

# 基于 ARM 的快速反射镜鲁棒控制系统设计与实现<sup>\*</sup>

王中石 王福超

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中国科学院航空光学成像与测量重点实验室 长春 130033)

**摘要:**快速反射镜凭借其响应速度快、控制带宽高、抗干扰能力强的优良特性,被广泛应用到各种空间光学领域。尽管国内有一些针对快速反射镜的研究,但少有针对其控制系统设计的研究。本文针对快速反射镜的工作原理、控制算法工程可实现性和电路成本、尺寸等问题,设计了一种基于 STM32F4 的 ARM 快速反射镜控制系统,该系统采用干扰观测器结合 PID 的闭环控制算法。实验结果表明:采用干扰观测器和 PID 的控制算法相比传统 PID 控制算法,具有动态稳定精度高、鲁棒性强的特点。基于 ARM 的快速反射镜控制系统工作正常,能够实时完成控制算法的解算,便于工程实现。

**关键词:**ARM;快速反射镜;干扰观测器;鲁棒控制

**中图分类号:**TP273 TH89 TN911 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:**510.8010

## Design and implementation of a fast-steering mirror robust control system based on ARM

Wang Zhongshi Wang Fuchao

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** Fast-steering mirror is widely used in various kinds of space optical fields which have fast response speed, high control bandwidth and high ability of anti-interference. Although there are some researches on FSM, there are few studies on the design of the control system. According to the working principle of FSM, the control algorithm reliability in engineering, the cost and size of the circuit and so on, this paper designs a FSM control system based on STM32F4 ARM, which adopts disturbance observer and PID closed-loop control algorithm. The experimental results show that compared with the traditional PID control algorithm, the disturbance observer and PID control algorithm have the characteristics of high dynamic stability and high robustness. The control system of FSM based on ARM is working well, which can finish the calculation of the control algorithm in real time, and is convenient for engineering.

**Keywords:** ARM; fast-steering mirror; disturbance observer; robust control

### 1 引言

近年来,快速反射镜(fast-steering mirror, FSM)在空间光学领域中受到了越来越广泛的关注,由于具有响应速度快,控制带宽高,抗干扰能力强的优良特性,快速反射镜被广泛的应用于各种实际工程项目中<sup>[1]</sup>。

压电陶瓷和音圈电机是快速反射镜最常用的两种驱动元件<sup>[2-3]</sup>。但是压电陶瓷的驱动电压一般较高,行程却相对较小,同时抗冲击和振动的能力较弱。因此,本文重点针对音圈电机作为执行机构的快速反射镜进行研究。音圈电机因其结构类似喇叭而得名,它特别适合短行程的

闭环伺服控制系统,由于音圈电机是一种非换流动力装置,其定位精度完全取决于反馈及控制系统。因此,快速反射镜的闭环控制系统是保证其发挥出自身特性的决定性因素。文献[4]设计了一种基于单片机 dsPIC30F401 的快速反射镜激光对准系统,采用步进电机作为执行元件,控制快速反射镜开环运动,并没有控制算法,属于快速反射镜最基本的使用。文献[5]中设计的算法是在半实物仿真机柜中实现的,工程使用具有一定的难度。文献[6]基于 TMS320F2812 DSP 实现了快速反射镜双闭环控制系统,但是由于使用普通 PID 闭环控制,所以控制效果一般,并且基于 DSP 的硬件电路成本较高、电路尺寸较大,特别

收稿日期:2015-12

<sup>\*</sup> 基金项目:中国科学院国防创新基金项目、中科院长春光机所创新项目(Y3CX1SS149)资助

是加入一些外设电路之后,电路复杂程度较高。

针对以上问题,本文选用 STM32F4 系列 ARM 作为主控芯片,它不仅具有成本低廉、可靠性高、外围接口较多、体积小等优点,并且具有硬件 FPU 单元以及 DSP 指令。同时,它的主频也高达 168 MHz。因此本文设计了一种基于 ARM 的快速反射镜鲁棒控制系统。

目前,针对 FSM 的控制算法多数是在传统的 PID 控制基础上辅以其他先进的控制算法<sup>[7]</sup>。本文针对 ARM 控制系统设计一种较为实用的算法,在 PID 闭环控制中加入干扰观测器(disturbance observer, DOB),以此来抑制外部干扰力矩和模型参数变化导致的输出差别,增加系统的鲁棒性。

