

文章编号: 1000-8055(2023)12-2872-11

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220059

航空发动机动态总压探针结构设计与优化

武乐群¹, 潘慕绚¹, 郑天翔¹, 丁 航²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 中国航发控制系统研究所, 江苏 无锡 214063)

摘 要: 提出一种具有强化散热结构的短测管型总压探针方案, 建立了总压探针的多物理场数值模拟模型, 提出一种基于数值模拟和改进粒子群算法的总压探针结构联合优化方法, 采用混合网格划分技术减少网格数量, 以正态分布初始化粒子位置, 同时增加种群学习因子和自适应邻域比例, 提高算法的优化效率。数值仿真结果表明, 数值模拟模型中网格顶点数量减少了 47%, 改进后优化算法迭代代数减少了 37%, 优化效率高, 获得的总压探针结构满足温度约束, 且长度短、质量轻。

关 键 词: 涡扇发动机; 动态总压测量; 短测管型总压探针; 结构优化; 散热设计

中图分类号: V233.7

文献标志码: A

Design and optimization of dynamic total pressure probe structure in aero-engines

WU Lequn¹, PAN Muxuan¹, ZHENG Tianxiang¹, DING Hang²

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Aero Engine Control System Institute,

Aero Engine Corporation of China, Wuxi Jiangsu 214063, China)

Abstract: A short-tube total pressure probe with an enhanced heat transfer structure was proposed. The multi-physical numerical simulation model of the probe was established. Based on the numerical simulation and the improved Particle Swarm Algorithm, a joint approach was proposed to optimize the probe's structure. A hybrid grid generation technology was utilized to reduce the number of meshes. The normal distribution was employed to initialize the particle's position. The social adjustment weight and the neighbor fraction were increased to improve the optimization efficiency of the algorithm. The simulation results showed that the number of grid vertices was reduced by 47%, and the iteration of optimization was reduced by 37%; the optimization efficiency was improved. The optimized total pressure probe satisfied the temperature constraints with the short length and the light mass.

Keywords: turbofan; dynamic total pressure measurement;

short tube type total pressure probe; structural optimization; heat dissipation design

航空发动机中各截面的压力是表征各部件安全可靠工作的重要物理量之一, 是发动机压比控

制^[1]、喘振保护控制^[2-3]、健康管理系统^[4-5]不可或缺的一个参数。航空发动机中高温环境较多, 如

收稿日期: 2022-02-09

基金项目: JKW 领域基金(2020-JCJQ-JJ-382); 中国航发产学研项目(HFZL2019CXY009)

作者简介: 武乐群(1997—), 男, 硕士, 主要从事航空发动机动态压力测量方面的研究。

通信作者: 潘慕绚(1977—), 女, 教授, 博士, 主要从事航空发动机智能感知与控制方面的研究。E-mail: muxuan.pan@nuaa.edu.cn

引用格式: 武乐群, 潘慕绚, 郑天翔, 等. 航空发动机动态总压探针结构设计与优化[J]. 航空动力学报, 2023, 38(12): 2872-2882. WU Lequn, PAN Muxuan, ZHENG Tianxiang, et al. Design and optimization of dynamic total pressure probe structure in aero-engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(12): 2872-2882.

小涵道比涡扇发动机高压压气机出口温度可达到 900 K^[6]。现有压力敏感元件的最高工作温度多为 600~800 K, 使其难以在此高温环境下长期稳定正常工作^[7-10], 且测量精度还会受高温影响^[11]。

为了解决航空发动机高温环境下压力测量, 目前在役发动机中通常利用导气管将该压力引出测量。长导气管会降低气体温度, 导致动态压力衰减与滞后, 所测压力无法准确反映热环境中的动态压力。为了获得精确且滞后小的动态压力信号, 研究人力图减小引气管的长度^[12-14], 但高温问题又凸显出来。

本文提出一种具有强化换热结构的短测管型动态总压探针, 利用低温气流冷却探针内气流温度, 以满足压力敏感元件耐受温度限制。强化换热结构一方面能够显著缩短探针长度, 降低动态压力衰减和滞后, 提高压力测量精度; 另一方面使得探针结构变得复杂, 结构参数增多, 例如散热结构厚度、宽度、间距等。这些结构参数对探针及其管内外气流的温度、压力等造成非线性影响。例如, 作者前期开展的单参数影响分析表明, 环肋片式强化换热结构的外径在一定范围内增加, 肋片换热面积增大, 换热能力增强; 然而肋片面积增加会使得肋片根部流速降低, 散热能力降低。因此, 采用传统传热数值模拟, 逐一确认不同结构参数组合下的总压探针性能, 较难获得满足约束的最优探针结构。综上, 针对上述存在气-固-热多物理量复杂耦合的、具有温度约束的动态总压探针结构设计与多参数优化是一个值得研究的难题。

多物理场复杂耦合下的结构设计一般有两种方法: ①建立物理问题的简化数学模型, 利用优化算法可实现多参数、多目标带约束的优化, 获得满足优化目标的一组最优结构参数^[15-16]; ②给定结构参数, 采用数值模拟求解复杂物理问题, 分析不同结构参数的仿真结果, 比选出满足设计要求的结构参数^[17-18]。对于复杂耦合物理场, 第一种方法所建的数学模型的建模误差大, 影响优化结构的有效性; 第二种方法通常基于设计者经验, 在给定的多组结构参数中比选出一组作为最终结果, 难以保证多参数复杂非线性影响下探针结构的最优性。

本文将擅长多参数寻优的智能优化方法与可精确求解复杂物理问题的数值模拟方法相结合, 针对具有强化换热结构的动态总压探针, 提出一

种基于数值模拟和改进粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)的多参数联合优化方法。建立探针多物理场数值模拟模型, 精确模拟探针内外流场参数和固体壁面参数, 并将它们传递给 PSO 算法; PSO 算法根据性能指标和约束条件调整结构参数, 再传回给数值模拟模型, 如此迭代, 直至获得满足约束且性能指标最优的一组结构参数。

本文的主要贡献有: ①提出了一种具有强化换热结构的动态总压探针, 满足压力敏感元件耐温限制, 减少动态总压的衰减和滞后, 提高压力测量精度; ②建立的多物理场数值模拟模型解决了传统流场模型和换热模型无法精确描述气-固-热多物理场耦合的问题; ③提出了基于数值模拟和改进 PSO 算法的多参数联合优化方法, 解决气-固-热复杂耦合下, 探针结构的带约束多参数优化问题, 获得满足最高温度限制、质量最小、长度最短的探针结构; ④提出混合网格生成技术, 减少网格数量; 优化初始粒子群、增加种群学习因子和自适应邻域比例, 改进 PSO 的局部搜索能力, 减少了优化时间, 提高了优化效率。

