

## 航空发动机滑油系统稳态模型的算法构造

周 强<sup>1</sup>, 刘 波<sup>1</sup>, 程 礼<sup>2</sup>, 薛省卫<sup>3</sup>

(1. 西北工业大学 航空动力与热能工程学院, 陕西 西安 710072;

2. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 3. 兰州军区空军航空中心修理厂, 陕西 西安 710077)



**摘 要:**滑油系统作为航空发动机关键系统之一,对航空发动机的可靠性起着决定性作用。在分析滑油系统部附件的基础上,根据部附件特性单调变化的特点,提出了“平衡计算”的概念,应用向量运算方法和多种插值算法取代传统的迭代算法来构造航空发动机滑油系统稳态模型算法的思路和方法,并用该算法编制程序对发动机在海平面最大状态下滑油系统性能参数进行了验算。验算结果与技术数据吻合较好,表明所构建的稳态模型算法是有效、可行的,可普遍用于模拟各种航空发动机滑油系统的工作状态。

**关键词:**航空发动机;滑油系统;稳态模型;计算方法

**中图分类号:**V233.4

**文献标识码:**A

**文章编号:**1671-654X(2005)02-0098-04

## 引言

滑油系统是航空发动机的关键系统之一,是航空发动机各承力和传动部件进行润滑和冷却的核心系统,对发动机的工作可靠性起着决定性作用。构建航空发动机滑油系统稳态模型的目的就是要研究滑油系统在不同飞行条件下的工作状态和性能,以检验发动机的可靠性。其中,算法是发动机滑油系统稳态模型的核心,它不仅将滑油系统各部附件的特性有机地组成一个整体,而且能显示不同飞行条件下滑油系统工作状态,并给出相应的性能数据。

目前,国外关于航空发动机滑油系统工作模型的公开报告和资料较少,国内相关研究也多集中于滑油系统部附件特性和分系统特性。根据现有资料,以往发动机滑油系统稳态模型的计算过程多采用迭代方式进行,运算量大且费时费力。本文引入了应用广泛的向量运算和插值算法来构造滑油系统稳态模型,不仅节省了计算时间,提高了运算效率,同时也保证了计算结果具有较高的精度。该算法对于其他型号发动机滑油系统稳态模型也具有较好的适应性。

## 1 结构与部附件特性分析

构造适用于发动机滑油系统稳态模型的算法,需要以研究滑油系统的构造和滑油部件具体特性为基础。正是由于滑油部件流量与压力损失、温度与流量之间的单调变化,才能够实现向量运算和插值运算,

才能保证各种参数数值的唯一性。

## 1.1 滑油系统结构

本文所研究的航空发动机滑油系统如图1所示,各轴承腔和齿轮箱是主要的润滑部位。其工作过程以分配接头为分界点,可分为供油冷却、滑油分配和回油三种过程。需要说明的是,各轴承腔和齿轮箱中空气压力对滑油系统的工作具有决定作用:在供油冷却过程,滑油箱与高速齿轮箱相通,分配接头与低压止推轴承腔相通,滑油箱和分配接头处的滑油压力分别等于高速齿轮箱和低压止推轴承腔空气压力与一定值之和,当滑油温度一定时,高压止推轴承腔与高速齿轮箱的空气压力之差,决定了滑油系统向发动机提供的滑油量;在滑油分配过程,各轴承腔和齿轮箱空气压力作为该处滑油喷嘴反压,决定了各润滑部位的滑油分配量;在回油过程,各轴承腔和齿轮箱空气压力决定了相应的回油泵的工作状态和回油能力。各轴承腔和齿轮箱空气压力取决于发动机低压压气机出口处空气压力和温度,这主要由发动机的飞行条件和工作状态决定。确定这些腔室空气压力也是滑油系统稳态模型的重要组成部分,但由于其可以单独计算,故不在本文的讨论范围之内。

