

机载核心处理平台电源管理系统

湛文韬, 孙靖国, 解文涛, 韩嫚莉

(中国航空工业集团公司西安航空计算技术研究所, 西安 710068)

摘要: 针对综合化、模块化机载核心处理平台的技术需求, 构建了一种电源管理系统。该系统基于并联冗余供电模式, 采用分布式电源架构, 设计了功率转换单元、电源开关阵列及智能控制单元, 集成了智能管理软件及通讯协议, 采用了过流保护、独立上下电控制、电流电压及温度采集、交互式通讯控制、均流等技术, 完成了电源管理系统的智能管理、状态监测管理、故障记录及冗余均流等内容, 提高了电源管理系统的数字化、智能化水平。该系统安全可靠、工作稳定, 并经过多次工程应用验证。

关键词: 机载核心处理平台; 电源管理系统; 开关阵列; 智能管理; 状态监测

中图分类号: TP336 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)11-0070-05

Design of an Intelligent Power Management System for Aircraft Core Processor

ZHAN Wen-tao, SUN Jing-guo, XIE Wen-tao, HAN Man-li

(Aeronautical Computing Technique Research Institute, AVIC, Xi'an 710068, China)

Abstract: A power management system was designed according to the requirement of the integrated, modular aircraft core processor. Based on parallel power supply mode, the distributed power architecture is adopted in the system. The power transformation unit, switch array unit, intelligent control unit are designed, and intelligent management software is integrated with communication protocol. Over current protection, independent electric control, current/voltage and temperature acquisition, interactive communication control and current sharing techniques are implemented, and intelligent management, state monitoring, fault recording, and redundancy and load sharing are realized, which can improve digital and intelligent level of the power management system. The system is safe, reliable and stable, and has been verified by engineering application.

Key words: aircraft core processor; power management system; switch array; intelligent management; state monitoring

0 引言

机载核心处理平台是综合化、模块化航电系统的核心处理系统, 随着机载设备综合化程度的提高, 对机载核心处理平台系统工作的可靠性和稳定性要求也越来越高。因此, 为机载核心处理平台提供一种高可靠的电源管理系统也就成为其关键技术和核心要求之一^[1]。综合化、模块化的机载核心处理平台电源管理系统已不再是仅仅满足系统供电需求的单一功能单元, 而是转变成了一种集数据处理、数据通信、智能管

理、故障隔离及电源转换功能为一体的功能高度综合化的系统, 并具有超高的可靠性和强大的容错能力^[2], 能有效地保障系统的安全性和可靠性。

1 关键技术需求

1.1 大功率并联均流供电

综合化使得机载核心处理平台要完成的任务量急剧增加、功耗随之增加, 平台的可靠性也成为重要的考虑指标。采用1+1并联冗余供电模式对机载核心处理平台进行供电, 提高平台任务可靠性也成为一种常规的方法^[3]。正常情况下, 两个电源模块同时供电工作, 任何一个电源模块故障时, 另一个也能支持全系统工作。并联运行的电源系统需要引入均流技术, 保证电源模块负载均衡, 否则, 其中电压高的电源模块可能

收稿日期: 2014-01-05 修回日期: 2014-03-11

基金项目: 航空科学基金(2011ZC31006, 2013ZC31003)

作者简介: 湛文韬(1984—), 男, 湖南汨罗人, 硕士, 研究方向为机载航电系统核心计算平台。

承担较多负载,另一个则可能轻载甚至空载运行,容易造成电源系统损坏^[4]。

1.2 智能管理

系统复杂度的提高迫切需要智能化的管理。电源管理系统的智能管理包括各模块独立供电控制、配置重构、过流保护,故障隔离以及与系统通信等内容。

独立供电控制包括利用命令进行单模块或多模块上下电控制,或者利用配置表切换进行重构。机载核心处理平台各模块本身复杂度高,在出现错误或异常时可以通过对模块独立上下电控制来快速地进行故障隔离和定位。在需要对平台进行降级重构(如只保留部分模块工作)的情况下,还能灵活地进行配置切换,将平台切换到降级工作模式。过流保护则是在模块出现短路异常时,平台电源系统能自动关闭电源输出,避免烧毁电源或者影响其他模块工作。因此,概括来说,智能管理主要包含智能控制、故障隔离及过流保护等内容^[2]。

