

仪器制造工艺学

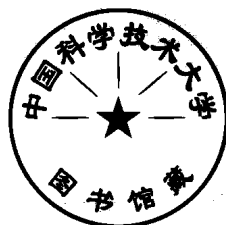
东南大学 郑志达 主编

机械工业出版社

高等学校教材

仪器制造工艺学

主编 郑志达
参编 余华芳 郭廷森
 吴再鸣 王大明
主审 安成祥



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书是专业教学计划必修技术基础课用书。内容上密切了课程之间的衔接,突出了仪器制造对象小、精、异的特点和仪器仪表行业的工艺实践。内容主要有:近代工艺理论、现代技术和工艺实践进步的成果,三维误差分析、夹具定位设计新概念、CAM、CAPP等计算机技术在工艺领域的应用、精密加工的机床精化、环境优化、自适应加工、柔性制造技术和特种加工新方法等。

全书共有加工精度、精密机械加工、劳动生产率和经济性、仪器制造工艺过程设计、夹具设计基础、仪器装配基础、特种精密加工、仪器零件结构工艺性等八章。

本书为综合工艺教材,综合叙述工艺、机床、工具知识。可供高等学校近机械类型的精密仪器、精密机械、电子仪器、光学仪器、导航仪器、机电仪一体化、传感器检测技术及仪器、智能仪器等专业教学用书和机械类型专业教学参考用书。凡具备机械制图、力学、材料、金属工艺学和算法语言的工程技术人员都能自学参考。

仪 器 制 造 工 艺 学

东南大学 郑志达 主编

责任编辑:贡克勤 责任校对:樊中英

封面设计:姚毅 版式设计:霍永明

责任印制:王国光

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $16^{1/2}$ ·字数 399 千字
1994年5月北京第1版·1994年5月北京第1次印刷
印数 0 001—5 700·定价:12.35元

ISBN 7-111-03987-4/TH·489(课)

前 言

本书是根据全国高等院校精密仪器专业指导委员会1992年6月关于编写“八五”普通高等教学规划教材指导意见的精神制订的《仪器制造工艺学》教学大纲编写的。全书共分加工精度、精密机械加工、劳动生产率和经济性、仪器制造工艺过程设计、夹具设计基础、仪器装配基础、特种精密加工、仪器零件结构工艺性等八章。

根据教学大纲精神,本书在专业教学计划中的地位是:该课程是仪器类专业必修的技术基础课。该教材在体系上密切了教学计划中课程间衔接,除保持教材建设的连续性,注意加强基础、讲清概念外,尚具有以下特点:突出仪器制造特点,重点是精密加工,讲述具有小、精、异特点的仪器零件制造和仪器装、调技术,内容选自仪器仪表行业工艺实践,并编入近代工艺学理论、现代技术和实践发展成果:三维误差分析、夹具定位新概念、CAD、CAM、CAPP等计算机技术在工艺领域中的应用、精密加工的工具设备精化、环境优化、柔性制造技术、自适应加工等现代技术和特种加工内容。该书把仪器制造工艺过程设计放在第四章,前三章为讲清工艺规程编制作知识准备。全书名词术语、标准均按国家最新标准执行。内容精炼,叙述简练。

本书系高等学校精密仪器、精密机械、电子仪器、光学仪器、导航仪器、机电仪一体化、传感器、检测技术及仪器、智能仪器仪表等专业的教材,学时60~70。也可供从事上述专业的工程技术人员、教师阅读参考。

全书由东南大学郑志达教授主编,编写第二章、第三章和第五章中夹具定位部分。成都科技大学吴再鸣编写第一章,合肥工业大学余华芳编写第四章、第八章,华侨大学郭廷森编写第五章、第七章,西安工业学院王大明编写第六章。合肥工业大学安成祥教授任主审。

初稿写成后已由东南大学胶印并在有关院校多次使用,反映良好。正式出版之前,又于1992年10月在南京召开审稿会,对初稿逐章逐节讨论、审定。参加审稿会的有哈尔滨工业大学赵维缓、中国科技大学金朝祥、合肥工业大学安成祥、胡鹏浩,厦门大学林亚瑛以及全体编者。审稿会之前在南京召开了“夹具定位设计新概念和仪器制造工艺学教材研讨会”,会上哈尔滨科技大学等30所高校和公司代表对初稿给予充分肯定并提出宝贵意见。陕西机械学院吴鸿洋对第五章和第六章提供了资料。在此谨向他们表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中缺点和错误恳请读者批评指正。

编者

1993. 5

目 录

前 言

第一章 机械加工精度.....1

第一节 基本概念1

- 一、加工精度的基本概念1
- 二、获得规定加工精度的方法1

第二节 影响机械加工精度 的工艺因素2

- 一、方法误差2
- 二、机床误差3
- 三、夹具误差和磨损9
- 四、刀具误差和磨损9
- 五、工艺系统的受力变形10
- 六、工艺系统的受热变形16
- 七、工件安装、调整和测量的误差20
- 八、工件内应力引起的变形21

