

文章编号: 1001-0920(2009)05-0749-05

## 板球系统的参数自调整反步控制

王红睿, 田彦涛

(吉林大学 通信工程学院, 长春 130022)

**摘要:** 为解决系统初始值大范围变化, 且控制量受到饱和和特性约束的板球系统镇定控制问题, 提出一种自动调整待设计参数的反步控制方法. 分析了反步法偏差系统的平衡点特性; 说明了反步法待设计参数与偏差系统动态间的关系; 构造了 Mamdani 模糊逻辑, 以自动调整反步法待设计参数; 考虑了控制量受饱和和特性限制而引入的约束条件, 进而以遗传算法优化了模糊规则. 仿真和实验结果均表明, 自动调整待设计参数的反步控制方法降低了镇定控制中的位置偏差和位置超调.

**关键词:** 非线性控制; 反步法; 板球系统; 遗传算法

**中图分类号:** TP13 **文献标识码:** A

## Backstepping control with automatic tuning parameters for ball and plate system

WANG Hong-rui, TIAN Yan-tao

(School of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China. Correspondent: TIAN Yan-tao, E-mail: tianyt@jlu.edu.cn)

**Abstract:** Backstepping control method with automatic tuning design parameters is proposed in this paper. The method is employed for the stabilization control of ball and plate system when system initial conditions vary in a wide range and system controls are constrained by saturation characteristics. Equilibrium points of error system in the backstepping control are analyzed. Relationships between design parameters in the backstepping control and the dynamics of the error system are illustrated. Mamdani fuzzy logic is used to tune the design parameters automatically in the backstepping control. Rules of the fuzzy logic are optimized by using genetic algorithm under the restricted conditions introduced by control saturations. Simulation and experiment results show that the backstepping control method with automatic tuning design parameters can reduce position errors and position overshoots in stabilization control.

**Key words:** Nonlinear control; Backstepping design; Ball and plate system; Genetic algorithm

### 1 引言

板球系统是欠驱动的多变量非线性系统, 控制方法包括模糊控制<sup>[1,2]</sup>、滑模变结构<sup>[3]</sup>和切换控制<sup>[4]</sup>等. 上述方法或未考虑系统模型<sup>[1,2]</sup>, 或使用简化的系统模型<sup>[3,4]</sup>. 作者从较为完整的板球系统非线性模型出发, 设计了反步法控制器, 并提出了自动调整反步法待设计参数的方法. 反步法中的待设计参数对系统偏差的动态等有重要影响<sup>[5]</sup>. 大多数反步设计方法未考虑系统初始值、控制量饱和等因素的影响, 采用固定的待设计参数<sup>[6]</sup>. 当系统初始值大范围变化时, 固定的反步法待设计参数可能导致闭环系统性能下降甚至失稳. 如何随系统初始值变化自动

调整反步法待设计参数是一个重要问题.

本文以板球系统为对象, 分析了反步法待设计参数与系统偏差动态的关系, 提出了系统初始值大范围变化及控制量受饱和和约束条件下自动调整反步法待设计参数的方法, 并以遗传算法优化了自动调整反步法待设计参数的模糊逻辑. 最后以实验及仿真验证了上述方法的可行性.

### 2 板球系统的反步控制器设计

#### 2.1 系统模型

板球系统 BPVS-JLU II 采用位置控制和角度伺服控制的双环控制结构<sup>[2]</sup>, 见图 1. 选择平板  $x$  轴与水平面的倾斜角  $\alpha$ , 平板  $y$  轴与水平面的倾斜角

收稿日期: 2008-05-07; 修回日期: 2008-07-15.

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060183006).

作者简介: 王红睿(1980—), 男, 长春人, 博士生, 从事非线性控制、欠驱动控制系统的研究; 田彦涛(1958—), 男, 吉林四平人, 教授, 从事复杂系统建模、优化与控制的研究.