1.3 状态监测管理

新一代的机载核心处理平台电源系统迫切需要实时掌握电源系统工作状态和故障情况,对其进行管理。通过对机载核心处理平台进行 FMECA 来看,影响大功率电源系统工作的主要故障模式是电压、电流及温度^[5],因而,对这三者要通过 A/D 采集进行重点监测。另外,电源系统的故障会影响整个平台的工作,这就迫切需要对电源系统发生的异常和故障进行记录,以便进行排查和管理。因此,实现电源系统的状态监测管理和故障记录也是提高电源系统可靠性和安全性的一种重要手段。

1.4 软件集成

新一代机载核心处理平台的电源管理系统需要集成智能管理软件,该软件需要完成电源模块内部各接口通道数据采集、自检、通讯以及数据记录等功能,将采集到的数据和检测结果进行存储,并与外部通讯,实时上报电源系统工作状态。在实际工作中,还能支持平台控制器对电源模块的控制和查询。总的来说,电源系统中的软件集成是实现电源管理系统状态监测及智能控制策略的重要组成部分^[3,6]。

2 系统设计与实现

2.1 系统架构

机载核心处理平台电源管理系统架构如图 1 所示,硬件部分主要由电源模块和主控模块组成,电源模块采用 1 + 1 并联供电模式。电源模块和主控模块均为标准 LRM^[7]结构的模块,主控模块通过 RS485 接口与电源模块连接,外部 PC 则通过 RS232 接口与电源模块连接通讯。电源模块内部驻留软件进行内部的信

息检测、采集和存储,主控模块加载软件通过 RS485 接口与电源模块进行信息交换,外部 PC 上的维护控制软件通过 RS232 接口与电源模块进行交互。电源模块以及电源模块驻留软件是电源管理系统的组成主体。

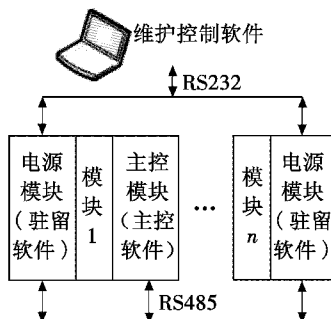


图 1 电源管理系统架构

Fig. 1 The structure of power management system

2.2 电源模块设计

电源模块由功率转换单元、开关阵列和智能控制组件组成,图 2 为其原理图。

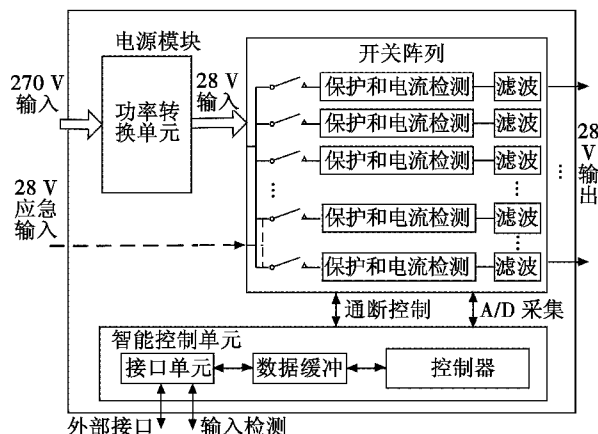


图 2 电源模块原理图

Fig. 2 Schematic diagram of power supply module

2.2.1 功率转换单元

功率转换单元采用分布式电源架构(DPA)的原理:输入电压首先经过高压 DC/DC 转换,产生一个适中的中转电压总线以降低输电电流、提高转换效率。该中转电压再通过机架母线或电缆传送到其他模块,典型的 DPA 如图 3 所示^[8]。

