

# 某型飞机空舰导弹供电系统故障检测的技术实现

韩兆福, 王超勇, 杨明绪

(海军航空大学 青岛校区, 山东 青岛 266041)

**摘要:** 为解决某型飞机空舰导弹供电系统大电流和满负荷能力无法检测的难题, 研制了空舰导弹供电系统检测仪; 采用自动控制技术构建了可变大功率负载网络, 有效解决了宽度窄的大电流启动曲线模拟问题; 利用图形化编程技术、状态机技术、DMA FIFO 和 TCP/IP 技术, 有效实现了传感器—FPGA—实时嵌入式平台—触摸屏式计算机之间的状态控制和采集数据实时传输; 实验结果表明, 该检测仪能够对空舰导弹供电系统的故障进行有效诊断和定位, 电压检测相对误差小于 $\pm 1.5\%$ 、电流检测相对误差小于 $\pm 1\%$ , 其性能指标达到设计要求; 该研究具有一定的实用性, 推广应用前景广阔。

**关键词:** 空舰导弹; 供电系统; 故障检测; 技术实现

## Technical Realization of Fault Detection for Air-to-ship Missile Power Supply System of a Certain Type of Aircraft

Han Zhaofu, Wang Chaoyong, Yang Mingxu

(Naval Aeronautical University Qingdao Branch, Qingdao 266041, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of a certain type of aircraft power supply system of air-to-ship missile large current and full load capacity cannot be detected, an air-to-ship missile power supply system detector was developed; automatic control technology is adopted to build a high power load network, effectively solve the simulation problem of large start current with narrow width; using graphical programming technology, state machine technique, DMA FIFO and TCP/IP technology, the state control and the real-time transmission of data acquisition between the sensor and the touch screen computer have been effectively realized, experimental result prove, this detector can effectively diagnosis and locate the fault of the air-to-ship missile power supply system, the relative error of voltage detection is less than  $\pm 1.5\%$ , and the relative error of current detection is less than  $\pm 1\%$ , and its performance index reaches the design requirement. The research has certain practicability and wide application prospect.

**Keywords:** air-to-ship missile; power supply system; fault detection; technical realization

### 0 引言

某型飞机空舰导弹供电系统作为 YJ- $\times$  空舰导弹的大功率供电的专用电源, 对空舰导弹系统的可靠性起着重要作用。该型飞机空舰导弹供电系统相对独立, 不与飞机直流电网系统连接, 由火控专业人员负责日常的维护。空舰导弹供电系统主要包括机上变压整流器(3、4号)和空舰导弹熔断器盒, 因其拆装困难, 缺乏有效的检测手段, 在装备时间增长后, 元器件的老化等故障问题难以得到及时发现和排除。因此, 为保证空舰导弹作战和训练任务的完成, 及时发现空舰导弹供电系统可能的故障隐患就显得十分必要和迫切。

### 1 系统结构及原理

空舰导弹供电系统检测仪主要包括硬件和软件两部分<sup>[1]</sup>, 其总体结构如图 1 所示。检测仪提供两套完全相同的检测硬件, 可同时两个供电通道进行检测。其中控制部分包括嵌入式控制器、嵌入式机箱、数字输入模块、数字

输出模块、触摸屏的触摸按钮和 18 个继电器, 模拟负载部分包括 18 个大功率电阻, 测量部分包括电流传感器和采集模块, 显示部分包括触摸屏式计算机, 电源部分包括直流转换模块<sup>[2]</sup>。嵌入式控制器、嵌入式机箱、数字输出模块和采集模块构成检测仪的核心部分。模拟负载、继电器和数字输出模块共同构成大功率模拟负载网络。检测仪软件开发平台主要包括 LabVIEW 开发系统、LabVIEW RT 实时开发环境、LabVIEW FPGA 开发环境和 LabVIEW 触摸屏模块。使用 LabVIEW 图形化系统设计软件, 可在同一个环境中编写人机界面(HMI)和可编程自动化控制器(PAC), 这样可将开发成本降到最小<sup>[3]</sup>。

