

# 基于 STM32 的飞机电气负载管理中心设计

马 敏, 刘鹏飞, 刘建英

(中国民航大学 航空自动化学院, 天津 300300)

**摘要:** 传统飞机远程配电系统使用采样电阻对模拟电参数进行采集, 硬件电路繁琐, 实时性、可靠性和采样效率在实用中很难满足系统要求; 针对这种情况, 设计一种基于 STM32 的飞机电气负载管理中心方案, 采用 RN8209 计量芯片替代传统的采样电阻, 设计模拟量采集模块电路, 通过 MODBUS 协议与控制内核通信, 完成汇流条以及负载电压、电流的采集; 以  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  实时嵌入式操作系统为软件平台, 给出了电气负载管理中心的整体框图, 硬件接口电路和系统程序设计; 实验结果表明, 电气负载管理中心实时性得到有效提高, 采样精度得以保留; 该方案有效地简化了硬件电路, 获得满意的采样效率, 同时系统的可靠性增强。

**关键词:** 飞机配电系统; 电气负载管理中心; 实时嵌入式操作系统; 任务优先级

## Design of Aircraft Electric Load Management Center Based on STM32

Ma Min, Liu Pengfei, Liu Jianying

(Aeronautical Automation College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** Aircraft remote power distribution system have been using sampling resistance to collect the analog electrical parameters, the hardware circuit is complicated, real-time performance, reliability, and efficiency of sampling would be impractical to meet system requirements. In response to this situation, an Electric Load Management Center (ELMC) which takes STM32 as the control unit, and with  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  real time embedded operating system as the software platform is presented. RN8209 metering chip is used instead of the traditional sampling resistor. Design the analog acquisition module, and communicate with the control unit through MODBUS protocol. The system block diagram, hardware circuit design and system program design are provided. Experimental results show that real-time of the system is effectively improved, and the sampling precision is preserved. This design can effectively simplify the hardware circuit and achieves satisfied sampling efficiency as well. At the same time, the reliability of the system is enhanced.

**Keywords:** aircraft power distribution; electric load management center (ELMC) embedded real time operation system; priority level

## 0 引言

现代飞机的远程配电系统是当前航空电气研究发展的关键, 目前国产飞机多数采用常规配电系统, 不能实现电气负载的自动管理。先进的电气负载管理中心能够对飞机发电、配电及负载管理等一体化控制, 能够实现负载的自动管理, 提高供电的可靠性, 增强配电系统的维护性和扩展性, 当前先进的飞机如 B787 和 A380 飞机都采用了这种技术。因此研究高效率的飞机电气负载管理中心有其现实意义<sup>[1]</sup>。

先进飞机配电系统由电源系统处理机 (PSP)、电气负载管理中心 (ELMC)、固态功率控制器 (SSPC) 组成<sup>[2]</sup>。PSP 是飞机电源系统的核心, 其主要功能是对飞机供电配电系统进行综合管理。SSPC 用来代替传统飞机上采用的电磁继电器和断路器, 同时兼具有过载、短路等电路保护功能, 若飞机负载短路, SSPC 瞬间进行跳闸, 保护负载, 控制 SSPC 的击穿电流。ELMC 主控单元主要完成飞机的二次配电, 并且实现飞机在飞行过程中对供电系统各个负载监测、保护和远程操控的功能。因此可以说, 设计可靠、稳定、功能强大的电气负载管理中心显得尤为关键。

本文以意法半导体公司的 STM32 为控制内核, 设计一个现代飞机电气负载管理中心的方案, 通过 CAN 总线与 RN8209 芯片进行通讯, 得到负载上的电压、电流、功率、电

量等参数, 接收 PSP 的指令控制各个 SSPC, 将采集到的负载上的电参数以 1553B 总线反馈给 PSP。

## 1 ELMC 整体方案设计

电气负载管理中心 (ELMC) 是飞机远程配电系统的关键, 分布在飞机机身的不同位置, 通过 CAN 总线和各个 SSPC 连接。飞机自动配电系统结构如图 1 所示。

