

〈系统与amp;设计〉

基于模糊控制的步进电机开环调焦系统设计

路欣宇¹, 苏俊波¹, 许红², 周春芬¹, 陈大乾¹, 刘鹏¹

(1. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223; 2. 陆军装甲军代局驻昆明地区军代室, 云南 昆明 650223)

摘要: 针对红外热像仪对调焦机构高精度、高可靠性的要求, 本文提出了一种基于模糊控制的步进电机开环调焦控制系统。该系统主要由 TMS320F28069 微控制器、TMC260 步进电机驱动芯片及外围电路构成。为了实现调焦系统精确定位的需求, 文中陈述了基于模糊控制的步进电机速度控制策略, 给出了系统的硬件电路设计。经过实际测试, 结果表明该系统可以满足实际使用要求。

关键词: 步进电机; 调焦系统; 开环控制; 模糊控制

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2018)03-0227-06

Design of Open-Loop Focusing System of Stepper Motor Based on Fuzzy Control

LU Xinyu¹, SU Junbo¹, XU Hong², ZHOU Chunfen¹, CHEN Daqian¹, LIU Peng¹

(1. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;

2. Military Representatives Office of Armored Corps Stationed in Kunming District, Kunming 650223, China)

Abstract: To address the requirements of high precision and high reliability in focusing systems of infrared thermal imagers, this paper proposes an open-loop focusing system for stepper motors based on fuzzy control. The system is composed of a TMS320F28069 microcontroller unit, a TMC260 stepper motor driver, and a peripheral circuit. In order to fulfill the precise positioning requirements of the focusing system, a speed control strategy is proposed for the stepper motor based on fuzzy control, along with a description of the hardware circuit design. Our experimental results confirm the feasibility of the system for practical use.

Key words: stepper motor; focusing system; open-loop control; fuzzy control

0 引言

红外热成像技术是现代国防建设中必不可少的一环, 其历史可以追溯到 20 世纪 30 年代出现的温度记录镜。随着红外热成像技术的发展, 在红外热像仪系统设计中, 调焦镜头成为了一个不可缺少的部分。为了实现目标的跟踪和捕获, 镜头焦距必须实现可调, 而实现调焦的关键在于调焦机构。调焦机构组件主要用于在目标的距离或者环境温度发生变化时, 调整目标的像面位置, 保证图像清晰。

目前国内对二代热像仪的研发相对较为成熟, 热像仪中采用的调焦方法更多的是直流电机驱动和直线导轨配合的方式进行调焦。但是, 在长期对二代热像仪调焦系统的应用中发现, 直流伺服电机闭环控制系统存在以下问题:

1) 常用控制方法参数针对性强, 不利于系统模块化^[1];

2) 系统对高精度位置检测装置依赖性高;

3) 伺服电机和高精度反馈装置价格相对较高, 系统成本不易控制。

通过分析直流电机和步进电机在调焦过程中各自所具有的特点, 本文设计了一种基于模糊控制的步进电机开环调焦系统, 该系统减少了外围电路的设计, 降低了开发成本, 缩短研发时间, 并且达到了实际工程应用需求, 具有很高的实用性。

1 指数型速度曲线控制算法

步进电机因其本身所具有的特点, 驱动脉冲数与步进数是一一对应的。在步进电机开环定位系统中, 电机位置只能由步进电机步数推算。所以在开环系统

收稿日期: 2017-09-03; 修订日期: 2018-01-02.

作者简介: 路欣宇 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为伺服控制。E-mail: luxy690@foxmail.com。

中,保证步进电机不失步就显得尤其重要。遵循步进电机本身特性的速度控制策略是保证步进电机不失步的关键。

目前常用的步进电机速度控制曲线主要包括直线型、S型和指数型3种^[2],相对于前两种而言,指数型速度控制曲线是从步进电机的矩频特性和惯频特性出发,更符合电机运动规律,同时兼顾了步进电机运行时的稳定性和快速性,所以本文对步进电机的速度控制策略选择指数型速度控制曲线。

由步进电机矩频特性曲线可知,步进电机无需经过加速就可以直接阶跃到起动频率所对应的速度,也可在起动频率所对应的速度直接停止,所以工程上将指数型速度控制曲线表达成直线加抛物线型曲线。因为指数曲线运算复杂,所以在实际应用中,通常将指数曲线离散化,用分档阶梯曲线逼近指数曲线规律。

