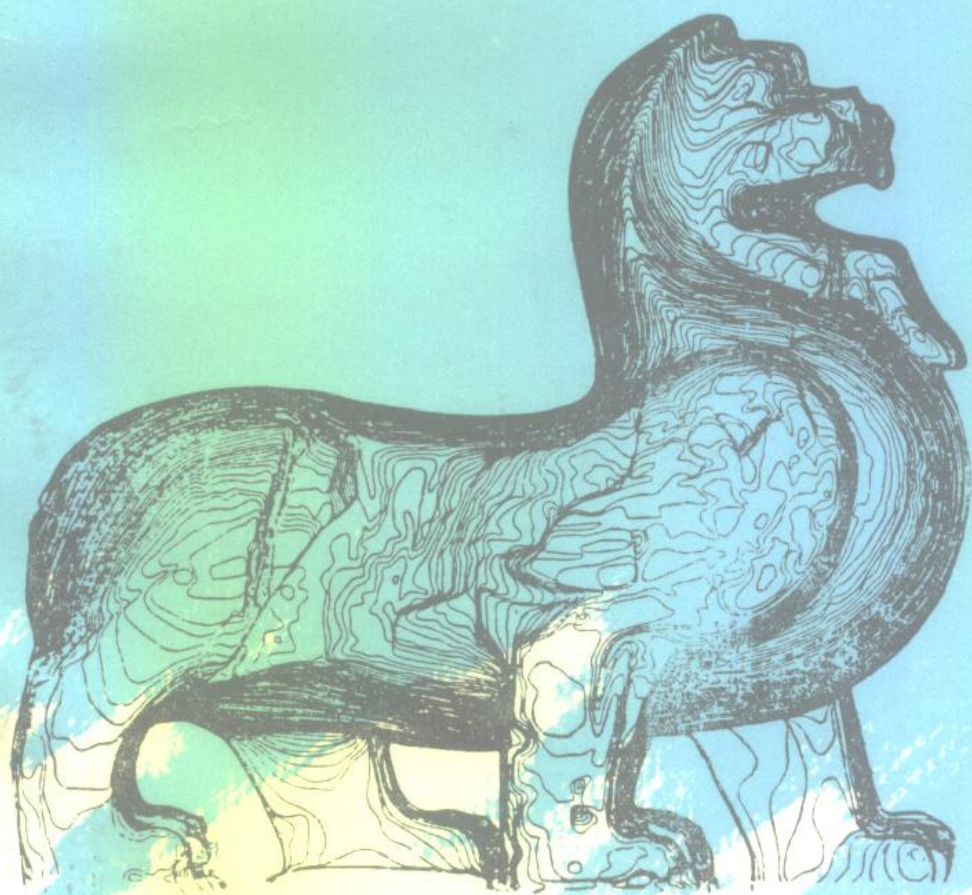


高等工科院校适用

机械制造工艺学

南京机械高等专科学校

张龙勋 主编



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书包括机械加工精度、机械加工表面质量与振动、尺寸链、齿轮加工精度分析、机械加工工艺过程的生产率和经济性、机械制造工艺的新发展等六章。

为适应教学改革要求,本书侧重于讲述机械制造工艺理论基础,力求简洁、精炼,同时反映一些新技术,如尺寸链中除介绍了工艺、装配尺寸链外,还介绍了适于CAPP使用的尺寸式法以及超精密加工、特种加工技术、GT和CAPP的基本原理等。

本书为高等专科学校“机械制造”、“机电一体化”专业教材,也可用作电大、职大教材,并可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械制造工艺学/张龙勋主编.——北京:机械工业出版社,1995.8

高等工科院校适用
ISBN 7-111-04634-3

I. 机… I. 张… I. 机械制造工艺-高等学校-教材
IV. TH16

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第03361号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)
责任编辑:林松 版式设计:霍永明 责任校对:姚培新
封面设计:郭景云 责任印制:王国光
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
1995年8月第1版·1995年8月第1次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·9.75印张·234千字
0 001-3 100册
定价:9.80元

前 言

本课程为机械制造工艺与装备专业的主要专业课之一，是我校两段式教学配套教材的一部分。它是《机械加工工艺基础》的直接延伸与深化，内容是根据我校两段式教学计划和教学大纲的要求而编写的。授课学时约45~50学时。它是在学完全部技术基础课及第一阶段基础专业课并完成了金工实习、认识实习的基础上进行教学的。它将研究机械加工中的主要工艺技术问题，分析其规律及对加工过程的影响以达到从质量、生产率和经济性三方面来对具体工艺问题进行综合分析的目的。学生学完本课程后期望能达到下述要求：

(1) 掌握机械制造工艺的基本理论知识。

(2) 学会分析机械加工过程中产生误差的原因，并能提出改进质量、提高效率、降低成本的工艺措施。

(3) 通过课程设计的练习，能具有制订较复杂的工艺规程及夹具设计的能力。

(4) 对机械制造的新工艺、新技术、新发展有所了解。

在编写上为了适应目前学生学习特点，采用一种提纲挈领的笔记式方式，使标题明确、内容突出、文字简练。

全书共分六章：第一章机械加工精度，着重讲述各种误差因素对加工精度的影响；第二章机械加工表面质量与振动，着重介绍了一些影响表面质量的工艺因素；第三章尺寸链，主要通过工艺尺寸链的讲述，解决工序尺寸与公差的正确确定问题，同时结合装配尺寸链，介绍了装配及装配方法；第四章齿轮加工精度分析，齿轮是机械加工中常见的一种精密零件，本章目的在于以滚齿加工为代表，对精密零件的加工误差产生和影响因素运用所学过的理论进行综合分析；第五章机械加工生产过程的生产率和经济性，着重介绍了一些有关生产率与经济性方面的基本理论知识；第六章机制工艺的新发展，目的使学生对部分新工艺、新技术有一初步了解，为学生选修课程和今后工作中可能接触到的新技术作了介绍。每一章末尾附有供教学使用的习题和思考题，便于学生课外练习使用。

本书系高等专科学校教材，也适用于职工大学，职业大学以及中等专业学校同类专业师生使用，也可作为各种中、高级工艺短训班教材使用，及供有关工程技术人员参考。

参加本书编写的有南京机械高等专科学校张龙勋（第一、三、五、六章），瞿燕南（第二章），季民达（第四章），由张龙勋任主编。

本书由哈尔滨工业大学王启平教授主审，其间提出不少宝贵意见，在此致以衷心谢意。限于编者水平，本书在体系、内容方面难免有不当之处，恳请读者予以批评、指正。

编者

1994年12月

目 录

前言

第一章 机械加工精度	1
第一节 概述	1
第二节 加工原理误差	5
第三节 工艺系统的几何误差	5
第四节 工艺系统受力变形引起的加工误差	15
第五节 工艺系统热变形引起的加工误差	30
第六节 加工误差的统计分析法	35
第七节 加工精度的综合分析	47
复习题	50
第二章 机械加工表面质量与振动	53
第一节 机械加工表面质量	53
第二节 影响表面粗糙度的因素及控制	55
第三节 影响表面层物理力学性能的因素及控制	58
第四节 机械加工中的受迫振动	63
第五节 机械加工中的自激振动	68
复习题	77
第三章 尺寸链	78
第一节 工艺尺寸链的查找	78