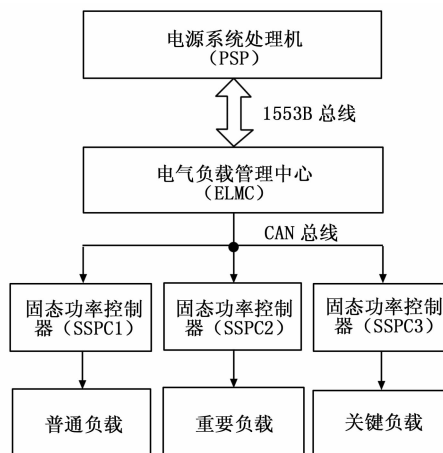


图 1 飞机自动配电系统结构图

由图 1 可知, ELMC 在 PSP 与 SSPC 通信的过程中起到桥梁的作用。ELMC 是 PSP 的一个终端, 通过 1553B 总线相连接, 接收来自 PSP 的控制命令, 并将各个负载的状态信息反

收稿日期: 2014-03-21; 修回日期: 2014-04-17。

作者简介: 马 敏 (1971-), 女, 安徽霍邱人, 教授, 博士, 主要从事航空电气及其自动化方向的研究。

馈给 PSP, 驾驶员在驾驶舱通过 PSP 就可以了解飞机各处负载的工作情况。

ELMC 通过 CAN 总线和 SSPC 相连接, 监控汇流条以及负载上的电压、电流各个参数, 当出现过载或者短路时能够第一时间控制 SSPC 闭合, 从而保护负载。

2 ELMC 硬件模块设计

2.1 硬件模块总体设计

ELMC 硬件模块的总体设计如图 2 所示, 系统控制核心是意法半导体公司生产的高性能 STM32F103ZET6; 电源转换电路为系统各部分提供  $\pm 3.3\text{ V}$ 、 $\pm 5\text{ V}$ 、 $\pm 12\text{ V}$  电源; STM32 与 PSP 通过 1553B 总线相连接; 采用 TJA1050 芯片与各个 SSPC 进行 CAN 通信; 通过串行接口 SPI 访问 RN8209 模拟量采集模块; 同时, 利用通用外设接口负责与二极管、继电器等离散量进行双向通讯。

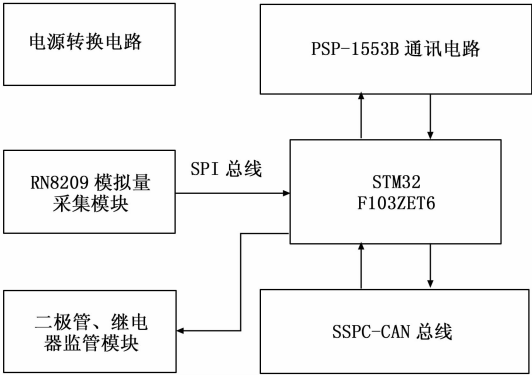


图 2 ELMC 硬件模块总体设计图

2.2 通信电路设计

系统使用 1553B 总线完成 ELMC 与 PSP 之间的通信, SSPC 通过 CAN 总线接收 PSP 的控制命令。CAN 是基于事件触发的串行通信协议, 其控制信号是由系统内部或外部事件触发的, 可以有效地支持具有高安全等级的分布式控制系统<sup>[3]</sup>。

本系统中的 CAN 总线接口电路采用了芯片 TJA1050 作为 CAN 收发器。高速 CAN 收发器 TJA1050 起到连接 CAN 控制器和物理总线的作用, 具有对 CAN 总线实施差动发送和接收的功能, 其传输速率最高可达 1 Mb/s, 且电磁辐射非常低。TJA1050 在不上电时总线呈现无源特性, 这使得任何一个没有供电的节点都不会对总线造成干扰。CAN 总线驱动接口电路如图 3 所示。

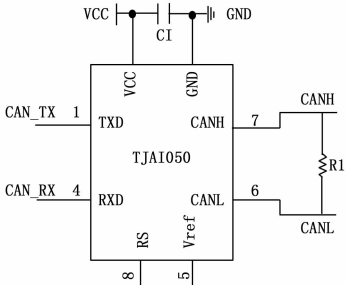


图 3 CAN 总线接口电路

2.3 模拟量采集电路设计

采样电路采集各汇流条电压, 判断 28 V 直流以及 115 V

交流汇流条是否正常, 如果正常, 则通过大功率继电器输送到 ELMC, 由 ELMC 完成对飞机负载的二次配电; 接下来要对负载上的电压、电流等模拟参量进行监测, 当发生故障时, ELMC 会及时控制 SSPC 关断相应的负载, 并将故障信息传送给 PSP, 工作人员可以针对不同的情况做出处理。

