

文章编号: 1672-8785(2017)08-0031-06

基于 FPGA 的绝对式圆感应同步器 测角系统的设计与实现

王 飞 付 晶 韩昌佩

(中国科学院上海技术物理研究所红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 为了实现对扫描控制机构的高精度角度测量, 以绝对式圆感应同步器作为角度测量传感器, 设计了高精度、高稳定度的测角系统。通过硬件电路设计, 该系统实现了高测角精度和测角稳定度; 通过 FPGA 程序实现了绝对角度测量的高可靠性。实际测试结果表明, 该系统的抗干扰能力强, 角度稳定分辨率可达 $0.1''$, 角度标定指向精度优于 $1.1''$ (3σ)。

关键词: 测角; 圆感应同步器; 高精度; 高稳定度; 抗干扰

中图分类号: TP **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.08.007

Design and Realization of Absolute Round Inductosyn Angle Measuring System Based on FPGA

WANG Fei, FU Jing, HAN Chang-pei

(Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology,

Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: To realize high precision angle measurement on a scanning control machine, taking an absolute round inductosyn as the angle measuring sensor, a high precision and high stability angle measuring system is designed. Through the design of hardware circuits and FPGA program, high precision and high stability angle measurement and high reliability absolute angle measurement are achieved respectively. The actual experimental results show that the system has strong anti-interference ability. Its stable angle resolution is up to $0.1''$ and its angle pointing accuracy is better than $1.1''$ (3σ).

Key words: angle measurement; round inductosyn; high accuracy; high stability; anti-interference

0 引言

高轨遥感卫星是通过控制扫描镜的转动实现对地观测的。为了能得到更高精度的卫星遥感数据, 需要有一套高精度的扫描控制系统。其中, 测角系统是其重要组成部分, 该系统的重要指标直接决定了控制系统的性能。测角系统中的测量元件可以为编码器、旋转变压器和感应

同步器等。感应同步器是一种电磁传感元件, 它可以将角位移信号转换成电压信号, 由于是多级结构设计, 对误差有平均效应, 起到了补偿作用^[1], 因此, 感应同步器具有很高的精度。另外, 感应同步器还具有使用寿命长、可靠性高、成本低以及受环境影响小等一系列优点, 被广泛应用在航空、航天等军事领域^[2]。

收稿日期: 2017-04-07

作者简介: 王飞 (1987-), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 助理研究员, 主要从事高精度角度的获取与测试研究。

