海克斯康

进入 21 世纪，随着 Brown & Sharpe 集团被瑞典 HEXAGON 集团收购，Brown & Sharpe 前哨与其他世界知名的测量机品牌美国 Brown & Sharpe、意大利 DEA、德国 LEITZ、美国 SHEFFIELD、瑞典 CE JOHANSSAN 以及著名的测量软件 PC-DMIS 专业开发商 WILCOX 和著名的精密计量工具制造

商瑞士 TESA 一起而成为 HEXAGON 计量集团的重要成员和生产制造基地之一，成为 HEXAGON 计量集团在亚太地区的重要研发、生产、技术支持基地，产品覆盖高、中、低，大、中、小各种系列，软件包括 PC-DMIS 及 QUINDOS 等世界知名的测量软件。

为贯彻 HEXAGON 计量集团的全球品牌统一规划，2004 年 6 月，青岛前哨朗普测量技术有限公司（Brown & Sharpe 前哨）更名为海克斯康测量技术(青岛)有限公司。改名后的海克斯康公司，作为 HEXAGON 计量集团亚洲区域的三坐标测量机制造销售厂商，在中国国内已拥有超过 1800 台机器的用户，占中国拥有测量机用户的一半以上，从而牢牢占据着中国测量机行业领先者的位置。

在后面的章节中，我们将较为详细地就有关坐标测量的基础知识、坐标测量机的几个核心要素、坐标测量机技术应用及其发展趋势和相关的维护保养等常识进行专门论述，希望通过我们的努力，能够使得读者更好的了解和领会坐标测量技术及其应用，为您选好、用好测量机提供帮助。



图1.6 桥式测量机

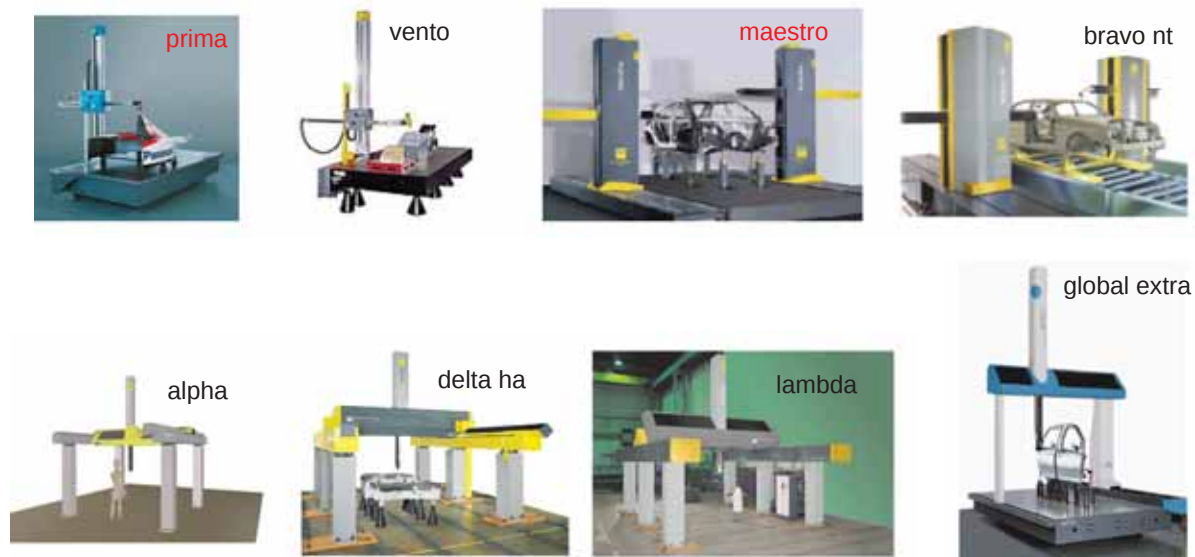


图 1.7 大型测量机

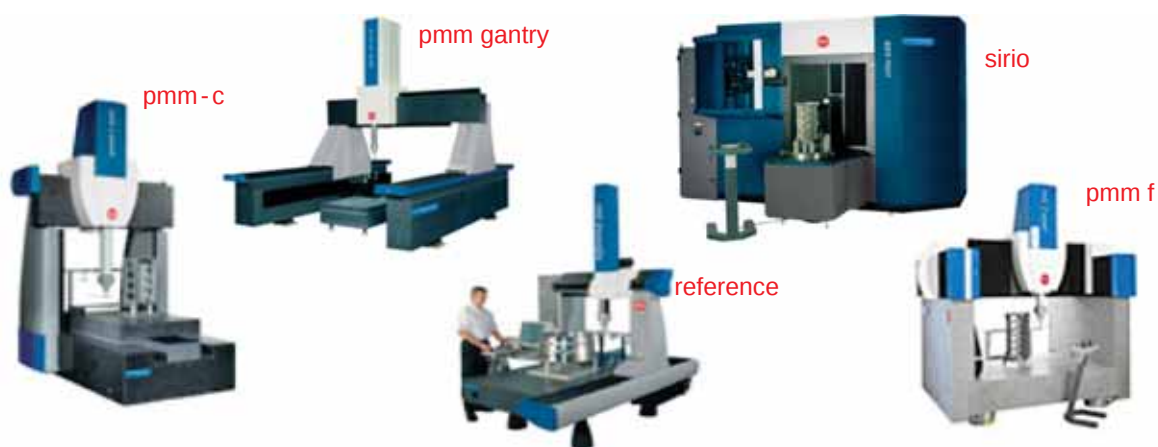
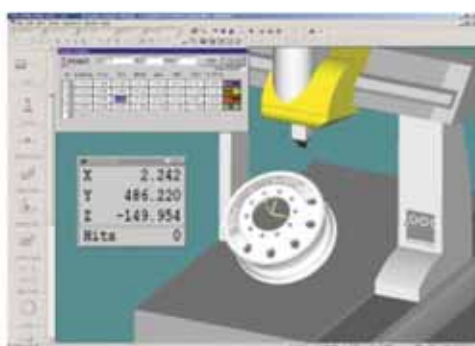


图1.8 超高精度测量机



PC-DMIS：具有强大CAD功能的工业级测量软件



QUINDOS：世界上功能最完善的测量软件之一

图1.9 测量软件

塑造测量的未来

shaping the future of measurement

- 拥有众多测量机著名品牌的跨国集团公司
- 171 年历史的精密制造经验
- 世界最大的测量机制造集团
- 世界领先的测量技术
- 中国领先的世界级测量机合资制造企业
- 完善的质量保证体系
- 全系列测量机产品
- 拥有超过 45,000 家的全球客户
- 在中国拥有 55% 以上的市场占有率
- 真正拥有本地化的销售、服务、应用培训、备件供应的完整体系

brown & sharpe
前哨

brown & sharpe



Sheffield

pc-dmis



CEJOHANSSON



海克斯康测量技术(青岛)有限公司 (Brown & Sharpe 前哨) 地址：青岛市株洲路 188 号 电话：0532-8702188 传真：0532-8703060 网址：www.brownsandsharpe.com.cn

海克斯康始终把“塑造测量的未来”做为企业发展的总目标

第二章、测量机分类及机械结构

三坐标测量机的基本组成:

测量机一般由主机（包括光栅尺）、电气系统及测头所组成，如下图所示：

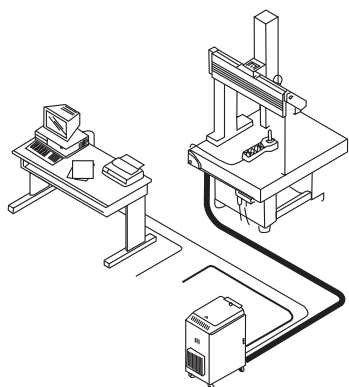


图 2.1 测量机基本组成

除硬件以外，软件也是测量机的重要组成部分。

本章我们将就坐标测量机主机的主要结构形式、对测量机总的要求，材料、传动、导轨、平衡装置进行介绍。

而测头、控制系统、软件、标准、安装及应用则分别在以后几章叙述。

1. 坐标测量机的主要结构形式

根据 ISO 10360 国际标准《坐标测量机的验收、检测和复检检测》第一部分的规定，根据机械结构，对主要的测量机结构类型作如下分类：

1.1. 固定工作台悬臂式坐标测量机

这类坐标测量机有沿着相互正交的导轨而运动的三个组成部分，装有探测系统的第一部分装在第二部分上并相对其作垂直运动。第一和第二部分的总成相对第三部分作水平运动。第三部分以悬臂状被支撑在一端，并相对机座作水平运动，

机座承载工件。

这种类型机器的优点是开敞性较好，但精度不太高，一般用于小型测量机。

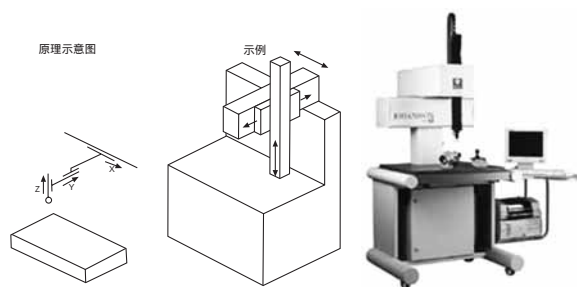


图 2.2 固定工作台悬臂式坐标测量机

1.2. 移动桥式坐标测量机（见图 2.3）

这类坐标测量机有沿着相互正交的导轨而运动的三个组成部分，装有探测系统的第一部分装在第二部分上并相对其作垂直运动。第一和第二部分的总成相对第三部分作水平运动。第三部分被架在机座的对应两侧的支柱支承上，并相对机座作水平运动，机座承载工件。

移动桥式坐标测量机是目前中小型测量机的主要结构型式，承载能力较大，本身具有台面，受地基影响相对较小，开敞性好，精度比固定桥式稍低。

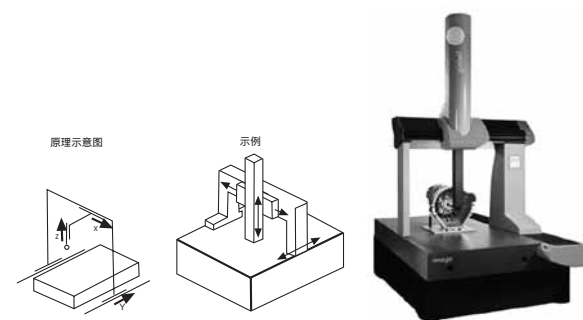


图 2.3 移动桥式坐标测量机

1.3. 龙门式坐标测量机（高架桥式测量机,见图2.4）

这类坐标测量机有沿着相互正交的导轨而运动的三个组成部分，装有探测系统的第一部分装在第二部分上并相对其作垂直运动。第一和第二部分的总成相对第三部分作水平运动。第三部分在机座两侧的导轨上作水平运动，机座或地面承载工件。

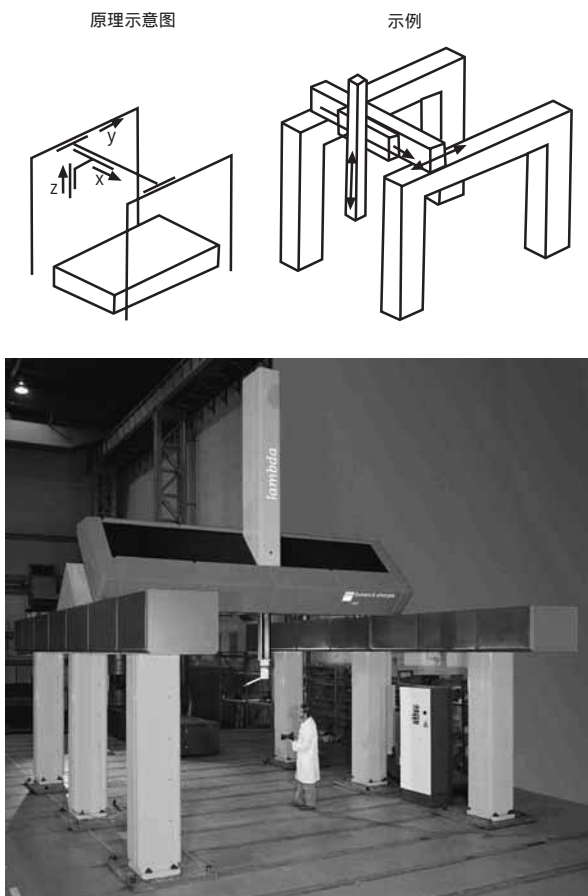


图 2.4 龙门式坐标测量机

龙门式坐标测量机一般为大中型测量机，要求较好的地基，立柱影响操作的开阔性，但减少了移动部分质量，有利于精度及动态性能的提高，正因为此，近来亦发展了一些小型带工作台的龙门式测量机。龙门式测量机最长可到数十米，由于其刚性要比水平臂式好，因而对大尺寸而言可具有足够的精度。

典型的龙门式测量机如来自意大利 DEA 公司的 ALPHA、DELTA 和 LAMBDA 系列测量机。

1.4. L型桥式坐标测量机（见图 2.5）

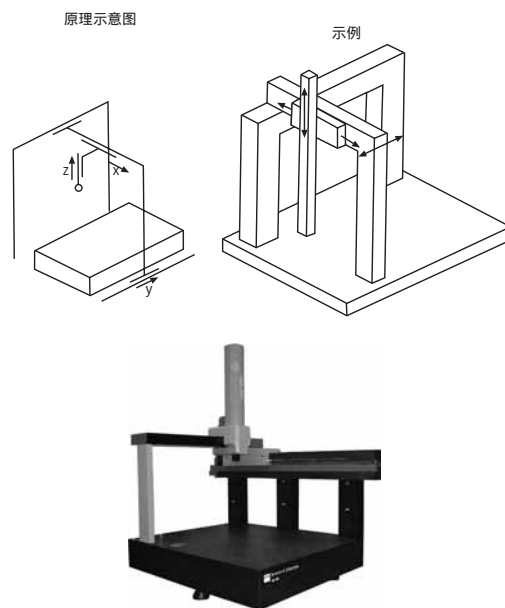


图 2.5 L型桥式坐标测量机

这类坐标测量机有沿着相互正交的导轨而运动的三个组成部分，装有探测系统的第一部分,装在第二部分上并相对其作垂直运动。第一和第二部分的总成相对第三部分作水平运动。第三部分在机座平面或低于平面上的一条导轨和在机座上另一条导轨的两条导轨上作水平运动，机座承载工件。

L 型桥式坐标测量机是综合移动桥式和龙门式测量机优缺点的测量机，有移动桥式的平台,工作开敞性较好，又像龙门式减少了移动的质量，运动速度、加速度可以较大，但要注意辅腿的设计。

1.5. 固定桥式坐标测量机（见图 2.6）

这类坐标测量机有沿着相互正交的导轨而运动的三个组成部分，装有探测系统的第一部分装在第二部分上并相对其作垂直运动。第一和第二部分的总成沿着牢固装在机座两侧的桥架上端作水平运动，在第三部分上安装工件。

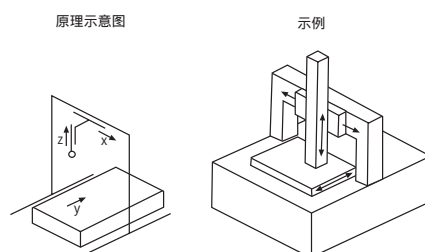


图 2.6 固定桥式坐标测量机

高精度测量机通常采用固定桥式结构。固定桥式测量机的优点是结构稳定，整

机刚性强，中央驱动，偏摆小，光栅在工作台的中央，阿贝误差小，X、Y 方向运动相互独立，相互影响小；缺点是被测量对象由于放置在移动工作台上，降低了机动的移动速度，承载能力较小。经过改进，这类测量机速度已可达 400 mm/s，加速度达到 3000 mm/s²，承重达 2000kg。典型的固定桥式有目前世界上精度最好的出自德国 LEITZ 公司的 PMM-C 测量机。



图 2.7 PMM-C 固定桥式测量机

1.6. 移动工作台悬臂式坐标测量机

这类坐标测量机有沿着相互正交的导轨而运动的三个组成部分，装有探测系统的第一部分装在第二部分上并相对其作垂直运动。第二部分以悬臂状被支承在一端，并相对机座作水平运动。第三部分相对机座作水平运动并在其上安装工件。

此类测量机承载力不高，应用较少。

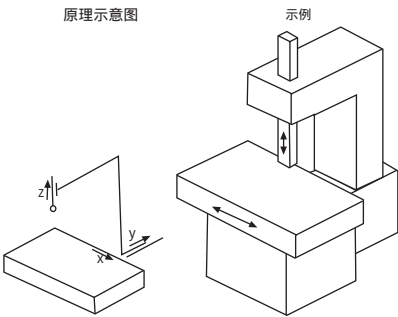


图 2.8 移动工作台悬臂式坐标测量机

1.7. 柱式坐标测量机

这类坐标测量机有两个可移动组成部分，装有探测系统的第一部分相对机座作垂直运动。第二部分装在机座上并相对其沿水平方向运动，在该部分上安装工件。

柱式坐标测量机精度比固定工作台悬臂测量机为高，一般只用于小型高精度测量机，适于要求前方开阔的工作环境。

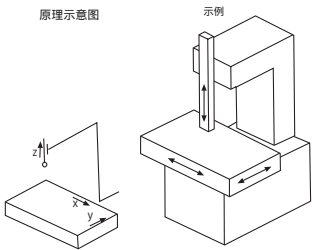


图2.9 柱式坐标测量机

1.8. 水平悬臂坐标测量机

这类坐标测量机有沿着相互正交的导轨而运动的三个组成部分，装有探测系统的第一部分装在第二部分上并相对其作水平运动。第一和第二部分的总成相对第三部分作垂直运动。第三部分相对机座作水平运动，并在机座上安装工件；如果进行细分，可分为水平悬臂移动式坐标测量机、固定工作台水平悬臂坐标测量机，移动工作台水平悬臂坐标测量机。

水平臂测量机在 X 方向很长，Z 向较高，整机开敞性比较好，是测量汽车各种分总成、白车身时最常用的测量机。

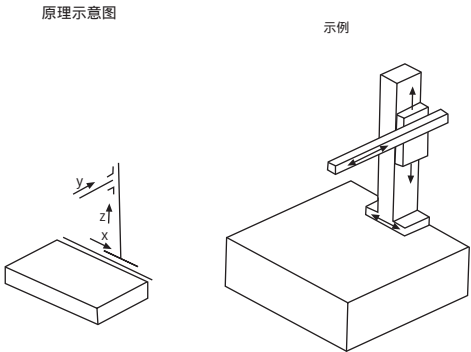


图 2.10 水平悬臂坐标测量机

2. 对测量机的总体要求

根据三坐标测量机的特点和伴随着现代制造业对于产品质量控制要求的特点，从硬件上来说，对测量机的总体要求体现为如下几点：

- 1、高精度、高性能；
- 2、高速度/高效率；
- 3、高可靠性；
- 4、高性能价格比；
- 5、适应于车间环境；

2.1. 高精度/高性能



高品质的产品不仅需要高质量的加工设备，而且主要依赖于所用测量设备的性能。测量机以其高精度而成为产品质量控制和最终检验的标准。随着测量技术、材料技术、补偿技术、控制技术和软件技术的发展，测量机的精度和性能得到广泛提高。如目前世界上生产超高精度测量机著称的德国 LEITZ 公司，将精度、重复性、速度、成本有效地融合为一体，目前，其固定桥式的 PMM-C 系列测量机，长度测量的最大允许示值误差 MPE_E 值达到了 $0.6 + L/600 \mu m$ ，而其活动桥式的 REFERENCE 系列测量机的 MPE_E 值可达到 $1.0 + L/350 \mu m$ ，加上配套的当今世界上功能最为完善的测量软件 QUINDOS，使得这类机器除了执行标准的测量任务，如：发动机箱体以及传动齿轮箱检测，还能够处理具有复杂形状工件的检测，成为真正意义上的通用测量中心。

2.2. 高速度、高效率

随着加工设备的效率和加工速度不断提高，加之测量机在产品质量控制尤其是过程控制方面发挥着越来越重要的作用，要求测量机能够具有良好的速度和效率以适应现代化大生产对于效率

的要求。

目前，HEXAGON 计量集团的 GLOBAL 系列测量机，测量机的空间运行速度达到了 $866mm/s$ ，空间运行加速度达到了 $4330mm/s^2$ （GLOBAL IMAGE 测量机）。高速度和高加速度提高了工作效率，但也增大了惯性力，因此要求测量机有更高的刚性。

2.3. 高可靠性

良好的可靠性是高品质产品的关键。测量机的可靠性方面，HEXAGON 计量集团提出了平均无故障运行时间 MTBF (Mean Time Between Failure) 这一指标，例如 GLOBAL 系列测量机，其平均无故障运行时间达到了 10000 小时；另外一个指标就是测量机的可维护性，目前定义了平均修复时间 MTTR (Mean Time To Repair) 这一指标，例如 GLOBAL 系列测量机在完成故障诊断的平均修复时间为 7 小时。

为更好地提高产品可靠性和设计成功率，许多测量机制造厂商在设计过程中进行了失败模式和影响分析，从而在设计环节尽可能多地避免可能产生的失误。涉及的工作包括：

- 思考设计中可能出现的错误
 - 有关领域的分析
 - 列出潜在的失败模式，并根据其对用户的影响分类
 - 建立矫正行动的优先顺序
- 同时，还对生产过程中的失败模式和影响进行分析。涉及的内容包括：
- 思考生产过程中可能出现的错误
 - 识别潜在的过程错误模式
 - 评定失败对用户的影响
 - 建立矫正行动的优先顺序

同时，为了保证设备的安全性在测量机气路、电气上都作了安全的逻辑设计，并设置了安全开关和禁区，以防止意外的发生。右图所示为 PMM-C 测量机上所具有的 Z 轴碰撞保护、测头碰撞保护以及紧急停感应条等措施。

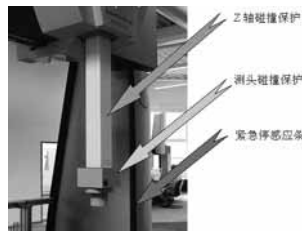


图 2.12 保护装置

2.4. 高性能价格比

良好的性能价格比是任何测量机用户在选购过程中的首选目标，同时也是测量机制造厂商所努力的方向。HEXAGON 计量集团在其产品开发和制造过程中就充分考虑了这一点，并采取多种措施和方法，力求为客户提供具有最优性价比的测量产品。现以其主打产品 GLOBAL 测量机为例：

— 提高性能的同时降低成本。在 GLOBAL 测量机开始研发之初，就确立了以“低价格加之以增强的功能，以提高整机的性能”这一定位，力图使得 GLOBAL 从“辅助设备”变成真正的“过程控制”工具。

— 模块化的设计理念，基于一种设计思想，囊括全部应用。GLOBAL 在设计过程中，充分考虑了机器和控制系统的模块化、组件化，使得共有部件具有相互兼容性，方便了后续的服务，从而最大程度地降低成本。下图为 GLOBAL 系列测量机，目前共有 7 大系列，尺寸范围从最小的 500x500x500 mm 一直到 2000x4000x1500 mm，从而可满足现代制造企业 80% 工件的检测需要。

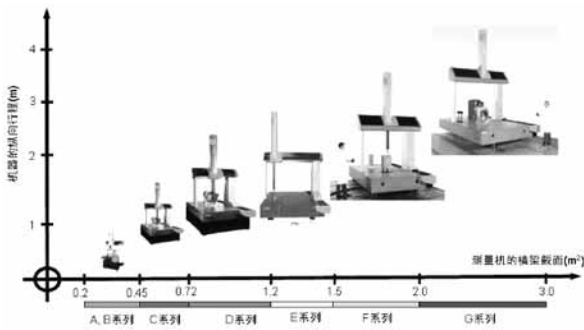


图 2.13 GLOBAL 测量机的系列化设计

— 良好的可升级特性。GLOBAL 测量机在设计上考虑到了不同档次客户的应用需要，在性能、精度、测头、软件等方面具备良好的升级，从而为不同形状的工件和各类检测任务提供了完美的检测方案，使得用户能够根据其具体测量应用选择合适的配置，从而达到成本和性能的最优。

— 全球化采购，使得成本最低。通过全球化采购，使得 GLOBAL 在一定生产量的基础上，获取最高品质和最低价格的零备件，从而降低了整机的成本。

— 本地化生产，加快了产品的交货速度，并降低了成本。在中国，HEXAGON 计量集团已经建立了一个世界级的测量机设计制造基地，采用一

流的设施和完善的系统管理，使得中国用户能够以优惠的价格获得世界品质的测量机产品。

2.5 适合于车间环境

对于测量设备而言，在特定的温度条件下能够获得最佳的检测结果，理想状态下为 20℃，但在工业环境下不可能满足这种条件。尤其是随着现代化生产节奏的加快，测量机在很多情况下应用在生产现场，对生产过程实时监控。因此，适应标准计量室之外的环境，能够克服由于温度、灰尘等生产现场环境对测量机尤其是测量精度的影响是摆在测量机制造商面前的一个课题。在这种情况下各种温度补偿技术的应用，在机器结构和材料使用上采用的一些重要技术，在某种程度上能够使得测量机以较高的精度适应复杂苛刻环境对于测量性能的影响。如为大家所熟知的线性和结构温度补偿系统（ACTIV）。同时，意大利 DEA 公司还最新推出了“CLIMA”技术——基于一个由 11 个传感器（每轴光栅尺两个、花岗石平台 4 个、工件 1 个）所组成的网络进行温度补偿的新技术，通过识别温度的变化，利用机械结构的数学模型而对测量结果进行补偿。从而不仅考虑了材料的自然线性变化，同时还考虑到几何结构的变化。由于采用了 CLIMA 技术，GLOBAL 系列测量机能够在 16℃ – 26℃ 的宽温度范围内保持高精度工作。



图 2.14 宽温度工作范围的测量机

另外一种典型的适合车间环境使用的测量机是来自美国 Brown & Sharpe 公司的 ONE 型测量机，采用 18 项独有技术，真正实现了靠近加工设备放置，可使用在车间需要的任何地方。



图 2.15 ONE 型测量机

同时，对于要求具有超大行程范围、超高精度和适合车间环境下的高稳定性等高端要求，德国LEITZ公司推出了 PMM-F 这种新机型，能够在 $15 - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度变化条件下，实现在 $3000 \times 2000 \times 1000\text{ mm}$ 行程范围内，具有 $1.9 + L/400\text{ }\mu\text{m}$ 的空间长度测量精度。



图 2.16 PMM-F 测量机

从以上三个新产品，我们不难看出，适合车间环境要求的测量产品，正成为三坐标测量机领域的新趋势。

3. 整体结构形式的考虑和选择

在设计和选型过程中，整体结构形式的选择是首先碰到的问题。

移动桥式：开敞性好，承载能力好，结构刚性好是中小型测量机的主流机型，占中小型测量机总量的 70%~80%。

固定桥式：结构稳定，是高精度测量机的首选型式。



图 2.17 固定桥式形成封闭框架

龙门式测量机(高架桥式测量机)：由于其刚性较水平臂测量机要好得多，对大尺寸工件的测量而言具有足够的精度，是大尺寸工件高精度测量的首选。

水平臂式测量机：由于汽车工业测量高度较高（2 米左右），水平方向要伸入车内测内饰件，有时还要两台甚至三台配合使用，在这个领域内水平臂测量机得到广泛使用。

大型测量机，为汽车身板金件、飞机部件、大型压模模具等工件提供了高精密检测方法



图 2.18 汽车工业常用的测量机

4. 温度问题的考虑

4.1. 如何解决测量机外部的热源

减少外部热源的影响是首要考虑的因素，应避免日光直接照射，不要用白帜灯而用冷光灯，不要过多的人的聚集，因为人群形成的温度场对精度的影响也很大。

对热源的隔离，具有较好的恒温间是首选，但亦是较贵的解决方案，另外一种方法就是测量机自带的恒温小室或在外罩内有恒温气流流动。

关于温度场的变化,这里特别要指出，影响最坏的不一定是高频变化的温度场，而是一日两个周期的温度变化，这相当于白天开空调，晚上关空调的情况。

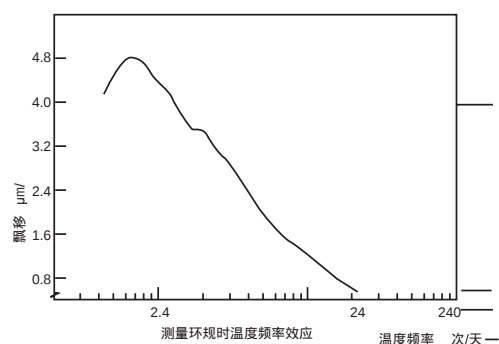


图 2.19 校验环规的误差与温度变化频率的关系

4.2. 内部热源的解决

为了解决测量机内部热源对测量机的影响，

常常动用红外线的热探测仪，来发现测量机的内部热源，研究发现电机及其传动装置是测量机的主要热源。

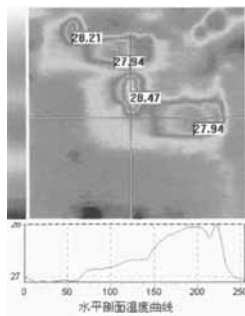


图 2.20 用红外线热探测仪测量结果，右下方电机，左上方减速器为温度较高的热点

因此，GLOBAL 测量机重要改进之一就是把固定的柔性齿型带改型为回转的齿型带，目的是把电机从主腿上移到底座之外，因而改善了导轨受热状况，减小了导轨变形。

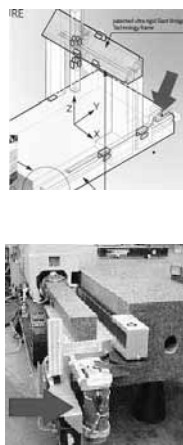


图 2.21 GLOBAL 把电机移到底座外面

4.3. 结构上减少热变形的方

结构弯曲及扭转的变形对精度的影响要大于伸长缩短的影响，因为线性的伸长缩短较容易用软件补偿，因此尽量减少温度梯度的影响，采用导热系数高的材料，不要形成大的温度梯度，而截面形状尽量对称以减少弯曲的影响，加筋的三角形梁有很大的抗扭矩，能够较好地减少在温度变化条件下的变形。

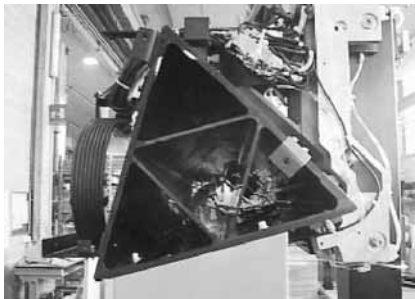


图 2.22 GLOBAL 测量机完全对称约三角形梁设计，大大减小了受热后的扭曲变形

4.4. 自由膨胀的光栅尺安装

工业上大部分被测零件为钢制零件，为了减小由于膨胀系数不同而造成在不同温度情况下的不同示值误差（在没有足够的温度补偿情况下），光栅尺应选用与钢相近的材料，同时，在 GLOBAL 上采用了与基体只有一点固定的光栅尺固定新方法，可保证光栅尺能够随温度变化自由膨胀，一方面避免了由于固定胶的温度膨胀系数不一致而造成的影响，同时能够更好地实现补偿。



图 2.23 单端固定并安在导轨内的钢带式光栅

4.5. 有限元分析，预测受力变形及温度变形

进行有限元分析，因而在设计时就避免了可能的变形。



图 2.24 测量机桥架的有限元分析

4.6. 软件温度补偿

为了适合于车间温度环境，克服温度变化所引起的变形，在大多数测量机上装有温度传感器，进行线性/实时温度补偿，较好的测量机上已应用了实时结构温度补偿技术（如 ACTIV 技术）。

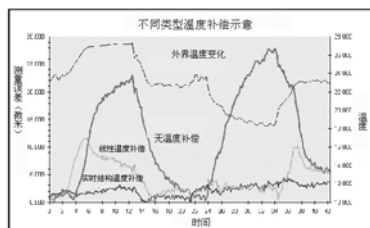


图 2.25 实时结构温度补偿技术（ACTIV 技术）

为了强调材料的重要性，下面对材料单列一节进行讲述。

5. 测量机的材料

5.1. 对测量机材料的总体要求

测量机在具有良好的高精度同时，需要根据被测工件形状和大小，选择不同的测量机结构形式，测量机要能够在环境变化的情况下、在运动状态下、在长期工作情况下保持稳定的精度和性能，这就要求构成测量机各部件的材料具有良好的性能，由于没有一种材料能全部满足这些要求，就需要进行合理的结构设计。

对材料的这些要求有：

导热性要好，以免外界有温度变化（随时间及随空间变化）时形成构件内部的温度梯度，引起变形（主要是扭转和弯曲）；

热膨胀系数要小，以免温度变化引起过大的伸长缩短；

要具有比较大的弹性模量（刚性），以免受力后有较大的变形；

高的硬度及耐磨性，保证不易划伤、磨损；

较高的强度不易断裂；

运动部分的材料要求密度小，以减小由于测量机的高速、高加速运动而产生的测量机惯性力，

它对精度的影响日渐重要；

考虑材料吸水率小，以免受潮变形（较差的花岗石的吸水性能，足以引起微米级的变形）；

工艺性好，易于加工；

成本要低。

5.2. 测量机固定部分的材料

对测量机的固定部分要求刚性好，受温度湿度影响的变形小（希望结构的变形只是线性，以便于软件补偿）、结构简单、成本低。

中小型桥式测量机的固定部分，特别是工作台大部件一般采用花岗石、钢或铸铁，较小的部件采用铝合金材料（电机支架，传动支架）；有时为了增加刚性采用整体结构（例如花岗石台面与导轨）。

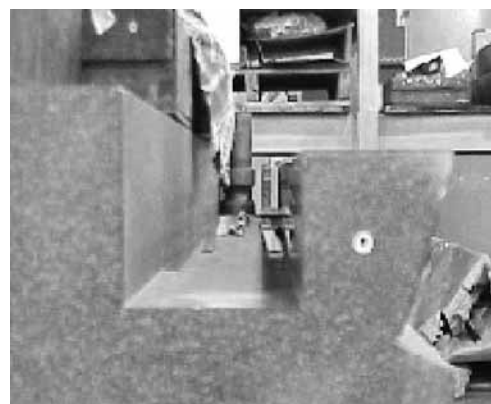


图 2.26 花岗石整体结构的导轨及台面

大型龙门式测量机、水平臂测量机的固定部分，大部分采用用钢、铸铁或花岗石。

5.3. 测量机运动部分的材料

希望移动部分质量轻，以便在高速、高加速运动时产生较小的惯性力、较小的变形，特别对于扫描测量，结构动态变形引起的误差非常重要。

由于对材料的特性要求有多种，例如热膨胀系数和导热性、质量要轻等等，目前没有一种材料能够完全满足所有的要求，但由于计算机软件补偿技术的发展，使得领先的测量机制造商已经将更多的注意力集中到铝合金和陶瓷等新型材料上，目前在测量机的运动部分主要应用铝合金及陶瓷材料，这两类材料，各有各的优势分别应用于不同场合。

铝合金：由于其导热系数高而适用于温度梯度和温度变化较大的环境中，通过硬质阳极化使铝表面生成铝陶瓷（ Al_2O_3 ），具有很高的硬度，因而耐磨；通过对硬质铝合金的合理的结构设计，使其变形主要限于伸长缩短，避免产生弯曲或扭转，再利用软件的温度补偿来减少温度变化对测量机精度的影响。

铝材料由于自身重量轻，从而使其成为桥式结构测量机运动部件材料的理想选择。例如著名的 GLOBAL 测量机就大量利用硬质铝合金作为运动部分的材料。

陶瓷及其复合材料：热膨胀系数小，硬度高，利用烧结工艺可以做成薄壁件，重量较轻，但材料自身较昂贵，比铝材料比重大，成型后较难加工，大部分用于温度梯度变化不大的工作环境中，例如德国 LEITZ 公司的 PMM-C 固定桥式测量机就利用陶瓷材料作为其 Z 轴。



德国 LEITZ 公司的 PMM-C 固定桥式测量机采用陶瓷 Z 轴

下述表格是关于不同材料导热率、热膨胀系数和弯曲变形量等数据的比较，从中我们可以了解到铝合金较钢、陶瓷和花岗石的导热率要高 2 到 40 倍，同时研究数据表明，铝导轨对受热弯曲有最佳的抵抗力，弯曲变形是花岗石的 1/10，是陶瓷的 1/6，是钢的 1/18。

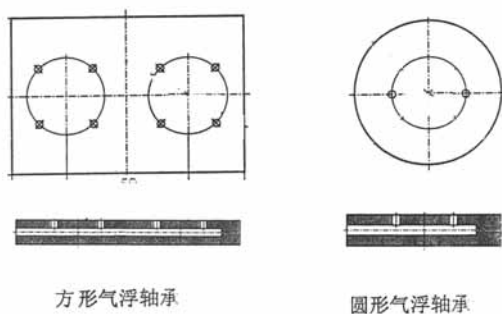
	花岗 岩	陶 瓷	铝合金		钢
			实心	空心结 构	
导 热 率 λ	1	10	40	40	20
横 截 面 t/L	1	0.2	1	0.4	0.067
横 截 面 热 阻 及 温 度 梯 度 T	1	0.5	0.025	0.0625	0.75
热 膨 胀 系 数 α	1	1.2	4.0	4.0	2.4
弯 曲 变 形 量 B	100%	60%	<10%	25%	180%

6. 测量机的导轨及轴承

测量机的导轨是保证机器平稳、高精度运动的关键，目前主要采用用气浮导轨及直线滚珠导轨两种形式。

6.1. 气浮导轨

气浮导轨的核心是气浮轴承,利用气浮轴承小孔节流形成气腔内的高压，在导轨和气浮轴承间形成具有一定承载能力和刚性的薄膜，气浮导轨具有无磨擦及无磨损的特性，由于匀差效应，运动的局部直线度及角度摆动较小，精度较高的测量机一般采用气浮导轨。



方形气浮轴承

圆形气浮轴承

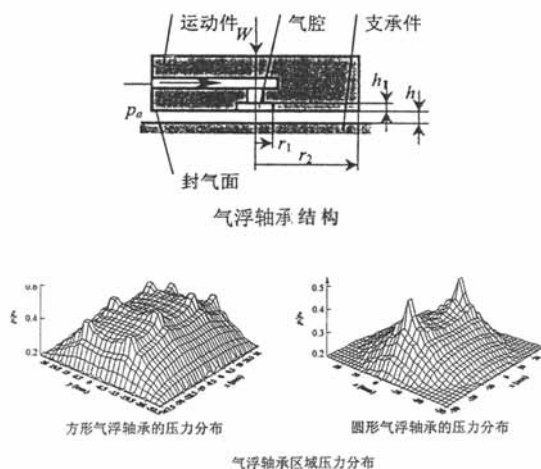


图 2.27 空气轴承结构示意及压力分布

气浮轴承的性能有四个要求：即承载能力，承载刚性（气浮间隙每变化一微米承载能力的变化），耗气量，抗气振能力；其它的要求还包括防锈性能、安装的工艺性，支承等的载荷设计亦不能忽略，对超高精度测量机，气浮间隙及气腔压力的稳定至关重要，超高精度测量机往往设置气浮轴承压力检查引出孔。

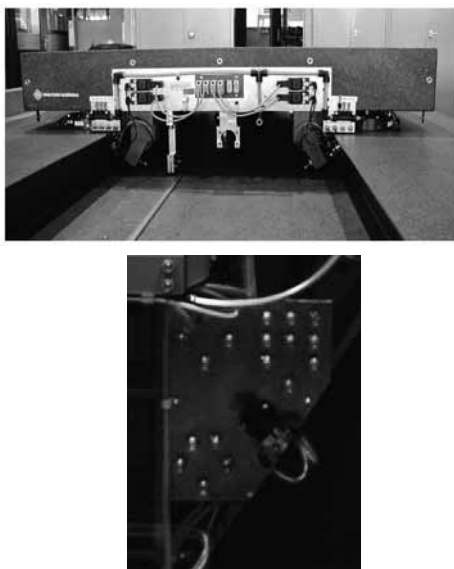


图 2.28 PMM-C 气浮导轨及轴承压力检查点

6.2. 直线滚珠导轨

采用直线滚珠导轨的优点是省去全套压缩空气设备及气动控制组件，成本较低，适于无气源的环境，它刚性较好，承载能力强，比简单的滚珠轴承，受个别滚珠疵瑕的影响要小，有一定的匀差效应，但由于钢球及导轨原因，该结构的测量机精度稍低，摩擦力较大，因而控制性能亦与气浮导轨特性不同，它的安装、调整找正对整机的性能的影响亦较大。

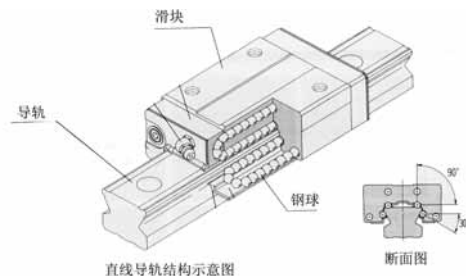


图 2.29 直线滚珠导轨

7. 传动机构

传动部分要使运动稳定、无抖动、寿命长、刚性好；传动部分，特别是电机和减速器，是测量机的主要内部热源，应远离测量机导轨部分，以免导致导轨变形，影响精度。由于工业生产节奏加快，测量机运动的速度、加速度不断提高（目前 GLOBAL 测量机的空间运行速度已达到 866 mm/s，加速度达到 4330 mm/s²），摩擦传动已基本不能满足要求，它们可能在高速启动或停车时产生振荡，目前在主传动中，大部分采用啮合传动，如同步带、滚珠丝杠用于中小型机传动，齿轮齿条用于大型机的传动。

例如 GLOBAL 测量机全部采用同步带传动，PMM-C 测量机由于速度、加速度的提高，也把摩擦传动改为精密滚珠丝杠传动；而 LEITZ 的 PMM-CANTRY 测量机及 DEA 的大型测量机普遍用齿轮齿条传动。

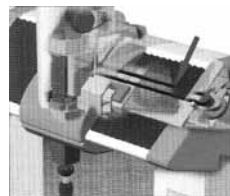


图 2.30 Global 的同步带传动



图 2.31 PMM-C的滚珠丝杠传动

测量机的高加速度运行，使运动各部件产生很大惯性力，如果结构刚性不好，会产生较大结构变形，特别是扫描测量，误差更大（详见测头部分），因此对于传动性能的研究始终是一个重要课题，关于动态性能的评定也成为测量机制造商所需要考虑的重要指标。

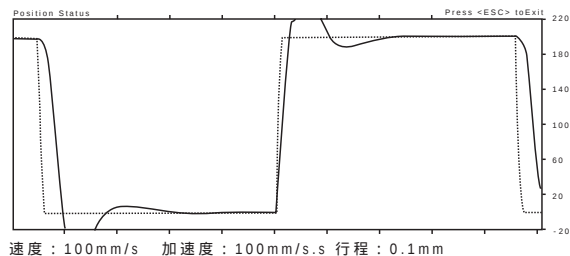


图 2.32 较好的动态性能

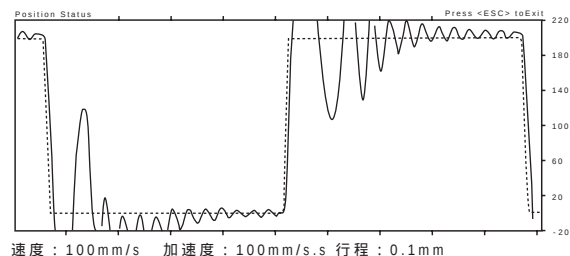


图 2.33 较差的动态性能，到位后振荡

8. 测量机的平衡机构

垂直轴测量机的 Z 轴或水平臂测量机的水平臂及头架组件，由于重力作用会下掉，必须有机构加以平衡，使它处于随遇平衡状态。

目前最常用的平衡机构有三种，一种为重锤平衡，另一种为气动平衡，还有一种是依靠电机用高减速比的减速器来平衡。

8.1. 重锤平衡的优缺点

优点是构造简单、安全，其原理类似定滑轮机构，一端为主轴，一端为平衡重量，构造可靠，除非连接钢丝绳断裂，一般不会出安全问题。

缺点是：加大了移动部分重量，当配重上升下降到不同位置时，会影响到测量机性能，特别是配重与导轨的间隙，影响运动的平稳性，因而影响精度。

8.2. 气动平衡的优缺点

气动平衡的优点是重量轻，没有大的晃动，对测量机精度影响小。

缺点是必须细致地设计气动平衡及保护机构，平衡机构必须灵敏，在各种状态下迅速保持平衡，由于高加速度，启动和停止时气缸中气压瞬时过压和欠压都会引起振动，因此必须用高灵敏度的精密调压阀。

平衡机构的保护机构必须保证在任何情况下，主轴不会下坠，特别是突然通气和断气的时候要防止 Z 轴或水平臂的坠落，这一般由气动器件组成的逻辑气路及单向阀等保护气路组成，甚至用电磁制动器来完成。

为了 Z 轴安全工作，不会意外掉下，气路系统必须满足下述逻辑：

开气→平衡气缸通气，Z 向空气轴承仍抱紧 Z 轴→空气压力超过平衡压力并有一定安全值，Z 向空气轴承放开 Z 轴，Z 轴在平衡压力值保持平衡。

关气或意外断气→压力下降到安全值，Z 向空气轴承抱紧 Z 轴→气缸在平衡压力值仍保持平衡→压力下降到平衡压力以下甚至到零，Z 向空气轴承抱紧 Z 轴，Z 轴靠该摩擦力保持平衡。

