

《机械制造工艺学》第一分册

机械制造工艺理论基础

(第二版)

哈尔滨工业大学 上海工业大学 主编

上海科学技术出版社

《机械制造工艺学》第一分册

机械制造工艺理论基础

(第二版)

哈尔滨工业大学 上海工业大学 主编

江苏工业学院图书馆
藏书章

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书为《机械制造工艺学》的第一分册。内容包括机械加工精度、工艺系统刚度及受力变形、工艺系统的热变形、加工误差的统计分析、机械加工表面质量和工艺系统的振动等。

本书将实际工艺问题提高到理论上进行分析计算,取材较丰富,说理较深入,有利于产品质量的全面管理和控制以及技术经济指标的提高。

读者对象:主要为高等工科院校机械制造工艺及设备专业的师生,以及有关技术人员。

《机械制造工艺学》第一分册

机械制造工艺理论基础

(第二版)

哈尔滨工业大学 上海工业大学 主编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 商务印书馆上海印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 19.25 字数 458,000

1980 年 8 月第 1 版

1988 年 5 月第 2 版 1988 年 5 月第 9 次印刷

印数: 107,401—111,500

ISBN 7-5328-0512-0/TH·16(课)

统一书号: 15119·2082 定价: 3.30 元

编写说明

根据大专院校机械制造工艺及设备专业教学上的需要和有关工程技术人员的要求,东北工学院、哈尔滨工业大学、吉林工业大学、上海工业大学、华南工学院等发起并联合有关院校,共同组织编写了本专业的教材与教学参考书。其中《金属切削原理与刀具》、《金属切削机床设计》、《机床设计图册》、《机床夹具设计手册》、《机械制造工艺学》、《机床夹具设计》、《数控机床》等由上海科学技术出版社出版。

参加《机械制造工艺学》一书编写的单位有:哈尔滨工业大学、上海工业大学、吉林工业大学、大连工学院、沈阳机电学院、第一汽车制造厂工人大学、清华大学、北京工业大学、天津大学、西安交通大学、合肥工业大学、南京工学院、浙江大学、江西工学院、湖南大学、武汉工学院、昆明工学院。

《机械制造工艺学》共分四册出版。第一册《机械制造工艺理论基础》;第二册《机械加工工艺规程制订及装配尺寸链》;第三册《轴、箱体、丝杠加工》;第四册《圆柱齿轮加工》。

本书主编单位为哈尔滨工业大学和上海工业大学。参加主编及审稿工作的有:哈尔滨工业大学侯镇冰、葛鸿翰、陶崇德;上海工业大学杨质苍、张景勘。此外还邀请了大连工学院王小华、山东工学院程韦德、清华大学朱耀祥、华南工学院苏树珊、沈阳机电学院经以广参加审稿。

本书在编写与审定过程中,哈尔滨工业大学、上海工业大学、华南工学院、昆明工学院、云南工学院、广西大学等曾做了大量的组织工作。

本书第一册《机械制造工艺理论基础》编写人为合肥工业大学王善庆、王治森(机械加工精度),清华大学朱耀祥(工艺系统刚度及受力变形),浙江大学梁允奇、高承煜(工艺系统热变形),大连工学院王小华(加工误差的统计分析),哈尔滨工业大学侯镇冰(机械加工表面质量),昆明工学院廖伯瑜、郭之璜、武汉工学院张仲甫、西安交通大学陈人亨(工艺系统的振动)。本分册在审稿过程中,侯镇冰、张景勘、程韦德、葛鸿翰、王小华等做了较多的工作。

本书不足之处,恳请读者批评指正。

第二版说明

为了使本《机械制造工艺学》更好适应教学和生产的需要,特对第一版内容作了更新、精简、修正和补充。

本册是在主编单位、主编支持下,由我社邀请各位编者修改和补充的,并由特邀修订人上海第二工业大学何绍杰、上海工程技术大学郑伟中作进一步修改和补充,以求书稿质量精益求精,更臻完善。特邀补充编写“传动链误差的频谱分析”的为上海交通大学李锦西、补充编写“机械制造中的自适应控制”的为上海交通大学陆大为。

由于修改时间仓促,难免考虑不周,希请各位读者指正,谢谢。

目 录

第一章 机械加工精度	1
§ 1-1 机械加工精度的概述	1
§ 1-2 零件的形状精度	1
一、获得表面形状的机械加工方法	1
二、影响形状精度的因素	3
§ 1-3 零件的尺寸精度	27
一、获得尺寸的机械加工方法	27
二、影响尺寸精度的因素	29
§ 1-4 零件表面的相互位置精度	37
一、加工面相互位置精度的获取	37
二、定位方法和加工面相互位置精度的保证	39
三、影响位置精度的误差因素	41
四、机械制造中的自适应控制	46
第二章 工艺系统刚度及受力变形	49
§ 2-1 工艺系统刚度的概述	49
§ 2-2 工艺系统作用力对加工精度的影响	52
一、切削力对加工精度的影响	52
二、传动力、惯性力、夹紧力、重力对加工精度的影响	57
§ 2-3 工艺系统刚度的实验测定	60
一、车床刚度的测定	60
二、铣床刚度的测定	63
三、钻床刚度的测定	63
§ 2-4 接触刚度问题	64
一、接触刚度的概念	64
二、接触变形的测量	65
三、各种因素对接触变形的影响	66
§ 2-5 提高工艺系统刚度的措施	68
一、选用合理的零部件结构和断面形状	68
二、提高连接表面的接触刚度	68
三、采用变形的转移、补偿和校正的方法	69
四、采用正确的装夹方式	71
第三章 工艺系统的热变形	72
§ 3-1 工艺系统热变形的概述	72
一、热变形的重要性及产生原因	72
二、热的传递、热平衡及温升的估算	74
三、计算中常用的热参数	75