模拟采样电路采用的是 RN8209 计量芯片组成的模块, 代替传统的采样电阻, 这样做可以大大简化硬件采样电路, 降低成本, 增加可靠性; 并且此计量芯片可以测量电压、电流、功率、电量等多个电参数, 全方位地监测负载的工作状态。系统采用完全差分输入方式, 抗共模干扰能力非常强。

系统采用 SPI 总线访问 RN8209 芯片, 考虑到 SPI 传输信号线有可能受到外界干扰而出现波动, 设计滤波电路进行滤波, 应用电路所图 4 所示。

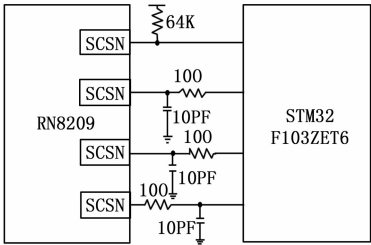


图 4 SPI 接线电路图

3 ELMC 软件系统设计

3.1 软件体系结构

依据模块化、结构化以及标准化的设计思想, 将软件系统分为执行软件和应用软件<sup>[4]</sup>, 如图 5 所示。执行软件采用嵌入式实时多任务操作系统  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ , 其目标是在航空电子综合系统的硬件与应用软件之间提供一个固定接口<sup>[5-6]</sup>。同时  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  可以为每个应用任务分配一个优先级, 基于优先级的任务调度方式使得紧要任务能够优先处理, 可以满足飞机配电系统对实时性的要求。

应用软件主要完成系统中各模块的具体工作任务, 在 ELMC 中体现为对周围负载进行控制, 实时采集负载和分布式汇流条的状态, 并通过 1553B 总线向 PSP 传送状态信息, 并接收来自 PSP 传送的控制命令, 根据 PSP 的布局命令和供电请求, 解算逻辑方程, 控制负载的供电通断, 以及控制转换继电器的动作, 从而实现负载的自动管理。

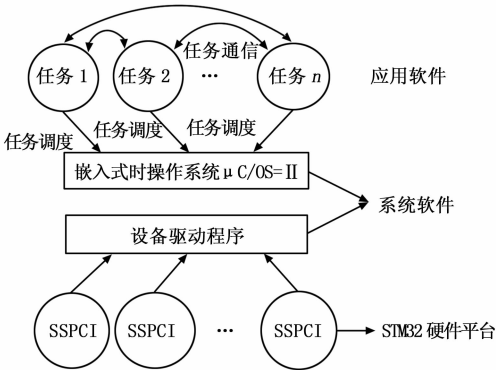


图 5 软件系统层次图

由图 5 可知, 各个应用任务之间并不是完全隔离的, 通过

调用信号量、邮箱、队列等进行通信，避免了同时访问资源的冲突，使整个系统协调统一地运转。

3.2 系统应用任务的划分

根据 ELMC 硬件模块要求，将应用程序分解成若干个具有一定功能的独立任务，通过  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  提供的系统服务来进行调度，简化了应用程序的设计，并且系统易于调试和扩展。正确地划分优先级才能保证重要任务优先执行，尤其是飞机配电系统对实时性要求非常高。因此，任务的建立以及优先级的划分是影响 ELMC 性能的关键<sup>[7]</sup>。根据以上要求，本文划分的应用任务如表 1 所示。

表 1 任务划分表

优先级	任务名	任务描述
0	T_start	开始任务
1	T_1553_send	1553B 发送任务
2	T_1553_rec	1553B 接收任务
3	T_SSPC_kz	SSPC 控制任务
4	T_SSPC_fk	SSPC 反馈任务
5	T_delay_kz	继电器控制任务
6	T_delay_fk	继电器反馈任务
7	T_RN5209	模拟量采集任务
8	T_Freq	频率采集任务
9	T_Selfbit	系统自检任务

3.3 采样系统程序设计

系统采用 RN8209 计量芯片实时监测汇流条以及负载上的电压、电流等参数，通信协议使用 MODBUS 协议，MODBUS 协议是应用于电子控制器上的一种通用语言，目前已广泛应用于工业设备和智能仪表中。在本系统，选用的传输方式为 RTU（远程终端单元）模式通信，这种方式的通信效率高 ASCII（美国标准信息交换代码）模式。

通信接口采用 SPI 接口，RN8209 中断资源包括 1 个中断允许寄存器 IE、2 个中断状态寄存器 IF 和 RIF、一个复用的中断请求管脚 IRQ \_ N/ZX/SIG，STM32 作为 SPI 主机，RN8209 作为 SPI 从机。

