

文章编号: 1672-8785(2020)05-0035-05

高分辨率光栅精密定位系统研究

刘 磊 吴 威 张 冰 李志增 宋 平

(中电科仪器仪表有限公司, 山东 青岛 266555)

摘 要: 为了使光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)能精确测量窄谱宽光信号, 要求光栅转动一圈分辨 200 万个点。设计了一种基于衍射光栅、直流无刷电机(Brushless Direct Current Motor, BLDCM)和光电编码器的高分辨率光栅定位系统。实现了基于比例-积分-微分(Proportion Integration Differentiation, PID)的高精度闭环调速控制技术, 以驱动 BLDCM 带动光栅的转动。同时, 高精度光电编码器快速检测并反馈光栅的角位置, 细分电路对编码器的输出信号作进一步细分。将输出信号的分辨率从 16000 点/圈提升至 2048000 点/圈, 极大地提升了光栅定位系统的整体分辨率。通过实验测试了光栅扫描速度、波长重复性和波长准确度等性能指标, 验证了光栅定位的精度和分辨率。

关键词: 光谱分析仪; 直流无刷电机; 光电编码器; 高分辨率; 光栅定位

中图分类号: TN23 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.05.006

Research on High Resolution Grating Precision Positioning System

LIU Lei, WU Wei, ZHANG Bing, LI Zhi-zeng, SONG Ping

(China Electronics Technology Instruments Co., Ltd., Qingdao 266555, China)

Abstract: In order that the optical spectrum analyzer can accurately measure narrow spectral signals, the grating is required to distinguish 2 million points in one cycle. A high-resolution grating positioning system based on diffraction grating, brushless direct current motor and photoelectric encoder is designed. A high-precision closed-loop speed control technology based on PID is realized which can drive the rotation of the grating. Meanwhile, the high-precision photoelectric encoder can quickly detect and feedback the angle position of the grating, and the subdivision circuit can further subdivide the output signal of the encoder. The resolution of the output signal is improved from 16000 to 2048000 per cycle, which greatly improves the overall resolution of the grating positioning system. The performance indexes such as the scanning speed, wavelength repeatability and wavelength accuracy of the grating are tested by experiments, and the positioning accuracy and resolution of the grating are verified.

Key words: optical spectrum analyzer; BLDCM; photoelectric encoder; high resolution; grating positioning

收稿日期: 2020-05-05

作者简介: 刘磊(1986-), 男, 山东潍坊人, 工程师, 主要从事光谱信号探测方面的研究。

E-mail: 97470613@qq.com

0 引言

光栅转动型 OSA 的波长调谐是由分光单元衍射光栅的角位置控制的。其中每一个光栅角位置都有相应波长的光通过反射镜最终聚焦在出射狭缝的中心^[1]。分光单元的波长准确度和分辨带宽由光栅扫描结构决定,要求光栅转动一圈分辨 200 万个点。因此,研究高分辨率光栅扫描结构对于提高光栅转动型 OSA 的性能具有十分重要的意义^[2]。

目前常用的方法是采用精密步进电机、高精度谐波减速器和角度传感器来实现位置开环或半闭环间接驱动控制。这种方式通过调节发送给步进电机的脉冲的频率来控制电机转动速度,检测角度传感器的输出信号并将其转换成用于定位的电机步数。减速器旨在提高定位精度^[3]。该方案中,步进电机与谐波减速器的结合属于间接驱动。为了满足精度要求,一方面需要提高减速器的传动精度,另一方面则需要进一步对信号进行细分以提高步进电机步距角的分辨率。对分辨率的要求越高,对电机性能和减速器的要求就越高。在这种情况下,成本相应提高,伺服控制系统的难度增大,步进电机易磨损,系统受外界环境影响大而导致使用寿命受到限制,而且还存在机械传动误差和丢步、失步等问题^[4]。

本文设计了一种基于衍射光栅、增量式光电编码器以及 BLDCM 的高分辨率光栅定位系统。采用 BLDCM 直接驱动衍射光栅的转动,使用高精度光电编码器直接检测光栅的角位置,并利用基于 PID 控制的闭环调速控制技术,完成对电机的精确稳定控制^[5-6]。

