

基于 MCU 的四旋翼无人机智能电源系统设计*

陈 璨 李 林 刘复玉 任旭虎

(中国石油大学(华东)信息与控制工程学院 青岛 266580)

摘 要:介绍了一种基于 MCU 的四旋翼无人机智能电源管理系统设计和实现方案。本系统以 STM32 MCU 为控制核心,以 TI 公司的降压控制器 LM5117 和 CSD18532KCSMOS 为核心器件,由滤波模块、稳压模块、电压反馈模块、AD 控制模块、显示模块组成。利用 LM5117 的 DC-DC 功能和反馈模块,系统不但实现了动力系统要求的恒压恒流功能,此外还具有过流保护功能以及负载识别能力;通过抑制电源纹波的产生,满足了控制系统的低噪声纹波电压的要求,另外系统进行了抗干扰设计。

关键词:四旋翼无人机; STM32; DC-DC; 低噪声纹波

中图分类号: TP242 TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4061

Design of intelligent power supply system for four rotor UAV based on MCU

Chen Can Li Lin Liu Fuyu Ren Xuhu

(College of Information and Control Engineering, China University Of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: This article introduced a quadrotor UAV power management system's design and implementation scheme. With the STM32 MCU as the core, and TI company's LM5117 and CSD18532KCSMOS step-down controller as the core device, the system is composed by filtering module, voltage regulator module, AD module and voltage feedback control module as well as display module. By using LM5117 DC-DC function and feedback module, the system not only carries out the function of constant pressure and current which power system demands, it also implements the function of over-current protection and load identification ability. By inhibiting the production of power supply ripple, it satisfies the control system's low noise ripple voltage requirements. In addition, the system carries out anti-interference design.

Keywords: four rotor UAV; STM32; DC-DC; low noise ripple

1 引 言

四旋翼无人飞行器具有结构简单、便于维护、体积小、机动性好等优点,广泛应用于军事和民用等各个领域。例如在民用领域,因四旋翼飞行器体积小、重量轻、能够垂直起降和悬停,可以飞入建筑、洞穴或对人类有危险的环境中执行观测、作业或救援任务,也可以在楼宇间执行安防任务;正因为四旋翼飞行器可以在相对狭小的空间内执行任务,所以对控制的精确性具有较高要求。

在影响四旋翼飞行的精确控制的因素中,除了由气动引起的系统的不确定性部分外,还有一部分不确定性是由电源所导致的,电源引起的不确定性分为两部分^[1]: 1)动力部分,例如电机的 PWM 控制与电机转速之间的关系受电源的输出电压的影响,如果电源不稳定,则电机

不能按照预期生成所需的动力,很容易引起系统的误差。2)控制部分,在学生做四旋翼无人机科技活动时,发现通讯及控制经常出现的故障多是由电源纹波多,电压电流不稳定等造成的。传统的电池输出电压由于电源内阻的存在,当需要大电流输出时会导致压降,致使输出的电压降低;另外随着工作时间的延长,电池储存的电量逐渐的减少,也会导致输出的电压降低。这样显然不能满足长时间的稳定飞行或复杂多变的飞行状态要求。

针对四旋翼飞行器对电源的要求轻便、效率高、纹波少的实际需求出发,本文设计并实现了一种新型电源转换管理实验系统。系统在电源 DC-DC 转化的基础上,实现恒压恒流,使得动力系统能按控制器要求生成需要的动力,同时通过抑制电源纹波的产生以减小系统误差,达到精确控制的要求。

收稿日期:2017-03

* 基金项目:山东省重点教改项目(2015Z025)、校级实验教改项目(YJ-A201624)资助

2 方案设计与论证

以 TI 公司的降压控制器 LM5117 芯片和 CSD18532KCS MOS 场效应管为核心器件,设计并制作一个安全可靠、成本低、输入直流电压为 16 V,输出功率为 100 W、输出电压为 12 V 的一个降压型直流开关稳压电源应用于四旋翼无人机。系统能满足当负载改变时,输出电压基本不变。具体指标如下:

- 1) 额定输入电压下,输出电压偏差: $|\Delta U_o| = |16\text{ V} - U_o| \leq 100\text{ mV}$;
- 2) 额定输入电压下,最大输出电流: $I_o \geq 10\text{ A}$;
- 3) 输出噪声纹波电压峰值: $U_{OPP} \leq 50\text{ mV}$ ($U_{IN} = 16\text{ V}$, $I_o = I_{Omax}$);
- 4) 效率: $\eta \geq 85\%$ ($U_{IN} = 16\text{ V}$, $I_o = I_{Omax}$);
- 5) I_o 从满载 I_{Omax} 变到轻载 $0.2I_{Omax}$ 时,负载调整率: $S_r = \left| \frac{U_{O轻载} - U_{O满载}}{U_{O满载}} - 1 \right| \times 100\% \leq 5\%$ ($U_{IN} = 16\text{ V}$)。

