

基于 CPAC 的非圆磨削数控系统的开发

徐新阳¹, 李建刚², 成群林¹

(1.上海航天精密机械研究所, 201600 上海; 2.哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 518055 广东 深圳)

摘要:为解决非圆磨削系统中工艺不足的问题,提出在 CPAC(computer programmable automation controller)控制器平台上开发一套非圆磨削数控系统.以分段三次样条曲线拟合为数学基础,介绍 $X - Y$ 加工方式下刀心轨迹坐标计算;介绍非圆磨削中恒速磨削的重要性,以等弧长密化插值为原则,提出两种实现恒速磨削的方法;介绍非圆磨削加工中的误差测量方法,并进行误差补偿;最后,集成了系统并在三轴龙门铣床进行加工,实验证明系统满足非圆磨削的需要.

关键词:非圆磨削;恒速磨削;误差补偿

中图分类号: TG595

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)11-0123-06

Development of NC system for non-circular grinding based on CPAC

XU Xinyang¹, LI Jiangan², CHENG Qunlin³

(1. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, 201600 Shanghai, China; 2. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, 518055 Shenzhen, China)

Abstract: To promote the defective craft in non-circular grinding NC system, a special NC system for non-circular grinding is presented based on CPAC. First, on the basis of piecewise cubic spline fitting as mathematical foundation, the cutter center coordinates of $X - Y$ is calculated. Second, the importance of constant speed grinding is produced, and two algorithms based on constant length of arc interpolation are put forward to realize constant speed grinding. Third, the method of error measuring and compensation is given. Finally, integrated system is completed and applied to three-axis milling machine. The experiment proves that the system can meet the needs of non-circular grinding.

Keywords: non-circular grinding, constant speed grinding, error compensation

非圆工件结构复杂,加工精度要求高,它是航天、汽车、船舶、发电设备等领域的关键部件^[1].非圆工件目前的加工方式以在通用磨床上加工为主,此类磨床是机床本体自行制造,数控系统进口国外,此种系统为标准数控系统如西门子 840D、发那科 Oi 系列等,缺乏非圆磨削的特殊工艺,如恒速磨削算法、误差补偿算法等,且因其系统自身的保护性,用户很难进行工艺算法的开发,因此,难以满足复杂工艺零件的加工^[2].因此,本文提出在 CPAC (computer programmable automation controller)控制器一体化平台上开发一套应用于非圆磨削的数控系统,集成恒速磨削算法,误差分

析补偿专家库等特殊工艺需求,解决了非圆磨削加工中的实际难题.

CPAC 是由深圳固高科技开发有限公司开发的一种嵌入式 PC、PLC 及运动控制器的一体化控制器(图 1).集成了 PC 的灵活性,PLC 的可靠性以及运动控制器的复杂运动执行能力^[3-4],与“工业计算机+运动控制器”形式的控制器相比,具有更高的可靠性、稳定性和抗干扰能力,能很好的满足非圆磨削加工的需要.

1 刀心坐标计算

本文以典型非圆工件汽车助力泵定子(图 2)为例,介绍数控系统开发及加工过程.

首先是刀心坐标的计算,加工数据的计算是 NC 系统的关键, $X - Y$ 坐加工方式为常见的加工

收稿日期: 2013-08-30.

作者简介: 徐新阳(1988—),男,工程师.

通信作者: 李建刚, jiangang_lee@163.com.

方式.在 $X - Y$ 坐标的磨削加工中,以定子中心为原点建立加工坐标系, X 轴和 Y 轴的插补联动运动使得砂轮沿着定子轮廓进行磨削加工.如图 3 所示,加工坐标系为 $(O - X, Y)$, $a_0(r_0, \theta_0)$ 为任意时刻磨削点, R 为砂轮半径,其轮廓的分段三次样条曲线拟合方程为: $r = S_k(\theta), r' = S'_k(\theta)$, $\theta_{k+1} \geq \theta \geq \theta_k$, 其具体拟合过程参见文献[5], 根据高等数学可知:

