

航空发动机滑油系统建模、优化及应用研究

黄世杰¹, 张振生¹, 蔡景^{1*}, 张瑞²

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 211106; 2. 中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 110015)

摘要: 针对基于试验方法开展滑油系统监测、诊断、预测等工作具备成本高、周期长等缺点, 开展滑油系统仿真模型构建与优化并提出了模型在滑油系统健康管理中的应用。基于滑油系统元件物理特性, 以某发动机滑油系统为例构建通风、供油、热力、回油等子系统模型, 并开展了滑油全系统模型构建与迭代求解; 结合粒子群、遗传算法对模型进行优化, 对比优化结果表明粒子群算法具有较好的收敛性与优化效果, 不同典型工况下滑油系统工作参数平均误差从 10% 以上降至 2% 左右, 具有一定的准确性; 基于模型的可扩展性, 结合滑油系统健康管理要求分析模型在滑油监测、诊断、预测等方面的应用, 为滑油系统的健康管理提供支撑。

关键词: 航空发动机; 滑油系统; 粒子群优化; 遗传算法; 健康管理

中图分类号: V233.4 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2025)05-1266-14

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-1599

引用格式: 黄世杰, 张振生, 蔡景, 等. 航空发动机滑油系统建模、优化及应用研究[J]. 系统仿真学报, 2025, 37(5): 1266-1279.

Reference format: Huang Shijie, Zhang Zhensheng, Cai Jing, et al. Research on Modeling, Optimization and Application of Aeroengine Oil System[J]. Journal of System Simulation, 2025, 37(5): 1266-1279.

Research on Modeling, Optimization and Application of Aeroengine Oil System

Huang Shijie¹, Zhang Zhensheng¹, Cai Jing^{1*}, Zhang Rui²

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Civil aviation college, Nanjing 211106, China;

2. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In response to the high cost and long cycle of using experimental methods for monitoring, diagnosing, and predicting lubricating oil system, a simulation model for oil system is constructed and optimized, and the application of the model in health management of oil system is proposed. Based on the physical characteristics of the components in the oil system, subsystem models for ventilation, oil supply, thermodynamics, and oil return are constructed using a certain engine oil system as an example, and the whole oil system model is constructed and solved iteratively. The model is optimized by combining particle swarm optimization and genetic algorithm. The comparative optimization results show that the particle swarm algorithm has good convergence and optimization effect. The average error of the working parameters of the oil system under different typical working conditions is reduced from more than 10% to about 2%, indicating a certain degree of accuracy. Based on the scalability of the model and combined with the requirements of health management in the oil system, the application of the model in oil monitoring, diagnosis, prediction, and other aspects is analyzed to provide support for the health management of the oil system.

Keywords: aeroengine; oil system; particle swarm optimization; genetic algorithm; health management

收稿日期: 2023-12-29

修回日期: 2024-02-04

第一作者: 黄世杰(1998-), 男, 硕士生, 研究方向为测试性与健康管理。

通信作者: 蔡景(1976-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为持续适航及健康管理。

0 引言

航空发动机工作在高转速、高载荷、高温的极端环境中, 滑油系统承担着对承力和传动部件进行冷却、润滑、清洁等功能。滑油系统运行状况直接影响发动机的工作状况, 一旦滑油系统出现故障, 直接影响发动机的传动系统与主轴承, 会造成严重的后果。因此, 在发动机运行过程中, 对滑油系统进行监测和诊断对于飞行安全和飞行任务的执行具有重要意义^[1]。滑油系统与发动机高度集成, 其运行状况与发动机工作状态息息相关, 基于试验方法开展监测和故障诊断, 具有周期长、成本高等缺点。通过建立高精度模型来开展监测和诊断具有成本低、周期短、准确率高等优点, 具有较广泛的应用。

西方国家航空技术起步较早, 在 20 世纪 50 年代就已掌握了滑油系统设计技术, 英美法等国建立了发动机转子及润滑技术研究发展中心和相应的科研队伍, 具备科学完备的滑油系统性能分析方法^[2]。美国的 NASA 更是拥有自主开发的计算机仿真软件 SSME^[3]、GFSSP^[4]等, 由于较高的战略价值而限制对外输出。文献[5]利用 Flowmaster 建立了供油系统的仿真模型, 但相对误差在 10% 左右。文献[6]基于 AMESim 建立了某型发动机供油系统模型, 并开展了典型故障模拟; 文献[7]在其利用模拟得到的故障数据基础上, 研究了基于改进 SVM 的供油系统故障诊断方法。此外, 对于通风子系统^[8]、回油子系统^[9]及换热特性^[10]也有相关的研究。文献[11]利用试飞数据建立了滑油系统“黑盒”模型, 可以用于参数实时监控, 但缺乏可解释性且依赖大量数据。文献[12]研究了滑油系统稳态模型, 但需要假设经验公式计算轴承腔压力。文献[13-14]基于数学原理和试验数据建立了全系统模型, 但文献[13]缺乏验证, 文献[14]没有进行优化导致误差较大, 不满足工程要求。因此, 滑油系统建模趋势主要是以全系统为对象、基于可扩展工具进行联合仿真并开展优化和验证。

发动机健康管理提出了对滑油系统主要参数及典型故障进行监测和诊断, 需要滑油系统与发动机模型进行协同仿真。Simulink 作为半物理仿真平台, 具有适应面广、结构逻辑清晰等优点, 可以与多种软件进行联合仿真^[15], 具备较高的可扩展性。因此, 本文拟基于 Simulink 建立了通风、供油、热力、回油等子系统模块库, 进一步开展全系统模型在不同工况下的迭代求解。为了进一步提高模型精度, 本文利用粒子群算法、遗传算法等优化算法, 设置修正系数对模型进行优化, 通过对比不同算法优化结果得到不同工况下的最优模型。

本文结合某型发动机健康管理系统用户提出的对滑油系统的需求, 基于建立的滑油系统仿真模型, 分析了滑油系统仿真模型在发动机健康管理领域, 特别是滑油系统工作参数监测、典型故障诊断及预测等方面的应用场景。

1 滑油系统模型构建及验证

1.1 滑油系统工作逻辑

滑油系统可分为开式和闭式两种, 开式结构简单, 适用于一次使用或短时工作的高温发动机; 闭式结构复杂, 可重复使用, 多用于目前的航空发动机。以某型全流量单回路反向循环滑油系统为对象建立仿真模型, 其油路原理如图 1 所示, 其中圆圈中内容表示该型滑油系统该位点的监测参数。

滑油系统在物理结构上主要由通风系统、供油系统、回油系统组成。通风子系统是指主轴承腔至发动机外的管路与部件, 其作用是把主轴承腔中密封装置泄露的空气排至机外, 使密封增压气流始终保持正压差, 包括通风器、高空活门和通风管路等^[16]。为了方便建模计算, 将供回油子系统中关于温度计算的模块独立出来, 组成热力子系统。供油子系统是指从油箱到发动机各润滑点喷嘴处的管路与部件, 其作用是给轴承、齿轮

等提供适宜温度的定量滑油，包括滑油箱、供油泵、滑油滤、调压活门、旁通活门、管路和喷嘴等；回油子系统是指从各润滑腔回油口至油箱的管路及部件，其作用是把轴承腔、齿轮箱等工作过的滑油抽回，泵送回滑油箱中，包括回油泵、油气分离器、磁屑检测器、回油滤和管路等。

综合上述，通风子系统主要涉及两相流(气多油少)的压力特性计算。供油子系统主要涉及滑油的流阻特性、压力特性计算。回油系统主要涉及两相流(油多气少)的压力特性计算。热力系统主要涉及滑油的换热特性计算。滑油系统流量特性、压力特性、换热特性的数学描述为

$$\begin{aligned} Q_i &= f_1(\Delta p_i, T_i, G_i) \\ \Delta p_i &= f_2(Q_i, p_i, T_i, G_i) \\ \Delta T_i &= f_3(Q_i, p_i, T_i, G_i) \end{aligned} \quad (1)$$