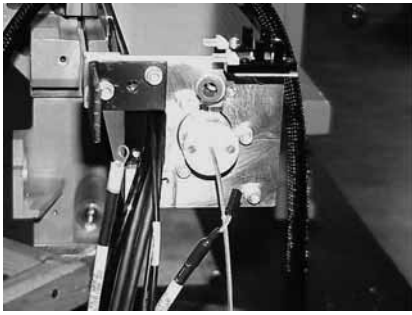


图 2.34 Global 测量机的 Z 轴平衡气缸

要防止气缸杆与 Z 轴导轨不平行对 Z 轴运动的干涉。

8.3. 高减速比的减速器来平衡

直接利用 Z 轴的重量来控制它的运动，既克服气动平衡时启动和煞车中的冲击又避免了重锤平衡的附加重量，但电机功率要加大，减速比要加大，必要时加煞车装置。



图 2.35 PMM-C 测量机的 Z 轴的电机 - 减速器平衡

9. 光栅尺

光栅尺是测量机的长度基准，本身的精度要好，热膨胀系数的不确定度要小，并且要抗污染抗划伤，以便于在生产环境下使用。

新型抗污染、抗划伤的光栅，AURODUR 光栅，适应了生产车间环境，下面我们作一个对比：

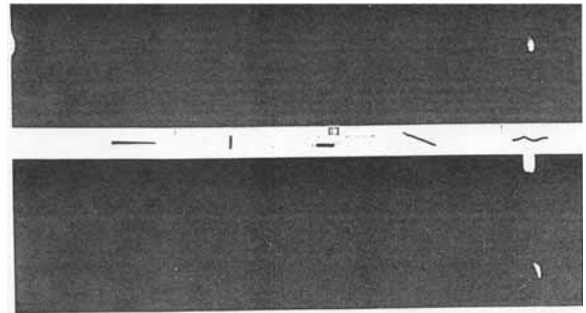


图 2.36 光栅表面上，划伤占了横截面一半

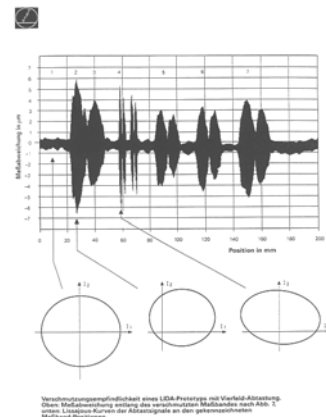


图 2.37 老式光栅划伤后的李沙育图形

老式光栅的表面略有划伤就不能正常工作，明显的在划伤处变成椭圆，且波形有干扰。

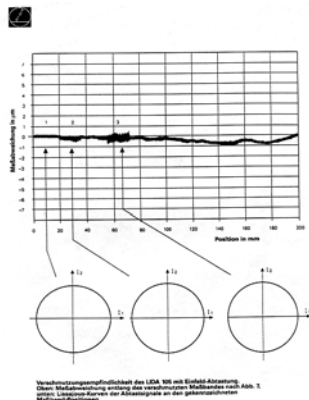


图 2.38 新型抗划伤光栅的李沙育图形

新式光栅的表面有划伤仍能正常工作，在划伤处保持为圆形，波形干扰小。

抗划伤原理：

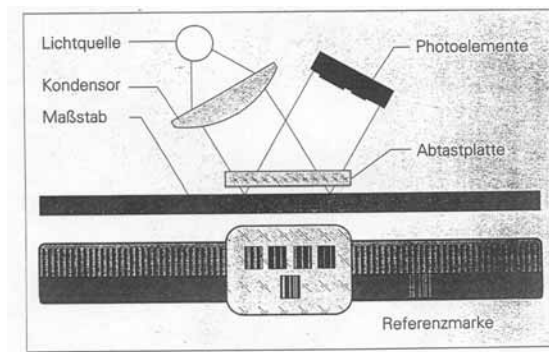


图 2.39 老式光栅

老式光栅四个光电池取光栅四个区域，所以光栅任一部分划伤，对信号影响很大；

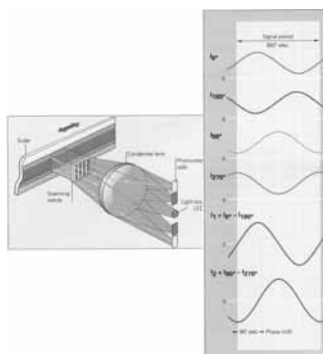


图 2.40 新型抗划伤光栅

新型抗划伤光栅四个光电池同取一个区域，划伤信号在四个光电池上互相补偿，所以受划伤影响小。

第三章、控制系统

控制系统是三坐标测量机的三大组成部分之一。其主要功能是：读取空间坐标值，对测头信号进行实时响应与处理，控制机械系统实现测量所必需的运动，实时监测坐标测量机的状态以保证整个系统的安全性及可靠性，有的还包括对坐标测量机进行几何误差与温度误差补偿以提高测量机的测量精度。

1. 控制系统分类

从控制系统的角度划分，三坐标测量机可分为手动型、机动型及 CNC 数控型三种模式。早期的坐标测量机以手动型和机动型为主，当时的控制系统主要完成空间坐标值的监控与实时采样。随着计算机技术及数控技术的发展，CNC (Computer Numerical Control) 型控制系统变得日益普及，高精度、高速度、智能化成为三坐标测量机控制系统发展的主要趋势。

1.1. 手动控制系统

手动控制系统主要包括坐标测量系统、测头系统、状态监测系统等。

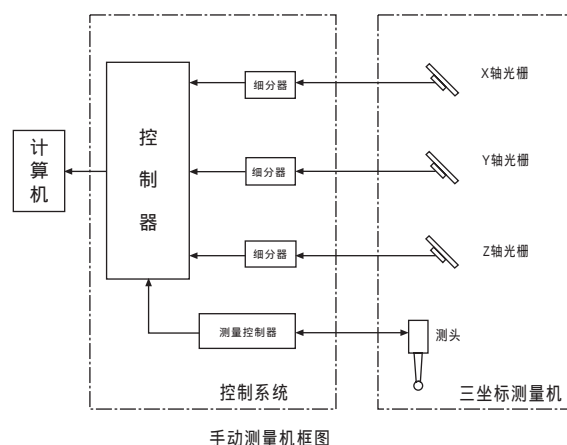


图 3.1 手动控制系统框图

坐标测量系统是将 X、Y、Z 三个方向的光栅信号经过处理后，送入计数器，CPU 读取计数器中的脉冲数，计算出相应的空间位移量。

测头系统的作用：当手动移动测头去接触工件，测头发出的信号用作计数器的锁存信号和 CPU 的中断信号；锁存信号将 X、Y、Z 三轴的当前光栅数值记录下来，CPU 在执行中断服务程序时，读取计数器中的锁存值，这样就完成了一个坐标点的采集。计算机通过这些坐标点数据分析计算出工件的形状误差和位置误差。

随着半导体技术与计算机技术的发展，可将光栅信号接口单元、测头控制单元、状态监测单元等集成在一块 PCI 或 ISA 总线卡上，直接插入计算机中，使得系统可靠性提高，成本降低，便于维护，易于开发。

手动三坐标测量机结构简单、成本低，适合于对精度和效率要求不是太高、而要求低价格的用户。

1.2. 机动控制系统

与手动型控制系统比较，机动型控制系统增加了电机、驱动器和操纵盒。测头的移动不再需要手动，而是用操纵盒通过电机来驱动。电机运转的速度和方向都通过操纵盒上手操杆偏摆的角度和方向来控制。

机动型控制系统主要是减轻了操作人员的体力劳动强度，是一种过渡机型，随着 CNC 系统成本的降低，机动型测量机目前采用得很少。

1.3. CNC控制系统

用 CNC 系统的测量过程是由计算机控制的，它不仅可以实现自动测量、自学习测量、扫描测量，也可通过操纵杆进行机动测量。

数控系统以控制器为核心，数控型三坐标测量机除了在 X、Y、Z 三个方向装有三根光栅尺及电机、传动等装置外，具有了以控制器和光栅组成的位置环；控制器不断地将计算机给出的理论位置与光栅反馈回来的实测位置进行比较，通过 PID 参数的控制，随时调整输出的驱动信号，努力使测量机的实际位置与计算机要求的理论位置保持一致。

由于实现了自动测量，大大地提高了工作效率，特别适合于生产线和批量零件的检测。由于

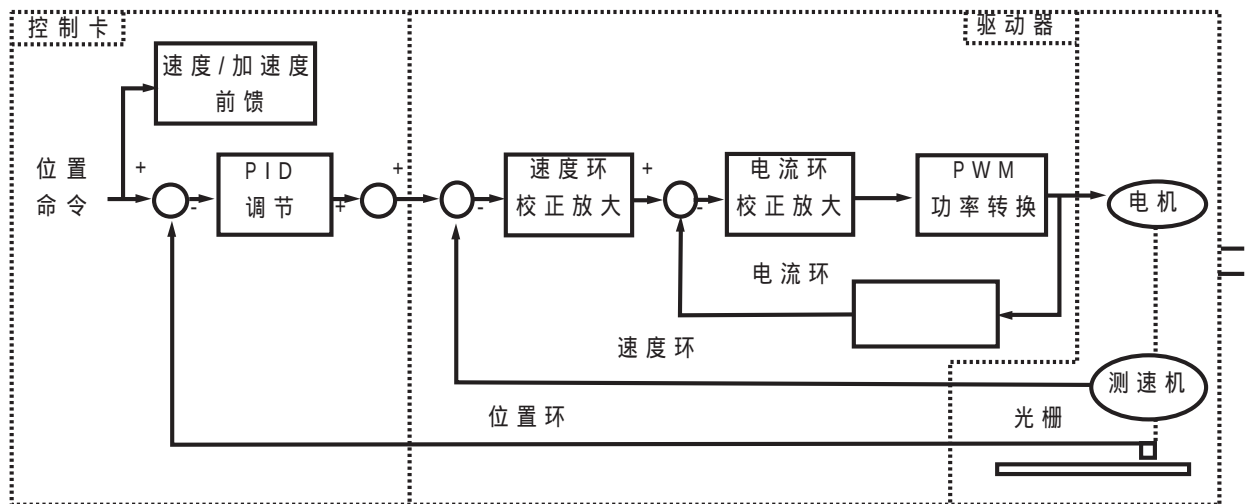


图 3.2 CNC 控制系统原理图

排除了人为因素，可以保证每次都以同样的速度和法矢方向进行触测，从而使测量精度得到很大的提高。

从原理图中可以清楚地看出数控系统的工作原理。它不但具有 PID 调节功能，还具有速度、加速度前馈控制，并具有三个控制环，即：电流环、速度环及位置环。

1.3.1. 电流环

在驱动器内部闭环，将驱动器的输出信号反馈到电流放大单元的前面，以稳定驱动器的输出电流。它的作用是减少电源电压波动的影响，提高控制力矩的线性度，以使系统恒流起动、制动，同时防止功率转换电路及电机过电流。

1.3.2. 速度环

由驱动器、电机及测速元件组成闭环。将测速元件输出的电压反馈到速度放大单元，以稳定驱动器的输出电压。速度环的作用是稳定电机的转速，提高系统的刚性，改善系统阻尼，减少非线性度。测速元件可以有多种，如：直流测速发电机、光电式编码器等。

1.3.3. 位置环

由光栅与控制器组成闭环。将光栅所测得的位置数据反馈到控制器，控制器将计算机给出的理论位置与光栅反馈回来的实际位置进行比较，如果两个数值不相等，将利用 PID 调节和速度、加速度前馈控制，调整输出给驱动器的驱动信号幅值，通过驱动器控制测量机的运行状态，以减少机器运行过程中的跟随误差和到位误差，直至实际位置等于理论位置。

1.3.4. PID 调节

PID 调节即比例（Proportional）、积分（Integral）、微分（Defferential）调节。

P 参数：此参数决定了系统对位置误差的整个响应过程。比例增益低，系统很稳定（无振荡），但刚性差，到位误差大；比例增益高，刚性好，到位误差小，但系统可能产生振荡。

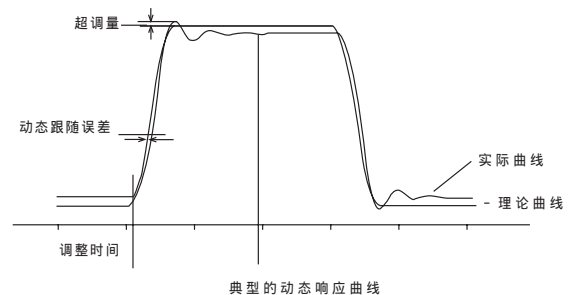


图 3.3 测量机典型的动态曲线（速度-时间）

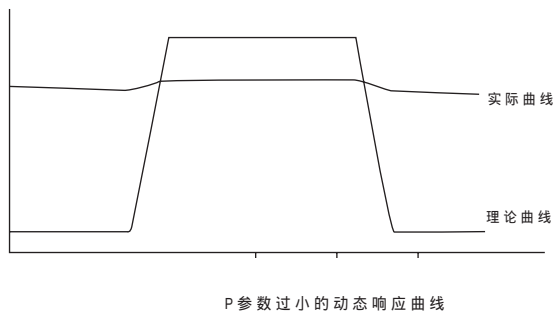
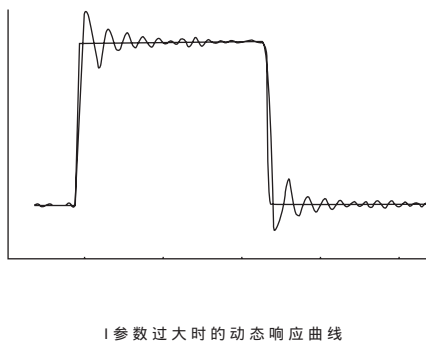


图 3.4 P 参数的影响

I 参数：积分增益是通过增大输出电压使控制系统克服由摩擦力和负载引起的静态到位误差。积分增益很小或为零，可能会有静态到位误差，这个误差取决于静态或摩擦负载及比例增益的大小；增大积分增益可以减小到位误差，但若积分增益太大系统可能在理论位置上下振荡（低频振荡）。



I 参数合适的动态响应曲线

图 3.5 I 参数的影响

D 参数：此参数通过阻止误差变化过冲给系统提供阻尼和稳定性。微分增益低，使系统对位置误差响应快，但位置改变后，可能会产生过冲；微分增益过高，系统响应较慢，此时可以允许比例增益较高而不振荡，但电机可能嗡叫。

速度前馈（Velocity FF）：由于系统的速度增加而跟随误差逐渐增大，需要提高输出电压。在高速运行时，速度前馈参数通过增大控制器输出电压来减小跟随误差；如果速度前馈参数太大，电机运动将超前理论位置。

加速度前馈（Acceleration F/F）：加速度前馈用于控制扭矩模式的伺服电机。与轻负载系统相比，高惯性负载系统需要大电流来控制电机的加速或减速。加速度前馈参数在加速度和减速度阶段，使控制器增加电机的控制信号。

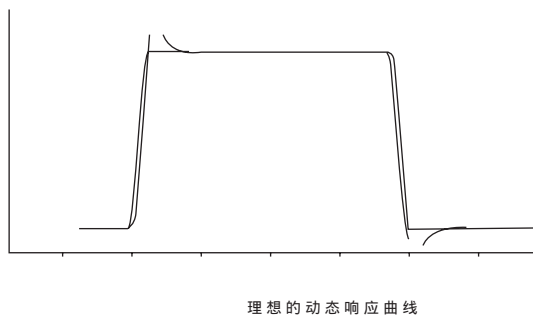


图 3.6 理想的动态曲线

2. CNC 数控系统的组成

从数控三坐标测量机的框图上可以看出，数控系统主要是由控制器、驱动器、细分器、光栅、测头、电机几部分组成。

2.1. 控制器

控制器由控制卡与控制软件组成，是整个数控系统的核心。现代先进的控制卡大多采用 DSP（Digital Signal Processor，即数字信号处理器）代替以前的 CPU，DSP 所具有的高速运算功能，使得控制周期缩短，大大提高了系统的轨迹控制能力，测量机动作更快，测量效率更高。

控制软件是控制系统的一个重要组成部分，软件结构与控制卡的硬件结构及功能密切相关：

2.1.1. 精确、实时地读取空间坐标值

控制软件要对空间坐标值定时读取，以实现测量机的状态监测和位置控制；另一方面，当测头系统发出采样信号后，要实时地将当前空间坐标值读取，作为测量软件的输入数据。

2.1.2. 运动轨迹的控制

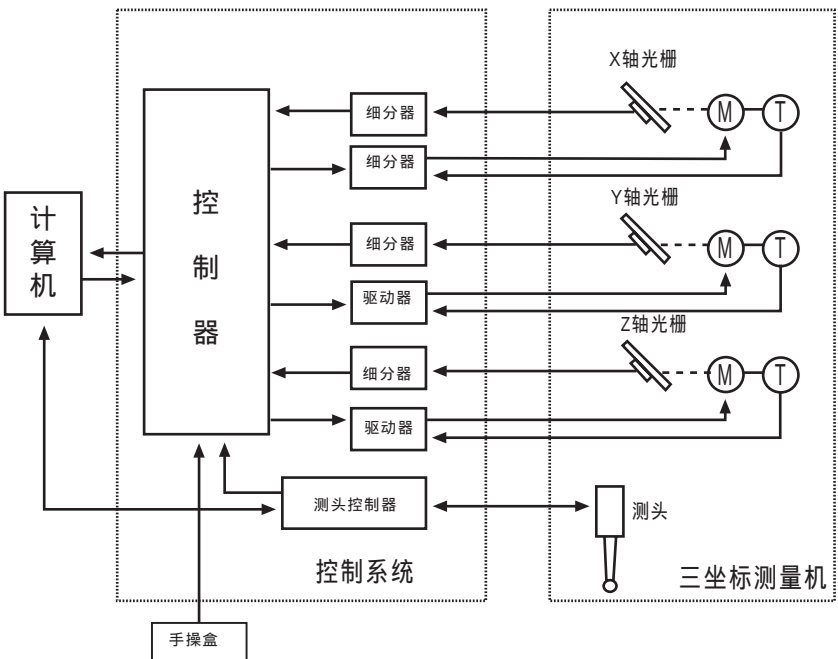
控制软件将空间坐标值读取后，与测量软件给出的理论位置进行比较，得到位置偏差，并通过计算可得到速度值，用软件实现数字 PID 调节后，作为位置控制信号输出给驱动器。测量机每个轴的运动都有一套驱动器，三轴联动的实现是按一定的算法控制的。直线和圆弧是构成空间曲线的基本要素，因此大多数 CNC 系统都具有直线和圆弧插补功能。在规划运动轨迹时，首先给出直线的起点和终点，圆弧的圆心及半径等，然后插补算出中间点的坐标值，以保证测头按设定的空间轨迹运行。插补的运算速度和计算精度直接影响 CNC 系统轨迹控制的能力。

2.1.3. 状态监控

为确保测量机的安全运行及测量数据的可靠，还要对测量机的运行状态进行实时监测，对故障进行自诊断处理。如坐标轴移动到行程极限、运动速度超速、光栅幅值过高或过低、跟随误差过大、到位误差过大、气压过低、测头触测或误撞、环境温度等，对系统进行相应的处理。

2.1.4. 测头系统的管理

为了保证测量的精度和效率，测量机的速度



CNC（自动）型测量机框图

图 3.7 CNC 控制系统框图

分为运行速度和测量速度。软件控制测头以高速（100~800 mm/s）运行到工件表面，再转换为测量速度和法矢方向接触工件，当测头发出采样信号后，除要实时读取空间坐标值外，还要控制三轴电机停止运动，并使测头按原路径和设定的速度回退一个安全距离。

2.1.5. 参数的管理与初始化

数控系统有很多参数，如：PID 参数、机器行程参数、机器速度与加速度、光栅的分辨率、到位窗口的设置、跟随极限的设置、测头与测座的型号等，这些参数允许用户修改，并在初始化时设置为默认值。

2.1.6. 通讯功能

与测量软件进行通讯，接收测量软件所发出的命令并进行解释，并将控制系统的状态与数据回送给测量软件。有的控制系统还与测头控制器通讯，管理测头的更换和测座的旋转等。现在的手操盒多是由单片机管理的，也是通过 RS232 等方式与控制器通讯来传送指令。

2.2. 光栅尺

坐标测量机的长度基准有多种：光栅、感应同步器以及激光干涉仪等。现在三坐标测量机上应用最广泛的是光栅。

光栅尺主要有金属的和玻璃的几种，它在 1mm 的间距内刻有高达 10~100 条刻线，每条刻线间的距离（即栅距）为 10~100 μm 。（根据所选

用的光栅尺的型号不同而定）

2.3. 细分器

光栅读数头输出四路模拟信号： $+\sin$ 、 $-\sin$ 、 $+\cos$ 、 $-\cos$ ，它的一个周期对应光栅的一个栅距。由于光栅的栅距一般为 10~100 μm ，这样的坐标分辨率显然不能满足测量机的要求，因此应对此信号进行细分处理。细分器根据其工作原理的不同，可分为硬细分和软细分两种。

硬细分主要是将移相电阻链与数字逻辑电路相结合，得到细分脉冲信号。硬细分电路的原理是：先将光栅输出信号放大，经电阻链移相，输出一系列五细分或十细分的正弦信号；再通过幅值比较器输出相位各异的系列方波；经数字逻辑电路的组合，提高细分数，产生含有方向信息的计数脉冲；由于最终的 $A+$ 、 $A-$ 、 $B+$ 、 $B-$ 四路脉冲信号的上升沿都对计数器产生触发，所以又进行了一次计数四细分。这是目前应用广泛、通用性强的一种方法。它的细分倍数一般都是 5 的倍数，常见的细分倍数一般有 20 倍、40 倍、100 倍等几种。

软细分是以 A/D 转换器与 CPU 为核心，它的工作原理是：将光栅读数头输出的四路模拟信号 $+\sin$ 、 $-\sin$ 、 $+\cos$ 、 $-\cos$ 经差动放大器后成为两路正交正弦信号，这两路信号经采样保持器和模拟开关进入 A/D 转换器。当采样控制信号到来时，两路模拟信号由采样保持器同时采样。CPU 控制模拟开关与 A/D 转换器分别对两路信号转换，得到两路信号的幅值，此幅值经软件运算得到正切值，再结合所处的象限，得到光栅信号相位角。再加上累计的整周期数，就可算出空间坐标值。

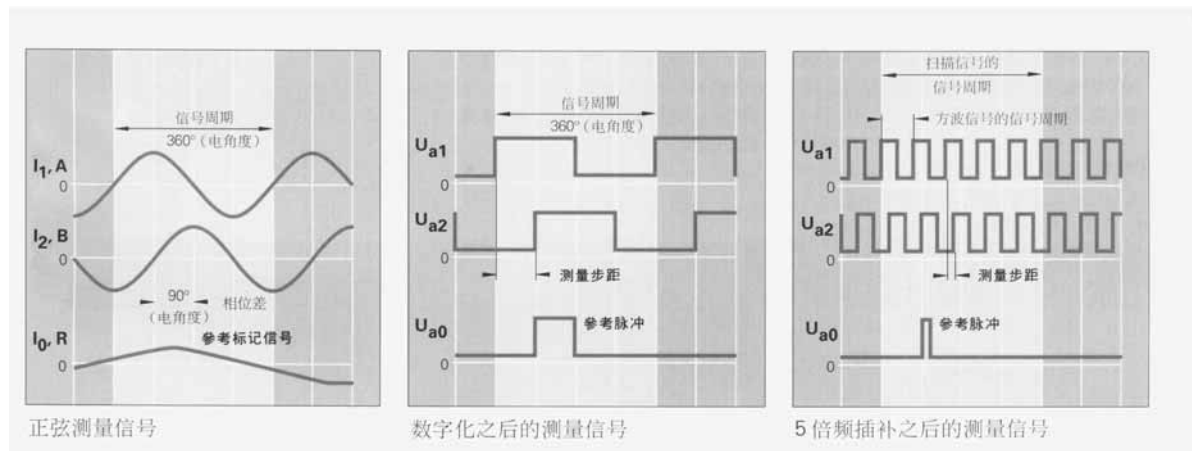


图 3.8 光栅信号的细分

它的细分倍数一般都是 8 的倍数，如 B3C-LC 系统所使用的细分器就是 512 倍的软细分。

2.4. 电机

绝大多数的测量机采用的是直流电机/测速机伺服机组，也有少数采用直线电机、步进电机等。由于三坐标测量机精度高，在测量时又经常高速地正反向切换，若每分钟采集 100 个点，则电机就必须每分钟正反向切换共 200 次，且要求运行平稳。因此，测量机所选用的电机性能要求很高，它要求起动扭矩大，起动电压低，时间响应快。

2.5. 驱动器

驱动器的性能直接影响机器的运行特性。在 80 年代，三坐标测量机上一般采用的是晶体管线性放大驱动系统；进入 90 年代后，PWM（Pulse-Width Modulation）驱动器在高精度伺服控制领域得到了最为广泛的应用。PWM，即脉宽调制系统，是按一个固定的频率来接通和断开直流电源，并根据输入信号的大小改变一个周期内“接通”和“断开”时间的长短，通过改变电机电压的“占空比”来改变平均电压的大小，从而控制电机的转速。它的调速比高、响应速度快、起动性能好。

驱动器不但要具有良好的控制性能，还具有过压、过流、过速、过热等多种保护手段。

2.6. 操纵盒

由手操杆和功能键组成。

操纵杆偏移的方向即是机器运动的方向，偏移的角度控制着机器的运行速度。

功能键一般有急停键、速度控制键、快/慢速转换键、单轴锁定键、电机加电键、虚点记录键、元素确认键、删除键等组成。不同的操纵盒功能键不完全一样。

比较好的操纵盒都以单片机为核心，不但功能键比较丰富，且具有调试和自检功能，对使用和维护提供了极大的方便。



图 3.9 操纵盒

3. 数控系统的结构

数控系统的结构分为上下位机式和集成一体式两种。

3.1. 上下位机式

上位机是标准的 PC 机，WINDOWS 操作系统，安装并运行测量软件（如：PC-DMIS，QUINDOS 等），向下位机发送理论位置、运动及触测指令，下位机回复机器实际位置及触测结果，在上位机内由测量软件进行分析、计算等。

下位机是一块控制卡为核心的简化计算机，DOS 操作系统，控制卡插在下位机内。控制软件安装并运行在下位机内，负责控制机器的运动与状态的监测等。由于下位机采用 DOS 操作系统，保证了控制逻辑的严谨和控制时序的准确，从而提高了控制系统的稳定性与可靠性。由于上下位机严格分开，用户无法对下位机进行操作，避免了病毒的干扰和误操作破坏控制程序等引起的控制混乱等。

上下位机之间通过串口或网卡等方式通讯。

我集团的控制系统 B3C-LC、B3CS、FB11、FBPC、SHARPE32、TUTOR 等都是上下位机式。

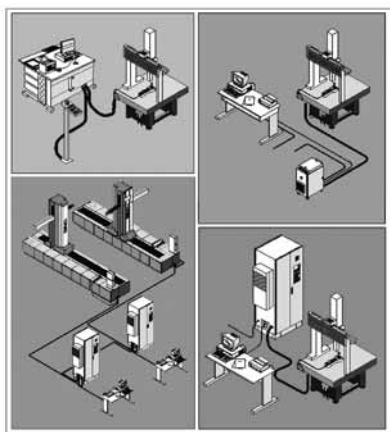
3.2. 集成一体式

上位机采用标准的 PC 机或工业控制机等，WINDOWS 操作系统，控制卡也插在上位机内，上位机不但安装并运行测量软件，也同时安装并运行控制软件，测量软件与控制软件之间通过 DDE 等方式通讯，利用 WINDOWS 的分时控制实现多任务的处理。

对于一体式结构的数控系统，WINDOWS 系统本身的不稳定因素严重影响了其稳定性与可靠性；由于用户可以随意对计算机进行操作，很容易遭到病毒的攻击，并可能因为误操作等破坏控制程序，所有这些都可能造成控制的混乱并引起飞车等严重事故。

4. HEXAGON 计量集团数控系统的功能

HEXAGON 计量集团可提供下列控制系统：B3C-LC、B3CS、B6CS、FBII 等。根据用户所选择的三坐标测量机的功能配备不同的系统。这几种数控系统都采用了先进的 32 位高速运动控制芯片，与上位机的测量软件之间通过串行口或网卡通讯。使用 TESTSOFT 软件和 AUTOTUNE 软件进行自动调试与优化，可保证机器运行在最佳工作状态。



3.4.1. TESTSOFT 调试软件

TESTSOFT 是一功能完善的调试与自检软件，在 TESTSOFT 中，可检查数控系统当前的工作状态与错误信息等，并可修改、调试所有的系统参数。B3C 系列和 FBII 系列控制系统的驱动器和细分器都采用的是电子电位器，可以通过修改参数直接调试驱动器的各电位器；如果机器所采用的光栅是模拟信号的，可实现光栅信号幅值、相位及零位的半自动调试，并可在 TESTSOFT 中完成转台、测头、手腕等附件的调试。

3.4.2. 具有专利技术的 AUTOTUNE 自动调试软件

B3C 系列及 FBII 控制系统运动状态及性能的调整，完全由 AUTOTUNE 自动调试软件实现，不需要对



硬件作任何调整，在调试主机时 AUTOTUNE 软件可以自动生成 PID 参数、自动调整光栅参数及功率驱动器的参数，从而优化了光栅信号和自动调节伺服放大器信号，确保了控制系统工作在最佳的运动状态，实现了测量机整机安装、调试的高效率和高性能。

4.3. HEXAGON 计量集团主要控制系统分类

4.3.1. FB II 系列

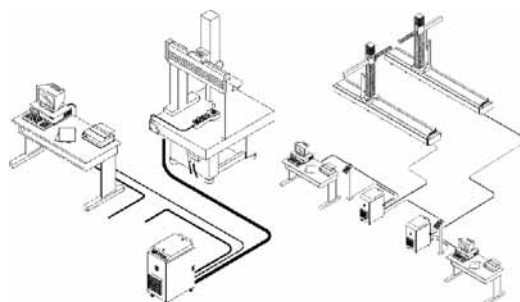
FB II 系列控制系统主要支持单水平臂测量机和小型测量系统。该控制系统支持一系列选项，包括 RENISHAW 的 PHxx 系列旋转测座

综合性能	
轴的最大数量	5 (3个测量机线性轴, RENISHAW 旋转测座的旋转和俯仰轴)
安全标准	机器标准 (89/392/CEE) 安全标准, 电磁兼容性 (89/336/CEE) 低压标准 (73/23/CEE)
物理特性	
重量 (约值)	20 kg
尺寸 (长x宽x高 mm)	550 x 210 x 550 mm
周围最小空间	前面: 800 mm 右面: 540 mm
电气特性	
最大功耗	600 W
驱动轴数	3
工作电压 (符合 EN 60240-1 标准)	220 - 230 V $\pm$ 10%, 50Hz $\pm$ 1% 100 - 120 V $\pm$ 10%, 60Hz $\pm$ 1% (美国)
电控柜安全级别	IP54, 根据 EN 60204 标准
操作环境 (FB 及其附件)	
海拔高度	$\leq$ 海平面 1000 米
操作温度范围	5 - 40
24 小时平均温度	35
相对湿度	20% - 90%, 非冷凝

4.3.2. B3C-LC 系列

B3C-LC 控制系统适用于单臂或双臂水平臂式测量机以及中小型的测量系统。

该控制系统能够支持一系列选项，包括 DEA 公司的 CW43L 关节测腕、RENISHAW 的 PHxx 系列旋转测座、DICISCAN 和 METRIS 的激光测头，以及 NC100 光学测头。



综合性能	
轴的最大数量	6 (3个测量机线性轴, RENISHAW 旋转测座的旋转和俯仰轴以及旋转轴)
安全标准	机器标准 (89/392/CEE) 安全标准, 电磁兼容性 (89/336/CEE) 低压标准 (73/23/CEE)
物理特性	
重量 (约值)	45 kg
尺寸 (长x宽x高 mm)	733 x 570 x 360 mm
周围最小空间	前面: 800 mm; 后面: 800 mm 右面: 540 mm
电气特性	
最大功耗	900 W
驱动轴数	3
工作电压(符合EN 60240-1标准)	220 - 230 V $\pm$ 10%, 50Hz $\pm$ 1% 100 - 120 V $\pm$ 10%, 60Hz $\pm$ 1% (美国)
电控柜安全级别	IP54, 根据 EN 60204 标准
操作环境 (FB2及其附件)	
海拔高度	$\leq$ 海平面1000米
操作温度范围	5 - 40
24小时平均温度	$\leq$ 35
相对湿度	20% - 90%, 非冷凝

4.3.3、B3CS/B6CS系列

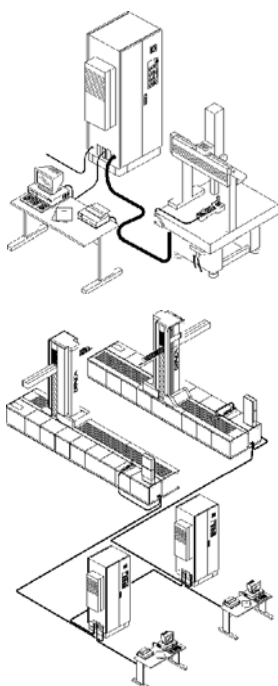
B3CS/B6CS 控制系统适用于单臂或双臂的测量系统以及任何尺寸的测量系统。该控制系统能够支持任何选项, 包括转台。同时, 该系列还装有热交换系统和温度调节系统, 以便于安装在苛刻的环境条件下。在该系列下, 包括了如下型号:

– B3CS SF3 系列: 支持所有的选项 (除了双驱动)。

– B3CS SFB 系列: 基本型

– B3CS SFW/FW3 系列: 在控制系统上集合了键盘、显示器和打印机, 并具备空气调节装置

– B6CS SF3 系列: 类似于 B3CS SF3, 但支持包括双驱动在内的任何选项, 主要适用于功耗较大的大型龙门式测量机, 如 LAMBDA SP 和一些旧机改造的情况下。



综合性能	
轴的最大数量	6 (3个测量机线性轴, RENISHAW 旋转测座的旋转和俯仰轴以及旋转轴)
安全标准	机器标准 (89/392/CEE) 安全标准, 电磁兼容性 (89/336/CEE) 低压标准 (73/23/CEE)
物理特性	
重量 (约值)	B3CS/B6CS SF3: 370 kg B3CS SFB: 164 kg B3CS SFW/FW3: 269 kg
尺寸 (长x宽x高 mm)	B3CS/B6CS SF3: 1122 x 792 x 2000 mm B3CS SFB: 792 x 792 x 2000 mm B3CS SFW/FW3: 830 x 810 x 1700 mm
周围最小空间	前面: 800 mm; 左面: 800 mm 右面: 300 mm; 上面: 800 mm
电气特性	
最大功耗	B3CS: 1 KW B6CS: 3 KW (峰值6 KW, 每轴峰值4KW)
操作环境	
海拔高度	$\leq$ 海平面1000米
操作温度范围	5 - 40
24小时平均温度	$\leq$ 35
相对湿度	20% - 90%, 非冷凝

4.4. 丰富的控制功能

4.4.1. 具有 FLY 功能

具有连续运动轨迹插补技术和真正三维矢量功能, 通过减少停顿和拐角将各轴运动进行整合, 从而确保坐标测量机各轴的高速平稳运行。

4.4.2. 支持多种温度补偿系统

不但具有常见的线性温度补偿, 并具有独特的 ACTIV 结构温度补偿, 可补偿因环境温度变化引起的机器结构变形, 有效地提高了系统的测量精度, 降低了对环境温度的要求, 使三坐标测量机可以使用于车间温度环境。

4.4.3. 可控制 SP600 扫描测头

支持 SP600 连续扫描功能, 可使用由 B3C-LC 控制的三坐标测量机应用于逆向工程和钣金件的测量中。

如前所述, CNC 自动测量是通过设定的运行路径并利用插补运算去控制测头的运行轨迹。但对于并不知道轮廓曲面的工件, 无法进行插补运算。SP600 测头在三个方向都有高精度的位移传感器, 当测头与工件表面接触时, 测尖位移的方向是接触点曲线的法线方向, 而测尖前进方向就是该点的切线方向。SP600 的自动扫描控制的办法就是采用这种采样一点、运算一次、进给一步, 使测头从开始点一直扫描到终止点。

由于 SP600 在扫描过程中的采样点数量很大, 且要随时运算, 对数据的传输速度要求很高, 一般使用网卡通讯。

4.4.4. 支持非接触测头

在众多的控制系统中，对接触式测头的支持和处理是通用功能，但是随着科技的发展，非接触式测头如：光学和激光扫描测头等的精度日益提高，应用不断广泛，B3C 系列控制系统提供了对各种主要非接触测头的完全支持，这样扩大了测量机的应用范围。

4.4.5. 可控制连续扫描测头

意大利 DEA 公司独有专利的测头 CW43L 连续旋转关节可代替 PH10M，能够完全应用于有 B3C 控制的坐标测量机和测量机器人上。CW43L 测腕具有连续定位功能，可配置自旋转中心长度达 674 mm 的测头，在测量空间内，可接近被测工件任意方位。连续 CW43L 测腕避免了 Renishaw 测座只按 7.5 度旋转的限制。

B3C 所支持的加长杆长度在 700 mm 以上，这对于测量大型钣金件、车身和航天发动机等的内部和深孔的测量极为方便。

4.4.6. 支持双光栅/双驱动系统

双光栅/双驱动技术主要应用在大型高架桥测量机上，双光栅的作用是补偿横梁在运动和测量时的角摆，提高系统的测量精度。而双驱动系统可有效地减少横梁在运动和测量时的角摆，提高系统的运动特性。

与通常的双光栅/双驱动系统不同，Delta、Lambda 等双驱动的主机上具有 LVDT 传感器。副轴驱动器也使用主轴驱动器的命令值，用 LVDT 传感器测量主/副轴的偏摆，来补偿副轴的驱动信号，副轴光栅只用于计数。这种控制模式的好处是：

不会因为光栅计数的变化而引起双驱动的干涉。

对于控制软件来说，是普通的三轴控制，四轴计算，提高了系统的可靠性。

4.4.7. 支持自动上下料系统

在生产装配自动化车间里，工件的自动装卸是柔性制造系统的一个突出特点，而 B3C 系列控制系统可完全控制自动上下料系统，使自动上下

料系统与测量机之间自动协调工作，而不相互冲突，配合测量机和测量机器人实现工厂自动化或生产过程的质量控制。

4.4.8. 支持柔性夹具系统

专用夹具系统由于其装夹特性和成本昂贵，专用性强等特点，在机械工业制造中是一项重要而又困难的事情，通用夹具和柔性夹具因其通用性强和节约成本特点一直是制造业努力的方向。B3C 控制系统可以为 FIVE 等柔性夹具系统提供驱动控制，并按被测工件的特点和位置在测量软件中建立坐标系。

4.4.9. 远程控制功能

对于大型测量机来说，由于计算机相距较远，操作很麻烦，远程控制面板（Remove Control Panel）可解决此问题。在远程控制面板上，有显示屏及许多功能键，可控制机器回零、列出已有的测量程序、运行测量程序、暂停或中止机器的运行等，并可显示机器当前状态、坐标值、测量的结果等信息。

4.4.10. 各种控制系统所支持的选项

测量系统选项	FB	B3C-LC	B3CS	B6CS
线性温度补偿	是	是	是	是
ACTIV结构温度补偿	否	是	是	是
双驱动系统	否	否	否	是
转台(W轴)	否	否	是	是
双臂测量系统(适用于水平臂测量机)	否	是	是	是
安全保护装置	是	是	是	是
实现与生产线和系统整合的PLC功能(如上/下料装置)	否	否	是	是
防碰撞控制(适用于水平轴的机器)	是	是	是	是
测座、工具和测量附件				
SP25测头	是	否	是	否
SP80测头	否	是	否	是
OTP点到点激光测头	是	是	是	是
OTM连续测量激光测头	是	是	是	是
RENISHAW PHxx旋转测座 (AB轴)	是	否	是	是
DEA CW43L测腕 (AB轴)	否	否	是	是
DEA CW43L测腕 (AB轴)和NC100光学测头(偏转W轴)	否	否	是	是
RENISHAW ACR1更换架	是	否	是	是
RENISHAW SCR更换架	是	否	是	是
控制系统选项				
远控单元	否	是	是	是
热交换或温度调节系统	否	否	是	是
其他选项				
DIGISCAN (连续接触式数字化、划线和轻铣功能)	否	是	否	否
METRIS (连续光学数字化)	否	是	是	否

4.5. 完善的保护功能

4.5.1. 应急保护电路

B3C 的 MIX01 卡上，有测量机的紧急链电路。系统的控制板、操纵盒、机器的 I/O 端口和其他机电单元均连接到它上面。紧急电路由一系列电器件（各种电阻按钮和断电器）串联而成。断开单个器件就能出现紧急状态，从而切断到电机的电源。

PWM 卡（驱动器）上的制动电路由继电器和电阻构成。在紧急情况下，通过继电器连接到电阻。电阻消耗了电机集蓄的能量，可使机器马上停止运动。

4.5.2. 超速保护

发生机器超速的因素很多，如：光栅计数故障、电机故障、机械传动故障、驱动器故障等，机器发生超速是最危险也是用户最担心的问题。B3C 完善的超速保护功能可使测量机在即使开环的情况下也可以及时刹车，防止碰撞事故发生。

4.5.3. 两级反馈系统

从测速机组的反馈信号到微处理器，经处理发送指令给测速机组构成第一层反馈，属于速度环。从光栅经过细分器的反馈信号到微处理器，经过处理再到机械传动结构，构成第二层反馈，属于位置环。B3C 具备读取各种位置参数，并作相应处理，可以防止很多意外事故的发生。

4.5.4. 气压保护

当气压不足或气源泄漏时，系统会及时报警，并停止机器运行，从而防止对机械部件的损坏。

4.5.5. 支持多臂防撞功能

在最通常的应用中，例如：双水平臂测量机，每一臂配一个控制系统，两个控制系统的关系是一主一辅，除此还有更重要的应用是一台控制系统连接两个水平臂，并且可以控制两个水平臂的运动，当两个水平臂接近时使其运动错开，防止碰撞。

4.5.6. 远红外保护功能：

作业区如果有远红外装置作为保护使用，那么 B3C 系统内有支持远红外功能的设置，从而使具备红外控制特性。

4.6. 便携式操纵盒

操纵盒使得操作者可手动控制测量机的机械运动，并可用来控制紧急情况、设置轴运动速度，设置复位状态功能。



便携式操纵盒示意图

控制键	功能
紧急停按键	使得测量系统及其移动部分产生立即的停顿，并激活当前的任何安全选项
MACH START 按键	执行启动控制系统或者清除紧急停的操作
操纵杆 ENABLE 按键	控制机动轴的手动运动：包括测量机的线性轴、测座的偏转和俯仰，以及选项附件（如转台的运动和 YAW 轴）。只有在 ENABLE 按下的情况下，轴才会移动。
速度指示器	在轴的运动受操纵盒控制时设置其线性运动速度。
SPEED 按键	速度指示器显示当前速度，利用 SPEED 按键设定。
SLOW 按键	SLOW 键用来在两个预定值之间选择轴的最大运动速度。
X/A, Y/B, Z/W 按键	利用操纵盒使能或禁止每个轴的运动（X/A, Y/B, Z/W 按键）。
SHIFT 按键	选择三个轴一起运动(XYZ 或者 ABW)，采用 SHIFT 按键。
RUN/HOLD 按键	将控制系统在运行和停顿状态进行选择。在停顿状态，控制系统将不能根据软件或操纵盒的指令运动。
DEL PNT 按键	依据正在使用的软件功能运行。如允许在软件执行工件检测程序的操作和自学习过程中通报一些特殊情况的发生
DONE 按键	
PRINT 按键	
JOG MODE 按键	设置机器参考系统(缺省)，或者其他的参考系统受软件管理

5. 控制系统的发展方向

随着三坐标测量机应用的普及及现代制造业的发展，高精度、高速度、多功能、集成化、无线传输将成为三坐标测量机数控系统的发展方向。

现代的制造业对三坐标测量机的测量精度和测量效率的要求越来越高，这方面除了主机性能的提高外，控制系统的精度和速度也是重要的一

个方面。这就要求 DSP 等控制芯片处理数据的精度更高、速度更快，缩短插补运算的周期，以使机器在高速运行的过程中，系统的跟随控制精度和到位控制精度更高，这在定点测量和扫描测量中是非常关键的。

随着扫描测头的应用与发展，三坐标测量机在逆向工程领域的应用也越来越广泛。这不但要求控制系统的功能强大，可以控制从触发到扫描、从激光到光学等所有类型的测头；而且因为扫描的点云数据庞大，要求数控系统在传输数据时的速度更快，不能造成瓶颈效应，现在的串口和网卡通讯都不能满足每秒上万个点的传输速率要求，光纤等速度更快的传输方式将在数控系统上得到应用。

同时，三坐标测量机的功能越来越强，其所包含的板卡和电缆也越来越多，这都给使用、维护等造成了难度和不便，所以集成化和无线传输也将是数控系统的发展方向。在操纵盒、通讯等方面的无线传输将很快得到普及，功率信号的无线传输将是一个比较长远的发展方向。

第四章、三坐标测量机软件

1. 综述

准确、稳定、可靠、精度高，速度快、功能强、操作方便，是对测量机总体性能的要求。

测量机本体（包括测头）只是提取零件表面空间坐标点的工具，过去，人们一直认为精度高，速度快，完全由测量机的硬件部分决定（测量机机械结构，控制系统，测头），实际上，由于误差补偿技术的发展，算法及控制软件的改进，测量机精度在很大程度上依赖于软件。测量机软件成为决定测量机性能的主要因素，这一点已普遍被人们所认识。

2. 三坐标测量机软件分类

虽然测量软件形式很多，但从功能上可以分成下面几类：

2.1. 通用测量软件（基本测量软件）

通用测量软件的作用在于完成整个测量系统的管理，包括探针校正，坐标系建立与转换，几何元素测量，形位公差评价，输出文本检测报告。

2.2. 专用测量评价软件（特殊测量评价模块软件）

专用测量软件是指在基本测量软件平台上开发的针对某种具有特定用途的零部件的测量与评价软件，如 QUINDOS 软件提供了齿轮、叶片、螺纹、凸轮、压缩机转子、自由曲线等特殊测量评价模块，用它替代一些专用的计量仪器，拓展了测量机的应用领域；PC-DMIS 软件提供了齿轮、叶片、CAD 直读接口等模块，满足了用户特定的检测要求。

2.3. 统计分析软件

统计分析在生产过程及工艺设备的状况与能力分析研究中有着重要作用，常用的统计分析指标有平均值、标准偏差、变化趋势（含平均值与标准偏差变化趋势）、分散范围、概率分布等，还

可以对各种因素进行相关分析等，此类软件可以通过测量数据，对加工设备能力和性能进行统计分析。

2.4. 各类驱动、补偿功能软件

为了增强测量机的功能，利用软件补偿的方法提高测量精度，测量机生产厂还提供了一些附加功能软件，如：误差检测软件、误差补偿软件、激光测头驱动软件，以及驱动其它厂家测量机的驱动软件等功能软件。

3. 测量软件的发展历史

最早期的三坐标测量机仅能输出坐标点，而且只能在机器坐标系下工作。所以测量时，先须人工找正工件，即把工件的基准线和测量机的坐标轴线找平行。测量的坐标数据要经过事后计算处理，才能得到结果。电子计算机的发明和应用，将数字化技术引入了测量机系统，从此诞生了三坐标测量软件。

迄今为止，三坐标软件包的发展经历了三个重要阶段：第一阶段是 DOS 操作系统及其以前的时期，测量软件包能够实现坐标找正、简单几何要素的测量、形位公差和相关尺寸计算。第二阶段是 Windows 操作系统时代，包括 16 位 Windows 系统和 32 位 Windows95/98；这一阶段，计算机的内存容量和操作环境都有了极大的改善，测量软件包在功能的完善和操作的友好性上有了飞跃性的改变，大量的采用图标和窗口显示，使功能调用和数据管理变得异常简单。第三阶段应该是从上世纪末开始，毫不夸张的讲，这是一次革命性的改变，它以将图 4.1 测量软件的引入，CAD 技术引入到测量使得测量机的功能得到很大的提高



