

## 活塞环非圆轮廓数控仿形加工系统及伺服机构设计\*

何汉辉 王世民 潘仲明 邰 臣

(国防科技大学机械电子工程与仪器系 长沙 410073)

**摘 要** 本文简要综述了国内外活塞环理论研究及加工技术的发展状况,介绍了活塞环加工的一种新的方式和技术——活塞环非圆轮廓数控仿形加工系统的构成和工作原理,详细论述了其伺服机构的设计,最后给出了实验结果。

**关键词** 活塞环,加工,数控,伺服机构

**分类号** TG502

---

## Design of Non-Round Piston Ring NC Machining System and Its Servomechanism

He Hanhui Wang Shimin Pan Zhongming Qie Chen

(Department of Mechantronic and Instrumentation,NUDT,Changsha,410073)

**Abstract** This paper summarises the developing situation of theoretic research and the technique of piston ring, and introduces a new method and technique for non-round piston ring contour NC machining and the construction and operating principle of this system. In this paper, the design of system's servomechanism is described. Finally, the results of the turning experiment are presented.

**Key words** piston ring, turning, NC, servomechanism

---

汽车产业是我国“九·五”期间及2010年远景规划的重点发展产业之一,实现高档汽车的关键零配件的国产化也是我国汽车零配件生产厂家长期以来追求的目标。活塞环是影响汽车发动机性能的主要零件之一,其几何形状及精度直接影响到汽车的功率、油耗、燃气污染、噪声、发动机缸体寿命等性能。

---

\* 湖南省科技攻关计划重点资助项目  
1996年12月17日收稿

几十年来,关于活塞环自由形状曲线先后出现了数种模型(如卡尔恩格里曲线、根茨布尔格曲线、富士二次余式和阿诺德曲线等),并在生产中得到了广泛的应用。70年代以来尤其是80年代以后,随着发动机技术的迅速发展和对发动机性能要求的不断提高以及活塞环材料和制造工艺的改进(如镀铬环和钢带环),在德国、瑞士等发达国家,一些新的研究成果相继被应用于活塞环的生产,例如油环和气环采用不同类型的曲线、高点梨形曲线环的高点值下降、椭圆环和负椭圆环的采用等;与此同时,在这些发达国家更先进的加工设备(如活塞环内、外轮廓仿形专用车床)被研制,并用于生产,显著提高了其加工精度、生产率和生产自动化程度;此外,在活塞环的自由断面形状及材质的研究和应用上,这些发达国家也都有了不同程度的发展。

60年代以后,我国的活塞环生产形成了一定的规模。活塞环自由形状主要是采用从前苏联引进的以根茨布尔格曲线为主的单体梨形曲线高点环(平均压力/高点压力=2.85),加工方式为靠模外轮廓仿形。这在当时对于我国内燃机生产的确起了很大作用。但在国外技术研究和生产均得到了长足发展的今天,我国采用的活塞环自由形状曲线和加工方式及国产活塞环加工机床几十年来却几乎没有变更,目前我国高档活塞环配件完全依赖进口或依赖进口专用机床生产(国内目前有国外活塞环专用车床的仿制产品,但问世以来性能一直不稳定,而进口专用机床的高昂价格(从德国、瑞士等国进口的高档活塞环内、外轮廓仿形专用车床每台价格在\$60万左右)显然不是国内厂家轻易能够承受的;与此同时,生产技术和研究手段的落后,更加剧了我国在活塞环技术研究领域同国外先进国家的差距。

基于上述情况,我们开展了“活塞环非圆轮廓数控仿形加工技术”的研究,经过两年时间的努力,目前已完成了系统研制和实验,并通过了技术鉴定。

## 1 系统构成及工作原理

本系统由微计算机、高性能步进电机及其驱动器,正弦(或类正弦)进给机构,在线检测机构以及通用微机接口电路模块等组成。其构成原理如图1所示。

在自由状态下,若取活塞环的环脊作为计算角度的起始点,则活塞环(等压环)形状可由下式确定<sup>[1]</sup>:

$$\begin{cases} R = \frac{D}{2} + \frac{\Delta G}{3\pi} \left( 1 + \frac{\Psi}{2} \sin \Psi \right) \\ \theta = \Psi - \frac{2}{3\pi D} \Delta G \left( \Psi + \frac{1}{2} \sin \Psi - \frac{\Psi}{2} \cos \Psi \right) \end{cases}; \quad \Psi \in (-\pi, \pi) \quad (1)$$

