

一种用于基站的柴油发电机组控制器的研究

任 凯, 王金海, 王金超

(天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387)

摘要: 针对山区、偏远乡村等地的通信基站用柴油发电机设计一款专用控制器; 基站使用柴油发电机供蓄电池充电作为电源, 控制器实现蓄电池电量监控, 显示以及控制柴油发电机自动停开机和对蓄电池充电的功能; 控制器以具有 Cortex-M4 内核的 STM32F407 芯片为核心, 通过 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 实时操作系统和 PID 算法对发电机和蓄电池充电进行实时控制; 实验表明, 控制器能够实现发电机的自动控制, 在为蓄电池充电过程中恒压波动小于 $\pm 0.1\text{ V}$, 恒流波动小于 $\pm 0.2\text{ A}$, 实现蓄电池快速稳定充电, 满足基站的供电需求。

关键词: 柴油发电机; 充电控制; STM32F407; PID 控制

Research on Diesel Generator Controller for Base Station

Ren Kai, Wang Jinhai, Wang Jinchao

(School of Electronic and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Design a dedicated controller to control the diesel generators which is used as power source for the communication base station built on the island or remote village. Base station uses the battery as a power source, the controller monitors the battery power and control diesel generator to charge the battery. The controller use STM32F407 chip with Cortex-M4 architecture as the core and use $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ real-time operating system and PID algorithm to ensure the stability of the battery charging. Experiments show that the generator can be automatically controlled by the controller and the charging voltage and current fluctuations were less than $\pm 0.1\text{ V}$ and $\pm 0.2\text{ A}$.

Keywords: Diesel generator; charge control; STM32F407; PID control

0 引言

由于海岛、高山、乡村等偏远地区的通信基站市电供应不便, 需要独立的柴油发电机作为电源^[1]。发电机根据通信基站装置的工作原理来实施基站蓄电池的充电和供应基站稳定的直流电源。控制器应控制柴油发电机组自动起动、运行、自动停止、测量和计量、显示以及故障保护等功能。目前的柴油发电机控制器大部分以 PLC 为核心, PLC 虽然性能稳定, 方便灵活, 当前仍为自动化机组控制器的主力。但其存在着外围电路复杂, 并需配置电压、转速、油压、水温、油温的逻辑判断电路及端口扩展继电器等缺陷^[2]。因此, 本文设计了一种基于 STM32F407 芯片的柴油发电机控制器, 在降低硬件成本的同时保证对发电机的实时监测和控制。

1 系统整体结构

柴油发电机控制器系统结构如图 1 所示。控制器检测发电机发电电压、负载电流、转速、油压、油位、温度等参数并通过开关量控制发电机的自动开关机和加减速。控制器通过 PWM 信号的占空比调节交流励磁机的励磁电流, 以改变主发电机的励磁电流, 从而控制主发电机的输出端电压。发电机内部设有两个蓄电池组, 12 V 蓄电池为控制器提供电源, 48 V 蓄电池组负责向外部基站供电。控制器实时监控 48 V 蓄电池电压和输出电量, 当蓄电池电压过低发电机自动启动对蓄电池进行充电。控制器集成 LCD 触摸屏, 用来显示发电机状态和参数设置。CPU 通过串口与 GPRS 无线模块通信发送发电机各项数据和状态, 供工作人员在异地监控和查询发电机工作