## 1.2 部附件特性分析

## 1.2.1 滑油泵特性

滑油泵为齿轮泵,其供油量由理论供油量与漏油量两部分组成,前者由高压转子转速决定,后者则取

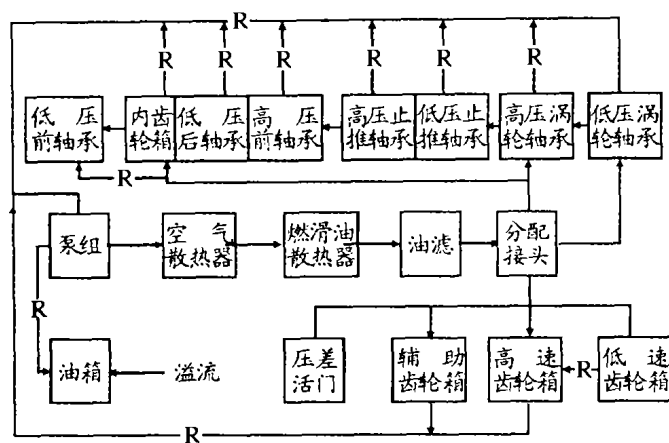


图1 发动机滑油系统

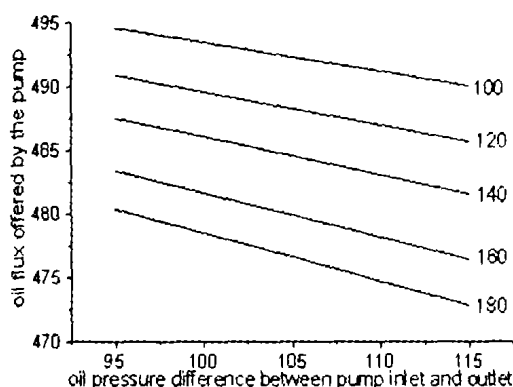


图2 油泵特性曲线

决于流经泵的滑油温度和滑油泵进出口压差。由图2所示,随着流经泵的滑油温度、滑油泵进出口压差不断增加,滑油泵供油量不断减少。主要是因为滑油温度增加,导致滑油泵内部漏油面积增大,滑油粘性的下降程度大于滑油密度,造成泵供油量下降;在泵漏油面积和滑油物理性质不变条件下,泵进出口压差增大,导致滑油从泵的高压区经滑油泵内部间隙反流至低压区的数量增大,从而造成泵供油量下降。

### 1.2.2 导管流阻特性

滑油导管沿程阻力与导管中滑油流量的大小有关。图3表示一段带有弯管的滑油管路的流阻特性。可见,在滑油温度一定的条件下,导管的沿程阻力随着导管流量的增大而增大。

### 1.2.3 滑油散热器特性

滑油散热器按照冷却介质的不同可分为空气滑油散热器和燃油滑油散热器。前者需要确定流过的空气流量。由图4可见,无论冷却介质流量增大,还是滑油流量增大,在散热器中交换的单位热量将随之增大,这是因为随着流体流量增加,管壁附近流体附面层厚度减小,温度梯度增大的结果。滑油管路的流阻特性如图5所示。

### 1.2.4 发动机对滑油的加热特性

当发动机工作条件和工作状态一定时;发动机加给滑油系统的热量与流过滑油散热器后的滑油温度有关。图6给出了在地面最大起飞状态时发动机对滑油的加热特性。由图6可见,随着滑油温度升高,发动机加给滑油的热量减少。发动机加给滑油系统的热量,由燃油滑油散热器和空气滑油散热器散去,在燃油滑油器中,热量用来提高燃油温度,以提高燃油在燃烧室中的雾化效果。