$$\mu_0 = \arctan \frac{s_k(\theta)}{s'_k(\theta)}. \quad (1)$$



图 1 CPAC 控制器



图 2 汽车助力泵定子

由 μ_0 可得

$$\phi = \mu_0 - \frac{\pi}{2}. \quad (2)$$

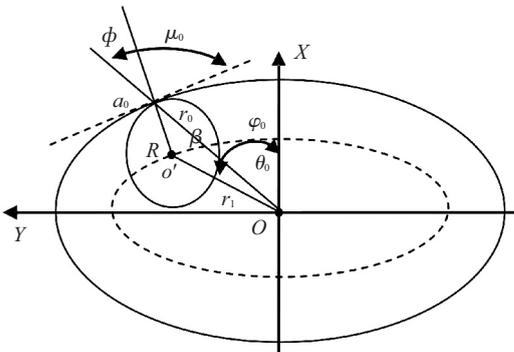


图 3 $X - Y$ 加工坐标计算

在三角形 $a_0o'o$ 中利用余弦定理计算 γ_1 为

$$r_1 = \sqrt{R^2 + r_0^2 - 2Rr_0 \cos \phi}. \quad (3)$$

再利用余弦定理求出夹角 β 为

$$\beta = \arccos \frac{r_1^2 + r_0^2 - R^2}{2r_1r_0}. \quad (4)$$

当 θ 在第二、四象限中时:

$$\beta = -\beta. \quad (5)$$

由此可得 $O'O$ 和 X 轴夹角

$$\varphi_0 = \beta + \theta_0. \quad (6)$$

最后求出砂轮中心在加工坐标系的坐标为

$$\begin{cases} x = r_1 \cos \varphi_0, \\ y = r_1 \sin \varphi_0. \end{cases} \quad (7)$$

2 恒速磨削算法

一般来说,磨削加工是整个工件加工流程的最后一道工序^[6],其加工质量直接影响最终工件表面的精度,在非圆工件在加工过程中,由于其轮廓曲率半径变化比较大,一般表现为磨削点线速度的变化,这些将影响工件的表面粗糙度^[7].因此,实现恒速磨削对提高工件表面质量具有重大意义,本文在恒速磨削方面的研究是对拟合后的曲线中进行等弧长密化插值,以保证在插补运动磨削过程中实现恒速磨削,曲线拟合见文献[5].

由上文知节曲线第 k 个区间上,节曲线的极坐标方程为 $r = S_k(\theta), r' = S'_k(\theta)$, $\theta_{k+1} \geq \theta \geq \theta_k$, 因为节曲线一阶连续可导,则两点弧长计算如下:

$$s_k = \int_{\theta_k}^{\theta_{k+1}} \sqrt{r'^2 + r^2} d\theta. \quad (8)$$

式中 $k = 0, 1, \dots, N - 1$.

同时,计算出节曲线第 k 个区间上极角为 θ 的点到第 k 点的弧长为

$$s_{k,\theta} = \int_{\theta_k}^{\theta} \sqrt{r'^2 + r^2} d\theta. \quad (9)$$

式中: $\theta_{k+1} \geq \theta \geq \theta_k, k = 0, 1, \dots, N - 1$.

因此,原始节曲线总的弧长为

$$S_k = \sum_{i=0}^k s_i$$

式中 $i = 0, 1, \dots, k$.

有了工件节曲线总弧长就可以进行密化插值,假设总的弧长为 S ,插值点数为 N ,那每一段的弧长为 S/N ,每一插值点对应的弧长为 $S_i = (S/N) * i, i = 0, 1, \dots, k$,图 4 给出由弧长 S 计算该点对应坐标的计算过程.

下面以一组原始节曲线数据为例介绍算法整个过程.原始节曲线数据见表 1,轮廓曲线见图 5.