式中： Q_i 、 Δp_i 、 ΔT_i 、 p_i 、 T_i 、 G_i 分别为第 i 个部件的流量、压差、温差、入口压力、入口温度及结构参数集。

基于各子系统的工作原理，分析子系统之间的输入输出关系(如图 2 所示)，具体逻辑为①根据轴承腔封严气体压力和温度计算各个轴承腔和齿轮箱的压力；②假设滑油箱出口及主供油路滑油温度，计算前、中、后轴承腔及齿轮箱油路供油量，并输入至热力系统计算滑油箱出口及主供油路滑油温度，对比假设值进行迭代直至计算值与假设值误差在可接受范围内；③基于滑油系统 3 个子系统计算结果，进行回油系统迭代求解。

1.2 子系统建模

通风系统为轴承腔保持适合的压力。供油系统为发动机轴承、齿轮提供适宜流量的滑油以起到润滑、冷却作用。回油系统通过抽回、过滤、除气使滑油循环使用。热力系统主要计算发动机对滑油的加热量以及滑油在滑油箱、散热器中的散热量。

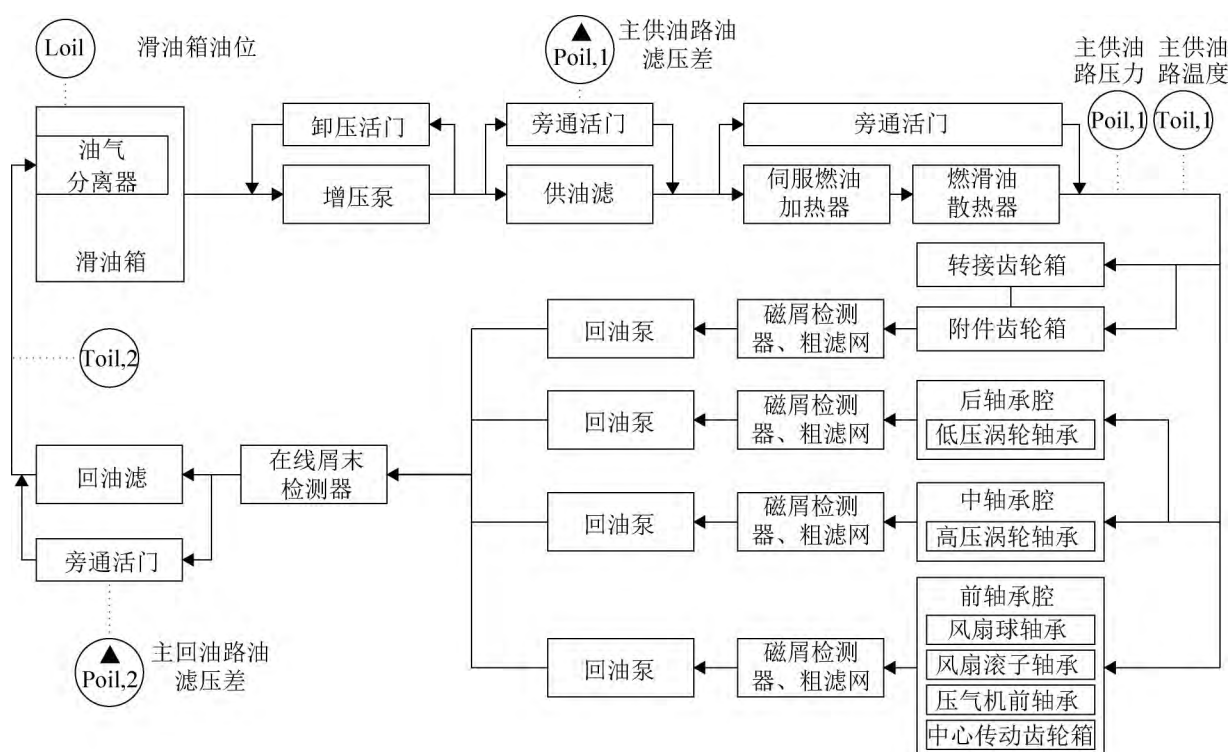


图 1 滑油油路系统原理
Fig. 1 Schematic diagram of lubricating oil circuit system

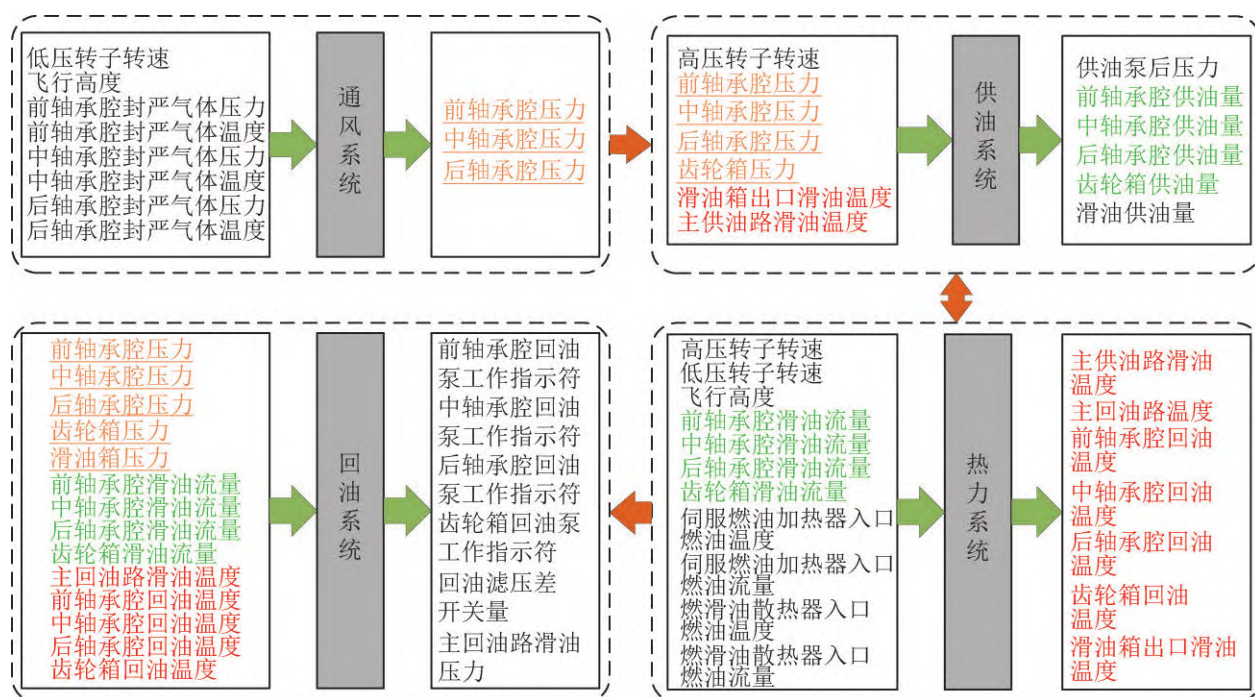


图2 滑油系统各子系统输入输出关系

Fig. 2 Input output relationship diagram of various subsystems of the oil system

滑油系统建模采用部件法建模的方法, 通过连接各个部件模型构成方程组, 通过迭代求得滑油系统工作参数。由于通风系统的输入与回油系统的输出没有与其他子系统的交联, 因此未涉及子系统间的迭代求解, 仅供油和热力系统涉及子系统间的迭代计算。

另外, 由于轴承腔内部涉及复杂的油气混合、流动换热, 难以在一维模型中对其进行准确表征。对此, 基于流体网络法思想, 将滑油系统抽象为由节点和元件组成的网络系统, 对部件内部的动态过程不作研究, 仅表示稳态下部件进出口的参数值。