1 总压探针结构设计

本文以小涵道涡扇发动机为应用场景开展短测管型总压探针结构设计与优化。发动机典型结构及截面编号如图 1 所示, 采用通用的部件特性和变比热法建立其准一维的非线性部件级模型^[19-20], 计算获得不同飞行条件和发动机工况下的各截面参数。计算结果表明发动机内涵中的各截面温度都较高, 例如燃烧室及涡轮部件的工作温度通常可达 1 800 K 以上, 压气机出口截面(截面 3)温度最高达到 980 K 左右。目前, 高温压力传感器的耐受温度多在 600~800 K, 不能直接深入到内涵气流中测量其压力。与内涵相比, 外涵中气流温度相对较低。例如截面 13 的温度约为 500 K, 较同一轴向位置上的截面 3, 温度低且能满足压力敏感元件的耐温限制, 因此将通过短测

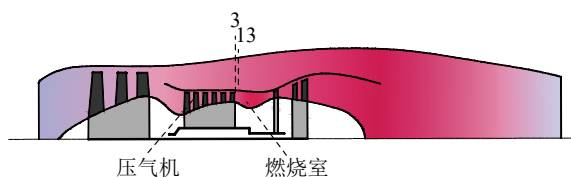


图 1 典型小涵道比涡扇发动机结构图

Fig. 1 Typical structure of small bypass ratio turbofan engine

管将内涵中热气流引导至外涵,并利用外涵中气流对其冷却并测量压力,是一种测量动态总压的新颖且可行的方案。

基于上述分析,本文提出图2所示的动态总压探针,它主要由两部分组成,即皮托管型短测管和环形肋片式强化换热结构(简称环肋片)。短测管的作用是将内涵中热气流滞止并引导至外涵冷却后供敏感元件测量其压力;环肋片用以增加探针与外涵冷气流的换热面积,增强其换热效果。图3给出探针主要结构参数,其中 s_0 为肋片初始间距, s 为肋片间距, d_1 和 d_2 分别为短测管外径和内径, d_3 为肋片外径, δ_1 为肋片厚度, δ_2 为短测管壁厚, L_{wg} 和 L_{zg} 分别为探针在内涵和外涵中长度。

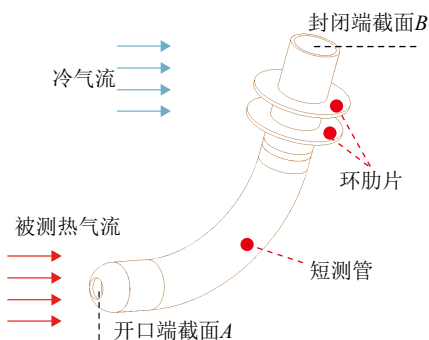


图2 总压探针结构

Fig. 2 Structure of total pressure probe

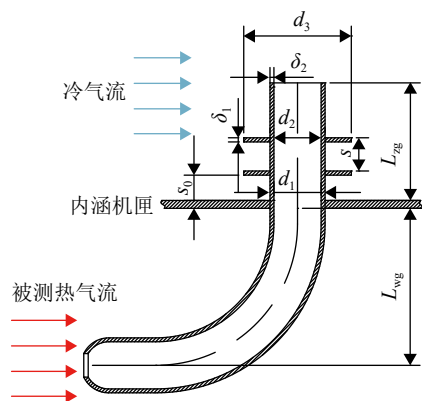


图3 总压探针结构参数

Fig. 3 Structure parameters of total pressure probe

使用中,探针安装在内涵机匣上压气机出口对应的位置(图1中的截面3),其下半部分处于内涵,开口端截面A正对待测热气流的来流方向,半部分处于外涵冷气流中,封闭端截面B为压力敏感芯体的感压面。待测热气流经截面A进入短测管滞止,压力升高。同时,随着热气流进入探针位于外涵的部分,它通过短测管壁面、环肋

片和内涵机匣与外涵中冷气流换热,使其在的封闭端截面B的温度低于压力敏感芯体的耐温限制,传感器测得其压力值。

由此可知,上述短测管和环肋片结构将直接影响冷却效果,进而影响截面B处的温度。考虑到发动机高推质比、总压探针安装空间限制等要求,接下来基于数值模拟模型和优化算法,以满足截面B温度限制且探针长度短、质量小等为目标,开展上述结构参数的优化方法研究。

2 总压探针多物理场数值模拟模型

结构优化中需要动态总压探针及其工作环境温度、压力等关键参数,因此本节开展探针多物理场数值模拟模型建模研究,为结构优化提供这些参数的精确模拟。

以某小涵道比涡扇发动机压气机出口(图1中截面3)为探针安装位置,确定机匣厚度、流道尺寸。由发动机非线性部件级模型确定探针工作环境参数。根据前期研究结果给定图3中参数初始值,建立包含总压探针、机匣以及表征内外涵冷热流道的三维数值模拟模型(见图4),其中机匣将冷、热流道完全隔离。由于探针尺寸远小于内外涵流道尺寸,因此模型几何结构考虑探针安装位置近域空间,即以探针为中心、尺寸为 $200\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的长方体,机匣简化为厚度为 1 mm 的平板。

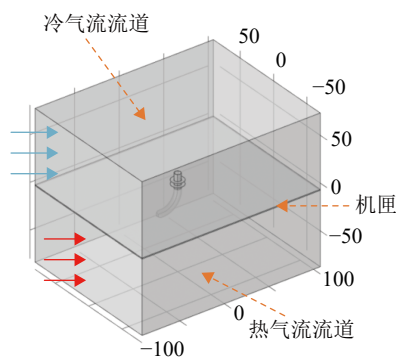


图4 总压探针多物理场数值模拟几何结构图(单位: mm)

Fig. 4 Geometric structure of multi-physical numerical simulation model of total pressure probe (unit: mm)

探针所处环境涉及到气流在弯曲短测管中的流动、冷热气流通过管壁/肋片/机匣等固体壁面的换热,以及流动-换热相互耦合的复杂物理过程。在此,分别建立流场模型、流-固换热模型和非等温流场模型描述以上三种物理过程,模型中参数的作用机制如图5所示。在流场模型中,根据冷

