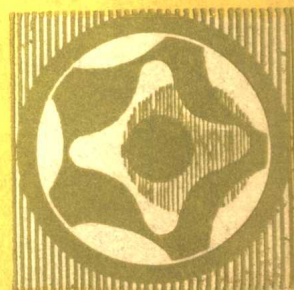
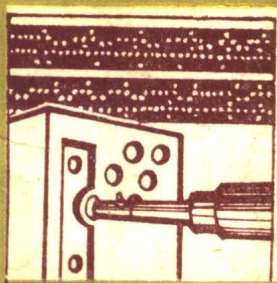
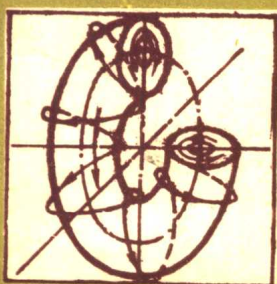


高等学校试用教材



机械制造工艺学

华中工学院孙 健 主编
天津大学曾庆福



机械工业出版社

高等学校试用教材

机械制造工艺学

华中工学院 孙 健
天津大学 曾庆福 主编



机械工业出版社

机械制造工艺学

华中工学院 孙 健 主编
天津大学 曾庆福

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $22 \frac{1}{4}$ · 字数 549 千字

1982 年 1 月北京第一版·1984 年 11 月北京第三次印刷

印数 61,001—75,500 · 定价 2.30 元

*

统一书号: 15033·5082

前 言

本书是根据1978年4月在天津召开的“高等学校—机部对口专业座谈会”的精神，和同年6月在大连召开的机械制造工艺及设备专业教材会议制订的《机械制造工艺学》编写大纲编写的。

全书共分加工精度、振动、尺寸链、精密加工工艺、精密零件加工工艺、工艺规程的制定以及自动线加工和成组加工工艺等七章。

根据编写大纲精神，在基本理论方面，适当增加了精度、统计分析、振动和尺寸链等方面的内容；在基本理论及精密工艺方面，尽可能地反映国内外的先进水平。并介绍了自动线工艺和成组加工工艺等内容。

本书可作为高等学校机械制造工艺及设备专业的试用教材，也可供从事机械制造专业的科技人员参考。

本书由华中工学院机制工艺教研室和天津大学机制教研室合编。华中工学院孙健同志任主编，天津大学曾庆福同志任副主编。全书由哈尔滨工业大学侯镇冰同志主审。参加本书编写的人员有：孙健（第一章第1、2、3、4和6节），曾庆福（第三章），余敏（第一章第5节、第六章），徐燕申（第二章），陈志祥（第四章第1、3、4、5节、第五章），席宏卓（第四章第2节），段守道（第七章）等同志。在本书的统稿、修改过程中，陈志祥同志作了大量的工作。

在本书初稿写成后，曾于一九七九年十月召开审稿会议，对初稿进行了认真的讨论。参加审稿讨论的有：哈尔滨工业大学侯镇冰、南京工学院霍少成、清华大学池去病、西安交通大学褚家麟、重庆大学许香穗、大连工学院王小华等同志，他们对初稿提出了不少的宝贵意见，翁善惠同志对全书进行了认真地审核，在此，谨向他们表示衷心地感谢。

由于我们水平有限，编写时间又很仓促，书中难免有不少缺点和错误，恳请读者批评指正。

作 者

一九八〇年十月

目 录

绪论	1	§ 4-5 无屑光整加工	194
第一章 机械加工的精度	2	第五章 精密零件加工工艺	203
§ 1-1 概述	2	§ 5-1 精密圆柱齿轮的加工	203
§ 1-2 工艺系统的几何误差	4	§ 5-2 精密蜗轮副的加工	225
§ 1-3 工艺系统力效应产生的误差	17	§ 5-3 精密丝杠的加工	242
§ 1-4 工艺系统热变形产生的误差	39	第六章 机械加工工艺规程的制定	266
§ 1-5 加工误差的综合分析	51	§ 6-1 概述	266
§ 1-6 保证和提高加工精度的途径	70	§ 6-2 工艺规程的作用	269
第二章 机械加工过程中的振动	79	§ 6-3 制定工艺规程的步骤	272
§ 2-1 概述	79	§ 6-4 零件的工艺分析	273
§ 2-2 机械加工过程中的受迫振动	89	§ 6-5 工件定位原理	275
§ 2-3 机械加工过程中的自激振动	94	§ 6-6 定位基准的选择	278
§ 2-4 减小切削自振的基本途径	110	§ 6-7 定位误差的分析	281
§ 2-5 磨削振动	118	§ 6-8 工件的夹紧	285
第三章 尺寸链	123	§ 6-9 工艺路线的拟定	289
§ 3-1 概述	123	§ 6-10 加工余量的确定	300
§ 3-2 尺寸链计算的基本公式	127	§ 6-11 时间定额	320
§ 3-3 工艺尺寸链的计算方法	140	§ 6-12 生产率与经济性	303
§ 3-4 装配尺寸链的计算方法	152	§ 6-13 制定工艺规程的实例	310
第四章 精密加工工艺和光整加工		第七章 自动线加工工艺和成组加工	
工艺	162	工艺	319
§ 4-1 精密切削加工	162	§ 7-1 自动生产线加工工艺	319
§ 4-2 精密磨削工艺	169	§ 7-2 成组加工工艺	334
§ 4-3 超精密加工的设备和环境条件		§ 7-3 使用电子计算机编制机械加工	
问题	174	工艺规程和设计工艺装备简介	347
§ 4-4 珩磨、超精研和研磨加工	177		

绪 论

机械制造业为国民经济中各部门提供机械装备。随着社会主义建设中各项事业的发展,需要机械制造业供应的产品品种数量日益增多,同时对产品质量的要求也越来越高。因此就要求机械制造业更迅速地发展,以满足四个现代化建设的迫切需要。

建国卅一年来,我国机械制造业在党的领导下,取得了很大的成绩,机械工业产品的生产(例如机床及工具、汽车、轴承、重型机械、农业机械、仪表等)具有相当的规模,已形成了产品门类基本齐全,布局比较合理的机械制造业体系。研制出一批具有世界先进水平的产品,不仅为国家生产建设提供了必要的装备,而且已开始进入国际市场。

