

# PTC 摄影测量控制系统设计与实现<sup>\*</sup>

李威钢<sup>1</sup> 燕必希<sup>1</sup> 董明利<sup>1</sup> 王君<sup>1</sup> 孙鹏<sup>1,2</sup>

(1. 北京信息科技大学光电测试技术北京市重点实验室 北京 100192;

2. 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院 北京 100876)

**摘要:** 设计槽式集热器 (parabolic trough collector, PTC) 摄影测量控制系统, 可以自动完成摄影测量中的图像采集任务。根据系统需求, 采用 8.5 m×17 m 的矩形导轨, 作为滑块的搭载平台; 采用摩擦轮驱动方式, 完成相机在直线上的平移任务; 采用由舵机提供动力输出的三轴云台, 完成相机在三个维度上的姿态调整; 系统控制软件在 PC 上运行, 实现系统调试、站位参数设置与保存以及自动运行的功能。最终, 对控制系统的各个部分进行组装, 完成 PTC 摄影测量控制系统的样机设计与制作。系统调试表明, 该控制系统满足设计要求, 可以完成大型槽式太阳能集热器支架以及面形的图像采集任务。

**关键词:** 抛物面槽式集热器; 摄影测量控制系统; 导轨; 云台; 控制界面;

**中图分类号:** TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Design and realization of photogrammetry control system for parabolic trough collector

Li Weigang<sup>1</sup> Yan Bixi<sup>1</sup> Dong Mingli<sup>1</sup> Wang Jun<sup>1</sup> Sun Peng<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Test Technology, Beijing Information Science & Technology University,

Beijing 100192, China; 2. Institute of Information Photonics and Optical Communications,

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** A photogrammetric control system of parabolic trough collector is designed in this paper. The photogrammetry image acquisition tasks can be automatically completed by this system. According as the front projection of PTC is 6 m×14 m, 8.5 m×17 m rectangular rail is designed to carry the slider. According to the system requirements, friction wheel drive transmission is adopted by slider to complete the movement of camera in the straight line. Servo provides power to the three-axis electric pan-tilt unit. The pan-tilt unit can complete the attitude adjustment of camera in three dimensions. PC control interface include system debug, parameter setting save and automatic operation functions. Finally, various parts of photogrammetry control system is assembled. The design and production of photogrammetry control system for parabolic trough collector is completed. It was showed from experiments that the photogrammetry image acquisition tasks can be automatically completed by photogrammetric control system.

**Keywords:** parabolic trough collector; photogrammetric control system; rail; pan-tilt unit; control interface

## 1 引言

能源是一切人类活动的物质基础, 然而伴随着几个世纪的开采和发掘, 传统能源即将消耗殆尽, 太阳能作为一种新能源, 具有天然丰富、取之不尽、用之不竭且无污染等特质<sup>[1]</sup>。截止目前, 太阳能发电分为以光伏发电为代表的太阳能光发电和以槽式太阳能发电为主的太阳能热发电,

太阳能热发电系统中的槽式太阳能热发电系统是通过槽式集热器将太阳光汇聚在焦线上, 安装在焦线上的管状吸热器将聚焦后的太阳辐射能吸收后转化为电能, 因此槽式集热器是热发电站的关键部件, 它是将太阳辐射聚集到吸热装置上的能量聚集装置, 起到对太阳辐射进行高密度聚集的作用<sup>[2-4]</sup>。太阳能发电站的发电效率很大程度上取决于槽式集热器的聚光效率, 而槽式集热器的面形精度以及支

收稿日期: 2015-10

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金(51475046)、北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目(CIT&TCD201404123)、北京市教委科研计划项目“动态摄影测量中的关键技术”(KM201511232020)资助项目

架结构精度是影响槽式集热器聚光效率的主要因素,所以在电站建设或运行过程中需要保证槽式集热器面形精度以及支架结构精度符合设计要求。

基于上述原因,设计一套能够评价槽式集热器的面形精度以及支架结构精度的系统的意义就显得十分重大。针对大尺寸和复杂面形一般采用传统接触测量、激光跟踪仪测量、摄影测量。而摄影测量已经被证明是最好的评估太阳能集热器及其组件形状精度的测量技术<sup>[5]</sup>。槽式太阳能集热器摄影测量系统的工作原理是:首先将定制好的测量目标点和带有逆向反光表面的编码点分布在太阳能反光镜、支架以及旋转轴上。然后在太阳能热发电系统的上方架一个矩形封闭导轨,导轨上的专业相机被固定在移动云台上,该移动云台可以由上位机控制,带领相机平移到目标站位,完成多角度、多站位拍摄后,将图像无线传回电脑。最后,系统将高分辨率数字图像用专业摄影测量软件处理后,给出一份关于该太阳能热发电系统面形精度和支架结构精度的评估报告。

