

非圆零件 车削加工技术

邓中亮 编著



人民邮电出版社
PEOPLE'S POSTS &
TELECOMMUNICATIONS
PUBLISHING HOUSE

非圆零件车削加工技术

邓中亮 编著

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了非圆零件的车削加工技术及国内外学者在非圆零件车削方面的最新研究成果。全书共分八章,内容包括:非圆车削加工发展概况、成形原理、基础理论、机械运动合成车削技术、仿形车削技术、数控车削技术、高频响大行程微进给装置设计、控制及其实验应用技术、金刚石精密车削与在线检测技术等。

本书可作为高等院校机械制造、机电一体化等专业高年级大学生选修课教材和研究生参考教材,也可供高等院校、科研部门、工厂企业从事机械制造和机电一体化专业的教师、研究人员、工程技术人员参考。

非圆零件车削加工技术

◆ 编 著 邓中亮

责任编辑 姚彦兵

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京崇文区夕照寺街 14 号

内蒙邮电印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本:787×1092 1/16

印张:22.5

字数:562 千字

1998 年 2 月第 1 版

印数:1-1500 册

1998 年 2 月 第 1 次印刷

ISBN7-115-06877-1/Z·657

定价:29.00 元

前 言

非圆零件在机械设计中占有愈来愈重要的地位。与圆截面零件相比,它有承载能力大、使用寿命长、节省材料、实现特定运动功能等特点,在航空、宇航、汽车、机床、轻工等制造业中的比重日益增长,而非圆车削加工已成为制造业的重要研究课题。

在非圆零件车削技术中,最关键的问题是如何实现刀具与工件之间的相对往复进给运动关系及相对位移精度。数控车削技术的迅速发展为非圆零件自动高效精密车削提供了良好的条件。与圆形零件车削加工相比,非圆零件车削必须配置往复进给装置。往复进给装置的频响、位移精度及动态刚度直接影响非圆零件的生产效率与加工精度,如何设计、制造出高频响、大行程往复进给机构是当前非圆零件车削必须解决的关键技术之一。在国家自然科学基金资助下,我们进行了高频响大行程微位移机构以及非圆数控车削技术等研究工作(该课题被列为重大资助项目关键技术课题之一),通过实验研究,提出了解决进给机构高频响与大行程的技术难题的理论方法,并在非圆零件车削生产中取得了满意的效果。在线自动检测是实现高效生产的关键环节之一,在线检测的自动化程度、检测精度与检测效率直接影响非圆零件的生产效率与加工质量,非圆零件截面形状愈复杂、加工精度要求愈高,则在线检测难度愈大。为此,必须合理地选择或设计传感元件,建立精确的数据处理模型,解决好速度与精度之间的矛盾关系。

本书围绕非圆零件车削加工技术,从非圆零件的成形方法入手,详细地介绍了非圆零件设计、制造分析所需基础理论知识,有机地建立了非圆零件截面形状与车削加工装置之间的相互关系,系统地介绍了机械运动合成法、仿形法、数控车削基础、原理及相关技术。在机械运动合成法中,详细论述了套车法、偏心法、周转轮系法等工作原理与实现技术;在仿形车削法中,介绍了机械仿形、液压仿形、仿形装置与靠模设计技术;在数控加工中,介绍了数控编程基础、典型非圆零件数控编程及国内外非圆数控加工技术。在此基础上系统地阐述了用于非圆截面精密数控车削的高频响大行程微进给装置的设计理论、方法与实验技术,最后介绍了非圆零件金刚石车削与在线检测相关技术。

在该项技术的研究过程中,清华大学王先逵教授给予了精心指导,同时也得到了许多同行的热忱帮助,在此表示衷心感谢。

本书可作为高等院校机械制造、机电一体化专业高年级大学生选修课教材和研究生参考教材,也可供高等院校、科研部门、工厂企业从事机械制造专业的教师、研究人员、工程技术人员参考。

由于时间仓促,加之水平所限,错误之处恳请读者批评指正。

作者

1997年8月于北京邮电大学

EAC67/1503

目 录

第一章 概 述	1
1.1 非圆截面零件的成形	3
1.2 非圆截面零件车削加工发展概况	6
1.3 非圆截面零件数控车削关键技术分析	10
第二章 非圆零件车削加工理论基础	12
2.1 非圆截面零件的几何设计与数学描述	12
2.2 数表处理	17
2.2.1 分割迭代法	17
2.2.2 Newton-Cotes 数值积分	20
2.2.3 常微分方程的数值解法	22
2.2.4 数表程序化	24
2.2.5 线图的程序化	27
2.2.6 数表拟合方法	27
2.3 自由曲线与曲面参数化描述	30
2.3.1 自由曲线	30
2.3.2 自由曲面	36
2.4 非圆截面谐波分析技术	39
2.4.1 谐波分析基础	39
2.4.2 非圆截面的谐波分析	41
2.5 非圆截面车削时的运动特性分析	48
2.5.1 非圆截面车削进给运动特点	48
2.5.2 速度分析	49
2.5.3 加速度分析	50
2.6 非圆截面零件车削力分析	50
2.6.1 车削力分析	50
2.6.2 影响车削力的因素	54
2.6.3 非圆截面车削时刀具工作角度的变化	61
2.6.4 径向进给运动对切削层面积的影响	63
2.6.5 径向进给速度对切削速度的影响	64
2.6.6 非圆截面车削的切削力模型	64
2.7 进给装置设计要求	66
2.7.1 动态特性要求	67
2.7.2 运动平稳性要求	68
2.8 加工精度分析	69

