

直线伺服电机的多目标优化控制方法*

刘新辉, 陈志华

(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 对伺服系统的模型和控制方法进行分析。根据系统的不同使用要求, 提出了具有一定稳定裕度的多目标优化方法, 并对一具体事例进行了仿真分析。仿真和实践表明该方法可行且非常有效。

关键词: 直线电机; 优化控制; 非圆

中图分类号: TM301.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6540(2007)12-0010-04

Multiobjective Optimizing Control Method for Linear Servo Motor

LIU Xin-hui, CHEN Zhi-hua

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

Abstract: The model of the servo system is analyzed, and then a multi-objective optimizing control method is proposed. Finally a practical example is given. The simulation result proves that the method is feasible and effective.

Key words: linear motor; optimizing control; noncircular

0 引言

目前, 非圆截面零件的数控加工已相当普遍。如中凸变椭圆活塞外圆的车削加工就是典型的非圆加工。PTC 活塞数控车削系统可以作为加工高档活塞外轮廓曲面的专用数控机床^[1], 也用来为活塞立体靠模车床车制钢质靠模。直线伺服刀架是 PTC 活塞数控车削系统的关键零部件, 它采用音圈式直线电机作为驱动源。音圈式直线电机的控制方法, 国内外有很多文献作了报道^[2,4], 但在实际应用中仍然有些问题需要解决。主要表现为: 首先, 由于被控对象存在比较大的非线性, 同时设备周围环境存在强烈的电磁干扰, 因此设计控制器必须考虑系统的稳定性和抗干扰问题; 其次, 在应用中不仅对数控系统直线伺服刀架的带宽有要求, 而且由于系统不同的用途, 对直线伺服刀架的动静态刚度也有不同的要求。由于上述原因, 目前在实际操作上, 控制器参数的整定一直要靠人工试验加经验来解决, 这样不仅耗时耗力而且得到的直线伺服刀架性能往往不甚理想。本文从控制理论和优化方法入手, 结合实践经验介绍

了具有一定稳定裕度的直线伺服刀架多目标优化控制。

1 直线伺服刀架的数学模型

直线伺服刀架的被控对象包括直线电机驱动器、直线电机和弹簧刀架。其中, 直线电机和弹簧刀架是直线伺服刀架的执行部件, 其结构简图如图 1 所示^[5]。

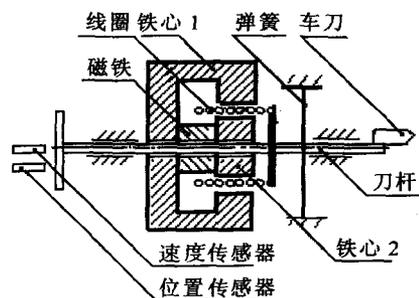


图1 直线电机和弹簧刀架的结构简图

由图 1 可知, 直线电机的铁心 1、磁铁、铁心 2 以及磁隙一起构成一闭合磁路。铁心 1 与铁心 2 之间的磁隙很小, 便于在磁隙中形成一个近似的

* 国家自然科学基金项目(50575223)

匀强磁场。线圈、刀杆、弹簧、车刀固连构成直线电机的动子部分。根据电磁理论可知,当线圈中存在电流时,线圈在磁场中将受到力的作用。动子在电磁力和弹力的共同作用下,使刀架平移一段位移 $y(t)$ 。电磁力与线圈中电流成正比,而线圈中电流又与直线电机驱动器的控制电压近似成正比。这样,弹簧刀架位移 $y(t)$ 与驱动电源控制电压 $u(t)$ 的关系可以表示为

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + K_1y = Ku \quad (1)$$

式中: M ——动子等效质量;

K ——系统增益;

K_1 ——弹簧刚度;

C ——粘性阻尼。

用传递函数表示,即:

$$G_1(S) = \frac{Y(S)}{U(S)} = \frac{K}{MS^2 + CS + K_1} \quad (2)$$

由于阻尼 C 值非常小,直线电机及其弹簧刀架可以看作是一个小阻尼的二阶系统,其动态响应性能、抗切削力及干扰能力都太差,难以实现对刀架的快速精确控制。为了改善伺服系统性能,直线伺服刀架采用了速度和位置双闭环反馈控制。其中,内环为速度环,采用比例控制方式,主要用来提高伺服刀架的快速响应性能,提高系统的动态刚度;外环为位置环,主要用来提高系统的跟踪精度。直线伺服刀架的控制原理框图如图 2 所示。