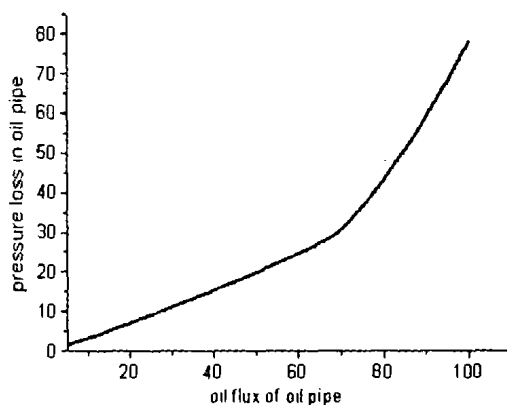


图3 滑油导管流阻特性

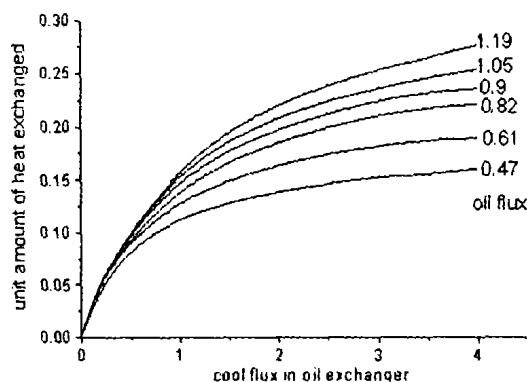


图4 油温变化特性

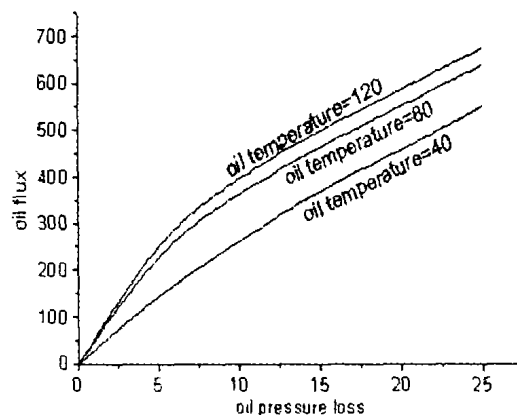


图5 散热器流阻特性

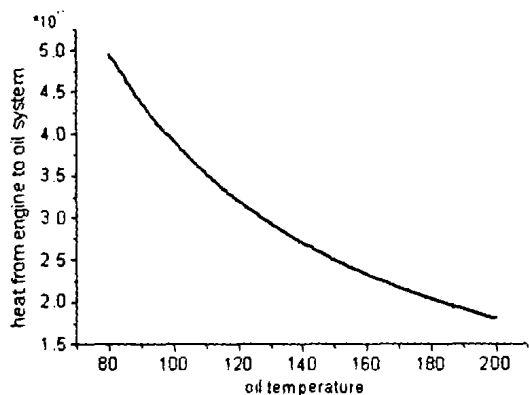


图6 发动机对滑油的加热特性

## 2 算法构造

由于发动机是在某个外界条件下以一定状态工作的,因此,确定发动机工作的外部条件和取得工作状态的有关参数是模拟发动机滑油系统稳态工作过程的关键。在取得发动机工作的高度飞行条件(飞行高度和飞行马赫数)和发动机相关的性能参数(高低压转子转速、高低压压气机出口总温和总压、空气流量和燃油消耗量)的前提下,可计算出该条件下发动机各轴承腔和齿轮箱内空气压力,能够模拟发动机稳态工作时滑油系统的工作状况。

### 2.1 构造思路

从前面的分析可知,滑油系统的滑油温度、流量和压力损失中任何2个参数的关系是单调变化的。从滑油系统的实际工作过程也可知,供油冷却过程中滑油温度、流量和压力损失的计算过程是收敛的。

按照以往的经验,模型的计算应采用迭代方式进行:即给出相关参数的初始值,不断地进行迭代,直至得出真实值。滑油部件特性决定了其取值范围较宽,给出的初始值不可能逼近真实值,这样就需要增加迭代的次数,相应地增加了运算量和运算时间。针对滑油系统中参数之间的关系是单调变化的特点,结合目前计算机可广泛进行向量和矩阵计算的实际情况,在确定相关参数的上限与下限的基础上,适当地将参数的数值范围等间隔划分,将包括上下限在内的数值间隔点作为向量元素,使需要给出初始值的参数成为向量参数。这样,只需进行从滑油箱到分配接头的一次性计算,即可得到所需的相应向量参数值。在计算过程中,对于某个向量参数会存在两个向量参数值。由于滑油系统中参数数值对于确定的发动机工作条件和状态而言是单一的,同时在向量运算过程中,所得向量的维数与代入向量的一致,且其中的元素之间是一一对应的。因此,可以构造一种“平衡计算”方法:对这两个向量参数值进行减运算,所得的差向量中必

有一元素数值为零,然后对向量参数值进行插值运算,找出差向量中数值为零的元素所对应的相关向量元素值。

### 2.2 供油冷却的算法构造

参见图1,可以将滑油系统中滑油从滑油箱,经增压泵、空气滑油散热器、燃油滑油散热器流至分配接头处的过程,称为供油冷却过程。此时,滑油箱内空气压力和分配接头处滑油压力是可确定的,需要知道滑油在分配接头处的温度和流量。滑油在这一流动过程中,温度、流量和压力的变化各现出不同的特点,如对于增压泵,流量是温度和进出口压力的函数;对于散热器而言,温度由流量决定,沿程阻力是温度和流量的函数,但分配接头处的温度、流量是供油泵进出口压差与滑油箱压力同分配接头滑油压力之差相平衡和两个散热器所散去的热量与发动机加给滑油系统的热量相平衡的结果。

