

基于 Arduino 单片机的太阳能智能充电 控制器监测系统设计

杨立英

(吉林大学 应用技术学院, 长春 130022)

摘要: 考虑到充电控制器在实际应用过程中未考虑控制器循迹、避障处理, 造成连接稳固能力较差、控制通路信号突变较大问题, 设计一种基于 Arduino 单片机的太阳能智能充电控制器监测系统; 在总体硬件结构基础上, 部署 Arduino 单片机的集成形式, 并联合可移植的太阳能智能监测协议, 对充电控制器的监测节点进行传输处理, 完成监测系统的结构组织搭建; 利用太阳能控制器的循迹标准, 对系统中可能出现的监测问题进行避障处理, 实现智能充电控制器的监测方案选型; 在多个微系数条件的促进下, 对系统的参量误差进行精准标定, 完成基于 Arduino 单片机的太阳能智能充电控制器监测系统设计; 在 40S68S37N03 充电芯片的支持下, 累计监测系统的多次运行调试结果可知, 充电频率处于 30~50 Hz 之间时, 太阳能控制器的连接稳固能力提升明显, 通路控制曲线在保持原有变化幅度的基础上, 出现稳定波动周期, 解决了控制通信号路突变问题。

关键词: Arduino 单片机; 器件电路; 协议移植; 节点传输; 控制器循迹; 误差标定

Design of Monitoring System for Solar Energy Intelligent Charging Controller Based on Arduino MCU

Yang Liying

(Applied Technology College, Jinlin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Considering that the charging controller does not consider the controller tracking and obstacle avoidance processing in the actual application process, resulting in poor connection stability and large sudden change of the control path signal, design a solar intelligent charging controller detection system based on Arduino single chip microcomputer. On the basis of the overall hardware structure, Arduino microcontroller integrated form is deployed, and combined with portable intelligent solar energy monitoring protocol, the monitoring nodes of charging controller are transmitted and processed, and the structure of monitoring system is completed. Using the tracking standard of solar energy controller, the obstacle avoidance treatment of monitoring problems may occur in the system is carried out, and the monitoring scheme selection of intelligent charging controller is realized. Promoted by several micro-coefficients, the parameter error of the system is calibrated accurately, and the detection system of solar intelligent charging controller based on Arduino MCU is designed. Supported by 40S68S37N03 charging chip, the accumulative results of running and debugging of the monitoring system show that when the charging frequency is between 30Hz and 50Hz, the connection stability of the solar controller is improved obviously. On the basis of maintaining the original variation range, the path control curve has a stable fluctuation period, which solves the problem of the sudden change of the control signal path.

Keywords: Arduino MCU; device circuit; protocol transplantation; node transmission; controller tracking; error calibration

0 引言

Arduino 是一款灵动性较强的电子原型平台, 包含所有型号的 Arduino 板硬件设备和 Arduino IDE 操作软件, 具备极高的实用适应能力。这种单片机平台组织的开放原始码以 simple I/O 介面版语言作为编写依据, 且融合 C 语言、Java、Processing/Wiring 等多种编程代码作为新条件语句的生成环境。最基本的 Arduino 单片机包含软、硬件组织两种组成成分, 其中硬件部分可以简单概括为用作连接电路的 Arduino 电路板结构, 而软件部分则是具备更改操作能力的 Arduino IDE 代码^[1-2]。当系统计算机在 IDE 组织中编写

程序代码时, 输出设备会将这些信息直接传输至 Arduino 电路板, 并以此达到执行系统语句指令的目的。

近年来太阳能智能充电控制器在多项工业领域中都出现迅猛发展的势头, 但随着器件设备运行时间的不断增加, 连接稳固性下降、控制通路无序等问题, 都对控制元件自身的应用执行能力造成严重负面影响。为解决上述问题, 搭建一种基于 Arduino 单片机的太阳能智能充电控制器监测系统, 按照软硬件平台搭建、控制器监测方案选型、实用误差标定的操作流程, 将相关系统执行参数调试至最佳应用状态。

