# 无速度传感器音圈式快速刀具的阻尼闭环控制。

杨 帆 戴一帆 王贵林

(国防科技大学机电工程与自动化学院,长沙 410073)

【摘要】 针对音圈式快速刀具阻尼较小、超调较大的开环特性,经典控制采用速度环和位置环双闭环反馈控制,但速度传感器增加了系统的复杂度,且易带来附加噪声。基于二阶积分器串联系统的最速控制方法,提出了采用最速过渡环节调节输入或控制信号阻尼,进而改善无速度传感器的输出阻尼前馈控制方法,设计了相应闭环控制方案,在 DSP 控制平台上进行刀具动态性能测试,并进行了球形透镜阵列的加工实验。实验结果表明:所提出的控制方法能有效改善快速刀具的阻尼特性,刀具方波响应超调约4%,上升时间仅为3 ms,所加工球透镜阵列具有良好的面形精度及表面粗糙度,PV 值约为0.228λ,表面粗糙度 *R*\_小于15 nm。

关键词:快刀伺服 音圈电机 阻尼 闭环控制 速度传感器 中图分类号:TG519.3;TP202 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2011)08-0195-05

## Damping Feed-forward Closed-loop Control for Voice-coil Fast Servo Actuator without Velocity Sensor

Yang Fan Dai Yifan Wang Guilin

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

#### Abstract

Low damping and large overshoot of voice-coil fast servoactuator (VCA) were its natural open-loop characteristics. In order to improve the dynamic performance and steady accuracy of VCA, a double closed-loop feedback control structure was used with a velocity loop and a position loop in classical control strategy. It was inevitable to add complexity and bring additional noise to fast tool servo (FTS) system for the use of velocity sensor. Based on the time-optimal control idea of the two order integrator series system, the damping feed-forward control method was put forward. The output damping could be improved by modulating the damping of input signal or the controlling signal through a time-optimal process (TOP) with no use of velocity sensor. The corresponding controlling projects were designed, dynamic performances were tested and typical microlens array was fabricated. The testing and experimental results indicated that the proposed damping feed-forward control method could improve the system damping effectively, the overshoot of square wave exciting response was 4% and the setting time was only 3 ms. The machined workpiece had better form accuracy and surface finish. The PV value of form error was only 0.  $228\lambda$  and the  $R_a$  of surface finish was less than 15 nm.

Key words Fast servo actuator, Voice-coil motor, Damping, Closed-loop control, Velocity sensor

引言

近年来,复杂面形光学零件在工农业领域的应 用越来越广泛,如多焦点渐进老花眼镜、汽车尾灯、 光纤阵列等<sup>[1-3]</sup>,这些零件面形复杂、局部曲率较大,面形精度与表面粗糙度要求很高,加工非常困难。普通的车削方式仅限于加工回转对称型零件,无法满足复杂面形零件的加工要求。

收稿日期: 2011-01-13 修回日期: 2011-03-08

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(50735007)

作者简介:杨帆,博士生,主要从事非圆零件加工与检测、超精密快速车削研究,E-mail: nudt804@126.com

为了克服普通车削不能加工非回转对称零件的 局限性,一些学者提出了快速刀具伺服(fast tool servo,简称 FTS)加工方法,工件在主轴的带动下旋 转,同时快速刀具在伺服控制作用下产生高频响、小 幅值的快速进刀运动,进而实现复杂面形零件的高 效加工。

在快刀加工中,起关键作用的是实现高频响精 密进刀运动的快速刀具系统<sup>[4-5]</sup>。音圈电机(voice coil actuator,简称 VCA)原理简单、频响高,被广泛 用于高速、高精度定位系统场合,如磁盘驱动器、多 坐标定位平台<sup>[6]</sup>等。对音圈电机结构及性能参数 的优化设计,还可实现较大的行程及较高的输出力--惯量比,因此也被用作精密及超精密加工的伺服刀 具。清华大学、国防科技大学及长沙一派数控机床 有限公司都利用音圈电机成功实现非圆活塞零件的 快速车削。近年来,美国 Precitech 公司将音圈电机 用作快速刀具实现光学零件的超精密快速车削,可 大大扩展快速车削可加工光学零件的能力与范 围<sup>[7]</sup>。但音圈电机一般阻尼特性较差,只有进行良 好的控制,改善其阻尼特性与动态性能,才可用于快 速车削加工。

