

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-09

# 航空发动机燃油管路系统温度特性研究

邓志彬, 张飞宇, 汤海平

(中国民用航空飞行学院 民航安全工程学院, 广汉 618307)

**摘要:** 航空发动机燃油管路系统为航空发动机提供燃料, 是航空发动机的重要组成部分。为探究燃油管路系统中燃油温度特性的变化, 根据燃油系统的基本构造和工作原理, 采用 AMESim 建立航空发动机燃油管路系统的仿真模型; 基于传热学理论, 在考虑飞行工况下以燃油泵、换热器和回油管路等重要部件为研究对象, 研究燃油管路系统的温度变化规律, 并对相关因素开展参数敏感性分析。结果表明: 在系统各类元件中燃油泵转速和热交换器中滑油温度是影响系统温度特性最显著的两个因素, 在泵转速超过 6 000 r/min 后, 燃油温升速度加快, 喷嘴处燃油温度可超过 140 °C, 系统燃油温度和热交换器中滑油温度呈正线性相关关系。

**关键词:** 航空发动机; 燃油管路系统; 数值模拟; 温度特性; 燃油喷嘴

中图分类号: V233.2

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

## Research on temperature characteristics of aeroengine fuel pipeline system

DENG Zhibin, ZHANG Feiyu, TANG Haiping

(College of Civil Aviation Safety Engineering, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** The aeroengine fuel pipeline system provides the fuel for aviation engines, and is an important component of aeroengine. To explore the changes in fuel temperature characteristics in aeroengine fuel pipeline systems, based on the basic structure and working principle of the fuel system, a simulation model of the aviation engine fuel pipeline system is established using AMESim. Based on heat transfer theory, the important components such as fuel pumps, heat exchangers, and return pipelines in the system are studied under flight conditions. The temperature characteristics of the system are studied, and the parameter sensitivity analysis is conducted. The results show that the speed of the fuel pump and the temperature of the aviation lubricating oil are the two most significant factors affecting the temperature characteristics of the system among various components. After the pump speed exceeds 6 000 r/min, the fuel temperature rise rate accelerates, and the fuel temperature at the nozzle can reach 140 °C. There is a linear positive correlation between the system fuel temperature and the temperature of the aviation lubricating oil.

**Key words:** aeroengine; fuel pipeline system; numerical simulation; temperature characteristics; fuel nozzle

收稿日期: 2023-11-06; 修回日期: 2024-02-25

基金项目: 教育部“新工科”航空油料管输安全实验实训基地建设项目(MHJY2023025)

通信作者: 汤海平(1985-), 男, 博士, 讲师。E-mail: tanghaiping-520@163.com

引用格式: 邓志彬, 张飞宇, 汤海平. 航空发动机燃油管路系统温度特性研究[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-9.

DENG Zhibin, ZHANG Feiyu, TANG Haiping. Research on temperature characteristics of aeroengine fuel pipeline system[J].

Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-9. (in Chinese)

## 0 引言

随着民航业运输要求的提高,飞机正在向着更快飞行速度、更大发动机推力的方向发展。在新时代工业强国的背景下,《中国制造 2025》规划提出把航空发动机作为未来十年的重要突破目标<sup>[1]</sup>。在实际工作中由于飞机面临不同的飞行状态和环境对发动机的工作条件会有不同的动力要求<sup>[2]</sup>,对发动机的性能提出了特殊的要求。燃油管路系统是航空发动机的重要组成部分之一,其主要功能是向燃烧室和飞控系统稳定输送燃油,燃油温度影响着航空发动机的性能<sup>[3]</sup>。燃油在管路流动过程中一方面吸收来自燃油泵、热交换器等部件运行时产生的热量,一方面与外界环境发生热交换,在飞机起飞后发动机需要保持在高温、高压和高负荷的工况下长期运转<sup>[4]</sup>,当系统中燃油温度过高时,易发生氧化、结焦造成燃油泵卡滞、管道堵塞等问题影响发动机正常工作<sup>[5]</sup>,并且,燃油超过 140 °C 就会有氧化结焦的风险,进而带来连锁危害<sup>[6]</sup>。

针对发动机燃油系统温度特性的研究,康思昭<sup>[7]</sup>利用 Flowmaster 模拟了泵变转速下供油管路的温度变化规律;余玲<sup>[8]</sup>采用 AMESim 建立了发动机燃油系统中调节计量装置的分析模型,研究了计量装置对燃油系统温度的影响;朱鹏飞<sup>[9]</sup>利用 MATLAB/Simulink 构建了发动机管路系统滑油部分的流动传热特性模型,获得了燃油的压力与系统温度变化的关系;Seki<sup>[10]</sup>研究了空气和滑油共同作用下对燃油温度的影响,提出了通过外来引气和滑油能有效改善燃油温升和消耗情况;Bill<sup>[11]</sup>针对燃油系统其中一段管路内部研究了燃油温度升高和系统热量变化的关系。

