

瓦楞纸板生产线电机同步控制方法

马子龙, 詹小英

(广西机电职业技术学院, 南宁 530007)

摘要: **目的** 为了提高瓦楞纸板其生产效率、降低次品率, 将神经网络和模糊控制相结合, 提出一种传送电机同步控制方法。**方法** 在分析传送装置和工艺要求的基础上, 建立传送过程数学模型。设计神经元 PID 控制器, 可用于弥补传统 PID 控制在解决非线性、时变、强耦合等方面的不足, 模糊控制器可用于速度补偿。基于 DSP 设计相应的控制系统, 最后进行实验研究。**结果** 控制算法的收敛速度较快, 控制系统稳定性较好, 能够实现各电机的同步控制。**结论** 该控制方法可以满足瓦楞纸板生产要求。

关键词: 瓦楞纸板; 同步控制; 神经元 PID; 模糊控制

中图分类号: TB486; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)21-0164-05

Motor Synchronization Control Method of Corrugated Board Production Line

MA Zi-long, ZHAN Xiao-ying

(Guangxi Technological College of Machinery and Electricity, Nanning 530007, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a synchronization control method for conveyor motor by combining neural network and fuzzy control, in order to improve the production efficiency and reduce the defective rate of gated board. On the basis of analyzing the transmission device and technological requirements, the mathematical model for transmission process was established. The neuron PID controller was designed and it could be used to make up the shortfalls of traditional PID control, such as nonlinearity, time varying and strong coupling, etc. The ler could be used for velocity compensation. The control system was designed accordingly based on DSP. Finally, the experimental study was carried out. The control algorithm had fast convergence speed and the control system had good stability. It could achieve the synchronization control over all motors. The control method can satisfy the production requirements of corrugated board.

KEY WORDS: corrugated board; synchronization control; neuron PID; fuzzy control

随着制造业和工业的快速发展,瓦楞纸板逐渐成为一种广泛使用的包装材料,当前国内绝大多数商品运输均采用瓦楞纸箱进行包装^[1-3]。在瓦楞纸板生产过程中,影响生产效率的关键因素在于输送装置速度的稳定性^[4]。输出速度稳定性由多组辊子共同决定,如果速度不同步容易导致瓦楞纸板翘曲、断纸,因此,输送装置速度持续稳定是保证瓦楞纸板生产效率以及生产质量的关键^[5-6]。同步控制是提高速度稳定性的有效方法。目前,多电机同步控制已在机械加工、纺织、印染、造纸等领域得到了广泛应用^[7]。在某种意义上,多电机同步控制算法及其结构不仅可以实现高精度同步控制,而且决定控制系统的可靠性甚至影

响产品质量、生产效率^[8-9]。

许宏、李乐宝等根据模糊 PID 控制算法设计了一种多电机同步控制系统,虽然该方法适用于时变、多输入输出、滞后等非线性复杂系统,但是其过于依赖操作者经验而且模糊控制规则比较多,参数整定相对困难,且没有自学习能力,因此其应用范围具有一定局限性^[10]。戴先中、刘国海等^[11]根据神经网络控制算法设计了一种多电机同步控制系统,该方法具有较好的自适应和自学习能力,但是计算过程比较复杂、实效性相对较差。为解决此问题,文中结合神经元 PID 控制和模糊控制设计一种电机同步控制器。分别阐述神经元 PID 控制和速度补偿器,并基于 DSP 给

收稿日期: 2017-05-16

作者简介: 马子龙 (1982—), 男, 硕士, 广西机电职业技术学院讲师, 主要研究方向为嵌入式系统应用及电子控制电路。

出相应控制系统。通过实验研究验证所述方法的可行性和有效性。

1 瓦楞纸板生产流程

1.1 工艺流程

瓦楞纸板生产线工艺流程见图 1。系统由驱动电机、传动装置、施胶装置、导纸装置组成。具体工艺过程包括纸板压制、加热、施胶、粘贴等^[12]。传送辊将瓦楞原纸送至加热辊并将原纸压制出瓦楞, 由施胶辊进行施胶; 同时传送辊将箱板纸送至热压力辊, 同时将箱板纸和瓦楞纸粘接、压合; 再次施胶、加热后, 通过传送带输出成品。文中以输送装置的同步控制为研究对象, 通常情况下输送装置的驱动力大多为辊子扭矩。传送装置的稳定性取决于各辊子的角位移是否同步, 如果同步效果理想, 可视为传送速度稳定, 满足生产工艺的要求。

