

# 周期控制律电加热控制系统设计与应用

冉林,熊建军,赵照,何苗

(中国空气动力研究与发展中心,四川 绵阳 621000)

**摘要:**针对飞机防除冰试验研究需求,设计了适用于大型结冰风洞的多功能电加热控制系统。通过可编程控制器(PLC)与上位机远程交互,实现控制律开环和主回路通断、连续调压闭环温度控制,以满足不同飞机型号电热防/除冰电源制式和控制模式的要求。针对反独热编码控制律任意性的特点,设计控制律程序,并进行了型号模型结冰风洞电热防冰试验,结果表明系统运行稳定性好、可靠性高,应用效果好。相关研究的开展可为电加热控制系统设计及研究提供参考依据。

**关键词:**大型结冰风洞;电加热控制系统;可编程控制器;上位机;反独热编码控制律;电热防冰  
**中图分类号:**TP23 **文献标识码:**A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd21276

## Design and Application of Electric Heating Control System with Periodic Control Law

RAN Lin, XIONG Jianjun, ZHAO Zhao, HE Miao

(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, Sichuan, China)

**Abstract:** For aircraft anti-icing and de-icing test research needs, a multi-functional electric heating control system for large icing wind tunnel was designed. Through the remote interaction between PLC and the master computer, the control law open loop, on/off, continuous voltage regulation and closed loop temperature control were realized, so as to meet the requirements of the electric heating anti-icing power system and control mode of different aircraft models. In view of the arbitrariness of the control law for anti-one-hot coding, the control law program was designed, and the electric anti-icing test was carried out on the type model of icing wind tunnel. The results show that the system has good running stability, high reliability and good application effect. The development of related research can provide reference for the design and research of electric heating control system.

**Key words:** large icing wind tunnel; electric heating control system; programmable logic controller(PLC); master computer; control law of anti-one-hot coding; electric anti-icing

飞机在含大量过冷水滴环境飞行时,机外部件撞击水滴聚积成冰层于表面,致使气动性能下降,且有相关研究结果表明,即使结冰量相当小,若出现在关键器件,也会引发安全事故<sup>[1]</sup>。因此,飞机易结冰部件必须采取防除冰措施,避免发生结冰现象<sup>[2]</sup>。

目前常用的防/除冰的手段有热气防冰、电热防/除冰、机械除冰<sup>[3-4]</sup>等,其中电热防/除冰技术通常采用周期性的工作方式,进行一定时间规律地加热,使表面温度高于零点,防止表面结冰,或破坏表面冰层,靠气动外力除冰<sup>[5]</sup>,具有能耗低、易控制的优点,且成熟度较高。文献[6]研究了电热除冰系统加热周期控制律对表面温度的影响,计

算得到两者的关系,表明合理的供电周期有益于除冰效果。文献[7]研究了飞行过程中电热防/除冰系统瞬态除冰的优化应用,通过改善热能空间分布和周期控制律,实现能耗降低。文献[8]对旋转帽罩周期性加热过程数值进行计算,对比连续加热方式,得到同功同耗的效果。文献[9]通过试验研究了复合材料部件电加热防冰性能。以上研究都只是概述了电加热控制系统,为其提供任意周期控制律,未对控制系统本身进行讨论,文献[10-11]则设计了电加热控制系统,可是周期控制律的设定较为固定,主要针对连续性周期电加热,而且都未用于大型结冰风洞,不能满足真实机型的电热防/除冰试验要求。

**作者简介:**冉林(1994—),男,硕士研究生,助理工程师,Email:467454843@qq.com

**通讯作者:**熊建军(1971—),男,硕士研究生,高级工程师,Email:173982434@qq.com

本文结合上述问题以及应用环境,设计了适用于大型结冰风洞<sup>[12]</sup>防除冰试验的电加热控制系统,配备与机载使用相符的DC 28 V,DC 270 V,AC 115 V电源<sup>[13]</sup>,上位机与PLC通过工业以太网连接,实时监控运行,具备温度开、闭环控制模式,适合不同应用场合。设计任意性周期控制律程序,以满足试验任务要求,自动进行周期性电加热。系统最大单位面积加热功率可达到3 W/cm<sup>2</sup>,温度控制精度 $\leq \pm 1$  °C。最后,通过某型号飞机桨毂罩模型结冰风洞电热防冰试验验证了系统的工作性能。

## 1 电加热控制系统

### 1.1 控制系统网络结构

结冰风洞电加热控制系统是以工业设备控制器西门子S7-400系列PLC为核心,与运行管理设备PC机通过PROFINET协议接入工业以太网进行交互,增加扩展模块通过DP-MODBUS转换器连接支持MODBUS协议的程控电源、温度巡检仪,实现模拟飞机电热防除冰功能,控制系统结构如图1所示。

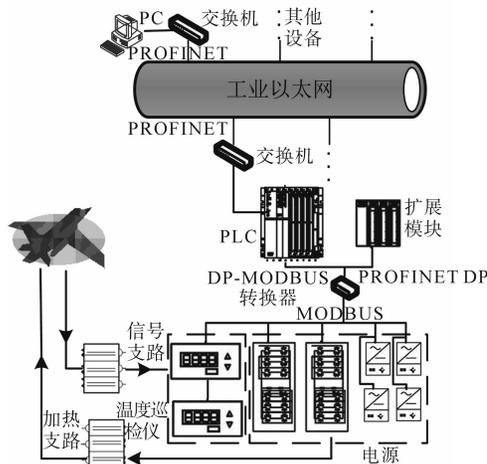


图1 电加热控制系统结构

Fig.1 The structure of electric heating control system

控制系统采用分布式网络结构,结构层次至上而下可划分为运行管理层、电气驱动层、设备执行层,各层相互独立。其中运行管理层包括PC机、触摸屏以及内部的软件,向下发送相关指令给驱动层控制电源运作,并接收来自执行层的上行测量数据实时显示设备运行状态;电气驱动层则由PLC、扩展模块组成,负责处理运行管理层的指令信息和执行层的测量信息,分别输出给设备执行层和运行管理层;底层的设备执行层是指

DC 28 V,DC 270 V,AC 115 V等程控电源、温度巡检仪及其他测量器件,用以输出电压及相关数据采集,再与模型对接构成完整的电热防/除冰模拟体系。

### 1.2 支路控制原理

电加热控制系统电源输出由3种程控电源提供,采用冗余性设计方法,单台大容量电源带10条工作支路,满足单支路大容量和多支路小容量电加热,通讯实现有限范围内无级调压,直流稳压精度可达 $\pm 1\%$  F.S,交流可达 $\pm 0.5\%$  F.S。在电路设计上,工作支路均受断路器保护,电流互感器反馈支路电流,选用无触点型固态继电器通断主回路,开/关响应时间 $\leq 0.01$  s,支路控制原理框图如图2所示。

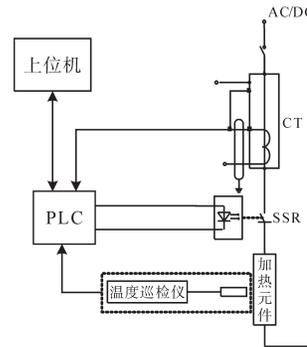


图2 支路控制原理框图

Fig.2 The block diagram of branch control principle

系统工作时,根据实际使用情况,由上位机发出相关控制命令,PLC接收后运算处理,与程控电源通讯调节输出电压,开关量模块输出控制信号,控制主回路固态继电器通断,从而控制电加热回路导通或关断。

开环控制模式时,系统控制主回路固态继电器按照控制律通断进行加热;另外闭环控制模式时,还需反馈温度信号,由温度传感器采集温度量值,送至温度巡检仪处理后,传回PLC形成温度闭环控制,可实现主回路通断控制,保持电源电压不变,继电器通断主回路来调控温度,以及调压控制,保持主回路导通,调节电源电压来调控温度。

## 2 系统软件设计

电加热控制系统软件设计主要包括上位机界面设计和PLC控制程序设计,上位机监视设备状态、发送指令、存储数据及实现电热控制律,PLC控制设备运作、处理数据、逻辑判断及暂存数据。对于整个系统而言,两者承上启下,数据传输通过通讯协议上传下达、协同工作达到电热防/

除冰的应用需求。

### 2.1 主程序控制流程

主程序控制主要包括如下几个方面:上位机与PLC程序初始化、相关控制参数设置、上位机触发信号及PLC接收后驱动底层设备工作,具体主程序控制流程如图3所示,其中,控制律控制主要依靠于开环模式,由外部控制器或附属子系统提供,而闭环模式还包括主回路通断和调压两种方式,需要设置工作方式。

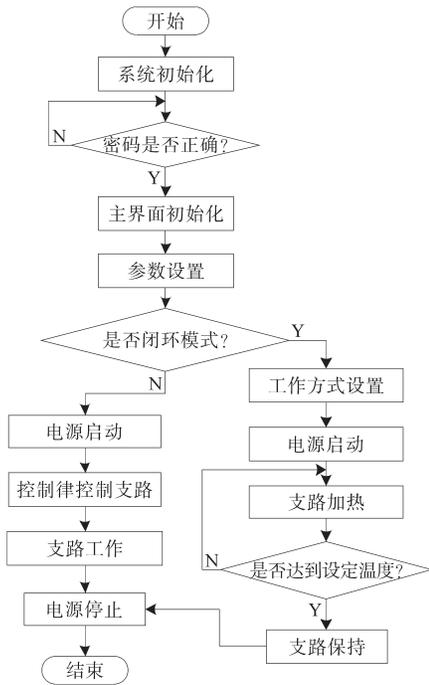


图3 主程序控制流程图

Fig.3 The flow chart of main program control

### 2.2 界面设计及数据通讯

系统界面应用LabVIEW图形化编程软件编写,其显示内容可反映出整个系统运行状态,如系统的通讯状况、当前的工作模式等,还包含按钮触发控件实现参数设置、AC 115 V电源、DC 28 V电源、DC 270 V电源、报警事件等其他8个子界面切换,再在子界面中配置符合试验要求的供电电源。人机界面(human machine interaction, HMI)具体可实现的功能如图4所示。

由系统结构可知,上位机与PLC通过工业以太网进行远程交互,而实质传输数据则依靠OPC技术。利用NI的OPC Servers组件建立OPC服务器,针对PLC的网络地址选择性访问内部设定的数据块信息,再在LabVIEW程序中建立OPC客户端,创建变量绑定OPC对象构成共享变量,上位机便可直接读、写PLC的数据寄存器。因此,应

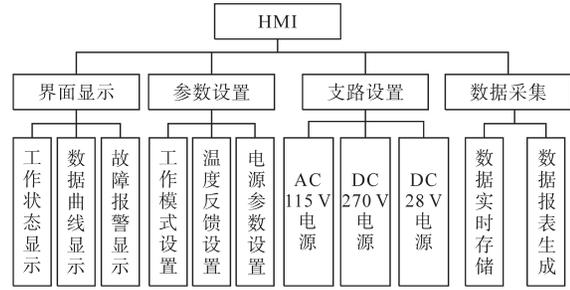


图4 HMI功能结构图

Fig.4 The functional structure diagram of the HMI

用OPC将系统运行状态组合成许多共享变量,经程序拆分在人机界面上显示,但是控制的关联开关量较多,若批量单独处理程序会较为复杂,于是设计 Bool Impulse Command.vi, Float Set Command.vi 等子程序与OPC中绑定的PLC控制开关量及相关参数等控制变量进行匹配,通过Datasocket函数链接控制变量的URL从而控制开关量的输出以及参数设置。

### 2.3 电热控制律程序

电热控制律是周期性电热防/除冰的关键,合理的配置可节省能耗、提升防/除冰性能,实质上是指主回路工作的时间规律,根据支路控制原理可知,即为控制继电器通断的占空比规律。

本文所给的控制律是附属于子系统,在上位机或PLC中设计控制律程序,但PLC的程序修改后需要重载不利于后续优化。因此提出基于上位机的控制律程序,应用延时函数与利用While结构的移位寄存器、条件结构和枚举控件实现的状态机配合,在枚举控件中设置与控制律相一致的状态数量,移位寄存器循环暂存当前运行状态并赋值给条件结构,再在条件结构内使用延时函数保持控制律状态输出,同时触发状态控件的值(信号)属性节点以调用主程序的开关量处理事件子程序,经OPC传输开关量值给PLC,从而控制继电器按预先设计的规律通断,以满足任意性控制律的设计要求,程序如图5所示。

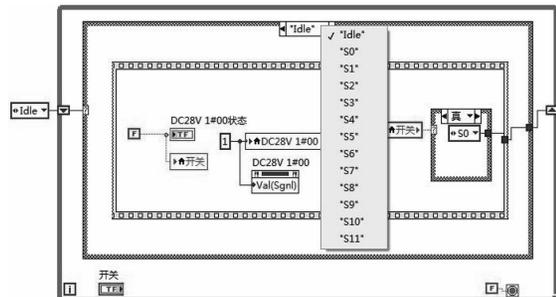


图5 电热控制律程序

Fig.5 The program of the electric heating control law

### 3 结冰风洞电热防冰试验验证

此次结冰风洞电热防冰试验以某型号飞机桨毂罩模型为对象,选用了两种控制律来验证桨毂罩前端电热防冰的有效性。控制律(一)是52 s四等分反独热编码形式通断,相互再间隔67 s断开状态,如表1所示,“0”表示主回路断开状态,“1”表示主回路导通状态,按序号顺序执行,整个周期时长为476 s,而且4个序号周期的通断规律都不一致,呈现任意性;控制律(二)则是连续性通断各25 s,周期时长为50 s。

表1 控制律(一)

Tab.1 Control law(one)

序号	时间/s				
	13	13	13	13	67
①	1	0	1	1	0
②	0	1	1	1	0
③	1	1	1	0	0
④	1	1	0	1	0

按照试验要求,设置电热控制律程序时序,选用开环控制模式工作,提供AC 115 V,400 Hz 电源。试验对象的电加热元件阻值为15 Ω,接入系统AC 115 V电源某一支路,可得主回路电流理论值约7.67 A,1 s采集一次电流值,得到控制律(一)、控制律(二)电流变化如图6、图7所示。

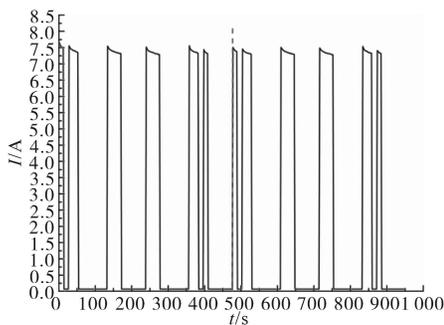


图6 控制律(一)电流变化

Fig.6 Current change with the control law (one)

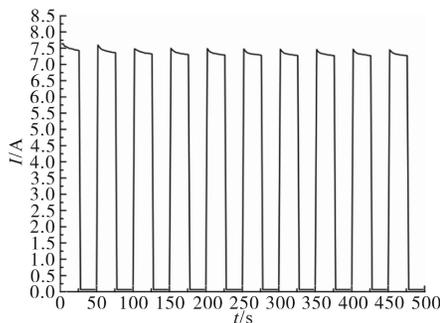


图7 控制律(二)电流变化

Fig.7 Current change with the control law (two)

图6为2个周期的控制律(一)电流变化,图7为10个周期的控制律(二)电流变化,可见连续周

期电流变化图形与所给的控制律相符,基于上位机的控制律控制支路实现周期性加热是可行的,且满足多控制律需求。

在弧面圆锥形桨毂罩表面13个点位布置了热电偶,以 $P_4$ 为中心成“十”字型,如图8所示。

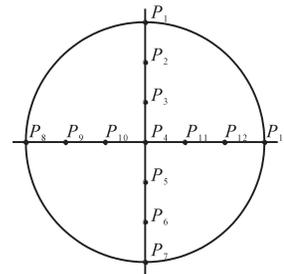


图8 桨毂罩表面热电偶布置

Fig.8 Thermocouple arrangement on propeller hub surface

试验模拟了桨毂罩穿越易结冰环境的过程,采集了不同控制律桨毂罩表面温度变化,如图9、图10所示。

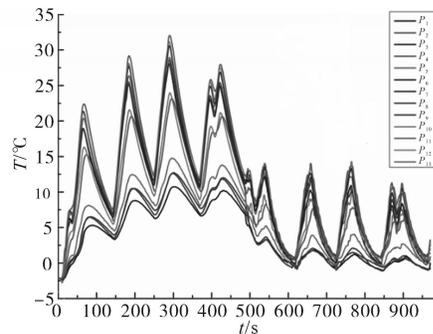


图9 控制律(一)桨毂罩表面温度变化

Fig.9 Temperature change of propeller hub surface with control law (one)

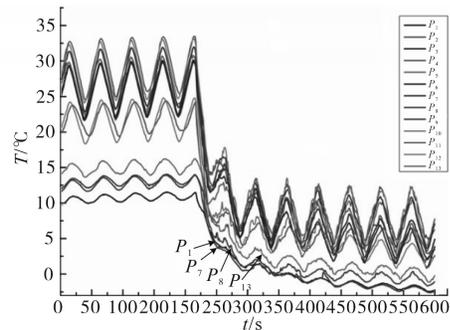


图10 控制律(二)桨毂罩表面温度变化

Fig.10 Temperature change of propeller hub surface with control law (two)

图9中0~450 s左右时无喷雾的温度变化,主要靠空气流动进行换热,13个点位温度变化与图7的控制律(一)1个周期的电流变化相符,在第1个和第4个波出现了双峰,而到达450~520 s,13个点位温度都下降,风洞进行喷雾模拟云雾环

境,大量过冷水滴撞击其表面,促进热交换,但后续的温度变化仍与电流变化相符。同理,图10所示的温度变化也是与控制律(二)的电流变化一致。在喷雾过程中,根据点位布置情况,发现4个边缘点位 $P_1, P_7, P_8, P_{13}$ 温度接近零度,其他点位均高于零度,桨毂罩表面大面积区域是未结冰的,达到了预期的防冰效果。因此,该电加热控制系统符合大型结冰风洞电热除冰试验的应用要求。

### 4 结论

电加热控制系统采用分布式网络结构,通过PC机与PLC远程互联,实现控制信号传输网络化、数字化,可任意控制律开环和主回路通断、连续调压闭环温度控制,同时具有实时显示、数据采集及存储功能,提升了控制系统的自动化水平。

设计了任意性控制律程序,应用于型号模型结冰风洞电热防冰试验,分析试验过程中两种控制律的回路电流变化和模型表面温度变化,比较电流与温度的变化趋势,结果表明系统具备多控制律的调控能力,且运行稳定可靠,符合结冰风洞电热防除冰试验要求。

#### 参考文献

[1] 林贵平,卜雪琴,申晓斌,等.飞机结冰与防冰技术[M].北京:航空工业出版社,2016.

[2] 张序. 积冰对飞行的影响及处置[J]. 西安航空学院学报, 2011,29(3):19-23.

[3] 朱春玲,朱程香. 飞机结冰及其防护[M]. 北京:科学出版社, 2016.

[4] 高郭池,李保良,丁丽,等. 气动除冰飞机结冰风洞实验技术[J]. 试验流体力学,2019,33(2):95-101.

[5] 胡琪,黄安平,孙涛,等. 机翼防/除冰技术研究进展[J]. 科技导报,2015,33(7):114-119.

[6] 常士楠,候雅琴,袁修干. 周期电加热控制律对除冰表面温度的影响[J]. 航空动力学报,2007,22(8):1247-1251.

[7] Pourbagian M, Habashi WG. Aero-thermal optimization of in-flight electro-thermal ice protection systems in transient de-icing mode[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2015, 54:167-182.

[8] 杨诗雨,常士楠,高艳欣,等. 旋转罩电加热防冰瞬态过程研究[J]. 空气动力学报,2016,34(3):289-294.

[9] 马辉,张大林,孟繁鑫,等. 复合材料部件电加热防冰性能试验[J]. 航空学报,2013,34(8):1847-1853.

[10] 陶茂升,常士楠,杨诗雨,等. 基于LabVIEW的电热防除冰温控系统设计[J]. 测控技术,2017,36(3):111-114.

[11] 锁俊睿. 防除冰桨叶加热及温度控制系统设计[D]. 南京:南京航空航天大学. 2014.

[12] 易贤,王斌,李伟斌,等. 飞机结冰冰形测量方法研究进展[J]. 航空学报,2017,38(2):1-12.

[13] 吴斌,於二军,腾国飞,等. 飞机机翼电热除冰控制系统设计[J]. 山西电子技术,2018(2):21-23,26.

[1] 林贵平,卜雪琴,申晓斌,等. 飞机结冰与防冰技术[M]. 北京:航空工业出版社,2016.

[2] 武伟. 高频逆变电源并联控制策略的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2009.

[3] Zhong Q C, Weiss G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4):1259-1267.

[4] 吴恒. 虚拟同步发电机功率环的建模与参数设计[J]. 中国电机工程学报,2015,35(24):6508-6518.

[5] 张波,颜湘武,黄毅斌,等. 虚拟同步机多机并联稳定控制及其惯量匹配方法[J]. 电工技术学报,2017,32(10):42-52.

[6] 杜威,姜齐荣,陈蛟瑞. 微电网电源的虚拟惯性频率控制策略[J]. 电力系统自动化,2011,35(23):26-31.

[7] Alipoor J, Miura Y, Ise T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2):451-458.

[8] 潘逸崑. 电力牵引机车用同相供电控制系统研究[D]. 北京:北方工业大学,2013.

(上接第32页)

[9] Hirase Y, Sugimoto K, Sakimoto K, et al. Analysis of resonance in microgrids and effects of system frequency stabilization using a virtual synchronous generator[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4):1287-1298.

[10] Jia L, Miura Y, Ise T. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(5):3600-3611.

[11] 任碧莹,邱姣姣,刘欢. 基于虚拟同步发电机双机并联系统的参数自调节优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1):132-142.

[12] 宋琼,张辉,孙凯. 多微源独立微网中虚拟同步发电机的改进型转动惯量自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2):412-423.

[13] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京:科学出版社,2007.

收稿日期:2019-12-19  
修改稿日期:2020-01-11

收稿日期:2019-07-02  
修改稿日期:2019-08-26