

# 高可靠性整流罩空调系统设计方案研究\*

刘雪飞<sup>1</sup>, 刘红<sup>1</sup>, 蒲亮<sup>1</sup>, 苏师师<sup>2</sup>, 王帅<sup>1</sup>, 闵晓霜<sup>1</sup>

(1.中国电子信息产业集团有限公司第六研究所,北京 102209; 2.中软信息系统工程有限公司,北京 102209)

**摘要:** 针对某发射场整流罩空调对设计参数温度、湿度、送风量的要求,调研了传统整流罩空调系统的实现方案,从信息安全、可靠性方面研究,提出了一种基于国产 PLC 的冗余整流罩空调自动控制系统。介绍了国产超御 PLC 组件的功能、冗余机组系统方案,并从硬件和软件两个方面对系统架构、控制方案等进行构建。通过现场实验调试,验证了该整流罩空调控制系统的可行性、稳定性,且具有安全、可靠等显著优点,解决了国产 PLC 在整流罩空调系统零应用的问题,是一种高可靠性整流罩空调系统设计方案。

**关键词:** 整流罩; 空调控制系统; PLC; 自主安全

中图分类号: TN108; TP273

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200550

中文引用格式: 刘雪飞, 刘红, 蒲亮, 等. 高可靠性整流罩空调系统设计方案研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(3): 31–35, 39.

英文引用格式: Liu Xuefei, Liu Hong, Kuai Liang, et al. Research on the design scheme of high reliability fairing air conditioning system[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(3): 31–35, 39.

## Research on the design scheme of high reliability fairing air conditioning system

Liu Xuefei<sup>1</sup>, Liu Hong<sup>1</sup>, Kuai Liang<sup>1</sup>, Su Shishi<sup>2</sup>, Wang Shuai<sup>1</sup>, Min Xiaoshuang<sup>1</sup>

(1. The 6th Research Institute of China Electronics Corporation, Beijing 102209, China;

2. CS&S Information System Engineering Co., Ltd., Beijing 102209, China)

**Abstract:** Aiming at the requirements of the design parameters temperature, humidity and air volume of the fairing air conditioner in a launch site, the implementation plan of the traditional fairing air conditioning system was investigated. In this paper, from the aspects of information security and reliability, a redundant automatic control system for air conditioning with fairing based on domestic PLC was proposed. In this regard, the article introduces the functions of domestic super Yu PLC components, redundant unit system scheme, and builds the system architecture and control scheme from the hardware and software aspects. Through on-site experimental debugging, the feasibility and stability of the fairing air conditioning control system are verified, and it has obvious advantages such as safety and reliability. It solves the problem of zero application of domestic PLC in the fairing air conditioning system and is a high reliability fairing air conditioning system design plan.

**Key words:** fairing; air-conditioning control system; PLC; independent safety

## 0 引言

整流罩空调系统任务就是要保证达到航天器、运载火箭测控系统等各种设备、仪器仪表在发射准备及发射时所要求的空气参数,否则卫星无法正常工作,使耗资巨大的卫星只能在太空中毫无意义地空转<sup>[1-2]</sup>。

传统整流罩空调控制系统核心设备可编程控制器(PLC)多以 Siemens<sup>[3]</sup>、Schneider<sup>[4]</sup>、Rockwell<sup>[5]</sup>、GE<sup>[6]</sup>、Mitsubishi<sup>[7-8]</sup>、Omron<sup>[9]</sup>等国外品牌占领,直接结果就是核心技术无法实现自主安全,存在较大安全隐患。

控制策略方面,现场的冗余方案是三台西门子机组互冗余,单台机组核心模块未冗余,功耗高、成本高、设备故障率高、可靠性低、机组复杂。

针对上述问题,结合提高可靠性的方案核心机组被控设备冗余<sup>[10]</sup>、核心控制设备 CPU 软冗余<sup>[11-13]</sup>,本文提出一种基于国产 PLC 的冗余整流罩空调自动控制系统。国产 PLC 采用基于国产软硬件平台、具有自主知识产权的超御 PLC 产品。控制策略方面,机组系统互为冗余,单台机组 CPU、核心被控设备冗余。

