

文章编号: 1001- 2486(2008) 01- 0078- 05

## 音圈电机驱动的快刀伺服系统建模与性能分析\*

戴一帆, 段纬然, 王贵林, 杨帆

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 复杂面形/结构零件的应用范围越来越广, 往往一个零件上既有复杂面形也有微小结构。为了实现复杂面形/结构零件的高效加工, 分析了快刀伺服加工方式的特点, 设计并研制了音圈电机驱动的快刀伺服系统; 基于动力学和电磁学分析, 建立了快刀伺服系统的传递函数模型, 并对控制方法进行了设计; 在此基础上, 通过实验对快刀伺服系统进行了性能测试, 实验结果表明本文所研制的快刀伺服系统具有较高的运动分辨率、定位精度和工作频响, 能够作为快刀伺服加工的进刀装置。

**关键词:** 复杂面形/结构; 快刀伺服; 音圈电机; 建模

中图分类号: TH113 文献标识码: A

## Study on Modeling and Performance of a Fast Tool Servo System Driven by Voice Coil Motor

DAI Yi-fan, DUAN Wei-ran, WANG Gui-lin, YANG Fan

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

**Abstract:** The application scopes of complex shape and structure units are becoming much wider. The problem is that these units are both complex in shapes and micro in structures. In order to mach complex form parts with high efficiency, the characteristics of fast tool servo process were analyzed in this paper, and a fast tool servo (FTS) system was developed, driven by voice coil motor. The characteristics of dynamics and electromagnetics were thoroughly analyzed, the transfer function model of FTS system was founded, and the control method was designed. On the basis of the above work, the performance of FTS system was tested. The result shows that the FTS system works with high resolution, good locating accuracy and high response, and it can act as fast feeding device of tool in fast tool servo process.

**Key words:** complex fom/structure; fast tool servo(FTS); voice coil motor (VCM); modeling

### 1 快刀伺服系统的工作特性分析

近年来, 复杂面形零件的应用范围越来越广, 某些特殊成像效果的光学系统只有采用复杂面形或复杂结构光学零件才能够实现, 而且往往一个零件上既有复杂面形也有微小结构。这些零件不能采用传统的切削加工方法进行加工, 而具有大行程、高频响特点的快刀伺服加工技术, 结合了普通快刀伺服加工技术的高频响和慢刀伺服加工技术行程大的特点, 能够实现复杂面形/结构零件的精密高效加工, 是目前国内外研究的热点之一。

快刀伺服加工的示意图如图 1 所示<sup>[1]</sup>。它由伺服控制的刀具产生高频响和小范围的快速进刀运动, 配合主轴的伺服回转, 实现复杂面形/结构零件的高效加工。

在快刀伺服加工中, 起关键作用的是实现高频响精密进刀运动的快刀伺服系统<sup>[2]</sup>。在能够实现直

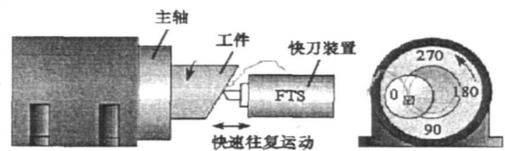


图 1 快刀伺服加工示意图

Fig. 1 The sketch map of fast tool servo process

\* 收稿日期: 2007- 09- 05

基金项目: 国家部委资助项目; 新世纪优秀人才计划项目

作者简介: 戴一帆(1966—), 男, 教授, 博导。

线往复进刀的驱动方式中, 传统的“电机+丝杠+螺母”结构行程大, 但运动频响比较低, 不能加工复杂的微小结构; 压电陶瓷的截止频率较高, 但行程很小, 采用叠层式结构可以将有效行程在一定范围内扩大<sup>[3]</sup>, 但其动态性能和刚度又会下降, 不适合加工高陡度的复杂面形零件。音圈电机具有输出力大、速度和加速度高、行程大的优点, 通过对控制方法进行优化能够提高跟踪精度和工作频响, 这既能够实现复杂微结构零件加工所需要的高频响, 也满足加工高陡度复杂面形所需要的大行程。

本文研制了一种以音圈电机作为驱动装置的快刀伺服系统, 通过分析机电耦合特性, 建立其传递函数模型, 并针对传统的输出反馈控制方式的动态响应和抗切削力干扰方面的不足, 对基于速度和位置的状态反馈控制系统进行设计; 最后通过测试实验对快刀伺服系统的运动性能进行分析和评价。

