

文章编号: 1001-0920(2006)06-0705-04

永磁直线电机伺服系统非线性鲁棒控制器设计

蓝益鹏, 郭庆鼎

(沈阳工业大学 电气工程学院, 沈阳 110023)

摘要: 针对永磁直线电机伺服系统数学模型非线性特点设计 L_2 鲁棒控制器, 将跟踪和扰动抑制问题归结为 L_2 控制问题. 通过构造适当的存储函数得到描述系统 L_2 控制器的定理; 证明定理给出的控制器能满足干扰抑制和系统的渐近稳定. 仿真结果表明, 用该方法设计的系统能很好地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: 直线伺服; L_2 增益; 存储函数; 干扰抑制; 渐近稳定

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Nonlinear Robust Controller Design for Permanent Magnet Linear Servo Motor System

LAN Yi-peng, GUO Qing-ding

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China Correspondent: LAN Yipeng, E-mail: lanyipeng@163.com)

Abstract: L_2 robust controllers are designed for permanent magnet linear servo motor nonlinear model. The tracking and disturbance attenuation problem is transformed into an L_2 control problem. A theorem describing L_2 robust controllers is given by a properly defined storage function. Furthermore, the L_2 robust control laws are shown to achieve the disturbance attenuation and asymptotic stability. Simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Key words: Linear servo system; L_2 gain; Storage function; Disturbance attenuation; Asymptotic stability

1 引言

在永磁直线伺服电机驱动的高性能数控机床中, 要求系统能够尽快消除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性问题.

对这一问题已有多方面的研究, 如文献[1, 2]对直线伺服系统的跟踪问题进行了研究, 文献[3]对非线性摩擦力和推力纹波进行自适应补偿控制. 文献[4]对伺服系统进行了非线性控制的研究. 本文提出的应用非线性控制中的 L_2 增益设计方法使准确跟踪和干扰抑制问题同时得到解决.

本文根据永磁直线电机数学模型非线性特点设计 L_2 鲁棒控制器. 首先, 为了实现对速度和电流

的准确跟踪, 通过递推^[5]建立速度和电流误差的动态模型; 其次, 通过构造适当的存储函数得到描述系统 L_2 控制器的定理, 进而证明定理给出的控制器能满足干扰抑制和系统的渐近稳定; 最后, 对系统进行仿真研究验证了设计的有效性.

2 问题的描述

2.1 永磁直线伺服电动机 d 轴、 q 轴数学模型

假定 d 轴和 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

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L}i_d + \frac{\pi}{\tau}v i_q + \frac{1}{L}u_d, \quad (1)$$

收稿日期: 2005-05-26; 修回日期: 2005-11-02

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项目(2004D040).

作者简介: 蓝益鹏(1962—), 男, 陕西华县人, 副教授, 博士生, 从事数控技术、鲁棒控制等研究; 郭庆鼎(1939—), 男, 辽宁盖县人, 教授, 博士生导师, 从事交流伺服、数控技术等研究.

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L}i_q - \frac{\pi}{\tau}v i_d - \frac{\pi\Psi_f}{\tau}v + \frac{1}{L}u_q \quad (2)$$

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 和 u_q 分别为 d 轴和 q 轴电压; i_d 和 i_q 分别为 d 轴和 q 轴电流; R_s 为定子相电阻; v 为直线电机运动速度; τ 为极距; Ψ_f 为定子基波磁势链过动子绕组的磁链; 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 在式(1)~(3)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 对速度误差及 d 轴和 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^* 为速度的给定量, i_d^* , i_q^* 分别为 d 轴和 q 轴电流的给定量

速度误差及 d 轴和 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}^* 为速度给定量的导数, \dot{i}_d^* , \dot{i}_q^* 分别为 d 轴和 q 轴电流给定量的导数