测量软件使用 CAD 数模，是受 CAD/CAM 的影响，也是制造技术发展的必然结果。数控加工

中心和 CAD/CAM 设计和加工编程实现了无图纸制造，自然会影响到坐标测量机的数模编程和无图纸检测。但是在这方面，测量软件的起步却比数控加工软件要晚得多，究其原因，一方面是在制造业中，测量机的使用和影响远不如数控加工中心那么普遍和重要；另一方面对于测量软件包的开发者也有技术上的难度。

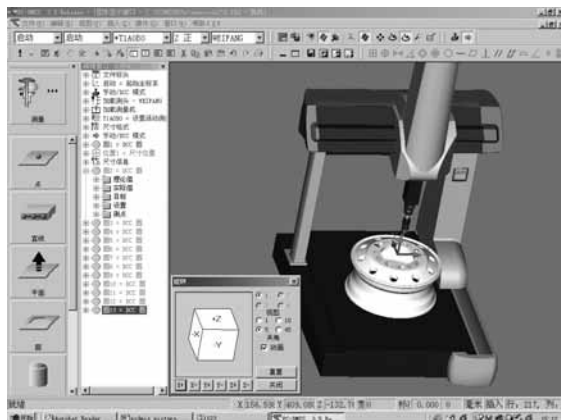


图 4.2 CAD 技术的引入，使得测量软件发生了革命性的变化

以三维 CAD 环境为中心的新一代的三坐标测量软件包的一个显著标志。在技术上，它需要完全重建结构框架和重写核心代码，不是一个简单的操作平台的移植或外围功能的扩展，而其核心 CAD 引擎（CAD Engine）的实现，对测量软件包的开发者来说是一个极大的挑战，因为它本身正是 CAD/CAM 软件的核心，涉及到三维几何形体的数据结构和表达、视图显示、操作交互、特征计算等，完全超出了测量软件工程师的知识领域。对每一个开发商来说，这里都存在一个很高的台阶，能否越过也是对其产品是否有能力继续发展的一个考验。从时间上看，这样一个更新换代产品的开发周期至少需要三到五年，代价也是巨大的。因此，我们注意到，从第一代到第二代的测量软件大多都是由测量机制造商自主开发的，但现在只有少数规模较大的测量机制造商能够成功开发新一代的基于 CAD 环境的测量软件包，多数中小制造商纷纷放弃软件开发，转向购买第三方的产品。目前，尽管有许多种具有 CAD 引擎的测量软件包，但真正得到市场考验和用户认可的只

是区区几家。美国 WILCOX 公司目前是全球最大的测量软件开发商，该公司现在隶属于瑞典 HEXAGON 计量集团，其产品 PC-DMIS 也是最早推出的具有 CAD 测量功能的测量软件包，全球拥有量已超过了 25,000 套，在中国有 800 套以上。

4. 测量软件的 CAD 核心

以三维 CAD 环境为中心的新一代三坐标测量软件包具有以下特点：

4.1. 数模脱机编程

以往的测量软件具有两种编程方式，自学习联机编程和脱机代码编程。自学习联机编程是一种最基本的方法，但需要在联机状态下在实际工件上完成，并且功能有限。而代码编程虽然可以脱机进行，但对编程人员要求很高，他必须精通编程语言，由键盘输入程序文本，还要进行语法检查才能执行。而程序中可能存在的逻辑错误则只有在实际测量时才能发现。更为严重的是，测头的配置差异和路径编程错误会造成严重事故。实际上在大多数情况下，用户还是很少单独使用文本脱机编程。

基于 CAD 数模编程大大提高了零件编程技术，它的极大优势是可以作仿真模拟，既可检查测头干涉，也验证了程序逻辑和测量流程的正确性。以下图示描述了一个典型的零件测量过程。首先在可视化操作环境下，实现测头配置和测量过程规划；通过动态仿真模拟，检查无误后，作实际工件测量，然后得到测量结果。

CAD 数模编程既不需要测量机也不需要实际工件，这将极大的提高测量机的使用效率或有效利用时间。对于生产线上使用的测量机，这就意味着投资成本的降低。因为占测量准备工作主要部分的编程，是在测量室以外完成的，甚至在零件还未制造出来之前就已经完成了。其次，编程中需要的理论数值，也将从数模上直接自动得到，而不需从图纸上查找再由键盘输入。这一改变在提高效率的同时也避免了数据输入错误的发生。

在中国最早使用 CAD 数模作脱机测量编程的是上海大众汽车公司。他们对所有新车型，都是在投产之前即完成了零件测量程序的编制。

pc·dmis

点击 CAD 模型，脱机完成测量程序的编制

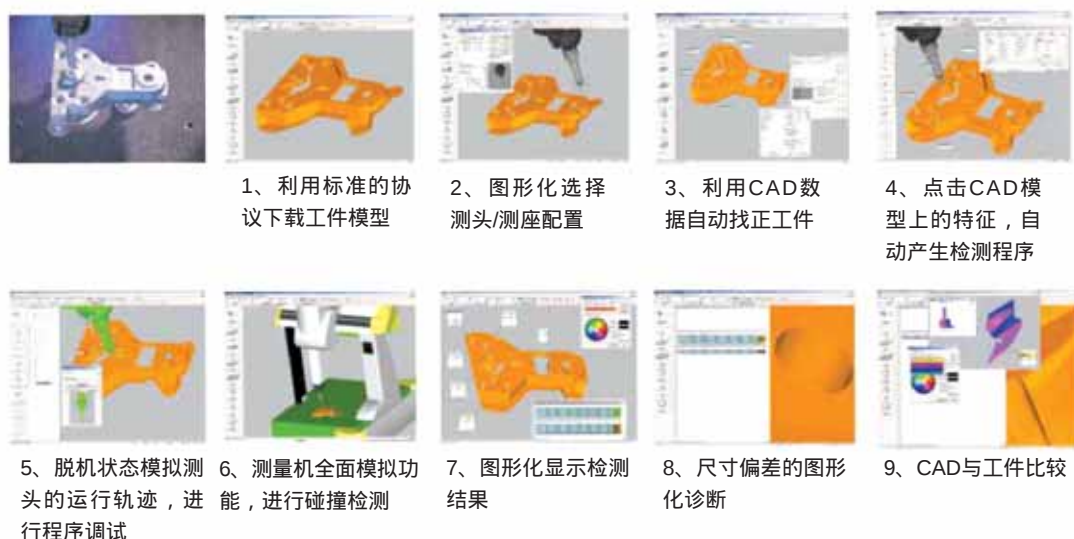


图 4.3 具有 CAD 功能的测量软件，能够脱机完成测量程序的编制

4.2. 图形操作环境

即使在没有 CAD 数模的情况下，测量软件的图形环境也使用户的操作方式大为改观。首先，测量元素是以三维图形显示的，而不是像传统软件那样，仅显示数据列表，从而实现了“所见即所得”。其次，在进行相关计算和分析过程中选择元素时，可以从显示窗口上直观的选取图形，而不是查找数据库列表里的元素标号。

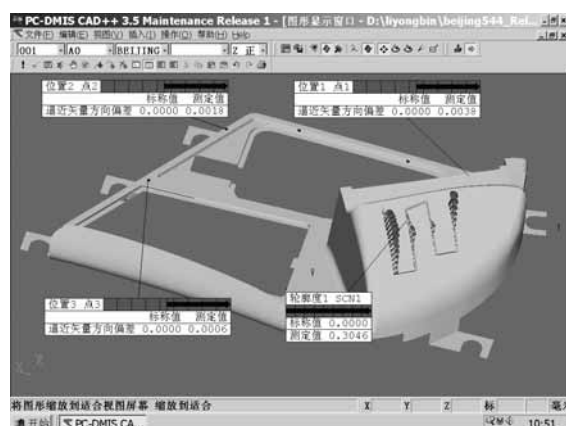


图 4.4 PC-DMIS 的图形操作环境

毫无疑问，图形操作环境使用户的工作具有轻松感，提高了效率，也使得测量的中间结果判断十分容易，可以避免许多显而易见的测量错误。

4.3. 图形报告

图形报告就是在测量结果上，直接绘制图形，同时将测量数据和理论值及误差等信息直接标注在图形上。在有 CAD 数模时，输出的图形即为数模图形；在无 CAD 数模情况下，输出的图形为测量元素。无论在那一种情况下，你都可以自由选择视图方向，以最合理的投影方向来表达测量结果。

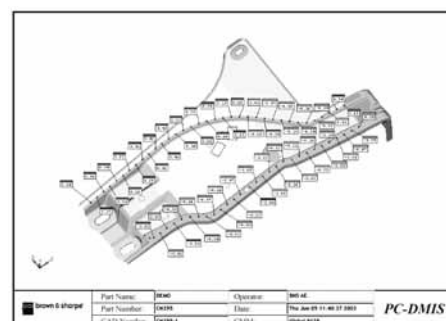


图 4.5 超级图形报告

显然，图形报告具有最直观的表达能力，能起到一目了然的效果。它完全不同于过去那种由测量数据报告再查找图纸对应关系才能解读和判定结果的方式，免除了测量数据后处理工作，不管是测量员还是部门主管都受益非浅。

图形报告也是可用户定制和编程的。公司内部，尤其是大集团公司，要求内部不同生产厂采用统一的规范化的检测报告，这个规范格式可由用户自己在测量软件包内设计和定制。一旦定制完成，即保存在测量程序中，每次测量结束，即自动输出报告。

基于 CAD 的测量软件包需要具备 CAD/CAM 接口，才能实现 CAD 数模的输入/输出。虽然有多种中性的接口规范，例如，IGES、STEP、VDA 等，但最快捷、最精确的方式还是直接导入/导出，即不经中间格式转换的直接输入/输出原始 CAD 文件的能力。PC-DMIS 软件包除了具备这些功能外，还与多家 CAD/CAM 软件供应商合作，能实现网络 CAD 数据交换。

5. 测量软件功能与应用的分类

测量软件的功能按被测零件的分类主要包括以下方面：

5.1. 箱体类零件

这类零件以组合平面和孔或轴为主要元素，主要测量空间尺寸与元素的形状位置误差。相对来讲，这是最基本、最简单的一类测量任务。对测量软件的要求主要包括计算方法的正确性、功能的完整性及操作的便利性三个方面。关于算法的正确性，国际标准化组织在 2001 年公布了“计算高斯拟合要素的误差的评定”（ISO10360-6）。目前权威的评价仍然是德国 PTB 认证，它通过在理论数据上迭加各种可控噪声模拟测量机的随机误差，来检验软件算法的收敛性和结果。软件功能的完整性是看是否包含所有的形状位置误差项，是否具有多重国际、国家标准，例如 ISO、DIN、JIS、GB 等，以及各种评价准则，例如最小二乘、最大实体、最小实体等。

形位公差的测量虽然是所有测量软件包的基本功能，但以 CAD 为引擎的新一代测量软件包，通过数模编程、图形环境、图形报告功能，却使操作方式和工作效率有了革命性的改变。箱体类零件的 CAD 编程技术，仍需发展的是如何从数模上提取公差值，而不仅仅是形体尺寸的理论值，这项技术涉及到三维数模上的公差标注方法，还有待于新的技术规范的形成和 CAD 设计软件的同

步发展。

具有 CAD 的测量软件包已不仅限于对单个零件的测量，还在继续向装配组件发展。即可以由单个零件的测量数据进行装配模拟，以预测实际的组件状况。

5.2. 自由曲面类

自由曲面（包括自由曲线）类零件，以测量轮廓度为特点，从简单的凸轮、到飞机机翼和汽车覆盖件。传统测量软件包将这部分归类为“曲线/曲面”测量。实际上在测量方式和软件内部处理上均是以测点方式实现的，即先确定一系列理论点，再测量这些实际点，在结果评价时再按照轮廓度要求进行。

这种传统的测量方案主要是受到两个方面技术条件的限制，一方面是测量机只能作分离点的测量，另一方面测量软件不能处理曲线和曲面的数学模型。这种测量方式对测量机的空间定位精度也非常敏感。由于控制系统的跟随误差引起的测头空间运动不到位或过定位误差都直接引入到测量点的位置误差，造成实测点本身的偏离。值得一提的是，测量机的空间定位精度差别是很大的，但却不在验收检验范围之内，这就要看各个厂家的出厂控制要求了。

CAD 数模的使用，是曲线/曲面的测量数据处理方法由“点到点”改变为“点到曲线”和“点到曲面”，在软件包内部使用的理论模型是真正的曲线/曲面。这一改变提高了测量数据的精度，克服了测量机的空间定位误差的影响。加上连续扫描测头的应用，使测量效率大幅度提高，一条扫描线就可实现一个截面轮廓的测量和分析。

测量技术的改变需要用户测量工艺规范的改变，但这往往是不同步的。因为对于一个大公司来说，要在已成熟定型的产品生产工艺上，作任何的修改，都要涉及到一大批人的参与和认可，工作量是巨大的，过程是复杂的。目前，还有相当一部分产品仍在沿用老的测量方法。当然，越来越多的新产品生产线，已将三坐标作为主要的在线检测工具而取代专用检具，在测量效率上有了更高的要求，从而寻求新的测量技术。例如德国大众集团公司对汽车钣金件的检测，从冲压件、焊接件、分总成到白车身，形面轮廓已全部采用测量机，对截面扫描线控制。

自由曲面的轮廓测量,进一步发展是云图测量。使用面扫描测头,快速采集高密度的面形数据和理论数模比较,给出误差的面分布图。毫无疑问,面分布图具有更大的信息量,能够全面地评价零件的轮廓度误差,也对零件的修复提供了最直观的指示,例如模具制造与维修。但这一技术目前还未到大量应用阶段,原因有几个方面:一是用于数据采集的测头主要为激光面扫描型式,价格高昂,而精度比标准接触式测头有数量级上的差别;另一方面,这种新技术也需要质量控制部门的一个认可过程。

薄壁件(sheet metal)的测量是自由曲面测量的另一大类型,它以汽车和摩托车覆盖件、家电外壳为主要代表。薄壁件除了面形轮廓外,具有许多种特殊的测量元素,例如,槽、缝、孔、边缘点、曲面交点,局部最高点/最低点、定位销,螺柱等。具有薄壁件测量功能的软件包对这些元素都有现成的测量功能,不需要额外编程处理。



图 4.6 薄壁件测量程序库

薄壁件测量中的另一重要方面是坐标找正。因为这类零件不象箱体类,有基准平面,基准线等定位元素,不能使用简单的 3-2-1 建坐标方法。而行之有效的办法是具有优化功能的最佳匹配算法(Best Fit)。根据边界条件和误差控制方式的不同,针对各种典型情况,最佳匹配的坐标找正又有多个变种,例如,有 CAD 数模和无 CAD 数模条件下的坐标找正,6 点找正是最少变量情况下的一个特例。但大多数最佳匹配意义下的坐标找正都是针对已测元素的一种事后数据处理,对测量点本身的准确性没有控制,所以找正的精度也无法保证。在基准元素中含有曲面点的情况下,这个问题尤为突出,甚至无法完成,因为在建坐标之前,无法准确测得曲面上的指定点。例如,叶片的形面找正,冲压类另件的找正。

特别值得一提的是是一种称为“迭代法(iteration)”的坐标找正方法,它能够适应各种应用情况,且具有很高的精度。它是通过联机重复测量并修正曲面基准元素,进行多次最佳匹配,直至达到规定的精度要求。这种找正精度是可控的,对各基准元素还可以设置权重。

在汽车车身测量中,通行的办法是先对规定的参考点(RPS)找正,在 RPS 点的测量值达到要求之后,才能正式开始全面测量。如果 RPS 点的测量值达不到要求,则该零件即不合格,无须继续测量。在过去,测量人员在 RPS 找正上,要花很多时间,通过人工调整或简单编程来修正测量点。现在使用 PC-DMIS 软件包之后,他们认为迭代法是最理想的工具。

5.3. 特定形面类



图 4.7 特定形面测量软件

这是指齿轮、叶片、蜗轮/蜗杆、螺纹等一类零件,其形状通过一组标准参数来控制。对这类零件的检查有两部分内容,一是控制参数,二是轮廓形线或形面。轮廓形线形面的测量实际上就是曲线曲面测量,较为简单,通用测量软件包也可以实现。但特定的控制参数的评价则需要完全专业的算法,他要符合行业的标准和规范。通用测量软件包均不包含这些内容,仅能作几何尺寸测量和形线形面轮廓测量。

在这一领域,德国 Leitz 公司的 QUINDOS 一直是公认的专业软件包。它对各类零件都有完全现成的功能模块来实现参数输入,自动测量、计算评价及报告输出。可贵的是它的评价算法都是



图 4.8 螺旋伞齿轮测量

在行业专业人士的参与下完成的，权威性得到普遍认可。另外，对这类测量，一般没有使用 CAD 数模编程的必要。

容易被用户忽略的一个问题是对测量机本身的要求。测量机首先要有足够的精度，才能测量一定精度等级的零件。探测误差直接影响轮廓形面的精度，往往起着决定性的作用。另外，连续扫描测头和自定中心功能也可将测量的精度和效率大大提高。Leitz 公司的高精度测量机 PMMC 和 TRAX 测头及 QUINDOS 软件包一直是这一领域的最佳解决方案。

5.4. 反求测量

逆向工程是近年来飞速发展的一项技术，测量机作为这一系统中的一个重要环节，得到了大量应用。但相当一部分人错误地将测量软件与反求设计软件混为一谈，认为测量机测出的结果就应当是三维 CAD 数模，甚至就是加工程序。这是一个极大的误会。测量机在逆向工程中的角色就是三维数据的采集，也就是反求测量。测量软件的表现水平就在于采点的自动化程度、效率以及与 CAD 软件的接口能力上。

逆向工程基本上可以分为两种，第一种就是简单复制，也叫作 CAM 反求，传统上叫仿型，要求百分之百地拷贝零件。这种反求方法较简单，用测量机实现的方式是使用连续扫描测头，逐行连续采集数据，并直接转换为加工刀具路径。在有的测量机上还可以装上铣削头，直接完成加工。因为零件本身的表面缺陷和测量点的误差都会完全复制到新的产品上，这种反求适用于精度要求不高和简单的低端产品，例如玩具业。

技术含量较高的是 CAD 反求，它要将测量点造型生成 CAD 数模，通过重新修饰和修改过的数模生成全新的产品。这里的关键技术是将测量数据转化为数模，这是典型的 CAD 设计造型工作，而不是测量软件的范畴。

如何由测量数据实现数模重建，仍然有两种不同的作法，第一种是由关键点重建，按 CAD 的传统造型模式，由点—线—面两步完成；第二种是由点云（point cloud）直接生成曲面数模。

总之，由测量点重建 CAD 数模的功能还是要靠 CAD 软件包来实现，人们梦想的由测量机直接产生出 CAD 数模的功能还远没有实现。现在有越

来越多的针对测量数据进行造型的专用软件包出现，例如，Delcam、Geomagic Studio、Rhino 等，成为一个十分活跃的领域。从发展上看，这种专用软件包作为测量机的后处理工具是非常合理的。因为造型过程是需要时间的，往往比测量采点的时间长得多，不可能包含在联机测量软件包中占用测量机的使用时间。

6. 测量误差与采样策略

6.1. 影响被测参数测量精度的因素

从测量原理上说，三坐标测量机直接测得的是被测工件上一些特征点的坐标位置，需要通过软件运算才能获得被测参数的值，因此被测参数的测量精度主要与下列因素有关：

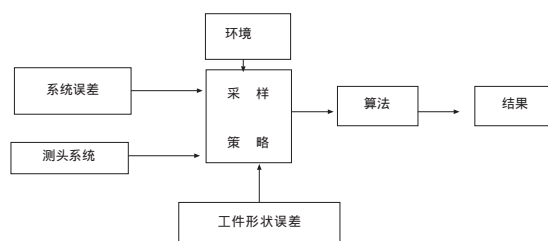


图 4.9 影响被测参数测量精度的因素

坐标测量机系统误差——包括测量机结构误差：位置偏差、垂直度偏差、直线度偏差、角摆偏差等 21 项误差（水平臂测量机为 24 项）；通常为了提高测量机精度，生产商都提供空间 21 项误差补偿软件。提供测量机测量精度。（21 项误差的含意参见第六章“坐标测量机的精度”）

测头系统误差——（见第五章“探测系统”部分）

工件形状误差——工件形状误差对测量精度影响很大。一般说来，很难对被测元素进行全面的测量，即使测量机完全没有误差，采样点不同时，测得的结果也会不同。也就是说测量结果与采样点位置有关。

算法计算误差——因为被测几何元素不是理想元素，在数据处理中总是用一近似的理想元素替代它，这一过程叫做拟合算法计算。常用的算法有：最小二乘法和最大最小条件法。最小二乘法根据误差的平方和开平方根为最小的条件求出

的值。这种方法的优点是按一定算法直接计算所需要参数,不需要搜索,已被 ISO10360-6 定为测量机软件的标准算法。

环境因素 —— 因为不同的材料对温度变化的敏感系数差别很大,所以温度变化对测量精度影响很大。为了避免环境对于测量性能的影响,测量机采用了各种温度补偿技术,以提高测量机适应环境的能力,减少因温度变化引起变形而产生的误差。

6.2. 软件误差

通常情况下,不考虑或忽略测量软件计算所带来的误差,但德国国家物理技术研究院 (PTB) 从 1983 年起对一些测量软件进行了测试。测试方法如下:

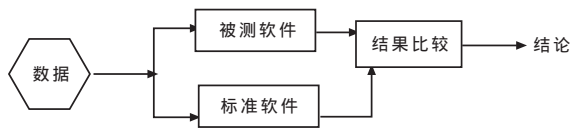


图 4.10 测量软件测试

该测试针对基本测量软件进行,被测元素分别为直线,平面,圆,圆柱,圆锥和球,被测参数包括这些元素的基本参数与相互关系,采用的评定准则均为最小二乘法。对测试的 17 套软件共进行 44 项测试,获得了 748 项结果,其中 37% 的线值差不超过 $0.1\mu\text{m}$, 角度值差不超过 $0.1''$; 18% 的线值差在 $0.1\mu\text{m} - 0.5\mu\text{m}$ 之间, 角度值差在 $0.1'' - 0.5''$ 之间; 19.8% 的线值差超过 $2\mu\text{m}$, 角度值差超过 $2''$; 另外 20.2% 的项是不能计算或得不出完整的结果。

鉴于这种情况,美国国家标准技术研究院、英国国家物理实验室等均展开了对软件测试的研究工作。总结出产生较大误差的主要原因是:

由于某些计算比较复杂,在软件的编制过程中采用了一些近似算法。

在误差计算中常常对两个数值很接近的量进行相减,相减中相对误差增大。相减后再进行乘除运算,绝对误差也会增大。

德国国家物理技术研究院在测试中发现,许多软件中对方向余弦的值所给的有效数字不够。

有的软件对“毛刺”十分敏感,即个别值有些偏差就会引起较大的计算误差。

对数据可能产生的各种情况考虑不周。对一类数据能给出精确的计算结果,而对另一类数据则会产生较大的误差。

有的软件在迭代搜索过程中收敛性差,甚至不能给出正确的计算结果。

判断运用不当。在搜索算法中,因为考虑不周,给出的条件不完整,也就是说满足条件的结果可能有几个。

鉴于这些研究结论,在选购测量机时,测量软件精度也是您考察指标之一,即测量机所提供测量软件一定要经过有关权威部门的认证,目前测量软件比较认可的是 PTB (德国物理科学院) 的认证。

6.3. 采样策略

采样策略研究的是如何在物体的表面进行采点,采集多少点最为合理,且使检测误差达到最小。所谓合理是指在同一台测量机上,在相同的环境下,测量同一个零件,怎样安排测量点的位置和测量点数,可以获得较高的测量精度,且耗费的时间比较经济。

为什么采样点数和采样位置影响测量结果: 1) 被测元素非理想元素,有形状误差; 2) 测量机采点及计算方法的局限性,存在测量误差。

以圆为例说明采样策略对测量结果的影响:

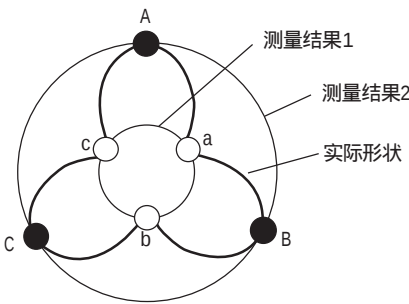


图4.11 测量点选取对具有三叶形形状误差工件的影响

对图 4.11 实际圆形具有三叶形误差,当测量点在 a, b, c 三点时,测得的直径为最小,当测量点选择在 A, B, C 三点时,测得的直径最大,由于工件可以任意摆放,测得的可能是他们之间的任意值。这是被测元素形状误差对测量结果的影响。

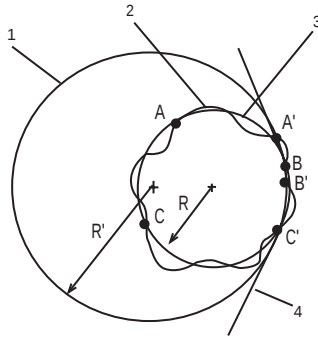


图 4.12 采样点对圆参数测量结果的影响

对图 4.12 工件形状为曲线 2 所示，如果采样点选在 A、B、C 三点，测得的圆直径较小如图中圆 3 所示，若采样点选在 A'、B'、C' 三点，则测得的直径很大，如圆 1 所示。若在 A'、C' 两点的测量误差向外，而 B' 点的误差向内，测得的圆直径更大，如圆 4 所示。

由图 4.11 和图 4.12 可以看出，采样策略对测量结果有很大的影响。如果对测量结果有异议，应考虑改变测量策略多测量几遍，分析测量结果，给出正确的测量数据。

6.4. 敏感系数的定义

敏感系数表示测量结果参量受初始测量元素影响的大小。

设最终要得到的参量为 Y，此参量受许多因素的影响，例如有 N 个因素 X1, X2, X3, X4, X5, X6, ..., X_N；例如大直径的短圆弧，用三点来测量，其半径 R 的误差取决于每一测点的坐标 X, Y, Z 的误差及弧所对的夹角 θ， $R = f(X, Y, Z, \theta)$ ，当弧夹角 θ 不同时，对测点的敏感系数是完全不同的，图 4.29、4.30、4.31 表示的是在相应的测点位置变化 1μm 时所引起弧半径 R，弧中心值 X, Y 的变化（偏差值）。

6.5. 采样策略示例

典型的例子是短圆弧大半径测量、同轴度测量：

产生这种情况的重要原因是测量机的测量特点认识不足。

测量机测空间点坐标精度很高，但并不等于对具体的对象（例如圆弧）所作结论的精度很高，这是因为从点坐标到具体对象所需的结论参数有一个计算的过程（所以测量机是一个测量加计算的设备），很多问题是数学方法产生的，测量机的数学方法一般基于空间解析几何的运算，例如用三点来测圆弧，是用每两点连线的中垂线相交来求圆弧半径及中心点位置，当这三点所夹中心角越小时，各点的精度对两点中垂线相交点位置就影响越大，真是“差之毫厘，失之千里”，有些专家就用“灵敏系数”来量化的表示结论和初始参数之间的关系，即用它来评价测量点误差对被测结果的影响；对于一些一般数学方法处理误差较大的问题，要用相应的特殊数学方法来处理，这种方法应当重现性好，并为生产所接受。

6.5.1. 短圆弧大半径测量

· 三点测圆时两点夹角对中心位置及半径测量的影响——短圆弧及大直径测量误差的理论解释

若三点测圆时，三点相对 Y 轴对称分布，两点间中心角为 θ

那么半径对测点的敏感系数由下述公式决定，

$$= \sqrt{(1 + 2 \cos^2 \theta) / 2(1 - \cos \theta)^2}$$

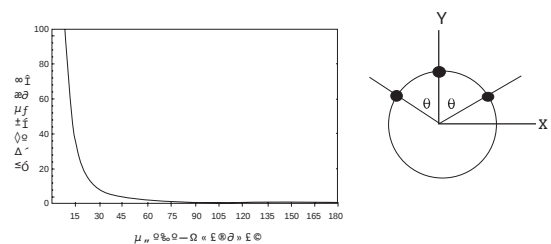


图 4.13 不同中心角时半径对测点的敏感系数

$$= 1/(\sqrt{2} \sin \theta)$$

圆心 X 坐标对测点的敏感系数为)

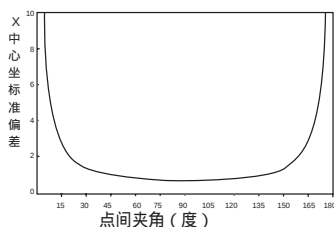


图 4.14 不同中心角时 X 坐标对测点的敏感系数

$$= \sqrt{3/2(1 - \cos\theta)}$$

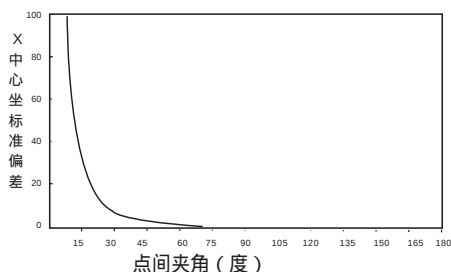


图 4.15 不同中心角时 Y 坐标对测点的敏感系数

圆心Y坐标对测点的敏感系数为

面对同一个检测对象，根据不同的检测方案，不同的中心夹角，可以测出不同的结果，而且可能有不同的精度，例如三点测圆测量方案 1（图 4.12）比测量方案 2 的误差要小得多，所以前面引入了一个敏感系数的概念；在图中假设圆是理想圆，但测量机不是理想测量机，即所测点坐标位置有变化，假设每一点的精度为 $1\ \mu\text{m}$ ，当弧的中心角为 120° 度时，半径的标准偏差为 $0.5\ \mu\text{m}$ ，而弧的中心角为 10° 度时，半径可偏差达到 $80\ \mu\text{m}$ 。

从图中可以看到当中心角小于 30° 度时，半径及弧中心位置对取点的误差的敏感系数均急剧变大，相应的标准偏差亦大大加大。

经分析，短圆弧（圆心角小于 30° 度以下）之所以成为难题，就是无论用什么测量仪器，用什么测量方法，都必须在被测的短圆弧上取点。由于各种因素，也就必然会产生取点误差。例如被测的短圆弧圆心坐标和 R 值的敏感系数按上图所示为 100 左右。在一般测量仪器上正常的采点误差假设为 0.003mm ，然后还用通常的计算方法。那么最后反映到圆心坐标和 R 值上，误差就会扩

大 100 倍而成了 $0.003 \times 100 = 3\text{mm}$ 。这无论是通过计算分析，还是实践经验都能证明这事实，那么这扩大了 100 倍后的误差结果显然是无法接受的，所以短圆弧是无法用通常测量圆的方法来进行的。

• 短圆弧测量改进一：密集采点

利用已测点的坐标值，利用最小二乘的数学方法，回归求出圆弧半径及圆心，为了提高精度要密集采点甚至用扫描采点的方法，但在中心夹角小时，误差仍较大。

• 短圆弧测量改进二：分段密集采样的圆心的最小二乘法

分别在短圆弧三点附近密集采点，此三点应尽可能远离，每一点附近的点的数据作为一组，共有三组数据，每组有 n 个数据；每组取一点，共三点，计算一个圆心及半径，互相组合后有 $N = n^3$ 个圆心，把 N 个圆心用最小二乘数学方法回归，得一点，作为实际圆心，把各点到此圆心的距离的平均值作为半径，最大、最小距离之差作为实际公差。

• 短圆弧测量改进三：圆的最小二乘法 + 最小条件逼近法

用最小二乘法求出初始圆心，根据精度确定收敛值；预置叠代步长，找出最大距离点及最小距离点，按“靠近最大距离点，远离最小距离点”的原则进行逼近，直到满足收敛值，这时确定了圆心，随之确定了半径。

• 短圆弧的测量改进四：圆心固定法

短圆弧的圆心坐标与 R 值，在图纸上标有名义值和公差值。从数学角度讲，零件上那短圆弧已设计确定。这圆心坐标与 R 值是一对完全相关量，只要确定了圆心坐标值，就能相应确定 R 值。无论从设计者讲或对短圆弧的使用功能特性讲，还是从加工短圆弧的工艺角度讲也都是以圆心坐标为基准值来计算、加工圆弧。

基于上述思想，先按图纸建立被测工件的零件坐标系，圆心可以通过其他的元素测量和计算得到，误差只是产生在短圆弧半径 R 值的计算上。

用三坐标测头在短圆弧上采点，每采一点就计算出该点到该圆心的距离，输入圆弧 R 名义值及其公差来判断是否合格。

用同样的方法在短圆弧的起点、终点和中间点，分别测出其半径值都在公差范围内为合格，只要有超差，就判不合格。

6.5.2. 同轴度

同轴度检测是我们在测量工作中经常遇到的问题。实际工作中，由于测量方法不当，有时会出现测量结果误差大，重复性差的现象。

同轴度公差的定义

在国标中，轴线 Φt 的圆柱面内的区域，该的同轴度公差定义为“公差带是直径为公差值圆柱面的轴线与基准轴线同轴”。它有以下三种控制要素：

- 基准轴线的建立
- 被测物体轴线的建立
- 考虑实际工作或装配要求作变通处理

注意建立合适的基准轴：

例如有两个短圆柱，其中一个作基准圆柱，另一个作被测圆柱，在基准圆柱上测量两个截面圆，其连线作基准轴线。

被测圆柱上也测量两个截面圆，构造一条直线，然后计算同轴度。

假设基准上两个测量截面的距离为很小，基准第一截面与被检第一截面之间的距离很大，即此种检测方案同轴度对采点的敏感系数很大，如

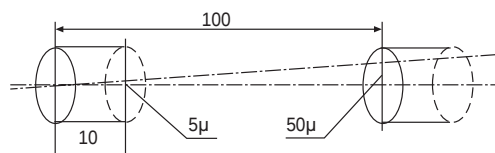


图 4.16 同轴度示例

下图所示。

用以下三种方法来减小或避免测量误差，供参考。

● 增加基准截面间的距离

在测量基准元素时，若第一截面与第二截面的距离加大，误差将成正比减小。因此，测量时要有意识地拉开基准截面间的距离。若基准截面间的距离够远，同时基准与被检截面相邻，这个问题自然就解决了。

● 用公共轴线作为基准轴线

当基准圆柱与被测圆柱较短且距离较远时，我们可以采取用公共轴线作为基准轴线的方法，在基准圆柱和被测圆柱上测中间截面，其中截面连线作为基准轴线，然后分别计算基准圆柱和被测圆柱对基准轴线的同轴度，取其最大值作为该零件的同轴度误差。

● 考虑实际工作或装配要求作变通处理

例如长轴短孔的处理：电机机座前端和后端止口内圆孔的同轴度两端内孔的同轴度要求（如图 4.33 所示），以一端内孔轴线为基准求另一端内孔轴线与基准轴线的同轴度误差。如果按照上述基准进行测量就会产生两种相反的测量结果，且测量重复性差，检测数据不可靠。

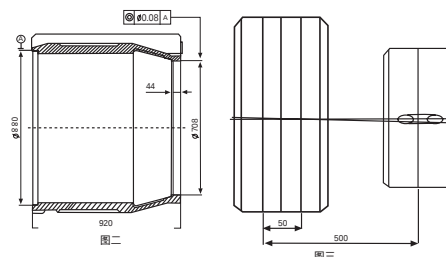


图 4.17 同轴度示例 2

为了使利用三坐标测量机测得的数据符合原设计要求，设想利用孔的端面做为基准（抱轴箱有端面与孔的轴线垂直度的要求），将两端短圆柱分成若干个截面圆进行测量，然后将截面圆投影到端面上，即可得到所有截面圆的圆心的坐标位置，通过计算找出最大的圆心距： $r = \sqrt{X^2 + Y^2}$ 则根据同轴度的定义，两端孔的同轴度 $\Phi f = 2xr$ 。为利用孔的端面作为基准来检测同轴度误差的方法，均能达到满意的测量效果。

● 变通处理—改测同轴度为测直线度

同轴度为被测元素和基准元素轴线间最大距

离的两倍。即计算出被测元素和基准元素的最大距离 d_s 后, 乘以 2 即可。

在被测元素和基准元素上多采截面, 然后用圆心构造出一条直线, 近似用直线度代替同轴度 (直线度 $\times 2$)。

对于被检工作截面距离较短 (短圆柱) 的情况, 可以采用变通的方法, 改测同轴度为测直线度。因为这种情况下轴的倾斜对装配影响较小, 而轴心偏移对装配影响较大, 轴心偏移的测量, 实际就是测量轴心连线的直线度。具体实现方法是: 分别在两个小圆柱上测 n 个截面圆, 然后选择这几个圆, 建立一条直线, 这条直线的直线度就可显示出来。这种方法工作截面越短, 效果越好。用一只综合量规来验证了这种方法的准确性。

7. 测量编程的几种模式

编程模式可分为: 联机编程, 脱机编程和自动编程。

7.1. "联机编程"

又叫"自学习"功能,

现代的测量机软件一般都具备“自学习”功能。所谓“自学习”, 指的是为了精确测量某一零件或是为了能自动测量相同的一批工件, 计算机把操作者手动操作的过程及相关信息记录下来, 并储存在文件中的一种功能。重复测量时, 只需调用该文件, 便可自动完成记录的全部测量过程。

联机编程优点是简单易学; 缺点是编程时会占用太多的测量机时间。

7.2. 脱机编程

脱机编程是在另一台计算机上, 安装测量软件, 根据图纸和测量要求, 在测量软件提供的编程平台上进行编程。

有脱机编程功能的测量机, 其有效工作时间较一般的测量机提高一倍或更高。

7.3. 自动编程

自动编程是基于 CAD 数据文件, 自动生成检

测规划和测量路径的编程方法, 是测量行业追求的目标。

真正实现无人自动测量。其含义是测量机一方面读取 CAD 文件, 自动构筑虚拟工件, 并根据虚拟工件自动建立检测规划, 自动生成测量路径, 自动完成检测, 并将实际工件的检测结果反馈给主控计算机。

软件 PC-DMIS 提供了脱机和联机自学习编程环境, 支持 DMIS。与 6 种 CAD 系统实现无缝连接。Solidwork 软件平台下还实现在 PC-DMIS 自动编制检测程序的能力。

8. 在测量平台上进行二次开发

二次开发能力, 包括内部编程能力和外部编程能力。内部编程能力是指测量软件本身提供的编程能力, 比较优秀的测量软件都提供两种内部编程环境:

8.1. 内部编程

8.1.1. 利用 DMIS 编程语言环境

DMIS 是通用测量机编程语言, 是测量机尺寸测量接口行业标准, 为使用者在测量上提供更大的灵活性, 提高工作效率, 同时在该环境下编写的零件程序具有通用性, 略加修改可以运行在不同厂家生产的测量机上 (前提是使用的测量机其测量软件必须支持 DMIS 编程语言环境)。

●在 PC-DMIS 平台下进行 DMIS 零件编程 (内部编程 I)

PC-DMIS 软件提供了一功能键, 使 PC-DMIS 程序和 DMIS 程序自动切换, 即使您不懂 DMIS 语言, 也可以编写和输出 DMIS 程序。

8.1.2. 测量软件本身提供的编程语言环境

编程语言简单, 可读性强。但由于编程环境是解释性语言, 计算速度不高, 对一些比较复杂的评价, 测量软件本身的编程能力很难满足要求, 需要外部编程能力的支持。另外此类编程语言没有通用性。

●PC-DMIS 零件编程（内部编程 II）

PC-DMIS 软件提供非常友好的内部编程环境，可以通过自学习自动记录程序。同时零件程序编辑器提供智能功能，通过功能键 F8 自动切换命令，使零件编程工作变得轻松、快捷。

PC-DMIS 软件与多个 CAD 软件系统实现直接数据传递，使脱机编程变得直观和容易。用户通过点击屏幕上的零件数模，PC-DMIS 自动记录程序命令，对程序进行仿真运行，检查测量路径轨迹的正确性。脱机编写的 PC-DMIS 程序可以直接联机运行，节省测量机时间，减少因为误碰撞造成的损失，提高工作效率。

8.2. 外部编程

8.2.1. 利用 VB/VC 外部编程能力

外部编程能力是指在测量软件平台下，通过 VB/VC 等高级编程语言进行高级编程的能力。

PC-DMIS 测量软件提供了强大的内部编程能力和外部编程能力，用户不仅可以进行灵活的零件编程，也可以通过 VB/VC/.NET 高级语言进行高级编程。通过外部编程方式在 PC-DMIS 测量软件平台下，我们开发了齿轮专用测量评价软件包，叶片测量评价软件包，PC-DMIS 与 EXCEL 之间数据传递等应用程序，扩大了 PC-DMIS 测量软件功能和应用领域。

下面通过一些简单的编程例子，仅仅展示编程思路，程序本身的意义对您没有太大价值。

●利用 VB 编程（外部编程事例 I）

通过一事例，描述 VB 编程全过程。下面这个例子是用 VB 实现特殊测量结果报告的输出，也就是 PC-DMIS 测量完成后，把所有测量点坐标提取出来直接写到一个 ASCII 文件中。

步骤1：打开 PC-DMIS 软件。

步骤2：编写测量点元素的 PC-DMIS 程序。

运行该 PC-DMIS 程序后，得到了一些点坐标和圆心坐标，下面我们编制一 VB 程序，从测量结果中取出点坐标，并保存到一文件中。



图 4.18 VB 选择菜单“文件”

步骤3：打开 VB 软件，编写 VB 程序。

打开 Visual Basic，选择菜单“文件”->“新建工程”，这时出现一对话框让你选择新建种类，如下图：

步骤4：工程文件类型

选择“标准 EXE”并按“确定”，这时 VB 就进入一个可供编程的新工程，该工程开始时提供了一个空的 Form，如下图：

步骤5：添加命令按钮

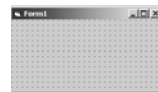


图 4.19 空的 Form

通过工具菜单，在新工程中，添加命令按钮，方法是：

在 VB 左边的工具栏中，我们选择 CommandButton，并在这个空的 Form 中“画”一个 Button。在右边的属性栏中，首先修改“名称”为 cmdGetPointsData，然后修改“Caption”为“取出测量点数据”，这里设计的 Form 为：



图 4.20 添加命令按钮

用鼠标双击 Button，这时 VB 产生一个空的 Function，如下：

```
Private Sub Command1_Click()  
  
End Sub
```

步骤6：引用 PC-DMIS 编程接口。

把 PC-DMIS 编程接口引用到该工程中，方法是：

选择菜单“工程”->“引用”，这里出现引用对话框，在“可用的引用”中找到 PC-DMIS3.5（或3.2）并选择上，如下图：

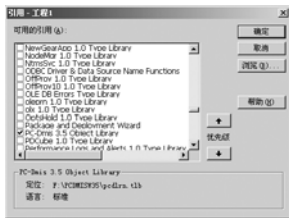


图 4.21 “可用的引用” 菜单

确定后，PC-DMIS 的接口库 PCDLRN.TLB 就被加入到我们的工程中了。

步骤7：在函数中添加内容。

在函数中添加内容，完成设计要求动作，方法是：

在 Command1_Click()函数体中加入程序代码，

```
Private Sub Command1_Click()
```

```
Dim appPcdmis As New PCDLRN.Application
```

```
Dim prtsPcdmis As PCDLRN.PartPrograms
```

```
Set prtsPcdmis = appPcdmis.PartPrograms
```

```
Dim prtPcdmis As PCDLRN.PartProgram
```

```
Set prtPcdmis = appPcdmis.ActivePartProgram
```

```
Dim cmdsPcdmis As PCDLRN.Commands
```

```
Set cmdsPcdmis = prtPcdmis.Commands
```

```
Dim cmdPcdmis As PCDLRN.Command
```

```
Dim featName As String
```

```
Dim measX, measY, measZ As String
```

```
Dim theoX, theoY, theoZ As String
```

```
Open "c:\point.txt" For Output As #1
```

```
For Each cmdPcdmis In cmdsPcdmis
```

```
    If cmdPcdmis.Type=
```

```
    AUTO_VECTOR_FEATURE Then
```

```
        featName = cmdPcdmis.ID
```

```
        measX = cmdPcdmis.GetText(MEAS_X, 0)
```

```
        measY = cmdPcdmis.GetText(MEAS_Y, 0)
```

```
        measZ = cmdPcdmis.GetText(MEAS_Z, 0)
```

```
        theoX = cmdPcdmis.GetText(IHEO_X, 0)
```

```
        theoY = cmdPcdmis.GetText(IHEO_Y, 0)
```

```
        theoZ = cmdPcdmis.GetText(IHEO_Z, 0)
```

```
Print #1, featName + " X "+ " Y "+ " Z "
```

```
Print #1, "ACT ", measX, measY, measZ
```

```
Print #1, "NOM ", theoX, theoY, theoZ
```

```
Print #1,
```

```
End If
```

```
Next
```

```
Close #1
```

```
End Sub
```

步骤 8：执行 VB 程序

执行 VB 程序（PC-DMIS不能关闭,否则VB程序执行后,没有结果输出）。出现如下对话框：



图 4.22 选用命令按钮

按“取出测量点数据”按钮，您可以在 c:\目录下发现一个名为 point.txt 的文件，该文件内容如下：

PNT7	X	Y	Z
ACT	224.85	296.248	-17.463
NOM	225	96	-17.463
PNT8			
ACT	79.5	87.082	0
NOM	80	87	0
PNT9			
ACT	146.77	0	-12.645
NOM	147	0	-12.645
PNT10			
ACT	114.495	9.414	0
NOM	114.5	10	0

这样，我们就把数据从 PC-DMIS 中成功的取了出来，存到了指定的文件中。

8.2.2. PC-DMIS 与 EXCEL 之间的数据传递（外部编程示例 II）

EXCEL 是非常优秀的制表软件，用户可以根据自己的需要，制做各式各样的个性化的表格，虽然表格设计容易，但添置和录入数据是非常麻烦的事。下面通过一示例，说明如何把测量数据自动添置到设计好的EXCEL表格中。

