

# 航空发动机滑油系统的现状及未来发展

李国权

(中航工业沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)



李国权(1963),男,自然科学研究员,从事航空发动机滑油系统设计工作。

收稿日期:2011-02-23

**摘要:**滑油系统是航空发动机机械系统的重要组成部分。随着中国航空发动机的发展,对其滑油系统的研究逐步深入,在系统的设计原理、系统热分析、系统组成部件、润滑油、系统检测等几个方面正在从仿制走向自行研制的道路。对发动机滑油系统的发展现状进行了分类描述,总结了未来发动机研制滑油系统的发展方向。

**关键词:**滑油系统;润滑油;状态监测;航空发动机

## Present and Future of Aeroengin Oil System

LI Guo-quan

(AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** The oil system is an important component of aeroengine mechanical system. With the development of aeroengine technology in China, the design principle, heat analysis, components, oil and system examination of oil system can be self-designed independent of

copied. The classified description of the development situation of oil system was conducted, and the future development was summarized for aeroengine oil system.

**Key words:** oil system; oil; condition monitoring; aeroengine

## 0 引言

航空发动机转子需轴承支撑,发动机功率的提取靠机械传动来实现。滑油系统为发动机轴承、齿轮等提供滑油,以减少摩擦与磨损,并带走其所产生的热量,是航空发动机机械系统的重要组成部分,决定发动机能否安全且可靠地工作。

中国航空发动机滑油系统早期主要是仿制苏制发动机的。林基恕系统总结了我国航空发动机滑油系统仿制的经验,较为详细地阐述了滑油系统的原理和计算方法、部件原理和设计技术、润滑油和状态监测等<sup>[1]</sup>。

近年来,随着中国航空发动机的发展,许多中国学者对滑油系统从系统的设计原理、系统热分析、系统组成部件、润滑油、系统检测等方面进行了比较深入的研究,滑油系统设计逐步从仿制走上自行发展的道路。

## 1 航空发动机滑油系统的研究现状

### 1.1 对滑油系统的研究

航空发动机滑油系统包括供油系统、回油系统和通风系统。对系统的研究包括:供回油协调、供油系统分析(过滤、防虹吸、压力、流量、温度等)、通风系统压力、流量计算等。

关于供回油协调,目前国内主要沿用俄罗斯早期回油供油比 4:1 的规范,即对于某 1 个油池,其回油泵的设计流量应大于其总供油量的 4 倍。该规范虽然在一定程度上可以确保发动机的供回油协调,但其建立在早期自由通风的滑油系统基础上,随着航空发动机的发展,仅用此规范进行滑油系统设计是不精确的,其供回油比还必须考虑发动机通风和滑油泵的高空性等情况。但到目前为止,国内外还未见到相关报道,这方面的研究还有待进行。

对于供油系统和通风系统的研究较多,主要集中在防虹吸、系统压力、流量仿真、滑油系统热分析和通

风控计算等方面。

文献[2]详细分析了航空发动机滑油系统的防虹吸原理和方法,对几种典型的发动机滑油防虹吸系统进行了详细介绍,指出了其特点及设计注意事项。这使航空发动机滑油系统的防虹吸技术上升到1个新的阶段。文献[3]讨论了某型发动机安装鼓风机引起滑油温升的原因,建立了其滑油系统的分析模型和计算方法;文献[4]利用英国商用流体系统仿真软件对某型发动机滑油供油系统进行了仿真研究。

在滑油系统的热分析方面,刘振侠等发展了1种由热网络法对系统进行热分析的软件;文献<sup>[5]</sup>对某型发动机滑油系统连同轴承腔一起进行了热分析计算。

轴承腔的热分析是滑油系统热分析的难点所在,多年来国内学者进行了多方面探索,取得了一些成果。文献[6]用2维有限元方法对轴承腔温度场进行了分析;文献[7-12]分析了轴承腔内的主要热源及轴承的发热,对轴承腔温度场计算进行了研究;文献<sup>[13]</sup>分析了滚动轴承的摩擦生热和热传导状况,并对轴承热分析的热网络法进行了研究;文献[14]用热网络法对OH-58直升机在滑油完全损失时行星传动系统及球面滚动轴承进行了稳态和瞬态热分析,编制了稳态和瞬态热分析计算程序,计算出了关键点的热态温度及温度随时间变化的曲线,并通过OH-58直升机润滑油完全漏掉后的生存性试验验证了计算结果,利用试验和热分析结果发展了实用的瞬态热分析计算程序;文献[15]针对专用的轴承开发了轴承热分析计算程序,如CYBEAN程序可进行滚子轴承的准动力学分析和稳态及瞬态热分析;文献[16]描述的BABHAP程序可进行球轴承的拟静力学计算和球轴承功率损耗的计算;文献[17]描述的PLANETSYS程序可对多级行星传动中行星轮上安装的轴承进行机械性能计算及稳态和瞬态热分析。