本文针对音圈电机为驱动的快速刀具,分析其 结构原理与开环特性,得出经典控制的双闭环结构。 针对经典控制中采用速度反馈来改善系统阻尼的局 限性,提出一种采用最速过渡环节的阻尼前馈闭环 控制方案,进行控制性能测试及实例加工。

### 1 音圈式快速刀具结构与特性

为了实现高频响运动,要求音圈电机出力大,且 运动惯量很小,因此采用动音圈式结构,音圈电机驱 动的快速刀具结构简图如图1所示<sup>[8]</sup>。运动部分由 线圈、刀杆、刀具组成。当线圈通电时,产生轴向推 力,使刀杆沿轴向作直线运动;支撑弹簧和刀杆组成 了弹性刀具,使刀杆恢复到平衡位置(*x*=0),并限 制刀杆的横向摆动;导向装置对运动部件产生粘性 阻尼作用。



图1 音圈式快速刀具结构简图

Fig. 1 Structure sketch of VCA

1. 磁铁 2. 线圈 3. 车刀 4. 弹簧 5. 刀杆 6. 传感器 7. 气隙 8. 铁芯

音圈式快速刀具的电压平衡方程和力平衡方程 的传递函数为<sup>[8]</sup>

$$G(s) = \frac{\frac{B_{s}l}{k}}{\frac{m}{k}s^{2} + \frac{Rc + B_{s}^{2}l^{2}}{kR}s + 1}$$
(1)

图1是一个 MFK(质量-弹簧-阻尼)型二阶系 统。

为了更准确获取刀具模型以实现良好控制,利用 dSPACE 半实物仿真平台对音圈式快速刀具进行 了正弦扫频实验,得到其开环频率特性如图2所示。



图 2 音圈式快速刀具开环频率特性曲线 Fig. 2 Open-loop frequency characteristics curves of VCA

(a) 开环幅频特性 (b) 开环相频特性

将扫频得到的频率特性导入 Matlab 的 ident 工 具箱进行系统辨识,其开环辨识模型为

$$G_{c}(s) = \frac{-421.7s + 1.654 \times 10^{5}}{s^{2} + 64.22s + 9.889 \times 10^{5}}$$
(2)

该快速刀具在158 Hz 处存在极大的共振峰,简 单验算易知其开环阻尼仅为0.0323。阻尼太小,超 调很大,无法直接用于实际的快刀加工。

### 2 快速刀具的经典控制策略

对于类似式(2)的二阶系统,经典控制方法采 用速度反馈环节来改善系统的阻尼特性,采用位置 反馈环节使系统达到合适的刚度和稳态精度,从而 构成速度、位置的双闭环反馈结构<sup>[8]</sup>。音圈式快速 刀具的经典控制双闭环反馈结构如图3所示。

图中,U为激励电压,X为刀杆位移,T<sub>0</sub>为电动 机的时间常数, *ξ*为阻尼系数。*k<sub>p</sub>*为功放增益,在 5kHz频率范围内可看作是纯比例环节;*k<sub>p</sub>*为速度反



Fig. 3 Double closed-loop feedback control structure of VCA

馈系数, $k_{\beta}$ 为位置反馈系数。控制器 C(s)为 PID 或 其变形结构。

调整速度反馈系数 k<sub>v</sub>,可以使快速刀具得到合适的阻尼系数 ξ。调整位置反馈系数 k<sub>ρ</sub>,可以使快速刀具得到合适的刚度和跟踪精度。

上述双闭环反馈控制可有效改善音圈式快速刀 具的阻尼及跟踪性能,但也存在难以解决的问题,其 根源在于速度反馈环节的构建。若采用速度传感 器,增加了系统的复杂度,容易带来附加噪声;若从 位置信号直接微分求取速度,往往会同时放大噪 声<sup>[9]</sup>,不可取。因此,探索无需速度传感器即可进 行阻尼调节的方法非常必要。