步骤一：打开 EXCEL 软件



图 4.23 打开 EXCEL 软件

步骤二：设计你期望的表格样式



图 4.24 期望的表格样式

步骤三：在适当位置插入图片



图 4.25 插入图片

步骤四：在图片上按右键,进入指定的宏

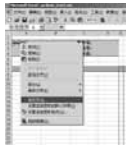


图 4.26 指定的宏

步骤五：选择已有宏，或新建立宏，进入 VB 编辑器



图 4.27 VB 编辑器

步骤六：建立 VB 程序

步骤七：关闭编辑器

步骤八：打开 PC-DMIS 软件



图 4.28 打开 PC-DMIS 软件

步骤九：测量 5 个点元素并进行评价

步骤十：双击 EXCEL 表格中的图标

在 EXCEL 中，双击表格中的图标，PC-DMIS 软件中评价的数据将会自动传递到 EXCEL 表格中。

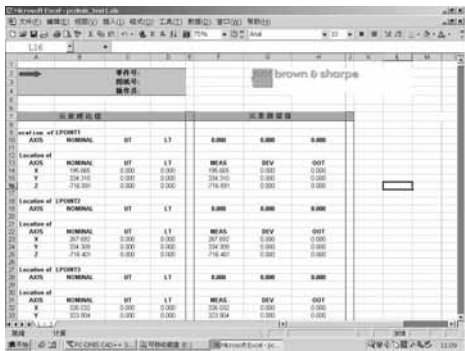


图 4.29 数据自动传递到 EXCEL 表格

9. 测量软件 DCI/DCT 与 CAD 的直接接口

9.1. DCI – 直接的 CAD 接口

具有直接的 CAD 接口的测量软件应当具备与主要 CAD/CAM 系统的直接接口，也就是说不需要做任何中间转换，直接识别相应 CAD 系统的默认输出文件格式，减少因为转换造成的特征丢失和精度损失，提高工作效率，同时这也是完成自动控制一体化的重要组成部分。在制造业中常用的 CAD 系统通常包括：Unigraphics，Catia，

Pro/Engineer, I-DEAS 和 ACIS。

所说的测量软件与 CAD/CAM 的直接接口意味着软件系统可以简便地导入和编译不同格式的 CAD 文件，包括 IGES, DXF, STEP, VDAFS, DES, XYZIJK 等通用格式在内的 CAD 图形数据。

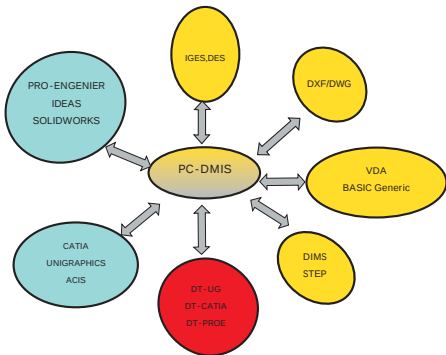


图 4.30 测量软件与 CAD 的接口

图中蓝色为可以利用 DCI 的软件，红色为可以进行 DCT 的软件，黄色为通用的数据格式

9.2. DCT – 直接 CAD 翻译器

PC-DMIS 测量软件提供 DCT（直接 CAD 编译器）/DCI（直接 CAD 接口）两个选项软件包，方便不同行业的用户使用。

PC-DMIS 软件的直接 CAD 编译器™（DCT）功能选项，即使在用户不具备某种特殊 CAD 系统的时候，仍然可以使用原始 CAD 模型中的数据。不需要将 CAD 系统文件转换成 IGES 格式文件，直接由原始的 CAD 格式导入到 PC-DMIS 中。目前提供 Unigraphics, Catia, Pro/Engineer 三种 CAD 软件接口。PC-DMIS 软件的直接 CAD 接口（DCI）功能选项，要求用户必须具有相应 CAD 软件的运行许可的情况下，可以使用原始 CAD 模型中的数据。不需要将 CAD 系统文件转换成 IGES 格式文件，直接由原始的 CAD 格式导入到 PC-DMIS 中。目前提供 Unigraphics, Catia, Pro/Engineer, SOLIDWORKS, ACIS, I-DEAS 六种 CAD 软件接口。

DCI/DCT 是 PC-DMIS 软件的选项模块软件，拓展了 PC-DMIS 功能，使 PC-DMIS 测量软件与 CAD 软件实现了真正的无缝连接，DCT 选项适合于一些小型的配套厂和模具行业，他们没有相应 CAD 系统的运行许可，但可以使 PC-DMIS 直接识别相应 CAD 数据文件。

10. 薄壁件测量

薄壁件（sheet metal）件薄易变形，使测量变得非常复杂，不论在建立基准方面，还是进行特征元素测量方面，如果没有相应的测量手段和方法，测量误差会很大或根本不能给出测量结果。

PC-DMIS 测量薄壁件所具备的优点：

10.1. 与 FIVE 专用柔性夹具系统相结合

根据设计部门提供的 RPS 点装夹零件，减少变形。

10.2. PC-DMIS 的薄壁件测量模块

10.2.1. 提供了孔寻找功能

能够对较易变形的零件完成自动测量

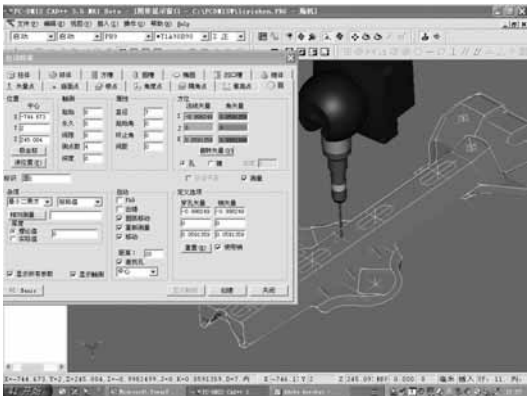


图 4.31 孔寻找功能

10.2.2. PH10 自动定向功能

根据几何元素的理论位置和矢量方向，确定测量的最佳 PH10 角度，自动旋转到最佳角度完成测量。

10.2.3. 特殊测量功能

提供方形槽，圆形槽，切口，边缘点，高点，角度点，拐角点，表面点的测量。

10.2.4. 允许用户自己定义法矢方向

自动给出使用冲孔和销子的矢量。

10.2.5. 利用最小二乘法，矢量法和最大/最小条件法完成二维和三维的最佳拟合，控制匹配方向和平移量

● 下面以一个零件为例说明薄壁件测量全过程。

步骤一：建立零件坐标系

PC-DMIS 提供的迭代法建立坐标系，是普通建坐标系方法无可替代的。特别是对坐标系不在被测零件上或者即使在工件上也无法找到相应的基准去建立零件坐标系时，此建立坐标系的方法尤为重要。例如汽车、飞机上的零件可能来自不同的厂家，但他们的坐标系可能都设置在车身或机身上。迭代法建立坐标系是通过工件上给定的参考元素（定位元素）通过自动逼近的算法，将工件坐标系和 CAD 上的坐标系很好的匹配在一起。下图是一个飞机把手零件。

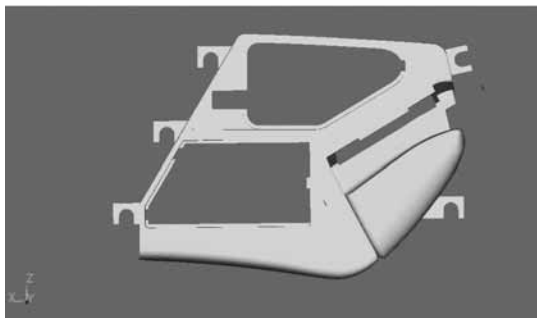


图 4.32 飞机把手零件

在 CAD 模型上提取 6 个理论点，并在实际工件的对应位置上测量这些点，用最佳匹配法自动逼近建立该零件坐标系。

步骤二：曲面点测量

在薄壁件的测量中有时对于边界和曲面上的点会有一些特殊的要求，在薄壁件模块中设置了曲面点和棱点、角度点等功能。对于自由曲面上的一个点来说，它的矢量方向是很难确定的，在曲面点中首先在理论点的周围采三个点来确定一个小面，用这个面的矢量方向来代替点的矢量方向，从而使测量点更精确。（图 4.33）

步骤三：边界点测量

边界点可以用来检测薄壁件的边界是否符合要求，通过在边界相交的两个面上采点可以计算出边界的情况。如图所示的黄箭头表示负向超差，即实际边缘向里凹了。（图 4.34）



图 4.33 点的矢量方向

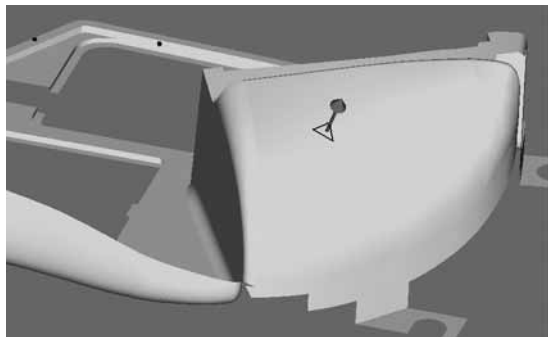


图 4.34 边界点测量

步骤四：点评价

对于点的评价设置了逼近矢量方向偏差、曲面矢量方向偏差，例如我们测量一个点时仅关心矢量方向上的偏差而不关心其他方向时可以通过选择矢量方向上的偏差，则偏差仅在矢量方向上计算，其他方向为零；我们也可以选择报告矢量来自自己定义偏差的计算方向，满足不同客户的需求，得到您想要的方向上的偏差。

步骤五：高点测量

该功能可以在指定的范围内找出曲面上的最高点。

步骤六：常规方法测量相关元素：

对于圆锥、椭圆、圆槽、方槽和半开口槽、用常规方法进行直接测量。

步骤七：孔查找功能

在测量时，尤其是一些冲压件有可能存在偏差较大的元素，必须使用查找孔功能进行测量。方法是先在理论元素的周围以螺旋线的方式自动寻找元素的位置，找到后再进行测量，此方式避免了测头的碰撞，可以自动完成变形比较大的部件的测量。

步骤八：曲线曲面分析功能

PC-DMIS 强大的曲线曲面功能，可以评价自

由曲面的轮廓度并将其轮廓度在 CAD 上通过图形和文本的方式显示每一个点的测量偏差，并且通过各种颜色的箭头表示超差、合格的程度。使测量结果更直观，清晰。更好的指导生产和进行质量控制。

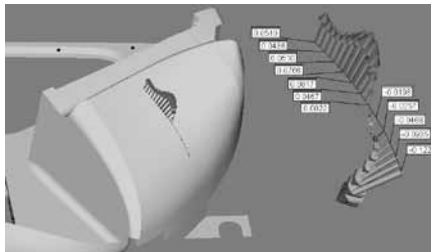


图 4.35 曲线曲面分析

11. 逆向工程中比较常用的 CAD 软件

下面介绍几个比较著名的逆向工程 CAD 软件。

* GeoMagic(www.geomagic.com)

美国 RainDrop 公司的逆向工程 CAD 软件，具有丰富的数据处理手段，可以根据测量数据快速构造出多张连续的曲面模型。软件的应用领域包括了从工业设计到医疗仿真等诸多方面，是比较优秀的逆向工程软件之一。

* ImageWare (www.imageware.com)

作为UG NX中提供的逆向工程造型软件，ImageWare 具有强大的测量数据处理、曲面造型、误差检测功能。可以处理几万至几百万的点云数据。根据这些点云数据构造的 A 曲面 (CLASS A) 具有良好的品质和曲面连续性。ImageWare 的模型检测功能可以方便、直观地显示所构造的曲面模型与实际测量数据之间的误差以及平面度、圆度等几何公差。

* CopyCAD (www.delcam.com)

CopyCAD 是英国 DelCom 公司系列 CAD 产品中的一个，主要处理测量数据的曲面造型。DelCom 的产品涵盖了从设计到制造、检测全过程。包括 PowerSHAPE、PowerMILL、PowerINSPECT、ArtCAM、CopyCAD、PS-TEAM 等诸多软件产品。作为一个系列产品的一部分，CopyCAD 与系列中

的其他软件可以很好地集成，为用户的使用提供方便。

* RapidForm (www.rapidform.com)

RapidForm 是由韩国 INUS 公司开发的逆向工程 CAD 软件。主要用于处理测量、扫描数据的曲面建模以及基于 CT 数据的医疗图像建模，还可以完成艺术品的测量建模以及高级图形生成。RapidForm 提供一整套模型分割、曲面生成、曲面检测的工具，用户可以方便的利用以前构造的曲线网格经过缩放处理后应用到新的模型重构过程中。

12. 测量软件的发展方向

测量软件包的发展，首先是要突破一个企业、一个计量室、一台测量机、一套软件这样的传统使用模式，测量软件正在向企业质量控制的广度和深度两方面发展。



图 4.36 PC-DMIS的企业级计量解决方案(EMS)

首先，企业有多种测量和计量设备，对一个零件的测量可能会用到不同的检测工具，能否在一个共同的软件平台上来检测和表达测量结果？另一方面，数字制造技术统一了产品的设计、制造、检验的全过程，这给使用统一的软件平台来实现各个环节的质量控制也提供了条件。出于这个目的，Brown & Sharpe 公司正在推出一个企业级计量软件包，简称 EMS (Enterprise Metrology Solution)。

企业级计量解决方案，可使制造商实现测量和检测操作的整合。上述操作是通过使用拓展功能的 PC-DIMS 软件模块实现的。这些模块包括：

PC-DMIS 检测规划™, PC-DMIS 视频™, PC-DMIS 数控™, 网络报告™, 它们既可单独使用, 又可结合起来进行尺寸数据的收集和分析。

PC-DMIS 检测规划模块可利用 CAD 模型的算法和工具创建检测特征目录, 而不需要将原始的 CAD 模块进行编译。PC-DMIS 视频模块可将工件的 CAD 视图与通过摄像头拍摄的实景联接起来。PC-DMIS NC 模块为配备测头的机床提供支持, 为规划、首件检测到最终检验提供了效率。网络报告™模块使得测量结果能够被工厂、企业或供应链通过互联网或者是局域网仅凭简单的网络浏览共享。

在另一方面, 三坐标测量机越来越多的深入到生产线, 成为取代专用检具的在线测量设备、在线测量具有两个鲜明的特点: 一是要求系统集成, 除了测量机本身的工作环境要满足在线设备的一般要求外, 测量机软件包要参与到生产线的信号流控制, 例如上下料机构动作、零件自动识别、测量结果在线反馈、安全保护系统等。在线测量软件包的第二个特点是针对性强, 仅需要一个简洁的界面来调用执行有限的几个零件程序即可。

对每个生产线用户的特殊要求进行独立编程是不科学和不经济的, 因为其工作周期和可靠性测试问题。而利用通用软件包进行定制是一个通用的解决方案。这就要求通用软件包具有很强的定制和二次开发能力。所谓定制, 包括操作界面和零件程序两个方面。界面定制可以按测量需要作到操作最简化, 而零件程序的定制则是指可以对一个测量程序的自由分割。例如一个完整的零件检测程序, 用在最后的产品出厂检验中, 但同时也可以分解为各个工段使用的工序检测程序和生产线控制系统的集成, 需要对通用软件包进行二次开发, 增加接口控制能力。要求测量软件包支持专业开发工具平台, 例如最常用的 VB、VC。同时开放所有内部功能调用, 包括测量数据处理和测量机运动控制。

测量软件包的多样性和性能差别使越来越多的用户希望具有自由选择权, 但前提是测量软件包必须建立标准化规范, 才能保证对不同机器的兼容性。DMIS (Dimension Measurement Interface Specification) 是较早在美国建立的一个测量机程序接口标准, 其目的是使不同的测量软件之间兼容零件程序, 但 DMIS 仅是一个接口标准, 简单地

说, 就是文件格式标准。有些人把它理解为测量机的编程语言标准则是错误的。正象 CAD/CAM 软件包也有 IGES、VDA、STEP 等接口标准一样, 不可能让各开发商放弃自己的内核数据格式, 因为这有一个程序设计的合理化和最佳化的考虑。同时作为标准, 其版本的更新总是要落后于现实发展的。先有技术的发展、完善和成熟才能上升到相关标准的更新。目前绝大多数测量软件包都能够支持 DMIS 接口标准。

测量软件包的另一个规范叫做 I++, 这是测量软件与控制系统的一个接口标准。这个标准是由全球最大的两个测量机生产商 Brown & Sharpe 集团和 ZEISS 发起的。因为专业的测量机都采用 CNC 分布式计算机控制系统, 测量机的运动控制和数据处理软件包使用独立的计算机, 上下位机通过发送和接收命令字符实现协调工作。显然, 命令字符的标准化, 将使测量软件包具有可更换性。但 I++ 标准应用到 DCC 控制的测量机上还有一定困难, 因为在这种简易的控制系统中, 运动控制系统由安装在主计算机内的一块多轴控制卡取代, 测量软件和控制软件的通讯是通过在操作系统的多任务环境下的 DDE 方式进行的。而通讯控制协议是因厂家而异的, 需由软件内部设定的, 无法实现“即插即用”。

随着新一代的产品几何技术规范 (Geometrical Product Specification, 简称 GPS) 标准体系的发展, 对误差定义、测量方法和数据处理准则将会有越来越详细的规定, 测量软件包对 GPS 标准的符合程度必将受到更严格的检验。同时, 在新的 GPS 标准中, 提出了由设计人员制定测量方案的思想, 也与现行的设计和检验人员完全独立工作的作法完全不同, 这些都会对测量软件包的发展产生极大的影响。

13. 超级报告应用示例——VB 高级应用编程

PC-DMIS 基于 VB 技术, 为用户提供了方便实用的编辑, 生成综合图形报告的功能。生成的报告中可以包括文本, 图表, 图标, 位图等格式文件。用户可以根据 PC-DMIS 提供的简单工具, 预先定义自己的输出报告模板, 当测量结束后, 自动生成定制报告, 并通过屏幕显示或打印机输出。

下面是三个特殊输出报告样例：

430-SF1300 检测报告

用户名称
航空工业西安(121) 1300

工件号
430_SF1300

操作者
2764



叶盘弯曲

B-B截面弯曲
0.007

C-C截面弯曲
0.02

D-D截面弯曲
0.008

叶盘扭转

B-B截面扭转
0.05

C-C截面扭转
0.042

D-D截面扭转
0.041

叶盘V点

测点值	允差值	上公差	下公差	偏差值
18.13	-18.026	0.15	-0.15	0.103
17.63	-17.684	0.15	-0.15	0.059
18.092	-18.068	0.15	-0.15	0.028

叶背V点

测点值	允差值	上公差	下公差	偏差值
18.114	-18.094	0.15	-0.15	0.02
17.423	-17.463	0.15	-0.15	-0.04
17.888	-17.834	0.15	-0.15	0.053

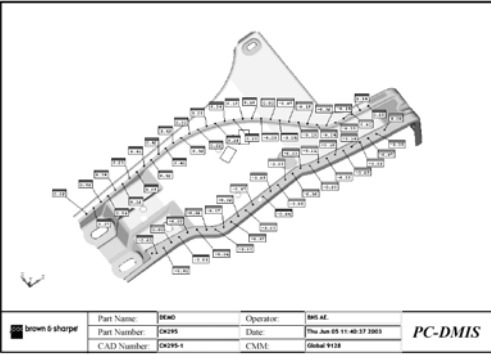
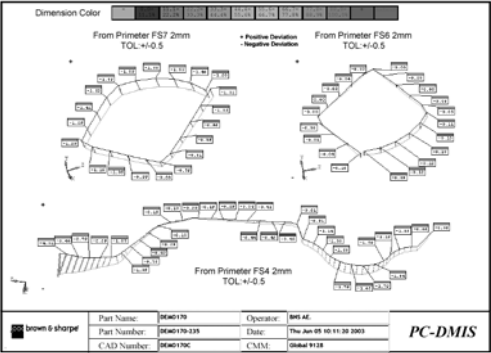


图 4.37 输出报告样例

第五章、探测系统

探测系统是由测头及其附件组成的系统，测头是测量机探测时发送信号的装置，它可以输出开关信号，亦可以输出与探针偏转角度成正比的比例信号，它是坐标测量机的关键部件，测头精度的高低很大程度决定了测量机的测量重复性及精度；不同零件需要选择不同功能的测头进行测量，由于测头是探测系统的主体，所以本章对于测头的讨论，许多地方实际是指探测系统。

1. 测头的分类

1.1. 触发测头与扫描测头

触发测头 (Trigger Probe)：又称为开关测头，测头的主要任务是探测零件并发出锁存信号，实时的锁存被测表面坐标点的三维坐标值。

触发测头一般发出的为跳变的方波电信号，利用电信号的前缘跳变作为锁存信号，由于前缘信号很陡，一般在微秒级，因此保证了锁存坐标值的实时性。

扫描测头 (Scanning Probe)：又称为比例测头或模拟测头，此类测头有的不仅能作触发测头使用，更重要的是能输出与探针的偏转成比例的信号（模拟电压或数字信号），由计算机同时读入探针偏转及测量机的三维坐标信号（作触发测头时则锁存探测表面坐标点的三维坐标值），以保证实时的得到被探测点的三维坐标，由于取点时没有机械的往复运动，因此采点率大大提高，扫描测头用于离散点测量时，由于探针的三维运动可以确定该点所在表面的法矢方向，因此更适于曲面的测量。

1.2. 接触式测头与非接触式测头

接触式测头 (Contact Probe)：需与待测表面发生实体接触的探测系统。

非接触式测头 (Non-Contact Probe)：不需与待测表面发生实体接触的探测系统；例如光学探测系统。

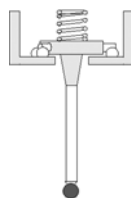
2. 接触式触发测头的基本原理：

2.1. 接触式触发测头的基本结构



图 5.1 触发测头基本结构

2.2. 触发测头工作时的基本动作



左图所示为测头处于回位状态。探针接触被测物体并与物体接触的力通过测头内部的弹簧力平衡，探针产生弯曲；探针绕测头内部支点转动，造成一个或两个接点断开，在断开前测头发出触发信号；然后机器回退，测头复位。

2.3. 触发测头工作时的电气原理：

触发测头通过触点形成电气回路；当测头与零件接触时测力增加、接触面积减小、电阻增加，当电阻到达阈值时，测头发出触发信号。

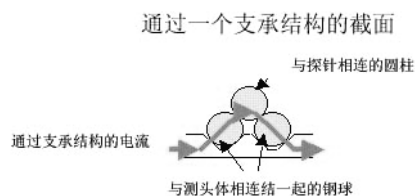


图 5.2 触发测头触点结构

局部放大图

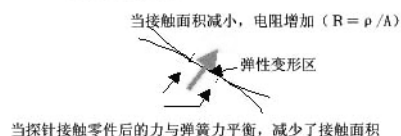


图 5.3 触发测头触点放大图

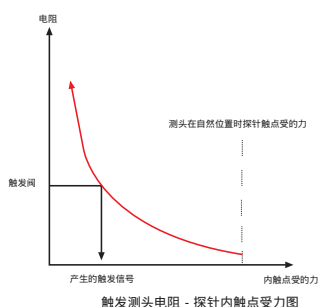


图 5.4 触发测头电阻-内触点受力图

接触式触发测头的重要性能要素：重复性、预行程的变化（各向同性评价：例如三角形效应）、反向误差。

重复性：表示测头每次在同一点触发的性能；一般重复性试验曲线为正态分布，取 95% 的可信度 2S（两倍标准偏差）作为重复性指标。

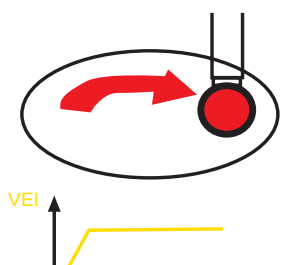


图 5.5 重复性实验曲线

预行程：从探针接触零件到测头发出测头信号这段时间，反映在测尖处探针的变形量，由于测头的结构原因，预行程与探测方向、探针长度有关。

反向误差：由于改变了探测方向而产生的误差；最大的反向误差产生在 XY 平面内的相反方向探测时，当探测力加大或探针加长时反向误差正比加大。通过使用测头的三点静定结构可减小反向误差。

3. 常用接触式触发测头

接触式触发测头主要包括：机械式触发测头（TP20）、应变片式触发测头（TP7、TP200）、压电陶瓷触发测头（TP800）。

3.1. 机械（电阻）式触发测头

机械（电阻）式触发测头的代表为 TP20，它

结构简单、体积小、耐用性好（ 10^6 次），预行程在 XY 平面内有较明显的三角形效应，目前最常用型号为 TP20，可实现自动更换探针。TP20 的单向重复性为 $0.35 \mu\text{m}$ （采用 10 mm 长探针），预行程的变化为 $0.6 - 0.8 \mu\text{m}$ （采用 10 mm 长探针）。

机械式触发测头的结构如图所示：

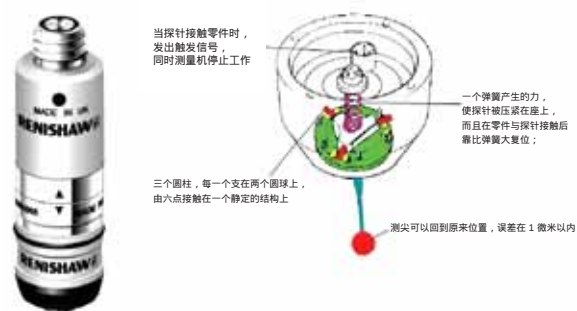


图 5.6 机械（电阻）式触发测头

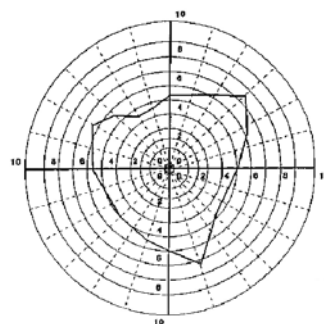


图 5.7 机械式触发测头预行程的三角形效应

3.2. 应变片式触发测头（TP7、TP200）

这种测头，利用应变片感受探针受力，触测力达到一定的阈值而触发，而不需要触点的机械通断，因此灵敏度高、寿命长；一般内部采用四片应变片，三片在 X、Y、Z 方向，一片主要进行温度补偿；做成了固体开关、具有高精度、高重复性的特点，寿命长（ 10^7 次），较小的预行程三角形效应，且可用较长探针（“G F”型最长达 100 mm），目前最常用型号为 TP200。

应变片式测头的单向重复性可达到 $0.25 \mu\text{m}$ （TP7，50 mm 长探针）， $0.4 \mu\text{m}$ （TP200，50 mm 长探针），预行程的变化 $0.25 \mu\text{m}$ （TP7，50 mm 长探针）， $0.8 \mu\text{m}$ （TP200，50 mm 长探针）。

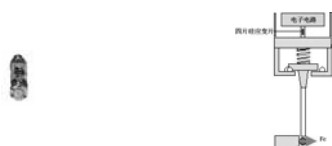


图 5.8 应变压式触发测头

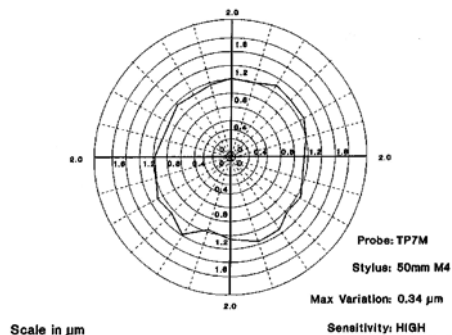


图 5.9 应变压式触发测头小的预行程变化

3.3. 压电陶瓷式触发测头 (TP800)

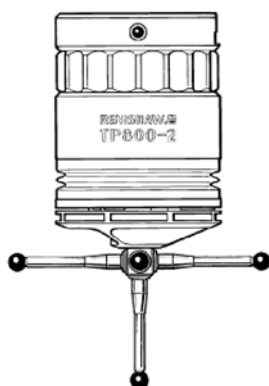


图 5.10 压电陶瓷式触发测头

利用压电陶瓷片感受探针接触零件的压力波而触发，不需要触点的机械通断，超高精度，极小的预行程三角形效应，且用较长探针（垂直方向最长达 350mm，水平方向最长达 200mm），要求测量机有极高的平稳性（速度变化小于 1mm/sec），否则易于误发信号，不适用于小直径测尖，被测对象的表面硬度及污物对测量有影响。压电陶瓷式测头的单向重复性可达到 $0.25\mu\text{m}$ （50mm 长探针），预行程的变化 $0.5\mu\text{m}$ （50mm 长探针）。

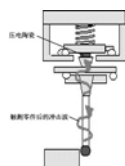


图 5.11 压电陶瓷式触发测头原理

3.4. 各类触发测头单向重复性及二维形状误差的比较

从上述图可以看出顺序为 TP800→TP7M→TP200→TP20，前面的能用更长的探针，而重复性及二维的形状误差均更小

下表列出了主要的接触式触发测头的特性（供应用参考），

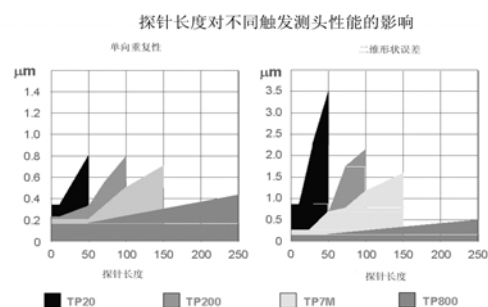


图 5.12 单向重复性及二维形状误差比较

	TP20 SF (10mm 探针 , 8mm/s 触测速度)	TP200 , (50mm 探针 , 8mm/s 触测速度)	TP7M (50mm 探针 , 4mm/sec 触测速度)	TP800-2 (4mm/s-20mm/s 触测速度)
工作原理	机械 (电阻) 式触发测头	应变片式	应变片式	压电陶瓷式
单向重复性	0.35 μm (10mm 探针)	0.4 μm (50mm 探针)	0.25 μm (50mm 探针)	0.25 μm (50mm 探针) , 1 μm (250mm 探针)
预行程	0. 6 μm -0.8 μm (10mm探针)	0.8 μm (50mm 探针)	0.25 μm (50mm 探针)	0.5 μm (50mm 探针)
三角形效应	有	无	无	无
最长探针	50mm	SF/EO : 50mm (钢) 100mm (碳纤维) L F : 20mm (钢) 50m (碳纤维)	150mm (钢) 180mm (碳纤维)	350mm (垂直方向) 200mm (水平方向)
探针螺纹	M2X0.4	M2X0.4	M4X0.7	M4X0.7
与测座连接	M8+PAA# (PH10M , PH10MQ , PH6M)	M8+PAA# (PH10M PH10MQ , PH6M)	自动更换方式 (PH10M , PH10MQ , PH6M)	与测量机主轴直接连接
与探针模块连接	自动更换方式	自动更换方式	无 (M4X0.7螺纹)	自动更换方式
额定寿命	10 ⁶ 次	10 ⁷ 次	10 ⁷ 次	
控制盒	PI4-2 , PI7-2 , PI200	PI200	PI7-2	PI-800-2
自动更换装置	MCR20	SCR200 , MSR1	自动更换架	

4. 接触式扫描测头

(常用)、SP600Q (用于小型机)

SP600 的性能:

4.1. 常用的接触式扫描测头 SP600 及其特性

RENISHAW SP600 系列: SP600、SP600M



图 5.13 常用接触式扫描测头

测量范围	用 50 mm 长的探针在所有方向为 $\pm 1\text{mm}$
分辨力	当用AC1时为 $1.0\mu\text{m}$ 当用AC2时为 $0.1\mu\text{m}$
弹簧力	1.2 N/mm在所有方向
阻尼	20% (X, Y, Z) 典型为在 23
操作温度环境	10 到 40
重量	SP600:172 克、SP600M: 216克、SP600Q:299克
尺寸	SP600 : $\phi 50\text{mm}$ max 89mm (不包括座柄) SP600M : $\phi 50\text{mm}$ max 107.5mm SP600Q : $\phi 60\text{mm}$ 见方座柄 x 99mm
最大探针长度	300mm
探针螺纹	M5
最大长度重量比	280mm/20g
采点率	500 点/秒 (用UCC1)
寿命	超过 50000 小时
自动更换探针系统	SCR600 或 SCP600+MPS
与测座连接	SP600 , 用柄与主轴直连 SP600M , 自动接口 (PH10M , PH10MQ , PH6M) SP600Q 直接嵌入主轴内部安装

4.2. SP25 接触式扫描测头:世界上体积最小的扫描及触发两用测头

SP25 的性能:

功能	扫描及触发两用
测量范围	所有方向为 ± 0.5mm
分辨力	0.1μm
弹簧力	0.2-0.6 N/mm
外径	25mm
与探针连接	M3
重量	100克 - 150克
探针长度	SM25-1: 20 mm -50mm SM25-2: 20 mm -75mm SM25-3: 20 mm -100mm
与测座连接	自动（PH10M，PH10MQ，PH6M）
与探针模块	自动（用接口TM25-20可用TP20探针通用模块）
自动更换装置	FCR25



图 5.14 SP25接触式扫描测头

4.3. RENISHAW SP80 系列:可用超长探针，又保持高精度的扫描测头

测头特点：内部用微型光栅作传感器，超高分辨率，移动部分无电线；

用三点定位装置快速与主轴离合；

探针自动更换；

三个方向防撞机构；

可用特长、特重、非对称探针；

无平衡电机、无发热源；
超高精度。

测量范围	所有方向为 ± 2.5mm
分辨力	0.02μm
弹簧力	0.2-0.6 N/mm
外形尺寸	80 mmX80mm 见方，150mm长
与探针连接螺纹	M5
重量	1140克
最大探针长度	500 mm
最重探针重量	500g
自动更换装置	SCP80+MRS

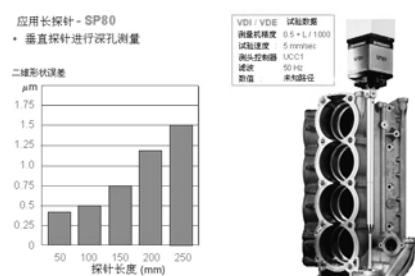


图 5.15 SP80 测头测垂直深孔能力

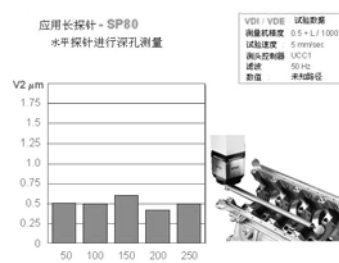


图 5.16 SP80 测头测水平深孔能力

4.4. 世界精度最高的测头-TRAX

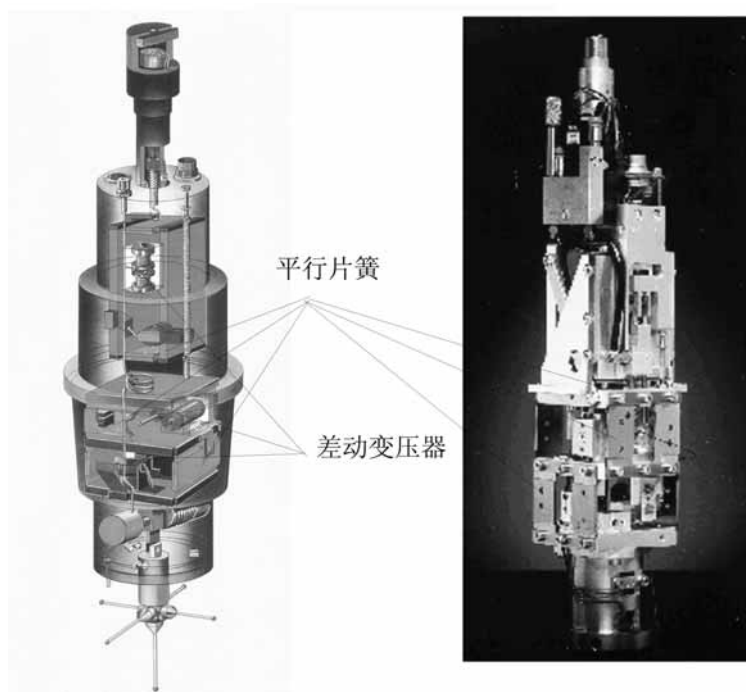


图 5.17 TRAX 测头

模拟测头

TRAX 模拟测头，他的工作原理和触发式测头不同，模拟测头内部每个轴向均有直线性差动变压器，当伸出测点时输出模拟信号，请看下图所示，

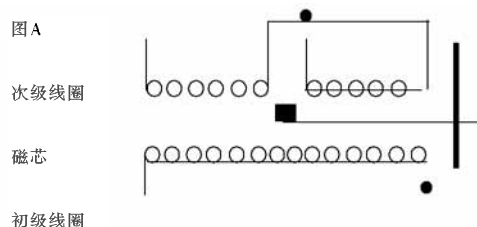


图 5.18 TRAX 测头原理

上图所示为直线差动变压器的工作原理：在初级圈内通 8 伏、18KHz 的交流电，两个次级线圈反向串联，当磁芯在平衡位置时，次级线圈两端输出电压为零，当磁芯在两个次级线圈内移动时，在次级线圈内感应了不同的电压，在移动距离和输出电压之间有相应比例关系及正负号：

在测头的三个方向各有一个相同的传感器

Trax 测头的特性：用作触发测量：30 点/分；

扫描测量速度：50mm/s 或 500 点/秒；

测力：0.01N-1.2N

最长可用探针：600mm

最大探针重量（包括头持器）1000g

MPE_V, MPE_D 是在 160mm 长探针情况下作出，扫描探测误差 MPE_{TH} 是在 80mm 长探针下作出，

4.5. 扫描测头的主要误差

高速扫描时由于加速度而引起的动态误差很大，不可忽略，必须加以补偿。

在扫描过程中，测头总是沿着曲面表面运动，即使速度的大小不变亦存在着运动方向的改变，因而总存在加速度及惯性力，使得测量机发生变形，测头也在变负荷下工作，由此而导致测量的误差，扫描速度越高影响越大，甚至成为扫描测量误差的主要来源。

图 5.19 所示为匀速圆形扫描，由于存在向心加速度（ V^2/R ），总有惯性力存在；图 5.20 所示为触发测头测量，在触测阶段总是在低速直线匀速运动状态，理论上加速度为零。

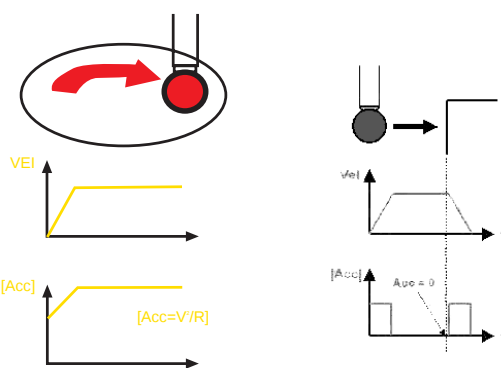


图 5.19 匀速圆形扫描时的速度加速度曲线 图 5.20 触发测量时的速度加速度曲线

实验表明在速度低于 10mm/sec 时，动态的影响较小。

4.6. 减小高速扫描时的动态误差的办法

改进测量机的结构刚性，但不要过多增加结构质量以免增加运动惯性力；

改进控制系统刚性及跟随性，保证高速扫描时测尖不会离开零件表面；

扫描测头结构本身应能适用于高速扫描；

最好的办法是量化动态误差并进行扫描动态误差补偿；

5. 选择测头的几点考虑

在可以应用接触式测头的情况下，慎选非接触式测头；

在只测尺寸、位置要素的情况下尽量选接触式触发测头；

考虑成本又能满足要求的情况下，尽量选接触式触发测头；

对形状及轮廓精度要求较高的情况下选用扫描测头；

扫描测头应当可以对离散点进行测量；

考虑扫描测头与触发测头的互换性（一般用通用测座来达到）；

易变形零件、精度不高零件、要求超大量数据零件的测量，可以考虑采用非接触式测头；

要考虑软件、附加硬件（如测头控制器、电缆）的配套。

5.1. 选用触发测头的场合

当零件所被关注的是尺寸（如小的螺纹底孔）、间距或位置，而并不强调其形状误差（如定位销孔），或你确信你所用的加工设备有能力加工出形状足够好的零件，而注意力主要放在尺寸和位置精度时，接触式触发测量是合适的，特别是对于离散点的测量。

触发式测头测尺寸、间距或位置比扫描测头快，触发测头体积较小当测量空间狭窄时测头易于接近零件。

一般来讲触发式测头使用及维修成本较低；

在机械工业中有大量的几何量测量，所关注的仅是零件的尺寸及位置，所以目前市场上的大部分测量机，特别是中等精度测量机，仍然使用接触式触发测头。

5.2. 选用扫描测头的场合

应用于有形状要求的零件和轮廓的测量：扫描方式测量的主要优点在于能高速的采集数据，这些数据不仅可以用来确定零件的尺寸及位置，更重要的是能用众多的点来精确的描述形状、轮

廓，这特别适用于对形状、轮廓有严格要求的零件，该零件形状直接影响零件的性能（如叶片、椭圆活塞等）；也适用于你不能确信你所用的加工设备能加工出形状足够好的零件，而形状误差成为主要问题时的情况。

高精度测量：由于扫描测头对离散点测量是匀速或恒测力采点，其测点精度可以更高。

同时，扫描测头可以直接判断接触点的法矢，对于要求严格定位、定向测量的场合，扫描测头对离散点的测量也具有优势。

对于未知曲面的扫描，亦即称为数字化的场合下，扫描测头显示出了它的独特优势：因为数字化工作方式时，需要大量的点，触发式测头的采点方式显得太慢；由于是未知曲面，测量机运动的控制方式亦不一样，即在“探索方式”下工作；测量机根据已运动的轨迹来计算下一步运动的轨迹、计算采点密度等。

5.3. 使用接触式测头和非接触式测头的场合

非接触测头的特点：

非接触测头没有测量力，适于柔软物体；非接触式测头取样率高，在 50 次/秒到 16000 次/秒之间，适于表面形状复杂，精度要求不特别高的未知曲面，例如汽车、家电的木模、泥模等。但非接触测头由于受物体表面幅射特性（颜色、光度、粗糙度、形状等）的影响较大，目前在大多数情况下，示值误差比接触式测头要大，保持在 10 微米级以上。同时，非接触测头的价格一般较贵。

选用非接触式测头的原则是：

在可以应用接触式测头的情况下，慎选非接触式测头；在只测尺寸、位置要素的情况下尽量选接触式触发测头；考虑成本又能满足要求的情况下，尽量选接触式触发测头；易变形零件、精度不高零件、要求超大量数据零件的测量，可以考虑采用非接触式测头；要考虑软件、附加硬件（如测头控制器、电缆）的配套。

5.4. 扫描测头的优势及劣势

优势：1、适于形状及轮廓测量；

2、高的采点率；

3、高密度采点保证了良好的重复性、再现性；

4、更高级的数据处理能力；

劣势：1、比触发测头复杂；

2、对离散点的测量较触发测头为慢；

3、高速扫描时由于加速度而引起的动态误差很大，不可忽略，必须加以补偿；

4、测尖的磨损必须注意。

5.5. 触发测头的优势及劣势

优势：1、适于空间箱体类工件及已知表面的测量；

2、通用性强；

3、有多种不同类型的触发测头及附件供采用；

4、采购及运行成本低；

5、应用简单；

6、适用于尺寸测量及在线应用；

7、坚固耐用；

8、体积小，易于在窄小空间应用

9、由于测点时测量机处于匀速直线低速状态，测量机的动态性能对测量精度影响较小；

劣势：测量取点率低。

6. 光学测头分类及原理

6.1. 两维光学测头：基于光学影像的两维测头

利用判断阴影及反光在光电器件上生成的特性类型（轮廓的灰度值），人工对准或自动发出锁存信号，锁存垂直于光轴方向的两维坐标值（测量机标尺给出，或光电器件本身坐标给出），此测头不能给出沿光轴深度方向的坐标值，如下图所示，并分别加以描述

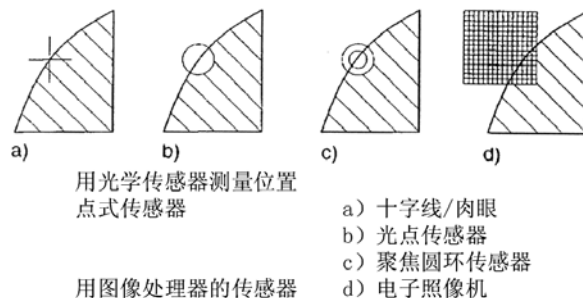
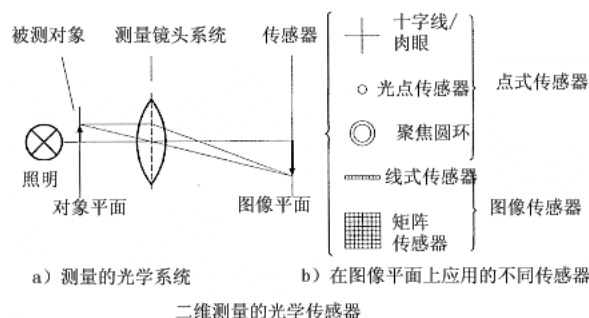


图 5.21 两维光学测头

6.1.1. 点式传感器

借助于光学的或光电传感器，此传感器只能探测轮廓上的点，当传感器的轮廓与被测物体的轮廓重合度满足条件时，则发出触发信号，这应当和相对运动的方向无关，此时传感器对称的圆周放置效果最好，具体有下述几类

6.1.1.1. 带十字线的视觉测头

带十字线的视觉测头：大多为手动操作使用因此受到人为判断的影响，精度要低一些，另外只能静态取数，效率稍低。

6.1.1.2. 光点传感器

当被测对象在光点中的阴影轮廓重合度满足条件（设定的阈值）时，产生触发信号，一般用背景光，很少用前景光。

6.1.1.3. 聚焦圆环式传感器

两个传感器均对称的圆周放置，两个尺寸相同的光电二极管平面作边缘探测器，形成一个圆区域及一个圆环区域，只有当圆及圆环的阴影或亮区面积相等时（两个传感器信号差为零），发出触发信号。

6.1.2. 图像处理器：线式或矩阵式

光学图像系统把被测对象的图像在电子相机的传感器上成像，传感器上具有单像素的分辨力，应用数字图像处理方法对图像进行处理。

一维线式或二维矩阵式结构的图像传感器，形成传感器的测量坐标系，把被测对象的特征点在传感器坐标系上确定下来，然后转换为零件坐标系，把各像素位置均存在图像存储器中，可以重复调用相应的像素位置及内存地址。

6.2. 三维光学测头

垂直于测头方向的两维坐标由测量机的坐标系给出，光轴方向尺寸由三角形原理或或聚焦原理由测量机探测轴的位置给出。

6.2.1 激光三角形原理的测头

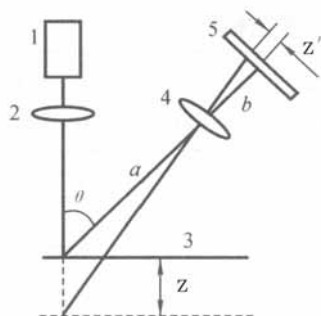


图 5.22 激光测头的三角形原理

图中 1. 激光器； 2. 透镜； 3. 被测表面； 4. 接受透镜； 5. 光电探测器；

设

a——激光束光轴和接收透镜光轴的交点到接收透镜前主面的距离；

b——接收透镜后主面到成像面中心点的距离；

θ ——激光束光轴和接收透镜光轴之间的夹角

由相似三角形得：

$$z/a = (z' / \sin \theta) / (b - z' / \tan \theta)$$

$$\text{最后得到 } z = a * z' / (b * \sin \theta - z' * \cos \theta)$$

对于激光测头a, b, θ ，为常数，由上述公式

就建立了 z' ， z 的一一对应关系， z' 的变化就反映了被测物体在高度方向的变化，超出激光测头的景深则由测量机移动Z轴来实现，而X, Y的位置由坐标测量机给出。

