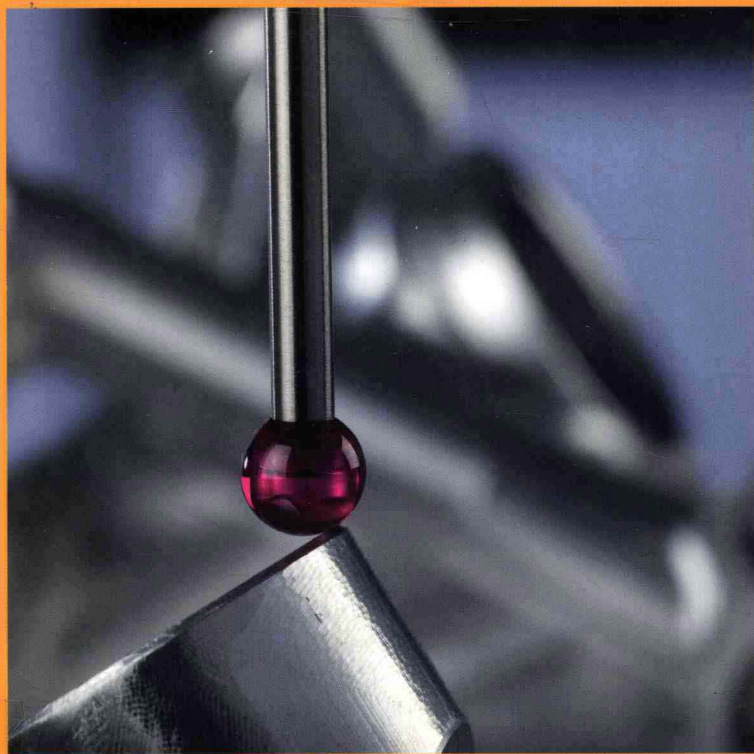


几何坐标测量 技术及应用

Geometry Coordinate Metrology
Technology and Application

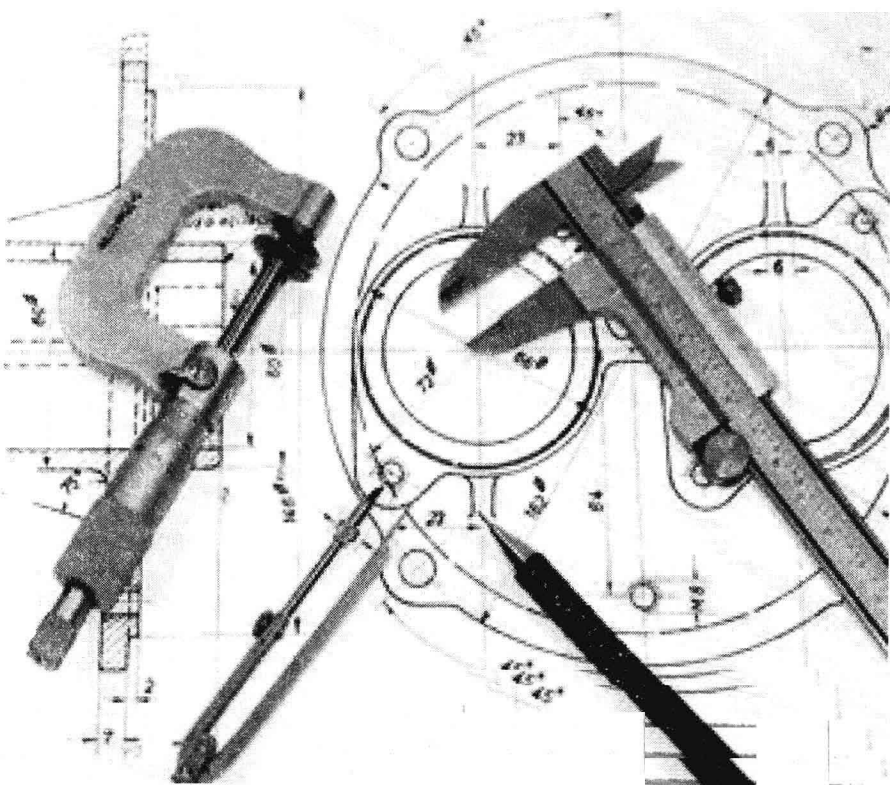
李明 费丽娜 著



中国质检出版社
中国标准出版社

几何坐标测量技术的应用

李明 费丽娜 著



中国质检出版社
中国标准出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

几何坐标测量技术及应用 / 李明, 费丽娜著. —北京: 中国标准出版社, 2012. 11
ISBN 978-7-5066-7005-0

I. ①几… II. ①李… ②费… III. ①几何坐标—测量技术 IV. ①P22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 230585 号

中国质检出版社
中国标准出版社 出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号 (100013)

北京市西城区三里河北街 16 号 (100045)

网址: www.spc.net.cn

总编室: (010) 64275323 发行中心: (010) 51780235

读者服务部: (010) 68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 16.5 字数 385 千字

2012 年 11 月第一版 2012 年 11 月第一次印刷

*

定价 60.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话: (010) 68510107

作者简介

李明

1963 年生，硕士。上海大学机电工程与自动化学院研究员、博士生导师。

现任全国产品几何技术规范标准化技术委员会委员（SAC/TC 240，ISO/TC 213）、上海市模具行业协会特种加工委员会副主任委员、上海市机械工程学会先进制造技术专业委员会理事、上海高校互换性与技术测量基础研究会副理事长，是国内坐标测量技术领域的知名专家。