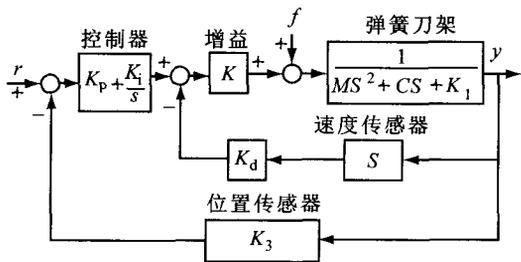


图 2 微进给机构的控制原理框图

根据图 2 可以推导被控对象的传递函数

$$G_2(S) = \frac{K}{MS^2 + CS + K_1} \quad (3)$$

或者

$$G_2(S) = \frac{K\omega_n^2}{S^2 + 2\zeta_1\omega_n S + \omega_n^2} \quad (4)$$

式中

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_1}{M}}, \zeta_1 = \frac{C}{2\sqrt{K_1M}}$$

因此弹性刀架位移 $y(t)$ 与输入参考信号 $r(t)$ 的传递函数关系为

$$G(S) = \frac{Y(S)}{R(S)} = \frac{(K_p S + K_1)K\omega_n^2}{S^3 + a_2 S^2 + a_1 S + a_0} \quad (5)$$

其中:

$$a_0 = K_i K_3 K \omega_n^2$$

$$a_1 = (K_p K_3 K + 1) \omega_n^2$$

$$a_2 = 2\zeta_1 \omega_n + K_d K \omega_n^2$$

考虑切削力时,弹性刀架位移 $y(t)$ 与切削力 $f(t)$ 的传递函数

$$G(S) = \frac{Y(S)}{F(S)} = \frac{\frac{1}{K_1} \omega_n^2 S}{S^3 + a_2 S^2 + a_1 S + a_0} \quad (6)$$

式(5)和式(6)中 K_i, K_p, K_d 为待定的控制参数, K_3 为已知的位置传感器增益。被控对象模型中的未知参数为弹簧刚度 K_1 、固有频率 ω_n 、增益 K 和阻尼系数 ζ_1 , 它们可以通过系统辨识方法来求得。

2 考虑系统稳定性的多目标优化控制

2.1 优化目标函数的选择

影响活塞外圆加工精度的因素很多,其中工作时直线伺服刀架的定位精度是最重要的因素之一。而反映直线伺服刀架定位精度的指标有两个:一个是刀架的动态响应性能;一个是抵抗切削力干扰的能力。直线伺服刀架的动态响应性能可以用下式来评估

$$H_1(K_i, K_p, K_d) = \int_0^{+\infty} |y(t) - y(\infty)| t dt \quad (7)$$

式中: $y(t)$ ——系统单位阶跃响应;

$y(\infty)$ ——系统单位阶跃信号作用下的稳态输出。

直线伺服刀架抵抗切削力干扰的能力用下式评估

$$H_2(K_i, K_p, K_d) = \int_0^{+\infty} |\delta(t)| dt \quad (8)$$

式中, $\delta(t)$ 为刀架在单位切削力脉冲作用下的响应。

这样,反映直线伺服刀架综合性能的目标函数可以表示为

$$H(K_i, K_p, K_d) = H_1(K_i, K_p, K_d) + \alpha H_2(K_i, K_p, K_d) \quad (9)$$

式中, α 为权重因子。

式(9)也可表示为

$$H(K_i, K_p, K_d) = \int_0^{+\infty} \left| \frac{1}{S} L^{-1}(G(S)) - K \right| dt + \alpha \int_0^{+\infty} L^{-1}(G_2(S)) dt \quad (10)$$

直接求式(10)中的显式表达式 $L^{-1}\left(\frac{1}{S}G(S)\right)$ 和 $L^{-1}(G_2(S))$ 比较困难, 可以借助 MATLAB 库中的 Step(sys) 和 Impulse(sys) 函数分别进行计算。