1.2.1 供油系统

供油子系统建模基于流体网络和部件法建模思想, 通过建立各个部件模型并进行连接来搭建子系统模型。供油子系统通过供油泵从滑油箱抽取滑油并增压, 通过管路依次经过供油滤、伺服燃油加热器、燃滑油散热器后进行分流, 最后分别流入前、中、后轴承腔和齿轮箱进行润滑和冷却, 完成子系统模型搭建。

对部件模型连接完毕后, 还需要加上迭代算

法才能完成子系统的求解。供油子系统计算涉及流量、压力特性计算^[17], 迭代原则为流量平衡或压力平衡。以流量平衡为例, 其迭代终点为滑油总供油量等于前、中、后轴承腔和齿轮箱供油量之和, 具体流程如图3所示。

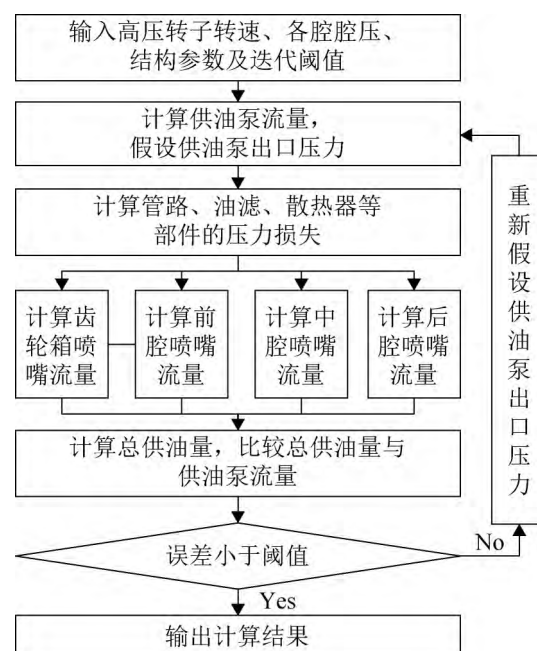


图3 供油子系统迭代流程

Fig. 3 Iteration process of oil supply subsystem

建成后的模型如图 4 所示，主要涉及供油泵流量特性，管路、油滤、散热器阻力特性，喷嘴流量特性等计算内容，模型输入为前、中、后轴承腔压力，输出为前、中、后轴承腔及滑

油箱供油量，迭代初猜值为供油泵后压力，理论上初猜值可以为任意值，这里在该型滑油系统供油泵后压力设计值范围内任取一随机数作为初猜值。

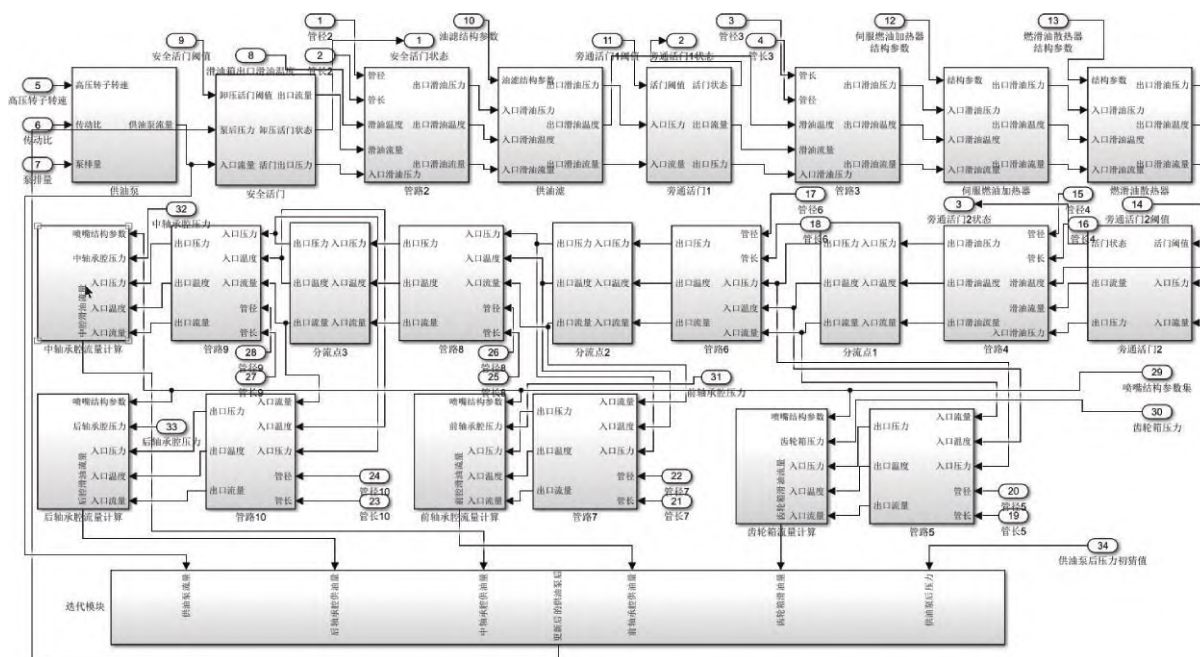


图 4 供油子系统 Simulink 模型
Fig. 4 Simulink model for oil supply subsystem

1.2.2 热力系统

热力子系统是将全系统中关于滑油热力计算的部分独立出来后形成的，其计算涉及生热和散热部件。从喷嘴开始，滑油经轴承、齿轮等生热部件加热后，经回油泵进入油箱进行初步散热，继而通过供油泵进入伺服燃油加热器和燃油散热器进行二次散热，最后进入喷嘴进行循环利用。将生热、散热部件依次连接，完成热力子系统模型搭建。

对部件模型连接完毕后，需要进行迭代求解计算不同点位滑油工作温度。热力子系统只涉及部件的生热特性^[10]和散热特性^[18]，基于热量守恒的原理进行迭代求解，终点为主供油路滑油温度平衡，迭代流程如图 5 所示。

热力子系统输入为高、低压转子转速，前、中、后轴承腔和齿轮箱滑油量，散热器入口燃油

流量、温度等，输出为主供、回油温度及各支路回油温度，迭代初猜值为主供油路温度，取值方法与供油系统类似，在该型滑油系统主供油路温度设计值范围内任取一随机数作为初猜值。

1.3 通风、回油系统

通风系统将由于密封装置漏气、滑油高温蒸发产生的高温高压油气混合气(气多油少)通过通风管路抽出，并经过通风器回收其中的少量滑油，以此来保证轴承腔和齿轮箱压力保持在一个合适的范围内。工程实践表明：通风系统油气混合气中滑油极少，为了便于计算和快速求解，将两相流简化为气流单相参与计算。

另外，由于缺乏滑油箱、齿轮箱的相关数据和资料，认为滑油箱、齿轮箱压力等于前腔压力。在所建的滑油系统中，中、后轴承腔通过通风管

路与前轴承腔相连, 进而通过轴心通风器接通大气, 因此模型的迭代求解包含中、后腔腔压和前腔腔压迭代求解两部分。通风系统在物理意义上是流量-压力平衡模型, 其起始点是封严气体通过封严篦齿泄漏, 终点为通风系统出口压力等于大气压力, 迭代计算流程与供油系统类似, 不作详细阐述。

