

火箭炮交流位置伺服系统的鲁棒最优控制

柴华伟,马大为,李志刚,乐贵高,王 锋

(南京理工大学机械工程学院,南京 210094)

[摘要] 为了实现某火箭炮交流伺服系统的高速、高精度位置控制,针对实际系统中存在的转动惯量和负载力矩变化大、冲击力矩强等各种不确定因素,提出了一种鲁棒最优控制方法。实验结果表明,该控制器鲁棒性强,而且具有较好的动态性能及稳态精度。

[关键词] 火箭炮;交流位置伺服系统;鲁棒控制;最优控制

[中图分类号] E924.93; TP273 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)10-0083-05

1 引言

现代火箭炮控制系统的设计有以下5个方面的技术要求:响应快,控制精度高,无超调,抗干扰,控制策略简单易于实现。由于火箭炮位置伺服系统是一种负载变化大、冲击扰动力矩强的系统,采用传统PID控制无法满足其位置控制的高速、高精度以及射击精度的要求,往往无法达到理想的控制效果^[1],需采用鲁棒控制理论。20世纪80年代初提出的以系统的 ∞ -范数为性能指标的 H_∞ 控制理论,是目前解决鲁棒控制问题比较成功且完善的理论体系,成为近20年来自动控制理论和工程研究的热门课题。目前, H_∞ 控制无论从理论上还是应用上都趋于成熟^[2]。线性二次型最优控制是在20世纪60年代发展起来的一种设计方法,由于此方法计算容易,控制效果显著,所以应用十分广泛^[3]。笔者将 H_∞ 控制理论与最优控制理论的优点加以结合,设计了鲁棒最优控制器。经实验验证,该控制器有效地克服了系统的模型不确定性和冲击力矩的影响,具有较好的鲁棒性、动态性能和静态控制精度,获得了满意的控制效果。

2 基于旋转轴系的PMSM伺服系统的数学模型

交流永磁同步电机的矢量控制也是一种基于磁

场定向的控制策略,按照磁链定向控制方法可以分为4种控制方案:转子磁链定向控制、定子磁链定向控制、气隙磁链定向控制、阻尼磁链定向控制。在模型推导中,做了如下假设^[4]:**a.** 忽略铁心饱和;**b.** 不计涡流和磁滞损耗;**c.** 转子上没有阻尼绕组,永磁体也没有阻尼作用;**d.** 反电动势是正弦的。

基于以上假设,可得在 $d-q$ 旋转轴系下的状态方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & p\omega & 0 \\ p\omega & -R/L & -p\psi_r/L \\ 0 & p\psi_r/J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_d/L \\ u_q/L \\ -T_l/J \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 R 为绕组等效电阻; L 为等效电感; p 为电机磁极对数; ω 为转子机械角速度; ψ_r 为每对磁极磁通; T_l 为负载转矩; J 为折算到电机轴上的总转动惯量。

采用 $i_d=0$ 的解耦控制,可得

$$\begin{bmatrix} \frac{di_q}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \\ \frac{d\theta}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & -p\psi_r/L & 0 \\ p\psi_r/J & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_q/L \\ -T_l/J \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

[收稿日期] 2006-10-10;修回日期 2006-11-27

[作者简介] 柴华伟(1981-),男,安徽和县人,南京理工大学博士研究生,主要研究方向:兵器发射理论与技术

取转角 θ 及角速度 ω 为状态变量,令

$$X = \begin{bmatrix} \omega \\ \theta \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} p\psi_r/J \\ 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} -1/J \\ 0 \end{bmatrix};$$

取输出为 $Y = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} \omega \\ \theta \end{bmatrix}$, 可建立交流永磁电机伺服系统的状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + B_1 i_q + B_2 T_1 \\ Y = CX \end{cases} \quad (3)$$