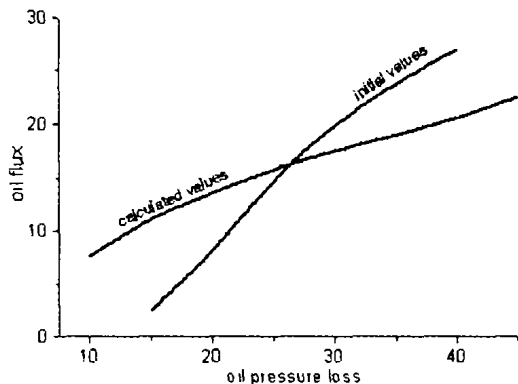


图7 流量平滑计算示例

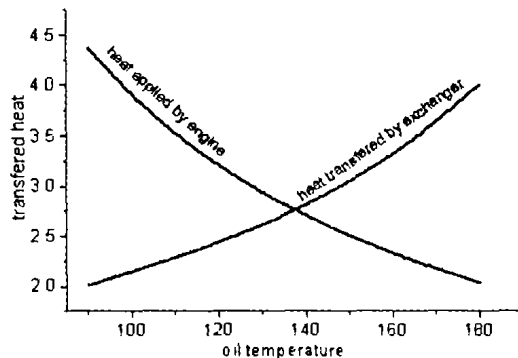


图8 热量平衡计算示例

在具体计算中,将供油冷却过程的计算分为内外两层来进行。将滑油箱中滑油温度的范围经2.1所述的处理后,作为外层计算的初始向量参数值。对于其中的元素—每一个滑油箱初始温度,将供油泵进出口压差的范围作同样处理后,作为内层计算的初始向量参数值。在内层计算中,根据初始向量参数值,沿流动方向依次计算出供油泵流量、两个散热器的散热量和压力损失、各管路中的压力损失等向量参数值,并

由散热器和各管路的压力损失,计算出供油泵进出口压差的向量参数值。对于将两个供油泵进出口压差向量参数值进行“平衡计算”,得到分配接头处单一的流量值及两个散热器的散热量。将这些单一的参数值作为与外层计算初始值相对应的向量参数元素。根据所得的分配接头处滑油温度向量值,计算出发动机对滑油系统加热的向量值。对于散热量和加热量这两个向量进行平衡计算,即可得到分配接头处的流量和温度值。

图 7 和图 8 分别示意了流量和热量“平衡计算”原理。图中两条曲线的交叉点就是滑油系统的工作点。

### 2.3 滑油分配的算法构造

同样如图 1 所示,可以将滑油系统中滑油从分配接头经导管进入各轴承腔和齿轮箱的过程称为滑油分配过程。由于各轴承腔和齿轮箱中的空气压力和滑油在导管中的压力损失的共同作用,滑油被分配至各润滑部位,从而保证了发动机的正常工作。在发动机工作条件和状态确定的情况下,各轴承腔与齿轮箱内的空气压力和分配接头处的滑油压力也承之确定。此过程中可认为滑油温度不变,流量是压力的函数。

以计算滑油进入各轴承腔的流量为例。滑油进入低压前轴承腔的流量由低压转子转速决定。给出低压后轴承腔滑油喷嘴的流量向量值,逆着流动方向计算各轴承腔内滑油流量和滑油进入喷嘴前的压力等向量值,直至分配接头前任一导管,取该导管作为“平衡计算”点,进行“平衡计算,得到各轴承腔和内齿轮箱的滑油分配情况。高速和辅助齿轮箱中滑油喷嘴数量较多,其算法构造方法与此相同。

## 3 验证计算

用该算法建立发动机滑油系统稳态模型并编制计算程序后,对发动机在海平面最大起飞状态的滑油系统性能参数进行了验证计算。将计算结果与该型发动机技术数据进行了比较,如下表所示,两者相差在 5% 以内。说明本文所构造的算法对于发动机稳态模型是可行、有效的,同时也证明了所建立的滑油系统稳态模型是可行、有效的。

