

一种提升数控凸轮磨轮廓同步性的新算法

毛国勇¹, 黄文生¹, 张 宁²

(1. 常州工学院 电子信息与电气工程学院, 常州 213002; 2. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 在凸轮的磨削加工过程中, 由于砂轮与凸轮的接触点不一定在两者的连心线上, 磨削加工会导致接触点偏移, 因此, 直接根据原始轮廓线数据进行加工会导致加工出的凸轮与母轮不同步. 研究了砂轮半径与接触点偏差的关系, 分析了用曲线拟合方法确定接触点位置所存在的问题, 提出了直接根据凸轮升程的离散点数据确定接触点的算法, 并证明了算法的正确性. 该算法比曲线拟合算法更易于用计算机编程实现, 通用性更强. 实验结果表明, 该算法能有效消除砂轮半径对轮廓线数据的影响, 加工出的凸轮与母轮一致.

关键词: 数控凸轮; 轮廓; 同步; 曲线拟合; 离散数据

中图分类号: TP 399

文献标志码: A

Algorithm for Contour Synchronization Improvement in CNC Cam Grinding

MAO Guo-yong¹, HUANG Wen-shen¹, ZHANG Ning²

(1. Department of Electronic Information & Electric Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou, 213002, China;

2. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In the process of CNC cam grinding, the contact point of cam and grinding wheel may not be on the line that connects the two components. The contact point may be shifted during the process of grinding, contour asynchronization may happen between the original cam and the processed one if the original contour data of cam are still used directly. The relation between the radius of grinding wheel and the offset was studied, the disadvantage of using curve fitting to determine the contact point was analyzed, and a new algorithm to determine the contact point directly from the discrete data was given and proved. Compared with the curve fitting-based methods, the algorithm can be easily implemented by using computer program, and is more applicable. The experiment results show that the algorithm can effectively eliminate the influence of the radius of grinding wheel on the cam contour, and the cam produced can be wholly identical to the original cam.

Key words: CNC cam; contour; synchronization; curve fitting; discrete data

收稿日期: 2013-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70971089, E051001); 江苏省高校优秀中青年教师和校长境外研究计划资助项目

第一作者: 毛国勇(1971-), 男, 副教授. 研究方向: 计算机控制技术. E-mail: maogy@czu.cn

凸轮在很多重要装备中发挥了重要作用,如在汽车行业和纺织机械行业.特别在高端纺织机械领域,共扼凸轮作为精编机中的关键零件,需要其有足够的精度才能保证编织过程的严格工序和精细工艺,最终保证编织产品的质量.由于表面轮廓线型复杂,凸轮对磨削精度和生产效率的要求都很高.如何提高磨削效率和加工质量是凸轮磨削加工控制急待解决的问题.近年来,将数控技术引入磨床成为一种趋势,其加工效率及精度有了很大提高.但是,在凸轮的数控磨削加工过程中,砂轮的大小对加工数据有很大的影响,将直接影响到加工凸轮的轮廓线^[1].如果不对数据进行处理,将检测数据直接输入数控凸轮磨床加工,与加工凸轮的母轮相比,凸轮升程会出现比较大的误差.

1 问题描述

凸轮磨采用三菱 E68 数控系统,以 3 个交流伺服器控制 X, Y, Z 3 个伺服轴.凸轮升程完全由工件旋转运动(Y 轴)和砂轮的横向进给运动(X 轴)确定, Z 轴数据控制工作台相对于砂轮的纵向运动.其数控系统的加工数据在 XY 平面采用极坐标形式,数据通过一台凸轮精密测试仪器获得^[2],其测量数据的误差精确到 $1\ \mu\text{m}$,最多每 0.075 度一组数据,共 4 800 组数据,能够比较精确地表示凸轮的轮廓.