定义2 干扰抑制的评价信号为

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

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)和(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

$$\lim_t e(t) = 0, \lim_t e_q(t) = 0, \lim_t e_d(t) = 0$$

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

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

式中: $T > 0$ 为有限时间, $\gamma > 0$ 为给定的干扰抑制程度

3 控制律推导

定义3 对系统(1)~(3)和(10), 定义 \mathcal{Y} 供给率为

$$s(F_L, z) = \frac{1}{2}(\mathcal{Y}^2 F_L^2 - z^2). \quad (12)$$

如果系统对上述供给率是耗散的, 那么就存在正定函数 V , 使得

$$\dot{V} \leq s(F_L, z) \quad (13)$$

成立 V 为存储函数 从而将耗散性与 L_2 增益约束条件联系起来 如果系统是 \mathcal{Y} 耗散的, 那么系统的 L_2 增益小于或等于 \mathcal{Y}

下面用递推设计^[5](backstepping) 求系统的 L_2 鲁棒控制器

定理1 对系统(1)~(3)和(10), 有

$$i_q = \frac{M}{K_f}(K_1 e + \frac{p_1^2}{2} e + \frac{1}{2\mathcal{Y}_1^2 M^2} e + \frac{B}{M} v), \quad (14)$$

$$u_q = L \left\{ \left[\frac{B}{K_f} \left(K_1 + \frac{p_1^2}{2} + \frac{1}{2\mathcal{Y}_1^2 M^2} - \frac{B}{M} \right) + \frac{\pi\Psi_f}{\tau} \right] v + \left(\frac{B}{M} + \frac{R_s}{L} - K_1 - \frac{p_1^2}{2} - \frac{1}{2\mathcal{Y}_1^2 M^2} \right) i_q + \frac{\pi}{\tau} v i_d + K_2 e_q + \frac{p_2^2}{2} e_q + \frac{1}{2\mathcal{Y}_2^2 K_f^2} \left(K_1 + \frac{p_1^2}{2} + \frac{1}{2\mathcal{Y}_1^2 M^2} - \frac{B}{M} \right)^2 e_q \right\}, \quad (15)$$

$$u_d = R_s i_d - \frac{\pi}{\tau} L v i_q + \frac{1}{2} L p_3^2 e_d + L K_3 e_d, \quad (16)$$

是该系统的 L_2 控制器 其中: $K_1 > 0, K_2 > 0, K_3 > 0$ 为给定的增益系数; $\mathcal{Y}_1 > 0, \mathcal{Y}_2 > 0$ 为给定的干扰抑制制度

证明 (1) 证明式(14) 成立.

先证明式(14) 满足耗散不等式

以式(4) 的 e 为状态变量构成子系统, 方程为

$$\dot{e} = -\frac{dv}{dt} = \frac{B}{M}v + \frac{F_L}{M} - \frac{K_f}{M}i_q \quad (17)$$

为使速度跟踪误差 $\lim_t e(t) = 0$, 假定 i_q 为虚拟控制

函数, 构造子系统的存储函数为 $V_1 = \frac{1}{2}e^2$.

V_1 沿系统(17) 的轨迹对时间的微分为

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

令

$$H = \dot{V}_1 + \frac{1}{2}(Z_1^2 - \mathcal{Y}_1^2 F_L^2),$$

并利用柯西不等式

$$|x^T Y| \leq \|x\| \cdot \|Y\|,$$

则

$$H = \frac{B}{M}ev + \frac{1}{M}eF_L - \frac{K_f}{M}ei_q + \frac{p_1^2}{2}e^2 - \frac{\mathcal{Y}_1^2}{2}F_L^2$$

$$\begin{aligned}
 & - \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \gamma_1 F_L - \frac{1}{\sqrt{2} \gamma M} e \right)^2 + \\
 & \frac{1}{2 \gamma M^2} e^2 + \frac{p_1^2}{2} e^2 - \\
 & \frac{K_f}{M} e i_q + \frac{B}{M} e v = \\
 & - \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \gamma_1 F_L - \frac{1}{\sqrt{2} \gamma M} e \right)^2 - \\
 & e \left(\frac{K_f}{M} i_q - \frac{B}{M} v - \frac{p_1^2}{2} e - \frac{1}{2 \gamma M^2} e \right) = \\
 & - \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \gamma_1 F_L - \frac{1}{\sqrt{2} \gamma M} e \right)^2 - \\
 & K_1 e^2 < 0
 \end{aligned}$$