第二节 尺寸链的解算	83
第三节 计算示例分析	86
第四节 装配概述	93
第五节 装配方法与装配尺寸链	96
复习题	104
第四章 齿轮加工精度分析	109
第一节 概述	109
第二节 滚齿	109
第三节 滚齿精度分析	111
复习题	119
第五章 机械加工工艺过程的生产率和经济性	120
第一节 高产与低耗	120
第二节 生产率分析	122
第三节 经济性分析	126
复习题	129
第六章 机制工艺的新发展	130
第一节 概述	130
第二节 成组技术	134
第三节 计算机辅助工艺过程设计	143
第四节 数控工艺与编程	147
复习题	149
参考文献	150

第一章 机械加工精度

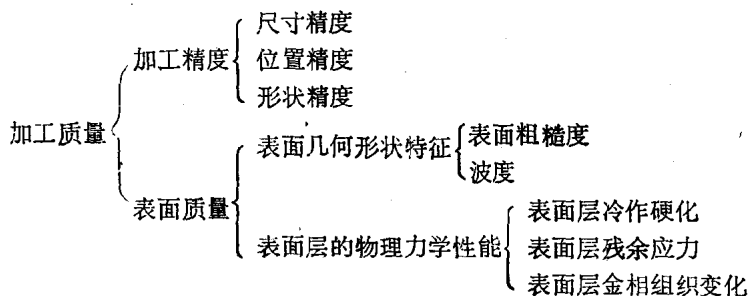
第一节 概 述

搞工艺的人可以说是生活在一个充满误差的世界里，车间里遇到的一些所谓工艺问题也往往是一些与误差息息相关的质量问题。工艺人员的主要任务之一，就是找出产生误差的原因，弄清它们与加工误差之间的定性乃至定量关系，采取针对性的措施减少或者消除它，从而提高加工质量。

一、加工精度与加工误差

1. 加工质量

零件的加工质量直接影响机械产品的使用性能和寿命。它包含以下一些内容，



其中，表面质量是我们下一章研究的内容，本章我们将着重研究加工精度问题。

2. 加工精度与加工误差

加工精度是指零件加工后的实际几何参数（尺寸、形状及相互位置）与理想几何参数符合的程度（分别为尺寸精度、形状精度及相互位置精度）。其符合程度愈高，精度愈高。反之，两者之间的差异即为加工误差。所谓“理想几何参数”是一个相对的概念，对尺寸而言，其配合性能是以两个配合件的平均尺寸造成的间隙或过盈考虑的，故一般即以给定几何参数的中间值代替之。如：轴的直径尺寸标注为 $\phi 100_{-0.05}^0 \text{mm}$ ，其理想尺寸为 $\phi 99.973 \text{mm}$ ；而对理想形状和位置，则应为准确的形状和位置。可见，“加工误差”和“加工精度”仅仅是评定零件几何参数准确程度这个问题的两个方面而已。实际生产中，加工精度的高低往往是以加工误差的大小来衡量的。

在生产中，任何一种加工方法不可能、也没必要把零件做得绝对准确，只要把这种加工误差控制在性能要求所允许的范围（公差）之内即可。所以，人们常说：在制订技术要求时，应以最低的精度、大的表面粗糙度满足最高的性能就是这个道理。

3. 经济加工精度

任何一种加工方法，可获得的加工精度均有一个相当

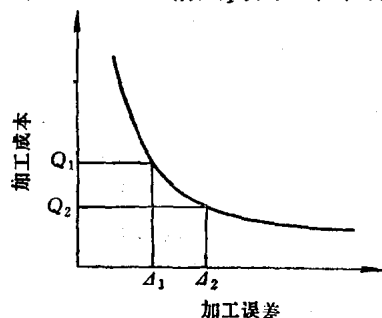


图1-1 加工误差与加工成本的关系

大的变动范围。但是，不同的精度要求（误差大小）所花费的加工时间、加工成本也不尽相同，它们的关系如图1-1所示。

其中 Δ_1 — Δ_2 之间既可满足技术要求又不必花费过高的成本。这种较易得到的、能经济地达到的加工精度，即称为该加工方法的经济加工精度。

二、获得规定的加工精度的方法

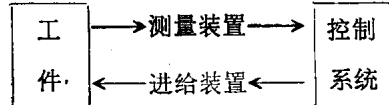
1. 获得尺寸精度的方法

(1) 试切法 依靠试切—测量—调整—再试切，反复进行直至工件尺寸合格为止。这种方法效率低，对操作者技术水平要求较高，适用于单件小批生产。

(2) 调整法 按工件规定的尺寸预先调整好机床—刀具—夹具—工件之间的相互位置，在加工中自行获得一定的尺寸精度。如自动车床用凸轮和档块进行加工的方法。这种方法，零件的加工精度在很大程度上取决于调整精度。

(3) 定尺寸刀具法 用具有一定形状和尺寸的刀具进行加工，使加工表面得到与刀具相吻合的形状和尺寸，如钻孔、拉削等。这种方法所得到的加工精度与刀具本身制造精度关系很大。

(4) 自动控制法（主动测量法） 用一定的装置，一边加工一边自动测量，当工件达到要求的尺寸时即自动停止加工。例如在磨外圆时使用的自动配磨仪。它可以用右面的框图表示：



2. 获得形状精度的方法

(1) 轨迹法 这种方法利用刀具与工件之间的相对运动轨迹来获得工件的形状。例如车削外圆面、圆锥面、曲线回转面等。

(2) 成形法 利用具有一定形状的刀刃的成形刀具代替通用刀具直接在工件表面上加工出对应的成形表面。如：用三角形螺纹刀车螺纹，拉削成形表面等。

(3) 展成法 利用工件和刀具间的相对运动关系使工件被刀具切削成一定形状的包络表面。例如滚齿加工齿轮轮齿所形成的渐开线表面。

形状精度的高低主要取决于：

1) 机床精度 如车削时主轴回转精度影响了工件的圆度；导轨的直线度影响了工件的圆柱度。

2) 刀具精度 如齿轮滚刀的制造精度影响了工件的齿形精度等。

3. 获得位置精度的方法

(1) 划线、找正法 这种方法生产率低，精度不高，一般划线找正误差 $>0.1\text{mm}$ 。

(2) 夹具安装定位法 这种方法不仅生产率高、精度高，而且操作省力方便。

影响位置精度的主要因素是：①机床精度；②夹具制造安装精度；③工件安装（划线）精度。

尺寸、形状、位置精度三者之间常常相互影响，有密切联系。因此，在设计机器零件和规定加工精度时，常常把形状误差控制在位置公差之内，把位置误差又控制在尺寸公差之内。通常将零件表面的几何形状误差和位置误差控制在相应尺寸公差的 $1/2\sim 1/3$ 以内。