状况。

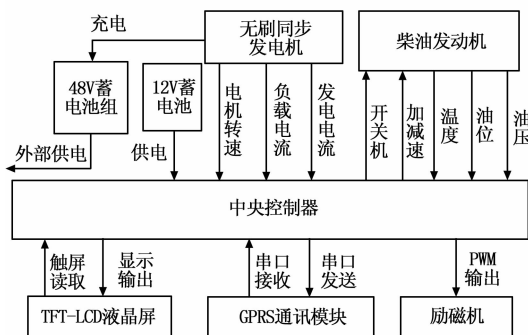


图 1 系统整体结构图

2 控制器硬件设计

2.1 MCU 与外围电路

控制器采用意法半导体公司 (ST) 生产的基于 ARM Cortex-M4 内核的 RISC 32 位微控制器。基于 ARM-Cortex-M4 内核的 STM32F4 系列微处理器是一款集 MCU、DSP、FPU 多种性能于一体的数字信号控制器。其最高主频可达 168 MHz, 支持多种低功耗模式^[3]。片内 1MB Flash, 192 k SRAM, 拥有强大的程序和数据存储能力; 资源丰富, 外围连通性好, 拥有 15 个通信接口; 外围设备丰富, 7 通道 DMA 控制器, 17 个定时器, 3 个速度为 2.4 MSPS 或 7.2 MSPS (交错模式) 的 12 位 ADC; 支持 JTAG/SWD 接口的调试下载及 IAP (在应用可编程), 无需专用的编程器/仿真器; 具有睡眠、停机和待机模式, 体积小、高性能, 满足控制器模拟量采集, 实时运算和低功耗的需求。

STM 芯片内置多条 DMA 总线, 可以直接读取 ADC、定

收稿日期: 2014-03-01; 修回日期: 2014-04-12。

作者简介: 任 凯 (1987-), 男, 天津人, 研究生, 主要从事嵌入式技术, 物联网方向的研究。

时器、串口等外设的数据, CPU 可以节约资源以处理其他程序。芯片内部的定时器作为计数器接收脉冲计算发电机转速。发电机励磁控制器由周期为 2 ms, 精度 12 bit 的 PWM 信号控制, PWM 信号由 CPU 内部定时器产生。发电机转速信号通过 CPU 内部计数器捕捉并实时计算。发电机停机机由 CPU 通过 GPIO 发送开关量信号, 经过 H11L1M 光耦隔离输出至 UL2803 达林顿管, 最终控制继电器开合。

2.2 电源电路

电源电路如图 2 所示。控制器采用 +12 V 蓄电池供电, 控制器所需电平有 +5 V, +3.3 V, +2.5 V。由于发电机使用环境相对复杂且长期无人值守, 对稳定性要求较高, 所以在电路设计上采用电气隔离的设计方式保证控制器稳定工作。控制器内部选用 DFB10-12S5 电源模块, 该模块输入电压 12 V 输出电压 5 V 最大负载电流 2 A, 外部 5 V 电压由 78M05 芯片提供, AMS1117 芯片输出 +3.3 V 电压为 CPU 供电。MC1403D 输出 +2.5 V 高精度电压作为 ADC 参考电压。

