

一种便携式智能导热测试仪的设计*

陈援峰 杨伟钧

(广州城市职业学院机电工程系 广州 510405)

摘要:本文研究了反映材料导热性能的导热系数的测试方法与系统。针对现有导热测试设备体积大,只能测量样品导热系数,测试结果不准确等缺陷,设计一种以平板作为监测终端的便携式导热测试仪。系统基于 STM32 控制器检测样品质量、厚度、温度曲线以测量导热系数,同时将图片或者数据文件形式存储于平板的测试主机,方便后期处理。检测过程中,系统动态调整压力,降低受温度影响导致的样品膨胀等误差影响,实验平台上显示系统能准确测试导热系数,运行稳定。

关键词:导热系数;智能终端;便携式;STM32

中图分类号: TN803.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.604

Design of portable and smart thermal conductivity coefficient instrument

Chen Yuanfeng Yang Weijun

(Department of Electromechanical Engineering, Guangzhou City Polytechnic, Guangzhou 510405, China)

Abstract: The test method and system of thermal conductivity to reflect the thermal conductivity of materials are studied. For the existing thermal test equipment, large volume, can only measure the thermal conductivity of the sample, the test results are not accurate and other defects, the design of a flat as a monitoring terminal portable thermal conductivity tester. System based on STM32 controller to detect sample quality, thickness, temperature curve to measure the thermal conductivity, while the picture or data file format stored in the flat test host, to facilitate post-processing. During the testing process, the system dynamically adjusts the pressure and reduces the influence of temperature caused by temperature expansion. The experimental platform can accurately test the thermal conductivity and stable operation.

Keywords: conductivity coefficient; smart thermal; portable; STM32

0 引言

导热系数是反映材料的导热性能的重要参数之一^[1],在工程技术方面是必不可少的,所以对导热系数的研究和测量就显得很有必要^[2]。金属材料的导热起主要作用的是自由电子的运动,无机非金属材料的导热则是通过晶格结构的振动(声子)来实现。目前测量导热系数的方法都是建立在傅里叶导热定律的基础上的,分为稳态法和动态法^[3-4]。稳态法是通过热源在样品内部形成稳定的温度分布后,再进行测量的方法^[5]。

传统稳态法导热测试仪存在以下问题:测试过程需人员实时监测数据、时间长、效率低、受环境影响大、测试数

据不统一、偏差较大等^[6]。因此,设计一款便携式智能导热测试仪具有重要的现实意义和广阔的市场空间^[7]。

1 工作原理

1.1 系统原理

当物体内部各处的温度不均匀时,就会有热量从温度较高处传递到温度较低处,这种现象叫热传导现象。对于各向同性的物质,在稳定传热状态下有傅里叶定律:

$$\Delta Q = -\lambda \frac{dT}{dx} \Delta S \Delta t \quad (1)$$

式中:比例系数 λ 称导热系数,其值等于相距单位长度的

收稿日期:2017-07

* 基金项目:2016年广东省科技计划“公益研究与能力建设专项”(2016A010101040)、广州市科技计划2015年科学研究专项(201510010192)、广州城市职业学院教育教学改革项目(JY2013063)资助

两平面的温度相差为一个单位时,在单位时间内通过单位面积所传递的热量,单位是 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

1.2 系统结构

测试系统由加热器、连接样品的上下热极、冷却器、温度传感器、位置传感器、加压及压力检测系统、主控核心、蓝牙通信模块组成。上下热极均采用紫铜加工而成,内置等间距温度传感器,作用是传递热量和测量热量^[8]。上热极内装加热器,由主控板 PWM 方式驱动并采用 PID 控温,提供稳定的热极温度^[9]。下热极底部安装冷却器,内有水槽,通过管导与外恒温水箱相连,利用外恒温水箱与冷却器的水循环,在冷却器中形成第二恒温场,提供下热极冷端稳定温度。上下热极各内置 3 支温度传感器,分别测量上下热极的 6 个温度点,利用温度梯度计算热流量。上热极顶端及冷却器底端均安装隔热材料,防止热量传导^[10]。主机结构如图 1 所示。

