

基于3片C8051F020仲裁热备份舵机控制系统硬件设计

茹毅 毛征 刘松松 罗子安 孟灿

(北京工业大学电子信息与控制工程学院 北京 100124)

摘要:本文基于3片C8051F020仲裁热备份技术设计了舵机控制系统。该单片机是完全集成的混合信号系统级芯片,它采用了高速流水线结构。与标准的51单片机相比指令执行速度具有很大提高,而且引进了数字交叉开关技术,使系统资源分配合理化。它通过采集大量传感器数据并实时计算输出给舵机控制板,从而精确控制舵机。对于仲裁热备份技术,本文设计了故障检测模块,双机通信模块,双机仲裁切换模块和舵机驱动模块。其中两台CPU通过双端口RAM进行通信,它们与仲裁单片机串口通信,通过仲裁切换极大缩短了切换时间,降低了系统故障率,提高了系统可靠性和稳定性。

关键词:C8051F020;舵机控制系统;仲裁热备份;双口RAM

中图分类号:TP273+.5 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:**510.8020

Hardware design for servos control system based on three C8051F020 arbitration hot backup

Ru Yi Mao Zheng Liu Songsong Luo Zi'an Meng Can

(College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: We design a servos control system based on three C8051F020 arbitration hot backup. C8051F020 is completely integrated of hybrid signals system on chip, provided with a high speed pipeline structure. The instruction execution speed is greatly improved compared with standard MCS-51, and the introduction of digital cross switch technology makes the allocation of system resources reasonably. It can control the actuator accurately by collecting and calculating a large number of sensor data out to the actuator control board. For the arbitration hot backup technology, we design fault detection module, communication module, dual engine arbitration switching module and servo drive module. Two CPUs communicate through double port RAM. In addition, communicating with the arbitration microcontroller serial greatly shorten the switch time, reduce the system failure rate and improve the system's reliability and stability.

Keywords: C8051F020; servos control system; arbitration hot backup; double port RAM

1 引言

随着科学技术日益发展,各国对军事设备质量和创新有了更高要求。作为世界头号经济大国,美国陆军最新项目是飞行卡车。其主要用于伤员救护、能力补给,组成未来战斗系统,无人驾驶地面装置等。我国首辆飞行汽车^[1]是由西安美联航空公司设计的“CarCopter”,这款飞行汽车从车头至尾翼总长8 m左右,车身具有流线型设计,外表相当美观。

飞行汽车的关键是飞行控制系统^[2],而飞控系统的核心是主控制芯片。本文主要研究的是基于3片C8051F020仲裁热备份的舵机控制系统硬件设计^[3],选用

的CPU是由Silicon Laboratories公司推出的一种混合信号系统级芯片C8051F020。其最大的优势是不仅采用高速流水线结构,还引进了数字交叉开关,与标准的51相比指令执行速度有了很大提高。

对于一个系统而言,即使是一个小故障也很可能造成无法挽回的糟糕局面,因此如何提高系统稳定性至关重要。本文设计了双机仲裁热备份系统^[4]:其中两个CPU同时工作并通过双端口RAM实时进行通信,当一个机器出现故障,另一台立即接管所有任务,间隔时间极短;第3台机器负责仲裁,用于监测两台机器的状态并控制系统最终输出,有效的保证了系统连续性和稳定性。

2 C8051F020 简介

C8051F020 器件是完全集成的混合信号系统级 MCU 芯片,具有 64 个数字 I/O 引脚,其 CIP-51 微控制器内核与 8051 指令集完全兼容,可以使用标准的 803x/805x 的汇编器和编译器进行软件开发。其采用流水线结构,相比于标准的 51 单片机比较指令执行速度有很大提高,70% 的指令执行时间为一个或者两个系统周期。C8051F020 是一个能真正独立工作的片上系统,该单片机最独特的地方是引进了数字交叉开关,它允许将内部数字系统资源映射到 P0、P1、P2、P3 的端口 I/O 引脚。