1 充电控制器监测系统的结构组织

在总体硬件结构的基础上, 连结 Arduino 单片机模块, 并对监测协议进行有效移植, 实现节点的定向传输, 完成

收稿日期: 2019-03-02; 修回日期: 2019-03-25。

作者简介: 杨立英(1971-), 女, 吉林榆树人, 博士研究生, 副教授, 主要从事计算机仿真与控制、信号处理方向的研究。

充电控制器监测系统的结构组织搭建。

1.1 系统参数与硬件总体结构

太阳能智能充电控制器监测系统设计参数：采用 atmega8515l - 8muavr 单片机，40S68S37N03 芯片，CC2530F64 兼容设备，772100 PNOZ m B0 基础继电器，ARM8227 嵌入式主板 ARM9 处理器，MC34063API 34063AP1 DIP8/DC-DC/转换器设备。

太阳能智能充电控制器监测系统的硬件总体结构包含感知数据采集、控制传输、监测数据分析 3 个组成环节。其中，感知数据采集单元由 Arduino 单片机模块、CC2530 设备和基础继电器组成，在执行充电数据选择、控制连接、监测对照功能的基础上，实现充电控制器的监测数据采集。系统硬件总体结构如图 1 所示。

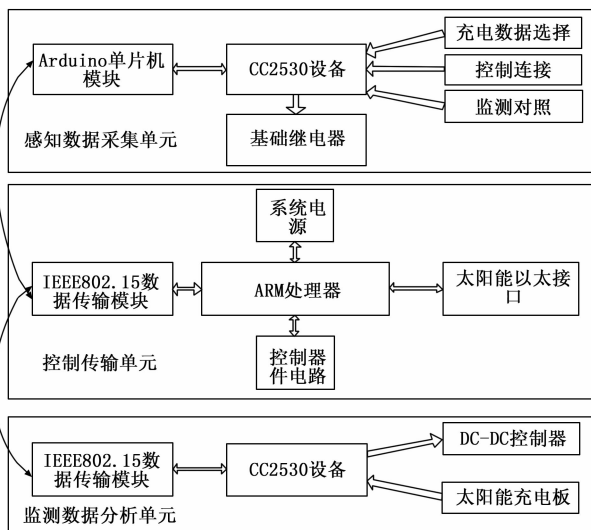


图 1 系统硬件总体结构图

Arduino 单片机的功能是促进太阳能智能充电控制器监测程序的迅速执行，并以此达到巩固系统连接稳定能力的目的^[3-4]。控制传输单元在太阳能智能充电控制器监测系统中起到承上启下的作用，在 IEEE802.15 数据传输模块与 ARM 处理器的促进下，连结太阳能以太网接口，并整合器件电路与系统电源，在符合控制调试接口传输要求的前提下，供应系统控制监测数据的快速传输。监测数据分析单元在 CC2530 设备的基础上，利用 DC-DC 控制器截取充电控制器监测数据的模式运行条件，并将其传输至太阳能充电板中进行深入分析研究。

1.2 Arduino 单片机模块集成

单片机控制器在外接自主计算机组织的同时，可以接受 7~12 V 的直流输入电压。在模块单独运行的过程中，充电控制数据保持数字输入状态，且可对器件电路提供 5 V 和 3.3 V 两种备选输出电压条件。

Arduino 单片机模块采用 BST-V51 的智能集成底板，在太阳能充电线路处于闭合状态的前提下，调整控制器电机转速，使系统驱动能力在短时间内达到顶峰状态，并以此迫使未经完全利用的太阳能电子快速流入器件控制电路，

