

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.013

# 航空发动机热管理半物理试验系统设计

尹键, 付林

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

**摘 要:** 针对当前航空发动机热管理技术研究需求, 基于某典型发动机热管理基础架构, 确定以外涵 CCA 换热为待验证的热管理方案。对比不同热管理方案验证手段, 确定以半物理试验作为发动机热管理方案的验证手段, 设计发动机热管理半物理试验系统。对该发动机热管理半物理试验系统进行调试。结果表明: 该半物理试验系统能够满足该典型发动机热管理半物理试验需要, 可为发动机热管理方案的试验验证提供技术支撑。

**关键词:** 航空发动机; 热管理; 半物理试验; 调试

**中图分类号:** V231.1    **文献标志码:** B    **文章编号:** 1671-5276(2026)02-0066-04

## Design of Semi-physical Test System for Aeroengine Thermal Management

YIN Jian, FU Lin

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

**Abstract:** To meet the current research needs of aero-engine thermal management technology, the thermal management program to be verified is identified as the external CCA heat exchange based on the thermal management infrastructure of a typical engine. The verification means of different thermal management programs are compared to identify the semi-physical test as the verification means of the engine thermal management program, and the semi-physical test system of the engine thermal management is designed. The engine thermal management semi-physical test system is debugged. The results show that the designed semi-physical test system can meet the needs of semi-physical test of the typical engine thermal management and provide technology support for the test verification of the engine thermal management program.

**Keywords:** aeroengine; thermal management; semi-physical test; debug

### 0 引言

航空发动机承担着飞机的动力供应任务, 其性能很大程度上决定着飞机的性能。随着发动机性能的快速提升, 发动机的热负荷也在急剧增加。发动机热管理技术便是在尽量保证发动机性能不变的情况下, 对发动机的热负荷进行有效处理和合理利用<sup>[1-3]</sup>。国外关于发动机热管理技术的研究一般是包含在其研究计划中。美方多部门联合提出了“经济可承受多用途先进涡轮发动机”(VAATE)计划。在该计划中, 综合热管理系统成为研究的重点对象。之后的“自适应通用发动机”(ADVENT)计划和“高效嵌入式涡轮发动机”(HEETE)计划作为 VAATE 研究计划的接力计划, 更是把整机综合热管理重要程度提到了一个新的高度, 将其列为关键研究内容, 系统地开展相关研究和验证工作, 并逐步得到实施<sup>[4-5]</sup>。梁春华等<sup>[6]</sup>通过各类信息收集, 对美国的第六代战机的核心技术进行介绍, 并结合我国战机发展水平,

提出高效热管理技术是我国发动机技术重要的发展方向。半物理试验作为一种应用普遍的技术研究手段, 在国内外航空发动机技术研究领域已有大量成果。PANGBORN 等<sup>[7]</sup>开发了一种以燃油热管理系统作为飞机综合热管理系统的核心要素, 用于飞机先进热管理策略试验验证的半物理试验系统。沈景凤等<sup>[8]</sup>开发了具有高度可视化功能的航空发动机半物理试验试车系统, 为航空发动机试车人员提供有效的试验环境。王淳<sup>[9]</sup>构建了航空发动机燃滑油系统热管理半物理试验平台, 该平台可以用于验证燃滑油系统热管理数字模型的精度。但该平台研究的对象只针对航空发动机燃滑油系统, 且并未考虑子系统对发动机性能的影响。

针对当前航空发动机热管理技术缺乏总体试验验证的需求, 本文基于某典型发动机热管理基础架构, 从现有发动机热管理研究中分析出了待验证的发动机热管理方案, 并建立对应的发动机热管理半物理试验系统, 对该半物理试验系统进

**第一作者简介:** 尹键(1998—), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 研究方向为航空发动机管理, yj3053242903@163.com。

行初步调试,结果证明试验系统能够满足发动机热管理半物理试验需求。

## 1 待验证的发动机热管理方案

### 1.1 某典型发动机热管理基础架构

航空发动机内部部件和组件众多,其总体性能受压气机、燃烧室、涡轮、喷管等各部件及燃油、滑油和空气系统等各子系统的影响。考虑到真实发动机内的空气流路极其复杂,因此本文仅对外涵空气流路和热防护系统中的压气机引气冷却高压涡轮动叶这一流路进行研究,并对该型发动机的燃油和滑油系统进行简化,确定了如图1所示的某典型发动机热管理基础架构。