## 2 FSM 数字控制系统硬件设计

### 2.1 硬件电路组成及选型

本文设计的快速反射镜硬件控制系统,主要包括主控芯片、数模/模数转换、功率放大和通信模块 4 部分,如图 1 所示。

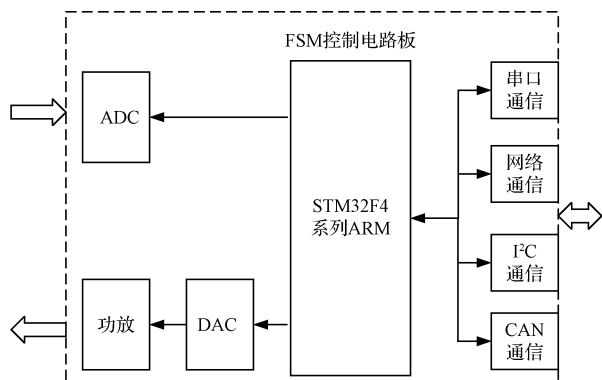


图 1 硬件电路组成

主控芯片采用 STM32F4 系列基于 Cortex-M4 的 ARM。相比 STM32F1/F2 等其他 Cortex-M3 内核的产品,它最大的优势就是增加了硬件 FPU 单元以及 DSP 指令,同时,它的主频也提高到了 168 MHz。由于本系统需要设计较复杂的控制算法,支持浮点运算和高主频处理速度是主要的选择依据。同时 STM32F4 系列 ARM 的外设功能十分强大,因此选择 STM32F4 系列 ARM 为核心完成快速反射镜的控制电路板。

ADC 采用 Analog Devices 公司的 AD7656 芯片,它具有独立的 6 个通道,每个通道都是 16 bit、快速、逐次逼近型 ADC,并集成到一个 SOIC 封装中。吞吐速率高达 250 kSPS,最高可以处理 12 MHz 的输入频率,具有并行和高速串行接口。

DAC 采用 Analog Devices 公司的 AD667 芯片,它是一款完全电压输出的 12 bit 数模转换器。输入的逻辑电平支持 TTL 和 CMOS 电平,十分方便直接连接微控制器。通过不同的外部电路连接,可以设置双极性输出或者

单极性输出及输出电压范围,最高可达 ±10 V,实际调试发现线性度十分理想。

功率放大器采用 MSK 公司 2451,它是一种大功率、双通道的功率运算放大器,内部包含两个运放,电源电压最大 ±40 V,输出连续电流最大 8 A,峰值电流 10 A。本文中采用双通道并连接线方式,分别连接两路 DA,电压放大两倍。连接成电压控制电流的电路结构,输入电阻( $R_i$ )和反馈电阻( $R_f$ )必须非常匹配,阻抗匹配好于 0.1%,电阻最好采用精密电阻。

通信部分主要应用 ARM 丰富的外设接口,RS422 串口、以太网接口、I<sup>2</sup>C 接口、CAN 接口等,既方便与外部设备通信,又可以适应不同接口的传感器。串口部分采用 MAX3490 将 ARM 自身的 UART 接口转成 RS422 串口,方便通信线长距离传输。以太网接口使用 STM32F4 内部的 MAC 控制器外加 LAN8720A 芯片,该芯片采用 RMII 接口与 STM32F4 通信,I/O 占用较少,且支持 auto mdix 功能,实现 10 M、100 M 网络的支持。I<sup>2</sup>C 接口可以使用 STM32F4 普通的 I/O 口模拟 I<sup>2</sup>C 时序来实现,这样最大的好处就是方便移植<sup>[8-9]</sup>。CAN 接口采用 TJA1050 芯片实现电平转换。

### 2.2 硬件电路调试

快速反射镜系统的带宽主要受到机械谐振、控制器、传感器等因素的影响<sup>[10]</sup>,其中在数字控制系统中,快速反射镜的带宽受到采样频率和系统延迟的限制,还与 AD、DA 有关<sup>[11]</sup>。