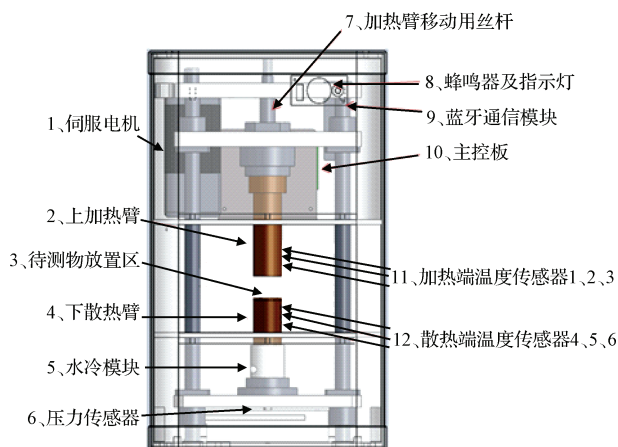


图 1 主机结构

上隔热材料通过丝杆组件连接伺服电机,带动下热极上下移动,下隔热材料底部安装压力传感器,用于测试样品质量及实时工作压力。伺服电机通过丝杆驱动上热极向下移动贴合样品,压紧后动态调节贴合压力,用于消除试样与热极的热阻,并同时测试物品厚度。主控核心采集温度、压力、厚度等数据;同时驱动加热器,伺服电机驱动器,指示灯及蜂鸣器;并通过蓝牙模块接收指令及上传数据^[11]。

采用稳态法测量导热系数。试样被夹在两金属棒之间,使用厚度为 5 mm 热绝缘材料与箱体隔离,确保所有能量都集中在上下热极^[12]。测试时,一方面加热单元直接将热量通过待测样品上平面传入样品,另一方面冷却单元使传入样品的热量不断由样品的下平面散出,当传入的热量等于散出的热量时样品处于稳定导热状态,这时样品的上下平面的温度分别为一定的数值。此时,通过样品厚度、半径、温度梯度与通过样品的热流便可计算导热系数。具体计算过程如下:

1) 流过待测样品的热流

$$Q_{23} = \frac{\lambda_{23} \cdot A}{d} \cdot (T_2 - T_3) \quad (2)$$

式中: Q_{23} 为流过上热极的热流, λ_{23} 上热极材料的热导, $T_2 - T_3$ 上热极两个点的温差, A 垂直于热流方向的热极截面积, d 热极两温差电偶的距离, $\lambda_{23} = 386.4 \text{ W/m} \cdot \text{K} = 386.4 \text{ W/m} \cdot \text{K}$; $d = 0.1 \text{ m}$; 热极直径为 30 mm。

温度点 1、6 远离样品,可作为补偿;考虑下热极(低温端)热量损失较小,热流值更精确,因此用它表示流过待测样品的热流,即 $Q = Q_{45}$ 。

2) 与试样相接触的高测量块的温度

$$T_H = T_3 - \frac{d_B}{d_A} \times (T_2 - T_3) \quad (3)$$

式中: T_H 与试样相接触高测量块温度, T_2 高测量块的较高温度, T_3 高测量块的较低温度, d_A 高温传感器间距, d_B 低温传感器到测量块高温表面的距离。测试中,测量点 1、2、3 等间距 0.01 m, 3 到测量块高温表面的距离也为 0.01 m, 故 $d_B = d_A$ 。

3) 与试样相接触的低温测量块的温度

$$T_C = T_4 + \frac{d_D}{d_C} \times (T_4 - T_5) \quad (4)$$

式中: T_H 与试样相接触低测量块温度, T_4 低位测量块的高温, T_5 低位测量块的低温, d_C 低温传感器间距, d_D 高温传感器到测量块低温表面的距离, 测试中,测量点 4、5、6 等间距 0.01 m, 6 到测量块低温表面的距离也为 0.01 m, 故 $d_D = d_C$ 。