## 1 整流罩空调系统设计

整流罩空调系统包含新风进风段、初中效过滤段、前级蒸发(挡水)段、前电热段、转轮除湿段、进风机段、后级蒸发表冷(挡水)段、后电热调温段、电热式加湿段、送风机段等。

### 1.1 冗余机组方案设计

目前现场为了提高整流罩机组系统的可靠性,应用 3 套机组系统互冗余。3 套机组冗余控制方案如图 1 所示。

\* 基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0803502)

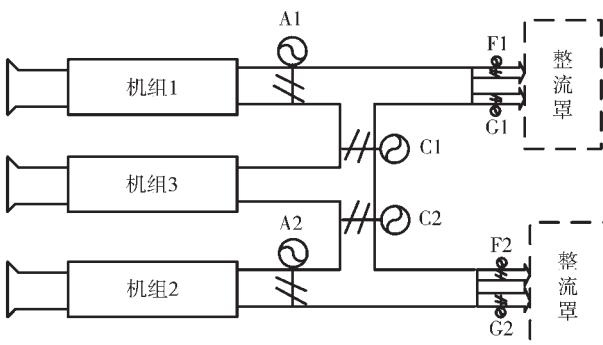


图 1 3 套机组冗余控制方案

3 套机组的工作程序：机组 1 和机组同时 3 启动，机组 1 将进风控制到用户设定状态，通过风阀 A1、G1 传输给整流罩。机组 3 将进风调整到用户设定状态，通过风阀 C2、G2 传输给整流罩。假设机组 1 出现故障，A1 阀关闭，C1 阀打开，C2 阀关闭，启动机组 2。此时，机组 3 处理后的风经 C1 和 G1 传输给整流罩，机组 2 将处理后的风经 A2 阀、G2 阀传输给整流罩。

3 套机组冗余方案需要电子设备、被控设备数量比较多。设备元件数量的增加会增加故障率，降低可靠性，增加费用投资。同时，设备运行数量越大耗电越大，这与节能设备指导方向相违背。

从节能性、可靠性、经济性方向研究，提出双备份机组冗余控制方案，如图 2 所示。

机组开机运行后，机组 1 先启动，新风和回风经过 A1 阀进组机组 1 控制系统，调节设定状态的风进过 C1、E1、G1 进入整流罩。机组 1 实时通过超御 PLC 站间通信功能，将机组 1 整定后的参数传递给机组 2。机组 2 一直处于待机状态，所有被控设备未运行，如果机组 1

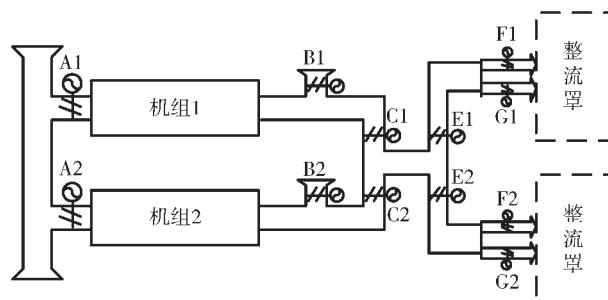


图 2 双备份机组冗余控制方案

发生故障，机组 2 按照机组 1 运行时的参数运行，机组 2 以最快的速度把新风处理到用户设定送风状态。

双备份冗余控制方案合理利用国产超御 PLC 站间的通信的功能，把控制系统的功耗降低 50%，并且大大减少了被控设备的数量，降低了故障率，提高了可靠性。

## 1.2 控制系统硬件设计

由文献[14]可知，电压的稳定性是整流罩空调系统正常工作的关键因素之一。本文在硬件设计方面着重介绍电源的可靠性设计。

### 1.2.1 220 V 供电设计

为了保证 PLC 的正常工作，抑制线路干扰，对于交流 AC220 V 供电的 PLC，在电源输入回路采取稳压措施。PLC 输入电源要与设备动力电源、交流控制回路电源、交流输出电源分离配线，并具有独立的保护回路。为了提高电源供电的可靠性，增设双电源配电柜。双电源切换装置 WATSGD500-4S 原理如图 3 所示。

