

永磁直线伺服电机 L_2 鲁棒控制的研究

郭庆鼎, 蓝益鹏

(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁省 沈阳市 110023)

RESEARCH ON L_2 ROBUST CONTROL FOR PERMANENT MAGNET LINEAR SERVO MOTOR

GUO Qing-ding, LAN Yi-peng

(Electric Engineering College, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: This paper presented L_2 robust control for permanent magnet linear motor servo system. First, on the basis of the motor nonlinear mathematical model, an error system dynamic equation was set up in order to reach accurate track of the motor speed and current. Second, the track and disturbance restraint was summed up L_2 control question. Furthermore, two theories used in describing L_2 robust controllers were obtained by defining proper storage function. Finally, these L_2 robust control laws which met disturbance restraint and asymptotical stability were proved. The results of simulation test indicate that the linear servo system with L_2 robust controllers can guarantee a good disturbance restraint as well as the tracks of input signal, and can finally satisfy control requirement for high-performance linear servo system.

KEY WORDS: Linear motor; L_2 -Gain; Robust control; Disturbance restraint; Asymptotical stability

摘要: 对永磁直线电机伺服系统提出非线性 L_2 鲁棒控制。给出电机的非线性数学模型,在此基础上,为实现对速度和电流的准确跟踪,建立了误差系统的动态模型;将跟踪和干扰抑制归结为 L_2 设计问题,通过构造适当的存储函数得到描述系统 L_2 控制器的两个定理;证明定理给出的控制器能满足干扰抑制和系统的渐进稳定。仿真结果表明,用该方法设计的系统能很好的抑制扰动和跟踪给定,满足对高性能永磁直线伺服系统控制的要求。

关键词: 直线电机; L_2 增益; 鲁棒控制; 干扰抑制; 渐进稳定

1 引言

永磁直线伺服电机驱动的高性能数控机床,要

基金项目: 国家自然科学基金项目(50075057); 辽宁省教育厅科学研究计划资助(2004D040)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50075057)。

求系统能够尽快抑制扰动和对输入指令准确跟踪,这已成为直线伺服系统设计的关键^[1-3]。

由于永磁直线电机数学模型具有非线性特点,因此,象旋转式永磁电机非线性控制^[4-8]那样,对直线电机有针对性的引入非线性控制可以抑制扰动和实现对输入指令的准确跟踪。在这里,采用 L_2 增益设计方法^[9-10]使跟踪问题和干扰抑制问题同时得到解决。与常规的 PID 控制器比较,由于 PID 参数固定不变,当系统存在不确定性时性能下降,甚至无法正常工作,系统适应性差^[11]。而 L_2 鲁棒控制是用一个结构和参数固定不变的控制器,保证在不确定性对系统影响最严重的情况下,也能满足性能要求^[12],这是 L_2 鲁棒控制的突出特点。

设计永磁直线电机伺服系统的速度和电流 L_2 鲁棒控制器。为了实现对速度和电流的准确跟踪,建立速度和电流误差的动态模型。通过构造适当的存储函数得到描述系统 L_2 控制器的两个定理,进而,证明定理给出的控制器能满足干扰抑制和系统的渐进稳定。最后,对系统进行仿真研究验证设计的有效性。

2 问题的描述

2.1 永磁直线同步电动机 d 、 q 轴数学模型

假定 d 、 q 轴电感 $L_d = L_q = L$, 那么,永磁直线伺服电机的非线性数学模型可描述如下

电流方程

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L}i_d + \frac{\pi}{t}vi_q + \frac{1}{L}u_d \quad (1)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L}i_q - \frac{\pi}{t}vi_d - \frac{\pi y_f}{tL}v + \frac{1}{L}u_q \quad (2)$$

运动方程

$$\frac{dv}{dt} = \frac{K_f}{M} i_q - \frac{B}{M} v - \frac{F_L}{M} \quad (3)$$

其中, u_d, u_q 分别为 d 、 q 轴电压; i_d, i_q 分别为 d 、 q 轴电流; R_s 为定子相电阻; v 为直线电机运动速度; t 为极距; y_f 为定子基波磁势链过定子绕组的磁链; F_L 为负载阻力; M 为动子质量; B 为粘滞摩擦系数; K_f 为推力系数。式中存在速度和电流乘积的非线性耦合项。

