

# 基于 DSP+FPGA 的无人机双冗余配 电管理计算机设计

林 沐 黄 建 梁 旭

(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100191)

**摘 要:**目前国内大部分无人机配电管理任务还是由飞行控制计算机通过相关接口采用模拟信号直接控制,随着负载的增加,无人机上的电缆重量也不断增加,严重影响了无人机的带载能力。为了提高无人机配电系统的可靠性,减轻电缆重量,本文以某型无人机的配电系统为研究对象,针对基于总线控制和冗余的配电管理计算机技术进行研究。在硬件方面,提出了基于双 CPU 冗余的配电管理计算机的硬件总体架构,并进行了功能模块的划分;在软件方面,分别从上位机调试软件和下位机软件两个方面提出了软件设计的总体方案。最后建立了配电管理计算机的马尔科夫模型,进行了系统可靠性分析和计算。

**关键词:**无人机配电;计算机;可靠性;冗余

**中图分类号:** V242.4<sup>+</sup>32 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.30

## Design of dual redundant power distribution management computer for UAV based on DSP+FPGA

Lin Mu Huang Jian Liang Xu

(School of Automatic Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** At present, the majority of tasks about power distribution management are directly executed by the analog signals from flight control computer. With the increasing of load, the weight of cable on the UAV is heavier, and it seriously affects the on load capacity of UAV. In order to improve the reliability of UAV power distribution system and reduce cable weight, the paper focuses on the research of power distribution management computer technology based on bus control and redundant. On one hand, the hardware architecture of the power distribution management computer was proposed based on dual CPU redundancy. On the other hand, the scheme of the software design was put forward from the two aspects of the upper computer debugging software and the lower computer software. Finally, the Markov model of the distribution management computer is established, and the system reliability analysis and calculation are carried out.

**Keywords:** UAV power distribution; computer; reliability; redundant

### 0 引 言

随着航空科学技术的发展,对无人机机载配电系统性能提出了更高的要求,配电系统作为无人机的关键机载设备,关系着全机的性能、任务质量和飞行安全,而且由于无人机没有驾驶员参与飞行,一旦出现问题,将导致严重后果,所以研制无人机机载智能配电管理技术具有重要意义<sup>[1]</sup>。目前国内定型和在研的多种型号无人机的机载电气系统仍采用常规电气系统的输配电方式,配电功率线全部引入机舱内的中心配电装置,二次电源或电气负载等从

中心配电装置获得电能,电气负载的控制方式为继电器逻辑控制,配电箱内电路板完成逻辑控制和不间断供电等功能<sup>[2-4]</sup>。该类型电气系统和设备缺少余度和容错设计,BIT 等技术,只是单纯依靠每个机载电气设备的 MTBF 来达到飞机总体对电气子系统的可靠性指标要求,基于这种技术平台的无人机电气系统,技术性能、可靠性、维修性都相对较低,因而迫切要求改变我国现有大型无人机电气系统的控制与管理结构,研究基于微处理器、实时多任务系统和固态配电技术的智能电气系统,以适应下一代先进军用无人机的性能要求<sup>[5-9]</sup>。

