

互换性与测量技术基础

何镜民 主编

许典煌 副主编

内 容 简 介

本书由北京高校互换性与测量技术教学研究会组织有丰富教学经验的人员编写,全书严格贯彻国家最新标准。内容包括:互换性与标准化、测量技术基础、圆柱结合的互换性、形状和位置公差、表面粗糙度、滚动轴承与孔和轴结合的互换性、光滑量规及光滑工件尺寸的检验、螺纹结合的互换性、键、花键结合的互换性、圆柱齿轮传动的互换性及尺寸链共11章。

本书可作为高等工业学校机械类各专业与仪器仪表类各专业的教材,也可供机械、仪器仪表部门的工程技术人员、计量检验人员及生产工人参考。

互换性与测量技术基础

何镜民 主编

许典煌 副主编

责任编辑 张赞宏

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码100044)

各地新华书店经售

北京市昌平长城印刷厂印装

787×1092 1/16 印张15¹/₂ 357千字

1991年5月第一版 1991年5月第一次印刷 印数:00,001—12,000册

ISBN 7-118-00831-1/TG·64 定价:6.30元

前 言

本书是由北京高校互换性与测量技术教学研究会组织,基本上遵照原“高等工业学校互换性与技术测量教材编审小组”所拟定的“互换性与测量技术基础教学大纲”进行编写的。参加编写的教师来自北京的十所高等院校。在编写过程中,对每个章节内容,都经集体讨论、总结各校多年的教学经验,取得共同的意见后,再由专人执笔,汇总修改而成。

本书编写原则是:照顾到机械类与仪器仪表类各专业需要,在使用中可各有取舍;在内容上主要是讲清基本概念和原理,在切实加强基础理论的同时注重实践环节。每章都附有足够的思考题和习题,并附有必要的表格以备解题之用。为了便于学生自学,对一些比较难懂的章节,适当用较大的篇幅介绍,对容易掌握的,尤其是一些纯叙述性的内容则有较大的压缩。务使全书重点突出、主次分明,使学生在学时不会产生枯燥感。

本书的许多章节,在内容上或安排上都有所改进和创新。例如,按现行的教学计划规定,学生在学习本课程之前,都已学过概率课程,故本书对误差理论的分析,力求用学生已掌握的的概率的理论工具来解释测量误差的处理,使篇幅减少、内容深入,教师讲解方便,学生接受容易。又如齿轮一章,本书着重分析齿轮加工时所产生的各种典型误差,这就使看起来似乎孤立的齿轮误差项目能有机地联系起来,使学生能理解得更深刻,便于建立起系统的概念,掌握得更牢固。

本书在介绍中深入浅出,力求用通俗的语言讲清比较复杂的问题;在讲解深度上又留有余地,使学生感到在互换性及测量这一学科领域内,尚有许多理论问题和实际问题值得研究,以启发学生的求知欲和学习兴趣。对有些章节内容,教师在讲授时可以灵活掌握,例如某些少学时的专业,对有些理论性较强的章节可以少讲或不讲,而偏重于实用性的内容。

本书各章的编写人是:第一章李士松,第二章许典煌,第三章徐沁泉、张国英,第四章梁畿辅、卓兴仁,第五章刘筱玉,第六章翟丰安,第七章叶庆昭,第八章翟丰安,第九章何志刚,第十章徐沁泉、叶庆昭,第十一章李梅山。何镜民负责统稿并任主编,许典煌任副主编,统一处理全书的文字、图表、习题等。

关于本课程的名称,虽然几经变化,但未尽如人意,故本书暂时仍沿用这一名称。不过我们认为,按照本课程所介绍的实际内容,并参照国际上所开类似课程的名称,本课程的名称应为《互换性与工程计量学》,英文名称为《Interchangeability and Engineering Metrology》,这样既符合本课程的学科体系,又便于国际间交流,决不会因译名而产生误解,因为国际上通常将几何量的检测称为《工程计量学》。在此提出,供国内同行共同探讨。

本书在编写过程中,得到北京市高等教育学会及北京各有关高等院校领导的大力支持和帮助,在此表示谢忱。

限于水平,缺点或不足之处难免,热诚欢迎广大读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1
第一章 互换性与标准化	2
§ 1-1 互换性的基本概念	2
§ 1-2 标准化	4
§ 1-3 优先数和优先数系	5
§ 1-4 零件的加工误差与公差	7
第二章 测量技术基础	14
§ 2-1 测量技术概述	14
§ 2-2 长度基准与量块	15
§ 2-3 计量器具和测量方法的分类	18
§ 2-4 计量器具的基本技术指标	19
§ 2-5 测量误差与数据处理	21
第三章 圆柱结合的互换性	44
§ 3-1 概述	44
§ 3-2 公差与配合的基本术语及定义	44
§ 3-3 公差与配合国家标准的构成	51
§ 3-4 公差与配合国家标准的应用	63
第四章 形状和位置公差	78
§ 4-1 概述	78
§ 4-2 形位误差及其评定	79
§ 4-3 形状和位置公差的定义、项目、公差带与标注	84
§ 4-4 形状公差各项目及其误差的检测	88
§ 4-5 位置公差各项目及其误差的检测	101
§ 4-6 形位公差与尺寸公差的关系	108
§ 4-7 形位公差的数值与等级标准	112
§ 4-8 形位公差的选用	114
第五章 表面粗糙度	125
§ 5-1 概述	125
§ 5-2 表面粗糙度的评定参数 (GB3505-83)	126
§ 5-3 表面粗糙度的评定参数值、代号及标注	129
§ 5-4 表面粗糙度的选择	131
§ 5-5 表面粗糙度的检测	134
第六章 滚动轴承与孔和轴结合的互换性	138
§ 6-1 概述	138
§ 6-2 滚动轴承的精度等级及应用	138
§ 6-3 滚动轴承内径与外径公差带及特点	140