§ 3-2 工件热变形对加工精度的影响及其预防措施	76
一、长圆柱体类工件加工时的热变形	76
二、板类工件单面加工时的热变形	77
§ 3-3 刀具热变形对加工精度的影响及其预防措施	79
§ 3-4 机床热变形对加工精度的影响及其预防措施	81
一、机床的温升与热平衡	81
二、各类机床的热变形趋势及其对加工精度的影响	82
三、机床热变形的测定与分析举例	85
四、减少和防止机床热变形的措施	87
§ 3-5 减小室温变化对机床精度、测量精度影响的措施	88
一、在给定精度所允许的温度下进行作业	88
二、选择在室温变化不大的地点和时间进行作业	89
三、建立恒温的精密加工车间和装配车间	90
§ 3-6 热传导、温度场及热变形的计算	91
一、热传导的基本理论	91
二、解析法	92
三、有限差分法	107
§ 3-7 工艺系统热变形的数控补偿技术	113
一、加工误差规律的寻找	113
二、加工误差补偿点的确定	116
§ 3-8 主动热源法	117
一、用主动热源缩短机床的热平衡时间	118
二、用主动热源改善机床的热稳态精度	132
三、热平衡时间的评价	128
第四章 加工误差的统计分析	131
§ 4-1 加工误差分析的概述	131
一、加工误差的分析研究方法	131
二、加工误差的分类	131
§ 4-2 分布图分析法	131
一、实际分布图——直方图	131
二、理论分布图	134
三、分布图的应用	142
§ 4-3 点图分析法	144
一、点图的各种形式	144
二、正常波动与异常波动	144
三、点图的应用	148
§ 4-4 工艺验证	148
一、工艺验证的步骤	148
二、工艺验证的实例	149
§ 4-5 统计检验	152
一、稳定过程的统计检验	152
二、不稳定过程的统计检验	153

§ 4-6	相关分析法	159
一、	回归直线与相关系数	159
二、	回归直线的简易求法	166
三、	相关分析的实例	166
§ 4-7	加工误差的综合分析和判断	168
一、	分析解决加工误差问题的方法和步骤	168
二、	加工误差综合分析的实例	170
第五章	机械加工表面质量	194
§ 5-1	机械加工表面质量的概述	194
一、	机械加工表面质量的含义和对产品性能的影响	194
二、	机械加工表面质量的控制	198
§ 5-2	各种因素对表面粗糙度的影响及减小表面粗糙度的工艺措施	198
一、	切削加工	198
二、	磨削加工	202
三、	超精研、研磨、抛光	204
四、	金刚石刀超精密切削加工	207
§ 5-3	机械加工表面金相组织的变化及其改善的工艺途径	211
一、	磨削区温度场的理论分析	212
二、	磨削烧伤问题的分析及减轻磨削烧伤的途径	217
§ 5-4	机械加工表面层残余应力的分析及改善表面应力状况的工艺措施	223
一、	机械加工表面残余应力的产生	223
二、	表面残余应力对产品质量的影响	233
三、	表面强化工艺	233
第六章	工艺系统的振动	237
§ 6-1	工艺系统振动的引论	237
一、	工艺系统振动的类型	237
二、	振动系统的动力学模型	238
三、	工艺系统的振动分析	238
四、	机床结构的动刚度	251
§ 6-2	工艺系统振动产生的原因	254
一、	工艺系统受迫振动产生的原因	254
二、	工艺系统自激振动产生的原因	255
三、	切削颤振的稳定性分析	263
§ 6-3	工艺系统振动的防治	270
一、	系统受迫振动的防治	270
二、	切削颤振的防治	272
§ 6-4	系统振动特性的测试	281
一、	机床试验模态分析	281
二、	表征系统振动特性的模态参数的识别	290

第一章 机械加工精度

§ 1-1 机械加工精度的概述

产品质量与零件质量、装配质量有很大关系，而零件质量则与材料性质、零件表面层组织状态等物理因素有关，也与加工精度、表面粗糙度等几何因素有关。机械加工的首要任务，就在于保证零件在几何方面的质量要求。

零件的加工精度是指加工后的零件在形状、尺寸和表面相互位置三个方面与理想零件的符合程度。

任何加工方法，都不可能把零件加工得绝对准确，在形状、尺寸和表面相互位置这三个方面，总是存在着一定的加工误差。加工误差越小，加工精度就越高。

随着对产品性能要求的不断提高，对零件加工精度的要求也就不断提高，但在满足产品性能要求的前提下，零件的加工精度应尽可能降低，以便提高机械加工的生产率和经济性。

零件加工精度的三个方面是既有区别，又有联系的。没有一定的形状精度，也就谈不上尺寸和位置精度。例如，不圆的表面就没有确定的直径，不平的表面之间就不能测量出准确的平行度，或垂直度。一般说来，形状精度应高于尺寸精度，而位置精度在大多数情况下也应高于相应的尺寸精度。对于一般机械加工方法，形状误差约占尺寸误差的 50% 以下。如果形状误差所占比值过大，势必要减小实际允许的 尺寸误差，从而使零件加工的难度加大，费用增加。因此，设计时，应使形状精度、位置精度与尺寸精度相适应。