收稿日期:2017-04

## 1 系统结构设计

本文从系统工程的角度出发,根据无人机机载配电管

理计算机的需求分析,设计了无人机机载配电管理计算机的总体架构,如图1所示。

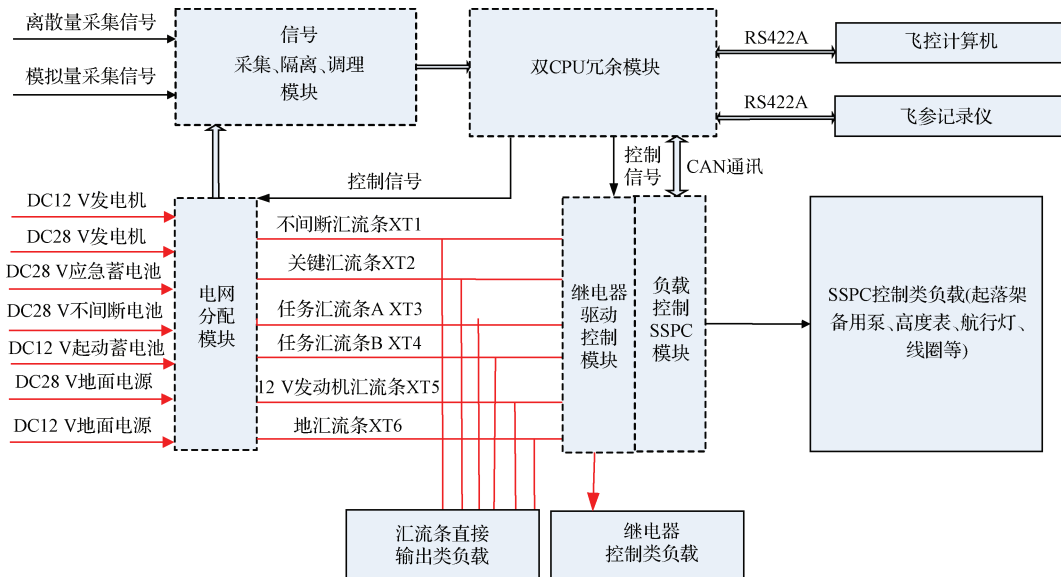


图1 无人机机载配电管理计算机整体架构

飞行控制计算机根据无人机飞行和任务等不同情况下的用电需求,向配电管理计算机发送配电指令,为用电设备供电。飞行参数记录仪用于记录无人机飞行信息。双CPU模块通过总线与飞行控制计算机或地面检测设备进行通信。信号采集隔离调理模块对模拟量信号和离散量信号进行采集,实现对电网状态的实时监控。继电器驱动控制模块对配电管理计算机中部分负载的通断进行控制。SSPC模块实现将汇流条上的电能按需分配给负载。

## 2 硬件设计

按照模块化的设计思想,将整个配电管理计算机的硬件设计分为4大模块,双CPU冗余模块、FPGA仲裁模块、信号采集调理模块、继电器驱动模块。

### 2.1 双CPU冗余模块

配电管理计算机中设计两块完全相同的CPU模块和一个FPGA仲裁模块,CPU1为主CPU,CPU2为备CPU<sup>[10]</sup>。FPGA仲裁模块根据两个CPU的生命周期信号和自检标志位信号判断CPU是否工作正常,生命周期信号为1kHz的方波信号,当CPU自检结束且无故障时,自检标志位信号为高电平,否则为低电平。

两块CPU模块的切换优先级顺序为CPU1高于CPU2。

1) 在配电管理计算机正常工作时,CPU1完成所有控制功能,此时CPU2处于热备份状态,总线通信模块只收

不发,离散量采集和模拟量采集模块采集输入信号。

2) CPU1和CPU2之间通过MCBSP实现握手,可以互相传递运行状态信息,可以实现双CPU运行同步的问题。

3) 当CPU1出现故障时,FPGA仲裁模块根据CPU1的生命周期信号和自检标志位信号,识别CPU1的故障,通过主备切换机制完成CPU1到CPU2的控制权切换。此时CPU2完成所有控制功能。

设计原理如图2所示。

### 2.2 FPGA仲裁模块

本文设计仲裁模块FPGA芯片采用的是ALTERA(阿尔特拉)公司的CYCLONE IV系列的EP4CE6F17C8芯片<sup>[11]</sup>,内核电压1.2V,逻辑门单元6272个,IO数量179个,引脚256个,采用FBGA封装。

FPGA的电源设计由5V电压通过芯片LM117-1.2、LM117-2.5、LM117-3.3变换得到1.2V、2.5V和3.3V电压<sup>[12]</sup>。其中1.2V电压为FPGA的内核供电,2.5V为FPGA的JTAG模块供电,3.3V为FPGA的BANK以及外围芯片供电。FPGA仲裁模块电源设计原理如图3所示。

FPGA内部没有可以固化程序的FLASH,需要通过JTAG下载模式利用JTAG接口将编译好的程序(.sof文件)下载到FPGA的SRAM中。FLASH芯片选用的是ALTERA的EPCS16芯片,JTAG接口电路和配置芯片电路的原理如图4所示。