另外,苏壮等还对航空发动机滑油系统断油时的主推力球轴承进行了瞬态热分析[18]。

在附件机匣的热分析方面,文献[19-20]对附件机匣出油口润滑油的温度、机匣内部润滑油温度场的分布进行了研究;根据流体边界层理论,沿竖直壁面无初速度加速流动过程中速度边界层和热边界层的形成规律,给出了对流换热系数的计算方法,并将其应用于飞机附件机匣的传热计算中<sup>[20]</sup>。

另外,在滑油滤方面,CFM56-5B发动机采用了

高过滤精度的主油滤(15  $\mu$ )配置旁路油滤(50  $\mu$ )的结构,大大改进过滤精度(原来一般只设计1个50  $\mu$ 油滤+旁路),以保证滑油部件的长寿命。

## 1.2 对系统部件的研究

滑油系统的部件主要包括滑油泵组、高空膜盒、燃滑油散热器、离心通风器(含轴心通风器)、油气分离器等,目前这些部件国内已可以自行设计,并正在建立自己的设计规范和体系。其指导思想是通过对各部件进行研究,掌握其原理,细化其设计方法。当各部件设计都能达到知其然并知其所以然的程度时,中国滑油系统部件的设计水平就上了1个新的台阶。如滑油齿轮泵设计,正在引入优化设计的概念,力争通过齿数、模数、压力角、变位系数等参数的优化使其流量最大或质量最小。转子泵设计虽有国家标准,但该标准不能完全适合航空发动机设计,同样需要优化,使其在满足性能的条件下,达到质量最轻。活门设计,除进行打开压力试验外,还应进行活门的压力-流量特性试验。这些工作集中起来会对整个系统设计有很大帮助。

对于滑油系统部件研究,国内学者所作的主要工作如下。

文献[21]从流体力学的角度,对滑油泵的高空性能进行了系统的理论分析,阐述滑油泵高空性的产生原理,推导了影响高空性的各种因素之间的关系式,为今后航空发动机滑油泵设计提供了理论基础;文献[22]对航空发动机中常用的转子泵起动过程阻力矩计算方法进行了研究,建立了1种阻力矩特性计算方法;文献[23-24]对某型发动机的燃滑油散热器进行了研究,建立了计算模型;文献[25]对高空膜盒的工作过程进行了深入研究,给出了确定膜盒封焊斜线的理论方程式,确定了航空发动机高空膜盒封焊斜线的方法;文献[26]对几种不同结构的航空发动机离心通风器进行了性能试验,阐述了其分离效率和阻力特性的影响因素,在国内首次量化给出了离心通风器出口滑油对发动机滑油消耗量的影响,为今后离心通风器的设计和改进奠定了基础;文献[27]广泛地收集了现代航空发动机所采用的轴心通风器的结构和演变情况,对不同的结构形式进行了理论(分离临界直径)估算,在分析的基础上,提出了轴心通风器的设计思想。

## 1.3 滑油的使用

目前国内外的主流仍使用传统的I、II型滑油。

I型滑油的使用温度为 $-54 \sim +165 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,属于低黏度油( $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 运动黏度 $\approx 3 \text{ mm}^2/\text{s}$ ),主要有美国空军和民用发动机使用的MIL-L-7808系列、国产4109、928、俄制ВНЙЙ НП 50-1-4Ф等;II型滑油的使用温度为 $-40 \sim +220 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,属于中黏度油( $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 运动黏度 $\approx 5 \text{ mm}^2/\text{s}$ ),主要有美国海军使用的MIL-L-23699系列、国产4106、4050等。目前,虽然I、II型滑油可以满足航空发动机的使用要求,但随着发动机的发展,滑油的性能也在不断地改进。如美国空军使用的滑油MIL-L-7808通过不断改进,目前的最新型号为MIL-L-7808L。在美国第4代发动机上,还使用了黏度介于I、II型滑油之间的所谓 $4 \text{ mm}^2/\text{s}$ 滑油(Mobil Turbo 284),其黏度和高、低温性能得以综合。