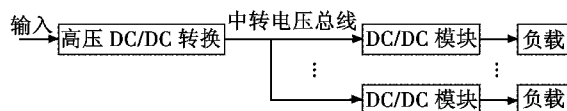


图 3 分布式架构(DPA)结构图

Fig. 3 The structure of DPA

机载核心处理平台电压输入为 270 V,中转总线电压按照系统的标准和要求设计为 28 V,该 28 V 电压在电源管理系统中引出一个参考点,再输出给开关阵列。功率转换单元采用模块化思想,以简化设计、提高

可靠性为原则,选用了成熟的 COTS 产品 DC/DC 模块,直接将 270 V 转换为 28 V,同时具有输入输出隔离功能、输出过流短路保护、输出过压保护等功能,满足机载核心处理平台供电要求。

2.2.2 电源开关阵列

电源开关阵列主要由低通态电阻的功率场效应管 (MOSFET)、专用的控制驱动器组成,实现 28 V 输出的通断控制和故障隔离,并有过载、过压、过温保护和短路保护等功能,它还能接收智能控制单元命令,完成上下电顺序控制功能。开关阵列是实现过压欠压保护、独立上下电控制以及模块内部状态监控的主要实施者,它相当于一个总开关,是其他各路模块电压电流输入和通断控制的中心。

开关后电流检测电路的功能是检测各路开关阵列通过的电流,并根据电流大小产生电压模拟量信号,提供给智能控制单元进行模拟量监测。为了减小功耗、简化电路设计,本文的电源管理系统设计选用了基于线性电流检测的霍尔效应电流检测 IC 电路,通过检测电压的换算关系来检测电流值。其检测原理是:电流检测电路的输出电压 V_{OUT} 与流过的电流成正比线性关系,即

$$V_{OUT} = I_{SENSE} \times A_V \quad (1)$$

式中: I_{SENSE} 为检测电流; A_V 为器件敏感度换算常数 (185 mV/A)。电流检测设计了两个阈值:0.5 A 和 6.2 A,一旦检测电流超过最大阈值,则认为系统工作不正常,开关会自动关闭;反之,则认为没有工作或处于限流状态,进行记录并上报。

温度采集的原理和电流电压类似,只是实现的方式不一样。电源模块在发热量最大的 DC/DC 模块附近布置一个温度传感器,通过该传感器获取电源模块的温度值。在地面维护状态下,设定电源模块温度阈值为 110 ℃,超过该温度,自动关闭电源输出。

2.2.3 智能控制单元

智能控制单元采用数字控制技术,引入 TI 公司生产的 DSP 处理器的 TMS320LF2407A 作为控制器,辅以 A/D 采样电路完成对开关状态检测、开关通断控制以及温度、电流采样等功能。同时,利用接口单元的信息传输功能,与外部应用进行可靠的状态监测和交互控制。智能控制单元是电源管理系统的控制中心,实现对整个电源管理系统的智能控制和查询,其具体架构如图 4 所示。

在工作过程中,智能控制单元能随时接收并解析控制命令,完成开关控制切换。同时通过 A/D 采样电路实时获取各路电压电流信息,并将检测到的系统状态信息包括故障信息进行存储,供上层应用查询或者

进行主动上报。

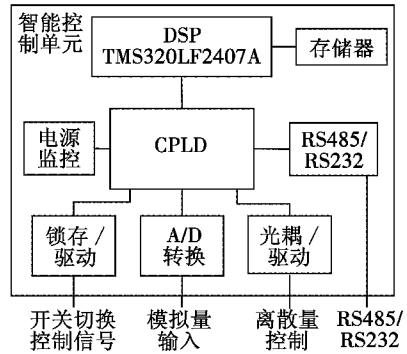


图 4 智能控制单元架构

Fig. 4 The structure of intelligent control unit

2.3 智能管理软件设计

智能管理软件包含了 3 部分内容,即电源模块驻留软件、维护控制台软件及主控软件。其中,电源模块驻留软件是实现智能控制的主体,维护控制台软件与主控软件主要和电源模块驻留软件进行信息传输。