加工误差来源于两个方面。一个方面是机床-夹具-刀具-工件所组成的工艺系统本身的误差，另一方面是加工过程中出现的载荷和各种干扰，包括受力变形、热变形、振动、磨损等等。这两方面的因素均使工艺系统偏离其理想状态，而造成加工误差。

本章主要研究工艺系统本身误差对加工精度的影响。

§ 1-2 零件的形状精度

一、获得表面形状的机械加工方法

在机械加工中，工件的表面形状主要依靠刀具和工件作相对的成形运动来获得。获得方法可具体归纳为如下三种。

1. 轨迹法

这种加工方法是依靠刀尖运动轨迹来获得所要求的表面几何形状的。刀尖的运动轨迹取决于刀具和工件的相对运动(成形运动)。例如，由图 1-1 所示，用工件的回转和车刀的直线运动车削圆锥面(图 a)；用工件回转和纵向移动以及砂轮回转加工圆柱面(图 b)；用工件的回转和刀具按靠模作曲线运动加工特殊形状的回转表面(图 c)；用刨刀的直线运动和

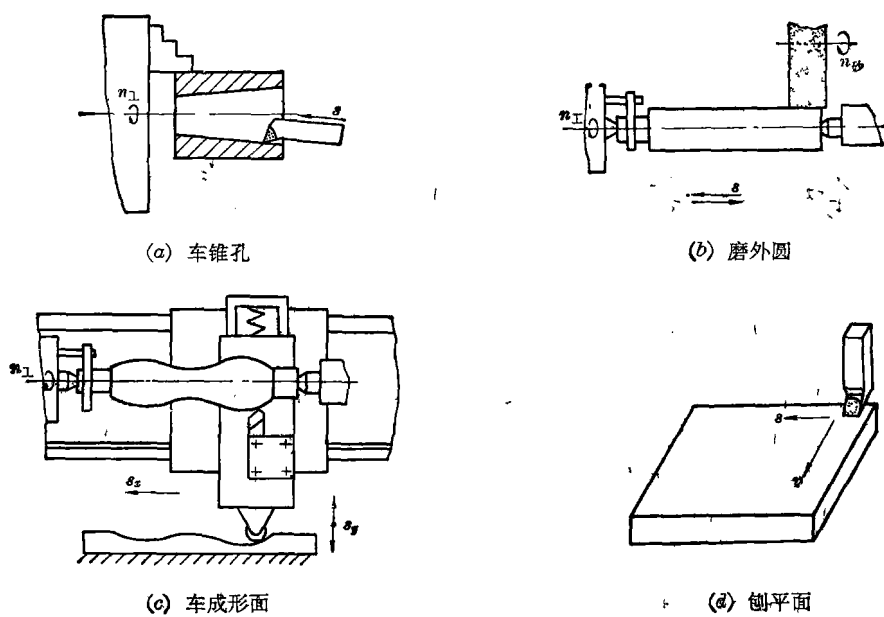


图 1-1 轨迹法

工件垂直于刨刀运动方向作直线运动加工平面(图 d)等等。

应该注意,成形运动和主切削运动在概念上是不同的。成形运动可以是主切削运动,也可以是非主切削运动。例如,在车削时,工件的回转,既是成形运动,也是主切削运动;而在磨削时,它就不是主切削运动。

用这种加工方法,得到的形状精度取决于成形运动的精度。

2. 成形法

为了提高生产率、简化机床,常采用成形刀具来代替通用刀具。此时,机床的某些成形运动就被成形刀具的刀刃几何形状所代替。例如图 1-2 所示,用成形车刀或成形砂轮加工回转曲面(图 a);用成形铣刀(成形刨刀)加工曲面(图 b);车削(磨削)螺纹(图 c)均属于此类。车(磨)螺纹时,螺旋面由工件的回转和车刀(砂轮)的直线运动产生,而螺纹的牙形则决定于刀具(砂轮)的形状。