达到减少无功监测消耗的目的。

1.3 太阳能智能监测协议移植

太阳能智能监测协议是 Light Weight IP 协议与 lwipopts 协议的组合形式，既定义了固有的 IP 轻量级连接条件，也可在精简控制条件下，更改充电控制器监测源代码的开放性强度。Light Weight IP 协议可单独移植充电控制器在监测系统智能内核，并且只能在监测程序保持自定义开发状态的前提下，才能对控制器装置起到太阳能充电调节作用。lwipopts 协议是一种存在于宏观状态下的太阳能充电调节指令，可以根据监测系统智能内核的连接情况，选择控制器装置所需的初始化条件^[5-6]。根据上文可知，Arduino 单片机是监测系统硬件运行环节中的主要执行设备，且 BST-V51 集成底板中的太阳能充电线路具备一定的电子输出能力。太阳能智能监测协议作为监测系统中具有实体形态的软件结构，可以通过编写两类分组小协议头结点的方式，建立宏观模式下的临界代码框架，再借助特定的子网掩码，实现从基础系统执行记录数据到完整监测指令的协议移植操作。具体太阳能智能监测协议移植操作流程如图 2 所示。

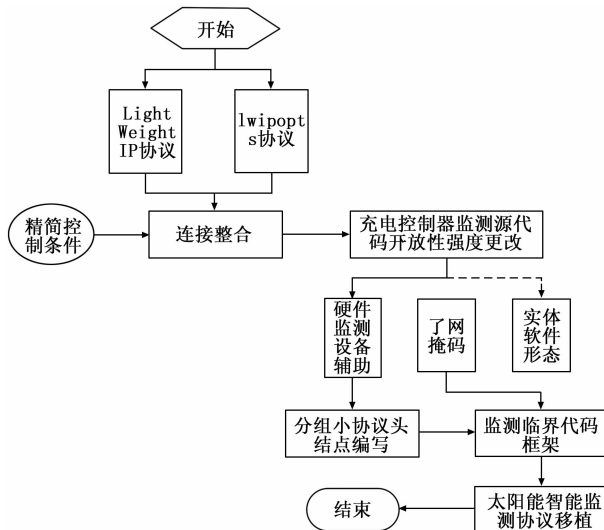


图 2 太阳能智能监测协议移植流程图

1.4 充电控制器的监测节点传输

充电控制器监测节点始终按照 IEEE802.15.4 规则排列，且直接受到太阳能智能监测协议的干扰影响。在充电控制器监测节点的传输过程中，Arduino 单片机首先根据太阳能智能监测协议的移植程度，来判断临界代码框架的完整情况。再在满足系统监测要求的情况下，排查可供选择智能控制器执行数据的解析结果。若排查结果为通过，则太阳能智能控制器数据自发进入充电监测节点中，并跟随系统的运行速度，完成整体的监测循环流程；若排查结果为未通过，则智能控制器数据再需要经历太阳能监测协议的解析处理，直至排查结果为通过，方可自发进入充电监测节点中，完成系统的监测循环操作。在整个监测节点的传输过程中，智能控制器数据始终遵循 Coord 伪代码编写

原理，且在接入监测申请后的节点覆盖情况由局部状态直接转化为全网覆盖状态，在不改变系统运行监测初衷的前提下，可根据如下所示程序语言完成监测节点传输的伪代码编译处理。

```
void main (void);
{
Protocol stack initialisation;
Global Enable Interrupy(); //临界代码框架生成
aplJoinNetwork(); //智能控制器执行数据解析
APS DSTMODE SHORT;
If 'YES';
apl SendMSCi; //充电控制器监测节点定向传输
If 'NO';
aplJoinNetwork();
Until 'YES';
apl SendMSCi;
Return;
}
```

2 智能充电控制器监测方案选型

利用充电控制器监测系统软硬件平台结构，循迹太阳能控制器的监测流程，并对其中的重要处理节点进行避障处理，完成智能充电控制器监测方案的选型操作处理。

2.1 太阳能控制器循迹

太阳能控制器循迹分为内监测走线、外监测走线、环形走线 3 种选型方向，由其中两种或两种以上循迹方式结合，又额外获得 4 种选型方向，故基于 Arduino 单片机的太阳能智能充电控制器监测系统共包含 7 种循迹选型方式。