4) 试样导热系数的计算

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{A \cdot (T_H - T_C)} \quad (5)$$

式中: A 为试样截面积, d 为试样厚度。

2 系统结构及测试流程

系统结构如图 2 所示,由微控制器 STM32F103C8T6 主控核心、温度采集模块、压力采集模块、伺服电机输入及驱动、PWM 加热驱动及过流保护、蓝牙通信模块、电源、平板检测 APP 等组成^[13]。

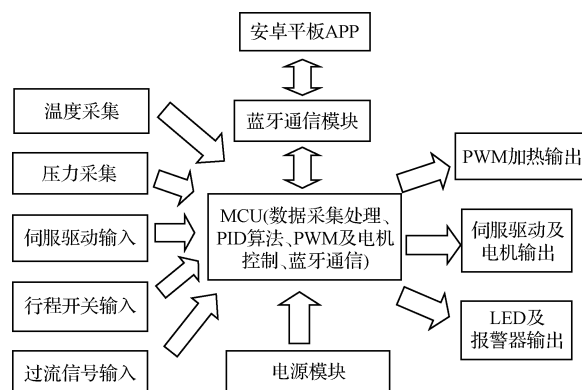


图 2 系统结构

1)数据采集部分主要包含:①温度信号采集,进行温度控制及导热系数计算;②压力采集,提供样品质量及实时压力;③伺服驱动反馈信号输入,计算移动距离及样品厚度;④开关信号输入,防止移动距离越界,损坏机械结构。⑤过流信号采集,防止过载导致的设备损坏^[14]。

2)数据处理包含如下:①温度信号处理:使用滤波算法及插值算法对温度信号进行处理,提高温度准确度;②压力处理:使用滤波算法对压力信号处理,提高压力准确度;③距离处理:对输出至伺服驱动器信号脉冲及反馈脉冲计数,计算移动距离,防止失步;④开关信号及过流信号处理:判断热极运动位置及工作电流,保护机械及电气装置;⑤蓝牙收发信号处理,接收平板 APP 端发送的控制信号,并上传采集的温度、压力等信号;⑥利用采集的温度信号经过 PID 算法,进行 PWM 输出信号的控制,达到恒温控制目的^[15]。

3)数据输出:发热棒 PWM 信号输出,伺服驱动器信号输出,LED 及蜂鸣器输出。

4)蓝牙通信:采用蓝牙串口透传,连接平板 APP 端,进行控制信号及采集的温度、压力、位置、时间信号的传递。

测试流程:放置样品,关闭舱门。上位机控制端(平板)发出“启动”指令,主控板控制伺服电机驱动器驱动伺服电机工作,通过连接丝杆旋转带动上热极下移,同时采集压力传感器压力值和伺服电机驱动器转数值,当压力值达到上位机控制端(平板)设定压力值时进入压力相对稳定阶段(随热膨胀变化调整),主控板采用 PWM 方式控制上热极内置的加热棒工作,持续加热并通过 PID 算法保证温度点 3 恒定为 60°C (默认值,可预设)。每 0.5 s 检测 6 组温度数据一次,并根据采集温度值计算导热系数及热阻。主控板每秒通过蓝牙通信模块发送一次数据至上位机,上位机每 10 s 刷新一次图形,每次可显示共计 1 200 s 内温度曲线。

当温度点 3 稳定为 $60\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 且保持 100 s 无明显变化时,认为温度恒定,测试完成,上位机自动截屏存储数据于设定文件夹下。加热棒停止工作,上热极上升 30 mm,蜂鸣器响表示测试完成,转入待机状态,等待下次测量。

3 系统软件设计

3.1 软件流程

系统软件流程设计如图 3 所示,系统启动自检后进入待机模式,根据系统的指令进入测试温度阶段,系统采用 PID 算法进行温度的测试。根据温度是否达到目标值,从而进入不同的工作状态。最后,在达到温度目标时,以蜂鸣器提示,再次进入休眠模式。