1 光栅定位系统方案设计

为达到分辨率要求,本文提出了一种高分辨率光栅精密定位系统。该系统由 FPGA、衍射光栅、BLDCM、光电编码器、细分电路以及电机驱动电路等部分组成(见图 1)。

BLDCM 转子的一端连接在衍射光栅的转轴上,另一端连接在光电编码器的转轴上。光

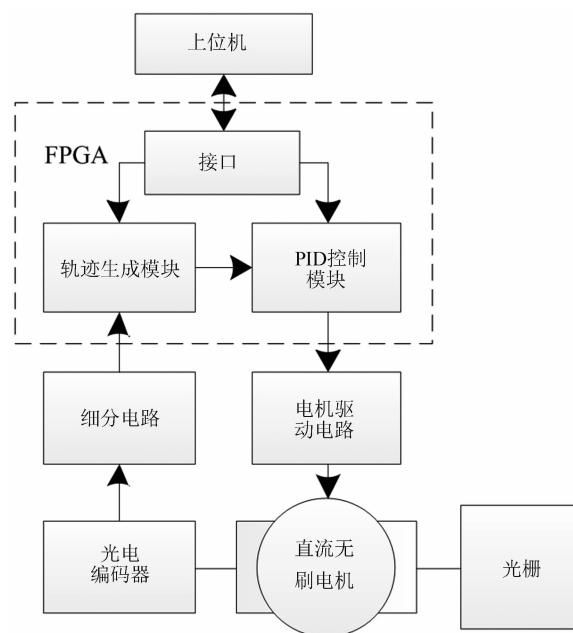


图 1 高分辨率光栅定位系统的结构框图

电编码器用于检测衍射光栅的角位置,其输出端连接细分电路。细分电路对光电编码器输出的正余弦信号进行放大和变换后开展倍频细分计数,并将其结果反馈给 FPGA。FPGA 根据上位机设定的起始波长、终止波长和采样点数计算出光栅的运动轨迹,并将其与编码器反馈的光栅当前位置进行比较。采用 PID 控制调节算法来输出数字控制信号。该信号经过数模转换器后,驱动 BLDCM 来带动衍射光栅转动。

2 编码器信号细分技术

本文中的光栅定位系统要求光栅每转动一周能分辨两百万个数据点。为达到这个高分辨率要求,采用了正弦波输出的增量式光电编码器。它是高精度光栅定位系统的核心器件,能够将角度信号转换为电信号,且具有高测量精度和高分辨率等特点。光电编码器输出两路正交的正余弦信号 A 和 B(见图 2)。光栅每转动一周就产生 16000 个 A、B 信号,同时提供一个索引脉冲 Z,以便确定光栅的初始计数位置。

A、B 信号经过 32 倍细分后,变成相位相差 90° 的方波信号。它们每个周期可产生 00、01、10、11 四种状态。FPGA 根据 A、B 信号

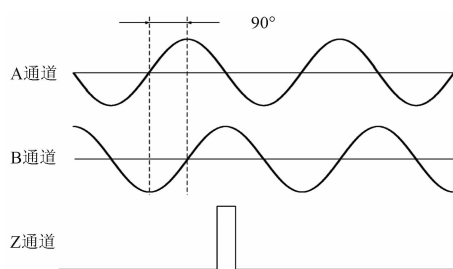


图 2 编码器的输出信号

的电平值判断两者的相位关系。通过观察 A 信号的相位是否超前于 B 信号的相位来判断光栅的转动方向(见图 3)。计数结果则可作为光栅的位置信息。经过信号细分后,光栅每转动一周, FPGA 就可直接读出 $2048000 (= 16000 \times 32 \times 4)$ 个位置计数。