三、研究加工精度的方法

1. 因素分析法

这种方法仅仅针对某一确定的工艺因素对加工精度的影响进行讨论，这时，一般不考虑其他因素的作用。所以，也称为单因素分析法。

2. 统计分析法

在生产现场,将产品抽样检测,用数理统计方法给以处理,从中找出误差产生与分布的规律,这种方法统称为统计分析法。

实际生产中常常将两种方法综合运用。用统计分析法找出误差产生与分布的规律,分析其原因,找出主要影响因素,再将此因素进行单项试验,以便迅速而准确地找到影响加工精度的主要原因,便于采取有效的工艺措施。

四、影响加工精度的原始误差

1. 工艺系统

机械加工时,工件和刀具分别安装在夹具和机床上。因此,由机床—夹具—工件—刀具所组成的相互联系的封闭系统,称为机械加工工艺系统。

2. 原始误差和加工误差

引起工艺系统各环节间相互位置相对于理想状态产生偏移的各种因素称为原始误差。由于这种偏离使加工后的工件产生了加工误差。两者是一种因果关系,即加工误差产生的原因是工艺系统原始误差;而原始误差使工艺系统的几何关系遭到破坏从而带来了加工误差。

但两者又有所区别。各种原始误差的大小和方向可能各不相同,而加工误差则必须在工序尺寸方向上度量。例如图 1-2 所示车削圆柱面。刀尖因某种原因发生的变形由 A 位移到 A' , 这里,原始误差为 $\overline{AA'} = \delta$, 取向与 \overline{OA} 夹角为 φ 。加工后,工件半径产生了加工误差 ΔR

$$\begin{aligned}\Delta R &= R - R_0 = \overline{OA'} - \overline{OA} \\ &= \sqrt{R_0^2 + \delta^2 + 2R_0\delta\cos\varphi} - R_0\end{aligned}$$

3. 误差敏感方向

在上例中,若刀尖沿着半径方向 (y 向) 偏移一个 δ , 即刀尖原始误差方向是在工件被加工表面的法向上, 此时 $\varphi = 0$ 。这时产生的加工误差是最大值 $\Delta R = \delta$ 。反之,若刀尖沿工件被加工表面的切向 (z 向) 产生同样大小的原始误差 δ , 这时 $\varphi = 90^\circ$ 。

此时产生的加工误差系最小值 $\Delta R \approx \frac{\delta^2}{2R_0}$, 由于它是一个高阶微小量, 一般可以忽略不计。

通常,将原始误差对加工精度影响最大的方向(如上例的 y 向)称为误差敏感方向。它也就是被加工表面的法向。反之,则称之为误差不敏感方向(如上例的 z 向)。一般是被加工表面的切向。在研究加工精度时应着重分析原始误差在误差敏感方向上的影响。

4. 影响加工精度的原始误差

让我们以下面这个例子来粗略地剖析一下。

若有一台机床床身,经机械加工后发现床面中部凹陷(简称中凹)如图 1-3a 所示。试分析可能有哪些原始误差会造成这种加工误差。我们可从以下几方面看:

(1) 毛坯误差 当床身毛坯即为中凹时,在龙门刨上加工时只粗略地刨过一次,在刨削时刨刀在切削力的垂直分力作用下向上让刀,两边切削层厚,切削力大让刀也大;中间切削层薄,切削力小让刀也小,加工后这种毛坯的中凹现象仍在一定程度上被保留了下来,如图 1-3b 所示。

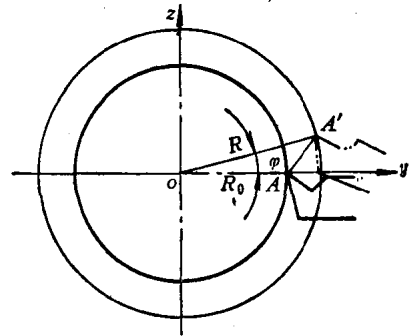


图 1-2 原始误差与加工误差的关系

(2) 工件安装 当床身被夹紧在龙门刨床的工作台上,若夹紧力 F_w 作用在如图1-3c所示的位置上,如果 F_w 过大,可能使床身产生中凸变形,切削加工时刚好切平,而工件被松开后,由于回弹使床身发生中凹。

(3) 工作母机 当龙门刨床的导轨有中凹误差,工作台按图1-3d所示产生直线运动误差,工件中部切削层深造成中凹。

(4) 受热变形 伴随上表面的加工产生大量切削热,这种热使上表面膨胀比床身下部大而发生床面中凸的热变形。在加工时上表面切平了,而一旦冷却下来又会收缩,而中部因多余地切除了热变形后的金属层而出现下凹。如图1-3e所示。

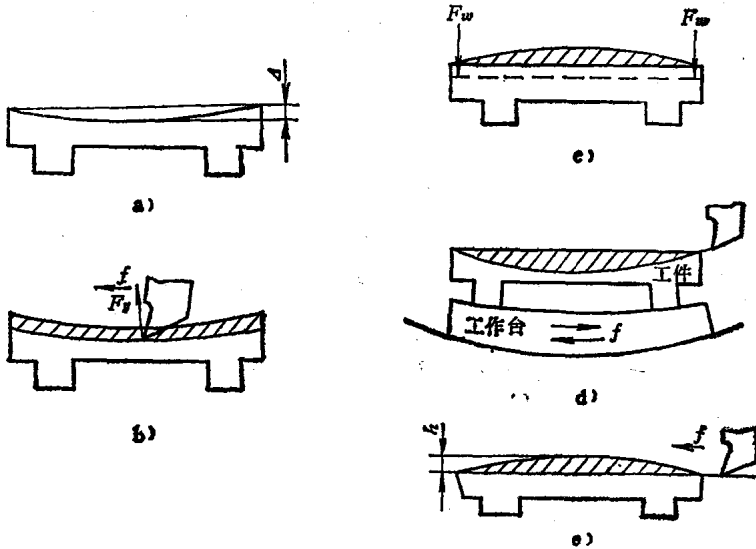


图1-3 床身导轨面的加工误差分析

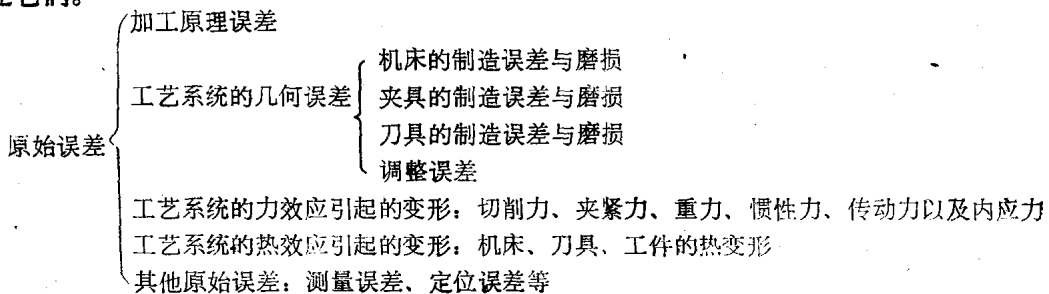
a) 床身加工后中凹 b) 毛坯误差复映 c) 夹紧变形 d) 机床导轨弯曲 e) 工件受热变形

