

构建航空发动机滑油系统稳态模型^{*}

刘 波¹, 周 强¹, 程 礼², 王掩刚¹

(1 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072 2 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘 要: 研究模拟不同飞行条件下滑油系统稳态工作对滑油系统的设计和故障诊断具有重要的参考价值。基于部附件特性, 提出了依据 8 个航空发动机性能参数, 用向量计算和插值算法取代迭代算法来构建滑油系统稳态模型的方法, 并对发动机在海平面、最大工作状态条件下的滑油系统性能参数进行了验证计算。计算结果与设计数据吻合较好, 误差在 5% 以内, 表明所建立的稳态模型是有效的。滑油在各轴承腔和齿轮箱中的流量分配随空气压力变化, 计算误差主要来自轴承腔和齿轮箱压力分布假设, 为进一步提高计算精度, 必须建立航空发动机内部空气系统模型。

关键词: 航空发动机; 滑油系统⁺; 稳态模型⁺; 数值模拟

中图分类号: V233.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055(2005)06-0556-04

Construction of steady model for an engine oil system

LIU Bo¹, ZHOU Qiang¹, CHENG Li², WANG Yan-gang¹

(1. School of Power and Energy Northwestem Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China

2. Engineering Inst., Air Force Engineering Univ., Xi'an 710038, China)

Abstract It is rather worth investigating and simulating for the construction of oil system model in diverse flight conditions and steady states for design and troubleshooting purpose. The method for constructing aero engine oil system computational model that begins with eight of aero engine performance parameters based on characteristic models of different oil parts has been presented, employing vector calculus and interpolation algorithm to replace iteration. Test computation for the model on condition that aero engine operates in maximum regime at sea level has been performed. The fact that the results of test computation consist with design data fairly with the errors between them within 5%, shows that the model is valid. Since the oil flow flowing into each bearing casing or gearbox varies with the pressure of relevant bearing casing or gearbox, the errors is caused by the hypotheses on pressure distribution of bearing casings or gearboxes. In order to promote computational precision of the model, it is necessary to construct computational model of aero engine internal air system.

Key words Aircraft engine; Oil system⁺; Steady model; Numerical simulation

1 引 言

滑油系统的性能会对航空发动机的稳定性和可靠性产生直接的影响, 建立模型模拟不同条件下滑油系统的工作, 对滑油系统设计和故障诊断具有重要参考价值。目前, 国内主要以滑油分系统性能和滑油部件特性作为研究对象^[1,2], 对航空发动机滑油系统性能的研究很少; 西方国家在 20 世纪 50 年代就已掌握

了滑油系统设计技术^[3], 但出于保密原因, 公开发表的有参考价值的文献极少。20 世纪 70 年代以来, 航空发动机飞行包线范围不断扩大, 特别是适于高空、高速飞行航空发动机的出现, 说明滑油系统的设计技术有了重大的进展^[4,5]。

本文以航空发动机滑油系统为研究对象, 以滑油进口温度和在各润滑部位流量分布为性能参数, 提出依据 8 个发动机性能参数, 基于各部附件特性, 应用

* 收稿日期: 2004-11-09 修订日期: 2005-05-08

作者简介: 刘 波 (1960—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为航空宇航推进理论与工程的研究。

向量运算和插值算法构建了滑油系统稳态模型。通过在海平面、发动机最大状态下对模型的验证计算及分析,说明建模方法是可行,所建模型是有效的。

2 滑油分系统模型

滑油系统按照功能可分为空气密封、供油散热、流量分配和回油四个分系统。稳态模型也相应地分为四个部分,并引入 8 个发动机性能参数,即:高低压转子转速 (n_L, n_H)、高低压出口总压和总温 ($p_L^*, T_L^*, p_H^*, T_H^*$)、空气流量 (m_a) 和燃油消耗量 (m_f)。稳态模型中,空气密封模型是其它模型的基础,供油散热模型和流量分配模型是稳态模型的主体,回油模型用来确认滑油系统工作状态。8 个发动机性能参数在稳态模型中的作用及各分系统模型之间的关系见图 1。