高栋<sup>[12]</sup>对燃油系统分管内燃油通过数值计算的方法分析了分管内燃油的温度分布情况;王翔宇<sup>[13]</sup>构建了基于质量守恒、压力平衡和能量守恒建立了航空发动机燃油回路的流动传热模型,提出了燃油系统温度特性变化的解析方法;Mawid<sup>[14]</sup>利用等效长度的方法对燃油系统模型进行简化后分析了泵和流量控制阀对燃油系统温度的影响;Qin<sup>[15]</sup>通过理论计算分析了系统中燃油温度升高情况,并指出温度过高时燃油的裂解反应会影响燃油的质量,进而影响燃油系统的安全工作。

航空发动机燃油系统结构复杂,目前对系统

温度特性的研究主要集中在燃油系统中单一节点或流程的作用,而燃油系统的运行受多因素的共同影响,对于整体燃油系统某一元件变化经多个环节多级影响后反映到喷嘴处的温度特性变化规律以及对影响程度指数鲜有报导。

本文采用 AMESim 建立包含多元件和环节的航空发动机燃油系统模型,综合考虑外界因素的作用下,开展燃油泵、热交换器、回油管路、等等重要部件对燃油系统温度的影响研究,并通过敏感性分析方法,获得燃油系统重要部件对燃油温度具体的影响规律和对温度的敏感度。

## 1 模型的建立

### 1.1 燃油管路系统工作原理

以某型航空发动机燃油管路系统为例,航空发动机燃油系统实物如图 1 所示。系统主要由低压离心泵、燃/滑油热交换器、高压齿轮泵、燃油计量活门、回油管路、燃油喷嘴以及各类燃油控制阀组成,如图 2 所示。系统中的控制机构主要包括实现机械控制的压差活门、转换活门和控制计量活门的电液伺服阀等部件。



图 1 航空发动机燃油管路系统实物图

Fig. 1 Physical diagram of aeroengine fuel pipeline system

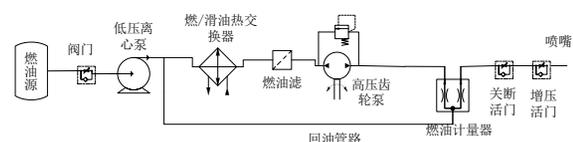


图 2 燃油管路系统结构图

Fig. 2 Structural diagram of fuel pipeline system

发动机燃油管路系统工作时,燃油温度在喷嘴处达到峰值。燃油从油箱经供油管路到达发动机经过低压离心泵<sup>[16]</sup>,然后经过燃/滑油热交换器,与高温滑油发生热交换后,通过燃油滤,过滤掉燃油中的杂质,随后燃油通过管路流经主齿轮泵,经过主齿轮泵进一步增压后,根据飞机控制器的指令,由燃油计量元件定量提供燃油到喷嘴处,多余燃油经回油管路回到低压离心泵附近,重新回到系统管路中<sup>[17]</sup>。燃油系统根据不同的飞行工况调节燃油的温度、压力、流量保证发动机的正常运行。

## 1.2 系统元件的理论模型

燃油流过管路中的控制阀门,包括关断阀门、卸压阀门、计量活门都会由于流动的变化和摩擦产热进而转化为燃油的内能,使温度升高。燃油通过阀门时单位时间内的产热可以由式(1)计算<sup>[18]</sup>。

$$\phi_1 = \kappa p Q \quad (1)$$

式中: $\phi_1$ 为燃油通过阀门时产热功率; $\kappa$ 为阀门的发热系数; $p$ 为流过阀门时流体的压力; $Q$ 为流过阀门的流体的流量。

离心泵在系统前段,主要作用是给流过的燃油增压提高动能,因泵功率损耗的能量会转化为燃油内能,单位时间内通过低压离心泵时的产热量可以由式(2)计算<sup>[19]</sup>。

$$\phi_2 = \frac{pQ}{\eta_1} (1 - \eta_1) \quad (2)$$

式中: $\phi_2$ 为发热功率; $p$ 为输出压力; $Q$ 为输出流量; $\eta_1$ 为离心泵的效率。

齿轮泵是燃油系统的主燃油泵,齿轮泵根据给定转速提供定量燃油,控制系统的流量和压力,齿轮泵一般由两个齿轮、泵体和安全阀等组成。齿轮泵的流量特性原理数学公式如式(3)所示<sup>[16]</sup>。

$$Q_v = \frac{V_r N}{60} \quad (3)$$

式中: $V_r$ 表示每一转的排量; $Q_v$ 表示流量; $N$ 表示每分钟转速。

齿轮泵生热由两部分的发热组成第一部分是每一转的排量和转速以及泵转动时的泄漏导致的生热,生热可由公式(4)计算得出。

$$\phi_3 = \alpha \left( P - k \cdot \frac{(V_r N)}{60} \cdot \Delta p \right) \quad (4)$$