E-mail: wangfei@mail.sitp.ac.cn

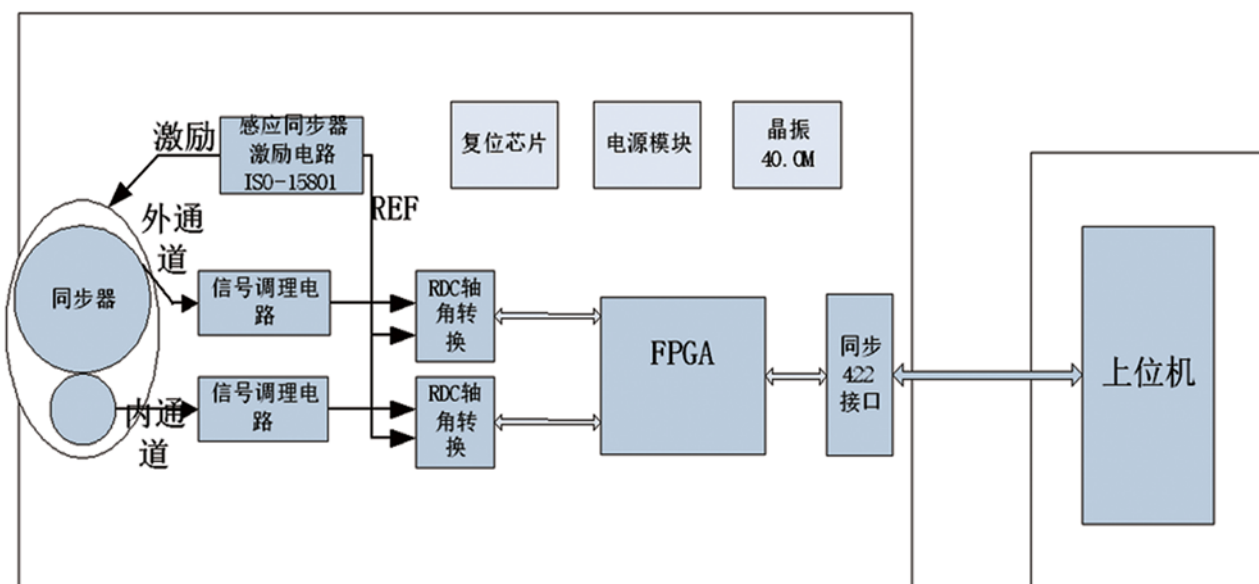


图 1 测角系统硬件框图

本文旨在设计一套高性能的测角系统，其角度稳定度小于 $0.3''$ ，角度标定指向的精度优于 $1.5''$ (3σ)。系统选用感应同步器进行角度采集。重点描述了感应同步器测角系统的硬件实现和数据融合，设计了感应同步器的输入激励电路，并针对感应同步器的输出为弱小信号的特点，设计了弱小信号放大调理电路；然后，在 FPGA 中实现内外通道的数据融合，得到感应同步器的绝对角度；最后，通过试验对测角系统的静态稳定度、动态角度连续性和角度指向精度进行了测试。测试结果表明，该测角系统可以有效抑制外界干扰，达到预期效果，显著提高了系统性能。

1 硬件实现

本系统采用的感应同步器为绝对式圆感应同步器，由内通道和外通道组成，内通道为 1 对级，外通道有 180 对级。感应同步器一共有四种不同的工作方式，本系统采用单相激励、双相输出鉴幅检测的工作方式^[3]。针对这种工作方式，设计了硬件电路。

测角系统的硬件电路主要由同步器激励电路、弱小信号调理电路、RDC19220S(RDC)轴角转换电路和 FPGA 数字逻辑电路组成，硬件框图

如图 1 所示。

1.1 同步器激励电路

感应同步器利用电磁感应原理将角位移信号转换为电压信号，需要外界提供激励信号才能工作。同步器激励电路的功能是为感应同步器提供激励信号，为轴角转换芯片提供参考信号(Reference, REF)，其输出信号的幅值和频率的稳定性会影响到系统的测角精度^[4]。

感应同步器采用正弦波信号进行激励。振荡器选用 DDC 公司生产的 OSC-15801 芯片构建。通过调节芯片的外围电容可以设置同步器的激励信号频率。振荡器工作时存在三次谐波。同步器对三次谐波拥有更高的传递比。为了消除谐波成分，需要对振荡器输出的激励信号进行滤波处理。采用的滤波器形式为 4 阶巴特沃斯带通滤波器，其中心频率为 5 kHz，带宽为 1 kHz。滤波器的电路形式如图 2 所示，在滤波器的后面增加了一级功率驱动电路。

通过设计激励信号放大电路，使激励信号满足同步器激励信号幅值的设计要求。通过设计参考信号放大电路，使 REF 信号满足内通道和外通道信号幅值的设计要求。表 1 为激励电路信号的设计指标。

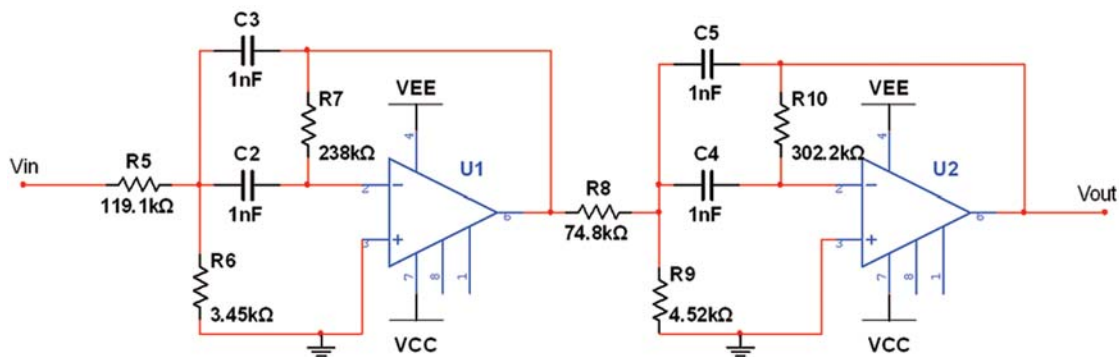


图 2 带通滤波电路

表 1 激励电路的设计指标

信号类型	设计指标
激励信号频率	5.0 kHz $\pm$ 10 Hz
激励信号幅值	6.0 V _{pp} $\pm$ 20 mV
REF 信号幅值	2V _{RMS} $\pm$ 20 mV