3 舵机控制系统硬件总体框架

舵机控制系统是飞行汽车的核心,是保障飞车飞行的关键,基于遵循小型化、低功耗的原则,必须考虑具有快速、实时计算能力的控制芯片。因此本文选用基于双 CPU 结构的处理器,分为 CPU1 和 CPU2。两个 CPU 具有相同功能,均负责实时处理从传感器模块采集到的飞车姿态、航向、位置、速度等数据^[5],并通过处理数据和姿态解算最终实现导航控制,计算并输出控制量,舵机控制板负责接收 CPU 的串口指令($\# \langle ch \rangle P \langle pw \rangle T \langle time \rangle \backslash r \backslash n$)并输出 PWM 信号,从而精确控制舵机的转向和角度^[6]。其系统硬件总体框图如图 1 所示。本文采用 Futaba-s3003 型号的舵机,控制信号是一个宽度可调的周期性方波脉冲信号,方波脉冲信号的周期为 20 ms(即频率为 50 Hz)。当方波的脉冲宽度改变时,舵机转轴的角度发生改变,角度变化与脉冲宽度的变化成正比^[7]。

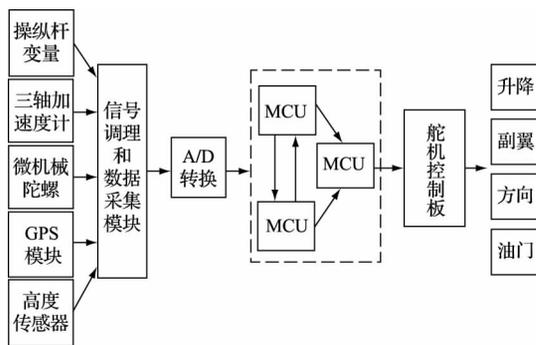


图 1 舵机控制系统硬件

4 基于 3 片 MCU 的热备份系统

舵机控制系统是整个飞行汽车的核心,对于一个庞大的系统而言出现故障在所难免,在特殊和复杂的环境中发生故障的可能性有所提高。因此系统应具备自我检测和修复能力以弥补故障产生的影响。为了提高系统的稳定性和可靠性,本文采用双机冗余仲裁热备份技术。

系统总体框图如图 2 所示。本文选用 3 台完全相同的单片机:A 机、B 机和 C 机。其中 C 机作为仲裁单片机,负责检测故障和仲裁。A 机和 B 机同时进行工作,当 A

机失效时,B 机立即接管 A 机工作,从而实现无缝对接。两台计算机同步接收相同的输入信号,任意时刻只能以一台计算机的输出作为系统最终输出。

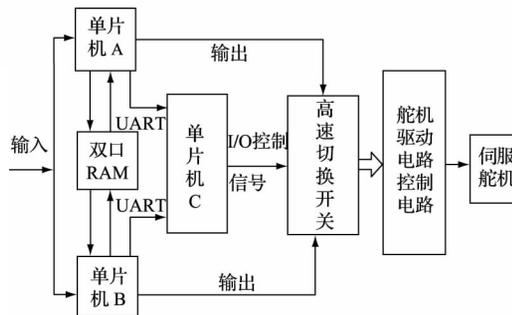


图 2 双机热备份系统

4.1 系统故障检测

故障指某个单元或者器件的属性、参数与正常值有很大差异,使其不能完成某种特定功能。故障按时间长短可分为瞬时性故障和永久性故障。故障检测是指通过获取故障模式、提取故障特征对故障信息进行综合评估,并将信息传递给仲裁控制器。其检测过程如图 3 所示。

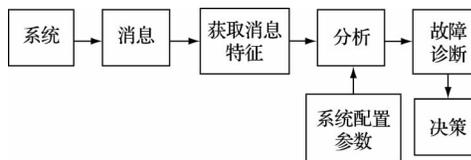


图 3 系统故障检测过程示意

本文将故障检测分为 3 部分:故障信息的采集、故障信息的分析比较和故障决策。当系统出现故障时,它的特征量会发生显著变化。采用基于解析模型的方法对故障信息进行参数估计,当故障参数显著变化时,根据参数估计值与实际值的差值来估计系统的状态。首先建立被控对象的输入输出参数模型,通过模型参数与过程参数的关系式,对模型参数序列 θ 进行估计。由模型参数序列导出过程参数序列,并最终得出过程参数的变化序列。最后基于此变化序列的统计特性来检测故障是否存在。常用的参数估计方法有很多,由于参数估计不需要计算残差序列,因此选用简单实用、具有很强鲁棒性的最小二乘法来进行参数估计。