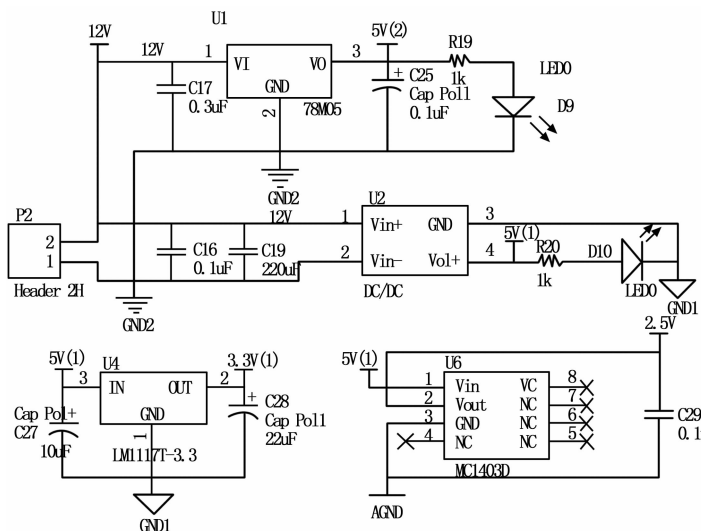


图2 控制器电源电路

2.3 模拟量采集电路

发电机的发电电压、48 V 蓄电池电压、发电电流、负载电流、油压、油位、温度等参数经过调理电路转变成 0~5 V 电压信号输入控制器, 要求控制器 ADC 精度 ≥ 10 bit, 转换速率 > 10 ksp/s。故模拟量采集电路选用 MCP3208 芯片, 该芯片是具有片上采样和保持电路的 12 位逐次逼近型模数转换器, 可被编程为提供 4 组差分输入对或 8 个单端输入。它使用与 SPI 协议兼容的简单串行端口与器件通信, 器件的转换速率可高达 100 ksp/s, 该芯片的转换速率和精度可以达到发电机控制器对模拟量采集的需求。芯片原理图如图 3 所示。电压信号经过两个 10 k 电阻分压后由 MCP3208 在单端模式下对各通道采集, 采集结果通过芯片的 SPI 接口发送至 CPU 进行处理。为了保证系统的稳定性, 在 MCP3208 和 CPU 之间采用 H11L1M 高速光耦进行电气隔离。H11L1M 是一款施密特触发器输出光耦, 最高达到 1 MHz 高速率, 具有卓越的隔离能力。可以满足 MCP3208 与 CPU 之间通过光电隔离的 SPI 接口进行通讯的需要。

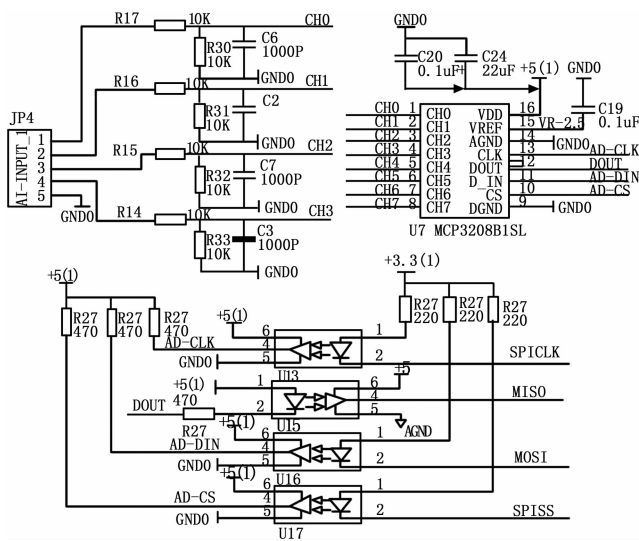


图3 模拟量采集电路

2.4 LCD 接口电路

控制器选用 4.3 英寸 TFT-LCD 显示发电机参数更为简洁直观, 人机交互过程通过触摸屏完成。液晶屏分辨率为 480×272 使用 RA8875 驱动芯片。RA8875 是一个文字与绘图模式的 TFT-LCD 控制器, 该芯片提供低成本的 8080/6800 并列式 MCU 接口, 由于内建强大的硬件加速功能, 可降低数据传输所需的时间并且改善效率。STM32 内部的 FSMC 模块支持 Intel8080 时序, 可通过该模块直接与 RA8875 芯片通信实现液晶屏的快速显示和刷新。FSMC_D0~D15 作为数据引脚, FSMC_NOE 为输出使能, FSMC_NWE 为写使能, FSMC_NE1 为片选信号, FSMC_A16 连接 LCD 的 RS 引脚控制发送指令或是数据。LCD 的 PS 和 C86 引脚接地使 LCD 工作在 8080 模式。

3 控制器软件设计

3.1 软件整体设计

为了保证对发电机控制的实时性和稳定性, 控制器选用 $\mu C/OS-II$ 实时操作系统。LCD 显示开发, 选用 uC/GUI 嵌入式图形支持系统。本系统程序包括显示控制和发电机检测控制。另外触摸屏数据采集需要一个单独任务执行。因此划分 3 个任务: 显示任务, 发电机控制任务和触摸采集任务。根据任务优先级由高向低排序: (1) 发电机控制任务; (2) 触摸屏参数采集任务; (3) LCD 显示任务。

3.2 控制程序

发电机控制流程如图 4 所示。控制器初次启动首先完成各硬件复位, 系统初始化, 变量清零, 第一次开机由人工按键操作完成。控制器检测到启动信号启动次数统计 +1, 检测柴油发动机温度若低于 15℃ 时发动机热机, 否则直接进入启动流程, 依次进行供油、点火、检测转速, 若转速 < 800 rad/min 则重启开机流程, 重启 3 次不成功系统进入故障停机模式, 对外部报警。正常情况系统启动检测 48 V 蓄电池电压, 高于 40 V 时认为蓄电池存在, 进入充电控制流程, 否则默认蓄电池不存在, 进入恒压输出模式。