1) 内监测走线型太阳能控制器循迹：配置两个减速电机作为辅助太阳能智能充电控制器的辅助监测设备，所有连接走线均采用杜邦线。这种控制器循迹方式从系统内部直接连接了 Arduino 单片机与监测控制器，既节省了架构搭建费用，也提升了系统监测精准性，但整体后期循迹避障处理过程的运算量相对较大，不利于系统的综合误差标定处理。

2) 外监测走线型太阳能控制器循迹：配置一个 SMARTDUINO 装置并外接一个电机固定件，用以获取太阳能智能充电控制器的实际监测消耗情况，所有连接走线均采用 Web 数据线。这种控制器循迹方式完全暴露于监测系统外部，且整个操作过程中，太阳能充电控制器的实时消耗情况始终保持明朗状态，具备最大化系统监测精度的应用能力^[7]。

3) 环形走线型太阳能控制器循迹：仅配置一个平台共享装置，位于监测系统内部的走线采用杜邦线、位于监测系统外部的走线采用 Web 数据线^[8]。这种循迹方式的监测精准性相对受限，但总体消耗费用极地，应用范围也不受系统监测运行周期的丝毫影响。

4) 内监测走线+外监测走线型太阳能控制器循迹：这种循迹方式既具备较好的监测精准性，又不需经历复杂的

误差数据处理过程。

5) 内监测走线+环形走线型太阳能控制器循迹：免去了监测系统内部走线对太阳能智能充电控制器实时消耗数据获取的限制，且使系统的监测精确度得到了最大化提升。

6) 外监测走线+环形走线型太阳能控制器循迹：可同时获取监测系统内、外部太阳能智能充电控制器的实时消耗数据，且可将系统的监测精确度长时间保持在最佳状态。

7) 内监测走线+外监测走线+环形走线型太阳能控制器循迹：融合 3 种循迹方式的所有优点。

2.2 监测避障处理

监测轨迹处理是确定太阳能智能充电控制器在监测实施过程中，是否出现较大操作漏洞的重要环节，必须在确定控制器设备自身循迹形式的基础上，判断已出现故障问题监测数据的数量级条件，并根据相关计算公式，完成监测避障处理的标准制定。基本的太阳能智能充电控制器监测避障处理规则只面向内、外、环 3 种走线循迹方式，规定控制器设备单位时间内的最大智能充电量不超过 $|\bar{q}|$ ，最长充电时间为 t ，则可将内、外、环 3 种走线循迹方式的监测避障处理规则表示为：

$$\begin{cases} \omega_1 = \left(\frac{f'}{y_1 + y_2} \right) |\bar{q}| t, \\ \omega_2 = \frac{(1 + \frac{|e|}{u_t}) |\bar{q}|}{p} \\ \omega_3 = |\bar{q}|^2 \left| \frac{f'}{k} \right| (t-1) \end{cases} \quad (1)$$

其中， ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别代表内、外、环 3 种走线循迹方式监测避障指标， f' 代表杜邦线中太阳能充电电子的平均传输速率， y_1 、 y_2 分别代表两个减速电机的辅助监测参量， $|e|$ 代表 SMARTDUINO 装置的智能充电系数， u_t 代表最长充电时间条件下 Web 监测数据线的消耗常量， p 代表太阳能充电控制器的实时消耗状态参量， k 代表环形循迹方式的物理监测周期。

复合型太阳能控制器循迹方式不具备明确的计算公式，只是在公式 (1) 的基础上，通过分布加工 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 三类监测避障指标的方式，得到全新的复合型避障处理规则，其具体运算原理如公式 (2) 所示：

$$\begin{cases} \omega_4 = \frac{\omega_1 \cdot \omega_2}{i \times l} \\ \omega_5 = \frac{\omega_2 \cdot \omega_3}{l \times j} \\ \omega_6 = \frac{\omega_1 \cdot \omega_3}{i \times j} \\ \omega_7 = \frac{\omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \omega_3}{i \times l \times j} \end{cases} \quad (2)$$