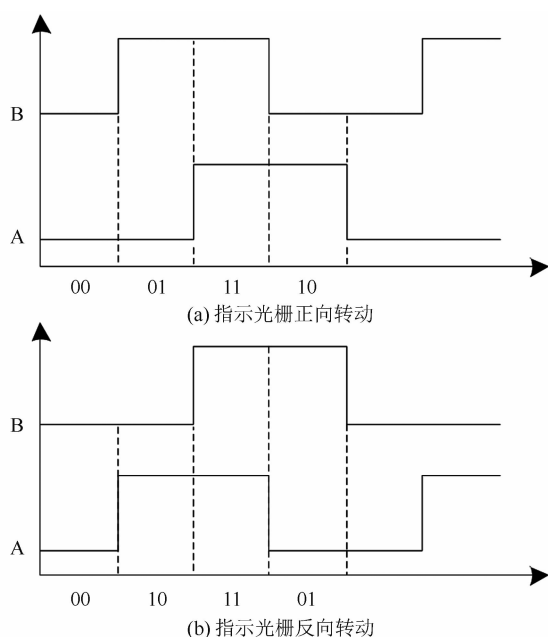


图 3 光栅转动方向的判断

3 高精度闭环调速控制技术

采用闭环调速控制方式可以快速反馈光栅的位置信号,实现光栅旋转速度的精确控制,从而进行精密定位。另外,闭环调速控制还可实现数字 PID 控制和编码器信号处理等功能。FPGA 根据上位机设置的参数,经计算生成光栅的运动轨迹,并利用光电编码器反馈的位置信息来实时调整驱动信号,从而控制电机速度。而且光电编码器又将电机速度实时反馈给 FPGA,形成闭环控制。

3.1 光栅运动轨迹的生成

FPGA 根据写入的起始位置和终止位置来计算光栅的起始位置、停止位置、速度和加速度等数据(见图 4),进而生成光栅的运动轨迹。用电机带动光栅以规定的加速度达到最快速度,或者带动光栅开始减速,直至停到规定的最终位置上。

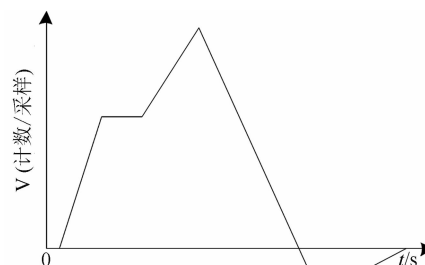


图 4 光栅转动速度曲线

在光栅的运动过程中,实时检测光栅位置并对当前位置与期望位置的偏差进行比较。判断电机下一步的状态,生成新的控制信号,使光栅作加速、减速或匀速运动,从而实现位置闭环控制。

3.2 基于 PID 的闭环调速

为获得光栅的稳步转动,本文引入了 PID 调节环节。基于 PID 的控制策略具有鲁棒性好和可靠性高等特点。在光栅的运动过程中,实时检测光栅位置并比较当前位置与期望位置之间的偏差(见图 5)。PID 可对偏差作出快速反应,从而减小稳态误差,提高动态响应速度。它可以快速调整电机的转速与转动方向,判断电机下一步的状态,生成新的控制信号,使光栅作加速、减速或匀速运动,进而实现位置闭环控制。

4 测试结果与分析

本文设计的高分辨率光栅精密定位系统被应用于某 OSA 中。通过对扫描速度、波长重复性和波长准确度的测试来分析系统性能。测试仪器包括是德科技公司的 8164B 光波测试平台。该平台搭载的可调谐激光源模块 81600B-132 和 81606A-216 分别输出波长为 1310 nm 和 1550 nm 的激光。