## 2 快刀伺服系统的传递函数建模

基于音圈电机驱动的快刀伺服系统结构布局如图 2 所示<sup>[4]</sup>。设计快刀伺服系统的行程为 2mm。

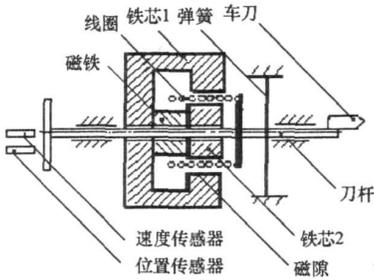


图 2 快刀伺服系统的结构布局

Fig. 2 The Structure of FTS system

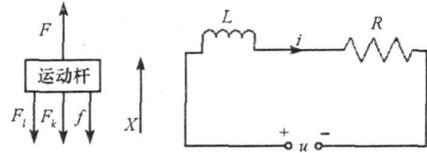


图 3 快刀伺服系统的力学和电路模型

Fig. 3 The dynamics and electromagnetics models of FTS system

为了实现高频运动, 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, 运动部分由线圈、运动杆、刀具和加工载荷组成。当线圈通电时, 产生  $X$  方向的推力, 使运动杆沿  $X$  方向作直线运动。支撑弹簧和运动杆组成了弹性刀架, 它使运动杆恢复到平衡位置 ( $x = 0$ ); 导向装置对运动部件产生粘性阻尼作用。为了达到较高的跟踪精度和良好的运动性能, 我们采用速度、位置双闭环控制方式。

为了得出运动位移  $x(t)$  与控制信号  $u(t)$  的实时定量关系, 需要对快刀伺服系统的传递函数进行建模分析。图 3 所示为快刀伺服系统的电路、力学模型, 可以得到两个重要方程<sup>[5]</sup>:

电压平衡方程:

$$u = L \frac{di}{dt} + Ri + (B_g l) v \quad (1)$$

式中,  $i$  为音圈电机的工作电流;  $L$  为线圈的电感;  $R$  为线圈内阻与控制信号  $U(t)$  内阻之和;  $v$  为线圈在磁场中的运动速度;  $B_g$  为磁感应强度;  $l$  为线圈总长度。

动力平衡方程:

$$F - f - F_k - F_l = ma \quad (2)$$

式中,  $F$  为线圈在磁场中产生的力;  $F_l$  为粘性阻力 ( $F_l = cv$ );  $F_k$  为弹性力 ( $F_k = kx$ );  $f$  为切削载荷在  $X$  方向的分量;  $m$  为运动部分的质量;  $a$  为运动部分的加速度。

另外, 通电线圈在磁场中产生的力为:

$$F = B_g i l \quad (3)$$

运动位移  $x$ 、速度  $v$ 、加速度  $a$  之间存在关系:

$$v = \dot{x}, a = \ddot{x}$$

由于电感  $L$  很小, 可以忽略不计, 联立式 (1)~(3) 可以得到:

$$m\ddot{x} + \left[ c + \left( \frac{B_g l}{R} \right)^2 \right] \dot{x} + kx = B_g l \frac{u}{R} - f \quad (4)$$

对式 (4) 进行拉普拉斯变换, 得到快刀伺服系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{X(s)}{I(s)} = \frac{\frac{B_g l}{k}}{\frac{m}{k}s^2 + \frac{Rc + B_g^2 l^2}{kR}s + 1} \quad (5)$$

这是一个 MFK(质量-弹簧-阻尼)型二阶系统,它具有如下性质:

(1) 时间常数  $T_0 = \sqrt{m/k}$ , 这表明减少运动部分的质量和增加弹簧刚度,有利于提高快刀伺服系统的响应速度。

(2) 开环增益  $A = \frac{B_g l}{k}$ , 这表明增大弹簧刚度和增加音圈电机的驱动能力,有利于提高快刀伺服系统的行程。

(3) 可以求得阻尼系数  $\xi = \frac{1}{2} \frac{cR + \left(\frac{B_g l}{k}\right)^2}{\sqrt{mk}} = \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{mk}} \left[ c + \left(\frac{B_g l}{R}\right)^2 \right]$ , 说明快刀伺服系统的阻尼由两部分组成: 机械阻尼  $c$ 、电磁阻尼  $\left(\frac{B_g l}{R}\right)^2$ , 因此通过对机械阻尼和电磁阻尼进行合理设计,能够提高快刀伺服系统的动态性能。

### 3 快刀伺服系统的控制方法设计

对于式(5)所示的二阶系统,经过系统辨识,发现它是一个小阻尼系统,为了实现对快速进刀运动的精确控制,提高快刀伺服系统的动态响应和抗切削力干扰能力,必须通过合适的控制方法来改善其动态性能。为此,采用基于速度和位置状态反馈的控制方式来进行控制器的设计。

