

# 数控随动磨床加工凸轮方法及其精度补偿策略\*

吴 兴<sup>1</sup>, 黄文广<sup>1</sup>, 黄兴红<sup>1</sup>, 潘旭华<sup>2</sup>

(1. 浙江机电职业技术学院 机械工程分院, 浙江 杭州 310053;

2. 苏州亚微精密机床厂, 江苏 苏州 215000)

**摘要:** 针对凸轮随动磨削中因工件轴转速差、伺服系统响应偏差、硬件制造误差等重复性误差影响因素造成的零件制造精度下降问题, 将在线测量技术和Sinumerik 840D数控系统的插补表与电子齿轮功能应用到机床运动控制系统中, 开展了随动磨削工艺的运动轨迹和控制方案分析, 提出了由内嵌在系统PCU上的VB程序来处理在线测量获得的360个离散误差补偿数值, 自动生成带插补表与电子齿轮功能的专用加工程序, 利用同轴运动叠加控制方法, 把补偿值叠加到进给轴上, 使带误差补偿数据的凸轮加工NC程序不断根据实际加工状态更新, 最后在工程样机上进行了磨削试验。试验结果表明, 发动机凸轮轴的廓型最大加工误差降到了2.6 μm以下, 残余误差主要来源为机械振动、非线性摩擦扰动等随机性偏差。该运动控制和误差补偿方法能在实际加工中较好地补偿重复性误差因素对工件精度产生的影响。

**关键词:** 凸轮轴; 随动磨削; 精度补偿; 编程示例

中图分类号: TH164; TH132.47; TG58

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)06-0636-04

## Working methods of servo cam grinder and its accuracy compensation strategy

WU Xing<sup>1</sup>, HUANG Wen-guang<sup>1</sup>, HUANG Xing-hong<sup>1</sup>, PAN Xu-hua<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Hangzhou 310053, China; 2. Suzhou Yawei Precision Machine Tool Plant, Suzhou 215000, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of decline in accuracy caused by the cam servo grinding workpiece speed difference, the servo system response deviation, the hardware manufacturing errors and repercussion factors of repeatability error etc., the online measurement technology and Sinumerik 840D of interpolation table together with electronic gear function were applied in the machine motion control systems. After the analysis of the trajectory of the grinding process and control programs, a method of 360 pcs discrete error compensation value was posted through online measurement handling by the VB program embedded in the PCU system, automatically generated the specific processing procedures with interpolation table and electronic gear function by control method of the superimposing coaxial movement, the compensation value was superimposed to the feed axis. Finally, the cam machining NC programs with data of error compensation was updated according to the actual processing. The engineering prototype were tested. The test results show that the engine camshaft profile of maximum machining error is reduced to lower than 2.6 μm, the mechanical vibration and nonlinear friction disturbance are the main sources of residual error. The results show that the motion control and error compensation method can reduce the impact of the repeatability error factors on the workpiece accuracy.

**Key words:** camshaft; servo grinder; accuracy compensation; example program

## 0 引 言

汽车发动机的凸轮轴是发动机关键零件之一, 它

直接影响发动机的性能和油耗等关键指标。随着我国汽车工业的高速发展, 对发动机凸轮轴加工的质量和生产效率提出了更高的要求。

收稿日期: 2012-02-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2008AA042504)