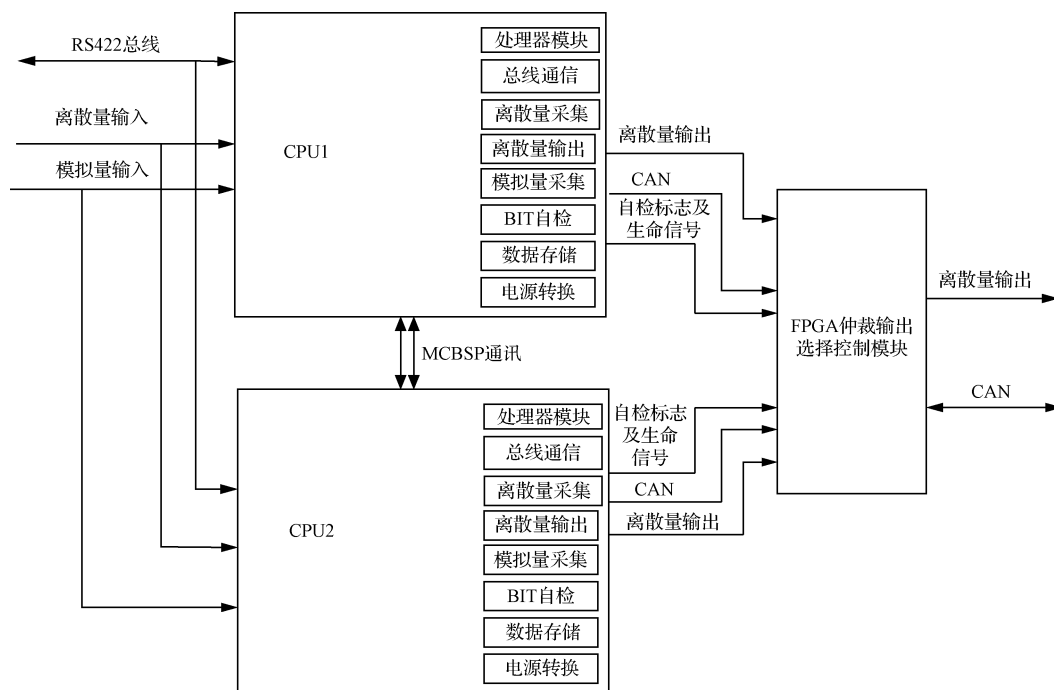


图2 双CPU模块硬件设计原理

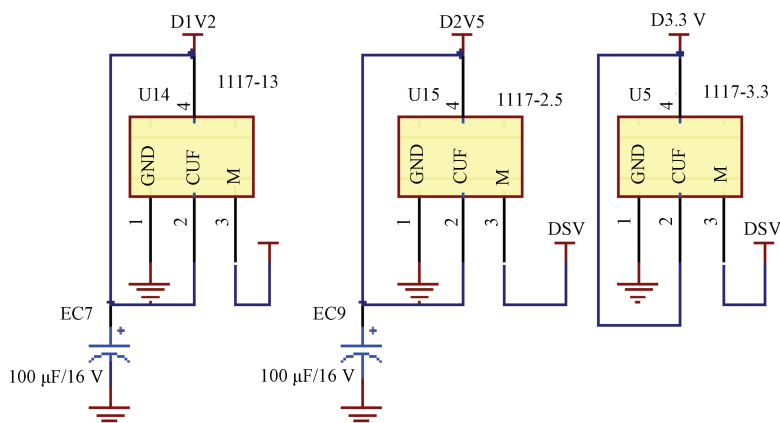


图3 FPGA仲裁模块电源设计原理

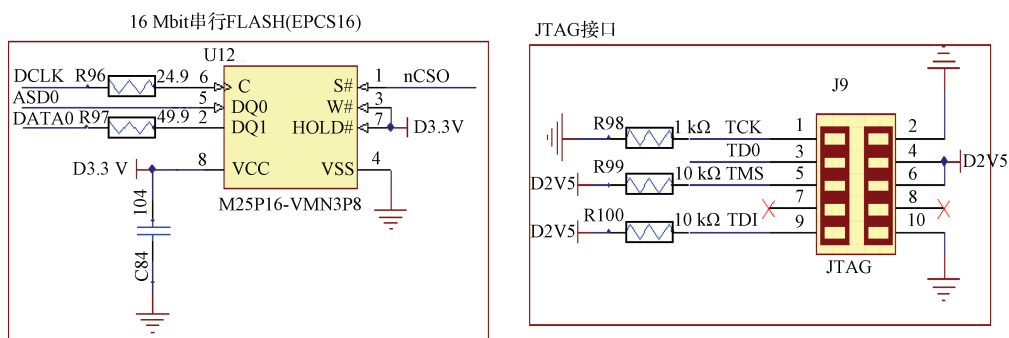


图4 JTAG接口和配置芯片设计原理

### 2.3 信号采集调理模块

被采集信号分为模拟量和离散量开关信号两种信号，其中模拟量信号包括电压信号和电流信号，由于 DSP 的信号采集端口对输入端电压有限制，需要对这两种信号作相应的转换，对电压信号进行衰减，对电流信号进行转换以及放大。

本文采用 0.1% 精密电阻对电压信号进行分压处理，达到衰减的目的。电路设计如图 5 所示。

利用霍尔传感器 CHB-200SF 实现电流信号到电压信号的转换，并通过运算放大器对信号进行放大处理，电流信号调理电路如图 6 所示<sup>[13]</sup>。

### 2.4 继电器驱动模块

继电器驱动模块用于将 FPGA 仲裁模块输出的控制信号进行功率放大，从而驱动执行元件。FPGA 仲裁模块输出的控制信号通过光电隔离后到达驱动芯片，控制外部汇流条接触器和继电器。光耦采用的是东芝的高速

