

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003625

板球系统的最优组合趋近律滑模控制*

李江峰 向凤红

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院 昆明 650500)

摘要:针对板球系统轨迹跟踪精度低、震荡大以及实时性差的问题,提出了一种基于遗传算法优化的组合趋近律滑模控制方案。首先运用 Ackermann 公式设计的滑模面来表达不连续的超平面;其次,在滑模前期采用指数趋近律来减小抖振幅度,后期运用变速趋近律使抖振收敛;最后,运用遗传算法来进行参数选定。实验结果表明,组合趋近律相对变速趋近律起始输出振幅降低了 2.2,遗传算法优化后收敛时间较优化前减少了 0.4 s。采用 Lyapunov 理论证明了控制器的稳定性,仿真验证了控制策略具有良好的动态品质和稳态性能,满足板球系统轨迹跟踪要求。

关键词:板球系统;滑模控制;Ackermann 公式;趋近律;遗传算法

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Sliding mode control of optimal combinatorial reaching law of ball and plate system

Li Jiangfeng Xiang Fenghong

(School of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to solve the problems of low tracking accuracy, large oscillation and poor real-time performance of ball and plate system, a sliding mode control scheme of combinatorial reaching law based on genetic algorithm is proposed. Firstly, the sliding mode surface designed by Ackermann formula is used to express the discontinuous hyperplane; secondly, the exponential reaching law is used to reduce the buffeting amplitude in the early stage of the sliding mode, and the variable speed reaching law is used to converge the buffeting in the later stage. Finally, the genetic algorithm is used to select the parameters. The experimental results show that the initial output amplitude of the combined reaching law is reduced by 2.2 compared with the variable speed reaching law, and the convergence time after genetic algorithm optimization is reduced by 0.4 s. The stability of the controller is proved by Lyapunov theory, and the simulation results show that the control strategy has good dynamic quality and steady-state performance, and meets the trajectory tracking requirements of the ball and plate system.

Keywords: ball and plate system; sliding mode control; Ackermann formula; reaching law; genetic algorithm

0 引言

板球系统是一个不稳定的非线性系统,具有多变量、欠驱动和强耦合的特性,可用于验证各种控制方案的性能,其研究成果可应用于工业控制和航空航天等领域^[1]。针对板球系统的控制问题,国内外学者做了大量研究。对板球系统的控制包括小球的定点保持和轨迹追踪,其机理是通过控制平板在 X 和 Y 轴的倾斜来控制小球的运

动,最终达到控制效果^[2-5]。文献[6]将指数趋近律滑模控制运用到板球系统中,使系统具有良好的动态性能,且控制器输出振幅较小,但系统不能收敛、持续抖振的问题仍然存在。文献[7]将模糊滑模控制运用到板球系统中,能够实现轨迹跟踪,但存在响应速度慢的问题。为了提高板球系统的追踪速度,文献[8-9]设计了级联分数阶滑模控制器控制板球系统,使系统的动态品质有所提升,但稳态性能欠缺。人工神经网络技术^[10]、自适应法^[11]、观测器方法^[12]和非奇异终端滑模^[13]对滑模控制的响应

收稿日期: 2020-11-07 Received Date: 2020-11-07

* 基金项目:国家自然科学基金(61963022)、云南省教育厅科学研究基金(2015Y071)项目资助

速度提升及抖振抑制均有效果,但控制参数需依靠经验进行选定,增加了控制难度。

本文主要对板球系统的轨迹追踪问题进行研究。针对滑模控制存在的上述问题,提出了一种基于遗传算法优化的组合趋近律板球系统滑模控制策略。首先,在满足 Lyapunov 稳定性的情况下,在滑模前段采用指数趋近律,使得控制器输出具有较小的抖振幅值;后段则采用变速趋近律,在提高系统响应速度的同时也使控制器输出能收敛为0;其次,采用 Ackermann 公式来设计滑模面,以简单的形式表达了不连续的超平面;最后引入了遗传算法对控制参数进行寻优,既优化了控制效果也降低了控制难度。通过仿真实验验证了所设计控制方案具备良好的动态品质和稳态精度。

