

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.012

基于 H_∞ 控制的高温磁悬浮轴承控制方法研究

赵瑞瑾,金超武,徐园平,辛宇,周扬

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘 要: 针对温度升高导致定转子间气隙、线圈磁导率与转子杨氏模量等参数变化,使得磁悬浮轴承-转子系统不确定性增加问题,从增强系统鲁棒性的角度出发,设计在宽温域内稳定运行的 H_∞ 控制器。进行磁悬浮转子动力学建模,得到转子的径向 4 自由度模型,并将其解耦为 4 路单自由度模型。分析温度对磁悬浮轴承-转子系统的影响,将其等效为系统不确定性的增加,选取 H_∞ 控制器对温度引入的不确定性进行抑制。引入混合灵敏度问题,将控制器的设计问题转化为对 3 个加权函数的选取,求解得到控制器的传递函数。对所设计控制器进行性能仿真与试验。研究结果表明: H_∞ 控制器可以保证转子从常温至 450 °C 时的稳定悬浮,相比 PID 控制器, H_∞ 控制器对外界低频干扰有更强的抵抗能力,其鲁棒性较强。

关键词: 高温;磁悬浮轴承; H_∞ 控制器;系统不确定性

中图分类号: TH133.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)02-0061-05

Research on Control Method of High Temperature Magnetic Bearing Based on H_∞ Control

ZHAO Ruijin, JIN Chaowu, XU Yuanping, XIN Yu, ZHOU Yang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To overcome the increasing uncertainty of magnetic bearing-rotor system due to the parameter changes of air gap between stator and rotor, coil permeability and rotor Young's modulus caused by temperature rise, this paper designs an H_∞ controller running stably in a wide temperature range in terms of enhancing the robustness of the system. The dynamic modeling of magnetic suspension rotor is carried out, and the radial four-degree-of-freedom model of rotor is obtained, which is decoupled into four-way single-degree-of-freedom model. The influence of temperature on the magnetic bearing-rotor system is analyzed, an equivalence to the increase of system uncertainty, and H_∞ controller is selected to suppress the uncertainty introduced by temperature. With the introduction of mixed sensitivity problem, and the design problem of the controller is transformed into the selection of three weighting functions, the transfer function of the controller is obtained by solving, and the performance of the designed controller is simulated and tested. The research results show that the H_∞ controller can ensure the stable suspension of the rotor from normal temperature to 450 °C, and has stronger resistance to external low-frequency interference and stronger robustness compared with PID controller.

Keywords: high temperature; magnetic bearing; H_∞ controller; system uncertainty

0 引言

磁悬浮轴承因具有转速高、无摩擦磨损、工作温度范围广、主动可控等特点,已经被越来越多地应用于高速旋转机械及航空航天领域。将磁悬浮轴承用于航空发动机时可为发动机设计提供新的思路,从而显著减轻发动机的质量、使得发动机结构更加紧凑、并提高发动机安全性与稳定性。要达到上述目标就要求磁悬浮轴承在高温下稳定运行^[1],而这给控制器设计带来了新的挑战。

MONTAGUE 和 JANSEN 等^[2-3]研制出具有容错能力的高温磁悬浮轴承,并在高温下分别进行

了性能测试,发现定、转子之间存在温度梯度,使得定转子间气隙增大,导致磁悬浮轴承产生的电磁力有较为明显的下降。文献[4]同样通过测量磁悬浮轴承的承载能力来说明温度对定转子间气隙变化的影响,电磁力随温度升高而降低,使得转子系统参数不确定性增大。南京航空航天大学与中国航发四川燃气涡轮研究院合作,成功研制了我国第一台具有多电发动机原理样机^[5],高温磁悬浮轴承最高工作温度为 450 °C,发动机转速达 20 000~30 000 r/min。

目前,温度对磁悬浮轴承-转子系统影响的相关研究较少,高温磁悬浮轴承的控制策略以 PID

基金项目: 航空发动机及燃气轮机基础科学中心重点项目(P2022-B-III-004-001)