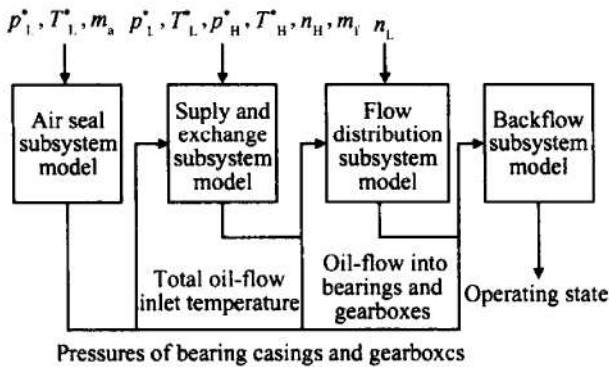


Fig 1 Steady model composed by subsystem based on engine performance parameters

2.1 空气密封模型

确定各轴承腔与齿轮箱空气压力,必须建立发动机内部空气系统模型。目前,虽不能建立该模型,但已有较为精确的经验公式,并假设除低压前轴承外的各轴承腔和内齿轮箱(简称主轴腔)压力与高压止推轴承腔压力相同,低速齿轮箱、高速齿轮箱和辅助齿轮箱(简称齿轮箱)的压力相同。

主轴腔空气压力计算公式^[6]为

$$p_C = \frac{p_{CB}}{1.0135} \quad (1)$$

主轴腔的周围空气压力与低压压气机出口静压比值 p_{CB}/p_L 随 p_L/p_0 的变化见图 2。

低压压气机前轴承腔压力 p_F 为

$$p_F = 0.975p_L - 6894.76 \quad (2)$$

齿轮箱空气压力 p_w 为

$$p_w = p_B \left| 1 + \frac{6.56}{T_L^*} \right| \quad (3)$$

式中离心通风器进口压力 p_B 由图 3 所示的 p_B/p_0 离

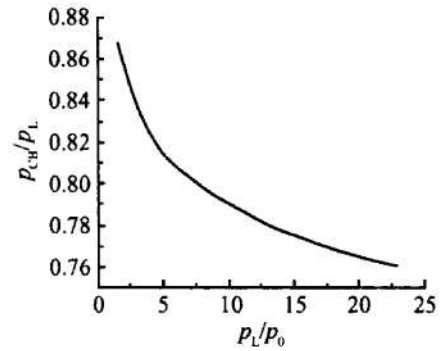


Fig 2 Variation of variable p_{CB}/p_L with p_L/p_0

心通风器换算流量随 $m_{Bcr} = \frac{m_B \sqrt{T_L^*}}{p_0}$ 的变化曲线得到。 $p_L/p_0 > 2$ 时,其质量流量 $m_B = \frac{1.8967 \times 10^{-8} p_L}{\sqrt{T_L}}$;

$p_L/p_0 < 2$ 时,则 $m_B = 1.15 \times 10^{-4} m_a$ 。

低压压气机的出口静压 p_L 可由下式得到

$$\left| \frac{m_a \sqrt{T_L^*}}{A p_L} \right|^2 = \frac{2}{R} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left| \left| \frac{p_L^*}{p_L} \right|^{-\frac{2}{k}} - \left| \frac{p_L^*}{p_L} \right|^{\frac{1+k}{k}} \right| \quad (4)$$

式中 A 为低压压气机出口处流道面积。

2.2 供油散热模型

滑油泵供油量 m_o 计算公式^[3]为

$$m_o = \left| \frac{87.87 W a C n_H - 3.12}{10^{12} A_p \left(\frac{1}{\mu} \right) \Delta p_p} \right| p \quad (5)$$

式中 $A_p = 2W \left| r + \left| \frac{C}{2} + a \right| \alpha (T - 20) \right| + 2(C + a - d) [e + W \alpha (T - 20)]$ 。 W, a, C 分别为泵齿轮齿宽、齿顶高和节圆直径; $A_p, \Delta p_p$ 分别为泵漏油面积和进出口压差; r, e 分别为常温时齿顶间隙和齿端间隙; α 为泵线膨胀系数; μ, ρ 分别为滑油绝对粘度和密度。