2.3.1 电源模块驻留软件

电源模块驻留软件运行平台为 DSP,并不配置操作系统,故应用程序为单任务周期运行方式,图 5 为其软件状态机示意图。

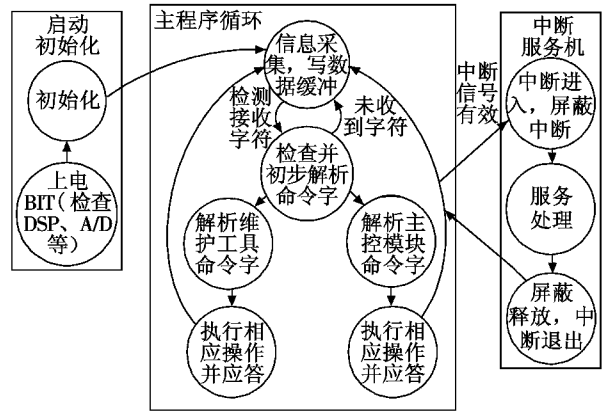


图 5 电源模块软件状态机

Fig. 5 The state machine of power supply software

软件的初始化流程主要完成初始化及上电 BIT 操作,无错误后进入主程序循环;主程序循环周期性查询接口单元接收到的命令码,并执行相应操作。维护控制台软件及主控软件均通过中断服务的方式和主程序进行通讯。中断服务程序与主程序循环之间的数据交换是通过专用的数据缓冲区实现的。主程序循环过程中的结果都循环记录在非易失存储器中,供下电后查询获取。

2.3.2 中断服务程序

维护控制台软件及主控软件均通过中断服务机程序和电源模块驻留程序通讯,主控模块是通过 RS485 总线发出中断,而维护控制台软件通过 RS232 接口发出中

断。中断命令(查询和控制)按照指定通讯帧格式发送给电源,电源模块接收到后,根据目的地址确定对应的电源模块做出相应操作,并将结果返回给中断程序。

2.3.3 基本通讯协议设计

RS485 和 RS232 总线没有专用的协议,因此,本电源管理系统单独设计了一套协议,采用统一定义的帧格式,用于通讯命令数据的解析。其基本帧格式定义如图 6 所示。

1	2	3	4	5	6	...	N	N+1
帧头	帧头	目的地址	源地址	帧长	有效数据			校验

图 6 帧格式定义

Fig. 6 The definition of frame format

帧头为 2 字节,定义为 0x3C3C。源地址和目的地址及发送命令和接收命令的模块 ID 号,等于系统的 ID 号和模块 ID 号,这些 ID 号由机载核心处理平台统一定义。如果帧目的地址为 0xff,则表示广播,电源模块都能同时接收到消息。帧长定义为有效数据字节长度,一般不超过 16 个字节。有效数据则包含请求命令、应答命令以及应答消息内容等,请求命令和应答命令是一一对应关系。校验为除帧头信息外的所有数据字节异或值,校验和如果有错误,则认为是错误命令码,不予执行任何操作。

2.4 均流设计

目前流行的均流方法比较多^[9],本系统选用的 DC/DC 模块实现的是最大电流自动均流法,模块上预留了均流母线,均流母线上的电压为模块的转换电压,在两个并联的电源模块中,均流母线上输出电压较大的模块将自动成为主模块。两个电源模块之间的均流信号按照图 7 所示的均流信号关系将均流母线引在一起,其中,1 和 2 是背板上的走线,R1、R2 和 C3 组成了一个低通滤波器。均流电路的设计,应当适当选择 R1 和 R2 的值,使 V_a 和 V_b 之间的电压差最小^[10],这样均流误差也最小。机载核心处理平台功率一般在 2 kW 左右,在该功率条件下,均流误差控制在 5% 的范围内是完全能接受的^[10]。