1 板球系统的数学模型

本文研究是基于固高公司研发的 GBP2001 板球系统实验平台进行的。该板球系统主要由平板、小球、摄像头、伺服电机和工控机组成,其实物模型如图 1 所示。



图 1 GBP2001 板球系统实物模型

Fig. 1 Physical model of GBP2001 ball and plate system

1.1 板球系统的数学建模

以平板中心为原点建立直角坐标系,对 Z 轴加以限制,保留 X 轴和 Y 轴的自由度,建立板球系统物理模型,如图 2、3 所示。

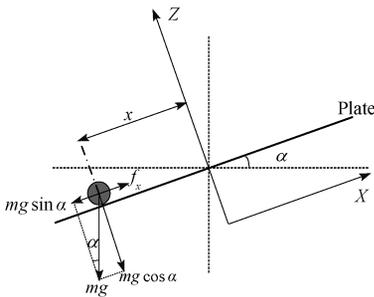


图 2 板球系统的 X 轴物理模型

Fig. 2 X-axis physical model of ball and plate system

考虑到板球系统的 X 轴和 Y 轴存在耦合,且该系统是典型的非线性系统,难以建立精确的数学模型,故本文采用拉格朗日方程对板球系统进行数学建模。在建模前需要作出如下假设:1)忽略平板与小球之间的摩擦;2)

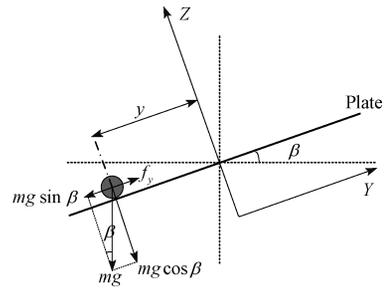


图 3 板球系统的 Y 轴物理模型

Fig. 3 Y-axis physical model of ball and plate system

任何时刻小球与平板之间的运动均为接触式滚动,不存在滑动或板球脱离现象;3)忽略平板的角速度;4)假设平板无限大;5)X 轴和 Y 轴完全对称。

建立的板球系统数学模型微分方程组如式(1),其中各变量意义如表 1 所示^[14]。

$$\begin{cases} x: (m + \frac{I_b}{r_b^2})\ddot{x} + m(x\dot{\alpha}^2 + y\dot{\alpha}\dot{\beta}) + mg \sin \alpha = 0 \\ y: (m + \frac{I_b}{r_b^2})\ddot{y} + m(y\dot{\beta}^2 + x\dot{\alpha}\dot{\beta}) + mg \sin \beta = 0 \\ \alpha: (I_b + I_p + mx^2)\ddot{\alpha} + m(xy\ddot{\beta} + \dot{x}y\dot{\beta} + xy\dot{\beta}\dot{\alpha}) + 2mx\dot{x}\dot{\alpha} + mgx \cos \alpha = F(\tau_x) \\ \beta: (I_b + I_p + my^2)\ddot{\beta} + m(xy\ddot{\alpha} + \dot{x}y\dot{\alpha} + xy\dot{\alpha}\dot{\beta}) + 2my\dot{y}\dot{\beta} + mgx \cos \beta = F(\tau_y) \end{cases} \quad (1)$$

表 1 参数变量意义及单位

Table 1 The meaning and parameters of parameter variables

| 变量 | 意义 | 单位 |
|------------------------|-------------|--------------------|
| m | 小球质量 | kg |
| g | 重力加速度 | m/s^2 |
| r_b | 小球半径 | m |
| I_b | 小球转动惯量 | $kg \cdot m^2$ |
| I_p | 平板转动惯量 | $kg \cdot m^2$ |
| $F(\tau_x), F(\tau_y)$ | 平板 X、Y 方向转矩 | $kg \cdot m^2/s^2$ |
| α, β | 平板 X、Y 方向倾角 | rad |
| x, y | 小球 X、Y 方向坐标 | m |

1.2 板球系统的简化数学模型

当小球处于稳定状态时,平板在 X 和 Y 轴的倾角 α 和 β 均为 0,且控制小球运动时平板的角度变化也很小,故为了简化复杂系统,可将平板倾角的正弦值近似为倾角本身,倾角变化率(角速度)也近似为 0。在实际控制中,控制平板运动的两个伺服电机位置也是固定的,因此将平板的转矩也忽略。即:

$$\sin \alpha \approx \alpha, \sin \beta \approx \beta \quad (2)$$

$$\dot{\alpha} \approx 0, \dot{\beta} \approx 0 \quad (3)$$

$$F(\tau_x) \approx 0, F(\tau_y) \approx 0 \quad (4)$$

将式(2)~(4)代入式(1),得到线性化的板球系统数学模型为:

$$\begin{cases} x:(m + I_b/r_b^2)\ddot{x} + mg \sin \alpha = 0 \\ y:(m + I_b/r_b^2)\ddot{y} + mg \sin \beta = 0 \end{cases} \quad (5)$$

选取系统状态变量为:

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8]^T = [x \ \dot{x} \ \alpha \ \dot{\alpha} \ y \ \dot{y} \ \beta \ \dot{\beta}]^T \quad (6)$$

则板球系统的状态空间描述方程为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{x} \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda g & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{m}{m + I_b/r_b^2} \quad (10)$$

本文取 $g = 9.81 \text{ m/s}^2, I_b = 0.4mr_b^2$ 并代入式(10),则有 $\lambda g = 7.007 \text{ 1}^{[15]}$ 。代入式中可得关于 X 轴系统的状态空间描述方程如式(11)所示。

$$\dot{\mathbf{x}}_x = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_x \mathbf{x} + \mathbf{B}_x \mathbf{u}, \mathbf{y}_x = \mathbf{C}_x \mathbf{u} \quad (11)$$

其中:

$$\mathbf{A}_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -7.007 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_x = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_x = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (12)$$

将系统分解成关于 X 轴和 Y 轴两个子系统后,因两个子系统是对称的,其解耦也相同,因此本文只分析关于 X 轴子系统。关于 Y 轴子系统原理相同,本文不再赘述。

2 基于组合趋近律滑模控制器设计

滑模控制具有系统“结构”随时间变化的开关特性,

此控制方案可以让系统在特定条件下沿着一定的状态轨迹运动,使系统具有良好的鲁棒性。但由于时间与空间滞后开关、系统惯性等影响使得系统不可避免地产生了抖振现象。为解决系统抖振问题,趋近律方法^[16-17]常被用在滑模控制中。

2.1 滑模控制器设计

滑模控制由趋近过程和滑动模态两个部分组成,其中趋近过程就是系统还未到达滑模面或有限次穿过滑模面阶段,滑动模态则是系统完全处于滑动模态区时。因此,可将控制器输出 $u_i(x, t)$ 分为等效控制 $u_{eq}(x, t)$ 和切换控制 $u_n(x, t)$ ^[18]。

针对线性化的板球系统滑模控制器,本文采用 Ackermann 公式设计滑模切换函数,即:

$$\mathbf{s} = \mathbf{C}\mathbf{x} = \sum_{i=1}^n c_i x_i \quad (13)$$

则有:

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} \quad (14)$$

其中, \mathbf{s} 是时间与状态的函数。Ackermann 公式描述为:

$$\mathbf{C} = \mathbf{e}^T \mathbf{P}(\mathbf{A}) \quad (15)$$

$$\begin{cases} \mathbf{e}^T = [0 \ \dots \ 1] [b \ A_x b \ \dots \ A_x^{n-1} b]^{-1} \\ \mathbf{P}(\lambda) = (\lambda - \lambda_1) \dots (\lambda - \lambda_{n-1}) (\lambda - \lambda_n) = \\ p + p^2 \lambda + \dots + p^{n-1} \lambda^{n-2} + \lambda^{n-1} \end{cases} \quad (16)$$

式中: p 为拉普拉斯算子; λ_i 为滑模面上的动态特征值。将式(14)代入式(11),可得:

$$\mathbf{u} = -(\mathbf{C}\mathbf{B}_x)^{-1} (\mathbf{C}\mathbf{A}_x \mathbf{x} - \dot{\mathbf{s}}) \quad (17)$$

2.2 指数趋近律

指数趋近律由等速趋近项 $-\varepsilon \text{sgn}(s)$ 和指数趋近项 $-ks$ 所组成。其趋近律如式(18),系统离散化以后的相轨迹如图 4 所示。

$$\dot{s}_e = -\varepsilon \text{sgn}(s) - ks, \varepsilon > 0, k > 0 \quad (18)$$

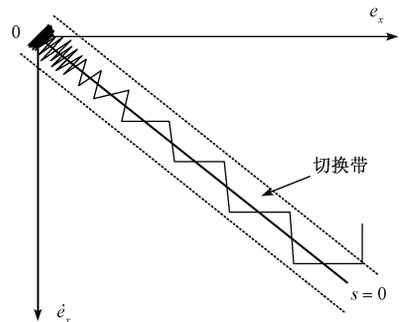


图 4 指数趋近律相轨迹

Fig. 4 Phase trajectory of exponential reaching law

虽然指数趋近律可通过调整趋近参数使系统的抖振幅度降低,但其自身切换带始终与切换面平行,且不收敛

于原点,导致系统最终在原点附近抖振而不能稳定。因此单纯的使用指数趋近律可能增加控制器负担,存在一定弊端。

2.3 变速趋近律

变速趋近律即控制的趋近速度与系统的状态范数成比例,离散后系统的切换带是两条过原点的射线。故系统将稳定的收敛于原点,具有良好的稳态性能。但运动点刚进入切换带时,由于系统状态范数比较大,会产生幅度较大的抖振,影响系统动态品质。变速趋近律的表达式如式(19),相轨迹如图5所示。