滑油散热器的计算公式^[6]为

$$\begin{aligned} Q &= K (T_{a, in} - T_{f, in}) \\ Q &= m_o (C_{p, o} T_{a, in} - C_{p, o} T_{a, out}) \\ Q &= m_f (C_{p, f} T_{f, out} - C_{p, f} T_{f, in}) \end{aligned} \quad (6)$$

式中 m_f, m_o 分别为散热器燃油流量和滑油质量流量; $T_{f, in}, T_{f, out}$ 和 $T_{a, in}, T_{a, out}$ 分别为燃油、滑油进出口温度,与之相应的比热容分别为 $C_{p, f}$ 和 $C_{p, o}$ 。根据 $T_{a, in}$ 和 $T_{f, in}$, 由图 4 得燃油滑油散热器散热系数 K , 由式 (5) 计算 $T_{a, out}$ 。

空气滑油散热的计算方法相同,散热系数 K 由图 5 可得。进入空气滑油散热器的冷却空气质量流

量 m_A 由图 6 所示的发动机进口总压与 p_0 比值 p_1^*/p_0 随散热器空气换算流量 $m_{A,cr}$ 的变化曲线得到。此外,燃油流经离心增压泵,温度有所上升,上升幅度与增压泵转速与流量有关,见图 7。

发动机对滑油的加热量用无因次量表示为^[3]

$$\frac{1.028H \times 10^6}{\rho_{H_1}^3 \left| \frac{T_c}{T_{a,out}} \right| \cdot \left| \frac{p_1}{14.7} \right|^{0.335}} = f\left(\frac{n_H}{\sqrt{T_1^*}}\right) \quad (7)$$

式中 H 为发动机对滑油的加热量; T_c 为发动机高压止推轴承腔周围空气温度,可由图 8 中的 T_c/T_1^* 随 T_H^*/T_1^* 的变化曲线得到; T_1^* 为发动机进口处总温。

2.3 流量分配模型

对于弯管管路损失,采用当量直管法计算,对于急剧弯管的管路损失,可引入动压损失系数来进行计算。具体内容可参见文献[7]。

2.4 回油模型

由于回油泵必须克服因高速转动而产生的离心力,因此,只有当各轴承腔和齿轮箱的空气压力大于离心力时,回油泵才能正常工作,以保证滑油系统持续工作。各回油泵离心力 p_{cf} 为

$$p_{cf} = \frac{\rho \omega^2}{2} [r_o^2 - r_i^2] \quad (8)$$

式中 r_o r_i ω 分别为回油泵齿顶圆与齿根圆半径及泵

的角速度。

回油泵最小流量公式^[6]为

$$m_{q,h} = 1.5832 \times 10^{-2} W a C n_p \rho \quad (9)$$

式中 n_p 为回油泵转速。

3 稳态模型的构建与计算分析

滑油系统稳态模型首先确定发动机外部条件和工作状态,输入相应的工作条件参数和 8 个发动机性能参数,计算确定滑油系统各轴承腔和齿轮箱中的空气压力;采用预估滑油箱温度和供油泵进出口压力差范围,分别对滑油散热器与发动机对滑油加热量进行热量-温度平衡计算和对供油泵进出口压差与有关滑油管路损失之和进行压力-流量平衡计算的方法,计算滑油进口温度和总流量;在滑油进口温度不变的情况下,采用预估低压压气机后轴承处、高速齿轮箱和辅助齿轮箱内部管路中限流孔处的滑油流量范围,分别对有关管路和限流孔进行压力-流量平衡计算的方法,计算各轴承腔和齿轮箱的流量;计算各回油泵离心力,与各回油泵所处轴承腔或齿轮箱空气压力相比较,判断回油泵的工作状态,在回油泵正常工作情况下,计算各回油泵的回油量,并与回油泵所在油池的滑油量相比较,以确认滑油系统能否持续正常供油。