光耦 TLP181。驱动芯片采用的是型号为 UNL2803A 的高电压大电流达林顿晶体管阵列<sup>[14]</sup>。其原理如图 7 所示。

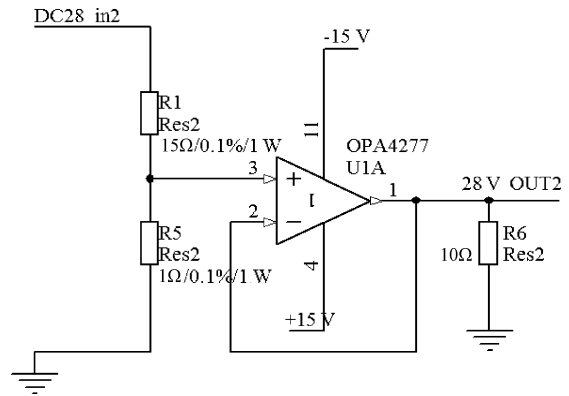


图 5 电压信号调理设计原理

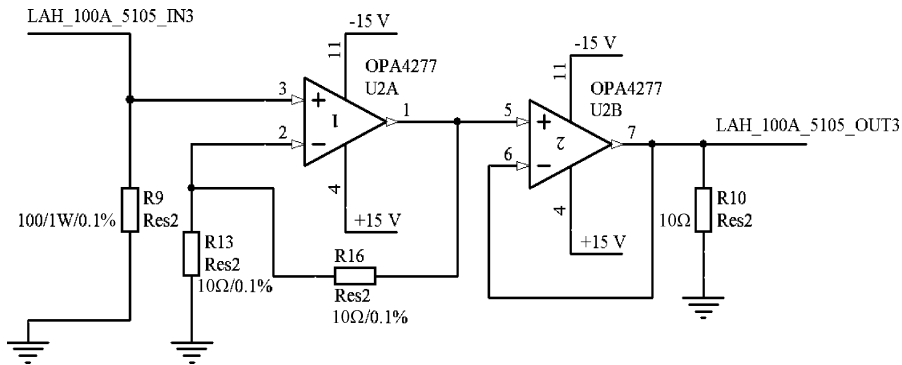


图 6 电流信号调理设计原理

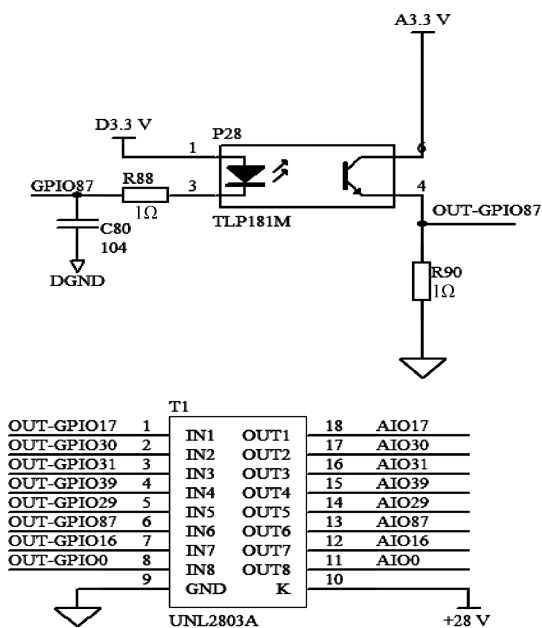


图 7 继电器驱动控制模块硬件设计原理

## 3 系统软件设计

无人机机载自动配电管理计算机软件包括上位机调试软件和下位机软件。其中上位机软件主要完成两个功能：1) 模拟飞行控制计算机向配电管理计算机发送配电控制指令；2) 模拟飞行参数记录仪对配电管理计算机上传的配电电网的电气参数进行记录。下位机软件包括加载在 DSP 芯片中的软件和加载在 FPGA 中的软件。

### 3.1 上位机软件设计

上位机软件采用 Windows7 操作系统作为操作平台，采用 Microsoft Visual Studio 2013 为开发环境，基于 MV-VM 架构模式，采用 .NET 语言和 WPF 构建整个系统运行过程中的底层环境<sup>[15-16]</sup>。采用开源的 .NET 图表类库 ZedGraph 完成数据可视化显示。通过 SerialPort 类与下位机配电管理计算机进行通信。为了实现配电管理计算机采集的参数进行记录，数据服务器采用 Microsoft SQL Server 2012 开发设计，通过 ADO.NET 与 SQL Server 2012 进行交互。结构框图如图 8 所示。