第三节 加工误差的统计分析21

- 一、加工误差的性质21
- 二、加工误差的统计分析21

第四节 机械加工的表面质量28

- 一、机械加工表面质量的意义28
- 二、影响表面质量的工艺因素29
- 三、切削加工过程的振动31

第二章 精密机械加工38

第一节 精密、超精密车削38

- 一、车床的精化38
- 二、车刀的精制39
- 三、防止工件变形41
- 四、环境条件的改善42

第二节 磨削加工44

- 一、磨削原理46
- 二、外圆磨削46
- 三、平面磨削49
- 四、内圆磨削50

第三节 高精度低粗糙度值磨削50

- 一、微刃磨削原理50
- 二、磨床精化51
- 三、磨削工艺53

第四节 超精加工和研磨54

- 一、超精加工54

- 二、研磨56

第五节 复杂零件的精密加工61

- 一、薄壁部分精密加工61
- 二、精密孔加工62
- 三、孔系加工63
- 四、细轴(丝)加工65
- 五、精密球面加工66
- 六、双V形直导轨加工68

第六节 螺纹精加工70

- 一、螺纹精密车削70
- 二、螺纹磨削73
- 三、精密螺纹磨削75
- 四、螺纹的研磨77

第七节 小模数渐开线齿轮加工78

- 一、概述78
- 二、滚齿加工79
- 三、蜗轮滚切86
- 四、插齿加工87
- 五、齿形精加工89

第三章 劳动生产率和经济性92

第一节 工艺过程的劳动生产率92

- 一、工艺时间92
- 二、工序中断时间93
- 三、流水线、自动线生产94

第二节 工艺过程的经济性94

- 一、成本组成94
- 二、降低成本的途径96

第三节 工艺过程自动化96

- 一、机床数控97
- 二、自适应控制102
- 三、柔性制造系统(FMS)104

第四章 仪器制造工艺过程设计106

第一节 仪器制造工艺过程106

- 一、生产工艺过程106
- 二、工艺过程的组成106
- 三、生产类型108

第二节 仪器制造工艺规程的制订109

一、工艺规程	109	第五节 提高夹具精度的几项措施	182
二、工艺规程的作用	109	一、结构的可调整性和可修配性	182
三、制订工艺规程的原则和 原始资料	110	二、装配后加工	183
四、制订工艺规程的步骤	110	三、良好的检测性	183
第三节 工艺路线的确定	112	四、化整体为分散结构	185
一、定位基准的选择	112	第六节 夹具应用举例	185
二、加工方法和工艺方案的选择	117	一、钻床夹具	185
三、零件各表面加工顺序的安排	119	二、车床夹具	186
第四节 加工余量的确定	121	三、铣床夹具	186
第五节 工艺尺寸链、工序尺寸及 公差的确定	124	第七节 组合夹具与可调整夹具	189
一、工艺尺寸链	124	一、组合夹具	189
二、工序尺寸及其公差的确定	126	二、可调整夹具	191
第六节 计算机辅助工艺过程 编制(CAPP)	130	第六章 仪器装配基础	194
一、概述	130	第一节 概述	194
二、CAPP工作原理	130	第二节 装配尺寸链及其计算	195
第七节 工艺过程举例	133	一、装配尺寸链	195
第五章 夹具设计基础	136	二、装配尺寸链的计算	196
第一节 概述	136	第三节 装配方法	196
第二节 工件的定位	138	一、完全互换装配法	196
一、定位	138	二、大数互换装配法	197
二、与定位有关的系统	145	三、选择装配法	201
三、定位元件	149	四、修配装配法	202
四、定位误差校核	152	五、调整装配法	203
第三节 工件夹紧及夹具的夹紧机构	155	第四节 仪器装配中的联接	203
一、夹紧的作用和要求	155	第五节 仪器装配工艺过程和 工艺规程	205
二、夹紧力的选择	155	一、仪器装配的三个领域和 生产类型	206
三、夹紧装置	157	二、装配工艺规程的制订	207
四、典型夹紧机构	158	第七章 特种精密加工	211
五、组合夹紧机构	166	第一节 电火花成型加工	211
六、定心夹紧机构	167	一、电火花成型加工原理	211
七、多点、多向和多件联动 夹紧机构	170	二、电火花成型加工设备	212
八、力源夹紧装置	172	第二节 电火花线切割加工	215
第四节 夹具定位、联接元件、对刀—引导 元件、分度装置和夹具体	174	一、数控电火花线切割原理	216
一、夹具对机床定位的元件	175	二、电火花线切割程序编制	217
二、对刀—引导元件	176	第三节 电火花共轭回转式加工	219
三、分度装置	179	一、同步回转式加工	219
四、夹具体	181	二、范成回转式加工	220
		三、比例差动回转式加工	220
		四、角合式加工	220
		第四节 电解加工	222

一、电解加工基本原理	222	二、超声加工的应用	236
二、电解加工特点及应用	223	第九节 其他特种加工	237
三、电解磨削	223	一、化学加工	237
第五节 电子束加工	224	二、液力加工	239
一、电子束加工原理	224	第八章 仪器零件结构工艺性	243
二、电子束加工特点	225	第一节 概述	243
三、电子束加工机的组成	225	第二节 零件结构的加工工艺性	245
四、电子束加工的应用	226	一、提高生产率降低成本的	
第六节 离子束加工	229	设计准则	245
一、离子束加工原理	229	二、保证零件加工精度的设计准则	246
二、离子束加工装置	229	三、零件加工精度和表面粗糙度的	
三、离子束加工的应用	230	合理确定	249
第七节 激光加工	230	四、标注尺寸的工艺准则	249
一、激光发生器	231	第三节 仪器结构的装配工艺性	251
二、影响激光加工的因素	232	一、分成独立的装配单元	251
三、激光加工的应用	233	二、方便装配操作和拆卸	251
第八节 超声加工	235	三、正确选择配合面及装配基准面	253
一、超声加工基本原理	235	参考文献	256

第一章 机械加工精度

第一节 基本概念

一、加工精度的基本概念

加工精度是零件在加工后,其尺寸、几何形状、表面相互位置等几何参数的实际数值与理想零件的几何参数相符合的程度。符合程度愈高,加工精度愈高。

任何一种加工方法,不论多么精密,都不可能将零件加工得绝对准确,并同理想零件完全一致,总会有大小不同的差异;即使加工条件完全相同,制造出的零件其精度也各不相同。零件实际几何参数与理想几何参数的偏差,称为加工误差。从仪器的使用性能来看,也没有必要把零件的尺寸、形状以及相互位置关系做得绝对准确,只要这些误差大小不影响仪器的使用性能,就允许它在一定的范围内变动,也就是允许有一定的加工误差存在。

研究加工精度的目的,就是研究如何把各种误差控制在允许的范围(即公差)内,弄清楚各种因素对加工精度的影响规律,从而找出减少加工误差、提高加工精度的途径。

机械加工精度包括尺寸精度、形状精度和位置精度三个方面。

二、获得规定加工精度的方法

(一) 获得尺寸精度的方法

试切法:试切法就是通过试切—测量—调整一再试切的反复过程来获得尺寸精度的方法。该方法花费在测量和试切上的时间较多,而且最后一次试切容易超过公差范围。因此,试切法的生产效率较低,同时要求操作者有较高的技术水平。这种方法主要用于单件,小批生产。