§ 6-4 滚动轴承与轴, 外壳孔配合的选择	142
第七章 光滑量规及光滑工件尺寸的检验	153
§ 7-1 概述	153
§ 7-2 光滑极限量规	154
§ 7-3 光滑工件尺寸的检验	160
第八章 螺纹结合的互换性	164
§ 8-1 概述	164
§ 8-2 普通螺纹几何要素误差对螺纹互换性的影响	165
§ 8-3 普通螺纹的公差与配合	170
§ 8-4 普通螺纹的检测	174
§ 8-5 梯形螺纹的公差配合与检测	179
第九章 键、花键结合的互换性	186
§ 9-1 键、花键结合的用途和种类	186
§ 9-2 平键结合的公差与配合	187
§ 9-3 矩形花键结合的公差与配合	190
§ 9-4 矩形花键的检测	194
第十章 圆柱齿轮传动的互换性	197
§ 10-1 圆柱齿轮传动的特点和使用要求	197
§ 10-2 齿轮加工误差概述	198
§ 10-3 圆柱齿轮的误差项目及检测	203
§ 10-4 齿轮副的误差项目及检测	212
§ 10-5 圆柱齿轮公差标准及其应用	215
第十一章 尺寸链	231
§ 11-1 尺寸链概述	231
§ 11-2 尺寸链计算	234
§ 11-3 尺寸链在几何精度设计中的应用	236
参考文献	241

绪 论

在高等工科院校机械类各专业，都是将“互换性与测量技术基础”课程作为一门技术基础课列入教学计划，本课程直接与机械设计、机械制造及机器的检测有密切的关系。

机械设计的过程，通常总是先由总体设计开始，然后进行部件设计，最后是机械零件的设计。在总体设计阶段，主要是考虑该机器将要完成哪些功能，必须具备哪些动作。在部件设计阶段，也是研究该部件所要承担的一些功能及动作。因此，总体设计与部件设计阶段，主要考虑的是机构运动学的问题，以及为了完成这些运动所需要的装置及运动副。在机械零件设计阶段，主要考虑各零件的具体结构，保证各零件在工作中受力后不致损坏，并保证各零件具有一定的寿命。因此，必须从材料强度的角度考虑选用各个零件的材料，以及零件结构的形状及尺寸大小。但这还不够，还必须进一步考虑零件的精度问题。因为在零件制造时，必然产生加工误差，必须将加工误差控制在一定范围内，才能使机器装配后能正常运转，这就是零件精度设计的任务。机器的精度，是决定机器质量的重要因素之一。生产实践证明，同样结构、同样材料的机器，只是由于精度不同，机器的质量好坏相差很大。

在有关课程中，“机械原理”课程主要是研究机构运动学设计中的各种问题，“机械零件”课程主要研究结构设计中的一些问题，本课程则主要研究精度设计中的一些问题。

精度，是用来控制加工误差的，精度设计确定之后，就必须用一定的制造工艺来保证。所以本课程又是以后学习《机械制造工艺学》等专业课程必不可少的基础课。

在制造中是否达到了精度要求，只有通过检验和测量才能知道，因此测量是保证精度的基础。事实上人类在进行任何生产活动时，都需要测量，在进行科学实验时更离不开测量。伟大的化学家和度量学家门捷列夫曾有一句名言：“没有测量就没有科学”，说明了“测量”的重要作用。本课程所分析的精度问题都是几何量的精度，因此所要研究的测量问题，也都是几何量的测量。测试能力是高等学校中培养学生的基本能力之一，因此本课程还担负着培养学生的测试技能的任务，其中包括：有关测量的理论问题，动手进行测试操作，取得测量数据后进行数据处理和最后得到正确的测量结果。

综上所述，本课程是教学计划中必不可少的一个重要环节，也是使学生学到有关精度的理论知识与测量的实践技能的一门重要课程。

第一章 互换性与标准化

§ 1-1 互换性的基本概念

一、互换性的意义和分类

在日常生活中,如果自行车的零件坏了,我们可以到商店买一个规格相同的零件,将它迅速地装在自行车上,即能很好地满足使用要求,其所以能这样方便,是因为自行车零件具有互换性。

在机械制造业中,零部件的互换性是指在同一规格的零件或部件中,可以不经选择、修配或调整,任取一件都能装配在机器上,且能达到规定的使用性能要求,零件或部件具有的这种性能称为互换性。能够保证产品具有互换性的生产,称为遵守互换性原则的生产。

怎样才能使零件具有互换性?似乎在一批同规格的零部件中,必须使实际参数(如尺寸、形状等几何参数、强度、硬度等物理参数)完全一致的零件才具有互换性。但实际上要获得这样完全一致的零件,不仅是不可能的,也是不必要的。从机器的使用和互换性生产要求来看,只要制成零件的实际参数值变动不大,保证零件充分近似即可。也就是说,只要将零件的实际参数值的变动限制在一定范围内,零件就具有互换性。实际参数允许的最大变动量称为“公差”。