激光测头的三角形原理的改进(NEXTEC)

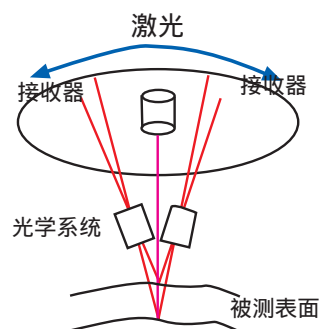


图 5.23 改进的三角形原理 1

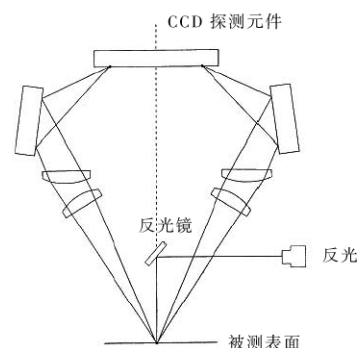


图 5.24 改进的三角形原理 2

以色列发展了加强型三角原理的激光测头，用多个在不同角度的接收器（结构上利用享有专利的结构，相当于无限多个 CCD 接收器），同时自动对激光的功率及 CCD 的曝光时间进行调节，对信号作实时处理，改进了对物体边缘、陡峭斜面，不同反光及颜色表面的测量性能，对光亮表面亦不需要涂层就可以工作，是目前精度较好的点激光测头；重复性 0.002mm，精度 0.01mm，取点率 50 点/秒。

线扫描激光 (KREAN)

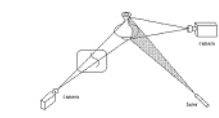


图 5.25 线扫描激光的原理

法国 KREAN 公司发展了基于三角法的线激光扫描测头，用双 CCD 照相头来接收反射光，

取点率 10000 点/秒、精度 $\pm 25 \mu\text{m}$ (3 Sigma)；
景深：60 mm

线扫描激光(Metris)



图 5.26 线扫描激光

根据不同型号 LC15 (LC50)
此类测头取样率可以达到 19200/s
激光带宽度为 15 (50mm)
视场可以达到 15 (50mm)
精度为 8, (15-20 μm) -1 σ 测球
分辨力为 0.025 (0.1mm)
探测距离为 100 mm

6.2.2. 激光聚焦传感器

工件反射激光由差动二极管接收
只有聚焦准确时才能给出相应触发信号

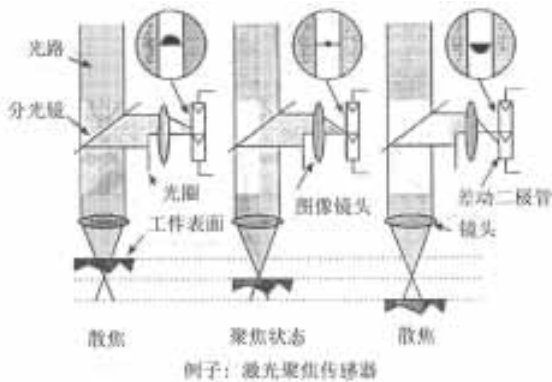


图 5.27 激光聚焦传感器

6.2.3. 视觉自动聚焦

根据光学聚焦情况，锁存相应位置坐标

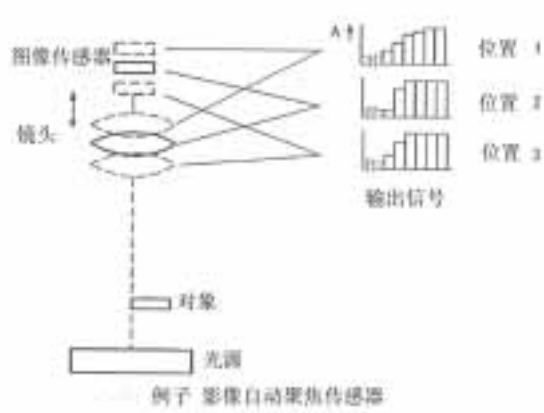


图 5.28 影像自动聚焦传感器

7 光学测头存在的特殊问题，

7.1. 两维光学测头

7.1.1. 中心光源时放大倍数的高度效应或表面倾斜效应

高度方向尺寸扩展，放大倍数发生变化，边缘在平面上两维坐标值会偏移，表面倾斜或光轴方向为弯曲形状也会产生类似的效应，改进的办法为不用点轴测光源而用平行光（远焦镜头系统），或作适当的补偿

7.1.2. 照明方式（背景光还是前置光）

影响探测误差大小，例如背景光情况下，高的边缘影响边缘的位置测量，前置光对圆滑边缘的位置测量会产生偏移；

7.1.3. 被测物体的特性

被测表面情况，粗糙度、颜色等，
欲探测边缘的质量，圆角等

7.1.4. 测头引进的误差：

人为误差，十字线用肉眼判断带来不可忽略的人为误差，还可能十字线平面与被测物体平面不平行而带来的视差

点或环式测头自身的校准不好而带来误差

欲探测边缘在平面内的半径，若被测对象的曲率相对点测头光点半径不可忽略，则应作数学修正。

光电探测器的局部不均匀特性，造成二维的探测误差

局部或随时间变化的不良照明

带图像处器的测头系统的放大倍数及畸变均应校准，影像坐标系统相对于零件坐标系统的扭曲，应有要求，因为它影响传感器坐标系到零件坐标系的转换。

7.2.三维光学测头

7.2.1. 三角形原理激光：表面明暗的突变、突跳的台阶，倾斜的表面或曲面以及直接反射光都会导致误差

7.2.2. 视觉聚焦传感器，表面过于光滑、太亮，倾斜的表面或曲面

8. 测座的选择

测头在坐标测量机中通常通过测座进行固定。测头信号通过测座同坐标测量机控制系统的测头接口相连。测座有多种，主要分为固定测座、手动可旋转测座、万向探测系统三种。

固定和手动旋转测座

对于小型、手动坐标测量机来说，手动可旋转的测头因其无特殊电缆及电路需求而尤为合适。这些小巧、完备的测头系统使操作者较容易在进行元素测量过程中进行测头的重新定位。操作者只需在测量过程中对所需位置的针尖数据进行一次标定，在以后的测头定位过程中不需进行重新标定，从而大大节省了检测周期。大多数手动可旋转定位测头的重复性可达 $15\text{ }\mu\text{m}$ (2°)。

8.1. 固定测座、万向探测系统的不同应用场合（例如 PH10）

万向探测系统在数控测量机的配备中已接近成为标准配置，这是由于它的优越性能和万能性，对于测量复杂零件，特别是需要从不同方向触测

的零件来说亦是成本最低的方案；固定测座由于不能旋转，对于复杂零件的测量需多根探针；但占用测量机空间小，没有旋转误差。

万向探测系统（例如 PH10M，PH10T，PH10MQ）的优缺点：

采用万向探测系统灵活性较强，可利用一个探针，从不同方位来触测零件。采用这种系统，可以快速旋转变位；自动化更强，与测量机的控制系统组为一体，操作极为方便；可以与自动更换探针系统组合，扩大了功能。但这种测头系统的缺点在于占用测量机空间较大。

转动速度：3.5 秒时间内可以转动 90° 定位；

定位精度：在测头长 62mm 时，重复性为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ x



图 5.29 PH10T、PH10M、PH10MQ 的差别

	测座安装方式	与测头的连接
PH10T	测座柄	M8螺旋连接
PH10M	测座柄	自动结合装置
PH10MQ	安装在主轴内	自动结合装置

8.2 固定式测座的优缺点

固定式测座的优点在于体积小，占用测量机空间小，同时结构简单、成本较低；整体结构刚性好，能够安装更长的探针。固定式测座具有一定的灵活性：若配上探针自动更换系统亦能适用于复杂情况，同时精度较高。

但是，固定式测座在测量不同的元素时的可触及性较低，有些情况不得不用星形或 T 型探针，同时，固定式测座效率较低，进行探针更换需要较长时间。

连续旋转测头座 CW43L

可用长度达 600mm 的加长杆而保持精度，由于可以连续旋转，因而可以探测任意方向的深孔；端部可以连触发测头 TP6 或 TF8(图 5.30)



图 5.30 连续旋转测头座

CW43L 技术参数(Characteristics):		
有效角度量程 Useful Angular		• 转动轴 Roll Axis : $\pm 180^{\circ}$
		• 俯仰轴 Pitch Axis : $\pm 112^{\circ}30'$
分辨率 (B5CS 控制系		• 转动轴 Roll Axis : 6.8×10^{-7} 弧度.
		• 俯仰轴 Pitch Axis : 6.8×10^{-7} 弧度.
加速度 Acceleration:		• 转动轴 Roll Axis : 10 弧度/ s^2
		• 俯仰轴 Pitch Axis : 10 弧度/ s^2
转动速度 Rotation Speed:		• 转动轴 Roll Axis : 1 弧度/s
		• 俯仰轴 Pitch Axis : 1 弧度/s
最大测头重量 Max. tool weight:		: 1.5kg
最大允许转矩 Max.applied		: 2Nm

9. 测头和探针自动更换系统



图 5.31 ACR3 测头更换支架



图 5.32 SCR200 探针更换支架



图 5.33 CW43L 探针更换支架

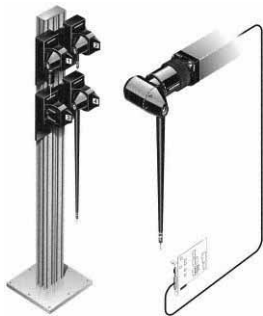


图 5.34 ACR² (PHSI) 测腕更换支架

10. 测头参数对精度的影响

10.1. 探针长度对等效直径的影响

相同的名义针头直径，在触发式测头校验时等效直径是不同的，不要省略校测头的过程，不要把针头的名义直径作为已校准的针头直径输入，也不要将短针头的直径输入作为长探针的等效直径；否则测量时会出现一个恒定的误差，下图表示了同一针头直径，但探针长度不同校准后所得到的不同等效直径。

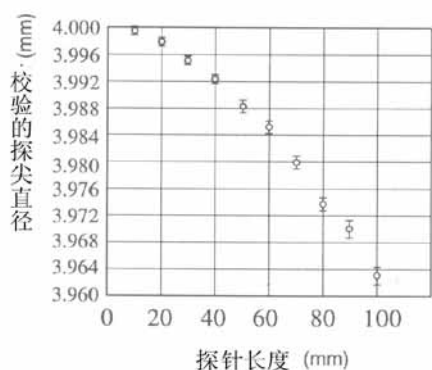


图 5.35 测杆长度对等效直径的影响

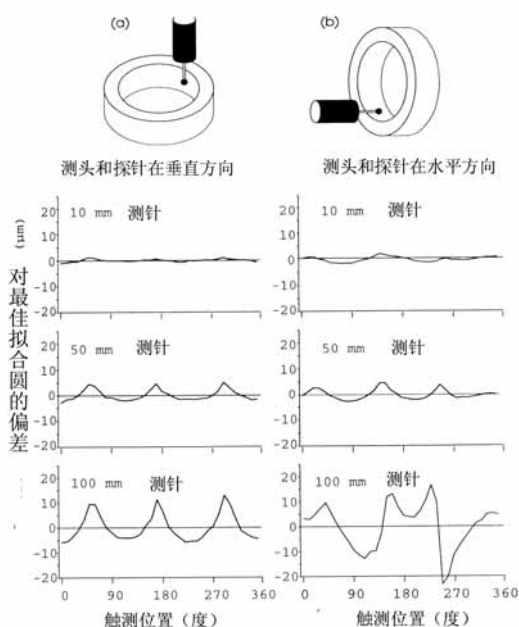


Figure 7.24. CMM probe lobing (pretravel variation) as measured using a ring gauge for three different stroke lengths on a touch trigger probe. (a) Probe and stylus are

图 5.36 探针长度对检测精度的影响

10.2. 探针长度对检测精度的影响

测头在垂直位置测量时，探针越长其三角形效应越明显；当测头探针水平放置应用时，由于探针重力的影响再加上三角形效应，探测精度可能各向无序排列。

TP20 测头在探针长于 50mm 时精度大大下降（最佳长度为 10–20mm），TP200 测头在探针长于 100mm 时精度大大下降（最佳长度为 50mm 以内），TP800 测头在探针长于 350mm 时精度大大下降，SP600M：探针最长长度为 107.5mm，SP80 探针最长长度为 250mm。

10.3. 不同测头及不同加长杆对万向探测系统重复性的影响

下图所示为加长杆长度对 PH10M 测座重复性的影响，此试验是用一台高精度测量机在恒温间中作出；可以看出加长杆材料不同、长度不同会影响测量的重复性，从 100mm 开始几乎是线性关系。

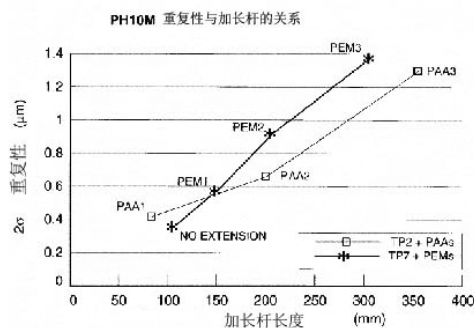


图 5.37 不同测头及不同加长杆对万向探测系统重复性的影响

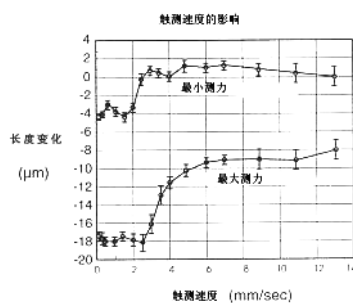


图 5.38 测头趋近度对测量精度的影响

10.4. 测头趋近速度对测量精度的影响

10.5. 多探针或旋转测座测量误差

多探针或旋转测座本身的重复定位精度是微米级,可以忽略不计,测量误差主要是由于测头的三角形误差及测头偏置矢量误差所造成,测头的三角形误差又是校验测头时产生偏置矢量误差的主要因素,要减少它的影响的方法是在校验测头时增加测点,以得到较准确的偏置矢量。

下图所示分别用 10mm 及 50mm 长的单个固定探针及旋转测座多个位置(8 个位置)测球的情况,可以看出长探针可旋转测头测量的误差要大,目前国际标准及国家检测规范正在对多测头或旋转测座的测量机制订标准(ISO10360-5)及规范[中华人民共和国国家计量技术规范(JTF-XXXX-XXXX)坐标测量机校准规范]。

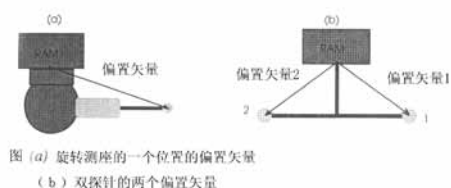


图 5.39 多探针或旋转测座测量误差

10.6. 探测距离对测量精度的影响

当考虑到测量机的刚性,测量机的趋近距离对测量机的精度在一定范围内有影响,改善的办法是改进测量机的刚性或动态性能,或者选择合适的探测距离。

如果一台测量机动态性能不好,又用很小的探测距离,那么即使采点再多亦不能改善其精度,图 5.40 所示的是用小的探测距离(2.5mm)测块规的情况,十点后的误差更大;动态性能不好的测量机,在测小孔时应特别加以注意,因为此时探测距离不能很大。

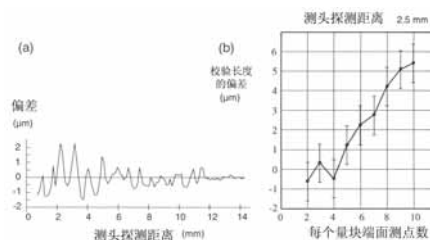


图 5.40 探测距离对测量精度的影响

10.7. 进行形状测量时探针针头直径的选择 (VDI/VDE 2617 Part2.2)

测量机的机械测头往往用球型探针针头,探针针头在进行形状测量时往往起到机械滤波的作用。与标准滤波(缺省值)为 $\lambda c=0.8mm$ 相对应,按 ISO 标准,标准的探针针头直径应当为 0.5mm,一般来说测量机用的探针针头直径经常大于 0.5mm,这是由于机械上的原因,例如测量深孔时要避免探针针杆与零件接触(而非针头与零件接触),另外一些测量机,例如应用光学测头的测量机,可以应用非常小的探针针头直径。

一般来讲,所应用的探针针头直径应尽可能小,应保持在极限值以下,即超过此极限值将产生机械滤波的作用,当然最小针头直径还是受探针针杆直径的制约。

假设被测表面的波度是正弦形的,下面的图形表达了下述几种参数间的关系:

- *每一转的波动次数 upr;
- *波度的波形最大高度的预计值 W_1 ;
- *被测外圆或内孔的直径 D;
- *不产生机械滤波作用的最大探针针头直径 DK

内径为 D 的内孔进行形状测量时,最大许用探针针头直径 D_k 是每转的波动次数及正弦波波高的函数(见图5.41)

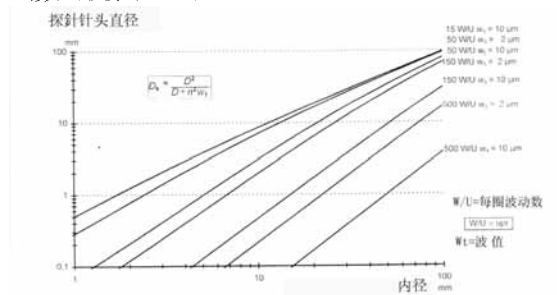


图 5.41 最大探针针头直径与每一转的波动次数、波形最大高度、被测内孔直径的关系

外径为 D 的外圆进行形状测量时，最大允许用探针针头直径 D_k 是每转的波动次数及正弦波波高的函数；

对于一个 38mm 直径的孔，波度的波高为 10 μm 以及每转波动次数为 150 次，那么从图上可查出，用 5.5mm 直径的探针针头可以对形状测量没有影响。

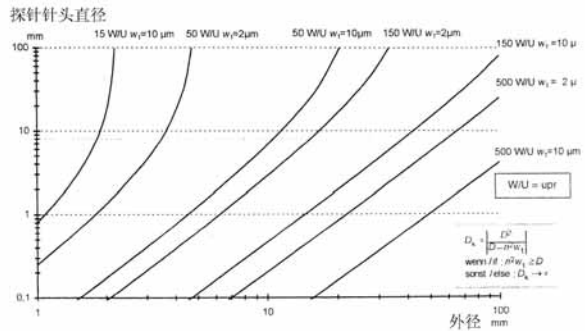


图 5.42 最大探针针头直径与每一转的波动次数、波形最大高度、被测外圆直径的关系

下述的表格把前面的图形根据公式推算列成表格，此表格给出了不同探针针头直径相应于不同的波动次数及波高所可以测量的内孔、外圆直径，因而看起来更直观。

若应用非常小的探针针头直径，例如光学测头系统，用高分辨力测内孔则可以从下图查阅；

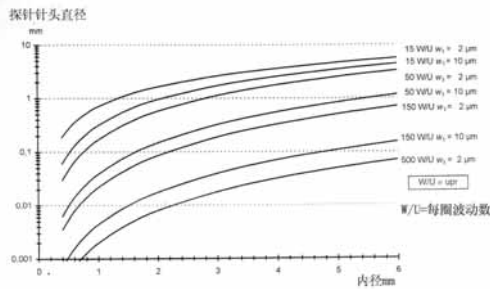


图 5.43 非常小的针头直径与每一转的波动次数、波形最大高度、被测内孔直径的关系

下图给出了测直线度及平面度所允许选用的探针针头直径，这直径大概在测外圆和内孔之间，

下面的例子说明了这一点，

设截止频率（Cut-off frequency）=150upr

波高 $W_1=10\text{m}$

$\leq \frac{1}{2} \lambda \quad c=0.8\text{mmE}''$

波的数量及波长折算相当于120mm的圆周，因此相当于直径

$D=38\text{mm}$

	Wellenzahl W/U / Undulations per revolution upr											
	15			50			150			500		
Wellentiefe / Wave height μm	20	40	80	10	20	40	5	10	20	2,5	5	10
Tastkugeldurchmesser Tip diameter mm	Innendurchmesser / Internal diameter mm											
0,025	0,3	0,5	0,7	0,8	1,1	1,6	1,7	2,4	3,4	4,0	5,6	7,9
0,1	0,7	1,0	1,4	1,6	2,3	3,2	3,4	4,8	6,8	8,0	11,2	15,9
1	2,7	3,5	4,8	5,5	7,6	10,5	11,1	15,5	21,7	25,5	35,9	50,5
2	4,2	5,4	7,1	8,1	11,0	15,2	16,0	22,2	31,0	36,4	51,0	71,7
3	5,5	6,9	9,0	10,3	13,8	18,9	19,9	27,5	38,3	44,8	62,8	88,1
5	7,9	9,7	12,3	14,0	18,5	25,0	26,3	36,1	50,0	58,5	81,6	114,3
8	11,2	13,4	16,6	18,7	24,4	32,6	34,3	46,6	64,1	74,8	104,1	145,5
20	23,8	26,7	31,4	34,5	43,2	55,8	58,5	77,8	105,4	122,2	168,4	233,8
50	54,2	57,8	64,1	68,3	80,9	100,0	104,1	134,0	177,1	203,5	276,2	379,4

Bild 5. Kleinste meßbare Innendurchmesser in Abhängigkeit von Wellenzahl, Wellentiefe und Tastkugeldurchmesser

Fig. 5. Smallest measurable internal diameter as a function of undulations per revolution upr, wave height and stylus tip diameter

许用的探针针头直径，可以从前述相应于内、
 外孔及直线度的图表得到。

对内孔 $D_k=5.5\text{mm}$

对外圆度 $D_k=6.5\text{mm}$

对外圆 $D_k=7.8\text{mm}$ ，这均在相应的图上用辅助
 线画出。

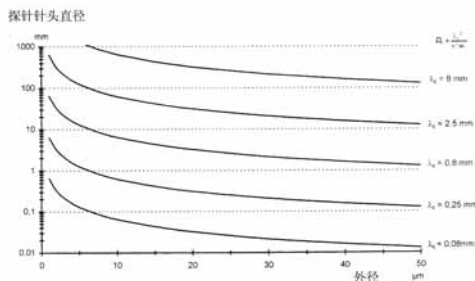


图 5.44 测直线度及平面度针头直径与每一转的
 波动次数、波形最大高度、波长的关系

11. 探测系统有何最新发展

* 高精度、高速度的扫描测头

目前，RENISHAW 在发展一种高精度，可带
 超长杆的扫描测头 SP80 (详见前)，已为我集团
 DEA 公司采用在高精度的机型上。

本集团 Leitz 生产的高精度测头 TRAX，则由
 于触测时不需要锁紧任何一轴，而真正能反映被
 测点方向矢量的能力，是扫描兼触发的最先进和最
 高精度的接触式测头；目前已生产了新型与 B3C-
 LC 控制系统匹配的 Minu TRAX。

* 适合于汽车行业的无级转向、长测杆的测头
 座 CW43L

DEA 发展的无级转向的手腕式测头 CW43L，
 由于可伸到汽车内部而且应用特长加长杆，而受
 到汽车行业的欢迎。

可用长度达 600mm 的加长杆而保持精度，由
 于可以连续旋转，因而可以探测任意方向的深
 孔；端部可以连触发测头 TP6 或 TP8。

* 低成本

在低成本的测头上，HEXAGON 计量集团已
 有突破，由瑞士 TESA 公司生产的测头 TESASTAR

和 TESASTAR i 比同类产品成本低，精度高。

* 非接触式测头

仍在提高精度、提高可靠性及提高速度上化
 工大，特别对于不同材料、不同颜色、不同光泽、
 不同形状以及边缘测量时精度的一致性上化工大；

图 5.25 已给出了线扫描的激光测头
 LC10/LC50，对于窄槽或弯槽，为了得到空间三维
 的形状和尺寸，这类测头需要改变安装角度作多
 次扫描（图 5.45）；

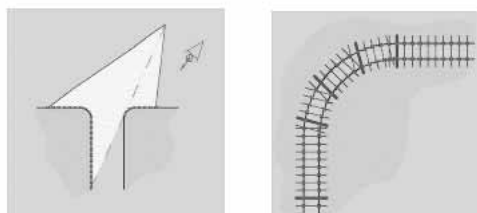


图 5.45 对于窄槽或弯槽单线扫描激光要改变安装
 角度，以得到空间三维的形状和尺寸

现在设计了能射出三道互相交叉 120 度而略
 有倾斜的线激光 XC50，如图 5.46 所示，

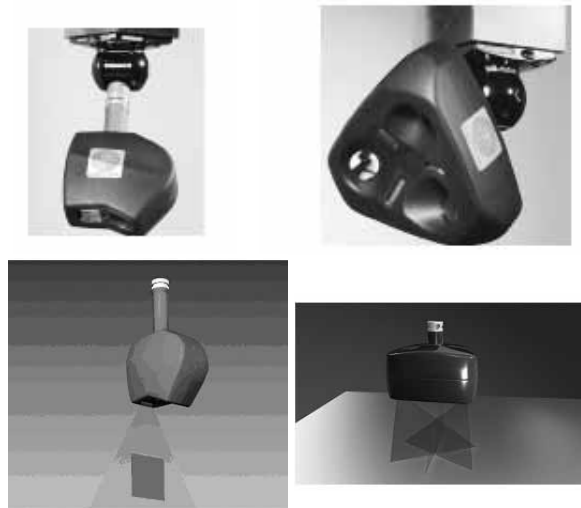


图 5.46 单线激光与三道互相交叉 120 度而略有
 倾斜的线激光 XC50

对上述单线激光感到难测的物体，现在 XC50
 既保持了高精度，又避免了要多次旋转测头座的
 麻烦，达到了一次定位进行三维元素的测量，当
 然亦可以与可旋转测座及自动更换测头架结合使
 用；

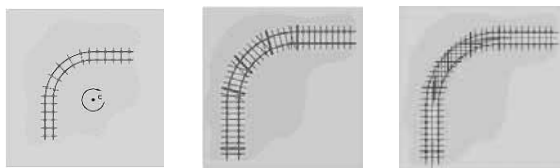


图 5.47 对槽三种不同扫描方式：单线扫描测头加连续旋转测座（左）；单线扫描测头加 PH10（中）；三线扫描测头一次完成（右）

这类测头 XC50 的指标如下：

重量 510 克

尺寸 147 × 135 × 82 mm

扫描速度为 3 × 6400 点/秒

激光带宽 3 × 50 mm；

视场 3 × 50 mm；

精度 15 μm

分辨力 0.1 μm

激光离物体距离 70 mm；

与软件结合起来既可以作正向测量，与 CAD 模型比较，亦可以对未知由面进行数字化进而作逆向工程。

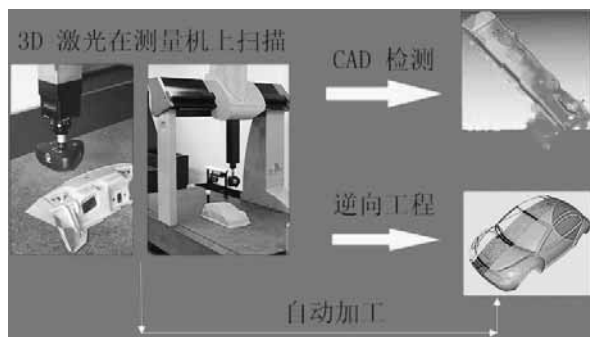


图 5.48 3D激光测头用于与CAD模型比较检测，亦可以对未知由面进行数字化进而作逆向工程的工作

大尺寸的非接触测量，例如激光经纬仪，光笔测量机地在发展。

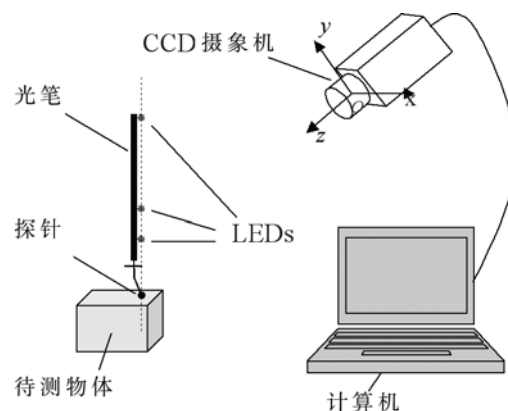


图 5.49 光笔式测头

参考文献：

1.Renishaw 测头参考资料

2.Nextec 测头参考资料

3.Krean 测头参考资料

4.Leitz 测头参考资料

5. Dea 测头参考资料

6.OVP 测头参考资料

7.Mitutoyo 样本

8.VDI/VDE 2617 2.2

9 John A.Bosch :Coordinate Measuring Machines and Systems

10.坐标测量技术新进展

刘书桂

第六章、测量机的精度评定标准

坐标测量机作为一种高精度的测量设备，其精度指标无疑是最关键的指标。关于测量机的精度评定指标，多年来有了一系列的发展和变化，各主要工业国家先后颁布了其坐标测量机评定标准。1994年，制定了ISO 10360-2《坐标计量学—第2部分：坐标测量机的性能评定》标准，目前的测量机精度标准和规范一般参照ISO标准来制定，该标准于2000年经过修订，本章将就主要的测量机精度评定标准和主要精度指标的选择要素进行描述。

1. 现有国内的测量机国家标准及校准规范

中国目前现行的有关标准及校准规范是：

中华人民共和国国家标准（GB/T 16857.1-2001 eqv ISO 10360-1:2000）：产品几何量技术规范（GPS）：坐标测量机的验收检测及复检检测坐标计量学第1部分：词汇

中华人民共和国国家标准（GB/T 16857.2-1997 eqv ISO 10360-2:1994）坐标计量学第2部分：坐标测量机的性能评定

中华人民共和国国家标准（GB/T 16857.3-200X eqv ISO 10360-3:2000）坐标计量学第3部分：配置转台轴线为第四轴的坐标测量机

中华人民共和国国家标准（GB/T 16857.4-200X eqv ISO 10360-4:2000）：产品几何量技术规范（GPS）：坐标测量机的验收检测及复检检测第4部分：在扫描模式下使用的坐标测量机

中华人民共和国国家计量技术规范（JTF-2000）：《坐标测量机校准规范》，适用于使用接触式测头的正交坐标系坐标测量机的校准

国内正在报批的标准有：

中华人民共和国国家标准（GB/T 16857.5-200X eqv ISO 10360-5:2000）：产品几何量技术规范（GPS）：坐标测量机的验收检测及复检检测第5部分：使用多探针探测系统的坐标测量机

中华人民共和国国家标准（GB/T 16857.6-

200X eqv ISO 10360-6:2000）：产品几何量技术规范（GPS）：坐标测量机的验收检测及复检检测第6部分：计算高斯拟合要素的误差的评定

中华人民共和国国家计量技术规范（JTF1064-2003）：《坐标测量机校准规范》

2. ISO 现有坐标测量机国际标准

ISO（国际标准化组织）是由各国标准团体组成的世界范围的联合组织。国际标准的起草工作一般是由ISO技术委员会来完成的。中国目前实行的测量机国家标准（GB/T16857.2-1997）是等同ISO相应标准。

ISO 10360 在主标题“产品几何量技术规范（GPS为Geometrical Product Specification缩写）——坐标测量机（CMM）的验收、检测和复检检测”下，由以下部分构成：

第1部分：词汇

第2部分：测量线性尺寸的坐标测量机

第3部分：配置转台轴线为第四轴的坐标测量机

第4部分：在扫描模式下使用的坐标测量机

第5部分：使用多探针探测系统的坐标测量机

第6部分：计算高斯拟合要素的误差的评定

一般来说，进行坐标测量机精度的检验采用的是可溯源到国家基准的一组量块或步距规以及检测球。

注意，建议量块最长长度至少是坐标测量机工作空间对角线最大长度的66%，最短长度应不大于30mm。

3. 其他的外国标准

在过去几十年里，除了ISO和国标之外，已经有许多国家的验收办法、规范和标准被采用，主要包括：

3.1. VDI/VDE 2617 德国工程师协会关于坐标测

量机的检验规范

在该标准中，主要包括五个部分：

Part 1. Generalities (概述)

Part 2.1 length Measurement uncertainty (长度测量不确定度)

Part 3. Components of the Measurement deviation of the machine (测量机测量偏差的组成)

Part 4. Rotary table on Coordinate Measuring Machines (带转台的坐标测量机)

Part 5 Supervision by mechanical standards (机械标准的管理)

由于各国对不确定度的认识不一致，VDI 的不确定度大致意思相当于 ISO 的示值误差；

3.2. CMM 坐标测量机生产商协会关于坐标测量机的检验规范

3.3. BSI BS6808 英国标准研究院关于坐标测量机性能检验的方法

3.4. ANSI/ASME B89 美国国家标准研究院发布的坐标测量机性能评定的推荐标准

3.5. JIS B 7440-1987 日本关于坐标测量机精度检测的工业标准

上述标准中规定的坐标测量机检验方法，主要是控制测量机自身的误差源，对坐标测量机长度测量的示值误差和探测系统进行检验。

4. ISO 标准及国标的主要内容

4.1. 判断测量机的精度的两个重要项目

由于测量对象千变万化，目前不可能给出面向测量对象的精度，因此总是用最基本的量块和标准球来判断测量机的精度，即用示值误差及探测误差来表示测量机的精度。

4.2. 用于尺寸测量的测量机的精度判断标准(JTF-

2000)

满足下列条件时，用于尺寸测量的坐标测量机的性能合格：

4.3. 示值误差 $\leq$ 最大允许示值误差 ($E \leq MPE_E$)

5 个尺寸实物标准器放在测量空间的 7 个不同的方向或位置，各测量 3 次，共进行 105 次测量，考虑了测量不确定度后，所有 105 次测量的坐标测量机的示值误差 E 不大于规定的用于尺寸测量

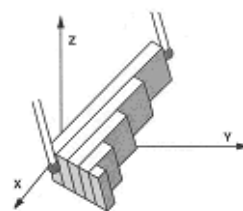


图 6.1 测示值误差时量块分布

的坐标测量机的最大允许示值误差 MPE_E ，($E \leq MPE_E$)，坐标测量机的性能合格。

如在 35 组尺寸测量中最多有五组，每组测量的 3 个值中只允许有一个值超出合格区。每一个超出合格区的尺寸测量必须在相应的方向和位置重测 10 遍；当所有重复测量的数据满足示值误差 E 不大于规定的最大允许示值误差 MPE_E ，用于尺寸测量的坐标测量机的性能合格。

4.4. 探测误差 $\leq$ 最大允许探测误差 ($P=r_{\max}-r_{\min} \leq MPE_P$)

考虑了测量不确定度后，探测误差 P 不大于规定的最大允许探测误差 MPE_P ($P=r_{\max}-r_{\min} \leq MPE_P$)。在标准球上均匀选取 25 个探测点进行探测，计算最小二乘（高斯）球的中心，并使用 25 个测量值

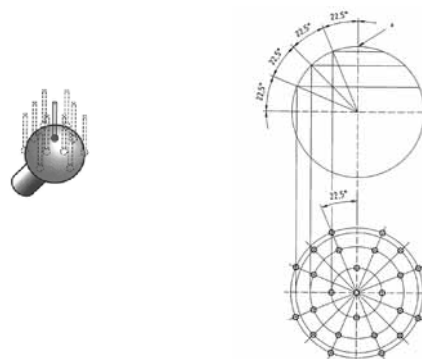


图6.2 探测误差测点分布

分别对该球心计算出径向距离 r , $P=r_{\max}-r_{\min}$ 。

各测量点应在检测球上匀称分布, 至少覆盖半个球面。对垂直探针, 推荐采样点分布为: 一点位于检测球极点; 四点均布且与极点成 22.5° ; 八点均布, 相对于前者绕极轴旋转 22.5° 且与极点成 45° ; 四点均布, 相对于前者绕极轴旋转 22.5° 且与极点成 67.5° ; 八点均布, 相对于前者绕极轴旋转 22.5° 且与极点成 90° 。

注: 配有修正系统误差的附件或相应的计算机软件, 可以对示值进行系统误差修正, 除测量机数据处理系统原有的误差自动修正外, 不允许对计算机输出的结果进行温度或其他因素的人工修正。

4.5. 对于配有扫描测头的测量机精度判断标准 (GB/T 16857.4-2003)

如果满足下列条件, 在扫描模式下使用的坐标测量机的性能验收被通过:

5.1. $T_{ij} \leq MPE_{Tij}$

扫描探测误差 T_{ij} 不大于由制造商规定的最大允许扫描探测误差 MPE_{Tij} (一般用 MPE_{THP})。

5.2. $\tau_{ij} \leq MPE_{\tau ij}$

对于扫描检测所用时间 τ_{ij} , 不大于由制造商规定的最大允许扫描时间 $MPE_{\tau ij}$ (一般用 MPE_{THP})

关于 THP, TLP, TLN, TLP 的含意及用法: 表达式中的 H 表示高密度采点 (High Point Density), 连续扫描点间距离为 0.1mm, L 表示低密度采点 (Low Point Density), 连续扫描点间距离为 1mm, P 表示预定路径扫描 (Pre-defined Path Scanning), N 表示未知路径扫描 (Non-defined Path Scanning), 见下表所示;

点密度	预定路径(P)	非预定路径(N)
高(H-0.1mm)	THP	THN
低(L-1mm)	TLP	TLN

生产厂商一般给出 MPE_{THP} 值, 这个指标比 MPE_{TLP} 要求高, 因此已经可以基本满足扫描探测性能评价的要求, 国际及国家标准也给出了较详细的规范。

标准器: 采用钢制检测球, 标称直径 25mm, 表面粗糙度 Ra 不大于 $0.05 \mu m$, 硬度不低于 HV800。

取值的方法: 采集并记录检测球的修正扫描线上扫描点的测量结果。修正扫描线在检测球表面上所规定的四个目标扫描平面内 (见图6.3)

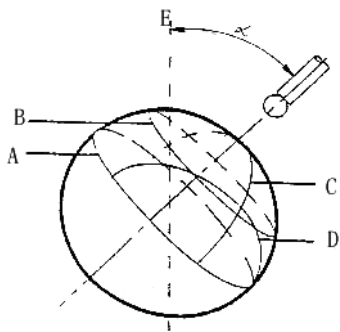


图 6.3 扫描探测误差路径示意

图中标号:

- A 目标扫描平面 1, 在平分球体的面
- B 目标扫描平面 2, 与平面 1 相距 8mm 的平行平面
- C 目标扫描平面 3, 通过极点并与平面 2 垂直
- D 目标扫描平面 4, 与平面 2, 3 垂直, 距极点 8mm
- E 探测轴的轴线, α 是探针轴偏离探测轴线的角。建议 α 角约为 45° 。

如在扫描模式下使用的坐标测量机的性能验收未被通过, 则应彻底检查探针针头和检测球有无影响测量结果的灰尘或污垢。在这种情况下, 对它们作严格的清洁后, 从探测系统标定开始再重复检测一次。

4.6. 配旋转工作台作为第四轴的坐标测量机精度判断标准 (GB/T 16857.3)

考虑了测量不确定度后, 如果所有四轴误差 (A 点: FR_A, FT_A, FA_A , B 点: FR_B, FT_B, FA_B)

小于规定的最大允许四轴误差（ MPE_{FR} ， MPE_{FT} ， MPE_{FA} ），配备旋转工作作为第四轴的坐标测量机性能合格。

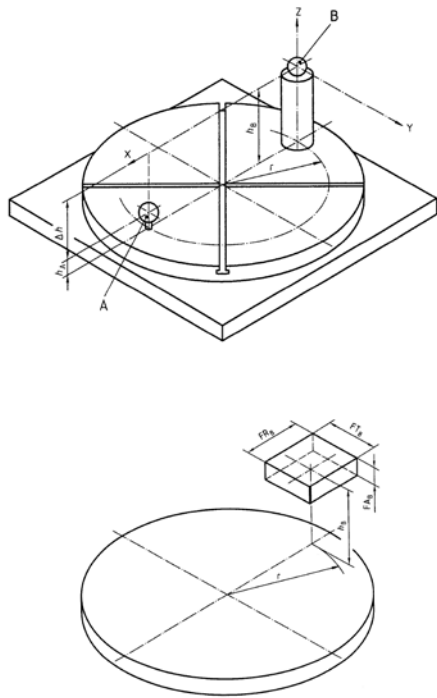


图 6.4 带转台的测量机精度判别

FR—径向四轴误差 MPE_{FR} —最大允许径向四轴误差

FT—切向四轴误差 MPE_{FT} —最大允许切向四轴误差

FA—轴向四轴误差 MPE_{FA} —最大允许轴向四轴误差

6.4.7. 使用多探针探测系统的坐标测量机精度判断标准（GB/T 16857.5）

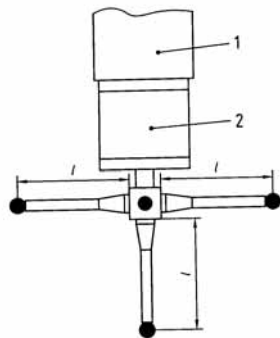


图 6.5 对星型固定探针的坐标测量机精度判断标准

对星型固定探针，每根探针测量球 25 点，总共 125 点。

点应均布在检测球上，至少覆盖半球。对垂直探针建议的采点方案为：在检测球极轴上采一点，离极轴 22.5 度的平面上均匀采 4 点；再旋转 22.5 度，即在距极轴 45 度的平面内均匀采 8 点；再旋转 22.5 度，即在距极轴 67.5 度的平面上均匀采 4 点；再旋转 22.5 度，在垂直于极轴的平面上均匀采 8 点（参见 6.2 探测误差）。

对于水平探针，应使用相似的采点方案，极轴的方向定义为探针的方向。

如果坐标测量机上配有探针或测头更换系统，应进行 5 次更换，每根探针更换一次。但是，如果更换系统少于 5 个测头或探针库位置，应使用最大的更换次数，某些探针或探头要更换 1 次以上，以达到更换 5 次。

将每个探针测量的 25 点为一组生成一个最小二乘拟合球，总共拟合 5 个球。计算 5 个球的中心坐标（X，Y，Z）的变化范围。这三个坐标的变化范围的最大值为位置误差 ML。

用 5 根探针测得的 125 点生成一个最小二乘拟合球。将拟合球直径与实物标准器尺寸校准值的偏差，给出固定的多探针系统的尺寸误差 MS。同样，将 125 点相对于最小二乘拟合球心的半径变化范围，即球度，记作固定多探针探测性能的形状误差 MF

对每一个允许的探针长度 l ，当满足规定的最大允许误差，即 $MF \leq MPE_{MF}$ ， $MS \leq MPE_{MS}$ ，和 $ML \leq MPE_{ML}$ ，带有固定多探针探测系统的坐标机性能评价合格。

万向探测系统

- 1 轴端
- 2 转向测头夹持器
- 3 测头加长杆
- 4 测头
- 5 探针

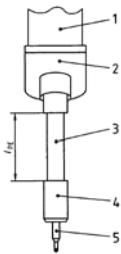


图 6.6 对万向探测系统的坐标测量机精度判断标准

检测的原理是使用万向探测系统的 5 个不同的转角位置，对检测球的形状、尺寸和位置。每个转角位置对检测球测量 25 点，5 个位置共测 125 点。

如果坐标测量机上备有探针或测头更换系统，应进行 5 次更换，且在每个转角位置使用前完成一次。每一个转角位置的一组 25 点拟合一个最小二乘拟合球，共 5 个拟合球。

计算所有 5 个拟合球的球心坐标 (X, Y, Z) 的变化范围。这三个的变化范围中最大值给出位置误差 AL。另外，通过全部 125 点产生的最小二乘拟合球用于检测形状和尺寸的示值误差。分别计算给出尺寸误差 AS 和形状误差 AF。

对每一个允许的探针长度 L_{PC} ，当满足制造商/用户规定的最大允许误差，即 $AF \leq MPE_{AF}$ ， $AS \leq MPE_{AS}$ ，和 $AL \leq MPE_{AL}$ ，带有转向探测系统的坐标机性能评价合格。

如果多探针坐标机的性能测试不合格，应彻底检查探测设备各种可能影响测试结果的因素，如灰尘、污染和任何操作者组合探针的失误，包括全部探测系统的部件的温度是否平衡。纠正全部问题后，从探测系统标定开始再重复检测一次。

4.8. 软件的评定 (GB/T 16857.6)

中华人民共和国国家标准 (GB/T 16857.6-200X eqv ISO 10360-6:2000): 产品几何量技术规范 (GPS): 坐标测量机的验收检测及复检检测第 6 部分: 计算高斯拟合要素的误差的评定

本部分规定了检测坐标测量计算拟合要素软件的方法。相关的要素是线 (以二维和三维表示)、面、圆 (以二维和三维表示)、球、圆柱、圆锥及圆环。

检测方法的原则:

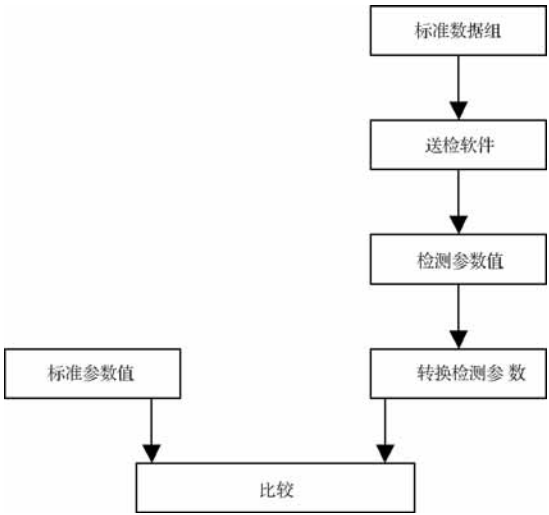


图 6.7 软件的评定

检验通过: 如报告无“失效”和 q 值中没有 一个大于相应的最大允许误差 MPE_q ，则送检软件的性能被检验通过。

5. VDI/VDE 2617 标准的主要内容

5.1. 测量的标准器

可以是量块、步距规或激光加箱体。

5.2. 长度测量不确定度的表示

若在测量机上用一个标准器来测量距离，显示值 L_a 与真值 L_r 的偏差，按 95% 的可信度来评价为 u (长度测量不确定度)，可用下式来表示:

$|L_a - L_r| \leq u$

长度测量不确定度简化为一个与长度有关的参数表达式: $u = A + KL \leq B$

5.3. 标准器布局

5.3.1. 一维长度测量不确定度，沿测量机每一条坐标轴线方向 X,Y,Z 检测，

5.3.2. 二维长度测量不确定度,

在测量机的 XY,XZ,YZ 每一个坐标平面内检测, 并与相应平面内的坐标轴成相等角度 (45°)