目前世界上,德国航空航天中心(DLR)于 2008 年研制出了第一套专门针对槽式太阳能集热器面形及支架的摄影测量控制系统——环形导轨控制系统(QFoto system<sup>[6]</sup>),之后于 2012 年 DLR 又推出了圆形导轨控制系统(pan-tilt-roll system<sup>[7]</sup>)。此外,同样由德国航空航天中心(DLR)于 2009 年研发制作的 TARMES<sup>[8]</sup>(trough absorber reflection measurement system)系统,它采用的是 S 型运动导轨。相比于国外,国内市场上专门针对于槽式太阳能集热器面形及支架的摄影测量控制系统尚未出现,且国外成套的控制系统价格昂贵,因此需要自行研制一套能够快速、精确、经济地检测槽式集热器面形精度以及支架结构精度的摄影测量控制系统。

## 2 任务需求

北京信息科技大学光电测试技术实验室经过多年研究,已经掌握了摄影测量关键技术,并设计开发了测量软件,但是还不能实现摄影测量系统的自动化控制,所以设计如图 1 所示的 PTC 摄影测量控制系统,图中  $\alpha$  为相机俯视角。基于被测物槽式集热器的正面投影  $6\text{ m} \times 14\text{ m}$ ,底座  $3\text{ m}$ ,设计导轨、滑块以及云台,使相机可以平移至目标站位,对槽式集热器进行多角度、多站位拍摄。根据槽式太阳能摄影测量网络规划<sup>[9]</sup>结果,提出控制系统性能指标:1)要求滑块可以引导相机移动,并停留在目标站位的有效区域( $\pm 10\text{ mm}$ );2)要求云台可以调整相机姿态,在必要旋转角度范围内完成分辨率为  $1^\circ$  的角度调整。

PTC 摄影测量控制系统的整体设计工作包括:系统机械结构设计、控制原理设计、系统软件设计。其中系统机械结构部分包括导轨、滑块以及云台的机械结构设计。控制原理部分包括滑块控制方式设计、云台控制方式设计以及无线控制模块设计。系统软件部分包括系统控制软件实现

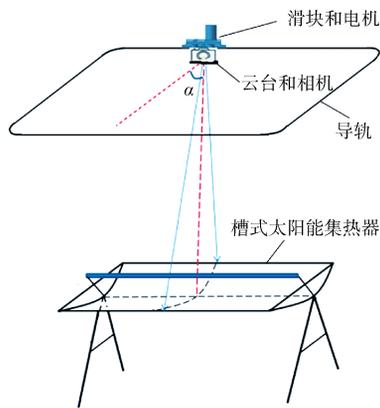


图 1 PTC 摄影测量控制系统示意

流程图设计和操控界面设计,将控制系统各个部分搭建完成后,完成系统调试、图像采集以及实验的任务。

## 3 系统机械结构设计

### 3.1 导轨及滑块设计

通过槽式太阳能摄影测量最佳网络站位规划分析,而且工程实际无法完成结构过于复杂的理想最佳网络站位轨迹,所以槽式太阳能摄影测量控制系统通常采用圆形导轨和矩形导轨,而对于圆形导轨和矩形导轨两种方案的比较,矩形导轨能更多、更有效的捕捉太阳能面形及支架图像中像点信息,所以摄影测量控制系统采用转弯半径  $1.5\text{ m}$ 、转弯弧度  $90^\circ$  的矩形导轨。

