

电子齿轮比对轮廓误差及加工效率影响的研究

滕福林 李宏胜 温秀兰 黄家才
南京工程学院,南京,211167

摘要:电子齿轮比仅考虑了在尺寸、加工速度上实现目标值与实际值的匹配,而忽视了插补加速度与交流伺服系统实际最大加速度能力的匹配。当电子齿轮比调节为偏离1较多的数值时,会对数控机床的轮廓误差和加工效率产生较大的不利影响,提出电子齿轮比和插补加速度优化算法,以减小电子齿轮比对数控机床轮廓误差和加工效率的影响。实验结果证明该算法是可行的。

关键词:数控机床;轮廓误差;加工效率;电子齿轮比

中图分类号:TM351 **DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2012.13.020

Research on Influences on Contour Error and Cutting Efficiency from Electrical Gear—ratio

Teng Fulin Li Hongsheng Wen Xiulan Huang Jiakai
Nanjing Institute of Technology, Nanjing, 211167

Abstract: Electrical gear—ratio has realized the match of position and speed between aimed outline and practical outline. However, match of interpolation acceleration and AC servo system's maximum acceleration was ignored. When electrical gear—ratio was deviated substantially from 1, contour error and cutting efficiency for CNC machining will be affected unfavorably. According to the change of feed—shaft inertia, contour precision requirement, transmitting mechanism and so on, this paper proposed a novel optimal algorithm on electrical gear—ratio and interpolating acceleration to decrease the effect from electrical gear—ratio. Experimental results prove that the algorithm is feasible.

Key words: CNC machine; contour error; cutting efficiency; electrical gear—ratio

0 引言

数控机床轮廓误差的成因除了机床结构误差、加工刀具磨损等机械原因外^[1],主要还有进给轴驱动系统的动态响应引起的误差^[2]。动态响应

性能与两方面有关:第一,进给轴驱动系统的闭环控制特性^[3];第二,控制器命令信号和伺服驱动器的执行元件特性在位置、速度、加速度三方面的匹配程度^[4]。

电子齿轮比定义了指令脉冲当量和反馈脉冲当量的关系,完成了位置信号的匹配,使得实际加工轮廓尺寸和目标轮廓尺寸相同^[5]。同时根据速度插补原则,通过电子齿轮比还可以实现目标速

收稿日期:2011—04—25

基金项目:江苏省高校自然科学基金资助项目(10KJD470001, 10KJD460001);江苏省自然科学基金资助项目(BK2009350, BK2011689);国家自然科学基金资助项目(51075198)

[6] Dewulf W, Willems B, Duflou J R. Estimating the Environmental Profile of Early Design Concepts [C]//Innovation in Life Cycle Engineering and Sustainable Development. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006: 321-334.

[7] Devanathan S, Ramanujan D, Bernstein W Z, et al. Integration of Sustainability into Early Design through the Function Impact Matrix[J]. Journal of Mechanical Design, 2010, 132(8):081004.

[8] Telenko C, Seepersad C C. A Methodology for Identifying Environmentally Conscious Guidelines for Product Design[J]. Journal of Mechanical Design, 2010, 132(9): 091009.

[9] Deng Y M. Function and Behavior Representation in Conceptual Mechanical Design[J]. AI EDAM, 2002, 16(5):343-362.

[10] Ulrich K T, Seering W P. Function Sharing in Mechanical Design[J]. Design Studies, 1990, 11(4): 223-234.

[11] Trimble A Z, Lang J H, Pabon J, et al. A Device for Harvesting Energy From Rotational Vibrations[J]. Journal of Mechanical Design, 2010, 132(9): 091001.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:王美焰,男,1985年生。中国科学技术大学精密机械与精密仪器系博士研究生。主要研究方向为概念设计方法、计算机辅助设计。沈连娣,女,1946年生。中国科学技术大学精密机械与精密仪器系教授、博士研究生导师。邓益民,男,1966年生。宁波大学工学院机械工程系教授。束学道,男,1968年生。宁波大学工学院特聘教授。