### 1.2.2 24 V 供电设计

对于直流 DC24 V 供电的 PLC，采用稳压电源供电。PLC 输入电源要与设备直流动力电源、直流控制回路电

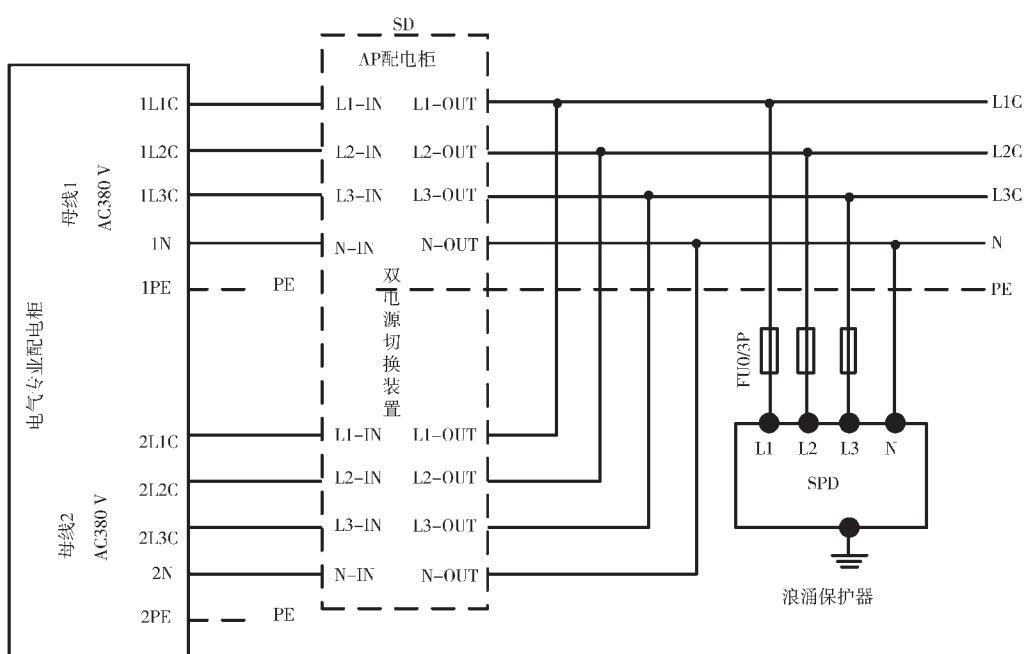


图 3 双电源切换装置原理图

源、直流输出电源分离配线，并具有独立的保护回路，在系统组成较复杂时，应使用独立的稳压电源单独对 PLC 供电。本系统采用双备份稳态电源供电，提高 PLC 核心组件的供电可靠性。24 V 供电原理图如图 4 所示。

### 1.3 控制系统软件设计

#### 1.3.1 控制系统组态

整流罩空调系统根据实际的参数量，依据被控设备的功能，分为核心设备和基础设备，其中，核心设备主要包括电加热加湿器、进风机、送风机、前后级压缩机、转轮除湿机、冷却风机、冷却水泵。基础设备为风阀执行器、前后级电加热、再生电加热<sup>[15]</sup>。

控制柜 CPU、PLC 卡件进行冗余，接入 I/O 单元耦合模块；通过 I/O 单元末端模块接入控制台 I/O 单元耦合模块；I/O 单元末端模块接入控制柜 CPU 单元，完成环网连接。PLC 控制系统硬件组态中，核心设备 PLC 组态如图 5 所示，基础设备 PLC 组态图如图 6 所示。

(1)NX2000，即冗余型 CPU 模块，实现 EtherCAT 主站功能，轮询 EtherCAT 从站数据，管理从站信息；与 SC-ProSys、SC-ProView 通过以太网完成配置的下装及诊断上报<sup>[16]</sup>。

