

现代
高等学校
工程技术训练
系列教材

质量检测与控制

来新民 主编



高等教育出版社

高等学校现代工程技术训练系列教材

质量检测与控制

来新民 主编
傅水根 系列教材策划

高等教育出版社

内容简介

本书介绍机械制造中制造质量的概念、典型检测设备、质量的基本控制方法,并给出应用实例。内容包括绪论、机械加工质量检测仪器与设备、质量控制的基本统计分析方法、工序质量评价、工序控制、产品及工艺设计中的质量控制、制造质量的连续改进、制造质量连续改进实例等8章。

本书内容涉及面广,图文并茂,特别体现方法和内容的可训练性。

本书为高等学校现代工程技术训练系列教材之一,也可作为企业工程师和其他技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

质量检测与控制/来新民主编. —北京:高等教育出版社, 2002.8

机械专业本科教材

ISBN 7-04-010752-X

I.质... II.来... III.①机械—加工精度—质量检验—高等学校—教材②机械—加工精度—质量控制—高等学校—教材 IV.TH161

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第040064号

质量检测与控制

来新民 主编

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市东城区沙滩后街55号
邮政编码 100009
传 真 010-64014048

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 北京市鑫霸印务有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 7.5
字 数 170 000

版 次 2002年8月第1版
印 次 2002年8月第1次印刷
定 价 9.40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

前 言

随着全球范围内物质的丰富,市场格局已经实现了从卖方市场到买方市场的转变。在这种情况下,全生命周期的产品质量成为决定产品竞争力的关键因素,特别是产品的制造质量,往往成为区分产品质量优劣的最后指标。20世纪90年代初,美国汽车就是由于制造质量低于日本,丧失了相当部分的国内市场份额,也正是由于制造质量的提高,才逐步夺回了失去的国内市场。

近年来,国内企业界也对质量问题高度重视,特别是面对加入WTO后竞争的压力,企业内部和社会范围的各种质量控制技术培训层出不穷,各个级别的质量体系认证活动竞相展开,许多企业还建立了“质量一票否决权”制度。为适应国内制造业的发展,国内众多院校都相应地加强了质量控制技术的研究,教育部借助世界银行贷款率先在全国范围内组建了11个工程训练中心,有关质量控制技术的训练是其中的重要内容。本书就是在此背景下编写的。

本书以质量检测、质量评价、过程控制和质量的连续改进为主线展开。第1章介绍质量管理的发展历程和质量保证体系;第2章介绍形位公差、表面粗糙度检测设备以及三坐标测量机;第3章和第4章分别介绍常用的统计方法和工序能力指数、质量损失系数等质量评价方法;第5章讲述典型的过程控制图及工序诊断调节控制法;第6章主要介绍正交试验设计与三次设计的概念;第7章与第8章介绍制造质量连续改进方法以及连续改进实例。本书力求深入浅出,强调实用性和可训练性。

本书由上海交通大学来新民主编。参加编写的有:来新民(第1章、第8章8.2节),北京科技大学贾志新(第2章、第7章、第8章8.1节),东南大学贾民平(第3章、第4章),上海交通大学赵亦希(第5章、第6章)。全书由上海交通大学陈关龙教授主审,河海大学林萍华教授和哈尔滨工业大学李旦教授也参加了审阅,对书稿提出了许多宝贵意见。

本书是现代工程技术训练系列教材之一,全套教材共6册,分别为:《特种加工技术》、《数控加工技术》、《快速原型制造技术》、《先进制造系统与管理》、《质量检测与控制》和《材料的先进成形技术》。全套系列教材由高等教育出版社与清华大学傅水根教授共同策划,傅水根教授对每本书的编写思路和内容均进行了仔细审阅,从整体上控制全套书的风格。

编写过程中参阅了大量国内外教材、资料和文献,并得到许多同行专家、教授的支持与帮助,在此表示衷心感谢。

由于编写时间紧迫和水平所限,书中定有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编者

2002年2月

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》。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。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。

现公布举报电话及通讯地址:

电 话:(010) 84043279 13801081108

传 真:(010) 64033424

E-mail:dd@hep.com.cn

地 址:北京市东城区沙滩后街 55 号

邮 编:100009

责任编辑	杨宪玲
封面设计	刘晓翔
责任绘图	吴文信
版式设计	马静如
责任校对	王 超
责任印制	张小强

目 录

第 1 章 绪论	1	4.4 计算实例	49
1.1 质量和质量改进的意义	1	第 5 章 工序控制	53
1.2 质量控制的发展历程	2	5.1 工序质量控制点	53
1.3 质量控制的基本内容	3	5.2 工序质量控制图法	54
1.4 ISO 质量保证体系与质量连续改进	6	5.3 工序诊断调节法	63
第 2 章 机械加工质量检测仪器与设备	8	5.4 其它统计方法简介	66
2.1 形位误差及其检测	8	第 6 章 产品及工艺设计中的质量控制 ...	70
2.2 表面粗糙度及检测设备	21	6.1 正交试验法	70
2.3 三坐标测量机	23	6.2 三次设计	77
第 3 章 质量控制的基本统计分析方法 ...	28	第 7 章 制造质量的连续改进	80
3.1 随机过程和抽样的概念	28	7.1 质量改进	80
3.2 直方图	29	7.2 戴明循环	82
3.3 测量数据的统计分布特征	31	7.3 质量改进对象的确定	85
3.4 抽样检查方法与抽样分布	35	7.4 质量改进措施的制定	87
3.5 统计分析实例	38	第 8 章 制造质量连续改进实例	90
第 4 章 工序质量评价	41	8.1 零部件制造质量改进实例	90
4.1 直接分析法	41	8.2 复杂车身制造质量改进实例	95
4.2 质量分布图法	43	附录 累积函数标准正态分布表	107
4.3 工序能力指数法	45	参考文献	110

第 1 章 绪 论

1.1 质量和质量改进的意义

从广义上讲,任何一种产品都有满足人们某种需要的内在属性,由于满足程度的不同,就产生了质量问题。ISO 8402—1986 定义质量是产品或服务所具备的满足明示的或隐含的需要的特征和特性的总和。美国 Montgomery 教授将这些质量特征概括为 8 个方面:

- 1) 性能: 产品将实现什么特定功能?
- 2) 可靠性: 产品是否容易失效?
- 3) 耐久性: 产品寿命有多长?
- 4) 可维修性: 产品是否容易维修?
- 5) 美观性: 产品是否宜人?
- 6) 特殊属性: 除去基本性能外, 产品还具有哪些属性?
- 7) 直观质量: 产品的声誉如何?
- 8) 标准性: 产品是否严格按设计者的意图制造?

可见,质量确实具有多视角特征。因此,很难简单地回答“什么是质量?”或“什么是质量改进?”通常,质量包括两个方面:一是产品的设计质量,它与设计规范相关联;二是产品的制造质量,是产品与设计规范的符合程度。这两方面都取决于产品特征的变化。现代质量控制理论认为:质量与产品特征的变化成反比,这意味着如果产品的重要质量特征的变化减弱,则质量提高。

例如,几年前美国某汽车公司对美国本土产某变速箱与日本进口变速箱进行了对比研究。从图 1.1 可以看出,日本变速箱的保修费用远低于美国产品的保修费用。为作进一步分析,对两种产品随机抽样并检测其关键质量特征,图 1.2 示出两种变速箱关键尺寸的分布情况。从图中可以看出,美国国产变速箱关键尺寸分布占据整个公差带的 75%,从产品检验合格率看,工厂的生产状态良好。而日本企业生产的变速箱的关键尺寸分布只占整个公差带的 25%,其关键质量特征的变化明显低于美国制造的变速箱。因此,日本生产的变速箱与美国相比换档更平滑,运行噪声更小,减少了使用过程中的维修,从而降低了产品的保修费用。这也说明质量就意味着效益。