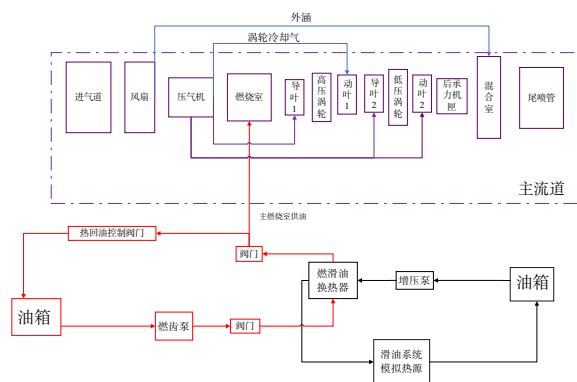


图1 某典型发动机热管理基础架构示意图

### 1.2 发动机热管理方案的确定

发动机热端部件的热防护问题一直是发动机热管理关注的重点问题。随着涡轮前温度的不断提高,而热端部件材料的耐温水平有限,因此只能通过增加压气机引气量的方式来维持涡轮等热端部件的温度。压气机引气量的增加无疑会对发动机性能产生诸多不利影响<sup>[10-11]</sup>。

可大幅度提升涡轮冷却气冷却品质并实现发动机能量综合利用预冷冷却空气(cooled cooling air, CCA)技术成为了解决上述问题的关键途径之一<sup>[12-13]</sup>。CCA技术使用的热沉包括发动机外涵空气、航空煤油及冲压空气等。通过上述低温工质从高压压气机出口引气提取热量,从而提高冷却空气的冷却品质,实现热防护系统内部自身气体能量传递与输运,最终实现热防护系统内部及用气典型部件的工作环境控制,保障其高效安全可靠地工作。

基于该典型发动机热管理基础架构和待验证的外涵CCA换热,确定了该典型发动机待验证的热管理架构,如图2所示。

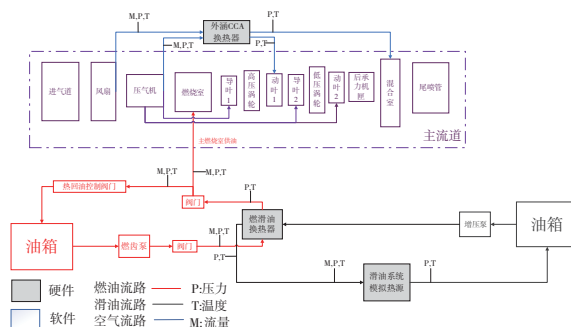


图2 某典型发动机待验证的热管理架构示意图

## 2 发动机热管理半物理试验系统

### 2.1 发动机热管理方案验证手段

为开展航空发动机热管理相关研究,首先需要构建功能完善的研究平台。目前航空发动机领域应用的技术验证手段包括:全数字仿真、半物理试验和全物理试验(试车)。全数字仿真是目前航空发动机研究领域应用最多的手段,但全数字仿真存在直观性和仿真精度差等问题。全物理试验是最直观的热管理方案验证手段,但由于其成本高昂,往往只在严苛的前期研究基础上,经过充分论证后,才会进行全物理试验。本文主要针对发动机热管理方案的初期设计进行验证,因此全物理试验并不适用。半物理试验一方面能够有效地避免全物理试验产生的高额成本,拥有比全物理试验更高的安全性;另一方面,半物理试验由于将研究的部分实物(如各种传感器、试验件等)接入到仿真回路中进行试验,能够满足全数字仿真达不到的精度要求,同时硬件的加入,提高了试验系统可信度及直观性<sup>[14-17]</sup>。因此本文就发动机热管理方案建立半物理试验系统,以实现对热管理方案的试验验证,为发动机热管理研究提供参考。

### 2.2 半物理试验系统组成与工作原理

航空发动机热管理半物理试验系统由硬件和软件组成,通过将硬件接到仿真回路中,通过工质供给系统实现硬件的真实试验,从而提高仿真精度和可行性。本文所研究的硬件主要是半物理试验系统内的物理模型件和调控系统硬件;软件主要指发动机热管理仿真模型和测控系统软件,发动机热管理仿真模型是由发动机主机模型和燃滑油系统热管理仿真模型互联形成的整体。

采用LabVIEW开发测试与控制系统上位机程序。发动机热管理半物理试验系统运行原理如

图3所示。发动机主机模型首先运行,输出的参数将传输到燃滑油系统热管理仿真模型,两模型共同将迭代计算的输出参数通过交互接口传递至LabVIEW软件,LabVIEW将各调控参数传递至控制器,控制器控制各执行机构工作,测控系统各传感器采集试验系统特定位置参数,经由采集系统传输至LabVIEW软件,并进一步反馈至发动机主机模型和燃滑油系统热管理仿真模型继续迭代计算,最后收敛输出各节点与发动机性能参数,完成整个半物理试验。