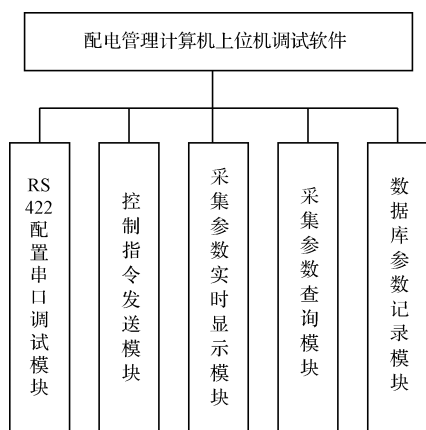


图8 上位机软件结构

### 3.2 下位机软件设计

下位机软件包括配电管理计算机 DSP 软件和 FPGA 仲裁切换软件两部分,结构如图9所示。

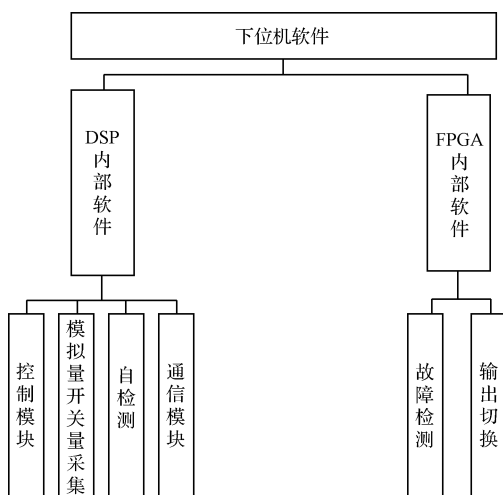


图9 下位机软件组成

由于 CPU 模块采用双 DSP 冗余设计,所以 DSP 软件设计包括两个程序:1)是主 DSP1 程序;2)是从 DSP2 的程序。DSP1 和 DSP2 的程序总体流程如图10所示。

FPGA 软件部分的功能主要是仲裁和输出切换功能,监测两个 DSP 是否故障,并根据 DSP 的故障情况控制输出切换动作。为了提高整个配电管理计算机的可靠性,将配电管理计算机的仲裁模块设计为3选2的冗余架构,当3个仲裁模块判断的结果至少有两个一样时,将该结果作为仲裁模块的最终结果。其原理如图11所示。

## 4 可靠性分析

### 4.1 配电管理机的可靠度计算

配电管理计算机是由2个同样功能的 DSP 和3个仲裁模块组成,其中两个 DSP 是并联关系,3个仲裁模块是一个3选2模块,所以整个配电管理计算机的可靠性框图

是一种混联模型。配电管理计算机工作时,每一个冗余单元出现故障的情况都是随机的,并且下一个故障状态仅仅与当前的故障状态相关,这种故障状态转移的过程是一种典型的马尔科夫过程。

配电管理计算机在工作时,每个故障模块都没有自修复的功能,当2个 DSP 都故障或者3个仲裁模块中至少两个故障时,整个配电管理计算机故障,故将其马尔科夫状态空间分为5个状态,  $E = \{0, 1, 2, 3, 4\}$ ,这5个状态代表的含义如下:

状态0:表示2个 DSP 和3个仲裁模块都正常,配电管理计算机正常工作。

状态1:表示2个 DSP 正常,1个仲裁模块故障,配电管理计算机正常工作。

状态2:1个 DSP 故障,3个仲裁模块正常,配电管理计算机正常工作。

状态3:1个 DSP 故障,1个仲裁模块故障,配电管理计算机正常工作。

状态4:配电管理计算机故障。

假设 DSP 的故障率为  $\lambda_1$ ,仲裁模块的故障率为  $\lambda_2$ ,配电管理计算机的马尔科夫状态转换图如图12所示。

可以得到马尔科夫方程组为:

$$\begin{cases} P_0(t + \Delta t) = P_0(t)[1 - (2\lambda_1 + 3\lambda_2)\Delta t] \\ P_1(t + \Delta t) = 3P_0(t)\lambda_2\Delta t + P_1(t)[1 - (2\lambda_1 + 2\lambda_2)\Delta t] \\ P_2(t + \Delta t) = 2P_0(t)\lambda_1\Delta t + P_2(t)[1 - (\lambda_1 + 3\lambda_2)\Delta t] \\ P_3(t + \Delta t) = 2P_1(t)\lambda_1\Delta t + 3P_2(t)\lambda_2\Delta t + P_3(t)[1 - (\lambda_1 + 2\lambda_2)\Delta t] \\ P_4(t + \Delta t) = 2P_1(t)\lambda_2\Delta t + P_2(t)\lambda_1\Delta t + P_3(t)(\lambda_1 + 2\lambda_2)\Delta t + P_4(t) \end{cases} \quad (1)$$

上式方程组中  $P_i(t)$  和  $P_i(t + \Delta t)$  分别为  $t$  和  $t + \Delta t$  时刻配电管理计算机所处状态  $i$  的概率。

对于配电管理计算机任意状态  $i$ ,当  $\Delta t \rightarrow 0$  时,可以得到该状态在  $t$  时刻的概率微分:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_i(t + \Delta t) - P_i(t)}{\Delta t} = P'_i(t) \quad (2)$$