1.2 弱小信号调理电路

绝对式圆感应同步器同时输出四路信号：内通道的正弦信号 (SIN) 和余弦信号 (COS)，外通道的正弦信号和余弦信号。外通道的信号幅值为毫伏级别 (典型值为 1 mV)，内通道的信号幅值为微伏级别 (典型值为 0.25 mV)。感应同步器的输出信号最终要输入到 RDC 端，信号需要放大几千倍。为了实现 RDC 转换无误差，实现高稳定度、高精度的测角要求，经过弱小信号调理电路后，信号幅值和相位必须满足设计指标，见表 2。

表 2 信号调理电路的设计指标

信号类型	设计指标
RDC 输入信号幅值	2 V _{RMS} $\pm$ 20 mV
SIN 与 COS 信号最大值时幅值差	<1 mV
SIN 相与 COS 相信号相位差	<0.5°
SIN 相与 REF 信号相位差	<0.5°
COS 相与 REF 信号相位差	<0.5°

为了降低电路本身对系统噪声的影响，信号放大电路采用多级级联放大的形式，由前置放大电路和主放大电路组成。由于前置放大电路对信号噪声的影响最大，所以，需要选用低噪声的运算放大器进行电路设计，前置放大电路设计为差分放大器形式，如图 3 所示。

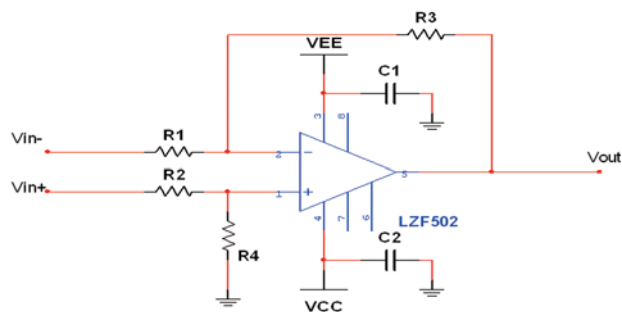


图 3 前置放大电路的形式

图 3 中，电阻 R1 和 R2 的阻值不能太大，必须为低阻值、低温漂的精密电阻，R3 和 R4 的阻值由放大倍数决定，同样要求是低温漂的精密电阻。

信号幅值的匹配由主放大电路完成，信号相位的匹配由移相电路完成。为使电路更容易处于设计指标的状态，所有的调幅、调相电阻均设计为三个封装。信号经两级放大后，再进行移相，最后进行滤波，完成信号的调理工作。调理电路的滤波器形式和同步器激励电路的一致。

1.3 RDC 轴角转换电路和 FPGA 数字逻辑电路

轴角转换选用 RDC19220S 芯片，该芯片为美国 DDC 公司生产的追踪行轴角转换器。配合相应的外围电路，根据给出的系统指标，可以很方便地设定 RDC 的工作状态。

RDC 轴角转换电路分为模拟部分和数字部分。模拟部分需要根据实际需求计算外围电路电阻电容的参数值，数字部分需要通过 RDC 上的数字管脚来设定数据的分辨率和数据的接口形式。FPGA 通过 RDC 读取时序控制 RDC 进行轴角转换，并以并行方式读取转换结果，在完成

对数据的各项处理工作后通过 RS422 接口与上位机进行通信。

本系统设定的 RDC 工作状态是, 内通道和外通道的工作分辨率为 16 bits, 带宽为 280 Hz, 通过 INH 管脚实现 FPGA 对 RDC 的读取时序控制。

2 软件实现

FPGA 软件的主要功能是控制 RDC 读取时序, 获取感应同步器的角度数据, 对角度数据进行补偿, 完成数据融合, 并发送融合后的数据给上位机。本文重点介绍程序的核心部分数据融合。

