

基于转矩补偿的双电机驱动消隙控制系统

梁 任, 方 强*

(浙江大学 流体传动及控制国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对齿轮传动中存在的齿隙非线性,以双电机驱动作为消除齿隙的实现方式,从控制器设计的角度出发,根据所需消隙转矩与负载转矩、运动速度和加速度之间的关系,设计了实时消隙转矩补偿控制器实现系统完全消隙。理论分析和仿真研究结果表明,相对于定常消隙转矩补偿,实时消隙转矩补偿控制器能以较小的控制能量实现系统完全消隙。

关键词:齿隙非线性;双电机驱动;消隙转矩

中图分类号:TP273

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)04-0016-05

Dual-drive anti-backlash system based on torque compensation

LIANG Ren, FANG Qiang

(The State Key Lab of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the nonlinear of the backlash in gear transmission, a dual-motor drive was used as a way to eliminate the backlash. From the perspective of controller design, according to the relationship between the required bias torque and the torque, velocity, acceleration of the load, a real-time bias torque compensation controller was designed to completely eliminate the backlash of the system. Theoretical analysis and simulation results show that compared with the method of constant bias torque compensation, the controller can completely eliminate the backlash with using smaller control energy.

Key words: backlash nonlinear; dual-motor driving; bias torque

0 引 言

齿隙是齿轮传动过程中不可避免的一种非线性,同时也是影响系统动态性能和稳态精度的重要因素。理想的精密机械传动装置,其输出与输入之间的关系应当是线性的;但由于齿隙的存在,传动过程中会产生回程误差,系统的输入与输出在短时间内会失去运动联系,造成输出的突然中断,从而使运动传递关系成为非线性。齿隙非线性会使系统产生振荡,大大降低系统的稳定性与精度。

传统齿隙消除方法,基本上都采用机械消隙,机械消隙实现方便,适用于对精度要求不高的场合,但该方法会增加机械部分的复杂性,且不适用于较大功率的传动^[1]。随着伺服驱动技术的发展,从控制角度入手

以达到消隙目的的方法也随之发展起来。目前比较多的方法为在闭环反馈回路上设计补偿控制器以补偿齿隙非线性^[2-4]。这些研究都是以单电机驱动系统为研究对象,只能尽可能补偿,而不能完全消除齿隙对系统的影响。而在高运动性能要求的领域,常常使用双电机驱动方式,即通过对驱动同一从动轴的两组驱动电机施加大小相等、方向相反的消隙转矩以达到消除齿隙的目的。该方法在保证系统运动精度的前提下能很好地消除齿隙非线性。文献[5]设计了在两自由度运动跟踪平台上的双电机消隙系统,并予以仿真与实验实现,探讨了消隙效果,指出了双电机消隙方法在提高运动精度与应用性能上的优势,但未对消隙效果进行详细探讨;文献[6]针对由偏置电压消除齿隙的双电机联动系统,提出在偏置电压一定时系统仍为非线性

收稿日期:2009-11-25

作者简介:梁 任(1986-),男,浙江温州人,主要从事伺服控制方面的研究. E-mail: skyman@zju.edu.cn

通信联系人:方 强,男,副教授,硕士生导师. E-mail: fangqiang@zju.edu.cn

系统,并设计了一种自适应控制策略消除非线性,在对定常消除转矩下双电机消除性能的提高有重要意义;文献[7]提出了一种枚举算法,以确定多自由度冗余驱动消除齿隙系统的合理配置方案。

以上研究都是在定常消除转矩的条件下得到的,在这个条件下,消除转矩需要设置得足够大以满足运动系统在负载与换向加速度变化下的消除需求。然而当系统处于稳定运行状态时,这个消除转矩就显得过大,从而造成运动能量的浪费。为解决该问题,文献[8]对偏置电压的调整策略进行了探讨,设计了与负载大小成比例的偏置电压控制器。对于负载频繁加减速的情况,偏置电压控制器的选取与加速度大小也紧密相关,在精度要求较高的控制系统中必须加以考虑。

本研究以双电机驱动齿轮啮合传动系统为研究对象,针对系统完全消除要求,对双电机消除原理进行分析,研究消除转矩大小与负载转矩、速度与加速度的关系,并设计实时校正控制器调节消除转矩输入。