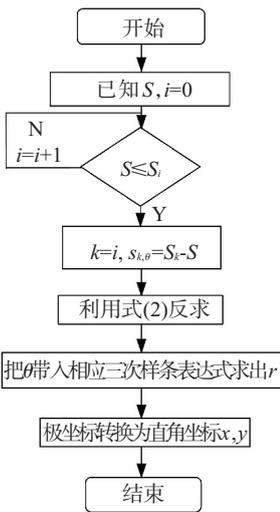


图 4 由弧长 S 计算节曲线对应点坐标

表 1 原始节曲线部分数据

X 坐标 / mm	Y 坐标 / mm
20.800	0
20.797	0.363
20.787	0.726
20.749	1.451
20.721	1.813
⋮	⋮
-20.800	0
-20.797	-0.363
-20.787	-0.726
-20.749	-1.451
⋮	⋮
20.721	-1.813
20.749	-1.451
20.787	-0.726
20.797	-0.363
20.800	0

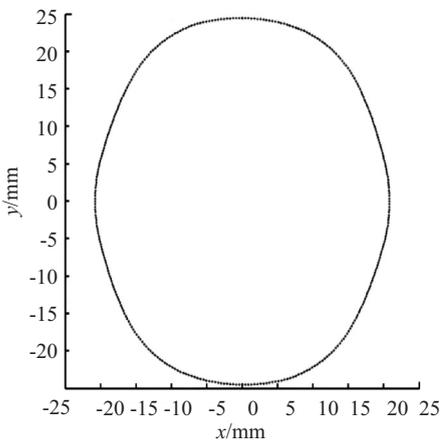


图 5 轮廓曲线

第一种恒速磨削算法流程见图 6, 在工件坐标系中对原始节曲线进行一次分段三次样条拟合, 以等弧长原则进行密化插值计算, 最后是机床坐标系下的加工数据计算, 计算过程见图 4 所示。

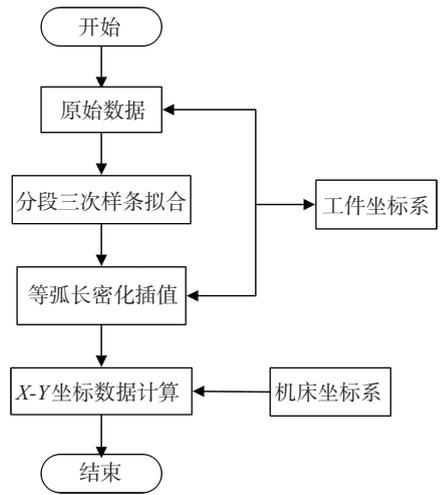


图 6 工件坐标系下恒速磨削的实现

考虑到第一种方法过早的在工件坐标系下完成密化差值计算, 再计算 $X - Y$ 坐标数据时会引入计算精度误差等不确定因素, 不能保证加工数据轨迹的等弧长, 本文设想在机床坐标中对加工数据进行二次等弧长密化差值, 以弥补前者的不足. 第二种方法是在一次三次样条拟合以后, 在机床坐标系中以加工数据轨迹的弧长 S 为自变量, 分别对加工数据 X_i 和 Y_i 进行二次分段三次样条拟合, 拟合最后进行密化插值得到理想加工数据, 计算过程见图 4 所示. 流程见图 7.

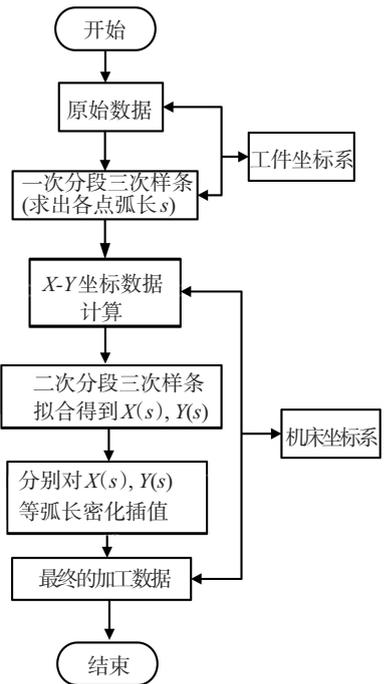


图 7 机床坐标系下恒速磨削的实现

3 误差补偿

加工精度是非圆磨床最重要的技术指标之一, 体现了磨削相对于其他加工方法的优越性^[8]。

对于机床精度的提高主要有两方面措施:一是从机床本体设计入手,优化机械结构设计,提高机床机械精度,减少和杜绝误差来源;二是误差在线测量和补偿,测量出误差量,加上一个补偿量,减少误差输出^[9].