充电控制流程控制发电机以三阶段充电法为基站蓄电池充电, 采用三阶段充电法避免了恒定电压充电法开始充电电流过

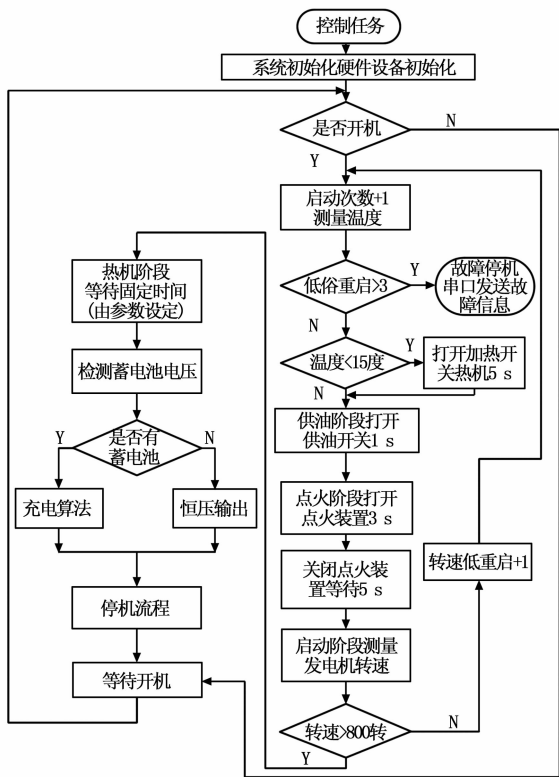


图 4 发电机控制流程

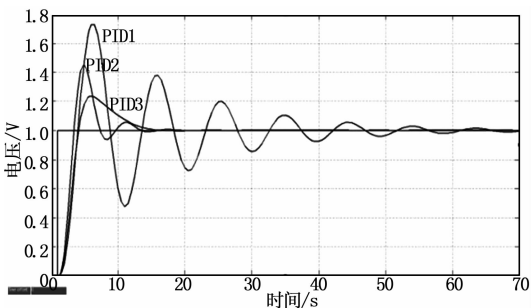


图 5 PID 控制阶跃响应曲线

4 实验结果及结论

4.1 测试结果

本控制器的测试分两个步骤：（1）在实验室条件下搭建测试平台，用于测试控制器各项子功能是否正常，主要参数是否达标。（2）在实际环境条件下测试控制器是否正常工作，能否达到设计要求。本控制器的测试平台结构图 6 所示。直流稳压源作为控

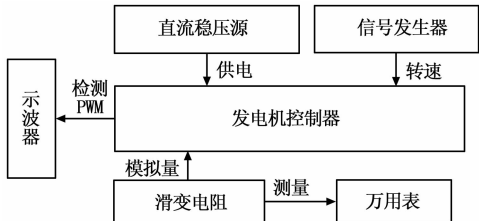


图 6 控制器测试平台结构

大而后期电流又过小的情况，延长了蓄电池使用寿命^[4]。发电机通过调节励磁大小控制输出电压和电流，恒流阶段充电电流保持不变，蓄电池电压逐渐升高，当蓄电池电压大于 56.5 V 后转入恒压模式，此时充电电流逐渐减小，当充电电流小于 5 A 时系统进入浮充阶段。浮充阶段仍然是恒流模式，电流大小为设定值，浮充时间超过设定时间后一次充电过程结束，发电机进入停机流程，蓄电池持续对外供电，控制器通过检测负载电流计算电池放电量，当放电量超过放电深度设定值后发电机重启进入第二次充电电流。

3.3 PID 控制算法及参数整定

发电机的发电电压，负载电流值经过采集和 CPU 运算，由控制器产生 PWM 脉冲至外围电路调节发电机的输出电压。在程序控制发电机恒流和恒压状态时使用 PID 算法稳定发电机输出。基于 PID 数字控制器的计算机控制系统在当今过程控制和控制设备中广泛采用^[5]。基本的 PID 控制规律如公式（1）所示。