度和实际加工速度的匹配^[6]。但电子齿轮比在代替机械减速箱的同时,一直忽视了插补加速度与进给轴驱动系统最大加速能力之间的匹配。而加速度信号不匹配也是引起动态位置跟踪误差的主要原因之一^[7]。同时,如果驱动系统不能以最大加速能力进行加减速,必然要影响数控机床的加工效率。

本文研究了电子齿轮比对数控机床轮廓误差和加工效率的影响,提出电子齿轮比和插补加速度优化算法,以期在保证轮廓误差最小的前提下尽量提高加工效率。

1 电子齿轮比设计中存在的问题

数控机床包括三个核心技术模块:上位机软件对任意图案的轨迹规划功能模块、控制器进行精插补功能模块、多轴联动伺服驱动功能模块。如图 1 所示。电子齿轮比都是由伺服驱动器内部提供的,所以传统意义上的电子齿轮比都是添加在图 1 中③处^[8]。

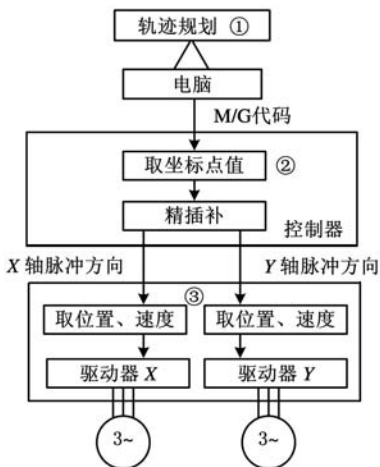


图 1 数控机床工作原理示意图

以上添加电子齿轮比的方法中,没有涉及加速度操作,如果电子齿轮比的值大于 1,则在目标位置、目标速度信号放大的同时,驱动系统的目标加速度信号也将被放大。如果放大后的目标加速度值大于甚至远大于各轴伺服驱动系统的最大加速度值 a_{max} ,不管是直线加减速响应还是 S 曲线加减速响应,实际加工轮廓的变形都在所难免。这是目前添加电子齿轮比的方法中存在的第一个问题。

电脑上轨迹规划软件有每个轴分辨率设置项,且控制器在接收坐标点序列时可以改变插补用坐标值大小,伺服驱动器取到目标速度后可以改变伺服驱动器的目标指令值,这三个功能分别在图 1 中①、②(精插补前)、③处(精插补后)实

现。电子齿轮比既然是指令脉冲当量和反馈脉冲当量的匹配,那么电子齿轮比不仅可以在③处添加,同样也可以在①或②处添加。修改轨迹规划分辨率的办法在工程应用中不可取。一般电子齿轮比可取 0.01~100 之间的数值。当电子齿轮比 g 远大于 1 时,在插补前添加电子齿轮比,实际线段长度被放大了 g 倍,从而,连续微直线段拟合曲线的精度、平滑度变差;在插补后添加电子齿轮比,由于插补加速度已定,经过电子齿轮比放大后,伺服系统命令信号中的加速度信号被放大 g 倍,由于伺服系统实际最大加速度能力有限,很容易引起伺服电机加减速过程中的动态位置跟踪误差过大,而造成轮廓误差偏大。当电子齿轮比远小于 1 时,插补前添加电子齿轮比,很多微线段的长度被进一步缩小,在速度插补中极有可能被误认为是不需要加工的直线而被删除,使得目标图案中大量有用信息丢失;插补后添加电子齿轮比,由于插补加速度不变,伺服系统工作速度被缩小了 g 倍,伺服电机工作在低转速下,加工效率降低,同时速度远低于额定工作转速,加工效果会受到影响。

将电子齿轮比简单地放在插补前或插补后,特别地,当电子齿轮比的值远远大于 1 或远远小于 1 时,都会对轮廓误差或加工效率产生不利影响。这是目前取电子齿轮比的方法中存在的第二个问题。如果控制器和驱动器是分开设计的,则第二个问题难以避免。