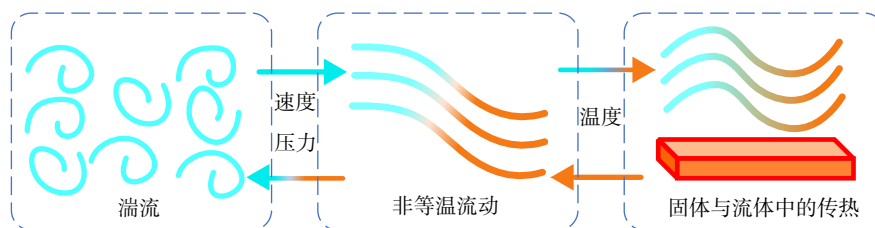


图 5 多物理场模型参数耦合作用机制

Fig. 5 Coupling mechanism of parameters in multi-physics numerical model

热气流的流态确定流场为层流或湍流。以湍流为例,模型自变量为速度和压力,在给定边界速度、压力和流动条件后,求解得到流场中速度和压力分布。流-固换热模型中,温度为主要自变量,给定边界的温度和换热条件后,求解获得气体和固体的温度分布。非等温流场模型能够模拟流体性质取决于温度的流动,在此用于描述流场模型与换热模型中参数间耦合。一方面,它根据流场模型解得的速度和压力、换热模型解得的温度,更新气流其他物性参数(如密度、运动黏度等),将它们传递给换热模型更新传热条件,计算出气流和固体新的温度分布。另一方面,根据新的温度分布,结合速度和压力,再次更新物性参数,并将它们传递给流场模型,重新计算速度和压力,如此反复直至计算收敛。非等温流场模型建立了流动和换热间的桥梁,使得气流温度和压力、速度一样随流动而变化,探针中温度模拟更加准确真实。

采用多参数联合优化方法优化探针结构时,需要反复迭代计算多物理场数值模拟模型和 PSO 算法,其中数值模拟模型计算量大、求解时间长,造成优化效率低。单次数值模拟耗时与总压探针几何模型结构复杂程度、所求解因变量个数、求解器设置等诸多因素相关,其中网格的结构和数量是影响数值模拟模型求解时间和精度的关键因素之一。

网格是在计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)中按照一定规律分布于流场中的离散点的集合,它通过将流体力学中的控制方程近似地表示为离散的代数形式,使得流体力学求解问题转化为离散的代数方程组的求解,直接关系到计算是否收敛。网格通常分为结构化网格和非结构化网格^[21-22]。前者多为六面体单元,基于此划分三维空间,网格生成速度快、数量少、计算耗时短。但是它的适用范围窄,多用于形状规则的几何结构。非结构化网格多为四面体单元,

基于此划分的三维空间模型能较好地处理不规则的复杂几何结构^[23-24]。但是,存在空间中网格填充效率不高,数量大,计算所需硬件资源多、耗时长等问题。

为了提高优化效率,本文结合两种网格的优点,采用混合网格结构划分图 4 所示的三维模型网格,在保证网格无关性的同时,减少网格数量,缩短单次数值模拟的耗时。划分基本思想是:在物理场较为复杂且对计算结果影响较大的总压探针处采用结构化网格,在探针之外的内外涵流场和机匣采用非结构化网格,对比分析不同网格参数对计算结果以及计算耗时的影响,选取满足网格无关性且耗时短的网格划分参数。网格划分结果如图 6 所示。

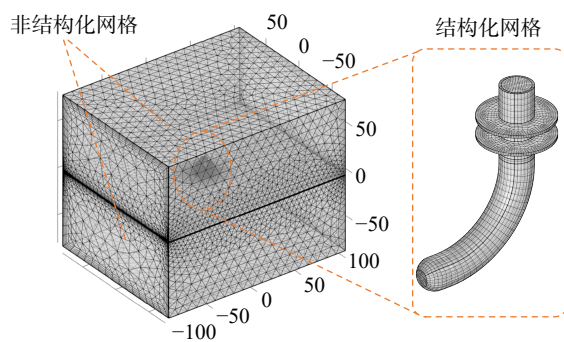


图 6 总压探针混合网格划分(单位: mm)

Fig. 6 Hybrid grid of the total pressure probe (unit: mm)

3 总压探针结构多参数联合优化方法

3.1 多参数优化问题描述

考虑到航空发动机高推质比需求和空间有限的特点,探针的质量和长度应尽量小,同时闭口端截面 B 的温度应满足压力敏感元件的耐温限制,因此探针结构优化可描述为

$$\begin{aligned} & \min f_1(\mathbf{x}) \\ & \text{s.t. } g_i(\mathbf{x}) \leq 0 \quad i = 1, 2, 3, 4 \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{x} = [s_0, s, \delta_1, d_2, L_{zg}, n] \quad (2)$$

$$f_1(\mathbf{x}) = k_1 \frac{m(\mathbf{x})}{m_0} + k_2 \frac{L_{zg}}{L_{zg0}} + k_3 k_{31} \left[\frac{T_e(\mathbf{x})}{T_d} - 1 \right]^2 \quad (3)$$

$$\begin{cases} g_1(\mathbf{x}) = \delta_1 - s \\ g_2(\mathbf{x}) = (n-1)s + s_0 + n\delta_1 - L_{zg} \\ g_3(\mathbf{x}) = \mathbf{x}_{lb} - \mathbf{x} \\ g_4(\mathbf{x}) = \mathbf{x} - \mathbf{x}_{ub} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\mathbf{x}$ 为待优化参数向量, $f_1(\mathbf{x})$ 为目标函数, $g_i(\mathbf{x})$ 为约束条件, n 为环肋片个数, m 为探针质量, m_0 和 L_{zg0} 为归一化参数, T_e 为截面 B 温度, T_d 和 T_m 分别为压力敏感元件设定工作温度和最高耐受温度, 满足 $T_d < T_m$, $\mathbf{x}_{lb}$ 和 $\mathbf{x}_{ub}$ 分别是 $\mathbf{x}$ 的下界和上界, k_1 、 k_2 和 k_3 为权重系数, 满足 $k_1 + k_2 + k_3 = 1$, k_{31} 为归一化系数, 满足

$$k_{31} \left(\frac{T_m}{T_d} - 1 \right)^2 = 1 \quad (5)$$

由式(3)可知, 目标函数 $f_1(\mathbf{x})$ 由代表质量、长度和截面 B 处温度需求的三项构成。前两项作用是使得探针质量小和长度短, 第三项是使得 T_e 尽量接近所设定的工作温度 T_d 。设计中将令 $T_d < T_m$, 使得压力敏感元件工作温度满足小于最高温度的约束, 既具有一定温度裕度, 又能够尽可能工作在较高温度, 有助于减少探针长度, 降低动态压力在短测管中的衰减, 提高探针测量精度。研究中通过调整这些权重系数来达到不同需求的优化结果。约束条件 $g_1(\mathbf{x})$ 和 $g_2(\mathbf{x})$ 用于保证探针结构合理性, $g_3(\mathbf{x})$ 和 $g_4(\mathbf{x})$ 用于保证优化结果的有效性。

