

基于 MEMS 微镜的混合式扫描同步设计 *

周 珣^{1,2}, 吴东岷²

(1.中国科学技术大学 微电子学院, 安徽 合肥 230026;
2.中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏 苏州 215000)

摘要:为了解决 MEMS 微镜扫描角度较小的缺点,设计了一种 MEMS 微镜与无刷电机同步扫描系统。该系统由 STM32 微控制器、DDS 驱动电路、相位检测电路组成。通过设计光栅码盘实现对无刷电机速度的测量,由 PID 算法控制电机转速使电机反馈信号与 MEMS 微镜反馈信号频率相同,并检测两路反馈信号的相位差,调节 DDS 驱动信号的相位实现相位同步。实验表明,系统工作稳定,相位误差不超过 1.5%。

关键词:MEMS; STM32 微控制器; DDS; 激光扫描; 相位同步

中图分类号: TP273+.5; TN41

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211300

中文引用格式: 周珏, 吴东岷. 基于 MEMS 微镜的混合式扫描同步设计[J]. 电子技术应用, 2021, 47(7): 92–96.

英文引用格式: Zhou Jue, Wu Dongmin. Design of hybrid scanning synchronization based on MEMS micromirror[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(7): 92–96.

Design of hybrid scanning synchronization based on MEMS micromirror

Zhou Jue^{1,2}, Wu Dongmin²

(1. School of Microelectronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215000, China)

Abstract: In order to solve the shortcoming of narrow scanning angle of micro-electro-mechanical system(MEMS) micromirror, a synchronous scanning system of MEMS micromirror and brushless motor was designed. The system consists of STM32 microcontroller, direct digital synthesis(DDS) drive circuit, and phase detection circuit. The speed measurement of the brushless motor is realized by designing the grating code disc. The proportion integration differentiation(PID) algorithm controls the motor speed so that the motor feedback signal and the MEMS micromirror feedback signal have the same frequency and the phase difference of the two feedback signals can be detected. Adjust the phase of DDS drive signal to achieve phase synchronization. Experiments show that the system works stably and the phase error does not exceed 1.5%.

Key words: MEMS; STM32 microcontroller; DDS; laser scanning; phase synchronization

0 引言

激光扫描在激光雕刻、激光雷达、激光精密打标等领域都有广泛的应用。目前激光扫描方式主要分为振镜扫描、MEMS(Micro-Electro-Mechanical System)微镜扫描以及转镜扫描^[1]。

振镜扫描是指振镜电机带动反射镜偏转,进而使入射到反射镜表面的光束发生偏转,实现扫描^[2]。振镜扫描方式由于其机械结构导致其扫描速度较慢,扫描频率一般为 20 Hz 左右,扫描角度一般为 20°×20°。

MEMS 微镜采用微机电系统工艺,相比机械振镜具有体积小、谐振频率高、光学特性好的优点^[3],由于其工作在谐振频率处,快轴扫描频率能达到 27 kHz,扫描角度一般为 40°×10°^[4]。

转镜扫描是一种比较常见的机械扫描方式,其物面扫描点的形状是线状的。有些商业 LIDAR(Light Detection and Ranging)系统采用这种方式。转镜扫描具有转速高、扫描速度大、稳定性好的优点^[5]。但转镜相比 MEMS 微镜,扫描图像分辨率较低。

为了增大 MEMS 微镜扫描的角度,因此提出同步扫描方案。目前关于同步扫描的研究主要还是基于振镜与转镜的同步,沈辰弋^[6]提出了一种振镜与步进电机带动的转镜同步扫描方案,其同步扫描通过等待零位置实现,扫描角度为 30°×60°。谢机有^[7]提出了一种振镜与无刷电机带动的转镜扫描方案,但未进行同步设计。

本文基于 MEMS 微镜的激光扫描特性,设计了 MEMS 微镜与无刷电机的同步方案,可以实现 40°×180° 扫描。

* 基金项目:国家重点研发计划(2018YFB130550)