2.2 L_2 控制问题的描述

为了实现对速度和电流的准确跟踪以及对干扰的抑制作如下定义:

定义 1 对速度误差和 d 、 q 轴电流误差描述为

$$e = v^* - v \quad (4)$$

$$e_q = i_q^* - i_q \quad (5)$$

$$e_d = i_d^* - i_d \quad (6)$$

其中, v^*, i_d^*, i_q^* 分别为速度的给定量和 d 、 q 轴电流的给定量。

定义 2 速度误差和 d 、 q 轴电流误差的动态描述为

$$\dot{e} = \dot{v}^* - \dot{v} \quad (7)$$

$$\dot{e}_q = \dot{i}_q^* - \dot{i}_q \quad (8)$$

$$\dot{e}_d = \dot{i}_d^* - \dot{i}_d \quad (9)$$

其中, $\dot{v}^*, \dot{i}_d^*, \dot{i}_q^*$ 分别表示速度给定量的导数和 d 、 q 轴电流给定量的导数。

定义 3 干扰抑制的评价信号为

$$Z = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{p_1 e}{p_2 e_q} \\ p_3 e_d \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, $p_1, p_2, p_3 > 0$ 均为加权系数。

这样, L_2 鲁棒控制器的设计问题可描述为: 对给定的控制对象(1)~(3)、(10)求反馈控制律使得闭环系统满足:

(1) 当干扰 $F_L = 0$ 时, 对任意初始状态系统渐近稳定。

即 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} e_q(t) = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} e_d(t) = 0$ 。

(2) 当干扰 $F_L \neq 0$ 时, 对于任意的扰动信号, 闭环系统具有扰动抑制性能, 即

$$\int_0^T \|Z(t)\|^2 dt \leq g^2 \int_0^T \|F_L(t)\|^2 dt \quad (11)$$

式中 $T > 0$ 为有限时间, $g > 0$ 为给定的干扰抑制度。

3 控制律推导

定义 4 对系统(1)~(3)、(10)定义供给率为

$$s(F_L, z) = g^2 \|F_L\|^2 - \|z\|^2 \quad (12)$$

如果系统对上述供给率是耗散的, 那么就存在正定函数 $V(x)$, 使得

$$\dot{V} \leq g^2 \|F_L\|^2 - \|z\|^2 \quad (13)$$

其中, $V(x)$ 为存储函数。从而将耗散性与 L_2 增益约束条件联系起来。

现在借鉴递推设计^[13-15] (backstepping) 求系统的 L_2 鲁棒控制器。

以式(4)的 e 为状态变量, 构成子系统, 方程为

$$\dot{e} = -\frac{dv}{dt} = \frac{B}{M} v + \frac{F_L}{M} - \frac{K_f}{M} i_q \quad (14)$$

为使速度跟踪误差 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$, 假定 i_q 为虚拟控制

函数构造子系统的存储函数。

定理 1 对子系统式(14), 有

$$i_q = \frac{M}{K_f} (K_1 e + p_1^2 e + \frac{1}{4g_1^2 M^2} e + \frac{B}{M} v) \quad (15)$$

其中, $K_1 > 0$ 为给定的增益系数, $g_1 > 0$ 为给定的干扰抑制度。式(15)是该子系统的 L_2 控制器。

证明: (1) 先证明式(15)满足耗散不等式。

构造子系统的存储函数 $V_1 = \frac{1}{2} e^2$

V_1 沿系统(14)的轨迹对时间的微分

$$\dot{V}_1 = e \frac{de}{dt} = e \left(\frac{B}{M} v + \frac{F_L}{M} - \frac{K_f}{M} i_q \right)$$

令 $H = \dot{V}_1 + \|Z_1\|^2 - g_1^2 \|F_L\|^2$, 并利用柯西不等式:

$|X^T Y| \leq \|X\| \cdot \|Y\|$, 则

$$\begin{aligned} H &= \frac{B}{M} e v + \frac{1}{M} e F_L - \frac{K_f}{M} e i_q + p_1^2 \|e\|^2 - g_1^2 \|F_L\|^2 \leq \\ &= -(g_1 \|F_L\| - \frac{1}{2g_1 M} \|e\|)^2 + \frac{1}{4g_1^2 M^2} \|e\|^2 + p_1^2 \|e\|^2 - \\ &= \frac{K_f}{M} e i_q + \frac{B}{M} e v = -(g_1 \|F_L\| - \frac{1}{2g_1 M} \|e\|)^2 - \\ &= e \left(\frac{K_f}{M} i_q - \frac{B}{M} v - p_1^2 e - \frac{1}{4g_1^2 M^2} e \right) = \\ &= -(g_1 \|F_L\| - \frac{1}{2g_1 M} \|e\|)^2 - K_1 e^2 < 0 \end{aligned}$$

令 $\frac{K_f}{M} i_q - \frac{B}{M} v - p_1^2 e - \frac{1}{4g_1^2 M^2} e = K_1 e$

$K_1 > 0$ 为给定的增益系数。

则

$$i_q = \frac{M}{K_f} (K_1 e + p_1^2 e + \frac{1}{4g_1^2 M^2} e + \frac{B}{M} v)$$

(2) 再证明控制律与系统 (14) 组成的闭环系统在原点渐进稳定。

当 $F_L = 0$ 时, 将 i_q 代入 \dot{V} 得到

$$\dot{V} = \frac{B}{M} e v + \frac{1}{M} e F_L - \frac{K_f}{M} \frac{M}{K_f} e (K_1 e + p_1^2 e + \frac{1}{4g_1^2 M^2} e + \frac{B}{M} v) = -(K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4g_1^2 M^2}) e^2 < 0$$

当 $\|e\| \rightarrow \infty$ 时, $V_1 \rightarrow \infty$, V_1 径向无界。

即子系统全局渐进稳定。

(证毕)

按照矢量控制原理选择参考电流

$$\begin{cases} i_q^* = \frac{M}{K_f} (K_1 e + p_1^2 e + \frac{1}{4g_1^2 M^2} e + \frac{B}{M} v) \\ i_d^* = 0 \end{cases}$$

再以电流跟踪误差 e_q 和 e_d 为状态变量, 由误差的动态方程 (8)、(9) 得到

$$\begin{aligned} \frac{de_q}{dt} &= \frac{di_q^*}{dt} - \frac{di_q}{dt} = \frac{M}{K_f} [(K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4g_1^2 M^2}) \frac{de}{dt} + \\ &\quad \frac{B}{M} \frac{dv}{dt}] + \frac{R_s}{L} i_q + \frac{\pi}{t} v i_d + \frac{\pi y_f}{tL} v - \frac{1}{L} u_q = \\ &\quad \frac{M}{K_f} (K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4g_1^2 M^2}) (\frac{B}{M} v + \frac{F_L}{M} - \frac{K_f}{M} i_q) + \\ &\quad \frac{B}{K_f} (\frac{K_f}{M} i_q - \frac{B}{M} v - \frac{F_L}{M}) + \frac{R_s}{L} i_q + \frac{\pi}{t} v i_d + \frac{\pi y_f}{tL} v - \\ &\quad \frac{1}{L} u_q = [\frac{B}{K_f} (K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4g_1^2 M^2} - \frac{B}{M}) + \frac{\pi y_f}{tL}] v + \\ &\quad (\frac{B}{M} + \frac{R_s}{L} - K_1 - p_1^2 - \frac{1}{4g_1^2 M^2}) i_q + \frac{\pi}{t} v i_d + \\ &\quad [\frac{1}{K_f} (K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4g_1^2 M^2} - \frac{B}{M})] F_L - \frac{1}{L} u_q \end{aligned} \quad (16)$$

$$\frac{de_d}{dt} = \frac{R_s}{L} i_d - \frac{\pi}{t} v i_q - \frac{1}{L} u_d \quad (17)$$

定理 2 对系统(16)、(17)

$$\begin{aligned} u_q &= L \{ [\frac{B}{K_f} (K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4g_1^2 M^2} - \frac{B}{M}) + \frac{\pi y_f}{tL}] v + \\ &\quad (\frac{B}{M} + \frac{R_s}{L} - K_1 - p_1^2 - \frac{1}{4g_1^2 M^2}) i_q + \\ &\quad \frac{\pi}{t} v i_d + K_2 e_q + p_2^2 e_q + \end{aligned}$$

$$\frac{1}{4g_2^2 K_f^2} (K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4g_1^2 M^2} - \frac{B}{M})^2 e_q \} \quad (18)$$

