

文章编号: 1000-8055(2009)04-0777-06

直升机减速器滑油冷却系统的改进设计方法

李林蔚¹, 高红霞¹, 余建祖¹, 常 莉²

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191;

2. 中国直升机设计研究所, 景德镇 333001)

摘 要: 对滑油冷却系统传统设计方法进行了研究. 基于对换热器散热特性、减速器对滑油加热规律、系统热耦合过程的分析, 提出了针对直升机减速器滑油冷却系统的改进设计方法, 使得系统热耦合时滑油温度的计算和换热器的设计更为简捷, 并考虑了变工况对系统热性能的影响, 提高了系统设计的可靠性和效率. 以某直升机减速器系统为例, 编制了改进设计方法的 VC++ 程序, 进行了该减速器滑油系统的冷却设计, 其设计结果与理论分析相吻合.

关 键 词: 滑油冷却系统设计; 直升机减速器; 滑油换热器

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Study of an improved aero oil cooling system design method

LI Lin wei¹, GAO Hong-xia¹, YU Jian zu¹, CHANG Li²

(1. School of Aeronautical Science and Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001, China)

Abstract: The conventional design method of oil cooling system was introduced. Based on the synthetic analysis of the performance of heat exchanger, the heat transfer principle between the decelerator and oil, and the heat balance process of the oil system, an improved design method of helicopter decelerator oil cooling system was established to improve the heat balance temperature calculation and heat exchanger design, meanwhile the new heat balance process under other working conditions were considered to improve the reliability of the design. Based on this improved method, a helicopter decelerator oil system was designed as an example, showing the results consistent with theoretical analysis.

Key words: oil cooling system design; helicopter decelerator; oil heat exchanger

直升机减速器滑油子系统的主要功能是对减速器动配合部位进行润滑, 并有效排散轴承生热以及各运动副摩擦生热, 保持减速器的温度在允许的范围^[1-4].

目前国内对滑油系统热性能的研究正逐渐深入, 主要工作内容包括两类: 一类是自行编制软件进行设计及分析^[5-7], 另一类是通过实验或者利用现有的商业软件如 FLOWMASTER 等进行仿真

研究^[8-10]. 以上研究都是建立在对系统各主要部件(如滑油换热器、泵、风扇等)的结构、散热以及阻力特性已详细掌握的基础上, 对现有的系统进行分析计算.

除系统性能分析外, 也有学者进行系统设计研究, 研究的重点在于子部件的设计, 诸如风扇、换热器等^[11-13]. 对于换热器散热和减速器(或者发动机)生热的耦合设计, 目前仍采用传统的以经

收稿日期: 2008-03-25; 修订日期: 2008-05-30

作者简介: 李林蔚(1984-), 女, 四川广元人, 硕士, 主要从事环境控制系统制冷与低温的研究.

验为主的校核性设计方法^[2], 此方法的系统设计中流程中减速器(或者发动机)进口滑油温度需要迭代计算, 系统中换热器的设计建立在已知换热器单位温差换热实验曲线或者是相关性能曲线基础上. 当采用实测曲线对换热器在系统性能中的影响进行预测时, 需要做大量的实验, 以获得不同工况下单位温差换热曲线. 实际上, 由于飞行工况的复杂性, 滑油散热器的传热和阻力特性曲线的获得是十分困难的, 且耗资巨大, 滑油散热器的生产厂家往往只给出设计点的性能参数或者一条性能曲线, 这给滑油系统乃至减速器的非设计工况热分析造成很大困难, 也给系统和部件的设计埋下了隐患.

随着科技的进步, 减速器滑油系统也在不断发展. 例如直升机减速器滑油系统中的滑油散热器已由传统的列管式空气滑油换热器发展为板翅式空气滑油换热器. 板翅式空气滑油换热器不仅效率比列管式显著提高, 而且其体积减小, 重量降低, 目前已在我国直升机上推广使用. 根据中国航空直升机设计研究所的要求, 笔者所在的课题组在“十·五”期间, 在进行板翅式空气滑油换热器设计技术研究的基础上, 开发了板翅式空气滑油换热器 CAD 软件^[14]. 该软件采用一种新的设计方法, 以对换热器传热和阻力特性有重要影响的质量流速方程作为切入点, 基于芯体摩擦压降与质量流速的关系, 求得满足压降要求的质量流速, 在此基础上利用芯体几何特征与传热特性的关系, 通过计算得出换热器的结构尺寸. 具体设计思