(5) 铸造应力 铸造时,由于床身表面层与深层冷却速度不同使表面产生残余压应力,中心产生拉应力。若毛坯未经良好的时效处理,即行加工,加工后,表面层由于切削使应力平衡被破坏,在内层和下部拉、压应力的作用下发生变形呈中凹,其机理我们将在后面详细讨论。

(6) 测量误差 此外由于测量工具欠精确及测量方法不妥而造成的误差也存在。

归纳此例可见:前两条原始误差是在力的作用下引起的(这里是切削力和夹紧力);第三条则是工艺系统(这里是机床)的制造和磨损造成的;第四、五条则是工艺系统受热的作用和工件受残余应力的作用所产生的。在其他一些零件加工中还可能会遇到另外的原因,如加工原理误差、安装定位误差、机床调整误差等等。

综上所述,我们不妨先把一些加工中经常出现的几种原始误差归纳列表如下,然后再分别讲述它们。



第二节 加工原理误差

加工原理误差也称作理论误差，是指由于采用了不符合理论要求的近似造形加工方法所造成的误差。下面，我们先从对几个实例的分析入手：

例1-1 用模数铣刀切制齿轮。这是利用刀具上与齿轮齿间形状一致的刀刃铣去齿间部分的金属，用仿形的办法得到齿廓要求的渐开线。由机械原理可知：当模数一定时，齿廓形状与齿数多少有关。（图1-4b所示）若为了加工同一模数而齿数不同的齿轮都去专门生产一把刀具则太不经济，实际生产中，一种模数制成8把（或15把）一套的仿形铣刀，每一号铣刀只加工一定范围齿数的齿轮。例如3号刀是加工齿数为17~20的齿轮时用的，但其刀刃轮廓是按17个齿的齿形设计的，那么，用它来加工本组其他齿数的齿轮时必定存在齿形误差。

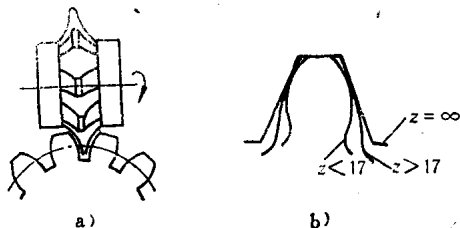


图1-4 模数铣刀铣齿
a) 仿形法 b) 齿形与齿数的关系

例1-2 齿轮滚齿加工，理论上应该用与渐开线圆柱蜗杆一样的刀具来加工，而没有刀刃是不能进行切削的，这样，滚刀一周内只能由有限个刀刃构成，因此，滚切的齿廓是由若干条刀刃切出的折线包络而成，以折线代替了理论上要求的渐开线。

例1-3 车削模数蜗杆（螺纹）时，螺距 $P = \pi m$ ，根据螺纹加工原理，工件和刀具之间应有准确的传动关系，即主轴与丝杠之间的传动比应满足 $i = \frac{P}{t} = \frac{\pi m}{t}$ （式中， P 为工件螺距， t 为丝杠螺距）。这里 π 是一个无理数，任何挂轮组合也得不到其真值，所以，加工后的螺距必定存在加工误差。

由以上三例可以归纳出三种近似加工情况：①近似的刀刃轮廓。②近似的加工方法。③近似的表面成形运动。还有许多实例与此类似，比如：数控机床用直线或圆弧拟合曲线的插补运动；双偏心机构磨削活塞裙部椭圆；阿基米德滚刀代替渐开线蜗杆滚刀加工齿轮等等。

既然明知这些方法有加工原理误差存在，为什么还要采用它们呢？这是因为：①理论上完全正确的方法难以实现，如 π 的挂轮。②即使能实现，却会使机床结构复杂，刚度、精度均不能保证。③有时虽可以实现，但效率很低或成本很高，如例1-1的模数铣刀。④理论刀刃轮廓不易制造或精度很低，如渐开线蜗杆齿轮滚刀。总之，采用这类近似方法进行加工是保证质量、提高生产率和经济性的有效工艺措施，特别适用于形状复杂的表面加工。而所存在的原理误差对于实际应用来说则可忽略不计。

第三节 工艺系统的几何误差

工艺系统的几何误差主要是指机床、刀具和夹具本身在制造时所产生的误差，以及使用中产生的调整与磨损误差。这类原始误差在刀具与工件发生关系（切削）之前即已客观存在，在某种意义上说，它们是一种先天的几何关系的偏离，而在加工过程中反映到工件上去。

一、机床几何误差

现代工艺技术的发展表明：高精度的零件要依赖高精度的工艺装备来生产，其中最重要的是机床的精度。机床精度可以分为：①静态下精度，即没有切削力作用下的精度。②动态下精度，指有切削力和切削运动情况下的精度。③热态下精度，指在温度场变化的情况下的精度。本节所讲的则主要指静态精度，它是由制造、安装和使用中的磨损造成的。其中对加工精度影响较大的是：①主轴回转精度。②导轨导向精度。③传动链传动精度。

(一) 主轴回转精度

1. 基本概念

机床主轴是安装工件或刀具的基准，工作时希望其回转轴线的空间位置是固定不变的，但由于各种误差原因的存在，实际上却并非如此。

(1) 理想回转轴线 理论上瞬时速度为零的轴线。它客观上存在但实际上却不能准确地确定它的位置。

(2) 平均回转轴线 主轴各瞬时回转轴线的平均位置，通常以它来代替理想回转轴线。

(3) 主轴回转误差 即主轴实际回转轴线相对理想回转轴线的偏离（漂移）。也称作主轴回转轴线的误差运动。

主轴回转误差可以分解为三种基本形式：径向圆跳动（径向漂移）、轴向窜动（轴向漂移）和角度摆动（角向漂移）（图1-5）

2. 主轴回转误差对加工精度的影响

不同类型的机床其误差敏感方向不同，加工内容不同，所以，主轴回转误差对加工精度的影响也不尽相同，应该针对具体情况具体分析。

不同形式的主轴回转误差所造成的加工误差不同这一点是显而易见的。例如：车削外圆柱面时，径向圆跳动影响了工件的圆度，而轴向窜动则无影响，但轴向窜动却会造成端面形状位置误差和车螺纹时的螺距小周期误差。角度摆动则对圆柱度、端面形状都会带来影响；而同一形式的回转误差对于不同的加工方法其影响也不一样。例如：镗孔加工时，同是径向圆跳动误差。若发生在镗床上：镗床是刀具回转类机床，随着主轴上刀具的旋转切削力方向也在旋转，误差敏感方向也在变动中，则轴线任何方向的漂移都会直接反映到工件上去（图1-6a）。若径跳发生在车床上，而车床是工件回转类机床，切削力的方向是固定的，误差敏感方向是不变的，只有在 y 轴方向上的漂移才会1:1地转化为加工误差，如图1-6b所示。由此可见，镗床主轴的回转误差对保证工件圆柱面的形状精度有着更为重要的作用。

