

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108975

面向跑道积冰预警的自主降温装置及性能调控*

陈 斌^{1,2}, 汤凯峰^{1,2}, 高大桷^{1,2}, 焦琳青^{1,2}, 王立文²

(1. 中国民航大学电子信息与自动化学院 天津 300300; 2. 中国民航大学航空地面特种设备研究基地 天津 300300)

摘 要:针对跑道积冰问题,设计以热电制冷器为核心的自主降温装置实现积冰主动预警。数值分析表明装置冷端受跑道小范围气象环境影响,具备非线性特性。为实现装置温度快速响应和精准跟随,提出双回路自抗扰控制(ADRC)方法,设计了面向跑道积冰预警需求的自主降温控制器。仿真结果表明 ADRC 温控跟随及抗扰性能均优于非线性 PID,均方根误差分别为 0.654 1 和 1.152 6。低温实验箱温控性能测试显示,装置在不同的温控指令下 ADRC 的稳态误差均小于非线性 PID,最高为 0.04℃。跑道环境下的冰点探测实验表明,装置能够实现跑道冰点探寻功能。该自主降温装置温控性能调控策略满足跑道积冰主动预警之需求。

关键词:热电制冷器;自主降温;精准温控;非线性系统;自抗扰控制

中图分类号: TH39 V328.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8030

Autonomous cooling device and performance control for icing early warning on runway

Chen Bin^{1,2}, Tang Kaifeng^{1,2}, Gao Darui^{1,2}, Jiao Linqing^{1,2}, Wang Liwen²

(1. Institute of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Research Base of Aviation Ground Special Equipment, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The runway has the problem of ice accumulation. To address this issue, an autonomous cooling device with a thermoelectric cooler as the core is designed to achieve active ice accumulation warning. Numerical analysis shows that the cold end of the device is affected by the small-scale meteorological environment of the runway and has non-linear characteristics. To realize the fast response and accurate following of the device temperature, a dual-loop active disturbance rejection control (ADRC) method is proposed to design an autonomous cooling controller for runway ice accumulation warning. Simulation results show that ADRC temperature control following and immunity performance are better than the nonlinear PID. The RMSE values are 0.654 1 and 1.152 6, respectively. Low-temperature experimental chamber temperature control performance test shows that the steady-state error of ADRC under different temperature control instructions is less than the nonlinear PID, and the highest is 0.04℃. The freezing point detection experiment under runway environment shows that the device can realize the runway freezing point detection function. The temperature control performance regulation strategy of this autonomous cooling device meets the demand of active warning of runway ice accumulation.

Keywords: thermoelectric cooler; autonomous cooling; accurate temperature control; non-linear system; ADRC

0 引 言

据中国民航局《2019 年民航行业发展统计公报》统计^[1],截至 2019 年底,我国共有颁证运输机场 238 个,机场及航班数量仍处于加速增长的阶段,旅客运输量及航班起降密度持续增强。据 ICAO 安全报告统计,在全部

通航事故中跑道事故占 53%,可见跑道安全保障能力及运行效率亟需提高^[2]。寒冷天气下,跑道积冰及降雨/雪是影响跑道运行安全的重要因素之一,除冰雪后二次积冰安全隐患更甚。2019 年 1 月,美国一架航班在前次航班报告“刹车效应好”后因地面“黑冰”滑出跑道。同年 2 月,新疆 5 个机场因跑道道面积冰,不够起降标准关闭跑道^[3]。冬季冰雪天气给航班正常运行带来安全隐患,也

收稿日期:2021-12-02 Received Date: 2021-12-02

* 基金项目:国家自然科学基金-民航联合研究基金(U1933107)项目资助

是航班延误、备降或取消的重要诱因。因此借助有效的冰情预警方法是提高航班安全裕度和保障效率的有效手段,有助于减少跑道积冰导致的安全隐患。

鉴于此,许多学者从积冰预测和检测角度对跑道积冰进行预警。针对积冰预测问题主要研究方法有基于机器学习的数据建模和基于气象因子大气学原理的机理建模。Li^[4]利用历史积冰数据进行学习分类,建立道面积冰厚度预测模型。Ryerson等^[5]基于路面信息自动化观测系统收集的气象数据,使用地面观测系统(ASOS)开发的新算法建立了路面结冰厚度预测模型,实现了冻雨和雨淞条件下结冰厚度预测分析。基于机器学习的数据建模方法对气候、地区差异大的情况模型普适性不强。机理建模方面,Yamaguchi^[6]提出的地面结构大气结冰模型主要包括大气冰雪对水滴的捕获率、粘附率、迎风面积和风速等参数,基于传热传质守恒原理建立地面物体大气积冰机理模型。Makkonen^[7]研究了明冰和湿雪时的过冷水滴在圆形几何物体表面的撞击特性,对几种冰的增长模型利用数值方法建立预测模型,但该模型参数复杂,不易获取。针对积冰检测问题研究,主要利用基于力学、光学的道面积冰传感器,Gong等^[8]将道路状态进行分类,利用红外偏振技术进行检测,但此非接触检测方法对“黑冰”等污染物复杂情况无法识别,且容易受到雾天或雨天的影响。Hoshino等^[9]针对跑道受冰雪污染问题,在地面嵌入监测冰和雪的激光传感器,通过光散射和人工智能技术来识别冰雪的类型和厚度,面对扰动检测精度不足。上述积冰检测手段属于被动的、事后预测方式,没有提前预知道面积冰的能力,为民航运输提供不了充足的保障业务。基于上述研究的不足,设计和开发了一种以热电制冷器(thermoelectric cooler, TEC)为核心的跑道嵌入式自主降温装置,借助道面温度未来演变趋势,装置进行自主降温实现对跑道小范围气象条件和积冰情况的超前模拟,同时借助传感器实时检测积冰,从而达到积冰主动预警目的。

跑道积冰自主降温装置降温控制难点一是装置热端散热受限影响TEC的优值系数、制冷效率等系数^[10-13],从而导致模型参数时变;装置在跑道运行时受到降雨/雪、风速和装置表面除冰液等介质变化,导致装置温控受到外界扰动等不利因素。二是根据积冰主动预警需求需要该装置表面温度精准跟随和快速响应。针对此种控制需求,部分学者利用自适应控制、反步控制、模糊控制或多组合控制等进行研究^[14-16]。考虑模型属性及使用场景的非线性强扰动等问题,韩京清等在PID控制基础上提出了自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)方法^[17-18],分析了其应用环境及理论框架。武利强等^[19]将ADRC引入具有单入双出变量耦合特点的直线倒立摆系统中,证明了自抗扰控制应用于复杂系统的优越性。Chen等^[20]在化工控设备中引入线性ADRC,

针对过程中的扰动及模型参数未知情况,验证了线性ADRC方法对模型参数不明晰对象的控制性能。近年来,ADRC应用于电液比例伺服力加载系统^[21]、无人机姿态控制^[22]及水下无人航行器^[23]等各类控制系统,成为非线性控制系统研究热点之一。

本文引入自抗扰控制方法,将系统中的内、外扰动归结为“总扰动”,利用扩张状态观测器进行估计并进行实时补偿,在上述思路基础上对自主降温装置进行实验验证。实施自主降温精准调控、冰点主动探寻方法,实现积冰预警功能,为积冰预警时效性和准确性的提升奠定基础,有助于跑道积冰保障高效化和集约化。

1 自主降温装置设计原理

自主降温方法的核心功能由半导体制冷器件(TEC)实现。TEC元件将N型半导体和P型半导体用导体连接并接直流电源,TEC制冷基于冷热端温差实现升降温^[24]。若使冷端达到较低的制冷温度,需对热端产生的热量进行有效散热。因此为实现自主降温装置冷端制冷目标,需为热端添加散热手段,对热端积累的热量进行有效散发。考虑跑道环境因素,设计了基于TEC元件的自主降温实物装置,应用示意图和基本结构示意图如图1所示,实物装置实验系统介绍如图2所示。

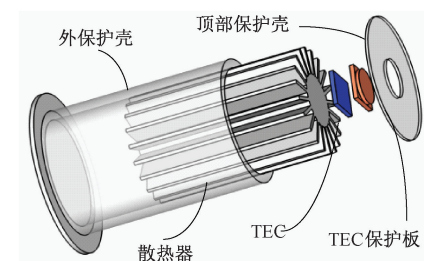
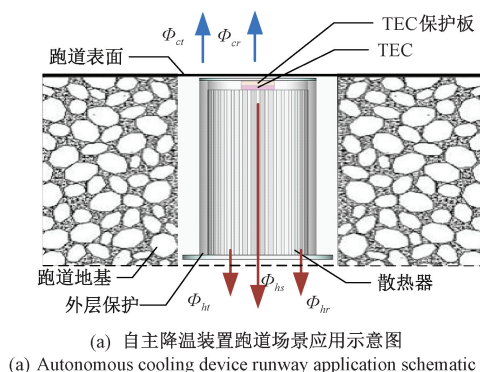


图1 自主降温装置应用示意图

Fig. 1 Autonomous cooling device application schematic

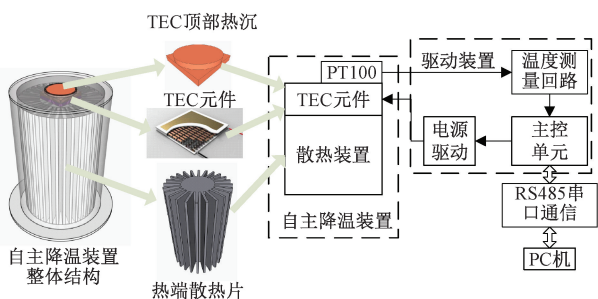


图2 自主降温装置实验系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the experimental system of the autonomous cooling device

自主降温装置实际应用时,将其设置于机场跑道内部且不影响航班正常起降的区域内,当外界气象因素满足积冰或即将达到积冰条件时,装置进行主动降温动作,提前模拟出未来短时间后的道面温度。若装置表面的温度低于空气的露点温度或低于积水的冰点温度,空气中的水蒸气或积水在装置表面凝结或结冰,借助积冰检测手段进行积冰信息反馈,实现积冰预警功能。

2 自主降温装置建模及分析

2.1 自主降温装置建模

1) 冷端数值模型

位于装置上表面的冷端直接与大气环境接触,因此主要存在对流传热及辐射传热。冷端表面换热示意图如图3所示。

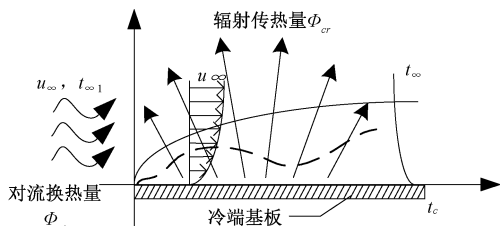


图3 冷端表面换热示意图

Fig.3 Schematic diagram of surface heat exchange at the cold end

冷端制冷功率 Φ_c 公式如下^[25-26]:

$$\Phi_c = -\alpha t_c I + \frac{1}{2} I^2 R + K_T (t_h - t_c) -$$

$$hA(t_c - t_{air}) - A\epsilon\sigma(t_c^4 - t_{air}^4) \quad (1)$$

其中,公式等号右端第1项为帕尔贴效应产生的热量, α 为塞贝克系数, I 为流经TEC的电流,A;第2项为焦耳热,冷热端各占一半, R 为TEC内阻;第3项为傅里

叶效应产生的热量, K_T 为TEC总热导系数, t_c 、 t_h 分别为TEC的冷热端温度,K;第4项为冷端表面对流换热热量 Φ_{ct} , h 为对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;A为与流体的接触面积, m^2 ; t_{air} 为大气环境温度;第5项为装置表面以辐射形式发生的热量传递,即辐射传热 Φ_{cr} , ϵ 为装置表面辐射率, σ 表示玻尔兹曼常数。

根据能量平衡方程,建立冷端温度功率转换公式如下:

$$\Phi_c = (c_L M_L + c_C M_C) \Delta t_c \quad (2)$$

其中, c_L 、 M_L 分别为冷端基板的比热容及质量; c_C 、 M_C 分别为冷端结点上物质的比热容及质量; Δt_c 为冷端温度变化量。

2) 热端数值模型

散热器单肋片如图4所示,设肋片高为 l ,宽为 L ,厚为 δ ;单肋片的截面积为 A_L ($A_L = l \times \delta$);散热片单片肋片外表面积为 A_H ($A_H = L \times \delta$);肋片的周边长度为 U ($U = 2(L + \delta)$);肋基处过余温度为 θ_0 ($\theta_0 = t_h - t_{soil}$),其中 t_{soil} 为跑道地基温度。

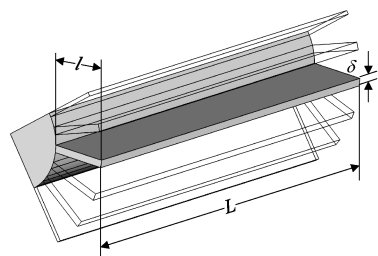


图4 散热器单肋片示意图

Fig.4 Heat sink single rib diagram

单肋片散热功率^[27]:

$$\Phi_{hs} = \lambda A_L m T_a \tanh \left[m \left(l + \frac{\delta}{2} \right) \right] \quad (3)$$

其中, λ 为散热片的导热系数, $W/(m \cdot K)$; T_a 为肋片整体平均温度,并考虑温度为双曲分布特性,则 $T_a =$

$$\frac{t_h \int_0^l \frac{1}{\cosh(mx)} dx}{l} = t_h \frac{\frac{2}{m} \arctan e^{mx} \Big|_0^l}{l}; \text{ 令式中系数 } m =$$

$$\sqrt{\frac{h_{hs} U}{\lambda L \delta}} = \sqrt{\frac{2h_{hs}(L + \delta)}{\lambda L \delta}} \approx \sqrt{\frac{2h_{hs}}{\lambda \delta}}, h_{hs} \text{ 为散热器的传热系数。}$$

同时考虑铝片最外围与外层热辐射 Φ_{hr} 、以及散热器空腔对流传热 Φ_{ht} ,得出热端制冷功率 Φ_h 公式如下:

$$\Phi_h = \alpha t_h I + \frac{1}{2} I^2 R - K_T (t_h - t_c) -$$

$$n\eta\lambda A_L m T_a \tanh \left[m \left(l + \frac{\delta}{2} \right) \right] - nA_H \epsilon \sigma (T_a^4 - t_{soil}^4) - nh_{sf} A_H (T_a - t_{soil}) \quad (4)$$

根据能量平衡方程,建立热端温度功率转换公式:

$$\Phi_h = (c_H M_H + c_F M_F) \Delta t_h \tag{5}$$

其中, h_{sf} 为热端散热器空腔内对流换热系数; c_F , M_F 分别为散热器的比热容及质量; c_H , M_H 分别为热端结点上物质的比热容及质量; Δt_h 为热端温度变化量; n 为散热片肋片数; η 为散热片单片肋片散热效率, 一般取 0.64~0.76 之间。

3) 整体数值模型

联立式(1)与(5)可得到自主降温装置温度变化数值模型公式如下:

$$\left\{ \begin{aligned} & -\alpha t_c I + \frac{1}{2} I^2 R + K_T(t_h - t_c) - hA(t_c - t_{air}) - \\ & A\varepsilon\sigma(t_c^4 - t_{air}^4) = (c_L M_L + c_C M_C) \Delta t_c \\ & \alpha t_h I + \frac{1}{2} I^2 R - K_T(t_h - t_c) - n\eta\lambda A_L m T_a \tanh \times \\ & \left[m \left(l + \frac{\delta}{2} \right) \right] - nA_H \varepsilon\sigma [T_a^4 - t_{soil}^4] - \\ & nh_{sf} A_H (T_a - t_{soil}) = \\ & (c_H M_H + c_F M_F) \Delta t_h \end{aligned} \right. \tag{6}$$

2.2 自主降温装置温度特性分析

TEC 元件内部 α 、 R 和 K_T 等系数随温度变化发生相应改变, 具体数值难以精准测量或选取, 一般使用工程数据根据冷热端物性温度进行估算。本模型中 TEC 型号为 TEC1-12706。根据已有实物装置, 选定参数。参数取值如表 1 所示。

表 1 装置参数取值
Table 1 Device parameter values

变量名称	变量取值	变量名称	变量取值	变量名称	变量取值
I	3	A_L	0.000 275	M_C	0.02
A	0.001 6	A_H	0.000 5	c_H	870
n	20	c_L	380	M_H	1.1475
η	0.7	M_L	0.042 9	c_F	500
m	4	c_C	500	M_F	0.02

1) 不同初始条件热特性分析

分析冷热端初始温度变化对冷端温度变化影响, 分别考虑冷端和热端初始温度固定两种情况, 观察冷端温度变化趋势。图 5(a) 为冷端初始温度为 0℃, 当热端温度由 0℃ 递增至 7℃ 时, 冷端温度特性曲线; 图 5(b) 为热端初始温度为 0℃, 当冷端温度由 0℃ 递减至 -7℃ 时, 冷端温度特性曲线。

2) 扰动影响下热特性分析

跑道环境有各种未知的扰动因素存在, 通常扰动情

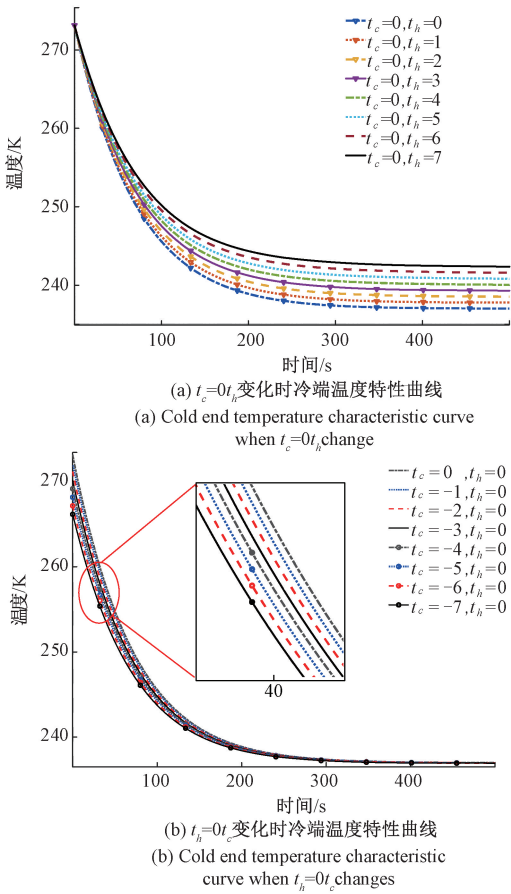


图 5 初始温度变化情况冷端温度热特性对比
Fig. 5 Comparison of thermal characteristics of cold end temperature for initial temperature change

况:跑道小范围内大气温度、风速等数据波动;装置冷端表面暴露在外侧,易受诸如冻雨、降雪等未知突变扰动。

(1) 温度或风速波动扰动。大气温度及风速的变化会直接改变自主降温装置的表面传热系数,故向对流传热系数 h_c 及冷端温度添加随机白噪声扰动,观察其温度响应,并与不加扰动对比如图 6 所示。冷端温度受扰动影响最终制冷温度相对升高,原因在于环境温度略高于冷端温度,且对流传热增强,使冷端温度吸收环境热量温度升高。

(2) 突变扰动。扰动还考虑装置表面温度突变影响,如冷端表面受降雨水滴的影响或飞机除冰液等滴落。对模型添加突变扰动的情况与不加扰动的情况进行对比,如图 7 所示。当冷端遭遇温度突变时,装置表面温度突然增大,实际情况降雨等温度相对装置表面初始温度较高,造成冷端降温幅度减少。

综上所述,针对主动积冰预警的需求,实现降温精准温控,需从装置特性角度出发设计控制策略。

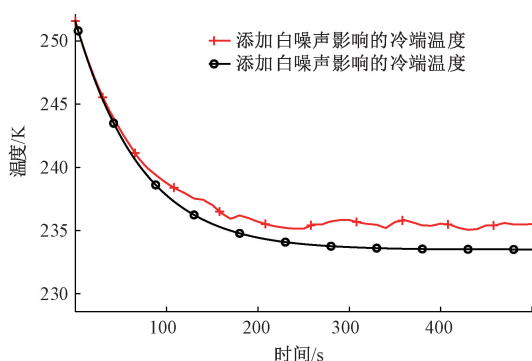


图6 加入扰动与未加扰动冷端温度对比

Fig. 6 Comparison of cold end temperature with and without perturbation

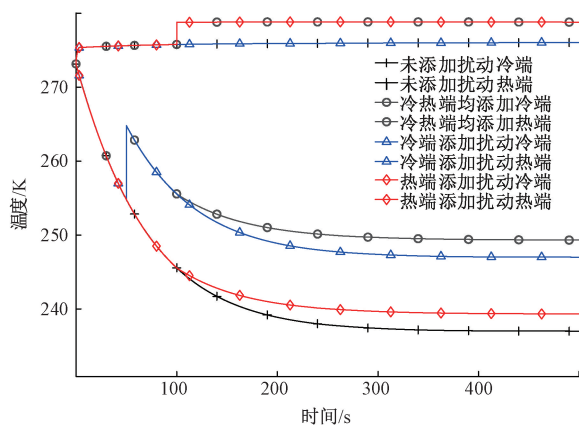


图7 加入突变扰动情况与未加扰动温度对比

Fig. 7 Comparison of temperature with and without sudden perturbation

3 自主降温装置自抗扰控制及仿真

3.1 自主降温装置非线性问题及控制策略选取

1) 自主降温装置温控问题描述

以往针对以 TEC 为核心的降温装置将冷端与热端分离研究,忽略冷热端之间的相互影响,将模型简化为线性函数。适用于零初始条件的传递函数既损失非线性特性,又未考虑参数时变影响,影响控制策略的抗扰性和鲁棒性^[17]。为方便分析将式(6)进行化简,合并简化后公式如式(7)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1 x_2 - b_1 x_1 - c_1 x_1^4 - (p_1 x_2 + q_1 x_1)u + r_1 u^2 \\ \dot{x}_2 = -a_2 x_2 + b_2 x_1 - c_2 x_2^4 + (p_2 x_2 + q_2 x_1)u + r_2 u^2 \\ y_1 = x_1 \\ y_2 = x_2 \end{cases} \quad (7)$$

其中, x_1 为冷端端温度,单位为:K; x_2 为热端温度,单位为:K; u 为电流输入,单位为:A; y_1, y_2 为冷热端温度输出。其余变量为化简后参数。式(7)为非线性系统,变量 x_1 与 x_2 之间相互耦合,且受外部环境参数时变。另外装置所处的跑道环境存在各种扰动。

2) 自抗扰控制原理

自抗扰控制将系统中不确定部分和时变部分视为内扰,将其余扰动部分视为外扰,并统称为总扰动,用扩张状态观测器为手段实现对总扰动的观测和估计,从而实现扰动抑制。自主降温装置冷热端之间存在耦合^[28],属于欠驱动系统,本文中虽主要以冷端温度为主,但热端影响不能忽视,控制系统结构框图如图8所示。

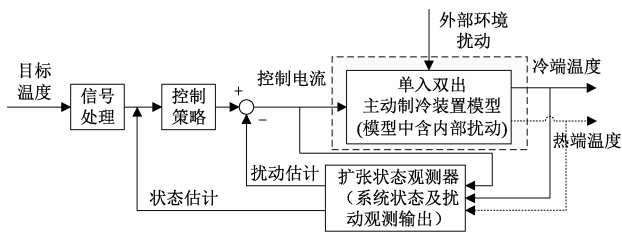


图8 ADRC 控制结构示意图

Fig. 8 Diagram of ADRC control structure

3.2 自抗扰控制策略设计

1) ADRC 控制策略总体构成

ADRC 控制系统主要由跟踪-微分器 (tracking differentiator, TD)、扩张状态观测器 (extended state observer, ESO) 和非线性状态误差反馈控制率 (nonlinear state error feedback, NLSEF) 3 部分构成。

对冷、热端建立双回路 ADRC 控制系统,利用自然解耦属性解决变量耦合。建立的 ADRC 控制总体结构如图9所示。以冷端温度控制 y_1 为主,对模型两个输出量分别建立独立的解耦控制系统。图中内扰为模型内部特性参数 (α, R 和 K_T) 和换热系数等参数时变耦合造成,外扰由跑道环境温度、风速和降水突变等扰动引起。用于设计 ADRC 控制的非线性控制方程如式(8)和(9)所示:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -b_1 x_1 - c_1 x_1^4 - q_1 x_1 u + r_1 u^2 + \omega_1 \\ y_1 = x_1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = -a_2 x_2 - c_2 x_2^4 + p_2 x_2 u + r_2 u^2 + \omega_2 \\ y_2 = x_2 \end{cases} \quad (9)$$

其中, x_1, x_2 为冷端及热端温度的状态变量; y_1, y_2 为冷热端温度的输出变量; $\omega_1 = a_1 x_2 - p_1 x_2 u$ 为冷端方程的热端温度耦合变量, $\omega_2 = b_2 x_1 + q_2 x_1 u$ 为热端方程的冷端温度耦合变量,两者均视为内部扰动。

2) 跟踪-微分器设计

跟踪-微分器作用在系统起始阶段,主要对模型输入信号进行前期处理,将可能出现的不连续或带有噪声

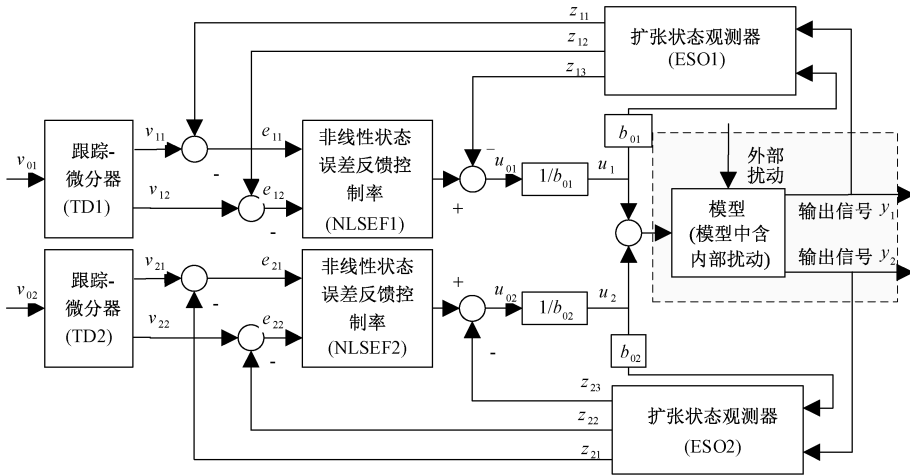


图9 自主制冷双回路 ADRC 控制系统示意图

Fig. 9 Schematic diagram of active cooling dual-loop ADRC control system

量的不稳定信号处理为连续信号,信号处理后由反馈控制率进行控制增益变换,输出控制信号。TD 控制器主要功能实现借助设计的最速综合函数 $fst(\zeta_1, \zeta_2, r_0, h_0)$, 其公式如式(10)所示。

$$\begin{cases} d = r_0 h_0^2 \\ a_0 = h_0 \zeta_2 \\ y = \zeta_1 + a_0 \\ a_1 = \sqrt{d(d + 8|y|)} \\ a_2 = a_0 + \text{sign}(y)(a_1 - d)/2 \\ s_y = [\text{sign}(y + d) - \text{sign}(y - d)]/2 \\ a = (a_0 + y + a_2)s_y + a_2 \\ s_a = [\text{sign}(a + d) - \text{sign}(a - d)]/2 \\ fst = -r_0[a/b - \text{sign}(a)]s_a - r_0 \text{sign}(a) \end{cases} \quad (10)$$

其中, ζ_1, ζ_2 为系统中间参数变量; r_0, h_0 为 fst 函数的性能控制参数。由式(10)建立 TD 控制器, 如式(11)所示:

$$\begin{cases} fst = fst(x_1(k) - v(k), x_2(k), r_0, h_0) \\ x_1(k+1) = x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + hfst \end{cases} \quad (11)$$

其中, x_1 为对输入曲线 v 的快速跟踪; x_2 为输入曲线 v 的微分近似。

3) 扩张状态观测器设计

扩张状态观测器(ESO)解决模型中内扰和外扰的问题,对总扰动变化实时观测,是 ADRC 控制的核心部分。根据式(8)所示的状态空间方程,进行 ESO1 观测器的设计,并在式(8)基础上建立新的扩张状态空间方程,将一阶系统变化为三阶系统,扩张系统如式(12)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_{12} + bu \\ \dot{x}_{12} = x_{13} \\ \dot{x}_{13} = \ddot{f}(x_1, u, \omega) = h \\ y_1 = x_1 \end{cases} \quad (12)$$

其中, $f(x_1, u, \omega) = -b_1 x_1 - c_1 x_1^4 - q_1 x_1 u + r_1 u^2 + \omega - bu$, 将具有非线性特性的输入量放进总扰动中进行处理; b 为对式(8)中 $-q_1 x_1 + r_1 u$ 大致取值的猜测量。对式(12)建立 ESO1 观测器,建立的三阶观测器系统如式(13)所示。

$$\begin{cases} e_1 = \hat{x}_1 - y_1 \\ \hat{x}_1 = \hat{x}_2 - \beta_1 fal\left(e_1, \frac{1}{2}, \delta\right) + bu \\ \hat{x}_2 = \hat{x}_3 - \beta_2 fal\left(e_1, \frac{1}{2}, \delta\right) \\ \hat{x}_3 = -\beta_3 fal\left(e_1, \frac{1}{4}, \delta\right) \end{cases} \quad (13)$$

其中, fal 函数为非线性函数,函数结构如式(14)所示。

$$fal(x, a, \delta) = \begin{cases} \frac{x}{\delta^{(1-a)}}, & |x| \leq \delta \\ \text{sign}(x)|x|^a, & |x| > \delta \end{cases} \quad (14)$$

综上,合理选取猜测量 b 即可建立起有效的 ESO1 观测器。同理 ESO2 观测器建立过程相同,不再赘述。

4) 非线性状态误差反馈控制率设计

NLSEF 为系统中反馈控制率部分,可以使用传统的 PID 方法,在 ADRC 控制中也有常用的控制率,如式(15)所示。

$$u = \beta_1 fal(e_1, a_1, \delta) + \beta_2 fal(e_2, a_2, \delta) \quad (15)$$

其中, a_1, a_2 两项取值范围一般为 $0 < a_1 < 1 < a_2$ 。

综上,将 TD 控制器,ESO 观测器和 NLSEF 控制率组

合即可建立 ADRC 控制系统,并通过设计双回路 ADRC 控制系统完成变量解耦处理,调节控制参数完成控制系统设计。

3.3 自抗扰控制性能分析及仿真

考虑跑道环境使用场景,自主降温装置应具备温度快速精准跟随的能力,研究阶跃、正弦两类输入信号下装置冷端温控快速、抗扰和精准跟随性能。搭建 ADRC 控制系统,并同非线性 PID (NLPID) 控制进行仿真对比,非线性 PID 控制器可表示为:

$$u(t) = k_p(e(t))e(t) + k_i(e(t)) \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d(e(t)) \frac{de(t)}{dt} \quad (16)$$

且

$$\begin{cases} k_p(e(t)) = k_{p1} + k_{p2}[1 - \text{sech}(k_{p3}e(t))] \\ k_i(e(t)) = k_{i1}\text{sech}(k_{i2}e(t)) \\ k_d(e(t)) = k_{d1} + k_{d2}/(1 + k_{d3}\exp(k_{d4}e(t))) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $k_{p1}, k_{p2}, k_{p3}, k_{i1}, k_{i2}, k_{d1}, k_{d2}, k_{d3}, k_{d4}$ 为正常实数,通过 k_{p3}, k_{i2}, k_{d4} 分别调整 k_p, k_i, k_d 的变化速率^[29]。

1) 阶跃输入仿真对比

阶跃输入验证装置温度的稳定性和抗扰性。阶跃输入情况下对比结果如图 10 所示。分析可知,ADRC 控制较 NLPID 控制曲线响应速度更快,ADRC 控制稳态误差相对 NLPID 控制较小,平均相差约 0.1 K。

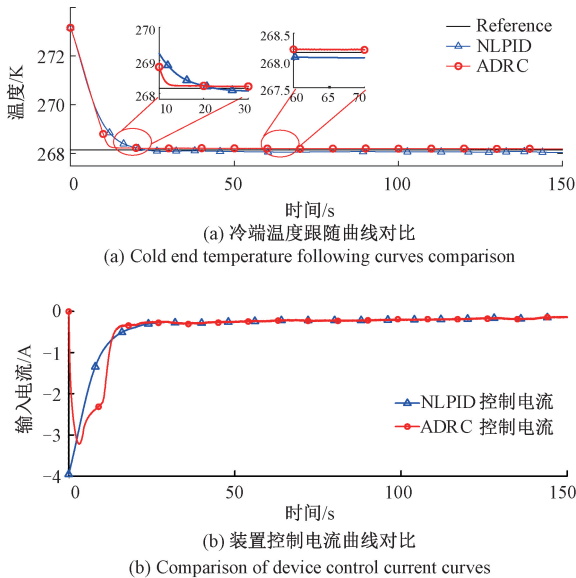


图 10 阶跃输入下冷端温度对比

Fig. 10 Comparison of cold end temperature under step input

在阶跃输入稳定时添加内扰进行分析。内扰变化考虑装置内部参数 (α, R 和 K_T) 和换热系数等参数,仿真过程中输出端引入功率谱密度为 0.1、采样周期为 10 s、

seed=32 214 的随机白噪声,对比结果如图 11 所示。分别对两种控制添加相同扰动后,ADRC 控制对扰动的抑制性能明显优于 NLPID 控制。

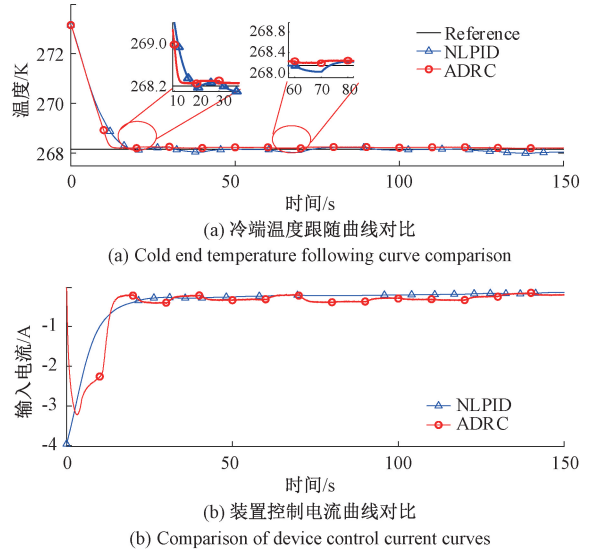


图 11 内扰情况下阶跃输入跟踪对比

Fig. 11 Comparison of step input tracking under internal disturbance

2) 正弦输入仿真对比

正弦输入检验装置的快速性、精准性和抗扰性。将设定值改为正弦输入并添加内扰(与图 11 相同的扰动信号),结果对比如图 12 所示。分析可知,当温度设定值为时变信号时,ADRC 控制可以更有效实现温控跟随,且误差相较于 NLPID 控制更小。

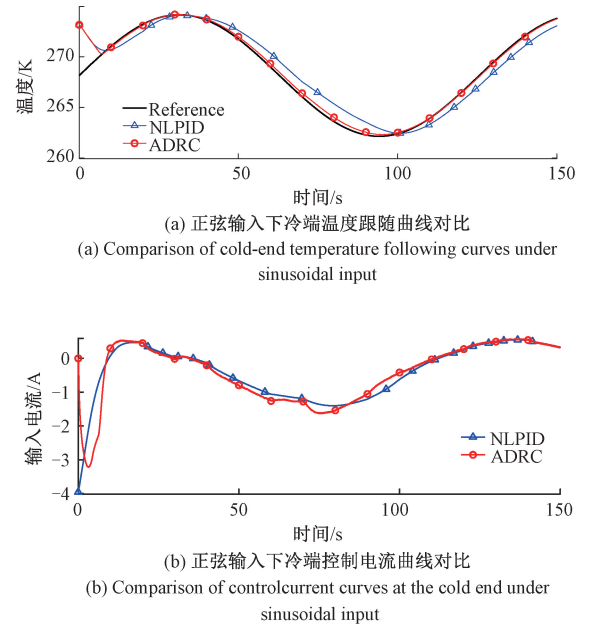


图 12 正弦输入下冷端温度控制效果对比

Fig. 12 Comparison of temperature control effect at cold end with sinusoidal input

在内扰影响的基础上,在 40 s 时刻,添加风速、温度突变等效的外部扰动(仿真中添加 2 K 的脉冲信号代替),总扰动仿真结果如图 13 所示。

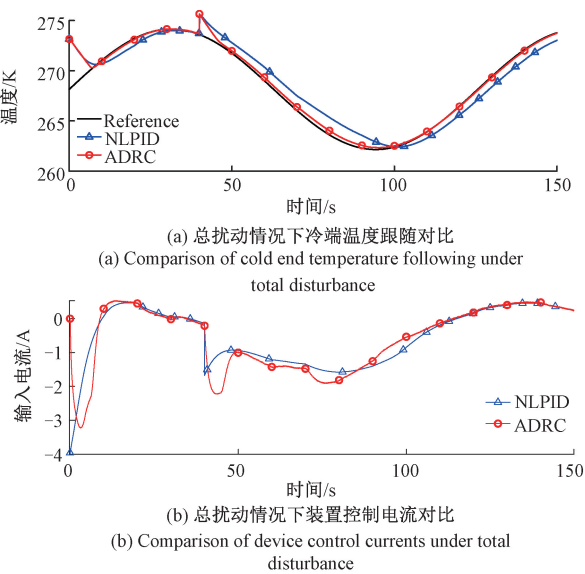


图 13 总扰动情况下正弦输入跟踪对比
Fig. 13 Comparison of sinusoidal input tracking under total disturbance

正弦仿真对比可知,相较于 NLPID,ADRC 控制针对时变和扰动信号,能快速跟踪并有效抑制。同样驱动电流也显示 ADRC 控制能积极响应。

综合上述两类输入信号,两种控制方法均方根误差 RMSE (root mean squared error, RMSE)^[30]结果如表 2 所示,ADRC 控制 RMSE 为 0.654 1,明显优于 NLPID。

表 2 各情况下 ADRC 与 NLPID 误差 RMSE 对比
Table 2 Comparison of error RMSE between ADRC and NLPID in each case

RMSE	扰动情况	ADRC 控制	NLPID 控制
阶跃 RMSE	稳定	0.570 4	0.672 4
阶跃 RMSE	内扰	0.570 8	0.680 3
正弦 RMSE	内扰	0.622 9	1.056 4
正弦 RMSE	总扰动	0.654 1	1.152 6

4 自主降温装置应用分析及实验

为实现积冰预警功能,装置主要从两方面进行实验测试:1)若预测获得当前环境下未来短时间后的道面温度值^[31],将该值作为装置降温的温控目标值,对装置进行温控性能验证,从而在实测中对所预测冰点进行验证;2)若未来短时间后的冰点未知,则以航空业标准 MH/T

6095-2013《除冰防冰液冰点测定方法》为思路,驱动装置进行阶梯降温主动探寻获得冰点。

4.1 自主降温装置温控性能验证

所设计的自主降温装置实物如图 14(a)所示,降温装置放置在 3℃低温实验箱内进行初步实验。加湿器调节湿度,气象传感器测量实验箱内的温度及湿度,图 14(b)、(c)为装置降温后积冰、积霜效果。结合前述的控制方法进行验证自主降温装置温控性能实验。

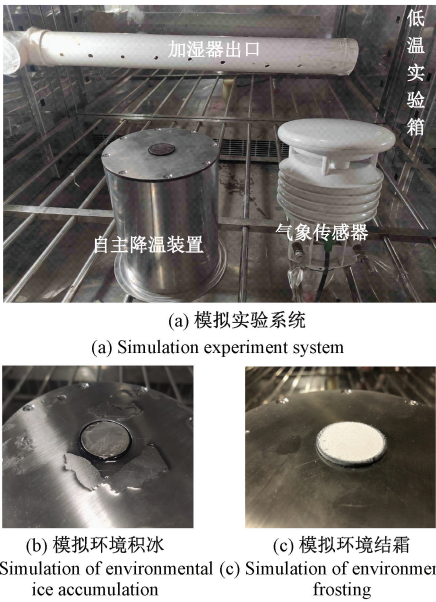


图 14 自主降温装置实验系统示意图
Fig. 14 Schematic diagram of the experimental system of autonomous cooling device

不同温控指令下的降温曲线如图 15 所示,可以看出:在目标温度为-3℃时,ADRC 超调几乎为 0,稳态误差为 0.05℃;在-6℃时,ADRC 的稳态误差最高为 0.04℃。相比较 NLPID 控制的超调及稳态误差均大于 ADRC 指标。相同实验条件下,ADRC 控制算法优于 NLPID,表明针对温控需求,ADRC 控制方法可实现温度的快速响应与精准跟随。在实际预警实验中根据预测的目标值进行主动降温,可验证所预测冰点准确性。

4.2 冰点探寻-积冰预警模拟实验

在冬季国内某机场跑道进行积冰预警模拟实验,实验现场如图 16 所示,此时大气环境为降雪后的低温环境,同时为便于分析,采集了当时环境下的跑道道面温度、大气环境温度、湿度、降雨量和装置热端温度的变化情况,对自主降温装置在积冰预警实验时进行综合分析。受除冰液影响,跑道环境下结冰温度多变,温控目标值难以确定。本文结合机场道面温度变化特征、除冰作业运行及跑道持续运行模式,考虑装置运行参数等因素,根据

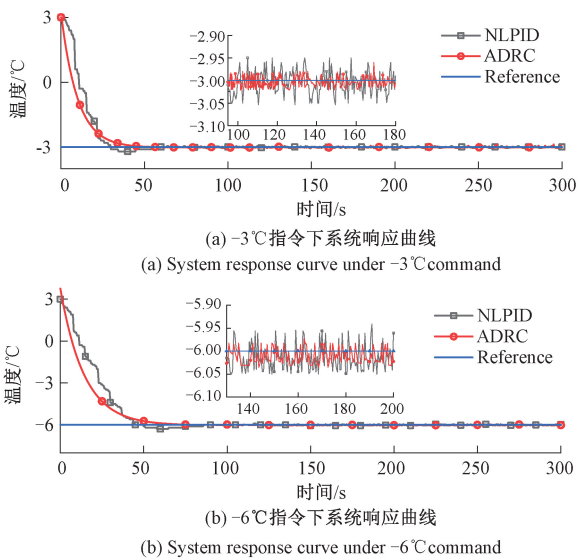


图 15 不同温控指令下系统响应曲线

Fig. 15 System response curves under different temperature control commands

某机场跑道温度变化特征,装置模拟该温度变化进行阶梯降温,主动探寻当时环境的冰点,如图 17 所示。

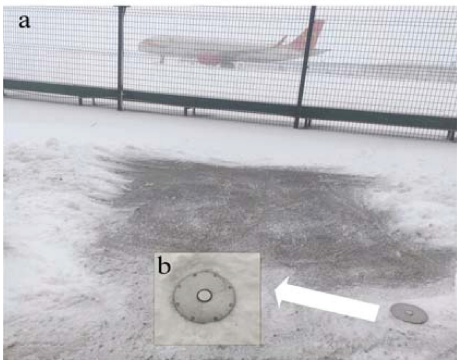


图 16 自主降温装置积冰预警模拟实验示意图

Fig. 16 Schematic diagram of the autonomous cooling device ice accumulation warning simulation experiment

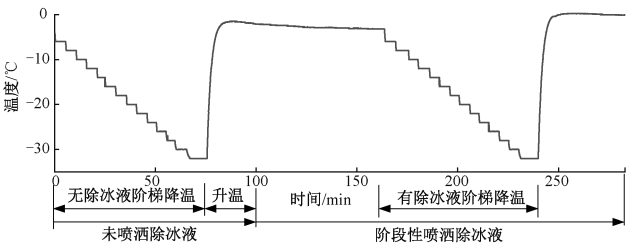


图 17 自主降温装置冰点探寻实验-积冰预警模拟实验

Fig. 17 Ice point exploration experiment of autonomous cooling device-ice accumulation early warning simulation experiment

图 17 中前 4 000 s 为阶梯降温实验,此阶段有环境扰动,没有积水、积冰和除冰液影响,在降温过程中的各个阶段进行积冰检测,得到结冰温度进而实现积冰预警。4 000 s~5 000 s 驱动电流反向融化积冰回到环境温度。6 000 s 之后喷洒除冰液,模拟跑道除冰、可能的二次积冰和表面扰动影响。10 000 s 启动二次降温,此阶段有除冰液及环境扰动同时影响,结果显示装置可有效跟随新的温度设定值,实现主动降温和二次预警。

5 结 论

面向机场跑道除冰保障积冰预警需求及机场安全高效运行要求,设计一种跑道积冰自主降温主动预警装置,研究了其热特性并提出该装置积冰预警的温控需求。引入 ADRC 控制方法解决了装置应用时参数时变、环境扰动和温度精准快速跟随问题。实物装置实验验证了其降温积冰等各项功能,并对其持续重复运行、温控跟随进行了模拟实验。研究结论如下:

- 1) 为实现跑道主动积冰预警,提出以 TEC 为核心的自主降温装置。对装置进行建模及热特性分析,探究了其温度变化范围及跑道小范围扰动影响,表明自主降温装置的非线性特征。
- 2) 考虑到自主降温装置工作时面临的扰动和参数时变问题,设计了 ADRC 控制方法。仿真对比证明 ADRC 可有效应对内部参数变化及冷热端扰动影响。ADRC 控制 RMSE 误差为 0.654 1,控制性能优于 NLPID。
- 3) 实验结果表明,ADRC 控制比 NLPID 有着更快的响应能力和更小的稳态误差,温控性能满足跑道积冰主动预警需求;冰点探测方法显示,装置具备跑道冰点探寻实现积冰主动预警能力。

参考文献

[1] 中国民用航空局. 2019 年民航行业发展统计公报[R]. 中国民航报, 2020-06.
Civil Aviation Administration of China. Statistical bulletin of civil aviation industry development in 2019 [R]. CAAC News, 2020-06.

[2] ICAO. ICAO Safety-report 2020-edition [R]. Canada: International Civil Aviation Organization, 2020.

[3] IATA. Safety report 2019 [R]. Canada: International Air Transport Association, 2020.

[4] LI J. A combination of PSO and SVM for road icing forecast [J]. Journal of Computers, 2010, 5 (9): 1372-1379.

[5] RYERSON C C, RAMSAY A C. Quantitative ice accretion information from the automated surface

- observing system[J]. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 2007, 46(9): 1423-1437.
- [6] YAMAGUCHI K. Improved ice accretion prediction techniques based on experimental observations of surface roughness effects on heat transfer [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 1990.
- [7] MAKKONEN L. Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2000, 358(1776): 2913-2939.
- [8] GONG X, BANSMER S. Laser scanning applied for ice shape measurements[J]. *Cold Reg*, 2015, 115: 64-76.
- [9] HOSHINO S, HASHIMOTO K, TATEYAMA K, et al. Snow and ice monitoring technique for the contaminated runway[C]. *AIAA Scitech 2020 Forum*, 2020.
- [10] MAO J, CHEN G, REN Z. Thermoelectric cooling materials [J]. *Nature Materials*, 2021, 20(4): 454-461.
- [11] SNYDER G J, TOBERER E S. Complex thermoelectric materials[J]. *Nature Materials*, 2008, 7(2): 105-114.
- [12] 刘东晓, 李运泽, 李运华. 纳卫星等效空间热沉的 PWM 控制及其在地面模拟试验中的应用研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(16): 148-155.
- LIU D X, LI Y Z, LI Y H. PWM control and application research on ground simulation experiment of equivalent space heat sink for nano-satellite [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(16): 148-155.
- [13] 李运泽, 魏传锋, 袁领双, 等. 应用热电制冷器的微型航天器主动温度控制及仿真[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(10): 149-152.
- LI Y Z, WEI CH F, YUAN L SH, et al. Simulation of micro spacecraft active temperature control system using thermoelectric cooler [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(10): 149-152.
- [14] 夏冬冬, 岳晓奎. 基于浸入与不变理论的航天器姿态跟踪自适应控制[J]. *航空学报*, 2020, 41(2): 312-323.
- XIA D D, YUE X K. Immersion and invariance based attitude adaptive tracking control for spacecraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(2): 323-328.
- [15] 文杰, 姜长生. 一类非仿射受扰混沌系统的自适应模糊控制[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(12): 2664-2668.
- WEN J, JIANG CH SH. Adaptive fuzzy control for a class of uncertain chaotic systems with nonaffine inputs[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(12): 2664-2668.
- [16] 郭建国, 鲁宁波, 周军. 高超声速飞行器有限时间耦合模糊控制[J]. *航空学报*, 2020, 41(11): 41-50.
- GUO J G, LU N B, ZHOU J. Fuzzy control of finite time attitude coupling in hypersonic vehicles [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(11): 41-50.
- [17] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
- HAN J Q. Active disturbance rejection control technique[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [18] 韩京清. 非线性系统的状态观测器[J]. *控制与决策*, 1990(3): 57-60.
- HAN J Q. State observer of nonlinear systems [J]. *Control and Decision*, 1990(3): 57-60.
- [19] 武利强, 韩京清. 直线型倒立摆的自抗扰控制设计方案[J]. *控制理论与应用*, 2004, 21(5): 665-669.
- WU L Q, HAN J Q. Active disturbance rejection controller scheme for the linear inverted pendulum [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(5): 665-669.
- [20] CHEN Z, ZHENG Q, GAO Z. Active disturbance rejection control of chemical processes [C]. *IEEE International Conference on Control Applications*, IEEE, 2007.
- [21] 王立新, 赵丁选, 刘福才, 等. 电液比例伺服力加载自抗扰控制[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(18): 216-225.
- WANG L X, ZHAO D X, LIU F C, et al. Active disturbance rejection control for electro-hydraulic proportional servo force loading [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(18): 216-225.
- [22] 王术波, 韩宇, 陈建, 等. 基于 ADRC 迭代学习控制的四旋翼无人机姿态控制[J]. *航空学报*, 2020, 41(12): 319-331.
- WANG SH B, HAN Y, CHEN J, et al. Attitude active disturbance rejection control of UAV attitude based on iterative learning control. [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(12): 319-331.
- [23] 施小成, 赵俊鹏, 周佳加, 等. UUV 水动力参数估计

- 及深度自抗扰控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(S2): 1-6.
- SHI X CH, ZHAO J P, ZHOU J J, et al. Hydrodynamic coefficients estimation for UUV and ADRC to its diving control [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(S2): 1-6.
- [24] 陈林根, 孟凡凯, 戈延林, 等. 半导体热电装置的热力学研究进展[J]. 机械工程学报, 2013, 49(24): 144-154.
- CHEN L G, MENG F K, GE Y L, et al. Progress in thermodynamic studies for semiconductor thermoelectric devices [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(24): 144-154.
- [25] MIRONOVA A, MERCORELLI P, ZEDLRR A. Control of a two-thermoelectric-cooler system for ice-clamping application using Lyapunov based approach[C]. 2017 21st International Conference on Process Control (PC), 2017.
- [26] 杨文刚, 樊学武, 王晨洁, 等. 天基望远镜探测器组件热电制冷系统设计与试验[J]. 光子学报, 2020, 49(8): 7-18.
- YANG W G, FAN X W, WANG CH J, et al. Design and test of thermo electric cooling system for space based telescope detector assembly[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(8): 7-18.
- [27] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001.
- TAO W Q. Numerical heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
- [28] 张钊, 杨忠, 段雨潇, 等. 主动变形四旋翼自抗扰飞行控制方法[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(4): 444-456.
- ZHANG ZH, YANG ZH, DUAN Y X, et al. Active disturbance rejection control method for actively deformable quadrotor [J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(4): 444-456.
- [29] 章家岩, 马中海, 李绍铭, 等. Smith 预估补偿控制策略在转炉煤气回收系统中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 628-633.
- ZHANG J Y, MA ZH H, LI SH M, et al. Application of Smith prediction compensation control strategy in converter gas recovery system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(3): 628-633.
- [30] 杜望, 王衍学. 基于协整和向量误差修正的轴承剩余寿命预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 32-39.
- DU W, WANG Y X. RUL prediction method for rolling bearing based on cointegration system and vector error correction [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(9): 32-39.
- [31] NUIJTEN, DW A. Runway temperature prediction, a case study for oslo airport, norway [J]. Cold Regions Science & Technology, 2016, 125: 72-84.

作者简介



陈斌(通信作者), 2018 年于天津大学获得博士学位, 现为中国民航大学副研究员, 主要研究方向为复杂机电系统检测与控制, 机场地面运行安全保障。

E-mail: chenbindavid@163.com

Chen Bin (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2018. He is currently an associate research fellow at Civil Aviation University of China. His main research interests include complex electromechanical system detection and control and airport ground operation safety guarantee.