2.8.1 概 述	69
2.8.2 工艺系统的几何误差	70
2.8.3 工艺系统力效应产生的误差	75
2.8.4 工艺系统热变形产生的误差	79
第三章 机械运动合成进给车削成形	82
3.1 概 述	82
3.2 套车成形技术	84
3.3 偏心进给车削技术	89
3.4 周转轮系法车削装置	95
3.5 凸轮机构运动进给车削	101
3.6 机构运动合成车削进给装置设计方法	104
第四章 仿形车削成形	107
4.1 概 述	107
4.2 机械式靠模仿形车削	107
4.3 液压仿形车削成形	114
4.4 液压仿形伺服装置的设计	124
4.5 液压仿形装置设计实例	137
4.6 数控仿形车削技术	142
4.7 仿形靠模的设计	143
第五章 非圆截面零件数控车削	149
5.1 概 述	149
5.2 数控插补控制基础	154
5.2.1 直线插补控制原理	154
5.2.2 圆弧插补原理	160
5.2.3 螺旋线与正弦线插补原理	165
5.2.4 高次曲线插补原理	166
5.2.5 插补速度分析	169
5.2.6 刀位补偿	171
5.3 数控加工编程	172
5.4 几种典型非圆零件的数控车削加工	190
5.4.1 盘状凸轮的数控加工	190
5.4.2 特殊螺纹的数控车削	194
5.5 数控伺服系统	196
5.5.1 伺服系统的组成	196
5.5.2 驱动元件	198
5.5.3 位移检测装置	209
5.6 TH-1 型非圆零件精密数控车削系统	226

第六章 高频响大行程直线微进给装置	231
6.1 概 述	231
6.2 高频响大行程高精度微进给装置的发展概况	233
6.3 高频响大行程微进给装置设计	236
6.4 新型高频响大行程精密微进给装置的设计	239
6.4.1 高频响大行程微进给装置设计方案分析	239
6.4.2 磁路设计	242
6.4.3 高频响微进给装置的机械支承结构设计	259
6.4.4 驱动轴设计分析	269
6.5 高频响微进给装置精密直流驱动电源	272
6.5.1 精密驱动电源的性能要求分析	272
6.5.2 驱动电源电路设计	274
6.5.3 提高驱动电耗跟随精度的措施	277
6.5.4 驱动电源的响应性能测试	278
6.6 微进给装置闭环控制系统	279
6.6.1 微进给装置的理论模型建议	279
6.6.2 微进给装置动态特性分析	282
6.6.3 微进给装置的控制系统设计	283
6.6.4 微进给装置闭环控制系统特性的理论分析	293
6.6.5 微进给装置计算机数字控制系统的设计与实现	299
6.6.6 微进给装置控制系统相移校正控制	303
6.7 微进给装置及其控制系统的实验分析	305
第七章 金刚石精密车削技术	319
7.1 精密车切削过程分析	319
7.2 金刚石刀具设计	322
7.3 金刚石车刀刃磨	326
7.4 振动切削在非圆零件精密车削中的应用	329
第八章 非圆零件检测技术	331
8.1 位移传感器	331
8.1.1 电感式传感器	331
8.1.2 涡流传感器	332
8.1.3 电容式传感器	335
8.1.4 光导纤维传感元件	337
8.2 检测信号处理	337
8.3 非圆零件在线检测方法	341
8.4 活塞异形外圆计算机测试系统	345
主要参考文献	350

第一章 概 述

在制造机械零件方面,不论是过去还是现在,着眼点总是把如何提高零件加工质量、生产效率以及廉价地制造出零件作为主要目标,而提高零件加工精度是提高零件质量及延长零件使用寿命的关键途径。在工程设计中,一些机械零件,为了满足其所需工作性能要求,截面形状常设计成非圆形(如图 1-1 所示),如内燃机、发动机的活塞,为了改善活塞裙部与气缸壁的接触状态,保证活塞良好工作,活塞裙部的结构形状在轴线方向设计成中凸形状,在径向方向则设计成变椭圆(如图 1-2 所示),其横向截面型线规律有:

一次近似椭圆型线

$$\Delta R = \frac{G}{4}(1 - \cos 2\alpha) \quad (1-1)$$

其中 ΔR 为横向半径变化量, α 为回转角, G 为控制量。

二次近似型线

$$\Delta R = \frac{G}{4}[(1 - \cos 2\alpha) + \frac{\beta}{25}(1 - \cos 4\alpha)] \quad (1-2)$$