本文将指数曲线进行分段,近似为直线段的组合,从而使步进电机频率变化更具连贯性。

首先,在指数控制曲线下,由步进电机动力学模型^[3],可知驱动脉冲频率 f 随时间 t 作指数规律上升^[4],即:

$$f(t) = f_h - f_h e^{-t/\tau} \quad (1)$$

式中: f_h 为步进电机最高连续频率; τ 为升速快慢时间常数,可由实验确定。当运行速度为 f_0 时,可算出频率由 f_0 到 f_h 升速时间为^[5]:

$$t_0 = \tau [\ln f_h - \ln (f_h - f_0)] \quad (2)$$

式中: f_0 为步进电机初始频率。

对 f_0 到 f_h 进行 n 等分,即:

$$\Delta f = \frac{f_h - f_0}{n} \quad (3)$$

将式(3)带入式(2),可计算出步进电机频率每升速 Δf 所对应的时间:

$$\Delta t_k = \tau \left[\ln \left(1 - \frac{k \cdot \Delta f}{f_h - f_0 - (k-1) \cdot \Delta f} \right) \right], k=1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

已知步进电机频率每升速 Δf 所对应的时间 Δt_k ,以及升速段始末频率 $f_0 + (k-1)\Delta f$ 和 $f_0 + k\Delta f$,即可得在第 k 段内步进电机运行步数 m_k 与频率的对应关系:

$$m_k = \frac{2\Delta t_k}{\frac{1}{f_0 + (k-1)\Delta f} + \frac{1}{f_0 + k\Delta f}}, k=1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

由式(4)可知,当 $n=1$ 时, Δt_1 为步进电机由初始

速度上升到最大速度所需时间,代入式(5),可得到步进电机在整个升速段运行步数 m_h 。

在开环调焦系统中,电机行程已知,即电机步进最大值 m_0 确定。当 $m_h \leq m_0/2$ 时,电机步进频率可以从初始频率上升至最大频率,频率变化可由式(3)、(4)、(5)求得。当 $m_h \geq m_0/2$ 时,电机步进频率不能从初始频率上升至最大频率。设此时步进电机频率为 f_1 ,由式(5)可求得步进电机可达频率 f_2 。将 f_1 、 f_2 对应到区间 $[f_0, f_h]$ 内 n 等分后的各段,即可得到 $f_1 \sim f_2$ 的升速规律曲线。

2 步进电机速度的模糊控制策略

在实际应用中,步进电机的目标位置因调焦需要,在电机运行中可能会发生改变,这就使电机不能按照既定速度曲线完成行程,需在运行过程中实时做出反应。针对这种情况,本文提出的思想是运用模糊控制器对步进电机速度控制曲线进行实时调节,以满足实际应用需求。

模糊控制器对步进电机速度的控制策略如图1所示。

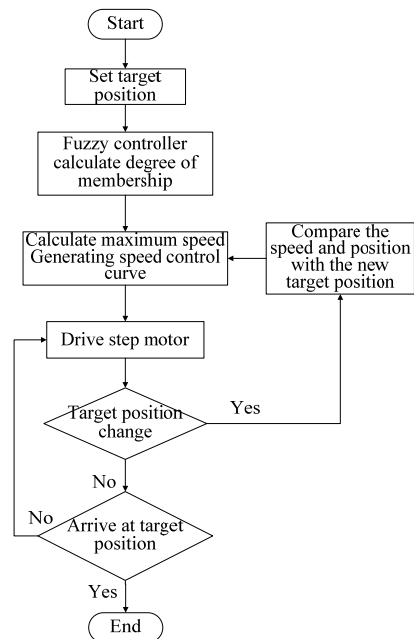


图1 模糊控制流程图

Fig.1 Flow diagram of fuzzy control

2.1 模糊控制器的设计

模糊控制的核心是模糊控制器。本文所设计的模糊控制器包括3部分:输入、模糊规则、输出^[6]。其中,输入包括“位置模块”和“速度模块”两个模糊化模块,输出为“状态模块”。模糊控制思想是通过对比步进电机当前速度和目标位置的分析,来确定步进电机下一步的运动状态。

在位置模块的设计中,“位置”除了表示电机与目标位置之间的距离外,还表示电机运动方向与下一状态运动方向的关系。令电机与目标位置之间的距离为 s , 运动方向较下一状态运动方向为 ± 1 , 则可得到 4 个模糊子集: N、PZ、PM、PL, 其中 N 表示距离为负, PZ 表示距离近, PM 表示距离中, PL 表示距离远。其隶属度函数如图 2 所示。