,球  $X$  方向上的位移  $x$  和球  $Y$  方向上的  $y$  为广义坐标. 由拉格朗日方法建立系统动力学方程组<sup>[2]</sup>

$$(m + I_b/r^2)\ddot{x} - m\dot{x}^2 - m\dot{y}\dot{\alpha} + mg\sin\alpha - f_x = 0, \quad (1a)$$

$$(m + I_b/r^2)\ddot{x} - m\dot{x}^2 - m\dot{y}\dot{\alpha} + mg\sin\alpha - f_x = 0, \quad (1b)$$

$$(I_p + I_b + mx^2)\ddot{\alpha} + 2mx\dot{\alpha} + mxy\ddot{\alpha} + m\dot{x}\dot{y} + m\dot{y}\dot{\alpha} + mgx\cos\alpha = \tau_x, \quad (1c)$$

$$(I_p + I_b + my^2)\ddot{\alpha} + 2my\dot{\alpha} + mxy\ddot{\alpha} + m\dot{x}\dot{y} + m\dot{y}\dot{\alpha} + mgy\cos\alpha = \tau_y. \quad (1d)$$

其中:  $m, r, I_b$  分别为球的质量、半径和转动惯量;  $f_x$  和  $f_y$  分别代表球在  $X$  及  $Y$  方向上受到的摩擦力;  $\tau_x$  和  $\tau_y$  分别为驱动平板绕其  $Y$  轴和  $X$  轴旋转的力矩. 参数详细说明见文献[2].

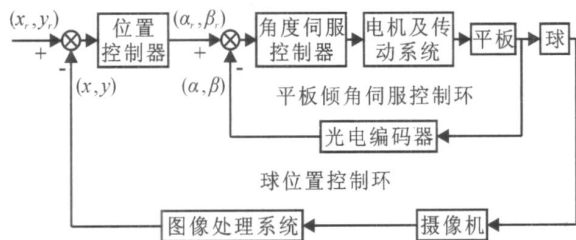


图1 板球系统工作原理图

## 2.2 X 方向反步法位置控制器设计

首先建立球在  $X$  方向运动的模型, 取状态变量

$$x_x = [x, \dot{x}]^T. \quad (2)$$

假设平板角速度  $\dot{\alpha}$ , 摩擦力  $f_x$ , 位移  $y$  是已知的, 其中摩擦力的观测参见文献[7]. 由式(1a) 建立描述球在  $X$  方向运动的状态方程

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{x1} \\ \dot{x}_{x2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{x2} \\ k(x_{x1}^2 + \ddot{y} + f_x/m) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -k \end{bmatrix} u_x. \quad (3)$$

其中:  $k$  为与球的半径、质量、转动惯量相关的常数,

$$k = mr^2 / (mr^2 + I_b); \quad (4)$$

$$u_x = g\sin\alpha. \quad (5)$$

下面给出反步法设计. 反步法是迭代设计方法, 它逐次地构造控制 Lyapunov 函数, 并将系统稳定性和状态变换联系起来<sup>[5]</sup>. 首先引入偏差变量

$$\begin{cases} z_{x1} = x_{x1} - x_d, \\ z_{x2} = x_{x2} - \dot{x}_d. \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $x_d$  为待跟踪的给定信号,  $x_{x1}$  为待设计虚拟反馈函数,  $x_d$  及其一阶、二阶对时间的导数都是已知、连续、有界的.

### 1) 反步法设计步骤 1

偏差  $z_{x1}$  对时间的导数为

$$\dot{z}_{x1} = z_{x2} + \dot{x}_{x1} - \dot{x}_d. \quad (7)$$

选取控制 Lyapunov 函数  $V_1$  及虚拟反馈函数  $x_1$  为

$$V_1 = z_{x1}^2/2, \quad (8)$$

$$x_1 = -c_{x1}z_{x1} + \dot{x}_d. \quad (9)$$

其中:  $c_{x1}$  为反步法待设计参数,  $c_{x1} > 0$ . 由式(7) 和(9), 有

$$\dot{z}_{x1} = -c_{x1}z_{x1} + z_{x2}. \quad (10)$$

控制 Lyapunov 函数  $V_1$  的时间导数为

$$\dot{V}_1 = -c_{x1}z_{x1}^2 + z_{x1}z_{x2}. \quad (11)$$

为使系统(10) 具有渐近稳定的特性, 同时保证  $V_1$  对时间的导数是半负定的, 继续反步设计.