那么,日本企业是如何提高产品质量的呢?是通过系统而有效的质量控制,实现质量的持续改进。

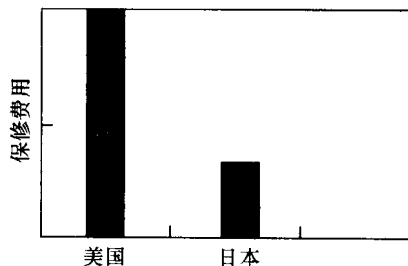


图 1.1 某汽车变速箱的保修费用对比

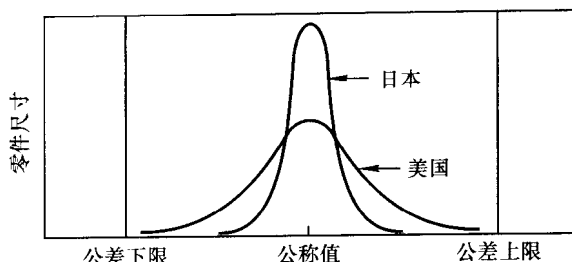


图 1.2 某变速器关键尺寸分布对比

1.2 质量控制的发展历程

商品的竞争过程也是质量管理不断发展和完善的过程。质量控制的发展过程大致可以分为三个阶段：产品质量检查、统计质量控制和全面质量控制。

1. 产品质量检查阶段

最初人们根据积累的生产经验和使用经验，制定出相应的质量标准，生产工人本身既是加工者又是检查者。该阶段可称为“操作者的质量管理”，质量管理还没有形成科学理论。19 世纪末 20 世纪初，美国工程师泰勒（F. W. Taylor）和法国工程师亨利提出了“科学管理运动”，主张管理人员和操作人员进行分工，使检查产品质量的职责由工人转移到了工长手中，形成了所谓的“工长的质量管理”。

20 世纪 30 年代，由于生产规模扩大和产品精度的提高，以及广泛使用公差和互换性概念，“工长的质量管理”已无力承担质量检查与质量管理的职责，逐步被“泰勒制度”取代，即：计划与执行分离，产品检查与制造分离。检验成为独立工序，形成了计划设计、执行操作、质量检查三个方面各司其责的职能管理体系，称为“检验员的质量管理”或“事后检查”。

“事后检查”的优点在于：设计、制造、检验分属三个部门，有人专职制定标准（计划），有人负责制造（执行），有人专职按照标准检验产品质量（检验）。各部门职责明确，体现了产品质量标准的严肃性。但“事后检查”只起到“把关”的作用，而无法在生产过程中“预防”和“控制”不合格品的产生。况且，此时的检验是全数检验，对于批量大的产品，或对于破坏性检验，这种检验是不经济和不实用的。这就为把数据统计的原理和方法引入质量管理领域在客观上创造了条件。

2. 统计质量控制阶段

20 世纪 40~50 年代可以称为统计质量控制阶段。二战期间，大量民品厂家转产军品，产品质量参差不齐，对战争的进展有一定影响。由于军需用品的检验常常需做破坏性试验，且产品数量巨大，“事后检验”不可能。为有效地控制产品质量，美国政府和国防部组织了一批包括休哈特博士在内的数理专家来解决这一问题，制订出“战时质量控制制度”，包括《质量控制指南》、《数据的控制图法》和《生产中质量管理用的控制图法》等。这就是统计质量控制的早期标准。美国国防部强行推广这些标准，从而很快改善了美国军需用品的质量。20 世纪 50 年代这种质量控制方法被引入欧洲、日本及其它许多国家与地区。

相对“事后检验”来说，统计质量控制的主要优点是：利用数理统计原理，通过抽样方法

对大批量的产品进行检验，预防不合格品的产生并检验产品的质量。这时，质量管理工作由专职检验人员转移给专业的质量控制工程师和技术人员承担，质量管理也由事后检验改变为预测、预防事故的发生。

3. 全面质量控制阶段

单纯的统计质量控制方法在 20 世纪 60 年代以后表现出明显的局限性，主要体现在：

- 1) 由于科学技术的发展，产品的精度和复杂程度大为提高，对产品质量的要求也从仅注重性能指标转向安全性、经济性等指标，这时仅靠统计质量方法来控制显然是不够的；
- 2) 市场竞争的不断加剧，迫使企业去寻找更好的方式来控制产品质量；
- 3) “全民管理运动”的兴起，使全体人员参加质量管理成为可能。

在此背景下，美国通用电气公司的费根堡姆（A. V. Feigenbaum）首先提出了“总体质量控制”的思想，朱兰（J. M. Juran）提出了“全面质量控制”（Total Quality Control, TQC）的概念，强调质量职能是公司全体人员的责任，重视人的因素，在生产技术和企业管理活动中广泛应用系统分析的概念和方法，以统计学为手段，结合运筹学、价值分析、系统工程和线性规划等多种方法，来控制生产过程。

1.3 质量控制的基本内容

1. 全面质量控制的基本方法

全面质量控制的基本方法可概括为：“一个过程”、“四个阶段”、“八个步骤”、“七种工具”、“两种方法”和“三次设计”。

一个过程指全面质量控制是一个动态的控制过程，包括制订计划、通讯联络和刺激诱导三个环节。

四个阶段（PDCA）是指计划阶段（Plan）、执行阶段（Do）、检查阶段（Check）和总结阶段（Action），即质量管理的 PDCA 循环，也称戴明循环。它好比一个按顺时针方向转动的车轮，不断旋转，循环不止。