粉碎“四人帮”以后,机械制造业与其他工业一样,正在四化道路上阔步前进。当前机械制造业的重点是放在提高产品质量、发展品种和提高机械产品的经济效益。

机械制造工艺学就是以机械制造中的工艺问题为研究对象的一门技术学科。由于生产中的工艺问题牵涉面极为广泛,因此机械制造工艺学一般仅讨论机械加工方面的工艺问题。要解决好机械制造工艺问题应从优质、高产、低消耗(即质量、生产率和经济性)等三个方面的指标来衡量。

随着科学技术的发展,宇航、军工、电子等工业对零件的加工质量和精度要求越来越高。要提高零件的加工质量,就必须深入研究在加工过程中各种工艺误差因素对加工质量影响的规律,同时需要通过大量的科学实验和生产实践,采用新工艺以及科学管理等措施来保证和提高加工质量。

其次,机械制造工艺另一个重要的发展趋势是不断地提高劳动生产率,即采用高效率的工艺方法和装备。精密工艺、成组加工工艺、自动线加工工艺以及计算机辅助制造等先进技术的应用使机械制造工艺进入一个新的阶段。

机械制造工艺中的经济性是与质量、生产率有密切联系的一个综合性问题。在给定的生产对象和技术要求的条件下,选择什么工艺方法和什么工艺设备来生产,就需要通过经济分析或经济论证加以确定。为了提高产品的制造质量或者提高劳动生产率而采用某种新的工艺方法和措施时,最后必须考察其所获得的经济效果如何。

质量、生产率和经济性三者具有辩证关系,在解决某一具体的工艺技术问题时,需要全面地加以考虑。

机械制造工艺学是机制工艺及设备专业的主要专业课程之一,通过本课程的学习,应使学生掌握机械制造工艺的基本理论知识,学会分析机械加工过程中产生误差的原因,对具体的工艺问题进行分析,并能提出改进质量、提高效率、降低成本的工艺途径。

同时,通过生产实习、课程设计、实验等教学环节的配合,使学生熟悉制定工艺规程的原则、步骤和方法,具有制订零件的工艺规程以及设计夹具的能力。对于机械加工中的新工艺、新技术和发展方向有一定的了解。

第一章 机械加工的精度

§ 1-1 概 述

一、加工精度的基本概念

机器零件很重要的一个质量指标就是机械加工精度，它的高低将直接影响整台机器的使用性能和寿命。随着机器的速度、负载的增高以及自动化生产的需要，对机器性能要求亦不断提高，因此保证机器零件具有更高的加工精度越显得重要。故在实际生产中，经常遇到和需要解决的工艺问题，多数是加工精度问题，因此深入地了解和研究加工精度的各种规律，相应地采取各种工艺措施，从而确保零件的加工精度，是机械制造工艺学的一项重要任务。

所谓加工精度是指零件在加工以后的实际几何参数（尺寸、几何形状和表面相互位置）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。反之，符合程度愈差，则加工精度也愈低。

生产实践告诉我们，任何一种加工方法，不论多么精密，都不可能将零件做得绝对准确，并同理想的完全相符。即使加工条件完全相同，制造出零件的精度也各不相同。从机器的使用性能来看，也没有必要把零件的尺寸、形状以及位置关系做得绝对准确。只要这些误差大小不影响机器的使用性能，就可以允许在一定的范围里变动，也就是允许有一定的误差存在。误差的大小实际上表明加工精度的高低。

我们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）之内，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。

二、获得规定的加工精度的方法

（一）获得尺寸精度的方法

机械加工中获得尺寸精度的方法有试切法、定尺寸刀具法、调整法及自动控制法等四种。

1. 试切法：试切法就是通过试切—测量—调整—再试切的反复过程来获得尺寸精度的方法。这种方法的效率较低，同时要求操作者有较高的技术水平。在单件及小批生产中常用此法。

2. 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、拉孔和攻丝等，加工精度与刀具本身的制造精度关系很大。

3. 调整法：按工件规定的尺寸预先调整机床、夹具、刀具与工件的相对位置，再进行加工。工件尺寸是在加工时自动获得的，在这种方法中，工件的加工精度在很大程度上取决于调整的精度。此法广泛应用于各类半自动机、自动机和自动线上，适用于成批及大量生产。

4. 自动控制法：这种获得尺寸的方法是用测量装置、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

承圈磨削自动线中,用无心磨床粗、精磨轴承圈外圆时,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),测量装置发出补偿讯号,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,当修整器往复次数达到预定次数后,进给装置使磨头架进行相应的补偿进给量。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。

近十多年来,由于数控机床的发展和应用,获得所规定的零件精度就更为方便,特别适用于零件的加工精度要求较高、形状比较复杂的单件、小批中批生产。在用数控法加工时,将有关操作程序的各种指令,以数字形式记录在纸带上,送入数控装置,然后发出指令讯号,通过伺服驱动机构使机床动作,来完成零件的加工,以达到规定的形状和尺寸精度。

(二) 零件的几何形状精度

对于零件的几何形状精度,主要由机床精度或刀具精度来保证。例如车削圆柱类零件时其圆度及柱度等几何形状精度,主要决定于主轴的回转精度、导轨精度以及主轴回转轴线与导轨之间的相对位置精度。又如在加工螺纹或齿轮时,零件的几何形状精度又和刀具精度以及各成形运动之间决定其速度关系的传动精度有关。

(三) 零件的相互位置精度

对于零件的相互位置精度,主要由机床精度、夹具精度和工件的安装精度来保证。例如,在车床上车削工件端面时,其端面与轴心线的垂直度决定于横向溜板送进方向与主轴轴心线的垂直度。又如在平面上钻孔,孔中心线对于平面的垂直度,决定于钻头送进方向与工作台或夹具定位面的垂直度。