(1) 数据融合的意义

由 RDC 输出到 FPGA 的信号是感应同步器的内通道和外通道的独立角度数据, 需要进行数据融合以实现绝对机械角度的变换。

(2) 数据融合的原理

数据融合的原理是, 利用内通道的角度值定位外通道在当前位置处的机械周期数, 然后利用外通道的角度值来反映当前位置的精确角度。

2.1 内通道数据补偿

定义电角度 θ_w 为 0° 时对应的外通道为感应同步器的外通道零位, 对应的内通道叫做内通道理论零位。对于外通道为 180 对级的感应同步器, 其外通道的一个机械周期为 2° , 总共有 180 个外通道零位点和 180 个 2° 机械周期。内通道的理论零位角度值为 $360/180 \times n$ ($n=0, 1 \cdots 179$)。在实际系统中, 外通道处在零位时, 内通道的角度值为 $360/180 \cdot n \pm M$ ($n=0, 1 \cdots 179$, M 为偏离值), 并不等于内通道的理论零位值。其中, M 不可以无限大。若超过极限值 (设计值为 0.875), 会出现周期定位错误的情况。为了尽可能地减小 M 值, 对采集到的内通道数据进行了修正, 修正采用的方法是分段线性补偿。

经过 RDC 数字量化后, 外通道 65536 码字表示 2° , 内通道 65536 码字表示 360° , 通过转动扫描镜获取工作范围内内通道和外通道的原始

角度数据, 得到实际的零位与理论零位之间的偏差。根据偏差曲线进行分段函数补偿, 把零位偏差压缩到 ± 20 码字以内。这一工作是在 FPGA 之外实现的, 得到的分段修正函数构成数据融合的一部分。

图 4 为原始的零位误差值。其中, 横坐标为外通道零位点个数, 纵坐标为码字。经过修正函数补偿后, 得到的零位误差值被控制在 ± 20 码字, 如图 5 所示。

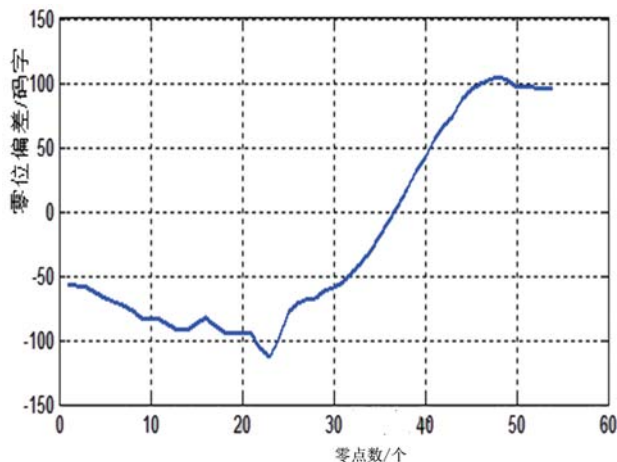


图 4 内通道和外通道的原始零位误差

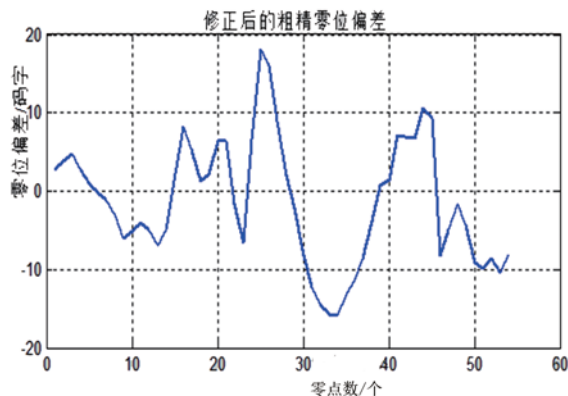


图 5 内通道和外通道的修正后零位误差

2.2 外通道的周期修正

经过修正后的内通道和外通道零位仍然存在一定的零位偏差。融合算法需要对由内通道计算出来的外通道当前测量周期数进行修正, 记修正量为 C 。图 6 为周期修正的示意图。