机械制造业中的互换性,按决定参数或使用要求可分几何参数互换性与功能互换性。

几何参数互换性是指规定几何参数公差,以保证零部件的几何参数具有互换性,此为狭义互换性。但是,要全面地满足产品使用性能的要求,还要对零部件的物理性能、化学性能、机械性能等各方面参数提出适当的要求,以达到功能参数的互换性,称为功能互换。此为广义互换性。

本课程主要研究几何参数的互换性。

互换性按其互换程度可分为完全互换与不完全互换。

若一批零件(或部件)装配前不经选择,装配时也不需修配和调整,装配后即可满足预定的使用要求,则具有完全互换性。但有时因装配精度要求很高,如采用完全互换,将使零件尺寸公差很小,加工困难,加工成本较高,甚至无法加工。为了便于加工,这时可将零件的制造公差适当地放大,零件加工完后,对零件进行测量,根据零件的实际尺寸大小分为若干组。这样,每组零件间实际尺寸的差别减小,装配时按相应组进行装配(如将实际尺寸大的孔与实际尺寸大的轴装配在一起)。即按大配大、小配小的原则,按相应组“对号入座”方法进行装配,这样既解决了加工困难问题,又保证了装配精度的要求。但是,此时仅组内零件可以互换,组与组之间不能互换,故称为不完全互换。如滚动轴承中,轴承内外圈滚道与钢球间的互换性,则因装配精度高,加工困难,通常采用分组装配,为不完全互换。

在进行机械产品设计规定零件公差时，对于那些易磨损或易丢失的零件，应遵循完全互换性原则。当产品结构较复杂、装配要求又较高时，则可遵循不完全互换原则，但不适于磨损储备件。在一般情况下，不完全互换只限于部件或机构在制造厂内装配时使用。至于厂外协作，往往要求完全互换。

二、互换性在机械制造中的作用

按互换性原则组织生产，已成为组织现代化生产的一项重要技术经济原则，在各生产部门得到广泛的应用。其主要优点如下：

从制造上看，按互换性要求进行生产是提高生产水平和文明生产的有力手段，可以合理地进行生产分工和组织专业化生产，便于采用高效率专用设备加工，甚至采用计算机辅助制造（CAM），提高产品的产量和质量，降低生产成本。由于零件具有互换性，装配时不需辅助加工或修配，使装配工的劳动量大大地减轻，生产周期缩短，易于实现装配自动化。

从设计上看，按互换性要求进行产品设计，最有利于采用标准件、通用件，因而大大地简化设计、计算、绘图等工作，可缩短设计周期，且便于用计算机辅助设计（CAD）。

从使用上看，如果零件具有互换性，当零件磨损或损坏后，可以立即用一个新的备件代替，显著地减少机器的维修时间和费用，保证机器工作的连续性和持久性，从而提高了机器使用价值。在某些情况下，互换性所起的作用很难用价值来衡量，如在战场上，为尽快排除武器的故障就必须使零件具有互换性。

由于现代机械产品的特点是结构复杂，精度高，产量大，因此现代化生产的组织形式是分散制造，集中装配，这就使得互换性原则成为组织现代化生产的重要技术经济原则。

现代机械工业发展的趋势是：由传统的生产方式逐步过渡成数字控制（NC）、计算机辅助设计、计算机辅助制造（CAD/CAM）及柔性生产系统（FMS）生产，而更先进的计算机综合自动化生产系统（CIMS）也已成为世界各先进国家热衷研究及发展的课题。科学技术愈发展，对互换性的要求愈严格。例如柔性生产系统的主要特点，是可以根据市场需求改变生产线上产品的型号和品种。当生产线上工序变动时，信息送给多品种控制器。控制器接受将要装配哪些零件的指令后，指定机器人（机械手）选择零件，进行装配，并经校核送到下一工序。库存零件提取后，由计算机通知加工站补充零件。显然按这种生产系统对互换性的要求更加严格。

综上所述，在机械制造中遵循互换性原则，不仅显著提高生产率，而且能有效地保证产品质量和降低生产成本。所以，互换性原则是当前和今后生产所不可缺少的重要生产原则和有效的技术措施。

三、怎样实现互换性生产

机械产品的设计主要是运动、结构、强度和精度设计。在一般情况下，产品的质量 and 成本主要由设计者决定，因而设计者必须根据产品的质量要求，合理地对零件进行精度设计，对零件的几何参数规定合适的公差与配合，并尽量简化零件形状，以利于制

造。否则由于零件几何参数的公差太小，加工困难，难以实现互换性生产。

制造时，必须选择适当的工艺方法，以保证零件不超出图纸中规定的公差。为了达到互换性的目的，应尽可能按专业化、协作化的原则来组织生产，这样才能为采用新技术、新工艺和先进的工艺设备创造条件，保证产品的加工精度，保证互换性生产的实现。

为了实现互换性生产，在计量上要保证长度计量单位的统一，要在全中国范围内规定严密的量值传递系统及采用相应的测量方法和测量工具，以保证测量精度。

§1-2 标 准 化

标准化，是实现互换性生产的前提。为了取得国民经济的最佳效果，依据科学技术和实践经验的综合成果，在充分协商的基础上，对经济技术活动中具有多样性、相关特性的重复事物，以特定程序和特定形式颁发的统一规定，叫做标准。