(2)NE1002 通过双以太网电缆与两个冗余 CPU 模块进行连接，将控制信号经由背板传输给后端 I/O 及通信网关等模块。

(3)NT1000，即 32 路数字量数据采集模块，现场 32 通道数字量信号通过现场接线端子进入模块，通过光耦与现场隔离。

(4)NT2000 控制器通过背板总线将输出过程数据通过 EtherCAT 总线写入 NT2000，该数据控制 MOSFET 电子开关输出闭合或断开指令。

(5)NT3009 模块主要由两部分组成：模拟量采集电

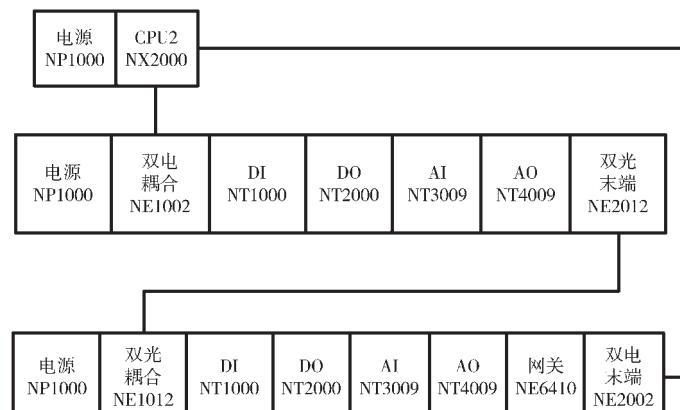


图 5 核心设备 PLC 组态

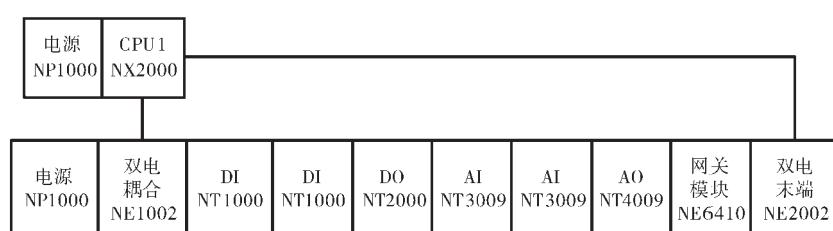


图 6 基础设备 PLC 组态图

路和数据处理电路。

(6)NT4009 模拟量输出模块 NT4009 实现 16 路 4~20 mA 电流信号输出，并具有限流保护电路。

(7)NE6410 实现 EtherCAT 总线协议和 Modbus-RTU 协议转换，具有 RS485 Modbus-RTU 总线接口。

(8)NE2002 支持 EtherCAT 协议，实现 EBUS 信号和 100BASE-TX 以太网信号的转换，无需执行参数化或组态任务，支持冗余。

(9)NE2012 双线光末端模块实现以太网的双光纤口扩展和双链路环网冗余功能，并将 EtherCAT 电缆的电气隔离长度增加至 20 km。

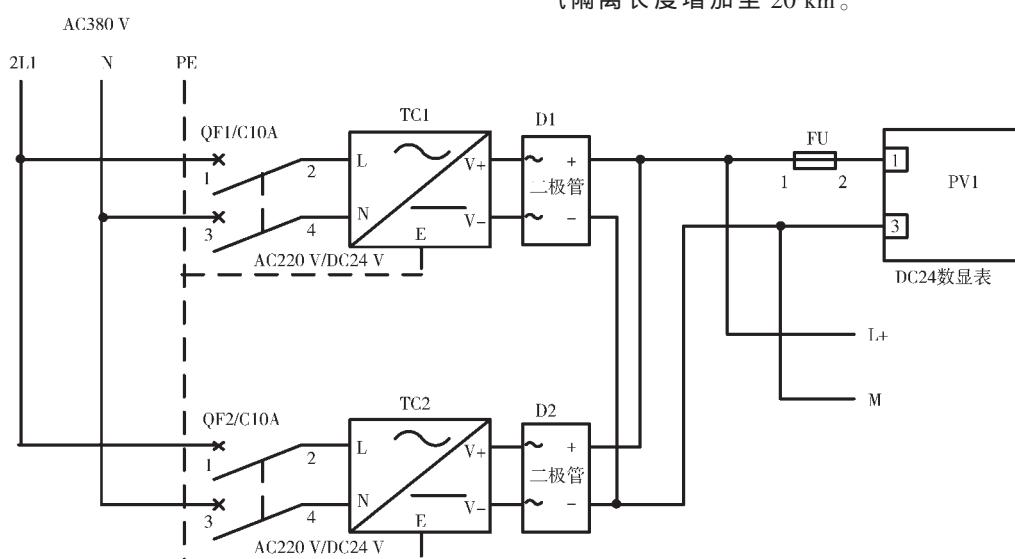


图 4 24 V 供电原理图

(10) NE1012 通过两路多模光纤分别与两个冗余型 CPU 进行连接，实现从站扩展。

### 1.3.2 系统网络热备双网

超御 N 系列 PLC 支持远程光纤通信，具有专有 EtherCAT 光纤耦合器模块，保证在远距离的条件下保持通信，实现远程控制功能。无需额外的光纤交换机，避免因交换机故障出现的控制问题。