第一作者简介: 赵瑞瑾(1998—),男,山西长治人,硕士研究生,研究方向为磁悬浮轴承控制技术,1257182873@qq.com。

控制为主。温度升高使得电磁力下降,位移传感器发生温漂,导致磁悬浮转子系统的不确定性增加。在试验过程中,需要对 PID 控制器参数进行反复调试,以确保转子的稳定悬浮与运行。为满足多电航空发动机高稳定性与高可靠性的要求,本文从增强系统鲁棒性的角度出发设计了 H_∞ 控制器,对温度引入的系统不确定性加以抑制,以确保转子在宽温域内始终保持稳定悬浮,从而更充分地发挥高温磁悬浮轴承用于航空发动机时的优势。

1 磁悬浮转子动力学建模

鲁棒控制适用于不确定性系统,在控制器设计过程中依赖被控对象模型,因此需要对转子进行建模,如图 1 所示。涡轮机模拟转子的径向 4 自由度动力学方程可以写为

$$\begin{cases} m\ddot{x} = f_{x1} + f_{x2} \\ J_x\ddot{\theta}_x + J_z\dot{\theta}_y\omega = f_{y1}l_a - f_{y2}l_b \\ m\ddot{y} = f_{y1} + f_{y2} \\ J_y\ddot{\theta}_y - J_z\dot{\theta}_x\omega = -f_{x1}l_a + f_{x2}l_b \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为转子质量; J_x 与 J_y 为赤道转动惯量; J_z 为极转动惯量; l_a 与 l_b 为两侧轴承处到质心的距离,具体值可以参见表 1; f_{x1} 、 f_{y1} 、 f_{x2} 、 f_{y2} 分别为转子在两侧轴承处的 x 方向与 y 方向上受的力; ω 为转子角速度。

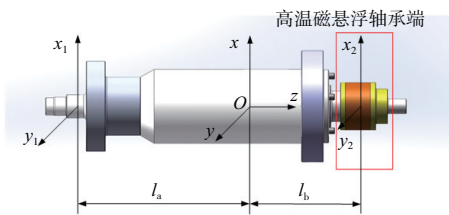


图 1 高温磁悬浮轴承-转子结构示意图

高温磁悬浮轴承-转子系统基本参数如表 1 所示。

表 1 高温磁悬浮轴承-转子系统基本参数

参数	数值
转子质量 m/kg	34.84
磁悬浮轴承 A 到质心距离 l_a/m	0.359 8
磁悬浮轴承 B 到质心距离 l_b/m	0.216 9
极转动惯量 $J_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.127
赤道转动惯量 $J_x/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.323
电流刚度 $k_i/(\text{N/A})$	714.7
位移刚度 $k_x/(\text{N/m})$	4.182×10^6

将式(1)写为矩阵形式:

$$M\ddot{q} + G\dot{q} = T_f F \quad (2)$$

式中: $q = [x, \theta_x, y, \theta_y]^T$,为质心处坐标;质量矩阵 M 、陀螺矩阵 G 与力臂矩阵 T_f 的表达式如下:

$$\begin{cases} M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_y \end{bmatrix}; G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_z\omega \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -J_z\omega & 0 & 0 \end{bmatrix}; \\ T_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & l_a & 0 & -l_b \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -l_a & 0 & l_b & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

磁悬浮轴承提供的电磁力为 F ,将其进行线性化表达:

$$F = \begin{bmatrix} f_{x1} \\ f_{x2} \\ f_{y1} \\ f_{y2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{x1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{x2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{y1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{y2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{ix1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{ix2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{iy1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{iy2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{x1} \\ i_{x2} \\ i_{y1} \\ i_{y2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)可以写为

$$F = K_i I + K_x q_a \quad (5)$$

式中 q_a 为轴承处的坐标。令: $q = T_a q_a$,则坐标变换矩阵 T_a 的表达式如下:

$$T_a = \frac{1}{l_a + l_b} \begin{bmatrix} l_b & 0 & l_a & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & l_b & 0 & l_a \\ -1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