首先增加速度反馈环节来改善系统的阻尼特性。图4为速度反馈结构,其中  $k_p$  为功放增益,它在 5kHz 频率范围内可看作是纯比例环节;  $k_v$  为速度反馈系数。

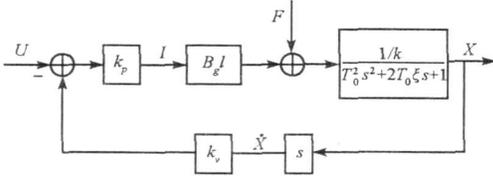


图4 速度反馈结构

Fig. 4 The structure of velocity feedback

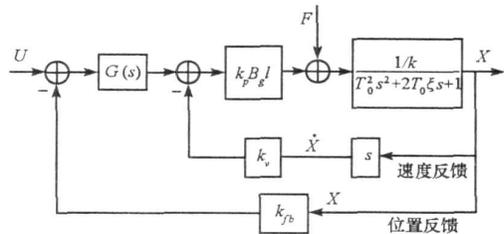


图5 快刀伺服系统的速度和位置全反馈结构

Fig. 5 The structure of both velocity and position feedback

系统的传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{k_p B_g l / k}{T_0^2 s^2 + 2T_0 \xi' s + 1} \quad (6)$$

从上式可以看出,增加速度反馈环节后,快刀伺服装置也是二阶系统,其中阻尼系数  $\xi'$  为:

$$\xi' = \xi + \frac{k_v k_p B_g l / k}{2T_0} \quad (7)$$

调整速度反馈系数  $k_v$ , 可以使快刀伺服系统得到合适的阻尼系数  $\xi'$ 。

从图4中还可以得出快刀伺服系统的刚度传递函数为:

$$K(s) = \frac{F(s)}{X(s)} = k \left( T_0^2 s^2 + 2T_0 \xi' s + 1 \right) \quad (8)$$

式(8)显示系统刚度是一个二阶微分比例环节,从而易知快刀系统的动态刚度在高频时能够大幅提高。同时由式(8)可以得到系统的静态刚度为:

$$K_{\text{静}}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{F(s)}{X(s)} = k \quad (9)$$

从上式中发现系统的静态刚度等于弹簧刚度  $k$ , 为了减少切削载荷  $f$  对刀架输出位移的影响, 应选用刚度较大的弹簧。

在快刀伺服加工中, 对金刚石刀具的跟踪精度要求较高(微米级), 因此还必须对刀具进行位置反馈控制, 最终设计的基于速度和位置的状态反馈控制结构如图 5 所示。下面通过测试实验来分析快刀伺服系统的运动性能。

#### 4 快刀伺服系统的性能测试与分析

在设计了快刀伺服系统的控制方法之后, 需要对它的运动性能指标(定位精度、重复定位精度、运动分辨率和工作频响)进行测试和分析。

标定电机时选用高精度电感测微器, 分辨率为 10nm。进行动态性能测试时使用高精度的 TR81 型电涡流传感器, 它采用非接触式测量方式, 动态性能好, 精度可达 1 $\mu$ m。

##### 4.1 定位精度和重复定位精度测试

定位精度和重复定位精度的测量步骤是: (1) 在快刀伺服系统 1mm 的运动范围内, 进行 5 等分, 得到 6 个分点; (2) 系统以 200 $\mu$ m 步长分段进行运动, 测出 6 个分点的位置误差; (3) 运动 3 个循环, 从而对每个分点测出 6 个位置误差值; (4) 通过数据处理, 求出定位精度和重复定位精度。

表 1 所示为快刀伺服系统的运动误差, 通过数据处理可以得出其定位精度为 2.8 $\mu$ m/mm, 重复定位精度为 1.4 $\mu$ m。

表 1 快刀伺服系统的运动误差  
Tab. 1 The movement error of FTS system

位置 (mm)	- 0.5	- 0.3	- 0.1	0.1	0.3	0.5
误差 ( $\mu$ m)	- 0.656	0.417	0.110	- 0.575	0.421	- 0.374
	0.360	- 0.130	0.056	- 0.051	- 0.387	0.304
	0.465	- 0.104	0.454	0.965	- 0.204	0.539
	- 0.213	0.052	0.897	0.902	0.369	- 0.295
	0.282	- 0.469	- 0.213	- 1.239	0.916	0.174
	- 0.239	0.235	- 1.305	- 0.002	- 1.116	- 0.347