1 双电机驱动消除系统数学描述

1.1 双电机驱动消除系统的机械结构

双电机驱动消除系统的机械结构如图1所示。系统运行时,A电机与B电机输出相同的连续转矩,控制各自齿轮与齿条啮合传动;此外A电机与B电机还额外输出大小相等、方向相反的消除转矩,使得两个齿轮与齿条张紧,以消除齿间隙。消除转矩不同于电机的连续转矩,无论在何种状态下它都是存在的,从而使得齿轮齿条在任何时刻都维持在无间隙的张紧状态。

1.2 消除原理

双电机消除传动系统在工作时,两个电机(A电机和B电机)的输出转矩、驱动负载的合成转矩与速度调节器输出的转矩指令之间的关系如图2所示。

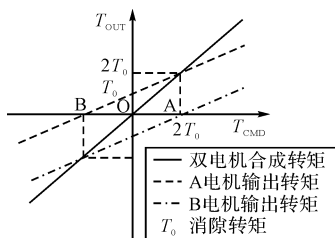


图2 双电机驱动消除系统转矩关系图

结合图2,该系统的传动过程可分为以下几种情况:

(1) 静止状态。

静止状态下,即转矩指令为0时,A电机输出消除转矩 T_0 ,B电机输出消除转矩 $-T_0$,双电机合成转矩为0,齿轮齿条处于张紧消除状态。

(2) 正向运动状态。

正向运动时,根据转矩指令的大小,有两种消除状态:

当转矩指令 $0 < T_{CMD} < 2T_0$,即图中的OA段时,A电机与B电机输出相同的连续转矩,在叠加各自的消除转矩后,A电机输出正向转矩 T_1 ,B电机输出反向转矩 T_2 ,且有 $|T_1| > |T_2|$ 。此时A电机为主动电机,B电机起辅助消除作用。

当转矩指令 $T_{CMD} > 2T_0$ 时,A电机与B电机皆输出正向转矩。此时B电机将跨过齿间隙,辅助A电机驱动齿条运动。

(3) 换向状态。

假定在换向前转矩指令 $T_{CMD} > 2T_0$,A电机与B电机共同驱动齿条运动;进行换向时,转矩指令减小,当 $0 < T_{CMD} < 2T_0$ 时,消除转矩大于电机连续转矩,B电机将跨过齿间隙起辅助消除作用,保持齿轮齿条处于张紧消除状态;当 $-2T_0 < T_{CMD} < 0$ 时,B电机变为主动电机,A电机起辅助消除作用;当 $T_{CMD} < -2T_0$ 时,A电机跨过齿间隙,辅助B电机驱动齿条运动。

由以上分析可知,当转矩指令落在AB线段外部时,两电机共同驱动负载运动,此时齿轮齿条间出现间隙。因此,如要求系统完全消除,在转矩指令一定的情况下,需要增大消除转矩,使得运动落在AB段内,此时两电机反向张紧,系统无间隙。即在满足 $2T_0 > |T_{CMD}|$ 的条件下,系统在运动全程都能实现无间隙。而负载的转矩指令取决于负载与电机轴的转动惯量、负载运动速度和加速度,因此相应的消除转矩在设计上也取决于这些因素。

1.3 消除系统数学模型

不失一般性,本研究以双电机齿轮啮合系统为例建立了双电机消除系统数学模型,如图3所示。



图3 双电机齿轮啮合系统

O_1 、 O_2 —双电机驱动的主动轮; O_0 —负载从动轮; θ 、 J —各齿轮转角、齿轮轴转动惯量; a —两齿轮间齿隙(假设两齿轮间隙相等)

则双电机消除系统动力学方程可表示为:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\theta}_1 + b_1 \dot{\theta}_1 = u_1 - T_1 + W \\ J_2 \ddot{\theta}_2 + b_2 \dot{\theta}_2 = u_2 - T_2 - W \\ J_0 \ddot{\theta}_0 + b_0 \dot{\theta}_0 = \sum_{i=1}^2 T_i \end{cases} \quad (1)$$