3.2 联合优化方法

针对式(1)所示的优化问题, 提出基于数值模拟模型和 PSO 算法的多参数联合优化方法, 利用总压探针多物理场数值模拟模型精确求解 T_e , 利用改进 PSO 算法搜索使得 $f_1(\mathbf{x})$ 最小, 且满足约束条件式(4)的结构参数 $\mathbf{x}$ 。

优化中选择 PSO 优化算法的主要原因有两方面: ①数值模拟的计算结果会因网格生成、代数方程求解中的一些随机性而存在一定波动, 这使得传统依赖于梯度的最优化方法不再适用于此优化问题; ②现代智能优化算法中应用最广泛的有 PSO 算法^[25-26]、遗传算法^[27]、模拟退火算法^[28]、禁忌搜索算法^[29]等。其中 PSO 算法是模拟鸟群觅食过程提出的一种基于群体智能的全局搜索算

法, 与其他智能优化算法相比, 它具有群体性、并行性和记忆性, 其优化效率高、局部搜索能力强等特点, 更适合于本文中的优化问题^[30-31]。

基于数值模拟和 PSO 算法的多参数联合优化流程如图 7 所示。

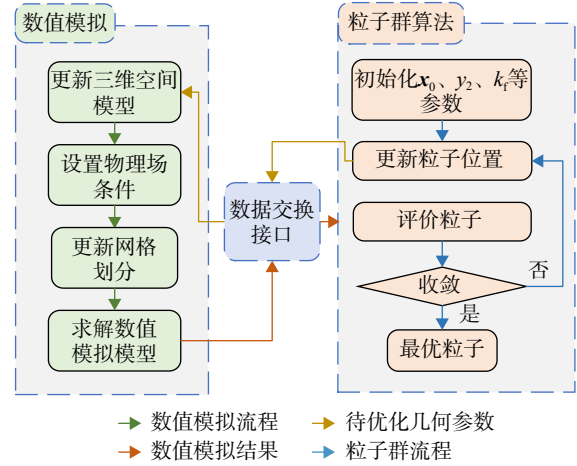


图 7 基于数值模拟和粒子群算法的联合优化方法流程

Fig. 7 Process of joint optimization method of numerical calculation and PSO

3.3 改进 PSO 算法

为了增强优化过程的计算效率和全局搜索能力, 本文采用具有自适应邻域的 PSO 算法^[32], 并通过优化初始粒子群、调整种群学习因子和自适应邻域比例, 改进 PSO 的局部搜索能力。

首先, 改进初始粒子群。采用试凑法选取不同的 $\mathbf{x}$, 对比分析它对于截面 B 的温度 T_e 、探针质量和长度的影响。结果表明 T_e 主要取决于肋片结构和长度。在一定范围内, 肋片个数 n 、外径 d_3 和探针在外涵内长度 L_{zg} 等增加会降低 T_e 。超过该范围后, T_e 不再降低。记试凑中使得 T_e 最低的一组参数为 $\mathbf{x}_0$, 以它为中心, 以 $\mathbf{x}_{lb}$ 和 $\mathbf{x}_{ub}$ 为上下界, 按照近似正态分布生成初始粒子群, 由此获得较优的初始粒子。

其次, 改进自适应邻域 PSO 算法。当粒子不满足约束式(4)中 $g_1(\cdot)$ 或者 $g_2(\cdot)$ 时, 表示它所代表的探针结构不合理, 将导致数值模拟无法计算。因此, 将这两个约束转化为惩罚项, 重新定义目标函数为

$$f(\mathbf{x}) = \begin{cases} f_1(\mathbf{x}) & g_1 \leq 0 \text{ 并且 } g_2 \leq 0 \\ f_c & g_1 > 0 \text{ 或者 } g_2 > 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 f_c 为一给定常数, 且 $f_c \gg f_1(\mathbf{x}_0)$ 。优化问题式(1)改进为

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } g_i(\mathbf{x}) \leq 0 \quad i = 3, 4 \end{cases} \quad (7)$$

收敛条件为 n_m 次的种群最佳目标函数值 $f^*(\mathbf{x})$ 的相对变化小于函数容差 σ_s 。

针对改进后的优化问题式(7), PSO 算法粒子更新律为

$$\mathbf{v} = W\mathbf{v} + y_1 u_1 (\mathbf{p} - \mathbf{x}) + y_2 u_2 (\mathbf{g} - \mathbf{x}) \quad (8)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (9)$$

式中 $\mathbf{v}$ 为粒子速度, W 为惯性因子, $W\mathbf{v}$ 代表粒子的运动惯性, u_1 、 u_2 为均匀(0,1)分布的随机数, $\mathbf{p}$ 为粒子 i 自身最佳目标函数所对应的位置, $\mathbf{g}(S)$ 为粒子 i 邻域 S 内最佳目标函数所对应的位置, y_1 为个体学习因子, 代表粒子向自身历史最佳位置逼近的趋势, y_2 为种群学习因子, 代表粒子有向邻域历史最佳位置逼近的趋势。通过学习因子 y_1 和 y_2 平衡 PSO 算法的局部搜索与全局探索能力。当 y_1 值越大, 局部搜索能力越强, 越有利于算法收敛。

此外, 粒子迭代更新时, 邻域 S 大小会自适应地变化。例如, 当粒子群的最佳目标函数 $f^*(\mathbf{x})$ 不再减小时, 增大邻域 S , 增加粒子群局部搜索能力。在此通过自适应邻域比例 k_r 调整邻域 S 的范围。

基于数值模拟和改进 PSO 算法的动态总压探针结构多参数联合优化步骤总结如下:

步骤 1 根据式(2)给定结构参数 $\mathbf{x}$;

步骤 2 基于探针多物理场数值模拟模型求解 T_e , 计算 m ;

步骤 3 由式(6)计算目标函数 $f(\mathbf{x})$;

步骤 4 根据式(9)更新 $\mathbf{x}$;