### 2) 反步法设计步骤 2

由式(10) 得到虚拟反馈函数  $x_1$  对时间的导数

$$\dot{x}_1 = c_{x1}^2z_{x1} - c_{x1}z_{x2} + \ddot{x}_d. \quad (12)$$

偏差  $z_{x2}$  对时间的导数为

$$\dot{z}_{x2} = \dot{x}_{x2} - \dot{x}_1. \quad (13)$$

由式(3) 和(12), 有

$$\begin{aligned} \dot{z}_{x2} &= k(x_{x1}^2 + \ddot{y} + f_x/m) - \\ & c_{x1}^2z_{x1} + c_{x1}z_{x2} - \ddot{x}_d - ku_x. \end{aligned} \quad (14)$$

选取控制 Lyapunov 函数  $V_2$  为

$$V_2 = z_{x1}^2/2 + z_{x2}^2/2. \quad (15)$$

控制 Lyapunov 函数  $V_2$  的时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \\ & -c_{x1}z_{x1}^2 + z_{x2}[k(x_{x1}^2 + \ddot{y} + f_x/m) - \\ & (c_{x1}^2 - 1)z_{x1} + c_{x1}z_{x2} - \ddot{x}_d - ku_x]. \end{aligned} \quad (16)$$

为保证式(16) 是半负定的, 选取反馈控制律

$$\begin{aligned} u_x &= \\ & x_{x1}^2 + \ddot{y} + f_x/m + [(c_{x1} + c_{x2})z_{x2} - \\ & (c_{x1}^2 - 1)z_{x1} - \ddot{x}_d]/k, \end{aligned} \quad (17)$$

其中  $c_{x2}$  为反步法待设计参数且  $c_{x2} > 0$ .

由式(5) 和(17), 平板倾角  $\alpha$  的期望角度  $\alpha_d$  为

$$\alpha_d = \arcsin(u_x/g). \quad (18)$$

将式(17) 代入(16), 得到

$$\dot{V}_2 = -c_{x1}z_{x1}^2 - c_{x2}z_{x2}^2 \leq 0. \quad (19)$$

将式(17) 代入(14), 得到

$$\dot{z}_{x2} = -c_{x2}z_{x2} - c_{x1}z_{x2}. \quad (20)$$

合理选择  $c_{x1}, c_{x2}$ , 可令

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V_2(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V}_2(t) = 0. \quad (21)$$

当  $t \rightarrow \infty$  时, Lyapunov 函数  $V_2$  有下界, 且其时间导数是半负定的, 闭环系统为全局渐近稳定的.

### 3) 偏差系统的特性分析

由式(10) 和(20), 偏差(6) 的系统方程为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} z_{x1} \\ z_{x2} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} z_{x1} \\ z_{x2} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} -c_{x1} & 1 \\ -1 & -c_{x2} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

矩阵  $A$  的特征值为

$$1, 2 = -\frac{1}{2}[(c_{x_1} + c_{x_2}) \pm \sqrt{(c_{x_1} - c_{x_2})^2 - 4}]. \quad (23)$$

根据不同的反步法待设计参数, 可将偏差  $z_{x_1}$  的动态过程分为 2 类. 第 1 类, 若  $|c_{x_1} - c_{x_2}| > 2$ , 则偏差  $z_{x_1}$  将无超调地收敛到 0, 矩阵 A 的特征值均为负实数, 偏差系统 (22) 的平衡点为稳定的结点<sup>[7]</sup>, 最终  $z_{x_1} - z_{x_2}$  的相轨迹收敛到平衡点  $z_{x_1} = 0, z_{x_2} = 0$ . 第 2 类, 若  $|c_{x_1} - c_{x_2}| < 2$ , 则偏差  $z_{x_1}$  出现超调, 振荡地收敛到 0, 矩阵 A 有 2 个实部为负的共轭复数特征值, 偏差系统 (22) 的平衡点为稳定的焦点<sup>[7]</sup>, 相轨迹最终收敛到平衡点  $z_{x_1} = 0, z_{x_2} = 0$ . 求解微分方程组 (22), 得