3. 主轴回转误差产生的原因

主轴是用主轴颈与轴承配合支承在主轴箱体上来确定回转轴线的位置，所以，影响主轴回转精度的主要因素即主轴精度、轴承精度及主轴箱有关的精度。

(1) 轴承精度

1) 轴承相对运动表面的圆度 此项对不同类型的机床影响也不同。对工件回转类机床（如车床），以滑动轴承为例，主轴回转时受力方向是一定的（图1-7a），主轴颈总是被压向一方，这样，轴颈表面上各点依次与轴承孔上一不变的点相接触，因此，主轴轴颈的圆度误

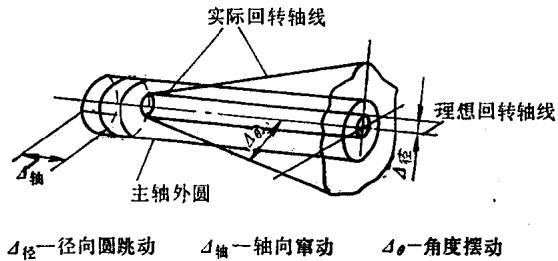


图1-5 主轴回转误差基本形式

差将传给工件，而轴承孔的误差则影响很小。而对刀具回转类机床（如镗床），主轴上所受的切削力随刀杆的旋转而旋转（图1-7b），在力的作用下，轴承孔与轴颈的接触点也是在不断旋转变化的，所以，轴承孔的圆度误差将传给工件，而轴颈的圆度误差则影响不大。当主轴使用滚动轴承时，轴承内外滚道的圆度误差对工件的影响情况与此类同。您是否可自行分析一下，滚动轴承内圈外滚道和外圈内滚道的圆度和波度将如何影响上面两类机床的加工精度呢？

2) 滚动体的尺寸误差和圆度 当不同直径、不同圆度的滚动体进入承载区时使轴心线随之发生径向跳动，同时，由于滚动体自转与公转周期与主轴不一样，主轴每转一周的误差运动轨迹也不重合。

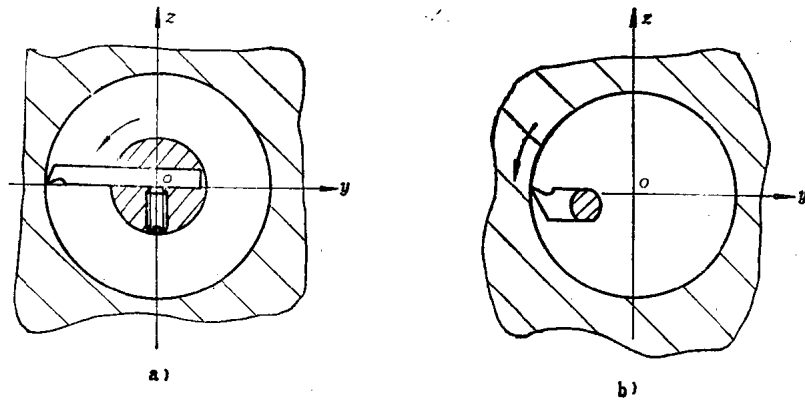


图1-6 同样的主轴回转误差(径跳)，加工方法不同影响也不同

a) 镗床镗孔 b) 车床镗孔

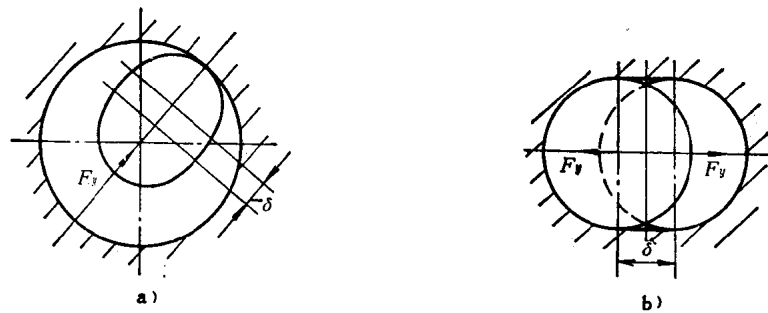


图1-7 轴颈与轴套孔圆度引起的主轴径向跳动

a) 车床类机床 b) 镗床类机床

3) 轴承间隙 对于滚动轴承，游隙过大会使轴向窜动与径向圆跳动量增大；对于动压滑动轴承，间隙增大便油膜厚度变化大，轴心轨迹变动量加大。而且，动压油膜厚度还与转速和外载荷大小变化有关，转速过高还会产生高速振荡和共振。

(2) 主轴轴系相关零件的制造精度 主轴是一个精密组件，与其相关的许多零件的制造、安装精度都会影响它的回转精度。

1) 主轴轴颈同轴度 同轴度误差会使内外圈滚道相对倾斜使轴心线整弯而产生角向漂移。

2) 轴颈本身或主轴箱轴承孔的圆度 轴承本身是一个薄壁零件，以上两种误差会使轴承装配后产生相应变形带来滚道的圆度误差。

3) 主轴系统径向刚度的各向异性 在切削力大小和位置变动时产生程度不等的变形使轴线漂移。

此外, 轴系受热后也会影响主轴回转精度。

4. 提高主轴回转精度的措施

针对主轴轴线发生漂移的原因去采取相应措施。

1) 采用高精度轴承, 轴承的游隙、径向圆跳动、端面圆跳动是影响轴线漂移的主要因素, 因此主轴轴承、特别是前轴承多选用D、C级轴承。

2) 采用静压轴承或多油楔可调短三瓦球面支承动压轴承, 以提高轴系刚度减少径向跳动量。

3) 采用预紧措施, 这样可消除或减小轴承间隙。

4) 提高主轴颈本身及与其相配合的轴系零件的精度。

5) 隔离主轴误差, 使工件(或刀具)的回转精度与机床主轴的精度无直接联系, 主轴仅提供旋转运动和转矩。如: 采用死顶尖定位来磨削外圆(图1-8a), 只要保证定位中心孔的形状、位置精度即可加工出高精度的外圆柱面。又如: 采用有前后导套的镗模加工箱体类零件上的孔(图1-8b), 刀杆与主轴浮动联接, 刀杆的回转精度与机床主轴无关, 仅和刀杆与导套配合精度有关。利用这种方法, 可以用精度较低的机床加工出精度较高的零件孔。