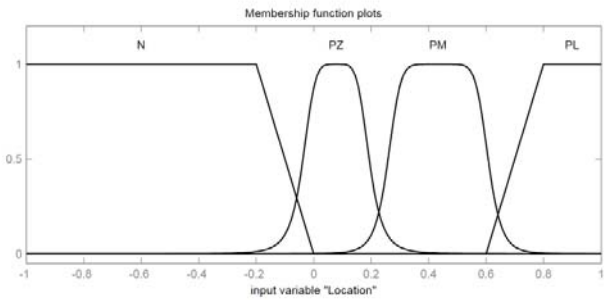


Fig.2 Location membership function

在速度模块的设计中,“速度”取电机当前的运动速率,速度模糊子集为: low、medium、fast, 其中 low 表示速度为慢, medium 表示速度为中, fast 表示速度为快, 其隶属度函数如图 3 所示。

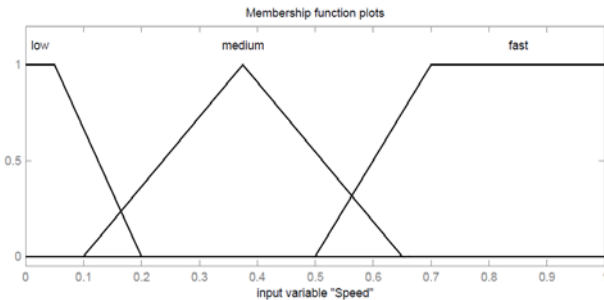


Fig.3 Speed membership function

模糊控制器对步进电机当前“位置”和“速度”进行模糊化、分析、清晰化后,得到步进电机下一步的运动状态,包括“保持(keep)”、“加速(accelerate)”和“减速(decelerate)”3 种状态。例如,当步进电机运动方向与目标位置相反时,无论电机处于何种速度下,其下一状态都是要减速运行,然后做反向运动。分析后可得,模糊控制器的模糊规则如表 1 所示。

因为本文设计所用的是 Sugeno 模型,所以清晰化模块的输出为数值。设定清晰化模块输出的取值范围为 $[-1, 1]$, 即减速对应为 -1 , 保持对应为 0 , 加速对应为 1 。用 MATLAB 的“Rule Viewer”功能对模糊控制器进行验证,选取实际调焦过程中的特征点,

设置模糊控制器位置模块和速度模块的输入值,由模糊规则可得到电机状态的输出值,整理后得表 2。

表 1 模糊规则 (平均权重)

Table 1 Fuzzy rule (average weight)			
N	PZ	PM	PL
low/ decelerate	low/keep	low/ accelerate	low/ accelerate
medium/ decelerate	medium/ decelerate	medium/kee p	medium/ accelerate
fast/ decelerate	fast/ decelerate	fast/ decelerate	fast/keep

由表 2 可知,模糊控制器对“位置”和“速度”处理后,得出“状态”参数,符合表 1 所设定的模糊规则。

2.2 模糊控制方法

令模糊控制器输出状态为 δ , 则 $\delta \in [-1, 1]$ 。设 t 时刻电机频率为 f_1 , 电机目标频率为 f_2 , 根据 δ 值的不同,可得到不同的目标频率:

当 $\delta \in [-1, 0)$ 时,电机处于减速状态,电机目标频率 $f_2 = f_0$, 并在 f_0 处停止,该过程是升速过程的逆过程,可直接由区间 $[f_0, f_1]$ 求得;

当 $\delta = 0$ 时, f_1 保持不变;

当 $\delta \in (0, 1]$ 时,电机处于升速状态:

$$f_2 = f_1 + (f_h - f_1) \cdot \delta \tag{6}$$

式中: f_1 为电机运动时对应频率; f_h 为电机运动所能达到的最大频率。

3 系统组成及驱动电路设计

3.1 调焦控制系统组成

本文所述的步进电机调焦控制系统组成如图 4 所示,主要由微控制器 TMS320F28069 及其外围电路、步进电机驱动芯片 TMC260、RS422 通信接口芯片、E²PROM 等构成^[7]。

电源向系统提供两路 12 V 电压,其中一路电压滤波后供给电机驱动芯片 TMC260,以驱动电机运动。另一路电压经电源芯片变压后输出 3.3 V 电压,用作微控制器、压力传感器、及其他芯片的工作电压。系统的时钟信号由晶振提供。微控制器通过 RS422 接口与上位机通信,接收上位机指令并作出反馈。JTAG 接口是微控制器的烧写接口。E²PROM 用来存放控制所需的各种参数,由微控制器随时调用。复位信号由复位电路产生,当过电压或欠电压的情况发生时可以对微控制器进行自动复位保护^[8]。