导轨可采用单导轨结构和双导轨结构,单导轨结构轻便、成本低廉。双导轨虽然结构复杂,但是并行双导轨的结构使滑块运行十分平稳。摄影测量控制系统的拍摄对象是开口宽度  $6\text{ m}$ 、每组长度  $14\text{ m}$ 、底座  $3\text{ m}$  的槽式太阳能集热器,根据被测物尺寸大小,结合拍摄工具尼康 D800 相机(蔡斯  $25\text{ mm}$  焦距镜头,全画幅  $36\text{ mm} \times 24\text{ mm}$  相机传感器)以及相机最大成像原理,如图 2 所示,最终计算得出导轨的适合外形尺寸为  $8.5\text{ m} \times 17\text{ m}$ ,导轨适合高度为  $9\text{ m}$ 。综合考虑,结构复杂的双轨导轨不适合高空作业的槽式太阳能集热器摄影测量控制系统,而且结构轻便的单导轨结构同样能够满足系统中滑块稳定的需求,最终设计采用矩形单导轨作为摄影测量控制系统的滑块搭载平台。

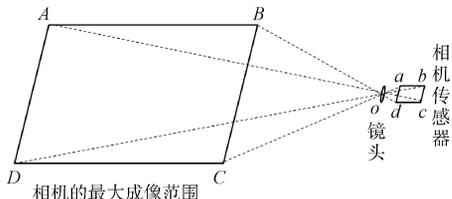


图 2 相机最大成像原理

滑块是连接导轨和电机减速箱的中间部分,所以在兼顾如图 3 所示的宽度  $44\text{ mm}$  导轨和横截面  $90\text{ mm} \times$

90 mm电机减速箱的客观条件下,设计滑块尺寸为200 mm×300 mm,滑块驱动转轮直径为34 mm。

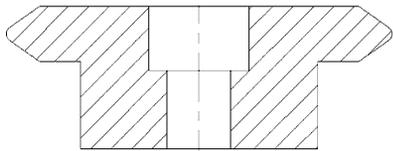


图3 导轨截面图

### 3.2 相机姿态调整设计

根据槽式太阳能摄影测量最佳网络站位规划分析以及矩形导轨上30个目标站位的相机角度计算结果,得出控制系统对相机姿态调整范围,即相机在三个旋转轴上的必要偏摆角度为:旋转方向(pan) $-65^{\circ}\sim+65^{\circ}$ ,俯仰方向(Tilt) $0^{\circ}\sim+60^{\circ}$ ,横滚方向(roll) $:0^{\circ}$ 和 $+90^{\circ}$ 。舵机控制的最小分辨率为 $1^{\circ}$ 。此外相机姿态调整完成后,云台需要有较大的保持力矩,保持相机在拍摄过程中稳定。

三轴云台的驱动装置一般为舵机或无刷电机,舵机是一种位置伺服驱动器<sup>[10]</sup>,因其内部独特的减速齿轮组装置,所以舵机具有较大的保持力矩,适用于那些需要角度不断变化并可以保持的控制系统,无刷电机一般适用于航拍中的自稳系统,所以由舵机驱动三轴云台符合系统需求。对于偏摆角度内最小分辨率为 $1^{\circ}$ 的设计要求,设计采用由飞越航模研发制作的三轴云台,云台总体重量1.03 kg,采用 $180^{\circ}$ 盛辉MG995舵机(输出扭矩为 $13\text{ kg}\cdot\text{cm}$ )。

## 4 控制原理设计

### 4.1 总体设计框图

摄影测量控制系统的硬件是基于核心控制芯片STM32F051C8T6,通过PWM脉冲生成芯片MC74HC595AD实现对舵机的角度控制,通过双H桥直流电机驱动芯片L298N实现对直流电机的正、反转以及速度控制,结合蓝牙通信模块,实现系统控制功能,控制系统总体的设计如图4所示。

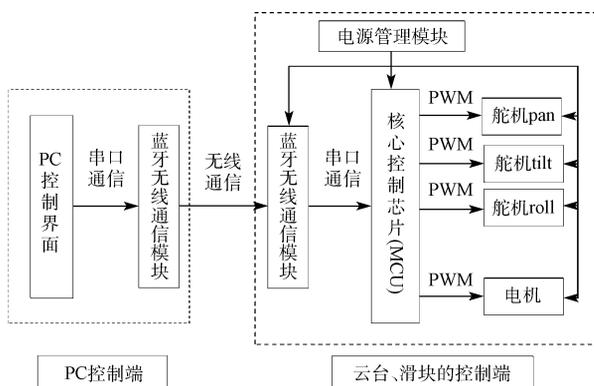


图4 系统控制原理

设计框图的左边是PC控制端,右边是云台、滑块控制端。首先PC控制端通过蓝牙发送端将站位信息即控制指令发出,然后蓝牙接收端将控制指令通过串口通信发送给控制芯片(MCU),最后双H桥直流电机驱动芯片或脉冲发生芯片将控制指令解算成相应的脉冲信号,实现对电机和舵机的控制。三路输出的电源模块分别为控制芯片、舵机、电机供电。

