

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.043

基于裕度监控的发动机主动稳定性控制方法研究

李泽阳, 王志强

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要:为提高航空发动机加/减速等动态过程中的安全稳定性,提出一种基于剩余稳定裕度实时监控的发动机主动稳定性控制方法,设计主动稳定性控制仿真程序。利用该仿真程序,研究主动控制的相关参数对控制结果的影响。结果表明,可以在发动机加速过程实时控制发动机的剩余稳定裕度,确保发动机安全稳定工作;合适的控制参数能改善控制效果且可以弥补控制延迟对控制效果造成的影响。

关键词:航空发动机;气动稳定性;稳定裕度;控制;动态过程;仿真模拟

中图分类号:V231.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)04-0227-05

Research on Active Stability Control Method of Aero-Engine Based on Margin Monitoring

Li Zeyang, Wang Zhiqiang

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract:In order to improve the safety and stability of aero-engines during dynamic processes such as acceleration and deceleration, an active stability control method for aero-engines based on real-time monitoring of the remaining stability margin is proposed, and an active stability control simulation program is designed. Using this simulation program, the influence of the relevant parameters of active control on the control results is investigated. The results show that the remaining stability margin of the engine can be controlled in real time during the acceleration process, ensuring safe and stable engine operation; appropriate control parameters can improve the control effect and compensate for the impact of control delay on the control effect.

Keywords:aero engine; aerodynamic stability; stability margins; control; dynamic processes; simulations

0 引言

航空发动机是飞机重要的组成部分,可为飞机的飞行提供必要的动力^[1-2]。随着发动机性能指标不断提高和控制技术持续发展,一些先进的稳定性控制概念和技术被提出^[3-9]。20 世纪 80 年代以美国 NASA 为首的多家研究机构提出了发动机先进控制发展方向,其中就有高稳定性发动机控制的相关内容^[10]。畸变容限控制^[11]作为高稳定性控制的一种方案,强调的是在发动机运行过程中实时评估计算畸变指数以及由其引起的稳定裕度损失,通过改变工作点位置,提高稳定裕度,从而减小发动机设计稳定裕度的需求。根据美国发展的畸变容限控制方法,实现该控制需要传感器系统、畸变估算系统和稳定性管理三要素^[12]。国内对发动机畸变容限控制也开展了一定的研究^[13-17],在畸变预测方面,刘旭^[18]、王俊琦等^[19]采用神经网络方法,提出了进气畸变的解

算方案,叶巍等^[20]建立了气动稳定性分析模型,用于分析进口畸变对稳定裕度的影响并提出了相关控制措施。

本文针对发动机畸变容限控制的技术需求,开发了发动机动态过程主动稳定性控制程序。该程序主要针对发动机在加/减速动态过程中可能出现的稳定裕度不足的问题,根据给定的进口流场畸变参数,实时估算出发动机的剩余稳定裕度。根据计算结果,调节主燃油流量进行主动稳定性控制,以达到确保发动机在加/减速等动态过程中有足够稳定裕度的目的。另外考虑到发动机控制系统的响应滞后效应,本文还研究了控制延迟时间对控制效果的影响。

1 稳定性主动控制研究

1.1 控制目标

使用发动机主动稳定性控制的目的是根据发动机工作需要设定发动机工作时最小稳定裕

基金项目:国家科技重大专项(J2019-I-0011-0011)

第一作者简介:李泽阳(1999—),男,湖北武汉人,硕士研究生,研究方向为航空发动机,lizeyang1999@126.com。

度控制值,当发动机剩余稳定裕度低于最小控制值时,进行主动稳定性控制;通过选择合适的控制参数,实时控制发动机工作点位置,使其远离稳定边界,从而确保发动机能够稳定工作。

1.2 稳定裕度和剩余稳定裕度计算

稳定裕度表明发动机瞬时的工作点与稳定边界之间的距离,表征的是工作点距离失稳边界的“远近”程度。为了实时监控发动机的稳定裕度,本文引入了发动机压缩部件等转速线稳定裕度,其定义如式(1)所示

$$S_M = \frac{\left(\frac{\pi}{w_{cor}}\right)_{surge} - \left(\frac{\pi}{w_{cor}}\right)_{work}}{\left(\frac{\pi}{w_{cor}}\right)_{work}} \quad (1)$$