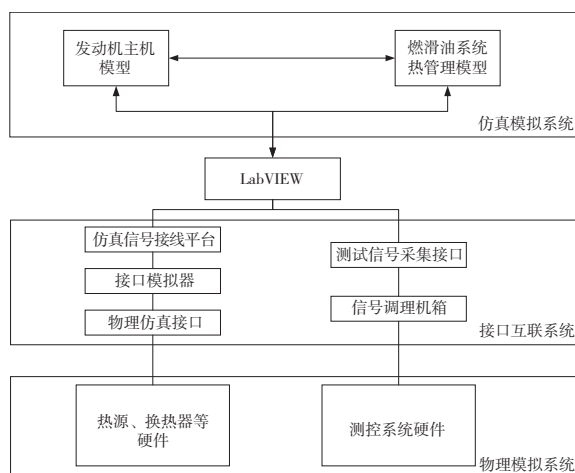


图3 半物理试验系统框架

### 2.3 硬件设计

针对半物理试验系统内的滑油系统模拟热源,采用电加热器的方式对其系统热量产生进行模拟,通过设定电加热器的加热功率实现滑油系统热量的模拟。

采用对数平均温差法,结合不同热管理方案的换热器需求,对换热器进行了设计<sup>[18-19]</sup>、加工和安装,如图4所示。

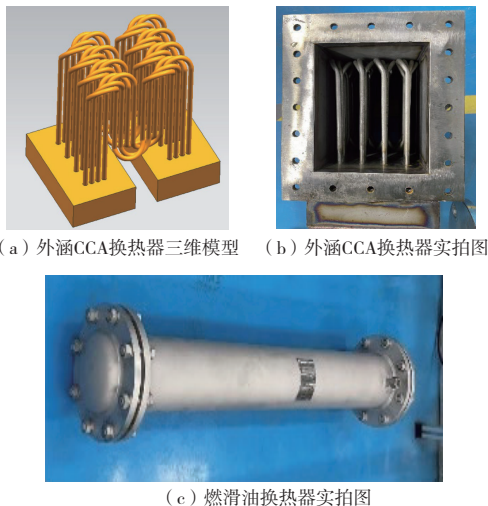


图4 换热器汇总

### 2.4 软件设计

发动机热管理半物理试验系统软件主要指发动机热管理仿真模型软件,发动机热管理仿真模型软件是由发动机主机模型和燃滑油系统热管理仿真模型互联形成的整体。

发动机热管理半物理试验系统的主机模型是基于该典型发动机开发,其特征就在于小涵道比双轴涡轮发动机,建模时不考虑加力情况,如图5所示。发动机部件数学模型按照气流流向包括进气道、风扇、压气机、燃烧室、高压涡轮、低压涡轮、混合室及尾喷管。在该发动机中,低压转轴连接了风扇与低压涡轮,高压转轴连接了压气机与高压涡轮<sup>[20-21]</sup>。各截面名称汇总表见表1所示。

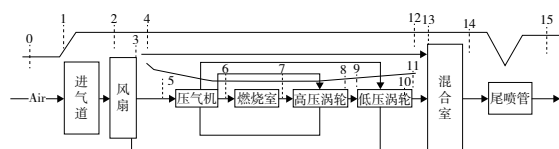


图5 发动机主机模型示意图

表1 各截面名称汇总表

| 编号 | 位置名称  | 截面编号 | 位置名称   |
|----|-------|------|--------|
| 0  | 环境空气  | 8    | 高压涡轮出口 |
| 1  | 进气道入口 | 9    | 低压涡轮入口 |
| 2  | 进气道出口 | 10   | 低压涡轮出口 |
| 3  | 风扇出口  | 11   | 内涵道出口  |
| 4  | 外涵道入口 | 12   | 外涵道出口  |
| 5  | 压气机入口 | 13   | 混合室入口  |
| 6  | 压气机出口 | 14   | 混合室出口  |
| 7  | 燃烧室出口 | 15   | 尾喷管出口  |

由于无法使用编程语言全面准确描述航空发动机的热力学动态特性,在保留发动机核心特性的前提下,在进行发动机建模时会进行部分简化。这包括忽略气流对部件的热交互作用,忽略发动机的容积效应,忽略燃烧室的燃烧延迟及燃烧动态的变化。