### 4.2 无线通信模块设计

控制系统对于无线通信模块有以下要求:首先有效通讯距离大于9 m,其次无线通信模块的供电电压可以由控制芯片承载,最后可以实现PC控制端与控制芯片之间数据和指令的无线传输。

目前一般工业现场的短距离无线通信(wireless communication)方式有:红外数据传输(IrDA)、蓝牙(bluetooth)、无线宽带(Wi-Fi)以及近场通信(NFC)等。其中红外数据传输技术的应用最为普遍,如红外线鼠标,红外线打印机,红外线键盘等。但红外数据传输技术是一种点对点的传输方式,传输距离不能离的太远,且发送端与接收端中间不能有障碍物,因此红外数据传输技术无法满足系统需求。蓝牙技术和无线宽带技术都可以实现近距离无线通信功能,同时也满足控制系统需求,但综合分析低功耗、低成本的蓝牙技术<sup>[11]</sup>更适合摄影测量控制系统。

通过市场调研,采用上海移摩通讯技术有限公司的FBT06蓝牙模块。其发射功率为4 mW,有效通讯距离约15 m,供电电压是2.7~3.6 V。

### 4.3 滑块控制原理设计

摄影测量控制系统对滑块驱动方式有以下要求:首先可以引导滑块在矩形导轨上平稳运动,其次驱动装置的配套设施不能影响相机的拍摄视野,最后在兼顾成本的原则下,选择合适的驱动方式。

目前,成熟的滑块驱动方式有以下4种<sup>[12-14]</sup>:同步带传动驱动、摩擦轮传动驱动、齿轮驱动以及卷动式驱动,考虑到同步带传动驱动的4个同步带轮会影响到相机拍摄视野,齿轮驱动虽然在定位精度和滑块稳定程度上性能优越,但是总体造价太高,卷动式驱动的适用范围只局限于直线导轨,而摩擦轮传动驱动的原理是利用滑块上转轮与导轨之间的摩擦力传递动力,完成机械运动。所以,摩擦轮传动驱动适用于矩形导轨,且转轮与导轨之间较大的咬合力有助于滑块的稳定性。最终滑块采用摩擦轮传动驱动。

根据导轨整体负载10 kg左右(滑块2 kg、云台1 kg、相机2 kg、电机5 kg)、滑块运动速度0.5 m/s以及工业现场安全系数0.9等多个客观条件,计算得出电机额定功率应该为120 W。根据导轨的驱动轮直径34 mm,滑块运动速度0.5 m/s,计算得出电机转速 $n$ 约为5 r/s(即 $n=300\text{ r/min}$ )。因为电机额定转速3000 r/min,所以需要减速比为1:10的齿轮箱。

滑块采用摩擦轮传动驱动如图5所示,图中的电机组

合指的是一个额定电压 24 V、额定功率 120 W 的直流电机和一个减速比 1 : 10 的齿轮箱。滑块尺寸为 200 mm × 300 mm,在其下方配有 1 个驱动转轮和 3 个辅助转轮。楔子具有润滑导轨、维持滑块平衡的作用。

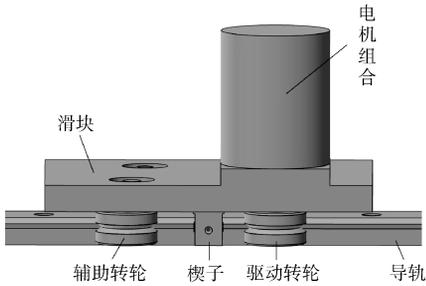


图 5 摩擦轮传动驱动

电机的基本控制原理:1)通过双 H 桥式电路实现电机的正反转控制;2)通过 PWM 调速原理即直流斩波原理<sup>[15]</sup>实现电机调速。通过实现电机的正、反转以及调速控制,继而实现滑块的前进、后退以及调速控制。电机的必要旋转时间  $t$ ,可以通过目标站位与当前站位之间的距离,结合此时电机转速求出,当滑块运行  $t$  s 到达目标站位后,位置传感器将信号反馈至控制芯片,控制芯片接收信号后发出使电机制动的控制指令,设计滑块最终可以停在目标站位的有效区域( $\pm 10$  mm)。