2.2 约束条件的确定

严格地说, 被控对象(包括功放、电机和弹簧刀架)都是高阶的非线性系统, 而式(4)只是为了处理方便而对被控对象采取的线性化和粗略近似。由于上述原因, 利用经典的稳定性理论来确定稳定约束条件往往会出现与现实不合的结论。笔者经过多次实践, 发现系统内环(即速度环)失稳的主要原因是速度环反馈增益 K_d 的过大, 而外环(即位置环)失稳则是由于 K_p 值过大造成的。由此建立如下约束

$$K_p \leq K_{p0}, K_d \leq K_{d0} \quad (11)$$

式中, K_{p0}, K_{d0} 为保证系统有合适稳定裕度的最大 K_p, K_d 值, 根据经验求取。

2.3 最优化问题的求解

直线伺服刀架控制系统的优化问题可以归纳为: 求取合适的控制参数 K_i^*, K_p^*, K_d^* , 使得在满足条件式(11)的情况下, 使式(10)具有最小值。在求解此问题之前, 先引入无约束优化问题, 即求取合适的参数 $\hat{K}_i^*, \hat{K}_p^*, \hat{K}_d^*$, 使得式(12)具有最小值。

$$T(K_i, K_p, K_d) = H(K_i, K_p, K_d) + M \quad (12)$$

式中

$$M = \begin{cases} 0 & (K_d < K_{d0} \text{ 且 } K_p < K_{p0}) \\ M_0 & (\text{其余情况}) \end{cases}$$

当 M_0 足够大时, 无约束优化问题式(12)与约束优化问题式(10)同解, 这样获得的 $\hat{K}_i^*, \hat{K}_p^*, \hat{K}_d^*$ 即是 K_i^*, K_p^*, K_d^* 。

式(12)表示的无约束优化问题可以利用单纯形方法求解。MATLAB 函数库中提供了单纯形法的算法程序。

3 实例与仿真

为了进一步了解优化后的直线伺服刀架的性能以及权重因子 α 对直线伺服刀架动态响应性能和抗切削干扰能力的影响, 取一实际被控对象作仿真研究。经测试, 被控对象的物理参数如表 1 所示。表 2 为对应不同权重因子 α 获得的优化控制参数。

表 1 被控对象物理的物理参数

$\omega_n / (\text{rad/s})$	$K_1 / (\text{N/m})$	$K / (\text{m/v})$	$K_3 / (\text{v/m})$	ζ_1	K_{d0}	K_{p0}
480	420 000	0.000 14	5 000	0.04	92	8

表 2 不同权重因子 α 对应的控制器优化参数

α	K_p^*	K_i^*	K_d^*
0	8	1 130	55
60	8	950	64
100	8	725	82

图 3 为不同权重 α 下伺服刀架的单位阶跃输入响应。由图 3 可知, 通过优化计算获得的伺服刀架其动态响应的调整时间较短; 其次, 从图中也可以看出, α 值越小, 系统的动态性能越好。