令

$$\frac{K_f}{M} i_q - \frac{B}{M} v - \frac{p_1^2}{2} e - \frac{1}{2 \gamma M^2} e = K_1 e,$$

$K_1 > 0$ 为给定的增益系数 于是

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

再证明控制律与子系统(17) 组成的闭环系统
在原点渐近稳定

当 $F_L = 0$ 时, 将 i_q 代入 V_1 得

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_1 &= \frac{B}{M} e v + \frac{1}{M} e F_L - \frac{K_f M}{M K_f} e (K_1 e + \\
 & \frac{p_1^2}{2} e + \frac{1}{2 \gamma M^2} e + \frac{B}{M} v) = \\
 & - (K_1 + \frac{p_1^2}{2} + \frac{1}{2 \gamma M^2}) e^2 < 0
 \end{aligned}$$

当 e 时, V_1 , V_1 径向无界 即子系统全局渐近稳定

(2) 证明式(15) 和(16) 成立.

先证明式(15) 和(16) 满足耗散不等式

按照矢量控制原理选择参考电流

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

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) 和(9) 得

$$\begin{aligned}
 \frac{de_q}{dt} &= \frac{di_q^*}{dt} - \frac{di_q}{dt} = \\
 \frac{M}{K_f} & \left[(K_1 + \frac{p_1^2}{2} + \frac{1}{2 \gamma M^2}) \frac{de}{dt} + \frac{B}{M} \frac{dv}{dt} \right] + \\
 \frac{R_s}{L} i_q &+ \frac{\pi}{\tau} v i_d + \frac{\pi \psi_f}{\tau} v - \frac{1}{L} u_q = \\
 \frac{M}{K_f} & (K_1 + \frac{p_1^2}{2} + \frac{1}{2 \gamma M^2}) \frac{B}{M} v + \frac{E_L}{M} - \frac{K_f}{M} i_q + \\
 \frac{B}{K_f M} & (K_f i_q - \frac{B}{M} v - \frac{E_L}{M}) + \\
 \frac{R_s}{L} i_q &+ \frac{\pi}{\tau} v i_d + \frac{\pi \psi_f}{\tau} v - \frac{1}{L} u_q =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{B}{K_f} (K_1 + \frac{p_1^2}{2} + \frac{1}{2 \gamma M^2} - \frac{B}{M}) + \frac{\pi \psi_f}{\tau} \right] v + \\
 & \left(\frac{B}{M} + \frac{R_s}{L} - K_1 - \frac{p_1^2}{2} - \frac{1}{2 \gamma M^2} \right) i_q + \\
 & \frac{\pi}{\tau} v i_d + \left[\frac{1}{K_f} (K_1 + \frac{p_1^2}{2} + \right. \\
 & \left. \frac{1}{2 \gamma M^2} - \frac{B}{M}) \right] F_L - \frac{1}{L} u_q, \tag{18}
 \end{aligned}$$

$$\frac{de_d}{dt} = \frac{R_s}{L} i_d - \frac{\pi}{\tau} v i_q - \frac{1}{L} u_d \tag{19}$$

