

基于仿射原理的活塞环仿形数控加工系统^{*}

戴一帆 潘仲明 王世民

(国防科技大学机械电子工程与仪器系 长沙 410073)

摘要 本文介绍一种新颖的活塞环非圆轮廓曲线仿形数控加工技术。利用该技术可实现用同一种凸轮加工多种具有不同压力分布曲线的活塞环。当凸轮或刀具磨损后可进行误差补偿加工,提高了机床的“柔性”和精度。同时利用智能决策和模糊控制技术解决抗干扰问题及增强系统的鲁棒性。

关键词 活塞环,仿形,模糊控制,仿射

分类号 TG66,TP273

The NC System for Copying Machining Piston Ring Based on Affine Principle

Dai Yifan Pan Zhongming Wang Shimin

(Department of Mechatronics Engineer and Instrumentation, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract A new NC copying machining technique for non-circular piston ring is introduced, which makes it possible to work piston rings with different pressure distribution curve using a kind of cam, and realize error compensation while cam or cutting tool wears away. It improves the flexibility and precision of machine. Moreover, the problem of disturbance resistance is resolved by an intelligent method of making policy combine with fuzzy control technology. It improves the system robustness, as well.

Key Words piston ring, copying, fuzzy control, affine

随着内燃机向增压、高速、大马力、低油耗、低污染、低噪音方向发展,用户对活塞环提出了更高性能的要求,如寿命长、工作可靠、摩擦损耗小等等。几十年来,各国活塞环专家一直没有停止过对具有不同压力分布的活塞环自由曲线的研究(例如,卡尔恩格里希曲线、金茨布尔格曲线、富士二次余式和阿诺德曲线等)。研究表明:改变接触压力分布可能显著地影响活塞环磨损量的分布和接触压力的重新分布,而在所有条件下都表现优良的

* 湖南省科委重点资助项目

1997年3月16日收稿

万能分布图是不存在的。长期以来我国活塞环外圆轮廓加工机床一直以硬靠模为主, 由于主轴旋转运动和刀具进给运动机械地联为一体, 故一种靠模只能生产一种类型的活塞环, 这显然不能满足活塞环产品发展的需要。为此, 我们开发研制了基于仿射原理的活塞环仿形数控加工技术, 该技术从原理上解决了用一种凸轮加工各种修正压力活塞环的技术难题, 同时利用智能决策和模糊控制技术来解决恶劣环境对系统的干扰, 因而不失为一种经济、可靠、简便的活塞环加工方法。

1 系统的组成

本系统如图 1 所示可分为主轴、凸轮进给、检测及微机控制四大模块。其中主轴模块

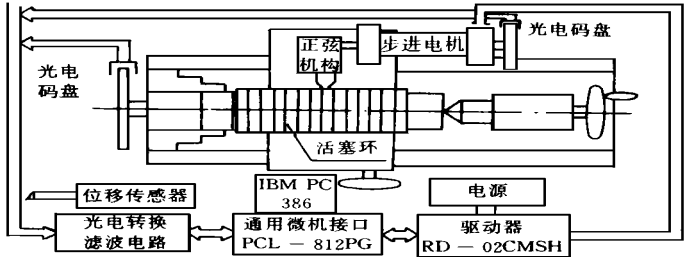


图 1 活塞环非圆轮廓数控仿形系统

由主轴及码盘组成。凸轮进给模块由进给机构、码盘、步进电机及驱动器组成, 检测模块由位移传感器及相应电路组成。主轴加码盘系统可实现对主轴转速的监测, 凸轮进给机构是由步进电机驱动凸轮旋转, 实现刀具进给的。其进给运动规律可由微机调整步进电机转速来灵活控制。进刀机构除了可以像普通仿形车床那样让凸轮和主轴同速旋转外, 还可利用微机进行可编程控制, 使其和主轴转速成一定函数关系。实际加工中由于步进电机性能所限, 控制时最好不要出现步进电机反转的情况, 只要凸轮曲线设计合理, 这种情况是可以避免的。步进电机的码盘系统可实时监测电机转速, 以实现闭环控制, 提高加工精度。利用检测系统中的位移传感器, 可对活塞环工件几何形状及刀具进给量进行检测。当凸轮由于磨损而产生误差时, 根据测量数据调整刀具进给规律, 可实现误差补偿加工。对于新型活塞环, 其自由几何形状未知时, 用该系统进行检测, 微机处理完测量数据后可直接进行数控仿形加工, 有利于新产品的开发。