采用python编程语言,根据发动机气流流动方向,逐一建立发动机主机各部件模型,采用牛顿拉夫逊算法对共同工作方程进行迭代计算,当各共同工作方程残差满足收敛标准时,输出发动机主机性能参数<sup>[22]</sup>。

燃滑油系统热管理仿真模型包括了齿轮泵、管路、油滤、加热器和冷却器等部件。根据部件特性建立各部件数学模型,在部件数学模型完成后,

采用节点网络法将各部件节点进行串联,将串联的具有共同特性的部件简化为一个部件,并采用阻尼牛顿法对流动方程组和温度方程组进行迭代求解,最终完成燃滑油系统热管理模型的建立<sup>[23-24]</sup>。发动机热管理仿真模型软件如图6所示。



图6 发动机热管理仿真模型软件

## 2.5 半物理试验系统软硬件集成

在完成半物理试验系统的软硬件开发后,将各软硬件进行集成,如图7所示。



图7 软硬件集成后的半物理试验系统

## 3 半物理试验系统调试

在完成发动机热管理半物理试验系统软硬件集成后,对半物理试验系统进行调试。调试结果如图8和图9所示。

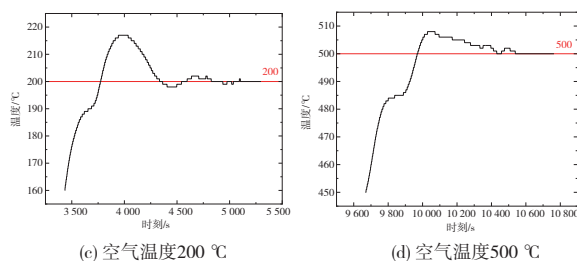
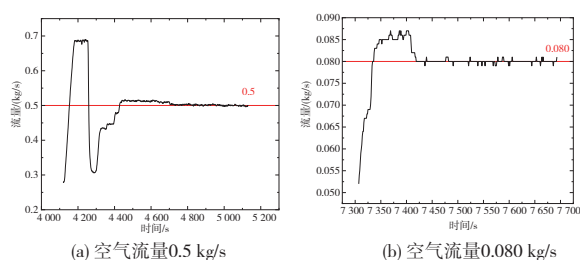


图8 热防护系统调试结果

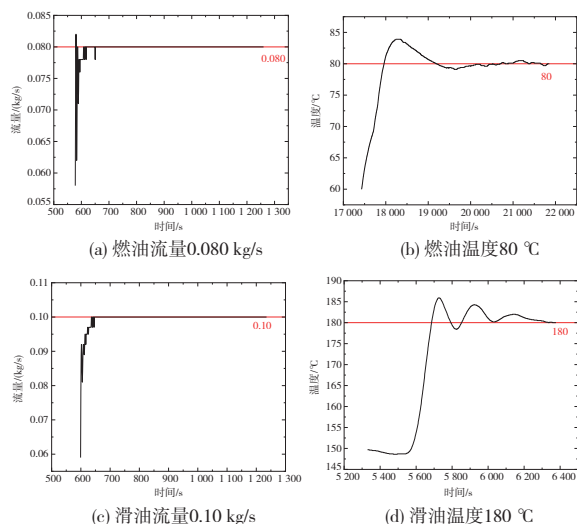


图9 燃滑油系统调试结果

调试结果证明:试验系统可以满足发动机热管理半物理试验需求。

## 4 结语

本文基于某典型发动机热管理基础架构,从现有发动机热管理研究中分析出了待验证的发动机热管理方案,确定了以半物理试验作为发动机热管理方案的验证手段,建立了相应的发动机热管理半物理试验系统,完成了该半物理试验系统的调试。调试结果证明了该半物理试验系统功能完善,并能够满足热管理方案验证需求。

## 参考文献:

- [1] 申金星,韩金华,舒领. 工程机械热管理系统设计与分析[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(2): 196-200, 219.
- [2] 赵维维,姜德仓,钟世林. 基于焓分析和代偿损失的热管理系统性能评价方法[J]. 航空动力学报, 2023, 38(12): 2829-2836.
- [3] 苏存要,连文磊,郝鑫,等. 航空发动机附件综合热管理性能分析[J]. 航空动力学报, 2022, 37(9): 1896-1904.