定尺寸刀具法:用具有一定形状和尺寸的刀具加工,使加工表面得到要求的形状和尺寸。例如:钻孔、铰孔、拉孔、镗刀块镗孔和攻丝等。影响尺寸精度的主要因素为刀具本身的尺寸精度、磨损和刀具安装。

调整法:用样件或首件试切,预先调整好机床、夹具、刀具与工件的相对位置和相互运动关系,再进行加工。在加工过程中,根据刀具或砂轮的磨损规律,可对机床作定期补充调整,以避免工件尺寸超差。工件的加工精度在很大程度上取决于调整精度。此法广泛用于各种半自动机、自动机和自动线上,适用于成批和大量生产。

自动控制获得尺寸的方法是把测量装置、进给装置和控制系统组成一个自动加工的循环过程,使加工过程中的测量、补偿调整和切削等一系列工作自动完成。例如在轴承环磨削自动线中,用无心磨床粗、精磨轴承环外圆时,待加工零件经送料装置自动进入磨削区磨削,同时,磨过的零件通过出口处的测量装置进行尺寸测量。当由于砂轮磨损而使零件尺寸增大到某一数值时(例如有3~5个零件的尺寸过大),测量装置发出补偿信号,使进给装置进行微量补偿进给。同时,砂轮修整器自动修整砂轮,当修整次数达到预定次数后,进给装置使磨头架进行相应的进给量补偿。整个工作循环都是自动进行的,磨削后工件尺寸精度稳定,加工效率高。

采用数字控制法加工零件时，只要将刀具用对刀装置安装在一定的位置上，依靠软件输入的信息，通过数字控制装置或电子计算机，就能使数控机床保证刀具和工件间按预定的相对运动轨迹动作，获得所要求的加工尺寸。当需要加工不同的工件时，只需更换不同的软件，输入与加工要求相应的信息就能实现。这种方法适用于中小批量，形状比较复杂的零件加工。

（二）获得形状精度的主要方法

零件的几何形状精度，主要由机床精度和刀具精度来保证。在机械加工中，获得零件表面形状精度的主要方法有两种：

成形运动法：即以刀具的刀尖做为一点，相对工件作有规律的切削运动，从而使零件表面获得所要求形状的加工方法。此时刀具对工件的切削成形面即为工件的加工面。如通过刀具相对工件作各种成形运动，就可得到圆柱面，圆锥面及平面等各种不同形状的表面。

在生产中，为了提高效率，往往不用刀具刃口上的一个点，而是采用刀具整个刃口加工，如用铰刀、拉刀、成形车刀及宽砂轮等对工件进行加工。在采用成形刀具的条件下，使刀具相对于工件作展成啮合的成形运动，就可能加工出形状复杂的表面。如各种花键表面和齿形表面。

在机械加工中，采用成形运动法加工零件的各种表面，主要是通过机床上工件和刀具两大系统的相对运动实现的。因此，加工后零件有关表面的形状精度在相当程度上取决于所使用机床的精度。

非成形运动法：零件表面形状精度的获得，不是依靠刀具相对于工件的准确成形运动，而是靠加工过程中对工件表面的积极检验和工人熟练操作技术的加工方法。这种非成形运动法，虽然是获得零件表面形状精度最原始的方法，但直到目前为止，某些复杂的成形表面和形状精度要求很高的表面仍采用。如具有较复杂空间成形表面锻模的加工，高精度测量平台和平尺的精密研刮加工及精密量块的手工研磨加工等均属于这种方法。

（三）获得位置精度的主要方法

一次安装法：零件有关表面的位置精度是直接在工件的同一次安装中，由机床、夹具精度和安装精度保证的。如轴类工件外圆与外圆的同轴度，外圆与端面的垂直度；箱体孔系加工中各孔之间的同轴度、平行度和垂直度等。

多次安装法：零件有关表面的位置精度受机床、夹具精度、安装精度和基准不重合误差影响。如轴上键槽对外表面的对称度，箱体平面与平面之间的平行度、垂直度，孔系与平面之间的平行度或垂直度等。

多次安装法，又可根据工件的安装方式划分为直接安装法，调整安装法和夹具安装法。

根据位置精度的不同获得方法，影响零件表面位置精度的主要因素有：机床的几何精度；工件的定位精度；工件的调整精度；夹具的制造、安装和调整精度。

第二节 影响机械加工精度的工艺因素

一、方法误差

方法误差亦称理论误差，这是由于加工时采用了近似的加工运动方式，或者形状近似的刀具轮廓而产生的加工误差。如用齿轮滚刀加工齿轮为例，同时存在两种方法误差，一方面由于渐开线滚刀制造上的困难，常采用阿基米德基本蜗杆或法向直廓基本蜗杆代替渐开线基

本蜗杆而产生的方法误差；另一方面，如图 1-1 所示，用滚刀在滚齿机上滚切渐开线齿形时，由于滚刀的切削刃是直线，以八条槽的滚刀为例，则在滚刀一转中就要由八个刀刃依次切出一个齿形。因此，切出的齿形并非是一条连续的渐开线，而是由 AB、BC、CD、……等折线组成的近似渐开线齿形。

用成形刀具加工复杂的曲线表面时，要使刀具刃口做出完全符合理论曲线的轮廓，有时非常困难，常采用圆弧、直线等简单、近似的线型。例如，当被加工齿轮精度要求不高的情况下，齿轮铣刀的齿形可以用圆弧齿形来代替渐开线齿形。

在某些情况下，采用和理论上完全正确的加工运动方式或刀具轮廓，会使机床或刀具结构十分复杂。为此，可以考虑采用近似的加工运动方式或近似的刀具轮廓，其加工精度不一定比理论上完全正确的加工运动方式或刀具轮廓的低，而且还可以提高生产率和经济性。