零件的尺寸、几何形状及相互位置这三项精度指标,是紧密相互联系的。例如,为保证轴颈的直径尺寸精度,则该轴颈的圆度形状误差不应超出直径尺寸公差。一般几何形状误差应控制在相应的尺寸公差的 $1/2 \sim 1/3$ 以内。对于特殊功用的零件,某些表面的几何形状精度,可能有更高的要求。

为了获得零件的尺寸、形状及相互位置的精度要求,必须分析研究加工过程中影响精度的误差因素。

三、影响加工精度的误差因素

由机床、夹具、刀具和工件组成的工艺系统在完成任何一个工序(或一个工艺过程)的加工时,有很多误差因素在起作用,这些因素大致可分为两个部分:一部分是与工艺系统本身的结构和状态有关的因素;而另一部分则是与金属切削过程有关的因素。根据科学研究的归纳,我们可将产生加工误差的主要因素具体地分成三个方面:

(一) 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、刀具的安装误差等。

(二) 工艺系统力效应产生的误差——包括工艺系统弹性及塑性变形产生的误差(即工艺系统的刚度不足或变化所引起的误差),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。

(三) 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。

除了上述三个方面的误差因素以外,还有如加工方法的原理误差、测量误差等亦是影响零件加工精度的很重要的因素。

在加工过程中,上述的各种误差因素并不是在任何情况下都会出现,而且在不同的情况下,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。下面我们将逐一地来说明各种误差因素的性质、出现的规律、对加工精度的影响以及提高精度的措施。

§ 1-2 工艺系统的几何误差

一、机床的几何误差

机床的几何误差包括机床的制造误差、磨损和安装误差等几个方面。在这里,我们着重分析机床几何误差中对加工精度影响较大的主轴回转误差、导轨误差以及传动链误差。

(一) 主轴的回转误差

机床主轴的回转精度(回转误差的大小)是主轴系统特性之一(主轴系统特性包括回转精度、刚度、热稳定性以及振动等四个方面),它直接影响零件的加工精度。在理想的情况下,当主轴回转时,主轴回转中心线的空间位置是固定不动的。但实际上由于存在着轴颈的圆度、轴颈之间的同轴度、轴承之间的同轴度、主轴的挠度以及支承端面对轴颈中心线的垂直度等误差,这些误差都在不同程度上影响主轴的回转精度,使主轴的每一瞬时回转中心线的空间位置都发生变动。

过去衡量机床主轴回转精度的主要指标是主轴前端的径向跳动和轴向窜动,采用图1-1所示的方法来测量。此法虽简单,但不能反映主轴在真正工作速度下的回转误差以及它们对加工表面和加工精度的影响。而只能用来检验被测表面与主轴回转中心是否同心。除此种测量方法外,亦有采用测量试件来评定主轴回转误差的,但试件的测量结果是切削过程中很多因素诸如夹紧变形、振动、刀具磨损等的综合影响,要从中分出主轴回转误差的影响,是很困难的(有关主轴回转精度的动态测量参见测试技术课程)。

近年来对于高精度主轴,提出了控制主轴回转中心线的漂移以提高主轴的回转精度。主轴轴心线的漂移是由下列因素引起的:

1. 滑动轴承的轴颈与滚动轴承滚道的圆度误差(图1-2 a)。
2. 滑动轴承的轴颈或轴套与滚动轴承滚道的波度(图1-2 b)。
3. 滚动轴承滚子的圆度误差与尺寸差(图1-2 c)。

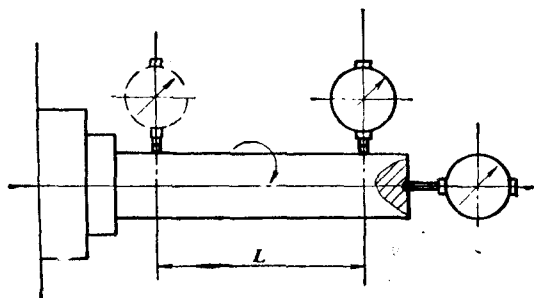


图1-1 主轴回转精度的测量方法

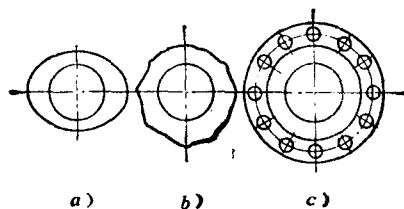


图1-2 轴承内圈及滚动体的几何形状误差

4. 有关零件在不同方向上的刚度不同。对于载荷同主轴一起旋转的主轴,有关零件是指固定不动的零件。例如轴承外圈、支承座、箱体等。对于载荷方向不变的主轴,是指主轴、

轴承内圈等。由于这些有关零件配合表面的几何形状误差及表面质量状况, 将使它们装配后在不同方向的刚度不同。

5. 轴承的间隙。将轴承预紧, 可消除间隙并减小滚道圆度、波度以及滚子圆度和尺寸差对轴心漂移的影响。

上述的一些因素是由多方面原因造成的, 一个原因也可能对几个因素有影响。首先, 要指出的是, 因为轴承圈是薄壁零件, 受力后极易变形, 当安装在主轴轴颈上或支承座孔中, 会因轴颈或座孔的圆度误差而产生相应的变形, 从而破坏了轴承原来的精度。所以, 如果把装配后工作时的轴承滚道的几何形状误差, 只理解为轴承滚道本身的制造误差是十分片面的。因此, 对于支承座孔与轴颈, 除控制其尺寸误差外, 还必须控制其几何形状误差。此外, 如轴承定位端面与轴心线不垂直、轴承端面之间不平行以及锁紧调整螺母端面有跳动等, 也都会引起轴承圈滚道的变形而降低主轴的回转精度。

主轴各轴颈的同轴度, 会使主轴轴心线弯曲而产生偏斜, 并使主轴端部锥孔、定心轴颈对回转轴心线产生偏心。

支承座孔之间的同轴度同主轴轴颈之间的同轴度的作用不完全相同。虽然两者都会引起主轴的弯曲、轴承圈的倾斜和内圈滚道正确形状的破坏, 但支承座孔的不同轴并不引起主轴端部锥孔和定心轴颈对回转轴心线的不同轴。