上式中， ω_4 、 ω_5 、 ω_6 、 ω_7 分别代表内监测走线+外监测走线型太阳能控制器循迹的避障指标、内监测走线+环形走线型太阳能控制器循迹的避障指标、外监测走线+环形走线型太阳能控制器循迹的避障指标、内监测走线+外监测走线+环形

走线型太阳能控制器循迹的避障指标, i, l, j 分别代表与内、外、环 3 种走线循迹方式监测避障指标相关的监测利用系数。

3 系统误差标定

在太阳能智能充电控制器监测系统运行过程中, 产生误差的因素来自多个方面。特别是在控制器设备循迹等多个执行处理流程中, 往往不仅要考虑到多种应用线路器件间的结合适配性, 还要通过多种技术手段, 使系统的监测精准程度不断向预期标准数值靠近^[9-10]。简单来说, 误差标定就是在保持系统运行设备主观能动性完整的前提下, 利用数据逼近的处理手段, 使与监测精准度相关的可变偏差结果逐渐缩小, 直至最终结果满足人为可接受物理范围需求。

控制器数据采集误差、监测目标选取误差、运行环境误差是三类主要系统误差条件。控制器数据采集误差多发生于监测系统软、硬件设备原件的安装过程, 受到 Arduino 单片机充电干扰条件 χ 的直接影响, 取 D 作为控制器数据采集上限条件, 可将该项采集误差结果表示为:

$$F_1 = 2 \left[\sum_{d=-\infty}^D (\lambda \chi - s) \right] \quad (3)$$

其中, d 代表控制器数据的随机采集向量, λ 代表 Arduino 单片机的智能化干扰频率, s 代表太阳能控制器所承受的平均监测干扰数据量。

监测目标选取误差标定以避障处理原则选取作为执行依据, 在默认基于 Arduino 单片机太阳能智能充电控制器监测系统采用内走线循迹方式的前提下, 可将该项误差采集结果表示为:

$$F_2 = \frac{\delta^2 (\sum s^2)}{\partial F(w_1)} \quad (4)$$

δ 代表与内走线循迹方式相关的选取系数, s 代表与监测目标选取相关的被积向量, $F(w_1)$ 代表监测系统默认定义的、与内走线循迹相关的目标函数, $\partial F(w_1)$ 代表该函数定义式的定积分表达式。

运行环境误差是与太阳能充电控制器监测系统执行结果最相关的物理系数条件。设 ξ_1, ξ_2 代表两个不同的监测系统默认控制器充电偏移向量, F_3 代表该项误差采集结果, 则其具体表达式如下。

$$F_3 = \frac{\sqrt{1 - (\xi_1 \times \xi_2)^2}}{vb} \quad (5)$$

v 代表监测系统控制器的最大太阳能充电量, b 代表系统常性监测系数。

联立公式 (3)、(4)、(5), 利用数据逼近处理要求, 可将基于 Arduino 单片机太阳能智能充电控制器监测系统的误差标定结果表示为:

$$\tilde{M} = 1 - n \cdot x \sqrt{\frac{1}{3F_1 \times F_2 \times F_3}} \quad (6)$$

上式中, n 代表太阳能智能充电控制器的监测可信度, x 代表平均误差标定系数。

4 系统运行调试

系统运行调试主要包括监测太阳能控制器连接稳固能力测试、通路控制曲线绘制两个方面。已知控制器稳固性越高、通路曲线密集区域越多, 系统监测精准程度越高, 反之则越低。

4.1 充电电路架设

在 40S68S37N03 芯片的支持下, 将 8 个外接充电脚桩分别与 Arduino 单片机、IEEE802.15 数据传输模块、ARM 处理器、CC2530 设备顺次相连, 其中每 2 个脚桩对应一个系统原件, 按照从上之下、从左至右的连接顺序。C18、R11、C8、U5 是 4 个相同的定向设备控制开关, 其中 C18、R11 开关直接控制 40S68S37N03 芯片的连接闭合状态, C8、U5 则与外接电阻相连, 通过相同的连接或闭合状态来控制电阻是否接入电路。