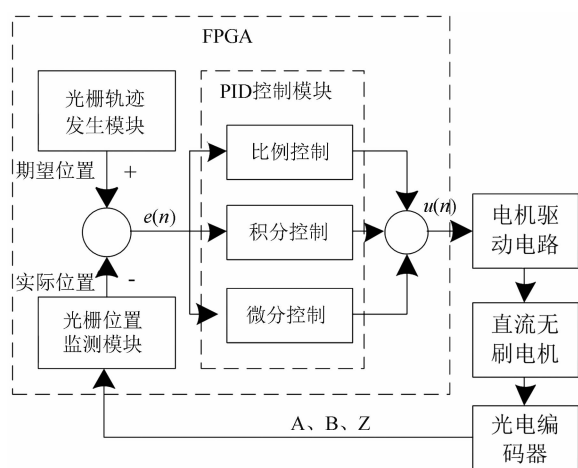


图5 PID闭环调速框图

4.1 扫描速度测试

扫描速度是指在一定的测量参数下,仪器完成单次扫描所需要的时间。设置中心波长为1550 nm,扫描带宽为100 nm。表1列出了扫描速度的测试数据。

表1 扫描速度测试数据

| 测试次数 | 扫描时间/ms |
|------|---------|
| 1 | 159.5 |
| 2 | 163.8 |
| 3 | 155.7 |
| 4 | 161.3 |
| 5 | 153.9 |

光栅从1500 nm转动到1600 nm,其中每一次的扫描时间都不一样。从表1可以看出,在多次测量中,光栅扫描100 nm波段所需时间的最大值为163.8 ms,最小值为153.9 ms,平均值为158.8 ms。

4.2 波长重复性测试

波长重复性是指多次测量同一波长时测量值的变化量,一般用最大值与最小值之差来衡量。分别对1310 nm和1550 nm的中心波长进行了测试。表2列出了波长重复性的测试数据。可以看出,OSA所测波长的重复性小于等于0.02 nm,说明该光栅精密定位系统多次扫描同一波长点的稳定性较好。

4.3 波长准确度测试

波长准确度是指OSA所测波长与实际波

长(标准波长)的偏差。将中心波长分别设置为1310 nm和1550 nm,并将扫描带宽设置为10 nm。表3列出了波长准确度的测试数据。

表2 波长重复性测试数据

| 中心波长设置值/nm | 中心波长测试值/nm | 波长重复性/nm |
|------------|------------|----------|
| 1310 | 1310.11 | 0.02 |
| | 1310.09 | |
| | 1310.11 | |
| 1550 | 1549.89 | 0.01 |
| | 1549.88 | |
| | 1550.88 | |

表3 波长准确度测试数据

| 中心波长设置值/nm | 中心波长测试值/nm | 波长准确度/nm |
|------------|------------|----------|
| 1310 | 1310.08 | +0.08 |
| | 1310.10 | +0.10 |
| | 1310.09 | +0.09 |
| 1550 | 1549.88 | -0.12 |
| | 1549.89 | -0.11 |
| | 1549.89 | -0.11 |

从表3可以看出,在测试波长为1310 nm和1550 nm的光源时,波长准确度均在±0.2 nm范围内。由于可调谐光源的输出本身具有一定的偏差,因此该测量值既包含了光源的波长误差,也包含了OSA的测量误差。

5 结论

本文针对OSA中的光栅扫描结构进行了深入研究,设计了高分辨率光栅精密定位系统以及BLDCM驱动电路,研究了增量式光电编码器信号细分技术,极大地提升了光栅定位系统的整体分辨率。另外还研究了基于PID的高精度闭环调速控制技术,然后开展了光栅定位精度与速度测试实验,实现了超高分辨率以及光栅快速扫描。下一步将会根据以上成果优化电机控制算法,将波长准确度提高至±0.05 nm,并将波长重复性提高到优于0.01 nm的水平。

参考文献

- [1] 贺永亮. 一种高性能光谱分析仪的设计方案 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [2] 洪喜. 无刷直流电机在近红外光谱仪中的应用 [J]. *激光与红外*, 2007, **37**(5): 445-448.
- [3] 潘峰, 周运杰, 卢沁雄, 等. 基于占空比调节的无刷直流电机直接转矩控制 [J]. *电机与控制应用*, 2017, **44**(11): 42-49.
- [4] 刘洋, 王钦若, 高军礼. 全数字化直流电机 PWM 调速实验教学平台设计 [J]. *机床与液压*. 2017, **45**(23): 61-65.
- [5] 黄晋卿. 光谱光栅仪中高精度快速波长扫描方法的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [6] 王兴权. 光栅光谱仪原理及设计研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2006.