$$z_1(t) = \left[ \frac{z_{x_{10}}}{2} \left( 1 - \frac{c_{x_1} - c_{x_2}}{n_{c_x}} \right) + \frac{z_{x_{20}}}{n_{c_x}} \right] e^{-\frac{1}{2}(c_{x_1} + c_{x_2}) - n_{c_x}} t + \left[ \frac{z_{x_{10}}}{2} \left( 1 + \frac{c_{x_1} - c_{x_2}}{n_{c_x}} \right) - \frac{z_{x_{20}}}{n_{c_x}} \right] e^{-\frac{1}{2}(c_{x_1} + c_{x_2}) + n_{c_x}} t, \quad (24)$$

$$n_{c_x} = \sqrt{(c_{x_1} - c_{x_2})^2 - 4}, \quad (25)$$

$$z_{x_{10}} = x_0 - x_{d_0}, \quad (26)$$

$$z_{x_{20}} = c_{x_1}(x_0 - x_{d_0}) + \dot{x}_0 - \dot{x}_{d_0}. \quad (27)$$

其中:  $x_0$  为位移  $x$  的位置初始值,  $x_{d_0}$  为给定  $x_d$  的初始值.

由式 (24) 可知, 偏差系统 (22) 的动态受反步法待设计参数、系统初始值等因素的影响. 若系统对待调节指标的超调、偏差收敛速率等动态特性有特殊的限制要求, 则在设计反步法控制器时要注意合理选择  $c_{x_1}$  等设计参数, 以获得期望的偏差动态特性.

### 2.3 Y 方向反步法位置控制器设计

由式 (1b) 建立球在 Y 方向运动的状态方程

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{y_1} \\ \dot{x}_{y_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{y_2} \\ k(x_{y_1}^2 + \ddot{x} + f_y/m) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -k \end{bmatrix} u_y, \quad (28)$$

其中状态变量  $x_y$  为

$$x_y = [y, \dot{y}]^T. \quad (29)$$

引入反步法设计中的偏差向量

$$\begin{cases} z_{y_1} = x_{y_1} - y_d, \\ z_{y_2} = x_{y_2} - \dot{y}_1. \end{cases} \quad (30)$$

其中:  $y_d$  为给定信号,  $y_1$  为虚拟反馈函数, 给定  $y_d$  及其一阶、二阶对时间的导数都是连续、有界的.

反步设计过程同 2.2 节, Y 方向反馈控制律为

$$u_y = x_{y_1}^2 + \ddot{x} + f_y/m + [(c_{y_1} + c_{y_2})z_{y_2} - (c_{y_1}^2 - 1)z_{y_1} - \ddot{y}_d]/k. \quad (31)$$

其中:  $c_{y_1}$  和  $c_{y_2}$  为待设计参数, 且  $c_{y_1} > 0, c_{y_2} > 0$ .

球 Y 方向的偏差向量满足如下动态方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} z_{y_1} \\ z_{y_2} \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} z_{y_1} \\ z_{y_2} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -c_{y_1} & 1 \\ -1 & -c_{y_2} \end{bmatrix}. \quad (32)$$

式 (32) 的分析同偏差系统 (22). 平板期望角度  $r$  为

$$r = \arcsin(u_y/g). \quad (33)$$

### 2.4 角度伺服控制器

采用切换的方法构造伺服控制器

$$u_p = \begin{cases} P_b, e & g_1; \\ -P_b, e & -g_1; \\ f(e, e_v), & \text{else.} \end{cases} \quad (34)$$

其中:  $P_b$  为常数;  $f(e, e_v)$  为模糊逻辑输出,  $e$  和  $e_v$  分别为平板倾角的偏差及其变化速率;  $u_p$  代表驱动步进电机的脉冲数. 设计细节见文献 [2].

### 3 反步法待设计参数的自动调整方法

在某些控制系统中, 系统的初始值会大范围变化, 同时系统的控制量常受到饱和特性的约束. 由式 (24), 若固定  $c_{x_1}$  等反步法待设计参数, 则当系统初始值出现较大变化时可能难以获取期望的偏差动态特性, 甚至由于控制量饱和导致系统失稳. 为了在较大的系统初始值范围内保证闭环系统的性能, 并尽量避免控制量饱和, 构造模糊逻辑来自动调整反步法待设计参数. 在考虑了控制量饱和而引入的约束条件后, 以遗传算法优化模糊规则.