2 进刀规律的生成

早在 70 年代末, 苏联的活塞环专家金茨布尔格在其专著《活塞环理论》中就给出了开口环自由形状曲线的通用数学表达式:

$$u = \frac{P_0 r^4}{EJ} \left[1 + 0.5(1 - \xi) \mathcal{Q}_{in} \varphi + \frac{1}{9} a^2 \cos 2\varphi + \dots + \frac{1}{(n^2 - 1)^2} a^n \cos n\varphi \right] + C_1 \cos \varphi + C_2 \sin \varphi \tag{1}$$

式中 u 为活塞环从工作状态转变到自由状态时中性轴线上各点的位移, r 为基圆半径, P_0

为平均压力, φ 为角度自变量, a_2, \dots, a_n 为参数, C_1, C_2 为积分常数。其中

$$\xi = \frac{a_2}{3} - \frac{a_3}{8} + \frac{a_4}{15} - \frac{a_5}{24} + \dots, \frac{(-1)^n a_n}{(n^2 - 1)} \quad (2)$$

选择不同的参数 $a_i (i = 2, 3, 4, \dots, n)$, 便可得到不同修正压力的活塞环, 如当 a_i 全取 0 时, 便可得到等压环的自由形状曲线:

$$u = \frac{P_0 r^4}{EJ} (1 + 0.5 \sin \varphi) \quad (3)$$

为了能仿形加工活塞环, 必须满足进刀机构的最大进刀量 $f_{\max} = u_{\max} - u_{\min}$, 且进刀量 $f(\theta)$ 在 $[0, f_{\max}]$ 之间严格单调。这两个条件可以通过合理设计凸轮形状及设置凸轮偏心调节机构来解决。设置凸轮偏心调节机构的另一个好处是当凸轮磨损而使 $f_{\max} < u_{\max} - u_{\min}$ 时, 可通过偏心量的调节来增大 f_{\max} 的值, 从而降低了系统对凸轮精度的要求。为方便起见, 假设现有凸轮在匀速旋转时, 进刀机构将按正弦曲线规律进刀, 而实际需要加工的是金茨布尔格曲线。将其和正弦曲线比较, 展开在同一坐标系中如图 2 所示。下面利用仿射原理求进刀机构的进刀规律。当主轴转过 θ 角时, 需要的进刀量 $f = u$, 此时凸轮应该转过 θ 角, 以使进刀机构具有 $f = u$ 的进刀量。将角度坐标分成 n 等份, 令

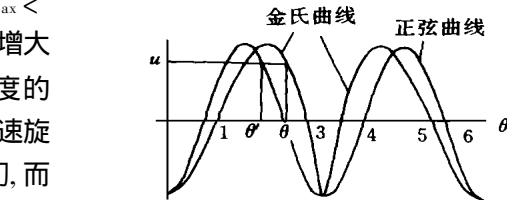


图 2 正弦曲线和金茨布尔格曲线

$$\Delta\theta = 360/n$$
 由于主轴是匀速转动的, 主轴的角速度可表示为

$$\omega = \Delta\theta / \tau$$

利用图 2 可以建立 $\Delta\theta_i$ 和 $\Delta\theta_i$ 的对应关系, 因而在主轴转过 $\Delta\theta$ 角度时(可由主轴码盘监测), 步进电机的角速度

$$\omega_i = \frac{\Delta\theta_i}{\tau} \quad \text{由此} \quad \omega_i = \frac{\Delta\theta_i}{\Delta\theta} \omega = \frac{\Delta\theta_i}{\Delta\theta} \omega \quad (4)$$