这里 A 和 B 代表系统标称模型,传统控制方式是采用 PI 控制器与线性状态反馈控制器相结合的方法,利用传统控制理论求解控制器参数,虽然该方法在提高稳态精度和改善动态特性方面作用明显,但转子速度、转角误差使得交流同步电机线性化以后的实际模型相对于理论模型发生了摄动,因此该方法无法克服模型参数变化对性能的不利影响,即系统对参数摄动的鲁棒性较差。鲁棒控制可以大大提高系统的鲁棒性,但如果直接对位置伺服系统采用鲁棒控制,即按鲁棒控制思想为受控对象设计一个状态反馈控制器,系统的稳态精度将无法保证^[5]。笔者结合最优控制理论和 H_∞ 控制理论的优点,设计了一种鲁棒最优控制器,使具有参数摄动和外部干扰的交流位置系统具有良好的跟随特性,并给出了实验结果。

3 控制器的设计

3.1 系统的描述

对于模型式(3),系统的不确定性主要表现在:
a. 系统参数的建模误差;
b. 系统参数的变化;
c. 外界干扰的不确定性。

对于式(3)所描述的伺服系统,系统的控制任务是设计合适的跟踪控制器,满足

$$\lim(x_{d2} - x_2) = \lim e_2 = 0 \quad (4)$$

其中 x_{d2} 为期望的角度输出信号, x_2 为实际的角度输出信号。 e_2 为跟踪误差,而且在整个控制过程中系统对上述所描述的不确定性呈现强鲁棒性和高的跟踪精度。

为了实现上述控制任务,设计一个合理的鲁棒最优控制器,首先假设^[6]:

1) 式(3)的标称系统是可以获得的,即式(3)中的矩阵 A, B_1 的估计 \hat{A}, \hat{B}_1 通过解析或辨识是可以获得的。

2) 控制增益 $p\psi_r/J$ 满足

$$0 < (p\psi_r/J)_{\min} < (p\psi_r/J) < (p\psi_r/J)_{\max} \quad (5)$$

3) 负载扰动 T_1 有界。

可见,对于式(3)所描述的伺服系统,上述假设可以实现。因此,式(3)可重写为

$$\begin{cases} \dot{X} = (\hat{A} + \Delta A)X + (\hat{B}_1 + \Delta B)i_q + B_2 T_1 \\ Y = CX \end{cases} \quad (6)$$

$\Delta A, \Delta B$ 表示摄动矩阵,且假设满足以下条件:

$$[\Delta A \quad \Delta B] = E\Sigma[F_a \quad F_b] \quad (7)$$

其中 E, F_a, F_b 为已知的定常阵; Σ 为含有不确定因素的矩阵,且 $\Sigma^T \Sigma \leq I, I$ 为单位阵。

3.2 控制器设计

对上述给定对象,设计控制器

$$u = -Kx \quad (8)$$

使闭环系统满足:

1) 对于任意满足条件 $\Sigma^T \Sigma \leq I$ 的 Σ , 闭环系统内稳定。

2) 对于任意满足条件 $\Sigma^T \Sigma \leq I$ 的 Σ , 由 T_1 到 Y 的闭环传递函数 $T_{YT_1}(s)$ 满足

$$\|T_{YT_1}(s)\|_\infty < 1 \quad (9)$$

文献[7]给出了对于被控对象式(6),存在状态反馈控制器 K ,使闭环系统满足 1,2 的充要条件及证明。

采用文献[8]中使用的二自由度控制器,如图 1 所示, P 为对象的实际模型, d 为外加干扰, K_1, K_2, K_3 为控制器, P_0 为标称对象,输入为 r ,输出为 y 。

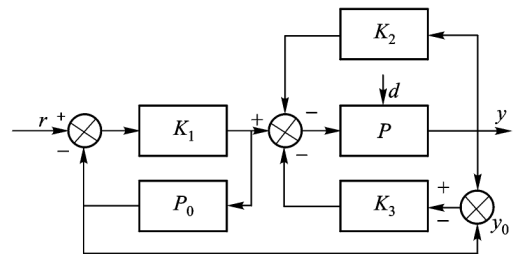


图 1 鲁棒最优控制器结构

Fig. 1 Structure of optimal robust controller

参数:电机及负载转动惯量折算到电机轴后总转动惯量 $J = 8.63 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $p = 4$, $p\psi_r = 0.64 \text{ Wb}$ 。