在实施 PDCA 循环时，可以分为八步走：①分析现状，找出存在的质量问题。②进行研究，调查质量问题的原因。③寻找影响质量问题的主要因素。④制订解决问题的计划与措施。⑤按照计划的内容，由执行者严格地加以实施。⑥根据计划的要求，对实施的效果进行检查。⑦巩固成果，将成功和失败的经验标准化。⑧将遗留的质量问题放到下一个 PDCA 循环中去。

全面质量控制中的七种工具包括：直方图、调查表、排列图、因果图、散布图、缺陷集中图和工序控制图。

两种方法是指“正交试验法”与“抽样检验法”。正交试验法是一种在分析多因素试验时，利用较少的试验次数而得到优选结果的方法。而抽样检验法则是指从产品总体中随机抽取一定数量的样本进行试验，来推断总体的情况。

三次设计是将产品设计过程分为三个阶段：系统设计阶段、参数设计阶段和容差设计阶段。三次设计充分利用产品系统中存在的非线性效应，以取得高质量、低成本的综合效果，在国际上得到广泛应用。

本书将介绍上述七种工具、两种方法和三次设计，重点讨论机械产品检测与抽样、工序控

制和正交试验。

2. 统计质量控制的基本方法

(1) 工序控制的概念

产品质量是通过概念设计、产品开发、制造、检验、销售、服务及使用等过程形成的。其中，制造过程所经历的时间与流程最长，所占用的物化劳动比重最大，对保证与提高产品质量起着重要作用。制造过程中的工序是指生产和检验阶段，是由人员 (Man)、机器设备 (Machine)、材料 (Material)、方法 (Method)、环境条件 (Environment)、测量手段 (Measurement) 等六大质量因素 (简称 5M1E) 所构成的过程。只有工序质量满足制造要求，才能实现产品开发设计所确定的质量目标。

所谓工序控制是对 5M1E 进行调查分析，揭开它们的交互影响，发现规律，减少或消除对质量的不利影响，维持与强化对质量的有利作用。

(2) 工序控制图

控制图是统计过程控制 (Statistical Process Control, SPC) 的主要技术之一，如图 1.3 所示，横坐标是时间或样本号，纵坐标是样本均值，CL 表示控制图的中线，UCL 和 LCL 分别表示上控制线和下控制线。如果没有特殊变化原因，工艺特征应该围绕中线 (CL) 波动。控制线的确定方法将在第 5 章进行讨论。

控制图是一种非常有用的过程监控工具，当存在特定变化原因时，样本均值将超出控制线之外，发出需要进行工艺调查和工序校正以消除系统误差的信号。系统而有效地应用控制图是减少变差的有效方法。

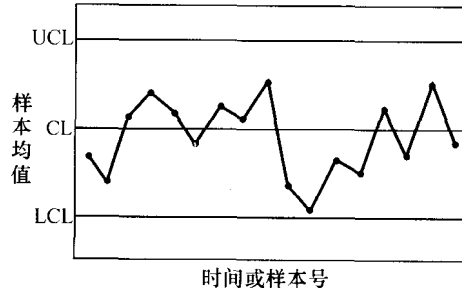


图 1.3 典型控制图

3. 试验设计

试验设计对于找出影响工序质量特征的关键变量是非常有用的，它是一种调节工序可控输入因素和确定这些因素对产品输出参数影响的系统方法^[1]。

因素设计是一种主要的试验设计类型，它根据因素的可能组合构造试验。图 1.4 表示因素数分别为 2 和 3 的因素试验设计。图 1.4a 中，每个因素有高和低两个水平，正方形的四个角表示了四种可能的试验组合。图 1.4b 中共有三个因素，每个因素同样各有高低两个水平，立方体的八个角表示出八个可能的试验组合，立方体每个顶点处的分布表示三个因素 x_1 、 x_2 、 x_3 不同组合条件下的工艺特征。显然，某些因素组合产生的结果比其他因素组合好。例如，因素 x_1 从低到高增加时，分布的均值变化；如果将因素 x_1 、 x_3 固定在高水平，当 x_2 从低到高增加时，工序变差明显减小。

因素设计通常用于开发或生产制造的早期阶段，是一种主要的离线质量控制工具，在减少产品变差方面具有重要作用。从图 1.4 可以看出，当因素和水平较多时，如果采用枚举法构造试验，试验个数将呈几何级数增长。为了降低试验成本，必须采用更为科学的方法构造试验。本书将在第 6 章讨论解决这个问题的正交试验设计法。