式中: $\phi_3$ 是产热功率; $P$ 泵输入轴功率; $k$ 泄漏系数; $\alpha$ 发热修正系数; $N$ 转速; $\Delta p$ 泵前后压差; $N$ 齿轮泵每一转的排量。第二部分是由有泵的固有效率损失生热,泵生热公式<sup>[19]</sup>为

$$\phi_4 = \frac{pQ}{\eta_2} (1 - \eta_2) \quad (5)$$

式中: $\phi_4$ 是产热功率; $p$ 为输出压力; $Q$ 为输出流量; $\eta_2$ 为齿轮泵的效率。

燃油和高温滑油在热交换器内和燃油发生热交换,热交换器的换热量通过公式(6)计算。

$$\epsilon = \frac{|\phi_e|}{C_{min} \cdot (T_{hot,in} - T_{cold,in})} \quad (6)$$

式中: $\epsilon$ 为换热效率; $\phi_e$ 为热交换热量; $C_{min}$ 为最小的比热容; $T_{hot,in} - T_{cold,in}$ 为换热器的入口热流和入口冷流之间的温差。

燃油在管路和元件中的基本过程的发热公式为

$$Q_{heat} = cm\Delta t = \oint t \quad (7)$$

$$\phi = \int_0^l 2\pi r c \frac{1}{v} dl \quad (8)$$

式中: $c$ 为燃油比热容; $\phi$ 为发热功率; $v$ 为燃油流速; $l$ 为元件长度。

## 1.3 燃油管路模拟系统构建

AMESim是多学科领域复杂系统建模与仿真平台,内部的应用库和计算设计能力强大,在汽车行业,航空航天,机械,液压等许多工程领域应用广泛<sup>[20]</sup>。AMESim常应用于飞机液压系统,燃油系统等<sup>[21]</sup>,因此根据航空发动机燃油系统原理以及元件理论模型,利用AMESim搭建系统仿真模型,假设燃油为不可压缩流体;忽略重力因素影响;忽略燃油的热物理参数随温度的变化;系统元件机械能损失的能量全部被燃油吸收。

在整个燃油管路系统中,燃油进入燃烧室之前的温度达到最高,因此,要保证燃油系统的安全运行,航空发动机燃油管路系统中进入燃烧室之前喷嘴处的燃油温度是监测的重点。根据系统构造和元件基本原理并加入外界环境模块,建立模拟系统如图3所示。