步骤 5 判断是否满足收敛条件, 若满足, 记

录最优粒子 $\mathbf{x}^*$; 若不满足, 返回步骤 2, 重复上述过程, 直至满足收敛条件。

4 面向压气机出口的动态总压探针设计与优化

4.1 压气机出口总压探针多物理场数值模拟模型与分析

由某涡扇发动机准一维的非线性部件级模型计算得到不同飞行条件和发动机工况下的压气机出口流道截面(图 1 中的截面 3)和外涵道内与压气机出口截面相对应的截面(图 1 中的截面 13)的气流参数, 如表 1 所示。表中 V 为速度, P_s 为静压, T_s 为静温, 下标 3 和 13 分别表示两个截面。由表可以看出压气机出口静温 T_{s3} 较高, 在换算高压转子转速 $n_{h,cor}=1.0$, 马赫数 $Ma=1.6$, 飞行高度 $H=8\text{ km}$ 时最高, 即 $T_{s3}=982.2\text{ K}$, 本文后续设计中则以此最恶劣情况设计和优化总压探针。

考虑图 4 所示探针数值模拟模型, 其内外涵进出口边界条件为表 1 中的静温、静压和流速(T_{s3} 、 V_3 、 T_{s13} 、 V_{13} 、 p_{s3} 、 p_{s13}), 数值模拟中考虑了内外涵气流与探针壁面、内外涵气流与机匣、探针壁面与机匣的热特性, 其他截面处为探针测点远域, 因而设为绝热边界。

在上述边界条件基础上, 首先采用非结构化网格, 经过网格无关性验证后, 分别选取 4.8×10^4 、 8.3×10^4 、 18.5×10^4 和 65×10^4 个网格节点计算模型, 得到的截面 B 的平均温度分别为 663.4 、 651.5 、 661.8 K 和 661.2 K 。结果表明网格节点数为 18.5×10^4 的温度计算值与网格节点数为 65×10^4 的温度计算值相对偏差仅为 0.09% 。考虑计算资

表 1 不同飞行条件和发动机状态下的截面 3 和截面 13 的气流参数

Table 1 Flow parameters of section 3 and section 13 under different flight conditions and engine conditions

$n_{h,cor}$	Ma	H/km	T_{s13}/K	p_{s13}/Pa	$V_{13}/(\text{m/s})$	T_{s3}/K	p_{s3}/Pa	$V_3/(\text{m/s})$
1.0	0	0	463.1	4.1×10^5	54.6	805.4	2.6×10^6	76.1
1.0	0.2	0	466.8	4.2×10^5	54.7	811.5	2.6×10^6	76.4
...	...	...	...	...	...	...	...	...
1.0	1.6	16	527.3	1.7×10^5	56.2	907.7	1.1×10^6	80.5
0.90	0	0	402.8	2.7×10^5	75.3	688.9	1.6×10^6	72.0
0.90	0.2	0	406.1	2.7×10^5	75.4	694.2	1.6×10^6	72.2
...	...	...	...	...	...	...	...	...
0.90	1.6	16	458.3	1.1×10^5	78.4	777.2	6.5×10^5	76.2
0.80	0	0	352.2	1.7×10^5	102.3	579.2	8.9×10^5	68.2
...	...	...	...	...	...	...	...	...
0.80	1.6	16	400.6	6.9×10^4	107.5	654.8	3.7×10^5	72.4

源,选择网格节点数为 18.5×10^4 。

探针 xOz 截面的温度分布如图8所示。图9为轴线上的平均温度,其中 l 为中轴线上的点到截面 A 的距离。由图9可知,探针前段(AM 段)深入内涵,温度基本保持不变;探针中段(MN 段)随着靠近外涵,气流温度逐渐降低,温度梯度不断变化;探针后段(NB 段)位于外涵,由于外涵气流冷却作用增强,探针内气流温度沿轴线持续降低,在总压探针末端处温度为 672 K,处于压力敏感芯体的耐温边界。

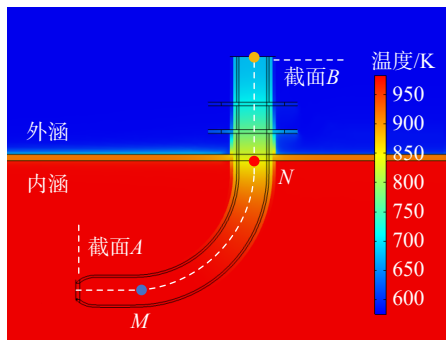


图8 探针 xOz 截面的温度云图

Fig. 8 Temperature nephogram of probe at xOz section

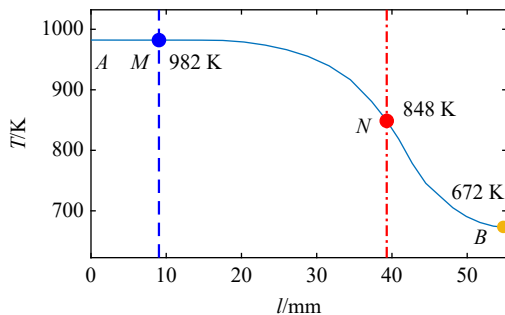


图9 总压探针内沿中心轴线的温度分布

Fig. 9 Temperature distribution along the central axis inside the total pressure probe

值得注意的是, MN 和 NB 段中管内气流温度不断降低,这与传统湍流场数值模拟求解速度和压力分布时,保持温度恒定是不同的。这种温度

的变化是由于本文建立的多物理场数值模拟模型描述了气-固-热参数间的相互耦合,从而准确模拟出管内热气流通过探针壁面、机匣将热量传导至外涵气流,其温度非线性变化过程。

由于非结构化网格的网格节点数较多,占用硬件资源大、仿真时间长,因此采用第3节中的混合网格划分技术改进数值模拟模型网格。首先,保持探针网格较密,调整内外涵非结构化网格参数,对比仿真结果与仿真时间,确定内外涵网格;其次,保持已确定的内外涵网格参数,调整探针及其内部的网格参数,通过仿真对比确定所有的网格参数。

采用非结构化网格生成内外涵的网格,主要参数有最大单元大小 $L_{e,max}$ 、最小单元大小 $L_{e,min}$ 以及最大单元增长率 $k_{e,max}$ 、网格顶点数 n_v 、网格单元数 n_e 和网格自由度 n_f 。本文由疏至密设计了3组网格参数(见表2),基于此生成3组网格,数值模拟得到截面 B 温度 T_e 和仿真时间 t_s (使用同一组硬件资源)。对比3组模拟结果发现,随着网格数量的增加,仿真耗时增加,而 T_e 变化较小。由此说明,总压探针及其附近物理场情况对模拟结果起着主要作用,当总压探针处网格较密时,内外涵网格的疏密程度对 T_e 计算结果影响较小。因此,本文后续仿真中内外涵的网格参数选择表2中第1组参数。