为简化问题, 取  $c_{x_1} = c_{y_1}, c_{x_2} = c_{y_2}$ , 球的目标点为 (0, 0). 选取球的位置初始值分别为 (-25, -25), (-50, -50), (-100, -100), (-150, -150), (-200, -200), 单位为 mm. 球的初始速度为 0. 为避免板球系统振荡, 限制式 (18) 和 (31) 中控制量的幅值, 令  $|r|_{\max} = 1^\circ, |\dot{r}|_{\max} = 1^\circ$ . 由实验获取确保控制量不进入饱和区的反步法待设计参数的范围及约束条件见表 1. 参数  $c_{x_2}$  和  $c_{y_2}$  的范围固定为 [0.01, 0.5]. 对上述 5 个位置初始值, 分别采用遗传算法搜索待设计参数的最优解<sup>[9]</sup>. 为使全局跟踪

表 1 参数范围及约束条件

球的位置初始值	待设计参数的范围及其约束条件		
(-25, -25)	0.1	$c_{x_1}$	2.2, $c_{x_1} + c_{x_2} \leq 3$
	0.1	$c_{y_1}$	2.2, $c_{y_1} + c_{y_2} \leq 3$
(-50, -50)	0.1	$c_{x_1}$	1.7, $c_{x_1} + c_{x_2} \leq 2$
	0.1	$c_{y_1}$	1.7, $c_{y_1} + c_{y_2} \leq 2$
(-100, -100)	0.1	$c_{x_1}$	1.2, $c_{x_1} + c_{x_2} \leq 1.6$
	0.1	$c_{y_1}$	1.2, $c_{y_1} + c_{y_2} \leq 1.6$
(-150, -150)	0.1	$c_{x_1}$	0.9, $c_{x_1} + c_{x_2} \leq 1$
	0.1	$c_{y_1}$	0.9, $c_{y_1} + c_{y_2} \leq 1$
(-200, -200)	0.1	$c_{x_1}$	0.6, $c_{x_1} + c_{x_2} \leq 0.7$
	0.1	$c_{y_1}$	0.6, $c_{y_1} + c_{y_2} \leq 0.7$

位置偏差尽量小,选取适应度函数为

$$J = \int_0^t (|z_{x1}| + |z_{y1}|) dt = \int_0^t (|x - x_d| + |y - y_d|) dt. \quad (35)$$

设置遗传算法的种群大小为 20,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.8,最大进化代数 200.优化结果见表 2 和图 2.以 Mamdani 型推理逻辑构造模糊系统.输入变量为式(26)的  $x$  方向初始位置偏差绝对值  $|z_{x10}|$ ,模糊子集为 {ZE,SM,MI,LA,VLA}.输入变量的隶属度函数采用均匀分布的三角形函数,见图 3.输出为待设计的参数  $c_{x1}$  和  $c_{x2}$ .

表 2 遗传算法优化结果

球的位置初始值	待设计参数	
	$c_{x1}$ 或 $c_{y1}$	$c_{x2}$ 或 $c_{y2}$
(- 25, - 25)	1.5138	0.4000
(- 50, - 50)	1.4750	0.3480
(- 100, - 100)	1.1454	0.2500
(- 150, - 150)	0.8179	0.1820
(- 200, - 200)	0.5511	0.1400

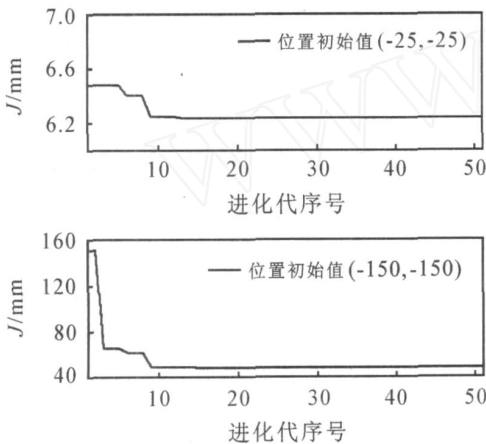


图 2 进化计算结果

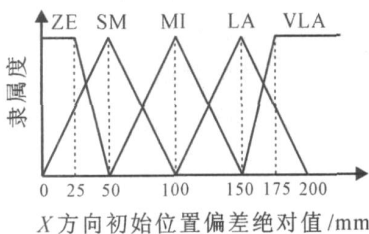


图 3 输入变量的隶属度函数

模糊逻辑的规则如下:

规则  $j$ : 若  $|z_{x10}|$  为  $D_j$ , 则  $c_{x1}$  为  $K_{c1j}$ ,  $c_{x2}$  为  $K_{c2j}$ ,  $j = 1, 2, \dots, 5$ .