作者简介: 吴 兴(1973-), 男, 浙江桐庐人, 实验师, 主要从事机械设计、制造及自动控制方面的研究。E-mail: wx2050@sohu.com

凸轮轴数控随动磨削加工技术是按照凸轮轮廓曲线参数编制数控程序,利用数控系统实现砂轮的径向往复运动和工件回转运动的精确联动,无需机械靠模等辅助工具直接磨削凸轮的全数控、自动化方式新技术<sup>[1]</sup>。理论上只要砂轮进给轴X轴和工件回转轴C轴严格按NC指令轨迹运行,即可保证凸轮轴加工精度。但受到砂轮损耗补偿算法复杂、工件轴转速非线性、伺服系统响应偏差、误差补偿与主控制程序协同等问题的制约<sup>[2]</sup>,数控随动磨削加工技术的应用在国内仍处于起步阶段。相关学者针对上述问题也开展了多项研究。罗红平等<sup>[3]</sup>研究了砂轮中心位移与凸轮转角间关系的数学模型,提出了使用恒线速度磨削以提高凸轮加工精度。范晋伟等<sup>[4]</sup>研究了凸轮加工中理想砂轮中心包络线的计算方法,并在此基础上提出了利用软件生成理想数控指令的方法。杨金凤等<sup>[5]</sup>研究了凸轮轴在线检测机构及误差分析方法,提出了在线检测设备的硬件配置和数据处理的流程。这些研究进展部分解决了一些凸轮轴随动磨削方法在国内的工程应用问题,但由于凸轮轴是异形细长轴,实际加工时受磨削力作用产生的变形在不同的转角并不相同,要求伺服电动机完全准确跟踪运动指令也非常困难,导致其运动控制策略繁复,误差计算与补偿复杂等问题仍然一直困扰着设备制造和产品生产企业。

本研究将采用凸轮加工误差在线检测的方法,利用Sinumerik 840D数控系统的插补表与电子齿轮功能,开发专用数控程序,实现带离散误差补偿数据组的凸轮随动精密磨削。

## 1 凸轮随动磨削过程中砂轮轨迹的计算

要通过数控随动磨削技术来加工凸轮,首先要确定砂轮中心在凸轮任意转角时的对应坐标点,这些坐标点是进行数控程序编制和精度补偿的基础。

目前,企业生产中凸轮轮廓形状要求通常是以升程表形式给出,其原始数据中包括:测量角度 $\Psi$ 、升程 $H$ 。升程表给出的是一组离散数据,实际加工中为了方便计算数控程序中的坐标点,要将其用连续可导的升程表达式统一表示。升程表达式形式为: $\Psi=H(\Psi)$ ,可以采用三次样条曲线来拟合所有的升程表离散数据以获得表达式<sup>[6]</sup>。

根据从动件结构的不同形式,凸轮顶杆可分为3种不同形式:刀口顶杆、滚子(含球面)顶杆、平面顶杆。这3种不同形式的顶杆测量出的凸轮升程 $H$ 的含义是不相同的。汽车凸轮轴的顶杆形式主要为平面

顶杆,其测量原理如图1所示<sup>[7]</sup>。

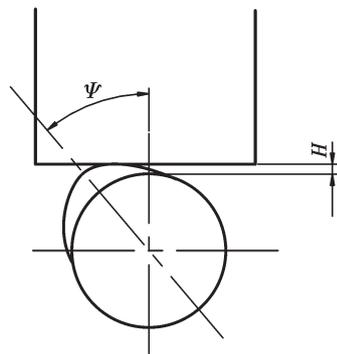


图1 凸轮升程测量原理

顶杆形式不同,砂轮中心位移和凸轮轴转动之间的数学模型也不完全相同,为了计算方便,可以将平面顶杆看作是当滚子半径为无穷大时的滚子顶杆。因此只要得出滚子顶杆形式下砂轮中心位移的数学模型,就可以得出平面顶杆凸轮加工要求的砂轮中心位移各个坐标点。

数控随动磨床磨削滚子顶杆凸轮的加工示意图如图2所示。加工时凸轮绕 $O_2$ 旋转,砂轮一边旋转,一边沿 $O_1O_2$ 水平往复移动。凸轮顶杆只是在检测升程或实际工作时才用,磨削加工时并不存在,但为理论推导方便,把顶杆的滚子也画在图2上。