表 2 模糊控制器验证 Table 2 Confirmation of fuzzy controller

location	−1	−0.5	0	0.5	1	1.5	2	2.5
state (speed)	−0.999 (0)	−0.967 (0)	0 (0)	0.0696 (0)	0.985 (0)	0.999 (0)	1 (0)	1 (0)
	−0.999 (0.1)	−0.967 (0.1)	0 (0.1)	0.0696 (0.1)	0.985 (0.1)	0.999 (0.1)	1 (0.1)	1 (0.1)
	−0.999 (0.15)	−0.979 (0.15)	−0.352 (0.15)	−0.283 (0.15)	0.632 (0.15)	0.646 (0.15)	0.992 (0.15)	1 (0.15)
	−1 (0.2)	−1 (0.2)	−0.999 (0.2)	−0.93 (0.2)	−0.015 (0.2)	0 (0.2)	0.978 (0.2)	0.999 (0.2)
	−1 (0.4)	−1 (0.4)	−0.999 (0.4)	−0.93 (0.4)	−0.015 (0.4)	0 (0.4)	0.978 (0.4)	0.999 (0.4)
	−1 (0.55)	−1 (0.55)	−0.999 (0.55)	−0.959 (0.55)	−0.416 (0.55)	−0.408 (0.55)	0.57 (0.55)	0.592 (0.55)
	−1 (0.6)	−1 (0.6)	−1 (0.6)	−0.981 (0.6)	−0.737 (0.6)	−0.734 (0.6)	0.244 (0.6)	0.266 (0.6)
	−1 (0.7)	−1 (0.7)	−1 (0.7)	−1 (0.7)	−1 (0.7)	−1 (0.7)	−0.022 (0.7)	0 (0.7)

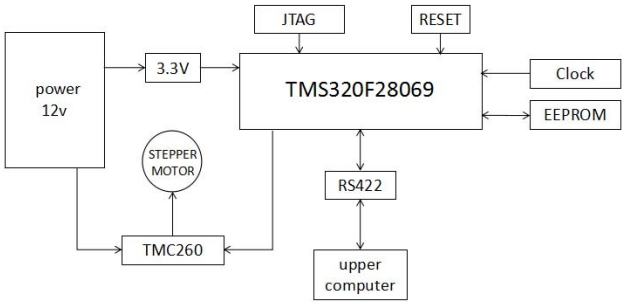


图 4 调焦系统结构框图
Fig.4 Structure diagram of focusing system

3.2 驱动电路设计及控制

驱动芯片 TMC260 的管脚定义及电路设计如图 5 所示。

微控制器通过 SCK、SDI、SDO 对 TMC260 进行初始化配置，之后只需向 STEP 管脚输入脉冲信号、向 DIR 管脚输入高低电平，即可通过驱动芯片完成对步进电机的控制。

驱动芯片 TMC260 的 STEP 管脚每收到一个脉冲信号，便会激励步进电机产生一个细分的步进。因此，改变微控制器发出脉冲信号的频率，就可以相应改变步进电机运动的速度。驱动芯片的 DIR 管脚控制电机驱动信号的电流方向，DIR 管脚接收到的电平为高，则电流由 OA1 流向 OA2、OB1 流向 OB2，若接收到的电平为低，则电流由 OA2 流向 OA1、OB2 流向 OB1。

因此，改变微控制器发出的电平高低，既可以控制步进电机运动的方向。

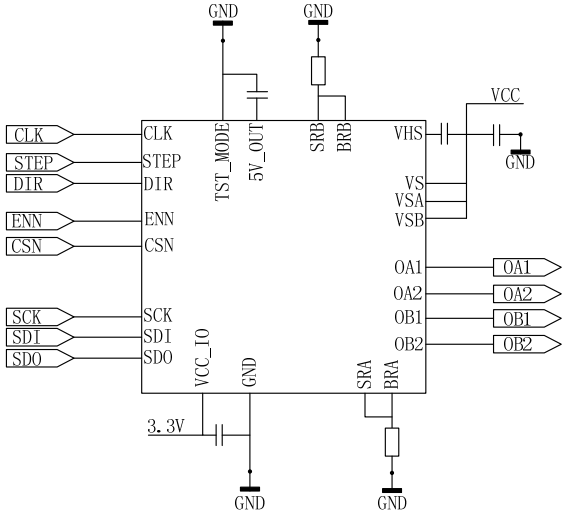


图 5 TMC260 电路图
Fig.5 Circuit diagram of TMC260

4 系统功能测试

在完成调焦系统步进电机控制算法改进和系统硬件设计之后，需要对系统功能进行测试。系统功能测试的目的是检验调焦系统在工作过程中，尤其是起停状态时是否发生失步情况，以及实际调焦精度是否满足应用要求。在实际测试中，系统加入了位置反馈