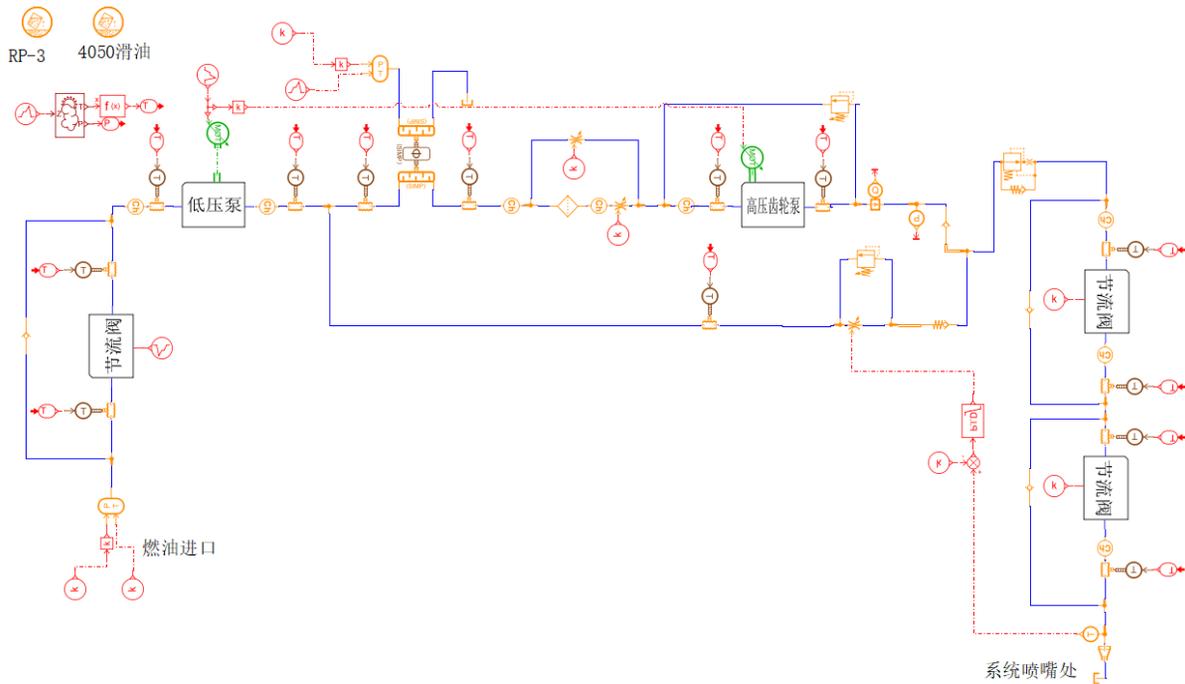


图3 发动机燃油管路系统模型

Fig. 3 Aeroengine fuel pipeline system model

参考飞机在实际运行过程中的工况参数,航空燃油选择RP-3喷气燃料,滑油选择4050滑油,设定其物性参数不变。根据调研得到的飞机实际运行情况为参考,考虑系统进口温度,燃油泵相关参数,热交换器参数模拟系统参数如表1所示。研究的主要因素有:系统入口温度,滑油温度,泵转速,泵效率,回油管路,外界环境,主要观测点是燃油进入燃烧室之前喷嘴处的温度。

表1 工况参数范围

Table 1 Scope of working condition parameters

进口温度 $T_{进}/^{\circ}\text{C}$	滑油温度 $T_{滑}/^{\circ}\text{C}$	泵转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	泵效率 $\eta/\%$
0~40	90~180	2 000~11 000	60~90

## 2 系统仿真与分析

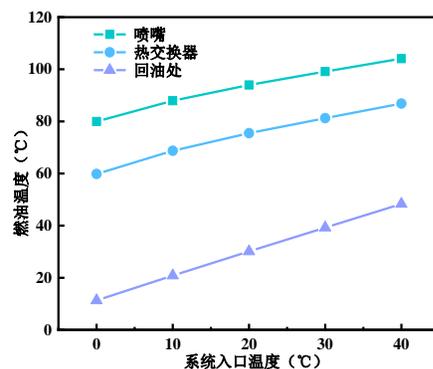
### 2.1 燃油进口温度对系统温度特性的影响

在系统中热交换器滑油温度为 $140^{\circ}\text{C}$ ,燃油泵转速为 $5\,000\text{ r}/\text{min}$ 工况下,改变航空发动机燃油系统进口燃油温度,仿真得到各个观测点的温度变化如图4(a)所示,选取回油处、热交换器处和喷嘴处为温度观测点,系统进口燃油温度的增加会导致系统各点的温度随之上升,回油管路处和热

交换器处温升幅值与进口温度变化保持一致,均为 $10^{\circ}\text{C}$ 左右,但喷嘴处燃油的温升幅值越来越小,从 $8^{\circ}\text{C}$ 逐渐减小为 $5^{\circ}\text{C}$ ,通过拟合表现出的规律符合双指数衰减函数:

$$y = y_0 + A_1 \left( 1 - e^{-\frac{x}{t_1}} \right) + A_2 \left( 1 - e^{-\frac{x}{t_2}} \right) \quad (9)$$

喷嘴处温度变化如图4(b)所示。由于燃油在系统中流经的元件较多,元件和外界环境热交换更剧烈更频繁,导致喷嘴处温度对进口温度的热响应减弱,其中系统各元件的多级影响也起到了稳定燃油温度的作用。



(a) 各观测点温度变化

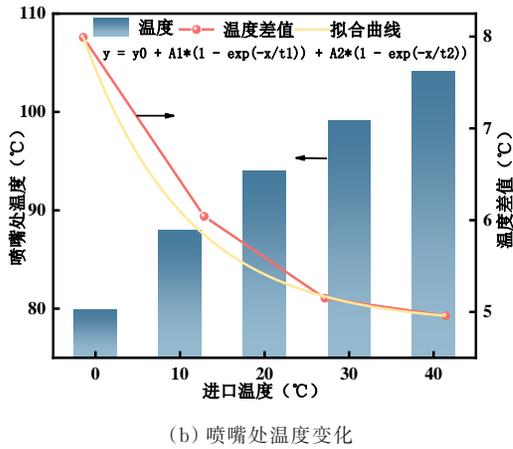


图4 入口温度对系统温度影响

Fig. 4 Influence of inlet temperature on system temperature

## 2.2 滑油温度对系统燃油温度的影响

燃/滑油热交换器是燃油在管路流动过程中最大的温升来源。对热交换器中滑油的入口温度 90~180 °C,取十组温度分别模拟,发动机燃油系统中的低压泵和高压泵的转速保持 5 000 r/min 不变,燃油系统进口燃油温度为 20 °C,模拟结果如图 5(a)所示,可以看出:在这十种工况下,系统燃油温度先逐步上升,在系统运行 120 s 后温度达到峰值并保持稳定。当滑油温度为 90 °C 时系统喷嘴处温度最低,约为 70 °C。滑油温度为 180 °C 时,喷嘴温度最高为 112 °C。并且随着滑油入口温度的升高,喷嘴处的燃油温度也逐渐升高。