采用结构化网格生成总压探针处的网格,由疏到密设计4组网格参数(见表3),同样利用这4组参数生成网格并进行数值模拟,计算得到 T_e 和 t_s (见表4)。由表3和表4可知,随着网格数量增加, t_s 增加,但 T_e 并未呈现单调变化。例如,第5、6组网格与第7组网格相比, T_e 的相对偏差分别为 0.210% 和 0.208%,而网格顶点数分别减少了 46% 和 28%。因此,综合考虑计算精度与计算资源,后续仿真中选择第5组参数生成总压探针处的网格。采用上述混合网格划分技术得到的网格与文中第4.1节中仅使用非结构化网格相比网

表2 不同内外涵网格划分参数

Table 2 Grid parameters of different internal and external grid partitions

序号	网格参数			网格统计数据		
	$L_{e,max}/mm$	$L_{e,min}/mm$	$k_{e,max}$	$n_v/10^5$	$n_e/10^5$	$n_f/10^5$
1	53	11.2	1.4	1.27	3.76	8.8
2	20.9	6.42	1.25	1.5	5.2	10
3	10.8	3.21	1.15	2.1	8.5	14

表 3 不同总压探针网格划分参数

Table 3 Grid parameters of different total pressure probe grid partitions

序号	短测管网格参数/mm		环肋片网格参数/mm		网格统计数据		
	$L_{e,max}$	$L_{e,min}$	$L_{e,max}$	$L_{e,min}$	$n_v/10^5$	$n_e/10^5$	$n_f/10^5$
4	2	1.5	0.6	0.4	0.89	2.6	6.2
5	1.5	1	0.5	0.3	0.98	2.8	6.9
6	1	0.5	0.4	0.2	1.3	3.8	8.8
7	0.5	0.3	0.3	0.1	1.8	5.2	13

表 4 不同总压探针网格划分下的数值模拟结果

Table 4 Simulation results of different total pressure probe grid partitions

序号	T_e/K				t_s/min			
	模拟结果 1	模拟结果 2	模拟结果 3	平均值	模拟结果 1	模拟结果 2	模拟结果 3	平均值
4	678.50	677.31	678.83	678.21	30	33	33	32
5	657.82	658.64	656.43	657.63	36	37	35	36
6	657.12	656.32	659.42	657.62	54	55	59	56
7	656.38	658.25	654.12	656.25	83	82	81	82

格节点数量减少 47%，显著缩短了单次数值仿真耗时，为后续提高联合优化效率奠定了基础。

4.2 压气机出口总压探针结构优化

选取 $m_0=5.1$, $L_{zg0}=16.5$, $T_d=650$, $\mathbf{x}_{lb}=[1.0, 1.0, 0.4, 4.0, 10.0, 1.0]$, $\mathbf{x}_{ub}=[5.0, 5.0, 2.0, 20.0, 30.0, 5.0]$, $k_1=1/6$, $k_2=1/2$, $k_3=1/3$, $\mathbf{x}_0=[3.2, 4.2, 0.5, 6.8, 16.5, 2]$, $n_m=10$, $\sigma_s=0.001$, $y_1=1.5$, $y_2=2$, $k_f=0.4$, 采用第 2 节所建立的总压探针多物理场数值模拟模型和第 3 节中的多参数联合优化方法, 求解优化问题式(7)。此处, 结构参数优化上下界 $\mathbf{x}_{lb}$ 和 $\mathbf{x}_{ub}$ 的选取综合考虑了探针强度、制造加工能力、安装等因素。优化中每一代粒子中最优目标函数值 f_{min} 和目标函数的平均值 f_{mean} 如图 10 和图 11 所示。优化结束时, 改进 PSO 算法的优化结果为 $f_{min,imp}=0.71$, 最优粒子位置 $\mathbf{x}_{imp}^*=[1.0, 4.37, 0.49, 5.86, 16.26,$

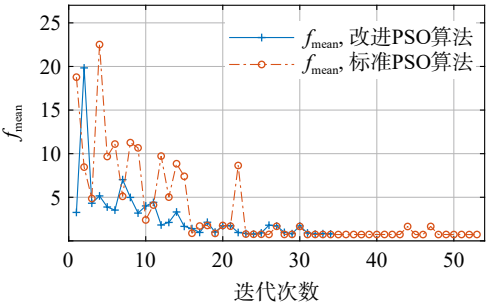


图 11 粒子群算法中平均目标函数曲线

Fig. 11 Mean objective function of particle swarm optimization

3.0], 截面 B 温度 $T_{e,imp}=649.5$, 满足温度约束 $T_{e,imp} \leq T_m$, 最优质量 $m^*=5$ 。

将各代粒子群中最优粒子列于表 5, 分析改进 PSO 算法的优化过程。表中第 0 代为试凑得到初始优化参数 $\mathbf{x}_0$, 第 25 代为最优参数 $\mathbf{x}_{imp}^*$ 。对比第 0 代、第 10 代以及第 25 代可以看出, 这三代中最优粒子对应的 $T_{e,imp}$ 均接近所设定工作温度 T_d 。第 0 代的 m 较大, L_{zg} 较小, 表明 PSO 算法通过增加肋片结构来增强整体散热效果。第 10 代中 L_{zg} 较大, m 较小, 表明 PSO 算法通过增加 L_{zg} 来增强整体散热效果。可见肋片结构和探针长度均能够影响 T_d , 通过调整目标函数中的权重系数 k_1 和 k_2 , 根据设计需求权衡两者, 获得最优结构参数。将由改进 PSO 算法获得的最优探针结构与 $\mathbf{x}_0$ 所表示的优化前结构相比, 探针长度减少了 0.24 mm, 质

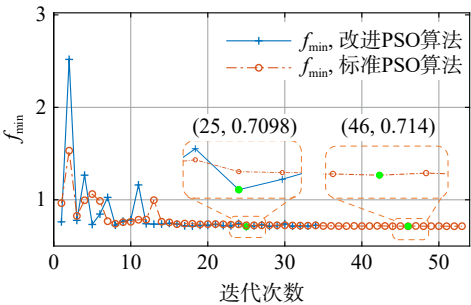


图 10 粒子群算法的最优目标函数曲线

Fig. 10 Optimal objective function of particle swarm optimization

表 5 改进后粒子群算法各代最优粒子参数统计

Table 5 Statistics of optimal particle parameters of each iteration of improved PSO