装置来检测电机位置，但不作为系统控制的反馈部分。测试使用的电机为海顿 HLM28H43-12-905，其技术参数如表 3 所示^[9]。

表 3 HLM28H43-12-905 直线步进电机技术参数
Table 3 Technique parameter of HLM28H43-12-905 Linear Actuator

Technique term	Technique parameter
Step angle	1.8°
Step	0.0254 mm
Minimal thrust	1.5 kg at 300 pps
Wiring	Bipolar
Operation voltage	12 V
Current/phase	0.18 A
Resistance/phase	68.5 Ω
Inductance/phase	39 mH
Power consumption	4.2 W
Rotor inertia	9.0 gcm ²
Weight	119 g

用两种方法对步进电机失步情况进行测量：第一种方法是让电机往复相同步数，检测电机行程变化规律；第二种方法是用编码器或传感器检测电机旋转情况。

首先用第一种方法进行测试，即在步数固定的情况下，让步进电机做往复运动，通过位置反馈装置检测每次步进电机停止的位置，并通过 CCS5.5 的 Graph 功能绘制出位置反馈装置的读出值，如图 6 所示。

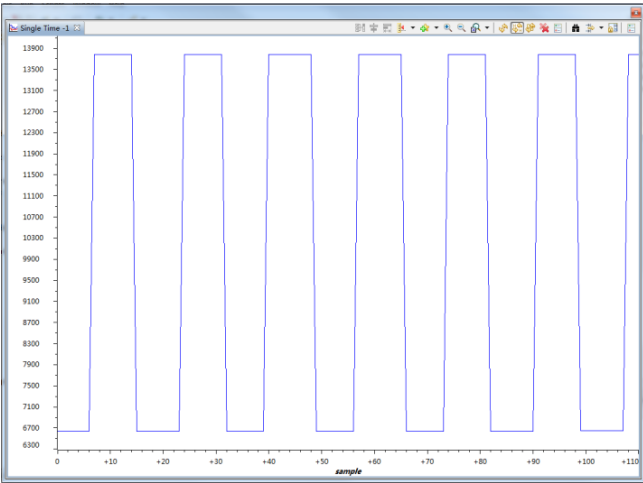


图 6 位置反馈值

Fig.6 Location feedback value

测试结果如图 6 所示，当步进数固定，步进电机做往复运动时，每个周期到达的位置是固定不变的，因此可证明步进电机每次往复运动的距离是相同的，每次运动相较于其他测试周期，不存在失步和过冲现象。但这种方法不能证明步进电机在运行过程中，每

次步进都是均匀平稳的。所以需要对每次步进进行分析测试。

第二种方法是对步进电机进行单步测试。位置反馈装置由长度为 27.5 mm 的电位器、AD 转换芯片等组成，AD 芯片有效位数为 $2^{14}=16384$ 。在半步步进状态下，电机步进长度为 0.0127 mm，计算可得，电机每步进一步，AD 采样值增加 7.57，即在测试中，AD 采样值应增加 7 或 8。当 AD 采样值小于 7 时，判定步进电机失步，当 AD 采样值大于 8 时，判定步进电机过冲。考虑到采样时的噪声干扰问题，在实际测试中设定的不失步采样区间为 [6, 9]，测试流程如图 7 所示。