4.2 仲裁热备份系统的通信

3 台 MCU 之间如何进行通信是仲裁热备份系统中最重要的环节,它直接关系到整个系统的可靠性,良好的通信是实现舵机控制系统冗余的基础。

4.2.1 单片机 A 与备份单片机 B 之间的通信

常用的双机(指单片机 A 和单片机 B)硬件通信方式有 3 种:双总线、网络和双端口 RAM。本文采用双端口 RAM 进行通信,双端口 RAM 是一种特殊的 RAM 芯片,它将控制逻辑与存储器集成在一片集成电路上,适合多种 CPU 接口,操作简单,集成度高,便于实现双机实时数据

交换。

在双机进行数据交换时,由于两台计算机都要对双端口 RAM 进行数据读取和传输,为了避免访问冲突,将双端口 RAM 分为 A 区和 B 区,如图 4 所示。

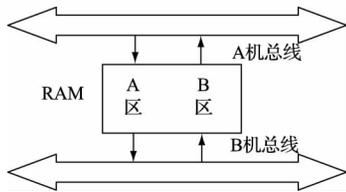


图 4 双机通信示意

如图 4 所示,A 机将数据传输到 A 区,B 机将数据传输到 B 区,当双机同时访问两个端口的同一单元时就会产生“BUSY”信号,此时如果其中任意一台 CPU 想继续访问双端口就会向另一台 CPU 发送双端口“BUSY”信号,等到访问结束后,“BUSY”信号撤销,对方可以继续访问了。A 机和 B 机同时进行工作,各自使用局部存储器工作,只有当需要交互数据时才使用公共存储器。两台处理机根据各自的系统总线,利用读、写双端口存储器指令访问 RAM 存储器实现数据比较,完成双机同步和故障检测等功能。

4.2.2 单片机 A(B)与仲裁单片机 C 通信

由于 C8051F020 内部集成了两个 UART,为了节省通信资源,仲裁单片机采用 UART 串行总线方式和单片机进行通信,避免了使用扩展模块,电路实现简单,具有很强的实用性。

4.3 仲裁算法的研究

仲裁切换模块是保障系统可靠性的核心环节,其通过对故障检测结果进行分析和仲裁,并将工作机切换到备用机以保障系统正常运转。本文定义双机仲裁热备份系统 4 种可能状态,如表 1 所示。

表 1 系统 4 种可能状态

A 机状态	B 机状态	系统运行状态
工作	工作	默认 A 机输出
工作	失效	B 故障 A 输出
失效	工作	A 故障 B 输出
失效	失效	系统失效(可能性极小)

本文采用分段式最小二乘法对数据进行有效仲裁^[8],由于飞车飞行参数是一些离散数据,本文选用二次型曲线对目标函数进行分段逼近,通过确定系数 a_0 、 a_1 、 a_2 来寻找最佳匹配函数,使得均方误差 S 为最小。

$$y(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 = [1 \quad t \quad t^2] \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=0}^N [f(t_i) - (a_0 + a_1t + a_2t^2)]^2 \quad (2)$$

当 S 对 a_0 、 a_1 、 a_2 的偏导数为零时, a_0 、 a_1 、 a_2 此时的取值使 S 为最小。

$$\begin{bmatrix} \partial S / \partial a_0 \\ \partial S / \partial a_1 \\ \partial S / \partial a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(3)可得关于 a_0 、 a_1 、 a_2 的正规方程组:

$$H \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^N f(t_i) \\ \sum_{i=0}^N t_i f(t_i) \\ \sum_{i=0}^N t_i^2 f(t_i) \end{bmatrix} \quad (4)$$