为保证系统整体满足耗散不等式, 构造系统的存储函数

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

则

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

上式两边加上 $\frac{1}{2} (Z^2 - \gamma^2 F_L^2)$, 并用式(10) 代入右端

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_2 &+ \frac{1}{2} (Z^2 - \gamma^2 F_L^2) = \\
 e \frac{de}{dt} &+ \frac{1}{2} (Z_1^2 - \gamma_1^2 F_L^2) + \\
 e_q \frac{de_q}{dt} &+ e_d \frac{de_d}{dt} + \frac{1}{2} (Z_2^2 - \gamma_2^2 F_L^2) = \\
 & - \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \gamma_1 F_L - \frac{1}{\sqrt{2} \gamma M} e \right)^2 - K_1 e^2 + \\
 e_q & \left[\frac{B}{K_f} (K_1 + \frac{p_1^2}{2} + \frac{1}{2 \gamma M^2} - \frac{B}{M}) + \frac{\pi \psi_f}{\tau} \right] v + \\
 \left(\frac{B}{M} + \frac{R_s}{L} - K_1 - \frac{p_1^2}{2} - \frac{1}{2 \gamma M^2} \right) & i_q + \\
 \frac{\pi}{\tau} v i_d - \frac{1}{L} u_q + \frac{p_2^2}{2} e_q & - \frac{\gamma_2^2}{2} F_L^2 + \\
 \frac{1}{K_f} (K_1 + \frac{p_1^2}{2} + \frac{1}{2 \gamma M^2} - \frac{B}{M}) & e_q F_L + \\
 e_d \left(\frac{R_s}{L} i_d - \frac{\pi}{\tau} v i_q - \frac{1}{L} u_d \right) &+ \frac{p_3^2}{2} e_d^2 \\
 & - \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \gamma_1 F_L - \frac{1}{\sqrt{2} \gamma M} e \right)^2 - K_1 e^2 - \\
 \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \gamma_2 F_L - \frac{1}{\sqrt{2} \gamma_2 K_f} (K_1 + \frac{p_2^2}{2} + \right. & \\
 \left. \frac{1}{2 \gamma M^2} - \frac{B}{M}) e_q \right]^2 - & \\
 e_q & \left[\frac{B}{K_f} \left(\frac{B}{M} - K_1 - \frac{p_1^2}{2} - \frac{1}{2 \gamma M^2} \right) - \right. \\
 \left. \frac{\pi \psi_f}{\tau} \right] v + (K_1 + \frac{p_1^2}{2} + \frac{1}{2 \gamma M^2} - \frac{B}{M} - & \\
 \frac{R_s}{L}) i_q - \frac{\pi}{\tau} v i_d + \frac{1}{L} u_q - \frac{p_2^2}{2} e_q - & \\
 \frac{1}{2 \gamma_2 K_f^2} (K_1 + \frac{p_1^2}{2} + \frac{1}{2 \gamma M^2} - \frac{B}{M})^2 e_q & -
 \end{aligned}$$

$$e_d \left(\frac{1}{L} u_d + \frac{\pi}{\tau} v_{i_q} - \frac{R_s}{L} i_d - \frac{p_3^2}{2} e_d \right) =$$

$$- \left(\sqrt{\frac{1}{2}} \gamma_1 F_L - \frac{1}{\sqrt{2}} \gamma_2 K_f e \right)^2 - K_1 e^2 -$$

$$\left[\frac{1}{\sqrt{2}} \gamma_2 F_L - \frac{1}{\sqrt{2}} \gamma_2 K_f \left(K_1 + \frac{p_1^2}{2} + \right. \right.$$

$$\left. \frac{1}{2\gamma_2^2 M^2} - \frac{B}{M} \right) e_q \left. \right]^2 - K_2 e_q^2 - K_3 e_d^2 < 0$$

令

$$\left[\frac{B}{K_f M} - K_1 - \frac{p_1^2}{2} - \frac{1}{2\gamma_2^2 M^2} \right] v +$$

$$\left(K_1 + \frac{p_1^2}{2} + \frac{1}{2\gamma_2^2 M^2} - \frac{B}{M} - \frac{R_s}{L} \right) i_q -$$

$$\frac{1}{2\gamma_2^2 K_f^2} \left(K_1 + \frac{p_1^2}{2} + \frac{1}{2\gamma_2^2 M^2} - \frac{B}{M} \right)^2 e_q -$$

$$\frac{\pi}{\tau} v_{i_d} + \frac{1}{L} u_q - \frac{p_2^2}{2} e_q = K_2 e_q,$$

$K_2 > 0$ 为给定的增益系数 从而得到式(15)的 u_q
再令

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

$K_3 > 0$ 为给定的增益系数 即得到式(16)的 u_d

再证明稳定性

当 $F_L = 0$ 时,有

$$V_2 = e \frac{de}{dt} + e_q \frac{de_q}{dt} + e_d \frac{de_d}{dt} =$$

$$- \left(K_1 + \frac{p_1^2}{2} + \frac{1}{2\gamma_2^2 M^2} \right) e^2 - \left[K_2 + \frac{p_2^2}{2} + \right.$$