对十种工况的峰值稳定温度进行汇总,如图 5 (b)所示,热交换器滑油温度越大,系统喷嘴处燃油温度上升的越快,且峰值温度越高。温度变化幅值为 42 °C,系统喷嘴处温度和滑油温度表现出正线性相关规律。这是由于当泵转速保持不变时,热交换器中滑油温度升高会使滑油与燃油之间的热交换更加剧烈。高温滑油会将更多的热量传递给燃油,从而导致燃油温度的整体升高。由于燃烧室入口喷嘴处的燃油直接来自该热交换过程,所以其温度也会随之上升。

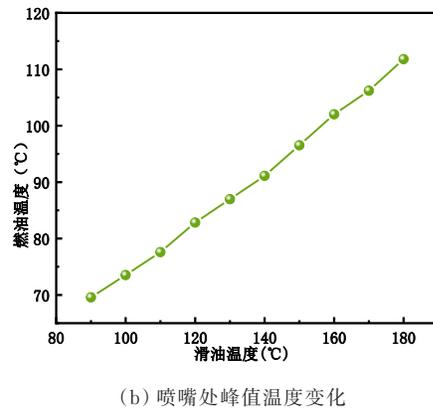
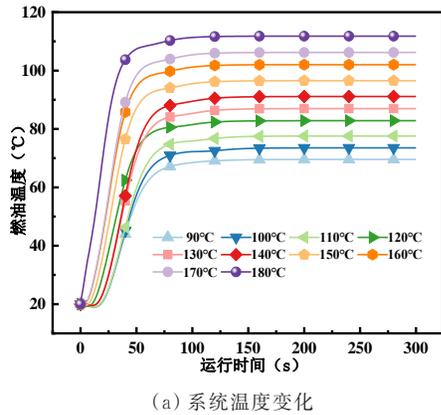


图5 滑油对系统燃油温度的影响

Fig. 5 The influence of lubricating fuel on the fuel temperature of the system

## 2.3 燃油泵对系统燃油温度的影响

### 2.3.1 泵转速对系统燃油温度的影响

发动机正常工作时转子旋转通过传动机构把动力传递给燃油泵,因此在飞机速度变化的同时燃油泵也随之变化。对燃油泵转速从 2 000~11 000 r/min,取十组转速分别进行模拟,系统入口燃油温度保持 20 °C 不变,热交换器滑油温度 140 °C。选取系统运行平稳时的喷嘴处温度为监测点,模拟得出结果如图 6 所示。当泵转速 2 000 r/min 系统温度为 96 °C,当泵转速升高到 6 000 r/min 以后,燃油温度升高速度加快,当泵转速为 11 000 r/min 时,系统温度高达 150 °C,温度过高增大了安全风险,并且随着泵转速越来越大,喷嘴处温度逐渐升高,通过数据拟合,温升规律符合双指数增长函数:

$$y = y_0 + A_1 e^{\frac{x}{t_1}} + A_2 e^{\frac{x}{t_2}} \quad (10)$$

综上所述,燃油泵转速越大,系统燃油温度越高,当泵转速超过 6 000 rad/min 时,系统温升速度变大,这是由于泵转速升高时泵输入功率变大,引起燃油流量变大,系统压力变大,系统环节对燃油的生热增加,进而在进入燃烧室之前燃油吸收的热量增加,温度升高。

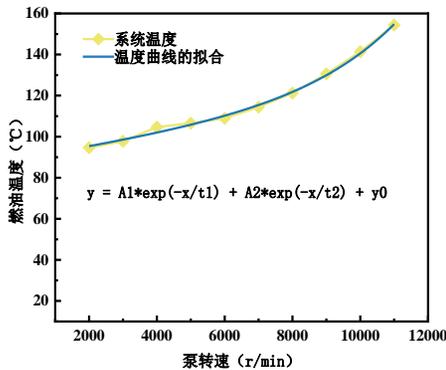


图6 系统燃油温度随泵转速变化

Fig. 6 System fuel temperature changes with pump speed

### 2.3.2 泵效率对系统温度的影响

模拟系统工况泵转速为 5 000 rad/min 恒定时,改变泵效率为 60%~90% 得出模拟结果如图 7 所示。随着齿轮泵效率从 60% 提高到 90%,喷嘴处的燃油温度从 90.3 °C 降低到了 88 °C,下降幅度约为 2.3 °C。其中泵效率为从 60% 改变到 70% 的同时,燃油温度下降幅度最大为 1.3 °C。这是因为泵的效率越高,对燃油的发热功率越小。当齿轮泵老化,或者齿轮缝隙变大,摩擦变多就会导致泵效率变低,功率损失会增大,向燃油转移的热量增加使得燃油在流经泵的过程中温度上升越多。但泵效率对喷嘴处燃油温度的影响程度较其他元件和工况较小。