在确保 40S68S37N03 芯片正常运行, C18、R11、C8、U5 开关同时闭合, 外接电阻直接连入充电电路的前提下, 开始对太阳能智能控制器监测效果的实验检测。

4.2 监测太阳能控制器连接稳固能力测试

分别将基于 Arduino 单片机太阳能智能充电控制器监测系统和普通监测系统与实验用外界检测采集装置相连, 前者为实验组、后者为对照组。多次调节 CC2530 设备, 使监测用控制器设备的充电频率处于 30~50 Hz 之间, 为减少实际操作次数, 本次实验共取 30 Hz、40 Hz、50 Hz 三种控制器设备充电频率作为实验备选条件。每次调节操作后保持 1 min 的静置时间, 使外界检测数值表中数据趋于稳定, 并记录此时数值表中所显示的 NS 数值 (控制器连接稳固系数), 详细实验数据结果如表 1、表 2 所示。

表 1 实验组 NS 数值表 Mb

频率/Hz	1	2	3	4	5	6	7	8
30	0.57	0.59	0.63	0.70	0.74	0.71	0.66	0.58
40	0.72	0.76	0.79	0.81	0.83	0.83	0.83	0.77
50	0.86	0.79	0.82	0.91	0.88	0.89	0.85	0.80
	9	10	11	12	13	14	15	16
30	0.55	0.52	0.54	0.64	0.69	0.72	0.73	0.75
40	0.74	0.69	0.74	0.68	0.81	0.77	0.74	0.81
50	0.95	0.84	0.79	0.81	0.86	0.78	0.84	0.96

表 2 对照组 NS 数值表 Mb

频率/Hz	1	2	3	4	5	6	7	8
30	0.31	0.36	0.40	0.40	0.37	0.32	0.33	0.41
40	0.42	0.40	0.43	0.41	0.40	0.38	0.41	0.45
50	0.37	0.39	0.32	0.35	0.37	0.31	0.36	0.38
	9	10	11	12	13	14	15	16
30	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
40	0.41	0.40	0.44	0.42	0.39	0.43	0.45	0.44
50	0.38	0.38	0.35	0.32	0.36	0.34	0.39	0.3.8

纵向观察实验组 NS 数值可知, 随着充电频率不断增加, NS 数值增加明显。已知 NS 数值与系统监测精准性呈现正相关影响关系, 在整个实验过程中, 实验 NS 数值最大值可达 0.96, 即为接近 1 (NS 数值永远不可能超过 1), 极为符合系统实际监测需求。而对照组 NS 数值仅能在充电频率处于 30~40 Hz 之间时, 保持明显上升情况, 充电频率达到 50 Hz 时, 对照组 NS 数值变化异常, 甚至有可能低于 30 Hz 情况下的 NS 数值, 且最大值也远低于 1, 对系统实际监测需求的符合程度远低于实验组。

4.3 监测通路控制曲线

监测通路控制曲线由多个 degee 节点连接而成, 在保持 4.2 中操作步骤不变的前提下 (已知控制器设备充电频率对 degee 监测器数值并无影响, 本次实验默认频率参量为 30 Hz), 在每次 CC2530 设备调节操作后, 触动 ARM 处理器, 直至 degee 监测器数值发生改变, 并记录第一次改变时的数值情况, 作为一个 degee 节点, 经过多次记录后, 可绘制如图 3 所示的监测通路控制曲线。

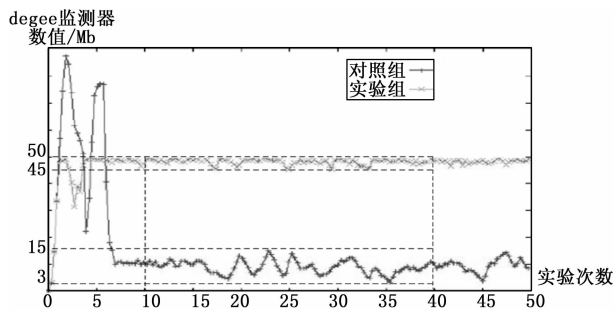


图 3 监测通路控制曲线图

由图 3 可知, 基于 Arduino 单片机的太阳能智能充电控制器监测系统, 信号波形较为稳定、规律。该系统能有效地改变传统系统在检测过程中, 检测通路信号突变较大的问题。