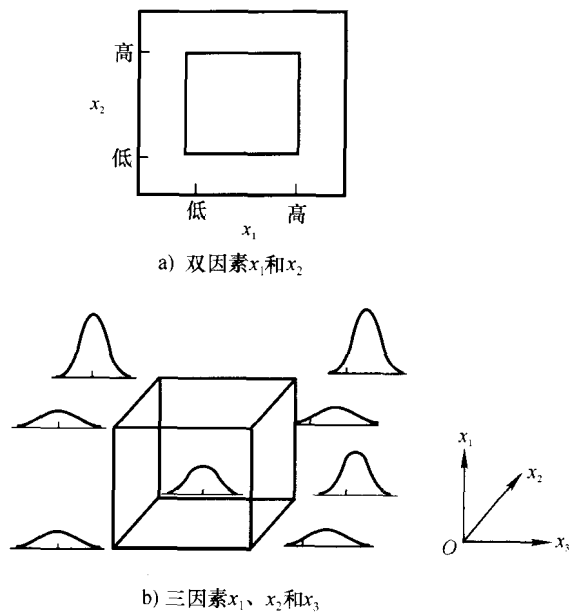


图 1.4 工艺过程因素设计^[1]

4. 抽样检验

抽样检验与产品的检测和试验紧密联系，是质量控制的早期形式。抽样检验一般可以在多个工序控制点进行检测，但通常设置在来料和产品成品两个阶段。图 1.5 列出几种不同的检测方案^[1]。图 1.5a 表示产品生产后和向消费者发送之前进行检验，亦称出厂检验；图 1.5b 表示来料检验，即从供应商供应的成批产品中抽样进行检验；图 1.5c 表示的是校正检验，来自供应商的产品经抽样检验后被接受，或者被拒绝，也可能返修或用合格产品置换。

现代质量控制系统通常不强调抽样检验，而侧重于统计过程的控制和试验设计。抽样检验侧重于满足公差要求的质量观点，而没有对工艺过程和工程设计提供任何反馈。

质量控制的主要目标在于产品关键特征变差的系统减小。图 1.6 示出抽样检验、统计过程控制和试验设计与质量特征分布的关系。在质量控制的早期阶段，抽样检验作为主要的控制技术，由于侧重于产品的合格与否，较难控制质量特征的统计分布，难以避免较多的质量缺陷。统计过程控制的引入能稳定工艺过程并减少质量变差，但还不能很好地满足日益增长的质量要求。试验设计与统计过程控制相结合可以使产品质量变差达到最小化，而质量的进一步提高将有效地改善产品性能和增强市场竞争力。

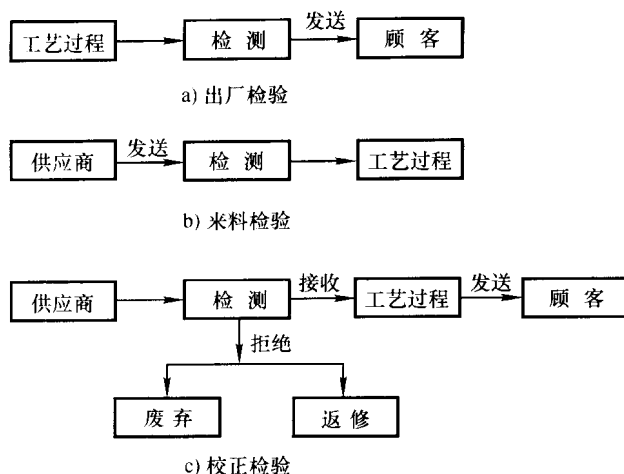


图 1.5 抽样检验的不同方式^[1]

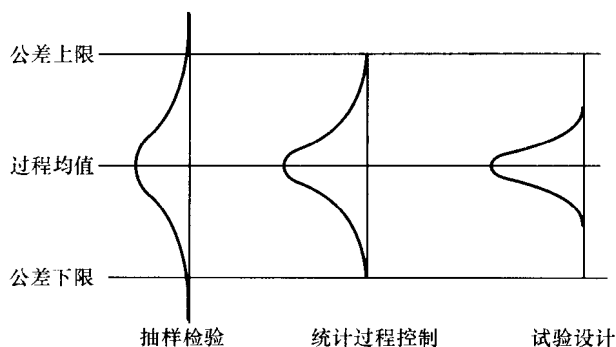


图 1.6 抽样检验、统计过程控制和试验设计与质量特征分布的关系^[1]