3.2 上位机软件

上位机平板端 APP 如图 4 所示,可设定发热端需要

恒定的温度(默认 60°C);对检测物施加的压力;用于保存截屏数据的文件路径;设备启动/停止;蓝牙连接设置;参数设置。

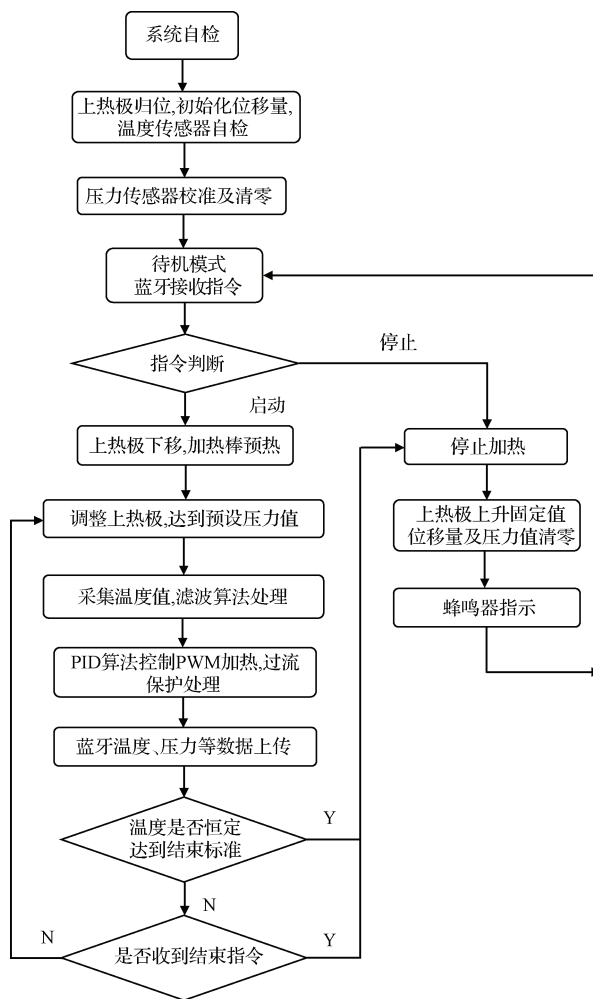


图 3 软件设计流程

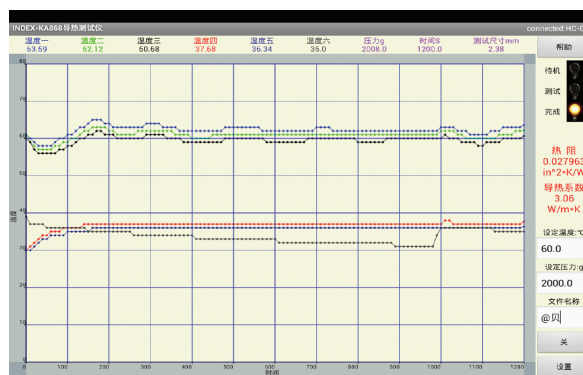


图 4 APP 控制及显示界面

主界面可显示蓝牙连接状态;6组温度值“ $^{\circ}\text{C}$ ”;压力“g”;实际工作时间“s”;样品厚度“mm”;设备工作状态;实测样品的热阻及导热系数值;帮助信息等。

图4中坐标横轴为工作时间(最大1 200 s,间隔100 s),纵轴为温度(最大80℃,间隔10℃),考虑屏幕分辨率,时间显示间隔为“点/10 s”,温度显示间隔为“点/1℃”,温度曲线自上至下依次为温度传感器1~6实时温度值。

4 测试及数据分析

实测系统如图5所示,含主机及平板终端,另选用智能恒温水箱作为冷端散热设备。测试采用控制变量方式采集不同的数据,进行全功率加热及过流保护测试、降温测试、PID温控测试、伺服电机测试及压力测试、蓝牙连接测试等,最后进行全系统测试,针对不同导热材料测试其导热系数及热阻。