模糊逻辑决策表如表 3 所示.由表 2 的反步法待设计参数遗传算法最优解来设置模糊逻辑决策表中的  $K_{c1j}$  等参数,并以表 2 的位置初始值构造输入

表 3 模糊逻辑决策表

初始位置偏差 绝对值 / $ z_{x10} $	待设计参数	
	$c_{x1}$	$c_{x2}$
ZE	1.5138	0.4000
SM	1.4750	0.3480
MI	1.1454	0.2500
LA	0.8179	0.1820
VLA	0.5511	0.1400

变量的隶属度函数.

#### 4 镇定控制仿真和实验

仿真及实验采用相同条件.设置球初始点坐标为 (- 85, - 155),目标点为原点 (0, 0),单位均为 mm.以两种方案设置反步法待设计参数.第 1 种方案固定待设计参数,设置  $c_{x1} = 0.4, c_{x2} = 0.2, c_{y1} = 0.4, c_{y2} = 0.3$ .第 2 种方案采用第 3 节中的反步法待设计参数自调整方法.调整后,  $c_{x1} = 1.226, c_{x2} = 0.274, c_{y1} = 0.789, c_{y2} = 0.177$ .偏差系统的平衡点均为稳定的焦点.

##### 4.1 仿 真

第 1 种方案及第 2 种方案的  $x$  方向平均位置偏差分别为 11.20 mm, 8.85 mm,第 1 种方案及第 2 种方案的  $y$  方向平均位置偏差分别为 23.53 mm, 20.36 mm,结果见图 4.由仿真结果可以看出,反步法待设计参数的自动调整方法降低了位置偏差及超调,减少了控制量幅值,有利于节约能量.

##### 4.2 实 验

第 1 种方案及第 2 种方案 10 次实验的  $x$  方向平均位置偏差分别为 18.25 mm, 11.80 mm;第 1 种方案及第 2 种方案 10 次实验的  $y$  方向平均位置偏差为 33.62 mm, 27.01 mm.2 种方案的 1# 实验结果如图 5 所示.

自动调整反步法待设计参数后,球  $x$  方向和  $y$  方向的平均位置偏差均有较大幅度下降.与固定反步法待设计参数的方法相比,自动调整反步法参数后的  $x$  及  $y$  方向的平均位置偏差分别变为固定参数时平均位置偏差的 64.66% 和 80.34%.实验结果表明,当系统的初始值大范围变化时,自动调整待设计参数的反步法降低了位置偏差和位置超调,提高了反步控制系统的性能.

#### 5 结 论

反步法待设计参数对反步控制系统的动态性能有重要影响.待调节指标是否超调、偏差收敛速率的快慢与反步法待设计参数有密切的关系.尤其在初始值大范围变化的反步控制系统中,如何自动地调整反步法待设计参数是一个重要课题.选择反步法