$$u_d = R_s i_d - \frac{\pi}{t} L v i_q + L p_3^2 e_d + L K_3 e_d \quad (19)$$

其中, $K_2 > 0$, $K_3 > 0$ 为给定的增益系数, $g_2 > 0$ 为给定的干扰抑制度。式(18)、(19)是该子系统的 L_2 控制器。

证明: (1) 先证明式(18)、(19)满足耗散不等式。

为保证系统整体满足耗散不等式, 构造系统的存储函数

$$V_2 = \frac{1}{2} e^2 + \frac{1}{2} e_q^2 + \frac{1}{2} e_d^2$$

$$\dot{V}_2 = e \frac{de}{dt} + e_q \frac{de_q}{dt} + e_d \frac{de_d}{dt}$$

上式两边加上 $\|Z\|^2 - g^2 \|F_L\|^2$, 并用式(10)代入右端

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 + \|Z\|^2 - g^2 \|F_L\|^2 &= e \frac{de}{dt} + \|Z_1\|^2 - g_1^2 \|F_L\|^2 + \\ &\quad e_q \frac{de_q}{dt} + e_d \frac{de_d}{dt} + \|Z_2\|^2 - g_2^2 \|F_L\|^2 \leq -(g_1 \|F_L\| - \\ &\quad \frac{1}{2g_1 M} \|e\|)^2 - K_1 e^2 + e_q \{ [\frac{B}{K_f} (K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4g_1^2 M^2} - \\ &\quad \frac{B}{M}) + \frac{\pi y_f}{tL}] v + (\frac{B}{M} + \frac{R_s}{L} - K_1 - p_1^2 - \frac{1}{4g_1^2 M^2}) i_q + \\ &\quad \frac{\pi}{t} v i_d - \frac{1}{L} u_q + p_2^2 e_q \} + \frac{1}{K_f} (K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4g_1^2 M^2} - \\ &\quad \frac{B}{M}) e_q F_L - g_2^2 \|F_L\|^2 + e_d (\frac{R_s}{L} i_d - \frac{\pi}{t} v i_q - \frac{1}{L} u_d) + \\ &\quad p_3^2 e_d^2 \leq -(g_1 \|F_L\| - \frac{1}{2g_1 M} \|e\|)^2 - K_1 e^2 - [g_2 \|F_L\| - \\ &\quad \frac{1}{2g_2 K_f} (K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4g_1^2 M^2} - \frac{B}{M}) \|e_q\|]^2 - \\ &\quad e_q \{ [\frac{B}{K_f} (\frac{B}{M} - K_1 - p_1^2 - \frac{1}{4g_1^2 M^2}) - \frac{\pi y_f}{tL}] v + \\ &\quad (K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4g_1^2 M^2} - \frac{B}{M} - \frac{R_s}{L}) i_q - \frac{p}{t} v i_d + \frac{1}{L} u_q - \\ &\quad p_2^2 e_q - \frac{1}{4g_2^2 K_f^2} (K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4g_1^2 M^2} - \frac{B}{M})^2 e_q \} - \\ &\quad e_d (\frac{1}{L} u_d + \frac{\pi}{t} v i_q - \frac{R_s}{L} i_d - p_3^2 e_d) = -(g_1 \|F_L\| - \\ &\quad \frac{1}{2g_1 M} \|e\|)^2 - K_1 e^2 - [g_2 \|F_L\| - \frac{1}{2g_2 K_f} \\ &\quad (K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4g_1^2 M^2} - \frac{B}{M}) \|e_q\|]^2 - K_2 e_q^2 - K_3 e_d^2 < 0 \end{aligned}$$

令

$$\begin{aligned} & \left[\frac{B}{K_f} \left(\frac{B}{M} - K_1 - p_1^2 - \frac{1}{4g_1^2 M^2} \right) - \frac{\pi y_f}{tL} \right] v + (K_1 + p_1^2 + \\ & \frac{1}{4g_1^2 M^2} - \frac{B}{M} - \frac{R_s}{L}) i_q - \frac{\pi}{t} v i_d + \frac{1}{L} u_q - p_2^2 e_q - \\ & \frac{1}{4g_2^2 K_f^2} (K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4g_1^2 M^2} - \frac{B}{M})^2 e_q = K_2 e_q \end{aligned}$$