其中 ω 是已知的, $\Delta\theta$ 是我们设定的, 利用仿射原理求出 $\Delta\theta_i$ 便可得出步进电机转一周过程中的变速规律, 也即进刀机构的进刀规律。

对于不同压力分布的活塞环, 只要知道其曲线形状, 按上述方法便可求得进刀机构的进刀规律, 实现用同一凸轮加工不同压力分布活塞环。

3 智能决策与模糊控制技术

3.1 干扰信号的智能判定

因为系统工作环境恶劣, 当外界扰动信号串入时, 就会使系统运行混乱, 达不到预期的变速控制效果, 为此, 首先必须消除干扰信号对采样数值的影响。

在系统原理图中, 电机码盘刻线为 400 线(在圆周方向均匀分布, $N_m = 400$ 线/转);

主轴码盘的刻线为 2000 线(在圆周方向均匀分布, $N_s = 2000$ 线/转)。在此,以主轴码盘刻线作为触发信号,对电机码盘信号进行监测。由于进给机构的进给量与步进电机的转角相对应,故通过控制步进电机转速,可以较精确地控制进给量的变化。将转角离散化用对应的码盘刻线数表示则有:

$$\begin{aligned} N_s(k) &= \Delta\theta^* k \\ N_m(k) &= \sum_{i=1} \Delta\theta^i \end{aligned} \quad (5)$$

在主轴和步进电机第 k 个相对应的位置上,它们间转角的差别用刻线数表示如下:

$$C(k) = N_s(k) / 5 - N_m(k) \quad (6)$$

所以,根据仿射原理求得的主轴和电机的转角关系应为:

$$N_s(k) = (N_m(k) + C(k)) \cdot 5 \quad (7)$$

否则,存在误差信号 $e(n)$, 且有:

$$\begin{aligned} e(n) &= N_s(n) - (N_m(n) + C(N)) \cdot 5 \\ ce(n) &= e(n-1) - e(n) \\ \delta e(n) &= \sum_{i=1}^{n-1} e(i) \\ n &= 1, 2, 3, \dots, N \end{aligned} \quad (8)$$

由于主轴转速是均匀的,所以主轴码盘信号 $N_s(n)$ 出现的频率是可预估的。当 $N_s(n)$ 出现的频率发生异常现象,可根据主轴实际转速消除干扰信号的影响。

至于电机码盘信号 $N_m(n)$,可按仿射原理事先预估出它出现的规律,因而也可以进行类似的处理。当 $N_m(n)$ 异常时,可按下式估算计数值

$$\begin{aligned} \text{if } \Delta u(n-1) = m \text{ then } N_s(n) &= (N_m(n) + C(n)) \cdot 5 + l \\ (n &= 1, 2, 3, \dots, N) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, m, l 为整数,且 $m \in [-4, 4], l \in [-4, 4]$ 。然后再根据式(8)计算相应的参数。在式(9)中, $\Delta u(n-1)$ 为第 $n-1$ 次电机转速控制信号的增量, Δu 越大,电机转速越小, $N_m(n)$ 越小;反之亦然。此外, l 的取值大小可根据实验的统计结果来估计。

3.2 模糊控制器的设计

模糊控制器的基本规则是用产生式规则建立一个知识库,即

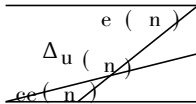
$$\text{if (process state) then (control output)}$$

其实质为知识控制模块,这种产生式规则表达清楚,符合人机系统的操作思维。在本系统中,模糊控制器有 2 个输入变量 e, ce 和一个输出变量 Δu 以及一个辅助输出判决变量 δe ,形成准 PID 模糊控制器,其控制规则如表 1 所示。在这个控制规则中,输入分成 5 个档次:NB(负大),NS(负小),ZE(零),PS(正小),PB(正大)。