1 系统总体设计与工作原理

1.1 系统结构

系统结构如图 1 所示。本设计由 STM32F407 微控制器、MEMS 微镜驱动电路以及相位检测电路三部分组成。由于 MEMS 微镜采用电磁驱动,且需要工作在谐振频率处^[8],因此 MEMS 微镜的驱动信号需要具有频率精度高的特点,为了实现 MEMS 微镜与无刷电机的同步,驱动信号还需要具备相位可调的特点,因此,本设计采用直接数字频率合成器(Direct Digital Synthesis, DDS)产生微镜驱动信号。STM32 通过 SPI 接口与 DDS 进行通信,DDS 输出经滤波放大后驱动 MEMS 微镜振动。相位检测电路完成对微镜反馈信号与无刷电机反馈信号的调理。无刷电机由 PWM 波进行驱动,可通过改变 PWM 波占空比实现对电机速度的控制^[9]。

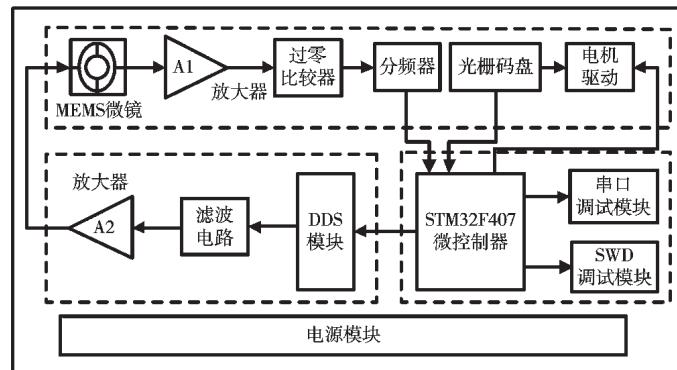


图 1 系统结构图

1.2 系统工作原理

系统工作原理如图 2 所示。MEMS 微镜在驱动信号的作用下,会产生正弦反馈信号。微镜反馈信号经过零比较器产生方波信号,方波信号的跳变沿则标志着微镜过零点的时刻。无刷电机装有光栅码盘,当无刷电机转动时,光栅码盘会使光电传感器产生方波反馈信号,STM32 会对方波信号进行处理,获取电机此刻的转动速度以及原点位置。为了能够得到稳定的相位差,需要通过 PID 算法对电机转速进行控制,使光电传感器产生稳定的方波信号,同时还需对过零比较器产生的方波信号进行分频处理,获得与电机反馈同频的方波信号。STM32 计算

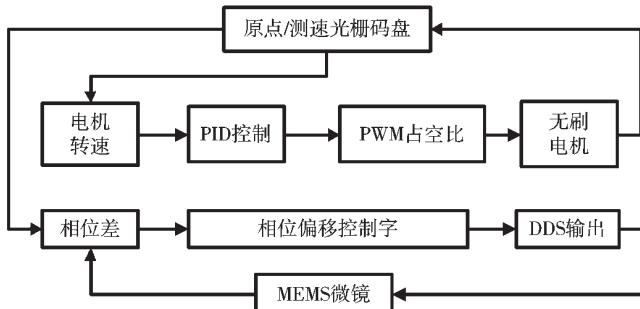


图 2 系统工作原理图

两路反馈信号上升沿的时间差得到相位差,通过调节 DDS 驱动信号的相位,便可使相位差趋近于 0,实现同步扫描的目的。

2 系统硬件设计

2.1 DDS 原理与驱动电路设计

驱动电路主要是为了产生 MEMS 微镜的驱动信号,使微镜在谐振频率处振动。本设计采用 DDS 作为微镜的信号源,其具有精度高,信号灵活可调的优点^[10]。

DDS 主要组成部分是:相位累加器、波形存储器、数模转换器和时钟模块^[11]。其原理是:在系统时钟的作用下,相位累加器会对频率控制字(Frequency Tuning Word, FTW)进行累加,而相位累加器的输出会作为寻址地址去波形存储器中查找数据并送入 DAC(Digital-to-Analog Converter)进行 D/A 转换。在系统时钟为 500 MHz、相位累加器为 32 位宽、相位偏移寄存器为 14 位宽时,产生正弦信号的 DDS 工作原理图如图 3 所示。