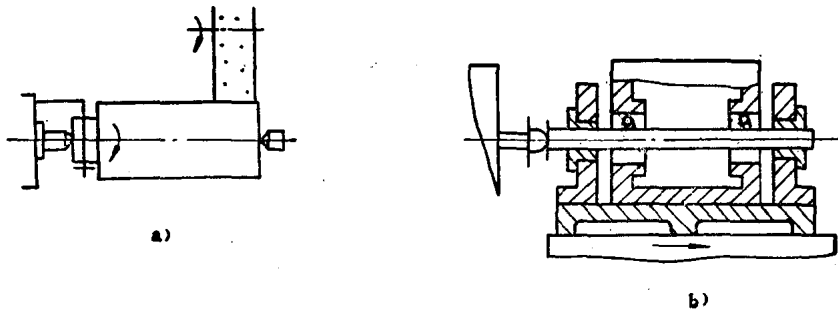


图1-8 隔离主轴回转误差的方法

a) 用固定顶尖磨外圆 b) 用镗模镗孔

5. 主轴回转精度的测量

(1) 传统测试方法 在主轴端部锥孔中装入检验心棒, 以千分表测量图1-9中所示部位的跳动量。

这种方法简单易行, 但有以下缺点: ①测量是在主轴慢速回转时进行的, 不能反映主轴工作转速下的回转精度。②不能把主轴的几何偏心(即主轴锥孔、定心外径及轴肩支承面的几何轴线与主轴回转轴线的同轴度)与主轴回转轴线误差运动而产生的漂移区分开来。例如: 假设主轴回转轴线没有回转误差, 而主轴定心外圆有径向圆跳动

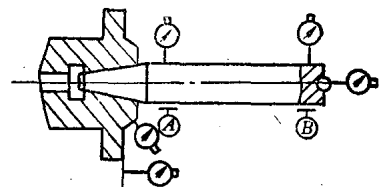


图1-9 主轴回转精度表测法

(图1-10), 工件夹持在卡盘上加工后的B面并没有圆度误差, 仅仅表现为B面与被夹持面A间的不同轴。而主轴回转轴线的误差运动却是会影响工件的圆度的。

由于加工精度要求不断提高, 现在需要采用更精确的测试方法和仪器。

(2) 主轴回转精度的测定 加工误差是在误差敏感方向上来测量的, 所以不同类型的机

床测试方法也有所不同。如对车床、磨床类机床,应在与刀具位置相同的、固定的方向测量;而对镗床类机床,由于工作中刀具是旋转的,则主轴回转误差必须在随主轴一起回转的误差敏感方向上测量。这里仅以镗床主轴回转精度测量为例对其测量原理加以说明(图1-11)。

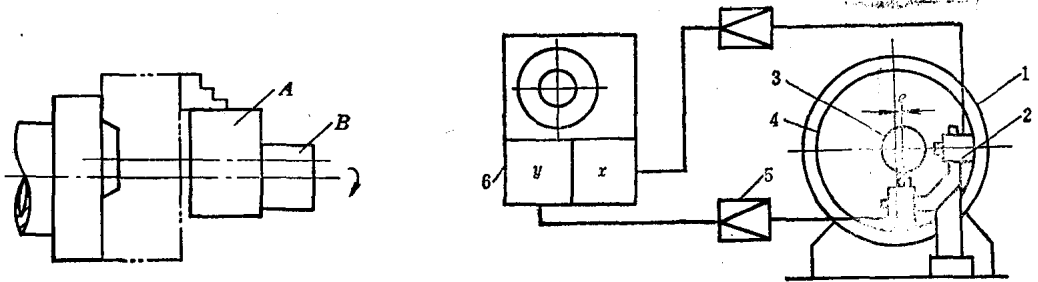


图1-11 镗床主轴回转精度测量原理
1—主轴 2—传感器 3—钢球 4—调整盘
5—放大器 6—示波器

图1-10 定心轴径的偏心对工件加工的影响

在主轴上安装一个精度较高的基准钢球(其形状精度应比主轴精度高一个数量级),钢球与主轴间有调整盘,以使钢球与主轴线有微小的偏心 e 。在钢球相互垂直的两侧装两个位移传感器(电容式或涡流式),传感器输出信号可反映它与被测表面的间隙变化。如果主轴没有回转误差,则两传感器输出的信号 s 经放大器放大 K 倍后分别是

$$s_x = K e \cos \omega t$$

$$s_y = K e \sin \omega t$$

式中 ω —— 主轴转速;
 t —— 任意时间。

示波器荧光屏上光点的矢径是

$$\rho = \sqrt{s_x^2 + s_y^2} = K e$$

这表示了示波器应显示一个半径为 Ke 的真圆。

假设主轴有径向误差 δ ,则该误差信号就会叠加到示波图上,如图1-12所示。两传感器输出信号为

$$s_x = K [e \cos \omega t + \delta \cos(\omega t + \varphi)]$$

$$s_y = K [e \sin \omega t + \delta \sin(\omega t + \varphi)]$$

式中 φ —— 主轴回转误差矢量 δ 与测量球偏心 e 矢量的夹角。

这时,示波器上显示出一个非圆图形(李沙育图形)。由于示波器光点有一定余辉,而且主轴回转误差是由不同周期的误差合成的,每转一周的图形并不重合,故实际显示出的李沙育图形是若干误差曲线叠加值,如图1-13所示。

设想基准钢球相当于镗杆,在偏心 e 的方向上装一把镗刀,那么李沙育图形就能反映出所镗孔的形状误差情况。作出包容这个图形的、且半径差为最小的两个同心圆,其中半径差 ΔR_{\min} 即为主轴回转轴线的径向漂移量,也反映出该测量截面上的圆度误差。图形轮廓线的径向宽度 B 表示随机径向漂移,它影响工件的表面粗糙度。