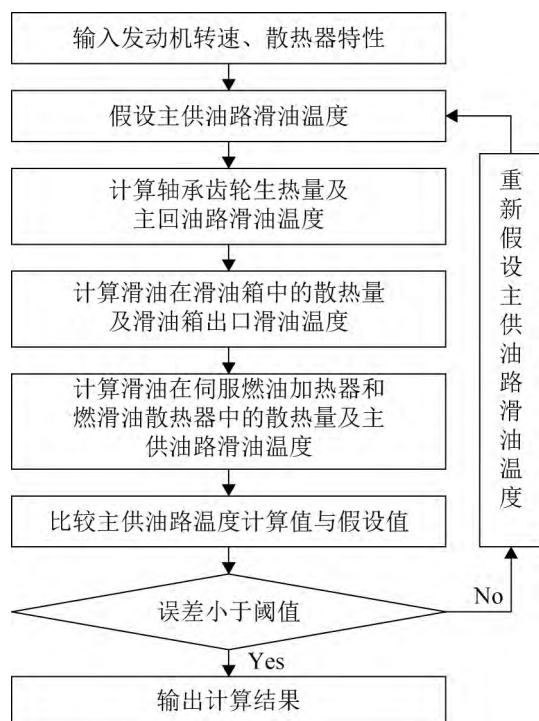


图 5 热力子系统迭代流程
Fig. 5 Thermal subsystem iteration process

回油系统将前、中、后轴承腔及齿轮箱中的滑油进行抽取、过滤、除气后重新送回滑油箱, 以进行循环使用。滑油完成润滑后, 会掺杂大量从封严篦齿中泄漏的高压空气, 因此在建模时要考虑管路内流质为两相流。需要说明的是, 油气分离器的阻力特性和分离特性没有准确的理论计算方法, 一般通过试验得到, 但由于缺乏足够的试验数据, 暂时忽略阻力特性, 并设定其可以实现油气的完全分离。

以回油管路为对象, 简要介绍两相流流质对其建模流程的影响。对于两相流, 其阻力计算采用基于经验公式的方法: 假定两相混合物为气体

单相并算出阻力, 然后按照有关流动类型进行校正。校正为两相流后管路的压力损失^[16]为

$$\Delta p_{r_pipe} = \phi^2 \Delta p_g \quad (2)$$

$$\Delta p_g = f_g \frac{\rho_g v_g^2 L}{2 d} \quad (3)$$

式中: Δp_g 为假定为气体单相后管路压力损失; f_g 为气相摩擦系数, $f_g = 0.0032 + 0.22/Re_g^{0.227}$; v_g 为流体速度; L 、 d 分别为管长、管径; ϕ 为修正系数, 其计算需基于两相流状态, 回油路中滑油状态一般为气泡流^[16], 计算方法如式(4)所示。

$$\phi = \frac{1.65 X^{0.75}}{(W_L/A)^{0.1}} \quad (4)$$

$$X = (W_L/W_G) \sqrt{(\rho_g f_L)/(\rho_L f_g)}$$

$$f_L = 0.02 + 1.7/\sqrt{Re_L}$$

式中: ρ_L 、 ρ_g 为滑油和空气密度, kg/m^3 ; A 为管路横截面积, m^2 ; W_L 、 W_G 为液相和气相质量流量, kg/h ; f_L 为液相摩擦系数。

另外, 回油管路建模需要结合油气比才可以进行流阻特性计算。油气比一般可以通过试验得出具体范围, 建模时将其简化为一固定值参与计算。

回油系统主要涉及压力特性, 其迭代计算的起点为主回油路起点压力, 终点为滑油箱压力平衡。回油系统迭代计算流程与供油系统、通风系统类似, 不作详细阐述。

1.4 全系统建模及验证

基于前述对滑油系统工作原理及各个子系统工作逻辑的介绍, 通过连接各个子系统模型并设置迭代算法实现对模型的计算求解。前文提到通风、回油子系统不涉及与其他子系统的迭代; 供油子系统计算需要输入滑油箱出口及主供油路滑油温度, 热力子系统需要输入前、中、后轴承腔及齿轮箱供油量, 因此二者需要进行迭代求解, 具体流程为: ①输入发动机转速、散热器换热特性、部件结构参数以及通风子系统计算得到的前、中、后轴承腔腔压; ②假设滑油箱出口和主供油路滑油温度, 用以计算滑油物性参数; ③利用供

油子系统计算前、中、后轴承腔和齿轮箱供油量；④利用热力子系统计算滑油箱出口和主供油路滑油温度；⑤比较计算值和假设值，若误差小于阈值，则计算结束并输出计算结果；否则，通过计算值与假设值的加权平均来重置两参数，重复②~⑤，直至满足迭代终止条件。滑油全系统协同工作模型如图6所示。

为了验证模型的准确性，将滑油系统在典型工况(标准起飞和最大巡航)下的工作参数与该领域

广泛使用的商用软件 Flowmaster 仿真结果为基准^[19]进行对比，如表1所示。可以看出，通风、供油子系统计算结果较准确，热力子系统结果存在较大误差，各工作参数平均误差在 10% 以上，不能直接应用于工程实践。产生误差的主要原因在于轴承、齿轮生热和燃油加热器、燃滑油散热器散热均采用经验公式和插值计算，导致了主供、回油路滑油温度的计算误差。因此，需要开展模型优化以提高模型精度，从而为工程应用提供支撑。

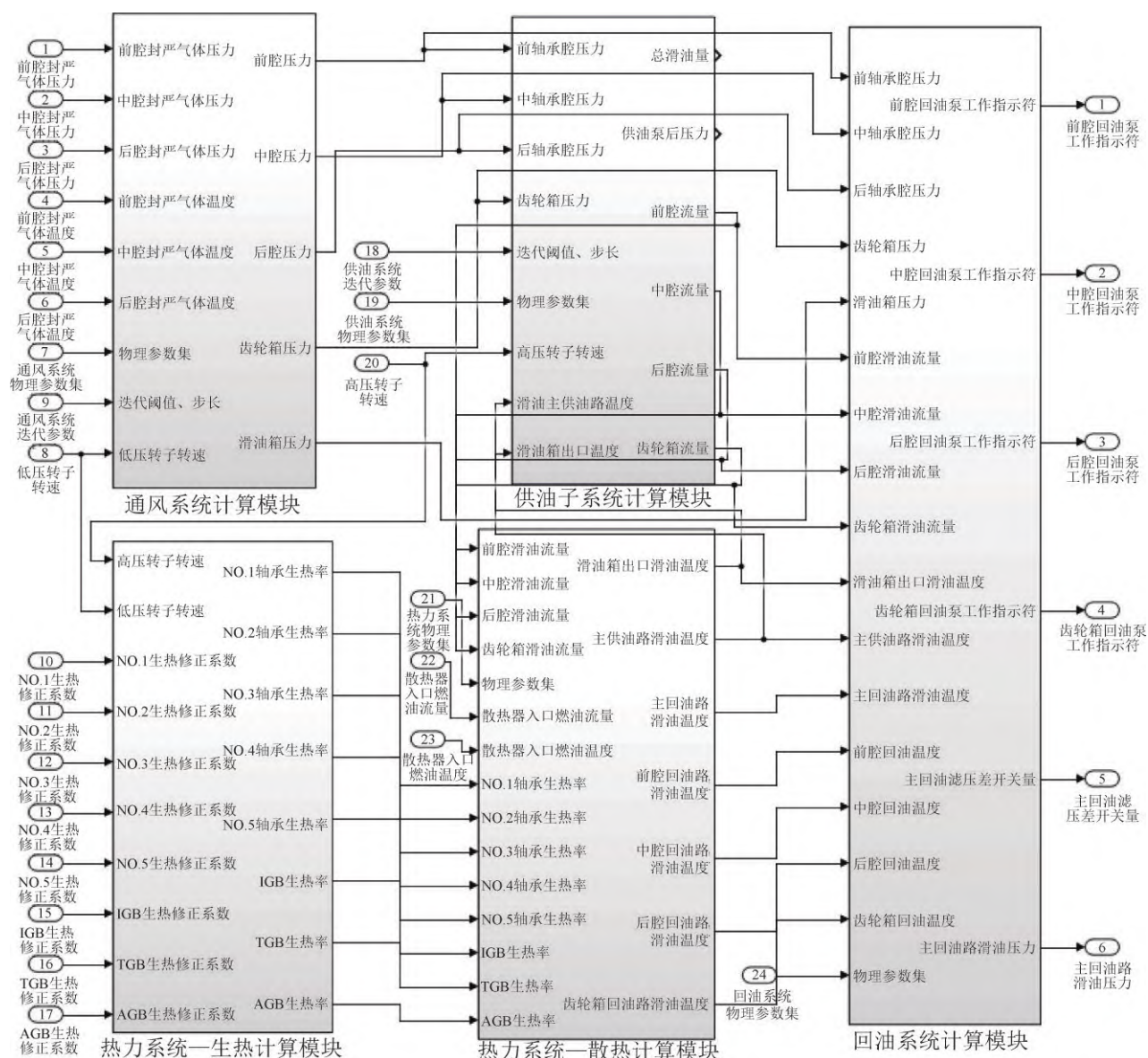


图6 滑油系统Simulink模型
Fig. 6 Simulink model for the whole oil system

表 1 典型工况下滑油系统工作参数计算结果与 Flowmaster 基准结果对比
Table 1 Comparison between the calculated working parameters of the oil system under typical working conditions and the Flowmaster benchmark results