联立式(2)、式(5)与式(6)可得:

$$MT_a\ddot{q}_a + GT_a\dot{q}_a = T_f(K_x q_a + K_i i) \quad (7)$$

此时转子模型中存在惯性耦合与陀螺效应耦合。惯性耦合理论上可以通过结构设计进行消除,在低速时,陀螺效应较弱,其影响可以忽略。将转子解耦为 4 路单自由度模型,并使用 MATLAB 进行解算,得到高温磁悬浮轴承对应的传递函数为

$$\frac{X(s)}{I(s)} = \frac{714.7}{17.54s^2 - 4.182 \times 10^6} \quad (8)$$

可以看出,该传递函数存在正极点,因此,磁悬浮轴承-转子系统不稳定,需要引入反馈控制使其达到稳定。后续将以式(8)所示传递函数为被

控对象模型,进行控制器的设计。

2 H_∞ 控制器的设计

已有研究表明,温度升高时,磁悬浮轴承定转子间气隙增大,导致电磁力下降。电磁力的下降使得磁悬浮轴承的等效支承刚度与阻尼下降^[6],导致转子的悬浮效果变差。转子材料的弹性模量减小,使得转子刚度降低,表现为转子的1阶弯曲模态频率降低,其随温度的变化规律如图2所示。

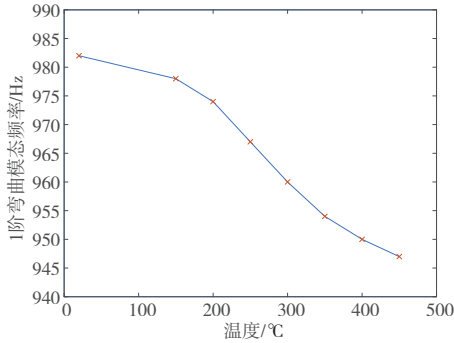


图2 温度与转子一阶弯曲模态频率的关系

图2说明温度对受控对象模型产生了影响。本文研究中将这部分变化视作系统不确定性的增加。从增强系统鲁棒性的角度出发,选取 H_∞ 控制器对温度引入的系统不确定性进行抑制。本文把 H_∞ 控制器设计问题转化为混合灵敏度问题,混合灵敏度问题是一种对闭环回路进行整形的设计方法,这种方法同时考虑到控制器对外部干扰与被控对象本身不确定性的抑制,适用于高温磁悬浮轴承工况。其原理如图3所示。

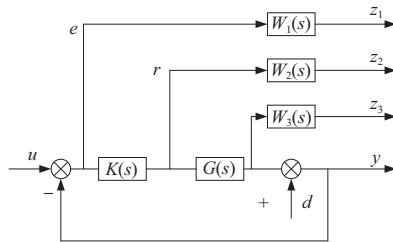


图3 混合灵敏度问题原理框图

图3中: u 为参考信号; y 为输出信号; e 为偏差信号; r 为控制器输出信号; d 为外部干扰信号。

在此引入3个函数: $S(s)$ 、 $R(s)$ 与 $T(s)$ 。灵敏度函数 $S(s)$ 为从干扰 d 到输出 y 的传递函数,用于描述闭环系统的抗干扰能力。补灵敏度函数 $T(s)$ 为从参考输入 r 到输出 y 的传递函数,用于描述系统的未建模动态及参数变化。 $R(s)$ 用于

描述系统加性摄动 $G+\Delta G$ 中摄动 ΔG 的大小。 $W_1(s)$ 为系统灵敏度函数的加权函数, $W_3(s)$ 为系统补灵敏度函数的加权函数, $W_2(s)$ 是作为不确定性而引入的加权函数。