飞控系统是一个实时性很强的系统,本文利用最近 3 个周期数据变化来验证第 4 个周期的数据的正确性,取 $t=[0,1,2]$ 代入拟合曲线式(1)。假设 t 时刻出现了系统故障, $R_1(t)$ 、 $R_2(t)$ 为数据真实值, $E_1(t)$ 、 $E_2(t)$ 为数据估计值, δ 为真实值与估计值的误差指数, ϵ 为最大门限值,它是由其概率特性决定的,在 $|R_1(t) - R_2(t)| > \epsilon$ 的情况下,若:

$$\begin{aligned} |R_1(t) - E_1(t)| &> \delta \\ |R_2(t) - E_2(t)| &< \delta \end{aligned} \quad (5)$$

则认为是 A 出现了故障,反之是 B 故障。

4.4 高速切换输出模块

舵机控制系统对实时性和精确度要求很高,必须选取高精度切换设备,因此本文选用无触点的高速切换开关 ADG1634 作为系统最终输出的切换设备^[9]。ADG1634 是 COMS 工艺的单刀双掷开关,切换时间小于 200 ns,切换干扰率小。由于任意时刻系统只能有一个输出,通过 I/O 控制信号决定哪个端口输出。通常系统默认 A 机的输出为系统输出,当 A 机出现故障,立即切换到 B 机,由 B 机输出数据,反之亦然。这样达到了元件级的冗余,提高了系统可靠性和稳定性。

5 系统可靠性模型及分析

系统的可靠性特征量是描述一个系统稳定性的重要指标。常用的可靠性特征量主要有可靠度、累积失效函数、失效概率密度函数、失效率等。可靠度 $R(t)$ 指系统在一定条件下,在时间 t 内完成特定功能的概率,表示为 $R(t) = P\{T > t\}$, $0 \leq t \leq \infty$, T 为系统寿命。累积失效函数 $F(t)$ 指系统在 $(0, t)$ 时间内发生失效的概率,表示为 $F(t) = P\{T \leq t\} = 1 - R(t)$ 。失效概率密度函数 $f(t)$ 定义为 $F(t)$ 对于时间 t 的导数。失效率 $H(t)$ 表示单位时间内失效元件与非失效元件的比值,定义为 $H(t) = \lambda$ 。如果失效率为常值,由公式推导可得 $R(t) = e^{-\lambda t}$ 。

5.1 系统可靠度

通常计算可靠性特征量有两种方法:1)通过测量方法计算,2)通过可靠性模型估算^[10]。常用的有串联模型、并

联模型、混联模型和旁联模型。测量方法精度高,但工作量大、费时、成本高。模型估计偏重理论、精度低,但它的优势是成本低、可行性高。因此选择可靠性模型^[8]来计算系统的可靠性。

$$R = 1 - F = 1 - \prod_{i=1}^N F_i = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - R_i) \quad (6)$$

假设系统中所有模块相互独立,各个模块可靠度分别为 $R_1, R_2, R_3 \dots R_N$, 相应的累积失效函数为 $F_1, F_2, F_3 \dots F_N$ 。系统的累积失效函数为 F , 系统的可靠度为 R , 则有公式

$$F = F_1 \cdot F_2 \cdot \dots \cdot F_N = \prod_{i=1}^N F_i \quad (7)$$

本系统采用双机热备份工作模式,其可靠性模型如图5所示。

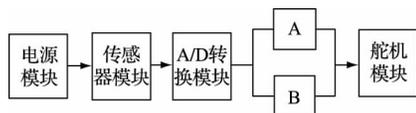


图5 系统可靠性模型

对于单机无冗余系统和双机热备份系统,双机热备份系统只有当双机同时失效才视为系统失效。相同的单片机具有相同的可靠度,设单片机可靠度为 R_D , A机和B机并联的可靠度为:

$$R_z = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - R_i) = 1 - (1 - R_D)^2 = 2R_D - R_D^2 \quad (8)$$

因此双机系统的可靠度为 $R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_z$ 。单机模型的可靠度为 $R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_D$ 。依据查表可知电源、传感器、A/D和舵机模块的失效率分别为 14.75×10^{-6} H、 13.99×10^{-6} H、 13.92×10^{-6} H和 14.02×10^{-6} H。由公式 $R(t) = e^{-\lambda t}$ 计算出各个模块的可靠度。其系统可靠度 $R(t)$ 曲线如图6所示。