根据以上参数得 $\hat{B}_1 = \begin{bmatrix} 74 \\ 0 \end{bmatrix}$, $B_2 = \begin{bmatrix} -115.9 \\ 0 \end{bmatrix}$ 。

另取 $\Delta A = \begin{bmatrix} 0 & \sigma \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $|\sigma| \leq 1$, $\Delta B = \begin{bmatrix} 0 \\ \text{cost} \end{bmatrix}$, $E = 5I$,

$\Sigma = \begin{bmatrix} 0 & \sigma \\ \text{cost} & 0 \end{bmatrix}$, $F_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}$, $F_b = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0 \end{bmatrix}$,即可满

足条件式(7)。先设计鲁棒控制器 K_2 , 设评价函数

$$z = Cx + Di_q \quad (10)$$

取 $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $D = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, 满足 $D^T[D \ C] = [I \ 0]$ 。

使用求解 LMIs 的方法进行计算^[8,9], 即可求得 $K_2 = [11.8 \ 0.001]$ 。

再设计最优控制器 K_1 ^[8], 对于 Riccati 方程 $PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + C^T Q C = 0$, 取 $Q = 100, R = 1$, 得到 $P = \begin{bmatrix} 0.073 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 。所以, $K_1 = R^{-1}B^T P$ 可取为 $[5.402 \ 0.001]$ 。

K_3 设计为常规 PID 控制器, 其系数可以在对系统进行实时控制的过程中实时调整。

4 软件设计

外部测控微机发出跟踪的目标位置信号, 通过工控机检测测角元件的当前位置信号, 再编制合适的控制算法对以上信号进行处理, 经过 D/A 转换放大送到交流电机驱动器经功率放大后驱动电机, 电机通过动力传动齿轮箱带动负载及安装在高精度小模数齿轮箱上的测角元件向期望的位置运动。负载是不断变化的, 要求系统从空载到满载范围变化时满足性能指标要求。系统由驱动器自带的 A/D 转换部分进行数据采集, 在工控机中完成控制算法并通过驱动器自带的 D/A 转换部分输出控制量 u 。系统的主程序框图及中断服务子程序框图分别如图 2 和图 3 所示。

5 实验研究

5.1 实验装置

系统由控制部分、旋转变压器、交流伺服电机、驱动器、功率放大等部分组成。其中控制部分为工控机, 控制对象为交流电机。系统工作原理: 由 A/D 转换采集旋转变压器的反馈位置信号与期望输出值相比较得到误差值, 经过计算来实现控制算法, 并且经过 D/A 转换输出控制电压, 最后经过功率放大驱动电机。

5.2 实验结果分析

笔者在火箭炮随动装置上分别进行了基于鲁棒最优控制策略和常规 PID 控制策略的交流伺服系统试验研究, 减速器减速比为 1:231, 等效阻力矩最大为 $1255 \text{ N} \cdot \text{m}$, 负载最大等效转动惯量为 $365 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。负载最大速度为 $50 \text{ }^\circ/\text{s}$, 最大加速度为 $40 \text{ }^\circ/\text{s}^2$ 。所研制的控制器的误差曲线如图 4、图 5 所示, 常规 PID 控