在控制器求解时,将图3所示混合灵敏度问题转化为标准 H_∞ 混合灵敏度控制问题。此时,控制器设计问题转化为对3个加权函数的合理选取。若选取的加权函数满足式(9)所示条件,求解所得控制器使被控对象具有闭环稳定性。

$$\left\| \begin{matrix} W_1(s)S(s) \\ W_2(s)R(s) \\ W_3(s)T(s) \end{matrix} \right\|_\infty < 1 \quad (9)$$

经过反复选取与调试,最终确定3个加权函数分别为

$$\begin{cases} W_1(s) = \frac{10}{s+0.5} \\ W_2(s) = 2.5 \times 10^{-9} \\ W_3(s) = \frac{1.5s+10}{18s+5000} \end{cases} \quad (10)$$

对于磁悬浮轴承-转子系统,外界干扰的影响主要作用于低频段,而内部扰动如未建模动态、参数与结构的不确定性的影响主要作用于高频段。这就要求 $W_1(s)$ 具有低通滤波性以抑制外界的低频干扰; $W_3(s)$ 具有高通滤波性以抑制系统的内部扰动。此外, $W_3(s)$ 的截止频率要高于 $W_1(s)$ 的截止频率。由图4可知,加权函数选取合理,可以继续后续试验研究。

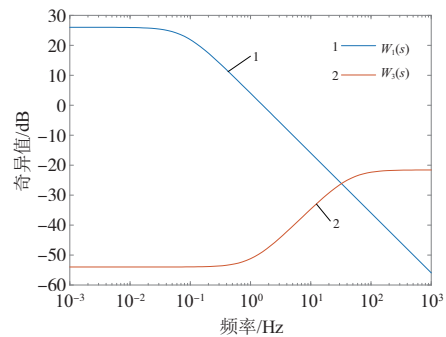
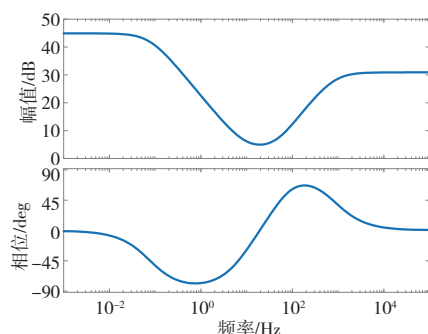


图4 $W_1(s)$ 与 $W_3(s)$ 奇异值关系

所设计 H_∞ 控制器的传递函数如式(11)所示。控制器性能评价指标为0.088,满足小于1的设计指标。

$$G(s) = \frac{28.1s^3 + 2.315 \times 10^4 s^2 + 5.061 \times 10^6 s + 2.216 \times 10^8}{s^3 + 5.818s^2 + 3.293 \times 10^6 s + 1.578 \times 10^6} \quad (11)$$

图5为式(11)所示 H_∞ 控制器的开环bode图。

图5 H_∞ 控制器开环 bode 图

由图5可以看出,该控制器在低频段有明显的积分效应,可以有效改善系统的稳态性能,在中高频段具有类似 PD 控制器的效果,可以提高系统的动态性能。

3 仿真与试验

3.1 仿真分析

为说明所设计 H_∞ 控制器用于高温磁悬浮轴承控制时的可行性,对 H_∞ 控制器与 PID 控制器的悬浮与抗扰性能进行仿真对比。 H_∞ 控制器参数如第2节所示,PID 控制器参数按照自然刚度、阻尼的方法选择。

为简化研究,将温度对磁悬浮轴承-转子系统的影响近似等效为气隙变化。设置4组仿真,气隙分别为 0.30 mm, 0.32 mm, 0.34 mm, 0.36 mm, 观察 H_∞ 控制器与 PID 控制器的起浮与抗扰性能。仿真结果表明:气隙改变时,转子达到稳态时间基本不变,超调量略有差别。在此仅给出气隙为 0.30 mm 时的起浮效果对比,如图6所示。