模糊状态表 1 中的每一项对应于一个模糊关系,这些模糊关系是根据系统的瞬态响应时间最短和稳态误差最小的准则来确定的。辅助输出变量 δe 的作用将在后面说明。

在模糊控制规则中,模糊条件推理语句是描述系统变量相互关系的,故需用隶属函数来定义模糊集,以便对系统变量进行模糊化处理,隶属函数的形式可根据操作者的经验和习惯来决定的。在本系统中,我们采用“三角形”函数来定义系统的隶属函数。

表 1 模糊状态表

	PB	PS	ZE	NS	NB
PB	NB	NB	NS	NS	ZE
PS	NB	NS	NS	ZE	PS
ZE	NS	NS	ZE	PS	PS
NS	NS	ZE	PS	PS	PB
NB	ZE	PS	PS	PB	PB

当建立了模糊控制规则后, 必须经过模糊推理来计算模糊控制器的输出量 Δu . 在此, 我们采用“最大乘法”模糊推理方法. 此外, 模糊控制器的输出量 Δu 是一个模糊集, 必须经过模糊判决(本文采用重心判决法), 将其变成确定的数值, 才能进行控制. 根据表 1 给定的控制规则, 并应用上述模糊推理和模糊判决方法, 可得出控制决策表. 由此, 经简单的矩阵映射, 就可以在该表中找出所需的控制量 $\Delta u(n)$, 从而可减少控制器的计算时间. 为了使系统的稳态误差 $\delta e(n)$ 最小和过渡过程的时间最短, 模糊控制器的输出值可经如下处理:

$$\Delta u(n) = \begin{cases} 0 & \delta e(n) = 0 \\ \pm 1 & \delta e(n) = \pm 1 \\ \text{int}\{\Delta u(n)\} & \delta e(n) > 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\text{int}\{\Delta u(n)\}$ 表示对 $\Delta u(n)$ 值取整(因为电机的输入是频率信号)

该控制算法在实际应用中的效果比较理想, 它提高了系统的鲁棒性, 使系统在干扰信号较大的恶劣环境下也能正常运行.

4 实验结果

基于上述原理, 我们在数控仿形车床上进行了加工实验. 仿形凸轮匀速旋转时, 刀具按正弦规律运动. 欲加工的活塞环自由形状曲线为金茨布尔格曲线. 具体实验条件如下:

- 车床型号: JMT360 型高速精密车床
- 主轴转速: 120r/min
- 走刀量 f : 0.075mm
- 最大切深 t : 2mm
- 材料: 球墨铸铁

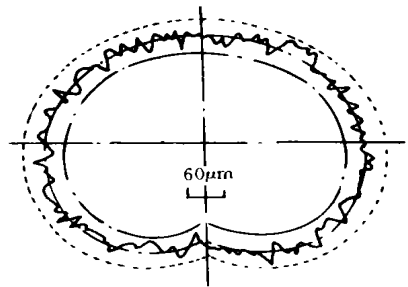


图 3 被加工活塞环实测曲线

工件轮廓实测曲线如图 3 所示, 图中的中心虚线为金茨布尔格曲线理论值, 外侧虚线为 $\pm 30\mu\text{m}$ 公差带. 对若干次切削实验的误差分析列于表 2 中. 分析表明, 利用该系统可以加工出具有各种修正压力分布的合格活塞环.

表 2 切削实验结果(单位: μm)

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值	均方差
最大误差	± 28	± 19	± 30	± 25	± 20	± 17	± 23	± 27	± 21	± 25	± 23.5	± 12.6

5 结论

实验结果表明,基于仿射原理并利用模糊控制技术设计的系统,可以加工具有不同修正压力分布的活塞环,加工精度满足使用要求。该系统具有结构简单、经济、“柔性”好、可靠等明显的优点。当然,作为实用机床推广,还有些技术问题有待解决,比如凸轮形状的选择就需要进一步研究。优化的凸轮形线有利于提高进给机构的动态性能。

参考文献

- [苏]金茨布尔格. 活塞环理论. 谢仲群等译. 北京: 机械工业出版社, 1986
- 潘仲明, 戴一帆, 王世民. 变速仿形系统中的模糊控制方法. 模糊系统与数学, 1996
- 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)