5.3.3. 三维长度测量不确定度

沿空间对角线测量, 此空间对角线与机器三根坐标轴的角度相等 (大约 55°); 这相应于一个空间方位角, 在水平平面内的投影与相应坐标轴成 45° , 与水平平面的夹角 (仰角) 为 35° ;

5.3.4. 检测方法

五块量块在测量线上互相平行放置, 每根量块必须分别找正, 测试长度等于所选量块长度, 每个长度测 10 次, 量块的左右表面必须交替测量, 每次应在表面中心, 在十次测量中, 量块不得移动其位置

一般推荐从空间三条三维的对角线长度测量不确定度开始检测, 每一条对角线的结果与生产商给出的指标一起单独画出,

5.3.5. 评价方法

若全部数据小于允许值则测量机合格,

若一个方向的 50 个检测值有超过 5% 的值超差, 那末就不符合生产商规定的三维长度不确定度性能指标, 若只有一个或两个值超差, 那末就要在相应的长度及方向作追加的检测, 每条对角线原来的和追加的测试共为 50 次, 若这些测量超差的值多于两次, 那么称为测量机不符合生产厂的性能指标, 否则就认为测量机通过

为清楚起见, 整个测量及处理和判断的流程如下图所示;

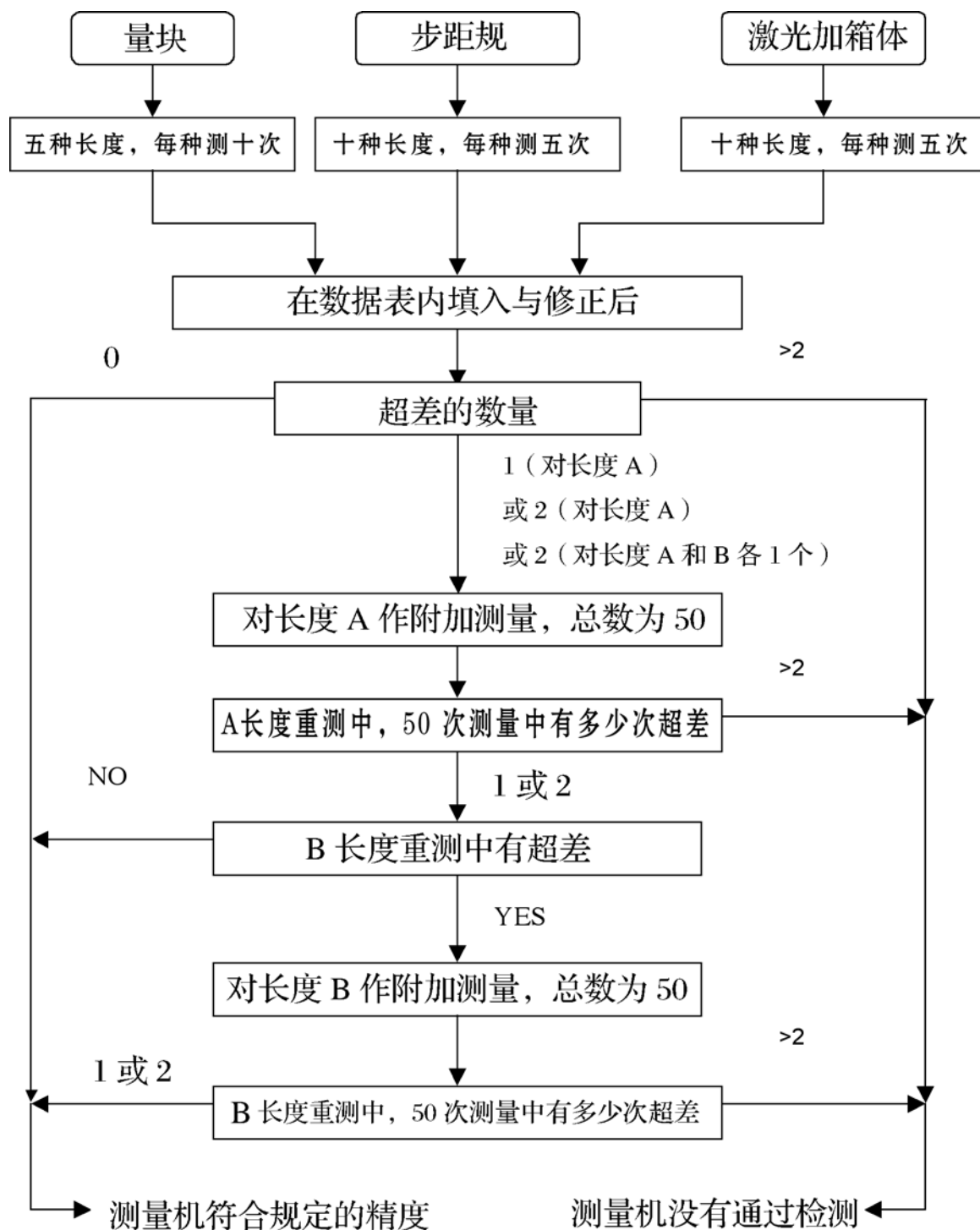


图 6.8 VDI/DE2617 标准的主要内容

6. 美国 B89 的主要内容

B89 “坐标测量机性能评价方法”是美国衡量测量机的标准，它以球棒作为最主要的标准器，用五种试验来评价测量机长度测量的性能。

6.1. 重复性测量

对固定球进行十组测量，每组至少四点，X、Y、Z 各轴向方向球中心坐标最大变动范围（轴向中心坐标最大值-轴向中心坐标最小值）称为重复性。

6.2. 轴向位置精度

用步距规或激光干涉仪，沿各轴向进行测量。

6.6.3. 空间球棒误差性能

用球棒在不同位置及不同方向进行检测，其精度以“误差/球棒长度”来表示，精度指标由生产商提供。

6.6.4. 偏置测头的测量性能

在垂直平面的四条对角线上，用两个 90 度方向偏置的测头，得出测量的球棒长度，与球棒真值对比，他们的差值以“误差/球棒长度”表示，此种试验对测头对轴的偏置很敏感，这对于应用直角偏置的测头很重要，例如可旋转测座。

6.6.5. 短量块探测误差

用短量块在四个方向测量，这是衡量双向测量的能力，这项指标和测头的误差有关。

7. 英国 BS6808 的主要内容

7.1. 标准器：量块

7.2. 主要指标

重复性，长度测量不确定度；

7.3. 重复性定义

沿 X、Y、Z 三个方向放置量块，在量块表面沿各轴向单向测十次，计算标准偏差 S_i ，各轴向单向重复性 $R=0.72S_i$ 。

7.4. 长度测量不确定度

用量块在 8 条线上测量长度，每条线上测 50 次（可以选 10 块量块，每块测 5 次或选 5 块量块每块测 10 次），若每条线上 50 次测量的误差中，少于或等于 2 项超产，则为合格。

8. 日本 JIS B7440 标准（Test Code for Accuracy Of Coordinate Measuring Machines）

8.1. 所用标准器

量块、步距规、准直光管、激光干涉仪、直尺、方尺、水平仪、电感测微仪。

8.2. 检测项目

测量精度：轴向测量精度，空间测量精度；

运动精度：示值精度、直线度、垂直度、角摆误差（方向、俯仰、自转）。

8.3. 测量精度

3.1. 测量方法

轴向：X、Y、Z 各个方向用相应行程的 1/10、1/5、2/5、3/5、4/5 五块量块，每块测五次。

空间：二条对角线，五块量块，每块测五次。

8.3.2. 评价方法

与 VDI 相似，若全部在允许值内则合格，若有一次超差则重测 50 次，50 次中允许 1 到 2 次超差。

8.4. 每轴的运动精度

8.4.1. 示值精度

（用量块在轴向全程测 5 次）

8.4.2. 直线度

用直尺或激光干涉仪，每条线至少取 10 点数据，按直线度评价。

8.4.3. 垂直度

用方尺或激光干涉仪检测，按垂直度评价

8.4.4. 角摆误差（方向、俯仰、自转）

用准直光管、激光干涉仪、水平仪、电感测微仪，每条线至少取 10 点数据，按角摆误差（方向、俯仰、自转）评价。

9. 主要测量机标准对照表

	ISO (国际标准, 等同中国标准)	VDI/VDE 2617 (德国)	B89 (美国)
标准器	量块、检测球	量块、步距规	检测球 (重复性)、激光 (轴向)、球棒 (空间)
精度表示	示值误差、探测误差	一维、二维、三维长度测量不确定度	重复性、轴向位置精度、空间球棒误差性能, 偏置测头的测量性能、短量块探测误差
检测方法	示值误差: 5 个尺寸实物标准器放在测量空间的 7 个不同的方向或位置, 各测量 3 次, 共进行 105 次测量, 探测误差: 在标准球上均匀选取 25 个探测点进行探测	一维长度测量不确定度, 沿测量机每一条坐标轴线方向 X, Y, Z 检测, 二维长度测量不确定度, 在测量机的 XY, XZ, YZ 每一个坐标平面内检测, 并与相应平面内的坐标轴成相等角度 (45°); 三维长度测量不确定度, 沿空间对角线测量, 此空间对角线与机器三根坐标轴的角度相等 (大约 55°); 这相应于一个空间方位角, 在水平平面内的投影与相应坐标轴成 45°, 与水平平面的夹角 (仰角) 为 35° ;	球重复性: 十组数据, 每组不少于四点; 激光与步距规: 沿轴向, 标准器真值与测量机显示值对比; 球棒: 测量球棒两端球的中心距, 比较其变化, 至少测十个位置, 最多四十个位置, 其中四条对角线及三个坐标平面对角线为必测;
判断准则	$E \leq MPE_E$ $P \leq MPE_P$	$ L_a - L_r \leq u$ (一维、二维、三维)	各项指标 $\leq$ 允许指标
不合格判断	要求全部合格	按 95% 的可信度来评价	对球棒超差点重复测试, 直到确证是否合格
局部不合格处理	如在 35 组尺寸测量中最多有五组, 每组测量的 3 个值中只允许有一个值超出合格区。每一个超出合格区的尺寸测量必须在相应的方向和位置重测 10 遍; 当所有重复测量的数据满足示值误差 E 不大于规定的最大允许示值误差 MPE_E 用于尺寸测量的坐标测量机的性能合格	若一个方向的 50 个检测值有超过 5% 的值超差, 那末就不符合生产商规定的三维长度不确定度性能指标, 若只有一个或两个值超差, 那末就要在相应的长度及方向作追加的检测, 每条原来的和追加的测试共为 50 次, 若这些测量超差的值多于两次, 那么称为测量机不符合生产厂的性能指标, 否则就认为测量机通过	

图 6.9 主要测量机标准对照表

10. 光学测头的检测标准 (VDI/VDE 2617-6, 6.1, 6.2)

标准器或试验装置是一维线性的、二维平面的或三维空间放置的, 例如有效的光学边缘、圆、平面或球, 试验装置的尺寸和形状应当经过校准。

10.1. 探测误差

探测误差表达了整个测量系统, 包括测量机、探测系统及其他因素, 在非常小的测试空间的误差;

10.1.1. 三维测头的探测误差 R_3

三维探测误差 R_3 是一个用半径给出的范围, 此半径等于各探测点到用最小二乘法得出的圆心的距离。

探测误差	用不同测量方法示例	符号
1-维 在X, Y, Z 坐标轴方向		R_1
2-维 在X1, X2, Y2 坐标平面		R_2
3-维 XYZ空间		R_3

图 6.10 探测误差

陶瓷或钢 $\phi 25\text{mm}$ 检测球, 最好用两个不同表面的球, 例如一个为黑色硅陶瓷, 一个为抛光的钢球, 平均的表面峰谷值 $R_z \approx 0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$, 或空间对角线放置的环规或圆形标准器 (如玻璃上镀铬的圆环), 若与此尺寸不同, 则用于决定探测误差的标准器尺寸应当是传感器测量范围的 1/5;

形状误差应小于探测误差的 1/5, 形状误差应

当有校准证书;

对于一个球、最少测点为 25 点; 环规、圆等, 最少测点为 15 点, 测点分布, 无论对于球、环规的圆柱、镀铬圆都应当均匀分布, 对于环规及镀铬的圆在测量之前应定出它们在空间的方向。

10.1.2. 二维测头的探测误差

10.1.2.1. 2D 探测误差, R_2

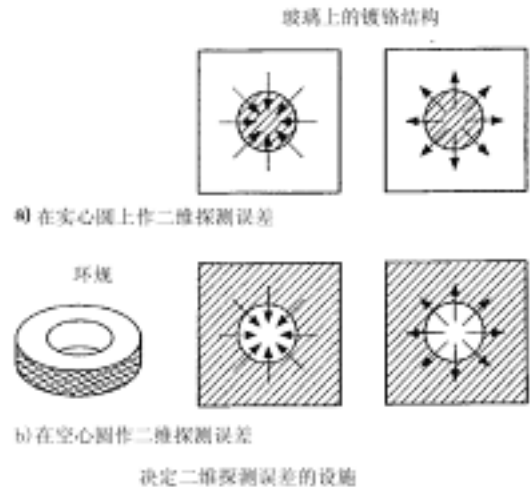


图 6.11 决定二维探测误差的设施

二维探测误差 R_2 是一个用半径给出的范围, 此半径等于用最小二乘法得出的圆和探测点 (ISO10360-2) 的坐标值的偏差。

为了检查二维探测误差, 应用环规、镀铬圆 (即在玻璃本体上的镀铬结构); 把它们放在轴向平面位置, 这意味着镀铬结构表面的法线或校准用环规的圆柱轴线应平行于任何一条坐标轴线,

圆的形状偏差应小于探测误差的 1/5, 形状误差应当有校准证书;

试验标准器的直径约为 25mm, 若与此尺寸不同, 则用于决定探测误差的标准器尺寸应当是传感器测量范围的 1/5;

对于一个环规、镀铬圆等, 最少测点为 15 点, 测点分布无论对于环规的圆柱、镀铬圆都应当均匀分布, 对于环规及镀铬的圆在测量之前应定出它们在空间的方向。

探测时应按两个方向即由亮/暗及暗/亮的方向触测; 触测对象既用柱也用孔, 如图所示。

评价探测误差时分别注明方向及类型。

10.1.2.2. 1D 探测误差, R_p

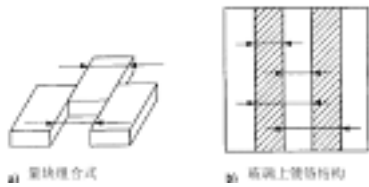


图 6.12 决定一维探测误差的设施

一维探测误差 R_p 是一个用长度给出的范围,

为了检查一维探测误差,应用块规或相应的在玻璃本体上的镀铬结构;把它们放在平行于任一轴线位置,用两个平行平面或平行直线的距离,用双向探测的模式进行,每个面探测 15 个不同的点,这时选择两种探测的方向(即亮/暗-暗/亮,见图),一个边缘或平面作为基准元素,评价边缘间的距离,距离的变化范围即一维探测误差;若探测的模式只能单向进行,在这时所测得的特性值前应冠以“uni”。

若探测误差不合格,经检查后可以重作一次,若仍不合格则不予通过。

10.2 示值误差及尺寸误差

10.2.1. 三维测头的示值误差 E_3

定义:从相反两个方向接近探测点,测定尺寸实物标准器的两标称平行平面间的法向两相对点距离的示值误差;

决定长度测量示值误差,可以用钢或陶瓷的块规、步距规,亦可以用线纹尺;测量距离时,它们应相互平行,或放在一条直线上;用玻璃做的线纹尺必须考虑线纹宽度,这与光学放大有关,它必须比测量机的结构分辨力的最小宽度为宽,这样才能保证探测出每一个边缘;

试验标准器的真值应当是已知的,它的误差应当小于由坐标测量机制造商所规定的长度示值误差的 1/5,试验标准器必须具有校验证书。要证明所用的标准器与示值误差的关系,所有标准器中能测的形状元素都应当用双向测量的方法进行校准,对于线纹尺,边缘的位置应当经过校验;

当测量长度示值误差时,作为校验的边界条件,根据校验(校验证书、标准或指南),不管测量标准器如何放置,在测量的整个空间内,由生

产制造商所规定的示值误差均应满足,最长的测量长度应是被测轴线长度、被测区域或空间对角线长度的 4/5,最短的长度应当为 10mm 或轴线长度的 1/10,至少要测量五个长度,每个位置及方向测三次;

若对于某尺寸的测量机没有合适的基本的测试标准器,那末应当在测量范围的不同位置进行测量,在不同位置,测量标准器应互相复盖衔接;

测量线数应当取决于测量机可移动的线数或轴线数,若为三条轴线则应取七条测量线,若为二条轴线则测五条线;测量线的位置可以自由选择; E_1 , E_2 , E_3 分别表示一维、二维和三维的示值误差

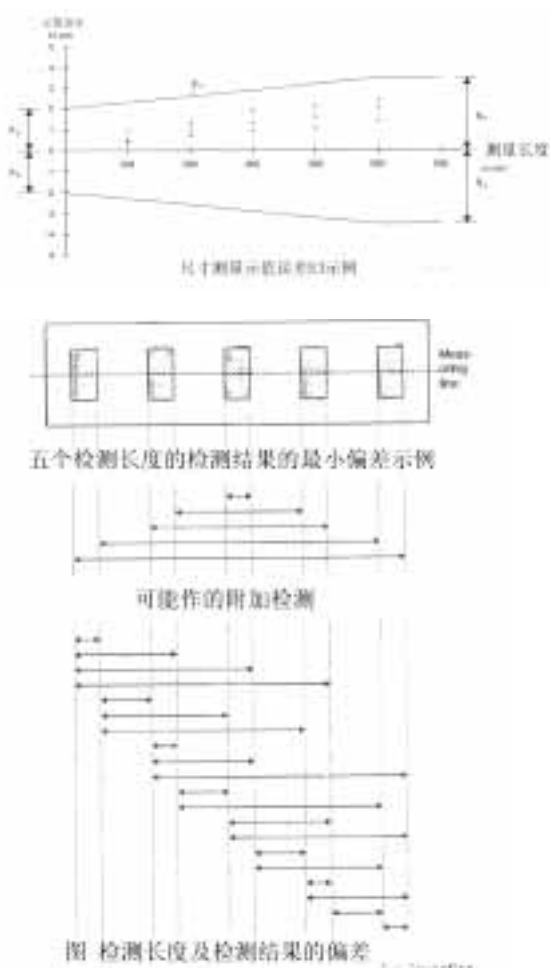


图 6.13 示值误差

10.2.2. 两维光学测头测量中的尺寸误差 ΔM

10.2.2.1. 二维测量中的直径误差 ΔD :

应用环规、镀铬圆（即在玻璃本体上的镀铬结构）；把它们放在轴向平面位置，这意味着镀铬结构表面的法线或校准用环规的圆柱轴线应平行于任何一条坐标轴线，

尺寸误差 ΔM ：为测量所得圆直径和圆的直径真值之差

$$\Delta M \leq E_{2\text{测}} \text{ 测为合格}$$

10.2.2.2 一维测量中的长度误差 ΔL ：

应用块规或相应的在玻璃本体上的镀铬结构；把它们放在平行于任一轴线位置，用两个平行平面或平行直线的距离，用双向探测的模式进行，探测 15 个不同的长度，这时选择两种探测的方向（即亮/暗-暗/亮,见图），一个边缘或平面作为基准元素,评价边缘间的距离，距离的变化范围即一维探测误差；

尺寸误差 ΔM ：为测量所得距离和试验基准的真值之差

$$\Delta M \leq E_{2\text{测}} \text{ 测为合格}$$

11. 坐标测量机的 21 项几何误差

通常将坐标测量机的几何参数误差按其可在各运动自由度方向作用分类，分为三项位置度、六项直线度、九项角摆误差、以及三轴相互之间的三项垂直度，共二十一项参数误差。

二十一项误差是测量机的基本几何误差，为了保证测量机满足示值误差及探测误差的要求，生产厂家都要测量和控制这二十一项误差，必要时进行补偿。

二十一项参数误差的测量可以使用不同的测量仪器进行检测以便于修正，包括双频激光干涉仪、电子水平仪、直角尺、高精度电感测微仪，但是，需要注意的是，使用上述仪器测量参数误差时，测量结果可能是几种参数误差的综合结果。这二十一项中有：

X、Y、Z 三个方向的位置度；

沿 X、Y、Z 三个方向运动时的六个直线（3 X 2）；

沿 X、Y、Z 三方向运动时自转、俯仰、方向九个角摆；

X、Y、Z 各轴间三个垂直度；

对水平臂测量机测为 24 项误差，即加上水平臂伸出时的下垂量误差。

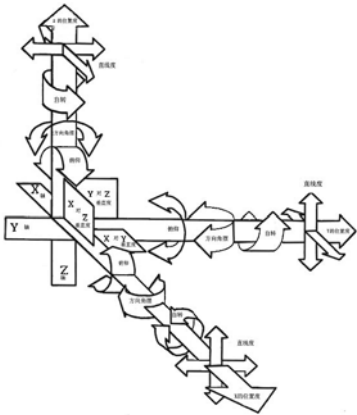


图 6.14 21 项误差示意图

12. 水平臂测量机的特殊误差

除了一般测量机的 21 项误差补偿外，还要考虑水平臂测量机水平臂在不同高度外伸时，引起的附加角摆，总数为 24 项补偿；

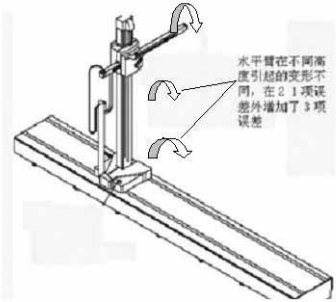


图 6.15 水平测量机的特殊误差

13. 两台水平臂测量机的相向成对使用, 软件及验收标准要作相应的调整

双臂测量机由两台相向的水平臂测量机组成, 安在两个纵轴互相平行的导轨上, 为了计量和运作的协调, 两台均由软件找正的过程联系在一起; 双臂测量机的参考空间由两台测量机的测量空间所综合 (YT), 量块放在下部, 与测量机容积大小无关; 这个过程不适于带转台的测量机;

2-A 臂 (1) 和臂 (2), 量块平行于 X 轴, 放在 Y 和 Z 轴行程的中点, 以单臂行程为参考;

2-B 臂 (1) 和臂 (2), 量块平行于 Z 轴, 放在 X 和 Y 轴行程的中点, 以单臂行程为参考;

2-C 臂 (1) 和臂 (2), 量块沿测量一条空间对角线, 而且在 X, Y, Z 轴行程中点, 以单臂行程为参考;

2-D 臂 (1+2), 量块平行于 Y 轴, 放在 X 和 Z 轴行程的中点, 以双臂行程为参考;

2-E 臂 (1+2) 量块沿一条空间对角线, 而且

在 X, YT, Z 轴行程中点, 以双臂行程为参考。

14. 阿贝测长原则

阿贝测长原则本身的定义为: 在长度测量中, 为使测量误差小, 应将标准量安放在被测量零件的延长线上, 就是说量具或仪器的标准系统和被测尺寸应按串联的形式排列, 否则就会产生阿贝误差或偏置误差。

三坐标测量机的标准系统 (一般为光栅) 一般与被测尺寸不可能在一条直线上, 都有一定的偏置, 所以说坐标测量机的测量系统一般来说是不符合阿贝原则的, 被测尺寸所在直线与光栅线之间的距离可以叫阿贝偏置, 由于相应角摆与阿贝偏置的联合作用, 被测点的空间坐标值测量值因此与实际值产生的误差称为阿贝误差; 在测量机的误差计算及补偿中, 阿贝误差的正确考虑是十分重要的。

15. 被测零件公差要求与测量机精度的关系

由于测量机本身不是测量基准, 为了保证测量结果的正确性, 按照计量原则, 通常测量示值误差应是零件公差指标的三至十分之一。根据我们的经验, 长度测量的最大允许示值误差 MPE_E 主要与距离等元素的误差相关, 而最大允许探测误差 MPE_D 及最大扫描探测误差 MPE_{THD} 则一般影响到形状的测量。(参考第 8 章)

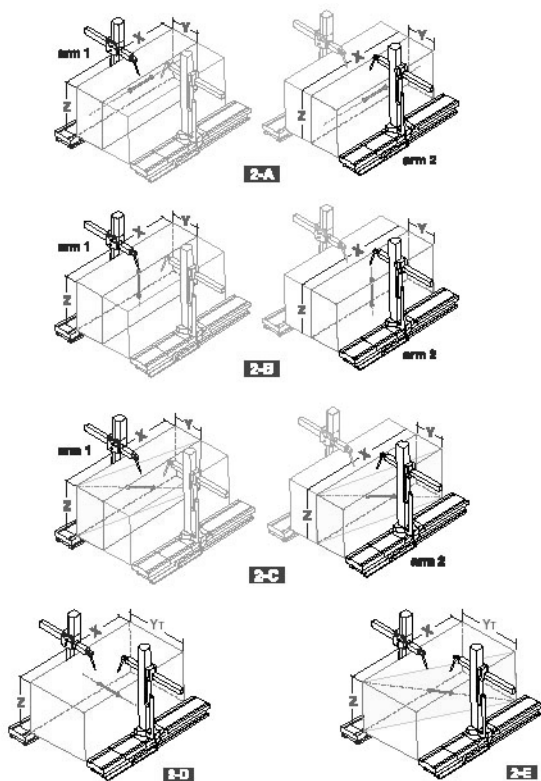
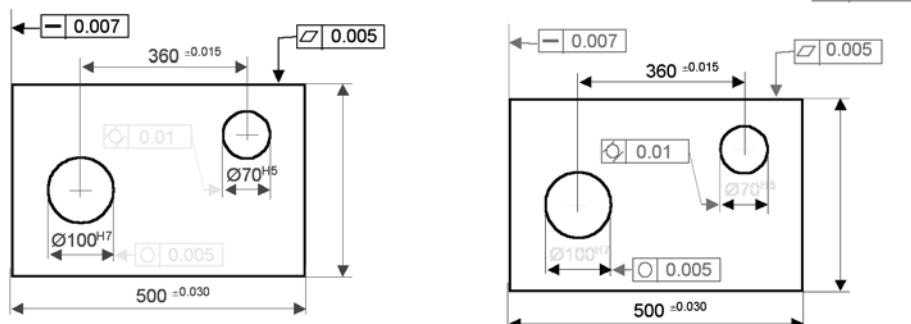


图 6.16 双臂测量机的精度检测

A magnifying glass is positioned over a single data point on the line graph, highlighting the specific value of approximately 1.5 for the year 1995.



	0.020
---	-------

1. 中华人民共和国国家标准 (GB/T 16857.2-1997 eqv ISO 10360-2:1994) 坐标计量学第 2 部分: 坐标测量机的性能评定。

3.中华人民共和国国家计量技术规范(JTF-2000):《坐标测量机校准规范》,适用于使用接触式测头的正交坐标系坐标测量机的校准。

5.中华人民共和国国家标准 (GB/T 16857.5-200X eqv ISO 10360-5:2000): 产品几何量技术规范 (GPS): 坐标测量机的验收检测及复检检测第 6 部分: 计算高斯拟合要素的误差的评定。

7.VDI/VDE 2617 Part 2.1测量机的规范及检测
不确定度。

第七章、测量机的安装及维护

1. 选择测量机安装地点的一般原则

测量机属于精密仪器，选择安装地点时，要考虑机器类型、外型尺寸、机器重量、结构形式、周围环境、如震动情况、温度条件、适合的吊装，辅助设备如：合适的气源、电源的安排等。

1.1. 温度、湿度

安装测量机最合适的地方是温度、湿度和振动等都可以被稳定控制的房间，一般不适于有阳光的直射方向，最好朝向为北向或没有窗户，因为阳光对于室内的温度有影响，不利于温度的控制。

此外测量机房间必须清洁，没有腐蚀性灰尘和脱落的漆层等。门窗的设计应考虑到机房的保温要求，设备、零件进出的需要。窗户要采用双窗并配置窗帘，机房最好设置过渡间，尽量避免布置在有两面相邻外墙的转角处，避免布置在附近有强热源的地方。

1.2. 振动

机房不要建在有强振源、高噪声区域，如：附近有冲床，压床，锻造，打桩机等。

1.3. 磁场、电场

不要建在强电场、强磁场附近，如电源断电

设备、变压器、电火花加工机床、变频电炉、电弧焊及滚焊机等；以及高粉尘区、腐蚀性气体源附近。对于有害气体车间，必须布置于有害气体车间的上风。

1.4. 空间

安装地点必须有适当的空间，这样便于机器就位操作和机器正常工作状态下的各种操作，也有利于室内温度控制。测量机的摆放位置要便于上下零件和方便维修操作且美观和谐。例如：测量机主机和控制系统之间的最小距离是 600mm，尤其应保证测量机和机房的天花板之间必须预留 100mm（或 200mm）左右的最小空间。

2. 安装及短途运输时应注意的问题

2.1. 运输通道

从包装箱贮放点到机房之间的运输通道必须有足够空间，保证最大包装箱能顺利通过并且路况良好。路面应有足够的承载能力。

2.2. 吊装设备

安装地点应当有合适的、足够承载能力的吊装设备，常用的有叉车、行吊、悬臂吊等，甚至可选用滚杠。

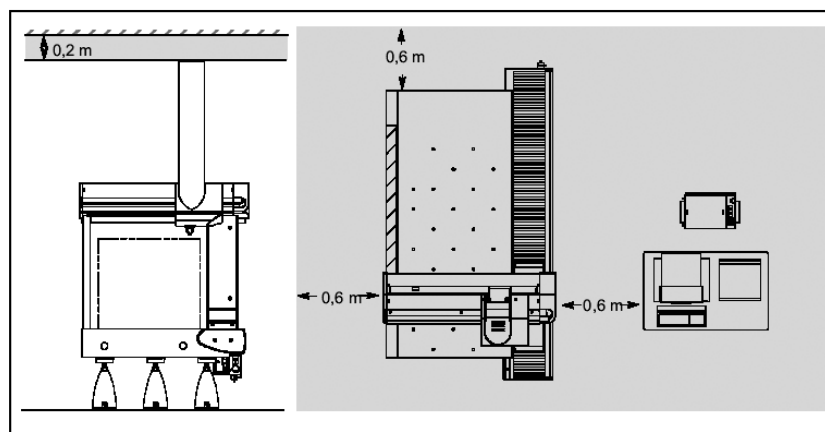


图 7.1 测量机布置的最小间距

2.3. 就位注意事项

测量机搬运、就位、安装应在服务工程师指导下进行，操作过程中搬运工具不能直接与测量机花岗石工作台或其它部位接触，以避免对测量机造成损坏。

2.4. 调试条件

在测量机进行调试前，应使机房中的温度、湿度、气源、地线、电源等条件符合要求。

2.5. 存贮

测量机是精密测量设备，由于出厂前都进行了细致周密的调试和检测、补偿，长期在非恒温条件下存放，会对测量机的零件、器件造成锈蚀损害，也会影响测量机的精度。所以测量机在非恒温条件下（室内）存放一般不要超过2个月。

3. 过渡间

过渡间是恒温间的一部分，主要是为了保证恒温效果，同时还可用于存放和交接待测工件。被测工件测量前须先运进过渡间进行恒温，过渡间面积可由用户根据本单位实际情况自定。隔墙及隔门可采用铝合金制作，并采取保温措施。隔墙、隔门可在测量机运输到位后再安装，隔门尺寸可自定。

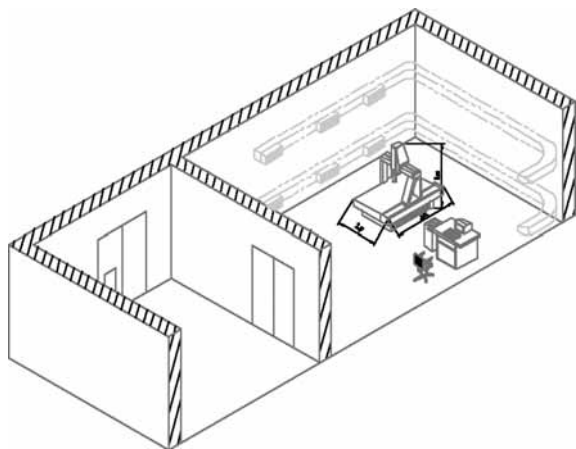


图 7.2 测量机工作间及过渡间布置

4. 地面、墙体、天花板

机房地面、墙壁的设计以防尘、防静电为主要原则，地板可采用木质地板（除测量机地基）或水磨石地板，不要用产生静电的材料，墙壁可涂浅色无光油漆，天花板白色。墙体、天花板要采取保温措施，屋面防水层必须要保证不漏雨，若无把握，可采用整体浇注屋面。

5. 温度和湿度

5.1. 温度

室内温度是指机器操作时要保证测量机性能所要求的温度，除了厂商特别注明，一般来说是 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

机房的温度条件中还有一项要求是温度梯度。温度梯度分为时间梯度和空间梯度。

时间梯度是指在一定时间段内室内温度的变化，一般要求 $1^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ， $2^{\circ}\text{C}/\text{天}$ 。

空间梯度是指在左右、上下各 1 米的距离温度差，一般要求在 $1^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。

5.2. 相对湿度

相对湿度是指保证机器达到最佳性能时所需的湿度范围：对于 GLOBAL 测量机是 30%–65%，过于低的湿度容易受静电的影响，过高的湿度会产生漏电或元件锈蚀。

5.3. 措施

为保证上述对温度和湿度的要求，必须使用空调系统进行温度和湿度控制。有条件的企业最好采用中央空调或变频式柜式空调。空调规格型号与机房空间大小有关，可向空调经销商咨询。

空调的送风和回风口的设计要根据空气流动的规律，送风口处空气不能直吹向测量机，还要使室内温度均衡，一般应请专业人员进行设计。

为保证测量机的使用寿命和使用效率及保证机房温度稳定，空调系统应保持连续开机，选择变频式空调既利于节能，又能稳定控制温度、湿

度。

空调系统必须满足防火要求；空调系统的噪声、振动和灰尘等不得对机房产生影响。

6. 供气系统

6.1. 压缩空气质量要求

由于坐标测量机一般采用气浮轴承，因此需要压缩空气。压缩空气的质量直接影响测量机的正常工作和使用寿命。一般的测量机厂商均对压缩空气提出一定的要求，如对于 GLOBAL 测量机，其正常工作时对压缩空气的基本要求如下：

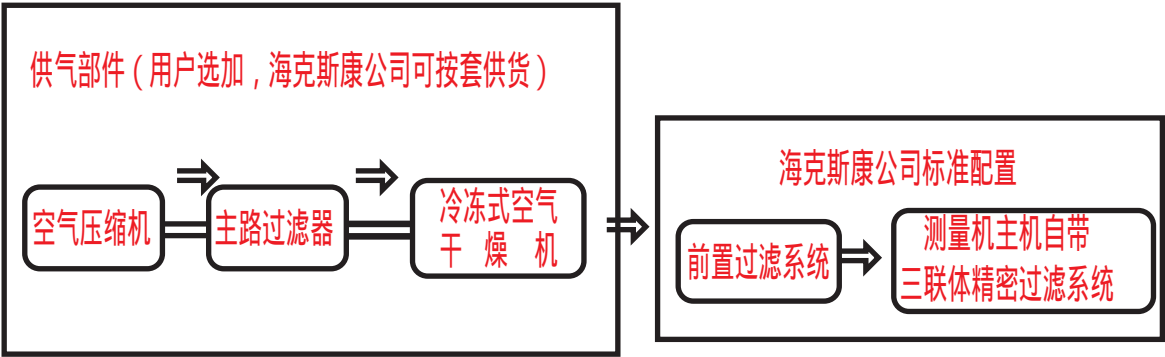


图 7.3 测量机气源系统

符合标准要求：	ISO 8573
进入测量机的压缩空气要求：	
-气压	大于0.55MPa
-耗气量	大于0.074m ³ /min
品质：	
-含水	6g/ m ³
-含油	5 mg/ m ³
-微粒大小	15 μ m
-浓度	10 mg/ m ³
供气软管：	6 毫米内径，耐压力要求：1.72 ² MPa

注：1 Nℓ 折合在 0℃ 及 1.0133 bar 情况下每分钟的气流（升）。

测量机本身带有精度较高的精密过滤器，可

以滤水和滤油，但仍应有前置过滤装置，保证压缩空气中不含有油、水和杂质，坐标测量机的前置过滤器须由用户另购。

6.2. 压缩空气产生原理和杂质的来源

产生、处理和贮存压缩空气的设备称为气源设备，由气源设备组成的系统称为气源系统。典型的气源设备包括空气压缩机，自动排水器，压力开关，压力表，油水分离器，气罐等。通过电动机驱动的空气压缩机，将大气压力状态下的空气压缩成较高的压力，输送给气动系统。压力开关是根据压力的大小来控制电动机的启动和停转。当气罐内压力上升到调定的最高压力时，使电动

机停止运转，当气罐内压力降至调定的最低压力时，则电动机又重新运转。当气罐内压力超过允许限度时，安全阀自动打开向外排气，以保证气罐的安全。冷冻空气干燥式的冷却器降低压缩空气的温度，将水蒸气及油污冷凝成液态水滴和油滴。油水分离器用于进一步将压缩空气中的油，水分离出来。在冷却器，油水分离器和气罐的最低点处，设有手动或自动排水器，以便排除各处冷凝的液态油水。

6.3. 气源处理的必要性

从空压机输出的压缩空气中，含有大量的水分，油分和粉尘等杂质，必须适当清除这些杂质，以避免它们对气动系统的正常工作造成危害。

变质油分的粘度增大，从液态逐渐固态化而形成油泥。这会堵塞气浮块的气孔，造成气动元件内的相对运动件的动作不灵活。水分会腐蚀金属零件，管道内滞留的冷凝水，会导致流量不足，

压力损失增大。铁屑和粉尘使运动件磨损，造成元件动作不良，粉尘会加速密封件损伤，导致漏气。

空气质量不良是气动系统出现故障的最主要因素，使气动系统的可靠性和使用寿命大大降低。

一般来说，气源的杂质主要来源于：由系统外部通过空压机等吸入的杂质、系统内部产生的杂质和系统安装和维修时产生的杂质。

自动排水器用于自动排除管道低处，油水分离器，气罐及各种过滤器底部等处的积水。

6.4. 供气系统的典型配置

一般情况下，测量机的前置过滤装置，安装在三坐标测量机后方墙体之上便于观察的位置，并在放水杯下放置盛水容器。用户需要把供气部件安装在机房外面，空压机到测量机的距离不小于 50m，否则，需要考虑安装减震装置。如果压缩空气在进入测量机之前质量不好，需要选用前置过滤器，以便滤除油污和杂质，测量机往往由于压缩空气中过多的油、水，导致大的故障。

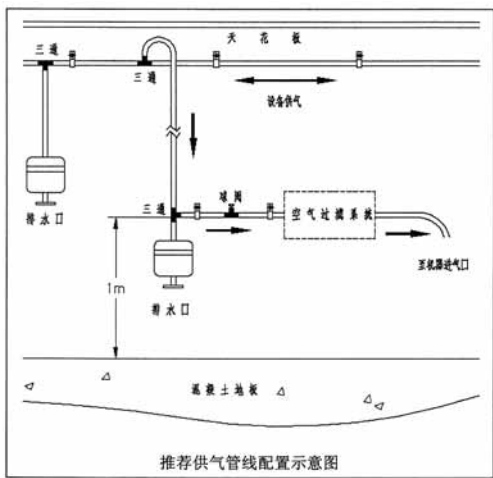


图 7.4 测量机室内供气系统布置图

7. 振动

工业地区常遭受到各种来自地面的振动，这些振动一般由压力机、锻压机、冲床等振动较大机床、交通及提升装置等产生并传向地面。即使机器的电气和主机部件再牢靠，来自外界的振动也会影响到测量精度，产生错误结果。因此，对测量机来说，对地基的振动有一定的要求。

按国家标准“隔振设计规范”，列出了各类精密仪器与设备的容许振动值（线位移或线速度），隔振对象隔振后的最大振动线位移、速度或加速度要小于或等于容许振动线位移、容许振动速度或容许振动加速度

$A_{max} \leq [A]$

$V_{max} \leq [V]$

$a_{max} \leq [a]$

例如，对于 Global 测量机，就提出了关于地基最大的振动幅度要求：

$0 - 6\text{Hz} < 7.62\mu\text{m} \text{ (0.0003in.)}$

$6 - 50\text{Hz} < 2.54\mu\text{m} \text{ (0.0001in.)}$

$\text{大于 } 50\text{Hz} < 7.62\mu\text{m} \text{ (0.0003in.)}$

对于其地类型测量机则按相应的安装手册进行；

如果用户测量机现场的振动低于要求的最大值，表明安装地点符合要求。

如果用户厂房地面振动不满足上述要求，用户应根据厂房周围振源情况采取适当的减振措施以达到上述要求；

我们建议采用下列措施：

- 1，使用弹簧减振器；
- 2，挖隔振沟，做与外界独立的基础等等。

8. 地基

在安装桥式测量机时，如果地面的承载大于 2.5 吨/米²，则不需要专门的地基，否则需要根据测量机厂商提供地基施工图的要求去做。同时注意不要将测量机安装在压力机，锻压机以及其它能引起地面振动的机床附近。

9. 电气要求

测量机需要专用的受保护电路才能正常工作，使用独立的电源以防线路干扰，采用暗线穿管方式，以避免出现跳闸危险。同时注意必须配备不间断电源，并应远离较强的电冲击源。

设备必须有可靠的接地装置。接地电阻应小

于 4 欧姆，当大于 4 欧姆时，应补增接地装置长度；每年检查接地电阻，并注意日常维护

采用冷光吸顶照明，照度应为 200 勒克斯。为防各停电所需，一般应配备应急照明装置。如果从光源到机器设备的距离小于机器的最大外形尺寸，应采用间接照明。

10. 检定验收环境要求

三坐标测量机检定验收前，检定验收环境必须经过恒温，达到正常使用温度后，再经过 24 小时恒温，测量机及控制系统通电预热稳定 2 小时以上，坐标测量机与检定工件的温差不超过 0.3℃，然后由制造商的技术服务工程师与用户工程师各一名进行检定验收，由于人体是重要的热源，检定时无关人员不得进入机房。

11. 测量机的日常维护

11.1. 每日

在完成保养步骤和纠正所有的偏差之前请不要操作测量机。

请检查测量机中是否有松动或损坏的外罩，如果需要，请紧固好任何松动的外罩，并修理任何损坏的外罩。

用酒精和干净、不掉纤维的布清洁空气轴承滑动通道的所有裸露表面。

在对空气过滤器，调节阀或者供气管道执行任何保养之前，请确保到测量机的供气装置已经关闭，并且系统气压指示为零。

检查两个空气过滤器是否有污染。如果需要，请清理过滤碗或者更换过滤器元件。

检查供气装置是否存在松动或损坏。如果需要，紧固任何松动的连接并更换任何损坏的管道。

11.2. 每月

请检查测量机外部，查看是否有松动或损坏的组件。视实际情况，紧固松动的组件，替换或修理损坏的组件。

在对三联体过滤器实施保养之前，一定要关闭供气设备。

检查三联体过滤器是否积聚了过多的油和水。如果发现严重污染，可能需要附加的空气过滤器和空气干燥剂来减少过滤器中积聚的污染物总量。

拆除平衡支架的前罩，检查传动带和传动轮带的磨损和破裂情况。必要时替换传动带和传动轮带。

11.3. 每季度

在完成保养步骤和纠正所有的偏差之前，请不要操作测量机。

只有经过培训并通过审定的人员才能保养电气组件。

在对控制系统和测量机进行下列任何保养之前，一定要关闭电源。

检查控制系统内的污染物，松动或损坏的布线。如果存在故障，必须对机器进行维修。

拆除它们的入口外罩，检查气动系统的管道，查看有无收缩和破裂。如果存在故障，必须对机器进行维修。

执行完季度保养清单的内容之后，通过运行简单的测量机精度程序（测试重复性，量块几何尺寸，线性精度等）进行功能性检查。

注意在对供气系统进行任何保养工作之前，必须关闭气源。在打开气源前，过滤器必须牢固连接。

12. 测量机正常工作对环境的要求

由于坐标测量机是一种高精度的检测设备，环境条件的好坏，对于测量机的正常工作至关重要。这其中包括检测工件状态及环境，温度条件，振动，湿度，供电电源，压缩空气等因素。

12.1. 检测工件的状态及环境

检测工件的物理形态对测量结果有一定的影响。最普遍的是工件表面粗糙度和加工留下的切屑。冷却液和机油对测量误差也有影响。通常，灰尘和脏东西可集中在测球上影响测量机的性能

和精度。类似的影响测量精度的情况还很多，大多数可以避免，建议在测量机开始工作之前和完成工作之后进行必要的清洁工作。

12.2. 温度条件（见 5.1）

影响测量的主要环境因素是温度，必须满足测量机正常工作所需要的温度条件。

12.3. 振动

由于较多的测量机应用在生产现场，振动成为一个普遍性的问题。必须满足测量机正常工作测量机的制造商对于地基振动频率与振幅的要求。

12.4. 湿度

机房的湿度直接影响到测量机零件和电气系统的安全。必须满足测量机正常工作所需要的湿度条件。

12.5. 供电电源（见 5.2）

为保证控制系统和计算机系统以及同外部联网的良好运作，对于供电电源有一定的要求，这包括：电源电压变化，频率要求以及接地装置，屏蔽装置的要求等，在我国电源电压及频率的稳定性是一个重要的问题。

12.6. 压缩空气

对于坐标测量机的采购者，应当满足测量机对压缩空气的要求，防止由于水和油浸入压缩空气对测量机产生影响，同时应防止突然的断气，以免对测量机空气轴承和导轨产生损害。

13. 制订测量机操作规程应考虑的项目

操作规程通常分为三部分：

13.1. 第一部分是工作前的准备，主要有以下三项

A 检查温度情况，包括测量机房，测量机和零件：连续恒温的机房只要恒温可靠，能达到测

量机要求的温度范围，则主要解决零件恒温（按规定时间提前放入测量机房）。

B 检查气源压力，放出过滤器中的油和水，清洁测量机导轨及工作台表面。

C 开机运行一段时间，并检查软件、控制系统、测量机主机各部分工作是否正常。

13.2. 第二部分是在检测工作中应当注意的几个方面

A 查看零件图纸，了解测量要求和方法，规划检测方案或调出检测程序。

B 吊装放置被测零件过程，要注意遵守吊车安全的操作规程，保护不损坏测量机和零件，零件安放在方便检测，阿贝误差最小的位置并固定牢固。

C 按照测量方案安装探针及探针附件，要按下紧急停再进行，并注意轻拿轻放，用力适当，更换后试运行时要注意试验一下测头保护功能是否正常。

D 实施测量过程中，操作人员要精力集中，首次运行程序时要注意减速运行，确定编程无误后再使用正常速度。

E 一旦有不正常的情况，应立即按紧急停，保护现场，查找出原因后，再继续运行或通知维修人员维修。

F 检测完成后，将测量程序和程序运行参数及测头配置等说明存档。

G 拆卸（更换）零件，清洁台面。

13.3. 第三部分是关机及整理工作，主要有两项

A 将测量机退至原位（注意，每次检测完后均需退回原位），卸下零件，按顺序关闭测量机及有关电源。

B 清理工作现场，并为第二天工作做好准备。

14. 用户进行测量机的自检

为保证测量机的精度，用户经常进行测量机的自检是非常重要的。

我们推荐给用户进行自检的方法主要有两种：

一是采用标准器对测量机的精度情况进行检查，如：示值误差、探测误差等。

二是采用经验证的样件检查测量精度情况。

15. 三坐标测量机的日常维护及保养注意事项举例

三坐标测量机做为一种精密的测量仪器，如果维护及保养做得及时，就能延长机器的使用寿命，并使精度得到保障、故障率降低。为使客户更好地掌握和用好测量机，现列出测量机简单的维护及保养规程。如果要详细了解，请参加海克斯康公司组织的定期硬件培训。