$$\dot{s}_v = -\varepsilon' \|x\|_1 \text{sgn}(s) \quad (19)$$

式中:系统状态范数 $\|x\|_1 = \sum_{i=1}^n |x_i|$ 。

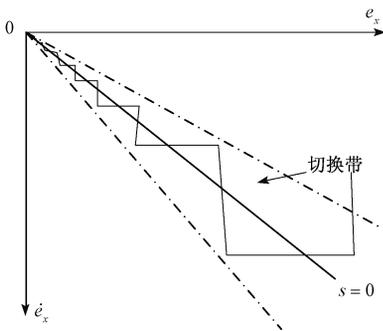


图5 变速趋近律相轨迹

Fig. 5 Phase trajectory of variable speed reaching law

2.4 组合趋近律滑模控制器设计

本文将指数趋近律与变速趋近律相结合,即在滑模控制的前部分采用指数趋近方案,在后段及稳定部分,采用变速趋近方案,构成组合趋近律的滑模控制策略。其目的在于,在滑模控制的前部分,指数趋近律在到达设计切换面时不会引起较大的抖振;而在后段采用变速趋近律使系统能够稳定地收敛于原点。基于组合趋近方案的控制保留了指数趋近律和变速趋近律各自的优点,具有良好的控制效果。其离散后的相轨迹如图6所示。

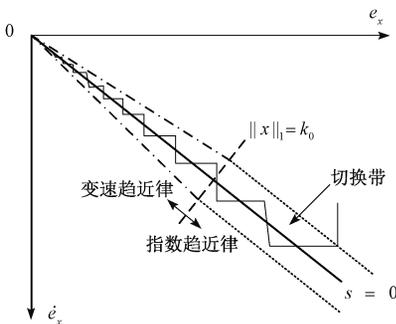


图6 组合趋近律相轨迹

Fig. 6 Phase trajectory of combinatorial reaching law

此控制器需要选定一个变换参考值 k_0 , 当系统状态范数大于参考值时采用指数趋近律, 小于或等于参考值时则采用变速趋近律。在参考值的选取过程中, 若 k_0 过大则难以发挥指数趋近律的优点, 若 k_0 过小则抖振幅值增大。

故系统的组合控制律为:

$$u_{eq}(x, t) = -(CB_x)^{-1} CA_x x \quad (20)$$

$$u_n(x, t) = \begin{cases} -(CB_x)^{-1}(CA_x x - \dot{s}_e) \|x\|_1 > k_0 \\ -(CB_x)^{-1}(CA_x x - \dot{s}_v) \|x\|_1 \leq k_0 \end{cases} \quad (21)$$

$$u_i(x, t) = u_{eq}(x, t) + u_n(x, t) \quad (22)$$

2.5 稳定性分析

当运动点处于趋近过程时, 为了保证系统能够进入到滑动模态并且保持稳定, 建立李雅普诺夫函数如式(23)。

$$V = \frac{1}{2} s^T s \geq 0 \quad (23)$$

由式(23)可得:

$$\dot{V} = s^T \dot{s} \quad (24)$$

将式(14)、(18)(19)代入式(24), 当 $\|x\|_1 > k_0$ 时, 有:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T \dot{s} = s^T C \dot{x} = s^T (CA_x x + CB_x u) = \\ &= s^T [CA_x x + CB_x (CB_x)^{-1} * (-CA_x x - \varepsilon \text{sgn}(s) - ks)] = \\ &= -s^T (\varepsilon \text{sgn}(s) + ks) \leq 0 \end{aligned} \quad (25)$$

当 $\|x\|_1 \leq k_0$ 时, 有:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T \dot{s} = s^T C \dot{x} = s^T (CA_x x + CB_x u) = \\ &= s^T [CA_x x + CB_x (CB_x)^{-1} * (-CA_x x - \|x\|_1 \varepsilon' \text{sgn}(s))] = \\ &= -s^T (\varepsilon' \|x\|_1 \text{sgn}(s)) \leq 0 \end{aligned} \quad (26)$$