本文测量方法是利用英国雷尼绍公司生产的 OMP40 无线测头作为测量工具,测量系统见图 8. 测头重复精度达到 1.0 μm,采用红外无线信号传输,信号接收单元和转换单元是与 OMP40 配套的 OMM 无线接收器和 MI12 信号状态显示与转换器,测量设备见图 9.

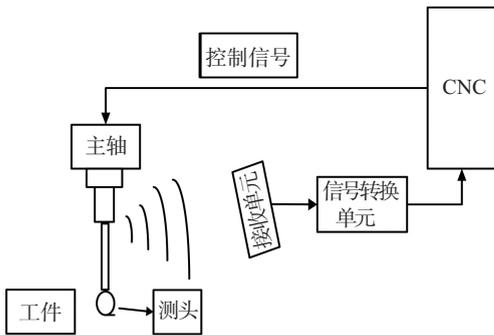


图 8 测量系统组成

根据原始定子轮廓采用的是极坐标形式表示,为了能够直接和原始数据比对测量误差,测量路径也选择在极径方向上^[10],图 10 给出了测量过程和测量路径的选择.根据原始数据点即为待测量点,在极坐标半径方向上留有一定安全退刀距离,计算出退刀点即为每一个测量循环的出发点,选择用直线插补运动方式执行测量过程,当探针接触工件后记下当前位置,退到下一个测量出发点位置,调整好测量方向,准备第二个测量点的测量,依次进行下去直到测量结束^[11-12],图 11 给出了实际测量实验的过程.

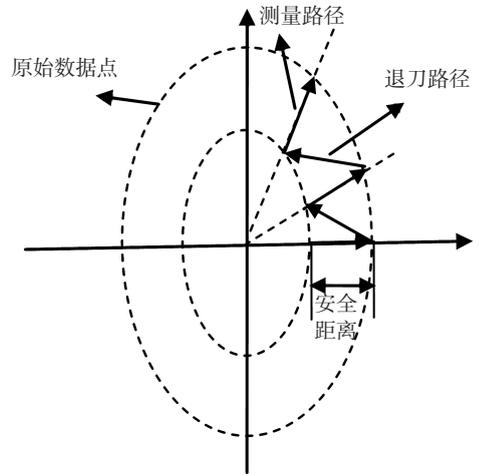


图 10 测量路径规划



(a) 红外无线测头



(b) 信号接收装置



(c) 信号转换装置

图 9 测量设备



图 11 测量误差过程

测量误差主要是在极坐标半径方向上,所以采取重新计算刀心坐标在砂轮半径方向上的位置进行误差补偿^[13],如图 12 所示,虚线为磨损后砂轮的位置,实线为补偿后砂轮位置,砂轮中心移动距离为补偿量 dr 即为测量误差的平均值.根据每次加工会引入新的固定误差量,加上一定的余量 Δr 代入式(3)、(4)重新计算加工数据

$$R = R' + dr + \Delta r . \tag{10}$$

4 磨削加工试验

本文在 CPAC 平台上开发了磨削系统及人机界面, 其中有磨削操作界面(图 13), 测量操作界面(图 14)以及参数设置、系统状态监控等功能, 完全满足非圆磨削加工的需要, 最后在一台三轴龙门铣床进行了磨削加工试验, 用直径 8 mm 平铣刀代替砂轮, 加工的余量为 0.2 mm, 加工过程见图 15. 加工完成后利用上述方法进行误差数据测量, 测得数据见表 2, 对误差数据进行分析补偿, 补偿前后的误差曲线见图 16, 工件效果如见图 17.