路如图 1 所示. 图 1 中, $v_m = \left[\frac{2\eta_0 \Delta p_{\text{限定值}}}{Pr^{\frac{2}{3}} v_m NTU} \cdot \frac{j}{f} \right]^{\frac{1}{2}}$, $A = \frac{NTU(q_m C_p)_{\min}}{K}$, $A_c = \frac{q_m}{v_m}$. η_0 为换热器翅片表面效率, NTU 为传热单元数, v_m 为质量流速, $\Delta p_{\text{限定值}}$ 为滑油系统允许的换热器的最大压降, j , f 分别为传热因子和摩擦因子, Pr 为普朗特数, v_m 为平均运动粘度, K 为总换热系数, q_m 为质量流量, A 和 A_c 分别为总传热面积和最小流通面积. 从图 1 可以看出, 新方法是在理论分析和推导的基础上, 采用数字计算的方法得出空气滑油换热器的结构参数(包括两侧的总传热面积、最小自由流体面积、迎风面积、孔度和芯体尺寸 L_1 , L_2 , L_3 等), 因而这种方法避免了传统的校核性试凑法依赖于设计者个人经验和前人实验结果的弊病.

新方法巧妙地利用了板翅式传热型面固有的

某些特点. 例如, 其传热因子和摩擦因子的比值 j/f 大约在 0.25 左右, 对于一个好的换热器设计, 其表面效率 η_0 应处在 70% ~ 90% 的范围内, 以及各种介质匹配采用的翅片型式较为简单统一等, 因此掌握这种新的设计方法, 即使对初学者也不是一件难事. 通过几年的工程实际应用, 证明此方法是可行的, 计算结果的准确性较高.

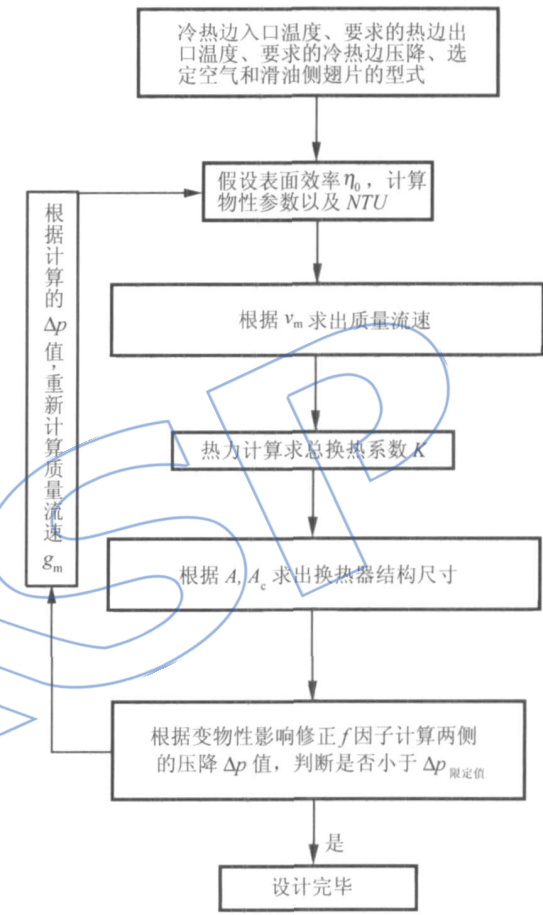


图 1 换热器设计新方法

Fig. 1 New heat exchanger design method

鉴于以上原因, 本文将上述新的滑油换热器设计方法及其支持软件引入直升机减速器滑油系统的热分析和设计中来. 利用板翅式空气滑油换热器 CAD 软件, 直接按照减速器的散热量要求进行换热器的设计, 这样不仅可保证减速器进口滑油温度在给定的设计值, 而且不需要进行大量的换热器性能试验作为系统和部件进行热分析和设计的基础, 也避免了因传热性能校核不合格, 而通过反复迭代和试凑来寻求合格换热器设计方案麻烦. 基于对系统热耦合过程的分析研究, 在系统设计中考虑变工况对系统热性能的影响, 通过对变工况下系统热耦合情况的分析校核, 可提高所设计滑油冷却系统的效率和可靠性.