因 $\dot{V} \leq 0$, 故此系统是渐近稳定的。

3 遗传算法参数寻优

3.1 遗传算法控制器寻优描述

由于所设计的板球系统滑模控制器趋近律参数(包括前期指数趋近律参数 ε 、 k 以及后期变速趋近律参数 ε' 、 k_0) 都是依靠经验及调试验证得到的, 而参数选取不同对控制效果影响较大。因此为使控制效果最优且简化控制难度, 本文采用20世纪60年代提出的遗传算法^[19]来对系统进行参数寻优。

遗传算法是一种基于群体、模拟自然进化(包括选择、交叉和变异)、进而搜索到最优解的方法^[20]。运用遗传算法对滑模控制器参数寻优时, 交叉概率 P_c 及其变异概率 P_m 的求取至关重要。其数学表达式分别为:

$$P_c = \begin{cases} P_{c_2} - \frac{(P_{c_2} - P_{c_1})(f_{\max} - f')}{f_{\max} - \bar{f}}, f' \geq \bar{f} \\ P_{c_2}, f' < \bar{f} \end{cases} \quad (27)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m_2} - \frac{(P_{m_2} - P_{m_1})(f_{\max} - f)}{f_{\max} - \bar{f}}, f \geq \bar{f} \\ P_{m_2}, f < \bar{f} \end{cases} \quad (28)$$

其中各变量含义如表 2 所示。

表 2 交叉、变异概率公式变量含义

Table 2 Variable meaning of crossover and mutation probability formula

| 变量 | 意义 |
|--------------------|------------|
| P_{c_1}, P_{c_2} | 交叉概率初始值、终值 |
| P_{m_1}, P_{m_2} | 变异概率初始值、终值 |
| f | 变异个体适应度 |
| \bar{f} | 适应度平均值 |
| f' | 交叉个体适应度较大值 |
| f_{\max} | 适应度最大值 |

3.2 遗传算法优化过程

1) 对所选参数进行初始化, 选取控制器需要优化的参数 ε 、 ε' 、 k 、 k_0 所对应的染色体基因组为 $\theta_i = [P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4]$ 。

2) 建立适应度函数。以系统误差作为惩罚项建立的目标函数为:

$$F_j =$$

$$\begin{cases} \int_0^{\infty} (\gamma_1 t |e_x(t)| + \gamma_2 u^2(t)) dt + \gamma_3 t_u, e_x(t) > 0 \\ \int_0^{\infty} (\gamma_1 t |e_x(t)| + \gamma_2 u^2(t) + \gamma_4 t |e_x(t)|) dt + \gamma_3 t_u, e_x(t) \leq 0 \end{cases} \quad (29)$$

其中, $e_x(t) = x_d(t) - x_1(t)$, $x_d(t)$ 为 x 轴上预定的实时轨迹, $x_1(t)$ 为 x 轴上实际输出的实时轨迹, $\gamma_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 为调节系数。种群个体的适应度公式为:

$$f(\theta_i) = \frac{1}{1 + F_j} \quad (30)$$

3) 设计遗传算子 (选择、交叉、变异算子) 的表达式为:

$$P(\theta_i) = \frac{f_{fit}(\theta_i)}{\sum_{\kappa=i}^n f(\theta_{\kappa})} \quad (31)$$

$$\begin{cases} \theta_x = \sigma\theta_x + (1 - \sigma)\theta_y \\ \theta_y = \sigma\theta_y + (1 - \sigma)\theta_x \end{cases} \quad (32)$$

$$q'_{\kappa} = \Delta q_{\kappa} \quad (33)$$

式中: θ_x 、 θ_y 和 θ_x 、 θ_y 分别为交叉前和交叉后的个体; σ 为

交叉系数; Δ 为变异系数; q_{κ} 为随机变异概率。

4) 满足迭代次数, 输出最优参数为止。

4 实验仿真结果分析

本文是在基于 MATLAB 2018a 的 Simulink 环境中完成仿真的。预设的小球跟踪轨迹为心形轨迹, 其轨迹表达式为:

$$\begin{cases} x_d = 2(\cos(\pi \times t) - 0.5\cos(2\pi \times t)) \\ y_d = 2(\sin(\pi \times t) - 0.5\sin(2\pi \times t)) \end{cases} \quad (34)$$

引入干扰项函数为

$$\begin{cases} K_x = 0.1\sin(t) + 0.1\cos(t) \\ K_y = 0.1\sin(t) + 0.1\cos(t) \end{cases} \quad (35)$$