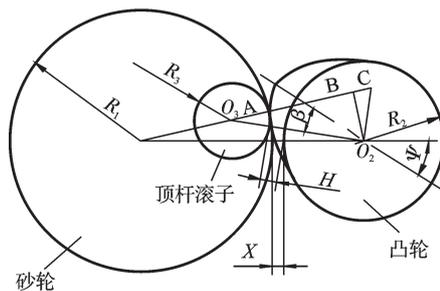


图2 随动磨削凸轮示意图

$O_1$ —砂轮圆心, $R_1$ —砂轮半径; $O_2$ —凸轮基圆圆心, $R_2$ —基圆半径; $O_3$ —滚子圆心, $R_3$ —滚子半径。

设磨削凸轮基圆对应的砂轮中心位置为X轴坐标零点,则图1中凸轮磨削时对应的砂轮中心位移 $X$ 为:

$$X = \overline{O_1O_2} - R_1 - R_2 \quad (1)$$

每一个 $\beta$ 角对应的砂轮中心位移 $X$ 为:

$$X = \sqrt{\left[ (R_2 + H + R_3) \sin \left( \tan^{-2} \frac{dH}{d\beta} \frac{1}{R_2 + H + R_3} \right) \right]^2 + \left[ (R_2 + H + R_3) \cos \left( \tan^{-2} \frac{dH}{d\beta} \frac{1}{R_2 + H + R_3} \right) + R_1 - R_3 \right]^2} - R_1 - R_2 \quad (2)$$

对于平面顶杆形式的凸轮而言,理论上相当于 $R_3$ 为无穷大的情况,在实际计算时当 $R_3$ 取得足够大时即可。实际加工零件时,还需要知道凸轮每旋转一度时对应的砂轮中心 $X$ 轴坐标点,所以还要求出 $\beta$ 与 $\Psi$ 的关系。凸轮每转一度对应的砂轮中心移动的距离为:

$$\begin{cases} \Psi = \beta + \angle O_1O_2O_3 = \beta + \angle O_2O_3C - \angle O_2O_1C = \\ \beta + \tan^{-1}\left(\frac{\overline{O_2C}}{R_2 + H(\beta) + R_3}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\overline{O_2B}}{\overline{O_1B}}\right) \end{cases} \quad (3)$$

## 2 实现凸轮轴随动磨削工艺的运动轨迹分析

在分析随动磨削凸轮示意图(如图2所示)的基础上,结合实际加工要求,可以得出凸轮轴随动磨削轨迹由以下几个基本插补运动组成:

- (1)  $C$ 轴带动凸轮轴的转动运动。 $C$ 轴转过的角度为圆轨迹,是凸轮轮廓误差补偿的基准,标记为 $Tr\_C$ 。
- (2)  $X$ 轴带动砂轮进行往复运动。它和 $C$ 轴的运动配合得到不同轨迹的凸轮表面形状,标记为 $Tr\_X$ 。
- (3)  $X$ 轴在进行往复运动的同时叠加一个进给运动,标记为 $Tr\_X'$ 。

则凸轮磨削运动的合成轨迹 $Tr = Tr\_C + Tr\_X + Tr\_X'$ 。这对控制系统提出了多轴联动和同轴运动叠加等功能要求,同时对系统数据的处理速度也有很高要求,可以选用Sinumerik 840D和FANUC 18i等高端数控系统来实现。

## 3 误差补偿轨迹的检测和获取方法

凸轮随动加工在线检测与补偿工作原理图如图3所示。

凸轮表面轮廓进入精磨之前,要利用在线检测量仪对轮廓进行升程测量。以力矩电机带动的 $C$ 轴匀角速度转动,量仪的可伸缩平板测头与凸轮接触,通过位移传感器把数据传输到数控系统,以每一度为采样单位,生成一圈360个点的凸轮升程值数据表,与设计要求的标准升程值进行比较,确定凸轮对应角度上的升程误差。在检测过程中,为了方便检测及随后的误差数据处理,可以把实际基圆上基点处的升程定为零升程。系统进行数据采集时,按文献[5]提出的方法,力矩电机带动的转台要求匀速转动,每转过 $1^\circ$ 采集一个数据,并进行3圈以上的多次测量,实际升程值取平均值。