1 冷却设计传统方法与改进方法介绍

图 2 所示为典型的减速器滑油冷却系统. 滑油以流量 q_m 进入减速器箱 9, 此时温度为 t_1 , 经过减速器轴承和各运动副后吸收热量 Φ , 温度升高为 t_2 , 流入减速器底部油箱, 进而由油泵 3 抽出流入换热器 2, 进口温度为 t_1^{oil} , 在换热器 2 中与由风扇 1 驱动的冷空气(入口温度为 t_1^{gas} , 出口温度为 t_2^{gas}) 发生热交换, 滑油经换热器散走的热量为 Q , 流出换热器的滑油温度降为 t_2^{oil} , 最后经油滤 14 流入减速器箱, 如此循环往复. 由于滑油在系统管路和油泵中的温度变化远小于其在减速器箱和换热器中的变化, 故假设 $t_1 = t_2^{oil}$, $t_2 = t_1^{oil}$. 减速器箱内的生热量是减速器轴承生热、各运动副摩擦产生的热量、发动机通过传导和辐射带入的热量等的总和, 由于传导和辐射的热量很难计算, 一般根据经验估计, 齿轮和轴承的功率损失详见文献[15], 本文不再赘述. 滑油从减速器的吸热量 Φ 与减速器的生热量以及滑油的入口工况有关, 详见本文第 3 节的分析.

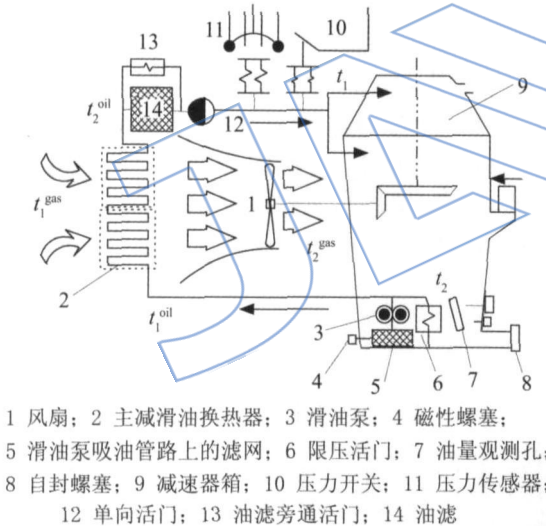


图 2 典型减速器滑油系统示意图

Fig.2 Schematic of a typical decelerator oil system

图 3 为滑油冷却系统传统设计方法流程图, 主要包括两个循环: 系统热耦合时 t_1 的计算和换热器的再设计. 图 4 为改进设计方法流程图, 相对于图 3, 其优势主要体现在:

1) t_1 的确定和系统热耦合的设计

传统方法为了计算 Φ 和 Q 耦合时的减速器滑油入口温度, 需先假设一滑油进口温度 $\bar{t}_1$, 由 Φ 得出 t_2 , 再由换热器校核方法或者已知的实验数据, 计算换热器入口温度为 t_2 时换热器的散热

量 Q 和 t_1 , 将 t_1 和 $\bar{t}_1$ 比较, 循环迭代至 $Q = \Phi$. 然后判断 t_2 是否超出限制值, 一般直升机减速器滑油的出口温度不应超出 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$, 如果超出, 则需要修改换热器的结构. 如果使用校核性的试凑法进行换热器设计, 需要设计者具有一定工作经验, 并有较多的参考产品, 才可获得满意的设计结果; 如果使用换热器的单位温差换热量实验曲线, 则需要的前期投入大, 且换热器型式固定, 得到的曲线不具通用性.