二、机床误差

机床误差主要由主轴回转误差、导轨误差及传动误差组成。

（一）机床主轴回转误差

车、磨、钻、铣等类机床主轴是工件或刀具的位置基准和运动基准。它的误差直接影响着工件的加工精度。

主轴回转轴线是主轴回转时速度为零的一条直线，它与主轴几何轴线（通过主轴各截面圆心的线）不同，只有主轴回转时才出现，与几何轴线不一定重合。

主轴回转轴线理想状态下是不变的，但是，由于轴颈和轴套存在加工误差，装配不良、温度及润滑剂的变化、磨损及弹性变形等因素的影响，主轴回转轴线就会发生偏移。主轴回转精度是以主轴实际回转轴线的位置偏移量即主轴回转误差来表示的，偏移量大，主轴回转精度就低。主轴回转误差又分为轴向窜动误差和径向跳动误差。主轴实际回转轴线的位置作纯轴向偏移时称为主轴的轴向窜动误差；主轴实际轴线作纯径向偏移与由主轴轴线角摆动所引起的径向偏移之和称为径向跳动误差，它在主轴不同的轴线位置上测得的跳动量是不同的。

机床主轴系统的回转精度对被加工工件加工表面的形状精度有直接影响。尤其是在精加工中，机床主轴系统的回转误差，往往是影响工件圆度的主要因素。如精密车床、坐标镗床、坐标磨床、精密磨床等高精度机床，其主轴回转精度必须很高，否则难以加工出高精度的工件。

机床主轴使用滑动轴承时的结构中，影响主轴回转精度的主要因素是主轴轴颈或轴承内径的圆度误差以及它们之间的配合情况。

在工件回转类机床（如车床、磨床）上，切削加工时，切削力的方向基本不变，主轴在切削力的作用下，主轴颈以不同的部位和轴承内径的某一固定部位相接触，这时主轴轴颈的圆度误差对主轴回转精度影响较大，而轴承内径的圆度误差对主轴回转精度基本无影响。如图 1-2 a 所示。

在刀具回转类机床（如镗床）上，由于切削力方向随着主轴回转而变化，主轴颈在切削力作用下总是以某一固定部位与轴承内表面的不同部位接触，因此，轴承内表面的圆度误差对主轴回转精度影响较大，而主轴颈圆度误差的影响则不大。如图 1-2 b 所示。

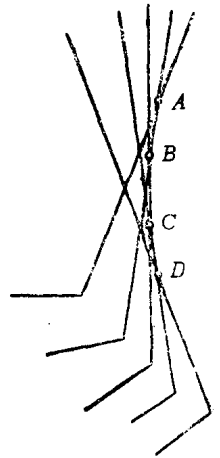


图1-1 滚切渐开线齿形

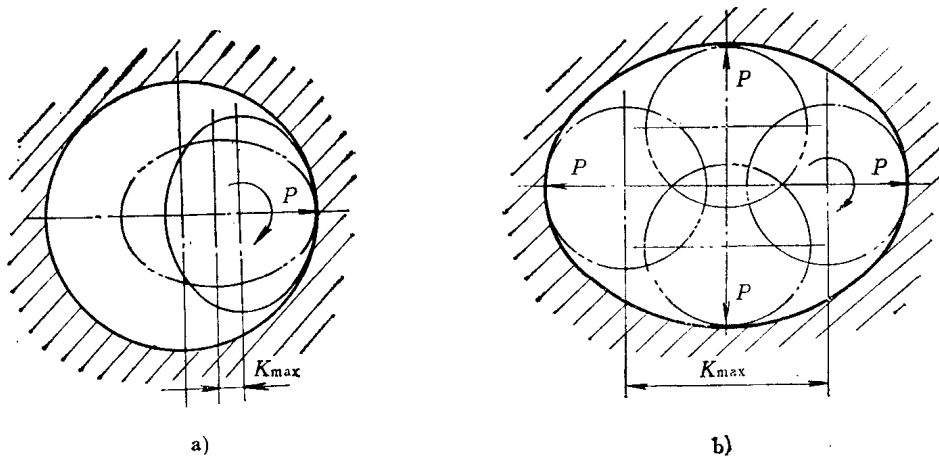


图1-2 采用滑动轴承时主轴的径向跳动

a) 工件回转类机床 b) 刀具回转类机床 K_{max} — 最大跳动量

机床主轴使用滚动轴承时主轴的回转精度不但取决于滚动轴承本身的精度（包括内外环滚道的圆度和波纹度、内外环的壁厚差、滚动体的形状误差和直径差等），而且在很大程度上和配合件（对内环而言是主轴轴颈，对外环而言是箱体上的轴承孔）的精度有关。

滚道的径向跳动来源于滚道的圆度误差和滚道相对于轴承内孔的偏心。对于工件回转类机床，滚动轴承内环的外滚道椭圆对主轴回转精度的影响较大；对于刀具回转类机床，外环的内滚道椭圆对主轴回转精度影响较大。

滚动轴承的内环或外环滚道表面有波纹如图 1-3 所示。不管是工件回转类机床还是刀具回转类机床，主轴回转时，都将产生高频率的径向跳动。

滚动体的形状误差和直径误差对主轴回转精度的影响如图 1-4 所示。当最大的滚动体通过承载区一次，就会使主轴回转轴线发生一次最大的径向跳动。回转轴线的跳动周期与保持架的转速有关。因为保持架的转速约为内环（主轴）转速的 $1/2$ ，即每当主轴回转两周，主轴轴线就径向跳动一次，即所谓“双转跳动”。当主轴承受载荷时，滚道和滚动体的变形，将部分补偿滚动体尺寸不均和形状误差对主轴回转精度的影响及被加工表面形状的影响。

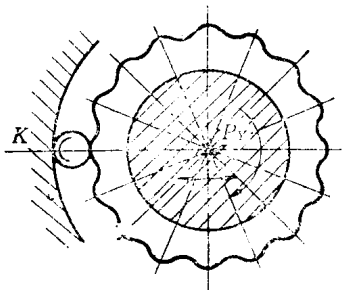


图1-3 滚动轴承滚道波纹对回转精度的影响

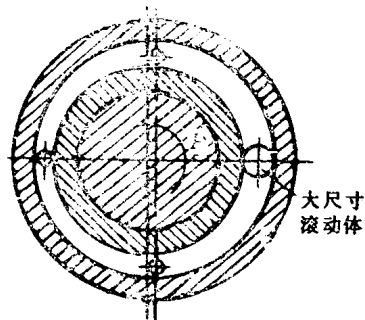


图1-4 滚动轴承的滚动体尺寸差对回转精度的影响

轴承的内外环是一种薄壁零件，受力后很容易变形，它安装到主轴轴颈上时又有一定过盈量。因此如果轴颈不圆，内环就会变形，使内环的滚道也变得不圆。这样就会破坏轴承原有精度，导致主轴回转精度下降。同样，把轴承外环装到箱体的内孔中时，若内孔不圆也会