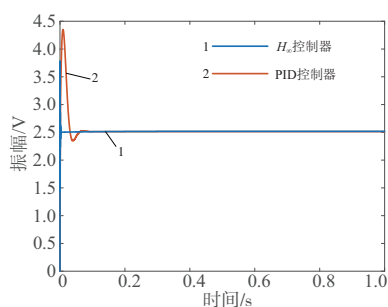


图6 控制器起浮性能对比

由图6可以看出,相比 PID 控制器, H_∞ 控制器响应更快,超调更小,具有更好的起浮性能。

对 PID 控制器与 H_∞ 控制器的抗干扰性能进行对比分析。磁悬浮轴承-转子系统受到的外界干扰多为低频干扰,因此仿真设置干扰频率为

30~60 Hz,每 10 s 阶跃上升 10 Hz。

两种控制器抗扰性能仿真对比如图7所示。

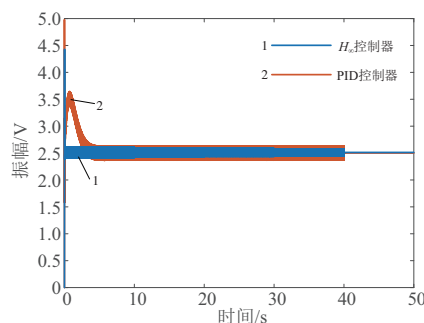


图7 两种控制器抗扰性能仿真对比

由图7可以看出,扰动频率上升时, H_∞ 控制器的幅值略微减小,PID 控制器的幅值基本无变化, H_∞ 控制器幅值的绝对值始终比 PID 控制器小。

仿真中难以模拟出时变温度场的效果。在已完成的变气隙起浮与抗干扰仿真中, H_∞ 控制器均表现出比 PID 控制器更优良的性能,初步验证了 H_∞ 控制器的可行性,以此为基础开展相关试验研究。

3.2 试验验证

在实际加热过程中,高温磁悬浮轴承端需要从常温不间断升温至 450 °C,加热及保温时间较长。为验证本文所设计控制器效果,需要在相同工况下对 H_∞ 控制器与 PID 控制器的效果进行对比。高温磁悬浮轴承具有分散的两条控制回路,两回路之间互相垂直,两路的单自由度传递函数在理论上是相同的。因此本文在试验过程中对其中一条控制回路使用 PID 控制器,另一条控制回路使用 H_∞ 控制器,体现控制变量的思想。

在升温过程中,转子分别在 200 °C、300 °C、330 °C 与 370 °C 左右均出现振幅增大乃至失稳的现象,通过增大 PID 控制器的比例系数 k_p 与微分系数 k_d ,可以使转子重新稳定。而 k_p 与 k_d 主要影响磁悬浮轴承的刚度与阻尼。因此可以认为,温度升高会引起电磁力的变化,从而导致支承特性变化,需要进行实时的参数调整以保证转子稳定悬浮,这与前文的结论一致。

图8为 200 °C 时 PID 控制器失稳及调参过程。在 4 s 之前,PID 控制器的振幅为 180 μm , H_∞ 控制器受到影响,振幅接近 20 μm 。通过调整 PID 控制器参数,PID 控制回路重新稳定, H_∞ 控制回路的振幅随之减小。此时 PID 控制器振幅约为 4.2 μm , H_∞ 控制器振幅约为 2.5 μm ,初步验证了 H_∞ 控制器用于高温工况时的有效性。