1.4 ISO 质量保证体系与质量连续改进

1.ISO 质量保证体系

国际标准化组织 (International Organization for Standardization, ISO) 在其颁布的 ISO 9000 系列标准中制订了若干质量保证模式, 以推动全面质量控制。这些模式涉及到企业质量方针、组织领导、市场调研、产品和工艺开发、生产、培训、采购、销售和售后服务等质量管理的各个领域, 主要包括以下 13 项内容:

- 1) 质量管理职责;
- 2) 设计控制;
- 3) 文档与数据控制;
- 4) 采购与合同管理;
- 5) 产品的可追溯性;
- 6) 检测与测试, 包括测量与检测设备的控制;

- 7) 过程控制;
- 8) 不合格品的处理, 校正与预防策略;
- 9) 产品的包装、储存和传送, 包括服务活动;
- 10) 质量记录控制;
- 11) 内部检测;
- 12) 培训;
- 13) 统计方法。

许多组织要求其供应商取得 ISO 9000 系列或派生出来的标准 (如北美汽车工业 QS 9000) 的认证。

2. 质量连续改进

质量是制造企业的永恒话题, 因为只有改进质量形成过程中各环节的工作, 才能使产品和服务质量不断提高, 从而使企业不断地保持竞争的优势。质量改进对提高产品质量或服务量, 降低成本, 改善企业素质和企业管理等各方面都具有十分重要的意义。20 世纪 60 年代美国开展的“零缺陷”运动推动了质量改进的深入发展, 其目的是减少或消灭由操作人员所造成的差错。

国家标准 GB/T 6583—1994 对质量改进的定义是: “为向本组织及其顾客提供更多的收益, 在整个组织内所采取的旨在提高活动和过程的效益和效率的各种措施。”“质量改进永无止境”已经成为企业质量管理的基本信念。

经过连续不断的、螺旋式上升的“戴明循环”, 企业组织连同其质量就会不断进步, 永远立于不败之地。本节所述内容将在第 7 和第 8 两章中进行讨论。

第 2 章 机械加工质量检测仪器与设备

为了保证产品的设计质量，必须对加工后的产品进行检测，以判断实际加工的产品是否满足设计要求。产品尺寸、形状和位置误差的检测，是产品质量检测的重要组成部分。由于不同产品的几何形状、结构特点以及精度要求各不相同，所以其检测方法也多种多样。本章将重点介绍形位公差和表面粗糙度的检测方法及设备。

2.1 形位误差及其检测

2.1.1 形位公差和误差检测原则

1. 形位公差的定义和误差检测项目

形位公差包括形状公差和位置公差两大类。形状公差是单一实际要素的形状所允许的变动全量。位置公差是实际要素的位置相对基准所允许的变动全量。形位公差共十四项，其中形状公差六项，位置公差包括定向位置公差、定位位置公差及跳动公差等八项。检测项目列于表 2.1。

表 2.1 形位公差检测项目

分类	项 目	分类		项 目
形 状 公 差	直 线 度	位 置 公 差	定 向	平 行 度
	平 面 度			垂 直 度
				倾 斜 度
			定 位	同 轴 度
				对 称 度
	位 置 度			
	跳 动			圆 跳 动
			全 跳 动	

2. 形位误差的检测原则

国家标准中规定了形位误差的检测原则，即与理想要素比较原则、测量坐标值原则、测量特征参数原则、测量跳动原则和控制实效边界原则。根据这五个检测原则可制订出各种检测方案，用于指导检测工作、正确选择检测方法。

(1) 与理想要素比较原则

该原则是将被测实际要素与理想要素相比较，从而测出实际要素的形位误差值，误差值可由直接方法或间接方法得出。理想要素多用模拟方法获得，如：用刀口尺刃边或光束模拟理想直线；用精密平板、平台、水平面模拟理想平面；用精密回转轴系和偏心安置的测头模拟理想圆等。

(2) 测量坐标值原则

该原则是利用坐标测量仪器如工具显微镜、坐标测量机等，测量被测实际要素的坐标值。当测得一系列坐标值后，即可用数学方法对测得数据进行处理，以求得形位误差值。该原则是位置度测量的常用方法。

(3) 测量特征参数原则

该原则是用被测实际要素中具有代表性的参数（即特征参数）来表示形位误差。下面将要提到的两点法、三点法测量圆度误差，就是测量特征参数的典型例子。

(4) 测量跳动原则

该原则是在被测实际要素绕基准轴线回转过程中，沿给定方向测量其对某参考点或线的变动量，变动量为指示仪器最大与最小读数之差。实际上，它就是用于测量跳动，包括圆跳动和全跳动。