系统的初始状态为 $x_0 = [-1 \ 0 \ 2 \ 0]$, 根据遗传算法寻优后参数选取为 $\varepsilon = 10.17$, $\varepsilon' = 5.2$, $k_0 = 2.04$ 。因系统 $n = 4$, 所以取 $\lambda_1 = -1$, $\lambda_2 = -2$, $\lambda_3 = -3$, 根据 Ackermann 公式求得 $C = [-0.86 \ -1.57 \ 6 \ 1]$, 系统仿真时间选取为 4 s。仿真结果如图 7~13 所示。

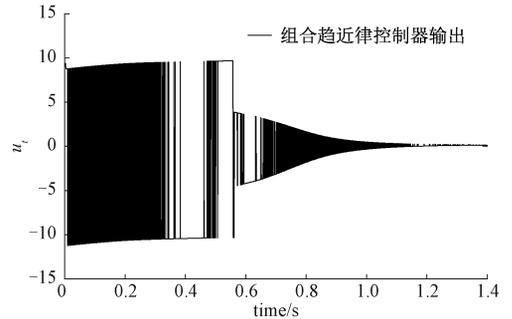


图 7 优化前组合趋近律控制器输出
Fig. 7 Output of combinatorial reaching law controller before optimization

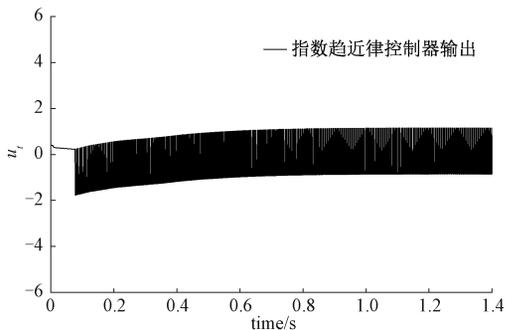


图 8 优化后指数趋近律控制器输出
Fig. 8 Output of optimized exponential reaching law controller

图 7 和 10 分别为遗传算法优化前后组合趋近律控制器的输出。由图 7 可知, 优化前指数趋近部分趋近速度过大, 运动点快速到达滑模面, 但同时也使得系统的振

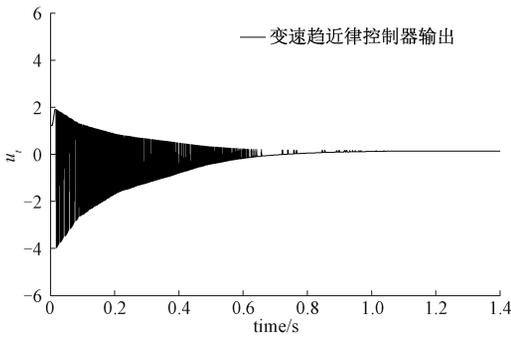


图9 优化后变速趋近律控制器输出

Fig.9 Output of optimized variable speed reaching law controller

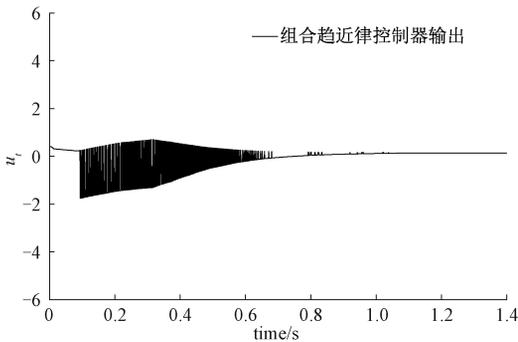


图10 优化后组合趋近律控制器输出

Fig.10 Output of optimized combinatorial reaching law controller

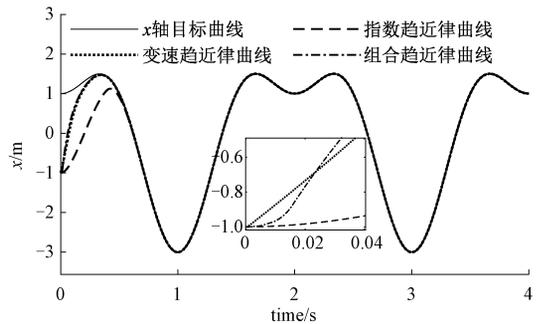
荡幅度过大(-12~10);指数与变速趋近律变换值 k_0 过小,从而掩盖了变速趋近律的控制优势,使得控制器输出收敛时间为 1.3 s。优化后的组合趋近律控制器输出振荡幅值小(-1.8~0.5),控制律转换值 k_0 使输出无跳跃且平稳,收敛时间为 0.68 s。验证了遗传算法参数寻优的有效性。

由图8~10的对比可以看出,组合趋近律结合了指数趋近律震荡幅度小与变速趋近律快速收敛于原点的优点,使控制器输出抖振幅值减小且稳定收敛于原点,验证了控制器的有效性。