$$\left. \frac{1}{2\gamma_2^2 K_f^2} \left(K_1 + \frac{p_1^2}{2} + \frac{1}{2\gamma_2^2 M^2} - \frac{B}{M} \right)^2 \right] e_q^2 -$$

$$\left(K_3 + \frac{p_3^2}{2} \right) e_d^2 < 0$$

其中: $K_1 > 0, K_2 > 0, K_3 > 0$

当 $\begin{bmatrix} e \\ e_q \\ e_d \end{bmatrix}$ 时, V_2 , V_2 径向无界 故系统

全局渐近稳定

4 仿真研究

取电机参数如下: $M = 10 \text{ kg}, B = 0.001 \text{ N} \cdot \text{s/m}, K_f = 37.4 \text{ N/A}, L_q = 0.01874 \text{ H}, R_s = 1.2 \text{ } \Omega, \tau = 0.036 \text{ m}, \Psi_f = 0.286 \text{ Wb}$, 控制器参数为: 控制器增益 $k_1 = 300, k_2 = 20, k_3 = 20$ 加权系数为: $p_1 = 0.4, p_2 = 0.4, p_3 = 0.4$ 扰动抑制制度为: $\gamma_1 = 0.02, \gamma_2 = 0.02$

为了研究系统的跟踪性能和对扰动的抑制能力,速度输入采用单位阶跃信号,扰动为幅值 50 N 的阶跃信号.为了清楚,给出的是局部放大图

图1是电流误差 e_q 和 e_d 曲线 在 $t = 0.4 \text{ s}$ 时突加 50 N 阶跃扰动,在 $t = 0.6 \text{ s}$ 时卸去扰动 由图可知,当有扰动时, d 轴和 q 轴电流误差很小且 $e_d = 0$, 系统具有扰动抑制作用 卸去扰动后系统具有较好的跟踪性能 图2为速度响应曲线,不仅速度能够良好地跟踪参考信号,而且具有渐近稳定的特性

采用本文设计的 L_2 控制器,系统将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

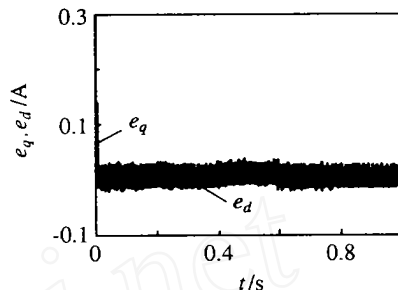


图1 d, q 轴电流误差曲线

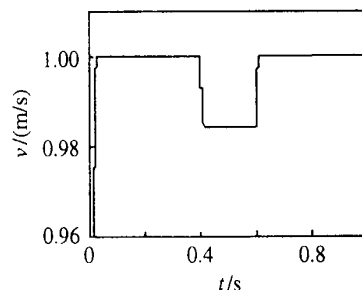


图2 速度响应曲线

5 结 语

本文基于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了描述系统 L_2 控制器的定理,并证明定理给出的控制器能满足干扰抑制和系统渐近稳定 仿真结果表明,用该方法设计的系统能很好地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(References)

[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] 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 Y P, Guo Q D. Permanent Magnet Linear Servo System H_∞ Robust Control [J] *J of Shenyang University of Technology*, 2004, 26(3): 281-283)

(下转第713页)

设计的基于立体视觉的移动机器人导航方法是可行的、有效的。该方法对于类似于校园干道的、路况较好的结构化水泥道路鲁棒性较好,且能有效避让静态和动态障碍物。但是,本文的道路检测方法目前只能识别阴影下的水泥道路,对于水迹及灰尘下的水泥道路不适合,只能作为可疑障碍物区域进行下一步检测。为了提高实时性,在以后的研究中将进一步完善检测算法。

参考文献(References)