为保证实验结果的真实性, 取第 10~40 次的中端实验数据作为主要参考依据。分析图 3 可知, 在该段时间内, 实验组监测通路控制曲线出现了相对明显的周期性变化趋势, 且最大值、最小值的变化趋势均有据可循, 对于太阳

能智能充电控制器监测系统来说, 这种周期性波动趋势极易提升系统自身的监测精准性。对照组监测通路控制曲线在该段时间内, 无明显波动变化趋势, 且最大值、最小值的变化状态也不唯一, 不利于系统监测精准度的提升。

5 结束语

在 Arduino 单片机的支持下, 太阳能智能充电控制器监测系统具备了一定的稳固能力, 且使控制通路信号突变的物理现状得到了有效改善。软硬件设备方面, 也不再受到节点传输限制等条件的影响, 可对系统误差等运算物理量进行基本标定处理, 对提升系统自身的监测精准度具备极强的促进意义。

参考文献:

- [1] 张 军, 张海云, 赵玉刚, 等. 基于 Arduino 单片机的微型智能自动循迹搬运车的设计 [J]. 机床与液压, 2018, 46 (3): 43-46.
- [2] 王 磊, 张翠霞. 机器视觉笔迹识别和 Arduino 控制机器人的设计 [J]. 电子技术应用, 2017, 43 (11): 15-17.
- [3] 朴政国, 郭裕祺, 户永杰, 等. 一种集成化蓄电池脉冲充放电控制器 [J]. 电工技术学报, 2017, 32 (10): 231-240.
- [4] 李 斌, 关天一. 电动汽车充电机控制系统建模与滑模变结构控制 [J]. 电机与控制学报, 2018, 22 (2): 64-70.
- [5] 邓 响, 李朝庆, 程小辉. 基于物联网的智能家居远程无线监控系统设计 [J]. 计算机应用, 2017, 37 (1): 159-165.
- [6] 匡海健, 胥布工, 李伟胜, 等. 基于 Web 的智能建筑节能监控系统的设计 [J]. 计算机应用, 2017, 37 (a01): 344-346.
- [7] 张 军, 赵玉刚, 杨 强, 等. 微型自动循迹搬运车控制系统的开发 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017 (7): 133-136.
- [8] 田涛涛, 侯忠生, 刘世达, et al. 基于无模型自适应控制的无人驾驶汽车横向控制方法 [J]. 自动化学报, 2017, 43 (11): 1931-1940.
- [9] 李 勋, 张 欣, 孙朔冬, 等. MEMS 陀螺误差模型标定实验与分析 [J]. 电子设计工程, 2017, 25 (17): 164-167.
- [10] 李鹏飞, 郝 宇, 费华平, 等. 基于多直线融合的雷达误差标定算法研究 [J]. 雷达科学与技术, 2017, 14 (6): 682-686.

(上接第 88 页)

- [4] 屠 锐, 曾自强. 一种用于电磁分离器的电源系统的高压屏蔽结构 [P]. 中国专利: ZL201610903321.1, 2017.11.21.
- [5] 何克忠, 李 伟. 计算机控制系统 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [6] 崔 坚. TIA 博途软件—STEP7 V11 编程指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [7] 崔 坚. 西门子工业网络通讯指南: 上册, 下册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

- [8] 崔 坚. 西门子 S7 可编程控制器—STEP7 编程指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [9] 张 春. STEP7 编程语言与使用技巧 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [10] 王国宝, 曾自强. 一种同位素电磁分离器 [P]. 中国专利: ZL201610905806.4, 2017.11.21.
- [11] 米亚静, 曾自强. 一种用于同位素电磁分离器真空系统及其控制系统 [P]. 中国专利: ZL201610907015.5, 2018.05.22.