图5 实测系统

1)空载(冷端不制冷)全功率加热测试如图6所示,系统可在300 s内将热端由常温(20℃)加热至工作温度(60℃),考虑温控精度要求,加热功率及速度满足设计要求。

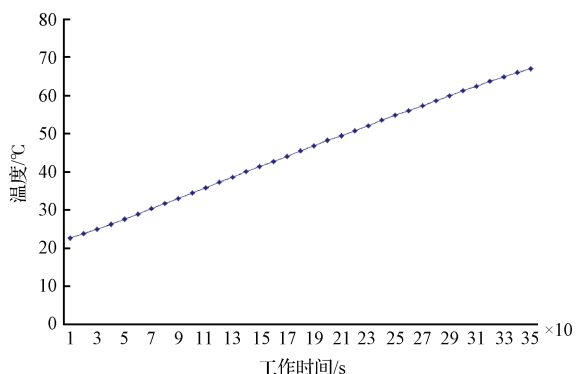


图6 空载全功率加热测试

2)冷端30℃散热曲线如图7所示,数据显示当取消热端停止加热后,系统可在100 s内将冷端由工作常温(43℃)降至接近恒温水箱温度(30℃),典型工作区间(43~35℃)散热曲线平滑,散热效率满足设计要求。

3)PID整定及测试如图8所示:数据显示PID参数经

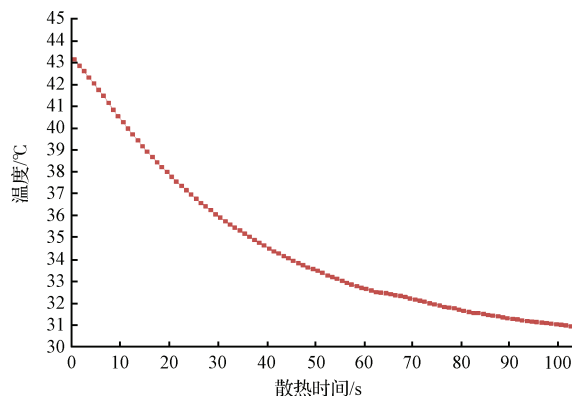


图7 30℃散热测试

过整定后温控达到设计要求。曲线自上至下依次为温度传感器3、4、5点的实时温度值,温度3作为热端PID控制温度(默认60℃),温度4、5为经待测样品后传递至冷端后采集温度。图形显示温度3最高温度61.8℃,120 s后温度稳定在60℃,温度起伏 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,温控效果良好;热量通过样品传递到冷端,点4温度先缓慢上升,后随系统温度稳定后趋于恒定,热平衡后测得最终温度差值,并计算导热系数。

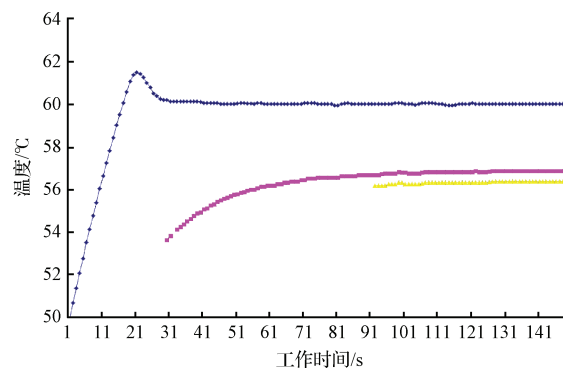


图8 PID温度-时间曲线

4)实际测试,采用美国材料试验协会(ASTM)的ASTM-D5470国际通用标准,测量3次计算均值。选用贝格斯导热硅胶产品2种,导热硅胶生产厂家产品7种(其中5种为同一批次原料不同厚度产品),对比仪器选用真空型导热测试仪1台,电子秤及游标卡尺等工具。部分测试材料及对比测试仪器如图9所示。