迭代次数	s_0/mm	s/mm	δ/mm	d_2/mm	n	L_{zg}/mm	m/g	T_e/K
0	3.2	4.2	0.5	13.7	2	16.5	5.1	653.8
5	3.7	4.4	0.7	11.4	2	16.7	5.1	652.4
10	2.5	4.8	0.6	12.7	2	18.8	4.4	646.9
15	1.0	5.0	0.4	8.0	1	16.5	4.6	657.2
25	1.0	4.4	0.5	11.7	3	16.3	5.0	649.5

量减少了 0.1 g, 最恶劣工况 ($T_{s3}=982.2\text{ K}$) 下封闭端截面 B 温度 T_e 减少 4.3 K。基于联合优化方法实现了总压探针结构的多参数优化。

进一步分析改进 PSO 算法的改进效果。采用标准 PSO 算法求解同样的优化问题式(7)。标准 PSO 算法中粒子初始化为均匀分布, $k_f=0.25$, $y_2=1.5$, 其他参数设置与改进 PSO 算法相同。迭代中 $f_{\min}$ 和 f_{mean} 的变化同样绘制在图 10 和图 11 中, 标准 PSO 算法的优化结果为 $f_{\min,\text{std}}=0.714$, $\mathbf{x}_{\text{std}}^*=[1.58, 1.99, 0.4, 5.17, 16.72, 3.0]$, $T_{e,\text{std}}=650.3$, T_e 也满足温度约束。

由图 10 和图 11 可以看出, 改进 PSO 算法和标准 PSO 算法的寻优过程均收敛, 且目标函数值收敛趋势一致。改进 PSO 算法的第一代粒子中 $f_{\min,\text{imp}}$ 和 $f_{\text{mean},\text{imp}}$ 较标准 PSO 算法的 $f_{\min,\text{std}}$ 和 $f_{\text{mean},\text{std}}$ 小, 这有利于后续粒子群确定优化方向。标准 PSO 算法在第 46 代找到最优粒子, 第 54 代优化结束, 而改进 PSO 算法在第 25 代找到最优粒子, 第 34 代优化结束, 算法优化代数减少 37%, 且改进 PSO 算法得到的最优目标函数更小。分析认为, 由于改进初始粒子群, 帮助粒子群快速寻找到最优粒子位置; 增加了种群学习因子和自适应邻域比例, 强化了粒子群的局部搜索能力, 由此提高了改进 PSO 算法的寻优效率和效果。

5 结 论

本文考虑航空发动机压气机出口动态总压测量需求, 设计了一种具有强化散热结构的短测管型动态总压探针; 建立了多物理场数值模拟模型, 精确模拟了存在气-固-热复杂耦合的总压探针及其工作环境中参数非线性变化; 提出了基于数值模拟和改进 PSO 算法的多参数联合优化方法, 通过数值模拟模型网格设计和 PSO 算法的改进, 提高了优化效率和优化结果。数值仿真结果表明, 本文设计并优化的动态总压探针能够在压力敏感

元件设定工作温度为 650 K、最高耐受温度为 675 K、压气机出口最高温度为 982.2 K 情况下, 测量压气机出口动态压力, 同时探针长度短(外涵部分长度约 16.3 mm)、质量小(5 g)。本文研究结果能够为动态总压探针原理样机的设计、研制和特性试验研究提供有意义的参考。

参考文献:

- [1] 曹明, 黄金泉, 周健, 等. 民用航空发动机故障诊断与健康管理现状、挑战与机遇: 气路、机械和 FADEC 系统故障诊断与预测[EB/OL]. [2022-02-09]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20210825.1351.006.html>.
CAO Ming, HUANG Jinquan, ZHOU Jian, et al. Civil aero-engine diagnostics & health management: current status, challenges and opportunities: engine gas path, mechanical FADEC diagnosis and prognosis[EB/OL]. [2022-02-09]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20210825.1351.006.html>. (in Chinese)
- [2] WERNER M, BAAR R, HALUSKA P, et al. Bidirectional flow measurement based on the differential pressure method for surge analysis on a small centrifugal compressor[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2018, 232(24): 4450-4460.
- [3] 刘卓. 航空发动机失速喘振辅助判别方法研究[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(3): 70-72.
LIU Zhuo. Research on the auxiliary discriminant method for stall and surge conditions of aero-engine[J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2019, 46(3): 70-72. (in Chinese)
- [4] 孔祥兴. 发动机健康管理: 为动力装置的安全可靠运行提供有力保障[J]. 航空动力, 2019(1): 67.
KONG Xiangxing. EHM: providing a safe and reliable operation of powerplant[J]. *Aerospace Power*, 2019(1): 67. (in Chinese)
- [5] 黄金泉, 王启航, 鲁峰. 航空发动机气路故障诊断研究现状与展望[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(4): 507-522.
HUANG Jinquan, WANG Qihang, LU Feng. Research status and prospect of gas path fault diagnosis for aeroengine[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2020, 52(4): 507-522. (in Chinese)
- [6] 潘慕绚, 黄金泉, 郭伟, 等. 脉冲爆震发动机高温压力测量方法[J]. 推进技术, 2009, 30(3): 355-359.
PAN Muxuan, HUANG Jinquan, GUO Wei, et al. Pressure measurement method under high temperature for pulse detonation engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30(3): 355-359. (in Chinese)
- [7] 何文涛, 李艳华, 邹江波, 等. 高温压力传感器的研究现状