但是,在凸轮的加工过程中,由于凸轮的轮廓线不规则,不能保证砂轮和凸轮的轮廓线一直在水平线上接触.图 1 所示为砂轮与凸轮的关系图.图左边为凸轮,其中所包含的大圆为基圆,其半径已知.右边的小圆为砂轮,半径也已知.从图中可以看出,原凸轮轮廓线上的极坐标值为 P_1 点的值.由于砂轮直径的影响,砂轮只能在 P 点与凸轮轮廓线接触.因此,在磨削 P_1 点时,实际磨削的却是 P 点的数

据.由于接触点的偏移,造成这两组数据之间存在一个误差.因此,必需根据砂轮的半径,确定真正接触点的位置,并计算出偏移量并加以补偿,使最终的凸轮与母轮一致.

2 解决方案

2.1 曲线拟合法

在国内,人们主要通过软件方法来解决上述问题.例如,文献[3]中给出了通过计算切点的导数求接触点的算法.要根据离散点数据计算导数,曲线拟合是最常见的方法^[4-5].因为可以根据多个离散点得到曲线方程,而根据曲线的方程就可以方便地得到每个点的导数.又由于三次样条曲线函数具有一阶导数和二阶导数连续的特点,拟合效果好,整体光滑,符合凸轮零件型线轮廓要求,故可采用三次样条曲线来分段拟合所有离散点^[6-8],进而求出每个离散点的导数.三次样条拟合既可根据算法用计算机编程实现,也可用一些专门的工具,如 Matlab 的曲线拟合工具实现.在国外,人们则以硬件方法为主来解决上述问题.例如,文献[9]提出了在数控磨削加工时,用带实时预测函数的 B 样条插值方法来实现光滑的轮廓,插值计算通过连接到控制器的计算机实现;文献[10]中提出了一种将检测设备直接与加工机床连接的智能预补偿方法,以获取精确的加工轮廓.但这些方法都是与硬件(检测设备、控制器)相关的方法,虽然可以保证一定的加工精度,但成本较高且针对性较强.因此,本文仍然研究软件方法.

仍以图 1 中的凸轮为例,图 1 中的凸轮在多个位置的轮廓线不够圆滑.例如,在 P 点附近,凸轮的升程数据变化较快,使得该处的曲线半径过大,近似于直线,这将导致接触点偏差出现.因此,必需对所有这些点附近的值进行拟合.但是,无论根据算法用计算机编程实现,还是用 Matlab 的工具实现,都无法克服一个缺点:由于凸轮轮廓较复杂,曲线拟合几乎不能拟合整个轮廓,因此,必需分段拟合,而段的长度将直接影响拟合出的数据与原始数据的误差.但是段长度的选取往往很困难,没有确定的选取准则.段太长将导致轮廓形状的偏差大,太短将导致在段与段间的接合点处曲线不光滑.因此,曲线拟合方法的操作性较差,误差较难控制,造成了该方法的通用性不强.

2.2 直接接触点确定算法

凸轮离散点数据可以表示为

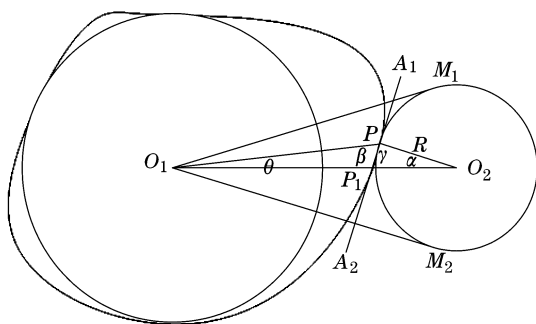


图 1 凸轮加工中的接触点偏移示意图

Fig. 1 Illustration of contact point offset in cam grinding

$(\rho_i, \theta_i), \quad i = 1, 2, \dots, n \tag{1}$

由这些离散点数据可以确定一个函数关系 $\rho = \rho(\theta)$, 它可以认为是凸轮的曲线方程. 切点 P 的坐标为 (ρ, θ) , 凸轮圆心为 O_1 , 砂轮的圆心为 O_2 , 半径为 R , A_1A_2 为切线. 根据图 1 中的三角形 O_1PO_2 , 可以得到 O_1O_2 的长度

$$\lambda = \frac{R}{\sin \theta} \sin \left(\theta + \arcsin \frac{\rho \sin \theta}{R} \right) \tag{2}$$

下面通过一组数据来说明该算法, 该数据为一组凸轮的原始轮廓数据. 从表 1 可以看出, 在凸轮数据的角度为 0 时, λ 在角度差为 0 时取得最大值, 它等于凸轮升程与砂轮半径相加; 表 2 说明, 在凸轮数据的角度为 19.2° 时, 凸轮升程与砂轮半径相加的值 132.117 6 并不是最大值, 而 λ 的取值先上升, 到角度差为 0.6° 时达到最大 (132.147 3), 然后再下降. 也就是说, λ 的值存在一个极点, 如果能证明这个点就是切点, 那么求这个点要比上面的导数法求解容易得多, 也更易于编程实现.