式中: π 和 w_{cor} 分别为工作点的压比和折合流量;下标 surge 为稳定边界点;下标 work 为工作点。

当发动机处于均匀进气状态时,稳定裕度用 $S_{M, clean}$ 表示,基于实时的工作点参数和原始的稳定边界参数根据上式计算得到;当进口流场存在畸变时,会引起发动机稳定裕度的减小,令稳定裕度的损失为 ΔS_M ,则发动机的剩余稳定裕度用 $S_{M, dis}$ 表示,可以用式(2)计算得到

$$S_{M, dis} = S_{M, clean} - \Delta S_M \quad (2)$$

畸变引起的稳定裕度的损失 ΔS_M 与综合畸变指数 W 和畸变敏感系数 α 有关

$$\Delta S_M = W \times \alpha \quad (3)$$

一般而言,发动机的畸变敏感系数 α 与发动机折合转速有关

$$\alpha = f(n_{cor}) \quad (4)$$

畸变敏感系数一般由发动机压缩部件稳定性试验或稳定性分析确定,本文不做研究,仅将其作为主动稳定性控制程序的输入参数。

1.3 控制变量

本文选用的控制变量为主燃油流量,之所以选择该控制变量,主要原因有3点:1)控制燃油流量的调节响应速度快,适合于动态过程的控制;2)不需要对发动机结构进行改动,便于实现现役发动机的升级;3)稳定性控制系统容易与发动机主控系统耦合。

1.4 发动机主动稳定性控制设计

发动机主动稳定性控制是基于发动机动态过程计算仿真模型上发展的,而动态过程仿真模型是以文献[1]关于航空发动机动态过程对气动稳定性影响相关研究为基础建立的。图1为该计算

仿真模型的计算流路。该仿真模型可以在已知发动机部件特性、主控制规律、零部件限制参数、容积效应的基础上计算发动机过渡态动态特性,可以对发动机动态过程参数变化进行分析。

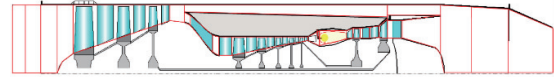


图1 计算流路

发动机主动稳定性控制的思路是:根据发动机运行安全的需要,设定合适的最小稳定裕度控制值 $S_{M, min}$;在发动机加/减速等动态过程中,利用发动机动态过程仿真程序,实时计算每一时刻下压缩部件的工作点位置,根据给定压缩部件特性,确定未考虑畸变影响下的稳定裕度;根据输入的进气畸变指数和畸变敏感系数,计算得到畸变导致的稳定裕度损失,进而计算当前状态下的剩余稳定裕度,并将其与最小稳定裕度控制值进行比较。若当前剩余稳定裕度值大于最小稳定裕度控制值,则说明该工作状态不需要进行稳定性控制,仍然由发动机主控程序对发动机进行控制;反之,则需要对发动机进行主动稳定性控制。图2为主动稳定性控制流程。

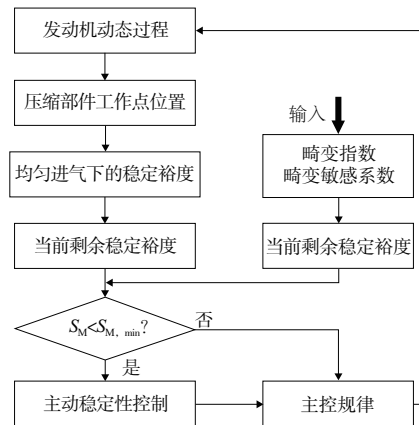


图2 主动稳定性控制流程图

本文的主动稳定性控制采用的是增量型 PID 控制方式,式(5)为主动稳定性控制律

$$\Delta u(t) = k_p(e_r(t) - e_r(t-1)) + k_i e_r(t) + k_d(e_r(t) - 2e_r(t-1) + e_r(t-2)) \quad (5)$$