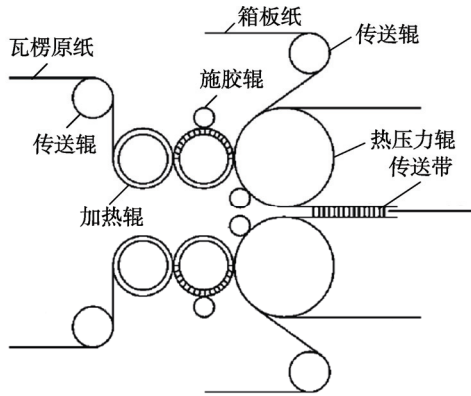


图 1 瓦楞纸板生产工艺流程

Fig.1 Production technological process of corrugated board

1.2 数学模型

一般情况下, 各辊子由电机直接驱动, 所以辊子角位移等同于驱动电机角位移。以直流电机为例, 角位移和电枢电压之间传递函数为:

$$G(s) = \frac{\omega_{n1}}{s^2 + \frac{D}{J}s + \omega_{n1}^2} \quad (1)$$

式中: ω_{n1} 为电机自然角频率, $\omega_{n1} = \sqrt{\frac{1}{2}Z_r^2 L_1 i_a^2 / J}$, 其中 Z_r 为电阻, L_1 为电感, i_a 为 α 相电流; J 为电机总惯量包括转子本身和负载 2 部分; D 为粘滞摩擦因数。

如果 $x_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \end{bmatrix}$, 令 $x_{i1} = \theta$, $x_{i2} = \dot{\theta} = \omega$, $\theta \in R$ 为电机角位移; $\omega \in R$ 为电机角速度。那么式 (1) 的状态方程可表示为:

$$\dot{x}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_{n1}^2 & -\frac{D}{J} \end{bmatrix} x_i + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_i \quad (2)$$

式中: x_i 为状态变量; u_i 为控制变量。同时式 (2) 也可表示为式 (3)。

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{i1} \\ \dot{x}_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_{n1}^2 & -\frac{D}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_i \quad (3)$$

即:

$$\dot{x}_i = A x_i + B u_i \quad (4)$$

$$\text{式中: } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_{n1}^2 & -\frac{D}{J} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}。$$

综上所述, 状态方程可描述为:

$$\begin{cases} \dot{x}_{i1} = x_{i2} \\ \dot{x}_{i2} = -\omega_{n1}^2 x_{i1} - \frac{D}{J} x_{i2} + u_i \end{cases} \quad (5)$$

2 控制系统设计

多电机同步控制解决了 2 个问题: 给定速度的单电机跟随和多电机之间的速度同步控制。对于单电机速度跟随控制, 文中采用神经元 PID 控制取代传统 PID 控制, 利用神经元的自适应和自学习能力实时修正加权系数, 可弥补传统 PID 控制在强耦合、时变、非线性等方面的不足, 同时具有较强的抗干扰能力, 可适应电机控制参数和运行状态的变化^[13]。对于多电机同步控制, 文中基于偏差耦合控制理论, 采用模糊控制设计了一种速度补偿器, 可以较好地解决电机运转不协调的问题^[14-16]。控制系统结构见图 2。