很明显,这种加工方法,形状精度既取决于成形运动的精度,也取决于刀刃的形状精度。

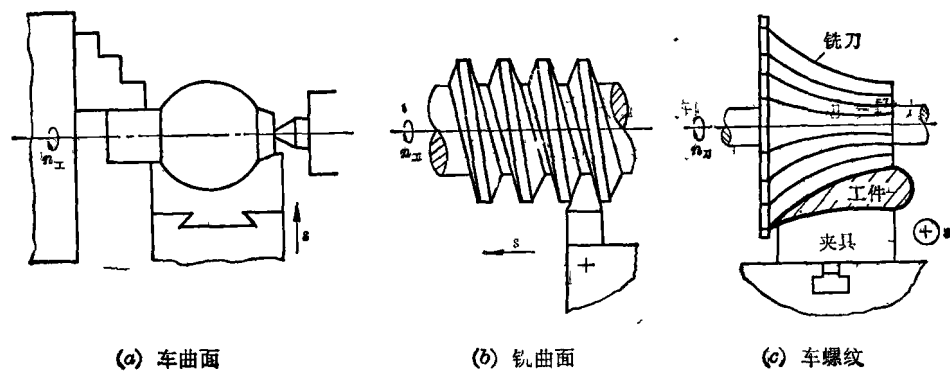


图 1-2 成形法

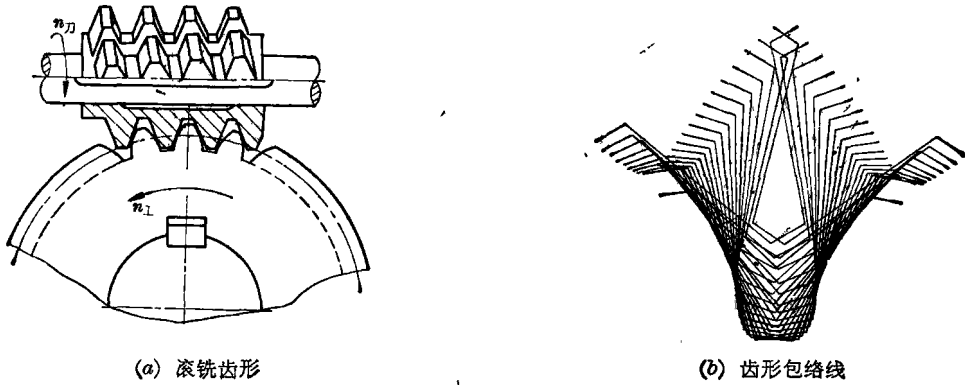


图 1-3 展成法

3. 展成法

各种齿形的加工，常采用这种方法。这时，刀具和工件作啮合运动(图 1-3a)。被加工表面是刀刃在相对啮合运动中的包络面(图 1-3b)。刀刃必须是被加工面的共轭曲线，而作为成形运动的啮合运动，则必须保持确定的速比关系。

由上述可知，为了保证形状精度，必须首先保证各成形运动本身及其相互关系的准确性。各成形运动的相互关系，是指成形运动轨迹的相对位置关系(几何关系)和成形运动速度之间的相互关系(运动关系)。对于大多数简单几何形状，如圆柱面、圆锥面、平面等，只需保证前一个关系就可以了；而对于一些复杂表面，如螺旋面及各种用展成法加工的表面(如轮齿等)，则需同时保证两个关系。

机器零件的种类虽然很多，但从其表面形状来看，大多是由一些圆柱面、圆锥面、平面、螺旋面等简单几何表面组成的。获得这些表面，都离不开回转运动和直线运动这两种最基本的成形运动。下面，我们就对这两种成形运动及其相互关系加以分析。

二、影响形状精度的因素

1. 机床主轴的回转精度

主轴回转精度是机床主要精度指标之一。它在很大程度上决定着工件加工表面的形状精度。

机床主轴工作时，除绕实际的回转轴线转动外，还存在着实际回转轴线对于回转轴线平均线的径向跳动、端面跳动和摆动(见图 1-4)，后者统称为机床主轴的误差运动，这个误差运动使主轴产生回转误差。所谓回转轴线平均线，是指实际回转轴线作误差运动时的对称中心线。

(1) 机床主轴回转精度的分析

① 滚动轴承精度对主轴回转精度的影响

i) 滚道的径向跳动

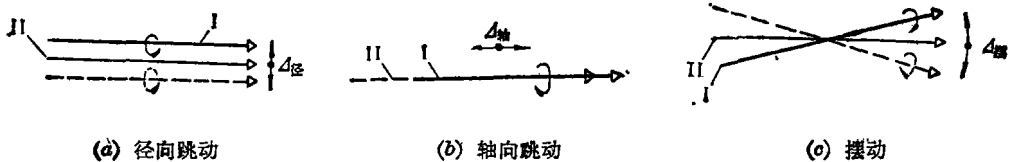


图 1-4 主轴回转误差

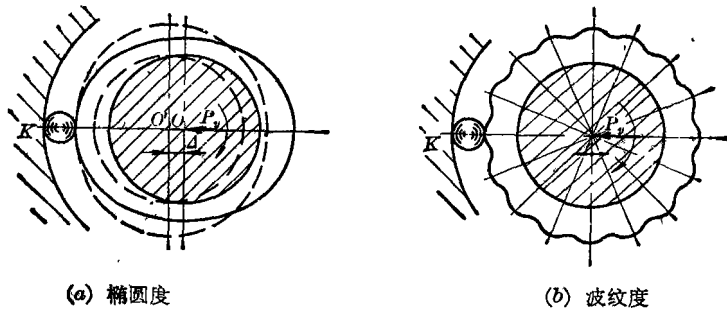


图 1-5 轴承滚道形状误差对回转精度的影响

滚道的径向跳动来源于滚道的形状误差(椭圆度、波纹度)和滚道相对于轴承内孔的偏心。

滚道形状误差会使主轴回转轴线产生如图 1-5 所示的径向跳动。这种误差仅是部分地复映到被加工表面上,这是由于滚道在载荷作用下所产生的弹性变形,起着部分抵偿滚道形状误差作用的原因。

对于不同的机床,滚道形状误差的影响是不同的。对于车床、磨床等,由于载荷 P (一般为切削力和传动力的合力)在轴承外圈上的作用点和方向基本不变,因此轴承外圈滚道误差对回转精度的影响很小。而内圈的情况就不同,其滚道上的每一点都要通过承载区,因此它的形状误差将部分复映到被加工表面上。对于镗床,则因镗刀与内圈一起转动,切削力在内圈上的作用点不变,而外圈滚道上每一点却都可能成为承载区,因此外圈滚道的误差将部分复映到被加工表面上。