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{1}$$

K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例单元、积分单元和微分单元。PID 控制器已被广泛应用于工业过程控制中，且取得了较好的控制效果，通过调节 PID 控制器的参数（ K_p 、 K_i 、 K_d ）使其可以适应于各种不同对象^[6]。通过在 MATLAB 仿真软件建立发电机系统模型，多次调节参数后仿真结果如图 5 所示。

当时曲线如图中 PID3，此时系统超调量最小，响应速度较快且系统震荡最小，电压快速恢复稳定。满足发电机对蓄电池充电和恒压输出的需要。

制器电源，模拟量信号使用电位器模拟，信号发生器提供方波信号代替发电机转速信号。LED 用于检测开关量输出状态，PWM 输出由示波器监测，本平台可以模拟发电机控制的主要控制流程和各个状态。控制器控制周期 $<10\text{ ms}$ ，通过万用表检测 ADC 采集误差 $\leq 2\text{ mV}$ 。经过直流稳压源检测控制器在 12 V 电压下平均输入电流为 0.18 A，功耗相对较低。

在实际环境条件下测试，容量为 1 200 AH 的 48 V 蓄电池组在充满的状态下进行放电，放电深度设定为 70%启动充电，具体测试结果如表 1 所示。在充电过程中恒流和恒压阶段充电电流和电压波动在要求范围以内，控制器可以完成整个发电机控制和充电流程。

表 1 控制器实际测试结果

起始条件	恒流波动范围	恒压波动范围	充电时间
放电深度 70%	$\pm 0.2\text{ A}$	$\pm 0.1\text{ V}$	4 h 43 min

4.2 结论

本文设计了一套针对基站供电的柴油发电机控制器，该控制器以 STM32F407VGT6 微处理器为控制核心，实现对发电机自动控制和蓄电池充电，保证了对基站稳定供电的需求。在 STM32F407 为主控模块的硬件上编写底层驱动程序，实现各个子模块的功能。该系统目前初步完成了对发电机实时控制，充电控制，错误报警。同时，它将柴油机控制系统、发电机电压控制系统集成在一个数字控制器上，保证发电机的控制性能的同时降低了控制器的成本提升性价比。

（下转第 2079 页）

在初始化阶段主节点可以通过服务数据对象对从节点进行配置, 配置的对象包括了几乎所有的 CANopen 配置参数。主节点还包括了 4 个 RPDO 对象和 2 个 TPDO 对象, 用于发送和接收数据对象。总共包含了 6 个 PDO 数据链, 其中两个对应于舵机从节点, 一个 RPDO 用于接收推进舱的工作电流、温度和漏水检测, 一个 TPDO 用于发送舵机的控制量; 两个对应于电源从节点, 均为 RPDO, 用于接收温度、电源电压、电流和漏水检测等数据; 另有两个对应于主推电机, 用于发送控制量和接收返回数据。

对从节点的保护。主节点可通过 RPDO、心跳报文和紧急报文对 3 个从节点进行监控。其中心跳报文可以监控电源和舵机从节点, 两个从节点每隔 1 s 向主节点发送一次心跳报文, 如果在 3 s 内主节点没有接收到从节点的心跳报文, 则主节点会采取相应的措施。

2.2.2 CANopen 网络优化

CANopen 网络在开始启动时, 首先会通过 SDO 报文对各个节点进行配置, 此时是网络的初始化阶段, 这时我们需要保证各个节点配置的功能性。

当 CANopen 网络完成配置并运行时, 我们需要考虑总线负载是否合理。在设计网络时应该尽量保证特定事件响应时间, 如管理报文、紧急报文等, 这些报文通常是事件驱动的因此最好使总线的负载率小于 80%。在本文的网络中, 节点较少, 总线负载率较低。

为了提高对总线中数据通讯的可预测性, 所有的 PDO 类型均采用同步模式。此时在每个通讯周期中可以确定每个数据报文的顺序。同时为了减少同步数据传输时出现的浪涌现象, 在使用 SYNC 报文时, 同时含有计数信息, 并利用该信息将 PDO 报文平均分配。

同时为了提高网络的可靠性, 通过心跳报文对各个节点进行监控。同时各个节点会监控自己的状态, 在将要发生错误时(如错误计数值到达一个阈值后), 将该节点的状态信息发送给主节点。