为解决以上两个问题,本文研究了一种电子齿轮比和插补加速度同时考虑的优化算法,以期达到插补加速度和驱动轴最大加速能力的匹配。

2 电子齿轮比和插补加速度优化算法

文献[6-7]表明,将控制器和伺服驱动器设计成一个整体(本文中称为组合控制器)已经成为一个比较热门的研究方向,甚至有趋势将轨迹规划软件、插补算法及伺服驱动全部整合在一起。本文对组合控制器中,伺服系统、电子齿轮比、插补控制之间的优化设置方法,以及在优化设置方法下,实现轮廓误差最小、机床加工效率最高的效果进行研究。

2.1 针对不同转动惯量值进行优化

电子齿轮比仍然添加在图 1 中③处。最大加速能力为峰值转矩与转动惯量的比值。伺服系统最大加速能力 a_{max} 的计算公式如下:

$$a_{max} = \frac{K_t I_N \gamma \tau}{J} \tag{1}$$

式中, I_N 为伺服电机额定电流; K_t 为伺服电机电磁转矩系数; γ 为伺服系统过载倍数; τ 为伺服驱动器中速度闭环输出限幅系数; J 为电机转子上转动惯量 J_0 。与直驱丝杆上平移运动质量 m 折算到转子上转动惯量 J_e 之和。

m 的折算公式为

$$J_e = m \left(\frac{P_B}{2\pi} \right)^2 \quad (2)$$

式中, P_B 为丝杆螺距。

对于一个 X/Y 轴数控机床, 如果已经知道两个伺服驱动系统的最大加速能力 $a_{\max-X}$ 、 $a_{\max-Y}$, 也可以通过峰值转矩输出记录速度变化来测量 $a_{\max-X}$ 和 $a_{\max-Y}$ 。令 g_X 、 g_Y 分别为 X 轴、Y 轴电子齿轮比, 则最大加速能力的幅值 A_{\max} 为

$$A_{\max} = \min \left(\frac{a_{\max-X}}{g_X}, \frac{a_{\max-Y}}{g_Y} \right) \quad (3)$$

已知伺服驱动系统前向通道增益为 K , 系统在位置斜坡输入 $p(t) = vt$ 的作用下, 稳态位置跟踪误差 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{v}{K} \quad (4)$$

可以近似认为伺服电机启动加速过程和制动减速过程中, 速度为斜线变化趋势, 动态位置跟踪误差也为斜线变化趋势。数控机床在加工中总是处于不停地加减速的状态, 如果伺服驱动系统采用最大加减速能力进行启动和制动, 则机床的加工效率最高。

图 2 显示了 X/Y 轴每个轴上插补加速度 a^* 与各个伺服驱动系统最大加速度 a_{\max} 之间的关系, 图中阴影部分面积就等于 ϵ 值, 从而可以推得:

$$a^*(t) = a_{\max}(t) \frac{t}{K+t} \quad (5)$$

X/Y 控制器的插补加速度幅值的计算公式为

$$A^*(t) = A_{\max}(t) \frac{t}{K+t} \quad (6)$$

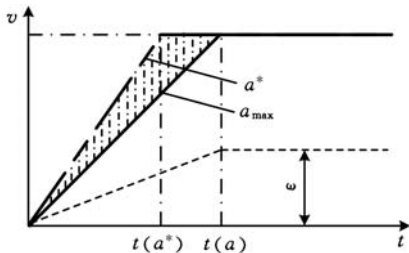


图 2 最大加速度插补示意图

将式(6)根据插补周期进行离散以后, 就可以得到数控机床效率最高时每个插补周期内的插补加速度值。

组合控制器中, 插补加速度、电子齿轮比、伺服系统最大加速能力的匹配是能够实现的。针对一台设备, 每个轴上 J 值不变化, 最大加速能力不变

化, 则插补加速度容易设计。对于通用型组合控制器, 针对不同机床, 电子齿轮比的输入界面是开放的, 如果伺服驱动系统具有转动惯量辨识功能, 则在组合控制器第一次在机床上使用时, 进行一次电子齿轮比设定和转动惯量辨识, 就可以求出本机床最优的插补加速度值。这种优化方法的设计目标是在不影响轮廓误差的情况下提高加工效率。