滑油系统工作参数	标准起飞工况			最大巡航工况		
	Simulink 计算结果	Flowmaster 基准结果	相对误差/%	Simulink 计算结果	Flowmaster 基准结果	相对误差/%
前轴承腔压力/kPa	147.85	147.3	0.37	50.10	49.0	2.24
中轴承腔压力/kPa	180.70	180.3	0.22	65.95	68.4	-3.58
后轴承腔压力/kPa	177.85	177.3	0.31	64.15	66.8	-3.97
供油泵后压力/MPa	0.56	0.55	1.82	0.43	0.42	2.38
前轴承腔供油量/(L/min)	24.75	24.3	1.85	23.75	23.5	1.06
中轴承腔供油量/(L/min)	3.26	3.1	5.16	3.22	2.9	11.03
后轴承腔供油量/(L/min)	2.62	2.8	-6.43	2.58	2.7	-4.44
齿轮箱供油量/(L/min)	17.86	17.2	3.84	17.14	16.6	3.25
滑油总供油量/(L/min)	48.49	48.5	-0.02	46.69	46.4	0.63
主供油路温度/°C	75.13	106.3	-29.32	74.62	133.7	-44.19
主回油路温度/°C	103.01	134.4	-23.36	100.55	157.1	-36.00
前轴承腔回油温度/°C	107.12	135.0	-20.65	103.95	161.2	-35.51
中轴承腔回油温度/°C	106.67	138.5	-22.98	101.74	159.4	-36.17
后轴承腔回油温度/°C	88.75	118.9	-25.36	88.63	145.2	-38.96
齿轮箱回油温度/°C	98.73	127.2	-22.38	97.39	155.8	-37.49
平均绝对误差/%		10.94			17.40	

2 模型优化算法原理及结果展示

通过分析不同工作参数误差大小, 追溯可能的误差来源, 定义对应的修正系数, 通过改变修正系数的值代入求解, 建立优化目标, 实现面向基准值的模型优化。本文旨在建立准确的滑油系统模型, 不涉及对各腔供油量、回油路温度等特定参数的研究, 因此以待优化系统/子系统相关工作参数的平均绝对误差最小为优化目标, 避免不同参数正负误差相互抵消带来误差较小的假象。

2.1 修正系数设置

模型误差主要来源于热力子系统, 结合前述对子系统协同工作原理的介绍, 通风、回油子系统工作相对独立, 可将全系统模型优化缩减为供油、热力子系统的优化。由于热力系统为供油系统提供的主供油温度和滑油箱出口温度主要用于计算滑油的物性参数, 且通过仿真发现, 滑油物

性参数的改变对供油子系统供油量的计算结果影响极小, 因此进一步将待优化模型锁定至热力子系统。通过设置经验公式修正系数, 利用粒子群、遗传算法对热力子系统模型进行优化, 通过可收敛性、计算时间、计算误差等指标对不同算法进行评价, 得到滑油系统不同典型工况下各修正系数值。

热力子系统生热部件分别为位于前轴承腔的风扇球轴承、风扇滚子轴承、压气机前轴承、中心传动齿轮箱; 位于中轴承腔的高压涡轮轴承; 位于后轴承腔的低压涡轮轴承; 以及位于齿轮箱的转接齿轮箱和附件齿轮箱。基于试验数据通过线性插值得到生热量的经验公式, 设置 $k_1 \sim k_8$ 修正系数对生热量进行修正, 如式(5)所示。此外, 除滑油箱外其余散热部件的散热特性计算也是基于已有试验数据进行插值, 也存在一定误差, 设置 k_9 、 k_{10} 作为伺服燃油加热器和燃滑油散热器的修正系数, 如式(6)所示。

$$\begin{aligned} H_1 &= k_1 \times (0.002\ 62 \cdot N_1 - 5.4) \\ H_2 &= k_2 \times (0.005\ 15 \cdot N_1 - 16.23) \\ H_3 &= k_3 \times (0.003\ 918 \cdot N_2 - 50.23) \\ H_4 &= k_4 \times (0.000\ 746\ 6 \cdot N_2 - 8.74) \\ H_5 &= k_5 \times (0.000\ 77 \cdot N_1 - 1.706) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} H_{\text{TGB}} &= k_6 \times (0.000\ 27 \cdot N_2 - 2.253) \\ H_{\text{AGB}} &= k_7 \times (0.001\ 204 \cdot N_2 - 8.276) \\ H_{\text{IGB}} &= k_8 \times (0.000\ 808\ 5 \cdot N_2 - 7.153) \\ \eta_{\text{heater}} &= k_9 \times \eta_1 \\ \eta_{\text{radiator}} &= k_{10} \times \eta_2 \end{aligned} \quad (6)$$

式中： $H_1 \sim H_5$ 分别为轴承 1-5 的生热率； H_{TGB} ， H_{AGB} ， H_{IGB} 分别为 3 个齿轮箱的生热率；下标 heater，radiator 分别是修正后伺服燃油加热器和燃滑油散热器的传热系数； η_1 和 η_2 分别是修正前伺服燃油加热器和燃滑油散热器的传热系数； N_1 、 N_2 分别为高、低压转子转速。

2.2 粒子群算法

粒子群优化算法(PSO)是一种通过模拟鸟群觅食行为而发展起来的一种基于群体协作的随机搜索算法，具有收敛快、不易陷入局部最优等优点^[20]。算法的基本流程为①初始化粒子群，包括群体规模及粒子的位置和速度；②计算粒子适应度；③更新个体极值与全局最优解；④更新个体速度和位置及处理边界值；⑤设置终止条件。

定义适应度函数、速度和位置更新公式如(7)(8)所示。

$$f = \frac{\sum_{i=1}^6 \left| \frac{T_{c,i}}{T_{s,i}} - 1 \right|}{6} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} v_{ij}(t+1) &= w \cdot v_{ij}(t) + c_1 r_1(t)[p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + \\ &\quad c_2 r_2(t)[p_{gj}(t) - x_{ij}(t)] \\ x_{ij}(t+1) &= x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \end{aligned} \quad (8)$$

式中： i, j 为粒子法原理中一些参数； $T_{c,i}$ 为计算值； $T_{s,i}$ 为 Flowmaster 基准值； x 为粒子不同时刻的位置； v 为粒子不同时刻的速度； r 为随机系数； w 为惯性权重，一般为 0.8~1.2； c_1 、 c_2 为加速度系数。

为了保证算法具有较好的全局收敛性，取 $w =$

$c_1 = c_2 = 0.8$ ，且基于动态惯性权重的思想，使用文献[21]提出的较为常用的线性递减策略实时改变惯性权重，其表达式为

$$w_t = w_{\max} - \frac{(w_{\max} - w_{\min}) \cdot t}{T_{\max}} \quad (9)$$

另外，设置粒子数为 100，迭代终止条件为 400 次或平均适应度值低于 0.01。由于生热部件生热量为正值，因此设置各个系数取值范围： $k_1 \sim k_8$ 为 (0, 2]， $k_9 \sim k_{10}$ 为 (0, 1]。