主轴实际回转轴线相对于回转轴线平均线作误差运动的频率与主轴转速有关。单纯的滚道椭圆度使主轴每转产生一次(镗)、或两次(车)径向跳动;如果同时还存在波纹度,则轴线的径向跳动将如图 1-6 所示,包含着与滚道波纹数有关的高频成分。

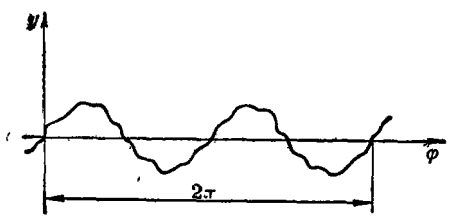


图 1-6 主轴回转误差的周期性

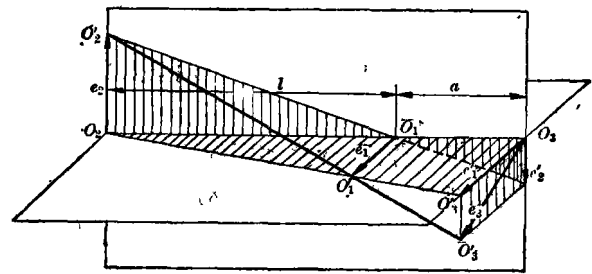
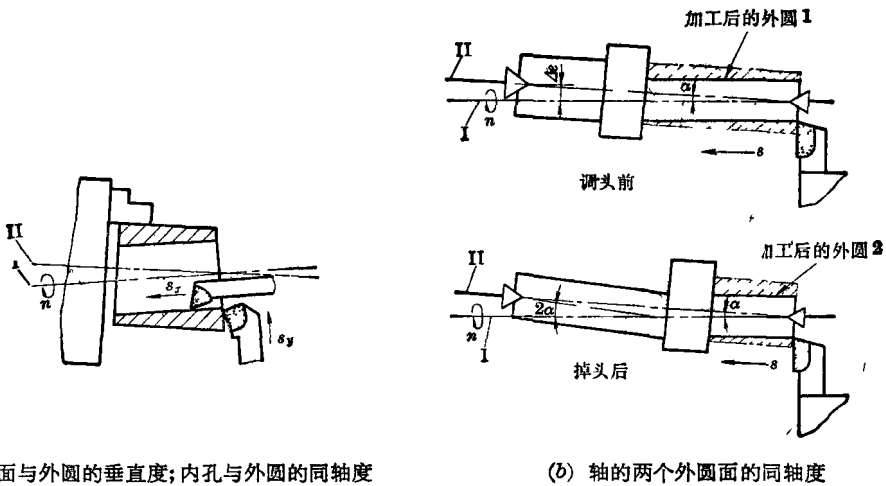


图 1-7 前后轴承内圈滚道偏心与轴端偏心的关系

轴承的内孔决定主轴几何轴线的位置。如图 1-7 所示,当内圈滚道和内孔偏心时,主轴的几何轴线 $O_2'O_3'$ 将会绕着回转轴线 O_2O_2' 回转,回转中心不变。主轴前端 O_3 处所测得的偏心 \vec{e}_3 与前后轴承的偏心 \vec{e}_1 和 \vec{e}_2 的大小和方向有关。即

$$\vec{e}_3 = \vec{e}_1 + \vec{e}_2 \quad (1-1)$$

但必须指出,单纯的前后轴承滚道偏心或由此而造成的主轴前端偏心 \vec{e}_3 ,不会影响主轴的回转精度,也即不会造成加工面的形状误差,而只会造成加工面与基准面间的相对位置误差。因为此时前后轴承内圈或外圈滚道的中心 O_1 和 O_2 所确定的主轴回转轴线,仍旧是固



(a) 端面与外圆的垂直度;内孔与外圆的同轴度

(b) 轴的两个外圆面的同轴度

图 1-8 主轴几何轴线径向跳动产生的加工误差

定不变的。

例如图 1-8a 所示,对装夹在三爪卡盘的工件镗孔时,由 \vec{e}_s 引起加工面(内孔)和安装基准(外圆)之间的同轴度误差。图 1-8b 所示为用顶尖顶着车外圆的情形。此时,前后顶尖连线与主轴回转轴线(即工件上的顶尖孔与被加工面)之间产生一夹角 α 。这样在调头前后分别车出来的两段圆柱面的轴线相交角就会是 2α 。

ii) 滚动体的形状误差和直径误差

这种误差,同样会引起主轴回转轴线的径向跳动,从而给加工面带来形状误差。例如,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。轴线跳动的周期与保持架的转速有关,保持架的转速约为内圈转速的二分之一,因而这种径向跳动每当主轴转过两转发生一次,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和被加工表面形状的影响。