#### 4.4 云台控制原理设计

三轴云台的整体动力输出由舵机提供。通过对 3 个旋转轴上舵机的角度控制,实现系统对云台的旋转控制。

舵机是一种位置伺服驱动器,适用于那些需要角度不断变化并可以保持的控制系統。其控制原理是:首先核心控制芯片 STM32F051C8T6 发出控制指令,然后脉冲生产芯片 MC74HC595AD 将控制指令解算成一定占空比的 PWM 脉冲信号,最后舵机将获得的不同脉宽的脉冲信号即直流偏置电压与舵机内部周期 20 ms,宽度 1.5 ms 的基准电路比较,获得电压差输出指舵机的输出轴转动。舵机的输出轴转角与输入信号的脉冲宽度 PWM 呈线性比例关系,所以按照通信协议给控制芯片 1 个控制指令,舵机将会反应出 1 个对应的角度。

选择合适的通信协议(最小分辨率可以达到  $1^\circ$ ),通过内部算法将站位信息(旋转角度)转化为对应的控制指令,从而实现对云台的控制。

## 5 系统软件设计

### 5.1 系统控制软件实现流程图

系统控制软件实现流程图如图 6 所示,系统开启后,首先完成系统初始化(即发送控制指令使舵机和电机回归初始状态),执行这一步的原因是舵机和电机可能依然停留在上一次控制系统关闭时的状态。舵机的初始化状态为  $0^\circ$ ,电机的初始化状态为初始站位、制动状态。完成系统初始化之后,判断串口是否打开,如果串口已打开,系统直接进入模式选择阶段。如果串口未打开,那么需要重新设置串口设备端口号和通讯波特率,设置完成后打开串口,进入模式选择阶段。