(5) 控制实效边界原则

该原则用位置量规模拟实效边界尺寸，检验被测实际要素是否超过实效边界，以判断合格与否。被测要素若未超出实效边界就能被位置量规通过，表示被测要素合格；反之，表示被测要素不合格。

2.1.2 形状误差的检测

1. 直线度误差的检测

直线度误差是指被测直线对理想直线的变动量。最常用的检测方法是直接法与间接法。用直接法测量可以直接读得误差数值，而用间接法首先测得数据，经过处理分析后才能获得误差数值。

(1) 直接法

直接法有光隙法和塞隙法两种方法。

1) 光隙法

光隙法是以被测直线和模拟的理想直线之间形成的光隙与标准光隙比较或直接观察光隙的颜色，来推断直线度误差的方法。它适用于磨削或研磨加工的短窄平面及短圆柱面和圆锥面的素线直线度的测量。理想直线常用刀口形直尺、平尺之类的量具来模拟，其直线度误差一般要求为被测直线的直线度公差 $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{3}$ 。测量时，将刀口尺刀刃与被测线接触，再对光观察，从隙缝中透光颜色不同来判断其误差大小。对凸形被测实际直线，应使刀口尺与被测直线两端的间隙大小相等（图 2.1a）；对凹形直线，将刀口尺直接放上即可（图 2.1b）。在人眼观察的另一侧安置光源（图 2.1c），光源应直照待测缝隙，并要求均匀明亮。如缝隙呈现蓝色光带，一般直线度误差小于 $0.8 \mu\text{m}$ ；呈现红色光带时，在 $1.5 \mu\text{m}$ 左右；而呈现白色光带时，大于 $2.5 \mu\text{m}$ 。

2) 塞隙法（又称垫塞法）

测量时，将长度为 L 的标准直尺放在被测直线上，并在直尺两端的 $\frac{2}{9}$ 全长处垫上等厚量块，然后用很窄的塞尺或片状塞规直接测出平尺工作面与被测直线之间的距离，以测得直线上各处的间隙大小，以测得的最大间隙与等厚量块尺寸的绝对差值作为直线度误差值。

(2) 间接法

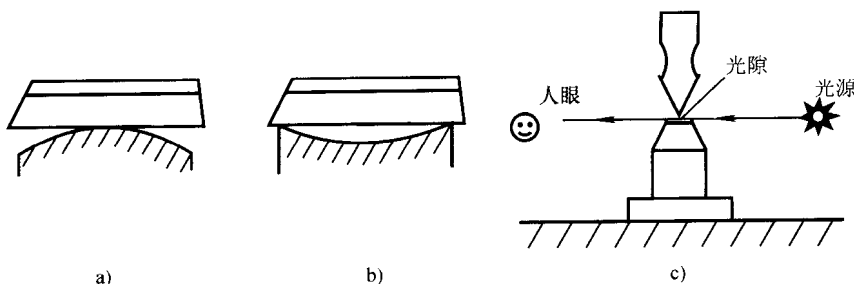


图 2.1 光隙法测量直线度误差原理图

间接法有水平仪测量法、准直仪测量法和莫尔干涉法三种方法。

1) 用水平仪测量

水平仪中主要部件是水准器，它的内表面磨成圆弧形，里面装有一定量的乙醚，封闭后留有气泡。由于地心引力作用，玻璃管内的液面总要保持水平面，即气泡总是在圆弧形玻璃管的最上方。若水准器倾斜一个角度 α ，则气泡就要移至最高点，移过的格数与倾斜角 α 成正比。常用的水平仪有普通水平仪、框式水平仪等多种（如图 2.2 所示），应按被测直线的测量精度要求来选用。