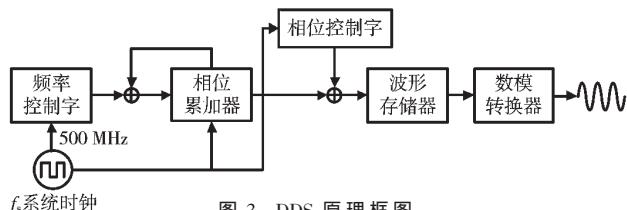


图 3 DDS 原理框图

DDS 的输出取决于频率控制字、相位控制字以及系统时钟。在系统时钟一定的情况下,频率控制字越大,DDS 输出频率则越大。相位控制字(Phase Offset Word, POW)越大,则 DDS 输出信号的相位偏移越大。本设计中,DDS 芯片时钟为 500 MHz,其输出频率精度能达到 0.12 Hz。其关系式如下:

$$f_{\text{out}} = \frac{f_s(\text{FTW})}{2^{32}} \quad (1)$$

式中, f_s 为系统时钟频率, 2^{32} 代表相位累加器的容量, f_{out} 为系统输出频率。

$$\theta = (\frac{\text{POW}}{2^{14}}) \times 360^\circ \quad (2)$$

式中, θ 代表输出相位偏移量, 2^{14} 代表相位偏移寄存器最大值。

由于 DDS 是数字器件,其输出信号是阶梯状的,内部含有较多高次谐波,为了得到较为平滑的波形信号,需要设计低通滤波器对这些高频分量进行滤除^[12]。针对 DDS 技术中输出波形的频谱结构及滤波器的传输特性^[13],为此本文设计七阶巴特沃斯低通滤波器。电路图如图 4 所示。

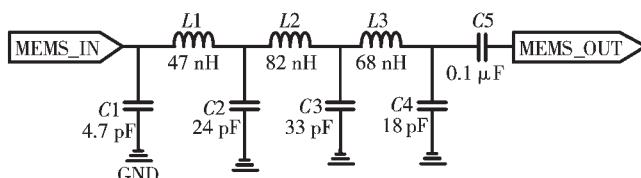


图 4 七阶巴特沃斯滤波器电路图

DDS 芯片对外提供 SPI 接口, STM32 通过 SPI 接口完成对 DDS 的初始化以及输出信号频率、相位的配置^[14]。

2.2 相位检测电路设计

相位检测电路的主要功能是实现 MEMS 微镜与无刷电机的同步扫描。其核心电路则是实现高精度的过零比较,本设计比较器采用 LM393 芯片实现^[15],单电源供电下电路图如图 5 所示。电机反馈信号由光电传感器产生,光栅码盘采用上下两层设计,上层用于电机转速的测量,下层则用于电机原点位置的标记,设计结构如图 6 所示。