本系统中的控制电路板主要应用的模块就是数模和模数转换模块,但是通常 ADC、DAC 都会出现一定的非线性和偏移量等问题,并且本控制系统直接使用 ADC/DAC 的电压值分别作为反馈量和控制量,因此,保证它们输入输出的准确性对于提高系统控制精度是十分必要的。

针对 AD667 芯片,设计双极性输出 ±10 V 工作模式,正常情况下输出范围是 -10.000 V 到 +9.995 V。首先进行偏移校准,输出寄存器所有位置 0,调节相应电位计,理论上测得输出电压 -10 V。接着进行增益校准,输出寄存器所有位置 1,调节另一个电位计,测得输出电压 +9.995 V 即可。最后,在量程内随意选择几个值赋值给输出寄存器,测量输出端电压同理论值进行比较,当输出范围是双极性 ±10 V 时,转换式如(1)。

$$V_{out} = \frac{DaIn + 10}{1 \text{ LSB}} (1 \text{ LSB} = 20 \text{ V} / 4 \text{ 096} = 1.22 \text{ mV}) \quad (1)$$

式中:  $DaIn$  是输入的模拟电压值,  $V_{out}$  是输出的数字量。实际使用过程中发现不需要校正,如果出现一点偏移或者非线性可以采用数学拟合方式针对式(1)进行校准。

针对 AD7656 芯片,设计基准电压 12 V,双极性输入,输入范围 ±10 V。片选信号低电平有效,可以接地设计,而  $\overline{RD}$  信号在出现低电平脉冲时可以用来获取转换结果。当 BUSY 信号变为低电平后即可开始读取同步采样的

ADC 通道。如果 CONVST A、CONVST B 和 CONVST C 同时变低,需要 6 次读取操作从 V1、V2、V3、V4、V5 和 V6 获得转换结果,转换结果以升序输出。要获得指定性能,建议在转换后进行读取。对于未使用的输入通道应将相应 CONVST x 引脚与 VDRIVE 相连。调试过程中,可以将 DAC 的输出端连接 ADC 的输入端,通过 DA 输出指定的电压,测试 AD 端口读取的准确性,如果出现偏差也可以采用数学拟合方式进行校准。AD7656 的 LSB 大小为 FSR/65 536。

### 3 基于 DOB 的控制系统设计

#### 3.1 干扰观测器的基本原理

音圈电机驱动的快速反射镜有时会受到外界干扰,并且模型参数变化等不确定性因素对于快速反射镜控制系统的影响是很大的,基于干扰观测器的闭环控制系统对于各种外部干扰和模型参数的小范围变化具有很强的抑制能力,具有极好的鲁棒性。干扰观测器的基本思想是将外部干扰力矩和模型参数变化导致的实际输出与名义模型输出的差别,等效的加到输入控制端进行补偿,实现针对干扰的观测和控制。

但是实际应用中如有如下困难<sup>[12]</sup>:

- 1) 被控对象的模型无法十分准确的估计出来,并且它的逆模型通常在物理上是不可实现的;
- 2) 反馈中包含测量噪声的影响会导致控制效果的下降。

针对以上两个问题,进一步研究,可以在反馈通道上加入低通滤波器  $Q(s)$ , 得到如图 2 所示的干扰观测器原理,其中虚线框中的部分就是干扰观测器。

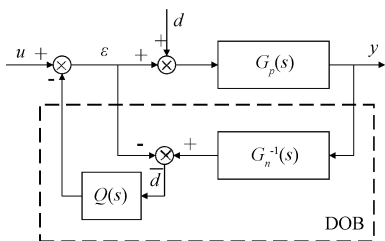


图 2 干扰观测器原理

图中:  $G_p(s)$  是被控对象的传递函数,  $G_n^{-1}(s)$  是被控对象的名义模型的逆函数,  $d$  是等效的干扰,  $\bar{d}$  是观测出的干扰,  $u$  是控制输入量,  $y$  是控制输出量。根据图文可以得到:

$$\bar{d} = (u+d)G_p(s)G_n^{-1}(s) - u = d \quad (2)$$

即干扰观测器观测出的干扰就是理论上系统中产生的等效干扰。

#### 3.2 干扰观测器的简化

通常音圈电机的数学模型可以看成二阶惯性系统,因此针对快速反射镜的控制就是二阶惯性系统的控制。针对被控对象的传递函数设计低通滤波器,使  $Q(s)$  分子阶

数为 0, 保证其在工作的频段内可以有有效的抑制干扰, 可以取分母阶次为 2 次<sup>[13]</sup>。现假设音圈电机的传递函数为:

$$\frac{1}{A_n \times s^2 + B_n \times s} \quad (3)$$

则根据干扰观测器原理, 得到等效的名义模型, 经过数学等效变换, 有下式:

$$G_n^{-1}(s) = A_n \times s^2 + B_n \times s = (A_n + \frac{B_n}{s}) \times g \times (\frac{s^2 + g}{g}) - (A_n + \frac{B_n}{s}) \times g = \frac{G_n^{-1}(s)}{s^2} \times g \times \frac{1}{Q(s)} - \frac{G_n^{-1}(s)}{s^2} \times g \quad (4)$$

可知,

$$G_n^{-1}(s)Q(s) = \frac{G_n^{-1}(s)}{s^2} \times g - \frac{G_n^{-1}(s)}{s^2} \times g \times Q(s) \quad (5)$$

可以将上述干扰观测器的原理框图进行等效变换, 得到基于干扰观测器的快速反射镜 PID 闭环控制结构, 如图 3 所示。

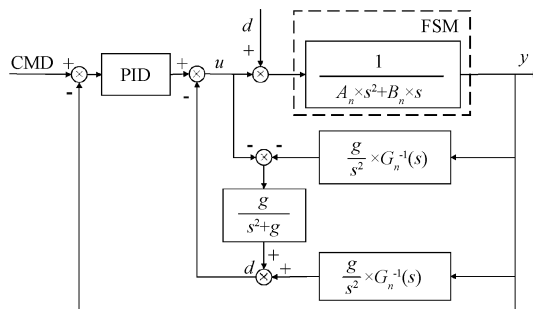


图 3 基于 DOB 的快速反射镜 PID 闭环控制系统结构

## 4 实验

#### 4.1 实验环境搭建

实验使用大功率电源提供快速反射镜和控制电路板的电源, 保证稳定而持续的电流输出能力。快速反射镜系统固定在实验台上如图 4 所示。基于 ARM 的快速反射镜控制电路板实物如图 5 所示。将控制电路板的功率放大输出端与快速反射镜的输入端连接, 快速反射镜的位置传感器输出端连接控制电路板的 AD 输入端, 作为控制系

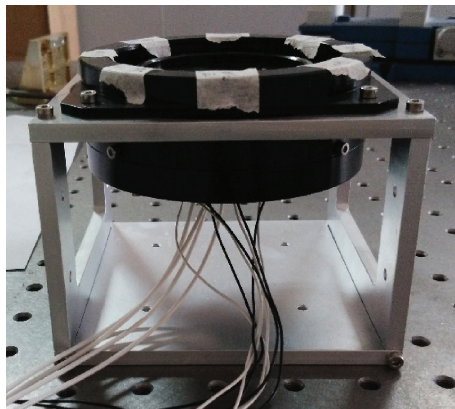


图 4 测试快速反射镜实物

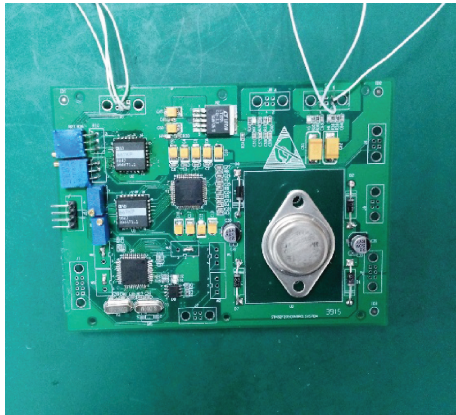


图5 快速反射镜控制电路板

统的反馈信号控制电路板工作定时周期 1 ms。在线调试使用 J-Link 仿真器连接调试机。实验过程中,控制电路板把实验数据通过 RS422 串口发送到调试机中存储,既可以减轻控制电路板的数据存储压力,也可以方便后续数据处理。

#### 4.2 快速反射镜 PID 闭环控制带宽

根据被控对象模型参数形式,设计基于干扰观测器的 PID 控制器,快速反射镜的位置传感器信号作为反馈信号,参数整定  $P=0.4, I=20$ ,针对快速反射镜闭环系统进行扫频处理,得到幅频相频特性曲线如图 6 所示。