本文空调系统网络采用工业以太网，提出高可靠性热备双网冗余结构，可以保证在任何一网络失效情况下，不影响系统网络层设备通信。系统网络拓扑结构如图 7 所示。

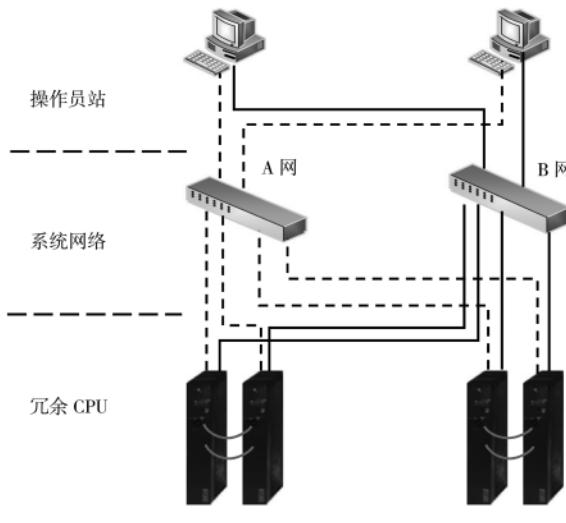


图 7 系统网络结构

## 2 控制方案

整流罩空调系统控制逻辑应用具有全自主知识产权的国产化、跨平台的 PLC 编程工具 SC-ProSys。

### 2.1 冬季工况

开机控制方案流程图如图 8 所示。

先关闭机组旁风阀，打开进风阀、送风阀和旁通阀。然后打开进风机、送风机。前后级电加热根据出风设定温度进行 PID 微调，满足出风温度要求。等系统运行半小时左右趋于稳定时，旁风阀打开，旁通阀关闭。空调系统正式投入保障任务。机组根据送风湿度给一个 4~20 mA 信号到加湿器，调节出风湿度。

关机时，先停止电加热和加湿器运行，延时 5 min 后关闭送风机，最后再关闭机组上所有风阀。冬季工况关机流程如图 9 所示。

### 2.2 夏季工况

夏季工况流程如图 10 所示。

先关闭机组旁风阀，打开进风阀、送风阀和旁通阀，然后打开前后级送风机。PLC 控制器基于 PID 整定前级压缩机投入比，控制前级蒸发后实际温度到露点温度。PLC 根据要求含湿量与实际含湿量，基于 PID 计算转轮的投入比、再生电加热投入比。