在线测量获得的360个升程误差值是一组离散的数据,受最高响应速度的限制,数控系统无法直接用

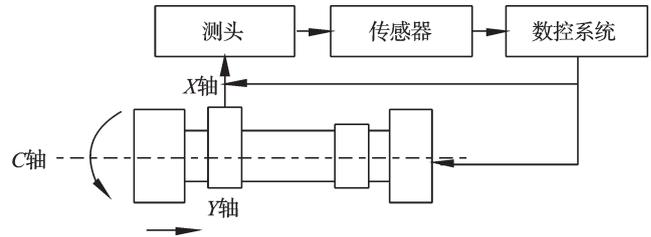


图3 在线检测与补偿工作原理

离散数据编制的点对点控制的程序实现高速准确加工,需要使用诸如Sinumerik 840D系统的插补表和电子齿轮等高级编程功能来实现。利用自主开发的内嵌在840D系统PCU上的VB程序误差处理软件,可以自动生成带插补表和电子齿轮功能的误差补偿NC程序。并由该程序引导机床 $C$ 轴和 $X$ 轴的运动, $X$ 轴实时坐标值由式(2)计算的理论值和补偿值叠加构成,从而使机床完成带精度补偿的精磨加工。

通过在线检测和实时误差补偿,凸轮加工的NC程序不断根据实际加工状态更新,综合补偿了砂轮损耗、工件轴转速差、伺服系统响应偏差等误差因素,提高了凸轮加工精度。在线检测量仪不但操作方便,而且检测升程值的重复性和精度高,能大大提高凸轮磨削加工的生产效率、降低废品率。

## 4 插补表与电子齿轮功能介绍

插补表和电子齿轮是Sinumerik 840D系统独立的两个功能模块。插补表是表示两轴之间位置和速度关系的一种高级轨迹功能,其原理说明如图4所示。

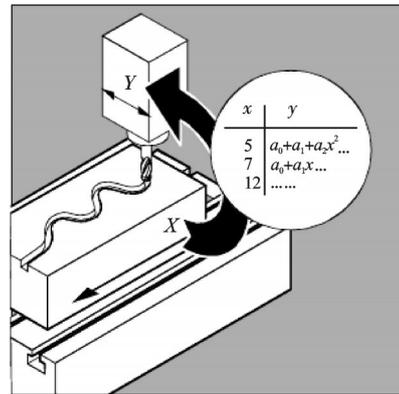


图4 插补表应用原理图

通过分析图4可得, $X$ 轴为引导轴, $Y$ 轴为跟随轴, $X$ 、 $Y$ 之间的关系由多项式函数表所决定。本研究将多项式函数表的关系建成插补表,构成轴向引导值耦合的基础,从而实现引导值和跟随值之间的功能性关联。在相应的编程时,从相互所属的引导轴和跟随轴的位置中,数控系统会计算出一个与插补表关系相对应的多项式,从而把离散数据式的点对点控制转化为连续的函数控制关系。

Sinumerik 840D系统的电子齿轮模块可以实现引导轴对跟随轴的运动控制。每个引导轴可以通过耦合系数定义引导轴和跟随轴之间的关系。通过使单个引导轴运动分量乘以其耦合系数,由加法构成所计算的跟随轴运动分量,也可以通过插补表实现引导轴和跟随轴之间的非线性运动关系的控制<sup>[8]</sup>,从而实现同一轴的运动叠加控制功能。

## 5 数控程序实例介绍

### 5.1 编程思路

(1) 使用插补表功能,将凸轮轴每旋转一度对应的砂轮中心轨迹在X轴上的点建立插补表;由凸轮轴C轴(主动轴)带动X轴。

(2) 使用电子齿轮功能,使得C轴按插补表数值引导X轴完成非线性跟随。

(3) 编程使用G91 C=\_X=\_。当C轴旋转时,通过插补表和电子齿轮带动X轴运动;同时,X轴叠加一个进给运动。

(4) 采集、对比测量数据,通过误差处理软件修改插补表数值,完成精度补偿加工。

### 5.2 相关参数设定

数控系统通用参数设置:

MD 10000[0] X1 砂轮架移动轴

MD 10000[1] Y1 工件移动轴

MD 10000[2] C1 凸轮轴旋转轴,为编程方便起见定义为旋转轴。

数控系统通道参数设置:

MD 20070[0]...[4] 1,2,3

MD 20080[1]...[4] X,Y,C

MD 20050[0]...[1] 1,2

MD 20060[0]...[1] X,Y

数控系统轴参数的设定:

因X轴在编程中要使用OVERLAID功能,必须设置叠加轴的DBX26.4为1。

### 5.3 数控程序

(1) 定义插补表。定义C轴与X轴插补表,该插补表中还包括360个误差补偿数据,由内嵌在840D中的误差程序后置处理软件生成。

C轴与X轴插补表(CL\_TABLE)定义:

CTABDEF(X,C,1,1)

C=0 X=0

.....