空舰导弹供电系统检测仪首先要提供大功率负载, 经大功率负载通过空舰导弹供电系统的大电流模拟空舰导弹的启动过程。由于两枚空舰导弹的最大工作电流达到 110 A, 且每枚空舰导弹的启动脉冲宽度较窄, 须将多个大功率负载并联工作, 每个大功率负载由固态继电器控制其接通或断开, 大功率负载和固态继电器共同构成大功率模拟负载网络, 如图 2 所示。通过固态继电器控制大功率负载的接通或断开, 从而实现不同大小的负载电流, 大功率负载的接通或断开的时刻决定了启动脉冲的宽度。负载电流由霍尔传感器感应送到嵌入式检测平台。

收稿日期: 2018-05-04; 修回日期: 2018-05-24。

作者简介: 韩兆福(1964-), 男, 山东蓬莱人, 大学, 副教授, 主要从事航空火力控制及计算机应用的教学与研究。

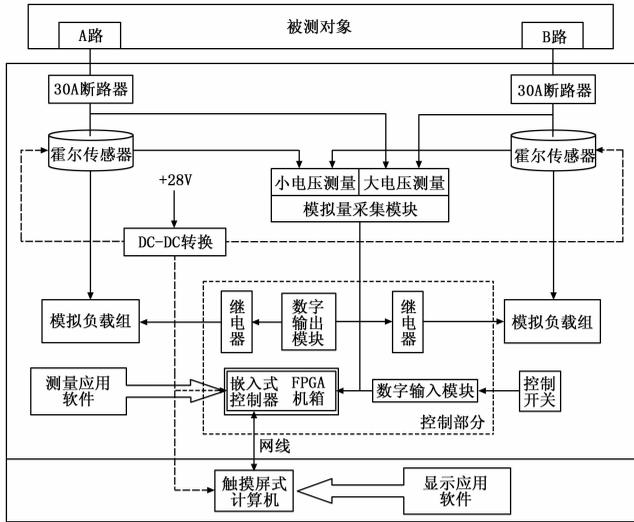


图 1 检测仪总体结构框图

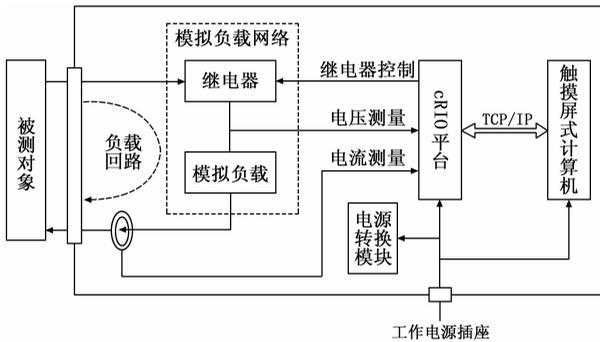


图 2 空舰导弹供电系统检测原理图

## 2 设计思路

鉴于空舰导弹的启动电流比较大，启动脉冲宽度比较窄，而已装备部队的 YJ- $\times$  空舰导弹模拟器/训练弹，已经有多个型号，但它们都只能提供很小的负载功能，无法反映该型飞机空舰导弹供电系统满负载能力。由此可见，空舰导弹供电系统负载能力的检测具有一定的难度和风险。

由于该型飞机空舰导弹供电系统检测仪的研制任务重、时间紧，且存在很多技术难点。因此，为避免研制风险，研制过程必须遵循如下设计原则：

### 2.1 硬件集成原则

- 1) 满足微秒级采集和控制的实时性要求；
- 2) 满足快速、可靠的数据传输需求；
- 3) 满足外场使用环境的要求，充分考虑输入电源、便携性、耐用性等因素；
- 4) 尽可能采用成熟的产品和技术，避免自行研制带来的风险；
- 5) 检测仪的通用性要强。

### 2.2 软件开发原则

- 1) 满足微秒级采集和控制的实时性要求；
- 2) 应用程序的开发平台必须是基于 Windows 的软件开

发环境；

- 3) 满足快速、可靠的数据传输需求；
- 4) 应用软件采用模块化设计，可靠性要好，安全性要强；
- 5) 人机界面友好，操作简单。其设计思路如图 3 所示。