标准的上述定义，概括了制订标准的目的、标准产生的基础及制订标准的对象。同时表明标准跟其他文件不同，它具有严格的编制程序，格式也是特定的。并由主管机关以一定形式发布才能生效。标准一经颁布，就成为技术法规，不许擅自修改或拒不执行，标准是具有法制性的。它是为标准化而规定的技术文件。

标准化是指以制订标准和贯彻标准为主要内容的全部活动过程。

标准化不是一件孤立的事物，而是一个制订、贯彻、修改标准的过程。因此，标准是标准化的核心。标准化的效果，只有当标准在社会实践中实施以后，才能表现出来，决不是制订一个标准就可以了事。有了再多、再好的标准，在实践中没有被运用，没有贯彻执行，那就什么效果也收不到。因此，在标准化的“全部活动”中，贯彻标准是一个非常重要的环节。

标准化是社会生产的产物，又能推动社会生产的发展。标准化是现代化大生产的重要手段，是实现组织专业化生产的前提，是科学管理的重要组成部分，也是提高产品质量的技术保证。实践证明，标准化水平是衡量一个国家科学水平、生产技术水平和管理水平的尺度，是现代化的一个重要标志。

标准按其性质可以分为三大类，即技术标准、生产组织标准和经济管理标准。但通常所说的标准，大都是指技术标准。所谓技术标准，就是指为科研、设计、工艺、检验等技术工作，为产品和工程的技术质量特性，为各种技术设备和工艺装备、工具制订的标准。按标准适用程度可分为基础标准和专业标准。就机械制造业来说，基础标准按照用途的不同，又可分为下列几类：

(1) 通用技术语言标准 如名词术语、符号代号、制图等。这类标准是为了使技术语言达到统一、简化、准确，以利于提高工作效率，便于互相交流和正确理解；

(2) 精度与互换性标准 如公差与配合、形状和位置公差、表面粗糙度等。这类标准是用保证一定的制造精度的办法来保证零部件的互换性和配合性质。对提高零部件通用化、统一化程度，实现生产专业化具有重要意义；

(3) 结构要素标准 如中心孔、锥度等。这类标准是为了促使零部件几何形状和尺寸达到统一和简化，以便于实现工艺典型化，减少工夹量具的品种、规格，提高生产

效率和经济效果;

(4) 实现产品系列化和保证配套关系的标准 如标准长度、标准直径等。这类标准,对于科学地组织社会化大生产,协调国民经济各环节之间的关系具有重要意义。

在我国,根据标准适应领域和有效范围,把标准分为国家标准、部标准(专业标准)和企业标准三级。从世界范围看,国际标准是由国际标准化组织(ISO)和国际电工委员会(IEC)制订颁发的标准。此外,尚有区域性标准,是由国际地区性组织制订颁布的。

§ 1-3 优先数和优先数系

任何一种机械产品都有反映它的一系列技术特性的参数。这些参数不仅同该种产品本身的性质有关,而且还与该产品相关的一系列产品的技术特性有关。因此,当设计者选定一个数值作为某种产品的参数指标时,这个数值就会按照一定的规律,向一切有关的制品、材料等有关指标传播、扩散,如螺栓尺寸一旦确定,与其相配合的螺母尺寸也就确定,并进而传播到加工、检验用的机床及量具,继而又传向垫圈、扳手尺寸等。由此可见,在设计和生产过程中,技术参数的数值不能随便确定,否则即使只有微小的差别,经过反复传播以后也会造成尺寸规格的繁多、杂乱,以致给组织互换性生产以及协作配套和使用维修等带来很大的困难。因此必须建立一定的标准,对参数进行合理的分档、分级。对工程上各技术参数进行协调、简化和统一。在生产实践的基础上,人们总结了一种符合科学的统一数值标准——优先数和优先数系。

优先数和优先数系是一种无量纲的分级数系,它是十进几何级数,适用于各种量值的分级。

优先数系是由公比为 $\sqrt[5]{10}$ 、 $\sqrt[10]{10}$ 、 $\sqrt[20]{10}$ 、 $\sqrt[40]{10}$ 和 $\sqrt[80]{10}$,且项值中含有10的整数幂的理论等比数列导出的一组近似等比的数列。各数列分别用符号R5、R10、R20、R40和R80表示。即:

R5 数系 以 $\sqrt[5]{10} \approx 1.60$ 为公比形成的数系;

R10 数系 以 $\sqrt[10]{10} \approx 1.25$ 为公比形成的数系;

R20 数系 以 $\sqrt[20]{10} \approx 1.12$ 为公比形成的数系;

R40 数系 以 $\sqrt[40]{10} \approx 1.06$ 为公比形成的数系;