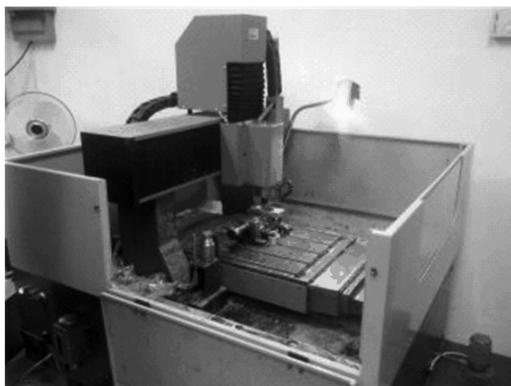


图 15 磨削加工过程

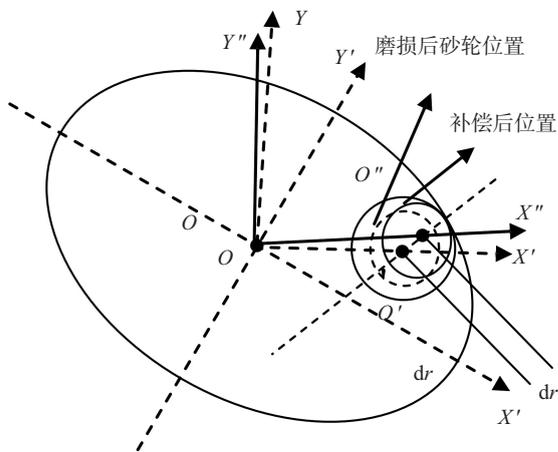


图 12 砂轮法线方向补偿

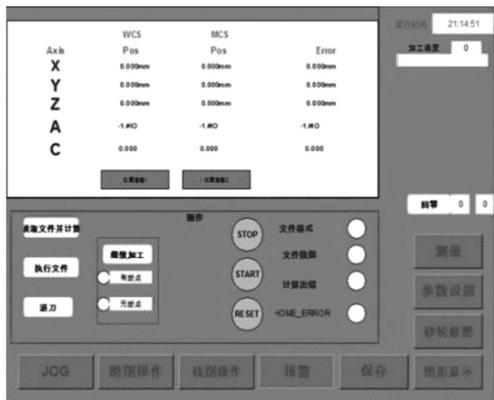


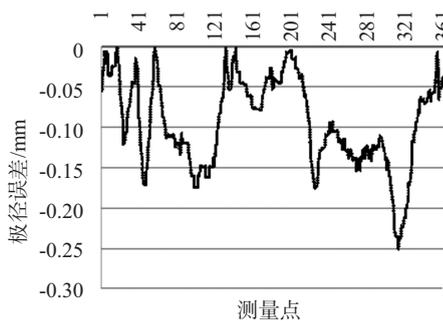
图 13 磨削操作界面



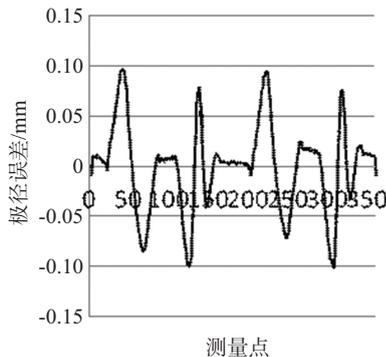
图 14 测量操作界面

表 2 测量误差部分数据

角度	原始极径/mm	测量极径/mm	误差值/mm
0	20.714	20.659	-0.055
1	20.714	20.681	-0.033
⋮	⋮	⋮	⋮
89	24.232	24.213	-0.019
90	24.23	24.205	-0.025
⋮	⋮	⋮	⋮
179	20.715	20.689	-0.026
180	20.714	20.661	-0.053
⋮	⋮	⋮	⋮
359	20.715	20.677	-0.038
360	20.714	20.663	-0.051