- [1] Chow Y H, Ronald C. *Obstacle Avoidance of Legged Robot Without 3D Reconstruction of the Surroundings* [R]. Hong Kong: The Chinese University of Hong Kong, 1999: 2316-2321.
- [2] Murray D, Jennings C. *Stereo Vision Based Mapping and Navigation for Mobile Robots* [A]. *Proc of IEEE Conf on Robotics and Automation* [C]. Albuquerque, 1997: 1694-1699.
- [3] Mathies L, Brown E. *Machine Vision for Obstacle Detection and Ordnance Recognition* [A]. *Proc of Annual Meeting of the Association for Unmanned Vehicle Systems* [C]. Orlando, 1996: 1780-1785.
- [4] Xu Y C, Wang R B, Li B, et al. *A Vision Navigation Algorithm Based on Linear Lane Model* [A]. *Proc of IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000* [C]. New York, 2000: 240-245.
- [5] 李庆忠, 陈先华, 顾伟康, 等. 基于彩色立体视觉的障碍物快速检测方法[J]. *计算机科学*, 2003, 10(9): 72-75.
(Li Q Z, Chen X H, Gu W K. Fast Method for Obstacle Detection Based on Color Stereo Vision [J]. *Computer Science*, 2003, 10(9): 72-75.)
- [6] 李欣, 李宏东, 顾伟康, 等. 一种结构化道路环境中的视觉导航系统[J]. *浙江大学学报*, 2002, 11(6): 630-633.
(Li X, Li H D, Gu W K, et al. A Vision-based Navigation System in Structural Road Environment [J]. *J of Zhejiang University*, 2002, 11(6): 630-633.)
- [7] Badal S, Ravela S. *A Practical Obstacle Detection and Avoidance System* [A]. *Proc of the Second IEEE Workshop* [C]. Sarasota, 1994: 97-104.
- [8] Murray D, Little J. *Using Real-time Stereo Vision for Mobile Robot Navigation* [J]. *Autonomous Robots*, 2000, 8(2): 161-171.
- [9] 席志红, 原新, 许辉. 基于视觉的移动机器人实时避障和导航[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2002, 23(5): 106-107.
(Xi Z H, Yuan X, Xu H. Vision-based On-line Obstacle Avoiding and Navigation of Mobile Robot [J]. *J of Harbin Engineering University*, 2002, 23(5): 106-107.)
- [10] 崔巍, 强文义, 陈兴林. 双足机器人实时障碍检测视觉系统[J]. *控制与决策*, 2004, 19(1): 40-43.
(Cui W, Qiang W Y, Chen X L. Real Time Obstacle Detection System for Biped Robot [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(1): 40-43.)
- [11] 唐国维, 李井辉, 赵建民. 基于二维灰度图像的道路区域获取方法[J]. *计算机工程与应用*, 2003, 16(39): 230-232.
(Tang G W, Li J H, Zhao J M. Approach to Getting Road Area Based on 2D Gray Image [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2003, 16(39): 230-232.)
- [12] Zhang Z, Deriche R, Faugeras O, et al. *A Robust Technique for Matching Two Uncalibrated Images Through the Recovery of the Unknown Epipolar Geometry* [J]. *Artificial Intelligence J*, 1995, 78: 87-119.
- [13] 黄庆明, 张田文, 潘少静. 基于色彩学习的彩色图像分割方法[J]. *计算机研究与发展*, 1995, 32(9): 60-64.
(Huang Q M, Zhang T W, Pan S J. Color Image Segmentation Based on Color Learning [J]. *J of Computer Research and Development*, 1995, 32(9): 60-64.)

(上接第708页)

- [3] Tan K K, Huang S N, Lee T J. *Robust Adaptive Numerical Compensation for Friction and Force Ripple in Permanent Magnet Linear Motors* [J]. *IEEE Trans on Magnetic*, 2002, 38(1): 221-228.
- [4] Solsona J, Valla M I, Muravchik C. *Nonlinear Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor with Disturbance Torque Estimation* [J]. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2000, 15(2): 163-168.
- [5] Rahman M A, Vilathgamuwa M, Uddin M N, et al. *Nonlinear Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor* [J]. *IEEE Trans on Industry Application*, 2003, 39(2): 408-416.