承受轴向力的轴承滚道的形位误差、滚子尺寸形状的误差以及主轴轴向定位端面与轴肩端面对轴心线的不垂直等误差因素都会引起轴向窜动。

由于上述各种因素的影响, 使主轴的实际回转轴心线对其理想的回转轴心线发生偏移, 这个偏移量就是主轴的回转误差。总之, 主轴回转误差可以分为三种基本型式: 纯径向跳动、纯角度摆动和轴向窜动(图1-3)。

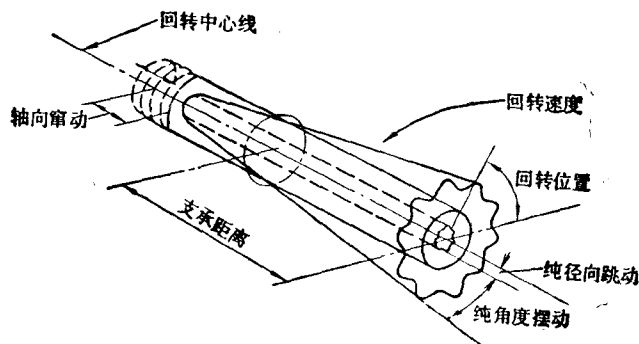


图1-3 主轴回转误差的基本形式

下面我们将进一步分析主轴回转误差对加工精度的影响。不同型式的主轴回转误差对加工精度的影响是不同的。同一型式的主轴回转误差对于不同的加工方法(如车和镗)的影响也不一样。下面就以几种典型的情况来说明这些影响。参看图1-4中,

在镗孔时, 如由于主轴回转时的纯径向跳动而使轴心线在与 X 坐标成 α 角的方向上作简谐直线运动, 其频率与主轴转速相同, 即 $f = \frac{\omega}{2\pi}$ (ω 为主轴的角速度), 简谐幅值为 A 。在某瞬间, 镗刀正处在 φ 的角度位置上, 而主轴中心则从回转中心的平均中间位置 O^* 点偏移了一个距离 h 。即

$$h = A \sin(\omega t + \varphi_0) = A \sin(\varphi + \varphi_0)$$

式中 φ_0 为初始相位角。

当 $t = 0$ 时, $h = A \sin \varphi_0$ 。由于主轴中心在 α 角方向偏移了一个 h , 就使得镗刀尖位置

* O_m 是指轴心跳动的最大半径与最小半径的平均值所作的圆心。

对于孔的名义半径 R 产生了径向误差 Δ , 其值为

$$\Delta = h \cos(\varphi - \alpha)$$

将 h 代入得:

$$\Delta = A \sin(\varphi + \varphi_0) \cos(\varphi - \alpha)$$

假设主轴的简谐运动是在水平方向 ($\alpha = 0^\circ$) 上, 因此在主轴中心是最大偏移 (即 $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$, $\varphi = 0^\circ$, $h = A \sin\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) = A$) 时, 镗刀尖通过其水平位置。那么当镗刀再转过一个 φ 角时, 此时刀尖轨迹的水平分量可以下式表示为

$$X = R \cos \varphi + A \cos \varphi = (R + A) \cos \varphi$$

其垂直分量为

$$Y = R \sin \varphi$$

根据水平分量 X 及垂直分量 Y 可得到镗刀尖在加工表面上的移动轨迹为

$$\frac{X^2}{(R + A)^2} + \frac{Y^2}{R^2} = 1$$

这是一个椭圆方程式。因此, 如果在镗孔时, 主轴回转具有纯径向跳动的误差时, 那么镗出的孔将是椭圆形的。

在车削过程中, 当主轴回转具有纯径向跳动误差时, 主轴中心的瞬时偏移距离 h 在 Z 向的误差分量对加工后工件圆度的影响很小。由图 1-5 可知, 如主轴回转中心的瞬时偏移 h 在 Z 向的误差分量为 ΔZ , 由此而产生的半径误差为 ΔR , 由图 1-5 得

$$(R + \Delta R)^2 = \Delta Z^2 + R^2$$

$$R^2 + 2R\Delta R + \Delta R^2 = \Delta Z^2 + R^2, \text{ 忽略 } \Delta R^2 \text{ 项得}$$

$$\Delta R \approx -\frac{\Delta Z^2}{2R}$$

设工件直径 $d = 100$ 毫米, $\Delta Z = 0.01$ 毫米, 则 $\Delta R = 0.001$ 微米。 ΔR 如此之小, 故完全可以忽略不计。但 h 在 Y 向 (径向) 的分量对半径则有直接影响, 它以 1:1 的关系转化为加工误差。一般精密车床的主轴径向跳动误差应控制在 5 微米以内。

主轴的轴向窜动对于加工内外圆柱面没有影响, 但在车床上车端面时, 如果主轴有轴向窜动, 则车出的端面与外圆不垂直。图 1-6 a 所示, 端面对轴心线的垂直度随切削直径的减小而增大:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{A}{R}$$

式中 A —— 主轴轴向窜动的幅值;

R —— 工件切削端面的半径;