引起外环滚道变形。因此滚动轴承配合件表面精度对保证主轴回转精度非常重要。

前后轴承内外环滚道与内孔偏心造成工件位置误差。轴承的内孔决定主轴几何轴线的位置。假设安装前、后轴承的壳体孔是同轴的，前后轴承外环内滚道（或内环外滚道）的轴心连线就是主轴的回转轴心 O_2O_3 ，如图1-5所示。当前后轴承内环外滚道与内孔存在偏心 e_1 和 e_2 时，主轴的几何轴心 $O'_2O'_3$ 将会绕回转轴心 O_2O_3 回转而产生径向跳动。主轴前端 O'_3 处所测得的偏心 e_3 与前、后轴承偏心在主轴前端的 e'_1 和 e'_2 大小和方向有关：

$$e'_3 = e_1 + e_2$$

由前后轴承内环外滚道与内孔存在的偏心而造成的主轴前端偏心 e'_3 ，只会造成加工面与基准面之间的位置误差它不会影响主轴的回转精度，一般情况下不会使被加工面产生形状误差。因为此时前后轴承滚道的轴心 O_2O_3 所确定的主轴回转轴线，仍旧是固定不变的。例如对装夹在三爪卡盘中的工件镗孔时， e_3 只会引起加工面（内孔）和安装基准（外圆）之间的同轴度误差，但它不影响镗孔圆度。

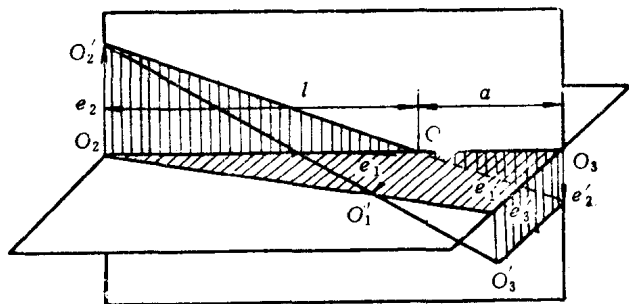


图1-5 主轴几何轴线的径向跳动

止推轴承滚道端面跳动会造成主轴端面跳动，主轴回转一周，来回窜动一次。

这时加工端面所得到的螺旋面。向前窜动时得到右螺旋面，向后窜动时得到左螺旋面。在这种情况下车削螺纹，将有螺距周期误差产生。对于那些同时承受径向和轴向载荷的轴承（如滚锥、向心推力轴承等），内外环滚道同时倾斜既引起轴向窜动也引起径向跳动，从而造成加工面的圆度误差。

配合零件和它们装配时的质量对主轴回转精度亦有重大影响。例如安装滚动轴承的主轴颈尺寸和形状精度不应低于轴承的相应精度。主轴颈如果不圆，由于滚动轴承内环是一个薄壁零件，必然会使内环变形，滚道也将随之变形而不圆。床头箱上安装滚动轴承的主轴孔不圆，也会使轴承外环滚道不圆，上述各种原因都会使主轴产生回转误差。滚动轴承的间隙对主轴回转精度影响很大，通常采取预加一定载荷的办法来消除轴承间隙，甚至造成过盈，但当预加载荷超过某一限度以后，进一步增加过盈量，对回转精度不再有明显作用，反而会因轴承工作时发热量增加造成变形使加工精度降低。主轴前后轴承之间，箱体前后轴承孔之间的同轴度误差，会使轴承内外环滚道相对倾斜，从而引起回转轴线的径向和轴向跳动。如果压紧滚动轴承的螺母、过渡套、垫圈等零件的端面与螺纹的垂直度，端面与端面间的平行度有误差也会使轴承装配时因受力不均造成滚道畸变，从而造成主轴回转误差。

在装配前后轴承时，应注意正确的选配方法。如图1-6所示，在装配主轴前后轴承时，不同的装配方法导致不同的精度效果。从图1-6 a中的相似三角形关系可列出：

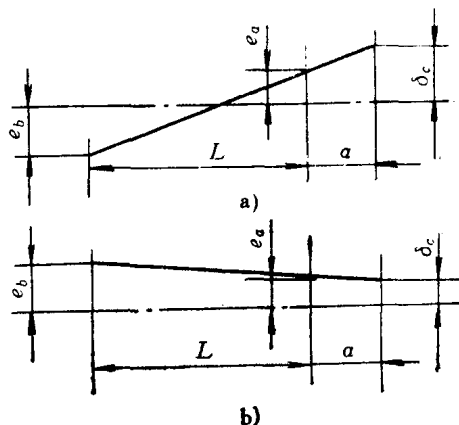


图1-6 不同装配方法引起的不同精度效果

$$\frac{e_a + e_b}{L} = \frac{\delta_c + e_b}{L + a}$$

简化后得:

$$\delta_c = e_a \left(1 + \frac{a}{L} \right) + e_b \frac{a}{L}$$

欲使 δ_c 最小或 $\delta_c = 0$, 条件是

$$e_a \left(1 + \frac{a}{L} \right) = -e_b \frac{a}{L}$$

式中 L ——前后支承跨距;

a ——主轴前支承至测量截面的距离;

e_a ——主轴前轴承的跳动量;

e_b ——主轴后轴承的跳动量。

由上式可知, 为了减少主轴的径向跳动误差, 装配时需保证: ①前后轴承的最大跳动量 e_a 、 e_b 在同一轴向截面内, 且在轴线的同一侧如图1-6b所示。② $e_a < e_b$, 即前轴承的精度高于后轴承精度。③滚动轴承预紧情况良好。精心调整预紧力, 以避免轴承间隙对轴承回转精度的影响。