式中: e_r 为输入,代表剩余稳定裕度与最小稳定裕度控制值之间的差值; $t-1$ 为前一时间步的时刻; $t-2$ 为前两个时间步的时刻; k_p 为比例系数; k_i 为积分系数; k_d 为微分系数; $\Delta u(t)$ 为 t 时刻(或当前时刻)的 PID 控制的输出量。再根据式(6)计算燃油流量的改变量 ΔG

$$\Delta G = d \cdot \Delta u(t) \quad (6)$$

式中 d 为燃油流量变化系数。为了方便整体控制,引入燃油流量变化系数 d ,表示对输出量的整体调整。得到燃油流量改变量后结合主控制程序输出的燃油流量,获得下一时间步实际输出的燃油流量值。

2 模拟仿真结果与讨论

本文研究的动态过程是从慢车状态加速到中间状态的过程。图3和图4给出了风扇和高压压气机稳态工作线和加速工作线变化情况。

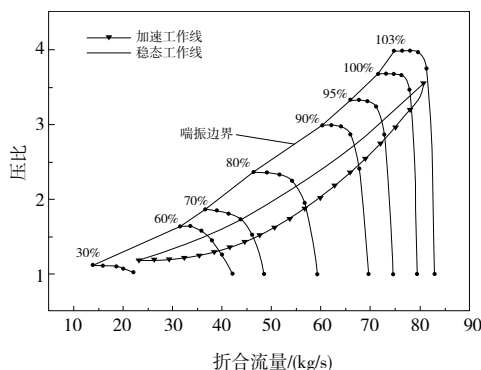


图3 风扇工作线变化

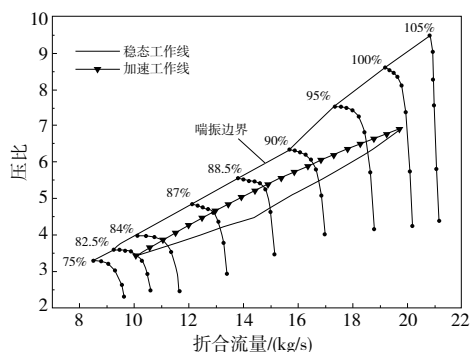


图4 高压压气机工作线变化

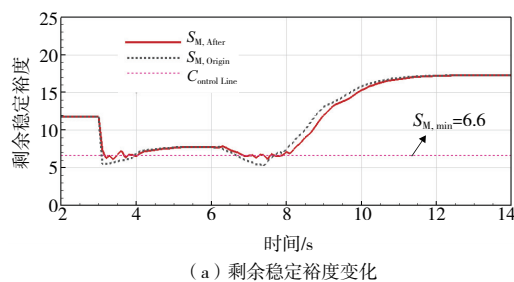
对于高压压气机而言,由于发动机油门杆位置的变化,燃油流量增加,燃烧室温度增大,由于转子惯性,转速增加量较小,因此燃烧室出口总温的增加导致压气机节流,工作点向稳定边界方向移动,稳定裕度减小。本文选用的控制手段主要是通过调节主燃油流量来实现对高压转子转速的控制。在现阶段为了研究主动稳定性控制程序的可靠性,暂不考虑畸变对风扇工作状态的影响。