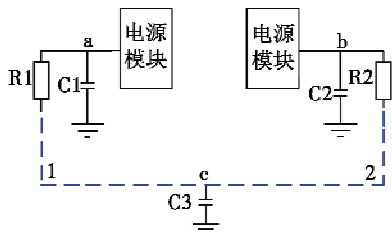


图 7 系统均流信号

Fig. 7 Current sharing bus of system

按照均流误差的计算式

$$\delta = (I_{\max} - I_{\min}) / 2 \times I_{\text{AVE}} \quad (2)$$

式中, I_{\max} 、 I_{\min} 和 I_{AVE} 分别为两个电源模块分担的最大、最小和平均电流。根据式(2)换算得到

$$\delta = 1 - 2 / [(R_2' \times U_{\max}) / (R_1' \times U_{\min}) + 1] \quad (3)$$

式中: R_1' 和 R_2' 分别为电阻 R1 和 R2 再加上 1 和 2 走线上的电阻; V_a 和 V_b 分别为电源模块输出的最大电压和最小电压。取 $R_1' = R_2'$, 可得到

$$\delta = 1 - 2 / (V_a / V_b + 1) \quad (4)$$

由式(4)进行推算,要保证 δ 小于 5%, 则电源模块的输出误差 σ 也需要小于 5%。本系统选用的 DC/DC 模块保证了电源模块的输出误差 $\sigma \leq 2\%$, 也就是说,在 $R_1' = R_2'$ 的情况下,电源模块的均流误差能满足平台要求。因此,取 $R_1 = R_2 = 0 \Omega$, 1 和 2 在背板上走线等长,可以在保证均流误差要求的情况下,额外消耗的功率最小。在工程应用中,如果模块输出电压误差较大,可根据实际情况调节 R1 和 R2 的阻值。

3 验证和评估

本文在机载核心处理平台上设计了电源管理系统原型并进行了验证。

验证结果表明:一个电源故障,备份电源能承担平台供电,满足冗余要求;注入故障,将其中一块功能模块的电源对地短接,电源模块能自动关闭该路输出,且其他功能模块不受影响,满足过流保护要求;地面调试状态下,软件注入故障,将电源模块实测温度值提高 30 °C,同时停止给平台散热,电源在 110 °C (实际温度 80 °C) 下自动停止工作,进入过温保护;利用图形化的维护控制软件及命令式的主控软件能实时获取电源系统工作状态,进行状态监测;故障时能及时写入故障信息并在下一次加电时进行信息读取,实现故障记录和定位;需要进行控制时既能进行各模块的独立上下电控制,又能通过配置表进行配置切换,满足智能控制要求;根据状态监测获取的电流值计算均流误差,测得实际误差不高于 5%,符合均流指标。

需要说明的是,由于增加了智能控制单元,相比传统的电源系统,其基本可靠性指标有所下降,但从实际的预计结果来看,原理机电源系统的可靠性预计值能达到 4000 h,若通过提高器件质量等级、优化电路等手段还能进一步提高到 6000 h,满足可靠性指标要求。

4 总结

本文的电源管理系统在保证机载核心处理平台安全性和可靠性的前提下,提高了系统的数字化、智能化水平,系统的冗余均流、开关阵列、智能管理、故障记录

以及状态监测等均已实现。目前,该电源管理系统已经随机载核心处理平台通过了高低温、振动冲击、电磁兼容、供电特性等试验,后续将继续进行耐久振动、可靠性强化等工程化验证,加强其应用前景。