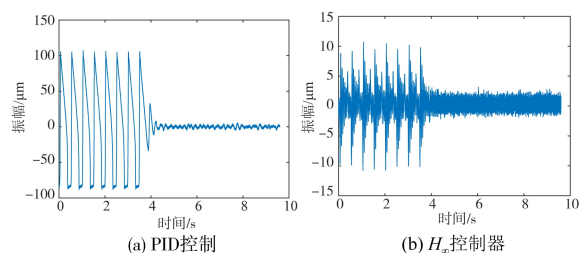


图8 两种控制器的悬浮效果对比试验

在20℃、150℃、300℃与450℃4个温度节点下引入与3.1节相同的正弦干扰,观察两种控制器的抗干扰效果,150℃时的效果对比如图9所示。

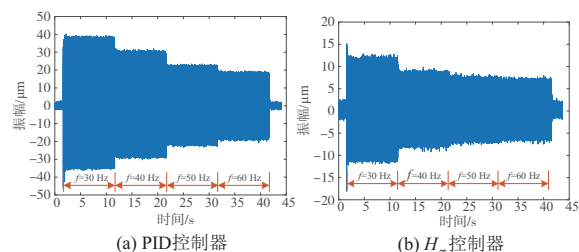


图9 150℃时两种控制器抗干扰效果对比

由图9可以看出,在受到同种正弦干扰, H_∞ 控制器表现出比PID控制器更好的扰动抑制效果,振幅下降较为明显,证明了 H_∞ 控制器具有更强的抵抗外界干扰能力。

4 结语

本文从温度对磁悬浮轴承-转子系统的影响入手,进行了理论分析,指出PID控制器用于高温磁悬浮轴承控制时的不足之处,将温度对转子系统的影响视为系统不确定性的增加,针对性地设计了鲁棒性更强的 H_∞ 控制器用于试验研究。试

验结果表明:从常温至450℃整个加热过程中, H_∞ 控制器振幅始终比PID控制器小,不会出现失稳现象,对外界低频干扰有更好的抑制效果,鲁棒性较强,证明所设计 H_∞ 控制器用于高温工况时的可行性。

参考文献:

- [1] SCHWEITZER G. Active magnetic bearings—chances and limitations [C]// Proceedings of the 6th IFTOMM International Conference on Rotor Dynamics. Sydney: UNSW Printing Service, 2002: 1-14.
- [2] MONTAGUE G, JANSEN M, PROVENZA A, et al. Experimental high temperature characterization of a magnetic bearing for turbomachinery [C]// 59th Annual Forum and Technology Display. Phoenix: American Helicopter Society, 2003 (E-13784).
- [3] JANSEN M, MONTAGUE G, PROVENZA A, et al. High speed, high temperature, fault tolerant operation of a combination magnetic-hydrostatic bearing rotor support system for turbomachinery [C]// Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Vienna: ASME, 2004, 41715: 599-606.
- [4] MINIHAN T, PALAZZOLO A, KIM Y, et al. Fail safe, high temperature magnetic bearings [C]// Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. Amsterdam: ASME, 2002, 36096: 1107-1116.
- [5] 王戈一. 磁悬浮多电发动机的研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2007, 20(4): 15-18, 35.
- [6] MA W Y, LIU G, LE Y, et al. Stiffness compensation control for centrifugal compressors based on online parameter identification of magnetic bearings [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(9): 9421-9431.

收稿日期:2023-12-21

(上接第60页)

- [18] 王利和,武志文,等. 入口气流参数对固体燃料超燃冲压发动机燃烧室性能的影响分析[J]. 兵工学报, 2014(35): 691-696.
- [19] CHERNOV V. Experimental investigation of a solid fuel scramjet using an arc heater [J]. Journal of Propulsion and Power, 2019, 35(4): 879-882.
- [20] HU M, WEI Z J, DING S Q, et al. Numerical investigation of a combined solid fuel scramjet combustor [J]. Acta Astronautica, 2018, 148: 210-219.
- [21] ZHANG H, WANG N F, WU Z W. Effect of fuel grain configuration on the thrust of a solid-fuel scramjet [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 106: 106145.
- [22] HAN W Z, WEI Z J, YANG G, et al. Numerical study

on long-duration performance of solid-fuel scramjet with size-fixed aft channel [J]. Acta Astronautica, 2021, 189: 222-234.

- [23] INGENITO A, BRUNO C. Physics and regimes of supersonic combustion [J]. AIAA Journal, 2010, 48(3): 515-525.
- [24] ZHANG H, WANG N F, WU Z W, et al. A new model of regression rate for solid fuel scramjet [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 144: 118645.
- [25] 赵承庆,姜毅. 气体射流动力学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1998.

收稿日期:2024-03-13