由图11可知,优化后的3种控制律的轨迹对比表明,在响应的开始,组合趋近律因前段为指数趋近律,故响应速度比变速趋近律缓慢;当状态变量 $\|x\|_1 \leq k_0$ 时,组合趋近律由变速趋近项起作用,此时,组合趋近律运动点离滑模面较变速趋近律更远,状态变量也更大,因此组合趋近律的收敛速度略快于变速趋近律。

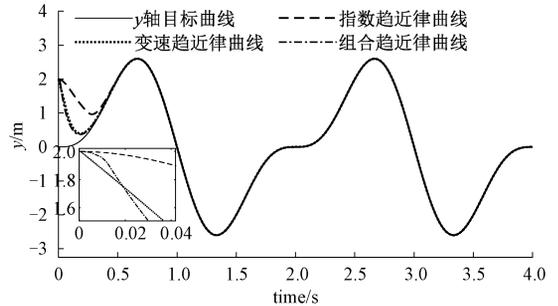
5 结论

为了改善板球系统轨迹跟踪精度低、振荡大和实时



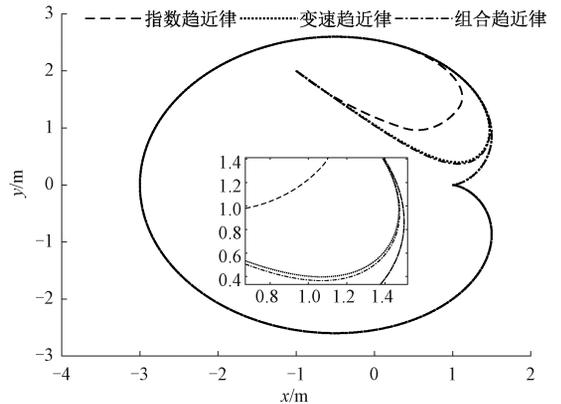
(a) x轴轨迹跟踪曲线对比

(a) Comparison of x-axis trajectory tracking curves



(b) y轴轨迹跟踪曲线对比

(b) Comparison of y-axis trajectory tracking curves



(c) 板球系统轨迹跟踪曲线对比

(c) Comparison of trajectory tracking curves of ball and plate system

图11 优化组合趋近律的小球轨迹跟踪

Fig.11 Ball trajectory tracking based on optimized combinatorial approach law

性差的问题,本文提出了基于遗传算法优化的组合趋近律滑模控制方案。从滑模面设计、控制器输出抖振问题、稳定性证明及运用遗传算法优化参数等方面,进行了板球系统滑模控制器的分析、设计和效果验证。通过仿真实验表明,设计的控制器具有良好的鲁棒性,控制器输出的抖振问题明显改善,响应速度和精度也有所提升,具有良好的动态品质和稳态精度。接下来将对系统响应速度的提升做进一步研究。