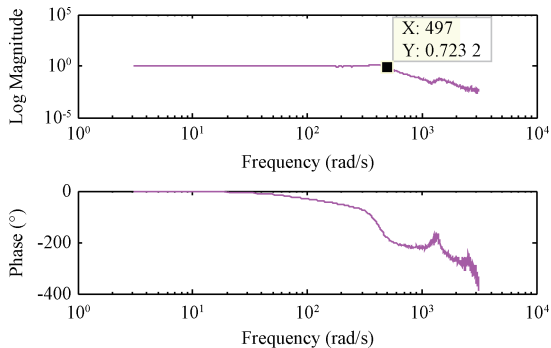
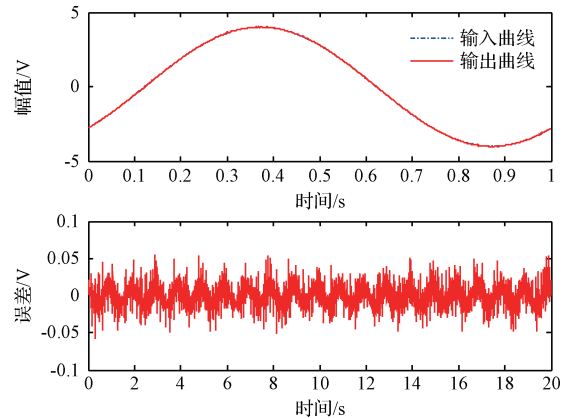


图6 快速反射镜 PID 闭环控制系统幅频相频特性曲线

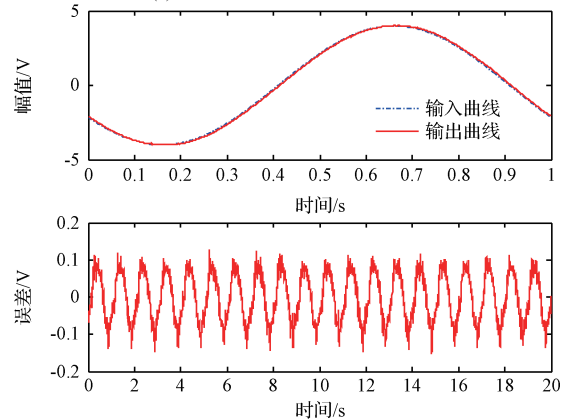
通过上图可以估算闭环系统控制带宽,当幅频特性曲线中幅值衰减到 0.707 时对应的频率点就是快速反射镜的闭环控制带宽,即 497 rad/s(79.26 Hz),约 80 Hz,基本满足实际控制系统的需要<sup>[14]</sup>。

#### 4.3 基于 DOB 的快速反射镜 PID 闭环控制

实验测试输入指令  $4^\circ$  射镜 PID1 Hz 正弦信号,加入干扰观测器的 PID 闭环控制的输入输出和误差曲线如图 7(a)所示,为了对比干扰观测器的效果,同时测试未加干扰观测器的输入输出和误差曲线如图 7(b)所示。通过对比可以发现,采用普通 PID 控制算法跟踪输入指令,存在一定的误差,并且相位有一些滞后;加入干扰观测器后,结合同样的 PID 控制器,跟踪  $4^\circ$  射镜 PID1 Hz 的正弦信号,误差明显变小,相位滞后现象也消除了。经计算,使用



(a) 加入 DOB 的 PID 闭环控制跟踪正弦效果



(b) 普通 PID 闭环控制跟踪正弦效果

图7 加入 DOB 的 PID 与普通 PID 闭环控制跟踪正弦效果

PID 控制算法的误差均方根值是 0.063 8,加入干扰观测器之后的误差均方根值降到 0.011 4。

## 5 结 论

综上所述,本文设计的基于 ARM 的快速反射镜鲁棒控制系统工作正常,性能良好,可以实现基于干扰观测器的 PID 闭环控制算法,算法实时性较好,具有一定的鲁棒性。在实验过程中,通过扫频得到了音圈电机驱动的快速反射镜的数学模型,通过参数整定设计 PID 控制器,完成系统闭环带宽测试,对比实验中,输入幅值  $4^\circ$  射镜 PID 频率 1 Hz 的正弦信号时,使用干扰观测器的 PID 闭环控制系统误差的均方根值是使用普通 PID 闭环控制系统的 1/6。实验结果表明,基于 DOB 的快速反射镜闭环控制系统效果明显,具有较好的动态跟踪效果和鲁棒性,针对 DOB 控制算法设计的 ARM 硬件电路平台工作良好,能够满足算法的处理速度,具有较好的实时性,对今后的工程应用具有一定的实际价值。