#### 3 非线性最速过渡环节的过渡过程

二阶积分器串联型系统为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = u \quad (|u| \leq r) \end{cases}$$
(3)  
式中 x, x, ----系统状态 u-----控制输入

r----控制极值

以原点为终点的最优控制能在最短时间内从任 意初态转移至终态,因而被称为最速控制(timeoptimal process,简称 TOP)<sup>[10]</sup>。其最速控制为

$$u = -r \operatorname{sign}\left(e + \frac{x_2 |x_2|}{2r}\right) \tag{4}$$

式中 e——跟踪偏差

如果令具有突变性质的输入信号事先通过二阶 积分器串联型系统,以该系统输入、输出之差快速衰 减至零为控制目标,即将跟踪偏差  $e = x_1 - v_0(t)$ 代 入式(4), $v_0(t)$ 为被跟踪信号,则得

$$\begin{cases} x_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -r \operatorname{sign} \left( x_1 - v_0(t) + \frac{x_2 |x_2|}{2r} \right) \end{cases}$$
(5)

这个系统的解的分量  $x_1(t)$  将在加速度限制  $|\ddot{x}_1| \leq r$  之下,最快的无超调地一次跟踪输入信号  $v_0(t)$ ,而且r 越大,跟踪越快<sup>[11]</sup>。

研究表明,式(4)用作最速控制时进入稳态会 产生高频颤振。韩京清给出了一种进入稳态后无颤 振的非线性最速过渡环节  $u = \text{fhan}(x_1, x_2, r, h_0)$ ,其 算法为<sup>[12]</sup>

$$\begin{cases} d = rh_{0} \\ d_{0} = h_{0}d \\ y = x_{1} + h_{0}x_{2} \\ a_{0} = \sqrt{d^{2} + 8r|y|} \\ a = \begin{cases} x_{2} + \frac{a_{0} - d}{2} \operatorname{sign}(y) & (|y| > d_{0}) \\ x_{2} + \frac{y}{h_{0}} & (|y| \le d_{0}) \end{cases} \\ \text{fhan} = -\begin{cases} r \operatorname{sign}(a) & (|a| > d) \\ r \frac{a}{d} & (|a| \le d) \end{cases} \end{cases}$$

式中 $d_x d_0 x_x a_0 x_a$ 均为中间变量,参数 $r_x h_0$ 可用来 调节过渡过程的快慢。调节参数 $h_0$ 还可以实现对 信号的滤波,因此 $h_0$ 被称为滤波因子。

以  $u = \text{fhan}(x_1, x_2, r, h_0)$ 为最速控制的式(5)的 离散形式为<sup>[12]</sup>

$$\begin{cases} u_{o} = \text{fhan}(x_{1}(k) - v(k), x_{2}(k), r, h_{0}) \\ x_{1}(k+1) = x_{1}(k) + hx_{2}(k) \\ x_{2}(k+1) = x_{2}(k) + hu_{o} \end{cases}$$
(7)

式中 h——积分步长,应与实际控制系统离散步长 一致

*u*。——离散形式的控制量

当 h = 0.0001, r = 2000000时, 不同  $h_0$ 时的阶 跃信号阻尼调节效果如图 4 所示。由图可见, 最速 过渡环节 fhan $(x_1, x_2, r, h_0)$ 可以无超调地快速跟踪 阶跃信号, 且  $h_0$ 越大, 跟踪信号阻尼越大。





固定 h<sub>0</sub>,改变速度因子 r,也可实现阶跃信号无 超调快速跟踪速度的调节。r 越大,跟踪速度越快;r 越小,跟踪速度越慢。速度特性反映了系统的阻尼 特性,速度反馈通过改变闭环系统的阻尼来改善输 出阻尼,而最速过渡环节则通过调节输入信号或误 差信号的突变达到改善输出阻尼的效果。这实质是 一种阻尼前馈。

#### 4 基于阻尼前馈的闭环系统性能测试

用最速过渡环节事先对输入信号进行阻尼调 节,可以有效改善输出阻尼,达到类似经典控制中速 度反馈的效果。为提高音圈式快速刀具的跟踪精 度,仍需进行位置反馈。为此,搭建出两种基于阻尼 前馈的位置闭环控制方案。