1. 开机前的准备：

1. 三坐标测量机对环境要求比较严格，应按合同要求严格控制温度及湿度；

2. 三坐标测量机使用气浮轴承，理论上是不磨损结构，但是如果气源不干净，有油、水或杂质，就会造成气浮轴承阻塞，严重时会造成气浮轴承和气浮导轨划伤，后果严重。所以每天要检查机床气源，放水放油。定期清洗过滤器及油水分离器。还应注意机床气源前级空气来源，（空气压缩机或集中供气的储气罐）也要定期检查；

3. 三坐标测量机的导轨加工精度很高，与空气轴承的间隙很小，如果导轨上面有灰尘或其它杂质，就容易造成气浮轴承和导轨划伤。所以每次开机前应清洁机器的导轨，金属导轨用航空汽油擦拭（120 或 180 号汽油），花岗岩导轨用无水乙醇擦拭。

4. 切记在保养过程中不能给任何导轨上任何性质的油脂；

5. 定期给光杆、丝杆、齿条上少量防锈油；

6. 在长时间没有使用三坐标测量机时，在开机前应做好准备工作：控制室内的温度和湿度（24 小时以上），在南方湿润的环境中还应该定期把电控柜打开，使电路板也得到充分的干燥，避免电控系统由于受潮突然加电后损坏。然后检查

气源、电源是否正常；

7. 开机前检查电源，如有条件应配置稳压电源，定期检查接地，接地电阻小于 4 欧姆。

2. 工作过程中：

1. 被测零件在放到工作台上检测之前，应先清洗去毛刺，防止在加工完成后零件表面残留的冷却液及加工残留物影响测量机的测量精度及针头使用寿命；

2. 被测零件在测量之前应在室内恒温，如果温度相差过大就会影响测量精度；

3. 大型及重型零件在放置到工作台上的过程中应轻放，以避免造成剧烈碰撞，致使工作台或零件损伤。必要时可以在工作台上放置一块厚橡胶以防止碰撞；

4. 小型及轻型零件放到工作台后，应紧固后再进行测量，否则会影响测量精度；

5. 在工作过程中，测座在转动时(特别是带有加长杆的情况下)一定要远离零件，以避免碰撞；

6. 在工作过程中如果发生异常响声或突然应急，切勿自行拆卸及维修，请及时与我公司联系，本公司会安排经过严格培训的人员前往，并承诺以最快的速度帮助客户解决问题。

3. 操作结束后：

1. 请将 Z 轴移动到下方，但应避免针头撞到工作台；

2. 工作完成后要清洁工作台面；

3. 检查导轨，如有水印请及时检查过滤器。如有划伤或碰伤也请及时与本公司联系，避免造成更大损失；

4. 工作结束后将机器总气源关闭。

第八章、坐标测量机的选择及应用

随着坐标测量机在机械结构、测头、软件和附件技术上的提高，坐标测量机在应用领域也趋向于细化。三坐标测量机的成功应用需要充分考虑被测工件的测量要求、测量工作环境、操作人员以及使用测量结果的部门和人员，只有将以上因素进行充分优化，并充分考虑安装、编程、夹具和输出格式等诸多因素，才能最大限度地提高测量的效率和质量，充分发挥坐标测量机的效用。

本章将从选择适用的坐标测量机入手，介绍选择坐标测量机的主要要素，并结合测量机的主要应用领域，展示最新坐标测量技术的应用。

- * 操作界面
- * 零件的夹持与固定方法
- * 环境要求
- * 数据输出方式
- * 测量机技术服务
- * 培训和技术支持
- * 售后长期技术支持和技术服务

本章中,将就以上与坐标测量机本身性能息息相关的因素展开描述，并根据其属性分为硬件性能、软件性能和其他因素。

1. 选择测量机需要考虑的因素

一般来说，选择测量机需要考虑以下要素：

- * 行程范围和机器的配置
- * 精度和重复性
- * 速度或者说是效率
- * 探测方法

1.1. 硬件性能

在纷繁复杂的各类坐标测量机中，如何进行正确的选型，有如下重要因素值得考虑：

1.1.1. 测量行程：

测量行程的选择往往取决于被测工件的最大尺寸，同时，还应当适当考虑未来工作或者计划的要求。

如果检测过程需要加长杆和夹具，那么，实际需要的行程范围可能要比工件的尺寸要大得多。

例如：测量如下箱体：

在这种情况下：

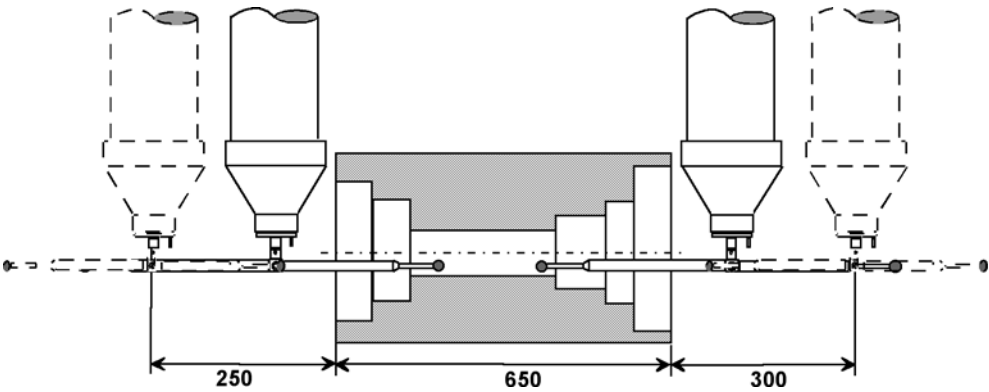


图 8.1 测量机行程的概算

这种分析需要针对每个轴进行，从而确定测量机需要的最小行程。

1.1.2. 测量机的结构形式

第二章中我们已经谈到坐标测量机的几种主要的结构形式，在选择合适的结构形式时，需要考虑被测工件的类型。在具体使用中，需要便于被测工件的装夹和运送

1.1.3. 测量精度

坐标测量机以其高精度而适用于质量保证和过程控制等领域，选择适当精度的坐标测量机对用户来说是非常重要的。这样一方面不会因为精度选择过高而致使选购成本加大，同时也不会因为测量精度过低而影响对产品质量评定的水平。

我们推荐用以下列表的方式，进行测量精度的选择。

所有被测特征（距离、直径、形状和真实位置），连同其公差要求，都在一个表中列出。然后列出根据 ISO 10360 国际标准规定的测量机 MPE_E 值、 MPE_P 值和 MPE_{TH} 值，这样，就可以计算出相应的“公差与测量精度”比例参数。

例如：在给定距离和直径情况下计算需要的 MPE_E 值，（请参见图8.2）

1.1.4. 测量速度和效率

测量机一般采用速度、加速度/减速度和每分

钟触测点数等数据反映其效率。测量机的效率主要反映在是否能够满足过程控制检测的要求，也就是说能否满足具体应用的需要。

随着现代制造效率的不断提高，坐标测量机这种重要的过程控制设备在提高效率方面发挥着重要作用。因此在进行坐标测量机的选型时，有必要对其逼近距离内采集单点时间、长距离情况下的运动速度以及测量典型零件所需时间进行考虑，以获得其在保证精度情况下测量效率的评价。

1.1.5. 测头的选用

我们在第五章《测头的选用》中已经进行了详细的描述。根据被测工件的物理特性、应用需要和精度要求选用适当的测头配置是非常重要的。

1.2. 软件性能

软件性能已经渐渐成为反映坐标测量机整体性能的重要因素，对于软件的详细描述请参考第四章，下面仅从选择的角度作简要论述。

1.2.1. 编程方法

有许多有效的编程方法，一般情况下包括：

- * 自学习联机编程
- * 基于 CAD 的脱机代码编程

1.2.2. 操作界面

						$MPE_E=0.6+L/600$			$MPE_E=2.2+L/400$		
NO.	数量	特征	名义值 [mm]	上公差 [mm]	下公差 [mm]	测量机 误差 [mm]	占公差 百分比	比率	测量机 误差 [mm]	占公差 百分比	比率
1	1	直径	286	-0.020	-0.040	+/- 0.0011	11%	1:9.3	+/-0.0029	29%	1:3.4
2	1	距离	320	0.012	-0.012	+/- 0.0011	9%	1:10.6	+/-0.0030	25%	1:4.0
3	1	距离	22	0.000	-0.008	+/- 0.0006	16%	1:6.3	+/-0.0023	56%	1:1.8

图 8.2 在给定距离和直径情况下计算需要的测量机精度，E 值

直观的图形化操作界面将增强测量机的性能。测量软件的操作界面在纷纷转为象 WINDOWS 一样的操作界面以后，又不断加强图形化、下拉菜单、图表化、用户定制菜单等方面的应用，力求给用户赋予最简单直观的操作界面，从而使得操作更加宜人化，用户的进入门槛降低。

1.2.3. 数据输出格式

测量机的输出是信息，信息只有在其被决策者理解才能有效。在这种情况下，直观的图形化用户报告是一个最好的选择，而且应当适合不同的用户，可以量身定制。

1.2.4. 数据评价方法

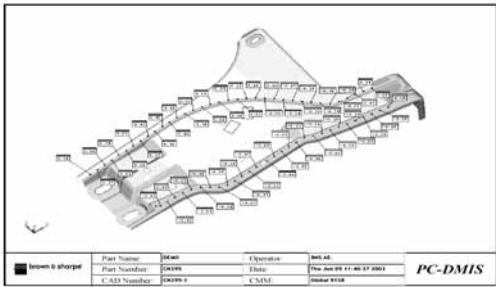


图 8.3 数据输出

我们知道，坐标测量机主机所采集的是被测工作表面点的 X、Y、Z 向坐标值，而测量机用户所要了解的是具体孔的尺寸、基准的垂直度、被测特征间的相互关系和其他各种尺寸、位置信息等等，这样数据点的坐标必须要转化成为工件的几何信息。

测量软件通过其内置的算法实现对工件几何信息的换算，并为用户提供了采用何种拟合技术的选择，还包括了关于复杂轮廓的评价和分析等等。

在最新的坐标测量机国际评定标准中，增加了有关软件评定的标准部分。目前在测量软件中，比较权威的是德国物理科学研究院（PTB）的软件认证。

1.2.5. 软件接口

测量数据的输出、基于 CAD 的零件检测程序编制以及逆向工程的要求，坐标测量机已经不再是一台孤立的检测设备，只有有效的与生产流程、CAD 系统进行结合，才能最大限度发挥测量机的效用。在这种情况下，要求测量机软件可兼容多种输入/输出格式。

1.3. 其他因素

1.3.1. 工件的运送和固定方法

对于一些比较大的工件或者是整合在生产线的坐标测量机，需要充分考虑工件的运送和装夹办法，为满足自动化生产线的要求，很多情况下，测量机的供应商可帮助用户设计自动/半自动上下料系统，从而大大提高检测效率。

工件的固定方法：有各种通用和专用夹具，能够完成各种形状工件的夹紧与固定，从而有效提高测量的精度。

Swift-Fix 夹具组件是世界最大测量机专业制造商 HEXAGON 计量集团专业设计具有综合测量性能的装夹系统，为您随时提供各种不同类型零配件的测量准备。通过设计了 4 种标准型号的配套组件，每一种型号都包含底板座（1 件）和一套标准的部件，例如：夹钳，支架，柱塞，拉力弹簧柱等（见零件细则单如下）。通过各种组件的组合，可以对各种工件进行灵活装夹。



图 8.4. 简单实用的SWIFTFIX通用夹具系统

SWIFTFIX标准部件的组成要素

数量	部件名称	数量	部件名称
2	弹簧压板	6	∅12 x 20 支架
2	拉力弹簧柱	6	∅12 x 30 支架
2	拉力弹簧支架	6	∅12x 50 支架
2	弹簧柱塞	6	∅6 x 20 支架
2	翼形螺钉	6	∅16 x 30 支架
2	可调节紧固压板	6	∅16x 50 支架
2	高度微调仪	6	∅20 x 20 支架
2	滑块	6	∅20 x 30 支架
2	M8 翼形螺钉	6	∅20 x 50 支架
4	∅20面磁铁	3	铝锥形体
6	阳接头	3	尼龙锥形体
2	支座销	2	M8 底板紧固螺钉
2	万向节	1	组件托盘

注：底板座为厚度 16mm 通用铝 合金栅格板，规格：均匀分布 196 个中心距为 20mm，M8 的螺纹孔

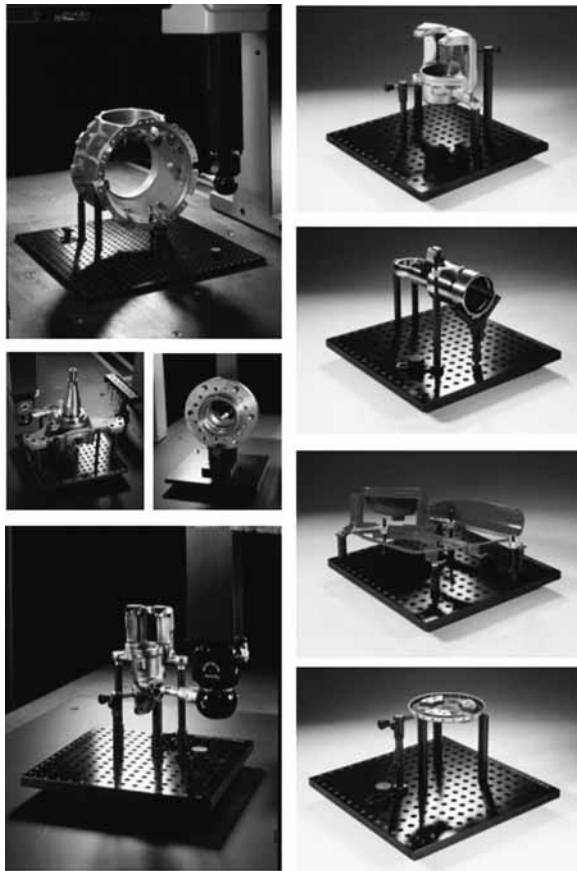


图 8.5 SWIFTFIX装夹实例

近几十年来，汽车和飞机的制造商一直为大

型薄壁冲压件的检测夹具而大伤脑筋，他们的梦想是用一种灵活多变的夹具来代替昂贵而复杂的专用夹具。意大利 DEA 公司生产的 Five U-nique 系统终于使他们梦想成真。



Five U-nique 如何代替各种复杂的专用夹具呢？以下就这种灵活性夹具的原理，结构、应用程序做一下简单的介绍：

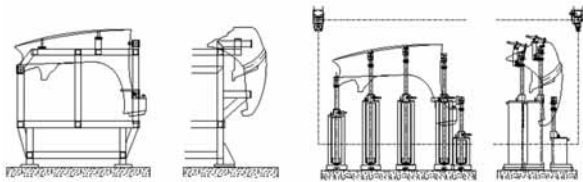
“灵活夹具”的原理

需要坐标测量机系统控制质量的工件，往往是属于以下三种类型：

1. “挤压几何量”（如钣金挤压件、塑料仪表盘、玻璃件等）
2. “复杂几何量”（如齿轮、涡轮叶片、凸轮等）
3. “箱体类工件”（如发动机箱、齿轮箱、汽车化油器等）

其中“复杂几何量”和“箱体类工件”都以固有的高硬度为特性，所以他们的几何尺寸不会受装夹的设备和在测量空间的位置的影响。相反地，“挤压几何量”工件，也称为“薄壁”件以其固有的低硬度为特性，则要求用准确的支撑点装夹/定位以避免无法控制的结构变形。这些装夹点是一系列相关的三维空间点，对应工件的名义点。因为大多数“薄壁”件，经过单件测量之后，还要装配到车身上，所以最好以车身位置检测。因此，夹具必须在工件最后装配时的特征点“装夹”，因为每个工件的特性不同，每种夹具只能对应一种工件或非常相似的工件。专用夹具在满足装夹的需要时，还要保证高重复性及可快速更改（夹

具已存在的情况下)，但是专用夹具的局限性在于很长的交货期，缺乏灵活性及更改时需要较高的费用。而且，储存费用也不容忽视（一种工件有一种夹具）。下图是用专用夹具及用“Five U-nique”灵活夹具系统两种方法，以车身位置装夹“薄壁”件：



由此看来，灵活性夹具是代替专用夹具的一项革新性产品，它使得为一个工件而设计专用夹具的方法从此可以摒弃。

而且“Five U-nique”可在任何测量系统上使用，因为它不需要与检测设备有特殊的电气和软件的联结。“Five U-nique”用坐标测量机选择需要装夹的检测工件，坐标测量机能够检测的工件，夹具就相应地支持这些工件。选择一台坐标测量机时，工件的以下特征需要考虑：

1. 被检工件的尺寸和特性决定机器的行程范围和结构形式。

2. 工件需要检测特征的特性和位置决定测座和测头的特征（固定测头或旋转测头）。

3. 工件的公差决定三坐标测量机的精度。

选择测量系统是工件质量控制的需要，夹具系统必须根据选择的测量系统调整。需要说明的是“Five U-nique”系统只用于装夹工件，测量设备则用于评价工件的质量。在选择一台测量设备的同时也决定了灵活夹具系统的特征：

1. 测量系统的工作台的材料决定夹具系统的立柱的型号（机械或电磁锁紧装置）

2. 工件需要装夹点的数量和点在机器垂直空间的位置决定需要立柱的数量。

对每个装夹点的支撑和锁紧的要求，决定连接立柱和工件的模块包的最佳配置方式。

1.3.2. 环境因素（参看第7章）

由于坐标测量机是一种高精度的检测设备，环境条件的好坏，对于测量机的影响至关重要。

这其中包括检测工件状态及环境、温度条件、振动、湿度、供电电源、压缩空气等因素。

2. 坐标测量机的典型应用

坐标测量机以其通用性强而在制造业得以广泛应用。下面我们将以几种典型应用为主题，向您展示测量机选用方案。

2.1. 测量箱体类工件

2.1.1. 适用的测量机

根据被测工件的尺寸和公差要求选用合适的测量机。

一般来说，桥式测量机能够满足绝大多数箱体类工件的测量要求，对于大型和超大型的测量应用，可考虑选择龙门式或水平臂测量机。GLOBAL 系列测量机，代表了当今一流的移动桥

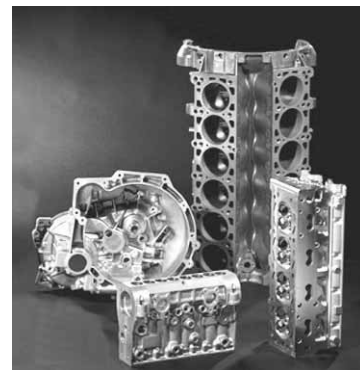


图 8.6 测量箱体零件

式测量机系列，该机型具备三种精度等级，测量行程范围从 500×500×500mm 一直到 2000×4000×1500mm，从而可涵盖 80% 以上的测量应用。下表说明了目前 GLOBAL 所具备的尺寸型号和测量精度。



图 8.7 GLOBAL活动桥式测量机

尺寸系列和性能指标

系列	型号	行程范围(mm)			外形尺寸(mm)			长程测量最大行程范围 (L-mm)
		X	Y	Z	W	L	H	
STATUS	555	500	500	500	1025	1180	2230	2.5+4L/1000
	575	500	700	500	1025	1480	2230	2.5+4L/1000
	777	700	700	660	1315	1650	2842	2.5+4L/1000
	7107	700	1000	660	1315	1950	2842	2.5+4L/1000
	998	900	900	800	1510	2195	3066	2.7+4L/1000
	9128	900	1200	800	1510	2495	3066	2.7+4L/1000
	9125	900	1500	800	1510	2795	3066	2.7+4L/1000
	9208	900	2000	800	1510	3295	3066	2.7+4L/1000
	121510	1200	1500	1000	1810	2945	3330	4+4L/1000
	122210	1200	2200	1000	1810	3645	3330	4+4L/1000
	123010	1200	3000	1000	1810	4445	3330	4+4L/1000
IMAGE	555	500	500	500	1025	1280	2431	1.5+3L/1000
	575	500	700	500	1025	1460	2430	1.5+3L/1000
	777	700	700	660	1315	1650	2842	1.5+3L/1000
	7107	700	1000	660	1315	1950	2842	1.5+3L/1000
	998	900	900	800	1510	2195	3066	1.7+3L/1000
	9128	900	1200	800	1510	2495	3066	1.7+3L/1000
	9158	900	1500	800	1510	2795	3066	1.7+3L/1000
	9208	900	2000	800	1510	3295	3066	1.7+3L/1000
	121510	1200	1500	1000	1810	2945	3330	2.2+3L/1000
	122210	1200	2200	1000	1810	3645	3330	2.2+3L/1000
	123010	1200	3000	1000	1810	4445	3330	2.2+3L/1000
	152210	1500	2200	1000	2110	3645	3330	3+3.5L/1000
	153010	1500	3000	1000	2110	4445	3330	3+3.5L/1000
	152014	1500	2000	1400	2388	3260	4385	3.5+4L/1000
	152614	1500	2600	1400	2388	3880	4385	3.5+4L/1000
	153314	1500	3300	1400	2388	4580	4385	3.5+4L/1000
	203315	2000	3300	1500	2888	4580	4685	4.5+5L/1000
	204015	2000	4000	1500	2888	5280	4685	4.5+5L/1000
REFERENCE	7106	700	1000	560	1250	1910	2700	1.0+L/1000
	9157	900	1500	700	1560	2800	3070	1.0+L/1000
	9207	900	2000	700	1560	3295	3066	1.0+L/1000
	12229	1200	2200	900	1860	3650	3330	1.7+L/1000
	12309	1200	3000	900	1860	4450	3330	1.7+L/1000

图 8.8 GLOBAL 活动桥式测量机规格

采用合适的探测方法对于完成测量任务关系重大，为满足箱体类工件的测量要求，您可以选择触发式测头，以及模拟扫描测头，

为加快检测效率，可以考虑选择机动测座和测头更换架，在这方面，厂家一般都具有各种方案供选择。

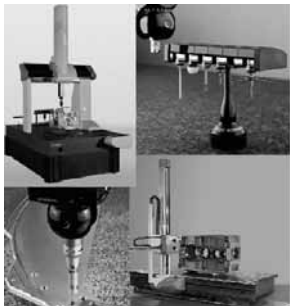


图 8.9 测头及测头座选择

2.1.2. 适用软件

箱体类工件以组合平面和孔或轴为主要元素，主要测量空间尺寸与元素的形状位置误差。相对来讲，这是最基本、最简单的一类测量任务。对测量软件的要求主要包括计算方法的正确性、功能的完整性及操作的便利性三个方面。软件功能的完整性是看是否包含所有的形状位置误差项，是否具有多重国际、国家标准，例如 ISO、DIN、GB 等，以及各种评价准则，例如最小二乘、最大实体、最小实体等。

形位公差的测量虽然是所有测量软件包的基本功能，但以 CAD 为引擎的新一代测量软件包，通过数模编程、图形环境、图形报告功能，却使操作方式和工作效率有了革命性的改变。具有 CAD 功能的测量软件包已不仅限于对单个零件的测量，还在继续向装配组件发展。即可以由单个零件的测量数据进行装配模拟，以预测实际的组件状况。

PC-DMIS，完善、便于使用的通用测量与检测软件，具有独特的 CAD 接口功能，能够利用原始的 CAD 数据，完成检测程序的编制、图形化模拟并可产生直观的图形报告。

QUINDOS 通用测量软件，具有强大的、基于特征的测量功能，能够完成最复杂工件的高精度检测，多种选项测量软件，能够简化各种特殊几何形状的测量与分析。

2.2. 复杂几何量的测量



图 8.10 复杂形状的工件测量

复杂形状的工件，如齿轮、凸轮、转子、机翼、叶片、拉刀和滚刀，能够直接用测量机进行评价和分析。要完成以上任务，需要具备多种专用技术，包括具备扫描功能的测量机。利用高精度扫描技术，系统可完成工件外形和轮廓的修正，并同 CAD 模型进行比较和优化以确定其偏差。测量机专用模块能够完成各种复杂形状工件的检测。

2.2.1. 适用的硬件

扫描型测量机，采用高性能的三维测量/扫描测头，具备单点探测和连续扫描技术，特别适用于完成复杂形状工件的测量。

一般来说，一台测量系统能够完成复杂形状零部件的检测需要具备以下条件：

* 测量系统具有超高的测量精度性能，特别是坐标测量机极小的空间探测误差 MPE_P 值；

* 对于各种几何形状的测量，必须具备专业计量软件，同时软件必须具有正确的数学算法

在精度要求较高的情况下，高精度的坐标测量机 PMM-C 作为通用计量检测设备，不但能够代替其他类型的专用检测设备，例如代替传统意义的形状检测仪、齿轮测量设备和凸轮轴检测设备，执行复杂几何形状检测功能，降低了企业执行计量检测任务所需的设备投资，而且在节省企业计量费用，提高计量检测精度方面也发挥出重要的作用。

对于精度要求不太高的复杂零部件检测，可兼容多测头测量技术的 GLOBAL 也是一种很好的选择。这种测量机将单点探测、模拟扫描和非接触测量技术整合在一台测量机上，能够完成对复杂形状工件的自动测量。采用自动测头更换架能够加速和简化测头与探针的更换，机动测座的使用可以接触到工件表面的任意特征。除了上述强大的灵活性之外，多测头技术的优势还在于可根据生产流程的需要优化检测方法。操作者可根据需要进行精度和效率的定制。

2.2.2. 适用的软件

正如我们前面所谈到的，完成复杂形状工件的评价和分析的另外一个前提就是需要具备专业计量软件，同时软件必须具有正确的数学算法。

QUINDOS 专业计量软件的数学算法的正确性和有效性均通过德国国家物理研究所 PTB 的权威认证，达到工业领域最高精度标准，其中软件长度测量误差小于 0.1 μm，角度测量误差小于 0.1 角秒。

QUINDOS 基本软件包包括了检测标准工件的所有命令，如发动机箱体、齿轮箱等，并可包括根据 ISO 标准的全部形位公差评价功能等等。

QUINDOS 还可提供 30 多种选项软件包，用以测量形状最复杂的工件，请参见下面的软件选项列表。

测量物	测头	特殊几何量	其他混合选项
直线	测头	叶片	2D/3D 曲线检测
点及几何元素的二维型	测头/测针	螺纹	数据化输入/输出接口
曲面数字化	测头/测针	公差轴	自动量测控制
曲面其它几何元素的三维型	测头/测针	互补公差	坐标检测
统计分析	测头/测针	测的导向位置及速度	测量机误差模型
圆盘测量	测头/测针	测量的精度	图形输出
基本要素的测量	测头/测针	测针/测针	
圆度/圆	测头/测针	测针/测针	
圆柱度/圆柱	测头/测针	测针/测针	
与圆柱轴对称的圆柱	测头/测针	测针/测针	
球面/球	测头/测针	测针/测针	

图 8.11 QUINDOS 软件分类目录

2.3. 测量自由形状轮廓曲面

轮廓、自由曲面形状的测量，包括了模具、冲压件、塑料件和一些家电产品，如电话听筒、手机、键盘；或者是具备流线形形状的，如车身、飞机构件、船体等等。鉴于过程控制的核心是制造出符合设计要求的产品，需要测量机完成上述自由形状工件表面点数据的采集，并完成检测和过程控制任务。与箱体类工件所不同的是，精确地完成对形状的评价需要大量的数据点，从而使评价更为准确。

2.3.1. 点到点测量方法

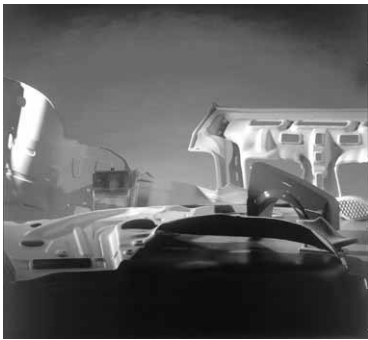


图 8.12 点到点测量方法

对于叶片的翼形或者一些模具内腔的检测，可以采用相对简单的利用触发式测头进行点到点测量的方法，然后将他们与蓝图或 CAD 模型进行比较。一些软件，如 PC-DMIS CAD 允许在测量程序中导入原始 CAD 模型，从而利用相应的名义数据矢量驱动测量机完成选定点的测量，然后软件可以计算出在矢量方向的测量和名义偏差。



图 8.13 连续扫描测量

2.3.2. 连续扫描测量方法

在需要大量数据点以反映工件表面特征时，点到点的测量方法相对就不太现实。在这种情况下，配备扫描测头完成空间测量是一种有效的方法。扫描工作方式能够自动完成工件空间外形的测量，同 CAD 数据相结合，能够对加工过程进行

判断。根据工件的几何形状是否已确定，测量机使用两种不同类型的连续扫描方法。

2.3.3. 非接触测量

对于一些小的工件、软材料工件或者需要高效率完成大量数据点的采集，在这种情况下，配备非接触光学测头的测量机成为一种有效选择。在许多应用当中，采用非接触测头使得测量机能够快速、精确地完成复杂形状的检测任务。诸如利用来自比利时 METRIS 公司的高精度非接触扫描头 LC50 或者 LC100，配合高性能测量机，如 GLOBAL。该测头完全兼容于 PH10 测座，能够精确地完成各种几何特征，如狭槽、小孔、细小件的测量任务。METRIS 非接触扫描软件包括了关于测头、测座的管理程序。其 CADcompare 选项，能够进一步完成工件测量、采集点云和 CAD 名义值的比较任务。

2.3.4. 软件性能对精度至关重要

通过先进的计量软件，如主流的测量软件 PC-DMIS，可最大限度地发挥扫描的作用，通过其独特的直接接口选项提供了与主要 CAD 系统的直接连接，避免由于格式转换而产生的偏差和失真，并具备完善的数据分析和报告功能。

由于对形状的测量需要大量的数据，因此测量软件需要具备一些特殊的扫描功能以为不同特征提供相应的扫描方法。如利用过滤功能允许扫描软件能够从对于表面形状的轻微变化中进行识别，如叶片的粗糙部分，过滤器同时还可减少振动所引起的采集点变化。

另一特殊的功能就是测头半径的修正，也称为平行曲线校准。在扫描应用中，数据需要采用平行曲线功能利用探针半径进行转换，从而获得工件曲面的真实表示。在分析过程中，利用平行曲线功能来消除扫描点与名义点之间的差异，从而计算出与名义点之间的偏差。

测量结果需要被展示以帮助轻易识别可能的工件问题，发现问题所在并在过程中采取适当的行动。"制造中"和"设计中"的结果比较能够以各种图形格式进行显示，从而可快速理解和帮助探测到在制造过程中所引发的错误。偏差可以彩色编码进行绘制，同时在扫描曲面上具有名义偏差带。（如图8.13）

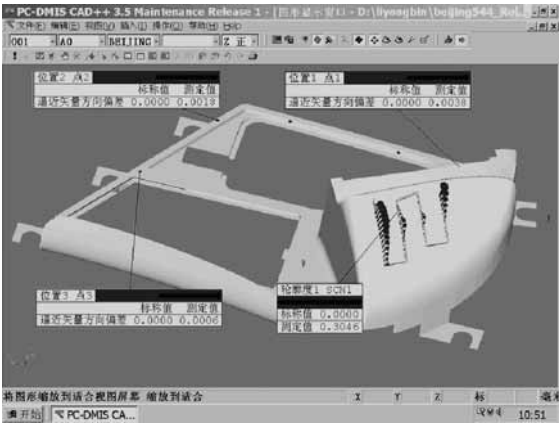


图 8.14 实际数据与理论数据比较

零件的编程和编辑必须是互动的，并充分利用 CAD 图形的优势。先进的扫描软件包允许三维工件几何量表示能够导入到测量程序中，自动从 CAD 模型上提取名义值和曲面的算术矢量。通过点击被扫描工件表面的区域和轮廓，系统可自动完成对区域和轮廓的扫描，并为采集数据进行报告。

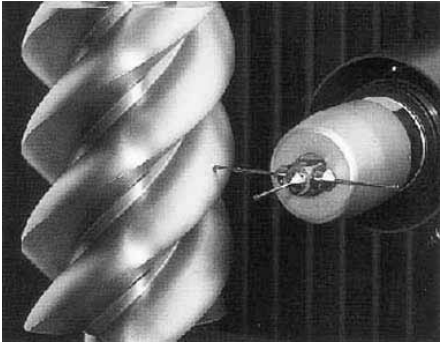


图 8.15 高精度工件的测量

2.4. 高精度工件的测量

高精度的工件，需要高精度、高重复性的测量机，能够产生可靠的、有用的质量数据为决策提供依据。

在高精度测量领域，德国 LEITZ 公司凭借其在高精度测量领域积累的世界级测量技术以及丰富的应用理论知识，通过高性能、高精确度的 PMM-C 三坐标测量机与功能强大的工业级计量软件 QUINDOS 的结合，不断解决来自工业各个领域的高精度的计量需求。

2.5. 大型、超大型工件的测量

在完成大型、难于搬运工件的检测过程中，龙门和水平臂测量机是这种应用的理想选择。开



图 8.16 大型、超大型工件的测量

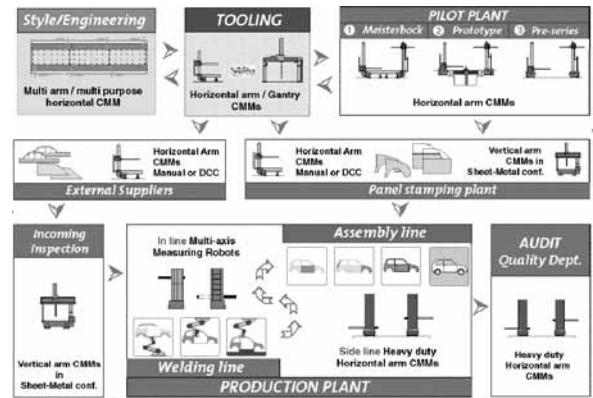


图 8.18 车身测量的全流程



图 8.17 车身的测量

放式结构便于工件的运送，并允许操作者接近工件进行测量。这种大型工件往往通过吊车或者铲车移到检测工作平台上。

2.6. 汽车零部件

在汽车行业需要坐标测量机系统控制质量的工件，往往是属于以下三种类型：

- * 冲压成型工件（如钣金冲压件、塑料仪表盘、玻璃件等）
- * 多参数复杂结构工件（如齿轮、涡轮叶片、凸轮等）
- * 箱体类零件（如发动机箱、齿轮箱、汽车化油器等）

一般来讲，涉及到汽车车身的制造包括有设计中心、试制工厂、冲压车间、焊装车间、装配车间和质检部门等，如图描述了一个汽车厂的整个构成。下面，我们将就车身制造的主要环节，分析需要，提出解决方案。

2.6.1. 设计中心：由概念产生实物

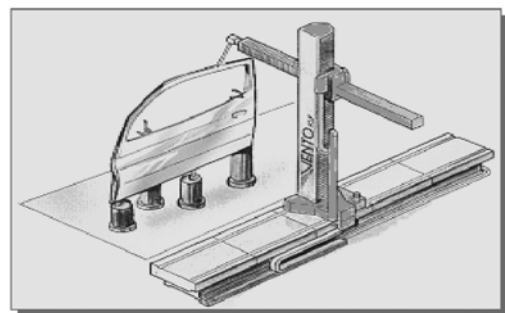
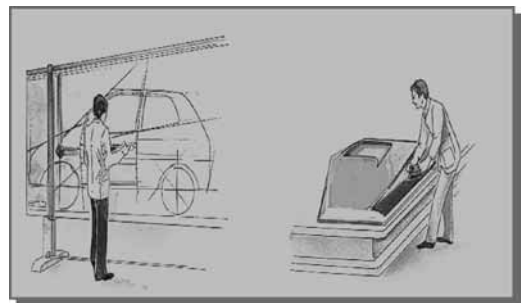


图 8.19 设计模型或样件测量

* 基本需要：

- 进行新产品的设计与改进
- 由物理原形产生 CAD 数据
- 具备强大 CAD 功能
- 与 CAD/CAM 系统的结合
- 能够实现逆向工程

* 测量机配置要求：

- 多性能、多臂测量系统

2.6.2. 试制工厂



图 8.20 测量机在试制工厂

* “样板”的尺寸检测

• 基本需要:

-RPS 点

-工件设置

-高精度

-确定基本的工件偏差

• 测量机配置要求:

-高精度双水平臂测量机

-高承载工作平面

-可手动控制以增加灵活性

* 样机的尺寸检测:

• 基本需要:

-完整的车身，包括底盘的测量

-高精度、高效率

-可对制造流程进行调整

-小批量

-数控或手动

• 测量机配置要求:

-高精度双水平臂测量机

-手动垂直第三轴

-连续伺服关节增加可接近性

-实时多臂控制

-高效率数控/手动操作

* 试生产的尺寸检测:

• 基本需要:

-完整的车身，包括底盘的测量

-高精度、高效率

-可对制造流程进行调整

-小批量

-数控或手动

• 测量机配置要求:

高精度双水平臂测量机

-连续伺服关节增加可接近性

-直接由 CAD 文件编制检测程序

-实时多臂控制

-高效率数控/手动操作

2.6.3. 冲压车间

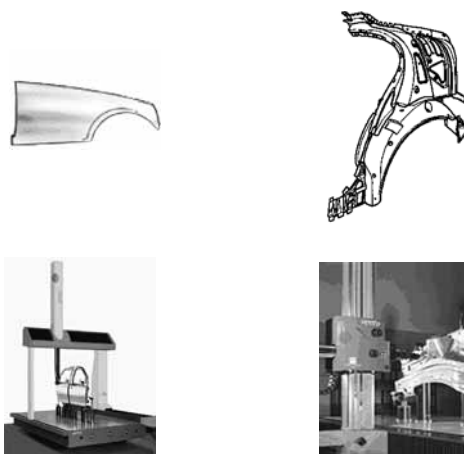


图 8.21 冲压件测量

* 基本需要:

-被测工件刚性低(工件需要依照实际“模型”、“车身”的位置进行测量)

-检测手段/过程与生产工厂一致

-保证板件的公差以防装配问题

-灵活性强(被测工件各式各样)

-可简易、快速的进行被测工件的变换

-高效率

-应用在车间环境

• 测量机配置要求:

-水平单臂测量机和/或桥式测量机

本

- 半自动柔性夹具系统，节省空间、时间和成本

- 数控操作
- 钣金件测量功能
- 双向DMIS支持

2.6.4. 入厂/外协检验

- 基本需要：
 - 验证产品/分供应
 - 减少库存 (实时操作)
 - 检测效率高
 - 适应车间环境
 - 灵活性强（单台设备检测所有工件）
 - 确保工件的公差以预防装配问题

· 测量机配置要求：

- 单水平臂测量机和/或桥式测量机
- 半自动柔性夹具系统（节省占地空间、时间和成本）

- 完善的钣金件测量程序

2.6.5. 焊装线

- 基本需要：
 - 过程监控
 - 车间环境
 - 仅对关键特征进行尺寸控制 (100到200个点)
 - 可对车身进行高达100%的检验

- 超高效率 (数控)
- 可每天2/3班轮换工作
- 可脱机产生工件检测程序
- 可与汽车生产上、下料系统整合

· 测量机配置要求：

- 水平单臂测量机和/或桥式测量机
- 半自动柔性夹具系统（节省占地空间、时间和成本）

- 完善的钣金件测量程序

2.6.6. 装配线

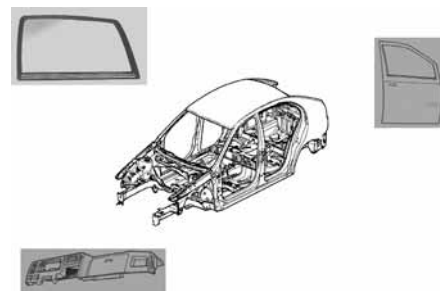


图 8.22 测量机在装配线

- 基本需要：
 - 对关键组合特征进行验收（如：嵌入式开口）
 - 适应车间环境
 - 对所有特征实施尺寸控制（多达 2000 点/特征）

-各种不同的检测任务

-可进行每天 2/3 班的轮换工作

-全数控或机动操作，用户友好的操作平台

-可整合在自动工件上、下料系统中

· 测量机配置要求：

-稳固的双臂测量机

-多臂检测单元总成

-连续伺服测腕提高了测量的可接近性

-全自动柔性夹具

-检测数据的实时反馈，进行统计分析以完成过程监控

2.6.7 质保部门



图 8.23 测量机在质保部门

· 基本需要：

-对关键组合特征进行进行最终验收 (如嵌入式开口)

-对关键车身元素进行检验

-对最终产品实施质量控制（整车身）

-各种不同的测量任务

-适应车间环境

-采用滑轮车进行车身部件的上、下料

· 测量机配置要求：

-高精度/大负荷水平臂测量机

-双臂配置

-全数控或手动操作，用户友好的操作平台

-连续伺服测腕增加了操作的可接近性

-便于工件上下料

-定制的交钥匙方案



图 8.24 水平测量机在工作

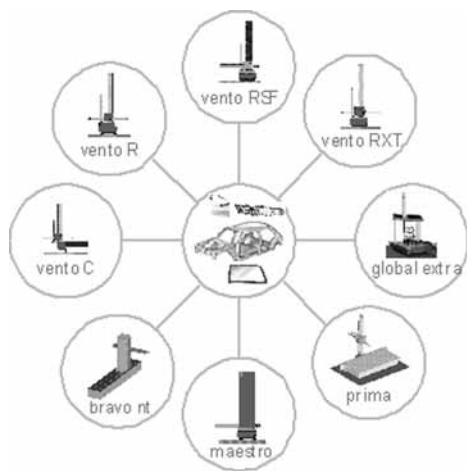
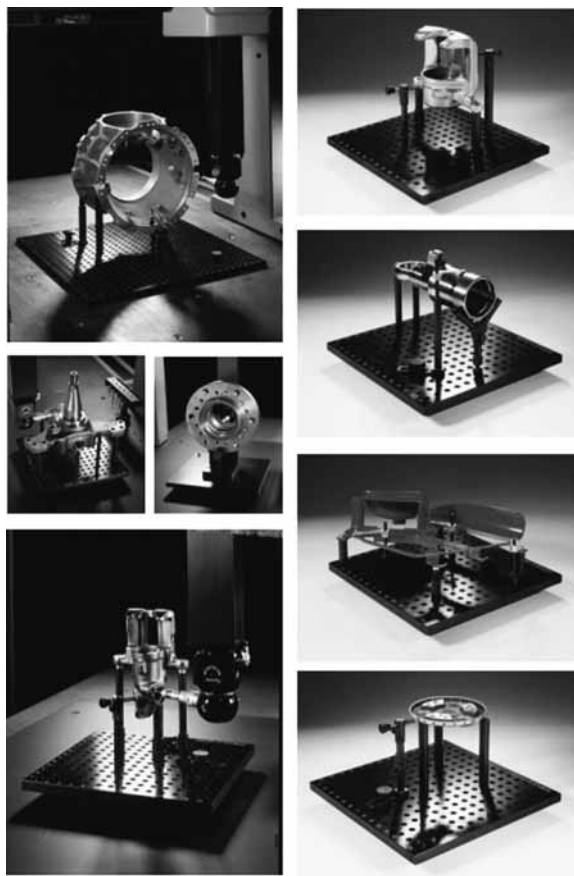


图 8.25 汽车工业所用的各类测量机

安装其它工件装夹示例



我们前面通过描述汽车车身制造的每个流程，分析了测量的需要，同时推荐了适当的测量机配置，通过这个过程，读者比较容易地了解到测量机在汽车制造的每个过程的应用。同时，作为在汽车制造业享誉全球的测量机制造商，意大利公司具备完善的全系列钣金件用测量机，能够满足汽车制造的每个过程中尺寸检测的需要。

2.7. 自由曲面形状工件的逆向设计（见第 4 章第 11 节）

逆向工程是利用从实体模型采集数据信息，并反馈到 CAD/CAM 系统进行设计制造的一个过程。逆向工程是解决直接从样件实现再造、建立那些已经遗失设计文件的工件设计文件以及结合现有 CAD 模型进行设计改进的好方法。

通过坐标测量机厂商所提供的先进手段和方法，可有效地协助您完成逆向工程应用。通过利用坐标测量机，探测所要实现逆向工程设计的零件表面，利用专业软件对采集数据进行处理，生成该零件直观的图形化表示，进行有关设计更改，

并经过性能模拟测试。这样，就大大缩短了设计时间，简化了零件的调整和评估时间。

2.7.1. 硬件配置

选择正确的测量机硬件的关键因素在于其效率。根据不同的应用，测量机可配备触发或扫描测头。尽管触发测头通用性强，但扫描技术能够在同样的时间内采集到更多的点，从而适合于需要采集大量点以确定其形状的复杂零件的逆向设计中。

一般的系统配置包括采用 SP600 模拟扫描测头，能够对未知三维自由型面进行连续扫描，连续、非接触激光测头（如 WIZPROBE、LC50 和 LC100），能够快速精确地完成复杂型面尤其是软材料工件的扫描，触发式测头（如 TP20 和 TP200），能够实现对于空间几何量的精确接触测量。

2.7.2. 软件的选择

一旦确定了测量机的硬件，合适的测量机应用软件能够加速采集数据的速度，并可方便地下载到 CAD/CAM 系统。

具有强大 CAD 功能的 PC-DMIS 通用测量软件，能够根据具体应用需要，采用接触式点触发测头或采用连续扫描测头，进行工件表面点的数据采集，并可采用多种方式实现采集点数据的输出，这包括利用通用的 IGES 格式和/或 VDA 格式进行测量数据的导出。

特征的关系。在检测过程中进行大量数据点的采集提高了对于工件几何尺寸描述的准确性，使得获取的信息对于过程控制更加有效。扫描测量机能够自动完成工件的检测，快速采集大量数据点，从而精确地定义尺寸、位置和形状，具有良好的精度与重复性。通过与 CAD 系统的联合，可以对加工过程提供参考。