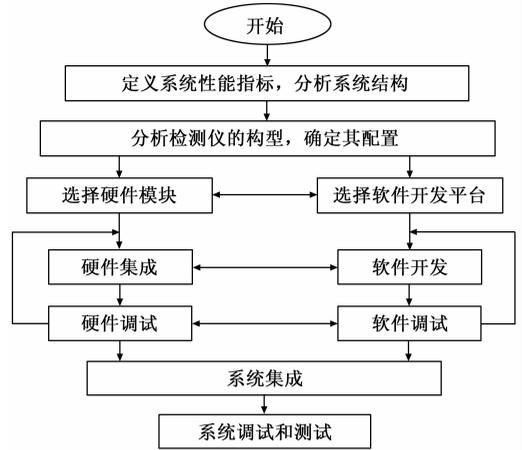


图 3 检测仪设计思路

## 3 技术实现

### 3.1 检测仪的状态划分

检测仪状态的合理划分，可有效控制检测仪的状态，有利于软件开发、多人合作、设计相互转换之间的信息交换。检测仪的软件整体可划分为初始化、等待（状态 1）、低速采集（状态 2）和高速采集（状态 3）4 种状态<sup>[4]</sup>，各状态之间的相互转换关系如图 4 所示。

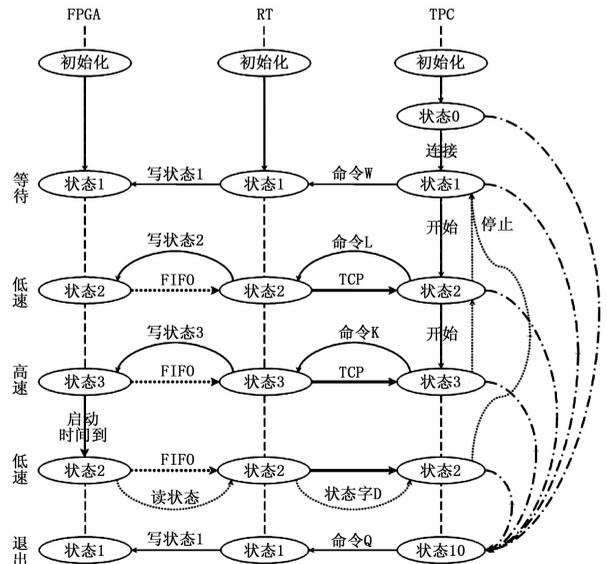


图 4 检测仪软件三部分组成及其状态转换关系的

### 3.2 人机界面布局设计

检测仪的软件包括测量应用软件和显示应用软件两部分。由于测量部分是一个嵌入式的计算机，无显示设备，也就不存在人机界面。所有的状态控制和操作均将通过以

太网在触摸屏式计算机 TPC 的触摸屏上进行<sup>[5]</sup>。因此, 人机界面布局设计主要是指触摸屏式计算机中显示应用软件的人机界面布局设计。

人机操作界面是触摸屏, 其分辨率为 800 × 600, 应用软件通过两级画面进行控制。

检测仪启动后, 自动进入启动界面。

启动界面提供“继续”、“退出”和“帮助”3 个操作按钮:

- 1) “继续”: 进入检测界面;
- 2) “退出”: 关闭触摸式计算机显示控制软件, 退回。
- 3) “帮助”: 提供帮助功能, 设备功能、物理连接、操作说明等。再次点击, 帮助内容消失。