从 1987 年开始接触三坐标测量机，长期从事几何坐标检测与质量过程控制、机电一体化系统设计制造方面的教学与研究工作。承担过国家 863、上海市重大和重点攻关项目，并且十分重视与企业的产学研合作，研究成果应用于汽车、风电、航空、航天、地铁、隧道、造船、建筑、机床、军工等领域，多次获得上海市科技进步奖。已公开发表学术论文 50 余篇，获发明专利授权 10 余项。

2003 年以来主持和参与了 30 多项产品几何技术规范（GPS）国家标准的制修订工作。多年来一直致力于 ISO、GB 和 ASME 标准的研究、宣贯、企业应用和人才培养。

联系方式：robotlib@shu.edu.cn



费丽娜

哈尔滨工业大学自动化测试与控制专业硕士，蔡司光学仪器（上海）国际贸易有限公司工业测量部培训经理，曾担任过应用工程师和产品经理的职务，具有丰富的基层测量经验，在许多技术交流会和学术论坛上发表过坐标测量技术和应用的文章，同时直接参与上海大学“几何坐标测量技术与应用”本科课程的教学工作。

联系方式：feiln@zeiss.com.cn

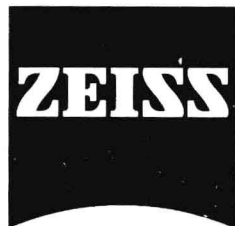
蔡司光学仪器（上海）国际贸易有限公司（ZEISS）

使命：作为光学技术的先锋，我们不断挑战人类想象的极限。我们以追求卓越的激情为客户创造价值，开启认知世界的全新方式。

关注领域：工业解决方案，科研解决方案，医疗技术。

网址：www.zeiss.com.cn

电话：021-50481717



序

产品几何技术规范 GPS (Geometrical Product Specifications) 规定了产品几何特性的定义及验收方法, 规范了产品设计、制造、检测、控制的整个质量控制过程, 其系列标准构成了机械制造业最基础和最重要的标准体系。

随着数字化技术的发展, 新一代 GPS 体系已在理念和方法上发生了根本性的改变。从基于几何到基于计量数学, 从仅规范几何精度标注内容和方法到规范整个几何精度的设计与形成过程, 无不体现出当今最先进的几何精度设计与控制理念。