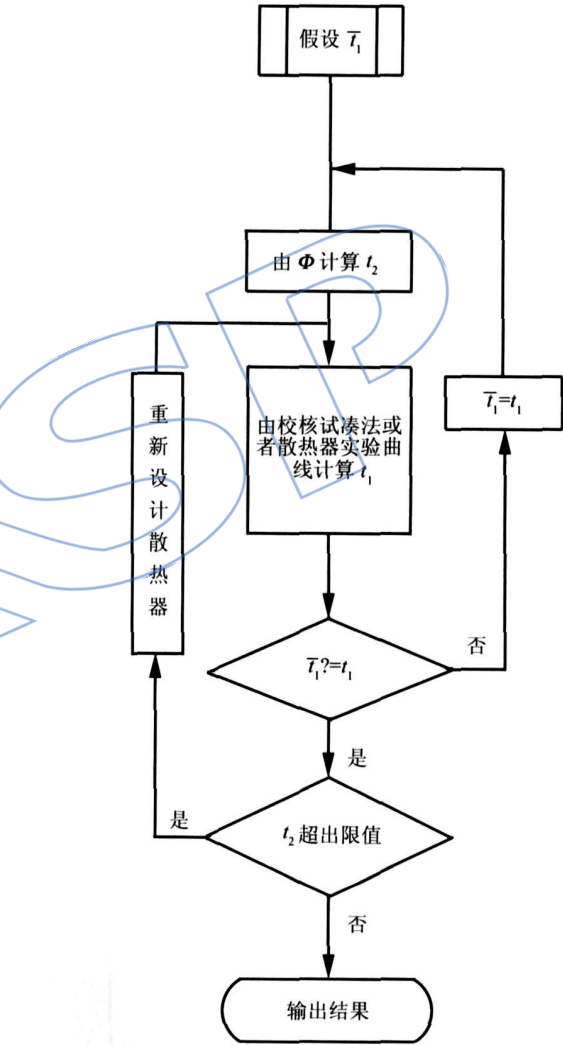


图 3 传统的滑油系统分析设计流程图

Fig.3 Conventional design method of oil system

改进方法则借鉴前文所述的换热器设计的新方法, 直接给定设计点 t_1 , 以 t_2 , t_1 作为换热器滑油进出口温度, 直接应用文献[14]中研制的滑油换热器 CAD 设计软件, 设计满足该散热要求的换热器结构, 从而保证 t_2 在允许的范围内, 不需要修改换热器的结构. 通过 CAD 软件设计出满足换热要求的换热器结构有多种, 将在变工况校

核的过程中予以筛选。

可以看出,改进方法通过换热器的设计保证了 Φ 和 Q 的热耦合,不需要迭代计算 t_1 ,通过设定 t_1 保证减速器滑油出口温度 t_2 在允许范围内,不需要重新设计换热器,提高了设计效率。

2) 变工况下校核

由图 3 可以看出,此设计过程未考虑变工况对系统热性能的影响。改进方法则通过计算变工况下系统新的热耦合点来筛选第一步设计出的换热器,并结合直升机上对换热器结构尺寸的要求,得到最终设计结果,保证变工况下系统仍能正常运行,提高了系统设计的可靠性,完善了系统设计。

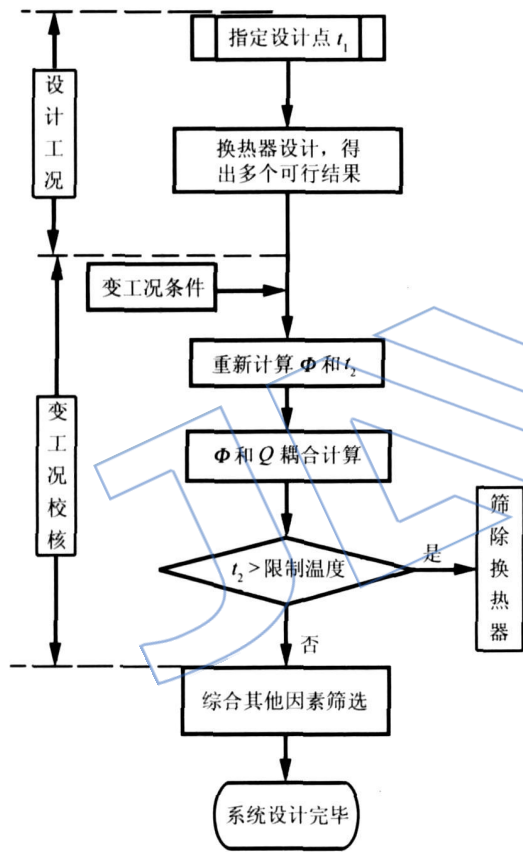


图 4 滑油系统冷却设计改进方法流程
Fig. 4 Flow chart of the developed design method

2 滑油系统热耦合分析

2.1 减速器对滑油加热的规律曲线

滑油从减速器的吸热量 Φ 与滑油的流量 q_m 、滑油入口温度 t_1 以及减速器的功率 W 和其损失有关,由于 Φ 与 q_m 、 t_1 、 W 的关系涉及两相传热等问题,很难得出具体的表达式,为简化分析,做如下假设:忽略发动机给减速器的传导及辐