在系统总体组成框图的基础上简要介绍几个主要部分的方案设计,系统总体组成如图 1 所示。

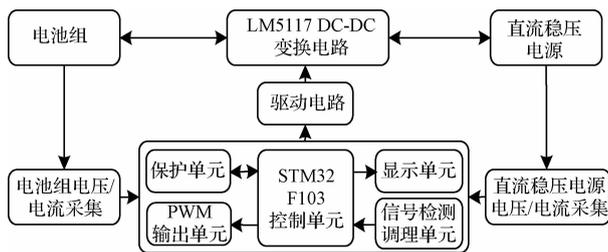


图 1 系统总框图

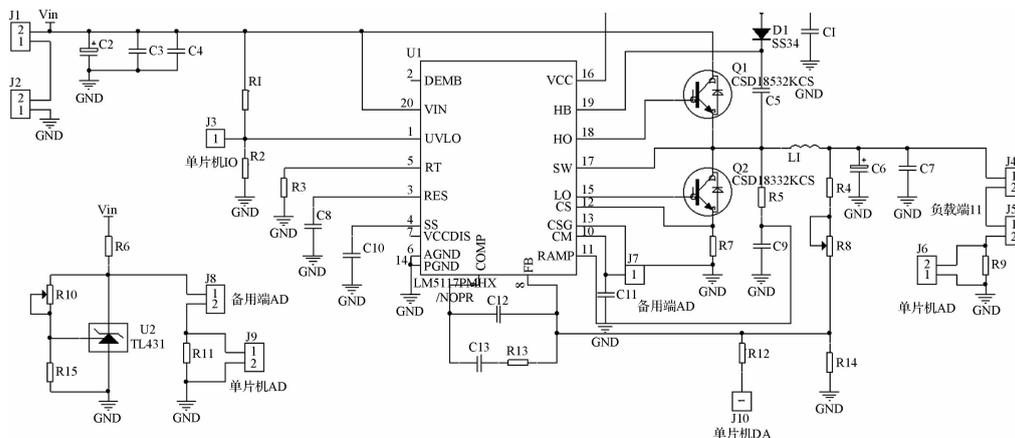


图 2 LM5117 及 DC-DC 主回路电路

2.3 开关管的选择

选择场效应管 CSD18532KCS MOS 作为开关管,管子导通的压降很低而且导通电阻只有几十毫欧,损耗比 IGBT 作为开关管的方案要小许多,因此比较后选择这一方案。

3 理论分析与电路实现

为了实现了动力系统要求的恒压恒流功能,以及控制

2.1 核心处理器方案选择

ST 公司基于 ARM[®] Cortex[™]-M4 内核的 STM32 系列 MCU 是专为要求高性能、低成本、低功耗的嵌入式应用设计的。STM32F103 单片机使用高性能的 ARM 的 32 位的 RISC 内核,工作频率为 72 MHz,内置高速存储器,高达 128 K 字节的闪存和 20 K 字节的 SRAM,丰富的增强 I/O 端口和联接到两条 APB 总线的外设。包含 2 个 12 位的 ADC、3 个通用 16 位定时器 and 1 个 PWM 定时器,还包含标准和先进的通信接口^[2-3]。处理器的稳定性与反应速度对控制调节结果影响很大,故选择计算功能强大,速度快速的 STM32F103 单片机进行系统的控制。

2.2 LM5117 及 DC-DC 主回路功能介绍

TI 公司产品 LM5117 是一种降压式 DC/DC 变换器。通过芯片内部的稳压器,输入电压为 PWM 控制器和 NMOS 栅极驱动器提供了 VCC 偏置电源。LM5117 可编程开关频率高达 750 kHz,通过对电压和电流进行检测和调理,将数据送入控制单元中进行 PI 调节器处理,产生 PWM 信号控制 DC-DC 变换器。RT 引脚允许通过一个电阻或同步至外部时钟对开关频率进行编程。故障保护功能包括逐周期和打嗝模式电流限制、热关断及远程关断功能,拉低 UVLO 引脚即可实现。其模拟遥测功能提供了平均出电流信息,适用于需要电流监控或电流控制的各种应用。DC-DC 主回路工作原理如图 2 所示。Q1、Q2 相当为开关管,当 Q1、Q2 导通时,输入电压 VIN 通过电感 L1 向负载供电,与此同时也向电容 C6 充电。在这个过程中,电容 C6 及电感 L1 中储存能量。当 Q1、Q2 截止时,由储存在电感 L1 中的能量继续向输出端供电,当输出电压要下降时,电容 C6 中的能量也向输出端放电,维持输出电压不变。