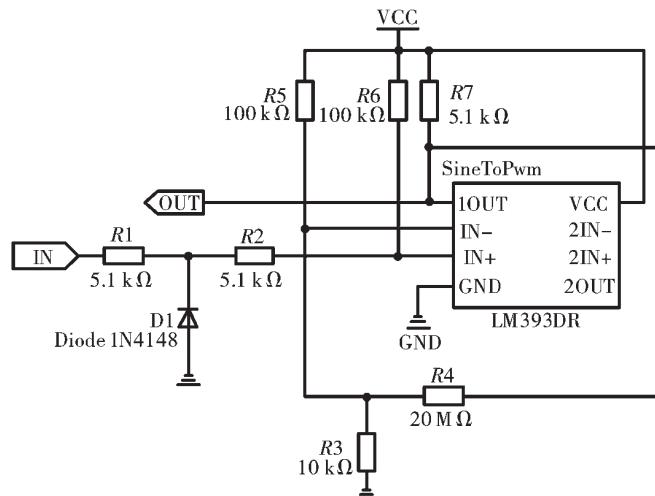


图 5 单电源供电下过零比较电路图

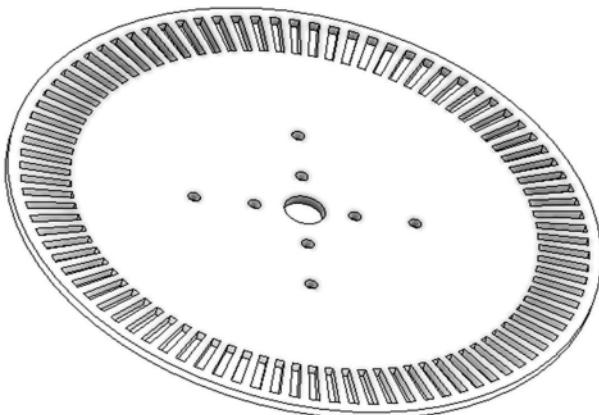


图 6 上层光栅码盘结构图

相位差检测的原理是通过 STM32 定时器通道 1 与通道 2 的输入捕获功能对微镜反馈信号与电机反馈信号进行上升沿捕获,在配置完定时器频率后,通过计算两路捕获寄存器的差值,便可得到上升沿的时间差。假设通道 1 发生上升沿捕获,记录此时通道 1 捕获寄存器值 $C1$ 并标记通道 1 已发生捕获,若通道 2 随后发生上升沿捕获,则记录此时通道 2 捕获寄存器值 $C2$,同时对定时器计数值置 0。而 $C2-C1$ 便为两信号上升沿时间差,进而可通过信号频率计算出相位差。在定时器计数频率为 1 MHz 的条件下,相位差计算公式如下:

$$\varphi = 2\pi f \frac{C2 - C1}{1\ 000\ 000} \quad (3)$$

式中 φ 为相位差,单位为弧度; f 则是反馈信号频率。

3 系统软件设计

软件设计主要包含以下几个模块: DDS 驱动模块、电机驱动模块、PID 控制模块^[16]以及串口通信模块。系统相位控制软件工作流程图如图 7 所示。

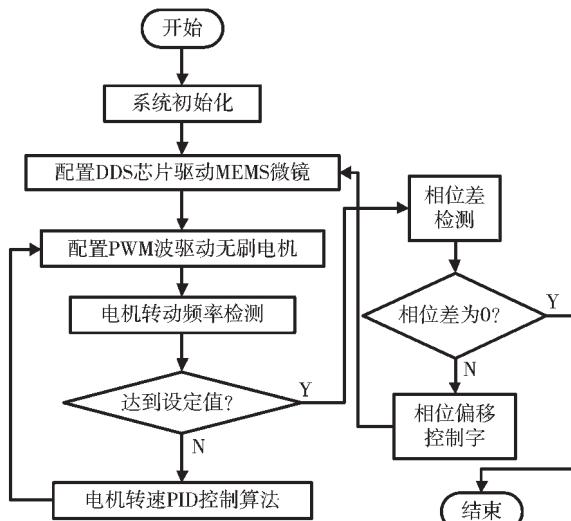


图 7 系统软件设计流程图

系统上电完成初始化后会对 DDS 进行配置,主要设置 DDS 输出正弦信号的频率、幅值以及相位,之后便配置 STM32F407 芯片输出 PWM 波驱动无刷电机转动。由定时器输入捕获功能计算得到相位差,通过改变 PWM 波占空比可以控制电机转动速度,设置 DDS 芯片输出正弦信号的相位偏移量可以减小相位差。