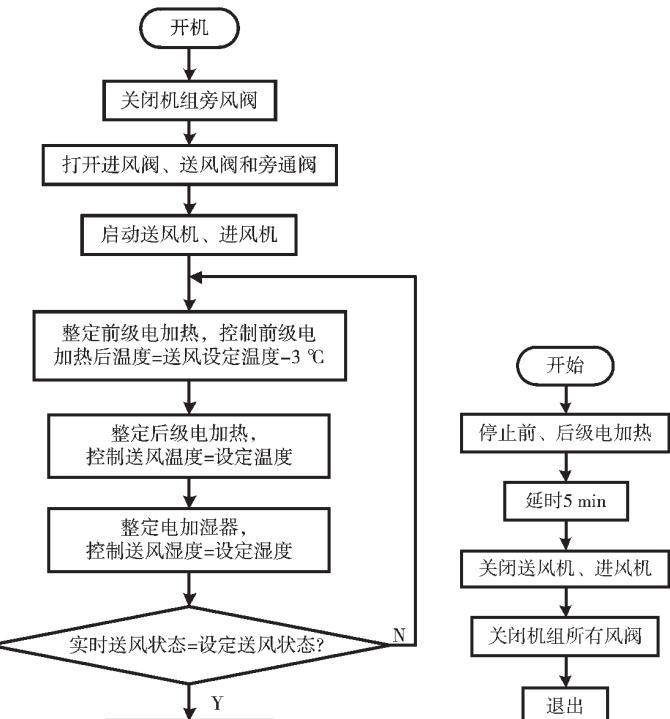


图 8 冬季工况控制方案

图 9 冬季工况  
关机流程图

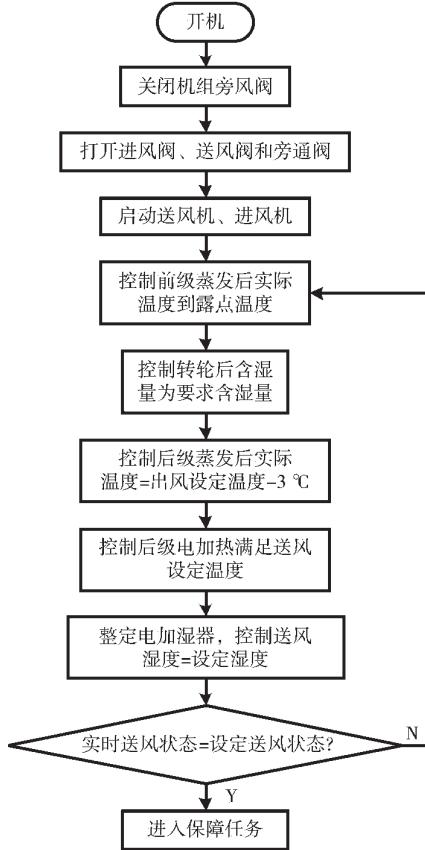


图 10 夏季工况控制方案

后级压缩机投入比按照后级蒸发后要求温度进行 PID 调节，满足蒸发后温度=出风设定温度-3 ℃。后级电

加热根据出风设定温度进行 PID 微调, 满足出风温度要求。

等系统运行半小时左右趋于稳定时, 旁风阀打开, 旁通阀关闭。空调系统正式投入使用保障任务。

关机时, 先停止所有压缩机和电加热运行, 延时 5 min 后关闭送风机, 最后再关闭机组上所有风阀。夏季工况关机流程如图 11 所示。

### 3 试验结果

机组设计完成后应用在某发射试验基地, 待机组运行稳定后, 应用超御 PLC 上位机软件 Proview 进行数据监控。

如图 12 所示, 控制点 1 是开机启动点, 经过 20 min 后机组 1 稳定, 到达点 2, 机组达到稳定状态。此时, 送风湿度曲线在用户设定送风湿度值 35% 上下浮动, 在误差 5%RH 范围内。送风温度实时监测值在设定值 10 ℃ 恒定, 误差为  $\pm 0.3$  ℃。

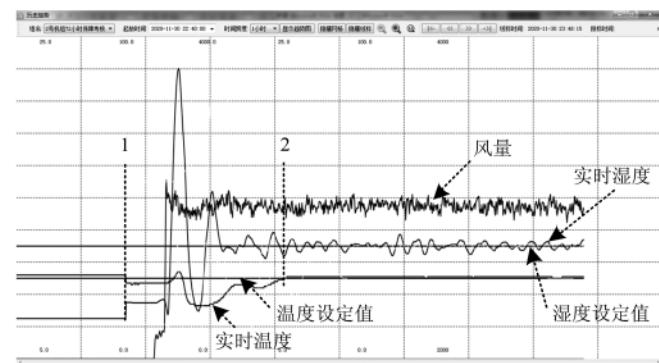


图 12 冗余系统开机启动曲线

依据用户的要求保障任务参数实时调节到控制点 3 的状态。控制点 3 到 4 阶段是送风温度设定值 17 ℃ 更改为 10 ℃ 的实时监控曲线。等到机组 1 运行稳定后, 进入控制点 4 阶段。假设运行到控制点 4, 机组 1 出现不可修复故障, 机组程序自动开启旁通阀 C2, 关闭旁风阀 B2, 机组 2 进入控制点 5 状态, 送风湿度还在浮动。经过 2 min 后机组 2 进入保障任务状态控制点 6, 将整定后的送风传输给整流罩。用户可以根据实际情况关闭机组 1。冗余系统整流罩空调机组切换曲线如图 13 所示。

由图 12 和图 13 试验可知, 机组 1 可以在 20 min 内将混合风调节到用户指定送风状态, 误差很小, 湿度在 5%RH 以内, 温度在 0.3 ℃ 内。在机组 1 出现不可修复故障后, 机组 2 可以接收机组 1 的参数, 对混合风进行调剂, 可在 10 min 内达到用户指定送风状态。风量在切