系统的低噪声纹波电压的要求,从两个方面进行优化设计,一方面是利用微控制器进行程序控制优化,利用先进控制算法实现控制的最优化,另一方面是对硬件的选型和参数进行最优化设计^[4-6]。

3.1 理论分析和程序设计

本设计采用电压、电流双闭环 PI 调节的方式控制输

出电压,电流环通过负反馈来实现,电压环采用电流电压双闭环控制,这种方法计算与调试均较难,但此种控制方法可实现系统调节的快速性和稳定性^[7-9]。用小电阻采集开关电源各自的电流信号和总体的输出电压信号,经过信号的调理传送给MCU,采用数字PI调节器调节控制,达到稳定输出电压和电流的效果。

3.1.1 电流环控制器的设计

PWM脉冲触发和变换装置等效为纯滞后环节,并将储能电感环节和电容两端输出电压和电流的关系进行拉氏变换,得到各环节的传递函数^[10-13]。根据以上关系,得到控制系统传递函数总框图,如图3所示。电流环以跟随性能为主,故将电流环校正为典型I型系统,可以表示为:

$$W_I(s) = W_{PI}(s)W_{obj}(s) = \frac{K_i(\tau_i s + 1)}{(\tau_i s + 1)(T_s s + 1)(L R s + 1)} = \frac{K_1}{s(T_1 s + 1)} \quad (1)$$

经计算,电流调节器比例系数 $K_{pi} = 4.046$,积分系数 $K_{Ii} = 1.061$ 。

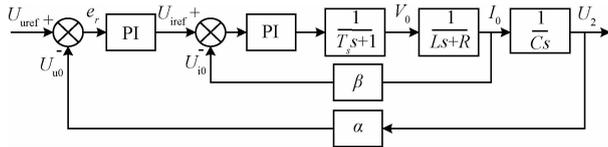


图3 控制系统传递函数总框图

3.1.2 电压环控制器的设计

电压环以抗扰性能为主,故将电压环校正为典型II型系统,可以表示为:

$$W_V(s) = W_{PIV}(s)W_{obj}(s) = \frac{K_v(\tau_v s + 1)}{(\tau_v s + 1)Cs(s/K_1 + 1)} = \frac{K_v}{s(T_v s + 1)} \quad (2)$$

经计算,电压调节器比例系数 $K_{pv} = 0.522$,积分系数 $K_{Iv} = 290$ 。

3.1.3 程序流程

主程序流程和中断子程序流程如图4所示。

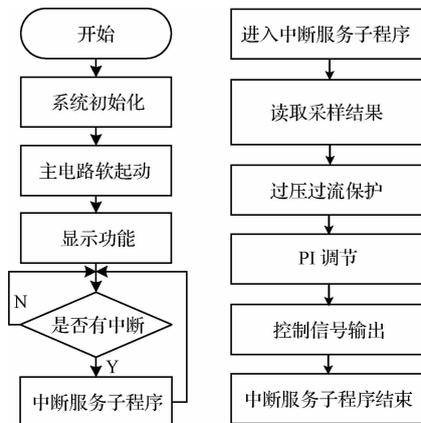


图4 主程序和中断子程序流程

3.2 电路设计和实现

本设计是以TI公司的降压控制器LM5117芯片和

CSD18532KCS MOS场效应管为核心器件,设计并制作的降压型直流开关稳压电源,因此LM5117芯片外围电路的设计至关重要。LM5117的外围电路如图2所示,具体设计参数分析如下^[14-15]。

1) 定时电阻 R_T

$$\text{计算出 } 230 \text{ kHz 开关频率下的 } R_T \text{ 值: } R_T = \frac{5.2 \times 10^9}{100 \times 10^3} -$$