式中, $R$ 为自由状态时活塞环半径的极坐标向径值, $\theta$ 为其极坐标角度, $D$ 代表理想缸套内径, $\Delta G$ 代表活塞环理论开口间隙, $\Psi$ 为参变量。

记  $X = \frac{2}{[\Psi \cdot \sin \Psi]_{\max}} \Psi \cdot \sin \Psi - 1$  (易得  $[\Psi \cdot \sin \Psi]_{\max} \approx [\Psi \cdot \sin \Psi]_{\Psi \approx 2.029} \approx 1.82$ ),

$$R_0 = \frac{D}{2} + \frac{\Delta G}{3\pi} + \frac{\Delta G}{12\pi} \cdot [\Psi \cdot \sin \Psi]_{\max},$$

$$A = \frac{\Delta G}{12\pi} [\Psi \cdot \sin \Psi]_{\max}, \text{ 则}$$

$$R = R_0 + A \cdot X \quad (2)$$

$X$  曲线见图 2。现令  $X = X(\omega_0 t)$ ，其中  $\omega_0 = \text{Const}$  为车床主轴旋转的角速度（亦即活塞环旋转的角速度）， $t$  为时间变量。对照图 2 中的正弦曲线知，通过正弦机构的变速转动可以建立函数  $\omega(\omega_0 t)$ ，使正弦机构的输出不再是正弦曲线，而变成  $X$  曲线，即  $X = X(\omega_0 t)$  曲线。

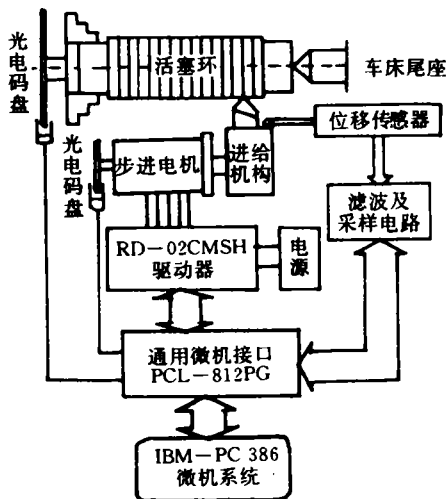


图 1 系统构成

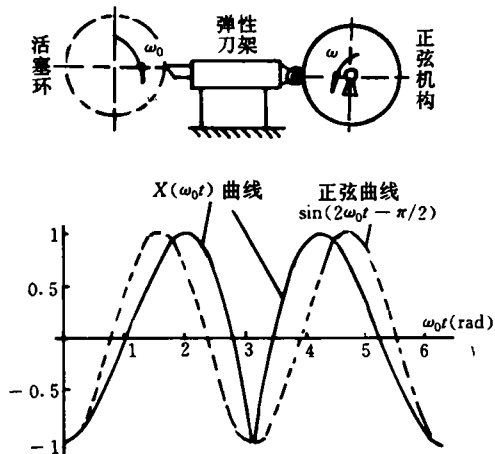


图 2 伺服机构的构成原理和  $X$  曲线

根据式(2)，首先需调整好进给机构的初始位置（即常数项  $R_0$ ），其次要调整好正弦机构的行程（即常数  $A$ ），最后通过步进电机变速控制进给机构的运动（即变量  $X$  项），从原理上讲即可加工出式(1)所描述的活塞环轮廓曲线。

由于正弦机构凸轮的制造误差及机械磨损会影响加工精度，故应定期用位移传感器对伺服机构的进给运动进行测量，并在加工中根据测量结果对控制过程进行修正，以保证所加工活塞环的自由形状精度。

对于其它类型的活塞环自由形状曲线，应用上述基本原理亦可进行加工。

## 2 伺服机构设计

伺服机构是系统的关键环节，它包括步进电机、可调偏心量的正弦机构和弹性刀架三个部分。其构成原理如图 2 所示。其动静特性主要包括弹性刀架的刚度和谐振频率、疲劳强度、伺服机构的加速度特性和动态负载能力，这是设计中须考虑的几个问题。

### 2.1 系统对伺服机构的动态特性要求

#### 2.1.1 弹性刀架直线运动的速度及加速度特性

在加工活塞环的过程中，刀架沿工件径向运动，其速度、加速度特性与机床主轴转速  $\omega_0$  及活塞环的类型和规格有关。设  $\omega_0 = 76 \text{r/min}$ ，活塞环为工作直径  $D = 80 \text{mm}$ 、理论开口间隙  $\Delta G = 6 \text{mm}$  的等压环，则刀架运动的速度、加速度特性的仿真结果如图 3 所示。