### 参 考 文 献

- [1] 徐新行,杨洪波,王兵,等. 快速反射镜关键技术研究[J]. 激光与红外,2013,43(10):1095-1103.
- [2] 王昱棠,张宇鹏,徐钰蕾. 压电陶瓷驱动快速反射镜

- 双闭环控制[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 68-72.
- [3] 王帅, 吴庆林, 张斌, 等. 用于快速反射镜的压电陶瓷驱动系统设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(7): 6-10.
- [4] 彭树萍, 王伟国, 于洪军. 激光对准快速反射镜控制系统的设计[J]. 激光技术, 2013, 37(4): 431-436.
- [5] 王福超, 田大鹏, 王昱棠. 基于 DOB 和 ZPETC 的 PWM 驱动快速反射镜控制方法研究[J]. 机电工程, 2015, 32(7): 903-908.
- [6] 周俊鹏. 快速反射镜 DSP 的伺服控制系统[D]. 长春: 长春工业大学, 2015.
- [7] 徐飞飞, 刘莎, 尹明东, 等. 基于反射镜补偿的粗精组合稳定控制系统性能对比与分析[J]. 应用光学, 2013, 34(1): 15-20.
- [8] 刘军, 张洋, 严汉宇, 等. 精通 STM32F4[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
- [9] 唐跃林, 郑徐豪, 吴德操, 等. 一种基于 ARM 处理器 STM32 的手持式智能化自动扶梯同步率测试仪研制[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(3): 65-68.
- [10] 林俊兰. 基于模拟电路的快速反射镜控制技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [11] 邓耀初. 基于快速反射镜的光束指向稳定技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [12] 张雪菲, 冷雪, 李文明, 等. 基于干扰观测器的航空成像系统的扰动抑制[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(12): 2793-2799.
- [13] LEE H S. Robust Digital Tracking Controllers for High-Speed/High-Accuracy Positioning Systems[D]. Berkeley: University of California, 1994.
- [14] 杨晓霞, 孟浩然, 张斌, 等. 大型光电系统精跟踪带宽设计方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12): 1382-1388.

## 作者简介

**王中石**, 1988 年出生, 工学硕士, 研究实习员, 主要研究方向为电机控制、光电平台伺服控制。

E-mail: wzsiatf@163.com

**王福超**, 1988 年出生, 硕士, 研究实习员, 主要研究方向为光电平台伺服控制。

E-mail: fuchaow@163.com

(上接第 73 页)

- [4] BENASCIUTTI D, TOVO R. Spectral method for lifetime prediction under wide-band stationary random processes[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(8): 867-877.
- [5] 王树东, 何明. 基于 LabVIEW 高速采集系统方法的研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(7): 84-87.
- [6] 毕虎, 律方成. LabVIEW 中访问数据库的几种不同方法[J]. 微计算机信息, 2006, 22(1): 131-134.
- [7] 尹技虎, 王峰基. 基于 LabSQL 的 LabVIEW 数据库访问技术[J]. 仪表技术, 2011(4): 55-56.
- [8] 吴松涛, 龚家伟. 在 LabVIEW 中利用 LabSQL 实现数据库访问[J]. 国外电子测量技术, 2006, 25(4): 53-56.
- [9] 常涛, 安霆, 庄会满, 等. 基于 ActiveX 的 LabVIEW 数据库访问功能[J]. 兵工自动化, 2006, 25(1): 45-46.
- [10] 田雪, 郑敏信. 基于 LabVIEW 的光伏储能控制系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(12): 53-56.

## 作者简介

**陈寅**, 1986 年 4 月出生, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为振动疲劳和海量数据处理。

E-mail: chenying3@comac.cc