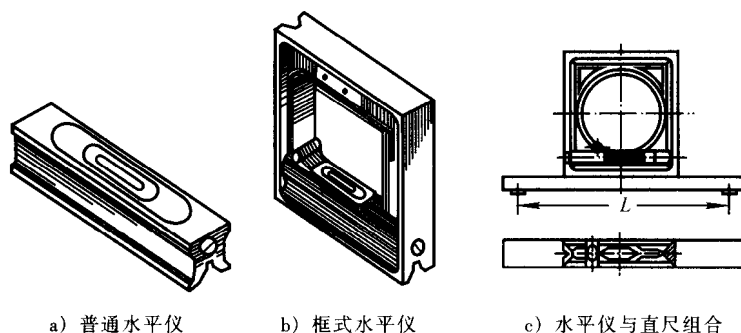


图 2.2 常用水平仪

2) 用准直仪测量（光轴法）

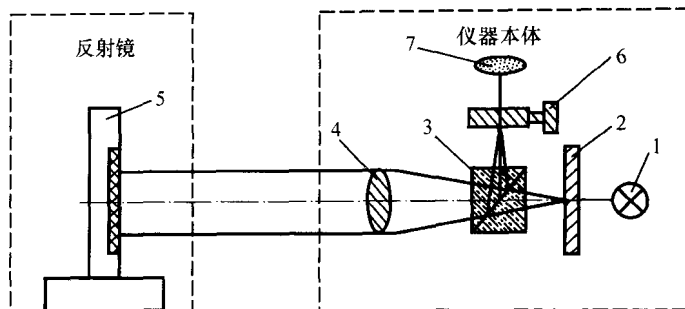
光轴法是用仪器发出光束的光轴模拟理想直线来测量直线度误差，适用于大、中型平面和孔、轴的轴线直线度的测量，常用准直仪作为产生光束的仪器。

准直仪由仪器本体及反射镜两部分组成，仪器本体又由平行光管和望远镜组成。准直仪的光学系统见图 2.3。由光源 1 射出的光线，经过位于物镜 4 的焦平面上的十字刻线板 2，将十字线影像透过立方棱镜 3 和物镜 4 而形成平行光束，投射到反射镜 5 上，若反射镜 5 与入射光轴垂直，则平行光束反射后由原路返回，投射到立方棱镜 3 的半透射半反射膜上，再向上反射到位于物镜 4 的焦平面上的活动刻度板 6 上。活动刻度板 6 位于目镜 7 另一侧的焦平面上，所以，从目镜视场中可清晰地看到十字线影像及活动刻度板上的刻度影像。

准直仪型号很多，原理上基本都大同小异。图 2.4 为 702 型光电自准直仪外观图。

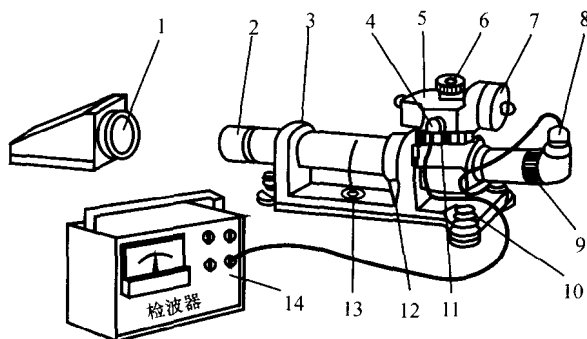
2. 平面度误差的检测

平面度误差是实际平面对其理想平面的变动量。平面度误差测量都是按照与理想要素比较原则进行的。



1—光源；2—十字刻线板；3—立方棱镜；4—物镜；
5—反射镜；6—活动刻度板；7—目镜

图 2.3 准直仪光学系统



1—反射镜；2—物镜；3—顶紧螺钉；4—光敏电阻；5—光电
测微读数头；6—目镜；7—读数鼓；8—灯头；9—光源；
10—基座调节螺钉；11—读数头锁紧鼓；12—锁紧环；
13—水准器；14—光电检波器

图 2.4 702 型光电自准直仪

(1) 色点法

色点法是通过检验平板来检测平面度误差的。在工件被测表面涂上一层很薄的红丹粉油，将其合在检验平板上，平稳地作前后左右往复运动。最后翻转工件，观察工件被测表面上留下的接触斑点，斑点愈多愈细密，均匀性愈好，说明被测表面愈平整。精度的高低是按一定面积上的接触斑点数来表示的。

色点法检测的缺点是不能测得平面度误差的具体数值，但这种检测方法简便，测量精度较高，稍有不平整情况即可发现，因而在生产中得到广泛应用。

(2) 平晶干涉法

平晶干涉法是用平晶模拟理想平面，主要用于小型被测件上精研面的平面度测量。测量时将平晶贴在被测表面上（如图 2.5 所示），由于平晶表面与被测表面有一定的空气隙（因平面度误差而形成），根据光波干涉原理，就会产生光波干涉条纹，由干涉条纹的数目和形状来评定平面度误差。

当被测面为理想几何平面时，干涉条纹互相平行；若被测表面内凹或内凸，就会出现封闭