2.2 针对不同电子齿轮比、不同机床轮廓精度要求进行优化

在 2.1 节分析的基础上, 在图 1 中的速度插补功能前增加优化控制器模块。在速度插补前预先设置一个分电子齿轮比 g_1 , 然后在图 1 中 ③ 处分别添加电子齿轮比 g_{IX} 、 g_{IY} , 且有

$$\left. \begin{aligned} g_X &= g_1 g_{IX} \\ g_Y &= g_1 g_{IY} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中, g_X 、 g_Y 由实际机床的传动机构、反馈脉冲当量以及指令脉冲当量来决定。不同类型机床肯定也有不同的电子齿轮比的值, g_X 、 g_Y 可能大于 1, 也可能小于 1。根据前面分析, g_X 、 g_Y 值对轮廓误差和加工效率都存在影响。

数控机床加工图案的目标精度, 即轨迹规划软件中直线段拟合曲线的最小直线段长度 $l_{\min} = \eta \Delta M$, 图文设备的轨迹规划软件中一般取 $\eta = 15$, ΔM 为电子齿轮比定义中的指令脉冲当量。在速度插补中, 如果线段长度小于 15, 则在速度插补的坐标点序列中忽略当前直线段的结束点坐标, 这样不影响加工精度。

数控机床要求的轮廓精度, 即直线拟合曲线的最小线段长度 $l_{\min} = \mu \Delta l$, 其中 $\Delta l = \max(\Delta l_X, \Delta l_Y)$, $\Delta l_X = D_{BX}/(4PPR_X)$, $\Delta l_Y = D_{BY}/(4PPR_Y)$ 。 D_{BX} 、 D_{BY} 分别为 X/Y 轴丝杆螺距, PPR_X 、 PPR_Y 分别为 X/Y 轴伺服电机位置检测元件精度。不同机床对曲线轮廓精度的要求是不一样的, 也即 μ 值大小不一样。

优化控制器的设计目标是在保证轮廓误差最小的前提下, 尽量提高加工效率。

在已知条件 g_X 、 g_Y 、 η 、 μ 、 $a_{\max-X}$ 、 $a_{\max-Y}$ 、 J_X 、 J_Y 的前提下, 根据不影响轮廓误差的前提下提高加工效率的原则, 优化 g_1 、 $A^*(t)$ 的值。

(1) 当 $g_X \gg 1$, $g_Y \gg 1$ 时, 经过图 1 中 ③ 处的电子齿轮比放大后, 拟合曲线的微直线段长度需要满足机床轮廓精度要求, 即

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta M \eta}{g_{IX}} &\leq \Delta l_X \mu \\ \frac{\Delta M \eta}{g_{IY}} &\leq \Delta l_Y \mu \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

当式(8)中两式均取等号时, 可以求取 g_{IX} 、 g_{IY} 的

值。再根据式(7)可以得到两个 g_1 值,取其中较小值作为 g_1 值,然后根据式(7)重新求 g_{IX} 、 g_{IV} 的值。最后根据 2.1 节的情况分析求取 $A^*(t)$ 值。

(2) 当 $g_X \ll 1, g_Y \ll 1$ 时,经过图 1 中 ③ 处的电子齿轮比缩小后,加工速度很低,加工效率有所降低,精度也会受到影响。所以,在保证加工精度的前提下,式(9)取等号,求取 g_1 值。