2.3 遗传算法

遗传算法(GA)属于群智能启发式算法，参考生物进化论，通过选择、交叉、变异来选择最优个体^[22]。其基本流程为创建初始种群→计算适应度→通过选择、交叉、变异操作获得下一代种群→设置终止条件→输出最优个体。GA 相较于 PSO 种群更新方式不同，且多了编码和解码步骤，适应度函数与 PSO 算法相同。计算中，设置交叉概率为 0.5，变异概率为 0.01，各个系数精度为 0.01，适应度定义及其他参数设置与 PSO 相同。

GA 算法通过选择、交叉、变异算子实现对种群的更新，其中变异算子基于变异概率随机进行，选择算子常见为轮盘赌和随机联赛，交叉算子常见为单点交叉、两点交叉、多点交叉、均匀交叉等。使用不同算子对算法收敛性和计算结果具有一定影响，因此拟通过重构算子得到 8 种组合的种群更新方式，利用迭代收敛度和适应度来选择最优算子组合，如图 7 所示。可以看出，标准起飞工况下“随机联赛-均匀交叉”算子组合计算误差较低，且迭代至 13 次已开始收敛，适应度(即热力子系统工作参数平均误差)为 1.156%，具有较好的效果；最大巡航工况下，“轮盘赌-两点交叉”等 3 种算子组合计算的适应度均在 1% 左右，具有较好的效果。

综上，2 种工况下均使用“随机联赛-均匀交叉”计算得到热力系统修正系数代入模型参与迭代求解。

2.4 不同优化算法结果对比及分析

基于滑油系统仿真模型, 分别使用 PSO、GA

优化算法对热力子系统进行优化后, 得到发动机在典型工况下滑油工作参数计算值与 Flowmaster 基准值对比情况, 如表 2 所示。

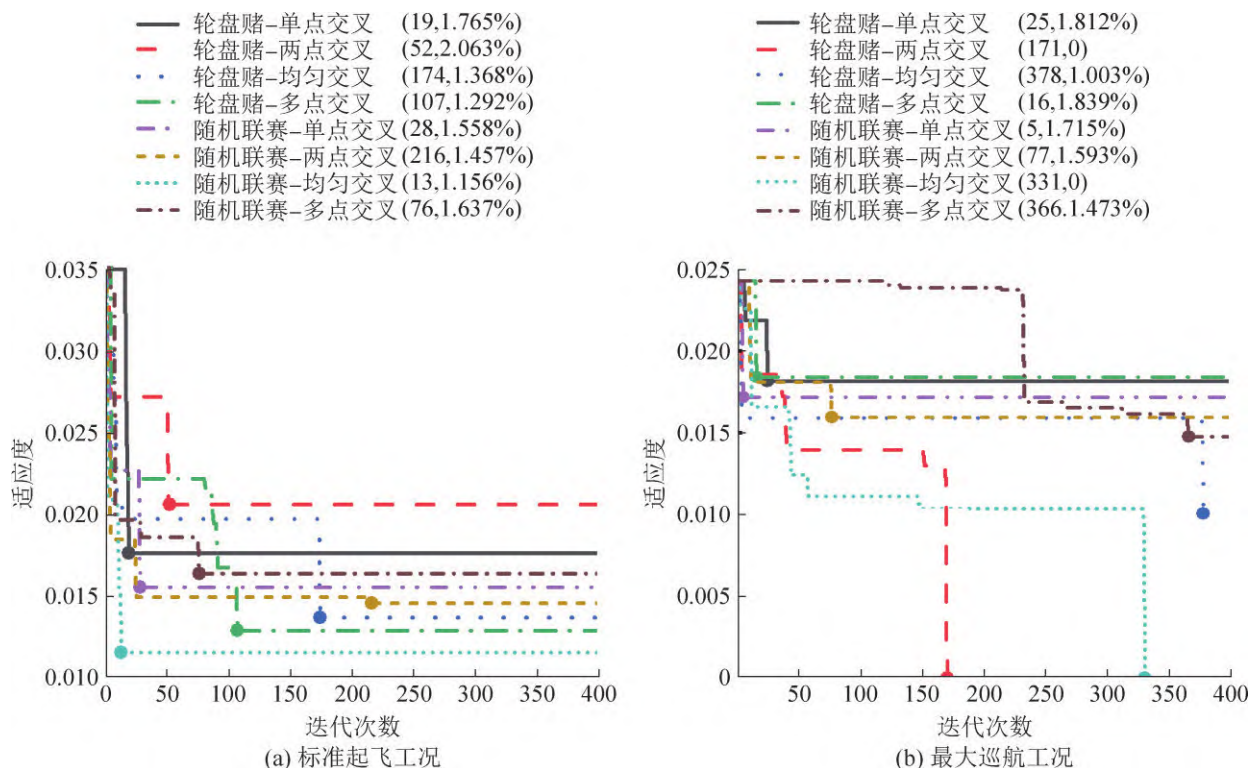


图 7 典型工况下 GA 算法不同重构算子计算收敛情况

Fig. 7 Convergence of GA algorithm with different reconstruction operators under typical conditions

可以看出, 标准起飞工况下, PSO、GA 优化后参数平均误差均在 2% 左右, 整体上 GA 优于 PSO 算法, 但差别不大; 最大巡航工况下, PSO 算法优化结果好于 GA 算法, 平均误差在 2% 以下。对比优化前后模型工作参数计算结果, 优化后模型准确度有较大提高, 可以满足工程上对精度的要求, 为后续基于模型开展滑油系统监测乃至健康管理提供支撑。

3 滑油系统仿真模型应用

发动机滑油系统一旦发生故障, 会导致轴承、齿轮等传动部件无法得到润滑和冷却而造成危害飞行安全的后果。2010 年的澳航 A380 客机就是因为滑油管道破裂, 造成发动机起火, 引发涡轮盘爆裂, 差点造成机毁人亡的惨

剧。预测与健康管 理 (prognostic and health management, PHM) 提出了通过收集发动机事件数据, 对发动机状态进行评估, 诊断发动机潜在故障, 确定发动机的维修策略, 从而达到降低发动机故障、减少发动机维修成本的目的。

用户对新一代发动机滑油系统健康管理的需求如表 3 所示, 可以看出, 通过对滑油系统监测、诊断、预测等来实现对滑油系统的健康管理。

用户对滑油系统的需求主要表现在对滑油系统进行监测和诊断, 结合健康管理理念^[23], 基于建立的仿真模型, 从监测层、诊断层^[24]、预测层、健康管理层^[25]等层次分析了模型在滑油系统健康管理中的应用, 如图 8 所示。

表2 不同工况下模型优化结果
Table 2 Model optimization results under different operating conditions