设定工作条件为最小稳定裕度控制值 $S_{M,min}$ 等于 6.6,综合畸变指数 W 等于 6%,在此条件下进行稳定性主动控制模拟仿真,验证程序的功能,

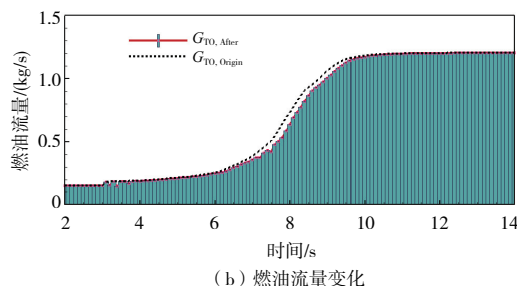
研究燃油流量变化系数 d 以及控制延迟时间对控制效果的影响。

2.1 主动稳定性控制模拟仿真

设定燃油流量变化系数为 0.1 进行主动稳定性控制仿真验证,图5为发动机剩余稳定裕度和燃油流量变化情况。



(a) 剩余稳定裕度变化



(b) 燃油流量变化

图5 剩余稳定裕度和燃油流量变化

从仿真结果可以看出,发动机在 3.1 s 时剩余稳定裕度值小于最小控制值后进入主动稳定性控制,受燃油流量减少的影响,剩余稳定裕度值减小的幅度下降,并于 4.1 s 后退出主动稳定性控制,该过程中瞬时燃油流量减少了 0.53%~20.43%,剩余稳定裕度值增加了 5.76%~33.21%。发动机在主控制规律作用下工作,并于 6.9 s 时再次进入稳定性控制,7.9 s 时退出控制。在该过程中,瞬时燃油流量减小了 1.03%~16.96%,剩余稳定裕度值增大了 5.52%~26.26%。由图5也可以发现,主动稳定性控制后压气机工作点向右下方有所偏移,稳定裕度得到一定的增加。

图6为该工作条件下发动机推力和耗油率(SFC)变化情况。在加速过程中,随着燃油流量逐渐增加,发动机推力逐渐增大,在 5.8~6 s 的时间段内,随着转速快速增加,内涵流量增加幅度较大,且增加的幅度大于燃油流量增加的幅度。因此,内涵出口总温降低,导致喷管出口流速下降,而发动机进口流速和流量都上升,最终导致推力下降。由于推力的突然下降,而燃油流量在增加,导致耗油率突然增大。出现这样的情况可能是由

于模型参数设置不够合理,但不影响本文对于主动稳定性控制程序功能的验证和研究。随着燃油流量与空气流量的增大幅度逐渐平衡,尾喷管进口总温上升,发动机推力快速增大,耗油率逐渐减小。随着加速过程的推进,推力逐渐逼近目标值,耗油率也减小到一定程度后保持稳定。在此过程中,推力在 11.8 s 时达到最大推力水平,加速时间相比无控制过程增加了约 0.3 s,平均耗油率为 1.726 kg/(h·daN),相比无控制过程增大了 1.98%。

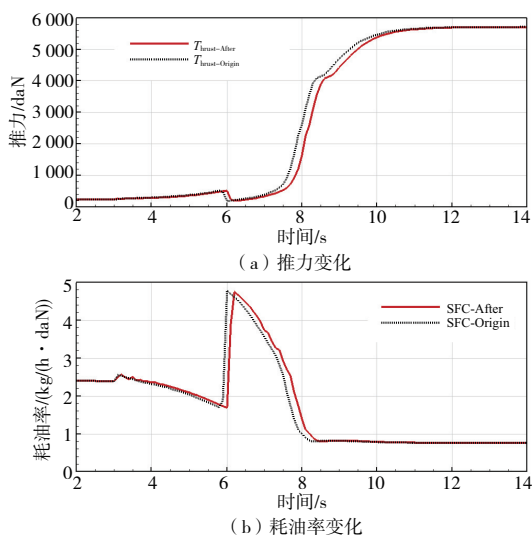
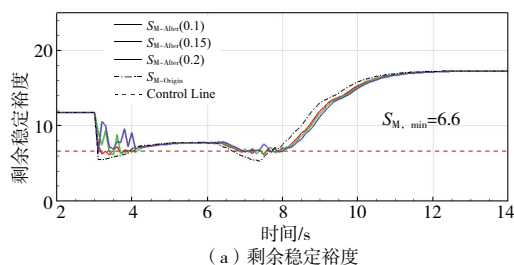
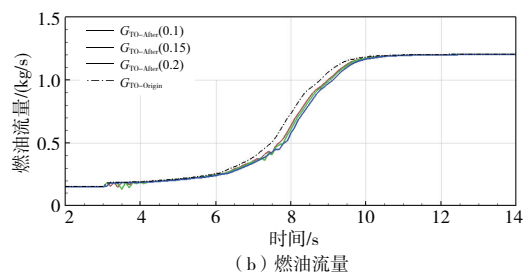