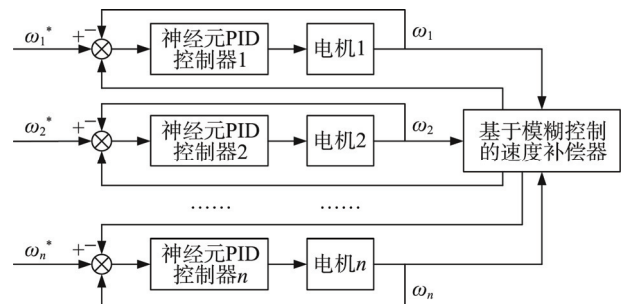


图 2 控制系统结构

Fig.2 The control system structure

2.1 神经元 PID 控制器

系统设定值为 $\omega^*(k)$, 实际输出值为 $\omega(k)$, 那么二者偏差可定义为 $e(k)$ 。该偏差通过状态转换器处理后会成为神经元的输入量 $x_i(k)$ ($i=1,2,3$), 即:

$$\begin{cases} x_1(k) = e(k) \\ x_2(k) = e(k) - e(k-1) \\ x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases} \quad (6)$$

定义神经元 PID 控制器的输出信号为 $u(k)$:

$$u(k) = K \sum_{i=1}^3 \omega_i(k) x_i(k) + u(k-1) \quad (7)$$

另外, 基于有监督 Hebb 学习算法, 神经元的学习过程可描述为:

$$\omega_i(k+1) = (1-c)\omega_i(k) + \eta r_i(k) \quad (8)$$

$$r_i(k) = z_i(k)u(k)x_i(k) \quad (9)$$

式中: $\omega_i(k)$ 为权系数; $r_i(k)$ 为递进信号; η 为神经元学习速率 $\eta > 0$; $z_i(k)$ 为误差信号; c 为常数, 且 $c \geq 0$ 。

为确保所述算法的收敛性以及控制系统的鲁棒性, 需要进行相关规范化处理, 那么控制学习算法可修正为:

$$u(k) = K \sum_{i=1}^3 \omega'_i(k)x_i(k) + u(k-1) \quad (10)$$

$$\omega'_i(k) = \omega_i(k) / \sum_{i=1}^3 |\omega_i(k)| \quad (11)$$

$$\begin{cases} \omega_1(k+1) = \omega_1(k) + \eta_p z(k)u(k)x_1(k) \\ \omega_2(k+1) = \omega_2(k) + \eta_i z(k)u(k)x_2(k) \\ \omega_3(k+1) = \omega_3(k) + \eta_d z(k)u(k)x_3(k) \end{cases} \quad (12)$$

式中: η_p , η_i , η_d 分别为比例系数、积分系数和微分系数的学习速率。

2.2 速度补偿器

当各电机负载发生变化时, 传统偏差耦合控制无法改变不同速度偏差之间的耦合顺序, 在某种程度上会影响电机同步控制效果, 因此文中基于模糊控制理论设计了一种速度补偿器, 并将转速误差最大的电机视作主电机, 剩余电机视作从电机, 进而生成新的耦合顺序。

速度补偿器包括比较器、模糊控制器以及执行器, 整个控制过程由以下环节构成: 输入模糊化、模糊推理、去模糊化。考虑到瓦楞纸板生产线对控制精度要求较高、多电机同步控制系统比较复杂, 所以文中设计了一种二维模糊控制器。将电机转速误差 e 和误差变化率 e_c 作为模糊控制器输入量, 那么输出量则为转速误差等级。

输入和输出可作如下定义。输入: 转速误差 e 的模糊论域可定义为 $[-3, 3]$, 对应语言值为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 同时采用三角形隶属度函数; 误差变化率 e_c 的模糊论域可定义为 $[-2, 2]$, 对应语言值为 $\{NB, NS, ZO, PS, PB\}$, 同样采用三角形隶属度函数。输出: 转速误差等级的论域可定义为 $[-4, 4]$, 对应语言值为 $\{N4, N3, N2, N1, ZO, P1, P2, P3, P4\}$, 同样采用三角形隶属度函数。

模糊推理则是根据控制经验或专家知识将已经模糊化处理的输入量转换为若干模糊条件语句, 即模糊控制规则, 然后基于模糊数学进行推理。模糊控制规则见表 1。

去模糊化是模糊化的逆过程, 可采用最大隶属度法, 其作用是从模糊推理结果中获取所需控制数值,

即转速误差等级。

表 1 模糊控制规则
Tab.1 Fuzzy control rules

u	e						
	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
e_c	P4	P3	P2	ZO	N2	N3	N4
	P3	P2	P1	ZO	N1	N2	N3
	P2	P1	ZO	ZO	N1	N2	ZO
	P3	P2	P1	ZO	N1	N2	NS
	NB	P4	P3	P2	ZO	N2	N3