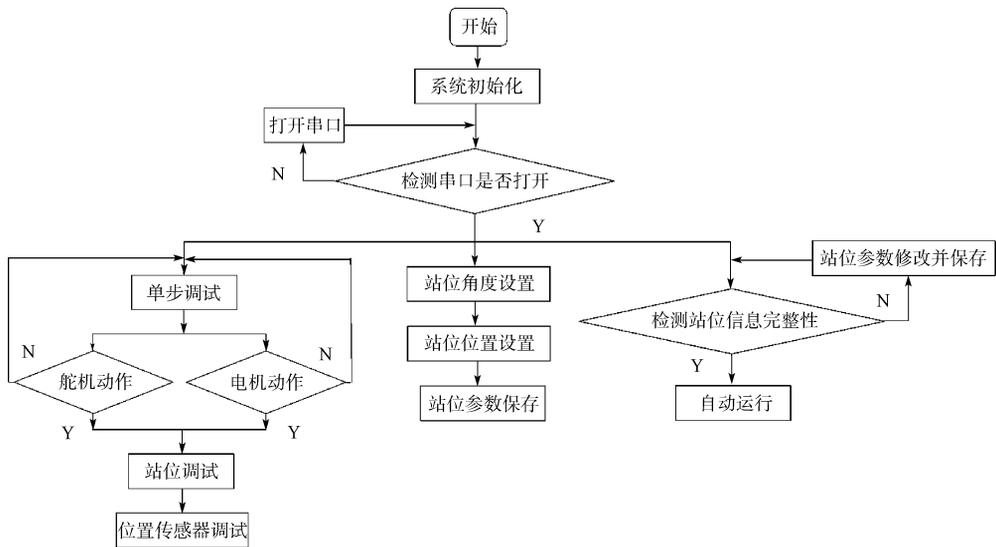


图 6 系统控制软件实现流程

模式选择阶段是供用户选择进入系统调试模块、站位参数修改与保存模块或是自动运行模块,在首次开启控制系统的情况下,需要进入系统调试模块。在系统调试模块

下,任意选择一个舵机输入调试角度或电机输入调试速度,点击动作控件后,控制系统将调试信息转化为控制指令发送给控制板,最终引导舵机、电机动作。如果舵机和

电机都准确动作,那么系统调试模块继续站位调试和位置传感器调试。如果不能准确动作,则返回系统调试模块。站位参数设置与保存模块是完成30个相机站位的站位参数信息设置。设置并保存某个站位参数后可以预演此站位的舵机、电机状态,一切都正常运行后方可进入自动运行模块。点击自动运行控件,系统自动检测30个站位信息的完整性,如果系统的某一个站位或某几个站位信息缺失或漏填,则系统重新返回站位参数设置与保存模块,反之系统则按照设定好的30个站位信息开始图像采集。

## 5.2 控制界面设计

控制系统的PC控制端界面是在C++的开发环境下设计完成的。整个软件PC控制界面包括:串口设置模块、系统调试模块、站位参数设置与保存模块、自动运行模块和状态提示模块。

如图7所示,串口设置模块是将通讯波特率(PC和控制芯片的通讯频率)和设备串口号(由上位机给蓝牙发送端自动分配)正确输入后,点击打开串口控件,PC上位机与控制芯片取得通信。状态提示模块的功能是实时显示当前电机转速和舵机角度。



图7 串口设置模块

如图8所示,系统调试包括舵机调试和电机调试。舵机调试中,舵机1代表旋转方向(pan),舵机2代表俯仰方向(tilt),舵机3代表横滚方向(roll)。输入舵机调试角度 $\alpha$ 后,点击“+”号,舵机朝正向旋转 $\alpha$ 。反之,舵机朝反向旋转 $\alpha$ 。电机调试中,电机可以实现高速正转、高速反转、低速正转、低速反转以及制动功能。系统调试的作用是保证舵机和电机正常运行,为系统自动运行做准备。



图8 系统调试模块

如图9所示,站位参数设置与保存模块包括对整个矩形导轨上30个站位的角度信息设置以及滑块位置信息设置,设置完成后点击保存,将站位信息保存至硬盘,为下一步自动运行提供站位参数。



图9 站位参数设置与保存模块

如图10所示,自动运行模块是读取站位参数设置模块保存至硬盘的站位参数信息,将其转化为相应控制指令后发送给控制芯片,完成对槽式太阳能集热器30个站位的图像采集。

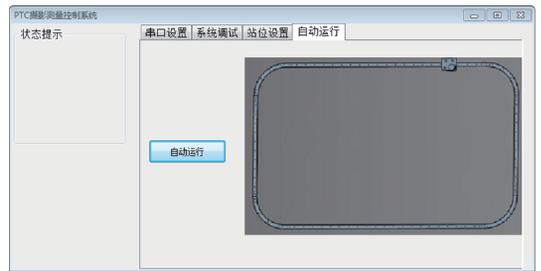


图10 自动运行模块

## 6 结 论

本文研究的PTC摄影测量控制系统在北京信息科技大学光电测试技术实验室的摄影测量场中反复调试运行,证明该控制系统性能可靠,通过位置传感器的触发信号可以将滑块制动停留在有效的站位区域( $\pm 10$  mm)。在合适的通信协议下,舵机可以达到最小分辨率为 $1^\circ$ 的设计要求,控制系统PC操作界面直观方便,可以根据预设值自动运动至全部站位并实现相机姿态自动调整,完成了对槽式太阳能集热器支架以及面形的图像采集任务。

## 参考文献

- [1] 韩雪冰,魏秀东,卢振武,等. 太阳能热发电聚光系统的研究进展[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 233-239.
- [2] 徐伟,杨帆,刘静静,等. 槽式抛物面太阳能热发电系统发展现状与探讨[J]. 发电设备, 2015, 29(1): 74-78.
- [3] 刘英玉,肖洪,朱天宇. 槽式太阳能聚光器结构特性研究[J]. 机械制造与自动化, 2013(1): 170-172.
- [4] XIAO J, WEI X, LU Z, et al. A review of available methods for surface shape measurement of solar