除上述型线规律,至今已发展多种横向型线规律。

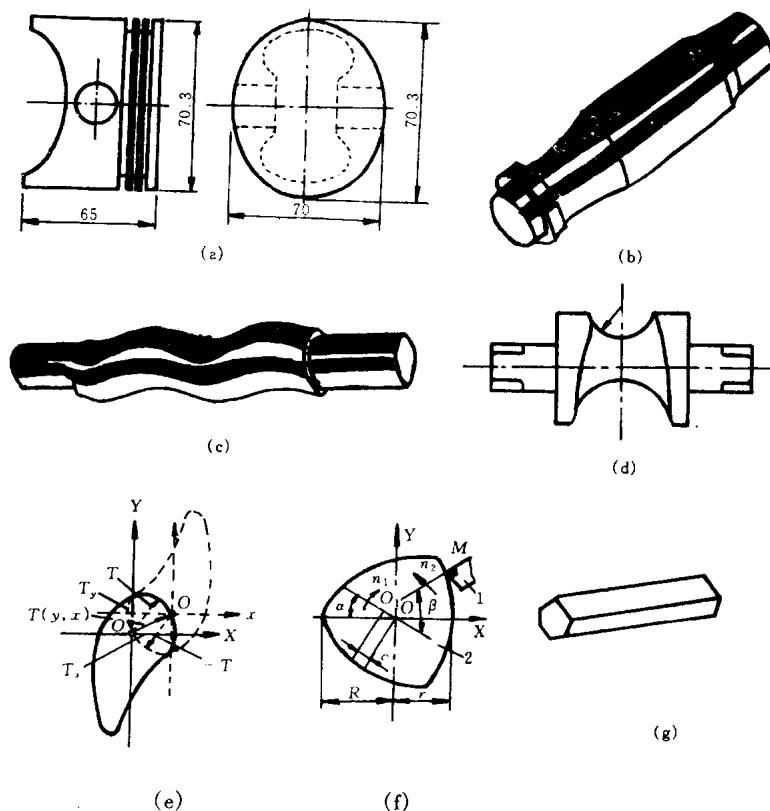


图 1-1 非圆截面零件

活塞纵向型(基)线规律有:

(1) 超越函数基线规律

$$\Delta_z = \Delta_0 e^{-mz} \quad (1-3)$$

其中 Δ_z 为纵向截面内径向半径的变化量, z 为纵向轴坐标尺寸, Δ_0 为径向半径尺寸, m 为常数。

(2) 指数函数基线规律

$$\Delta_z = Ez^n$$

表 1-1 引列了国外几种活塞所用裙面横向型线规律, A、B、C、E、G 诸机型的活塞均系 Mahle 厂设计制造的。

凸轮也是最常见的非圆截面零件, 通常用于运动规律定位或定时控制等。

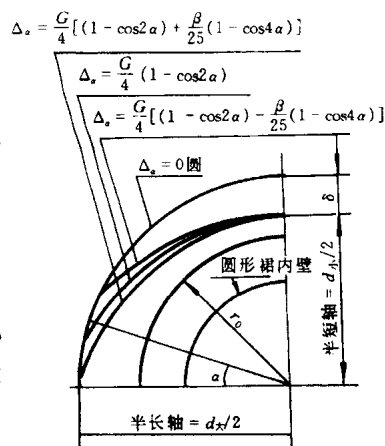


图 1-2 活塞裙部横向外形曲线示意图

表 1-1 几种国外活塞裙面非圆型线函数

机号	缸径 mm	裙面横向型线规律	$m = 2Y/G$ (Y - 配 缸间隙)	附 注
A 型	125	$\Delta\alpha = \frac{Ga}{4} [(1 - \cos 2\alpha) - \frac{3.409}{25} (1 - \cos 4\alpha)]$	0.88 ~ 0.94	1969 年定型
B 型	126	$\Delta\alpha = \frac{Gb}{4} [(1 - \cos 2\alpha) - \frac{3}{25} (1 - \cos 4\alpha)]$	0.83 ~ 0.88	1983 年设计
C 型	135	$\Delta\alpha = \frac{Gc}{4} [(1 - \cos 2\alpha) + \frac{1.78}{25} (1 - \cos 4\alpha)]$		1963 年设计
D 型	139.72	$\Delta\alpha = \frac{Gd}{4} (1 - \cos 2\alpha)$		1975 年设计
E 型	200	上端: $\Delta\alpha = \frac{Gea}{4} [(1 - \cos 2\alpha) - \frac{5.625}{25} (1 - \cos 4\alpha)]$	0.7	1982 年设计
		下端: $\Delta\alpha = \frac{Gea}{4} [(1 - \cos 2\alpha) - \frac{5.625}{25} (1 - \cos 4\alpha)]$	0.5714	1982 年设计
		上端: $\Delta\alpha = \frac{Geb}{4} [(1 - \cos 2\alpha) - \frac{5}{25} (1 - \cos 4\alpha)]$	2.20	1982 年设计
		下端: $\Delta\alpha = \frac{Geb}{4} [(1 - \cos 2\alpha) - \frac{5}{25} (1 - \cos 4\alpha)]$	1.60	1982 年设计
F 型	228	$\Delta\alpha = \frac{Gf}{4} (1 - \cos 2\alpha)$		
G 型	280	$\Delta\alpha = \frac{Gg}{4} [(1 - \cos 2\alpha) - \frac{1.5}{25} (1 - \cos 4\alpha)]$		1971 年设计

注:表中 a, b, c, d, e, f 分别为各型线规律的控制参数。

一些有特殊用途的轴类零件也设计成非圆截面, 如多棱轴、凸轮轴、多边形轴、曲轴等等, 利用多棱轴可代替一般的键、花键及销子联接, 传递扭矩。与键联接相比, 不仅能提高剪切强