作为几何数字化测量技术的几何坐标测量技术, 是新一代 GPS 体系的重要组成部分, 也是现代数字制造过程中质量过程控制的关键技术。由于该项技术本身涉及的知识体系非常庞杂, 现有的规范和标准还未能兼顾到其中一些过程。所以, 目前企业在实际应用中最为关注这一部分的技术内容。

该书在新一代 GPS 的理念、方法和相应的国家标准规范基础上, 结合几何坐标测量技术的原理和方法, 通过大量的实际应用案例, 详细且较规范地描述了几何坐标技术及其应用方法。它将帮助坐标测量行业规范测量操作过程, 更好地应用坐标测量技术这一数字化测量和控制手段, 保障产品质量, 提升产品品质。所以, 该书的出版不仅是对当今几何坐标测量技术理论和实践的一次小结, 也可以说是对 GPS 规范体系在实际应用中的有益解读和引导。

因此, 我向专业技术人员推荐这本专著, 借以有效地推动 GPS 国家标准体系的建立、实施和应用。

全国产品几何技术规范标准化技术委员会

主任委员

强毅

2012 年 8 月

作者序

坐标测量技术 (Coordinate Measuring Machine, CMM) 是产品几何质量数字化过程控制的关键技术, 属于产品几何技术规范 (Geometrical Product Specifications, GPS) 和 ASME GD&T 标准及应用中的一个重要组成部分, 在数字化制造的今天已得到了越来越广泛的应用, 成为产品几何质量控制系统中不可或缺的高端技术。

然而, 坐标测量技术在实际应用中却遇上了诸多的问题, 如坐标测量技术与新一代 GPS 标准体系及 ASME GD&T 的关系问题、测量过程的规范问题、测量系统的不确定度问题、坐标测量与其他测量方法的测量结果比对问题、坐标测量系统的应用问题等。

本书作者有多年几何精度设计与质量控制理论、坐标测量理论、技术和应用研究、与多个行业和领域的企业成功合作经历, 并直接参与了多项新一代 GPS 标准的制修订工作, 积累了丰富的实践经验。在整合原本科教学讲义, GPS、GD&T 和 CMM 培训讲义的基础上, 结合 ISO、GB 和 ASME 相关标准、坐标测量机制造商的资料, 以及企业和网络提供的案例编撰了本书。

本书基于新一代 GPS 标准体系和美国 ASME GD&T 相关标准, 在介绍坐标测量原理的同时, 通过大量的实际案例, 结合传统测量方法进行了比对描述, 希望使读者能更好地理解本书的内容, 同时也对坐标测量机应用过程中的一系列问题进行了探讨, 希望能对读者的测量实践有所启发和帮助。

本书可以作为高校精度设计和技术测量课程的辅助教材, 也可作为从事机械产品设计、制造、检测和质保人员的参考书籍, 更希望本书能成为坐标测量从业人员的一本工具书。

全国产品几何技术规范标准化技术委员会秘书长明翠新研究员为本书的立项和出版提供了指导与帮助。

本书的编写与出版得到了德国蔡司光学仪器 (上海) 国际贸易有限公司的支持, 特别是平颀副总裁对本书的立项和出版给予了全力支持。工业测量部资深工程师张亮先生、工业测量应用部门侯世俊和张超先生在技术上给本书许多有益的直接指导与帮助。



本书的出版得到了上海大学重点课程建设项目经费的资助。

本书在编写、修改和审核过程中，得到了全国产品几何技术规范标准化技术委员会委员、深圳市计量质量检测研究院于冀平高级工程师，全国产品几何技术规范标准化技术委员会委员、上海汽车工业（集团）总公司倪新珉高级工程师，上海大学韦庆玥老师、李伟老师、研究生赵幸福和杨恢等的直接支持和帮助，同时也得到了上海大学 2010 年和 2011 年二届卓越工程师试点班 50 多位同学的许多宝贵意见和建议。在此对帮助和支持本书编写和出版的所有同行和朋友表示由衷地感谢。