表 1 数据角度为 0° 时的凸轮升程数据及 λ
Tab.1 Lift data and λ of cam when data angle is 0

ρ	θ (角度差)	λ
106.000 0	0	131.000 0
106.000 4	0.15	130.998 5
106.000 6	0.30	130.993 0
106.000 6	0.45	130.983 5
106.001 6	0.60	130.971 1
106.002 8	0.75	130.955 2
106.004 2	0.90	130.935 6
106.006 6	1.05	130.913 2
106.009 2	1.20	130.887 2

表 2 数据角度为 19.2° 时的凸轮升程数据及 λ
Tab.2 Lift data and λ of cam when data angle is 19.2

ρ	θ (角度差)	λ
107.117 6	0	132.117 6
107.132 4	0.15	132.130 5
107.147 0	0.30	132.139 2
107.162 2	0.45	132.144 7
107.178 4	0.60	132.147 3
107.195 2	0.75	132.146 6
107.211 2	0.90	132.141 2
107.227 2	1.05	132.131 9
107.241 8	1.20	132.117 2

下面证明这个极点就是切点.
假设以凸轮圆心为坐标原点, 水平方向为横轴, 则可以得到外面砂轮的极坐标方程为

$$g(\lambda, \theta) = \rho^2 - 2\lambda\rho\cos\theta + \lambda^2 - R^2 = 0 \tag{3}$$

由式(3)可知, λ 是 θ 的函数, 因而该式事实上确定了一个以为 θ 自变量, 以 λ 为因变量的隐函数, 为了确定其极值, 两边关于 θ 求导, 得

$$2\rho\rho' - 2\lambda'\rho\cos\theta - 2\lambda\rho'\cos\theta + 2\lambda\rho\sin\theta + 2\lambda\lambda' = 0 \tag{4}$$

因为 $\rho\cos\theta - \lambda \neq 0$, 从而可得

$$\lambda' = \frac{\rho\rho' - \lambda\rho'\cos\theta + \lambda\rho\sin\theta}{\rho\cos\theta - \lambda} \tag{5}$$

令 $\lambda' = 0$, 由 $\beta = \angle A_2PO_1$, 再由 $\frac{\rho}{r} = \tan\beta$ 可知

极点满足 $\lambda = \frac{\rho\rho'}{\rho'\cos\theta - \rho\sin\theta} = \frac{\rho}{\cos\theta - \tan\beta\sin\theta} = \frac{\rho\cos\beta}{\cos(\beta + \theta)}$, 即极点 (θ^*, λ^*) 满足方程

$$\lambda = \frac{\rho\cos\beta}{\cos(\beta + \theta)} \tag{6}$$

因此, 极点是存在的.

同时, 由式(6)可知, $\frac{\rho}{\lambda} = \frac{\cos(\beta + \theta)}{\cos\beta}$, 但由正弦定理可知

$\frac{\rho}{\lambda} = \frac{\sin\alpha}{\sin(\beta + \gamma)} = \frac{\sin(\gamma + \beta + \theta)}{\sin(\beta + \gamma)}$, 其中, 记 $\gamma = \angle A_2PO_2$, $\alpha = \angle PO_2O_1$, 所以

$\frac{\cos(\beta + \theta)}{\cos\beta} = \frac{\sin(\gamma + \beta + \theta)}{\sin(\beta + \gamma)}$, 当 $\lambda > \rho + R$, 即 $\theta \neq 0$ 时, 化简可得

$$\tan\beta = -\cot(\beta + \gamma)$$

由这几个角度的取值范围可知, 上式成立时必有 $\gamma = \pi/2$, 即 P 是凸轮与砂轮的切点. 因此, 极点就是切点.