$948 = 51.052 \text{ k}\Omega$, R_T 即为图2中的R3。

2) 输出电感 L_o

对于这个设计,选择的纹波电流为1.2A。已知频率、最大纹波电流、最大输入电压和标称输出电压,电感值计算如下:

$$L_o = \frac{V_{OUT}}{I_{PP(MAX)} \times f_{sw}} \times \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN(MAX)}}\right) = \frac{5 \text{ V}}{3 \text{ A} \times 0.4 \times 100 \text{ kHz}} \times \left(1 - \frac{5 \text{ V}}{55 \text{ V}}\right) = 37.88 \mu\text{H} \quad (3)$$

L_o 即为图2中的 L_1 。

3) 电流检测电阻 R_s

转换器的性能根据K值会有所不同。对于本设计,选择了 $K=1$,以控制次谐波振荡和实现单周期阻尼。考虑到误差和纹波电流,最大输出电流能力应高于所需输出电流的20%~50%。因此选择12A的130%。检测电阻值为:

$$R_s = \frac{V_{CS(THD)}}{I_{OUT(MAX)} + \frac{V_{OUT} \times K}{f_{sw} \times L_o} - \frac{I_{PP}}{2}} = \frac{0.12 \text{ V}}{12 \text{ A} \times 1.3 + \frac{12 \times 1}{230 \text{ kHz} \times 10 \mu\text{H}} - \frac{1.04 \text{ A}}{2}} = 7.3 \text{ m}\Omega \quad (4)$$

其中, R_s 即为图2中的R7。

4) 斜坡电阻 R_{RAMP} 和斜坡电容 C_{RAMP}

电感电流斜坡信号是通过斜坡电阻 R_{RAMP} 和斜坡电容 C_{RAMP} 仿真的。斜坡电容 C_{RAMP} 值设置在820pF的标准电容值。斜坡电阻 R_{RAMP} 值可以用如下公式计算。

$$R_{RAMP} = \frac{L_o}{K \times C_{RAMP} \times R_s \times A_s} = \frac{38 \mu\text{H}}{1 \times 820 \text{ pF} \times 25.12 \text{ m}\Omega \times 10} = 184.48 \text{ k}\Omega \quad (5)$$

其中, R_{RAMP} 即为图2中的R5, C_{RAMP} 即为图2中的C9。

5) U_{VLO} 分压器 R_{UV1} 、 R_{UV2} 和 C_{FT} ^[5-6]

所需启动电压和迟滞由分压器 R_{UV1} 、 R_{UV2} 来设定。电容 C_{FT} 为分压器提供滤波。对于这样的设计,启动电压设置为14V,低于 $V_{IN(MIN)}$ 1V。 V_{HYS} 设置为2V。 R_{UV1} 、 R_{UV2} 的值计算如下:

$$R_{UV2} = \frac{2 \text{ V}}{20 \mu\text{A}} = 100 \text{ k}\Omega \quad (6)$$

$$R_{UV1} = \frac{1.25 \text{ V} \times 100 \text{ k}\Omega}{14 \text{ V} - 1.25 \text{ V}} = 9.8 \text{ k}\Omega \quad (7)$$

其中, R_{UV2} 即为图2中的R1, R_{UV1} 即为图2中的R2。

6) 环路补偿元件 C_{COMP} 、 R_{COMP} 和 C_{HF}

环路补偿元件 C_{COMP} 、 R_{COMP} 和 C_{HF} 环路补偿元件可配置误差放大器的增益和相位特性以实现稳定的电压环路增益。内部高增益误差放大器可以产生一个与 FB 引脚电压和内部高精度 0.8 V 基准之差成正比的误差信号。连接至 COMP 引脚的误差放大器的输出允许用户实现 II 型环路补偿元件, 即 R_{COMP} 、 C_{COMP} 和可选的 C_{HF} 。电路如图 5 所示, 其中 R_{COMP} 为图中的 R13, C_{COMP} 为图中的 C13, C_{HF} 为图中的 C12, 具体参数计算按照下面 4 个步骤进行。

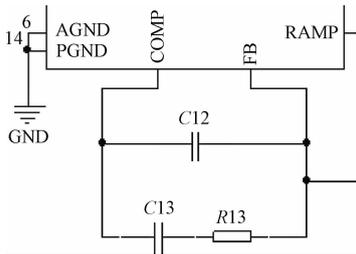


图 5 电压环路增益补偿电路

(1) 选择 f_{CROSS} : 通过选择 1/10 的开关频率, f_{CROSS} 可计算如下:

$$f_{CROSS} = \frac{f_{sw}}{10} = \frac{186\ 000}{10} = 18.6\ \text{kHz} \quad (8)$$