(二) 导轨导向精度

工件表面的形成主要是依赖它与刀具的相互运动关系来得到,其直线运动关系主要依靠导轨来完成,所以这种直线运动精度取决于导轨导向精度。

1. 导向精度

导轨副运动件实际运动方向与给定(理论)运动方向符合程度称为导向精度。通常导向

误差包含以下几方面（以车床为例）：

- 1) 水平面内的直线度（导轨在水平面内弯曲）。

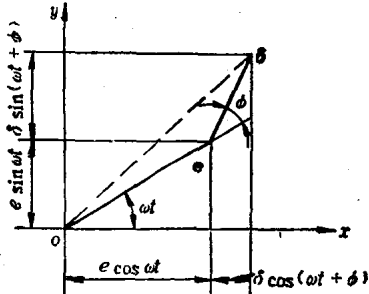


图1-12 钢球偏心矢量与回转误差矢量合成

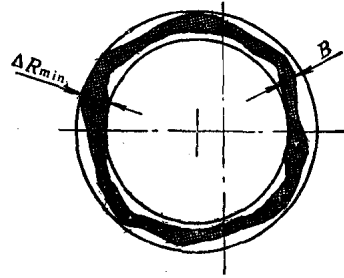


图1-13 实测得的李沙育图形

- 2) 垂直面内的直线度（导轨在垂直面内弯曲）。
- 3) 前后导轨的平行度（扭曲）。
- 4) 导轨对主轴轴线的平行（或垂直）度。

2. 导向误差对加工精度的影响

机床导轨误差对加工精度的影响应根据不同类型机床导轨因制造或磨损造成的不同变形所可能引起的原始误差（几何关系的变化）情况具体分析。以车床为例：

(1) 导轨在水平面内弯曲 这恰好是在误差敏感方向上，将1：1地反映到工件表面上去（图1-14）。

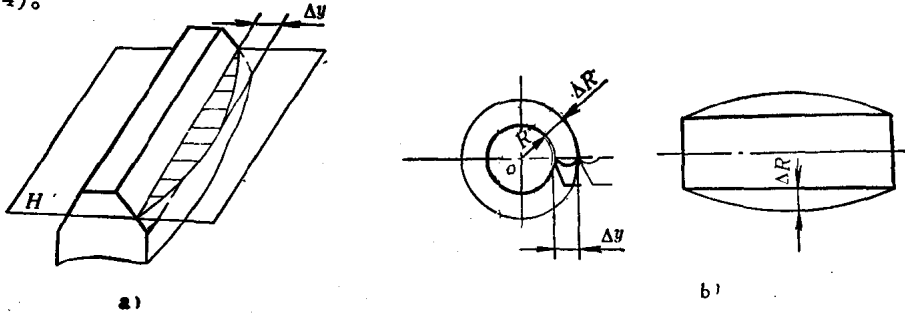


图1-14 导轨在水平面内弯曲引起的加工误差
a) 导轨水平弯曲 b) 工件产生形状误差

(2) 导轨在垂直面内弯曲 如图1-15所示，由此造成的半径误差 $\Delta R \approx \frac{\Delta z^2}{2R}$ ，由于 Δz^2 很小，所以卧式车床导轨垂直面内的直线度误差对工件加工精度影响很小，可忽略不计。

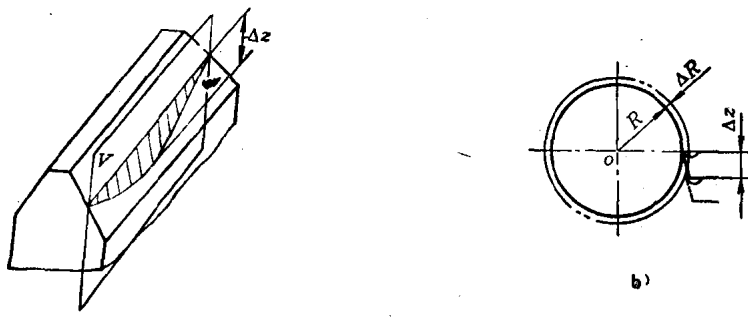


图1-15 导轨在垂直面内弯曲引起的加工误差
a) 导轨垂直弯曲 b) 工件加工误差

以上两点若发生在龙门刨床、平面磨床上则恰恰相反，因为两者的误差敏感方向与车床

不同。

(3) 导轨扭曲 如果前、后导轨在垂直面内有平行度误差(图1-16), 若在两不同截面间前、后导轨高差为 δ (原始误差), 使床鞍在此间移动时偏斜造成其上的刀具在水平方面发生位移 Δy , 则工件半径误差由图示几何关系可知 $\Delta R = \Delta y \approx \frac{H}{B} \delta$ 。一般车床 $\frac{H}{B} \approx \frac{2}{3}$, 外圆磨床 $\frac{H}{B} \approx 1$, 可见, 这一原始误差对加工精度影响很大, 不可忽视。

(4) 导轨与主轴回转轴线的平行度 这是一项关系到主轴回转轴线与导轨相对位置的内容, 比如导轨本身沿水平、垂直方向倾斜; 或主轴回转轴线角向漂移; 或尾座偏移使前、后顶尖连线与刀具轨迹不平行等都属于此项误差之内。我们从图1-17所示的几项与此有关的内容中可以清楚地看出由此而带来的加工误差。

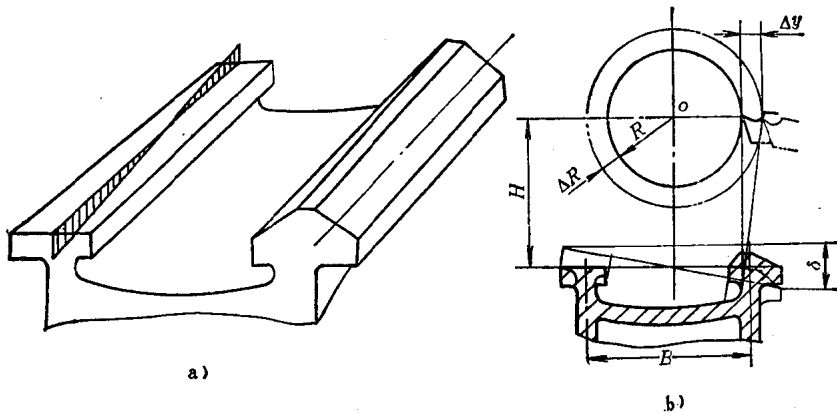


图1-16 导轨扭曲引起的加工误差

a) 导轨扭曲 b) 工件加工误差

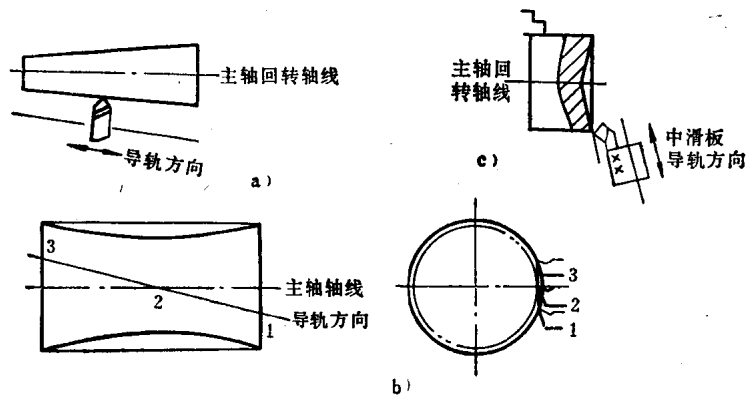


图1-17 主轴轴线与导轨关系不准带来的加工误差

a) 两者水平面内不平行 b) 两者在垂直面内不平行 c) 两者不垂直

同是导轨与主轴平行度误差, 给镗床带来的加工误差则不同。如若采用工件送进方式镗孔, 则会带来圆度误差(呈椭圆孔), 如图1-8a所示; 如采用镗杆送进方式, 则会引起孔与基准的位置误差(图1-18b所示为孔与端面垂直度误差)。