### 2.1.2 正弦机构旋转运动的角速度和角加速度特性

在加工活塞环的过程中,步进电机驱动正弦机构变速转动以输出直线运动  $X(\omega_0 t)$ 。利用参变量方程组(3)可以对正弦进给机构的旋转运动特性进行仿真。

$$\begin{cases} X(\omega_0 t) = \sin(\omega t - 0.5\pi) \\ \omega_0 t = \Psi - 2 \cdot \Delta G(\Psi + 0.5\sin\Psi - 0.45\Psi\cos\Psi)/(3\pi D) \end{cases} \quad (3)$$

图4给出了  $\omega_0=76\text{r/min}$  时的角速度和角加速度的仿真结果及经技术改进后的实际特性(活塞环开口处用高次曲线插补)。显然,仿真曲线在靠近  $\omega_0 t = \pi$  的两处  $\omega$  有突变,与之对应的角加速度为无穷大,对系统不利,但在实际系统中采用理想的技术路线改变了这一现象。

### 2.2 步进电机的空载加速度特性

目前系统所采用的 XS-8932-007 步进电机的驱动力矩为  $14\text{N} \cdot \text{m}$ , 转子惯量为  $0.00115\text{kg} \cdot \text{m}^2$ , 故其空载角加速度最大可达  $12174\text{rad/s}^2$  (若采用 K 系列步进电机则可达  $24833\text{rad/s}^2$ )。

### 2.3 弹性刀架的刚度和谐振频率

为避免共振,弹性刀架的往复运动频率应避开其谐振频率。刀架设计为平行双板簧结构,沿径向进给方向受一次超静定约束。其径向刚度  $K=48EI/L^3$  (推导过程从略)。取弹性模量  $E=2 \times 10^{11}\text{N/m}^2$ , 并代入有关几何量,可求得  $K=2.82 \times 10^6\text{N/m}$ 。

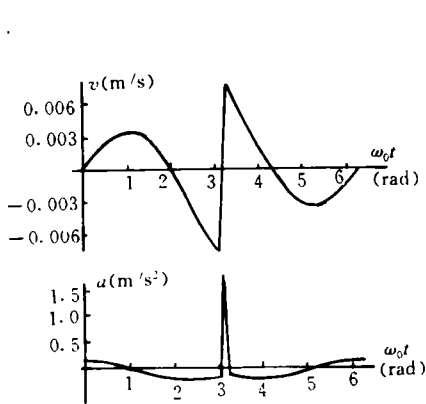


图3 刀架运动的速度和加速度特性

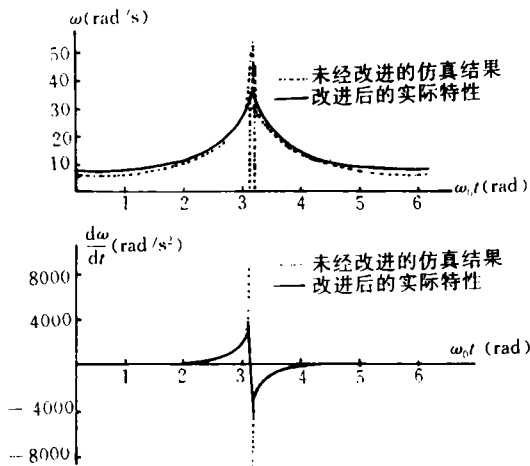


图4 正弦机构旋转的角速度和角加速度特性

弹性刀架在自由状态下可视为单自由度弱阻尼自由振动系统。忽略其阻尼的影响,并取刀架当量质量  $m=2.5\text{kg}$ , 则易求得其谐振频率:

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{m}} = 168.96(\text{Hz})$$

加工过程中,当车床主轴转速为  $76\text{r/min}$  时,弹性刀架往复运动瞬时最高圆频率(见图4)  $\omega_{\max} \approx 35\text{rad/s}$ , 即往复运动最高频率小于  $6\text{Hz}$ , 远小于弹性刀架的谐振频率。