度、疲劳强度、传动效率、降低传动噪音,具有自动定心作用,还有利于降低制造成本。由此可见,与常规的圆截面零件相比,非圆截面零件(简称非圆零件)在特定场合下具有独特的优越性。

随着生产的不断发展,非圆截面零件所占比例日益增加,为了达到所需性能要求,其加工精度要求也随之提高,而相应的非圆截面零件精密高效加工技术也成了当今加工技术研究的热点。

1.1 非圆截面零件的成形

非圆截形零件的成形通常有以下三种途径:第一是成形法,如铸、锻、冲压等;第二是运动合成法切削加工,如车、铣、刨、磨等;第三是特种加工法,如线切割、电火花、激光加工等等。

成形法是非圆截面零件常用成形方法之一,但由于其制造精度较低与表面粗糙度值较大(见表 1-2),故不能用于非圆零截面件的精加工工序。铸、锻、冲压等成形法制造非圆截面零件时,零件的几何形状及制造与所用模具有关。在制造过程中,因拔模工艺要求,零件表面须保留 1°~5°的拔模斜度,因此对于尺寸精度与形状精度要求较高的非圆截面零件,成型法通常用于制作零件毛坯,如曲轴、连杆等毛坯的制造等。

特种加工是借助于电能、光能、热能或化学能等多种能量或组合以实现材料的切除。特种加工法可加工形状较复杂的非圆截面零件(如花键、涡轮叶片等等),特别适合于难加工材料(如工件材料硬度高于切削刀具材料、硬脆材料等)以及特殊零件(如薄壁零件、弹性元件等低刚度件)的加工。对于普通材料的非圆截面零件,采用特种加工法时,一方面加工成本较高,另一方面难以获得较高的加工效率。而且当工件的横截面与轴截面形状都很复杂时,则仍难以用特种加工方法来完成非圆截面零件的加工。

运动合成法是获得高精度非圆截面零件的主要途径。如表 1-2 所示,利用超精密车削或磨削,工件的尺寸精度可达 0.1μm 以上,表面粗糙度可达 Ra0.01μm。

表 1-2 非圆零件成形方法

加工方法		表面粗糙度 Ra	精度	运动合成切削法	精磨	0.8μm	IT6
成形法	精密模锻	1.6μm	IT12		精车	0.8μm	IT8
	精密铸造	2.5μm	IT13		超精车	0.01μm	IT6
	挤 压	0.4μm	IT8		精镗	0.1μm	IT8
特种加工法	电火花加工	0.2μm	IT7		精刨	0.8μm	IT9
	激光加工	1μm	IT8		精铣	0.4μm	IT8
	电解抛光	0.02μm	IT7		精插	1.6μm	IT9

在圆柱坐标系中,非圆截面零件表面形状可用 R 、 θ 、 x 等三个参数来描述,如图 1-3 所示,零件的横截面形状则可由径向尺寸 R 与径向角 θ 来确定。

若设非圆截面零件表面形状函数为 S_F ,横截面函数为 S_C ,则有

$$\left. \begin{aligned} S_F &= f(R, \theta, x) \\ S_C &= g(R, \theta) \end{aligned} \right\} \tag{1-4}$$

由上式可知,任何非圆表面都可由三个运动 $x(t)$ 、 $\theta(t)$ 、 $R(t)$ 的合成运动轨迹包络而成,而 $x(t)$ 、 $\theta(t)$ 与 $R(t)$ 必须满足 $R=f(x,\theta)$ 的约束条件。因此,为了形成非圆截面零件表面尺寸及形状,加工设备必须能准确地实现两个直线运动 $R(t)$ 、 $x(t)$ 及一个回转运动 $\theta(t)$ 。从理论上说,运动合成法可适用于各种非圆截面零件的加工。

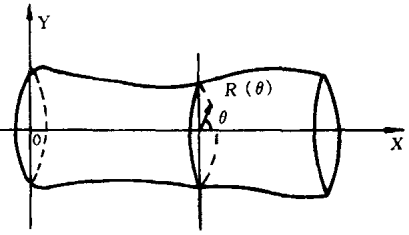


图 1-3 非圆截面零件的描述

在生产过程中,车、铣、刨、磨等是最常见的运动合成法切削加工方法,都能加工一定复杂形状的零件。而这些

加工方法的选择则取决于被加工表面的几何形状与精度要求,最终评价指标是加工的经济效率。在自由曲面的加工中,铣削与刨削加工法目前尚难以获得很高的加工精度。磨削加工是常用的精密加工方法,具有较高的生产效率。磨削加工的主要工具是砂轮,砂轮表面分布着一系列尖硬的颗粒,并由粘结剂连接成一个整体。磨削时,主要由这些颗粒状的锋刃进行切削加工,切屑由磨削液冲洗。砂轮在宏观上一般按几何形状成形,但各磨粒的切削刃具有不规则的形状,所形成的前刀面朝向也不规则,而且往往具有很大的负前角。各切削刃的切削深度一般为 $1\mu\text{m}$ 甚至更小,所以当工件材料较软,切削深度较小时,即使切削刃与工件接触而滑过,也不一定排出切屑,而工件表面却产生塑性变形,图 1-4 所示是磨削过程中的四种情况:①摩擦,②塑性变形,③飞边,④切削。这四种情况的产生都决定于切削刃的形状、切削深度的大小、工件性质和切削速度。