方案1控制框图如图5所示。最速过渡环节单 独作为一个前馈环节,放在位置闭环外面,调节输入 指令的过渡过程。经过调节的跟踪信号作为输入参 与闭环控制。



方案 2 控制框图如图 6 所示。最速过渡环节作 为闭环系统前向通道的一个环节,放在系统闭环内 部,系统输入与指令输入求和后的误差信号作为最 速过渡环节的输入,误差经过调节后再采用合适的 控制律进行控制。



图 6 最速过渡环节位于系统闭环内部控制原理图 Fig. 6 TOP used as a block within closed-loop system

方案2可变形为如图7所示。





方案 2 相当于对输入、输出信号均进行最速过 渡环节的调节。若输入、输出信号中含有噪声,则可 通过最速过渡环节中的滤波因子进行一定程度的滤 波。因此方案 2 较方案 1 有一定的优势。

需要说明的是,两种方案所搭建的闭环系统的 稳定性由采用的控制器来决定。最速过渡环节具有 类似二阶线性低通滤波器的频率特性<sup>[13]</sup>,不会改变 闭环系统的稳定性。方案 1、方案 2 中的控制器均 可取为合适的控制,如 PID、零极点校正控制、变结 构控制等。

以控制方案 2 进行刀具控制与性能测试。控制 平台采用 TI 公司的高性能控制芯片 DSP28335, A/D采样芯片为 16 位高精度 ADS8364, D/A 芯片为 16 位高精度 TLC2755, 采用分辨率为 10 nm 的 Keyence 型激光传感器进行快速刀具的位置检测, DSP 的伺服更新频率设定为 10 kHz。

以40 Hz、幅值为100 μm的方波进行激励,控制 律采用增量式数字 PID 控制器,即

$$u_{i} = u_{i-1} + k_{p} \left[ e_{i} - e_{i-1} + \frac{\mathrm{d}T}{T_{i}} e_{i} + \frac{T_{d}}{\mathrm{d}T} (e_{i} - 2e_{i-1} + e_{i-2}) \right]$$

最速过渡环节中参数设计为: $r = 2\ 000\ 000$ , $h = 0.000\ 1$ , $h_0 = 0.000\ 3$ ,数字 PID 控制参数为: $K_p = 1.625$ , $T_i = 50$ , $T_d = 0.000\ 2$ ;快速刀具响应如图 8 所示。由图可见,刀具响应超调约 4%,上升时间仅为 3 ms,闭环刀具系统具有良好的阻尼特性。



rig. o Testing of square wave response

如果取消最速过渡环节,而仅以上述 PID 参数 进行数字 PID 控制,音圈刀具即出现"飞车",充分 说明最速过渡环节的阻尼调节作用。

#### 5 加工实验

在对音圈式快速刀具实现良好控制基础上,在 搭建的快速车削系统平台上进行典型透镜阵列的实际加工。设计待加工试件为 3 × 3 矩形排列的球冠 状透镜阵列,加工参数为:主轴转速 120 r/min,径向 进给速度 2 mm/min,每周切削点数 1 250 点,最大切 削深度 16.55 μm,刀尖圆弧半径 1.5 mm。

加工实物如图 9 所 示。利用 Zygo XP/D -1000型波面干涉仪测得透 镜表面形貌如图 10 所示, 去掉其球面形状后,其误 差结果的 PV 值 仅 为 0.228λ。利用 New View



图 9 加工实物

200 型三维表面形貌轮廓 Fig. 9 Machined workpiece 仪,测得所加工透镜的表面粗糙度  $R_a$ 小于 15 nm。

综合以上测量结果可知,所设计的音圈式快速 刀具对于阵列式光学透镜具有较好的加工能力,试 件具有较高的面形精度及表面质量。



图 10 透镜表面形貌 Fig. 10 Surface profile for machined workpiece

6 结论

(1) 音圈式快速刀具为欠阻尼超调较大系统, 采用速度传感器进行阻尼调节,增加了系统的复杂 度,且易带来噪声。以二阶积分串联型系统为基础 的最速过渡环节可将具有突变性质的输入信号或误 差信号调节为具有合适阻尼的连续渐变信号,这对 音圈式快速刀具的阻尼调节及具有突变性质的快速 车削输入信号调节非常有效。