C=359.999 X=0

CTABEND

M17

(2) 主程序。

主程序定义如下:

CL\_TABLE;装入插补表

M00

G0 C0;到达加工起始点

COUP\_ON(1,1);启动插补表;启动电子齿轮

G1 G91 C3600 X0.2 F100;开始加工

M30

## 6 随动磨削试验加工

本研究在实验室构建了基于液体静压导轨的非圆随动磨床工程样机,如图5所示。运动部件都采用直接驱动方式来减少误差,其中X轴采用专利技术液体静压导轨<sup>[9]</sup>和直线电机驱动,工件旋转轴C轴采用力矩电机驱动,砂轮采用电主轴驱动,控制系统采用Sinumerik 840D。试加工工件为WD615发动机的凸轮轴,首先采用无补偿磨削试验,加工后凸轮的最大轮廓误差实测为16 μm。产生误差的主要原因是设备运动部件的加工和装配误差,以及伺服系统的响应滞后偏差等<sup>[10]</sup>,误差值在X轴换向时表现的尤为明显。通过在线测量和带插补表功能的误差补偿技术,使用以上的专用数控程序试验加工,磨削后所获得的廓型最大误差达到2.6 μm以下,达到零件给定的廓型加工精度要求。这一误差补偿方法是从最终加工获得的工件质量出发,给出的误差补偿数值是工件轴转速差、伺服系统响应偏差、硬件制造误差等重复性影响因素的综合反映。

补偿后零件的残余误差主要来源为机械振动、非线性摩擦扰动等随机性偏差,由此可见,影响凸轮轴随动磨床加工精度的非理想因素得到了直接有效的补偿。

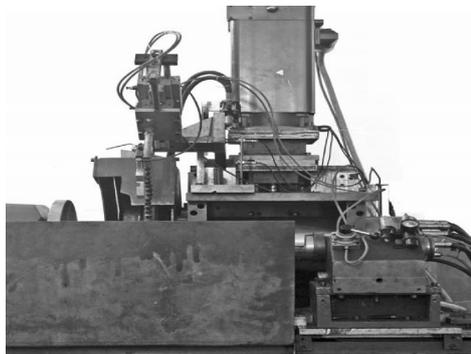


图5 非圆随动磨床工程样机

## 7 结束语

结合高端数控系统开发的自动控制 and 精度补偿方法是传统机械靠模仿型磨削加工所无法实现的,数

(下转第644页)

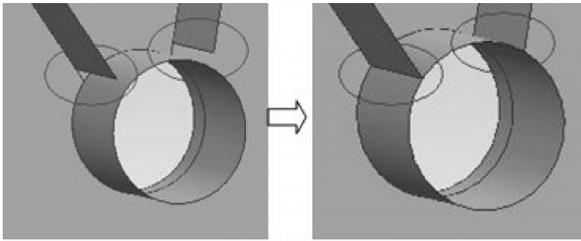


图5 中位面的连接缝合过程

### 3 结束语

本研究提出利用C++语言编程调用UG/Open API函数的方法,实现挖掘机工作装置的动臂和斗杆模型进行细节特征删除和中位面的自动提取过程,使工作装置的有限元模型得到简化,有利于改善网格划分质量,降低模型的分析时间,在CAD/CAE集成过程中有效提高了从CAD模型到CAE模型的转换效率,优化了有限元分析的结构模型。

### 致 谢

感谢纪老师在本项目中对我的指导,感谢河海大学对该项目的资助。

### 参考文献(References):

- [1] 孔德文,赵克利,徐宁生. 液压挖掘机[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [2] 刘 韬,胡军科,谢 平. 液压挖掘机工作装置结构的优化设计[J]. 建设机械技术与管理,2011(11):118-120.
- [3] 杜文靖,崔国华,刘小光. 挖掘机工作装置整体集成有限元分析[J]. 农业机械学报,2007,38(10):20-23.