3 实验研究

3.1 系统搭建

控制系统硬件结构见图 3。可以看出, 控制系统包括控制模块和功率变换模块。控制模块以 DSP 芯片 TMS320F2812 作为核心控制器, 主要负责电机控制。功率变换模块则选用 IPM 模块 PS21563-P 作为电压逆变器件, 主要负责电机功率变换。控制核心接收人机界面、故障检测模块、霍尔位置检测模块、电流检测模块传送来的信号实现相关任务处理以及电机的控制。IPM 模块接收来自控制器的 PWM 控制信号, 实现直流-交流逆变, 完成功率变换, 驱动电机运转。

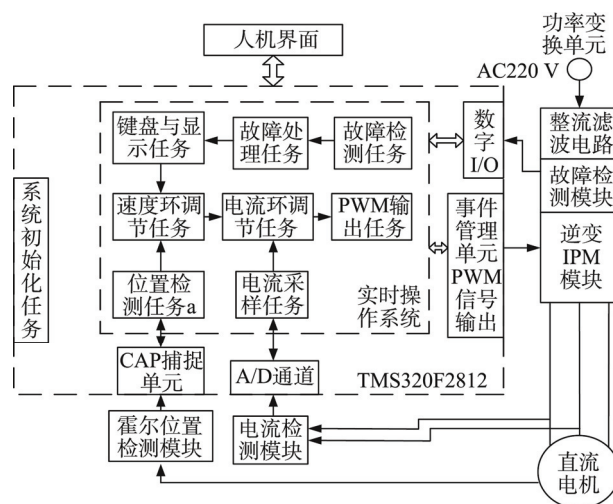


图 3 控制系统硬件结构

Fig.3 The control system hardware structure

控制系统其他模块功能: 人机界面主要由显示器和键盘组成, 可通过人机界面设定控制参数和指令以及实时监测电机运行状态。故障检测模块主要包括 IPM 故障、过电流、过电压等的检测和处理工作。霍尔位置检测模块可向 DSP 提供电机转子位置信息, 进行 IPM 通断逻辑的判断; 利用霍尔传感器相邻升降边沿的时间差可得到当前时刻电机转速, 可为速度环提供速度反馈值。电流检测模块实时检测 A 相和 B

相电流，可为故障检测模块和电流环提供电流反馈值。

3.2 实验结果与分析

将该控制方法用于某公司生产的瓦楞纸板生产线，该生产线输送装置配有 4 个牵引电机，为验证控制方法的收敛性和稳定性，分别在无扰动和有扰动的情况下进行相关实验研究。在同一速度参考指令下，4 台电机的跟踪误差和同步误差曲线见图 4。由实验结果可以看出：电机跟踪误差会在 0.7 s 的时间内趋于 0，收敛速度较快；电机同步误差则会在 1 s 的时间内趋于 0，同步性能比较理想。

在 3 s 左右使系统负载发生突变，对应实验结果见图 5。由实验结果可以看出，即使存在外部扰动，控制系统的跟踪误差的收敛速度仍然较快。同步误差的收敛速度比较理想，可稳定地趋于 0。综上所述，无论有无外部干扰，所述控制系统均具有比较快的响应速度，且运行稳定，具有较好的同步性能。