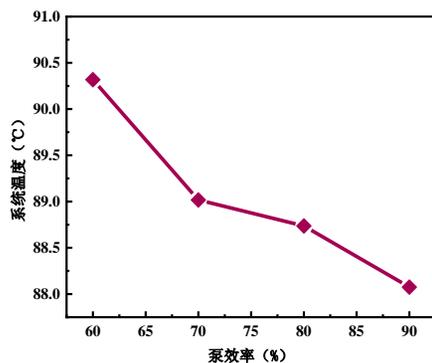


图7 燃油泵效率对系统温度影响

Fig. 7 The effect of fuel pump efficiency on system temperature

## 2.4 回油管路对系统燃油温度的影响

发动机燃油管路中的压力达到某一预设值时,回油管路中的压差活门就会打开,部分燃油从回油管路流回系统低压泵附近。为满足流量控制和调节温度要求,回油管路模块模拟了通过控制燃油计量器控制流入喷嘴的燃油流量,多余燃油从回油管路流到低压泵附近。控制燃油入口温度为 20 °C,改变泵转速设置为 0~11 000 r/min 逐渐上升,模拟飞机一次加速过程中系统温度总体变化结果如图 8 所示,当燃油泵加速到 3 200 r/min 以上,系统回油管路开启后,喷嘴处的部分燃油回流到热交换器前,引起流经热交换器的燃油流量变大,流速变快,而滑油的传热量不变,因此燃油温度在回流的过程中降低,幅度约在 14 °C 左右,降低的原因如图 9(a) 所示。喷嘴处温度较高的燃油回流后与离心泵处燃油混合,总体温度升高,此过程较为缓慢,混合处的燃油温度模拟结果如图 9(b) 所示。

因此回油管路对系统中燃油温度的影响是双重的一方面回油管路开启短时间内,喷嘴处燃油回流增大的过程中,燃油温度降低另一方面,经过回油管路回流到低压离心泵后的高温燃油和系统中的低温燃油混合,进而燃油温度上升(如图 8 所示)。合理利用回油管路中的回流,可以改善发动机的燃烧效率、输出功率和燃油温度以及系统安全性。

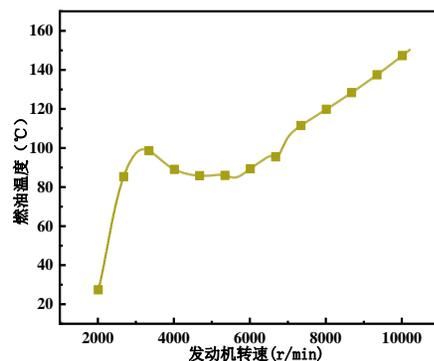


图8 系统温度变化

Fig. 8 System temperature change

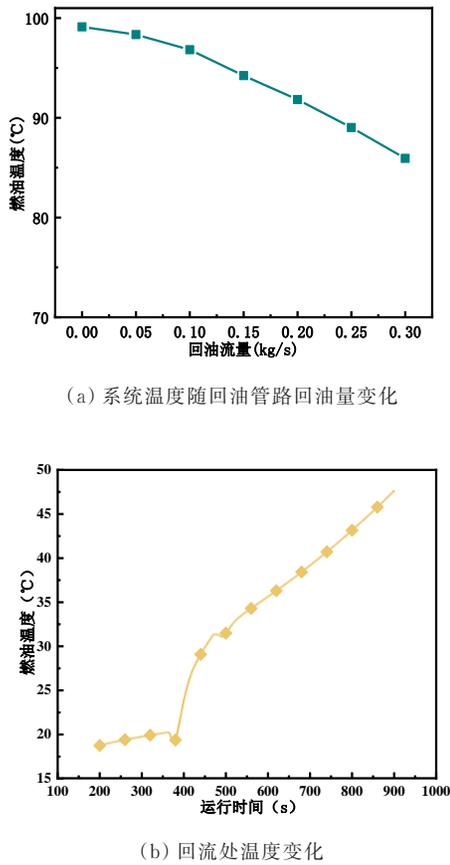


图9 回油管路对系统温度影响  
Fig. 9 The influence of return fuel pipeline on system temperature

### 2.5 外界环境对系统温度特性影响

在航空发动机燃油管路模拟系统中加入外界环境模块,改变外界环境的海拔高度,可得到相应高度下对应的外界环境,根据调研得到的数据,当外界环境为高空 8 000 m 时,环境温度约—34 °C。

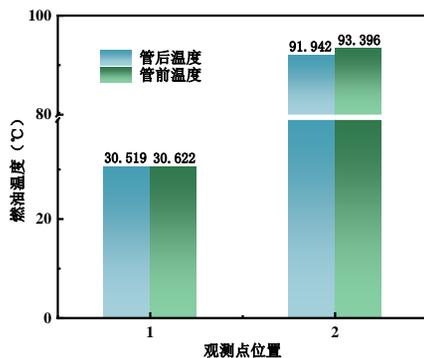


图10 外界环境温度对燃油温度影响  
Fig. 10 Environmental impact on system temperature

在系统前段离心泵附近和后段喷嘴前选取两段管路为观测点,管路长度均为 1 m,探究外界环境温度对燃油管路系统温度特性的影响,模拟得出管路进出口的燃油温度结果如图 10 所示。系统离心泵附近管路前温度为 30.622 °C,管路后温度为:30.519 °C,在 1 m 的管长范围内,燃油与外界热交换降低的温度约为 0.1 °C,靠近喷嘴处的管路前温度为 93.396 °C,管路后温度为 91.942 °C,燃油与外界热交换降低的温度约为 1.4 °C。由此可见环境温度对燃油前段温度影响小,在 0.1 °C 左右,对后段靠近喷嘴处影响增大,在 1.5 °C 之内。这是因为管路越靠近燃烧室燃油温度越高,和外界环境热交换更剧烈更频繁。