R80 数系 以 $\sqrt[80]{10} \approx 1.03$ 为公比形成的数系。

R5、R10、R20、R40数列在优先数系中称为基本系列;R80称为补充系列,仅在参数分级很细,基本系列不能适应实际情况时,才可考虑采用。

优先数系中的任一个数值均称为优先数。优先数的理论值大都是无理数,标准中已经加以圆整。

在设计中遇到选择数值系列时,特别是在确定产品的参数或参数系列时,必须按标准规定,最大限度地采用。这就是“优先”的含义。优先数系的基本系列列于表1-1。

表1-1中只给出1~10区间内的优先数,对大于10和小于1的优先数,均可用10的

表1-1 优先数基本系列

基 本 系 列 (常用值)				计 算 值
R 5	R 10	R 20	R 40	
1.00	1.00	1.00	1.00	1.0000
			1.06	1.0593
		1.12	1.12	1.1220
			1.18	1.1885
		1.25	1.25	1.2589
			1.32	1.3335
		1.40	1.40	1.4125
			1.50	1.4962
		1.60	1.60	1.5849
1.60	1.60		1.70	1.6788
		1.80	1.80	1.7783
			1.90	1.8836
		2.00	2.00	1.9953
			2.12	2.1135
		2.24	2.24	2.2387
			2.36	2.3714
		2.50	2.50	2.5119
			2.65	2.6607
2.50	2.50	2.80	2.80	2.8184
			3.00	2.9854
		3.15	3.15	3.1623
			3.35	3.3497
		3.55	3.55	3.5481
			3.75	3.7584
		4.00	4.00	3.9811
			4.25	4.2170
		4.50	4.50	4.4668
4.00	4.00		4.75	4.7315
		5.00	5.00	5.0119
			5.30	5.3088
		5.60	5.60	5.6234
			6.00	5.9566
		6.30	6.30	6.3096
			6.70	6.6834
		7.10	7.10	7.0795
			7.50	7.4989
6.30	6.30	8.00	8.00	7.9433
			8.50	8.4140
		9.00	9.00	8.9125
			9.50	9.4406
		10.00	10.00	10.0000

整数幂 (如10、100、1000、……或 0.1、0.01、0.001、……) 乘以表 1-1 的优先数求得。

此外, 由于生产的需要, 可采用派生系列, 即从基本系列或补充系列 R_r (r 为 5、10、20、40 和 80) 中每 P 项取值而导出的系列, 以 R_r/P 表示。如 $R_{10}/3$ 系列是从 R_{10}

系列中某一项开始,每隔3项取一项。假如从1开始,就可得出1、2、4、8……。或从1.25开始就可得1.25、2.5、5、10……。

§ 1-4 零件的加工误差与公差

一、加工误差

为了使零件具有互换性,应该对其几何参数提出适当的要求。如果零件的各几何参数可以制造得绝对准确,当然能够满足任何规定的要求。但在实际制造过程中,由于种种原因,任何一种加工方法不论多么精密,都不可能将零件制造得绝对准确,加工误差是不可避免的。从机器的使用情况来看,也没有必要将零件制造得绝对准确,只要误差的大小不影响机器使用性能,就可以允许存在一定的误差。但误差数值过大,则零件不能互换。因此,要制订公差来限制误差,以保证互换性。

加工误差的表现形式,通常有下列几种:

(1) 尺寸误差 是指零件表面本身的尺寸所具有的误差(如圆柱面的直径误差)和零件表面间的尺寸所具有的误差(如孔间距等)。

(2) 形状误差 是指零件实际表面与理想表面之间,在形状上偏离的程度,如圆柱面的圆柱度误差、圆度误差(参看图1-1),平面的平面度误差等。

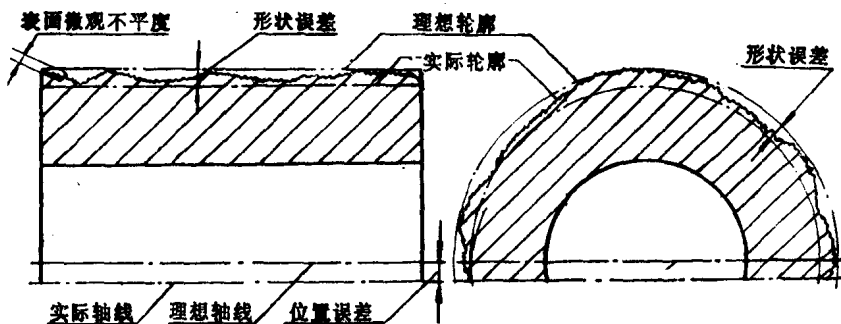


图1-1 圆柱表面几何参数误差

(3) 位置误差 是指表面、轴线或对称平面之间的实际位置与理想位置偏离的程度,如两圆柱面间的同轴度误差(参看图1-1),二平面间的平行度误差和垂直度误差等。

(4) 表面粗糙度 是指加工后工件表面上所留下的、具有较小间距和微小峰谷的微观不平度。

上述几种误差同时存在,其中尺寸误差是最基本的。

零件的精度是指零件几何参数实际值与理想值的符合程度。实际几何参数数值与理想几何参数数值差别越小,即误差越小,精度越高。故零件精度的高低是用误差的大小来表示的。由此可见,“精度”和“误差”这两个概念是从两种观点来评定零件几何参

数这个同一事物。零件的精度按其作用可分为设计精度和加工精度。

设计精度是由设计者根据产品的性能和工艺方法对零件各几何参数提出的精度要求，在零件图纸上是用公差值表示的。加工精度是指加工完的零件各几何参数，在尺寸、位置和形状等方面达到的精度。显然，精度都是具有一定范围的。为保证零件质量，加工精度必须满足设计精度的要求。