参照 MODBUS 协议文件，主机 ELMC 发送指令“01、03、00、48、00、06、45、DE”给计量模块，“01”表示从机地址、“03”表示功能码读多路寄存器、“0048”表示访问的起始寄存器地址、“0006”表示数据的长度、“45DE”表示 CRC 校验码，校验低字节在前，高字节在后。在收到指令后，RN8209 电路开始检测汇流条及负载上的电压、电流等参数，检测完毕将数据发送给 ELMC，再根据数据格式和计算公式解码成对应的电参数值，这里不再赘述。

本系统共有 20 个 RN8209 计量模块，按照是测交流还是直流、单相还是三相来对这些计量模块进行分组。

3.4 系统通讯任务设计

ELMC 的通信任务主要包括两个方面：（1）向 PSP 发送当前的数据状态；（2）从 PSP 接收控制命令。

PSP 首先向 ELMC 发送命令字，命令字到达时产生中断通知 ELMC 接收命令字。在中断服务程序中，分析命令字，判断是接收数据还是发送数据。若是接收数据则发送数据接收信号量 SemRx，使 T\_1553\_rec（）任务进入就绪态。在数据接收任务中，首先通过读当前命令，判断要接收数据的地

址，根据通信协议的要求进行下一步操作，发送相应的信号量，启动相应任务执行。

当 PSP 要求 ELMC 发送状态数据时，首先向 ELMC 发送命令字，此后 PSP 一直处于等待接收数据状态，要求数据发送任务尽可能的快，故任务 T\_1553\_send（）的优先级最高。

3.5 系统主程序设计

系统主程序的设计包括主函数 MAIN（）设计和初始主任务 T\_start（）设计<sup>[8]</sup>。MAIN（）函数包括  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  的初始化，创建主任务 T\_start（）和启动  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ ，应用程序首先调用  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  初始化函数 OSInit（）。

在启动  $\mu\text{C}/\text{OS-II}$  之前，应用程序至少要建立一个应用任务，这里建立了主任务 T\_start（），系统初始化流程图如图 6 所示。

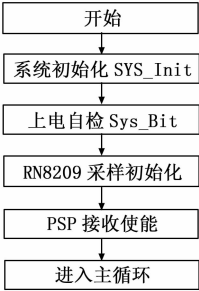


图 6 系统初始化流程图

初始主任务 T\_start（）启动之后，调用系统初始化程序 Sys\_Init（），此函数主要用来初始化 STM32 的系统设置，配置 STM32 的全局控制器和状态寄存器，调用各外设模块的初始化程序，包括：CAN 通信模块的初始化程序、1553B 总线的初始化、频率采集模块的初始化程序等；接着系统进行上电自检，检查各硬件电路是否工作正常；然后 RN8209 模拟量采集模块开始初始化；最后设置 PSP 接收使能，系统进入主循环，等待 PSP 发送命令，系统开始工作。

3.6 系统主中断设计

PSP 通过中断方式访问 ELMC，中断流程如图 7 所示。ELMC 会实时响应 PSP 发送过来的数据，进入数据接收中断。

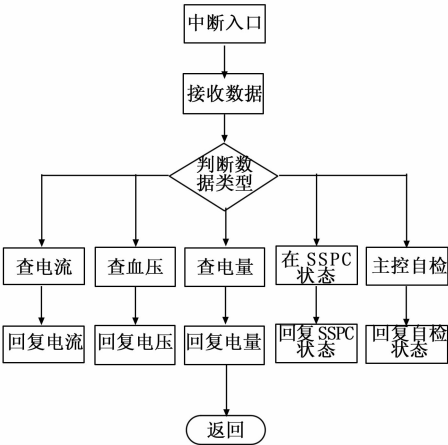


图 7 PSP 通讯中断响应流程图

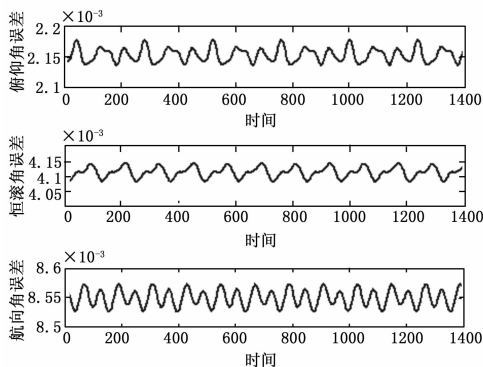


图 7 角运动参数误差

由图 6~7 可以看出,惯导解算的姿态角误差在  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  角分之间,速度误差在  $0.01 \sim 0.02$  m/s 之间,验证了本软件及算法输出的轨迹数据接近实际值。其误差主要来源于惯性器件本身存在的漂移误差,偏差误差等。