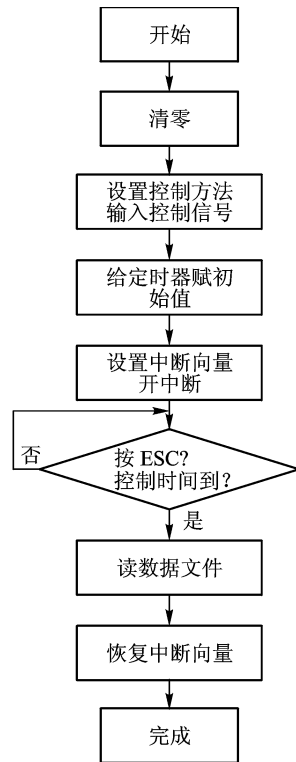


图 2 主程序流程图

Fig. 2 Flow chart of main procedure

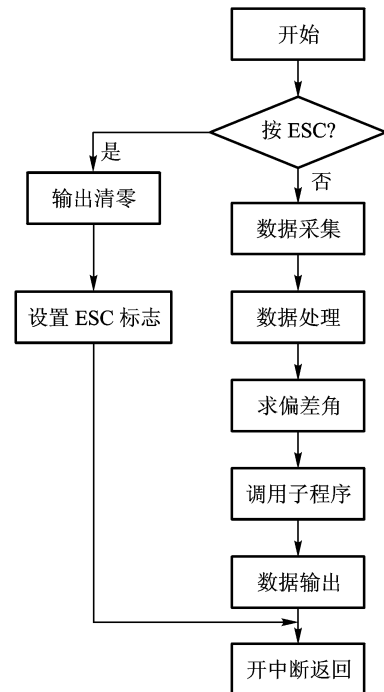


图 3 中断服务子程序流程图

Fig. 3 Flow chart of interrupt service sub-procedure

制器的误差曲线如图6、图7所示。实验表明,采用所研制的控制器,系统200 mil阶跃响应误差 <0.5 mil,等速 $50^\circ/\text{s}$ 误差 <2 mil。动、静态性能良好,而且无超调,整个系统工作稳定,控制效果好,满足了系统的要求。而采用常规PID控制器,系统200 mil阶跃响应误差 <2 mil,等速 $50^\circ/\text{s}$ 误差 <4 mil,效果明显比采用本文控制器差,不能较好地满足系统要求。

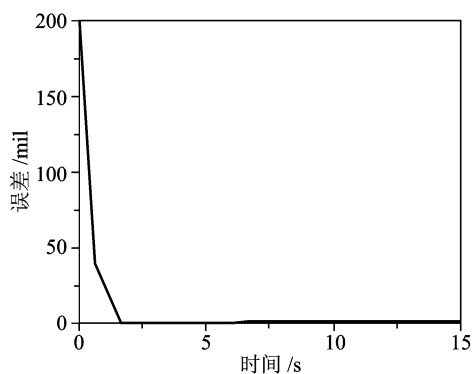


图4 200 mil阶跃响应误差曲线
Fig. 4 200 mil step response error curve

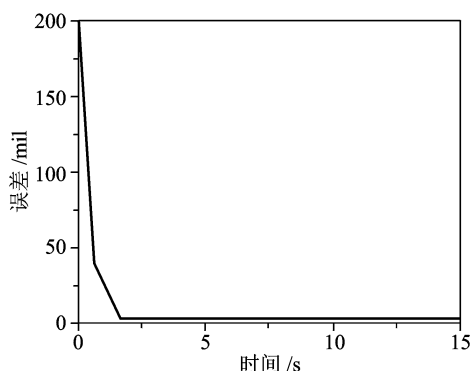


图6 200 mil阶跃响应误差曲线
Fig. 6 200 mil step response error curve

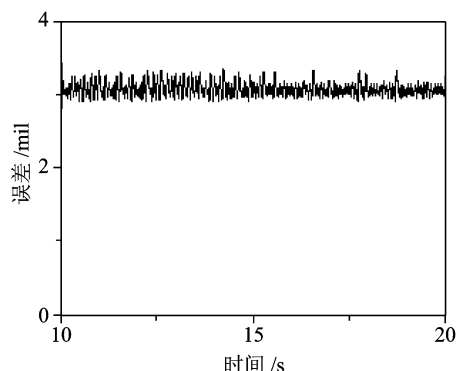


图7 等速($50^\circ/\text{s}$)误差响应曲线
Fig. 7 Equivalent speed ($50^\circ/\text{s}$) response error curve

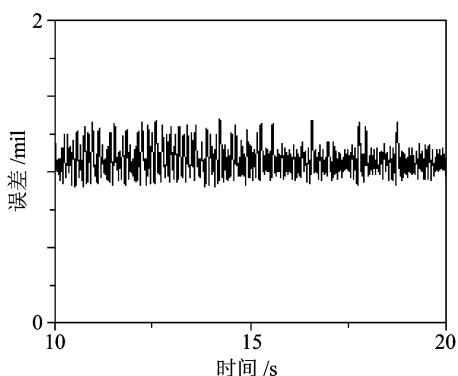


图5 等速($50^\circ/\text{s}$)误差响应曲线
Fig. 5 Equivalent speed ($50^\circ/\text{s}$) response error curve