(2) 确定所需的 R_{COMP} 。已知 f_{CROSS} , R_{COMP} 可计算如下:

$$R_{COMP} = 2\pi \times R_s \times A_s \times C_{OUT} \times R_{FB2} \times f_{CROSS} = 2\pi \times 23.78\ \text{m}\Omega \times 10 \times 514\ \mu\text{F} \times 4.99\ \text{k}\Omega \times 10\ \text{kHz} = 56\ \text{k}\Omega \quad (9)$$

其中, R_{COMP} 选择的标准值为 56 kΩ。

(3) 确定 C_{COMP} 以消除负载极点, R_{COMP} 选择的标准值为 27.4 kΩ。

$$C_{COMP} = \frac{R_{LOAD} \times C_{OUT}}{R_{COMP}} = \frac{\frac{5\ \text{V}}{3\ \text{A}} \times 514\ \mu\text{F}}{38.3\ \text{k}\Omega} = 14\ \text{nF} \quad (10)$$

其中, C_{COMP} 选定的标准值为 14 nF。

(4) 确定 C_{HF} , 以消除 ESR 零点已知 R_{COMP} 和 C_{COMP} , C_{HF} 可计算如下:

$$C_{HF} = \frac{R_{ESR} \times C_{OUT} \times C_{COMP}}{R_{COMP} \times C_{COMP} \times R_{ESR} \times C_{OUT}} = \frac{10\ \text{m}\Omega \times 514\ \mu\text{F} \times 22\ \text{nF}}{38.3\ \text{k}\Omega \times 22\ \text{nF} - 10\ \text{m}\Omega \times 514\ \mu\text{F}} = 135\ \text{pF} \quad (11)$$

其中, C_{HF} 选定的标准值为 135 pF。

4 系统测试

4.1 硬件测试

测试仪器有示波器、万用表、直流电源等。在各个电路焊接完毕后, 判断仿真电路和硬件电路是否都与系统原理图完全相同, 检查无误后进行测试, 测试原则是首先每级电路分开单独测试, 然后进行级联测试, 测试是否达到

设计要求。测试时先在 VIN 接 16 V 的直流源, 改变负载测量电压波动, 对信号调理电路进行单独测试, 电压电流检测电路输入几十毫伏小信号, 测量输出信号和纹波大小, 判断电路能否满足恒压恒流和低纹波电压等参数指标要求以及进一步改进。

4.2 硬件软件联调

将主电路和控制电路连接, 同时将信号检测模块与 MCU 系统相连无误后上电, 微调电源电压, 观察系统输出电压能否达到预期的稳压和稳流要求; 改变系统负载, 测试系统能否跟随负载的变化自动调节输出, 同时在这一过程中通过示波器观察电路的纹波情况, 改变电路状态, 测试系统电流控制精度、电流变换率、电路运行效率。

在一定的负载情况下, 以一定的电压 ($16 \pm 2\ \text{V}$) 作为输入为例, 测量结果如表 1 所示。

表 1 负载时的测量结果

测量项目	设计指标	实际结果
输出电压偏差 ΔU_0	$\Delta U_0 \leq 100\ \text{mV}$	30 mV
最大输出电流 I_O	$I_O \geq 10\ \text{A}$	13.5 A
输出噪声纹波 U_{OPP}	$U_{OPP} \leq 50\ \text{mV}$	27 mV
负载调整率 S_i	$S_i \leq 5\%$	4.8%
电压调压率 S_v	$S_v \leq 0.5\%$	0.39%
效率 η	$\eta \geq 85\%$	92%
电源重量	0.2 kg	0.15 kg

根据测试数据, 该稳压电源在一定的电压输入范围内, 输出电压偏差 ΔU_0 较小, 输出电压及输出电流符合设计要求, 同时输出噪声纹波电压峰峰值 U_{OPP} 约为 27 mV, 输出效率为 92%, 由此可以得出以下结论: 1) 系统具有恒压恒流和低噪声纹波。2) 系统具有过流保护功能和负载识别功能。3) 除负载外, 电源重量为 0.15 kg。综上所述, 本设计总体来说可以达到设计要求。

5 结论

本系统采用 STM32 MCU 为控制核心, 以 TI 公司的降压控制器 LM5117 和 CSD18532KCSMOS 为核心器件, 利用 LM5117 的 DC-DC 功能和反馈模块, 同时采用双闭环系统的 PID 调节算法, 实现了在过流时封锁输出, 故障消除后恢复自动运行的保护性设计, 从测试的数据与系统的运行情况来看, 系统不但实现了动力系统要求的恒压恒流功能, 同时也满足了控制系统的低噪声纹波电压的要求, 另外系统进行了抗干扰设计, 具有过流保护功能以及负载识别能力。经实地测试, 能够较好满足四旋翼飞行器的实际需要, 表明该系统具有较好的推广和应用价值。