测试中环境温度:25℃;样品直径:30 mm;测试压力:1 000 $\pm$ 2 g;热端恒定温度:60 $\pm$ 0.1℃,测试数据如记录如表1和表2所示。从两个表中数据显示,实测数据均满足设计要求,但较标称值偏大,但其主要原因如下。

1)硅胶产品受压变形,厚度变薄,下热极(冷端)温度偏高,式(5)中 $T_H - T_C$ 值偏小,导致实测系数偏高,且随厚度增加,压缩导致的变形量变大,偏差也更大。在实际测试中,如果调小压力会导致上下热极和被测材料贴合不紧密,热传导不充分,选择合适的检测压力和材料变形量



图9 待测样品与设备

有关(部分检测样品可能是硅脂类流体),需要进一步针对不同检测样品做优化。

2)实际厂家产品为保证满足设计要求,在成本范围内均会稍微调高原料掺比,避免导致残次品,导热系数值比标称值也会偏高。

3)采用对比测试仪器测得结果也显示实测值比标称值偏高,但其偏差较小,主要原因在于采用真空方式后减少了环境温度及空气对流对测试结果产生的影响。

5 结 论

该文设计了一种便携式导热测试仪,选用芯片STM32F103作为系统控制及处理核心,手机或平板电脑作为测试终端,灵活设定测试参数,实时显示测试数据。经实验及数据分析证明,该系统稳定可靠,测试结果满足设计要求。设备体积小重量轻,便携易操作,测试速度快,便于现场快速测试。

表1 样品基本测试

产品	标称厚度/mm	实测厚度/mm	标称导热系数/(W/m·K)	实测系数(均值)/(W/m·K)	偏差/%
贝格斯	1.00	0.99	3.00	3.03	+1
贝格斯	2.00	1.98	0.75	0.76	+1.3
松泽硅胶	1.50	1.48	1.50	1.52	+1.3
松泽硅胶	2.00	1.97	1.50	1.53	+2
松泽硅胶	2.50	2.45	1.50	1.54	+2.6
松泽硅胶	3.00	2.94	1.50	1.54	+2.6
松泽硅胶	3.50	3.42	1.50	1.55	+3
松泽硅胶	1.00	0.99	2.00	2.02	+1
松泽硅胶	2.00	1.97	3.00	3.04	+1.3

表2 测试仪器比对测试

产品	标称厚度/mm	测试设备	标称导热系数/(W/m·K)	实测系数(均值)/(W/m·K)	偏差/%
松泽硅胶	1.50	本仪器	1.50	1.52	+1.3
松泽硅胶	1.50	真空型导热测试仪	1.50	1.513	+0.86
松泽硅胶	2.00	本仪器	3.00	3.04	+1.3
松泽硅胶	2.00	真空型导热测试仪	3.00	3.022	+0.73

参 考 文 献

[1] 赵鹏,荆红莉. 无线 PM2.5 测试仪的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2016, 39(6):134-137.

[2] 魏明. 眼睛理疗仪智能控制器设计[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(6):85-88.

[3] 颜奕,黄宇,陈鸣,等. 基于电容阵列 I-V 测试仪的光

伏 STC 曲线拟合研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(2):272-279.

[4] 易秀成,王波,方春明. 多要素防雷装置综合测试仪研发[J]. 电子测量技术, 2016, 39(10): 130-134.

[5] 林伟,马新香. 便携式光通信综合测试仪的研制[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(5):43-47.