检测界面和帮助界面均采用标签页面形式, 具有直观、方便操作的特点。

### 3.3 检测仪检测流程设计

依据实际的通电过程和检测仪的状态设置, 详细设计检测仪各状态的具体动作, 方便编程实现, 总的检查流程如图 5 所示, 其中简化了双机通信的过程。

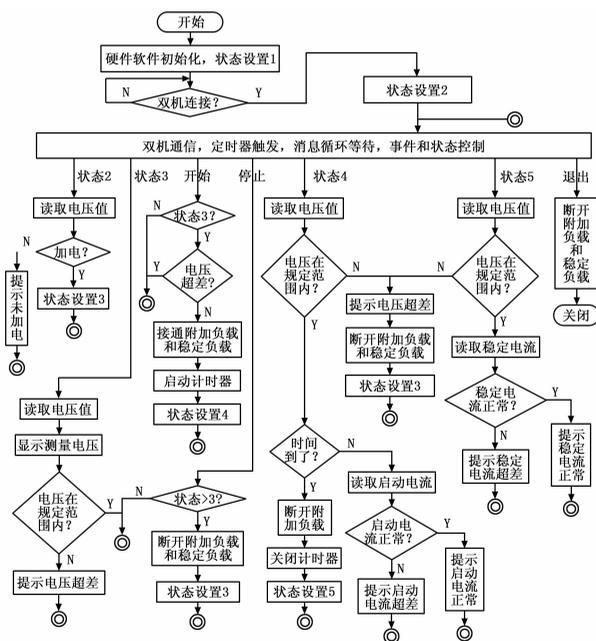


图 5 检测仪的检测过程设计框图

初始化阶段: 在测量应用软件和显示应用软件运行后, 首先完成双机硬件和软件的初始化, 主要包括采集模块和数字输出模块的初始化和人机界面的初始化, 服务器和客户端的初始化, 并将状态设置为 1;

状态 2: 尝试建立双机 TCP 连接, 一旦连接成功, 将检测仪状态设置为 3;

状态 3: 等待加电。实时读取检查通道的电压值, 判断是否加电, 若没有加电, 则提示“未加电”, 若已加电, 实时测量显示加电电压, 并判断电压是否正常。若电压不在规定范围内, 则提示电压超差, 若正常, 则等待用户触发“开始”事件。

“开始”事件: 用户触发此事件后, 首先判断检测仪是否处于准备好的状态, 且检查通道的电压正常, 两者满足要求后方可接入附加负载和稳定负载, 启动计时器, 将检测仪设置为状态 4。

状态 4: 实时监控检查通道的电压变化情况, 一旦电压超差, 则给出提示“电压超差”, 并断开附加负载和稳定负载, 将检测仪设置为状态 3。若电压正常, 实时测量判断启动电流, 若正常, 则给出提示“启动电流正常”, 若超差, 则给出提示“启动电流超差”。一旦计时器时间大于规定的启动时间, 则断开附加负载, 关闭计时器, 将检测仪设置为状态 3。

状态 5: 实时监控检查通道电压和稳定电流的变化情况。若电压超差, 则给出提示“电压超差”。若稳定电流超差, 则给出提示“稳定电流超差”。

“停止”事件: 用户触发此事件后, 判断检测仪是否处于模拟启动或模拟稳定状态, 若条件为真, 则断开附加负载和稳定负载, 将检测仪设置为状态 3。

“退出”事件: 用户触发此事件后, 不管检测仪处于什么状态, 都断开附加负载和稳定负载, 并关闭应用软件。

### 3.4 检测仪整体状态控制设计

为便于编程控制, 将检测仪的整体工作状态分为 6 个状态<sup>[6]</sup>, 并由 3 个事件来控制, 状态之间的转换关系如图 6 所示。

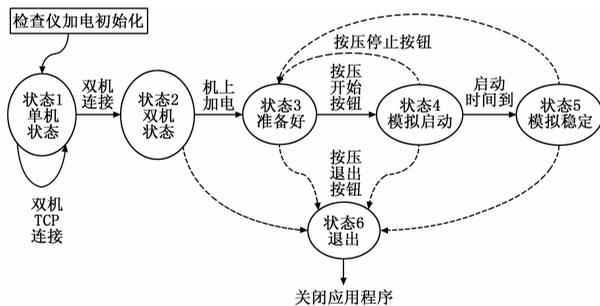


图 6 检测仪总体状态转换图

检测仪可分为 6 个工作状态:

- 1) 状态 1: 单机状态, 即 cRIO 系统与触摸屏计算机 TPC 尚未完成 TCP 通信连接; 一旦 TCP 通信连接成功, 自动转入状态 2;
- 2) 状态 2: 是指双机连接成功, 但检查通道未加电的状态, 提示“未加电”; 一旦检查通道加电, 自动转入状态 3;
- 3) 状态 3: 实时监控检查通道的电压, 提示“准备好”, 等待用户触发“开始”事件;
- 4) 状态 4: 模拟启动状态, 此阶段接通附加负载和稳定负载。当计时器的计时时间大于启动时间, 自动转入状态 4;
- 5) 状态 5: 模拟稳定状态, 此阶段断开附加负载。
- 6) 状态 6: 退出应用程序。

检测仪的状态主要由 3 个事件来控制<sup>[7]</sup>:

表 1 检测仪的各状态描述和触发条件

状态	cRIO 端		TPC 端		
	触发条件	状态描述	触发条件	状态描述	提示
状态 1(单机)	cRIO 加电	初始化, 双机 TCP 未连接	TPC 加电	初始化, 双机 TCP 未连接	单机
状态 2(等待加电)	双机连接	等待检查通道加电, 不发送数据	双机连接	双机连接, 检查通道未加电	未加电
状态 3(准备好)	已加电	断开启动和附加负载发送测量电压数据	按压停止按钮数据长度为 2	接收电压数据	准备好
状态 4(启动)	“启动”命令	接通启动和附加负载发送测量电压电流数据	按压开始按钮数据长度为 4	接收电压电流数据	启动
状态 5(稳定)	启动时间到	断开附加负载发送测量电压电流数据	数据长度为 1	接收电压电流数据	稳定
状态 6(退出)	“退出”命令	退出应用程序	按压开始按钮数据长度为 1		—

1) “开始”事件: 首先判断检测仪是否处于准备好状态, 并且电压在规定范围内, 如满足条件, 则接通附加负载和稳定负载, 并转入状态 4, 否则不做任何动作;

2) “停止”事件: 当检测仪处于负载启动或稳定阶段, 断开附加负载和稳定负载, 但仍然实时监控检查通道的电压, 转入状态 3;

3) “退出”事件: 无论检测仪处于什么状态, 都将检测仪恢复到未加负载状态, 同时关闭应用软件。

检测仪具体的各状态描述和触发条件如表 1 所列。

## 4 技术难点

### 4.1 实时性的要求

由于启动电流脉冲宽度很小, 需要控制电路、电流传感器和采集电路都具有很高的实时性, 以达到产生启动电流脉冲的理想效果<sup>[8]</sup>。而基于 Windows 的系统架构只能达到几毫秒的循环控制, 很难实现模拟负载启动过程。如果自行研制基于单片机的检测仪, 一方面技术难点较多, 研制周期长; 另一方面, 很难满足技术要求。为此, 尽可能选用现有商用技术 COTS, 以达到满足技术要求, 同时可获得研制周期短和可靠性高的目的。

解决方案:

1) 采用由嵌入式控制器、嵌入式机箱和 C 系列的模块组成的 CompactRIO 嵌入式实时平台, 控制循环可达 25 ns 间隔;

2) 采用固态继电器控制大功率负载的接通和断开, 满足实时性要求;

3) 采用霍尔型传感器测量启动电流和稳定电流, 以解决大电流无法直接测量的难题;

4) 优化检查控制流程。

### 4.2 双机通信

嵌入式控制器与触摸屏式计算机之间的通信, 现有硬件连接为以太网网线。通信协议主要有 IP 通信协议、UDP 通信协议和 TCP 通信协议。双机之间的通信是双向的, 嵌入式控制器须将采集的电压电流数据传送到触摸屏式计算机, 触摸屏式计算机须将操作者的操作选择和状态控制发送到嵌入式控制器。通信协议选择的关键是在可靠传输的基础上满足传输速度快的需求。

解决方案:

TCP 是一种可靠的、基于连接的协议<sup>[9]</sup>。它提供错误

检测, 确保数据按顺序并且不重复地到达。TCP 是基于连接的协议, 这意味着各传输点必须在数据传输前创建连接。

可通过等待入局的连接或寻找具有指定地址的连接来创建连接。在创建 TCP 连接时, 须指明其地址及该地址的端口。一个地址上不同的端口表示该地址上的不同服务。通过打开 TCP 连接函数可主动创建一个具有特定地址和端口的连接。如连接成功, 该函数将返回唯一识别该连接的网络连接句柄。这个连接句柄可在此后的 VI 调用中引用该连接。

### 4.3 电压和电流的高速采集

由于启动电流脉冲的宽度不超过 100 ms, 为了使得采集的电流和电压数据波形真实地反映波形特征, 应确保启动电流脉冲的采样点达到 200 点以上为最低标准, 单通道的采样率最低为 2 kS/s, 即每 500  $\mu$ s 采样一次。

解决方案:

模拟采集模块 NI9221: 总采样率 800 kS/s, 现有 2 个测量通道, 则完成一次采样的时间为 2.5  $\mu$ s; 模拟采集模块 NI9205: 总采样率 250 kS/s, 现有 4 个测量通道, 则完成一次采样的时间为 16  $\mu$ s。两个模拟采集模块的性能远远超过最低需求。

## 5 实验结果与分析

实验内容内容包括地面验证实验与外场联机实验。

### 5.1 地面验证实验

地面检测仪加电检查时, 大功率负载电阻发热并出现异味, 模拟负载网络工作出现异常, 5 min 后终止试验, 后经测试电阻烧毁 1 个。

#### 5.1.1 原因分析

原设计方案未能充分考虑检测仪机箱的空间和散热等因素。

#### 5.1.2 纠正措施

1) 换电阻。通过多方联系和讨论, 最终确定将原 18 个 RX24 铝壳散热电阻更换成耐热性更好的 RMG 片式无感大功率电阻。500 W 级的尺寸为 96 mm  $\times$  60 mm  $\times$  3.0 mm, 尺寸大大减小, 散热空间增大, 重量 (0.35 kg/个) 也降低很多。

2) 加厚铝板和增加风扇散热。所有的大功率负载由原来固定在 2 mm 铝板上改为 4 mm 铝板, 便于快速散热; 另外, 加装通风扇, 只要工作电源接通风扇就工作, 确保使用阶段检测仪内部的空气快速流通。

3) 增加机箱散热孔。与生产厂家联系, 在机箱的两侧各增加  $\Phi 10$  通风孔 10 个。

4) 工作时间软件定时。通过软件定时, 限定大功率模拟负载网络最长工作时间为 5 min。

### 5.1.3 验证实验

改用片式无感大功率电阻后, 通过固态继电器一大功率模拟负载组合板的设计和制作, 后期进行了验证实验。连接好电缆→接通工作电源→机箱内应能听到风扇转动的声音→触摸屏式计算机正常启动→触摸屏式计算机响应专用触摸笔的操作→双机网络成功连接, 证明电阻更换后选型是合理且检测仪软、硬件工作正常, 符合设计要求。

## 5.2 外场联机实验

外场联机实验在东部战区海军航空兵某团 16 号机进行。检测结果为: 满负载电压不低于 24 V; 纹波电压不大于 1.5 V; 检测仪合格指示灯亮 (指示灯熄灭为不合格), 符合设计要求。

## 6 结束语

该检测仪具有功能齐全, 技术含量高, 人机界面友好, 智能化程度高, 可原位检测某型飞机空舰导弹供电系统满负载能力和纹波电压, 有效提高了空舰导弹发射任务保障能力, 具有显著的军事经济效益, 其检测方法和嵌入式硬件检测平台可适用于其他主战机型空舰导弹供电系统的原

(上接第 79 页)

### 5.3 结果分析

经实验表明, 该温控系统满足控制要求。由于本次控制对象是数字化模型, 而实际控制对象所处环境都是十分复杂的, 多存在较大滞后, 所以本次实验旨在验证算法。

## 6 结束语

本次温控系统设计先采用软件搭建模型进行仿真实验, 采用 Smith 预估器改进的 PID 算法验证算法能够完成舱温控制要求。在此基础上, 快速搭建实验室系统原型平台, 实际实验证明设计控制算法可以达到舱温控制要求。