4 测试结果与误差分析

实验装置如图 8 所示,实验拟合了无刷电机响应曲线,测试了 PID 控制效果以及相位误差。

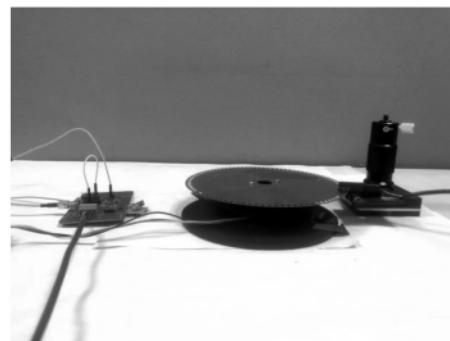


图 8 实验装置图

在 PWM 波频率为 100 Hz 下,PWM 波占空比与无刷电机转速之间的关系如图 9 所示。

根据无刷电机 PWM 响应线性拟合结果,对 PID 参

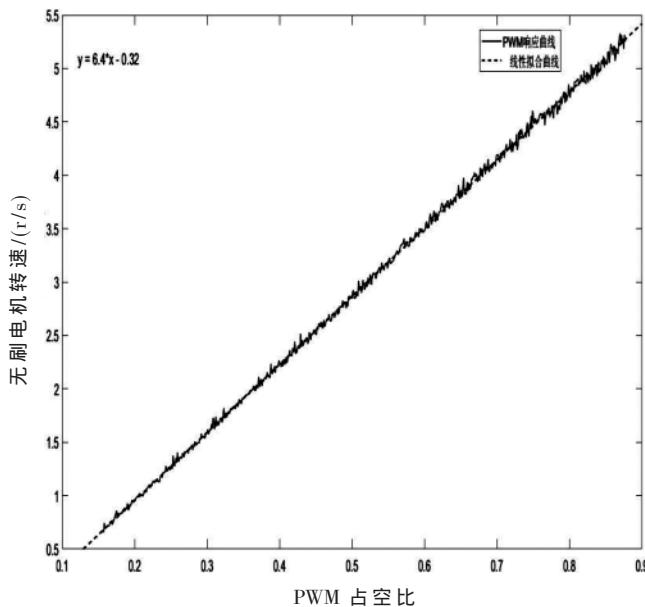


图 9 无刷电机 PWM 响应线性拟合曲线

数进行调试，在比例系数 $K_p=10$ 、微分系数为 $K_i=0.8$ 的情况下，系统上升时间约为 2.2 s，调节时间约为 5 s，PID 响应曲线如图 10 所示。