滑油系统工作参数	标准起飞工况					最大巡航工况				
	Flowmaster	PSO	相对误	GA	相对误	Flowmaster	PSO	相对误	GA	相对误
	基准结果	优化	差/%	优化	差/%	基准结果	优化	差/%	优化	差/%
前轴承腔压力/kPa	147.3	147.85	0.37	147.85	0.37	49.0	50.10	2.24	50.10	2.24
中轴承腔压力/kPa	180.3	180.70	0.22	180.70	0.22	68.4	65.95	-3.58	65.95	-3.58
后轴承腔压力/kPa	177.3	177.85	0.31	177.85	0.31	66.8	64.15	-3.97	64.15	-3.97
供油泵后压力/kPa	0.55	0.56	1.82	0.56	1.82	0.42	0.43	2.38	0.43	2.38
前轴承腔供油量/(L/min)	24.3	24.75	1.85	24.75	1.85	23.5	23.75	1.06	23.75	1.06
中轴承腔供油量/(L/min)	3.1	3.26	5.16	3.26	5.16	2.9	3.22	11.03	3.22	11.03
后轴承腔供油量/(L/min)	2.8	2.62	-6.43	2.62	-6.43	2.7	2.58	-4.44	2.58	-4.44
齿轮箱供油量/(L/min)	17.2	17.86	3.84	17.86	3.84	16.6	17.14	3.25	17.14	3.25
滑油总供油量/(L/min)	48.5	48.49	-0.02	48.49	-0.02	46.4	46.69	0.63	46.69	0.63
主供油路温度/℃	106.3	105.94	-0.34	106.43	0.12	133.7	130.64	-2.29	133.43	-0.20
主回油路温度/℃	134.4	130.39	-2.98	132.46	-1.44	157.1	157.11	0.01	156.37	-0.46
前轴承腔回油温度/℃	135.0	131.31	-2.73	135.97	0.72	161.2	161.01	-0.12	158.95	-1.40
中轴承腔回油温度/℃	138.5	137.56	-0.68	146.29	5.62	159.4	161.99	1.62	156.8	-1.63
后轴承腔回油温度/℃	118.9	123.17	3.59	121.31	2.03	145.2	144.65	-0.38	151.23	4.15
齿轮箱回油温度/℃	127.2	128.87	1.31	126.71	-0.39	155.8	152.66	-2.02	153.49	-1.48
平均绝对误差/%			2.11		2.02			1.98		2.79

(1) 监测层。滑油系统监视技术可分为性能监视、碎屑监视及滑油状态监视等。滑油碎屑监视和状态监视多见于离线分析，性能监视主要通过滑油系统专用传感器对滑油压力、滑油温度、滑油消耗量、油滤旁通指示器等参数进行监视，并配合不同工况下预设的参数阈值对系统性能进行监测，主要包括超限警告和趋势分析。由于滑油系统可监测参数有限，通过采集机载传感参数对不同工况下仿真模型进行修正，从而计算无法通过专用传感器直接采集的滑油工作参数(如各子回路滑油温度)，配合预设的参数阈值进行滑油监测和报警。

(2) 诊断层。通过建立高精度仿真模型，并结合传感器参数，利用测点参数直接诊断、通过分析单参数或多参数趋势来诊断以及建立故障方程求解诊断等方式建立诊断模型，实现对滑油系统的故障诊断。基于模型进行故障诊断弥补了基于数据进行诊断在机理上存在不可解释性的不足，在滑油系统健康管理中具有较广的应用前景。

表3 用户对滑油系统的需求
Table 3 User demand for oil system

序号	需求内容	重要度
1	具备滑油系统监视功能	必须
2	EHM应具有滑油系统工作参数、滑油金属碎屑数据的测量和记录功能	必须
3	通过监视滑油温度、压力、消耗水平、滑油杂质等,监测滑油系统被润滑部件的健康状况,包括磨损引起的发动机中央传动齿轮、附件机匣传动齿轮、主轴承故障等	必须
4	不能因单一传感器故障或漂移导致虚假监测	必须
5	应在相关技术文件中明确基于滑油系统信号分析的故障预测判断标准和逻辑	需要
6	能够对滑油系统进行监测和记录,当参数处理后达到判断准则设定值,将该事件对应的时刻记录到EHM报表中;参数处理分为全状态和平稳飞行状态两种	必须
7	对后轴承腔故障、滑油泄露、轴承故障、调压活门等滑油系统故障进行记录和反馈	必须
8	对滑油系统后腔回油温度、后腔封严压差、供油压差、滑油消耗率、在线屑末等参数进行趋势分析	必须

(3) 预测层。滑油系统预测多见于通过分析滑油自身理化性质和磨粒尺寸、成分、数量等信息, 对传动部件状况进行评估, 从而支撑对主要传动部件及发动机剩余寿命的预测。

(4) 健康管理层。根据滑油系统监测/诊断/预

测信息、可用资源和使用要求对维修和后勤活动做出智能化、有见地、适当决策的能力。通过健康管理, 提高滑油系统的工作可靠性, 为传动部件提供有效地润滑和冷却。

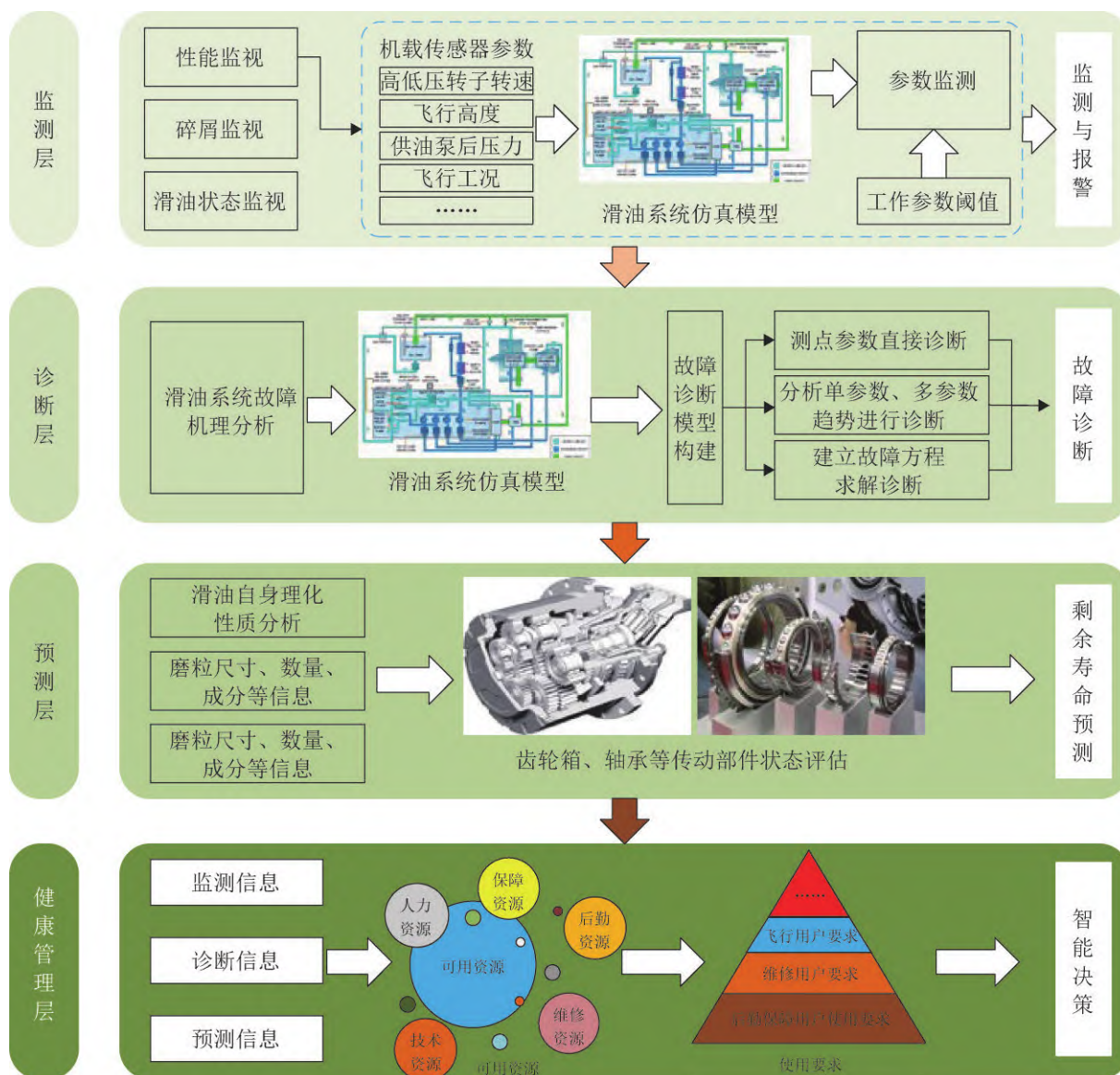


图8 仿真模型在滑油系统健康管理中的应用

Fig. 8 Application of Simulation Models in Health Management of Oil Systems

4 结论

本文结合滑油系统流阻、压力、换热特性等相关理论, 基于 Simulink 平台开发了滑油各子系统模型并进行全系统迭代求解, 利用 PSO、GA 算

法对模型进行优化, 并对模型在健康管理中的应用进行了分析, 主要结论如下:

(1) 构建了滑油系统部件模型库和子系统模型库, 搭建了滑油系统模型, 实现了全系统的迭代

求解, 具有求解速度快、重用性高、扩展性强的特点。

(2) 利用 PSO、GA 算法对标准起飞、最大巡航等典型工况下滑油系统模型进行优化, 与 Flowmaster 基准结果进行对比, 优化后模型误差从 10% 以上降低到 2% 左右, 具有一定的准确性。

(3) 基于发动机健康管理理念, 结合用户对滑油系统的需求, 从监测层、诊断层、预测层、健康管理层给出了仿真模型在滑油系统健康管理中的应用, 具有工程价值。

参考文献:

- [1] 李国权. 航空发动机滑油系统的现状及未来发展[J]. 航空发动机, 2011, 37(6): 49-52, 62.
Li Guoquan. Present and Future of Aeroengin Oil System [J]. Aeroengine, 2011, 37(6): 49-52, 62.
- [2] 吴大观. 涡轮风扇发动机及其系统的性能研究[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- [3] Cheng A K. SSME Alternate Turbopumps Axial Thrust Balance and Secondary Flow Models: 322-002-91-153-R01[R]. [S.l. : s.n.], 1992.
- [4] Majumdar A K, LeClair A C, Moore C, et al. Generalized Fluid System Simulation Program (GFSSP) - Version 6 [C]//51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Reston: AIAA, 2015: AIAA 2015-3850.
- [5] 杨家旺, 姜会庆, 周琳. 航空发动机滑油供油系统建模及应用[J]. 工业技术创新, 2019, 6(3): 80-85.
Yang Jiawang, Jiang Huiqing, Zhou Lin. Modeling and Application of Lubricating Oil Supply System for Aeroengines[J]. Industrial Technology Innovation, 2019, 6(3): 80-85.
- [6] 白杰, 朱永新, 何文博, 等. 基于AMESim的某型航空发动机滑油供油系统故障模拟[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(9): 3784-3789.
Bai Jie, Zhu Yongxin, He Wenbo, et al. Fault Simulation of a Certain Type of Aeroengine Lubricating Oil Supply System Based on AMESim[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(9): 3784-3789.
- [7] 朱永新. 基于改进支持向量机的航空发动机滑油系统故障诊断研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.
Zhu Yongxin. Research on Fault Diagnosis of Aeroengine Oil System Based on Improved Support Vector Machine[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020.
- [8] 路彬, 刘振侠, 吕亚国, 等. 航空发动机滑油通风系统性能计算仿真[J]. 航空计算技术, 2011, 41(4): 32-35.
Lu Bin, Liu Zhenxia, Lü Yaguo, et al. Performance Calculation Simulation of Aeroengine Lubrication Vent System[J]. Aeronautical Computing Technique, 2011, 41(4): 32-35.
- [9] 方露露. 航空发动机轴承腔及回油管路两相流动换热规律研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
Fang Lulu. Study on the Oil-gas Two-phase Flow and Heat Transfer in an Aero-engine Bearing Chamber and the Scavenge Pipes[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [10] 汪元林. 航空发动机滑油系统温升研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
Wang Yuanlin. Research on Temperature Addition of Aeroengine Oil System[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [11] 马明明. 基于试飞数据的航空发动机滑油系统模型建立及应用[J]. 润滑与密封, 2017, 42(10): 121-126.
Ma Mingming. Establishment and Application of Aero-engine Oil System Model Based on Flight Test Data[J]. Lubrication Engineering, 2017, 42(10): 121-126.
- [12] 刘波, 周强, 程礼, 等. 构建航空发动机滑油系统稳态模型[J]. 推进技术, 2005, 26(6): 556-559.
Liu Bo, Zhou Qiang, Cheng Li, et al. Construction of Steady Model for an Engine Oil System[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(6): 556-559.
- [13] 张效伟. 涡扇发动机润滑系统性能计算与分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [14] 闫星辉, 郭迎清, 殷锴, 等. 基于MATLAB/Simulink的滑油系统建模仿真与优化[J]. 航空动力学报, 2017, 32(3): 740-748.
Yan Xinghui, Guo Yingqing, Yin Kai, et al. Modeling Simulation and Optimization of Oil System Based on MATLAB/Simulink[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(3): 740-748.
- [15] 张书刚, 郭迎清, 陆军. 基于GasTurb/MATLAB的航空发动机部件级模型研究[J]. 航空动力学报, 2012, 27(12): 2850-2856.
Zhang Shugang, Guo Yingqing, Lu Jun. Research on Aircraft Engine Component-level Models Based on GasTurb/MATLAB[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(12): 2850-2856.
- [16] «航空发动机设计手册»总编委会. 航空发动机设计手册: 第12册传动及润滑系统[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
Editorial Board of Aeroengine Design Manual. Aeroengine Design Manual: Volume 12 Transmission and Lubrication System[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002.

- [17] 赵然, 高红霞, 李明. 直升机滑油系统流动阻力特性研究[J]. 航空制造技术, 2013(12): 89-94.
- Zhao Ran, Gao Hongxia, Li Ming. Study of Flow Resistance Characteristics for Helicopter Oil System[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(12): 89-94.
- [18] 吕亚国, 刘振侠. 航空发动机管壳式燃-滑油散热器换热特性计算[J]. 航空动力学报, 2014, 29(12): 2830-2835.
- Lü Yaguo, Liu Zhenxia. Heat Transfer Characteristics Calculation for Aero-engine Shell-tube Fuel-oil Heat Exchanger[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(12): 2830-2835.
- [19] 闫星辉. 民用涡扇发动机滑油系统建模仿真与故障诊断[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
- Yan Xinghui. Modeling, Simulation and Fault Diagnosis of Civil Turbofan Engine Oil System[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.
- [20] Zhang Mengyang, Zhang Xuyinglong, Gao Shan, et al. Comfort Study of General Aviation Pilot Seats Based on Improved Particle Swam Algorithm (IPSO) and Support Vector Machine Regression (SVR)[J]. Applied Sciences, 2023, 13(15): 9038.
- [21] Shi Yuhui, Russell C Eberhart. Parameter Selection in Particle Swarm Optimization[C]//Evolutionary Program-
ming VII. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1998: 591-600.
- [22] Qu Meijiao, Li Mengqi, Song Yuheng, et al. Multi-objective Optimization Design Method for Whole-aeroengine Coupling Vibration[J]. Aerospace, 2023, 10(2): 99.
- [23] Volponi A J. Gas Turbine Engine Health Management: Past, Present, and Future Trends[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136(5): 051201.
- [24] 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I: 气路、机械和FADEC系统
故障诊断与预测[J]. 航空学报, 2022, 43(9): 封2, 1-33.
- Cao Ming, Huang Jinquan, Zhou Jian, et al. Current Status, Challenges and Opportunities of Civil Aero-engine Diagnostics & Health Management I: Diagnosis and Prognosis of Engine Gas Path, Mechanical and FADEC[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(9): 封2, 1-33.
- [25] 尉询楷, 杨立, 刘芳, 等. 航空发动机预测与健康
管理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- Wei Xunkai, Yang Li, Liu Fang, et al. Aeroengine Prognostics and Health Management[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.