图 6 为绝对式圆感应同步器角度拉伸后的示意图。当外通道处在零位点时, 内通道的角度

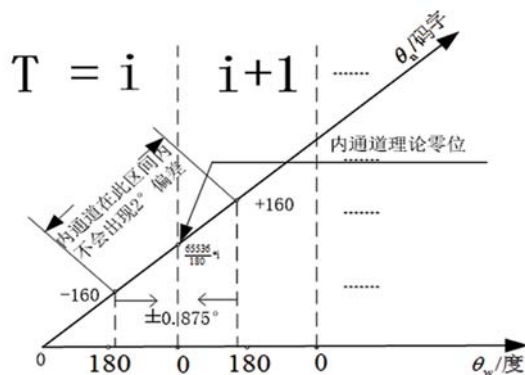


图 6 周期修正示意图

值在内通道理论零位处允许有 $\pm 0.875^\circ$ 的偏差。当外通道角度值处在 $T = i$ ($i < 180$, 下同) 区间, 内通道的角度值处在 $T = i + 1$ 区间内, 且角度值与理论内通道角度值的偏差小于 0.875° 时, 修正量 $C = -1$ 。当外通道的角度值处在 $T = i + 1$ 区间, 内通道的角度值处在 $T = i$ 区间内, 且角度值与理论内通道角度值偏差大于 -0.875° 时, 修正量 $C = 1$ 。

数据融合后, 数据长度为 24 bits, 其中, 高 8 bits 指示当前外通道的周期位置, 低 16 bits 为外通道的原始数据, 反映在当前 2° 机械周期内位置信息的绝对值。

3 试验结果

系统设计完成后, 对角度稳定度和角度指向精度进行了测试。测试角度稳定度时, 将扫描镜锁定, 读取感应同步器的位置数据。进行角度指向精度标定测试时, 借助第三方工具经纬仪 (型号为 Leica TM5100) 测试了 $\pm 6^\circ$ 区间大角度标定和 $\pm 2^\circ$ 区间小角度细分标定, 并将指向角度与经纬仪读出的角度进行了比较, 反映出了系统的指向精度。

图 7 和图 8 中, 横坐标为采样点数, 纵坐标为码字。从图中可以看出, 系统的静态角度数据跳动只有 1 个码字, 换算成角度值为 $0.1''$; 角度动态数据连续无跳点; 表明本文设计的电路形式可以有效地抑制外界干扰, 电路本身也没有引入干扰, 数据融合算法是可靠的。

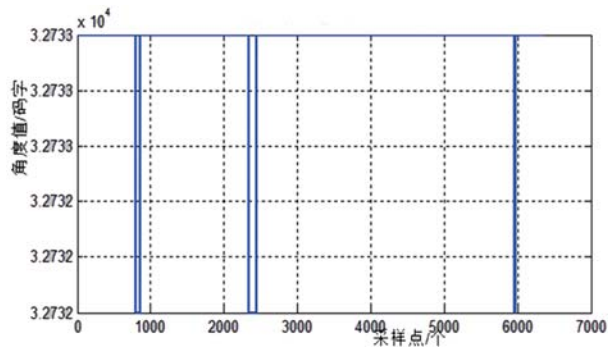


图 7 融合后角度的静态测试数据

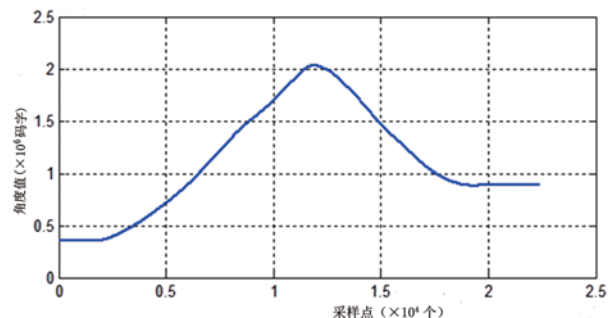
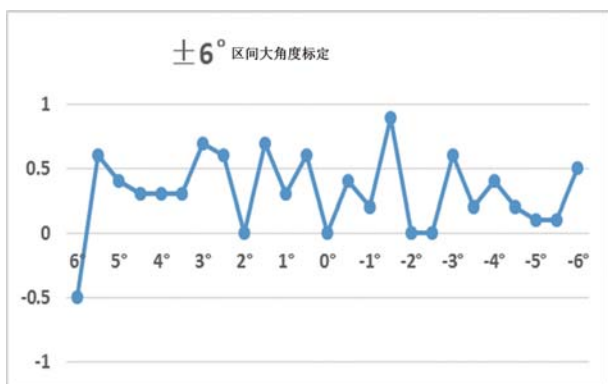
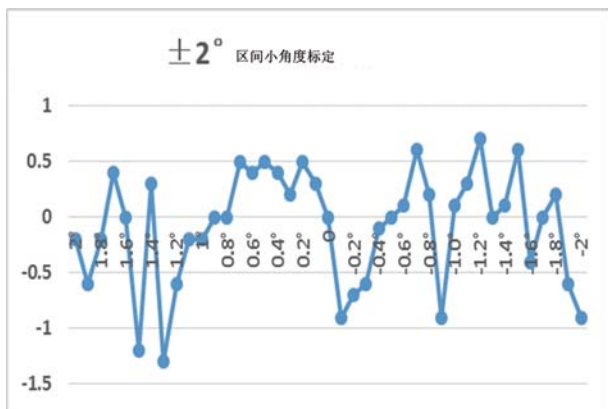