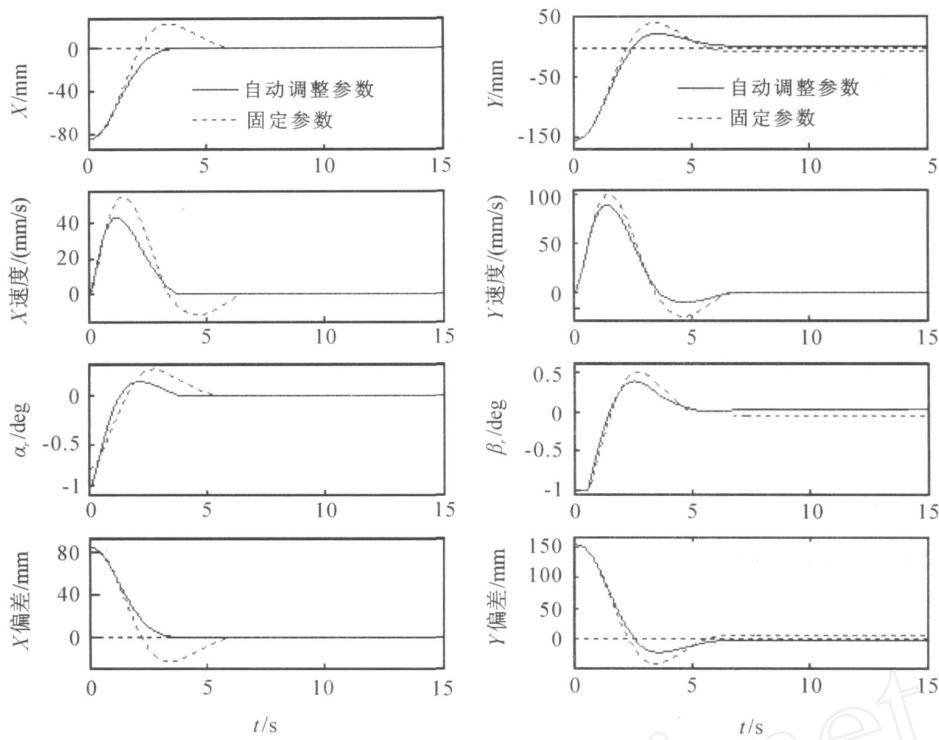


图 4 仿真结果

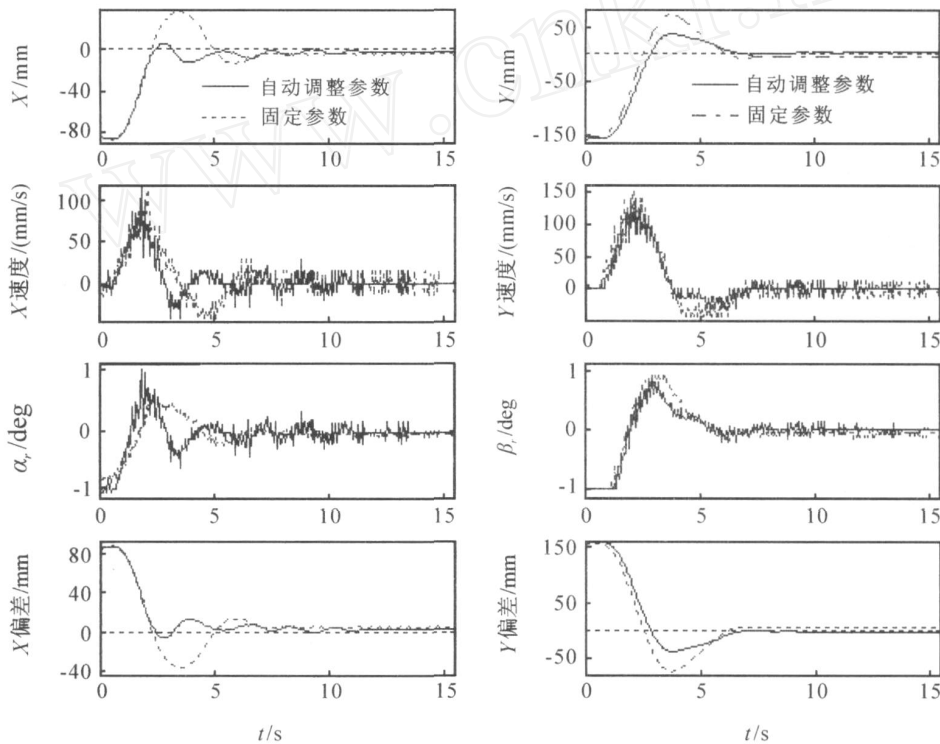


图 5 实验结果

待设计参数时还应考虑到控制量可能存在的饱和特性. 本文以板球系统为对象, 研究了在系统初始值大范围变化及控制量受饱和特性约束的条件下, 反步法待设计参数的自动调整方法, 分析了偏差系统的平衡点特性, 说明了反步法待设计参数对偏差系统动态的影响. 为了应对系统初始值的变化, 构造了模糊逻辑, 以自动调整反步法中的待设计参数. 在考虑

了控制量受饱和特性限制引入的约束条件后, 以遗传算法优化了模糊规则, 以便降低全局的位置偏差. 板球系统的镇定控制仿真及实验结果均表明, 自动调整待设计参数的反步控制方法降低了位置偏差及位置超调. 这种自动调整待设计参数的反步控制方法, 对于类似的控制系统设计有一定的参考价值.