图 1-4 磨削过程

由上述分析可知,当用磨削方法进行非圆截面零件的精密切削加工时,尚存在以下几方面问题:

(1) 磨削软质有色金属(如铝、铜)及其合金时,切屑很容易吸附在砂轮表面,堵塞砂轮表面上的气孔,严重降低磨削效率和表面质量。

(2) 当工件表面曲率半径小于砂轮工作表面的曲率半径时,则难以用磨削法实现切削加工。

(3) 砂轮在磨削过程中,在磨削力的作用下,硬颗粒容易磨钝、脆裂或脱落,既影响加工质量,又影响生产效率。因此,砂轮每使用一段时间,就必须修整一次。

(4) 磨削过程中,即使给定了砂轮的磨削深度(设定切深量),但实际从工件上切下的加工量,由于工艺系统弹性变形和砂轮磨损,通常总比所给定的切削深度小。如图 1-5 所示,OG 为理论磨削量, d_0 为因砂轮磨损引起的加工误差, d_1 为工艺系统变形而引起的误差, d_2 为砂轮接触部分的弹性变形而引起的误差, d_3 为工件回弹所引起的加工误差,实际的磨削如图中的 OCB' 曲线所示。

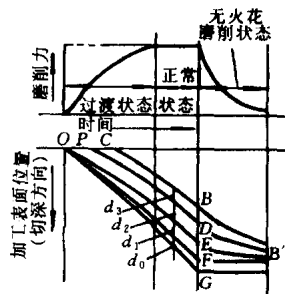


图 1-5 磨削表面的形成过程

由上述分析可知,在非圆截面零件的精加工中,磨削仍难以满

足加工需要。

精密车削是近二十多年来发展起来的精密加工技术,特别是金刚石车刀的广泛应用,使精密车削的加工精度往前推进了一大步。在车削过程中,零件的表面形状由车刀沿切削轨迹包络而成,整个车削过程可看成以零件的横截面为轨迹沿工件的回转中心线平移而成。与规则形状零件的车削相比,非圆截面零件的轨迹往往是变化的,而且母线也常常不是简单的直线。与磨削加工相比,车削加工法具有以下特点:

(1) 车削刀具的刀尖圆弧半径很小,如金刚石车刀的刀尖圆弧半径可刃磨至 $1\mu\text{m}$ 以下,实用的楔角为 45° 的金刚石车刀,其刃口半径可以达到 $50\text{\AA}$ 。因此车削加工法可加工表面曲率半径很小的复杂形状零件。

(2) 由于车刀(如金刚石车刀、硬质合金车刀等)的使用寿命较长,耐磨性好,易于保证稳定的表面加工质量和尺寸精度。

(3) 对于铜、铝等有色金属,用金刚石刀具进行精密车削,既可获得较高的加工精度、较小的表面粗糙度,又能获得较高的加工效率。

(4) 为了防止积屑瘤的形成,精密车削一般都在高速切削条件下进行,因此具有较高的加工效率。

综上所述,对于非圆截面零件的精密切削加工,精密车削法是很有前途的一种加工方法。

由于在非圆截面零件加工时,车刀的工作角度是变化的,车削时可能出现过大的负前角或负后角。当出现负后角时,车刀与工件表面严重挤压、摩擦,工件表面质量变差,而且难以切除工件材料。因此在非圆截面零件加工时,还必须防止负后角的出现,并设法保证正常的车削工作角度。为此,当非圆截面零件车削前后角变化很大时,非圆截面车削系统的进给机构往往会变得较复杂。

与圆截面零件车削相比,非圆截面零件车削在进给系统方面提出了苛刻的要求。车削非圆截面零件时,进给系统必须随工件的回转作高速的往复进给运动。

以椭圆形零件加工为例,主轴每转一周,刀具必须往复运动两次,设刀具往复运动周期数为 f ,则有

$$f = 2n/60(\text{Hz}) \quad (1-4)$$

式中 n 为车床主轴转速(单位: r/min)。

设椭圆截面的极坐标方程为

$$\left. \begin{aligned} X &= a\cos\theta \\ Y &= b\sin\theta \\ \theta &= 2\pi nt/60 \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

则有

$$\left. \begin{aligned} R &= (a^2\cos^2\theta + b^2\sin^2\theta)^{\frac{1}{2}} \\ \frac{dR}{dt} &= \left(\frac{2\pi n}{60}\right) \times [(b^2 - a^2)\sin\theta\cos\theta \cdot (a^2\cos^2\theta + b^2\sin^2\theta)^{-\frac{1}{2}}] \\ \frac{d^2R}{dt^2} &= \left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2 \times (b^2 - a^2) \left[\frac{\cos 2\theta}{R} - \frac{(a^2 - b^2)\sin^2 2\theta}{4R^3} \right] \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

式中 R 为刀尖距车床主轴回转中心的距离; $\frac{dR}{dt}$ 为刀具进给运动速度; $\frac{d^2R}{dt^2}$ 为刀具进给运动加速度; θ 为工件的回转角度; b 为椭圆短轴半径; a 为椭圆长轴半径; t 为运动时间。

由上式可知,若车床主轴转速为 1800r/min,则要求刀具往复进给频率为 60Hz;当主轴转速为 3000r/min 时,刀具往复进给频率为 100Hz,往复进给幅值取决于椭圆截面径向尺寸的变化量($a - b$)。主轴转速愈高,椭圆截面的长短径差值愈大,则刀具运动的加速度愈大。