- 与发展趋势[J]. 遥测遥控, 2016, 37(6): 61-71.
- HE Wentao, LI Yanhua, ZOU Jiangbo, et al. Present research status and prospective trend of high-temperature pressure sensor[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2016, 37(6): 61-71. (in Chinese)
- [8] GIULIANI A, DRERA L, ARANCIO D, et al. SOI-based, high reliable pressure sensor with floating concept for high temperature applications[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 87: 720-723.
- [9] KURTZ A D, NED A A, EPSTEIN A H. Ultra high temperature, miniature, SOI sensors for extreme environments[J]. IMAPS International HiTEC, 2004: 1-11.
- [10] ZIERMANN R, VON BERG J, REICHERT W, et al. A high temperature pressure sensor with β -SiC piezoresistors on SOI substrates[C]//Proceedings of International Solid State Sensors and Actuators Conference. Piscataway, US: IEEE, 2002: 1411-1414.
- [11] 潘慕绚, 刘杨琳, 李瑜. 面向硅压阻式压力传感器温度补偿的组合方法[J]. 航空动力学报, 2021, 36(6): 1188-1196.
- PAN Muxuan, LIU Yanglin, LI Yu. A combined temperature-compensation approach to silicon piezoresistance pressure sensor[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(6): 1188-1196. (in Chinese)
- [12] 叶挺, 梁庭, 张文栋. 压力测试中引压管的动态特性研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2011, 32(2): 222-226.
- YE Ting, LIANG Ting, ZHANG Wendong. Dynamic characteristic of transmission tube in pressure measurement system[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2011, 32(2): 222-226. (in Chinese)
- [13] 张红艳, 徐鹏. 关于传压管道的特性分析[J]. 应用科技, 2009, 36(11): 20-23.
- ZHANG Hongyan, XU Peng. The characteristics of pressure transmission pipeline[J]. Applied Science and Technology, 2009, 36(11): 20-23. (in Chinese)
- [14] 王维新, 谢壮宁. 测压传压管路系统动态特性的试验分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2005, 35(4): 392-396.
- WANG Weixin, XIE Zhuangning. Experimental investigation on the dynamic characteristics of tubing systems for fluctuating wind pressure measurements[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2005, 35(4): 392-396. (in Chinese)
- [15] 李嘉, 李华聪, 王万成, 等. 燃油离心泵多目标优化设计及仿真分析[J]. 推进技术, 2021, 42(3): 666-674.
- LI Jia, LI Huacong, WANG Wancheng, et al. Multi-objective optimization design and simulation for fuel centrifugal pump[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(3): 666-674. (in Chinese)
- [16] 黄协思. 疲劳约束下航空发动机涡轮盘结构优化设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- HUANG Xiesi. Structure optimization design of aero-engine turbine disk under fatigue constraints[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [17] 范红伟, 艾青牧, 李家新, 等. 某航空发动机主轴轴承参数优化设计[J]. 机械, 2020, 47(11): 17-23.
- FAN Hongwei, AI Qingmu, LI Jiaxin, et al. Optimum design of spindle bearing parameters for an aeroengine[J]. Machinery, 2020, 47(11): 17-23. (in Chinese)
- [18] 崔华盛, 赵振峰, 王恩华, 等. 某航空活塞发动机进气系统优化设计[J]. 航空动力学报, 2019, 34(9): 2063-2070.
- CUI Huasheng, ZHAO Zhenfeng, WANG Enhua, et al. Intake system optimization study and design for an aircraft piston engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(9): 2063-2070. (in Chinese)
- [19] 潘慕绚, 陈强龙, 周永权, 等. 涡扇发动机多动力学建模方法[J]. 航空学报, 2019, 40(5): 99-110.
- PAN Muxuan, CHEN Qianglong, ZHOU Yongquan, et al. A multi-dynamics approach to turbofan engine modeling[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(5): 99-110. (in Chinese)
- [20] 周文祥, 黄金泉, 黄开明. 航空发动机简化实时模型仿真研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(2): 251-255.
- ZHOU Wenxiang, HUANG Jinquan, HUANG Kaiming. Real-time simulation system for aeroengine based on simplified model[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(2): 251-255. (in Chinese)
- [21] 刘晶. 结构与非结构网格的生成、转化及应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- LIU Jing. Structured grid and unstructured grid generation, translation and application[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
- [22] 周帅, 付琳, 汪丁顺, 等. 航空发动机数值仿真中网格生成技术的应用与发展[J]. 航空动力, 2021(1): 43-47.
- ZHOU Shuai, FU Lin, WANG Dingshun, et al. Application and development of grid generation technology for aero engine simulation[J]. Aerospace Power, 2021(1): 43-47. (in Chinese)
- [23] 董亮. 非结构化网格生成技术研究及应用[D]. 江苏: 镇江: 江苏大学, 2010.
- DONG Liang. The study and application of unstructured mesh generation technique[D]. Zhenjiang Jiangsu: Jiangsu University, 2010. (in Chinese)
- [24] 苏静波, 殷佩生, 邵国建. 工程中有限元网格生成技术的研究和应用[J]. 工程图学报, 2008, 29(6): 13-19.
- SU Jingbo, YIN Peisheng, SHAO Guojian. Research and application on finite element mesh generation technique in engineering[J]. Journal of Engineering Graphics, 2008, 29(6): 13-19. (in Chinese)
- [25] 苗卓广, 谢寿生, 吴勇, 等. 基于改进粒子群算法的航空发动机状态变量建模[J]. 推进技术, 2012, 33(1): 73-77.
- MIAO Zhuoguang, XIE Shousheng, WU Yong, et al. Aero-engine state variable modeling based on the improved particle swarm optimization[J]. Journal of Propulsion Technology, 2012, 33(1): 73-77. (in Chinese)
- [26] 刘楠, 黄金泉. 应用改进粒子群算法的涡轴发动机性能寻优[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(3): 303-308.
- LIU Nan, HUANG Jinquan. Performance seeking of turbo-shaft engines based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(3): 303-308. (in Chinese)
- [27] 杨弘彬, 刘山, 靳广在, 等. 基于遗传算法优化小波网络的柔性喷管力矩特性辨识方法[J]. 航空动力学报, 2022, 37(9): 1936-1945.
- YANG Hongcheng, LIU Shan, JIN Guangzai, et al. Identification of flexible nozzle torque properties based on wavelet neural network optimized by genetic algorithm[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(9): 1936-1945. (in Chinese)
- [28] 郭彩杏, 郭晓金, 柏林江. 改进遗传模拟退火算法优化BP算法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2019, 40(10): 2063-2067.
- GUO Caixing, GUO Xiaojin, BAI Linjiang. Research on improved BP algorithm for genetic simulated annealing algorithm[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2019, 40(10): 2063-2067. (in Chinese)
- [29] 张震, 魏鹏, 李玉峰, 等. 改进粒子群联合禁忌搜索的特征

- 选择算法[J]. 通信学报, 2018, 39(12): 60-68.
- ZHANG Zhen, WEI Peng, LI Yufeng, et al. Feature selection algorithm based on improved particle swarm joint taboo search[J]. Journal on Communications, 2018, 39(12): 60-68. (in Chinese)
- [30] 魏智辉, 梁言. 进化粒子群算法在航空发动机模型求解中的应用[J]. 工程与试验, 2019, 59(4): 54-55.
- WEI Zhihui, LIANG Yan. Application of evolutionary particle swarm optimization algorithm in aero-engine model solving[J]. Engineering & Test, 2019, 59(4): 54-55. (in Chinese)
- [31] RAMADHANI B N I F, GARSIDE A K. Particle swarm optimization algorithm to solve vehicle routing problem with fuel consumption minimization[J]. Jurnal Optimasi Sistem Industri, 2021, 20(1): 1-10.
- [32] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]// Proceedings of ICNN'95 International Conference on Neural Networks. Piscataway, US: IEEE, 2002: 1942-1948.

(编辑: 秦理曼)