所以根据马尔科夫方程组就可以得到马尔科夫微分方程组:

$$\begin{cases} P'_0(t) = -(2\lambda_1 + 3\lambda_2)P_0(t) \\ P'_1(t) = 3\lambda_2P_0(t) - (2\lambda_1 + 2\lambda_2)P_1(t) \\ P'_2(t) = 2\lambda_1P_0(t) - (\lambda_1 + 3\lambda_2)P_2(t) \\ P'_3(t) = 2\lambda_1P_1(t) + 3\lambda_2P_2(t) - (\lambda_1 + 2\lambda_2)P_3(t) \\ P'_4(t) = 2\lambda_2P_1(t) + \lambda_1P_2(t) + P_3(t)(\lambda_1 + 2\lambda_2) \end{cases} \quad (3)$$

根据配电管理计算机的实际工作过程可知,马尔科夫微分方程组的初始条件为:  $P_0(0) = 1, P_1(0) = P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = 0$ ,将其带入上式微分方程组即可得到:

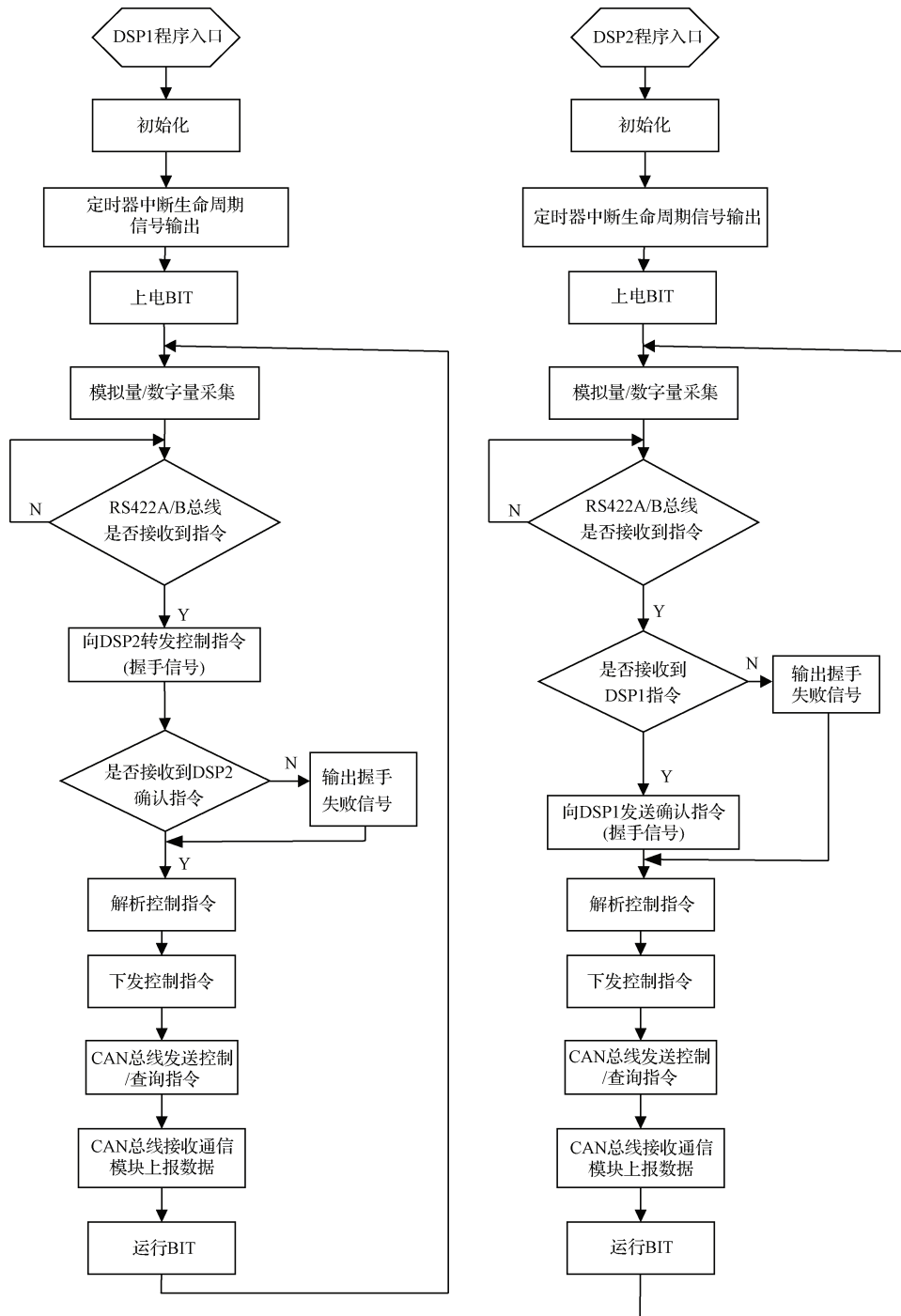


图 10 DSP1 和 DSP2 软件总体流程

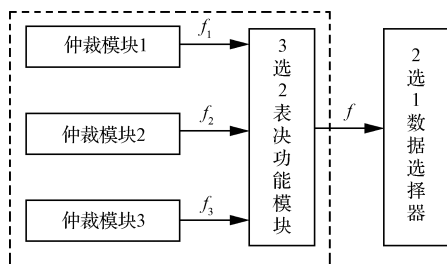


图 11 FPGA 软件设计框

$$\begin{cases}
 P_0(t) = e^{-(2\lambda_1+3\lambda_2)t} \\
 P_1(t) = -3e^{-(2\lambda_1+3\lambda_2)t} + 3e^{-(2\lambda_1+2\lambda_2)t} \\
 P_2(t) = -2e^{-(2\lambda_1+3\lambda_2)t} + 2e^{-(\lambda_1+3\lambda_2)t} \\
 P_3(t) = 6e^{-(2\lambda_1+3\lambda_2)t} - 6e^{-(2\lambda_1+2\lambda_2)t} - \\
 \quad 6e^{-(\lambda_1+3\lambda_2)t} + 6e^{-(\lambda_1+2\lambda_2)t}
 \end{cases} \quad (4)$$

因此可以得到配电管理计算机的可靠度为：