由式(1-6)可得,当 $n = 3000\text{r/min}$, $a - b = 1\text{mm}$ 时,则最大换向加速约为 394m/s^2 。对于四棱轴零件,设截面型线方程为

$$\left. \begin{aligned} X &= a \cos 4\theta \\ Y &= b \sin 4\theta \\ \theta &= 2\pi nt/60 \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

则当 $n = 3000\text{r/min}$, $a - b = 1\text{mm}$ 时,进给系统的最大换向加速度约为 1577.6m/s^2 。

对于起动频率为 10kpps 的步进电机,当脉冲当量为 $1\mu\text{m}$ 时,则最高换向加速度约为 5m/s^2 ,其它伺服电机(如直流伺服电机、交流伺服电机等等)也均难以获得上述所需加速度。

在非圆截面零件高速切削时,由于进给运动加速度很大,当进给机构的惯性较大时,则要求伺服系统提供很大的驱动力或力矩,才能获得较高频响和足够的加速度。

因此,非圆截面零件车削不仅仅要求进给驱动机构具有很高的刚度、位移精度,还必须有很好的随动性能和较高的频响。故非圆截面零件的车削在进给装置方面的性能要求远超过普通圆截面零件车削要求。

1.2 非圆截面零件车削加工发展概况

在数控技术出现以前,非圆截面零件的车削加工方法主要有两类:一类是机械运动合成法;另一类是硬靠模仿形加工法。随着计算机技术和自动控制技术的不断发展,各种性能优异的数控机床不断出现,为各类非圆截面零件的加工奠定了良好的基础,而非圆截面零件的车削加工方法也逐步由数控车削法取代。因此,非圆截面零件车削加工发展过程大致分为以下三个阶段:

一、机械式运动合成法加工阶段

机械式运动合成法是通过机构的多方向运动合成产生非圆截面的车削运动轨迹。根据机构运动合成特点的不同,这类车削方法又可分为套车法、偏心法、周转轮系法等等。

1. 套车法

国外在六十年代便开始对椭圆活塞的加工方法作了许多实用性的研究,最初是凸轮靠模法,后来专门针对椭圆形零件的车削加工,研究出一种套车法。套车法是根据圆柱体的非正交截面为椭圆的原理,巧妙地用正圆的加工方法来实现。

套车法的成形原理如图 1-6 所示,用一平面去截一圆柱体,则截面为一标准椭圆,设椭圆长轴半径为 a ,短轴半径为 b ,则有

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{d}{2\cos\alpha} \\ b &= \frac{d}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

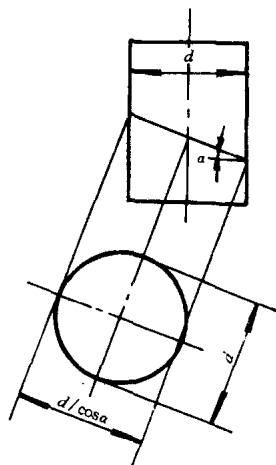


图 1-6 套车法成形原理

通过调整交角 α 与圆柱体直径 d , 便可得到不同尺寸形状的椭圆。

套车法加工时, 让车刀绕工件高速回转以形成主切削运动, 而工件则根据需与刀具的回转平面形成交角 α , 并沿工件轴线方向进给, 当刀尖回转半径为 $d/2$ 时, 便可得到式(1-8)所描述的椭圆截形。

在我国大连组合机床研究所研制的 ZHS-173 立式单轴套车加工装置中, 为了实现所需的套车运动, 该装置有可摆动的套车头和刀盘(如图 1-7), 由摆动套车头和径向运动机构一起可加工出变椭圆、轴向中凸型线或锥形型线等等。

对于椭圆形零件的加工, 套车法在加工效率与加工精度方面都能取得较好的效果, 而对于非标准椭圆零件, 套车法便无能为力。

2. 偏心法

偏心法是利用偏心运动机构驱动刀具获得所需的切削运动轨迹。如图 1-8 所示, 当工件随主轴回转时, 车刀的运动方程为

$$\left. \begin{aligned} x &= e \cos \theta + \sqrt{l^2 - e^2 \sin^2 \theta} \\ \theta &= 2\pi n i t / 60 \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

加工后所得工件的截面形状为

$$\left. \begin{aligned} R(\theta_1) &= r_0 + e \cos \theta + \sqrt{l^2 - e^2 \sin^2 \theta} \\ \theta_1 &= \theta / i \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

式中 n 为主轴的转速; θ 为圆转角; i 为主轴与偏心轮之间的传动比; $R(\theta_1)$ 为工件横截面的径向半径。

3. 周转轮系法

如图 1-9 所示, 设轮 4 装在轮 H 上, 偏心为 $(a-b)/2$, 轮 4 一方面以 ω_H 绝对角速度绕 O_2 公转, 又在轮 5 的作用下, 以绝对速度 ω_4 绕本身中心 O_1 旋转。当工件与轮 4 同轴旋转时, 便可加工出非圆截面零件。

综上所述, 套车法、偏心法、周转轮系法等机械运动合成法均需要专用车床来实现非圆截面零件的车削加工。其优点是:

- (1) 可以获得较高的生产效率;
- (2) 可以获得较高的加工精度。

由于这类车削方法中, 进给运动形式是由机械运动机构确定, 柔性较差, 故仍存在着以下几方面的缺点:

- (1) 一种机床只能加工同一类型的非圆截面零件;
- (2) 加工成本较高;
- (3) 难以满足多品种小批量生产需要。

二、靠模仿形法加工阶段

靠模仿形法是利用靠模来控制车刀与工件的相对运动轨迹, 形成所需的表面形状。靠模仿形法可分为机械靠模仿形与液压靠模仿形两种, 最典型的机械靠模仿形法为凸轮靠模法。

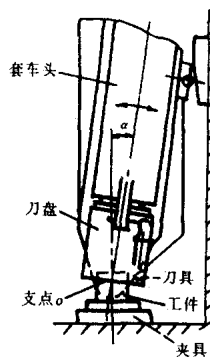


图 1-7 套车头

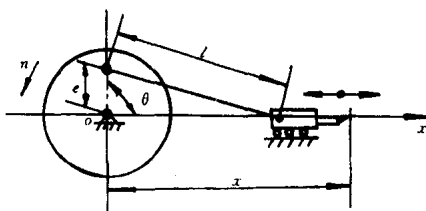


图 1-8 偏心轮驱动机构

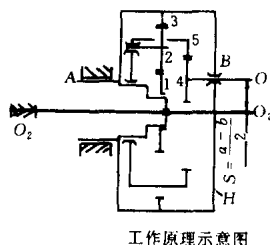


图 1-9 工作原理示意图

用于非圆截面零件车削加工的靠模车床有很多,如瑞士 SIM 厂生产的 TPO—150 金刚石靠模车床、沈阳机床厂所生产的 SI—240B 靠模车床、立体靠模车床等。以 TPO—150 金刚石靠模车床为例,它包括加工活塞裙部中凸型线、椭圆以及活塞头部外形的三个独立机构,加工裙部中凸型线采用中凸仿形机构,加工椭圆时则采用变杠杆比凸轮仿形机构,加工活塞头部则使用斜面仿形的后刀架。我国沈阳机床厂生产的 SI—240 及 SI—240B 型活塞外形车床,则用了三件平面型靠模板来完成活塞外形表面的加工。

液压仿形加工法是通过液压传动装置将靠模的形状映射成刀具的运动,如图 1-10 是一多棱轴的液压仿形车削系统。

近几年来,随着制造技术的不断发展,立体靠模的加工与检测问题的解决,便出现了立体型靠模车削系统。立体靠模的使用不仅简化了靠模仿形系统的结构,而且还有利于加工更复杂的非圆截面零件。

与机械运动合成车削法相比,靠模仿形车削法具有以下特点:

(1) 适应的加工范围较广。对于不同的非圆截面零件,只需更换靠模便可进行车削加工,因此,靠模仿形法能完成多种非圆截面零件的车削加工。

(2) 可实现大进给量的切削,具有较高的加工效率。

(3) 适合于非圆截面零件的粗、半精加工。

由于此类加工方法既需要硬靠模来控制切削运动,又需要一系列仿形机构来驱动刀具进给运动,系统结构较复杂,从而导致以下几方面的缺点:

(1) 响应速度低,不适合于非圆截面零件的高速切削,允许主轴转速一般为 700~800r/min。

(2) 伺服系统结构的环节较多,各环节的制造与装配误差及其刚性均影响到非圆截面零件的车削加工精度。

(3) 由于刀具的进给运动由靠模的型线来确定,因此零件的车削加工精度将受到靠模制造精度的限制。

(4) 更换零件的类型时,需重新设计或更换硬靠模,生产准备周期较长,不利于提高生产效率。

(5) 靠模使用一段时间后,因磨损需要修整或更换,从而使产品的成本增加。

(6) 加工范围有限。当零件形状复杂时,用平面靠模难以较精确地拟合出车削运行轨迹,而目前制造立体靠模仍存在一定的困难,因此用靠模法难以加工出很复杂的非圆截面零件。

(7) 加工精度低。受进给伺服系统及靠模的各种误差因素的影响,该方法尚难以获得较高的非圆截面加工精度,加工误差大于 $\pm 10\mu\text{m}$ 。

三、数控加工阶段

八十年代初期,国外开始研制非圆截面零件数控加工车床,有人称之为无凸轮加工车床。英国的 AE 集团投资 500 万英镑于活塞自动加工线,其中最关键的设备就是非圆活塞的数控车床,该车床用金刚石车刀完成非圆截面的加工,其主轴转速达 2500r/min,并一次加工成形。由于实现了数控化加工,这条生产线只需四个人来监视,生产率可达 80000 件/周,产品改型也极

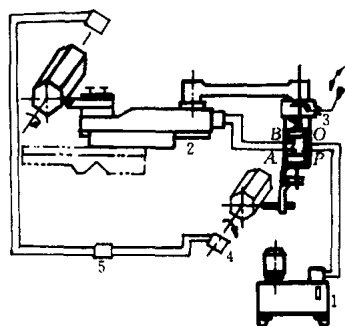


图 1-10 万能异形仿形系统

1. 泵站 2. 仿形刀架 3. 伺服阀
4. 样件拖架 5. 微机同步控制器

日本株式会社大隈铁工所研制的 BL9 - CAM 非圆数控车床加工非圆零件时,能允许的主轴转速高达 3000r/min。与传统的凸轮仿形、液压仿形等加工方法相比较,其加工效率可提高三倍以上,且只需要修改加工控制程序,便可实现各种非圆截面零件的自动车削加工。在加工椭圆度为 0.30mm 的椭圆形零件时,在 3000r/min 的主轴转速条件下,其加工精度可达 $\pm 2.5\mu\text{m}$ 。