总之采用正确的装配和调整方法, 对于提高主轴回转精度有密切关系。

此外, 主轴本身的刚度, 对轴承工作精度也有很大影响。当主轴受力弯曲时, 轴承内外环滚道相对偏转, 其影响与箱体轴承孔不同轴度对回转精度的影响类似。为了保证主轴回转精度必须控制上述零件的有关精度。

对于精密设备, 还应选择回转精度更高的主轴结构与支承形式。如密珠轴系、液体摩擦轴系、气体摩擦轴系。

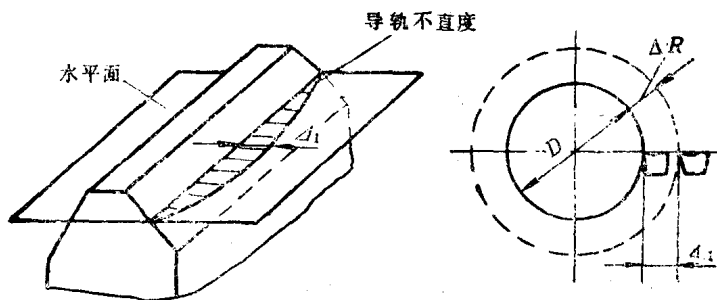
(二) 机床导轨误差

对于刨床、铣床等平面加工机床来说, 工作台(或滑枕)的直线运动精度直接影响被加工表面的平面度。对于车床、镗床等以回转运动为主切削运动的机床来说, 工作台(或刀架)的直线运动精度直接影响工件外圆和孔在纵截面内的形状误差(如圆柱度)。

导轨是机床中确定各主要部件的相对位置的基准, 也是运动基准。机床直线运动精度主要取决于机床导轨的精度。以普通车床为例, 根据部颁标准, 对机床导轨的精度要求主要有以下三个方面: 在水平面内的直线度; 在垂直面内的直线度; 前后导轨在垂直面内的平行度。

导轨在水平面内的直线度误差 Δ_1 将直接反映在被加工工件表面的法线方向上, 对加工精度的影响最大。如图1-7所示,

在刀具纵向切削的过程中, 刀尖的运动轨迹相对于工件轴心线之间就不能保持平行, 当导轨向后凸出时, 工件上就产生鞍形加工误差。而当导轨向前凸出时, 就产生鼓形加工误差。



导轨在垂直面内的直线度误差 Δ_2 , 造成刀具在垂直方向

图1-7 车床导轨在水平面内不直度引起的误差

上移动,引起被加工工件的误差。但 Δ_2 对加工精度的影响要比 Δ_1 小得多,如图1-8所示,因 Δ_2 使刀尖由 a 下降至 b ,不难推导出工件半径 R 的变化量 ΔR_2 为:

$$\Delta R_2 = -\frac{\Delta_2^2}{D}$$

若设 $\Delta_2 = 0.1\text{mm}$, $D = 40\text{mm}$, 则

$$\Delta R_2 \approx -\frac{\Delta_2^2}{D} = \left(-\frac{0.01}{40}\right)\text{mm} = 0.00025\text{mm}$$

即垂直方向刀尖下移 0.1mm , 仅使工件半径增大 $0.25\mu\text{m}$ 。

那么,对各种机床导轨是否只要考虑在水平面内的直线度就行了呢?实际上并不是这样,导轨在垂直平面内的直线度,在机床精度中一直占有重要地位。它的作用除保证溜板运动的方向精度外,还为了保证溜板与导轨的良好接触,并和机床的安装水平直接有关。而且床身导轨往往是检测机床一系列几何精度的基准,导轨本身的直线度误差,将会直接影响其它各项精度的测量结果。所以,可以认为床身导轨在垂直平面内的直线度是机床一系列几何精度的根本。以卧式镗床为例,为了可以承受较重的工件和确保加工精度,现代镗床的工作台一般都是不能升降的,只能作纵向、横向和回转运动。为了适应加工各种不同的工件,工作台必须满足的条件是:工作作任何运动时,台面应始终保持和主轴轴心线平行,并且台面到主轴轴心线的距离应始终保持不变。为了满足这个条件,必须做到:引导工作作纵向、横向和回转运动的全部导轨面都应和工作台面始终保持平行。这样的要求必须在导轨的加工过程中,尤其在装配的过程中逐步给予保证。

由于机床装配时,工作台是最后才安装在所支承它的部件之上的,所以必须有一个原始基准面,装配时所有按次序安装的各个部分都逐一对这个原始基准面作精度检验。这样的原始基准面,就是床身的导轨面。导轨本身在垂直平面内的直线度误差,将会直接影响机床一系列最终精度。

前、后导轨在垂直平面内的平行度误差 Δ_3 表征前后导轨存在扭曲,刀架移动时产生摆动,刀尖的成形运动轨迹变成一条空间曲线,使工件产生形状误差如图1-9所示,当前后导轨有扭曲误差 Δ_3 以后,引起了加工误差 ΔR 由几何关系可得:

$$\Delta R : \Delta_3 = H : B$$

$$\Delta R \approx \frac{H}{B} \Delta_3$$

一般车床的 $H/B \approx 2/3$, 外圆磨床的 $H/B \approx 1$ 这类机床前后导轨的平行度误差(扭曲)几乎直接反映到被加工工件上。

除了导轨本身的制造误差外,导轨的不均匀磨损和安装质量,也是造成导轨扭曲的重要原因。例如普通车床前后导轨工作9个月后(两班制),磨损量可达 0.03mm 。对于重型机床,由于安装不当,因机床自重而下沉的量有时可达 $2 \sim 3\text{mm}$ 。

在机床导轨误差相同的情况下,由于检验时测量仪器的安装位置不同,测得误差数值不同,测量误差影响程度的大小按阿贝原则判别。

镗床、坐标镗床、镗铣床、坐标磨床、加工中心机床在它三维直角坐标系统中, X 、 Y 、 Z 三个坐标的全部有效工作行程范围内工作时,空间任意两点的误差不超过一定数值。由于在精密仪器和精密机械制造领域里,经常遇到空间复杂形状工件的加工,它在三维空间中的