[6] 朱萍萍,马蒙蒙. 一种可配置的通用 GPS 终端测试仪

- 的研制[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(6): 66-69.
- [7] 白国政. 基于 ME3M-CH₂O 型便携式甲醛测试仪的研制[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(2): 41-44.
- [8] 张克明. 基于 FPGA 和 ARM9 的电压波动与闪变测试仪设计[J]. 电子测量技术, 2013, 36(5): 87-90, 96.
- [9] 张玉健, 张江伟. 自动电阻测试仪的设计及其误差处理[J]. 电子测量技术, 2012, 35(3): 87-89, 111.
- [10] 宋会平, 孙荣霞, 张锁良, 等. 太阳能电池板充放电测试仪的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2012, 35(1): 22-24.
- [11] 陈思运, 刘炫, 沈超, 等. 基于可穿戴设备感知的智能家居能源优化[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(3): 704-715.
- [12] 郭银景, 李玉翠, 司动丽, 等. 电场侵入式理疗仪的设计与实现[J]. 微型机与应用, 2014, 33(8): 16-18.
- [13] 易秀成, 王波, 方春明. 多要素防雷装置综合测试仪研发[J]. 电子测量技术, 2016, 39(10): 130-134.
- [14] 赵鹏, 荆红莉. 无线 PM_{2.5} 测试仪的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2016, 39(6): 134-137.
- [15] 张竞择, 郑敏信, 王倩, 等. 蓄电池内压测试仪的开发与应用[J]. 电子测量技术, 2015, 38(9): 98-101, 111.
- [16] 杜冬, 尹学峰, 吉小军. 基于 FPGA 的脉冲信号发生/测试仪一体化设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(1): 64-68, 94.

作者简介

陈援峰, 1979 年出生, 硕士, 讲师, 主要研究方向为嵌入式系统、测控技术。

E-mail: 164331685@qq.com

NI 针对工业物联网发布全新的 IP67 边缘节点

这款最新的工业控制器将 IP67 可靠性加入高性能处理和控制应用中

2017 年 11 月 28 日, NI(美国国家仪器, National Instruments, 简称 NI) 作为致力于为工程师和科学家提供基于平台的系统解决方案来应对全球最严峻工程挑战的供应商, 今日宣布推出 NI 首款 IP67 级控制器 IC-3173 工业控制器。全新的控制器非常适合在恶劣的环境中作为工业物联网边缘节点使用, 包括喷涂制造环境、测试单元和户外环境, 而且无需保护外壳。IP67 防护等级可以确保机器在粉尘和潮湿环境下严格按照 IEC 60529 标准稳定运行。

工业控制器是高性能的无风扇装置, 提供高性能处理和连接功能, 适用于极端环境的自动化图像处理和控制系统。该系列控制器最高配置 2.2 GHz 的 Intel Core i7 双核处理器、8 GB DDR3 RAM、64 GB 存储容量、4 个以太网供电 (PoE) GigE 端口、两个 USB 3.0 端口和两个 DisplayPort, 坚固耐用, 无移动部件, IP 防护等级达到 IP67。工业控制器还包括一个用户可编程 Xilinx Kintex-7 FPGA, 通过提供定制的 I/O 时序、同步、控制和图像协处理功能来提高系统性能。

“NI 工业控制器拥有一套强大的 I/O 资源, 我们只需使

用一个控制器就能满足各种自动化需求, 包括测试、视觉、运动控制和数字 I/O。”Federal-Mogul Powertrain 制造工程师 Jordan Larson 表示, “对于运动和调理 I/O, 使用内置的 EtherCAT 主节点, 大大减少了我们自行开发的自动化机器的布线时间和调试时间。使用工业控制器后, 与以前用于机器视觉的其他相机相比, 每台相机的成本也大大降低了。借助 NI 的工业控制器, 我们减少了机器内部的部件数量, 并将所有的控制软件集成到一个平台上, 这是我们以前无法做到的。”

NI 正在不断研发可支持时间敏感型网络 (TSN) 的新产品, 工业控制器就属于其中的一部分。TSN 是 IEEE 802.1 以太网标准的演进版, 提供了分布式时间同步、低延迟和时间关键及网络流量收敛。除了使用 TSN 进行控制器之间的通信外, 工程师还可使用 NI 今年年初发布的基于 TSN 的 CompactDAQ 机箱来集成高度同步的传感器测量。

如需了解更多关于工业控制器如何帮助工程师开发高性能的图像处理、数据采集或控制系统, 请访问 www.ni.com/en-us/shop/data-acquisition-and-control/what-are-industrial-controllers.html。