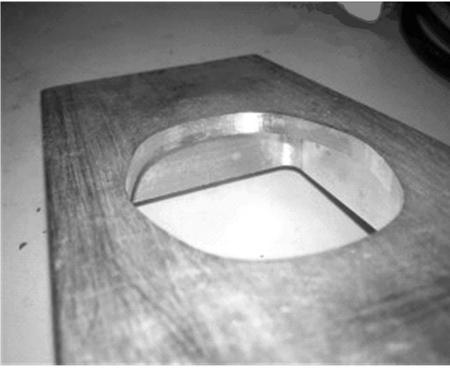


(a) 补偿前误差曲线

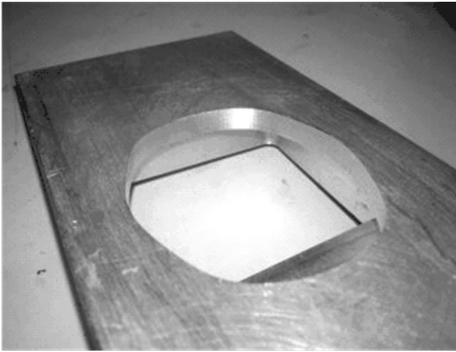


(b) 补偿后误差曲线

图 16 补偿前后误差曲线



(a) 补偿前加工效果



(b) 补偿后加工效果

图 17 补偿前后工件效果

补偿后误差值减小明显且呈现规律性分布, 试验件表面更加光滑, 说明误差已得到合理有效的控制, 补偿算法是切实可行的。

5 结 语

本文在 CPAC 平台上开发了非圆磨削数控系统, 集成了非圆磨削的特殊工艺, 并通过加工实验验证了本文提出的数据计算、恒速磨削算法和补偿算法的正确性和有效性。

参 考 文 献

[1] 李静, 沈南燕. 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): 39-42.

- [2] 邓朝晖, 唐浩. 凸轮轴数控磨削工艺智能应用系统研究与开发[J]. 计算机集成制造系统. 2012(8): 23-26.
- [3] WANG Bo, JIANG Shilong, WU Shengguang. A methodology for implementing the CPAC approach to path tracking with six-DOF robotic manipulators[C]//Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics Bangkok, Thailand; [s.n.], 2009: 22-25.
- [4] WANG Bo, JIANG Shilong, LI Zexiang. CPAC—a new control architecture for six-DOF industrial robotic manipulators [C]//2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. St. Louis, USA; [s.n.], 2009:78-84.
- [5] 李建刚. 非圆齿轮加工理论及其 CAM 系统的研究[D]. 西安:西安交通大学,2005.
- [6] 姜志波, 何永义. 曲轴切点跟踪磨削自动编程系统的开发[J]. 机械制造, 2012(6): 50-54.
- [7] LANPINEN J. Cam shape optimization by genetic algorithm [J]. Computer-Aided Design, 2003, 25: 727-737.
- [8] JYWE W. A 3D error measurement system for CNC machining Tools [J]. Fifth International Symposium on Instrumentation Science and Technology, 2009(05):34-37.
- [9] 胡琦峰. 实时测量在基于西门子 840D 数控轧辊磨床的应用[J]. 精密制造与自动化, 2012(2): 15-19.
- [10] LEI WT, HSU YY. Accuracy test of five-axis CNC machine tool with 3D proble-ball. Part 1: design and modeling[J]. Machine Tools & Manufacture, 2002(12): 55-60.
- [11] LEI WT, HSU YY. Accuracy test of five-axis CNC machine tool with 3D proble-ball. Part 1: errors estimation [J]. Machine Tools & Manufacture, 2002(12):61-64.
- [12] LEI WT, HSU YY. Error measurement of five-axis CNC machine with 3D proble-ball [J]. Materials Processing Technology, 2003(8)127-133.
- [13] 荣瑞芳, 赵先仲. 三位侧头在数控加工中的应用[J]. 制造技术与机床, 2003, 9: 42-48.

(编辑 苗秀芝)