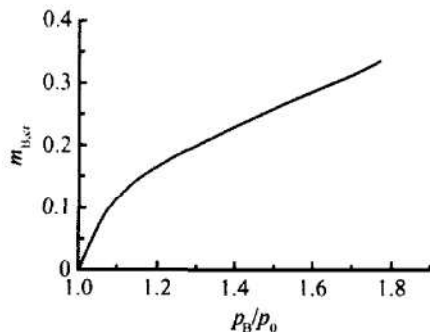


Fig. 3 Variation of variable $m_{B,cr}$ with p_B/p_0

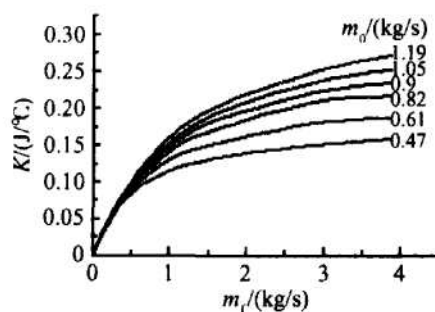


Fig. 4 Characteristic curve of fuel-oil exchanger

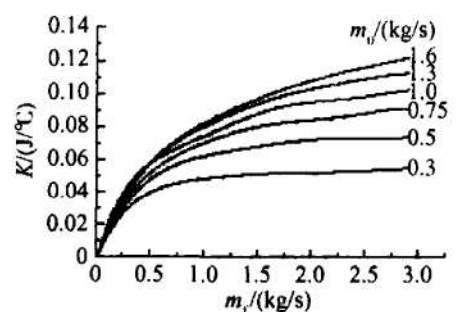


Fig. 5 Characteristic curve of air-oil exchanger

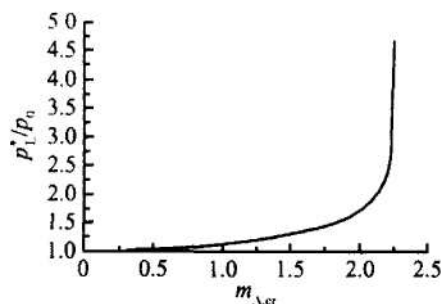


Fig. 6 Air flow curve of air-oil exchanger

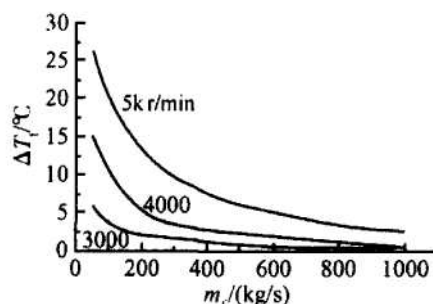


Fig. 7 Temperature increments of fuel via fuel-pump

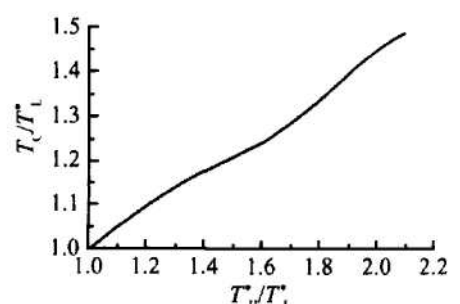


Fig. 8 Air temperature at HP antithrust bearing

在稳态模型中,考虑到不同温度下燃油和滑油密度,滑油粘性系数会发生变化的实际,采取了变密度和变系数算法。滑油消耗量也是滑油系统的性能参数之一。但主要通过实验的方法来确定^[8],故不在本文讨论范围之列。

由于滑油部附件的特性具有呈单调变化的特点,在预估有关滑油系统参数范围时,将取值范围等间隔划分,以间隔点数值作为向量参数的元素。利用向量参数元素的对应性,在计算中应用向量运算和插值算法取代迭代计算,引入插值算法进行变密度和变系数计算,采用三次样条插值、三次插值等一维内插算法,并以此编制相应的程序。在保证向量参数对应性的前提下,保证计算精度,缩短计算时间,提高效率。