将文中所述方法分别与神经元 PID、模糊控制进行比较，各电机之间同步控制效果见表 2。可以看出，文中所述控制方法的最大同步误差相对较小，同步控制精度更高。

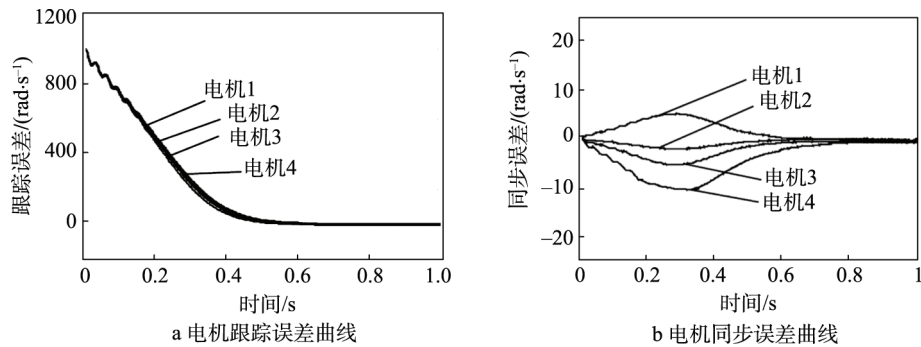


图 4 无干扰情况下实验结果
Fig.4 The experimental results without disturbance

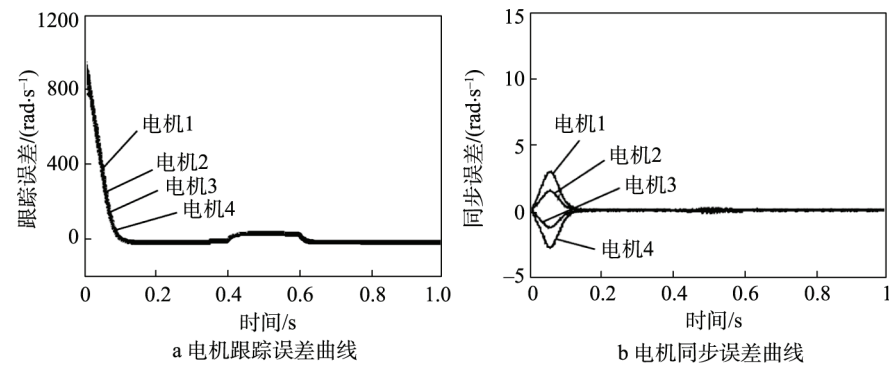


图 5 干扰情况下实验结果
Fig.5 The experimental results with disturbance

表 2 电机同步控制效果对比
Tab.2 The contrast of motor synchronization control effect

控制策略	最大同步误差率/%			
	电机 1	电机 2	电机 3	电机 4
神经元 PID	2.3	3.7	5.5	1.6
模糊控制	1.0	2.4	3.6	0.7
文中方法	0.6	0.8	1.4	0.4

4 结语

瓦楞纸板是一种使用非常普遍的包装材料，输送装置电机的同步控制是产品质量和生产效率的关键所在。为改善电机的同步控制效果，文中基于神经网络和模糊控制设计了一种瓦楞纸板生产线电机同步

控制器。基于 DSP 芯片 TMS320F2812 设计了相应的控制系统。实验结果表明，所述控制系统具有较快的响应速度，且运行稳定，具有较好的同步性能。

参考文献：

[1] 苟进胜, 樊晓敏, 张强军. 瓦楞纸板及其结构件缓冲性能的研究进展[J]. 包装工程, 2009, 30(9): 114—117.
GOU Jin-sheng, FAN Xiao-min, ZHANG Qiang-jun. Research Progress of Cushioning Performance of Corrugated Paperboard and Its Structural Component[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(9): 114—117.
[2] 李杨, 陈曲. 基于 ANSYS 的打印机全瓦楞缓冲包装设计[J]. 包装学报, 2012(2): 37—41.