射;不考虑轴承腔、运动摩擦副表面温度的不均,以名义温度 t_w ($^{\circ}\text{C}$) 表示减速器与滑油接触传热的表面温度;认为在减速器工况恒定的情况下,滑油和减速器表面的综合换热系数 h ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) 基本不变;忽略滑油与减速器内空气的换热;认为滑油和减速器接触的总表面积不变,用 A (m^2) 表示。于是有减速器表面与滑油传热的关系式

$$\Phi = q_m c_p (t_2 - t_1) = hA \Delta t_m = hA \frac{t_2 - t_1}{\ln[(t_w - t_1)/(t_w - t_2)]} \tag{1}$$

对式(1)进行分析,名义温度 t_w 主要受减速器功率 W 的影响,即 $t_w = f(W)$; h 主要由减速器传动功率 W 以及 t_1 影响,即 $h = f(t_1, W)$,可知在减速器恒定工况下式(1)可以近似表示为

$$\Phi = f(q_m, t_1, W) \tag{2}$$

在恒定的减速器工况下, W 恒定,同时 q_m 稳定,于是 $\Phi = f(q_m, t_1, W)$ 中的 Φ 只由 t_1 决定,即 $\Phi = f(t_1)$ 。于是,对式(1)进行整理后,得到 Φ 和 t_1 的函数关系式

$$\Phi = q_m c_p [(t_w - t_1) - (t_w - t_1) \backslash e^{hA/q_m c_p}] \tag{3}$$

对 t_1 求导

$$\dot{\Phi} = q_m c_p [-1 + 1 \backslash e^{hA/q_m c_p}] \tag{4}$$

由于 $\dot{\Phi} < 0$ 且 $\ddot{\Phi} = 0$,故在固定减速器工况下 Φ 随 t_1 的增大线性递减。当工况改变时, Φ 与 t_1 的线性曲线也会随着改变,如图 5 中实线可定性地表示不同工况下减速器对滑油的加热规律。

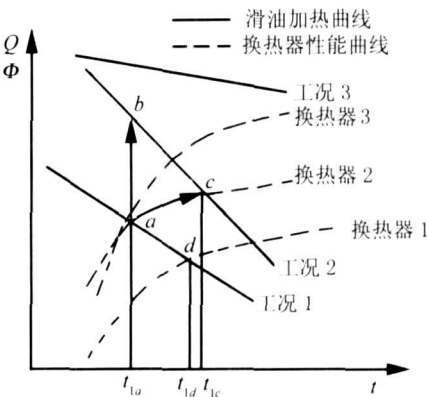


图 5 减速器加热和换热器性能曲线
Fig. 5 Performance of the heat exchanger and heat transfer principle between the decelerator and oil

2.2 换热器性能曲线

对于一个给定的换热器,由换热器的性能可知

$$Q = \varepsilon W_{\min}(t_1^{\text{oil}} - t_1^{\text{as}}) = W_{\text{oil}}(t_1^{\text{oil}} - t_2^{\text{oil}}) \tag{5}$$

其中 ε 为换热效率, $W_{\min}$ 为滑油和空气中较小的热容量, W_{oil} 为滑油热容量. 式(5)可变形为

$$Q = \varepsilon W_{\min} \left(t_2^{\text{oil}} - t_1^{\text{gas}} \right) \left(1 - \varepsilon W_{\min} / W_{\text{oil}} \right) \quad (6)$$

当空气侧入口条件、滑油入口流量不变时, 由 $Nu = cRe^mPr^n$, $Re = Gd/\mu A_c$, 以及 $\alpha = Nu\lambda/d_c$ (Nu , Re , G , μ , α , λ 分别为努塞尔数、雷诺数、流量、动力粘度、换热系数和导热系数, c , m , n 分别为系数) 可知, 除温度变化对滑油和空气物性参数有微小影响外, 滑油侧和空气侧的换热系数基本不变, 也即换热器效率基本不变, 滑油和空气的热容量变化也不大. 故从式(6)可近似得出换热器换热量 Φ 随着 t_2^{oil} 的增加而增加, 若用具有通用性的曲线来表示这种关系, 即有图 5 中虚线所示的换热器性能曲线, 图中不同的曲线针对不同的换热器结构.