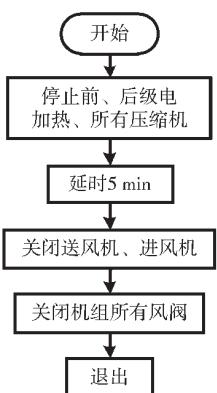


图 11 夏季工况关机流程图

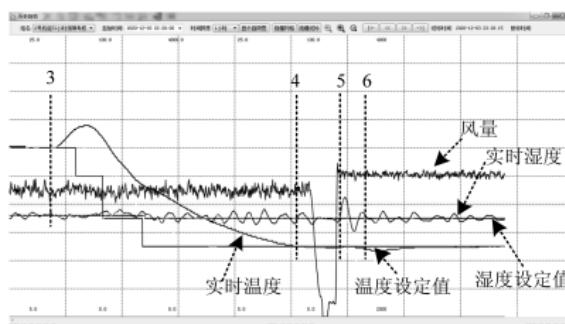


图 13 冗余系统机组切换曲线

换时由机组 1 的  $3\ 100\text{ m}^3/\text{h}$  浮动, 切换为机组 2 时, 风量在  $3\ 200\text{ m}^3/\text{h}$  浮动, 不影响正常保障任务。

### 4 结论

本文对国产超御 PLC、空气调节系统进行了研究, 设计了一种基于国产 PLC 的冗余整流罩空调自动控制系统。空调系统核心电源设备冗余、核心被控设备冗余、核心 PLC 组件冗余、通信网络冗余、机组双备份冗余, 采用中电六所全国产化自主可信 N 系列大型 PLC 产品, 具有高可靠性、高稳定性、低功耗等特点, 对从事工业自动化、空调技术研究和工作的人员有一定的参考价值。

### 参考文献

- [1] 程初. 模糊 PID 在火箭整流罩空调中的应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [2] 何健辉. 基于神经网络的整流罩空调系统传感器故障诊断[J]. 科技风, 2018(29): 151.
- [3] 王晓彬. 西门子 PLC 软件在中央空调节能设计中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2019(3): 48.
- [4] 宋慧欣. 施耐德电气 PLC: 诠释市场趋势[J]. 自动化博览, 2015(6): 42–43.
- [5] 姜德亮. 基于 PLC 的半导体洁净室空调控制系统的工作与应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [6] 海尔中央空调布局三大品牌[J]. 供热制冷, 2017(4): 74.
- [7] 三菱重工空调携手杭州九州智选假日酒店[J]. 机电信息, 2020(13): 8.
- [8] 殷小娣. 基于 PLC 的空调压缩机零件清洗线电气控制系统设计[J]. 湖北农机化, 2020(4): 165–166.
- [9] 张杰, 孙刚, 张阔. 基于色标检测在空调 U 管自动化生产的研究应用[J]. 机械工程与自动化, 2019(5): 169–171.
- [10] 李可成. 西门子 PLC 冗余技术在糖厂压榨自控系统的应用[J]. 轻工科技, 2020, 36(6): 73–75.
- [11] 刘丹. PLC 冗余系统在冰蓄冷中央空调中的应用[J]. 自动化技术与应用, 2011, 30(3): 77–80.
- [12] 张帆, 张隽爽. 冗余技术在 PLC 控制系统可靠性提高中的应用[J]. 价值工程, 2020, 39(11): 233–235.
- [13] 吴瑶. 探究 PLC 冗余技术在跨座式单轨交通道岔设备中的应用[J]. 时代汽车, 2020(3): 18–19.
- [14] 周钦, 张博舒. 空调电气故障分析与诊断[J]. 电子世界, (下转第 39 页)

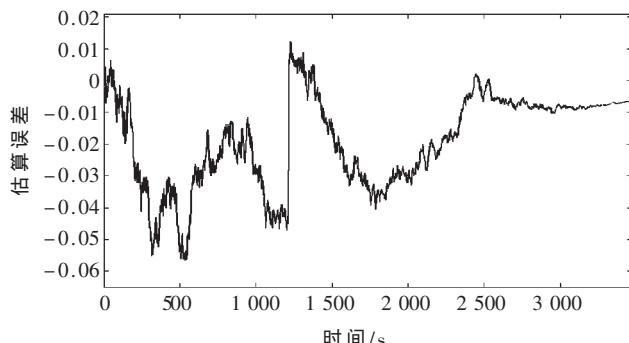


图 7 SOC 估算误差曲线

30%SOC 时, 估算误差显著降低。这验证了模型具有较高精度, 且可以显著抑制噪声。但此模型未考虑温度对电池 SOC 估算的影响, 同时改变电流大小对估算精度影响较大, 因此模型可以继续优化改进。

## 5 结论

本文利用二阶 RC 电路模型来捕获锂电池的电特性, 通过混合动力脉冲能力测试对电池参数进行辨识, 探索了电池 SOC 与开路电压、内阻之间的关系。在此基础上, 提出了一种基于扩展卡尔曼滤波算法(EKF)的 SOC 估算法。建立仿真模型并进行实验后, 验证表明模型的误差值在 2.1% 左右, 与一般的 SOC 估算法相比可明显提高精度。

## 参考文献

- [1] 孙立珍. 锂离子电池 SOC 估计方法研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2019.
- [2] 颜湘武, 郭玉威, 王雨薇, 等. 基于 GNL 模型自适应无迹卡尔曼滤波的电动汽车荷电状态估计[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(30): 94–100.
- [3] 王党树, 王新霞. 基于扩展卡尔曼滤波的锂电池 SOC 估算[J]. 电源技术, 2019, 43(9): 1458–1460.
- [4] 徐颖, 沈英. 基于改进卡尔曼滤波的电池 SOC 估算[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(6): 855–860.
- [5] 刘艳莉, 戴胜, 程泽, 等. 基于有限差分扩展卡尔曼滤波的锂离子电池 SOC 估计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 221–228.

(上接第 35 页)

- 2016(10): 152–157.
- [15] 古宇飞, 陈少将, 张利军, 等. 基于冷量阈值的整流罩空凋控制策略研究[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(10): 58–61.
- [16] 赵德政. 基于 MAC 的 PLC 双机冗余方法及系统[J]. 电子技术应用, 2017(8): 81–84.

- [6] 顾亚雄, 张友近. 基于双卡尔曼滤波的锂电池 SOC 估算[J]. 电源技术, 2016, 40(5): 986–989.
- [7] 刘胜永, 于跃, 李昊, 等. 基于无迹卡尔曼滤波的锂电池 SOC 估算方法研究[J]. 电源技术, 2018, 42(1): 40–42, 45.
- [8] 潘海鸿, 吕治强, 李君子, 等. 基于灰色扩展卡尔曼滤波的锂离子电池荷电状态估算[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 1–8.
- [9] 吴红杰, 齐铂金, 郑敏信, 等. 基于 Kalman 滤波的镍氢动力电池 SOC 估算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007(8): 945–948.
- [10] BESTER J E, HAJJAJI A E, MABWE A M. Modelling of Lithium-ion battery and SOC estimation using simple and extended discrete Kalman Filters for Aircraft energy management[C]. Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2015.
- [11] HAN K C, LIN Y H, LIU V T, et al. State of charge estimation of Lithium-Ion batteries by extended Kalman filtering[J]. Advanced Science Letters, 2012, 8: 332–336.
- [12] Zhang Lei, PAPAVASSILIOU C, Liu Sheng, et al. Intelligent computing for extended kalman filtering SOC algorithm of Lithium-Ion battery[J]. Wireless Personal Communications: An International Journal, 2018, 102(2): 2063–2076.
- [13] 彭凯. 基于改进 UKF 算法的锂离子电池 SOC 估计策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [14] 董俊松. 基于扩展卡尔曼滤波的单目标跟踪算法研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2019.
- [15] 莫易敏, 叶鹏, 骆聪, 等. 基于改进的双卡尔曼滤波的锂电池 SOC 估计[J]. 电源技术, 2020, 44(5): 732–735.

(收稿日期: 2020-07-02)

## 作者简介:

崔耕韬(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统与电力电子技术。

江卫华(1966-), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向: 电气测控自动化系统。

涂炜(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力电子与电机控制。

(收稿日期: 2020-06-24)

## 作者简介:

刘雪飞(1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 工业软件、自动化控制系统、嵌入式软件系统。

刘红(1986-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 工控信息安全、工业控制系统测试。

蒯亮(1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 计算机技术、指挥控制系统、嵌入式系统。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所