- LI Yang, CHEN Qu. Based ANSYS Printer Full Corrugated Packaging Design[J]. Packaging Journal, 2012(2): 37—41.
- [3] 巩桂芬, 贾丽平. 关于瓦楞纸板质量控制的研究[J]. 包装工程, 2011, 32(19): 126—128.
GONG Gui-fen, JIA Li-ping. Study of Corrugated Board Quality Control[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(19): 126—128.
- [4] 王冬梅. 高弹瓦楞纸板及其生产方法[J]. 包装工程, 2008, 29(12): 18—19.
WANG Dong-mei. High Elastic Corrugated Paper Board and Its Producing Method[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(12): 18—19.
- [5] 梁浩, 赵东亚, 张贝贝, 等. 瓦楞纸板传输过程滑膜同步控制方法[J]. 机械工程与自动化, 2016(4): 146—148.
LAING Hao, ZHAO Dong-ya, ZHANG Bei-bei. Sliding Mode Synchronization Control of Corrugated Paperboard Transmission System[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2016(4): 146—148.
- [6] 言利容, 谢勇. 菱形蜂窝纸板的成型工艺[J]. 包装学报, 2011, 3(2): 45—48.
YAN Li-rong, XIE Yong. Diamond Honeycomb Molding Process[J]. Packaging Journal, 2011(2): 45—48.
- [7] 崔皆凡, 刘艳, 闫红, 等. 基于模糊控制的多电机神经元 PID 同步控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013, 2(2): 81—83.
CUI Jie-fan, LIU Yan, YAN Hong, et al. Multi-motor Neuron PID Synchronous Control Based on Fuzzy Control[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013, 2(2): 81—83.
- [8] 卢小锦. 基于 DSP/BIOS 的无刷直流电机控制系统的研制[J]. 自动化技术与应用, 2011, 30(5): 21—25.
LU Xiao-jin. The Development of BLDC Control System Based on DSP/BIOS[J]. Techniques of Automation & Applications, 2011, 30(5): 21—25.
- [9] 彭晓燕, 刘威, 张强. 基于改进型偏差耦合结构的多电机同步控制[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(11): 77—83.
PENG Xiao-yan, LIU Wei, ZHANG Qiang. Synchronized Control of Multi-motor Based on the Improved Relative Coupling Control[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(11): 77—83.
- [10] 许宏, 李乐宝, 张怡, 等. 变摩擦负载下双电机同步控制系统设计与实验[J]. 中国机械工程, 2011, 22(24): 2908—2913.
XU Hong, LI Le-bao, ZHANG Yi, et al. Design and Experiment of Double-motor Synchronous Control System with Variable Friction Load[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(24): 2908—2913.
- [11] 戴先中, 刘国海. 两变频调速电机系统的神经网络逆同步控制[J]. 自动化学报, 2005, 31(6): 890—900.
DAI Xian-zhong, LIU Guo-hai. Neural Network Inverse Synchronous Control of Two-motor Variable Frequency Speed-regulating System[J]. Acta Automatica Sinica, 2005, 31(6): 890—900.
- [12] 王建华, 詹国兵. 造纸机多电机同步速度链控制系统研究[J]. 机械工程与自动化, 2015(4): 148—149.
WANG Jian-hua, ZHAN Guo-bing. Research on Multi-motor Synchronous Speed Chain Control System of Paper Machine[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2015(4): 148—149.
- [13] 蔡锦达, 刘劲阳, 杨宝山. 基于自适应模糊 PID 飞剪式冲切控制研究[J]. 控制工程, 2016, 23(5): 693—697.
CAI Jin-da, LIU Jin-yang, YANG Bao-shan. Flying Shear Punching Machine Based on Adaptive Fuzzy PID Control Algorithm[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(5): 693—697.
- [14] 杨原清, 刘卫东, 李乐. 基于自适应模糊 PID 算法的切纸机伺服控制器设计[J]. 微特电机, 2010(3): 55—58.
YANG Yuan-qing, LIU Wei-dong, LI Le. Design of Guillotine Servo Controller Based on Fuzzy PID Algorithm[J]. Small & Special Electrical Machines, 2010(3): 55—58.
- [15] 尹亮, 宫文宁. 模糊自适应 PID 控制算法分析[J]. 变频器世界, 2011(9): 86—88.
YIN Liang, GONG Wen-ning. Analysis of Fuzzy Adaptive PID Control Algorithm[J]. The World of Inverters, 2011(9): 86—88.
- [16] 张乐, 吴金男, 毕少杰. 基于模糊 PID 的直升机模型飞行姿态控制[J]. 控制工程, 2014, 21(3): 387—394.
ZHANG Le, WU Jin-nan, BI Shao-jie. Helicopter Model Flight Attitude Control Based on Fuzzy-PID[J]. Control Engineering of China, 2014, 21(3): 387—394.