受限于作者的知识、能力和精力，本书必然会存在一些问题，甚至错误，希望能得到读者和同行们的意见、建议和反馈。

作 者

2012 年 8 月

目 录

第 1 章 坐标测量技术概论	1
1.1 基本概念	1
1.2 坐标测量技术的发展和应 用	3
1.3 相关规范、标准和技术体系	7
1.4 传统测量技术与坐标测量技术的关系	9
1.5 从业人员的知识体系	11
第 2 章 几何特征的坐标测量和要素生成	13
2.1 坐标测量中几何要素的生成	13
2.2 测点的基本概念	20
2.3 常规几何特征的测量及拟合	23
2.3.1 直线的坐标测量和拟合	24
2.3.2 圆的坐标测量和拟合	25
2.3.3 平面的坐标测量和拟合	26
2.3.4 圆柱的坐标测量和拟合	26
2.3.5 圆锥的坐标测量和拟合	27
2.3.6 球的坐标测量和拟合	27
2.4 曲线、曲面的坐标测量方法	28
2.5 几何特征坐标测量提取策略	29
第 3 章 测量坐标系和误差评定基准	31
3.1 测量坐标系及其应用	31
3.2 误差评定基准/基准体系	32
3.3 评定基准/基准体系的构建规则与方法	35
3.4 图样中基准/基准体系与坐标测量评定的关系	38
3.5 评定基准/基准体系构建方法和案例	39



第4章 坐标测量的误差测量和评定	65
4.1 几何要素的坐标测量与误差评定流程	65
4.2 尺寸误差的测量与评定	67
4.3 几何误差的坐标测量与评定	73
4.3.1 仅与公称要素形状相关的几何误差测量评定	73
4.3.2 仅与公称要素相互方向相关的几何误差测量评定	82
4.3.3 与公称要素及位置相关的几何误差测量与评定	97
4.3.4 跳动误差测量与评定	115
第5章 坐标测量系统与结构特点	122
5.1 测量系统的功能需求	122
5.2 测量系统的类别	122
5.3 测量系统的布局特点	124
5.4 主要部件结构	127
5.4.1 本体结构	127
5.4.2 位置传感系统	130
5.4.3 测量系统的移动轴线特点	133
5.5 坐标测量系统的精度及误差补偿	135
5.5.1 测量系统的误差组成	135
5.5.2 测量系统的几何误差修正补偿	137
5.5.3 测量系统的动静态弯曲修正补偿	137
5.5.4 工作温度环境与温度补偿	138
5.6 测量精度保障的其他环境要求	139
第6章 坐标测量的探测系统	142
6.1 探测系统组成与功能	142
6.1.1 测头 (Probe Head)	142
6.1.2 探针系统 (Stylus System)	142
6.1.3 探针库 (Rack System)	142
6.1.4 标准球 (Reference Sphere)	143
6.1.5 探测系统性能的主要评价参数	143
6.2 测头类型与性能	144
6.2.1 触发式测头 (Trigger Probe)	144
6.2.2 扫描测头 (Scanning Probe)	148



6.2.3 非接触式测头——激光测量测头	150
6.2.4 非接触式测头——影像测头	151
6.3 测头座及其应用	152
6.3.1 测头座的分类	152
6.3.2 万向式测头座	153
6.3.3 测头座与各类测头的组合应用	155
6.4 探针系统及配置	157
6.4.1 探针针头类型	157
6.4.2 探针系统	158
6.4.3 探针系统配置与应用	160
6.5 探针库及应用	162
6.6 探测系统的校准	162
第7章 控制系统与软件功能	164
7.1 坐标测量系统的控制与软件功能模块	164
7.1.1 坐标测量系统的控制	164
7.1.2 坐标测量系统的软件功能模块	165
7.2 坐标测量系统的应用流程	166
7.3 测量系统的操作准备过程	168
7.3.1 坐标测量系统的启动	168
7.3.2 探针配置和校准	169
7.3.3 CAD模型及操作	171
7.3.4 工件的装夹	173
7.4 几何特征的测量和评定操作	174
7.5 坐标测量的编程操作	178
第8章 坐标测量系统的检测与复检	183
8.1 坐标测量系统检测与复检的相关标准	183
8.2 坐标测量系统中误差的概念和检测条件	184
8.3 坐标测量系统检测与复检方法	186
8.4 坐标测量系统测量软件与计算方法性能的评定	189