### 2.6 影响因素敏感性分析

根据以上对航空发动机燃油管路系统仿真结果,可以发现,在一定范围内,系统进口温度  $T_{进}$ ,热交换器中滑油温度  $T_{滑}$ ,泵转速  $n$ ,泵效率  $\eta$ ,回油管路流量  $Q_{回}$  都会对系统燃油温度产生影响,不同元件的不同参数对温度特性的影响程度不同,采用敏感性分析法从众多参数中可以有效筛选出对温度特性影响较为重要的参数,得到每个元件对系统温度具体的影响程度,以便根据各参数的敏感程度排序,制定相应的应对措施<sup>[22]</sup>。

根据系统中元件参数的不同,采用因素分析法的原理,可将系统燃油温度  $K$  视为诸因素  $X_i$  的函数,表达式为<sup>[23]</sup>

$$K = f(X_1, X_2, \dots, X_r, \dots, X_n) \quad (11)$$

利用影响因素  $X_r$  引起的系统燃油温度相对变化率与该因素自身相对变化率进行比值的公式来衡量其敏感度,即第  $r$  影响因素的敏感度  $E_r$  为

$$E_r = \frac{\left| \frac{\Delta K_r}{K_r} \right|}{\left| \frac{\Delta X_r}{X_r} \right|} \quad (12)$$

式中:  $|\Delta K_r / K_r|$  为系统燃油温度  $K_r$  相对变化率;  $|\Delta X_r / X_r|$  为因素  $X_r$  相对变化率。

对燃油管路系统中的系统进口温度  $T_{进}$ 、热交换器中滑油温度  $T_{滑}$ 、燃油泵转速  $n$ 、泵效率  $\eta$ 、回油管路流量  $Q_{回}$ , 5 种因素选取合适的区间,按照公式 (12) 的方法进行敏感度计算,结果如表 2 所示。

表2 敏感度分析结果  
Table 2 Sensitivity analysis results

考察因素	$\Delta X_r/X_r$	$\Delta K_r/K_r$	$E_r$
$T_{进}$	1.00	0.262	0.262
$T_{滑}$	0.353	0.243	0.687
$n$	1.200	0.364	0.304
$\eta$	0.241	0.011	0.046
$Q_{回}$	1.00	0.076	0.086

从表2可以看出:在燃油管路系统中,热交换器中滑油温度 $T_{滑}$ 对系统燃油温度影响的敏感度最大,因为热交换器是燃油的主要升温来源,其次依次是燃油泵转速 $n$ 、系统进口温度 $T_{进}$ 、回油管路流量 $Q_{回}$ ,泵效率 $\eta$ 的对燃油温度的敏感度最小。

### 3 结 论

1) 通过敏感性分析法得出,在航空发动机燃油系统的运行过程中,各元件对系统温度特性的影响程度从高到低依次为:热交换器中滑油温度、燃油泵转速、系统进口温度、回油管路、泵效率。

2) 滑油温度对系统燃油温度特性的影响最显著,二者呈线性正相关的关系,因此在实际工作中,可通过改变热交换器滑油温度直接调控燃油系统温度使其在适宜的范围内工作。

3) 燃油泵转速是燃油温度升高的重要原因,当燃油泵转速超过6 000 r/min,喷嘴处燃油温升速度加快,最高超过140℃,因此应适当采取措施改善燃油泵工作条件和换热效率,控制泵对燃油系统的温升影响,避免出现温度过高的情况。

4) 随着系统进口温度的改变,燃油管路温度最大增加26℃,影响程度会随着进口温度提高越来越弱;回油管路对燃油系统温度影响幅值约为14℃因此可以利用回油管路控制系统流量的同时间接控制喷嘴处燃油温度。