## 4 结论

1) 本文根据发动机滑油系统部件特性单调变化的特点,提出了矩阵运算和插值运算取代迭代运算的算法,并进行了验证计算。计算结果与技术数据的吻合较好,表明算法是有效、可行的。

计算结果与技术数据对比表

滑油系统参数	计算结果	资料数据	相对误差
发动机滑油进口温度(℃)	131.84	≤135	—
低压压气机前轴承(L/min)	1.056	1.053	0.28%
低压压气机后轴承(L/min)	1.032	1.004	2.79%
滑油系统参数	计算结果	资料数据	相对误差
高压压气机前轴承(L/min)	1.793	1.758	1.99%
中介轴承(L/min)	3.234	3.167	2.12%
高压止推轴承(L/min)	5.000	4.902	1.88%
低压涡轮轴承(L/min)	1.762	1.750	0.68%
高压涡轮轴承(L/min)	2.393	2.470	-3.12%
内齿轮箱(L/min)	2.126	2.091	1.67%
高速齿轮箱(L/min)	7.493	7.653	-2.09%
辅助齿轮箱(L/min)	3.368	3.22	4.59%
低速齿轮箱(L/min)	0.659	0.659	0%
溢流量流(L/min)	3.384	3.235	4.6%
滑油流量总计(L/min)	33.300	32.962	1.02%

2) 本文所用算法的优点在于:与迭代运算相比,既能保证较高的计算精度,又能较大幅度减少计算时间和运算量,提高了计算效率。

### 参考文献:

- [1] 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,1986,12.
- [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):P398-400.
- [3] 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):P813-818.
- [4] 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,1999,02.
- [5] 余建祖. 换热器设计[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2000,01.
- [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] 林基恕. 高性能涡轮发动机润滑系统设计[J]. 涡轮试验与研究,2003,(1):P7-P9.

(下转第 104 页)

## Research of Air Localization by Airborne Radar

CAO Zhi-gang<sup>1</sup>, CHAI Chun-Hong<sup>1</sup>, WANG Zheng-wu<sup>1</sup>, CHAI hui<sup>2</sup>

(1. *Mathematics Teaching and Researching Office, The First Aeronautic Institute of Air Force, Xinyang 464000, China*; 2. *94314 ARMY, Zhengzhou 450046, China*)

**Abstract:** Omnidirectional radar is the necessary electronic counterwork equipment in modern tactical fighter. It functions by accepting the radar signals from the threat, which will be computer-disposed by analyzing the signal character and distinguishing the type, direction, etc. It provides the aircrew with the warning audio-visual signals. In this paper, the author analyzes the two-shipper localization by active service airborne omnidirectional radar, gives the space coordinate formula of the threat with direction cosine by well-conceived maths deducing. This formula is concise and its program running time is short, so it provides the guarantee for monitoring the threat. At the same time, he theoretically analyzes the location errors from two points of views and gives out the error area and the max-error limit respectively.

**Key words:** airborne radar; two-shipper localization; localization error

(上接第101页)

## Algorithmic Construction for Aero Engine Oil System Steady Model

ZHOU Qiang<sup>1</sup>, LIU Bo<sup>1</sup>, CHENG Li<sup>2</sup>, XUE Xing-wei<sup>3</sup>

(1. *Coll. of Power & Energy Engineering, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China*;  
2. *Coll. of Engineering, Air Force Engineering Univ., Xi'an 710038, China*;  
3. *Lanzhou Military Area Command Air Force Aviation Materiel Repair Centre, Xi'an 710077, China*)

**Abstract:** The oil system, as one of the aero engine key systems, plays a crucial role on the reliabilities of aero engine. The method of constructing arithmetic of oil system steady model for aero engine has been elaborated in this paper, which is based on the analyses of different parts' characteristics that show monotone variation relationship and which introduces the notion "balanced calculation" to replace traditional iteration with vector calculus and various interpolation algorithms. The numerical calculations of the aero engine oil system with the arithmetic on condition that the aero engine works at sea level operates in maximum regime have been conducted for checking purpose. The calculated results nearly in agreement with the data given by designer, shows that the employed arithmetic is valid and practical and could be used in simulating the characteristics of diverse engine oil systems effectively.

**Key words:** aero engine; oil system; steady model; algorithmic construction