图6 推力和耗油率变化

图7和图8对比了燃油流量变化系数分别为0.1、0.15以及0.2情况下,剩余稳定裕度和燃油流量以及推力和耗油率变化情况。表1给出了3种情况下发动机加速时间和平均耗油率的变化结果。对比3种燃油流量变化系数情况下的仿真结果可以发现,3种情况都能增大发动机的剩余稳定裕度,从而达到主动稳定性控制的目的。但是,当燃油流量变化系数设定过大时,剩余稳定裕度会出现在最小控制值上下波动的情况。根据表1中的数据可知,发动机的加速时间以及加速过程平均耗油率都随燃油流量变化系数的增加呈现出增长的趋势。

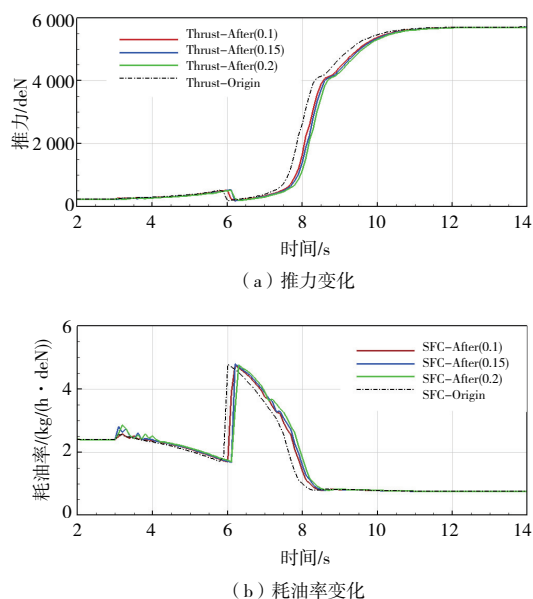


(a) 剩余稳定裕度



(b) 燃油流量

图7 不同燃油流量变化系数下剩余稳定裕度和燃油流量



(b) 耗油率变化

图8 不同燃油流量变化系数下推力和耗油率变化

表1 不同变化系数下的加速时间和平均耗油率

燃油流量 变化系数	加速 时间/s	加速时间 变化/s	平均耗油率/ kg/(h·daN)	平均耗油 率变化率/%
0(未施 加控制)	11.5	—	1.692	—
0.1	11.8	0.3	1.726	1.98
0.15	11.9	0.4	1.737	2.66
0.2	12.0	0.5	1.752	3.55

2.2 有控制延迟的条件下主动稳定性控制

在实际控制过程中当控制信号发生时,往往需要一定的时间作动装置才能接收到控制信号,并执行相应的动作,从而使工作状态发生变化。考虑控制延迟,设定延迟时间 0.1 s 进行主动稳定性控制仿真研究。

设定燃油流量变化系数 $d=0.15$ 、控制延迟时间为 0.1 s 的条件,进行主动稳定性控制仿真模

拟,图9为进行主动稳定性控制前后剩余稳定裕度和燃油流量变化情况图。

由仿真结果可知,在3.1 s时剩余稳定裕度小于最小控制值,进入主动稳定性控制,由于控制存在延迟,燃油流量在0.1 s后开始减少,剩余稳定裕度有了明显的增加,但波动较大,在4.7 s时退出主动控制。该控制过程中,瞬时燃油流量减少了2.16%~37.50%,剩余稳定裕度增加了5.37%~121.84%。在7.6 s进入第二段控制,8.6 s退出控制,该过程中瞬时燃油流量最大减少了50.17%,剩余稳定裕度最大增加了35.02%。由于主动稳定性控制的介入,燃油流量减小较大,发动机的加速过程较未施加控制时明显滞后,因此在第二段控制结束之后的相应时刻,稳定裕度相比原工作情况有所减少。