θ —— 切削端面的斜角。

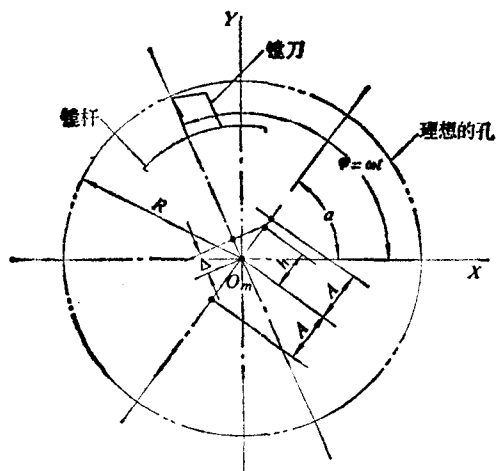


图1-4 纯径向跳动对镗孔精度的影响

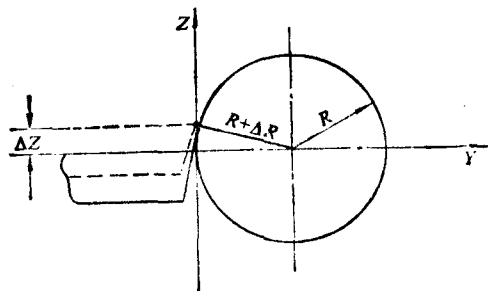


图1-5 Z向的误差分量 ΔZ 产生的加工误差

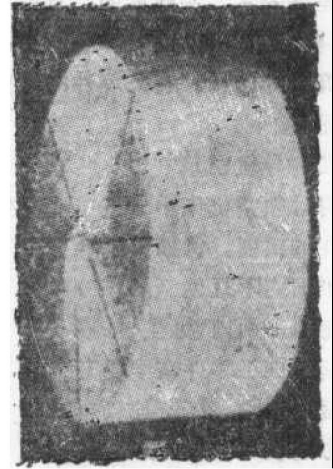
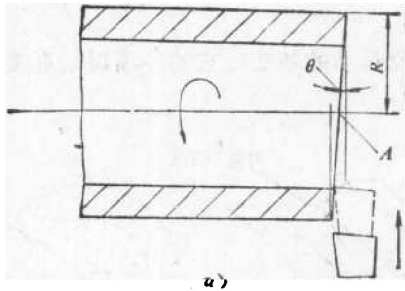


图1-6 轴向窜动对端面加工的影响

当 $R \approx 0$ 处，在端面中心附近出现一个凸台（图1-6 b）。在加工螺纹时，由于主轴的轴向窜动将使单个螺距产生周期误差。精密车床的轴向窜动量规定在 $2 \sim 3$ 微米，甚至更严。

至于机床主轴回转时的纯角度摆动误差对加工精度的影响，随机床类型和误差存在的情况而异。车外圆时，由于车床主轴的纯角度摆动的存在，得到一个锥体，而不是一个圆柱体。在镗床上镗孔时，由于镗床主轴有纯角度摆动，而且回转轴心线的平均位置 O_m 与工作台导轨不平行，即 O_m 与工件孔的轴心线 O 不同轴，镗出的孔将是椭圆形的，如图1-7所示。

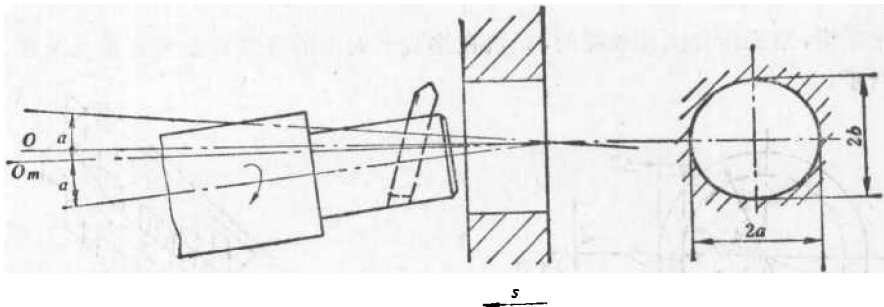


图1-7 纯角度摆动运动误差对镗削加工精度的影响

O_m —主轴回转轴线的平均位置 O —工件孔的轴心线，它与工件进给方向平行

以上分析了主轴的回转误差在车、镗加工中对加工精度的影响。在外圆磨削加工中，由于作为定位基准件的前后顶尖都是不转的，能起定心作用，可以避免工件头架主轴回转误差的影响。至于砂轮头架主轴的径向跳动、轴线的漂移等因素不会引起工件的圆度或锥度等几何形状误差，但会产生棱圆度和波度，降低表面质量。

由上述分析可知，主轴的回转精度对加工精度的影响是十分显著的。为了提高主轴的回转精度，在滑动轴承方面，广泛采用静压轴承、三瓦球面支承的动压轴承以及三瓦的弹性轴承等结构。在滚动轴承方面，除了根据机床精度的等级选择相应精度等级的轴承外，要相应地确定如轴颈、支承座孔、调整螺母等有关零件的精度以及轴颈与内圈、支承座孔与外圈的

配合公差等要求。实践证明,只有当主轴、支承座孔以及有关零件都制造、装配得很精确时,高精度的轴承才能发挥其作用,主轴才可能获得很高的回转精度。有关主轴部件滚动轴承精度等级的选择、有关零件的精度及配合要求以及合理的装配方法可参见有关手册,这里不再详述。

(二) 导轨误差

床身导轨是机床中一些主要部件的相对位置以及运动的基准,它的各项误差直接影响被加工零件的精度。例如车床导

轨在水平面内不直度(图1-8)使刀尖在水平面内发生位移 Y ,引起被加工零件在半径方向的误差为 ΔR 。在车削较短零件时影响较小。若车削长轴,这一误差将明显地反映到工件的直径上而形成锥形、鼓形或鞍形。在磨削长工件的外圆时,如磨床导轨在水平面内

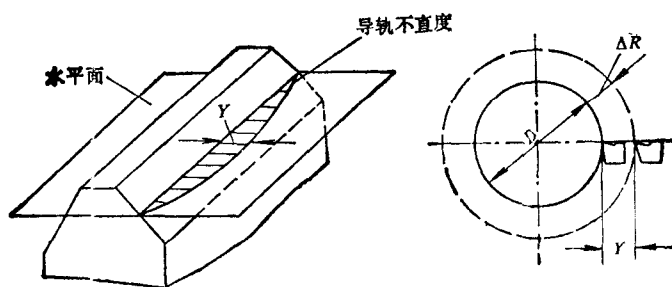


图1-8 车床导轨在水平面内不直度引起的误差

有直度误差,当刚性较差的工作台贴合在床身导轨上作往复运动,其运动轨迹便受导轨直度误差的影响。当导轨直线性误差凹向砂轮架时,工件被磨成鞍形。反之,则磨成腰鼓形。同时在工件表面产生螺旋线,影响工件的表面质量。

车床导轨在垂直平面内直度误差,将引起刀尖产生 ΔZ 的误差,如图1-9所示,产生的半径方向的误差为 $\Delta R \approx \frac{\Delta Z^2}{d}$,对零件形状误差的影响较小。但对于龙门刨床、龙门铣床及导轨磨床来讲,当工作台刚性较差时,导轨在垂直平面内的直度误差将直接反映在工件上,如图1-10所示。