设计师必须对零件进行精度设计，主要是以对机器或仪器的误差分析为基础，对机构中某些重要的零部件进行分析，分析可能出现的各种误差因素及其对精度的影响，以便采取减小和控制误差的措施。为了合理地规定零件几何参数的精度要求，还需要对零件的各尺寸和组合件的各有关尺寸进行尺寸链分析，从而在保证技术精度的前提下，达到经济加工的目的。总之，精度设计的主要任务是：根据给定的机器或仪器的精度条件设计机构、确定公差，同时考虑工艺和测量各因素。

为了实现零件的互换，对零件进行精度设计时，不仅只考虑尺寸精度，还要规定位置精度、形状精度以及表面粗糙度等。而且彼此之间还应协调一致。在规定公差值时，总的原则应是

$$T_{尺寸} > T_{位置} > T_{形状} > R_s(R_z)$$

式中 $T_{尺寸}$ ——尺寸公差；

$T_{位置}$ ——位置公差；

$T_{形状}$ ——形状公差；

$R_s(R_z)$ ——表征表面粗糙度的参数（详见后）。

工艺师为保证零件的尺寸、形状、位置精度和相互位置要求，必须分析研究加工过程中影响精度的误差因素，采取相应措施，以保证设计精度的要求。在机械加工中，产生加工误差的主要因素要从机床—刀具—工件这一工艺系统来进行分析。

(1) 工艺系统的几何误差 包括机床、夹具、刀具的制造误差和磨损，尺寸链误差，机床传动链的静态和动态调整误差以及工件、夹具和刀具的安装误差等；

(2) 工艺系统的力效应产生的误差 包括工艺系统弹性及塑性变形产生的误差，工件的夹紧误差，离心力和传动力所引起的误差以及工件残余应力引起的误差等；

(3) 工艺系统热变形产生的误差 包括机床、刀具以及工件热变形产生的误差。

除了上述的三个方面的误差因素外，还有加工方法的原理误差及测量误差等，也是影响零件加工精度的重要因素。

在加工过程中，上述各种误差因素并不是在任何情况下都会出现，而且在不同情况下它们的影响程度也不同，在分析生产中存在的具体问题时，必须分清主次，抓住主要矛盾采取措施，把各种误差控制在允许范围（即公差）之内。

二、加工误差的分类

区别加工误差的性质，是研究和解决加工精度问题的极为重要的一环。各种加工误差，按它们在一批零件中出现的规律，可以分系统误差和随机误差两大类。

(1) 系统误差 当连续加工一批零件时，系统误差的大小和方向，或保持不变，或按一定规律而变化。例如铰刀直径尺寸偏大0.005mm，则所有铰出的孔的尺寸也将偏大0.005mm。又如车轴类零件时，由于车刀磨损，车削出来的轴的直径会有规律地逐渐

增大。

(2) 随机误差 在加工一批零件中, 随机误差的大小和方向是不规律地变化的。毛坯误差(余量大小不一, 硬度不均等)的复映, 定位误差(基准面尺寸不一, 间隙影响等)、夹紧误差(夹紧力大小不一)、多次调整的误差和内应力引起的变形误差等等, 都会引起随机误差。

随机误差的根源主要是由于加工系统中各种随机因素引起的, 而其中的任何一种因素都不起决定性作用, 因此, 误差表现出随机性。与系统误差相比, 随机误差的数值较小, 但由于它没有明显的变化规律, 从理论上讲不能完全消除, 只能对其产生的根源采取适当的措施, 以减小其影响, 控制在一定范围之内。

必须指出: 随机误差与系统误差既有区别又有联系, 在一定条件下可以互相转化。例如冷却液的温度变化无常时, 磨削尺寸也将变化无常, 这种误差属随机误差, 如果采取措施使冷却液的温度保持一定, 则温度差所造成的尺寸误差就表现为系统误差了。

在工艺稳定的条件下, 加工一批零件时, 零件各几何参数在尺寸、形状、位置等方面的加工误差, 一般都包括系统误差和随机误差, 但从系统误差的特征来看, 一般它是可以设法避免的。显然, 要使系统误差完全消失, 也是不可能做到的, 残存的微小系统误差, 通常可按随机误差处理。

三、随机误差的特性及其评定

如前所述, 加工中的系统误差在理论上可以消除, 故本书分析的重点是随机误差的特征及其评定。

随机误差从表面上看似乎没有什么规律, 无从分析起, 但是应用数理统计的方法可以找出一批工件加工误差的总体规律, 然后在工艺上采取措施来加以控制。如用无心磨床加工一批轴, 共100件。由于存在着加工误差, 它们的尺寸是不相同的, 这种现象称为尺寸分散。把测量的数据按尺寸大小分组, 每组的尺寸间隔 Δx 为0.001mm, 如表1-2所列。

表1-2 工件加工尺寸统计表

序号	尺寸间隔 (mm)	分组算术平均值 (mm)	工件数	频率 (%)
1	24.976~24.977	24.9765	1	1
2	24.977~24.978	24.9775	4	4
3	24.978~24.979	24.9785	9	9
4	24.979~24.980	24.9795	15	15
5	24.980~24.981	24.9805	19	19
6	24.981~24.982	24.9815	22	22
7	24.982~24.983	24.9825	14	14
8	24.983~24.984	24.9835	10	10
9	24.984~24.985	24.9845	4	4
10	24.985~24.986	24.9855	2	2
		总算术平均值24.981	100	100