6 结论

为了满足火箭炮交流伺服系统的高速和高精度指标,提出了一种最优 H_∞ 控制器。它结合了 H_∞ 控制理论和最优控制理论的优点,不需要被控对象精确的数学模型,适应性强,控制效果显著。从实验结果可以看出,对具有强干扰的伺服系统,应用该鲁棒最优控制器后系统鲁棒性好,满足了系统的要求。该控制策略特别适用那些系统结构复杂、外部干扰大而且控制精度要求高的场合。

参考文献

- [1] 彭熙伟,陈宝江,莫波,等. 电液位置伺服系统的智能控制[J]. 北京理工大学学报, 1997, 17(3): 344~349
- [2] 韩崇伟,林廷圻,贾志勇,等. 基于 H_∞ 控制的火炮电液伺服系统研究[J]. 液压气动与密封, 2002, (2): 18~21
- [3] 解学书. 最优控制——理论与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 1986
- [4] 郭庆鼎,王成元. 交流伺服系统[M]. 北京:机械工业出版社, 1994
- [5] 董扬斌,蒋静坪,吴茂刚. 基于状态变换的交流伺服系统鲁棒二次最优控制方法[J]. 电工技术学报, 2005, 20(9): 82~87
- [6] 韩崇伟. 火炮位置伺服系统的鲁棒控制与应用研究[D]. 西安交通大学, 2002
- [7] 申铁龙. H_∞ 控制理论及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 1996
- [8] 严晓隽,高金源. 鲁棒最优控制在随动系统中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(4): 470~472
- [9] Gahinet P, et al. LMI Control Toolbox [M]. The Math Works Inc, 1995

Optimal Robust Control of AC Position Servo System for Multiple Rockets

Chai Huawei, Ma Dawei, Li Zhigang, Le Guigao, Wang Feng

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

[Abstract] In order to realize high speed and high precision position control in an AC servo system, in view of such kinds of uncertainties as moment of inertia and load moment changing widely, and strong impact moment, an optimal robust control tactics is put forward. Experimental results show that this control tactics has strong robustness, and has fairly good dynamic performances and steady-state precision.

[Key words] rocket mortar; AC position servo system; robust control; optimal control

(上接第 82 页)

参考文献

- [1] 周育人, 李元香, 王 勇, 等. Pareto 强度值演化算法求解约束优化问题[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1243 ~ 1249
- [2] Duan Q Y, Gupta V K, Sorooshian S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient minimization [J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1993, 76(3):

501 ~ 521

- [3] Duan Q Y, Sorooshian S, Gupta V K. Optimal use of the SCE – UA global optimization method for calibrating watershed models [J]. Journal of Hydrology, 1994, 158(1): 265 ~ 284
- [4] 覃 俊, 康立山. 求解复杂约束优化问题的演化多目标算法 [J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2004, 23(1): 66 ~ 68

A Pareto Strength SCE – UA Algorithm for Reservoir Optimization Operation

Lin Jianyi^{1,2}, Cheng Chuntian¹, Gu Yanping³, Wu Xinyu¹

(1. Institute of Hydropower System & Hydroinformatics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China; 2. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen, Fujian 361003, China; 3. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou 310020, China)

[Abstract] In this paper, the Pareto strength SCE – UA algorithm (PSSCE) is presented to handle the reservoir optimization operation problem. The approach treats the constrained optimization as a two-objective optimization: one objective is the original objective function; the other is the degree of constraint violation. SCE – UA algorithm is applied to the two-objective optimization by using the individual's comparing procedure and the population ranking procedure which are respectively based on the Pareto dominance relationship and the Pareto strength definition. The new approach is more general, effective and robust.

[Key words] reservoir optimal operation; constrained optimization; Pareto dominate; Pareto strength; SCE – UA algorithm