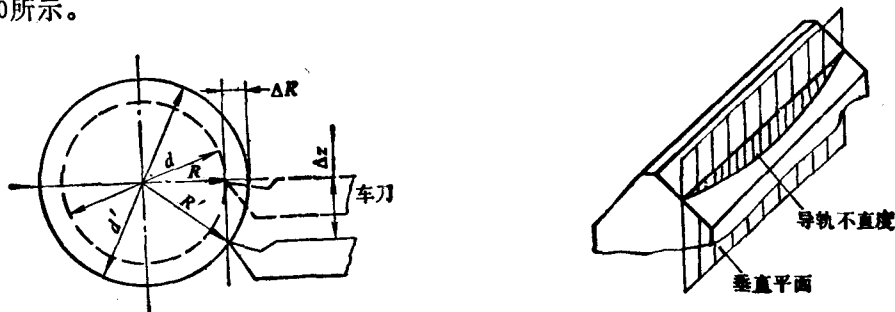


图1-9 车床导轨在垂直平面内不直度引起的误差

由于两导轨面在垂直平面内的平行度误差(扭曲度),会使车床溜板在沿床身移动时发生偏斜,从而使刀尖相对于工件产生偏移,影响加工精度。对于外圆磨削,由于床身导轨在垂直平面内的不平行,使工作台运动时产生倾斜,工件中心变动,因而引起工件的几何形状误差。

当车床导轨与主轴回转中心在水平面内不平行,车出的内、外圆柱面就会有锥度。如在垂直平面内两者不平行时,则加工出双曲线回转体的表面,如图1-11所示。但其误差数值是很小的。

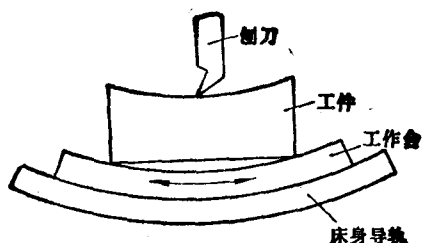


图1-10 龙门刨床导轨在垂直平面内不直度引起的误差

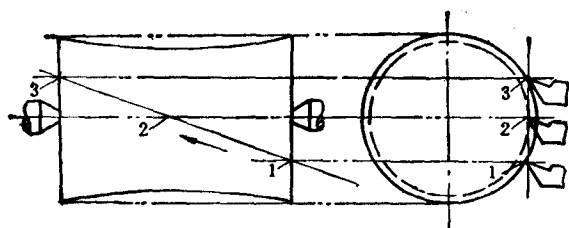


图1-11 主轴回转中心与导轨在垂直平面内不平行时的加工误差

上面的分析说明了机床导轨误差对加工精度的影响。

机床在使用过程中，由于机床导轨磨损不均匀，会使导轨产生直度、扭曲度等误差，这些误差对加工精度的影响是很大的。机床的磨损与机床工作的连续性、负荷特性以及工作条件有关，一般普通车床在两班制条件使用一年后，三角导轨面的磨损量可达0.04~0.05毫米。在粗加工的条件下，磨损量甚至可达0.10~0.12毫米。对于经常加工铸铁零件的车床，导轨磨损更大。当然，磨损量最大的地方一般都在导轨中部。

由于机床安装得不正确，即安装水平调整得不好，会使床身产生扭曲，破坏导轨原有的制造精度，从而影响加工精度。例如顶尖距为一米的C620型车床，由于安装不正确引起的扭曲度可达0.22毫米。对于床身较长的龙门刨床、导轨磨床等，床身结构细长，刚性差，在本身自重的作用下容易产生变形，如果再安装得不正确，或地基搞得不好，都会使床身扭曲，产生误差。

为了减少机床导轨误差对加工精度的影响，在设计和制造时，应从结构、材料、润滑方式、保护装置等方面采取相应的措施。同时在使用过程中，要保证地基和安装质量，细心维护和注意润滑，严格遵守操作规程。

(三) 传动链误差

传动链的误差会影响刀具运动的正确性，在某些情况下，它是影响加工精度的主要因素。例如滚切齿轮时，需要保持严格的运动关系，即要求滚刀的转速和工件的转速之比恒定不变，保持下列关系：

$$\frac{n_d}{n_g} = \frac{Z_g}{K}$$

式中 K ——滚刀头数；
 n_d ——滚刀每分钟转速；
 n_g ——工件每分钟转速；
 Z_g ——工件齿数。

但当传动链中的传动元件（如滚切挂轮、分度蜗轮副等）有制造误差和装配误差以及在使用过程中有磨损时，就会破坏正确的运动关系，使滚出的齿轮产生误差（如周节误差、周节累积误差及齿形误差等）。因此，机床传动链的传动精度，首先取决于各传动元件的制造和装配精度，但各元件在传动链中的位置不同，对传动精度的影响也不同。图1-12所示为Y3180E滚齿机的滚切传动链，在滚切齿轮时，滚刀与工件的正确转速比应为 $\frac{Z_g}{K}$ 。若滚刀

等速转动, 而滚刀轴上的齿轮由于制造和装配误差在某一时刻产生的转角误差 $\Delta\varphi_1$, 则它所造成的在传动链末端元件 (工作台或工件) 的转角误差 $\Delta\varphi_g$ 为

$$\Delta\varphi_g = \frac{80}{20} \times \frac{23}{23} \times \frac{28}{28} \times \frac{28}{28} \times \frac{42}{48} \times i_o \times \frac{e}{f} \times i_x \times \frac{1}{84} \times \Delta\varphi_1 = i_{1g} \Delta\varphi_1$$

式中 i_x 、 i_o 分别为滚切挂轮及差动机构的传动比, i_{1g} 为滚刀轴上的齿轮到分度蜗轮的总传动比。上式说明, 传动元件的转角误差乘上该传动元件至末端元件之间的总传动比, 就等于末端元件的转角误差。 i_{1g} 反映了第一个传动元件转角误差对传动链精度的影响。因此, 亦可以称为误差传递系数, 以 K_1 表示, 如果 K_1