- concentrator in solar thermal power applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(5): 2539-2544.
- [5] 肖君, 魏秀东, 卢振武, 等. 基于偏折原理的太阳能槽式聚光器面形快速检测方法[J]. 中国激光, 2013(12): 185-191.
- [6] POTTLE K, MÜTZEL M, ENGELKE J, et al. QFoto: Automatic inline measurement system for parabolic trough structures; experiences and developments[C]. Solar PACES Conference, 2011: 20-23.
- [7] CSP Services GmbH, Germany. Technical description of Qfoto system and scope of supply[R]. Solar Energy, 2012.
- [8] PRAHL C, STANICKI B, HILGERT C, et al. Airborne shape measurement of parabolic trough collector fields[J]. Solar Energy, 2013(91): 68-78.
- [9] 陈杰春, 赵丽萍, 张恒. 立体视觉测量中的摄像机优化布局[J]. 机床与液压, 2012, 40(15): 34-37.
- [10] ZHOU N, HAO K, GUO C, et al. Visual servo control system of 2-DOF parallel robot [C]. In: Software Engineering and Knowledge Engineering: Theory and Practice. Berlin Heidelberg: Springer, 2012: 425-433.
- [11] 李杰, 陈庆奎. 基于蓝牙 4.0 的 GPU 集群功耗测量系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(3): 314-319.
- [12] 田瑶, 刘晓邦, 瞿少成, 等. 基于 CCD 摄像头的智能小车系统的研制[J]. 电子测量技术, 2010, 33(6): 106-109.
- [13] 李国玉, 石波, 吴玮, 等. 室内定轨移动摄影测量控制系统设计与实现[J]. 测绘科学, 2011, 36(3): 197-198.
- [14] 陈飞凌, 徐庆, 姚狄, 等. 智能球型摄像机预置位精度研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(2): 460-467.
- [15] 朱剑波. 无刷直流电机控制系统的仿真与分析[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(12): 25-30.

### 作者简介

**李威钢**, 1989 年出生, 硕士研究生, 研究方向为视觉测量技术。

E-mail: 543665040@qq.com

**燕必希**, 1970 年出生, 硕士, 副教授, 研究方向为光电测试与机器视觉。

E-mail: yanbx@bistu.edu.cn

## 泰克扩展 DPO7000SX 示波器串行标准测试功能

把第三代和第四代串行总线一致性测试功能带到业内保真度最高的示波器中

中国北京 2016 年 6 月 8 日-全球领先的测量解决方案提供商-泰克科技公司日前宣布, 在最新的 DPO7000SX 家族超高性能示波器中新增串行总线标准测试支持。DPO7000SX 平台采用已获专利的异步时序交织(ATI)信号采集技术, 提供了较好的信号保真度和性能, 并采用可扩充的结构, 在信号速度不断提高时提供“升级空间”。

工程小组必需面向迅速发展的云计算和移动通信市场中的下一代标准做好准备, 他们需要一个测量平台, 能够以极高的一致性和精确度测量高数据速率信号方案。为满足这一需求, 泰克已经在 DPO7000SX 系列上实现对第四代标准的串行总线测试支持, 包括 USB3.1、采用 USB Type-C 接口的 Thunderbolt、PCIe Gen4 和 DDR4。这一全新示波器家族提供了难以置信的信号保真度, 可以在 10Gb/s 以上的第四代串行数据速率中精确进行裕量分析。

此外, 泰克把广泛的应用方案组合带到 DPO7000SX 家族中。这一组合包括 50 多种解决方案, 用于企业、数据

通信、移动通信和显示等应用中的物理层一致性测试、特性分析和调试。同时适用于第三代标准和第四代标准的解决方案, 提供自动测试设置和执行、内置报告选项、深入分析等多种功能。

与上一代示波器相比, DPO7000SX 系列示波器为高性能一致性测试和调试应用提供了大量的优势, 包括:

1) 高带宽、低噪声 ATI 通道, 为当今和未来最快速的信号提供最好的信号保真度和最宽的测量裕量。

2) 灵活的结构, 可以在客户地点配置仪器, 从 23 GHz 扩展到 70 GHz, 而几乎没有中断。

3) 业内最佳的触发功能, 支持 25 GHz 边沿触发带宽, 简便地捕获最快速的信号。

4) 高精度时基, 在当今最快速的标准上提供准确的定时和抖动测量功能。

5) 集成计数器/定时器, 实现高精度定时测量, 分析设计特点, 调试问题。