$$R(t) = P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = 2e^{-(2\lambda_1+3\lambda_2)t} - 3e^{-(2\lambda_1+2\lambda_2)t} - 4e^{-(\lambda_1+3\lambda_2)t} + 6e^{-(\lambda_1+2\lambda_2)t} \quad (5)$$

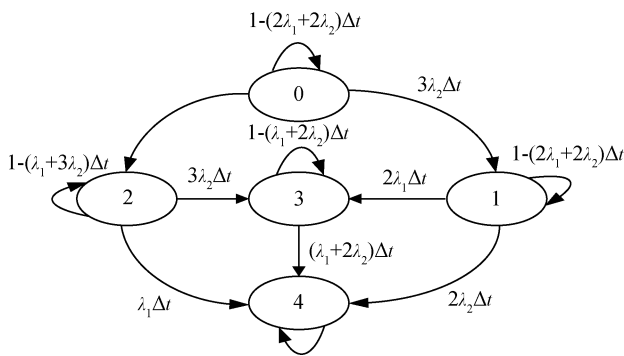


图 12 配电管理计算机马尔科夫状态转换

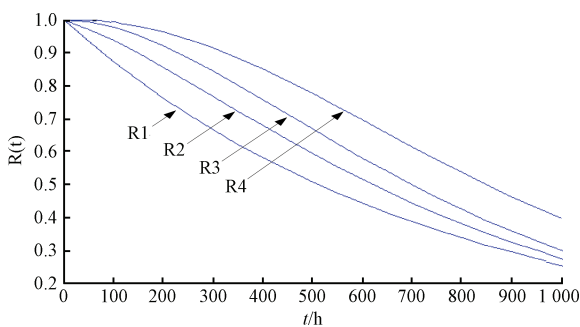


图 13 不同冗余结构配电管理计算机可靠度曲线

根据国军标《GJB-Z 299C-2006 电子设备可靠性预计手册》查询可知，DSP 和仲裁模块的故障率预计公式为：

$$\lambda_p = \pi_Q [C_1 \pi_T \pi_V + (C_2 + C_3) \pi_E] \pi_L \quad (6)$$

式中： $\lambda_p$  为故障率，单位为 $10^{-6}/h$ ； $\pi_E$  为环境系数； $\pi_Q$  质量系数； $\pi_L$  成熟系数； $\pi_T$  温度应力系数； $\pi_V$  电压应力系数； $C_1$  及  $C_2$  电路复杂度失效率； $C_3$  封装复杂度失效率。经查表计算可得：DSP 故障率为  $\lambda_1 = 0.001353(h)$ ，仲裁模块故障率为  $\lambda_2 = 0.000485(h)$ 。将  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  带入式(5)，当  $t=400h$  时可得配电管理计算机的可靠度为  $R(t) = 0.7574$ ， $MTBF=1450h$ 。

#### 4.2 不同冗余结构配电管理计算机可靠性比较

分别对单 DSP、两冗余 DSP 和单仲裁模块、两冗余 DSP 和三冗余仲裁模块及三冗余 DSP 和三冗余仲裁模块 4 种不同冗余结构的配电管理计算机可靠性进行比较，其可靠度曲线如图 13 所示。图中 R1 表示单 DSP 可靠性曲线，R2 表示两冗余 DSP 和单仲裁模块可靠性曲线，R3 表示两冗余 DSP 和三冗余仲裁模块可靠性曲线，R4 表示三冗余 DSP 和三冗余仲裁模块可靠性曲线。从图中可以看出，随着时间的增加，配电管理计算机的可靠度逐渐减小，且有  $R4 > R3 > R2 > R1$ 。