参 考 文 献

- [1] 牛文生. 综合化航空电子系统对软件开发技术的挑战[J]. 航空计算技术, 2008, 38(1): 1-6.
NIU W S. The challenges for software development in integrated modular avionics [J]. Aeronautical Computing Technique, 2008, 38(1): 1-6.
- [2] 张华. 基于机载处理机的智能供电系统[J]. 计算机工程, 2008, 34(s1): 169-174.
ZHANG H. Smart power system based on aircraft processor[J]. Computer Engineering, 2008, 34(s1): 169-174.
- [3] 霍峰, 戴小氏, 田丹. 综合化航电智能电源控制软件设计与实现[J]. 航空计算技术, 2011, 41(5): 91-94.
HUO F, DAI X D, TIAN D. Design and realization of intelligent power supply software in integrated modular avionics [J]. Aeronautical Computing Technique, 2011, 41(5): 91-94.
- [4] 何亮. 机载火控雷达分布式电源系统研究[J]. 现代雷达, 2005, 27(8): 74-76.
HE L. Research on distributed supply of airborne fire control radar[J]. Modern Radar, 2005, 27(8): 74-76.
- [5] 陈森, 魏华, 徐正喜. 一种控制装置电源短路 FMEA 分析及其解决办法[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(6): 124-127.
CHEN M, WEI H, XU Z X. A FMEA analysis and solutions of short circuit power control device [J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(6): 124-127.
- [6] 魏曙光, 马晓军, 闫之峰, 等. 基于 DSP 的坦克电源管理系统设计与实现[J]. 仪表技术, 2008(8): 65-67.
WEI S G, MA X J, YAN Z F, et al. Design and realization of tank power management system based on DSP [J]. Instrumental Technique, 2008(8): 65-67.
- [7] ASAAC Standards ; Part 1-proposed standards for common functional modules[S]. London: UK Defense Standardization, 2005.
- [8] 孟颖悟. 新型机载计算机电源架构的研究[J]. 航空计算技术, 2007, 37(5): 63-65.
MENG Y W. Research on power architecture for next generation airborne computer [J]. Aeronautical Computing Technique, 2007, 37(5): 63-65.
- [9] 郑耀添. 并联均流技术在高频开关电源中的应用研究[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(6): 169-171.
ZHENG Y T. Study of parallel current sharing for high power switch supply [J]. Microelectronics and Computer, 2006, 23(6): 169-171.
- [10] 古志强, 张才清. 固态雷达发射机多路电源的并联均流设计[J]. 现代雷达, 2007, 29(4): 89-92.
GU Z Q, ZHANG C Q. Current sharing paralleling design of power supplies for solid radar transmitter [J]. Modern Radar, 2007, 29(4): 89-92.
- [11] (上接第 61 页)
CHEN Z, JIANG C S. Decision-making for air to surface multi-target attacking based on multi-expert weights [J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(7): 18-21.
- [10] CALLAN R. 人工智能[M]. 黄厚宽, 田盛丰, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002: 84-124.
CALLAN R. Artificial intelligence [M]. Translated by HUANG H K, TIAN S F. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 84-124.
- [11] WANG Q, GAO X G, CHEN D Q. Pattern recognition for ship based on Bayesian networks [C]//4th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2007, 4: 684-688.
- [12] 肖秦琨. 基于动态贝叶斯网络的智能自主优化机制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
XIAO Q K. Research on autonomous optimization based on DBN [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [13] POROPUDAS J, VIRTANEN K. Analyzing air combat simulation results with dynamic Bayesian networks [C]//Simulation Conference, 2007: 1370-1377.
- [14] KANE M J, SAVAKIS A. Bayesian network structure learning and inference in indoor vs outdoor image classification [C]//Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004: 479-482.
- [15] 王庆江, 高晓光. 空对面激光制导导弹的仿真与作战效能评估[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(31): 202-205.
WANG Q J, GAO X G. Simulation and effectiveness assessment of air-to-surface laser-guided missile [J]. Computer Engineering and Application, 2007, 43(31): 202-205.
- [16] 王庆江, 高晓光. 激光制导炸弹的仿真及其有效投弹区的计算[J]. 火力指挥与控制, 2008, 33(8): 44-47.
WANG Q J, GAO X G. Simulation and calculation of effective attack area about laser-guided bomb [J]. Fire Control and Command Control, 2008, 33(8): 44-47.