最终 CAN 总线的的数据报文传输如图 8 所示。在每个同步窗口中, 各个 PDO 类型数据进行发送和接收。同时主节点通过心跳报文对从节点进行监控, 同时也会有异步报文的传输, 如 EMCY 报文。

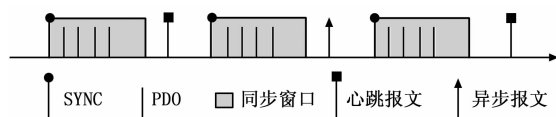


图 8 CAN 总线数据报文

(上接第 2072 页)

参考文献:

- [1] 庄衍平. 通信基站用环保低噪声柴油发电机组 (5kW~24kW) [A]. 通信电源新技术论坛——2008 通信电源学术研讨会论文集 [C], 中国通信学会通信电源委员会, 2008: 5.
- [2] 徐 明. 基于 DSP 的柴油发电机组的控制器设计 [D]. 南昌: 南昌大学, 2005.
- [3] 黄智伟. 基于 STM32F4 的图像压缩技术研究 [J]. 南华大学学报

2.2.3 实验结果

在完成网络组建后, 对其运行的实际效果进行了测试。主节点发送同步报文, 从节点在接收到同步报文后, 根据各自的传输类型决定是否在同步窗口中发送报文。可以检测到在同步窗口内, 会有大量的报文发送, 总线的负载增加; 这主要是因为同步窗口中有大量的同步报文传输, 此时不会影响异步报文和紧急报文的传输。当从节点发生故障时, 可以向主节点发送紧急报文; 如果是严重的故障, 主节点同时可以通过心跳报文检测到, 实现了对从节点的有效监控。

3 结论

本文实现了基于 CAN/CANopen 协议的 AUV 控制系统, 并进行了测试。CAN 协议通过物理层和数据链路层保证了数据传输的实时性和可靠性, 通过 CANopen 应用层提高了网络设计的灵活性, 利用 CANopen 协议, 在设计节点时只需要少量修改即可。分别针对主从设备设计了相应的 CANopen 节点。主节点含有丰富的资源, 主要进行复杂的数值运算, 为了保证 CANopen 网络的可靠性, 可以设计监控进程; 而从节点资源较少, 为了提高实时性, 尽量采用中断响应。采用分布式网络符合 AUV 的模块化设计, 提高了网络的可靠性, 便于添加其它功能模块。

参考文献:

- [1] 王 立, 王世强. 基于 CAN 总线的 AUV 分布式控制系统 [J]. 水雷战与舰艇防护, 2011, 19 (2): 22-25.
- [2] 黄时伦, 刘 健, 王国权. AUV 内部通讯总线设计 [J]. 机器人, 2004, 26 (4): 342-345.
- [3] International Organization for Standardization, ISO-11898 Road vehicles—Controller area network [S]. Switzerland, 2003.
- [4] 饶运涛, 邹继军, 郑勇芸. 现场总线 CAN 原理与应用技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [5] 王桂荣, 钱剑敏. CAN 总线和基于 CAN 总线的高层协议 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 27 (1): 24-30.
- [6] CAN in Automation, CiA-301 CANopen application layer and communication profile [S]. Nuremberg, 2011.
- [7] Boterenbrood H. CANopen high-level protocol for CAN-bus [R/OL]. www.nikhef.nl/pub/departments/ct/po/doc/CANopen30.pdf?, 2000.
- [8] Holger Zeltwanger. 现场总线 CANopen 设计与应用 [M]. 周立功, 黄晓清, 严寒亮译. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [9] Jean J. Labrosse. 嵌入式实时操作系统 μ COS-II [M]. 邵贝贝, 等译. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.

(自然科学版), 2012, (3): 58-63.

- [4] 胡恒生, 王 慧, 赵徐成, 等. 蓄电池充电方法的分析和探讨 [J]. 电源技术应用, 2009, (8): 1-4.
- [5] 陈建国, 黄 河. PID 数字控制器多指标优化模拟设计方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012, (6): 1530-1534.
- [6] 庞丽萍, 曲洪斌, 王 浚. 电加热模糊 PID 控制及仿真研究 [J]. 计算机应用研究, 2004, (9): 225-226.