



普通高等教育“十五”国家级规划教材

高等学校机械工程及自动化

机械设计制造及其自动化

专业系列教材

互换性与 测量技术

——几何产品技术规范与认证 GPS
Geometrical Product Specifications
and Verification

李柱 徐振高 蒋向前 主编



高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

高等学校机械工程及自动化专业系列教材
机械设计制造及其自动化

互换性与测量技术

——几何产品技术规范与认证 GPS
Geometrical Product Specifications
and Verification

李 柱 徐振高 蒋向前 主编

高等教育出版社

内容简介

本书为普通高等教育“十五”国家级规划教材,由华中科技大学李柱等编写。本书总结了本学科半个多世纪以来的教学科研经验和国际上的最新研究发展动向。内容包括以下9章:互换性与标准化概论、测量技术概论、圆柱体结合尺寸精度的控制与评定、形状和位置精度的控制与评定、表面特征的控制与评定、典型零部件几何精度的控制与评定、渐开线圆柱齿轮传动精度的控制与评定、机械系统的精度设计、GPS标准与计量体系。

本书主要供高等学校机械设计制造及其自动化专业(含机械制造、机械设计、机械电子方向)以及仪器仪表类专业等本科生使用。

图书在版编目(CIP)数据

互换性与测量技术——几何产品技术规范与认证 GPS/
李柱,徐振高,蒋向前主编. —北京:高等教育出版社,
2004.12

ISBN 7-04-015607-5

I. 互... II. ①李...②徐...③蒋... III. ①互换性-理论-高等学校-教材②技术测量-高等学校-教材 IV. TG8

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第103578号

策划编辑 龙琳琳 责任编辑 贺玲 封面设计 李卫青 责任绘图 朱静
版式设计 王莹 责任校对 王雨 责任印制 孔源

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京新丰印刷厂

开 本 787×960 1/16
印 张 27
字 数 500 000

版 次 2004年12月第1版
印 次 2004年12月第1次印刷
定 价 33.50元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号:15607-00

序 言

制造业是国民经济的基础,过去是这样,现在是这样,将来还是这样。互换性与测量技术是与机械、电子、仪器等制造工业发展紧密联系的基础学科,它不仅将涉及制造业的标准化领域与计量学领域的有关知识紧密地结合在一起,而且涉及机械设计、机械制造、质量控制、生产组织管理等许多方面,因此本学科实际上是一门综合性应用技术基础科学。

现代科学技术已进入以计算机科学、信息技术、光电子技术、机器人技术、航空航天技术、纳米技术、生物工程等学科为标志的新的发展时期。制造业正处于由劳动密集、资本密集逐步向科学技术密集、智力密集方向发展,由单一品种、大批量生产,逐步向多品种、小批量综合生产系统发展的阶段。这些新生产系统的采用与实施依赖于基础技术科学的开发与研究。特别是随着计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)的发展,迫切需要发展计算机辅助公差设计(Computer Aided Tolerancing, CAT)和计算机辅助测试(Computer Aided Testing, CAT)。因为CAT是CAD和CAM的联系环节,而本学科是发展CAT技术的基础,故其重要性更加显得突出。此外,互换性与测量技术不仅是现代机械工业发展的基础,而且也与上述带头学科本身的发展密切相关。显然,加强本学科的教学与科学研究工作,努力提高本学科的理论水平与应用水平,对于培养提高工程科技人才的素质,贯彻我国入世的“人才、专利、技术标准”三大战略有着非常重要的意义。

近年来,随着专业调整和教学计划的修改,本学科的教材建设进入了一个新的历史时期,有将本学科机械精度设计部分内容与机械设计、机械原理合并为一本教材的,也有单独编写或改用其他名称的。而与此同时,在美国出版了由张洪潮教授主编的“Advanced Tolerancing Techniques”(先进公差技术)一书,在欧洲出版了由多国16位作者合编的“Geometrical Product Specifications”(几何产品技术规范)一书,作为技术大学的必修课教材。这说明,本学科的科学内涵在不断进步发展,教材建设必须“与时俱进”,深化改革。

本教材正是在这种新形势下组织编写的。其特点是:①既重视对本学科基本理论和规律性知识的总结论述,也重视对本学科的应用与发展的分析;②反映最新国家标准和国际标准发展动向;③对测量技术,以论述原理、原则及方法为主,并将“公差”与“测量”紧密结合,符合技术标准与计量技术全球融合和国际化的趋势;④内容丰富,简明扼要,具有前瞻性和较高的学术水平及实用

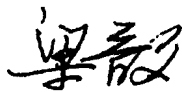
价值。

本书作者是一支由老、中、青教师结合的队伍。他们中有从事本学科教学和研究工作长达半个多世纪的老教师,也有年轻的博士。他们不仅了解我国本学科的发展和“公差与配合”等国家标准的制订,也了解当前国际标准组织 ISO 关于几何产品技术规范与认证等国际标准的研究发展动向,掌握第一手材料,这是他们编写本书的有利条件。

本书作为普通高等教育“十五”国家级规划教材,不仅对于提高本学科的教学具有重要意义,对本学科的科学的研究以及我国制造工业的发展也必将起到很好的作用。

值此教材即将由高等教育出版社出版之际,谨记述如上,作为本书之序。

全国高校互换性与测量技术研究会理事长
清华大学教授 梁晋文



2004年2月于北京清华园

前 言

“互换性与测量技术”是与制造业发展紧密相联系的一门综合性应用技术基础科学,它不仅将涉及制造业的基础标准与计量技术结合在一起,而且涉及机械设计、机械制造、质量控制、生产组织管理等许多领域。

国际上,目前本学科的流行名称是“几何产品技术规范与认证”,并被国际标准组织 ISO/TC 213 简称为 GPS(Geometrical Product Specifications and Verification)。凡有尺寸大小和形状的产品都是几何产品,包括机械电子、仪器仪表、计算机和信息技术、航空航天、交通运输、家用电器、机器人、半导体和生物工程等产品,既包括传统机械产品,也包括高新技术和创新技术产品。产品几何规范(GPS)贯穿于所有几何产品的研究、开发、设计、制造、验收、出厂、使用以及维修等全过程,覆盖领域极为广泛,其应用已经从工业领域渗透到了商业领域和国民经济的各个部门。随着新世纪知识的快速扩张和经济全球化,基于产品几何规范的“标准和计量”体系的重要作用日益为国际社会所认同,其水平不但对国家制造业水平有决定作用,而且对国民经济发展有着重要影响。

过去,我们熟悉的几何产品技术规范有公差配合、形状与位置公差、表面粗糙度等,其基本特征是以几何学为基础,被称为第一代 GPS。几何学是经典的、确定性的数学方法,用于描述、限制具有随机特征的加工误差,理论上存在“先天不足”的问题,而在实际应用上,由于测量方法不统一,导致产品合格评定的纠纷。在 ISO/TC 213 近年工作的基础上,新一代 GPS 已经形成。它以计量数学为基础,引入物理学中的物像对偶性原理,把规范过程(标准)与认证过程(计量)联系起来,并用“不确定度”(uncertainty)的传递关系将产品的功能、规范、制造、测量认证集成一体,从而将解决一直困扰人们的基于几何学理论技术标准的烦琐以及由于测量方法不统一致使测量评估失控引起纠纷的问题。新一代的 GPS 是信息时代几何产品技术规范 and 计量认证综合为一体的新型国际标准,它标志着标准和计量进入了一个全新的时代。

考虑到国内外的具体情况,第一代 GPS 在制造业中还有应用,由第一代 GPS 完全过渡到第二代 GPS 不仅需要一段时间,而且第二代 GPS 的产生离不开第一代 GPS 的基础。因此,本教材采取兼顾的策略,既介绍第一代 GPS,也论述第二代 GPS 的发展。此外,本教材编写特别注意总结、归纳、提炼有关本学科的基本原理、原则与方法,希望能对读者有所帮助。

本教材由李柱、徐振高、蒋向前主编。参加各章编写的有:第 1 章,杨曙年;

第2章,李柱、程德云;第3章,李柱、程德云、杨将新;第4章,徐振高、熊峰;第5章,蒋向前、谢峰;第6章,赵俊伟、徐振高;第7章,徐振高;第8章,徐振高、黄美发;第9章,蒋向前、肖少军、马利民。清华大学梁晋文审阅了本书。

在本书的编写过程中,得到了高等教育出版社、机械科学研究院、全国几何产品技术规范标准化技术委员会 SAC/TC 240、全国高校互换性与测量技术研究会等的大力支持,编者在此表示衷心感谢!我们特别感谢本学科的宗师梁晋文教授对本学科的开拓、奉献及对本教材编写殷切的关注与鼓励,他终身对本学科的追求和实事求是的治学精神是我们完成本书的重要支柱。

由于编者水平的限制,本书难免有疏忽错误之处,欢迎读者批评指正!

编 者

2004年1月于武昌华中科技大学

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)64014089 64054601 64054588

目 录

第 1 章 互换性与标准化概论	1
1.1 机械制造中的互换性	1
1.1.1 互换性的含义	1
1.1.2 互换性的分类	2
1.1.3 互换性的作用	3
1.1.4 互换性生产的发展	4
1.1.5 互换性原理简述	5
1.1.6 互换性与精度理论	8
1.1.7 互换性与质量工程	9
1.2 标准化及优先数系	10
1.2.1 标准和标准化的意义	11
1.2.2 标准化的基本原理	15
1.2.3 技术参数数值系列的标准化	18
习题	23
第 2 章 测量技术概论	24
2.1 测量技术的基本知识	24
2.1.1 计量单位与量值传递系统	25
2.1.2 测量器具与测量方法的基本计量学指标	28
2.1.3 测量方法与测量器具分类	30
2.2 被测的量在测量过程中的变换	34
2.2.1 机械变换	34
2.2.2 气动变换	39
2.2.3 光学变换	40
2.2.4 电学变换	46
2.3 测量误差与测量结果的数据处理	48
2.3.1 测量误差及其产生原因	48
2.3.2 测量数据处理	49
2.4 测量技术的基本原则	57
2.4.1 测量误差公理	57

2.4.2	最近真值原理	57
2.4.3	量值传递原则	57
2.4.4	最小变形原则	57
2.4.5	基准统一原则	61
2.4.6	最短测量链原则	63
2.4.7	阿贝测长原则	64
2.4.8	测量误差补偿原则	66
2.4.9	重复原则	66
2.4.10	随机原则	66
2.4.11	测量的公差原则	67
	习题	68
第3章	圆柱体结合尺寸精度的控制与评定	69
3.1	基本术语	69
3.2	公差制的发展	78
3.2.1	初期公差制	79
3.2.2	旧公差制	79
3.2.3	国际公差制	81
3.3	ISO 极限与配合制	83
3.3.1	标准公差	83
3.3.2	基本偏差	88
3.3.3	公差带与配合	99
3.4	尺寸精度设计的基本方法	102
3.4.1	基准制的选择	103
3.4.2	公差等级的确定	106
3.4.3	配合的确定	108
3.5	间隙配合的设计计算	115
3.6	过盈配合的设计计算	121
3.6.1	术语和定义	122
3.6.2	计算基础与方法	124
3.6.3	过盈配合的确定	127
3.7	过渡配合的设计计算	130
3.8	尺寸精度的控制	132
3.8.1	基本概念	132
3.8.2	光滑极限量规	136

3.8.3 用测量器具直接测量	141
习题	145
第4章 形状和位置精度的控制与评定	147
4.1 概述	147
4.2 基本术语与定义	148
4.2.1 要素	148
4.2.2 形位公差与形位误差	149
4.2.3 形位误差的评定原则	151
4.2.4 基准	153
4.3 形状公差与形状误差测量	155
4.3.1 直线度	155
4.3.2 平面度	159
4.3.3 圆度	165
4.3.4 圆柱度	169
4.3.5 线、面轮廓度	170
4.4 位置公差与位置误差测量	171
4.4.1 平行度	171
4.4.2 垂直度	174
4.4.3 倾斜度	177
4.4.4 同轴度	178
4.4.5 对称度	179
4.4.6 位置度	179
4.4.7 跳动	182
4.5 形位公差与尺寸公差的关系	185
4.5.1 基本概念	185
4.5.2 独立原则	192
4.5.3 包容要求	192
4.5.4 最大实体要求	194
4.5.5 最小实体要求	197
4.5.6 可逆要求	199
4.6 形位精度设计	201
4.6.1 公差原则和相关要求的应用	201
4.6.2 形位公差项目的选择	203
4.6.3 形位公差值的确定	203

4.6.4 形位公差的标注	204
4.7 统计形位公差	209
4.7.1 统计公差及其概念	210
4.7.2 提出统计圆度公差的几点考虑	210
4.7.3 统计圆度公差的评定参数	211
习题	214
第5章 表面特征的控制与评定	217
5.1 表面特征的意义	217
5.1.1 表面特征的形成与划分	217
5.1.2 表面特征对零件性能的影响	218
5.2 表面特征的术语及定义	219
5.2.1 ISO 4287:1997 中的术语及定义	220
5.2.2 GB/T 3505—1983 中表面粗糙度的主要术语及评定参数	225
5.2.3 相关术语与参数符号的比较	229
5.2.4 三维表面粗糙度参数	229
5.3 表面粗糙度的选用与标注	231
5.3.1 表面粗糙度的选用	231
5.3.2 表面粗糙度的标注	234
5.4 表面粗糙度的测量	236
5.4.1 目测或感触法	236
5.4.2 非接触测量法	236
5.4.3 接触测量法	239
5.5 滤波技术	242
5.5.1 2RC 滤波器	243
5.5.2 无相移滤波器	244
5.5.3 谷抑制滤波器	244
习题	245
第6章 典型零部件几何精度的控制与评定	246
6.1 滚动轴承结合的精度设计	246
6.1.1 概述	246
6.1.2 滚动轴承的精度等级	246
6.1.3 滚动轴承和座孔、轴颈结合的公差与配合	249
6.1.4 滚动轴承与座孔、轴颈结合的配合选择	251

6.2 键与花键连接的精度设计	256
6.2.1 平键结合的精度设计	256
6.2.2 花键结合的精度设计	259
6.3 螺纹连接的精度设计	266
6.3.1 普通螺纹的分类及使用要求	266
6.3.2 螺纹结合的主要参数	266
6.3.3 普通螺纹的公差与配合	269
6.3.4 普通螺纹公差与配合的选用	273
6.3.5 普通螺纹的标注	276
6.3.6 螺纹中径的合格性判断	276
6.3.7 圆柱螺纹的测量	279
6.4 圆锥结合的精度设计	283
6.4.1 圆锥配合的基本参数	283
6.4.2 圆锥几何参数误差对圆锥配合的影响	285
6.4.3 圆锥公差与配合	287
6.4.4 角度和锥度的测量	293
习题	300
第7章 渐开线圆柱齿轮传动精度的控制与评定	301
7.1 齿轮传动的使用要求与制造误差	301
7.1.1 齿轮传动的使用要求	301
7.1.2 齿轮的加工误差	304
7.2 齿轮传动准确性的评定指标及其误差测量	306
7.2.1 齿距累积总误差 F_p	306
7.2.2 径向跳动 F_r	309
7.2.3 切向综合总误差 F'_i	310
7.2.4 径向综合总误差 F''_i	313
7.2.5 公法线长度变动 ΔF_w	314
7.3 齿轮传动平稳性的评定指标及其误差测量	317
7.3.1 单个齿距偏差 f_{pt}	317
7.3.2 基圆齿距偏差 f_{pb}	318
7.3.3 齿廓偏差	320
7.3.4 一齿切向综合误差 f'_i	322
7.3.5 一齿径向综合误差 f''_i	323
7.4 载荷分布均匀性和齿轮副侧隙的评定指标及其误差测量	324

7.4.1	载荷分布均匀性的评定指标	324
7.4.2	齿轮副侧隙的评定指标	328
7.5	齿轮的精度设计	330
7.5.1	齿轮的精度等级及其选择	331
7.5.2	最小法向侧隙和齿厚极限偏差的确定	335
7.5.3	齿轮检验项目的确定	336
7.5.4	其他技术要求	337
7.5.5	齿轮精度等级的标注	338
7.5.6	应用举例	338
	习题	341
第8章	机械系统的精度设计	342
8.1	概述	342
8.1.1	机械设计	342
8.1.2	机械精度设计	343
8.2	尺寸链	344
8.2.1	尺寸链的有关术语	346
8.2.2	尺寸链的分类	347
8.2.3	尺寸链图的绘制与增、减环的判别	349
8.2.4	尺寸链的计算	349
8.2.5	用完全互换法(极值法)计算直线尺寸链	350
8.2.6	用统计法(大数互换法)计算直线尺寸链	357
8.3	统计尺寸公差	365
8.3.1	概念	365
8.3.2	限定概率分布特性的方法	365
8.3.3	统计尺寸公差在图样上的标注	368
8.3.4	应用	369
8.4	并行公差优化设计	370
8.4.1	目标函数的建立	371
8.4.2	约束条件的确定	372
8.4.3	目标函数的求解	374
8.4.4	应用举例	374
	习题	379
第9章	GPS标准与计量体系	381

9.1 产品几何量技术规范(GPS)	381
9.1.1 GPS 的含义与范围	381
9.1.2 GPS 的作用	382
9.2 新一代 GPS 体系	382
9.2.1 新一代 GPS 体系的起源	382
9.2.2 新一代 GPS 体系的结构	384
9.2.3 新一代 GPS 的基础理论体系	387
9.2.4 新一代 GPS 的图样标注体系	399
9.2.5 新一代 GPS 规范操作应用举例	400
9.3 新一代 GPS 测量不确定度的评定与管理	405
9.3.1 概述	405
9.3.2 新一代 GPS 测量的不确定度管理	406
9.3.3 测量不确定度表示达成一致性方法	408
9.4 GPS 标准与产品质量管理	409
9.4.1 产品质量与成本的关系	410
9.4.2 产品质量管理的标准体系	412
9.4.3 ISO 9000:2000 介绍	414
习题	415
参考文献	416

第1章 互换性与标准化概论

1.1 机械制造中的互换性

1.1.1 互换性的含义

所谓互换性(interchangeability),顾名思义即事物可以相互替换的特性。在工程及日常生活中,产品或制件互换性的体现比比皆是。如,计算机的磁盘,同一张磁盘可在不同品牌的计算机上使用,同一计算机上也可使用不同厂家的磁盘;电视机上的集成芯片损坏了,可换装上同一规格的新芯片,便能保证电视正常工作;家用白炽灯泡坏了,到商店购回同一规格的灯泡,装上即可点亮照明;自行车、汽车、拖拉机等机械的零件损坏后,修理人员可迅速换上同规格的新零件,并且在更换和装配后,即能很好满足使用要求。这里提到的磁盘、集成电路芯片、灯泡、机器零件等,在同一型号规格内可以互相替换使用,它们都是具有互换性的产品。在制造工程领域中,产品或制件可互换的特性不仅在使用中体现出优越性,而且互换性在产品的研究、开发、设计、制造等全过程中也有重要的作用。本课程将主要论述制造工程领域里有关产品或制件的互换性及其测量技术的基本理论与方法。

从理论上讲,要使一批产品或制件具有可以互相替换使用的特性,可以将它们的所有实际参数(如尺寸、形状等几何参数及强度、硬度等物理参数)的数值加工制造得完全一样,使得取其中任意一件的应用效果都是相同的,因此它们也将具有互换性。但是,由于实际生产中制造误差不可避免地存在,要获得这样完全一致的产品几乎是不可能的,也是不必要的。因而在按互换性的原则组织生产时,只要将一批产品或零件实际参数值的变动限制在允许的极限范围内,保证它们充分近似,即可实现互换性并获得最佳的技术经济效益。这里,实际参数值允许的最大变动量称为公差。

至此,可将机械工程中互换性的含义归结如下:“机器制造中的互换性,是指按规定的几何、物理及其他质量参数的极限范围或公差,来分别制造机器的各个组成部分,使其在装配与更换时不需辅助加工及修配,便能很好地满足使用和生产上的要求。”

1.1.2 互换性的分类

根据使用要求以及互换的参数、程度、部位和范围的不同,互换性可分为不同的种类。

1. 按决定参数分

按互换的参数或参数的功能分,互换性可分为几何参数互换性与功能互换性。

(1) 几何参数互换性 是指通过规定几何参数的极限范围以保证产品的几何参数值充分近似所达到的互换性。此为狭义互换性,即通常所讲的互换性,有时也局限于反映保证零件尺寸配合或装配要求的互换性,也是本教材主要涉及的互换性。

(2) 功能互换性 是指通过规定功能参数的极限范围所达到的互换性。功能参数既包括几何参数,也包括其他一些参数,如材料物理力学性能参数、化学、光学、电学、流体力学等参数。此为广义互换性,往往着重于保证除几何参数互换性或装配互换性以外的其他功能参数的互换性要求。

2. 按方法及程度分

按实现方法及互换程度的不同,互换性又可分为完全互换性(极值互换)和不完全互换性。不完全互换性通常包括概率互换性(大数互换性)、分组互换性、调整互换性和修配互换性等几个种类。

(1) 完全互换性 是指零、部件在装配或更换时不仅不需要辅助加工与修配,而且不需选择,即可保证百分之百地满足使用要求。

(2) 概率互换性 是指零、部件的设计制造仅能以接近于1的概率来满足互换性的要求,主要用于成批、大量生产场合。在成批、大量生产方式下,考虑制造时制件参数实际值的概率分布特点,将参数允许的变动量适当加大以获得制造的经济性。按概率互换性要求组织生产,可能出现达不到总装要求的情况,但其出现的概率应很小。

(3) 分组互换性 通常用于某些大批量生产且装配精度要求很高的零件。此时若采用完全互换性组织生产,则零件互换参数数值的允许变动量将很小,使加工困难、成本增高,甚至无法加工。在这种情况下,可按分组互换性要求组织生产:将零件互换参数数值的允许变动量适当加大,以减小加工难度;而在加工完毕后再用测量器具将零件按实际参数值的大小分为若干个组,使同组零件的实际参数值的差别减小,然后按对应组进行装配。此时,仅同组内的零件可以互换,组与组之间不能互换。分组互换,既可保证装配精度及使用要求,又使零件易于加工、降低制造成本。例如,滚动轴承内、外套圈及滚动体在装配之前,通常要分十几组甚至几十组;内燃机的活塞、活塞销和连杆在装配前,往往要分三、