2.3 系统热耦合分析以及变工况校核

如图 5 所示, 对于确定的减速器工况 1, 减速器给滑油的加热曲线与换热器性能曲线的交点即是系统工作点(如 a 点, d 点), 此时 $t_2^{\text{oil}} = t_1$, Φ 和 Q 相耦合. 工作点 a 对应的减速器滑油入口温度为 t_{1a} , 换热器 2 和 3 均可满足在 t_{1a} 的系统热耦合, 若采用换热器 1, 那么系统将在工作点 d 达到热耦合, 对应的减速器滑油入口温度为 t_{1d} .

当减速器工况改变时, 如由低转速工况 1 曲线变为高转速工况 2 曲线, 减速器给滑油的加热量增加, 当减速器滑油入口温度为 t_{1a} 时, 滑油从减速器吸收的热量 Φ 由 a 移至 b , 对于换热器 2, 由于需散走的热量增加, 使得工作点向 c 方向移动, 在从 t_{1a} 移向 t_{1c} 的过程中, Φ 又随着入口温度 t_1 的增加而减少, 从 b 点移至 c 点, 系统将在 c 点再次达到热耦合.

综上所述可看出, 基于对系统热耦合的分析, 提出的改进设计方法包括额定工作点的初始设计

和变工况点的校核两部分, 可从初始设计的多个结果中选择满足变工况散热要求的换热器.

3 系统冷却设计算例分析

以某直升机减速器系统为例进行滑油系统的冷却设计. 取最大连续状态为设计工况, 主减速器限制的起飞状态为变工况, 设计工况下减速器滑油入口温度 t_1 取为 $100\text{ }^\circ\text{C}$, 以 $130\text{ }^\circ\text{C}$ 为滑油工作限制温度, 取风扇流量为 0.75 kg/s , 滑油流量为 65 L/min , 空气入口温度 $t_{1\text{gas}}$ 为 $54\text{ }^\circ\text{C}$, 不同滑油入口温度下减速器给滑油的加热量由相关单位提供的实验数据查取. 由于滑油空气换热器两侧的传热性能差别较大, 故滑油侧选择锯齿型翅片, 空气侧选择百叶窗型翅片, 换热器总体结构设计为滑油侧双流程, 空气侧单流程.

系统设计结果如表 1 和图 6 所示. 从中可以看出, 对于设计出的换热器 I, 主减限制的起飞状态下减速器滑油入口平衡温度 t_1 为 $106.9\text{ }^\circ\text{C}$, 从

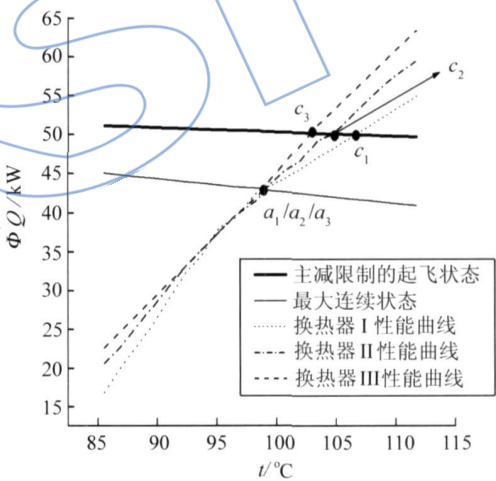


图 6 实例减速器加热和换热器散热曲线图

Fig. 6 Quantity of heat exchange between decelerator and oil and between gas and oil for this sample

表 1 某直升机减速器滑油系统冷却设计和变工况校核结果
Table 1 Thermal design and check results of a decelerator oil system

	换热器	数据点	$t_1 / ^\circ\text{C}$	$t_2 / ^\circ\text{C}$	Q/kW	换热器 长 mm× 宽 mm× 高 mm
巡航状态设计	换热器 I	a_1	100	120.9	42.745	340×136×141
	换热器 II	a_2	100.1	120.9	42.745	345×90×175
	换热器 III	a_3	100.1	120.9	42.745	360×118×192
最大状态校核	换热器 I	c_1	106.9	131.5	50.04	340×136×141
	换热器 II	c_2	103.2	128.4	51.26	345×90×175
	换热器 III	c_3	101.9	127.5	52.07	360×118×192

减速器吸收热量 50.04 kW, 出口温度 t_2 为 131.5 °C, 超出了限制值 130 °C, 故换热器的换热不够; 换热器 II 和换热器 III 在主减限制的起飞状态下减速器滑油出口温度 t_2 分别为 128.4 °C 和 127.5 °C, 散热性能足够, 综合考虑换热器尺寸及大小, 最终选择换热器 II, 设计完成。