第 9 章 坐标测量技术的应用案例	191
9.1 坐标测量的应用分类	191
9.1.1 精密加工成形的箱体类工件坐标测量评定特点	191
9.1.2 轴类工件坐标测量评定特点	193
9.1.3 钣金类工件的坐标测量评定	194
9.1.4 注塑类工件的坐标测量评定	196
9.1.5 金属浇压铸类工件的坐标测量评定	197
9.1.6 焊接成型类工件的坐标测量评定	198
9.1.7 高精度曲面曲线类工件的坐标测量	199
9.1.8 二维平面类工件的坐标测量	200
9.1.9 具有特殊形状工件的坐标测量	201
9.1.10 现场及大型工件的坐标测量	203
9.2 坐标测量的应用案例	205
9.2.1 具有最大实体要求的几何误差评定案例	205
9.2.2 孔系复合位置度误差评定案例	206
9.2.3 管类工件位置度误差评定案例	209
9.2.4 针对客户产品的整套解决方案	210
9.2.5 压气机叶轮检测解决方案	216
第 10 章 几何坐标测量结果的合格判定	223
10.1 影响坐标测量结果的因素	223
10.2 按规定检验结果的合格判定规则	227
10.3 测量不确定度的管理	230
10.4 关于测量不确定度表述的共识	231
10.5 现场不确定度评估方法	232
10.6 规范与测量结果的合格判定	236
附录 A 相关产品几何技术规范 (GPS) 标准汇总	238
附录 B 本书中插图与表格汇总	242

第 II 章

坐标测量技术概论

几何坐标测量涉及计量技术、测量技术、数字测量系统及其应用等多个方面，本章主要介绍与坐标测量技术及其应用密切相关的一些基本概念、相关标准规范及知识体系。

1.1 基本概念

在国际标准化组织/国际电工委员会第 99 号指南（2007）《国际计量学词汇—基础通用的概念和相关术语》[International vocabulary of metrology —Basic and general concepts and associated terms (VIM)] 中对测量进行了定义（国内对应的计量技术规范为 JJF 1001：2009《通用计量术语及定义》）：

Measurement: experimentally obtaining one or more quantity values that can reasonably be attributed to a quantity.

测量（有时也称**计量**）：通过实验获得并可合理赋予某量一个或多个量值的过程。

从上面的定义中我们可以看到测量是一个过程，包括了测（数据获取）和量（评定）两个主要方面，涉及测量要求、测量工具、测量方法、测量过程和评定方法等内容，其核心是整个操作过程的规范，也就是说，所有的测量结果是有条件的，这种条件就是操作规范。

国际标准 ISO 10360：2000 [Geometrical Product Specification (GPS) —Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines—Part 1: vocabulary]，对应的国家标准 GB/T 16857.1—2002《产品几何量技术规范（GPS） 坐标测量机的验收检测和复检检测 第 1 部分：词汇》中对坐标测量技术的相关术语进行了定义，其中包括：

坐标测量机 (CMM) coordinate measuring machine

通过运转探测系统测量工件表面空间坐标的测量系统。

坐标测量 coordinate measurement

由坐标测量机来完成空间坐标的测量。

在坐标测量技术中，坐标系是一个用来表示几何要素方位和坐标测量机运行方位的体系，其定义与数学定义的坐标系一致。

坐标系 coordinate system

对于一个 n 维系统，能够使每一个点和唯一的一组（ n 个）标量构成一一对应的系统。

对于三维空间而言，最常用的是直角坐标系，也称笛卡儿坐标系（Cartesian coordinate system），是一种正交坐标系。三个坐标轴满足由右手定则规定的三维空间，图 1.1