- [4] 李金晓,杨茹萍. 挖掘机动臂的有限元分析[J]. 建筑机械化,2009(11):59-62.
- [5] RAMANATHAN M, GURUMOORTHY B. Generating the mid-surface of a solid using 2D MAT of its faces[J]. **Computer-Aided Design and Applications**,2004(1):665-674.
- [6] Quadros, William Roshan. An approach for extracting non-manifold mid-surfaces of thin-wall solids using chordal axis transform[J]. **Engineering with Computers**, 2008, 3(24):305-319.
- [7] 黄 勇. UG/Open API、MFC和COM开发实例精解[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [8] 赵璞峰. 基于CAD的VR多层次细节模型生成技术研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2006.
- [9] 葛晓波. 有源相控阵雷达机箱模块CAD/CAE集成建模技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学机电工程学院,2009.
- [10] NIKHIL J, DEBASISH D. Feature simplification techniques for freeform surface models [J]. **Journal of Computing and Information Science in Engineering**, 2003, 3(3): 177-86.
- [11] 何 磊. 框架零件的CAD/CAM集成制造技术研究[J]. 机械,2010,37(9):58-61.
- [12] 杜宏亮,袁 媛,蒋家桥,等. 一种大型桁架CAD中的有限元分析[J]. 机械,2010,37(1):52-54.
- [13] 王 会. 基于VB6.0和UG NX4.0的盘形凸轮机构CAD系统设计[J]. 机械,2010,37(1):55-58.
- [14] SHEEN D P, SON T, MYUNG D K, et al. Transformation of a thin-walled solid model into a surface model via solid deflation[J]. **Computer-Aided Design**, 2010,42(8):720-723.

[编辑:李 辉]

(上接第639页)

控随动凸轮磨床可以显著地提高凸轮的制造水平、生产效率和柔性化制造能力。通过使用Sinumerik 840D数控系统的电子齿轮、插补表功能和误差数据在线检测手段,能够方便地获取凸轮轴加工时对应转角的补偿数值,并能把这些离散的补偿数据转换添加到实际加工程序中,从而引导机床实现即时补偿磨削,较好地解决了砂轮损耗、工件轴转速差、伺服系统响应偏差等重复性误差影响因素。这为提高凸轮轴轮廓的磨削精度提供了一种可行的方法。

### 参考文献(References):

- [1] 潘盛湖,杨继东. 高精度数控凸轮轴磨床控制系统设计[J]. 机床与液压,2006(11):177-179.
- [2] 李 静,沈南燕,何永义,等. 凸轮非圆磨削动态误差预测及补偿[J]. 制造技术与机床,2009(10):64-68.

- [3] 罗红平,周志雄,孙宗禹,等. 凸轮轴切点跟踪磨削加工策略[J]. 湖南大学学报,2002,29(3):62-64.
- [4] 范晋伟,关佳亮,阎绍泽. 提高精密凸轮磨削精度的几何误差补偿技术[J]. 中国机械工程,2004,15(14):123-126.
- [5] 杨金凤,孙志永. 凸轮轴在线检测及误差分析[J]. 机械设计与制造,2009(8):174-175.
- [6] 黄富贵,傅师伟,张认成. 基于三次样条函数拟合的凸轮升程误差评定方法[J]. 轻工机械,2004,22(4):80-83.
- [7] 杨连生. 内燃机设计[M]. 北京:中国农业机械出版社,1981.
- [8] Siemens Ltd.. SINUMERIK 840D/840Di/810D/FM-NC Programming Guide[M]. Siemens, 2007.
- [9] 潘旭华. 一种油膜厚度可调的静压导轨及其调节方法:中国,200810061701. 0[P]. 2008-10-08.
- [10] 俞红祥,张 昱,潘旭华. 新型非圆随动磨削运动模型的研究[J]. 机械工程学报,2011,47(13):167-174.

[编辑:罗向阳]