式中 b —粘性摩擦系数; u_1 、 u_2 —两电机输入转矩; W —消除转矩输入; T —主从动轮接触时的传递力矩。

受齿隙影响,主动轮驱动从动轮运转时有 3 个状态,分别为正转、空转与反转。相应地,主从动轮接触时传递力矩 T 可表示为:

$$T_i = \begin{cases} k(\Delta\theta_i - a) & \Delta\theta_i \geq a \\ 0 & \Delta\theta_i < a \\ k(\Delta\theta_i + a) & \Delta\theta_i \leq -a \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_0$, $i = 1, 2$, 此处假设传动比 $N = 1$; k —主从动轮结合处刚性系数。

由上述两式本研究建立了间隙消除模型,如图 4 所示,其中输入信号为两电机的转矩指令,即系统输入转矩 u ; 输出为负载从动轮的转角 θ_0 与两电机的转速。模型中 Backlash 模块根据式(2)建立,其输入 Angle 表示 $\Delta\theta_i$, 输出 Torque 为驱动从动轮的转矩 T_i 。

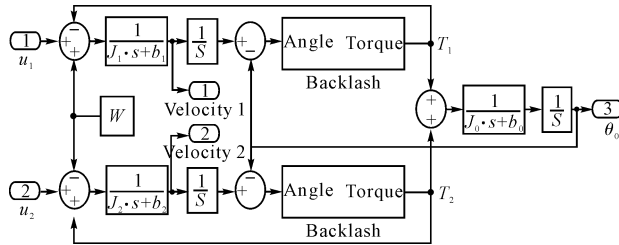


图 4 消除模块

结合上述模型,并依据在最外环采用 PID 控制的方式,建立双电机消除系统的整体模型,如图 5 所示。模型输入为齿条或齿轮位置指令,输出为实际位置。模型中 Driver 模块为永磁同步电机驱动模块。

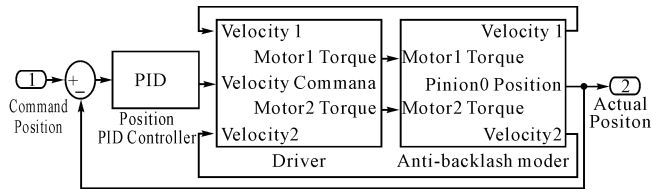


图 5 双电机驱动消除系统模型

2 消除控制器设计

消除控制器设计的目的为针对系统运动的负载大小以及加减速状况,通过控制器调节消除转矩,实现完全消除。

2.1 设计指标

消除控制器的设计直接关系到消除效果的好坏,在不考虑外界扰动的情况下,系统单位阶跃响应的性能指标为:

- (1) 上升时间 t_r : 0.05 s;
- (2) 调整时间 t_s ($\Delta = 5\%$): 0.2 s;
- (3) 超调量: 20%;
- (4) 稳态误差 e_{ss} : 0.001°。

2.2 控制器设计

由上述有关消除原理的分析可知,为实现完全消除,需要满足消除转矩 $T_0 > |T_{CMD}|/2$ 。设负载从动轮运动角速度为 ω , 角加速度为 ε , 则转矩指令为:

$$T_{CMD} = (J_0 + J_1 + J_2)\varepsilon + (b_0 + b_1 + b_2)\omega \quad (3)$$

那么应选取消除转矩为:

$$T_0 > |(J_0 + J_1 + J_2)\varepsilon + (b_0 + b_1 + b_2)\omega|/2 \quad (4)$$

考虑到测量噪声误差干扰,在速度与加速度输出端分别加入低通滤波器 $k_1/(s+k_1)$ 与 $k_2/(s+k_2)$ 以消除干扰。控制器的输出端加入低通滤波器,调节偏置输出的超调量与调整时间,避免偏置转矩发生过大阶跃跳动,影响系统稳定^[9-10]。