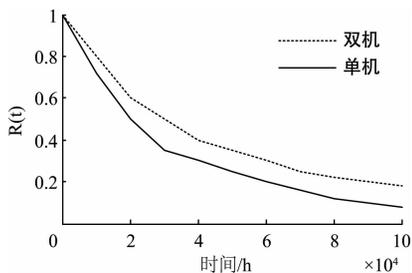


图6 单机与双机系统可靠性曲线

5.2 系统平均无故障时间

可靠度为 $R(t)$ 的系统的平均无故障时间 MTTF 定义为从零时刻到故障发生时持续运行时间的平均值。

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt, \text{ 如果 } R(t) = e^{-\lambda t}, \text{ 则 } MTTF = 1/\lambda.$$

双机系统是并联模型,其可靠度 $R = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_z$, 代入各自失效率得出 $MTTF = 15\ 629.25$ h。单机系统属于串联模型,其可靠度为 $R = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 \cdot R_D$ 。

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5} =$$

9 299.25 h。

通过以上数据可知双机热备份系统的平均无故障时间比单机系统超出 60%, 这样延长了系统平均运行时间, 有效保障了设备的可靠性。

5.3 系统仿真验证

对于故障仲裁采用 3 个梯度, 按严重程度分为自检、梯变、测量值与估计值差异指数。系统正常时, 两通道自检信号呈现周期性方波, 所有梯变正常, 而且差异值在门限值范围内, 不进行双机仲裁。假设某一时刻自检信号异常, 仲裁模块接收到的 I/O 信号引脚电平不呈现周期性变化, 说明系统出现严重故障, 持续 5 个周期后则立即切换。如图 7、8 所示。

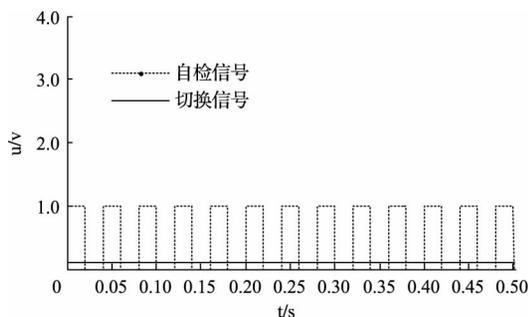


图7 通道自检正常相应曲线

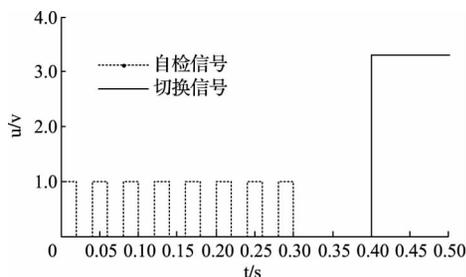


图8 通道自检异常相应曲线

本文采用线性二次函数对通道进行分段拟合, 控制周期为 20 ms, 对于 2 ms 内电压变化范围是 $-3 \sim +3$ V 的舵机信号, 每个周期电压变化梯度为 0.06 V, 考虑到通道的差异性, 在双通道门限值为 0.02 条件下, 估计曲线和真实值误差小于 0.005 V, 满足精度要求。

如果在自检信号正常情况下随机注入故障信号, 信号梯度变化合理。由于故障信号的影计, 使得 $|R_1(t) - y_1(t)| > \lambda$, 注入瞬时干扰信号, 虽然瞬时值和真实值在之后几个周期有很大差距, 但因双通道差值恢复到允许门限值范围内, 且在接下来 5 个周期内超出, 系统判定为一次瞬时性故障, 不采取任何措施。在测量值和估计值差异性指数较大时, 通道差异持续超过门限值则被判定为永久性故障, 系统进入切换状态, 切换时间小于 300 ms, 完全符合舵机控制系统对实时性的要求。

6 系统失效模拟

6.1 系统硬件失效模拟

硬件失效模拟是指人为设定一些硬件故障来检测系统容错的能力,考虑到硬件成本和复杂度的问题,硬件失效模拟如表2所示。

表2 系统硬件失效模拟

编号	故障类型	模拟方法	系统状态	最终输出
1	正常	无	A、B正常	A(默认)
2	A机电源故障	切断A机电源	A机失效 B机工作	B
3	B机电源故障	切断B机电源	A机工作 B机失效	A
4	A机无法复位启动	MCU复位引脚电平被拉低	A机失效 B机工作	B
5	B机无法复位启动	MCU复位引脚电平被拉低	A机工作 B机失效	A
6	A机无法与C机正常通信	阻断A机与C机之间通信	A机失效 B机工作	B