3. 提高导向精度的措施

(1) 提高导轨副制造、大修精度, 合理地提出技术要求 比如一般床身中段使用频率

高,易于磨损,在制造和大修时规定只许中凸; 尾座在使用中因导轨磨损会使中心高下落‘规定尾座套筒中心只准高于主轴中心。

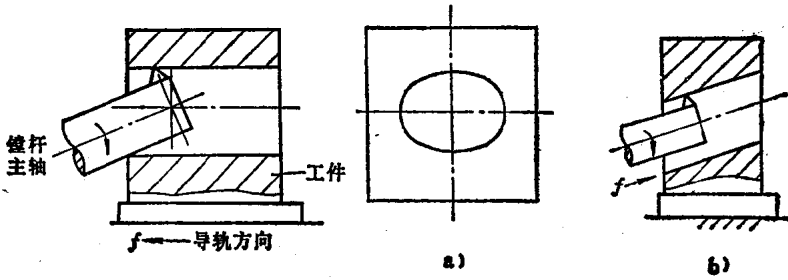


图1-18 不同镟孔方式的加工误差
a) 镟杆不动, 工件送进 b) 镟杆送进

(2) 正确的安装和良好的地基 机床安装不正确造成的影响有时甚至超过制造误差。垫铁支承位置不合理、调整不当, 在自重和切削力作用下会引起地基下沉均会造成导轨弯、扭。对大型、精密、长导轨机床影响更甚。

(3) 减少磨损 采用良好的防护(铁屑和灰尘)措施; 可靠的润滑; 合理的工艺(如粗、精加工分开); 采用淬硬或镀铬导轨提高耐磨性等措施都是有益的。

4. 导轨导向精度的测量

常用水准仪和专用检验桥板检验导轨的直线度、平行度。精度要求高时可用准直光管装置进行测量。

(三) 传动链传动精度

传动链误差是指传动链始末两端传动元件间相对运动的误差。一般以传动链末端元件的转角误差来衡量。在螺纹加工及展成法齿形加工中它是影响加工精度的主要因素。例如在车床上加工螺纹(图1-19); 要求工件导程 l 与机床传动丝杠的导程 L 应有以下关系

$$l = iL \quad (1-1)$$

图1-19 丝杠车床传动系统
1—主轴箱 2—挂轮 3—丝杠 4—螺母 5—尾座 6—刀架

式中 i ——机床主轴到机床传动丝杠的传动比。

$$i = \frac{\omega_s}{\omega_w} = \frac{\theta_s}{\theta_w} \quad (1-1)$$

式中 ω ——角速度;

θ_w ——机床主轴(即工件)的转角;

θ_s ——机床传动丝杠的转角。

对式(1-1)微分得

$$dl = i dL + L di$$

因此, 工件导程误差与传动链的传动误差可近似表为

$$\Delta l = i \Delta L + L \Delta i$$

显见, 影响工件导程误差的有两项: ①丝杠导程误差 ΔL 。 ΔL 引起的线性误差直接经传动比放大或缩小去影响工件导程误差 Δl 。②传动比误差 Δi 。若假设工件转一周, 传动比误差 $\Delta i =$

$\frac{\Delta\theta_i}{2\pi}$, 可见 Δi 与末端元件一丝杠一总转角误差 $\Delta\theta_0$ 成正比。设 $\Delta\varphi_j$ 为传动链中第 j 个传动元件在工件一转内的转角误差; i_j 为自第 j 个传动元件到机床传动丝杠(末端元件)的传动比,则第 j 个元件的误差通过传动链传到丝杠上的转角误差 $\Delta\theta_j$ 为

$$\Delta\theta_j = i_j \Delta\varphi_j \quad (1-2)$$

$\Delta\varphi_j$ 通常是由该传动件的加工、装配和使用中的磨损造成。考虑各传动件误差的随机性,各个传动件对加工精度影响的总和(总转角误差)可用下式来估算

$$\Delta\theta_0 = \sqrt{\sum_{j=1}^n \Delta\theta_j^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^n i_j^2 \Delta\varphi_j^2} \quad (1-3)$$

当传动件为齿轮时, $\Delta\varphi_j$ 一般以切向综合误差 $\Delta F'_{i,j}$ (弧度)代之。以本车床为例,以 z_a 、 z_b 、 z_c 、 z_d 为各挂轮齿数

$$\begin{aligned} \Delta\theta_a &= \frac{z_a z_c}{z_b z_d} \Delta F'_{i,a} & \Delta\theta_b &= \frac{z_c}{z_d} \Delta F'_{i,b} \\ \Delta\theta_c &= \frac{z_c}{z_d} \Delta F'_{i,c} & \Delta\theta_d &= \Delta F'_{i,d} \end{aligned}$$

$$\Delta\theta_0 = \sqrt{\Delta\theta_a^2 + \Delta\theta_b^2 + \Delta\theta_c^2 + \Delta\theta_d^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{z_a z_c}{z_b z_d}\right)^2 \Delta F'_{i,a}{}^2 + \left(\frac{z_c}{z_d}\right)^2 \Delta F'_{i,b}{}^2 + \left(\frac{z_c}{z_d}\right)^2 \Delta F'_{i,c}{}^2 + \Delta F'_{i,d}{}^2} \quad (1-4)$$

由此可见,我们可以采取以下措施来提高传动精度:

- (1) 尽量缩短传动链(减少传动件数) 由式(1-3)可见, n 越少,总的转角误差越小。
- (2) 提高各传动元件制造、安装精度,特别是末端元件 由式(1-4)可见, d 轮的转角误差将直接通过丝杠传给工件。又如滚齿机的分度蜗轮一般应比被加工齿轮精度高1~2级。
- (3) 尽可能采用减速传动 由式(1-2)可见,若求传动链中任一环元件对末端元件转角误差的影响,只要将该元件的转角误差乘以该环元件至末端元件之间的传动比即可。若是升速($i > 1$),则误差被放大;若是减速,则误差被缩小。所以,一般螺纹加工机床母丝杠导程应大于工件螺纹导程;齿轮加工机床母蜗轮齿数一般应多于工件齿轮的齿数。
- (4) 提高装配精度、消除间隙 间隙会使传动瞬时速度不均、速比不稳,特别是要正反转的传动中,影响更甚。如在数控机床进给系统中,在反向时间隙会使进给运动的反向动作滞后于脉冲指令,影响传动精度,为此可采用双层可调齿轮结构自动或定期调整消除啮合间隙。
- (5) 采用校正装置、补偿传动误差 如螺纹磨床所用的校正尺。

二、刀具误差

1. 刀具制造误差

刀具类型不同对加工精度的影响方式也不同。

- (1) 定尺寸刀具 如钻头、铰刀、拉刀等的尺寸、形状误差会直接影响工件的尺寸和形状精度。它们的安装误差也会使加工面尺寸变大。
- (2) 成形刀具 如成形车刀、成形铣刀等的误差主要将影响工件的表面形状精度。
- (3) 展成法加工刀具 如滚齿刀、插齿刀等的制造误差将影响齿轮的加工精度,此外这类刀具的安装、机床的调整也会直接影响加工精度,这些我们将在第四章中做专门讨论。
- (4) 一般刀具 如车刀、镗刀、刨刀等单刃刀具属于轨迹法成形,多采用试切法加工,它们的制造误差对加工精度无直接影响。相对来讲,它们的磨损对加工精度影响较大。