综上所述,由滚道和滚动体误差产生的回转轴线径向跳动,是主轴转角的复杂周期函数。它包含和主轴转速 n 相等的频率成分,也包含低于和高于 n 的频率成分。

实践证明,工件形状误差不仅与主轴回转轴线的径向跳动有关,也与主轴转速有关。在某个最佳转速范围之内,工件的圆度接近于主轴回转轴线的径向跳动,当转速增高时,圆度将显著增大。

iii) 滚道的端面跳动

滚道端面跳动会造成主轴端面跳动(图 1-9)。主轴回转一周,来回窜动一次。这时加工端面得到的是螺旋面。向前窜动时得到右旋螺旋面,向后窜动时得到左旋螺旋面(图 1-10a)。如在这情况下车削螺纹,则必然伴随有螺距周期误差的产生(图 1-10b)。

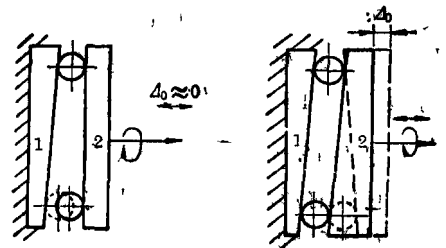
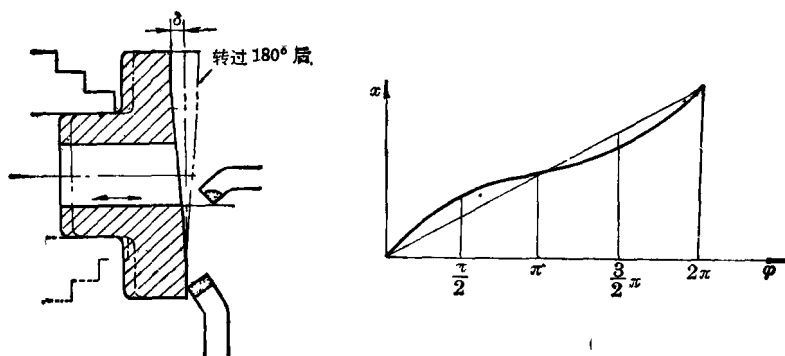


图 1-9 轴承端面跳动的影响

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),内外圈滚道的同时倾斜既引起轴向跳动,也引起径向跳动(图 1-11),从而造成加工面的圆度误差。



(a) 工件端面跳动

(b) 螺距周期误差

图 1-10 主轴端面跳动引起的加工误差

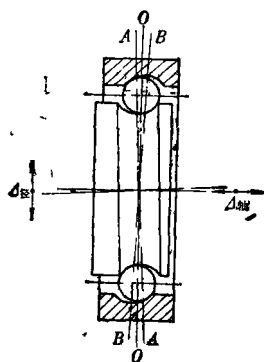


图 1-11 滚道端面跳动的影响

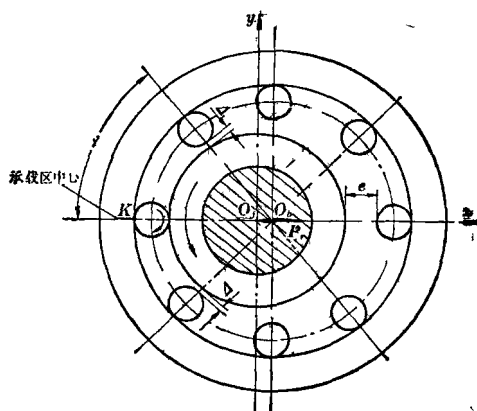


图 1-12 轴承间隙对主轴中心位置的影响

iv) 轴承间隙

轴承间隙对主轴回转精度有很大影响。它除了使主轴在外力作用下发生一个静位移外，还会使主轴回转轴线产生复杂的周期运动。这种情形，可以由图 1-12 来说明。当一个滚动体正处在承载区中心 K 时，主轴回转中心 O_s 应处于水平坐标的极右点；当滚动体逐渐向下滚动时， O_s 开始向左上方、继而向左下方移动，直至第二个滚动体转到 K 点，即保持架转过 $\tau = 360^\circ/z$ ，主轴完成一次周期摆动。间隙越小，滚动体与滚道弹性变形的补偿作用越大，回转轴线变动范围就越小。根据理论分析^[23]，轴心的这种运动轨迹，取决于径向载荷 P_r 、间隙 e 、轴承材料的弹性系数 C_0 及滚球或滚子数 z 等参数。它们对主轴回转精度的影响，如图 1-13 和图 1-14 所示。