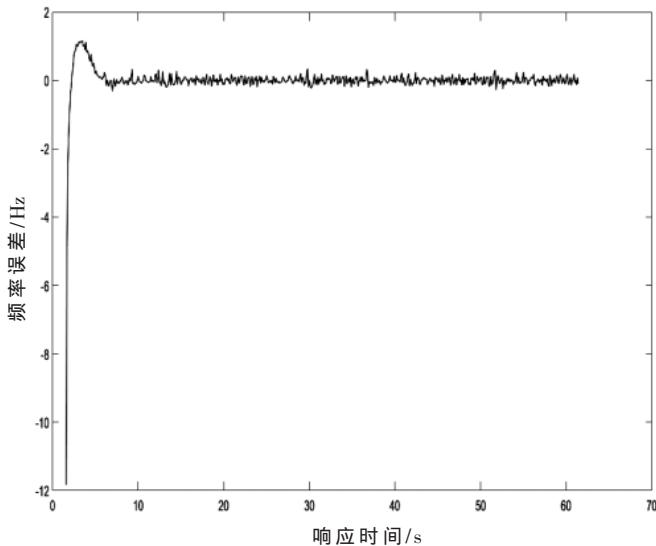


图 10 PID 响应曲线

在反馈信号周期为 9.274 ms 的条件下，对相位误差进行分析，实验结果如图 11 和表 1 所示。

由表 1 可知，系统最大误差不超过 0.138 ms，相位误差不超过 1.5%，误差产生的原因可能有以下两点：

(1) 光栅码盘精度不够高。光栅码盘的细分精度直接影响无刷电机测速精度，进而导致相位测量不准确。

(2) 光栅码盘的安装存在机械误差，这会使光电传感器产生的信号不均匀，从而引起相位测量不准确。

5 结论

本文针对 MEMS 微镜扫描存在的缺点设计了 MEMS

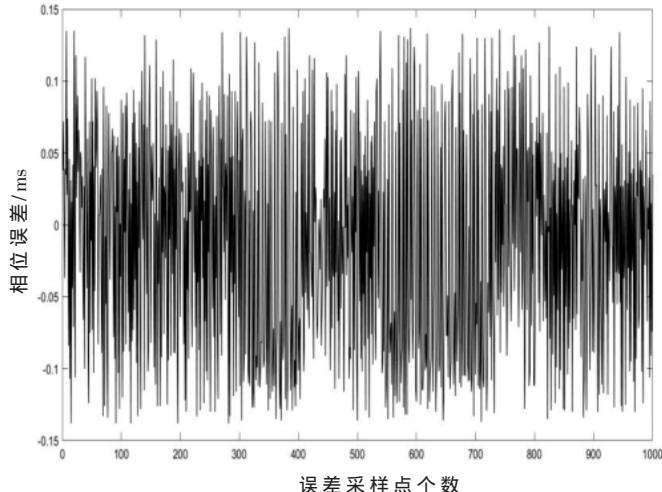


图 11 采样点为 1000 的相位误差图

表 1 相位控制误差数据

样本个数	最大误差/ms	平均误差/ms	标准误差/ms
500	0.133	0.007 944	0.070 66
1 000	0.138	0.012 28	0.075 81
1 500	0.135	0.006 129	0.073 78
2 000	0.138	0.005 116	0.074 1

微镜与无刷电机同步扫描系统。本文首先根据 MEMS 微镜的工作特性设计了 DDS 驱动电路，其次通过设计光栅码盘完成了无刷电机速度的测量，由相位检测电路得到两路同频的方波信号，最后对系统进行软件设计得到相位差并进行控制。实验表明系统相位差不超过 1.5%，在一定程度上满足同步扫描要求，为后续激光扫描应用提供基础。

参考文献

- [1] 徐亮亮.二维激光振镜扫描控制系统设计[D].长春：长春理工大学，2012.
- [2] 苗舒越.共聚焦显微镜控制系统研究[D].长春：中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所)，2014.
- [3] 何嘉辉，周鹏，余晖俊，等.电磁驱动大尺寸 MEMS 扫描镜的研究[J].光子学报，2017，46(1)：21–28.
- [4] 范娜娜，王懋，温少聪，等.基于二维 MEMS 振镜的激光雷达系统的光学设计[J].光学技术，2020，46(3)：290–294.
- [5] 贺嘉.激光雷达高速扫描系统原理及设计[D].西安：西安电子科技大学，2009.
- [6] 沈辰弋.单/双基地激光雷达扫描与接收系统设计[D].西安：西安电子科技大学，2010.
- [7] 谢机有.用于成像激光雷达的转镜扫描关键技术研究[D].长沙：国防科学技术大学，2011.
- [8] 黄明成.基于激光雷达的二维 MEMS 微镜驱动研究[D].南京：南京理工大学，2018.
- [9] 郑玲玲.基于 DSP 的转台稳速控制系统的研究与设计[D].长春：吉林大学，2008.
- [10] 董淑豪，吴东岷.基于 FPGA 的高精度鉴相器实现[J].电

- 子技术应用,2020,46(10):57–60,78.

 - [11] 王臣.高精度相位测距系统硬件研究与设计[D].西安:西安电子科技大学,2019.
 - [12] 韦孟辉.高精密相位控制的多通道任意波形发生器研究[D].洛阳:河南科技大学,2015.
 - [13] 戴慧.任意波形发生器的设计[D].武汉:华中师范大学,2011.
 - [14] 张福洪,朱怀环,戴绍港.基于AD9959的频率合成器设计及其应用[J].电子器件,2008(4):1155–1158.
 - [15] 刘俊俊,廖小松,袁嫣红.提高过零检测精度的方法研究[J].工业控制计算机,2009,22(10):80–81,88.

(上接第 91 页)