(2)基于最速过渡环节搭建闭环系统,并进行 了性能测试,刀具响应超调约4%,上升时间仅为 3ms,证明了该方法对音圈刀具阻尼调节的有效性。 实际车削球透镜阵列试件,测试表明试件具有良好 的面形精度及表面粗糙度,PV 值仅为0.228λ,表面 粗糙度 R<sub>a</sub>小于15 nm。

参考文献

- 赵清亮,郭兵,杨辉,等. 金刚石飞切加工微结构表面的工艺参数优化[J]. 光学精密工程,2009,17(10):2512~2519.
  Zhao Qingliang, Guo Bing, Yang Hui, et al. Technological parameter optimization of micro-structured surfaces by diamond fly-cutting [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(10):2512~2519. (in Chinese)
- 2 陈文琳, 苗量, 王世东, 等. 汽车尾灯支架成形数值模拟与优化[J]. 农业机械学报,2007,38(10):157~160. Chen Wenlin, Miao Liang, Wang Shidong, et al. Optimization and numerical simulation on forming process of taillight supporter of the car[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(10):157~160. (in Chinese)
- 3 梁静秋,侯凤杰.采用硅 V 型槽的一维光纤阵列的研制[J].光学精密工程,2007,15(1):89~94. Liang Jingqiu, Hou Fengjie. One dimension optical fiber array with silicon V-grooves[J]. Optics and Precision Engineering, 2007,15(1):89~94. (in Chinese)
- 4 Cuttino J F, Miller A C, Schinstock D E. Performance optimization of a fast tool servo for single-point diamond turning machines[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1999, 4(2):169 ~ 179.
- 5 李荣彬,张志辉,杜雪,等. 微结构光学元件快速伺服刀架加工技术研究[J]. 纳米技术与精密工程,2005,3(3): 216~221. Li Rongbin, Zhang Zhihui, Du Xue, et al. An investigation of fast tool servo machining of optical microstructures [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2005,3(3): 216~221. (in Chinese)
- 6 张大卫,冯晓梅. 音圈电机的技术原理[J]. 中北大学学报:自然科学版,2006,27(3): 224~228. Zhang Dawei, Feng Xiaomei. The technical principle of voice-coil actuator[J]. Journal of North University of China: Natural Science Edition, 2006,27(3): 224~228. (in Chinese)
- 7 吴丹,谢晓丹,王先逵. 快速刀具伺服机构研究进展[J]. 中国机械工程,2008,19(11):1379~1385.
  Wu Dan, Xie Xiaodan, Wang Xiankui. Research review of fast tool servo[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(11):1379~1385. (in Chinese)
- 8 陈志华. 非圆截面零件车削控制研究[D]. 长沙:国防科技大学,2000. Chen Zhihua. Research on the control of noncircular turning [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2000. (in Chinese)
- 9 王忠山,曾鸣,苏宝库.数字伺服系统中微分控制律的实现[J].电机与控制学报,2006,10(3):336~340.
  Wang Zhongshan, Zeng Ming, Su Baoku. Implementation of the differential law in digital servo system [J]. Electric Machines and Control, 2006,10(3):336~340. (in Chinese)
- 10 于长官.现代控制理论[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1997.
- 11 韩京清.最速反馈控制的不变性[J].系统科学与数学,2005,25(4):498~506.
  Han Jingqing. Invariability of time optimal feedback control [J]. Journal of System Science and Mathematical Sciences, 2005,25(4):498~506. (in Chinese)
- 12 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学,2007,1(1):24~31.
  Han Jingqing. Auto disturbances rejection control technique [J]. Frontier Science, 2007,1(1):24~31. (in Chinese)
- 13 韩京清,黄远灿. 二阶跟踪-微分器的频率特性[J]. 数学的实践与认识,2003,33(3):71~74.
  Han Jingqing, Huang Yuancan. Frequency characteristic of second-order tracking-differentiator auto disturbances rejection control technique[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2003, 33(3):71~74. (in Chinese)