图 1-13 和图 1-14 中的曲线，分别代表安装在两种不同的轴承上的主轴轴心变动的轨迹。它们的形状和变化范围可用参数 X 的大小来判定，

对于球轴承

$$X_{球} = \frac{P_r}{C_0 \left(\frac{e}{2}\right)^{1.5} \cdot z} \quad (1-2)$$

对于短圆柱滚子轴承

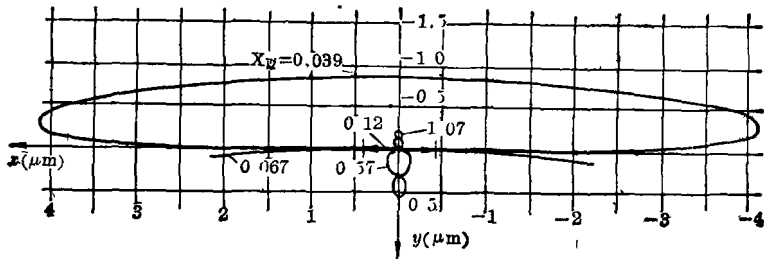


图 1-13 用球轴承时主轴轴心变动轨迹

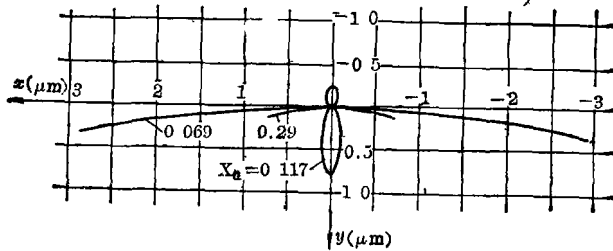


图 1-14 用圆柱轴承时主轴轴心变动轨迹

$$X_{\#} = \frac{P_r}{\sigma_s \left(\frac{e}{2}\right) \cdot z} \quad (1-3)$$

由图可以看出，对应于不同的 X 值，轴心变动轨迹的曲线形状也不同。 X 越小，轴心变动越大。而由式 1-2 和式 1-3 可以看出， e 越大， P_r 越小， X 就越小。这说明，当轴承在轻载和大间隙条件下工作时，主轴轴线特别不稳定。例如 $X_{\#} = 0.039$ 时，轴心变动范围约为 $\pm 5 \mu\text{m}$ 。增加 P_r 、减小 e 时， X 增大，轴线变动就减小。因此，对于精密机床，一般都采取轴承预加载荷的方法来消除轴承间隙，甚至造成过盈。实质上也就是通过提高主轴承的刚度来提高主轴回转精度。当然，预加载荷的大小必须严格控制。当预加载荷超过某一限度以后，进一步增加过盈，对回转精度就不再有明显作用，这时倒反会由于轴承工作时摩擦发热量增加而使加工精度降低。表 1-1 为某些主轴轴承装配间隙(过盈)的推荐数据。

表 1-1 推荐的主轴轴承装配间隙(过盈) (μm)
(适用于 3182100 和 4162900 型轴承)^[4]

速度参数 $d \cdot n_{\max}$ (mm r/min)	轴 承 精 度 等 级		
	D 级	C 级	高于 C 级
小于 0.5×10^5	-3 ~ +3	-5 ~ 0	-5 ~ -2
$0.5 \sim 1.5 \times 10^5$	0 ~ +6	-2 ~ +3	-3 ~ 0
$1.5 \sim 2.5 \times 10^5$	+5 ~ +12	-1 ~ +4	-2 ~ +2

注：对大直径和高转速取大值。(+)表示间隙，(-)表示过盈。

调整和控制间隙(过盈)的方法：

以 3182100 型主轴轴承为例，可用图 1-15 所示的夹具进行调整。间隙或过盈可通过螺母 1 控制。当存在间隙时，按动轴承外圈(它由下部的弹簧 2 顶住)，就可由表上读出间隙

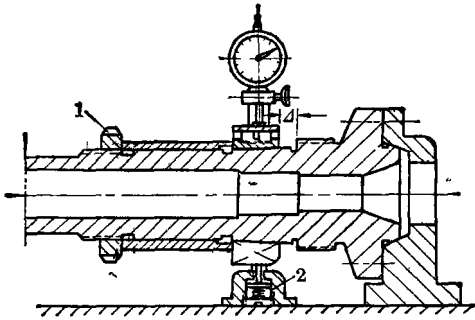


图 1-15 调整轴承间隙的方法
1—预紧螺母； 2—弹簧

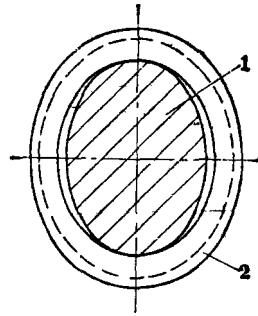


图 1-16 轴颈不圆引起的轴承内圈变形
1—轴颈； 2—轴承内圈

值。过盈则通过外环变形由表读出。当达到规定值后，测出轴承内圈端面到轴肩的距离 Δ (沿圆周测几点取平均值)，然后按此尺寸配磨垫圈。

② 配合零件和装配质量对主轴回转精度的影响

主轴回转精度不仅取决于轴承本身精度，而且与相配零件(主轴、箱体等)的精度和装配质量等有密切的关系。

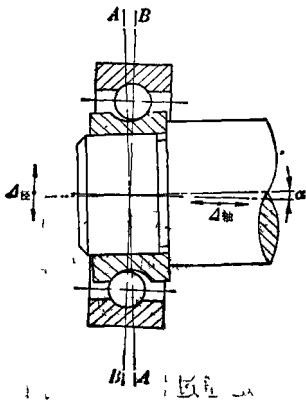


图 1-17 箱体轴承孔同轴度
误差对回转精度的影响

安装轴承的主轴轴颈，其尺寸和形状误差必须严格控制。其精度不应低于轴承的相应精度。轴承内圈是一个薄壁零件，当轴颈不圆时，必然会使内圈滚道发生相应的变形，而且使主轴组件在各个方向的刚度不一致(见图 1-16)，从而也会造成主轴工作时回转精度的降低。为了提高主轴组件的刚度，对于高精度机床，主轴轴承的内、外圈均宜采用配合较紧的、保证过盈的过渡配合 K5 和 K6。

主轴前后轴颈之间、箱体前后轴承孔之间的同轴度误差，会使轴承内外圈滚道相对倾斜，从而引起回转轴线的径向和轴向跳动(见图 1-17)。

此外调节螺母、过渡套、垫圈和轴肩等的端面垂直度误差，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。因此，这类误差也应严格控制。