大于 1 (即升速传动), 则误差就被扩大, 如 K_1 小于 1 (即降速传动), 则误差被缩小。传动链中所有传动元件的误差都将按这个规律传递到末端元件。在滚切传动链中, 从滚刀到分度蜗轮中间有许多对传动齿轮, 对传动链精度影响最大的是末端传动元件——分度蜗轮, 它的转角误差直接反映到工作台 (工件) 上, 而所有中间传动齿轮副的误差, 在最后经过蜗轮副的大降速比后, 对加工精度的影响就变得很小了。下面我们将进一步分析传动链误差的性质及其变化的规律, 以便找出提高机床传动链精度从而提高加工精度的措施。

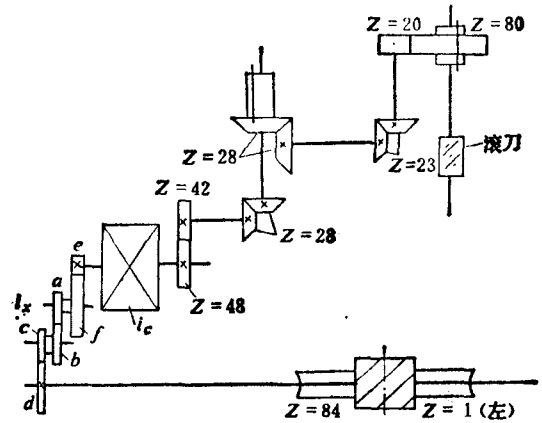


图1-12 Y3180E 滚齿机的滚切传动链

对于机床传动链中各传动元件的转角误差 $\Delta\varphi_i$ 一般都是时间 (转角) 的周期函数 (在测量传动链转角误差时, 转角误差曲线是有规律的, 每经过一段时间, 误差曲线的轨迹总是重复的), 当传动齿轮存在几何偏心或运动偏心时, 转角误差可以一正弦函数来表示, 即

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_i &= f(t) = A_i \sin(\varphi_i + \alpha_i) \\ &= A_i \sin(2\pi f_i t + \alpha_i) \end{aligned}$$

式中 A_i ——第 i 个传动元件转角误差的幅值 (或称为误差向量的模);

α_i ——第 i 个传动元件误差向量的初始相位角;

f_i ——第 i 个传动元件误差向量的频率。

如果把 $\Delta\varphi_i$ 转化为末端元件 (工作台) 的转角误差, 则得

$$\Delta\varphi_g = K_i \Delta\varphi_i = K_i A_i \sin\left(\frac{2\pi f_g t}{K_i} + \alpha_i\right)$$

令 $m_i = \frac{1}{K_i}$, 上式可写成

$$\Delta\varphi_g = K_i A_i \sin(2\pi m_i f_g t + \alpha_i)$$

此式说明, 对于转角误差幅值为 A_i 和频率为 f_i 的第 i 个传动元件, 其正弦误差将使末端元件 (工作台) 产生幅值为 $K_i A_i$ 、频率为 $m_i f_g$ 的正弦误差, 这就是传动链误差的 m_i 次谐波分量。这时, 第 i 个传动元件每转重复一次的转角误差在末端元件 (工作台) 一转中重复出现 m_i 次。至于分度蜗轮的转角误差则以 1:1 地反映到工作台上, 它的正弦误差称之为基波分量。根据传动链误差的周期函数性质, 可以用下面一个三角多项式来表示传动链的转

角误差, 即

$$\begin{aligned}\Delta\varphi_g &= K_1 A_1 \sin(m_1 \varphi_g + \alpha_1) + K_2 A_2 \sin(m_2 \varphi_g + \alpha_2) \\ &+ \cdots \cdots + K_n A_n \sin(m_n \varphi_g + \alpha_n) \\ &= \sum_{i=1}^n K_i A_i \sin(m_i \varphi_g + \alpha_i)\end{aligned}$$

上式说明, 滚齿机传动链的传动误差是其末端元件 (工作台) 转角 φ_g 的一个复杂的周期函数, 其中包括各种频率的误差成分 ($f_1 = \frac{n_1}{60}$, $\cdots \cdots f_g = \frac{n_g}{60}$, 式中: $n_1 \cdots \cdots n_g$ 为传动链中各传动元件的转速), 我们可以应用误差频谱图来表示传动链的误差, 误差频谱图的横座标表示各次误差谐波的频率, 纵座标表示各次误差谐波的幅值; 如图 1-13a 所示。当转动滚齿机的滚刀轴来测量工作台的转角误差, 就可得到一条传动链的误差曲线 (图 1-13b)

(可以采用精密多面体和经纬仪的静态测量方法或者应用磁分度仪和光栅仪等动态测量方法来测得传动链的误差)。如果将其各种频率成分的误差分量分解出来, 作出频谱图, 就可以判断每种误差分量来自传动链中的哪一个传动元件, 并可根据其大小找出影响传动误差的主要环节, 这就是传动误差的谐波分析法。我们知道, 谐波分析的基础是富里叶级数或富里叶变换, 任何一个周期函数都可以展开成有限富氏级数。因此, 作为工作台转角 φ_g 的周期函数的传动链误差 $\Delta\varphi_g$ 就可以用富氏级数来表示。应用谐波分析法就是根据实际的传动链误差, 求其各次谐波的幅值 A_i 和初始相位角 α_i 。基本方法可分为模拟分析和数值分析两类。采用模拟分析时, 可以应用实时模拟式频谱分析仪, 其原理如图 1-14 所示。当滚齿机的转角误差经传感器变为电压信号, 放大后经滤波电路, 把各次谐波分解开来, 然后经检波和积分电路, 再经过开关逻辑电路顺次取样, 获得相应的各次谐波的幅值, 最后在萤光屏上显示出频谱图来。