表示了三维直角坐标系定义规则，三个轴按常规定义为 X 、 Y 和 Z 轴。

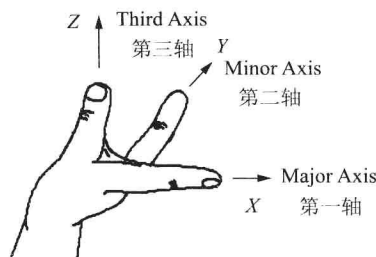


图 1.1 几何坐标系定义

此外，还有一些与测量工作密切相关的概念：

测量误差 measurement error, error of measurement

简称误差 (error)，测得的量值减去参考量值。

偏差 Deviation

偏差又称为表观误差，是指个别测定值与测定的平均值之差，它可以用来衡量测定结果的精密度高低。

在测量工作中，误差和偏差是二个非常容易混淆的概念。应该说，误差是测量值与真值之间的差值，我们一般用误差来衡量测量结果的准确度，用偏差来衡量测量结果的精密度；误差是以真值为标准，偏差是以多次测量结果的平均值为标准。

从上面可以看出，误差与偏差的含义完全不同，实际工作中必须加以区别。但在一般情况下，由于真值我们并不知道，因此实际中往往在尽量减小系统误差的前提下，把多次平均测量值当作真值，把偏差当作误差。

在介绍坐标测量技术之前，这里先汇总描述一下测量中会使用到的一些术语。

几何要素 geometrical feature (GB/T 18780.1)

点、线、面。

组成要素 integral feature (GB/T 18780.1)

面或面上的线。

导出要素 derived feature (GB/T 18780.1)

由一个或几个组成要素得到的中心点、中心线或中心面。

下面通过一个简单的示例来介绍坐标测量技术的原理：

图 1.2 描述了坐标测量的原理和对工件几何特征进行坐标测量的过程：将被测工件（包含有一个截面圆，图 1.2 中表示为一个虚线的圆），放置在一个平面直角坐标系（图 1.2 中为测量坐标系，即测量机的坐标系）中，通过坐标测量机移动和对被测工件轮廓面（被测特征）的测量，能得到被测截面圆上一个点集 $P \{P_1, P_2, P_3 \dots P_n\}$ 的二维坐标值。由于已知被测几何特征的理想要素是一个截面圆，因此可以通过对测得点（点集 P ）进行拟合目标为圆的数学拟合操作，就能得到图示中的被测几何要素（geometrical feature）的拟合要素（associated feature）——被测截面圆（即被测要素的替代要素），以及该拟合要素的导出要素（derived feature）——被测截面圆的圆心。然后通过与公称要素

(nominal feature 理论模型) 的比较得到二者之间的误差, 包括直径和位置等, 并根据图样所规范 (标注) 的公差进行误差评定。

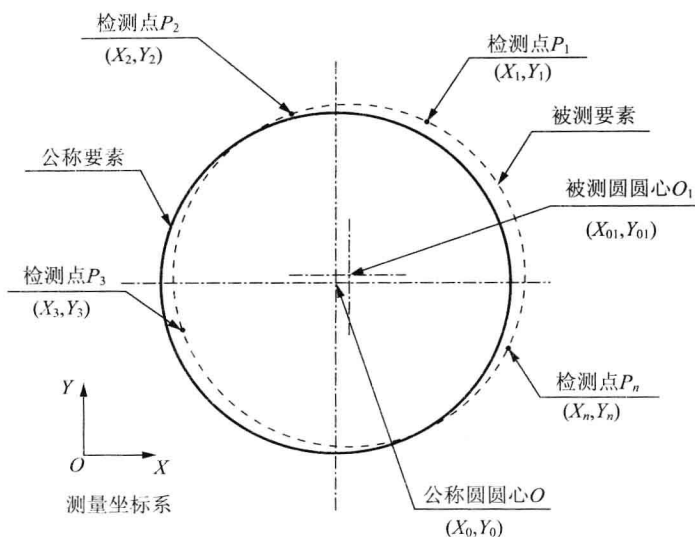


图 1.2 几何坐标测量原理示意

从上面测量和操作过程的描述来看, 本书对坐标测量技术进行了新的定义:

坐标测量 coordinate measurement

一种通过对工件轮廓面进行离散点坐标获取、几何要素拟合操作后进行误差评定的几何量测量技术。

坐标测量机 (CMM) coordinate measuring machine

采用坐标测量技术的测量系统。

从上面的定义来看, 具有三维空间测量能力的坐标测量机都可以称为三坐标测量系统。

坐标测量机 (测量系统) 一般由硬件、软件和辅助系统组成, 其主要功能包括: 工件装夹与定位、探针系统配置与校准、测点坐标获取、几何要素拟合、评定基准建立、误差评定和测量结果输出等功能。

1.2 坐标测量技术的发展和應用

意大利 DEA 公司 (Digital Electronic Automation Spa) 可能是世界上第一台坐标测量机设备的制造商, 这是一台具有门式结构并配置了硬测头的坐标测量机。

苏格兰 Ferranti 计量公司 (现在为 IMS 公司: International Metrology Systems) 可能是第一台采用计算机辅助 (Direct Computer Assist) 的坐标测量机制造商, 这是一台悬臂结构的坐标测量机 [图 1.3a)], 它配置了坐标轴的数显装置和硬测头。

德国卡尔·蔡司公司是世界上第一台采用计算机数控 (Computer Numerical Control, CNC) 技术的三坐标测量机制造商, 这是一台桥式测量机 [图 1.3b)], 它革命性地将电子技术和测量技术集成在一起, 使测量准确度可以达到 $0.5\mu\text{m}$, 配备了现代意义的接触式

探测系统、标准计算机接口、测量软件、动力驱动系统和控制面板等。

今天，高端的坐标测量系统已发展成一种具有高精度计量特性和全自动操作功能的测量系统（见图 1.4）。

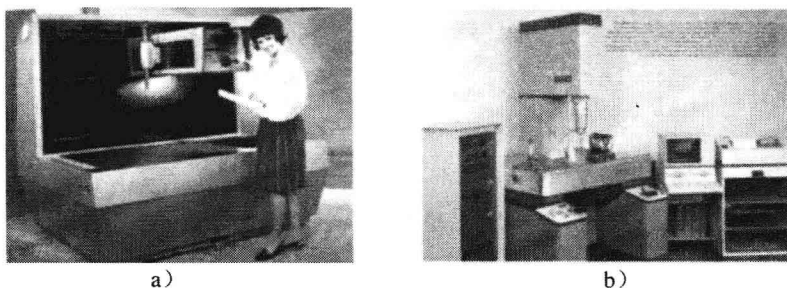


图 1.3 第一台 DCA 和第一台 CNC 坐标测量机

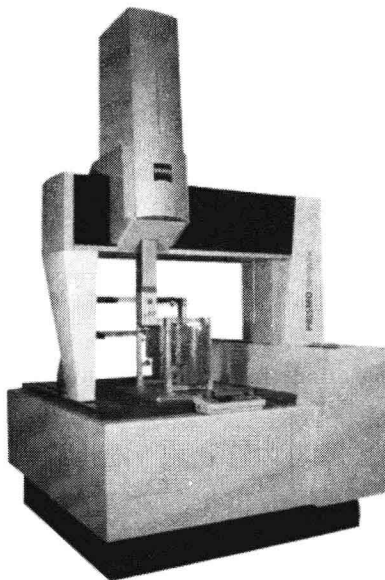


图 1.4 现代坐标测量系统示例

(1) 工件的变化

随着数字制造技术的发展，特别是三维数字设计（CAD）和数字制造技术（CAM）的日益广泛应用，工件的几何特性较以前发生了很大的变化，其主要体现在：

- ① 三维设计和多轴数控加工技术的出现和应用，工件的形状已变得越来越复杂；
- ② 工件的精度要求越来越高，不仅体现在尺寸方面，更体现在形状和空间方位方面；
- ③ 极端制造技术的飞速发展，使工件的体量向更大和更小二方向发展，分别进入了微纳和（超）大型尺度。

同时，越来越高的现代产品质量控制要求也对工件的检测和评定技术，特别是质量状

况的数字化和过程控制提出了更高的要求,坐标测量技术和测量系统已成为现代制造系统,特别是产品几何质量过程控制过程中不可或缺的部分。

图 1.5 介绍了坐标测量技术在几种复杂工件测量和精度控制中的应用。

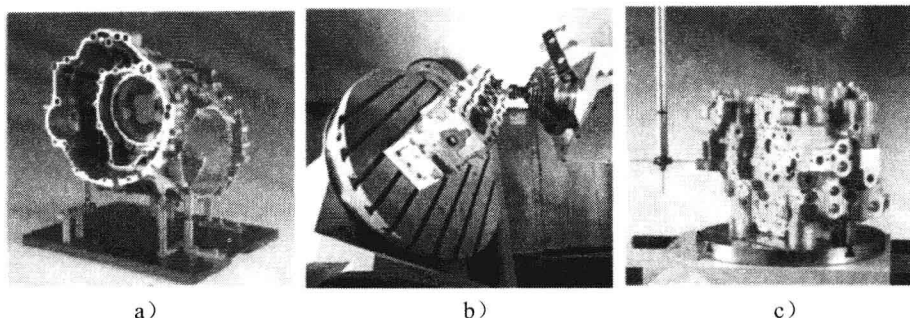


图 1.5 坐标测量技术在复杂工件测量和尺寸控制中的应用示例

1) 某型号轿车的变速箱壳体 [图 1.5a)]: 铝镁合金压铸件,需要全尺寸数字测量报告。工件压铸成形后毛坯外形质量控制点数(测量点数)近 5000 个,工件在加工后需测量与控制的几何尺寸误差和几何误差等总计 450 多项;工件采用批量生产方式,其加工质量需要进行过程控制。

2) 某型号汽车发动机的气缸盖 [图 1.5b)]: 铝镁合金压铸件,在工件处于毛坯状态时就需要全尺寸数字测量报告;工件由五轴数控机床加工完成,并需要进行六面(全部空间方向)的几何尺寸误差和几何误差高精度测量与评定;同时由于是批量生产,需要进行质量过程控制。

3) 某型号集成阀块 [图 1.5c)]: 要求五面高精度孔系的几何尺寸误差、几何误差测量和评定;工件加工为批量生产方式,其加工质量需要进行过程控制。

(2) 坐标测量系统的位置及与其他环节关系

从以上案例中可以看到坐标测量技术在现代数字制造系统中的重要作用。图 1.6 描述了坐标测量系统在现代机械设计制造过程中的位置及其他环节之间的关系:

1) 基于计算机辅助设计(CAD)的几何精度设计技术是整个测量工作的上游,CAD 模型作为理论模型(公称模型)、二维工程图样(规范有公差信息)或三维公差规范模型将是后续测量过程规范建立、误差评定的虚拟对象和评定依据;

2) 测量工作不仅针对工程图样的要求,还有相当一部分工作内容是针对制造过程的监控和调整,因此在制定测量过程规范时,还会考虑制造工艺与制造系统等因素。其最终的误差分离结果有相当部分会返回制造系统,用于加工过程的调整;

3) 测量过程的规范还会受到质量控制策略的约束,即需要根据控制要求来确定检测的频度、内容和数据密度等,以及返回各相关体系的检测数据内容。

(3) 现代测量工作的特点

从上面我们可以看出,现代精度控制过程对测量工作的要求具有以下的特点:

1) 工件质量状态的数字化

坐标测量技术对工件几何质量状态的数字化(量化)能力,使其在整个数字制造中的