美国的 Ingersoll 公司在研制的非圆截面零件无靠模数控车床中采用了实体造型技术,使非圆截面零件的设计、制造实现了一体化,并采用了在线检测技术以稳定地保证产品质量,提高生产效率。美国 Cross 公司相继开发的 PTM-2000 与 PTM-3000 型非圆加工数控车床,在加工变椭圆形活塞时,生产率可达 150 件/小时,加工误差则小于 $\pm 3.8\mu\text{m}$ 。

Figure 1 consists of two parts. The left part is a graph with the vertical axis labeled $C(r/min)$ ranging from 1,000 to 3,000 and the horizontal axis labeled $Y(mm)$ ranging from 0 to 2.0. A curve starts at $(0, 3000)$ and decreases to $(2.0, 1000)$. The right part is a schematic diagram of a circular workpiece with center O . A cutting tool is shown in contact with the workpiece. A coordinate system is shown with the Y -axis pointing upwards and the C -axis pointing to the right. The workpiece is labeled '工件' and the tool is labeled '刀具'.

```

graph LR
    SBC[单板机控制系统] --> Sum((+))
    FB[反馈量] --> Sum
    Sum --> C[控制器]
    C --> A[放大器]
    A --> HSI[高频响伺服机构]
    HSI --> ET[弹性刀架]
    ET --> PD[位置检测]
    PD --> FB
    PD --> EN[编码器]
    EN --> C6250[C6250]
    C6250 --> SBC
  
```

长沙国防科技大学于1990年初用TP801单板机开发了软靠模活塞加工装置,加工系统如图1-12所示。利用该装置加工活塞时,需先将活塞的中凸型线和椭圆型线根据工艺设计要求转换成计算机控制数据存放在EPROM中。利用该装置在C6250普通车床上的实验结果表明:当工件直径为 $\Phi 110$,机床转速为700r/min,纵向进给量为0.2mm/r时,活塞的头部与裙部可在一次装夹中用不同的程序加工出来,椭圆度误差为 $\pm 10\mu\text{m}$ 。

清华大学从 1988 年开始进行高频响大行程微进给机构的研究,并于 1991 年底建立起以高频响、大行程微进给机构为径向伺服进给装置的非圆截面零件精密数控车削系统。该系统的整个运行过程均由 IBM-PC 计算机控制,用户可直接在计算机上进行数控编程,并自动生成 NC 控制程序。该系统由 CM6140 改装而成,主轴最高转速为 1400r/min。

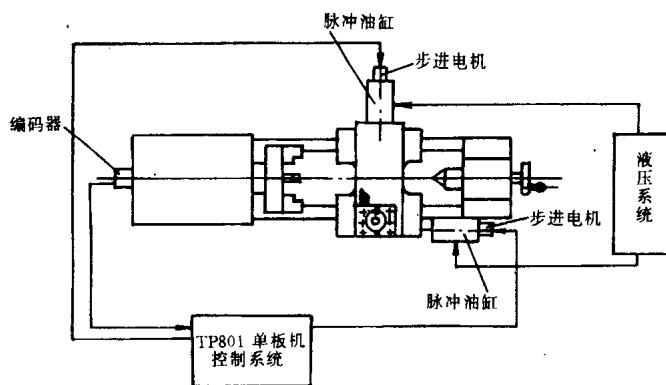


图 1-13 开环数控系统

与机械运动合成法、靠模仿形法相比,数控车削法是最有前途的一种非圆截面加工方法,它具有以下几方面的特点:

- (1) 加工范围广,可用于实现各种非圆截面零件的自动车削;
- (2) 生产效率高;
- (3) 可获得很高的加工精度和稳定的加工质量;
- (4) 柔性大,特别适合于多品种小批量的自动化生产。当加工对象改变时,仅需调整数控程序。

以上三种方法的综合对比分析如下表 1-3 所示。

表 1-3 加工方法比较

车削方法	加工范围	加工精度	柔性	加工效率	可加工复杂程度	稳定性	自动化程度
机械运动合成法	窄	一般 $> \pm 10\mu\text{m}$	差	较高	低	一般	一般
靠模仿形法	一般	较低 $> \pm 10\mu\text{m}$	一般	较低	一般	较差	一般
数控加工	宽	高 $< \pm 5\mu\text{m}$	好	最高	高	好	高

活塞是典型的非圆截面零件,每年产量达几千万只,而我国现有的加工设备大部分仍采用靠模车削机床,生产效率和加工精度均难以满足生产需要,目前虽然已从国外购进了几台数控设备,但成本很高,而且远远不能满足需要,而我国在复杂的非圆截面零件精密数控车削加工方面与国外尚存在着一定的差距,因此进行非圆截面零件精密数控车削研究在国民经济中具有十分重要的意义。

1.3 非圆截面零件数控车削关键技术分析

要实现非圆截面零件数控车削,必须解决以下关键技术问题: