

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.047

基于位力一体化装置的蜡马达性能检测系统的设计与实现

黄金梭^{1,2}, 仇旻昱³, 潘雷⁴, 雷芝⁴, 周智远⁴, 陈志青^{1,2}

(1. 温州职业技术学院, 浙江 温州 325035; 2. 浙南轻工装备智能技术协同创新中心, 浙江 温州 325035;

3. 东南电子股份有限公司, 浙江 温州 325600; 4. 浙江名瑞智能装备科技股份有限公司, 浙江 温州 325200)

摘要:为解决蜡马达在恒定负载作用下动作性能参数及寿命的自动化检测问题,设计一种基于位力一体化装置的性能检测系统。构思一套位力一体化装置的设计方案,分析位移及作用力计算方法;设计一套电气自动化控制系统,并详细介绍硬件构成及其控制流程,对部分关键控制程序分析说明;制作一台检测样机,以验收上述装置及控制系统设计的科学性和准确性。测试结果表明:系统设计可行有效,机构动作稳定可靠,电气检测快速准确,提高了蜡马达性能检测的精准性和自动化水平。

关键词:位力一体化;蜡马达;性能检测;系统设计;自动化

中图分类号:TP391.41 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)04-0247-06

Design and Implementation of a Performance Testing System for Wax Motors Based on a Displacement-Force Integrated Device

Huang Jinsuo^{1,2}, Qiu Mingang³, Pan Lei⁴, Lei Zhi⁴, Zhou Zhiyuan⁴, Chen Zhiqing^{1,2}

(1. Wenzhou Polytechnic, Wenzhou 325035, China; 2. South Zhejiang Collaborative Innovation Center of Intelligent Technology for Light Industry Equipment, Wenzhou 325035, China; 3. Dongnan Electronics Co., Ltd., Wenzhou 325600, China;

4. Zhejiang Mingrui Intelligent Equipment Technology Co., Ltd., Wenzhou 325200, China)

Abstract: To address the need for automated testing of the operational performance parameters and lifespan of wax motors under constant load, a performance testing system based on a displacement-force integrated device is designed. First, a design scheme for the displacement-force integrated device is conceptualized, and the calculation methods for displacement and force are analyzed. Second, an electrical automation control system is designed, with a detailed introduction to its hardware composition and control process, and an analysis of some key control programs is provided. Finally, a testing prototype is manufactured to verify the scientific validity and accuracy of the device and control system designs. Test results show that the system design is feasible and effective, with stable and reliable mechanism operation and fast and accurate electrical testing. It improves the precision and automation level of wax motor performance testing.

Keywords: displacement-force integration; wax motor; performance testing; system design; automation

0 引言

蜡马达(也叫热驱动器)是一种通电发热膨胀后产生推或拉动作、输出力和位移的驱动装置^[1],其广泛应用于各种机电设备中,是排风机、洗碗机、电烤箱、空气阻尼器等等诸多家用电器中不可或缺的零部件。蜡马达的典型结构如图1所示。其工作原理如下:内部的 PTC 通电后加热片发热,使得蜡马达芯体中的高膨胀率石蜡融化产生体积膨胀,进而缓慢推或拉伸伸缩杆产生位移;当断电后,石蜡逐渐冷却收缩,在弹簧辅助作用下,伸缩杆缓慢恢复至初始位置。

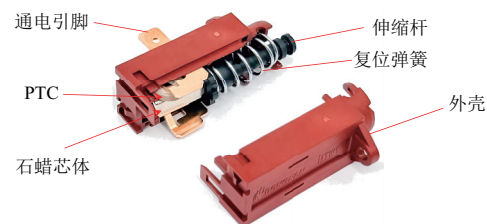


图1 蜡马达内部结构及伸缩动作原理图

蜡马达伸缩动作性能的好坏将直接影响电器设备是否能够正常工作。为了检测蜡马达在指定恒定的负载下其伸缩动作行程的位移准确性、行程时间曲线图及其动作寿命等诸多性能数据,企

基金项目:2025 年度浙江省高校国内访问工程师“校企合作项目”(FG2025090);温州市重大科技创新攻关项目(ZG2024049)

第一作者简介:黄金梭(1985—),男,浙江龙港人,副教授,硕士,研究方向为机器视觉、工业机器人及智能装备研制,

hjsmail@126.com。

业急需一套蜡马达性能自动化检测装备,代替人工完成蜡马达工作全过程的性能数据采集,从而为蜡马达设计工程师改进结构参数提供实验依据。

对蜡马达进行性能检测的关键技术在于:在蜡马达伸缩动作过程中,作用在蜡马达伸缩杆上的负载作用力始终保持大小恒定,并精确地检测出负载作用力方向上的伸缩杆实时位移数据;要求负载作用力方向以及大小可灵活切换。为此相关学者以及企业做了诸多研究。李涛、吴桐等^[2-4]通过将弹簧作为负载模拟装置,对直热后置式的石蜡驱动器的位移输出特性进行了试验,得出了输出位移变化曲线。陈兵芽等^[5-7]通过弹簧模拟压力对石蜡本身的加热膨胀特性进行了试验和研究。部分蜡马达制造企业也做了蜡马达产品性能检测装置的开发研究,如思微自控(乐清)有限公司^[8]及温州甲鼎科技有限公司^[9]采用了一种能产生推力或拉力的弹簧装置,将作用力负载施加在蜡马达伸缩杆上,并通过位移传感器检测伸缩杆的位移量,如图2所示。在上述研究开发案例中,弹簧负载在蜡马达伸缩过程无法保持作用力大小的恒定。此外,也有一些学者对蜡马达的核心材料“石蜡”在不同温度环境和压力负载下做了相关的热膨胀实验研究^[10-17],以及使用相关检测手段检测位移^[18-21]。



图2 蜡马达性能检测装置

为了解决蜡马达在恒定负载作用下的性能检测及自动化的问题,通过集成力学原理、机械传动、传感检测及自动化等多学科交叉技术,本文设计了一种基于位力一体化装置的蜡马达性能检测系统。该系统能够在蜡马达伸缩位移方向上模拟产生恒定大小的作用力负载,并精准地检测与作用力同线的位移行程,下面系统性地介绍相关的设计原理与方法。

1 位力一体化装置设计与分析

1.1 机构设计及工作原理分析

为了保证蜡马达伸缩杆在伸缩过程中受到的

作用力负载始终保持恒定,同时检测伸缩杆动作行程的位移数据,设计了如图3所示的位力一体化装置。

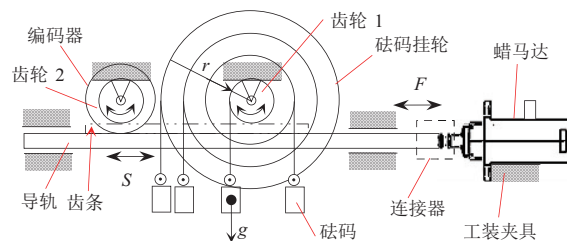


图3 位力一体化装置总体设计思路

在该装置中,齿轮1与砵码挂轮刚性连接在一起,并构成转动副;齿条与导轨刚性连接在一起,并构成移动副;齿轮1与齿条相互啮合;砵码挂轮上不同直径圆两侧均可向下挂砵码 G ,从而产生顺时针或逆时针的转矩;该转矩通过齿轮齿条结合传递至导轨,进而产生向左或向右的恒定水平作用力 F 。在上述装置左侧,编码器与齿轮2同轴刚性连接在一起,并构成转动副;齿轮2与齿条相互啮合,导轨齿条的移动 S 会带动齿轮2转动,并通过编码器输出的脉冲数 P 检测转动角度值 A ,此时编码器的转矩阻尼对齿条的作用力可忽略不计。在上述装置的右侧,工装夹具将蜡马达外壳安装固定,再通过连接器将伸缩杆与导轨刚性连接在一起,从而实现将导轨恒定的水平作用力传递至蜡马达伸缩杆上,以及将蜡马达伸缩杆的位移传递至导轨。

1.2 位移检测计算

在上述位力一体化装置的设计中,各个参数定义如下:1)齿轮1和齿轮2的分度圆半径均为 r ,齿数为 z ,模数为 m ;2)砵码挂轮每级半径间隔为 r ,案例中共有4级;3)砵码质量为 g ;4)编码器分辨率为 P_{Enc} 。

导轨移动量 S 与齿轮2转动角度值 A 之间的关系为

$$S = \pi \times m \times z \times (A/360) \quad (1)$$

导轨移动量 S 与编码器脉冲数 P 之间的关系为

$$S = \pi \times m \times z \times P / (360 \times P_{\text{Enc}}) \quad (2)$$

基于式(2)可知,当蜡马达通电动作后,根据编码器反馈的脉冲数 P ,即可计算出蜡马达伸缩杆的位移量 S 。

当 $P=1$ 时,由式(1)可得到该装置的行程位移理论检测精度 $A_{\text{CC}} = \pi \times m \times z / (360 \times P_{\text{Enc}})$

由上可知,齿轮 2 的模数越小、齿数越少,编码器分辨率越高,则该装置的位移检测精度越高。

1.3 作用力负载计算

假设将质量为 g 的一个砝码挂于挂轮左侧半径为 R_n 的圆上,可产生向右的水平作用力 F ,如图 4(a)所示。

在蜡马达通电后伸缩杆缓慢移动过程中,根据力矩守恒定律,得到公式

$$g \times 10 \times R_n = f \times r \quad (3)$$

$$\begin{cases} r = m \times z \\ F = g \times 10 \times R_n / m \times z \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知,同一砝码挂在不同直径大小的圆上,可产生大小不同的水平作用力 F 。

假设将质量为 g 的砝码挂于挂轮右侧 R_n 的圆上,可产生向左的水平作用力 F ,如图 4(b)所示。

当在左右两侧不同直径圆上分别挂多个砝码时,即可最终组合出指定方向、指定大小的水平作用力。

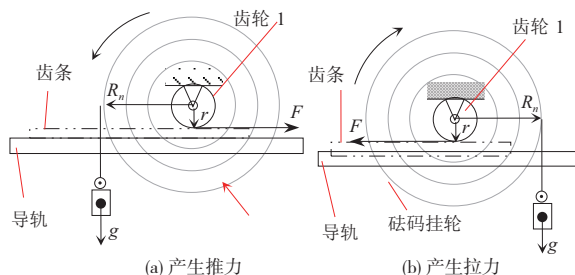


图 4 位力一体化装置受力分析图

2 自动化控制系统设计

2.1 检测数据分析及采集设计

在蜡马达通电过程中,需要检测吸收电流 A 、动作行程位移 SW 、启动时间 TS 及动作行程完成时间 TW 等数据;在蜡马达断电过程中,需要检测复位行程位移 SR 、复位行程完成时间 TR 等数据,每个数据的存储地址分配如表 1 所示。其中,蜡马达通电吸收电流使用电流传感器采集,通电后第一次电流数据存于首地址 $D200$ 中、第一次动作行程位移数据存于首地址 $D201+N$ 中,之后每隔 0.5 s 记录一次,存储地址依次递增。同理,复位行程位移数据存于首地址为 $D202+2N$ 开始的寄存器区间。蜡马达伸缩杆从通电到开始动作经过的启动时间 TS 存于 $D7991$ 中,从通电到完成动作行程经过的动作时间 TW 存于 $D7990$ 中,从断点到回到初始位置锁经过的复位时间 TR 存于 $D7989$ 中。

表 1 性能检测数据存储地

单位:s

检测数据名称	存储地址			
	0	0.5	...	$0.5 \times N$
电流大小 A	D200	D201		$D200+N$
动作行程 SW	$D201+N$	$D201+N+1$		$D201+N+N$
启动时间 TS	D7991			
动作时间 TW	D7990			
复位行程 SR	$D202+N+N$	$D202+N+N+1$		$D202+N+N+N$
复位时间 TR	D7989			

2.2 系统控制流程设计

为了实现基于上述装置的自动性能检测目的,设计了如图 5 所示的系统控制流程图。

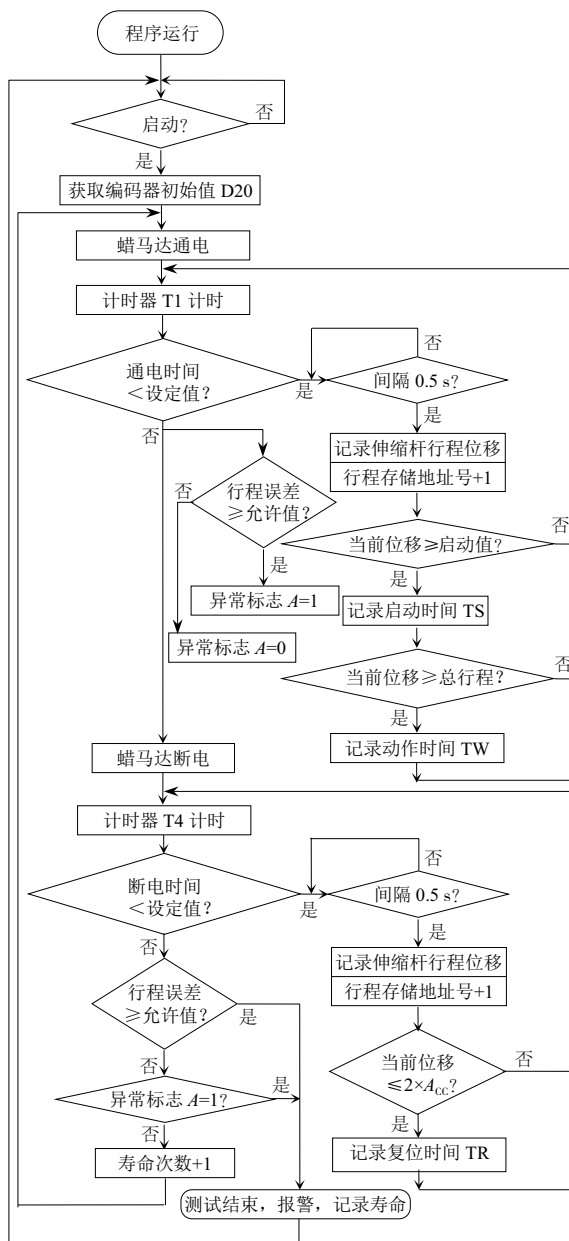


图 5 蜡马达伸缩杆位移检查工作流程

在启动自动化检测程序后,首先从编码器计数器 C246 中读取一次数值作为蜡马达伸缩杆的初始位置数据,存于寄存器 D20 中;给蜡马达通电,并用计时器 T_1 计时通电时间,每隔 0.5 s 读一次 C246 数值,通过 C246-D20 计算出当前时刻伸缩杆行程位移 SW,并按照时间顺序依次存于首地址为 D201+N 开始的连续 N 个寄存器区间内。当行程位移大于 $2 \times A_{cc}$ 时,认为蜡马达开始动作,此时记录 T_1 的数值于 D7991 中,作为启动时间 TS;当 T_1 计时时间达到设定时长时,记录工作行程是否异常的标志,并进入断电状态,用计时器 T_4 计时断电时间,同通电期间一样,每隔 0.5 s 记录复位位移于 D202+2N 开始的连续存储区间,当伸缩杆恢复误差在 2 个 A_{cc} 时,认为复位完成,记录 T_4 数值与 D7989 中,作为复位时间。

当 T_4 达到设定时长时,若通电行程与断电行程误差均正常,则继续新一轮测试;否则,停止测试,系统报警,并记录寿命次数。

3 机械结构设计

3.1 位力一体化装置的结构设计及参数

基于上述位力一体化装置的机构原理,设计了如图 6 所示的机械三维结构,砝码通过挂绳对砝码挂轮施加了转矩,砝码挂轮通过转轴将转矩传递至砝码挂轮齿轮,齿轮通过啮合将转矩转化为齿条的水平作用力,该作用力通过齿条基座、齿条座传递至右侧的位力杆上,如图 7 所示。其中,齿轮齿条的模数 $m=1$,砝码挂轮齿轮齿数 $z_1=36$,编码器齿轮齿数 $z_2=12$,砝码挂轮采用 5 级设计,第 1 级半径 $R_1=18$,第 n 级半径 $R_n=18 \times n$,砝码质量为 1 kg,由式(4)可知,每级砝码产生的水平作用力 $F=n \times 10$ N。

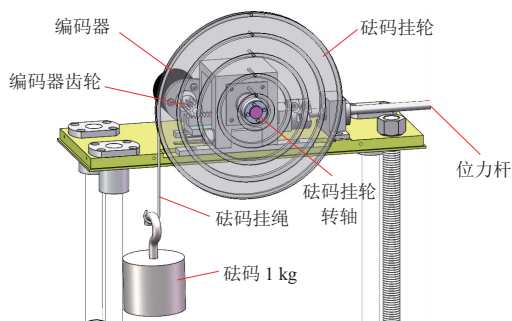


图6 位力一体化装置的三维结构轴测图

选用欧姆龙 E6B2-CWZ6C2000R/P 型号的编码器,旋转一圈产生的脉冲数为 2 000,根据式(2)

可知, $S \approx 0.0188P$,检测精度为 0.0188 mm。

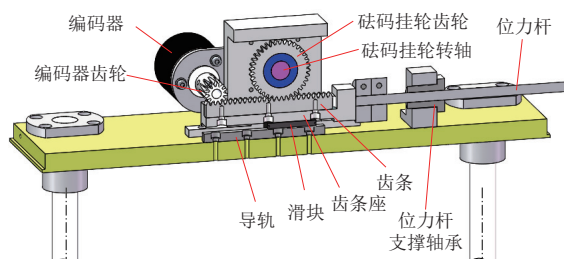


图7 位力一体化装置的三维结构剖视图

3.2 蜡马达工装夹具及整体平台设计

为了实现快速地安装蜡马达至检测平台上,设计了如图 8(a) 所示的工装夹具,将蜡马达放置在滑台的工装位上后,通过压马器下压固定,并由连接器将蜡马达伸缩杆与位力杆刚性连接在一起;蜡马达工装夹具整体安装于保温箱中,为蜡马达营造一个温湿度检测环境,如图 8(b) 所示。

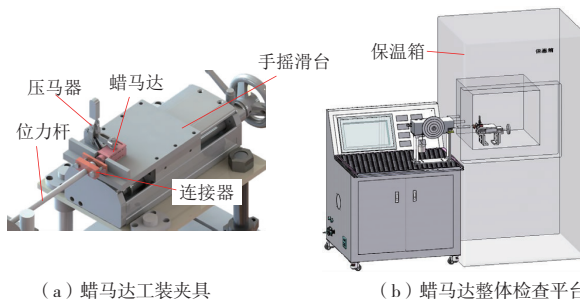


图8 蜡马达工装夹具及整体检测平台

4 系统测试

为了验证上述设计的可行性、科学性和准确性,制作了一套物理样机,如图 9 所示。该样机先后在实验室和合作企业的车间实际运行了 2 年多,应用结果证明了方案设计的可行性和良好的稳定性。

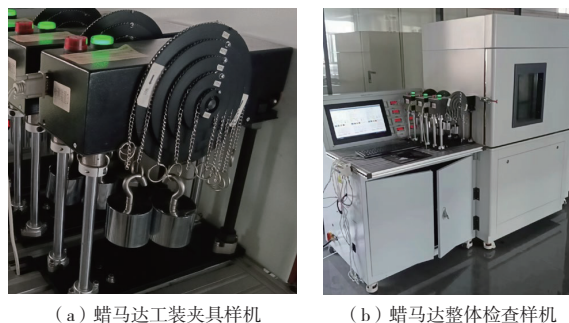
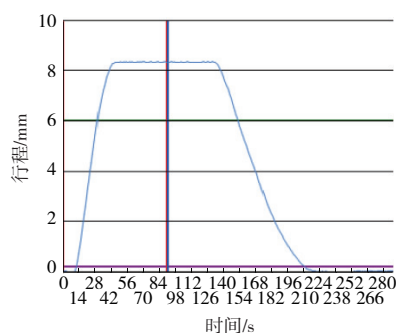


图9 蜡马达性能检测设备的物理样机

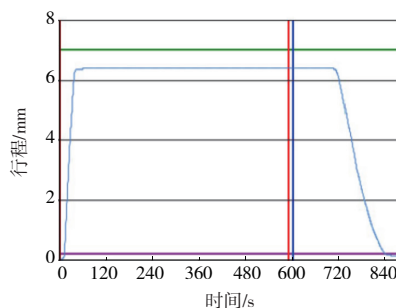
为了评价本系统检测的准确性,对同一批次蜡马达 A 在测试条件 T001、蜡马达 B 在测试条件 T002 下做了一系列的性能测试,其中表 2 记录了蜡马达的两种测试条件 T001 和 T002。图 10 显示了蜡马达的行程随时间变化的曲线。表 3 记录了蜡马达的性能测试结果,所有测试均以 0.02 mm 的行程变化为伸缩杆的动作完成标志。