图 8 融合后角度的动态测试数据

图 9 $\pm 6^\circ$ 区间大角度标定图 10 $\pm 2^\circ$ 区间小角度标定

在进行角度指向精度标定时, 先将扫描镜指向给定的目标值, 然后通过经纬仪读取当前扫描镜的位置, 再通过计算与目标值之间的差值, 便可得到测角系统的角度指向精度。试验时, 对 $\pm 6^\circ$ 区间进行了大角度标定, 并对 $\pm 2^\circ$ 区间小角度进行了细分标定测试。

4 结论

研究了基于绝对式圆感应同步器的测角系统的设计要点。硬件方面设计了感应同步器的输入电路和感应同步器输出信号的调理电路, 通过 RDC 实现了轴角的模数转换。软件方面设计了数据融合程序。最后, 通过试验进行了硬件和软件验证。结果表明, 本文设计的测角系统有很强

的噪声抑制能力, 角度静态跳动只有 $0.1''$, 角度指向精度优于 $1.1'' (3\sigma)$ 。该测角系统的设计方案已成功应用于航天领域, 并对其他军用、民用等型号设计具有一定的参考意义。

参考文献

- [1] 蔡铁峰, 骆崇. 基于感应同步器的轴角测量系统及其误差分析 [J]. 浙江工业大学学报, 2009, 37(3): 323-325.
- [2] 何俊, 李文华. 基于 FPGA 和 AD2S80A 的数字测角系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2008, 12(7): 68-69.
- [3] 李谋. 位置检测与数显技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [4] 刘丽艳. 基于 DSP 的感应同步器测角系统的设计与实现 [J]. 航空精密制造技术, 2010, 46(1): 28-31.

(上接第 30 页)

表 2 步进值为 1 dB 时的 U_{n-1}/U_n 比值

U_2/U_1	U_3/U_2	U_4/U_3	U_5/U_4	U_6/U_5
0.8049	0.7994	0.8036	0.8033	0.7919

由表 1 可知, 通过改变 DAC 的数值, 可以使激光器的输出光功率随其相应调节, 且调节范围为 30 dB。从表 2 中可以看出, 当输出光功率的步进值 ΔP 为 1 dB 时, 调节电压的比例关系与理论分析结果基本一致。因此, 该方法能够有效地实现激光器输出光功率的连续调节。

4 结束语

本文针对激光器输出光功率与电流线性特性之间的关系, 将自动功率反馈控制电路和光功率调节电路结合起来, 对稳定光源的输出功率进行了调节。测试结果表明, 光源输出光功率的

调节范围可达 30 dB。这种具有功率可调功能的稳定红外激光光源可替代部分由光源和光衰减器组成的测试系统。在减小仪器体积的同时, 该光源还可降低光纤通信系统的测试成本, 因此它在光纤通信施工及其日常维护中将具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 王健. 可编程光衰减器工作原理及自动校准 [J]. 合肥工业大学学报, 2012, 35(10): 1363-1366.
- [2] 魏会敏, 罗风光, 曹明翠, 等. 基于低电压驱动 MEMS 的可调光衰减器的设计与性能分析 [J]. 光电子·激光, 2006, 17(6): 685-687.
- [3] 江剑平. 半导体激光器 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [4] 李秀红, 陈涛, 乔长城, 等. 路边状况传感器稳定光源驱动电路设计 [J]. 气象与环境学, 2003, 36(1): 76-78.