5) 相较于其他燃油部件对温度的影响,环境温度和燃油泵效率对燃油温度影响较小,因此其对发动机燃油系统运行过程中的安全影响较小。

本文研究对于航空发动机燃油系统安全风险的预防提供依据,为民航发动机的发展提供理论基础。

#### 参考文献

- [1] 陈贵林,叶枫.航空发动机专家[J].航空制造技术,2016(s1):38-39.
- [2] 崔利杰,李皓祥,李薛,等.航空发动机多状态寿命控制策略及仿真研究[J].航空工程进展,2022,13(5):141-147.
- [3] 陈宏亮. X-8航空发动机燃油调节系统建模仿真研究[D].西安:西北工业大学,2006.
- [4] FUSARO R, FERRETTO D, VIOLA N, et al. A methodology for preliminary sizing of a thermal and energy management system for a hypersonic vehicle[J]. The Aeronautical Journal, 2019, 123: 1508-1544.
- [5] 张东辉.高温燃油对航空发动机控制系统的影响分析[J].航空发动机,2013,39(1):12-16,29.
- [6] 王晨臣,彭孝天,王苏明,等.燃油结焦影响因素及抑制方法综述[J].航空发动机,2018,44(2):64-69.
- [7] 康思昭.基于Flowmaster的航空发动机燃油热管理系统温度仿真[D].大连:大连理工大学,2020.
- [8] 余玲.航空发动机燃油计量装置的温度特性研究[D].南京:南京航空航天大学,2013.
- [9] 朱鹏飞,刘振侠,任国哲,等.航空发动机管路系统流动与换热的仿真平台[J].推进技术,2014,35(11):1523-1529.
- [10] SEKI N, MORIOKA N, SAITO H, et al. A study of air/fuel integrated thermal management system[C]//SAE 2015 Aero Tech Congress & Exhibition. US: SAE, 2015: 1-9.
- [11] HO Y H, LIN T, HILL B, et al. Thermal benefits of ad-

- vanced integrated fuel system using JP-8+100 fuel [C] // 2013 World Aviation Congress. US: IEEE, 2013: 1-7.
- [12] 高栋, 李锋, 尚守堂, 等. 航空发动机主燃烧室燃油总管流动换热特性研究[J]. 航空发动机, 2015, 41(6): 22-27.  
GAO Dong, LI Feng, SHANG Shoutang, et al. Investigation on flow and heat transfer characteristics of fuel manifold for aeroengine combustor [J]. Aeroengine, 2015, 41(6): 22-27. (in Chinese)
- [13] 王翔宇, 周兵, 徐向华, 等. 航空发动机燃油回路流动传热特性模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(4): 863-869.  
WANG Xiangyu, ZHOU Bing, XianghuaXV, et al. Simulation on the flow and heat transfer of a simplified aero-engine fuel loop [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(4): 863-869. (in Chinese)
- [14] MAWID M, ARANA C, SEKAR B. An engineering analysis tool for high performance combustors and fuel systems [C] // 2013 AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. US: AIAA, 2013: 1-11.
- [15] QIN J, ZHANG S, BAO W, et al. Thermal management method of fuel in advanced aeroengines [J]. Energy, 2013, 49: 459-468.
- [16] 陈吉祥. 航空发动机燃调系统热管理及控制优化设计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2020.  
CHEN Jixiang. Thermal management and optimized control design of aero-engine fuel regulation system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [17] 李波, 张东辉, 洪黎. 航空发动机燃油热管理系统仿真及试验验证[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2019, 32(5): 29-34.  
LI Bo, ZHANG Donghui, HONG Li. Simulation and experimental verification of aero-engine fuel thermal management system [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2019, 32(5): 29-34. (in Chinese)
- [18] 浦志理. 航空油泵设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- PU Zhili. Design of aviation fuel pump [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1983. (in Chinese)
- [19] 黎启柏, 刘树道, 成国真, 等. 液压元件手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000  
LI Qibai, LIU Shudao, CHENG Guozhen, et al. Handbook of hydraulic components [M]. Beijing: China Machine Press, 2000. (in Chinese)
- [20] ZHANG D, ZENG XI, WANG P, et al. Co-simulation with AMESim and MATLAB for differential dynamic coupling of hybrid electric vehicle [C] // 2009 Intelligent Vehicles Symposium. US: IEEE, 2009: 761-765.
- [21] 葛杭. 某型航空发动机机械燃油泵典型故障诊断的仿真研究 [D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2020.  
GE Hang. Simulation study on typical fault diagnosis of mechanical fuel pump of a certain aeroengine [D]. Guanghan: Civil Aviation Flight University of China, 2020. (in Chinese)
- [22] 黄盛锋, 陈志波, 郑道哲. 基于灰色关联度法和强度折减法的边坡稳定性影响因素敏感性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 35-40.  
HUANG Shengfeng, CHEN Zhibo, ZHENG Daozhe. Sensitivity analysis of factors influencing slope stability based on grey correlation and strength reduction method [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(3): 35-40. (in Chinese)
- [23] 王威, 杨文豪, 杨成忠, 等. 铁路路基翻浆冒泥的参数敏感性及其不确定性分析 [J]. 铁道学报, 2022, 44(12): 105-113.  
WANG Wei, YANG Wenhao, YANG Chengzhong, et al. Sensitivity analysis and reliability study on influencing factors of mud pumping in railway subgrade [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(12): 105-113. (in Chinese)

(编辑:丛艳娟)