相互位置要求很高。因此,对于坐标镗床、数控自动换刀机床(加工中心)、万能测量机、三坐标测量机等,保证“三维精度”对精密加工和测量具有重要意义。

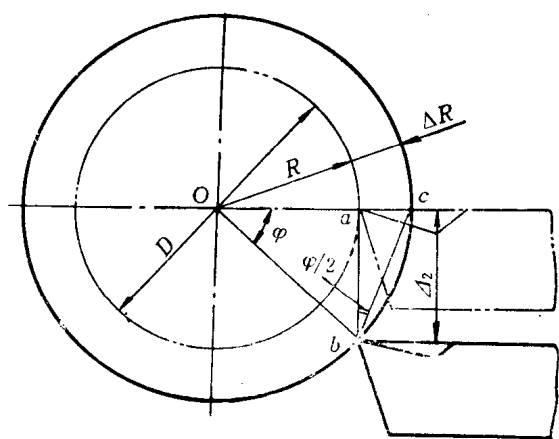


图1-8 导轨垂直面内直线度误差对工件加工精度的影响

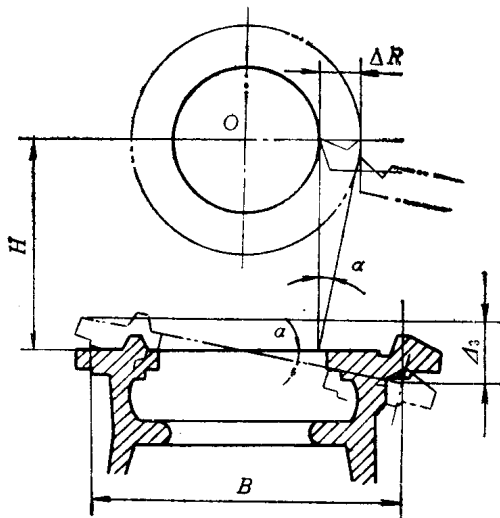


图1-9 车床导轨扭曲对工件形状的影响

如图1-10所示,在一个实际的机床坐标系 X_M, Y_M, Z_M 中,由点A向点 B_1 作 x_1, y_1, z_1 的三维位移时,在一个理想的直角坐标系 X, Y, Z 中,测出的并不是点A到点 B_1 的位移,而是从点A到点 B_M 的位移。两者之差 $\overrightarrow{B_1B_M}$ 是由 $\Delta x, \Delta y$ 和 Δz 三个分量构成的误差向量,这项误差是由机床沿三个坐标移动时导轨误差造成的。以沿X坐标轴方向移动为例,如图1-11,除了该坐标方向本身的平移误差 ΔX 外,溜板还会产生沿另外两个坐标方向的平移误差 ΔY (即沿Y轴的垂直平直度)和 ΔZ (即沿Z轴的水平平直度)及绕三个坐标轴的旋转误差 $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ (即滚摆、摇摆和颠摆)。因此,对每一坐标的移动都会产生三个平移和三个转动(即六个自由度)的运动误差。这就不难理解在点A到点 B_1 作三维位移时,就会产生 $3 \times 6 = 18$ 项误差。此外,机床的三个坐标轴亦不可能绝对相互垂直,因此还要加上三项垂直误差 $\Delta \alpha_M, \Delta \beta_M, \Delta \gamma_M$ (包括由零件间因温度造成不均匀变形引起),这样一共就有21项误差。这21项误差相互作空间向量叠加形成。图1-12所示的三维误差向量场,每一点的综合三维误差向量为:

$$\Delta \vec{R} = \Delta \vec{X} + \Delta \vec{Y} + \Delta \vec{Z}$$

根据以上分析,不难看出,三维误差主要是由于机床导轨误差造成的。

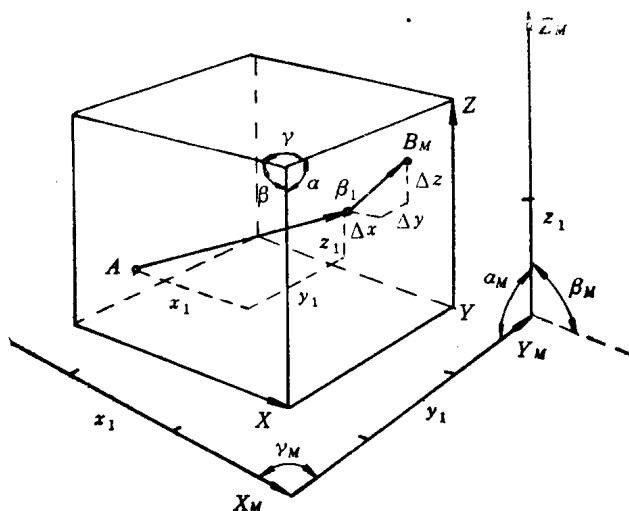


图1-10 三维误差向量图

X, Y, Z —理想的直角坐标系

X_M, Y_M, Z_M —机床的实际坐标系

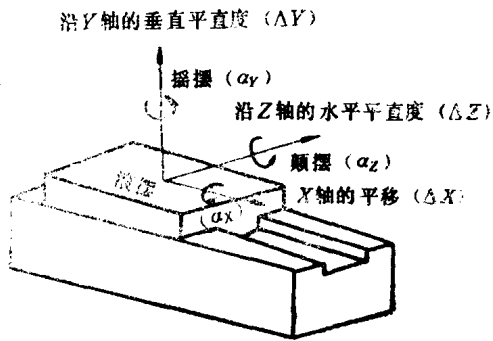


图1-11 沿X轴移动时的6项误差

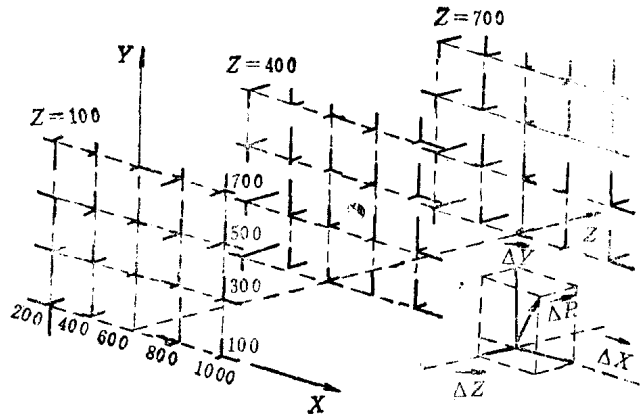


图1-12 三维误差向量在三个平面上的误差分量场

(三) 机床传动链误差

对于螺纹、齿轮、蜗轮加工和精密刻线等加工方式，机床传动链精度对加工精度影响很大。车削螺纹时，要求工件转一转刀具走一个精确导程；滚切齿轮时，要求滚刀转一转工件转过一个分齿角。这种一定的速比关系靠传动链精度来保证。