根据可靠度曲线可知，三冗余 DSP 和三冗余仲裁模块的配电管理计算机可靠度最高，两冗余 DSP 和三冗余仲裁模块的可靠度次之，两冗余 DSP 和单仲裁模块、单 DSP 结构的配电管理计算机的可靠度都较低，结合配电系

统对配电管理计算机的体积和重量的要求，本文采用冗余结构较为适合。

## 5 结论

本文以某型无人机的配电系统为研究对象，对无人机机载配电管理计算机技术进行简要分析，研究了配电管理计算机的设计架构以及配电管理计算机硬件设计和软件设计的基本内容，并基于 VS2013 软件开发了配电管理计算机的上位机调试实验平台。最后建立了配电管理计算机的马尔科夫可靠性模型，分析了配电管理机的可靠性。

## 参考文献

- [1] 王宏旭. 分布式智能配电系统[D]. 西安:西安电子科技大学, 2012.
- [2] 陶于金,李沛峰. 无人机系统发展与关键技术综述[J]. 航空制造技术, 2014, 464(20): 34-39.
- [3] 嵇成新. 军用无人机的用途及关键技术[J]. 现代防御技术, 2009, 37(6): 26-30.
- [4] EMADI A, EHSANI M. Aircraft power systems, technology, state of the art, and future trends[J]. IEEE AES Systems Magazine, 2000, 15(1): 28-32.
- [5] ZHOU S. Research on more electric aircraft power system[D]. Xi'an: Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, 2006.
- [6] NIU Y. Research on key technologies of advanced aircraft power system processor[D]. Xi'an: Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, 2006.
- [7] 薛超,张西虎,朱长怀. 基于 DSP 的无人机配电控制器检测系统的设计[J]. 电子测量技术, 2012, 35(1): 136-139.
- [8] 徐金全,郭宏,张秦岭,等. 基于冗余和容错技术的高可靠机载智能配电系统设计[J]. 航空学报, 2011, 32(11): 2117-2123.
- [9] 罗秋凤,肖前贵,杨柳庆. 无人机自动检测系统的设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(1): 126-131.
- [10] 陈万青. 基于 MFM 的核电厂 DCS 可靠性分析方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2013.
- [11] 黄茂芹. 基于 FPGA 的实时无线传感器网络系统设计[D]. 成都:电子科技大学, 2013.
- [12] 王银玲,李华聪. 基于 FPGA 的声发射检测仪的设计[J]. 无损检测, 2015, 37(3): 59-63.
- [13] 张洪近. 电动汽车电池主控及荷电状态估测单元设计与开发[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.
- [14] 王一鸣. 嵌入式综合数据采集技术研究及实现[D].

西安:西安电子科技大学,2010.

- [15] 谢季峰,陈汶滨. MySQL数据库与.NET技术集成的研究与应用[J]. 信息技术,2010(6): 159-160.
- [16] 雷金奎,马媚,张小林. 基于 Visual Studio 的无人机地面配置及检测平台设计[J]. 国外电子测量技术,2013,32(8):84-87.

#### 作者简介

林沐,1992年出生,工学硕士,主要研究方向为电机与电器。

E-mail:931256610@qq.com

## 罗德与施瓦茨公司推出具有指标保证的 5 GHz 带宽信号分析功能

R&S FSW85 信号与频谱分析仪提供了 5 GHz 带宽信号分析功能,可用于分析超宽带信号例如汽车雷达的 FM-CW 线性调频信号,IEEE 802.11ay 信号和 5G 新空中接口候选波形。

近日,罗德与施瓦茨公司一直以来致力于满足快速增长的宽带器件和系统测试需求,R&S FSW-B5000 选件的功能更加突出了这一贡献。信号与频谱分析仪 R&S FSW85 配备新的硬件选件和 R&S RTO2064 数字示波器配合使用就具有 5 GHz 带宽信号分析能力。

配备 R&S FSW-B5000 硬件的 R&S FSW85 在出厂前会做全频段的幅度和相位频率相应的校准,全频段内保证了高精度的幅度和相位测量。R&S FSW-B5000 支持中心频

率 9.5~90 GHz。R&S FSW85 在 85~90 GHz 频段工作需要额外配备 R&S FSW-B90G 选件。

R&S FSW 的瞬态和脉冲测试应用可对汽车雷达的宽带 FMCW 线性调频信号、跳频和脉冲雷达信号进行深入分析。R&S FSW-B5000 硬件选件也可对 IEEE 802.11ay 宽带信号、未来 5G 通信系统的新空中接口候选波形进行采集和分析。

高端信号与频谱分析仪 R&S FSW85 的 R&S FSW-B5000 硬件选件从即日起就可以订购。2017 年 9 月 11 号到 13 号,该功能会在波士顿即将举行的 EDICON 会议上首次亮相于公众媒体。更多信息请访问官方网站 [www.rohde-schwarz.com/ad/press/fsw](http://www.rohde-schwarz.com/ad/press/fsw)