本文所提出的建立滑油系统稳态模型的方法和以向量运算和插值计算取代迭代计算的算法,尚未在其它公开文献中出现过。

编制稳态模型计算程序后,根据已有的设计数据,对海平面、发动机最大状态条件下滑油系统稳态性能参数进行了验证计算,计算结果与设计数据的比较见表 1,两者吻合较好,相对误差在 5% 之内,表明所构建的滑油稳态系统模型能准确模拟该海平面、发动机最大状态条件下滑油系统的工作过程。由稳态模型计算得到发动机滑油进口温度为 131.84℃,完全符合小于发动机滑油进口最高允许温度 135℃ 的要求。

Table 1 Comparison with computing results and design data

Performance parameters	Computation results/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Design data/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Relative errors/%
Flow to fore bearing of LPC	1.056	1.053	0.28
Flow to back bearing of LPC	1.032	1.004	2.79
Flow to fore bearing of HPC	1.793	1.758	1.99
Flow to LP antithrust bearing	3.234	3.167	2.12
Flow to HP antithrust bearing	5.000	4.902	1.88
Flow to LP turbine bearing	1.762	1.750	0.68
Flow to HP turbine bearing	2.393	2.470	-3.12
Flow to internal gearbox	2.126	2.091	1.67
Flow to high speed gearbox	7.493	7.653	-2.09
Flow to auxiliary gearbox	3.368	3.22	4.59
Flow to low speed gearbox	0.659	0.659	0
Overflow to oil tank	3.384	3.235	4.6
Total flow of oil system	33.300	32.962	1.02

计算结果表明:除低压压气机前轴承外的各轴承腔空气压力与止推轴承腔压力相等的假定不能反映各轴承腔间空气压力的实际变化,是产生验证计算误

差的主要原因;计算误差还可能与忽略个别管路损失和忽略各轴承腔与齿轮箱中的喷嘴内径随环境温度的变化有关。因此,有必要建立航空发动机内部空气系统模型,以进一步提高稳态模型的计算精度。计算结果还表明:滑油温度变化对滑油流量分配的影响,不如各轴承腔和齿轮箱中空气压力的变化明显。

4 结 论

(1)航空发动机滑油系统稳态模型是以滑油系统整体为研究对象,在滑油系统各部附件特性的基础上构建的,稳态模型在海平面、发动机最大状态条件下的计算结果与设计数据的误差在 5% 以内,两者吻合较好,说明所建稳态模型是有效的,构建模型的方法是可行的。

(2)轴承腔和齿轮箱空气压力由低压压气机出口总压决定,滑油系统总流量和轴承腔和齿轮箱中滑油流量的分配主要由轴承腔和齿轮箱的空气压力决定。可见,滑油流量在轴承腔和齿轮箱中的分配由低压压气机出口总压决定。

(3)计算误差主要来自对轴承腔和齿轮箱空气压力的假设,在构建发动机冷却空气系统工作模型后,可进一步提高稳态模型的计算精度。

参考文献:

- [1] 杨春信,张丽娜,郭 辉. 发动机滑油散热系统性能分析 [J]. 航空动力学报. 2003. 18(6).
- [2] 马 壮,程 礼. 航空发动机滑油系统稳态压力模型研究 [J]. 航空动力学报. 2004. 18(6).
- [3] 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.
- [4] Bisset paal Powerplant engineering for commercial engines-Bearings and seal design [M]. GE. Cincinnati Ohio USA. 1991.
- [5] 林基恕. 高性能涡轮发动机润滑油系统设计 [J]. 涡轮试验与研究. 2003 (1).
- [6] 《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 [M]. 北京:航空工业出版社,2002.
- [7] 何永森,刘邵英. 机械管内流体数值预测 [M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [8] 汪海源,杨九高. 燃气涡轮发动机滑油系统滑油消耗量测量方法 (PIM 1579-78) [S]. 北京:中国航空工业标准化研究所. 2000.

(编辑:朱立影)