$$\frac{\Delta M \eta}{g_1} \leq \Delta l \mu \quad (9)$$

根据式(7)还可以求取 g_{IX} 、 g_{IV} 的值。再根据 2.1 节的情况分析求取 $A^*(t)$ 值。

3 实验结果分析与结论

电子齿轮比和插补加速度优化算法采用 2.2 节的方法,并在图 3 所示图仪中进行实验以观测轮廓曲线的平滑度,电子齿轮比的值分别设定为 4、0.25,并保持两种电子齿轮比下实际加工图案尺寸一致,得到加工图案如图 4 和图 5 所示。图 4a 加工时间为 11s,电子齿轮比过小,造成伺服电机实际工作转速较低,虽然机床要求轮廓精度较高,但实际加工曲线仍然不够平滑,伺服软件监测 X/Y 轴的动态位置跟踪误差峰值为 620 个脉冲(X、Y 轴伺服反馈精度均为 4000 个脉冲/转);图 4b 加工时间为 8s,曲线相对较为平滑,动态位置跟踪误差峰值为 310 个脉冲。图 5a 加工时间为 8s,由于电子齿轮比的值较大,加减速过程中的动态位置跟踪误差比较大,峰值达 1240 个脉冲,轮廓曲线开始出现比较明显的抖动和毛刺现象;图 5b 加工时间为 6s,曲线相对比较平滑,动态位置跟踪误差峰值为 360 个脉冲。

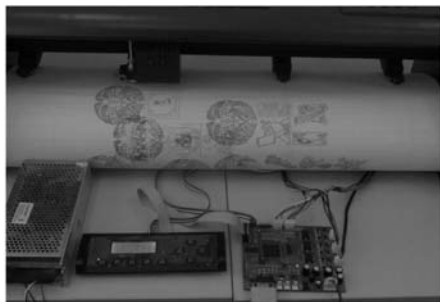
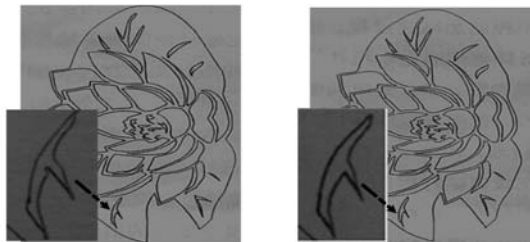
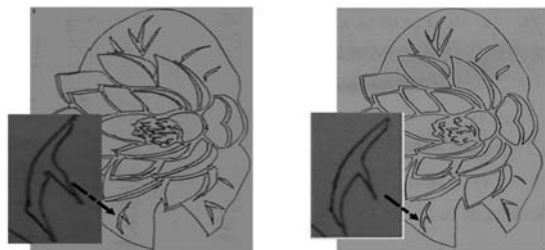


图 3 实验平台



(a)增加优化算法前 (b)增加优化算法后

图 4 电子齿轮比的值为 4 时的加工图案



(a)增加优化算法前 (b)增加优化算法后

图 5 电子齿轮比的值为 0.25 时的加工图案

电子齿轮比和插补加速度优化算法在保证轮廓误差最小的前提下,可以尽量提高加工效率。实验结果也证明了这种优化算法的有效性和实用性。

参考文献:

- [1] Hecker R L, Flores G M, Qxie Irlhecker, et al. Servocontrol of Machine—tools; a Review[J]. Latin American Applied Research, 2008, 38(1): 85-94.
- [2] 李宏胜,孙权,张建华,等. 基于前馈控制的数控机床进给运动轮廓误差分析[J]. 设计与研究, 2010 (2): 9-15.
- [3] Lee C W. Design of the Tracking Controller for Holographic Digital Data Storage[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2010, 15 (2): 242-252.
- [4] Hecker R L, Flores G M, Qxie I, et al. Solution of Inverse Dynamics Problems for Contour Error Minimization in CNC Machines[J]. The Internal Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(5/8): 589-604.
- [5] 吴焱明,赵韩,张栋,等. 数控车削多面体机床原型系统设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2006 (7): 44-45.
- [6] 赵国勇,徐志祥,赵福令. 高速高精度数控加工中心 NURBS 曲线插补的研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(3): 291-294.
- [7] 滕福林,胡育文,刘洋,等. 位置/电流两闭环结构位置伺服系统的跟随性能研究[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 40-46.
- [8] 王艳琴,桂贵生. 基于 DSP 芯片的斜齿轮插齿数控加工技术研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2006(6): 11-13.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:滕福林,男,1978 年生。南京工程学院自动化学院讲师、博士。研究方向为运动控制系统。李宏胜,男,1966 年生。南京工程学院自动化学院教授。温秀兰,女,1966 年生。南京工程学院自动化学院教授。黄家才,男,1977 年生。南京工程学院自动化学院副教授、博士。