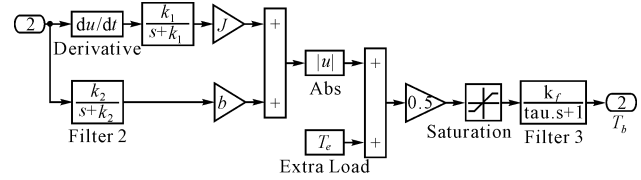


图 6 消除控制器模块

设计消除控制器如图 6 所示,该控制器能根据输入指令要求计算出合适的消除转矩,为此,消除模型中的输入为系统运动速度 x , 输出为消除转矩 T_b , 两者的关系为:

$$T_b = F_3 \text{sat}[(|x s F_1 J + x F_2 b| + T_e)/2] \quad (5)$$

式中 F_1 、 F_2 —速度加速度输入滤波器; F_3 —控制器输出端滤波器; $J = J_1 + J_2 + J_3$; $b = b_1 + b_2 + b_3$; T_e —附加转矩。

函数 sat 定义如下:

$$\text{sat}(x) = \begin{cases} c_1 & x > c_1 \\ c_2 & x < c_2 \\ x & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

式中 c_1 、 c_2 —转矩输入至 F_3 前的上下门限值。

由于系统要求消除转矩大于 1/2 转矩指令,因此消除转矩超出转矩指令一半的幅度大小就由该值来调节。

稳态时, T_b 可表示为:

$$T_b = k_f \text{sat}[(|x_s J| + |x_b| + T_e)/2] \tag{7}$$

将控制器加入消除模块模型中,其示意图如图 7 所示。

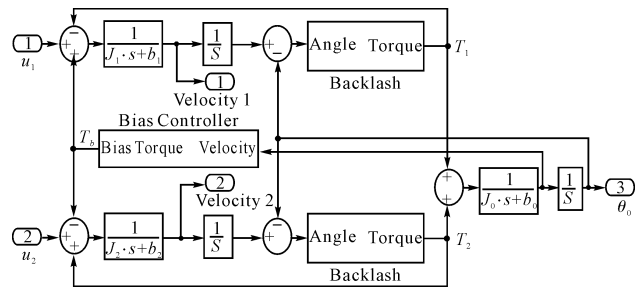


图 7 加入消除控制器消除模块

3 仿真分析

为验证加入消除控制器后系统的消除效果,本研究对如图 5 所示双电机消除系统模型在 Matlab 的 Simulink 环境下进行了仿真,仿真采用定步长模式,采样时间为 0.005 s,系统的各参数如表 1 所示(此处假设两电机参数完全相同)。

表 1 双驱系统模型各参数值

模块	符号	单位	数值	模块	符号	单位	数值
消除模块	J_0	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.051	电流环	K_p	—	10
	b_0	—	1.7	控制器	K_i	—	0.14
	J_1	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.153	速度环	K_p	—	5
	b_1	—	1.5	控制器	K_i	—	0.04
	J_2	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.153	位置环	K_p	—	8
	b_2	—	1.5	控制器	K_d	—	27
齿隙模块	a	m	0.03	位置环	K_i	—	0.3
	K	—	500	消除控制器	K_1	—	25.32
电机驱动模块	K_e	$\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$	0.38	消除控制器	K_2	—	20.6
	K_f	$\text{V} \cdot \text{A}^{-1}$	0.25	消除控制器	T_e	$\text{N} \cdot \text{m}$	0.05
	K_m	$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$	0.675	消除控制器	K_3	—	1
	L	H	4.4×10^{-3}	消除控制器	τ	—	0.15
	R	Ω	0.16				

系统阶跃响应波形如图 8 所示。前 1 s 系统输入为零,消除控制器输出附加转矩,齿轮预紧消除;在 1 s 时加入阶跃输入后,系统上升时间 $t_r = 0.05 \text{ s}$,调整时间 $t_s = 0.15 \text{ s}$,最大百分比超调 17%,稳态误差 $\varepsilon_{ss} = 0.0004^\circ$ 。

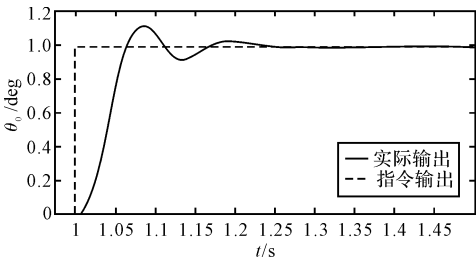


图 8 系统阶跃响应

系统的正弦输入响应如图 9 所示。输入信号为:

$$x = 0.01 \sin 20\pi t \tag{8}$$

依旧加入 1 s 的延迟输入模块作为系统的预紧环节,在完成预紧后齿隙得到了消除;由图示可见在系统在运动时消除了齿隙非线性,不存在回程误差。

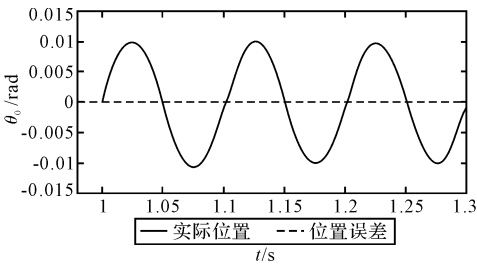


图 9 系统正弦输入响应

如上正弦输入时消除控制器在系统运动阶段输出波形如图 10(实线)所示。消除转矩在经过运动初始阶段的超调后,稳定波动在 $6.4 \text{ N} \cdot \text{m} \sim 6.8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 之间。在 1 s ~ 2.5 s 这段时间内转矩的积分为:

$$\int T dt = 8.237 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \tag{9}$$

而对于定常消除转矩,如要实现运动过程中的完全消除,根据之前分析可知,消除转矩需满足式(4),结合式(8),可得实现完全消除的消除转矩为:

$$W = |(J_0 + J_1 + J_2)\varepsilon + (b_0 + b_1 + b_2)\omega|/2$$

$$= |0.94\pi \cos 20\pi t - 1.428\pi^2 \sin 20\pi t|/2 \tag{10}$$

则可得 $W_{\max} = 6.864 \text{ N} \cdot \text{m}$,如图 10(虚线段)所示,那么:

$$\int T dt = 6.864 \times 1.5 = 10.296 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \tag{13}$$

可见,采用消除控制器的系统,在同样的消除效果下,控制能量增加了。通过消除控制器控制输出的消除转矩能根据系统速度、加速度及负载的大小调节自身大小,相比于达到同样消除效果的定常消除转矩方法,用较少的控制能量保证了系统的消除效果。

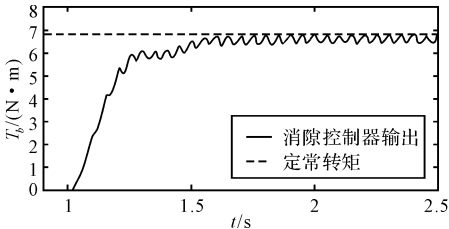


图 10 正弦信号输入时消除控制器输出波形

4 结束语

本研究设计了一种基于消除转矩补偿的双电机消除系统,通过设计消除控制器调节消除转矩实现了系统的完全消除,构建了系统模型并进行了仿真验证。仿真结果表明,在加入消除控制器后,双电机消除系统

(下转第 27 页)

形齿轮,在草图中,圆柱人字形齿轮的主要变量是齿轮的模数(模数 MD1)、齿数(齿数 ZD1)和螺旋角(螺旋角 D1)这3个变量,只要改变草图中的这3个变量就可以得到新的草图,重新建模之后就可以得到新变量下的标准圆柱人字形齿轮的特征图,如图13所示。

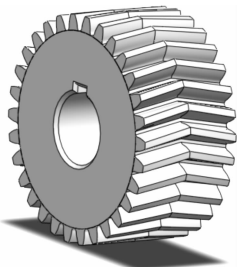


图13 标准圆柱人字形齿轮的特征图

在以上建立标准圆柱齿轮数据库的过程中,草图的绘制是比较难的,它和成百上千个数据联系在一起。本方法在基于 solidworks 软件基础之上用曲线拟合的方法做出齿轮齿面的渐开线,这比以往传统的建立数学模型手工找点法做渐开线要直观、精确。笔者将齿轮的上千个数据利用方程式的形式关联到草图中。只要改变齿轮的模数或齿数就能重新生成齿轮齿廓的草图和齿轮特征图。

4 结束语

(1)标准圆柱齿轮数据库建立之后,方便设计,只要在原草图基础之上改变齿轮的模数或齿数就能重新生成齿轮的齿廓草图和齿轮特征图。本研究建立标准圆柱齿轮数据库使齿轮的2D与3D模拟更加形象逼真,方便教学和培训。