表 2 蜡马达测试条件

参数	测试条件	
	T001	T002
理论行程/mm	8	6
通电时长/s	70	600
负载/N	60	60
温度/℃	90	90
断电时长/s	250	300



(a) 蜡马达A



(b) 蜡马达B

图 10 蜡马达的行程-时间图

表 3 蜡马达测试结果

参数	蜡马达 A	蜡马达 B
启动时间/s	10.56	32.77
动作时间/s	33.60	353.50
复位时间/s	125.80	255.00
动作行程/mm	8.36	6.41

以上检测数据表明,基于本文位力一体化装置的性能检测系统可以有效解决蜡马达负载模拟以及行程检测一体化、自动化的问题^[22]。

5 结语

在新产品研发阶段,对产品质量进行全过程实时检测是改进和验证产品设计是否合理的一个有效手段,本文通过设计和研制基于位力一体化装置的蜡马达检测系统,得出了以下结论:

1)融合齿轮传动机械原理、力矩守恒力学原理以及电气自动化控制技术、实现多学科交叉应用。设计出的位力一体化装置可实现行程位移线和恒定水平作用力线的合二为一,实现在一个杆上既能输出恒定的水平作用力、又能检测行程位移的作用,为检测蜡马达在恒定负载作用下的行程与时间变化关系提供了有效的解决方案。

2)基于本文的设计理论与方法,经过简单改造连接方式和工装夹具,也能够用来检测其它需要在恒定负载作用下行程-时间关系的产品,具有良好的应用扩展性。

参考文献:

- [1] 仇旻罡,鲁文杰,吴步强,等. 热驱动器: CN202221376283.6[P]. 2022-09-16.
- [2] 李涛,纪玉杰,姜宏彪. 直热后置式石蜡驱动器的位移输出特性研究[J]. 成组技术与生产现代化,2023, 40(1):48-51,58.
- [3] 吴桐. 后置水浴式石蜡驱动器输出特性研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2024.
- [4] 李涛. 直热式石蜡驱动器输出特性研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2023.
- [5] 陈兵芽,刘莹,孙长存. 石蜡的热膨胀驱动特性[J]. 机械工程材料,2008,32(7):60-63.
- [6] 陈兵芽,刘莹,胡敏等.石蜡热膨胀性能试验装置的研究[J]. 传感器与微系统,2007,26(12):60-62.
- [7] 陈兵芽,刘莹. 石蜡驱动器感应加热耦合场的数值模拟[J]. 制造技术与机床,2008(10):91-94,102.
- [8] 思微自控科技(温州)有限公司. 蜡马达的测试原理[EB/OL]. (2025-11-24)[2025-12-22]. https://www.iswell.com/iswell/vip_doc/25357363.html.
- [9] 温州甲鼎科技有限公司. 热动执行器内部结构及原理[EB/OL]. (2023-04-22)[2025-12-22]. <https://www.jadin.tech/jsdt/27.html>.
- [10] 邓鸿,唐波,戴越,等. 改善石蜡相变材料导热性与泄露问题研究进展[J]. 化学通报(中英文),2025, 88(5):527-534.
- [11] 李佳玉,王信刚,雷宇轩,等. Nano-Al₂O₃改性石蜡相变微胶囊的热性能及作用机理[J]. 南昌大学学报