## 6 结论

在对舰船运动特点充分分析的基础上,用 VC++ 实现了

一种新型船用捷联惯导系统数字仿真器的设计,该系统可以灵活设定舰船的运行轨迹与惯性器件的精度参数,系统解算结果与轨迹真实数据对比所得的误差值,验证了仿真算法的可行性。该系统的设计对捷联惯导系统传递对准技术的研究有重要的工程应用价值。

## 参考文献:

- [1] 张 斌. 基于捷联惯导的舰船轨迹仿真发生器的设计 [J]. 数字技术与应用, 2009, (11): 11-13.
- [2] 陈 敏, 安艳辉, 李晓华. 捷联惯导系统仿真器的设计与实现 [J]. 现代测绘, 2012, (1): 10-11.
- [3] 解春明, 赵 焱. 高精度传递对准仿真飞行轨迹设计 [J]. 火力指挥与控制, 2010, (9): 88-92.
- [4] 罗 彬. 舰载武器惯导系统传递对准仿真验证系统的设计与实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [5] 赵 琳, 荣文婷. 舰载武器惯导系统传递对准仿真验证的研究 [J]. 传感器与微系统, 2012, (3): 92-95.
- [6] 杨金显. 微惯性测量系统关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [7] 王勇军. 舰载机惯导技术对准研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.

(上接第 2972 页)

根据接收到的数据包,ELMC 会解析出 PSP 具体的控制指令,比如查电压,查 SSPC 的工作状态,ELMC 自检等,再把具体的任务发送给模拟量采集模块,二极管、继电器监控模块,最后使用 1553B 总线将监测到的值回复给 PSP。这样,通过 PSP 显示界面,就可以远程监控汇流条和负载的工作状态。

## 3.7 系统监控界面设计与分析

系统以 PC 机作为 PSP,制作上位机软件,监控负载的状态,上位机界面如图 8 所示。



图 8 上位机界面

系统 115 V 交流电压由航空地面电源提供,在回路中接入额定功率为 900 W 的电气负载,通电测试后在 PC 机上得到电压、电流、功率、因素和电量共 5 个电参数,由图 8 可知,获取参数的采样精度满足系统要求,多参数的测量提高了系统的可靠性。

系统设计必须满足关键飞行负载的不中断供电要求,软件刷新时间间隔设置为 50 ms,这样就能满足飞机大部分负载的要求。当检测到电源脱落后,把负载转换到可供选用的电源

上,达到防止供电中断的目的。

## 4 结束语

先进飞机电气负载管理中心是当前航空电气工程研究的重点。本文设计的电气负载管理中心采用了以高性能 STM32 作为控制核心,并分别从硬件模块、软件系统结构和嵌入式操作系统  $\mu C/OS-II$  使用、应用软件任务优先级的划分等各个方面作出了详细的设计和说明。系统测试表明,该系统能够实现负载的自动管理,提高了配电系统的高效性和可靠性。

## 参考文献:

- [1] 张秦岭,温菲菲,刘 磊. 基于 DSP 的通航飞机自动配电系统设计 [J]. 测控技术, 2014, 33 (1): 83-85.
- [2] 金 静,李建勋,毕 荣. 基于 DSC 的飞机电气负载管理中心设计 [J]. 电源技术应用, 2012, 15 (8): 53-57.
- [3] 任仁良,赵尊全,冯建朝. 总线在现代飞机配电系统中的应用 [J]. 测控技术, 2013, 32 (12): 114-117.
- [4] 张大为,姜 静,刘 迪. 基于 DSP 的固态功率控制器的设计 [J]. 航空计算技术, 2012, 42 (4): 117-119.
- [5] 谢控勤,杨 阳,李宇翔. 基于 VxWorks 的先进飞机电气负载管理中心软件设计 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (11): 2302-2305.
- [6] 谢控勤,宋 岩. 基于 VxWorks 的飞机电气处理机多任务程序设计 [J]. 现代电子技术, 2012, 35 (22): 107-112.
- [7] 邱红岗,袁朝辉. 飞机电气负载管理系统设计 [J]. 微处理机, 2009, 6 (3): 102-105.
- [8] 马常伟,李玉忍,齐 洁. 飞机自动配电管理系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2007, 15 (1): 1500-1502.