由于选取的是使 λ 取得极大值的点, 由上面的证明可知, 该极点必是切点, 又由于凸轮磨削加工外切的特点, 该切点必是外切点, 不是内切点.

综上所述, 使 λ 取得极大值的点就是切点, 也就是砂轮与凸轮的真正接触点.

实际上, 不用对所有的 (ρ_i, θ_i) 求 λ 值并比较大小, 因为对凸轮, 其切点位置对应的 θ 应在 $\angle M_1O_1M_2$ 的内部, 因此只需对该范围的 θ 计算 λ 值并求最大值就行了. 具体地, 该范围为

$$\arctan \frac{R}{|O_1O_2|}, -\arctan \frac{R}{|O_1O_2|} \tag{7}$$

这是因为根据凸轮形状不同, 切点可能在直线

O_1O_2 的上面,也可以在其下面.但在确定该范围时并不知道 O_1O_2 的确切值,所以可以用

$$|O_1O_2| \approx \rho_0 + R \quad (8)$$

来近似.

因此,从离散点数据的任一点出发,计算出 θ 在特点范围内使 λ 取得极大值的点,就可以确定接触点(切点)的位置,进而算出偏移量.对于表中的数据,当凸轮升程为 106,角度为 0 时,接触点未发生偏移;当凸轮升程为 107.117 6,角度为 19.2°时,接触点偏移角度为 0.6°.

3 实际应用结果

表 1 与表 2 中的数据角度间隔为 0.15°,共 2 400 个数据点.当数据间隔为 0.075°,即 4 800 个数据点时,对于角度为 19.2°的点,接触点偏移角度为 0.675°.实验结果表明,4 800 个数据时,加工出的凸轮与母轮的同步性更好.显然,数据点越多,离散点越能近似连续曲线,求出的接触点也越精确.但是,数据点越多,加工一个凸轮所需的时间也越长.实际应用表明,离散点数据个数为 4 800 时,误差已经在允许的范围内.与曲线拟合法相比,该方法更易于编程,具有很强的通用性.

4 结 论

本方案从数控系统的实际问题出发,分析了砂轮半径导致凸轮轮廓同步误差的原因,利用基于离散数据的接触点直接确定算法找出了接触点并计算修正量,有效消除了砂轮半径对凸轮加工的影响.该算法易于用计算机编程实现,可适用于任意大小的砂轮,对于数控磨削加工有较强的通用性.

参考文献:

- [1] 张义智,李卫国.盘形凸轮轮廓曲线检测中的数据处理[J].机械设计与制造,2006(3):14-15.
- [2] 杨金凤,孙志永.凸轮轴在线检测与误差分析[J].机械设计与制造,2009(8):174-175.
- [3] 黄文生,毛国勇,张建生.凸轮轮廓检测及数控磨削加工中的数据处理的算法研究[J].制造业自动化,2009(10):72-74.
- [4] Huang W S, Mao G Y, Zhang J S. Research of cutter track elimination algorithm for CNC cam grinding based on cubic spline curve fitting and spline interpolation[J]. Key Engineering Materials, 2010 (426/427):550-554.
- [5] 范晋伟,关佳亮,阎沼泽.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(7):1223-1226.
- [6] 龚时华.凸轮轴高速磨削加工控制系统关键技术[D].武汉:华中科技大学,2008.
- [7] 陈金成,徐志明,徐正飞,等.基于分段三次样条曲线的高速加工平滑运动轮廓自适应算法研究[J].机械工程学报,2002,38(5):61-65.
- [8] 赵彤,吕强,张辉,等.三次均匀 B 样条曲线高速实时插补研究[J].计算机集成制造系统,2008,14(9):1830-1836.
- [9] Yau H T, Wang J B. Fast Bezier interpolator with real-time lookahead function for high-accuracy machining[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007,47(10):1518-1529.
- [10] Tian X C, Huissoon J P, Xu Q, et al. Dimensional error analysis and its intelligent pre-compensation in cnc grinding[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008,36(1/2):28-33.

(编辑:金虹)