- (理科版),2023,47(2):141-147.
- [12] 张顺杰,王露斯,聂超,等. 空间大载荷石蜡驱动器研制[J]. 北京航空航天大学学报,2017,43(5):1038-1044.
- [13] 陈兵芽. 石蜡热力学特性及其无缆驱动器研究[D]. 南昌:南昌大学,2008.
- [14] 杨杰超. 基于感应加热和石蜡复合材料的相变微驱动器研究[D]. 北京:北京工业大学,2018.
- [15] 张屹东,张红婴,闻静,等. 月桂酸-棕榈酸-石蜡/膨胀石墨定形复合相变材料的制备及性能表征[J]. 化工新型材料,2025,53(8):229-235.
- [16] 高慧,孟多. 石蜡/改性粉煤灰定形相变材料的制备及热性能研究[J]. 新型建筑材料,2025,50(4):1-6,49.
- [17] Mann A, Bürgel C, Groche P. A modeling strategy for predicting the properties of paraffin wax actuators. Actuators [J]. Actuators,2018,7(4):81-81.
- [18] Piston K, Roberts M. Thermomechanical modeling and experimental characterization of paraffin wax actuators for automotive applications [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2021, 32(5):512-525.
- [19] Bremen S, Schmidt I, Lambertz A. Development of a high-force miniaturized wax-actuator for aerospace applications[J]. Actuators, 2019, 8(3):68.
- [20] Ferrández D, Morón C, Saiz P. Design and implementation of an automated test bench for characterizing thermal actuators [J]. Measurement, 2022, 188:110543.
- [21] 方媛媛,陆永华,刘恒,等. 基于激光测距的复合齿轮轴同轴度测量方法研究[J]. 机械制造与自动化,2025,54(5):40-45.
- [22] 王俊东,周宁,李艳,等. 一种基于机器视觉检测受电弓升降弓时间及弓头位移曲线的新方法[J]. 机械制造与自动化,2022,51(5):172-176.

收稿日期:2025-12-22

(上接第231页)

- [3] 徐昊天,胡骏,黄臣. 进气条件对多级高压压气机的稳定性影响[J]. 机械制造与自动化,2025,54(3):13-18.
- [4] 南希,马宁,兰发祥. 轴流压气机流动失稳机理与扩稳技术研究[J]. 航空动力,2020(2):47-52.
- [5] 安然,陈佳杰,杜潇,等. 基于几何设计法的航空发动机内外机匣减振控制新方法[J]. 南京航空航天大学学报,2023,55(4):622-633.
- [6] 全福祥. 航空发动机失稳预测和喘振主动控制研究[D]. 大连:大连理工大学,2024.
- [7] 成志杰,张敏,杜娟,等. 基于叶顶喷气的高速三级轴流压气机扩稳方法研究[J]. 热能动力工程,2025,40(10):26-36.
- [8] 巩赞. 引气诱导的轴流压气机非均匀流动特性及扩稳机制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.
- [9] 许登科,董旭,徐瑞泽,等. 压气机流动稳定性自适应控制方法研究进展[J]. 力学学报,2022,54(3):557-576.
- [10] 朱旭津. 航空发动机先进控制概念和高稳定性发动机控制系统研制[J]. 燃气涡轮试验与研究,2002,15(3):5-10.
- [11] Garg S. Propulsion controls and diagnostics research at NASA Glenn [C]//43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Cincinnati, OH. Reston, Virginia: AIAA,2007:5713.
- [12] Orme J, DeLaat J, Southwick R, et al. Development and testing of a high stability engine control (HISTEC) system [C]//34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Cleveland, OH. Reston, Virginia: AIAA,1998:3715.
- [13] 赵思瑞,王旭,李杜,等. 进气组合畸变对某涡轴发动机性能影响研究[J]. 推进技术,2025,46(8):86-94.
- [14] 田文涛,屠宝锋,胡骏. 旋流和总压畸变对增压级性能和稳定性影响数值仿真[J]. 海军航空大学学报,2025,40(1):213-227.
- [15] 刘泽鹏. 进气畸变与风扇耦合影响机制及模型研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2023.
- [16] 徐浩洋. 周向总压畸变对多级轴流压气机气动稳定性影响的分析方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2023.
- [17] 徐蓉. 旋流畸变对压气机气动稳定性影响的计算模型和方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2023.
- [18] 刘旭. 基于壁面静压的发动机进口总压畸变重构[J]. 航空动力学报,2023,38(6):1360-1366.
- [19] 王俊琦,李俊浩,汪涛,等. 基于神经网络的航空发动机进口总压畸变重构研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2021,34(1):21-26,33.
- [20] 叶巍,祝剑虹,肖大启,等. 涡扇发动机进气畸变容限控制研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2013,26(5):30-34.

收稿日期:2024-03-07