### 2.4 弹性刀架的疲劳强度

在加工过程中,正弦机构推动弹性刀架循环往复运动,板簧受交变应力作用,因此需校验其疲劳强度。经计算<sup>[2]</sup>,板簧所受最大交变应力  $\sigma_{\max} = 413.22\text{MPa}$ ,许用应力

$$[\sigma_{-1}] = 576\text{MPa}, \text{显然 } \sigma_{\max} < [\sigma_{-1}].$$

### 2.5 伺服机构的动态负载能力

切削加工过程中,正弦机构转轴轴承上承受的正压力  $F_N$  来源于径向切削力  $F_y$ 、弹性刀架变形抗力  $F_s$  和刀架惯性力  $F_a$ ,即  $F_N = F_y + F_s + F_a$ ,电机所荷载荷主要有三: $F_N$  施加于偏心圆凸轮转轴轴承上产生的摩擦转矩  $M_f$ ;由于偏心存在, $F_N$  又对电机轴产生了偏心转矩  $M_e$ ;此外还有电机转子本身和偏心圆凸轮机构的惯性转矩  $M_a$ 。电机所受的全部负载  $M = M_f + M_e + M_a$ ,其中惯性载荷最为显著。代入系统有关参数,经计算(计算过程从略),当车床主轴转速为  $76\text{r/min}$ (实验时所采用的实际参数)时,切削加工过程中电机所受最大负载约为  $M_{\max} = 10\text{N} \cdot \text{m}$ ,小于电机所能提供的最大转矩( $14\text{N} \cdot \text{m}$ )。

## 3 系统实验结果及性能指标

在正式加工活塞环工件之前,用试件进行了若干次切削实验,其实验条件如下,实验结果<sup>[2]</sup>如表 1。

车床型号:J<sub>1</sub>MT360 型高速精密车床

主轴转速:76r/min

走刀量:0.075mm

材料:球墨铸铁

工件轮廓实测曲线如图 5 所示<sup>[2]</sup>,图中的中心虚线为活塞环理论曲线(根茨布尔格曲线),内外侧两条虚线为误差带( $\pm 30\mu\text{m}$ )。

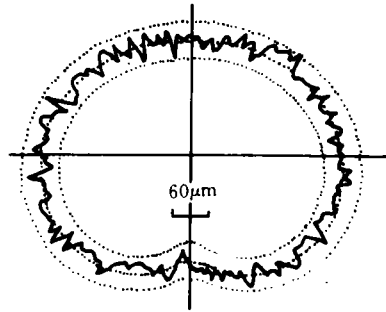


图 5 被加工活塞环轮廓曲线的实测结果

表 1 切削实验结果(单位:  $\mu\text{m}$ )

实验次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值 $\delta'$
最大误差 $\delta$	$\pm 28$	$\pm 19$	$\pm 30$	$\pm 25$	$\pm 20$	$\pm 17$	$\pm 23$	$\pm 27$	$\pm 21$	$\pm 25$	$\pm 23.5$

实验表明,伺服机构的重复定位精度达  $\pm 3\mu\text{m}$ ,对球墨铸铁材料工件的切削深度可达  $3\text{mm}$ ,输出功率大于  $900\text{W}$ ,频率响应大于  $20\text{Hz}$ ,目前系统加工活塞环可达到的轮廓精度优于  $\pm 30\mu\text{m}$ 。

## 4 结束语

本系统的应用范围较广,可以加工目前已知的具有各种类型压力分布曲线的活塞环,还可以加工其它一些类型的异形轮廓,如椭圆、不规则三角形轮廓等。此外,本系统还可加工出一种双线螺旋体<sup>[2]</sup>,其每条螺旋线的导程通过变速控制可以任意变化。

目前国内外活塞环的加工除了钢带环以热定形方式生产外,其余均由靠模方式生产。一种靠模只能对应一种类型的活塞环,显然不利于多类型、多规格活塞环生产的要求。本系统的应用将改变这一现象,同时也为新的活塞环压力分布曲线的特性的研究和新产品

的开发提供了有效手段。

目前对本系统技术上的深入研究和完善工作及本系统的产品化工作正在同步进行,基于本系统原理的活塞环内外轮廓仿形加工专用机床可望在近期内问世。本系统原来所采用的步进电机的驱动能力尚嫌小,现在正在开发的专用机床中拟采用驱动力矩更大的MT系列或K系列步进电机,这两种电机的驱动能力比原电机的驱动能力大一倍以上。

### 参 考 文 献

- 1 [苏]根茨布尔格·活塞环理论(中译本).北京:机械工业出版社,1986
- 2 郗臣·活塞环非圆轮廓数控仿形技术:[学位论文].长沙:国防科技大学机械电子工程与仪器系,1996

(责任编辑 张 静)