同一尺寸间隔的零件数量叫做频数, 频数与该批零件数之比叫频率 ω 。以 $\omega / \Delta x$ 为纵坐标, 零件尺寸 x 为横坐标, 可在坐标纸上绘等宽直方图, 在直方图中, 每一直方的

面积表示该尺寸间隔的频率。再连直方图中每一直方宽度的中点纵坐标得一不连续折线，见图1-2中实线 a 。

随着零件数量增加，尺寸间隔取得很小（即组数分得很多）时，图1-2所示折线就逐渐接近于一条光滑曲线，我们把这条曲线叫做分布曲线。

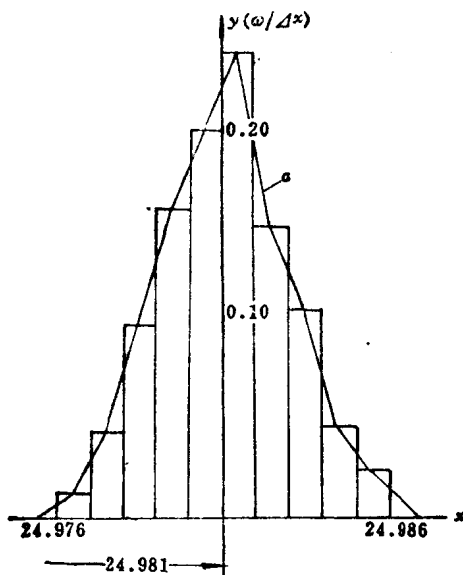


图1-2 尺寸分布折线图

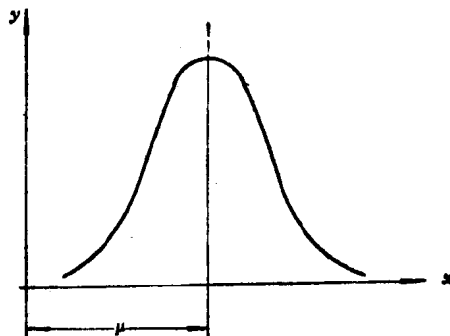


图1-3 正态分布曲线

数理统计学提出了一系列理论分布曲线，度量一批零件的加工尺寸所画出的分布曲线叫做实际分布曲线。利用理论分布曲线可以近似地表达相应的实际分布曲线的理想状态。根据理论分布曲线的方程式，就能较方便地研究零件的加工精度问题。

实践证明，在一般情况下，在调整好的自动机床上加工或用定值刀具加工一批零件，所得的尺寸分布曲线多数符合正态分布曲线，见图1-3。

正态分布曲线的方程式为

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-1)$$

式中 x ——零件实际尺寸；

y ——与实际尺寸 x 相对应的概率密度；

μ ——正态分布的理论均值，主要表征随机误差的分布中心；

e ——自然对数的底；

σ ——标准差，它表征零件实际尺寸离散的程度。

由方程式中可看出，正态分布曲线对称于直线 $x = \mu$ ，并在 $x = \mu \pm \sigma$ 处有拐点，当 $x \rightarrow \pm \infty$ 时，曲线以 x 轴为渐近线。

如果不改变 σ 值，仅改变 μ 值，则曲线沿 x 轴平行移动，而不改变其形式，见图1-4(a)。这表明正态分布曲线位置是由 μ 值决定的。

如果使 μ 值固定不变（例如取 $\mu = 0$ ），仅改变 σ 值（如取 $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ ）时，发现 σ 值愈小，曲线愈陡。这是因为 σ 值愈小，函数的最大值愈大，但因为分布曲线下面的面

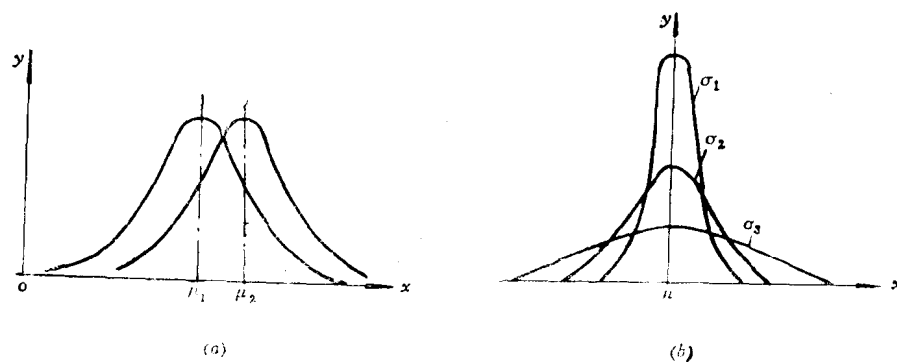


图 1-4

(a) μ 对分布曲线的影响; (b) σ 对分布曲线的影响。

积总保持等于1, 所以曲线在中心部分升高, 而在两侧则很快地接近 x 轴。即零件实际尺寸分布得比较集中; 反之, 当 σ 值增大时, 曲线将渐趋平坦, 即零件的实际尺寸分布得比较分散。如图 1-4 (b) 所示。所以正态分布曲线的形状特征是由标准差 σ 来决定的。