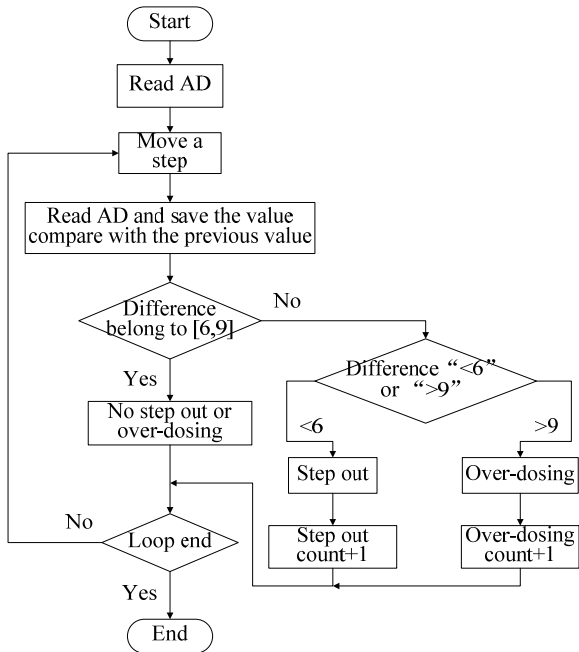


图 7 失步测试流程

Fig.7 Flow diagram of step out test

经过测试，步进电机在运行过程中不存在失步和过冲情况，且每次步进后，AD 采样值都落在区间 [6,9]，即，每次步进长度约为 0.010 mm~0.015 mm。

5 结束语

本文对步进电机指数型速度控制算法做出了相应改进，以适应实际工程应用，并提出了基于模糊控制的指数型速度控制策略，以满足红外热像仪对调焦机构高精度、高可靠性的要求。文中还设计了一种步进电机开环调焦控制系统，并进行了实际测试。测试结果表明，该开环系统定位精度能够达到 0.015 mm，可以满足实际使用要求。本文所述方法主要针对于行程较小的调焦环节，也可用作红外热像仪视场变倍控制。但受限于步进电机自身特点，视场切换速度较慢。

参考文献:

- [1] 王晓东, 杨南生. 红外搜索跟踪系统伺服机构模糊-PID 控制器设计及仿真研究[J]. *红外技术*, 2007, **29**(2): 107-111.
WANG Xiaodong, YANG Nansheng. Study on Fuzzy-PID Servo Controller Design and Simulation in Infrared Search and Track System[J]. *Infrared Technology*, 2007, **29**(2): 107-111.
- [2] 孙孔政, 徐抒岩, 曹小涛, 等. 基于矩频曲线的步进电机加减速控制[J]. *微电机*, 2014, **47**(1): 81-85.
SUN Kongzheng, XU Shuyan, CAO Xiaotao, et al. Speed Control of Step Motor Based on Torque Curve[J]. *Micromotors*, 2014, **47**(1): 81-85.
- [3] Mojtaba Khalilian, Ali Abedi, Adel Deris Zadeh. Position Control of Hybird Stepper Motor using Brain Emotional Controller[C]//*Energy Procedia*, 2012, **14**: 1998-2004.
- [4] 曾康玲, 杨向宇, 赵世伟, 等. 步进电机指数型加速曲线优化与实现[J]. *微电机*, 2014, **47**(6): 36-40.
ZENG Kangling, YANG Xiangyu, ZHAO Shiwei, et al. Optimization of Exponential Acceleration Curve of Stepper Motor and Realization on PIC[J]. *Micromotors*, 2014, **47**(6): 36-40.
- [5] 张涛. 步进电机快速定位方法研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2012.
ZHANG Tao. Fast Position Study For Stepping Motor[D]. Beijing: North China University of Technology, 2012.
- [6] 石辛民, 郝整清. 模糊控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2008: 89-93.
SHI Xinmin, HAO Zhengqing. *Fuzzy Control and MATLAB Simulation*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, Beijing Jiaotong University Press, 2008:89-93.
- [7] 刘虎, 张仁杰, 刘振, 等. 基于 ARM 和 TM262 的步进电机运动控制系统[J]. *仪表技术与传感器*, 2015, **10**: 57-58
LIU Hu, ZHANG RenJie, LIU Zhen, et al. Design of Control System of Stepping Motor Based on ARM and TMC262[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2015, **10**: 57-58
- [8] 刘芸邑, 郑婕, 李燕, 等. 基于 AD2S1210 的旋变解码电路设计[J]. *红外技术*. 2016, **38**(12): 1042-1046.
LIU Yunyi, ZHENG Jie, LI Yan, et al. Design of Resolver Decoding Circuit Based on AD2S1210[J]. *Infrared Technology*, 2016, **38**(12): 1042-1046.
- [9] 海顿科克. 精密直线运动产品样本和设计指南[M]. 常州: 海顿直线电机(常州)有限公司, 2013.
Haydon Kerk. *Guide for Sample and Design of Precision Linear Motion Products*[M]. Changzhou: Haydon Linear Motor(Changzhou)Ltd., 2013.