(下转第80页)

- [10] 杨成博,彭丽,王昆平,等. 某航空机载集成设备架正向隔振设计与方法研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44(10):215-223.
- [11] 杨国辉. APU 橡胶隔振器特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012:1-2.
- [12] P.K.弗雷克利, A.R.佩恩. 橡胶在工程中的应用的理论与实践[M]. 杜承泽, 唐宝华, 译. 化学工业出版社, 1985: 3-15.
- [13] 唐振寰. 橡胶隔振器动力学建模及动态特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013:1-4.
- [14] 刘辉,胡晓东,胡煦. 某橡胶减振器动态振动特性试验研究[J]. 特种橡胶制品, 2020, 41(6):44-48.
- [15] 师祥利,王婉颖,常金波,等. 惯组减振器温度环境适应性分析与验证[J]. 航空精密制造技术, 2025, 61(1):28-30.
- [16] 涂春潮,陈子昂,张雪颂,等. 惯性导航用氟硅橡胶减振器振动性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2023, 46(5):131-136.
- [17] 李博,唐宏刚,殷海涛,等. APU 安装系统设计与分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2010(3):42-46, 53.
- [18] 宋利剑,王波,胡冬. 隔振装置强度计算分析研究[J]. 机械工程与自动化, 2023(1):206-208, 211.
- [19] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 振动与冲击隔离器静、动态性能测试方法: GB/T 15168—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014:19-20.

收稿日期:2023-12-25

#### (上接第 69 页)

- [4] 孙明霞,梁春华. VAATE 计划下的革新性发动机[J]. 航空科学技术, 2011, 22(5):18-21.
- [5] 晏武英. 美国新一代国家级军用航空动力预研计划分析[J]. 航空动力, 2018(2):35-39.
- [6] 梁春华,索德军,孙明霞. 美国第 6 代战斗机发动机关键技术综述[J]. 航空发动机, 2016, 42(2):93-97.
- [7] PANGBORN H C, HEY J E, DEPPEN T O, et al. Hardware-in-the-loop validation of advanced fuel thermal management control [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2017, 31(4):901-909.
- [8] 沈景凤,李初蕾,武殿梁,等. 航空发动机半物理仿真试车系统的设计研究[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(5):808-816.
- [9] 王淳. 航空发动机燃滑油系统热管理半物理仿真技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2023.
- [10] 于霄,吕多,李洪莲,等. 空气冷却器在航空发动机上的应用及流动传热试验分析技术研究[J]. 计测技术, 2017, 37(3):34-38.
- [11] 温奇,裴鑫岩,田鸿宇,等. 空-油换热器对变循环航空发动机总体性能的影响研究[J]. 推进技术, 2023, 44(2):39-48.
- [12] 邓宏武,李利昂,杨家旺,等. 航空发动机超轻高效换热器的发展与应用展望[J]. 航空动力学报, 2022, 37(10):2272-2285.
- [13] BRUENING G B, CHANG W S. Cooled cooling air systems for turbine thermal management [C]// Volume3: HeatTransfer; ElectricPower; Industrialand Cogeneration. Indianapolis, Indiana, USA: American Society of Mechanical Engineers, 1999. V003T01A002.
- [14] 徐向华. 小型空间站热管理系统动态仿真与实验研究[D]. 北京:清华大学, 2003.
- [15] 沈景凤,李初蕾,武殿梁,等. 航空发动机半物理仿真试车系统的设计研究[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(5):808-816.
- [16] 赵立华,李博,丁彦杰,等. 半物理仿真系统及模型的试验分析[J]. 电子工业专用设备, 2022, 51(6):1-5, 16.
- [17] 杨胜. 汽车热管理系统半物理仿真试验平台研究[D]. 北京:清华大学, 2004.
- [18] 刘启航,闻洁,吕璐璐,等. 紧凑翅片管式空气-燃油换热器试验[J]. 航空动力学报, 2023, 38(12):2848-2860.
- [19] 钱颂文. 换热器设计手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2002.
- [20] 董威,尹家录,郑培英,等. 航空发动机及燃气轮机整机性能仿真综述[J]. 航空发动机, 2023, 49(5):8-21.
- [21] 翟雁军,范茹军,王绪辉,等. 飞机热管理系统热动态仿真及温度控制[J]. 航空动力学报, 2025, 40(5):263-271.
- [22] 孙宁彤,施小娟,吉洪湖. 航空发动机整机空气系统流动与传热数值模拟[J]. 推进技术, 2021, 42(5):1121-1128.
- [23] 李波,张东辉,洪黎. 航空发动机燃油热管理系统仿真及试验验证[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2019, 32(5):29-34.
- [24] 苏壮,毛宏图,宋冠麟. 基于热管理技术的航空发动机滑油系统热分析方法[J]. 航空发动机, 2016, 42(2):44-50.

收稿日期:2024-01-29