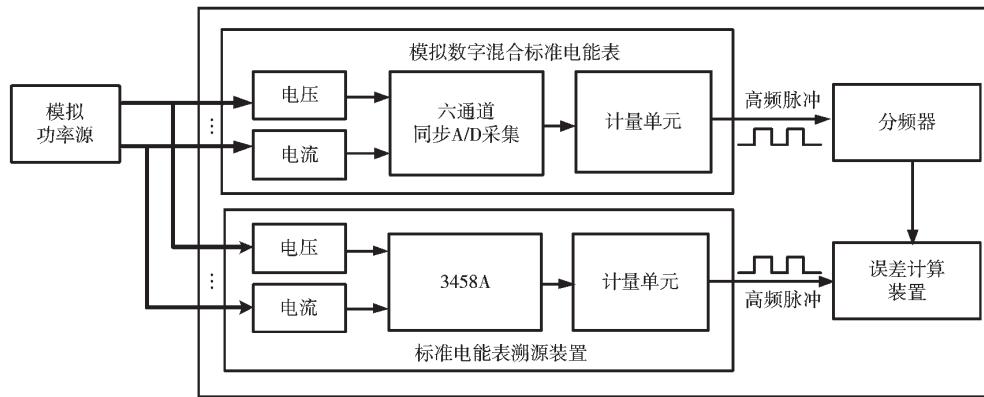


图 5 标准表的溯源

打破了数字化电能表之间相互比较的方法，采用模拟电能表计量检测溯源体系实现了数字电能表的量值溯源。本项目设计的成功对完善数字化电能计量体系有着重要的意义。

参考文献

- [1] IEC 61850-9-2 E2.0.Communication networks and systems in substations , part 9-2 : specific communication service mapping(SCSM)–sampled values over ISO.IEC8802-3[S]. 2012.
 - [2] 孙卫明,林国营.IEC 61850 协议电能表的校验方法研究[J].电测与仪表 ,2010 ,47(7A):13–15.
 - [3] 穆小星,段梅梅,张健.数字化电能表“溯源”探究与分析[J].电测与仪表 ,2014 ,51(23):28–34.
 - [4] 唐毅,江波,李红斌.数字电能计量系统检定方法综述[J].电工技术学报 ,2013 ,28(2):372–377.
 - [5] 宋晓林,任伟,邵方静,等.基于新型标准数字功率源的数字化电能表检定和溯源方法[J].电测与仪表 ,2018 ,55 (2):92–99 ,136.
 - [6] 陈璐怡.基于 IEC 61850 的数字化电能计量误差分析[D].重庆 :重庆大学 ,2017.
 - [7] 潘峰,孙卫明,赵伟,等.数字化电能计量中数值积分算法的误差分析[J].电测与仪表 ,2012 ,49(6):23–28.
 - [8] 穆小星,张健,段梅梅.采样率及数值积分算法对数字化电能计量误差影响分析[J].计量技术 ,2014(12):3–6.

- [16] Gu Dawei, Yao Yao, Zhang Dengming, et al. Matlab/simulink based modeling and simulation of fuzzy PI control for PMSM[J]. Procedia Computer Science, 2020(166): 195–199.

(收稿日期:2021-01-15)

作者简介：

周珏(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:嵌入式控制系统。

吴东岷(1973-),通信作者,男,博士,研究员,主要研究方向:MEMS光学成像系统等,E-mail:dmwu2008@sinano.ac.cn。



扫码下载电子文档

- [9] 刘莉,陈辉,李莉,等.标准电能表测量准确度影响因素分析[J].电力设备管理,2019(5):24-26.
 - [10] 李素芬,李刚,孙景发.模数转换技术及其发展[J].电子技术应用,2002,28(4):72-75.
 - [11] 苏家洪.刍议 AD 板的抗干扰设计[J].中国新技术新产品,2011(1):28.
 - [12] 肖勇,赵伟,罗睿希,等.数字化电能计量算法综述[J].电测与仪表,2018,55(7):1-7.
 - [13] 周冬跃,林海全,张洪林,等.采用窗函数法进行数字信号截短的优化算法[J].电子技术应用,2015,41(12):32-35.
 - [14] 温和,滕召胜,王永,等.基于 FDMS 的 FFT 电力谐波分析算法研究[J/OL].(2012-12-27).[2020-06-04].<http://www.paper.edu.cn>.
 - [15] 汪树青,韦邦跃,吴勇,等.仪器仪表测量不确定度评定方法[J].电子技术与软件工程,2019(10):80-81.

(收稿日期:2020-06-04)

作者简介：

王一民(1966-),男,本科,高级工程师,
主要研究方向:电磁计量和电工电子产品检测。

吴振宇(1981-),男,本科,工程师,主要研究方向:电能、电磁学领域的计量技术。

朱重治(1964-),男,本科,高级工程师,
主要研究方向:电磁计量溯源新技术。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所