另外,随着发动机推重比的不断提高,对滑油系统的要求也越来越高,研制更高使用温度的润滑油也就成了必然。目前国外发动机技术发达国家非常重视高温润滑剂的研制工作。如美国IHPTET计划就将高温润滑剂的研制列入其中。在IHPTET计划的第1阶段研制出了符合MIL-PRE-7808L的第3、4级润滑油,能承受较高温度而不结焦;在IHPTET第2阶段,为了满足减重和飞行任务的要求,计划研制 $330 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 液体润滑剂,其主要热性能指标是主体油氧化温度 $330 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,热点安定性 $510 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;自然温度 $649 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在 $330 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时蒸汽压小于 $267 \text{ Pa}$ 。如果采用这种高温润滑剂,热区轴承腔、轴承、支座等不需要热防护与隔热,无需冷却空气,滑油流量亦可减少至目前使用流量的50%,整个机械系统可减重12%,从而达到IHPTET计划第2阶段减重10%的目标。美国PWA公司为了兼顾IHPTET计划第3阶段任务要求的润滑剂最低能力,进行了 $360 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 液体润滑剂的研制。

中国在III型润滑油的研制方面,也已经取得了较大突破,为更先进战斗机的研制打下了基础。前些年由中国科学院上海有机化学研究所历经8年研究,性能全面达到俄罗斯BT301指标的III型润滑油已于2005年10月24日完成了由中科院军工办组织的鉴定和验收。

III型润滑油是在仿制俄罗斯BT301的基础上研制的,其基础油为氟硅油,抗高温润滑剂为含铁元素添加剂,铁含量约为 $0.017\% \sim 0.022\%$ ,此外还有抗泡剂、抗磨剂等添加剂。III型润滑油目前已经在航天装备的润滑系统中应用。

## 1.4 滑油系统检测

滑油系统检测是滑油系统设计的重要内容,随着一些先进检测技术的应用,滑油系统检测技术得到了快速发展,使发动机视情维护成为可能。目前美国最先进的第4代发动机在传统的屑沫报警分析、光谱分析、参数分析的基础上,增加了静电传感器在线检测颗粒度、振动传感器检测附件机匣、应力波检测主轴承等新项目,并将其系统化融入发动机健康管理(PHM)系统。

中国学者也对滑油系统检测进行了较深入研究,其中文献[28]中建立了滑油系统的稳态压力数学模型,为判断滑油系统性能衰退和故障检测提供参考依据;文献[29]中提出了1种基于Elman过程神经网络的航空发动机金属含量预测方法,给出了相应的学习算法;文献[30]中介绍了滑油系统的功能和监测参数,讲述了某软件系统的总体设计方案,给出了软件系统流程图,论述了各功能模块的内容和特点;文献[31]从理论和实际应用2方面对滑油光谱故障诊断专家系统知识库的建立进行了较深入地研究和探讨,提出了知识库建立的方法,应用磨损元素浓度与浓度增长率模糊综合评判,采用模糊聚类的方法定量研究,结合专家经验,较好地解决了故障诊断准确性问题。

## 2 滑油系统未来发展方向

林基恕等于2001年对航空发动机滑油系统进行了展望<sup>[32]</sup>,提出了推重比为 $8 \sim 10$ 的航空发动机滑油系统的发展方向。但要研制更高推重比的发动机,还需要进行更加深入的研究。总的来说,滑油系统应向如下几个方面发展。

### 2.1 超高温润滑油

以II型滑油为基础的滑油系统,经过多年研究改进,要想再大幅减轻其质量已无可能。为此,必须在高温润滑油性能及其使用上取得技术突破。在航空发动机上应用高温润滑油(如III型润滑油的主体使用温度达到 $260 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,比现有的II型润滑油的约高 $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ),就可减少对滑油加热,滑油流量也可以减少,则可使燃油散热器面积减小或滑油系统可适应更高引气温度、减少引气装置和轴承腔隔热件的质量;为此,需开展如下研究。

(1)使用高温润滑油对发动机的影响。对发动机使用高温润滑油进行全面评估,充分研究其对滑油系

统及其部件、空气系统、总体布置、轴承腔隔热、轴承与齿轮等冷却所带来的影响,为新一代滑油系统设计奠定基础。

(2)适用于高温润滑油的紧凑型一体化滑油系统附件(滑油箱、散热器)技术研究。使用高温润滑油后,滑油的主体温度升高,发动机对滑油的加热减少,散热器面积减少(质量减轻);另外,由于滑油在散热器内对燃油的加热减少,使低压散热器(散热器置于燃油增压泵后)成为可能的选择,如果使用低压散热器,则可将散热器与滑油箱进行一体化设计,这样就省去了部分管路,从而减轻质量。