(下转 758 页)

补线性化等方法)设计出保持系统随机稳定的控制器. 仿真结果验证了所提出的控制器设计方法的有效性.

### 参考文献(References)

- [1] Ait Rami M, Folcher J, El Ghaoui L, et al. Control of jump linear systems: Application to the steam generator water level[C]. Proc of the 38th IEEE Conf on Decision and Control. Phoenix: IEEE, 1999: 4923-4928.
- [2] Seiler P, Sengupta R. An  $H$  approach to networked control[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2005, 50(3): 356-364.
- [3] Mara Tanelli, Paolo Bolzern, Patrizio Colaneri. On almost sure stabilization of continuous-time Markov jump linear systems [C]. Proc of Int Symposium on Intelligent Control. Limassol Cyprus, 2005: 237-242.
- [4] Boukas E K. Robust stability and  $H$  control of discrete-time jump linear systems with time-delay —An LMI approach[C]. Proc of the 39th Conf on Decision and Control. Sydney, 2000: 1527-1532.
- [5] Li Li, Valery A Ugrinovskii. On necessary and sufficient conditions for output feedback control of Markov jump linear systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2007, 52(7): 1287-1292.
- [6] Guan Haiwa, Gao Lixin. Delay-dependent robust stability and  $H$  control for jump linear system with interval time-varying delay[C]. Proc of the 26th Chinese Control Conf. Zhangjiajie, 2007: 609-614.
- [7] Carlos de Souza. Robust stability and control of uncertain discrete-time Markov jump linear systems[C]. Proc of the IEEE Conf on Control Applications. Toronto, 2005: 434-439.
- [8] Zhang Xiaomei, Zheng Yufan, Lu Guoping. Delay-dependent robust  $H$  control of uncertain Markovian jump systems over communication networks[C]. Proc of IEEE Int Conf on Control and Automation. Guangzhou, 2007: 853-857.
- [9] Branicky M S, Phillips S M, Zhang W. Stability of networked control systems: Explicit analysis of delay [C]. Proc of the American Control Conf. Chicago, 2000: 2352-2357.
- [10] Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 84-99.
- [11] Zhang L Q, Shi Y, Chen T W, et al. A new method for stabilization of networked control systems with random delays[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2005, 50(8): 1177-1181.
- [12] Ghaoui L E, Oustry F, AitRami M. A cone complementarity linearization algorithm for static output-feedback and related problems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1997, 42(8): 1171-1176.

(上接第 753 页)

### 参考文献(References)

- [1] Fan X, Zhang N, Teng S. Trajectory planning and tracking of ball and plate system using hierarchical fuzzy control scheme[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2003, 14(2): 297-312.
- [2] Wang H, Tian Y, Sui Z, et al. Tracking control of ball and plate system with a double feedback loop structure [C]. Proc of 2007 IEEE Int Conf on Mechatronics and Automation. Piscataway: IEEE, 2007: 1114-1119.
- [3] Park J, Lee Y. Robust visual servoing for motion control of the ball on a plate[J]. Mechatronics, 2003, 13(7): 723-738.
- [4] Tian Y, Bai M. A non-linear switching controller for ball and plate system [J]. Int J of Modeling, Identification and Control, 2006, 1(3): 177-182.
- [5] Miroslav K, Kanellakopoulos I, Kokotovic P. Nonlinear and adaptive control design[M]. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- [6] 张兴华. 永磁同步电机的模型参考自适应反步控制[J]. 控制与决策, 2008, 23(3): 341-345.  
(Zhang X H. Model reference adaptive backstepping control of permanent magnet synchronous motor [J]. Control and Decision, 2008, 23(3): 341-345.)
- [7] Wang H, Tian Y, Ce D, et al. Output regulation of the ball and plate system with a nonlinear velocity observer [C]. Proc of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. Piscataway: IEEE, 2008: 2164-2169.
- [8] Khalil H. Nonlinear Systems[M]. 3rd ed. New York: Prentice Hall, 1996.
- [9] Goldberg D. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, reading [M]. MA: Addison-Wesley, 1989.