参考文献

- [1] 李彦辉, 唐胜景, 杨盛毅, 等. 基于电压补偿的四旋翼

- 动力系统建模与实验[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(5): 934-939.
- [2] 林志琦, 郎永辉, 王岩, 等. 倍压整流电路电容参数的优化设计[J]. 吉林工学院学报, 2009, 30(5): 551-555.
- [3] 陈巍, 王国富, 张法全, 等. 一种新型高功率因数电源的设计[J]. 电子技术应用, 2014, 40(11): 60-63.
- [4] 马秀荣, 白红蕊, 白媛, 等. 一种抑制电源分配网络并联谐振的方法[J]. 电子技术应用, 2012, 38(8): 59-62.
- [5] 王忠民, 张延波, 郭林鑫, 等. 振动能量收集电源电路设计[J]. 微型机与应用, 2015, 34(5): 24-26.
- [6] 文玉梅, 叶建平, 李平, 等. 一种振动自供能无线传感器的电源管理电路[J]. 电子技术应用, 2011, 37(11): 84-88.
- [7] 蔡方凯, 张玉平. 基于 DSP 实现双闭环控制的直流电源[J]. 电力自动化设备, 2009, 62(10): 35-37.
- [8] 刘晓倩, 黄建, 全应栓. 带恒功率负载的机载直流电源系统稳定性分析[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(11): 60-64.
- [9] 张卫宁. TMS320C2000 系列 DSP 原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [10] 杜云朋, 王建斌. 基于 LTC3872 的超声导波检测系统电源设计[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(2): 50-53.
- [11] 严琦龙, 陈庭勋. 基于 DPA425 的小功率无线电源设计[J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(7): 27-31.
- [12] 陈超, 黄建, 梁旭. 基于虚拟仪器技术的直升机电源试验系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(1): 89-93.
- [13] 陈涛, 彭政达. 高性能升压型 DC-DC 电源变换器的设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(6): 55-58.
- [14] 吴红斌, 顾细, 赵波等. 蓄电池充放电管理的全过程仿真研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(8): 843-849.
- [15] 马岚, 王厚军. 基于输出电压和电源电流协同分析的故障诊断方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1872-1877.

作者简介

陈璨, 1978 年出生, 工学硕士, 实验师, 实验教学中心副主任。研究方向为电类基础课程教学和电力电子技术及其应用研究。

E-mail: upcll@163.com

(上接第 107 页)

参考文献

- [1] 周扬铭. 水泥生产关键设备及其节能降耗技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [2] 郭利霞, 李正中. 电气控制与 PLC 应用技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2015.
- [3] 万细阳, 李军. 自动控制系统在西江水厂取水工程中的应用[J]. 自动化仪表, 2006, 27(7): 39-41.
- [4] 温盛军, 王艳, 杨永明. 基于 PLC 的水厂源水处理自动控制系统[J]. 重庆科技学院学报, 2008, 10(1): 69-72.
- [5] 廖常初. S7—200/300 PLC 应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社.
- [6] 赵英. 水泥粉磨站生产线节能的探究[J]. 产业与科技论坛, 2011, 10(15): 91-92.
- [7] 胡红泽. 新型干法水泥生产过程优化控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [8] 张宏峰. 浅谈 PLC 输灰控制系统在我厂的应用[J]. 刊江西煤炭科技, 2009(2): 41-42.
- [9] 刘志军. 组态软件控制技术[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2006.
- [10] 何程, 宋晓梅, 王亚茹. 基于 S7-200 PLC 和 WinCC 的油源控制系统[J]. 电子测量技术, 2015, 38(8): 54-57.
- [11] 李林, 曹军, 陶维青. 光伏系统测量体系 G3_PLC 通信技术实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(1): 141-150.
- [12] 陈小贝, 汪志成, 叶宝安. 基于嵌入式系统的 PLC 触摸屏控制系统设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(3): 54-56.
- [13] 寇志伟, 徐明娜, 李文军, 等. 基于 PLC 的太阳能热水工程水位测控系统[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(1): 69-72.

作者简介

周茂, 1994 年出生, 工学硕士, 主要研究方向为光电检测与成像。

E-mail: 944893426@qq.com