参考文献

[1] 李小华,王傲翔,刘晓平. 随机激励下板球系统建模与

- 有限时间全状态预设性能跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(11): 2333-2346.
- LI X H, WANG A X, LIU X P. Modeling and finite-time full state prescribed performance tracking control for ball and plate system with stochastic noise[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(11): 2333-2346.
- [2] BANG H, LEE Y S. Embedded model predictive control for enhancing tracking performance of a ball-and-plate system[J]. IEEE Access, 2019; 1-1.
- [3] FAROOP U, GU J, LUO J. On the interval type-2 fuzzy logic control of ball and plate system [C]. IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics, 2013; 2250-2256.
- [4] 苑仁令. 基于视觉板球系统的 RBF-PID 控制研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- YUAN R L. Research on RBF-PID control based on visual ball and plate system [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.
- [5] DEBONO D, BUGEJA M. Application of sliding mode control to the ball and plate problem [C]. International Conference on Informatics in Control. IEEE, 2015.
- [6] 赵聚乐, 韩光信. 基于粒子群优化的板球系统双闭环滑模控制 [J]. 吉林化工学院学报, 2020, 37 (1): 63-67.
- ZHAO J L, HAN G X. Double closed loop sliding mode control of ball and plate system based on particle swarm optimization [J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2020, 37(1): 63-67.
- [7] 韩京元, 田彦涛, 孔英秀, 赵博昊, 李聪. 板球系统的间接模糊自适应控制 [J]. 控制与决策, 2015, 30 (2): 303-310.
- HAN J Y, TIAN Y T, KONG Y X, et al. Fuzzy indirect adaptive control for ball and plate system [J]. Control and Decision, 2015, 30(2): 303-310.
- [8] ROY P, DAS A, ROY BINOY K. Cascaded fractional order sliding mode control for trajectory control of a ball and plate system [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2018, DOI: 10.1177/0142331216663826.
- [9] BORAH M, ROY P, ROY B K. Enhanced performance in trajectory tracking of a ball and plate system using fractional order controller [J]. IETE Journal of research, 2018, 64(1): 76-86.
- [10] SAID L, EDDINE R S, HOCINE B. Exponential reaching law and sensorless DTC IM control with neural network online parameters estimation based on MRAS [J]. IAES International Journal of Robotics and Automation (IJRA), 2018, 7(2): 77.
- [11] 王永俊, 贾建芳. 航天器自适应滑模变结构姿态控制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9): 9-15.
- WANG Y J, JIA J F. Adaptive sliding mode variable structure control for spacecraft attitude control [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(9): 9-15.
- [12] 申永鹏, 郑竹风, 王耀南, 等. 基于 PLL 自适应滑模观测器的 PMSM 无传感器控制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 22-29.
- SHEN Y P, ZHENG ZH F, WANG Y N, et al. Adaptive sliding mode observer based on PLL in sensorless control of PMSM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2020, 34(8): 22-29.
- [13] 贾林, 王耀南, 何静, 等. 自由曲面打磨机器人非奇异终端滑模阻抗控制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5): 89-96.
- JIA L, WANG Y N, HE J, et al. Non-singular terminal sliding mode impedance control of free-form surface grinding robot [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2020, 34(5): 89-96.
- [14] 费朔. 板球系统的模糊自适应控制 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- FEI SH. Fuzzy adaptive control of ball-plate system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [15] ALI H I, AMJAD H M, HASAN A F. Optimal nonlinear model reference controller design for ball and plate system [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019, 44(8): 6757-6768.
- [16] HUANG J, ZHANG Z, HAN J, et al. Sliding mode control of permanent magnet generator system based on improved exponential rate reaching law [J]. IET Electric Power Applications, 2020, DOI: 10.1049/iet-epa.2019.0749.
- [17] ZHANG C, ZHANG L W, PENG B, et al. PMLSM nonlinear integral sliding mode control based on gain time-varying reaching law [J]. Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering, 2020, 13 (5): 743-750.
- [18] 韩治国, 李伟, 冯兴, 等. 基于滑模控制技术的视觉板球控制系统设计 [J]. 技术与创新管理, 2019, 40(6): 679-684.
- HAN ZH G, LI W, FENG X, et al. Control system design for visual cricket based on sliding model control [J]. Technology and Innovation Management, 2019, 40 (6): 679-684.
- [19] RIAZI A, TÜRKER U. A genetic algorithm-based search

space splitting pattern and its application in hydraulic and coastal engineering problems[J]. *Neural Computing and Applications*, 2018, 30(12):3604-3610.

- [20] 王登峰, 王玉洁, 刘俊. 采用遗传算法优化滑模控制的柔性喷嘴液压驱动误差[J]. *中国工程机械学报*, 2020, 18(3):210-214.

WANG D F, WANG Y J, LIU J, et al. Hydraulic driving error of flexible nozzle using genetic algorithms to optimize sliding mode control [J]. *Chinese Journal of Construction Machinery*, 2020, 18(3):210-214.

作者简介



李江峰, 2019年于河南师范大学获得学士学位, 现为昆明理工大学硕士研究生, 主要研究方向为智能控制系统。

E-mail: Li_LeFon@163.com

Li Jiangfeng received his B. Sc. degree in 2019 from Henan Normal University. He is now a M. Sc. candidate at Kunming University of Science and Technology. His main research interest includes intelligent

control systems.



向凤红, 1984年于昆明理工大学获得学士学位, 1993年于昆明理工大学获得硕士学位, 2002年于昆明理工大学获得博士学位, 现为昆明理工大学教授, 主要研究方向为智能控制理论与应用、计算机网络控制系统、基于(无线)传感器网络的信息融合与处理、先进控制技术及应用。

E-mail: 1718473881@qq.com

Xiang Fenghong received his B. Sc. degree in 1984 from Kunming University of Science and Technology, received his M. Sc. degree in 1993 from Kunming University of Science and Technology, Ph. D. degree in 2002 from Kunming University of Science and Technology. Now he is professor at Kunming University of Science and Technology. His main research interests include: intelligent control theory and application; computer network control system; information fusion and processing based on (wireless) sensor network; advanced control technology and application.