##### 4.2 运动分辨率测试

对快刀伺服系统运动分辨率的测量方法是: 输入指令为阶跃形式, 延迟时间为 0.1s, 测量结果如图 6 所示。从图中可以看出, 快刀伺服系统的运动分辨率优于 1 $\mu$ m, 同时发现在每一步(1 $\mu$ m)定位过程中出现一些毛刺, 这主要是传感器噪声带来的影响。

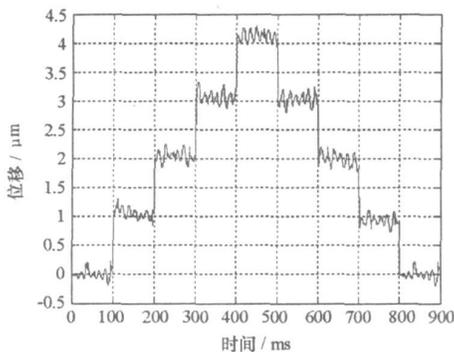


图 6 运动分辨率测试结果  
Fig. 6 The movement resolution of FTS system

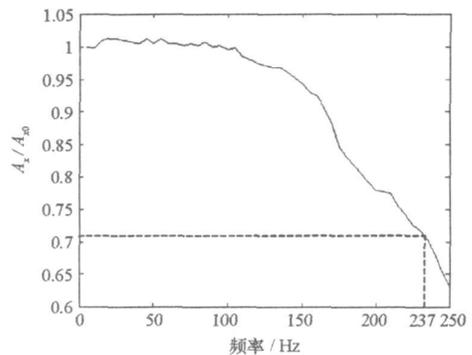


图 7 频率响应实验结果  
Fig. 7 The result of response testing

##### 4.3 运动频响分析

运动频响是指快刀伺服系统输出位移不失真时的最大工作频率, 频响测试仍然按照 -3dB 原则, 即

在幅频特性曲线上, 输出输入比  $A_x/A_0$  的对数幅值下降 3dB 处 ( $20\lg A_x/A_0 = -3\text{dB}$ ,  $A_x/A_0 = 0.707$ ) 对应的频率就是运动频响。因此只需测出  $A_x = 0.707A_0$  时的临界频率, 就可确定出快刀伺服系统的运动频响。

对快刀伺服系统进行幅频测试实验, 记录输出与输入幅值比, 实验结果如图 7 所示。可以看出快刀伺服系统的运动频响达到 237Hz, 能够满足复杂面形零件的快刀伺服加工要求。

## 5 结论

大行程、高频响的快刀伺服加工能够实现复杂面形/结构零件的精密高效加工, 其关键部件——快刀伺服系统一直是研究的重点和难点。本文设计并研制了音圈电机驱动的快刀伺服系统, 设计行程达到 2mm, 测试结果表明它具有较高的运动分辨率和工作频响。通过对控制方法进行优化, 能够进一步提高跟踪精度, 在一定条件下可以解决复杂面形和微小结构综合加工的问题。

## 参考文献:

- [1] James F C, Arthur C M, Dale E S. Performance Optimization of a Fast Tool Servo for Single point Diamond Turning Machines[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1999, 4(2): 169- 179.
- [2] 李荣彬, 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.
- [3] 孙宝玉, 等. 压电驱动超精密定位工作台的研究[J]. 机械设计与研究, 2003, 19(2): 44- 46.
- [4] 陈志华, 赵淳生. 基于激振器的直线运动伺服系统[J]. 振动测试与诊断, 2002, 22(2): 107- 110.
- [5] 黄世涛, 冯之敬. MF 型音圈电机驱动的微进给机构伺服方法研究[J]. 航空精密制造技术, 2005(10): 12- 15.

(上接第 56 页)

## 参考文献:

- [1] 郭福成. 基于运动学原理的单站无源定位与跟踪关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2002.
- [2] 冯道旺. 利用径向加速度信息的单站无源定位技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.
- [3] 周亚强. 基于视在加速度信息的单站无源定位与跟踪关键技术研究及其试验[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
- [4] 冯道旺, 周一宇, 李宗华. 相参脉冲序列多普勒变化率的一种快速高精度测量方法[J]. 信号处理, 2004, 20(1): 40- 43.
- [5] Hill D A, Bodie J B. Experimental Carrier Detection of BPSK and QPSK Direct Sequence Spread Spectrum Signals[C]//IEEE Military Communications Conference MILCOM, Canada, 1995: 362- 367.
- [6] Tretter S A. Estimating the Frequency of a Noisy Sinusoid by Linear Regression[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1985, 32(6): 832- 835.