(3)适用于超高温润滑油的滑油系统设计技术研究。使用高温润滑油后,滑油系统设计必须进行相应的改进,供、回油及通风 3 大系统布置、供回油协调、系统压力、流量计算、系统热计算、滑油消耗量的评估等都要进一步深化,以满足系统设计需要。

(4)滑油系统附件(滑油箱、散热器等)与附件机匣一体化集成设计技术研究。国外第 4 代发动机的机械系统中各附件外形较小,可以节省空间将滑油箱等附件安排在附件机匣侧面。另外,将滑油箱和散热器做成 1 个整体附件,以减少各附件间连接的外部管路,同时提高其维护性和可靠性。滑油箱等与附件机匣一体化设计,可以改变目前国内在发动机滑油箱和散热器之间使用的复杂连接管路,提高发动机推重比。简化附件连接形式是大势所趋,有必要进行深入研究,优化设计结构。

(5)适用于超高温润滑油的空气系统和总体设计技术研究。使用高温润滑油后,滑油的主体温度升高,滑油系统可适应更高引气温度,这样就可以减少(甚至取消)引气装置和轴承腔隔热件的质量。此方面需要进行深入计算研究。

## 2.2 精确的滑油系统热计算

高推重比发动机在高温、高压环境下工作,因此,进行精确的滑油系统热计算十分重要。为此,需要在现有计算软件的基础上完善各项计算方法,用试验方法得到轴承腔内、外的传热特性,掌握各有关附件的载荷谱及温度计算关系,了解各种边界条件下的使用规律。

## 2.3 完善滑油系统的检测体系

滑油系统检测是航空发动机状态监控的重要内容。许多发动机的早期故障可以通过滑油系统检测诊

断出来,从而避免发动机更大事故的发生。虽然目前掌握了一些滑油系统的检测手段,并在发动机研制中发挥了重要作用,但由于缺少批量发动机的使用经验,目前的检测手段还有很多不足,不能形成 1 个完整检测体系。这就需要对各种检测手段进行归纳、整理、研究,将其综合起来,以形成 1 个完整的滑油系统检测体系;同时加强对新型检测传感器(在线检测颗粒度的静电传感器、检测附件机匣的振动传感器、检测主轴的应力波传感器等)的研究,以适应发动机 PHM 系统的需要,为发动机视情维护奠定基础。

## 3 结束语

通过大量相关资料,对中国航空发动机滑油系统的发展现状进行了描述,阐述了未来发动机滑油系统研制的发展方向。认为航空发动机滑油系统应在如下几个方面重点发展:

(1)进行超高温润滑油及其在发动机的应用研究,以适应更高推重比发动机对滑油系统的要求;

(2)发展更加精确的滑油系统热计算技术,为高推重比发动机及部件的精确设计提供支持;

(3)完善滑油系统的检测体系,使之适用于发动机 PHM 系统,为发动机从定期维修转向视情维护奠定基础。

## 参考文献:

- [1] 林基恩. 航空燃气涡轮发动机机械系统设计[M]. 北京:航空工业出版社,2005.
- [2] 李国权. 航空发动机滑油系统的防虹吸[J]. 航空发动机, 2007, 33(1): 34-36.
- [3] 杨春信,张丽娜,郭晖. 发动机散热系统性能计算方法及其应用[J]. 航空动力学报, 2005, 22(2): 219-224.
- [4] 郁丽,李国权. 某型航空发动机滑油供油系统压力流量仿真[J]. 航空发动机, 2009, 35(6): 14-17.
- [5] 邢俊,李国权,陈聪慧. 航空发动机滑油系统热分析计算[C]//第十三届机械动力传输学术讨论会论文集,北京:中国航空学会机械动力传输专业委员会,2007: 332-336.
- [6] 葛治美,韩振兴. 航空发动机轴承腔热分析计算[J]. 航空动力学报, 2005(3): 483-486.
- [7] 李键,刘志全,袁培益. 航空发动机轴承腔热状态参数的分析模型[J]. 润滑与密封, 1999(2): 64-65.
- [8] 李键,刘志全,袁培益. 航空发动机轴承腔热温度场计算与测试[J]. 润滑与密封, 1999(1): 58-60.
- [9] 刘志全,张泳红,苏华. 高速滚动轴承热分析[J]. 润滑与密封, 1998(4): 66-68.

(下转第 62 页)