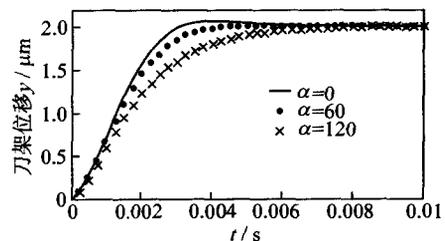


图 3 不同权重因子对应的优化系统的单位阶跃响应

图 4 为伺服刀架的在单位脉冲切削力作用下的位移输出。由图 4 可知, α 值越大, 系统对外界切削力干扰的抑制作用越强。

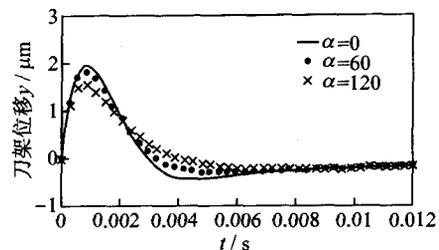


图 4 在单位切削力作用下的刀架动态响应曲线

4 结 语

通过以上分析可知,借助于计算机的快速计算能力可以快捷地确定控制器的具体参数。其次,通过仿真分析也可知:权重因子 α 对于直线伺服刀架的跟踪能力和抑制切削力的能力是相反的,因此在进行系统设计时必须考虑系统的使用要求。如果系统是用车削铝质活塞,考虑到车削铝质活塞的切削力较小而生产效率要求高,这时可选较小的权重因子 α ,保证系统具有较大的带宽,从而加工零件时可以采取较大的主轴转速;当机床仅用来作为加工靠模的专用机床时,考虑到车削钢质靠模一般为单件生产或小批量生产,对加工工时要求不高,但是车制靠模的切削力大,这时可选较大的权重因子 α ,从而提高系统对切削力干扰的抑制能力。实践证明,采用上述优化

(上接第9页)

$$P_m = m \cdot E_1 \cdot I_1 \quad (7)$$

其中, m 为相数。定子绕组的感应电势

$$E_1 = 4.44f_1 N_1 \phi_{m1} \quad (8)$$

式中: f_1 ——感应电势的频率;

N_1 ——定子绕组每相匝数;

ϕ_{m1} ——单匝绕组磁通的基波幅值。

输出功率、输出转矩、输入功率和效率等可以用下列公式计算:

$$P_2 = P_m - P_{Fe} - P_{mec} \quad (9)$$

$$T_2 = P_2 / \omega_r \quad (10)$$

$$P_1 = P_m + P_{cu} \quad (11)$$

$$P_{cu} = mI_1^2 R_1 \quad (12)$$

$$\eta = P_2 / P_1 \quad (13)$$

式中: P_{Fe} ——铁耗;

P_{mec} ——机械损耗;

P_{cu} ——铜耗;

ω_r ——角速度。

5 结 语

为了研究软磁复合材料的实际应用前景,本文依据材料的特点设计了一台高速爪极式永磁电机;由于其机构的复杂性,必须通过三维有限元计算,对电机进行参数计算和性能分析。本文在阐述参数计算与性能分析时所用的方法,已在低速

方法来设计直线伺服刀架的控制器参数,不仅可以大大缩短人工,而且能获得比较好的性能。

【参考文献】

- [1] 陈志华,崔红娟. 活塞外圆智能加工系统[J]. 机械科学与技术,1998,17(5):803-804.
- [2] 王先逵,钱磊. 高频响大行程微进给机构的研究[J]. 中国机械工程,1999,10(9):1105-1007.
- [3] 邓中亮. 高频响精密位移直线电机及其控制的研究[J]. 中国电机工程学报,1999,19(2):41-46.
- [4] 刘金陵,王先逵,吴丹,等. 直线电机伺服系统的模糊推理自校正PID控制[J]. 清华大学学报(自然科学版),1998,38(2):44-46.
- [5] 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.

收稿日期:2007-05-28

的爪极电机^[7]中得到了验证。

【参考文献】

- [1] PERSSON M, JANSSON P. Advances in powder metallurgy soft magnetic composite materials for electrical machines[G]//Impact of New Materials on Design, IEE Colloquium. 1995:4/1-4/6
- [2] HAMMONS T J, ERTAN H B, TEGOPOULOS J A, et al. 1998 ICEM Review[G]//IEEE Power Engineering Review. 1999, 12-17.
- [3] 夏长亮,史婷娜,张惠群. 永磁爪极步进电动机运行特性及其控制[J]. 天津大学学报,2000,33(2):202-205.
- [4] KWON Soon-o, LEE Ji-young, HONG Jung-pyo, et al. Practical analysis method for claw-pole type generator using 2-dimensional equivalent model electric machines and drives[C]//2005 IEEE International Conference. 2005:1661-1664.
- [5] GUO Y G, ZHU J G, Zhong J J, et al. Core losses in claw pole permanent magnet machines with soft magnetic composite stators[J]. IEEE Trans Magn, 2003, 39:3199-3201.
- [6] GUO Y G, ZHU J G, WATTERSON P A, et al. Development of a permanent magnet claw pole motor with soft magnetic composite core[J]. Australian Journal of Electrical & Electronics Engineering, 2005,2(1):21-30.

收稿日期:2006-12-05