机床传动链精度与传动链中各传动零件的制造和安装精度有关。各传动零件在传动链中所处的位置不同，则对传动精度的影响程度也不同。

在具有丝杠—螺母机构的机床中，传动链中最后一个与丝杠同步旋转的齿轮对加工精度影响最大，因为它的传动误差将以1:1传给丝杠。

提高传动链精度的方法，除了减少传动元件数量和提高传动元件精度外，还可以采用校正装置来减少传动链误差。

随着数字控制和自动控制技术的发展，采用激光干涉仪、光栅、感应同步器和磁尺等精密检测元件作为发信号和接收元件，组成的精密同步随动系统，可以省略主动和从动件间一系列的传动副，减少了传动误差。提高螺纹和齿轮类机床的传动链精度。

三、夹具误差和磨损

夹具误差包括夹具的制造误差、定位元件和导向元件的磨损、夹具在机床上安装的误差等。

夹具误差会影响工件的加工精度。例如采用镗模加工箱体孔系时，工件精度由镗模的精度决定，加工时镗杆与机床主轴的连接采用浮动连接，机床只起传递动力的作用。

夹具磨损将使夹具的误差增大，从而增大工件误差。为了保证工件的加工精度，必须严格保证夹具的制造精度，还应注意提高夹具易损件（如钻套、镗套、定位元件等）的耐磨性，当磨损到一定限度后，必须及时更换。

对夹具的装配技术要求应严格控制在规定的公差范围之内。精加工用夹具一般取为工件相应公差的1/2~1/3；粗加工夹具一般取为工件工序公差的1/5~1/10。

四、刀具误差和磨损

刀具误差对加工精度的影响与刀具的种类有关。

用定尺寸刀具加工时，刀具的制造误差及磨损会直接影响被加工工件的尺寸精度。

用成形刀具加工时，刀具的形状精度将直接影响工件的形状精度。

用滚刀、插齿刀等展成法刀具加工齿轮时，刀具切削刃的几何形状及有关尺寸会直接影响加工精度。

一般刀具，如车刀、铣刀、单刃镗刀的制造精度对工件精度没有直接影响（但磨损对工件的尺寸或形状精度有影响）。如用车刀车削一根直径较大的长轴的外圆时，车刀磨损将使工件产生锥度。在用调整法加工一批零件时，车刀的磨损会扩大零件的尺寸分散范围。用成形刀具加工时，刀具刃口的不均匀磨损将直接复映在被加工工件上，造成形状误差。

精细车削、镗孔时，因所用进给量很小，刀具的磨损小对工件精度的影响很小。

磨削时砂轮的耗损一般比车刀尖的磨损大得多，尤其是内圆磨削时，砂轮尺寸较小，砂轮的耗损显著地影响砂轮的尺寸和形状，因而精磨前一般都要重新修整一次砂轮。

为了减小刀具制造误差和磨损对加工精度的影响，除应合理规定刀具的制造误差外，应根据工件材料及加工要求，正确选择刀具材料，几何参数、切削用量、冷却润滑、正确地进行刃磨，加工过程中当刀具磨损到磨损限度时就应当及时换刀。

此外，成形刀具的安装正确与否非常重要。例如，车螺纹时，如果螺纹车刀的角等分线与工件回转中心线不垂直，则车出螺纹的两个半角大小不等。因此，成形刀具必须特别注意正确安装。

五、工艺系统的受力变形

（一）基本概念

在仪器制造中由机床、夹具、刀具、工件所组成的工艺系统，在切削力、传动力、重力、惯性力、夹紧力等外力的作用下，会产生相应变形，从而破坏刀具与工件之间已经调整好的正确相对位置，使工件的加工精度下降。例如，将工件装在前后顶尖上车削细长轴时，若不采取任何工艺措施，工件在切削力作用下会发生变形，使加工出来的轴出现中间粗两头细的形状；在内圆磨床上以切入式磨孔时，由于内圆磨头轴比较细，产生弹性变形，而使工件内孔呈锥形或喇叭口；在车床上车削短而粗的工件外圆时，由于机床系统的受力变形，加工后尺寸比事先调整好的尺寸大。因此，为了消除工艺系统弹性变形对加工精度的影响，必须采取一定的工艺措施。例如纵磨外圆时，在停止砂轮横向进给后，仍需反复多次进行纵向往复移动，一直磨到无火花出现为止。

工艺系统是各种零件部件按不同连接方式和运动方式组合起来的总体，因此它受力后的变形是复杂的，其中包括弹性变形、塑性变形、摩擦和间隙影响。为了研究与比较工艺系统抵抗变形的能力，需要建立刚度的概念。

刚度（ J ）：物体抵抗使其变形的能力。

$$J = F/Y \quad (\text{N/mm})$$

式中 F ——外力（ N ）；

Y ——外力作用方向的变形量（ mm ）。

刚度的倒数称为柔度 W 。

$$W = 1/J = Y/F \quad (\text{mm/N})$$

如果引起弹性变形的力是一个大小、方向和作用点都不变的静力，则由此力和变形关系所决定的刚度称为静刚度；如果引起弹性变形的力是一个交变力，则力和变形所决定的刚度称为动刚度。在切削加工中，切削力是不断地变化的，工艺系统在动态下产生的变形不同于静态下的变形，因此就有静刚度和动刚度的区别。在一般情况下，工艺系统的动刚度与