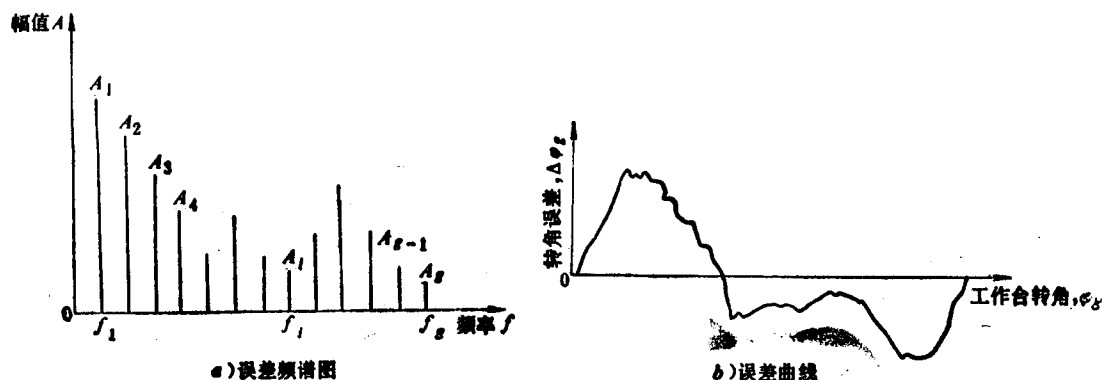


图1-13 传动链误差曲线及误差频谱图

应用数值分析法时可以采用快速富里叶分析仪。当要求的最高谐波次数不大时, 也可粗略地进行手算 (具体算法请参见有关专著*)。

为了减少机床传动链误差对加工精度的影响, 可采取下列措施:

* 冯 康: 谐波分析《计算机与应用数学》, 1977, №11。

陈仲仪: 机床传动链误差频谱《浙江大学学报》, 1978, №3, 1979, №2, 快速富里叶变换算法《计算机与应用数学》, 1974, №2。

1. 减少传动链中的元件数目, 缩短传动链, 以减少误差来源。例如图1-15所示是一台在大批量生产中应用的精密螺纹磨床的传动系统。机床可换母丝杠与被加工工件在同一轴线上串联起来, 母丝杠螺距与工件螺距相同, 这样传动链最短, 传动元件最少。又如加工高精度分度蜗轮的蜗轮母机, 比起一般的精密滚齿机的分度传动链要短得多。

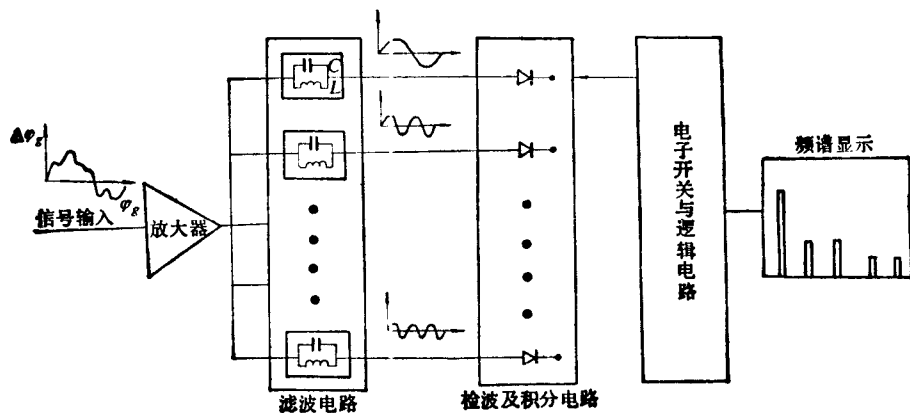


图1-14 频谱仪工作原理

2. 提高传动元件, 特别是末端传动元件的制造精度和装配精度。根据某些资料分析, 滚齿机上切出的工件齿轮的周节误差及周节累积误差, 大部分是由分度蜗轮副引起的。所以齿轮加工机床的分度蜗轮副是影响加工精度的一大关键。通常分度蜗轮副的精度等级应比被加工齿轮要求的精度高1~2级, 同时末端传动副的降速比取得越大, 则传动链中其余各传动元件的误差影响也就越小。如某台精密滚齿机的蜗轮齿数为665, 有的甚至更多; 而其运动精度可达3级以上。

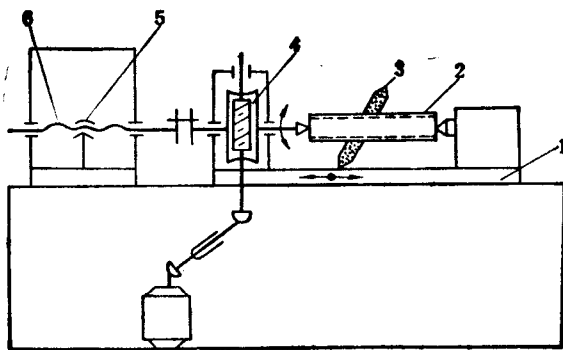


图1-15 精密螺纹磨床的传动系统

1—工作台 2—工件 3—砂轮 4—传动蜗轮副
5—螺母 6—可换母丝杠

3. 消除间隙。传动链齿轮间存在的间隙, 同样会影响末端元件的瞬时速度不均匀、速比不稳定。数控机床的进给系统中, 在反向时, 如果传动链中存在间隙, 就会使进给运动反向滞后于指令脉冲, 造成反向死区而影响其传动精度。因此必须采用消除齿轮传动间隙的措施。

常见的有双片薄齿轮错齿调整结构。在两个啮合的圆柱齿轮副中, 其中一个为宽齿轮, 另一个是由两薄片组成的齿轮, 再附加某些结构, 使一个薄片齿轮的齿左侧和另一个薄片齿轮的齿右侧, 分别紧贴在宽齿轮的齿槽左、右两侧, 从而消除间隙。图1-16所示为可调拉簧式结构, 在两个薄片齿轮1和2上, 各分别装四个有螺纹的凸耳4与8, 弹簧3的一端钩在凸耳4上, 另一端钩在螺钉5上。弹簧3所受的张力大小可分别用螺母6和7来调整及锁紧, 从而达到消除间隙的目的。在锥齿轮及蜗轮副传动链中, 为了消除齿侧间隙, 均可采用类似的方法。