总之，提高装配和调整质量，对于提高主轴回转精度有密切关系。例如，高精度机床，其主轴轴承(C级)内圈径向跳动为 $3 \sim 6 \mu\text{m}$ ，而主轴组件装配后的径向跳动只允许 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ ，这就要靠装配和调整的质量来保证。

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，轴承内外圈滚道相对偏转(图 1-18)。其影响类似于图 1-17。因此，某些国家对主轴平均静刚度 K_s 作了规定^[2]：普通精度的双支承主轴， K_s 应不低于 $250 \text{ N}/\mu\text{m}$ ；高精度机床， K_s 应不低于 $50 \text{ N}/\mu\text{m}$ 。 K_s 的值，可近似地按下式计算

$$K_s = 53(D^4 - d^4)/l^3 \text{ N}/\mu\text{m} \quad (1-4)$$

式中： D ——前后轴承之间的平均直径(mm)；
 d ——前后轴承之间主轴中心孔平均直径(mm)；
 l ——前后轴承中心的跨距(mm)。

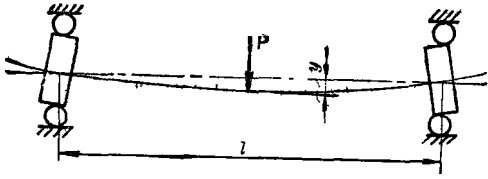


图 1-18 主轴的刚度对轴承工作精度的影响

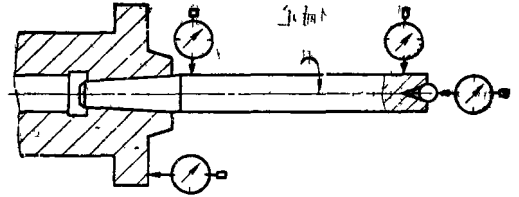


图 1-19 主轴回转精度的表测法

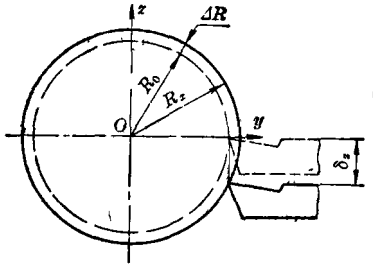


图 1-20 回转轴心跳动对加工精度的影响

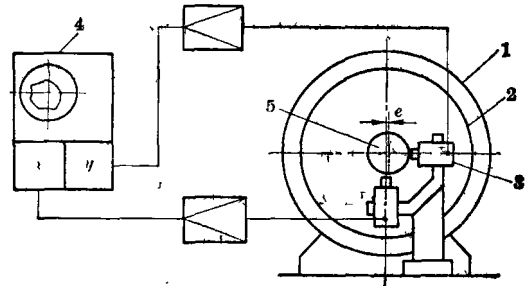


图 1-21 测定镗床主轴回转精度的方法

1—主轴；2—调整盘；3—传感器；4—示波器；5—钢球

(2) 机床主轴回转精度的测量

机床主轴回转误差，包括径向跳动、轴向跳动和轴线摆动三个方面。目前生产中主要是采用图 1-19 所示的表测方法。这种方法简单易行，但它却有以下两个主要缺点：

i) 不能反映主轴在工作转速下的回转精度。

ii) 不能把性质不同的误差区分开来。例如，不能把包含在由表测得的径向跳动中的主轴回转轴线的径向跳动和主轴几何轴线和定位基准（锥孔、定心凸肩等）相对于回转轴线的偏心所引起的径向跳动区分开来。

随着对机床主轴回转精度要求的不断提高，就需要采用更精确的测试方法，以使测量结果能真实反映出机床上待加工零件的实际形状精度。

对于车床或磨床类机床，在某一瞬时，主轴回转轴心的跳动 δ 可分解为 δ_y 和 δ_z 。其中，刀尖处加工表面法线方向的跳动分量 δ_y ，会使工件半径产生同样大小的变化；而加工面切线方向的跳动分量 δ_z ，却对工件半径影响甚小。由图 1-20 可知。跳动分量 δ_z 所产生的半径误差为

$$\Delta R = R_s - R_0 = \sqrt{R_0^2 + \delta_z^2} - R_0 \approx \left(R_0 + \frac{\delta_z^2}{2R_0} \right) - R_0 = \frac{\delta_z^2}{2R_0} \ll \delta_s \quad (1-5)$$

当 $\delta_z = 0.01 \text{ mm}$ ， $D = 2R_0 = 100 \text{ mm}$ 时， $\Delta R = 10^{-6} \text{ mm}$ 。此值完全可以忽略不计。而在 y 方向同样大小的径向跳动所造成的半径误差为 0.01 mm ，是上述数值的 10^4 倍。

因此，我们称 y 方向为误差敏感方向。而只有在这个方向测得的跳动分量，才能正确评定主轴的回转精度。

对于车床、磨床等，误差敏感方向是固定不变的；对于镗床等，误差敏感方向则随主轴一起回转。因此，在这两种情况下，测量主轴回转精度的方向是不同的。

① 镗床类机床主轴回转精度的测量方法

仪器工作原理如图 1-21 所示。在主轴 1 的端面固定一调整盘 2，用以调整标准钢球 5