$K_2 > 0$ 为给定的增益系数。从而得到式(18)的 u_q 。

再令

$$\frac{1}{L} u_d + \frac{\pi}{t} v i_q - \frac{R_s}{L} i_d - p_3^2 e_d = K_3 e_d$$

$K_3 > 0$ 为给定的增益系数。得到式(19)的 u_d 。

(2) 再证明稳定性。

在 $F_L = 0$ 时,

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & e \frac{de}{dt} + e_q \frac{de_q}{dt} + e_d \frac{de_d}{dt} = -(K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4g_1^2 M^2}) e^2 - \\ & [K_2 + p_2^2 + \frac{1}{4g_2^2 K_f^2} (K_1 + p_1^2 + \frac{1}{4g_1^2 M^2} - \frac{B}{M})^2] e_q^2 - \\ & (K_3 + p_3^2) e_d^2 < 0 \end{aligned}$$

其中 $K_1 > 0$, $K_2 > 0$, $K_3 > 0$ 。

当 $\begin{bmatrix} e \\ e_q \\ e_d \end{bmatrix} \rightarrow \infty$ 时, $V_2 \rightarrow \infty$, V_2 径向无界。

故系统全局渐进稳定。

(证毕)

4 仿真研究

(1) 仿真参数

电机参数: $M=11\text{kg}$, $B=1.1\text{N}\cdot\text{s/m}$, $K_f=25\text{N/A}$, $L_q=9.0\text{mH}$, $R_s=1.2\Omega$, $t=36\text{mm}$, $y_f=0.00144\text{Wb}$ 。

控制器参数: 控制器增益 $k_1=100$, $k_2=20$, $k_3=6000$, K_1 、 K_2 减小有利于 i_q , u_q 减小, 限制过大的控制代价。 K_3 的变化和 u_d 对应, 同时, 它的增加有利于减小 d 轴的误差 e_d 。加权系数: $p_1=0.1$, $p_2=0.1$, $p_3=0.1$, 对给定的干扰信号, p_1 , p_2 , p_3 越小, Z 的范数越小, 跟踪误差越小。扰动抑制度 $g_1=0.1$, $g_2=0.1$, 它们的减小可以使系统的干扰抑制能力增强, 但是, 如果太小, 又会使控制量过大。

(2) 仿真结果与分析

图 1 是阶跃速度信号输入时的 d, q 轴电流曲线。其中与时间 t 轴重合的直线为 d 轴电流 i_d , 另一线为 q 轴电流 i_q 。在 $t=0.4\text{s}$ 时突加 30N 的阶跃扰

动, 在 $t=0.6\text{s}$ 时卸去扰动。由图可知, 当有扰动时, q 轴电流 i_q 迅速增加以平衡扰动, d 轴电流始终维持在 $i_d=0$, 当卸去扰动后 q 轴电流回到 $i_q=0$ 。显然电流具有快速的跟踪性能。

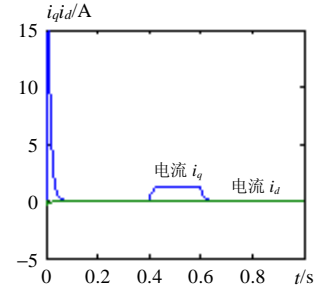


图 1 d, q 轴电流曲线

Fig. 1 d, q axis current curve

图 2 为速度响应曲线。在仿真曲线上, 当有扰动作用时, 闭环系统具有扰动抑制性能; 当扰动消失时, 速度恢复到给定值。系统不仅能够良好的跟踪参考信号, 而且具有渐进稳定的特性。

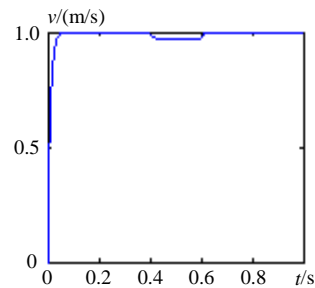


图 2 速度响应曲线

Fig. 2 The response of speed

L_2 控制器以固定结构和参数满足设计要求

(1) (2), 而不必象 PID 控制那样需要改变控制器的参数^[11], 具有更强的适应性。

总之, 使用本文设计的非线性 L_2 控制器, 系统具有良好的抑制扰动和跟踪给定的效果, 同时也实现了速度与电流的完全解耦。

5 结论

针对永磁直线电机伺服系统数学模型非线性特点设计了 L_2 鲁棒控制器。通过构造适当的存储函数得到描述系统 L_2 控制器的两个定理; 证明定理给出的控制器能满足干扰抑制和系统的渐进稳定。仿真结果表明, 用该方法设计的系统能很好的跟踪给定和抑制扰动, 满足对高性能永磁直线伺服系统控制的要求。