由上面分析可知, 正态分布曲线完全由理论均值 μ 和标准差 σ 而定, 所以 μ 和 σ 实际上是反映生产过程的两个基本参数。

现介绍用正态分布曲线研究加工误差。

正态分布曲线下的全部面积代表了全部零件出现的概率, 显然等于 1, 即

$$P(-\infty < x < +\infty) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx = 1$$

也可求出零件尺寸在 $x_1 \sim x_2$ 区间出现的概率, 见图 1-5 中曲线下阴影部分的面积, 即

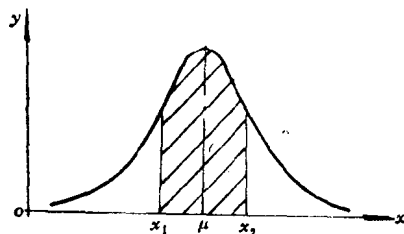


图1-5 概率计算

$$P(x_1 < x < x_2) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (1-2)$$

为了计算方便常进行变量置换, 令 $t = \frac{x-\mu}{\sigma}$, 可得

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}$$

如果式 (1-2) 中的概率区间 x_1 与 x_2 对称于分布曲线中心 μ 时, 如令 $\frac{x_2 - \mu}{\sigma} = t_i$,

则 $\frac{x_1 - \mu}{\sigma} = -t_i$, 故式 (1-2) 中的概率计算可写成

$$P(x_1 < x < x_2) = P(-t_i < t < t_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-t_i}^{t_i} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

或
$$2P(0 < t < t_i) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{t_i} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 2\Phi(t_i) \quad (2-3)$$

$\Phi(t_i)$ 值可由正态分布概率积分表中查出, 列于表1-3。由表中可以看出, 当 $t_i = 3$ 时, $\Phi(t_i) = 0.49865$, 则 $2\Phi(t_i) = 0.9973$, 即全部尺寸99.73%在 $\mu \pm 3\sigma$ 以内。因此可取 6σ 代表整批零件加工尺寸的分散范围。

表1-3 $\Phi(t_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{t_i} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 值

t_i	$\Phi(t_i)$	t_i	$\Phi(t_i)$	t_i	$\Phi(t_i)$	t_i	$\Phi(t_i)$	t_i	$\Phi(t_i)$
0.00	0.0000	0.25	0.0987	0.50	0.1915	1.00	0.3413	2.50	0.4938
0.01	0.0040	0.26	0.1026	0.52	0.1985	1.05	0.3531	2.60	0.4953
0.02	0.0080	0.27	0.1064	0.54	0.2054	1.10	0.3643	2.70	0.4965
0.03	0.0120	0.28	0.1103	0.56	0.2123	1.15	0.3749	2.80	0.4974
0.04	0.0160	0.29	0.1141	0.58	0.2190	1.20	0.3849	2.90	0.4981
0.05	0.0199	0.30	0.1179	0.60	0.2257	1.25	0.3944	3.00	0.49865
0.06	0.0239	0.31	0.1217	0.62	0.2324	1.30	0.4032	3.20	0.49931
0.07	0.0279	0.32	0.1255	0.64	0.2389	1.35	0.4115	3.40	0.49966
0.08	0.0319	0.33	0.1293	0.66	0.2454	1.40	0.4192	3.60	0.49984
0.09	0.0359	0.34	0.1331	0.68	0.2517	1.45	0.4265	3.80	0.499928
0.10	0.0398	0.35	0.1368	0.70	0.2580	1.50	0.4332	4.00	0.499968
0.11	0.0438	0.36	0.1406	0.72	0.2642	1.55	0.4394	4.50	0.499997
0.12	0.0478	0.37	0.1443	0.74	0.2703	1.60	0.4452	5.00	0.4999997
0.13	0.0517	0.38	0.1480	0.76	0.2764	1.65	0.4505		
0.14	0.0557	0.39	0.1517	0.78	0.2823	1.70	0.4554		
0.15	0.0596	0.40	0.1554	0.80	0.2881	1.75	0.4599		
0.16	0.0636	0.41	0.1591	0.82	0.2939	1.80	0.4641		
0.17	0.0675	0.42	0.1628	0.84	0.2995	1.85	0.4678		
0.18	0.0714	0.43	0.1664	0.86	0.3051	1.90	0.4713		
0.19	0.0753	0.44	0.1700	0.88	0.3106	1.95	0.4744		
0.20	0.0793	0.45	0.1736	0.90	0.3159	2.00	0.4772		
0.21	0.0832	0.46	0.1772	0.92	0.3212	2.10	0.4821		
0.22	0.0871	0.47	0.1808	0.94	0.3264	2.20	0.4861		
0.23	0.0910	0.48	0.1844	0.96	0.3315	2.30	0.4893		
0.24	0.0948	0.49	0.1879	0.98	0.3365	2.40	0.4918		

四、加工误差与公差的关系

在加工过程中, 必然产生加工误差, 系统误差与随机误差也往往同时出现。为避免零件实际尺寸超过公差范围, 消除废品, 必须了解加工误差与公差之间的关系。

设计者主要从功能、使用要求及制造的可能性来规定零件的公差 T , 而 6σ 大小代表了某一种加工方法规定条件下所能达到的加工状况。若排除了系统误差, 即零件实际尺寸的分布中心与公差范围的中心重合时, 不产生废品的条件应是: $T \geq 6\sigma$ 。反之, 便有