从上述检测结果可以看出,当系统出现硬件故障时系统能够准确确认并及时做出相应处理,从而保证系统的安全。但是由于硬件设备出现故障时难以预测,考虑到周围环境的不同,情况往往很复杂,在设计过程中要尽量考虑全面以保障系统的可靠性和稳定性。

6.2 系统软件失效模拟

设计软件故障的方法很多,有删除程序,增加冗余数据,改变延迟特性等。软件故障注入可以在编译时注入也可以在运行时注入,相比于硬件模拟更全面,但缺点是无法模拟软件自身的错误,软件失效模拟如表3所示。

表3 系统软件失效模拟

编号	故障类型	模拟方法	系统状态	最终输出
1	正常	无	A、B正常 A发出自检错误警告	A(默认)
2	自检周期	向A机发送自检超时指令	B机工作	B
3	自检周期	切断B机电源	A机工作 B机失效	A
4	强行切机	向A机发送切换指令	A机失效 B机工作	B
5	数据丢失	人为抹掉A机数据	A机失效 B机工作	B
6	自检错误	A机发出自检错误	A机失效 B机工作	B

从上述测试中可以看出,常见的软件故障均能被系统检测,并能够根据故障类型进行相应处理以隔离故障。

7 结论

本文主要研究了基于3片C8051F020仲裁热备份的

舵机控制系统。该单片机通过实时采集传感器数据并解算输出给舵机控制板,进而控制舵机,提高了系统的控制精度。本文创新设计了仲裁热备份系统,即两台CPU同时进行工作,另一台单片机负责仲裁,合理的进行资源利用使系统得到优化。通过故障检测模块、双机通信模块和仲裁切换模块实现了该系统的基本功能,把仲裁机制分成3个独立的梯度层次能适应各种故障的检测,使切换更准确更具有实时性,极大的减少了系统切换时间。最后,通过系统失效模拟仿真验证了系统在出现故障时的可靠性,并与单机系统做了比较,从RT曲线可知,双机仲裁热备份系统的可靠性和稳定性得到了显著提高。

参考文献

- [1] 刑路. 国内首辆飞行汽车[EB/OL]. 中国民航网,2012.
- [2] ABDULHAMITBILAL ERKAN, JAFAROV EM. Gain scheduled automatic flight control systems design for a light commercial helicopter model[J]. Wseas Us, 2011; 440-455.
- [3] 王辉堂,颜自勇,陈文芾,等. 基于带PWM模块单片机的步进电机细分驱动技术[J]. 国外电子测量技术,2007,26(3): 9-11.
- [4] 史文路,胡平. 双机热备份系统的研究与改进[J]. 微处理机,2008,29(3):180-182.
- [5] 袁雪,张志文,司庆丹,等. 基于ARM的智能数据采集系统设计[J]. 国外电子测量技术,2014,33(11): 66-71.
- [6] 杨庆庆,徐科军,任保宏,等. 变PWM占空比的压电式阀门定位器控制方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014,28(4):424-433.
- [7] 崔茂振,张昌凡,朱剑. 永磁同步电机滑模调速控制及其实现[J]. 电子测量与仪器学报,2012,26(1): 84-92.
- [8] 李志宇,居晓,高艳辉. 基于相似冗余度飞控计算机内核的单片机仲裁机制研究[J]. 计算机测量与控制, 2013(2):3359-3361.
- [9] 罗毅,杨昆,董麟,等. 开关触点接触电阻动态测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015,36(1): 49-55.
- [10] YI J, LUO X, LUO P, et al. Markov reliability model based on error classification[C]. Proceedings-International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Programming, 2012;224-231.

作者简介

茹毅,1989年出生,工学硕士,主要研究方向为信号处理与电路。

毛征,1959年出生,工学博士,教授,主要研究方向为兵器系统仿真与光电跟踪技术。

E-mail:maozheng@bjut.edu.cn