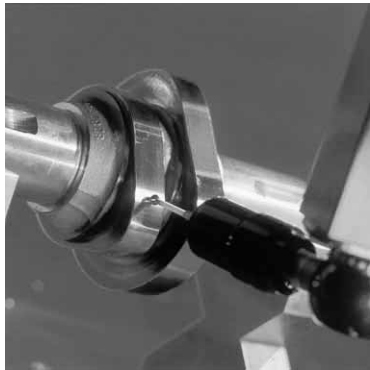


图 8.26 利用扫描技术完成测量和造型

2.8.1. 检测所面临的特殊难题

工件的形状越复杂，就需要越多的数据点以完成形状的描述。大量的数据点需要用来精确描述几何外形，如齿轮、螺旋压缩机和叶片，以及自由形状曲面，诸如模具、塑料模具、车身、船体。箱体类工件同样能够从扫描测量中获益，通过采集和分析大量点数据而减少测量的偏差。我们知道，圆的直径最少由三点确定，但如果采集的点更多，那么根据大量点所进行的关于圆的直径、形状和位置的评价无疑将会更准确。关于圆的形状的测量可能需要成千的点，这基于评价水平的需要。同时，大量数据点的采集必须快速以确保对过程控制进行实时反馈。装备模拟测头的扫描测量机能够实现连续扫描，能够将大量的点源源不断地反馈到计算机系统。能够快速、精确地采集大量数据点，协助操作者完成箱体类工件、复杂形状工件和自由形状工件的检测。

2.8.2. 适用的测头系统

* 接触式扫描测头：

这种测头可沿被测表面进行连续的扫描与数据采集，避免了其他辅助运动所造成的时间上的浪费。主要包括：

2.8. 利用扫描技术完成测量和造型

在工业计量领域，不仅需要知道工件特征的位置，同时还要包括其形状、尺寸和与工件其他



SP600: 通用扫描测头

SP25: 集触发与扫描测量为一身的测头

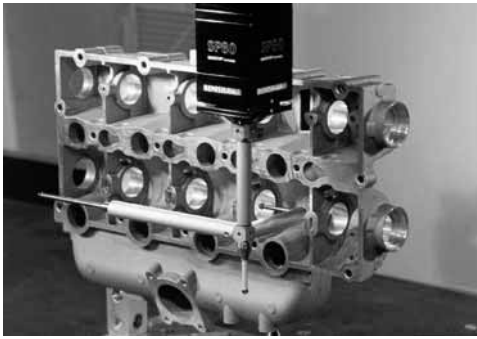


图 8.27 测深孔的测头

SP80: 高精度扫描测头

* 非接触扫描测头:

在被测工件的外形和材料不便于进行接触测量时，非接触测头可解决这样的问题。能够允许测量机自动、快速、精确地完成复杂形状工件的检测。主要包括：

OTM3M：单点激光测头，能够完成简单的扫描任务

LC 50/LC 100：激光条纹扫描测头，能够完成高速数据采集

效率，尤其适用于大型复杂工件的表面数字化。配合 METRIS 软件共同使用，LC50/LC100 能够实现对复杂形状的快速扫描和精确的尺寸数据采集。产生的点云可以下载到 CAD/CAM 系统，或者是脱机直接由测量机自身配备的软件进行处理。



图 8.28 激光测头

2.8.3. 利用扫描完成曲面造型

通过利用测量机完成样件的扫描然后将数据传送到 CAD/CAM 系统中以完成设计和造型，能够帮助公司节省大量的时间。一旦将数据转化到 CAD 系统，可完成对未知工件的设计建档、产生数学模型，将新设计与原始设计进行结合并可产生新的设计，并可为加工中心产生加工路径。被测工件形状越复杂，需要测量的点越多。

适应于复杂曲面形状造型的非接触扫描测量机主要分成两种：点扫描和线扫描。

点扫描测头 OTM3M，能够连续地以单点形式向系统计算机传输测量数据。主要使用在一些小型零件的测量。并能够与 PC-DMIS CAD++ 软件配合使用

线扫描测头 LC50、LC100 以一条激光线束的方式采集工件表面数据，利用一个图象传感器进行探测，并转换成为数字图象。线激光高速测头采集一条线上数以百计的点，这种测头具有超高

第九章、坐标测量机的发展趋势

从上个世纪 50 年代第一台坐标测量机的诞生到今天各类坐标测量设备的广泛使用,坐标测量已经成为当今工业无可替代的一个重要组成部分。在过去近一个世纪的历程中,工业和实验用坐标测量机经历了多个突破性的飞跃。三坐标测量机的出现,电机驱动的采用,CNC 控制器的出现和应用,微型计算机的应用,网络的普及等等无一不给坐标测量机的发展历程带来了巨大的影响。



图 9.1 坐标测量发展的重层面

今天的坐标测量机技术已经是一门应用领域多,跨学科,技术性强的系统工程。它受到工业和科研对高精度,高效率,高可靠度,自动化,模块化,系统化,信息化,多能化,智能化,人性化,兼容性,可扩展性,低资源消耗的要求的持续推动;同时也得到了来自新材料,新工艺,能源技术,动力技术,传感技术,控制技术,数理工具,半导体技术,人体工程,现代信息技术,管理技术的有力支持。在这些因素的驱动下,当今坐标测量发展的重要方向可以分成不同的层面(如图 9.1):物理层,功能层,应用层和扩展层。下面,本章节就按照层面的顺序来介绍一下坐标测量的发展方向。

1. 物理层

包括测量设备的各类基本执行器件的物理原理,材料,制造工艺等等带有物理特性的元素。任何测量工作都离不开完成位移,测量,控制等等功能动作的硬件,这些建立于物理层之上,利用物理层元素建立起来的完成坐标测量设备上某个(某些)特定功能的硬件模块形成了功能层。这两个层面具有非常紧密的结合,互为因果。一方面新的功能设计需求促进了新的物理原理,材料,制造工艺的开发和应用,另一方面新发展出

来的物理原理,材料,制造工艺又给实现新的功能提供了更多的选择和有力的支援。在物理和功能层面上的发展方向主要可以分以下几个方面:

1.1. 新材料

更轻,更稳定,受环境影响更小,工艺性更好,成本更低的新材料,材料结构,材料加工

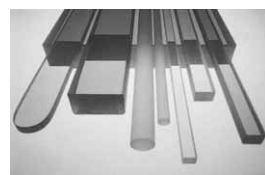


图 9.2 新材料

工艺及材料应用技术。碳纤维,硅材料和各类陶瓷材料,因为他们的高强度质量比和低温膨胀特性,成为近期受关注比较多的几种可根据实际情况应用在坐标测量设备上的新材料。其中 ZERODUR 是一大类玻璃陶瓷材料(图 9.2 是其中一种),它的热膨胀系数非常接近零(常温下在每摄氏度百万分之零点一以下),材质稳定,可加工特性好,所以它常被用来制做高精度光栅尺的尺基和设备校准用的基准件。也有少量标准级超高精度测量机或纳米测量机采用 ZERODUR 作为他们的结构材料。

1.2. 测感原理和器件

更高效快速,更精确,更方便,抗干扰,多用途的测感原理和器件。

这其中可分为接触式测感,非接触式测感两个大类。随着新的工业和民用需求的出现和发展,对先进测感技术的需求和应用会越来越多。纯机械式(或机电式)的测感技术经过了多年地发展,性能已经接近其极限,而基于激光,电磁波,电子束,超声波,半导体感光等等的新兴物理感应技术会被越来越多地发现和运用在测量设备中。今后坐标测量的测感技术的主要热点将会是纳米精度的微接触探测和高速,高精度的非接触探测(尤其是光学探测)。另外,为监控设备或工件状态,优化工作过程,补偿各种误差,提高测量设备整体性能,一些过程辅助感测技术如温度测量,变形力测量等等也会得到更广泛的应用。

图 9.3 是 PTB 开发的一款纳米微接触式测头(Opto-tactile sensor)的原理图。

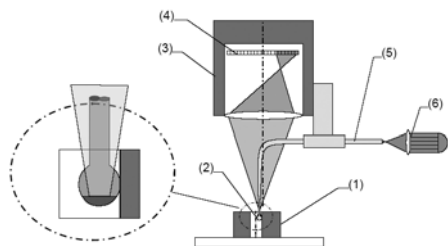


图 9.3 纳米测头原理图

图中：(1) 被测工件，(2) 测头末端，(3) 光学结构，(4) CCD 感光片，(5) 光纤，(6) 光源。该测头主要是由一根带有球状反光末梢的光纤和一组反光接受感测元器件组成。当球状末梢接触到物体时，只要很小的接触力光纤就会变形，从而使反光发生位置变化，并使反光接受元器件产生有用输出。

1.3. 新运动结构，新驱动技术，定位技术和控制技术

更高速，精确，稳定，轻便，体积小，低耗，低成本的新运动结构，新驱动技术，定位技术和控制技术。

相对来说，传统测量机主机的这些结构部分经过多年的发展和经验积累，已经比较成熟。而在最近一段时间，一些基于全新运动结构（包括后面将介绍的手动关节式测量机和多边运动结构测量机）的非传统测量机用技术正逐渐引起人们的关注。而他们所采用的不同于传统测量机的各种器件（如球状关节，流体压力定位系统，角度传感器等等）就自然地成为了研究发展的重要组成部分。另一个发展方向是纳米级定位器件（图 9.4 是 PI 公司的一种微型直线移动台，分辨力为 100 纳米，行程 20mm）和定位结构。在这个领域，压电微动机构和电容传感器组成的定位系统是采用最多的一种。



图 9.4 微型直线移动台

2. 应用层

从测量的应用层面看，所有可以测量出目标点坐标的系统可称作坐标测量机。高效，快速，稳定，精确，经济，实用，简便，多能等等要素仍旧是测量机不断前进的主要目标。在这个层面上讲，坐标测量机的发展趋势又可分如下几方面。

2.1. 非接触原理的坐标测量机



图 9.5 非接触原理的坐标测量机

各种基于光学等非接触原理的坐标测量机已经蓬勃发展起来，并将在今后的坐标测量中起到越来越重要的作用。这些设备的工作原理包括激光扫描，多点成像，视觉测量，激光球坐标

标，激光雷达等等。非接触式测量是他们的共同点，但他们往往各有各的特点和专长。例如主动式 LED 多点成像设备（图 9.5，Krypton K600）具有体积小，测量范围大，多功能，多跟踪目标点，可级连，善于捕捉动态坐标的特点。而激光球坐标仪（Faro 公司的产品）具有测量范围大，精度高，移动方便的特点。微型 GPS 系统和工业 X 射线层析测量系统（CT）是近年刚刚开始兴起的技术。微型 GPS 系统的特点是测量范围可由级连数量决定大小，灵活性大，可扩展度高，空间占用少（可装在厂房的天花板或横梁上）等等，特别适合超大尺寸测量，大规模柔性测量和流水测量。X 射线层析测量技术最早是用在临床医学上的，现在已经开始被工业测量所转化采用，它的特点是表面穿透测量能力，可以探测工件的内部几何形状和尺寸。



图 9.6 微型 GPS 系统

2.2. 非传统构架设计

非传统构架设计的出现丰富了机械式测量机的种类和应用。首先手动关节式测量机（右图，Brown&Sharpe 公司提供）在最近几年得到了快速的推广。其灵巧的转臂，轻便的结构



图 9.7 非传统构架设计

和简易的操作弥补了它在精度和速度等方面的不足。在 CNC 机床方面，多边结构的机床和测量机成为很多公司，研究机构的热门项目，因为这类机床较普通机床在结构刚性和定位精度上有很多优点。这一类机床的结构目前主要以六边结构（hexapod）为主。图 9.8 上是一台六边结构的三坐标测量机。



图 9.8 六边结构的三坐标测量机

2.3. 软件越来越强大

坐标测量机和系统的软件越来越强大。早期的测量软件只提供非常有限的功能和简单的界面。而现在的测量软件正朝着功能更多，界面更友好，通用性更强，可扩展度更高，维护更方便的方向发展。大量以前由操作人员手工完成或难以实现的操控，补偿，通讯，数据提取，验证，分析，比对，统计和评价工作已经被测量软件的功能模块逐步替代。很多自动化和智能功能（如自动读取 CAD 数据，规划和优化路径，自动比对等等）已经成为现代测量软件的必备。软件的使用极大地提高了效率，保证了正确性，减轻了操作强度，拓宽了应用，方便了管理，减少了成本。测量软件的开发还会沿着这些方向继续完善和扩展下去。在这里需要提到的有如下几个方面。

2.3.1 在测量精度上

为了提高坐标测量机稳定性和精度，过去主要是由精密的零件加工，安装工艺和机械调试工艺来实现的。而在今天，坐标测量设备已经越来越依赖可靠的测试器具，系统的测试方法和误差补偿软件来达到更高的性能。尤其是一些新式结构的测量机和非接触测量系统，软件误差补偿的好坏已经成为决定测量性能的关键性因素。这些补偿涉及的功能有静态误差补偿，弹性变形补偿，温度误差补偿，磨损补偿，动态补偿，光学器件补偿，冗余要素补偿，样件补偿，基准点补偿，主动执行器补偿等等。伴随着误差补偿的需求，对测量误差的来源的分析研究和各种先进测试手段也在不断深入下去。快速，准确的测试和误差补偿系统仍旧是业界的一个重要课题。

2.3.2 图象识别技术

结合摄像传感测头的图象识别技术在坐标测量中也会得到越来越多的应用。

它的运用不仅仅局限于对目标几何形状进行直接提取从而实现快速定位和快速测量，也可以进行快速几何形状的全局性辨识以便于规划和优化测量路径，规避障碍，自动规划测量过程。这些几何形状辨识功能可分为有 CAD 模型的比较辨识和没有 CAD 模型的智能抽取辨识两种。他们将在高效快速和智能的测量方案中占据一定的地位。

2.3.3 虚拟测量机

虚拟测量机是一门在测量界比较新的热门学科，它发展也给坐标测量机带来了许多全新的东西。广义上说它是将测量机所有相关信息数字再体现的技术。它大大降低了特殊工件上，盲测工件上，危险/有毒环境中，恶劣环境中的测量的难度和不可预见性；它实现了自动的路径和防碰撞检测，避免了对机器的损坏和损失的时间；它使可视化编程成为可能，减轻了操作人员的负担，减少了错误，提高了效率；它也使相关人员对结果的数据（如测量误差，测量的生产率）有了可靠的预期，使计划和决策的指定有了更可靠的参考依据。随着计算机技术的发展和数理模型的完善，虚拟测量机软件将不断完善强大。

2.3.4 软件的 CAD 直接接口

数据处理功能，可视化功能，统计功能，数据输出（包括报告）功能不断强化，仍然是今后测量软件的重要走向。这些功能大大减轻了测量人员所承担的工作，提升了测量过程和结果的可读/可视性，便于判断和管理。同时通过网络，这些功能的合理应用更可以使测量环节有机地纳入工厂或企业的整个生产体系中（参考延伸层的说明）。

2.3.5 测量软件模块化，网络化和系列化

一个系列软件共享一个或一组核心模块，通过各自不同的应用或接口模块的可以在不同的坐标测量机器和系统上使用或实现不同的功能。多个测量设备可以通过测量软件和网络连接到一起，实现在线数据和指令交换，统一协调工作。PC-DMIS EMS（图 9.9）就是具有上面这些功能特性的一个强大的软件家族。它在 PC-DMIS 核心的基础上发展了针对不同用途的可选择模块软件（包括不同设备上的测量软件模块，测量规划软件模块，网络报告软件模块，CAD 交互数据交换以及企业数据交换）。企业用户通过适合自己需求和实际状况的选择配备可以解决测量相关的众多问题，实现高度的多能化，自动化，信息化，智能化和统一管理，并且把测量作为一个有机的部分组合到企业中，对加工品质的现场控制，生产任务的综合规划等等实现了闭环。

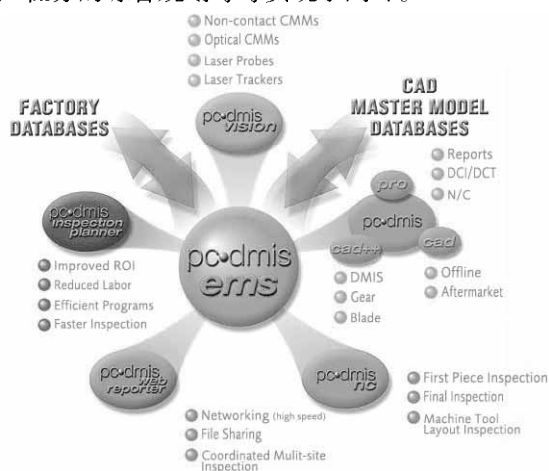


图 9.9 EMS 系统

2.4. 纳米级精度的测量机

在微电子，材料物理，光学器件等等行业的快速增长的推动下，纳米级精度的测量机也成为测量机发展的一个重要分支。

目前世界上正在从事纳米测量机研究开发工

作的厂家和科研机构有上百所。在传统设计的测量机的测量精度已经接近极限的时候，这些纳米级精度测量机一般都采用了许多非传统元器件，材料和结构设计。常见的有用激光干涉仪或电容传感器做定位的，用压电器件做驱动的，用光学，电子或 MEM（Micro-ElectroMechanics）器件做测头的，用陶瓷材料做结构的，用压电微动器件做角度调节或位置修正的...图 9.10 是一台纳米精度测量机的结构示意图。

2.5. 模块化

模块化的设想和尝试已经开始推广到测量机的运动轴及其控制器上。

在这个框架下任何一条轴都是可根据测量任务的实际要求方便地选择和拆装的通用模块，这

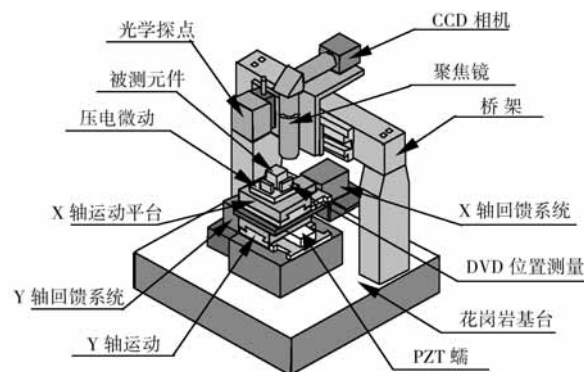


图 9.10 测量机结构模块化

可以从很大程度上减少了繁多地产品分类，削减了开发/生产/安装/调试的投入，给用户提供一个非常柔性的系统。在这方面的研究开发是从金属加工机床开始的，目前还只是理论和样品测试改进阶段，但非常有希望在未来的若干年内出现第一套实用的系统。

2.6. 人体工程设计和环保工程的应用

人体工程设计和环保工程的应用在发达国家已经受到普遍的重视，它们也是测量设备的重要环节。

好的人体工程设计可以使测量设备的操作更符合人性化，舒适化的需求从而提高生产效率，降低操作人员的操作强度，减轻疲劳，减少辅助性投入，提高员工对工作的满意程度。比较有代

表性的例子有：采用人体感觉舒适的要 23 摄氏度作为环境温度，但通过硬件和软件保证测量结果基于 20 摄氏度的精度；合理设计测量机结构以方便操作人员装卸工件和维护保养；采用遥控手柄，减轻手柄重量，优化手柄外形设计和以适合手持，优化手柄上摇杆设计和功能件设计以适合操纵；提升测量设备外观的视觉设计；采用触摸荧屏，方便操控；通过加装平衡机构或减轻摇臂或测头重量来减少测量者使用手动测量机，关节测量机，非接触测量机的疲劳；加装错误预警，加强容错和抗损坏能力。环保设计的目的是为了减少对人类社会生活，工作环境和自然环境的破坏。其措施有：采用环保，低污染，易回收处理的材料和材料工艺（尤其是涂料，塑料，表面处理等等）；采用便于分解，回收处理的设计结构，为每一个器件制定跟踪信息表；减小设备的有害输出如噪音，有害电磁波，气体/液体泄漏等等。随着社会发展和人类生活质量的提高，对人体工程和环保工程的应用会越来越多地应用到测量设备上。

2.7. 把CNC金属切削机床作为坐标测量机来使用

给 CNC 金属切削机床配上测头，通过测量软件的支持，把 CNC 金属切削机床作为坐标测量机来使用是 20 世纪末开始逐渐推广的一种测量方式（图 9.11）。

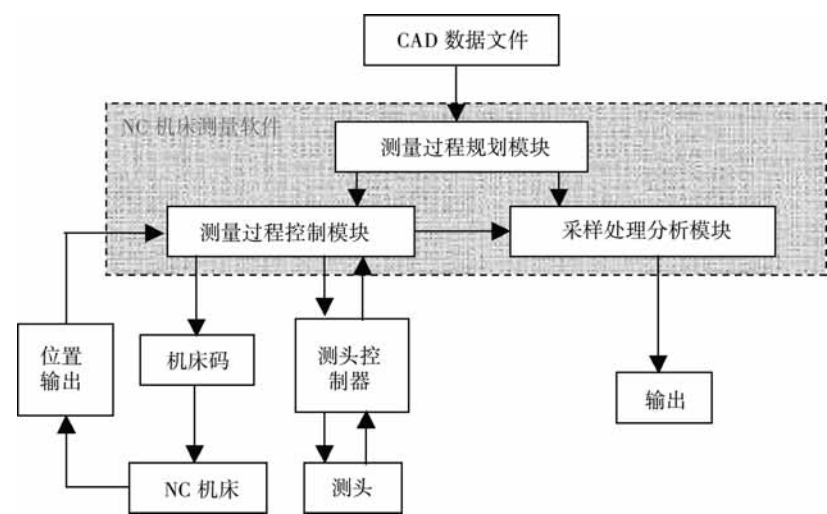


图9.11 CNC 金属切削机床作为坐标测量机来使用

这种方式正得到越来越多的软/硬件支持和实地运用（PC-DMIS NC 就是一款完成这样工作的优秀软件）。它的最大特点就是可以在加工完成后立即直接在加工机床上测量工件，节省了专用测量设备的支出，同时也可以通过分析在线测量的结

果纠正刀具误差等等参数，减少误差提高质量。尤其对于一些小批量复杂形状工件的生产企业来说，这个方式具有相当的吸引力。

3. 扩展层

扩展层面覆盖了一个广义的空间，包括设备的可兼容性，可扩展性和即插即用（Plug&Play）。面向设备和软件的接口标准化是实现这个概念的基本保证。目前的各种测量设备（测头，控制器等等）和测量软件还或多或少带有其独专的方面，在不同产品的系统兼容，组合和协调工作上还有种种障碍。采用类似计算机软硬件的接口标准化方法正是解决这个问题的出路。

测头（尤其是光学测头系统）接口和测量机接口的标准化工作目前正在开展起来。世界各大坐标测量机厂商（包括 Hexagon 集团下的 Brown&Sharpe 和 DEA 两大著名坐标测量机生产商）和光学测头厂商发起了一个标准化组织 OSIS（Optical Sensor Interface Standard）来制定统一的接口标准来推动光学测头接口的标准化以推动种类繁多的测量机和测头系统的方便的结合。



图 9.12 OSIS 光学测头接口标准

早在上世纪 80 年代末，规范测量机通用程序代码的 DMIS（现在主要是 DMIS Part1）标准就已经由 CAM-I 制定出来。现在 DMIS 标准已经被坐标测量厂商普遍采用。这样，一个 DMIS 程序可以在不同厂商生产的符合 DMIS 规范的测量设备上运行，完成不同的测量任务，使测量程序在不同测量机上的自由转移变成现实，减少了重复劳动，同时也为整合的企业测量体系提供了一定的支持。



图 9.13 DMIS 标准



图 9.14 CORBA 标准

在 DMIS 标准和 CORBOA (Common Object Request Broker Architecture) 标准的基础上 Object Workshops 制定的 DOT (DMIS Object Technology) 标准给 DMIS 引入了面向对象, 即插即用的新内容 (已经



图 9.15 DOT

加入到 DMIS Part2)。DOT 是面向 CIM (Computer Integrated Manufacturing) 构架设计为各种测量方案提供的一个通用平台。它采用了 CORBA 的结构, 对 DMIS 完全兼容, 支持 STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data), 集成网络 (包括因特网) 功能, 通过网络将各种测量相关的设备和软件整合进一个完整的企业系统中 (见下图)。它主要有两个功能性部分, DMISEQUIP (面向 DME 的低级控制) 和 DMISMATH (可装载的数学模型)。在包括了 DOT 的新的 DMIS 标准的开放式结构下, 用户可以根据测量需要选择各种类型的测量设备 (CMM, 激光雷达, 照相测量仪等等)。当一个新设备被接入到这个 DOT 服务器后, 它会

向服务器自动辨明身份, 列出它可以实现的功能项目, 当前的状态等信息, 而 DOT 服务器会立即把这些信息传给相关的联网注册的客户端设备和软件。用户可以为他们的测量设备选择或开发“即插即用”的软件 (例如基于 CAD 的自动测量程序生成软件, 3D 分析软件, SPC 过程统计控制软件, 交互界面软件, 测量仿真软件, 专用测量软件等等)。当这些软件在 DOT 服务器进行过注册后, 它们就可以直接和测量设备进行通信, 自动完成相关任务而无须担心兼容性问题。由于采用了 CORBA 接口, 它可以通过网络实时反馈现场测量结果以及时做必要的生产过程调整, 也可以通过因特网实现远程通信和操控。

和 DMISEQUIP 可以相比较的是 I++ 标准。他们同是面向 DME 的低级控制标准。I++ 是由 5 大欧洲汽车制造公司牵头, 众多测量机厂商参与制定的。除了支持设备种类上和使用功能上 I++ 比 DMISEQUIP 较少外, 最大的不同点是 I++ 的客户机与测量设备间采用 TCP/IP 的通信方式 (DMISEQUIP 用的是 ORB 方式)。

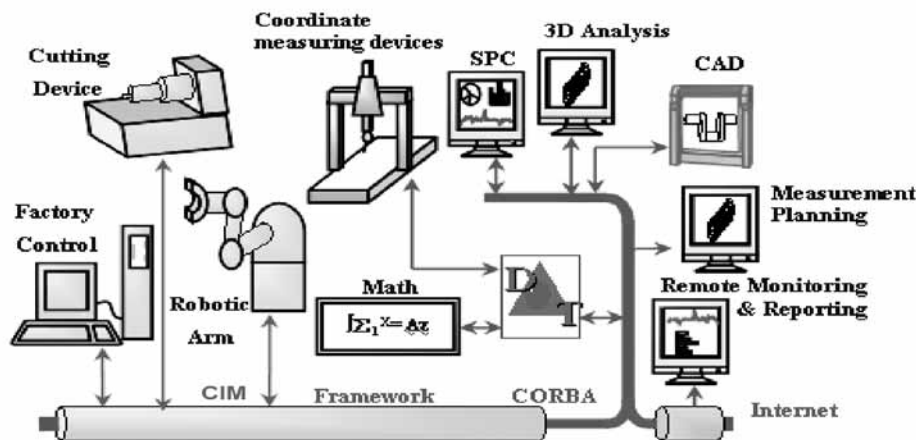


图 9.16 DOT 通用平台

附录（一）：坐标测量技术英中名词对照表	
A/D Converter	A/D转换
Abbe Error	阿贝误差
Acceptance Test (Of A CMM)	验收检测
Actual Contact Point	实际接触点
Air (Pneumatic) Counter Balance	气动平衡
Air Bearing	空气轴承
Alignment	找正、建坐标系
Articulated Probing System	万向探测系统
Articulated Probing System Form Error	万向探测系统形状误差
Articulated Probing System Location Error	万向探测系统位置误差
Articulated Probing System Size Error	万向探测系统尺寸误差
Autochanger	自动更换装置
Axial Four - Axis Error	轴向四轴误差
Back Off Distance	返回距离
Ballscrew	滚珠丝杠
Best - Fit Process	最佳拟合
Cartesian System	笛卡尔直角坐标系
Certification	合格证
CNC CMM	数控测量机
Coefficient Of Thermal Expansion	热膨胀系数
Column CMM	柱式坐标测量机
Comparator	比较仪
Compressed Air	压缩空气
Computer Aided Accuracy	计算机辅助精度改进
Computer - Aided Design (CAD)	计算机辅助设计
Contacting Probing System	接触式探测系统
Continuous Path Control	连续轨迹控制
Conversion Rule	转换规则
Converted Test Parameter Values	转换检测参数
Coordinate Measurement	坐标测量
Coordinate Measuring Machine(CMM)	坐标测量机
Corrected Measured Point	修正测量点
Corrected Scan Line	修正扫描线
Corrected Scan Point	修正扫描点
Counter Balance	平衡机构
Diagonal Line	对角线
Dial Indicator	百分表、千分表
Dimension	尺寸
Dimensional Measuring Interface Standard(DMIS)	尺寸测量用接口标准
Direct CAD Interface (DCI)	直接 CAD 接口
Direct CAD Translation (DCT)	直接 CAD 翻译
Discreted - Point Probing	离散点探测
Discreted - Point Probing Speed	离散点探测速度
Drift	漂移
Dynamic Effect	动态作用
Error Mapping	误差修正图

附录（一）：坐标测量技术英中名词对照表	
Error Of Indication Of A CMM For Size Measurement	坐标测量机尺寸测量的示值误差
Extent(Of A Data Set)	数据集的范围
Feature Construction	元素构造
Filtration System	过滤系统
Finite Element Analysis(FEA)	有限元分析
Fixed Bridge CMM	固定桥式坐标测量机
Fixed Head	固定测头座
Fixed Multiple - Stylus Probing System Form Error	固定多探针探测系统形状误差
Fixed Multiple - Stylus Probing System Location Error	固定多探针探测系统位置误差
Fixed Multiple - Stylus Probing System Size Error	固定多探针探测系统尺寸误差
Fixed Table Cantilever CMM	固定工作台悬臂式坐标测量机
Fixed Table Horizontal - Arm CMM	固定工作台水平悬臂坐标测量机
Form	形状
Friction Bar	摩擦杆
Friction Driver(Capstan Or Traction)	摩擦杆传动
Gantry CMM	龙门式坐标测量机
Gauge Block	量块
Gaussian Associated Feature	高斯辅助要素
Gaussian Radial Distance	高斯径向距离
GPS (Geometrical Product Specifications)	产品几何量技术规范
Helical Gear	斜齿轮
High Point Density(Of A CMM)	（坐标测量机）的高点密度
Humidity	湿度
Hysteresis	滞后
Indicated Measured Point	指示测量点
Infrared	红外的
Interim Check(Of A CMM)	（坐标测量机）的中间检查
Interim Testing	中间检查
Interim Point	中间点
International Organization For Standardization (ISO)	国际标准组织
Laser Interferometer	激光干涉仪
Laser Scanning Probe	激光扫描测头
Leadscrew	丝杠
Learn Programming	自学习编程
Least Square	最小二乘
Least - Squares Associated Feature	最小二乘辅助要素
Length Standard	长度标准
Linear Displacement Accuracy	位置精度
Location	位置
Low Point Density(Of A CMM)	（坐标测量机）的低点密度
L - Shaped Bridge CMM	L型桥式坐标测量机
Machine Coordinate System	机器坐标系
Magnetic Scale	磁栅尺
Manual CMM	手动测量机
Manual Head	手动测头座
Material Standard	实物标准器
Material Standard Of Size	尺寸实物标准器

附录（一）：坐标测量技术英中名词对照表	
Maximum Inscribed Circle	最大内切圆
Maximum Permissible Error Of Indication Of A CMM For Size Measurement	坐标测量机尺寸测量的最大允许示值误差
Maximum Permissible Fixed Multiple-Stylus Probing System Form Error	最大允许固定多探针探测系统形状误差
Maximum Permissible Fixed Multiple-Stylus Probing System Location Error	最大允许固定多探针探测系统位置误差
Maximum Permissible Fixed Multiple-Stylus Probing System Size Error	最大允许固定多探针探测系统尺寸误差
Maximum Permissible Probing Error	最大允许探测误差
Maximum Permissible Articulated Probing System Form Error	最大允许万向探测系统形状误差
Maximum Permissible Articulated Probing System Location Error	最大允许万向探测系统位置误差
Maximum Permissible Articulated Probing System Size Error	最大允许万向探测系统尺寸误差
Maximum Permissible Axial Four Axis Error	最大允许轴向四轴误差
Maximum Permissible Radial Four Axis Error	最大允许径向四轴误差
Maximum Permissible Scanning Probing Error	最大允许扫描探测误差
Maximum Permissible Tangential Four Axis Error	最大允许切向四轴误差
Maximum Permissible Time For Scanning Test	最大允许扫描检测时间
Mean Time Between Failure (MTBF)	平均失效时间
Mean Time For Repair (MTFR)	平均修复时间
Measuring Volume	测量空间
Micrometer	千分尺
Micro-Strain Gage	微型应变片
Minimum Circumscribed Circle	最小外接圆
Motorized CMM	机动测量机
Motorized Head	机（自）动测头座
Moving Bridge CMM	移动桥式坐标测量机
Moving Ram Horizontal-Arm CMM	水平悬臂移动式坐标测量机
Moving Table Cantilever CMM	移动工作台悬臂式坐标测量机
Moving Table Horizontal-Arm CMM	移动工作台水平悬臂坐标测量机
Multiple Styli	多探针
Multiple Stylus	多探针
Multi-Probe System	多测头系统
Multi-Stage Speed Reducer	多级减速器
National Institute Of Standard And Technology(NIST)	（美国）国家标准及技术研究院
Non-Cartesian System	非直角坐标系
Non-Contacting Probing System	非接触式探测系统
Non-Uniform Temperatures	不均办温度场
Not Pre-Defined Path Scanning	非预定路径扫描
Off-Line Programming	脱机编程
Optical Probe	光学测头
Optical Probing System	光学探测系统
Optical Scale	光栅尺
Orientation	方向
Parameterization Of A Feature	要素参数化
Part Coordinate System	零件坐标系
Part Handling	零件工夹具

附录（一）：坐标测量技术英中名词对照表	
Part Programming	零件编程
Piezo Sensor	压电测头
Pitch	俯仰角摆
Pre - Defined Path Scanning	预定路径扫描
Pretravel	（测头）预行程
Probe	测头
Probe Calibration	测头校验
Probe Head	测头座（测头）座
Probe Lobbing	测头的三角形效应
Probing Error	探测误差
Probing System	探测系统
Probing System Qualification	探测系统的标定
Probing(to probe)	探测
Program Point	程序点
Programmable Fixture	可编程夹具
Rack - And - Pinion	齿轮齿条
Radial Four Axis Error	径向四轴误差
Ram	探测轴
Range	范围
Read Head	（光栅）读数头
Reference Data Set	标准数据
Reference Pair	标准付
Reference Parameter Value	标准参数值
Reference Parameterization	标准参数化
Reference Residual	标准残差
Reference Software	标准软件
Reference Sphere	标准球
Reflection Scale	反射式光栅
Reliability	可靠性
Repeatability	重复性
Residual	残差
Resonance	谐振
Reverification Test(Of A CMM)	（坐标测量机）的复检检测
Reverse Engineering	逆向工程
Roll	自转
Rotary Table	转台
Rotary Table Setup	转台设置
Sampling Strategy	采点策略
Scan Sequence	扫描顺序
Scanning	扫描
Scanning Probe	扫描测头
Scanning Probing Error	扫描探测误差
Scanning Speed	扫描速度
Sensitivity Coefficient	敏感系数
Servo Motor	伺服电机
Sheet Metal Feature Measurement	薄壁件特征测量
Size	尺寸

附录（一）：坐标测量技术英中名词对照表	
Software	软件
Software Interface	软件接口
Speed Forward Feedback	速度前馈
Spur Gear	正齿轮
Squareness	垂直度
Statistical Analysis	统计分析
Straightness	直线度
Stylus	探针
Stylus Length	探针长度
Stylus System	探针系统
Stylus System Components	探针系统元件
Stylus Tip	探针针头
Stylus Tip Offset	探针针头偏置
Subdivided	细分
Switching Probe	开关测头
Synchro Trasmission Belt	同步带
Tangential Four - Axis Error	切向四轴误差
Target Contact Point	目标接触点
Target Scan Line	目标扫描线
Temperature Compensation	温度补偿
Test Parameter Values	检测参数值
Test Parameterization	检测参数化
Test Residual	检测残差
Test Sphere	检测球
The American Society Of Mechanical Engineers(ASME)	美国机械工程师协会
Thermal Conductivity	导热性
Time For Scanning Test	扫描检测时间
Tip Correction Vector	针头修正矢量
Touch - Trigger Probe	接触式触发测头
Tractability	溯源性
Transfer Shuttle	随行夹具
Transmission Scale	透射光栅
Uncertainty	不确定度
Vector Control	矢量（运动）控制
Vibration	振动
Video Probe	光学测头（成像测头）
Vision Checking System	视觉检测系统
Volumetric Performance	空间性能
Weight Counter Balance	重锤平衡
Workpiece Coordinate System	工件坐标系统
Yaw	方向角摆
Zerodu	零膨胀系数材料

附录（二）：坐标测量技术中英名词对照表	
（测头）予行程	Pretravel
（光栅）读数头	Read Head
（美国）国家标准及技术研究院	National Institute Of Standard And Technology(NIST)
（坐标测量机）的低点密度	Low Point Density(Of A CMM)
（坐标测量机）的复检检测	Reverification Test(Of A CMM)
（坐标测量机）的高点密度	High Point Density(Of A CMM)
（坐标测量机）的中间检查	Interim Check(Of A CMM)
A/D转换	A/D Converter
CNC测量机	CNC CMM
L型桥式坐标测量机	L - Shaped Bridge CMM
阿贝误差	Abbe Error
百分表、千分表	Dial Indicator
比较仪	Comparator
标准参数化	Reference Parameterization
标准参数值	Reference Parameter Value
标准残差	Reference Residual
标准付	Reference Pair
标准球	Reference Sphere
标准软件	Reference Software
标准数据集	Reference Data Set
薄壁件特征测量	Sheet Metal Feature Measurement
不均匀温度场	Non - Uniform Temperatures
不确定度	Uncertainty
采点策略	Sampling Strategy
残差	Residual
测量空间	Measuring Volume
测头	Probe
测头的三角形效应	Probe Lobbing
测头校验	Probe Calibration
测头座（测头）座	Probe Head
产品几何量技术规范	GPS (Geometrical Product Specifications)
长度标准	Length Standard
程序点	Program Point
尺寸	Dimension
尺寸	Size
尺寸测量用接口标准	Dimensional Measuring Interface Standard(DMIS)
尺寸实物标准器	Material Standard Of Size
齿轮齿条	Rack - And - Pinion
垂直度	Squareness
磁栅尺	Magnetic Scale
导热性	Thermal Conductivity
笛卡尔直角坐标系	Cartesian System
动态作用	Dynamic Effect
对角线	Diagonal Line
多测头系统	Multi - Probe System

附录（二）：坐标测量技术中英名词对照表	
多级减速器	Multi - Stage Speed Reducer
多探针	Multiple Styli
多探针	Multiple Stylus
反射式光栅	Reflection Scale
返回距离	Back Off Distance
范围	Range
方向	Orientation
方向角摆	Yaw
非接触式探测系统	Non - Contacting Probing System
非预定路径扫描	Not Pre - Defined Path Scanning
非直角坐标系	Non - Cartesian System
俯仰角摆	Pitch
高斯辅助要素	Gaussian Associated Feature
高斯径向距离	Gaussian Radial Distance
工件坐标系统	Workpiece Coordinate System
固定测头座	Fixed Head
固定多探针探测系统尺寸误差	Fixed Multiple - Stylus Probing System Size Error
固定多探针探测系统位置误差	Fixed Multiple - Stylus Probing System Location Error
固定多探针探测系统形状误差	Fixed Multiple - Stylus Probing System Form Error
固定工作台水平悬臂坐标测量机	Fixed Table Horizontal - Arm CMM
固定工作台悬臂式坐标测量机	Fixed Table Cantilever CMM
固定桥式坐标测量机	Fixed Bridge CMM
光学测头	Optical Probe
光学测头（成像测头）	Video Probe
光学探测系统	Optical Probing System
光栅尺	Optical Scale
滚珠丝杠	Ballscrew
国际标准组织	International Organization For Standardization (ISO)
过滤系统	Filtration System
合格证	Certification
红外的	Infrared
机（自）动测头座	Motorized Head
机动测量机	Motorized CMM
机器坐标系统	Machine Coordinate System
激光干涉仪	Laser Interferometer
激光扫描测头	Laser Scanning Probe
计算机辅助精度改进	Computer Aided Accuracy
计算机辅助设计	Computer - Aided Design (CAD)
检测参数化	Test Parameterization
检测参数值	Test Parameter Values
检测残差	Test Residual
检测球	Test Sphere
接触式触发测头	Touch - Trigger Probe
接触式探测系统	Contacting Probing System

附录（二）：坐标测量技术中英名词对照表	
径向四轴误差	Radial Four Axis Error
开关测头	Switching Probe
可编程夹具	Programmable Fixture
可靠性	Reliability
空间性能	Volumetric Performance
空气轴承	Air Bearing
离散点探测	Discreted - Point Probing
离散点探测速度	Discreted - Point Probing Speed
连续轨迹控制	Continuous Path Control
量块	Gauge Block
零件编程	Part Programming
零件工夹具	Part Handling
零件坐标系	Part Coordinate System
零膨胀系数材料	Zerodu
龙门式坐标测量机	Gantry CMM
美国机械工程师协会	The American Society Of Mechanical Engineers(ASME)
敏感系数	Sensitivity Coefficient
摩擦杆	Friction Bar
摩擦杆传动	Friction Driver(Capstan Or Traction)
目标接触点	Target Contact Point
目标扫描线	Target Scan Line
逆向工程	Reverse Engineering
漂移	Drift
平衡机构	Counter Balance
平均失效时间	Mean Time Between Failure (MTBF)
平均修复时间	Mean Time For Repair (MTFR)
气动平衡	Air (Pneumatic) Counter Balance
千分尺	Micrometer
切向四轴误差	Tangential Four - Axis Error
热膨胀系数	Coefficient Of Thermal Expansion
软件	Software
软件接口	Software Interface
扫描	Scanning
扫描测头	Scanning Probe
扫描检测时间	Time For Scanning Test
扫描顺序	Scan Sequence
扫描速度	Scanning Speed
扫描探测误差	Scanning Probing Error
湿度	Humidity
实际接触点	Actual Contact Point
实物标准器	Material Standard
矢量（运动）控制	Vector Control
视觉检测系统	Vision Checking System
手动测量机	Manual CMM
手动测头座	Manual Head
数据集的范围	Extent(Of A Data Set)

附录（二）：坐标测量技术中英名词对照表	
水平悬臂移动式坐标测量机	Moving Ram Horizontal - Arm CMM
丝杠	Leadscrew
伺服电机	Servo Motor
速度前馈	Speed Forward Feedback
溯源性	Tractability
随行夹具	Transfer Shuttle
探测	Probing(to probe)
探测误差	Probing Error
探测系统	Probing System
探测系统的标定	Probing System Qualification
探测轴	Ram
探针	Stylus
探针长度	Stylus Length
探针系统	Stylus System
探针系统元件	Stylus System Components
探针针头	Stylus Tip
探针针头偏置	Stylus Tip Offset
同步带	Synchro Trasmission Belt
统计分析	Statistical Analysis
透射光栅	Transmission Scale
脱机编程	Off - Line Programming
万向探测系统	Articulated Probing System
万向探测系统尺寸误差	Articulated Probing System Size Error
万向探测系统位置误差	Articulated Probing System Location Error
万向探测系统形状误差	Articulated Probing System Form Error
微型应变片	Micro - Strain Gage
位置	Location
位置精度	Linear Displacement Accuracy
温度补偿	Temperature Compensation
误差修正图	Error Mapping
细分	Subdivided
斜齿轮	Helical Gear
谐振	Resonance
形状	Form
修正测量点	Corrected Measured Point
修正扫描点	Corrected Scan Point
修正扫描线	Corrected Scan Line
压电测头	Piezo Sensor
压缩空气	Compressed Air
验收检测	Acceptance Test (Of A CMM)
要素参数化	Parameterization Of A Feature
移动工作台水平悬臂坐标测量机	Moving Table Horizontal - Arm CMM
移动工作台悬臂式坐标测量机	Moving Table Cantilever CMM
移动桥式坐标测量机	Moving Bridge CMM
有限元分析	Finite Element Analysis(FEA)
预定路径扫描	Pre - Defined Path Scanning
元素构造	Feature Construction

附录（二）：坐标测量技术中英名词对照表	
找正、建坐标系	Alignment
针头修正矢量	Tip Correction Vector
振动	Vibration
正齿轮	Spur Gear
直接 CAD 翻译	Direct CAD Translation (DCT)
直接 CAD 接口	Direct CAD Interface (DCI)
直线度	Straightness
指示测量点	Indicated Measured Point
滞后	Hysteresis
中间点	Intermediate Point
中间检查	Interim Testing
重锤平衡	Weight Counter Balance
重复性	Repeatability
轴向四轴误差	Axial Four - Axis Error
柱式坐标测量机	Column CMM
转换规则	Conversion Rule
转换检测参数	Converted Test Parameter Values
转台	Rotary Table
转台设置	Rotary Table Setup
自动更换装置	Autochanger
自学习编程	Learn Programming
自转	Roll
最大内切圆	Maximum Inscribed Circle
最大允许固定多探针探测系统尺寸误差	Maximum Permissible Fixed Multiple - Stylus Probing System Size Error
最大允许固定多探针探测系统位置误差	Maximum Permissible Fixed Multiple - Stylus Probing System Location Error
最大允许固定多探针探测系统形状误差	Maximum Permissible Fixed Multiple - Stylus Probing System Form Error
最大允许径向四轴误差	Maximum Permissible Radial Four Axis Error
最大允许切向四轴误差	Maximum Permissible Tangential Four Axis Error
最大允许扫描检测时间	Maximum Permissible Time For Scanning Test
最大允许扫描探测误差	Maximum Permissible Scanning Probing Error
最大允许探测误差	Maximum Permissible Probing Error
最大允许万向探测系统尺寸误差	Maximum Permissible Articulated Probing System Size Error
最大允许万向探测系统位置误差	Maximum Permissible Articulated Probing System Location Error
最大允许万向探测系统形状误差	Maximum Permissible Articulated Probing System Form Error
最大允许轴向四轴误差	Maximum Permissible Axial Four Axis Error
最佳拟合	Best - Fit Process
最小二乘	Least Square
最小二乘辅助要素	Least - Squares Associated Feature
最小外接圆	Minimum Circumscribed Circle

附录（二）：坐标测量技术中英名词对照表	
坐标测量	Coordinate Measurement
坐标测量机	Coordinate Measuring Machine(CMM)
坐标测量机尺寸测量的示值误差	Error Of Indication Of A CMM For Size Measurement
坐标测量机尺寸测量的最大允许示值误差	Maximum Permissible Error Of Indication Of A CMM For Size Measurement