本次设计软件业务层独立于硬件层进行设计, 在实际工程应用中, 仅需依次使用真实硬件替换嵌入式开发目标机、使用系统实物替换数学模型、使用 AD、DA、PWM 等工程 IO 接口替换以太网, 可以实现全数字向全实物有序过渡, 为后续工程应用项目提供了基础。

### 参考文献:

- [1] 余建祖, 余雷. 飞机设备吊舱环境控制系统的优化设计 [J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28 (1): 25-29.
- [2] 刘东晓, 满广龙, 曹剑峰, 等. 载人航天器密封舱温度独立控制方法及实验研究 [J]. 航天器环境工程, 2014, 31 (4): 386-391.
- [3] 余建祖, 钱翼稷, 高泽溪, 等. 电子吊舱微环境智能控制系统 [J]. 低温工程, 1998, 5: 28-34.
- [4] 贺居锋. 基于 MATLAB/Simulink/GUIDE 的 PID 工具箱的设

位检测, 推广应用前景广阔。

### 参考文献:

- [1] 熊华刚, 王中华. 先进航空电子综合技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [2] 支超有. 机载数据总线技术及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [3] 叶华, 李彬, 高培淞, 等. 航空相机检测仪系统的设计与实现 [J]. 国外电子测量技术, 2017, 36 (5): 40-44.
- [4] 杨珂, 宋国望, 赵世平. 基于多线程技术的测控系统软件设计 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (16): 89-91.
- [5] 杨帅, 熊德智, 李建新, 等. 基于载波通信的低压用户串户检测仪的设计 [J]. 计算机应用, 2016, (4): 56-58.
- [6] 邹明虎, 闫军, 万里波, 等. 基于嵌入式计算机的雷达数字拖设设备检测仪 [J]. 兵工自动化, 2017, 36 (10): 24-28.
- [7] 吴永忠, 陈浩. 基于 ADuC842 的制冷剂气体检测仪设计 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (12): 64-66.
- [8] 邱长泉, 张艳溶, 袁延荣, 等. 基于总线仪器的飞行信号再现方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (11): 273-275.
- [9] 郝宇, 赵鹏, 张彦波. 一种新的便携式防空导弹模拟训练系统 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (11): 97-99.
- [10] 闵昆龙, 吴晓晔, 祁玉林, 等. 基于 LXI 总线的航空武器装备地面综合保障系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (11): 115-116.
- [5] 王建新, 隋美丽. LabWindows/CVI 虚拟仪器设计技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [6] 李可, 庞丽萍, 刘旺开, 等. 环境模拟舱体的建模仿真及控制方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33 (5): 535-538.
- [7] 邹伯敏. 自动控制理论 (第 3 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [8] Liu H, Xu J H. Research of Hybrid Fuzzy-PID Control Technology based on the Temperature and Humidity Control [A]. Proceedings of the 2008 International Symposium on Computational Intelligence and Design [C]. 2008.
- [9] 姚洪伟, 王浚, 歼击机环境控制系统控制性能分析 [J]. 中国工程科学, 2006, 8 (6): 44-47.
- [10] 张军, 张春莹, 朱熙, 等. 分段自适应 PID 控制器及其在航天产品真空热试验中的应用 [J]. 航天器环境工程, 2014, 31 (3): 283-286.
- [11] 杨政秋, 李响, 席隆, 基于 PID 的空间精密温控研究 [J]. 计算机技术与发展, 2014 (8): 143-145.
- [12] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真 (第 3 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [13] 崔玉萍. 一种基于时滞辨识的模糊 Smith 控制 [J]. 电光与控制, 2005 (4).
- [14] 刘桂香, 陈菊, 朱学峰, 等. 自适应修正 Smith 算法控制大时滞过程的仿真研究 [J]. 自动化技术与应用, 2008, 27 (10): 12-15.
- [15] 宋云霞, 朱学峰. 一种改进的自适应 Smith 预估控制系统 [J]. 测控技术, 2002 (8).