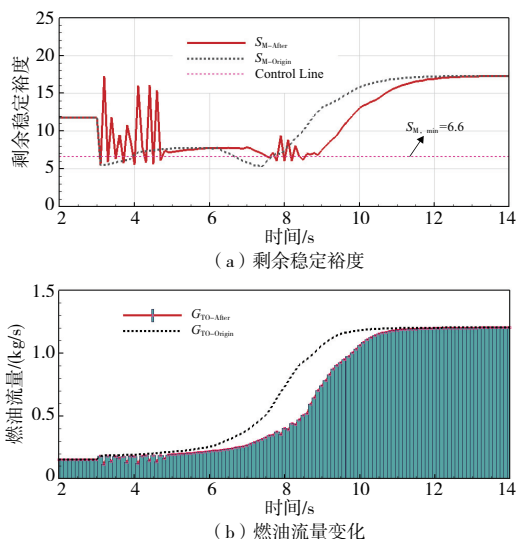


图9 有控制延迟下剩余稳定裕度和燃油流量变化

图10为加速过程中推力和耗油率变化图。由于稳定性控制过程中燃油流量下调幅度较大,因此推力会有一定程度的减少。在整个加速过程中,发动机的推力在12.6 s时达到最大水平,相比于未考虑控制延迟的情况,加速时间增加了约0.7 s,平均耗油率为1.839 kg/(h·daN)。表2给出了增加了控制延迟时间后加速时间以及平均耗油率的变化情况。根据上述结果分析可知,控制延迟会对主动稳定性控制产生不利影响,推力和耗油率的变化波动较大,加速时间和平均耗油率均有所增加,且剩余稳定裕度的波动幅度较大。通过前一节的研究可知可以通过调整燃油流量变化系数获得较好的控制效果,从而弥补控制延迟造成的影响。

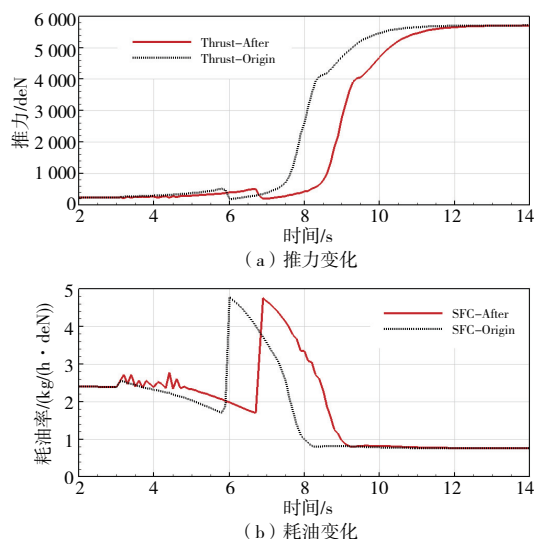


图10 有控制延迟下推力和耗油率变化

表2 控制延迟时间对加速时间和平均耗油率的影响

控制延迟 时间/s	加速 时间/s	加速时间 变化/s	平均耗油率/ kg/(h·daN)	平均耗油 率变化率/%
0	11.9	—	1.737	—
0.1	12.6	0.7	1.839	5.87

3 结语

1) 使用主燃油流量作为控制变量可以实现发动机在动态过程中主动控制剩余稳定裕度的目的,但控制的效果取决于给定合适的控制参数。

2) 燃油流量变化系数对主动稳定性控制效果有较大的影响,系数过大会导致控制过程中参数变化幅值太大,影响发动机推力的稳定性;过小又会导致对稳定裕度的控制能力减弱。控制延迟时间对发动机主动稳定性控制效果有影响,可以通过调整燃油流量变化系数弥补其造成的影响,燃油流量变化系数是决定主动稳定性控制效果的主要参数。

3) 本文发展的主动稳定性控制方法为发动机动态过程中的稳定性控制提供了新的思路,基于该方法设计的控制程序为实际情况下的主动稳定性控制实施提供了依据,但该方法的有效性和可靠性尚需通过实验进行验证。

参考文献:

- [1] 赵运生. 航空发动机气动稳定性分析系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
- [2] 胡骏. 航空压气机气动稳定性分析方法[M]. 北京:国防工业出版社,2015.

(下转第252页)

- (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