由此例的设计结果可以看出, 减速器加热和换热器散热曲线图 6 与第 3 节理论分析得到的性能曲线图 5 相吻合, 说明改进的设计方法具有一定的可行性和准确性。

4 结束语

进行了直升机减速器滑油冷却系统的设计方法研究, 利用已研制成功的滑油换热器 CAD 软件, 基于对系统的工作原理、减速器生热规律、换热器散热特性的分析, 提出了系统冷却设计的改进方法。该方法避免了传统方法中热耦合时滑油温度的迭代计算, 解决了换热器设计依赖于实验曲线或者设计者经验的问题, 提高了系统设计的效率。基于对系统热耦合过程的理论分析, 改进方法加入了变工况下系统热性能的校核, 使得设计结果更具可靠性和实用性。最后, 以某直升机减速器系统为例, 编制了改进方法的 VC++ 程序进行滑油系统的冷却设计, 设计结果和参数曲线与理论分析相吻合, 说明改进的设计方法具有一定的可行性和准确性。

参考文献:

- [1] 杜马钦柯 H T, 克拉维茨 A C. 燃气涡轮发动机的滑油系统[M]. 毛可久, 译. 北京: 国防工业出版社, 1978.
- [2] 《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: 传动与润滑系统 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
- [3] Shimo M, Heister S D. Modeling oil flows on seal runners and engine sump walls [R]. AIAA 2002 3904, 2002.
- [4] Weinstock V D, Heister S D. Modeling oil flows in engine sumps: drop dynamics and wall impact simulation [R]. AIAA 2002 3939, 2002.
- [5] 夏小群. 润滑与冷却系统数字化平台设计技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
XIA Xiaqun. Study of lubrication and cooling system digitized design platform technology [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
- [6] 张效伟. 涡扇发动机滑油系统性能计算与分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
ZHANG Xiaowei. Turbofan engine lubrication and oil system performance computation and analysis [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
- [7] 刘振侠, 黄生勤, 吕亚国, 等. 航空发动机滑油系统通用分析软件开发[J]. 航空动力学报, 2007, 22(1): 12-17.
LIU Zhenxia, HUANG Shengqin, LÜ Yaguo, et al. General analysis software of aeroengine lubrication system design [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(1): 12-17. (in Chinese)
- [8] 杨春信, 张丽娜, 郭晖. 发动机滑油散热系统性能研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(6): 813-818.
YANG Chunxin, ZHANG Lina, GUO Hui. Investigation of performance of an engine Oil Cooling system [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(6): 813-818. (in Chinese)
- [9] 杨春信, 张丽娜, 郭晖. 发动机滑油散热系统性能计算方法及其应用[J]. 航空动力学报, 2005, 20(2): 219-224.
YANG Chunxin, ZHANG Lina, GUO Hui. Method for predicting the performance of oil cooling systems and its application [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(2): 219-224. (in Chinese)
- [10] 姬小明. 发动机润滑系统设计新方法及应用[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
JI Xiaoming. New development methods of lubrication system of engine and applications [D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese)
- [11] 李琳, 余建祖. 直升机滑油换热器的结构优化设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(3): 366-369.
LI Lin, YU Jianzu. Structure optimization of finned tube lubricate heat exchangers used in helicopters [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(3): 366-369. (in Chinese)
- [12] 高红霞, 余建祖, 谢永奇. 直升机用高转速、小流量轴流风扇设计[J]. 航空动力学报, 2006, 21(1): 119-124.
GAO Hongxia, YU Jianzu, XIE Yongqi. Design of a high rotating speed, low flow rate axial flow fan used on helicopters [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(1): 119-124. (in Chinese)
- [13] 李琳, 余建祖, 谢永奇. 直升机用小型高压离心式风机的设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(3): 244-247.
LI Lin, YU Jianzu, XIE Yongqi. Design of small size and high pressure centrifugal fans used in helicopters [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(3): 244-247. (in Chinese)
- [14] 高红霞, 余建祖, 朱啟昭, 等. 油-空气换热器板翅式结构的一种设计方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(增刊): 106-109.
GAO Hongxia, YU Jianzu, ZHU Qishao, et al. A design method of oil-gas plate-fin heat exchanger [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27: 106-109. (in Chinese)
- [15] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册第 13 册: 减速器 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.