参考文献

- [1] Braembussche P V, Swevers J, Brussel H V et al. Accurate tracking

- control of linear synchronous motor machine tool axes [J]. *Mechatronics*, 1996, 6(5): 507-521.
- [2] Tan K K, Huang S N, Lee T H. Robust adaptive numerical compensation for friction and force ripple in permanent-magnet linear motors[J]. *IEEE Transaction on magnetic*, 2002, 38(1): 221-228.
- [3] 蓝益鹏, 郭庆鼎. 永磁直线伺服系统 H_∞ 鲁棒控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2004, 26(3): 281-283.
- Lan Yipeng, Guo Qingding. Permanent magnet linear servo system H_∞ robust control[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2004, 26(3): 281-283.
- [4] 张涛, 蒋静坪, 张国宏. 交流永磁同步电机伺服系统的线性化控制[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 40-43.
- Zhang Tao, Jiang Jingping, Zhang Guohong. Linearizing control for AC PMSM servo system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(6): 40-43.
- [5] 王江, 王家军, 许镇琳. 基于逆变器死区特性的永磁同步电动机系统的自适应变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 37-41.
- Wang Jiang, Wang Jiajun, Xu Zhenlin. Adaptive variable structure control of PMSM system based on inverter dead-time[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(8): 37-41.
- [6] Solsona J, Valla M I, Muravchik C. Nonlinear control of a permanent magnet synchronous motor with disturbance torque estimation [J]. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 2000, 15(2): 163-168.
- [7] Bologani S, Tubiana L, Zigliotto M. Extended Kalman filter tuning in sensorless PMSM drive[J]. *IEEE Transaction on Industry Application*, 2003, 39(6): 1741-1747.
- [8] Baik I, Kim K, Youn M. Robust nonlinear speed control of PM synchronous motor using boundary layer integral sliding mode control technique[J]. *IEEE Transaction on control system technology*, 2000, 8(1): 47-54.
- [9] Arjan van der aschaft. L_2 -Gain and passivity techniques in nonlinear control[M]. London: Springer-Verlag London Limited, 2000.
- [10] 林飞, 张春朋, 宋文超, 等. 感应电机的 L_2 增益鲁棒控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 117-119.
- Lin Fei, Zhang Chunpeng, Song Wenchao *et al.* The robust control of induction motor based on L_2 -gain[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(9): 117-119.
- [11] 孙强, 程明, 周鄂, 等. 新型双凸极永磁电机调速系统的变参数 PI 控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 117-122.
- Sun Qiang, Cheng Ming, Zhou E *et al.* Variable PI control of a novel doubly salient permanent magnet motor drive[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(6): 117-122.
- [12] Doyle J. Glover K, Khargonekar P *et al.* State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems[J]. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 1989, 34(8): 831-847.
- [13] 王江, 李韬, 曾启明. 基于神经网络的同步电动机励磁反步控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 140-145.
- Wang Jiang, Li Tao, Zeng Qiming. Backstepping control of synchronous generator based on the neural networks[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(12): 140-145.
- [14] Kristic M, Kanellakopoulos I, Kokotovic P. Nonlinear and adaptive control design[M]. U.S.A. New Jersey: Prentice Hall, 1995.
- [15] Rahman M A, Vilathgamuwa M, Uddin M N *et al.* Nonlinear control of interior permanent-magnet synchronous motor[J]. *IEEE Transaction on Industry Application*, 2003, 39(2): 408-416.

收稿日期: 2005-08-01。

作者简介:

郭庆鼎 (1939-), 男, 辽宁省盖县人, 教授, 博士生导师, 从事交流伺服、数控技术、鲁棒控制、智能控制等研究;

蓝益鹏 (1962-), 男, 陕西省华县人, 副教授, 博士研究生, 从事交流伺服、鲁棒控制研究。