(2)对标准圆柱齿轮数据库进行改进,可以将它作为 solidworks 软件的一个关于齿轮成型的插件使用。

(3)渐开线齿轮最适宜加工,可以根据齿轮的模数和模仿渐开线草图选择齿轮加工的刀具。

在上述的模拟仿真过程中,也有它的不足之处,就是在草图中变更齿轮的参数范围很窄,如果齿轮参数变化过大,则草图中容易产生自相交的情况,这还有待于进一步深入研究解决。但本研究为以后齿轮的有限元分析和动态仿真打了基础,为 CAD/CAM 进一步集成提供了一个条件。

参考文献(References):

- [1] 邹贵平. 基于 Pro/E 的渐开线圆柱齿轮三维参数化建模[J]. 机电工程, 2007, 24(2): 49-51.
- [2] 聂正东. 齿轮三维参数化建模及其运动仿真分析[J]. 机械研究与应用, 2009(3): 49-53.
- [3] 胡义刚. 渐开线齿轮三维参数化设计方法与实现[J]. 上海工程技术大学学报, 2004, 18(1): 42-46.
- [4] 魏征, 王一惠, 宋晓明. Solidworks2008 基础教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 213-241.
- [5] 刘志红, 劳奇成. 虚拟 CNC 的齿轮测量中心[J]. 机电工程, 2007, 24(4): 23-25.
- [6] 沈继飞. 机械设计基础[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1994: 45-69.
- [7] 徐灏. 机械设计手册: 第4卷[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [8] 李世伦. 利用 ObjectARX 对渐开线齿轮的开发[J]. 机电工程, 2002, 19(1): 56-59.
- [9] 宋清宇, 张耀宗. 精锻锥齿轮渗碳热处理 CAPP 系统[J]. 机电工程, 2003, 20(6): 89-93.
- [10] 张杰, 柳忠彬. 渐开线圆柱齿轮参数化三维造型研究[J]. 机械, 2009, 36(9): 33-35.
- [11] 郭克希, 王建国. 机械制图[M]. 2版. 内蒙古: 内蒙古大学出版社, 2008: 201-206.

[编辑: 柴福莉]

(上接第19页)

能根据各种输入情况调节消除转矩, 以较小的控制能量保证消除效果, 有利于进一步提高系统运动性能。

参考文献(References):

- [1] 胡超, 施浒立, 宁春林. 齿轮消隙功能实现探索[J]. 机电工程, 2008, 25(2): 11-14.
- [2] RACHED D, KENJI K, MASAHIRO T. Analysis and compensation of speed drive systems with torsional loads[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(3): 760-766.
- [3] TOMISLAV J, NEDJELJKO P. Model based backlash compensation[C]//Proceedings of the American Control Conference, 2001, VA [s. n.], 2001: 775-780.
- [4] KONG Jung-shik, JUNG Byung-jae, LEE Bo-hee, et al. Non-linear motor control using dual feedback controller[C]//Proceedings of Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE. [s. n.], 2005: 171-176.
- [5] ZEESHAN H, FAHAD H, MUHAMMAD H M, et al. De-

sign, control and implementation of 2-DOF motion tracking platform using drive-anti drive mechanism for compensation of backlash[C]//IEEE International Workshop on Robotic and Sensors Environments, 2007. Canada: Ottawa, 2007: 1-6.

- [6] 赵国峰, 胡维礼. 双电机驱动伺服系统齿隙非线性控制研究[J]. 电气传动, 2005, 35(2): 24-27.
- [7] CHANG Sun-lai, TSAI Lung-wen. On the redundant-drive backlash-free robotic mechanisms[J]. Journal of Mechanical Design, 1993, 115(5): 115-124.
- [8] GAWRONSKI W, BEECH-BRANDT J J, AHLSTROM H G, et al. Torque-bias profile for improved tracking of the deep space network antennas[J]. IEEE Antennas and Propagation magazine, 2000, 42(6): 35-45.
- [9] 赵海波. 双电机同步联动伺服系统的设计与分析[D]. 南京: 南京理工大学自动化系, 2006.
- [10] MERZOUKI R, DAVILA J A, CADIOU J C, et al. Backlash phenomenon observation and identification[J]. Proceedings of the 2006 American Control Conference, 2006(6): 3322-3327.

[编辑: 柴福莉]