

民用飞机发动机灭火系统性能计算分析

李一德*

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘要: 选取填充 Halon1301 灭火剂的某飞机右发动机灭火系统为仿真模型准确性验证对象, 采用 Amesim 软件开展仿真建模与计算, 通过计算结果与试验数据的对比确定仿真模型的准确性。选取填充 HFC-125 灭火剂的某型发动机灭火系统为仿真对象进行建模与计算, 分析氮气在灭火瓶中的充装压力、灭火管内径等参数对灭火喷嘴流量、灭火剂浓度的影响。结果表明: 发动机灭火喷嘴的流量与发动机核心舱内的灭火剂浓度随着灭火瓶氮气填充压力的升高而升高, 但升高幅度较小; 在一定范围内选取内径较大的灭火导管可以显著提高发动机灭火喷嘴流量, 同时, 灭火剂喷射时间显著降低, 但超出一定范围时, 选取更大内径的灭火导管, 灭火喷嘴流量提高幅度较小, 灭火剂喷射时间降低的幅度也较小。

关键词: 发动机; 灭火系统; 性能计算

中图分类号: V233.7⁺47

文献标识码: A

OSID:



0 引言

根据 CCAR-25-R4 第 25.1195(a) 条要求, 必须有为每个指定火区服务的灭火系统^[1]。发动机舱为民用飞机指定火区, 必须为该区域配备灭火系统, 即发动机灭火系统^[2]。

目前常见的发动机灭火系统均采用 Halon1301 灭火剂作为灭火介质^[3]。由于 Halon 灭火剂会破坏臭氧层, 航空工业界正在研究新型的替代灭火介质, 例如 HFC-125 灭火剂等^[4]。

在我国民用飞机设计初期, 行业通常采用理论公式与工程经验的方式对灭火系统管路流量分配进行计算, 当面临复杂灭火系统设计时, 准确性较低^[5-7]。近年来, 随着计算机技术的发展, 国内外专家学者开始采用基于计算流体力学 (CFD) 的方法对飞机灭火系统性能进行计算与研究^[8-10], 但计算流体力学的建模与计算时间较长, 计算效率较低, 亟需通过更有效的方法对灭火系统进行设计与研究。

本文选取填充 Halon1301 灭火剂的某飞机右发

动机灭火系统为仿真模型准确性验证对象, 采用 Amesim 软件对其开展仿真建模与计算, 通过计算结果与试验数据的对比确定仿真模型的准确性。选取填充 HFC-125 灭火剂的某飞机发动机灭火系统为仿真对象进行建模与计算, 分析氮气在灭火瓶中的充装压力、灭火管内径等参数对灭火喷嘴流量、灭火剂浓度的影响。

1 仿真模型准确性验证

1.1 准确性验证模型

选取某实验中某飞机右发动机灭火系统为准确性验证的仿真对象, 发动机灭火系统示意图如图 1 所示。系统采用 Halon1301 灭火剂, 设备和部件包括发动机灭火瓶、灭火管路、管弯头、管三通和灭火喷嘴。

根据发动机灭火管网结构数模在 Amesim 软件中建立一维管网模型, 由于对发动机的一次灭火仅释放一个灭火瓶, 因此在仿真模型中, 仅建立一个灭火瓶, 如图 2 所示。该模型分为两个模块。第一模块描述的是灭火剂在发动机灭火管网中进行两

* 通信作者. E-mail: liyide@comac.cc

引用格式: 李一德. 民用飞机发动机灭火系统性能计算分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2024(4): 57-63. LI Y D. Performance calculation and analysis of civil aircraft engine fire extinguishing system[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(4): 57-63 (in Chinese).



图 1 某飞机右发动机灭火系统试验构型

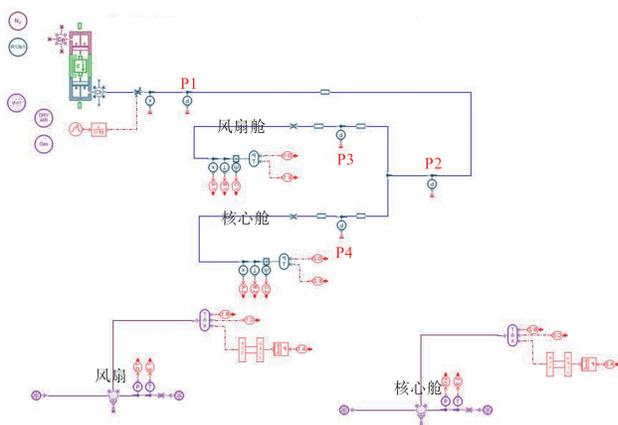


图 2 某飞机发动机灭火系统仿真模型

相流管网流动过程,采用 Amesim 软件提供的两相流库元件;第二模块描述的是由发动机灭火喷嘴喷出的灭火剂进入发动机风扇舱和核心舱对相应火区进行灭火的过程,采用 Amesim 软件提供的混合气体库元件。其中,对模型做出以下假设:

1) 将发动机灭火瓶简化为一个理想的活塞容腔模型,容腔上部的高压氮气推动活塞向下运动,活塞挤压容腔下部的灭火剂使其沿灭火瓶出口喷出,进入灭火管网;

2) 由于 Amesim 软件两相流库元件无法定义管路高程,因此,忽略灭火剂在管网内流动产生的高程压力损失。

1.2 仿真模型简化

由于发动机灭火管路结构复杂且 Halon1301 灭火剂在灭火管内易发生相变,采用 Amesim 软件进行两相流一维性能仿真计算时计算量较大,耗时较长且计算结果易发散,为了兼顾效率与准确性,采用等效管路拟合法对验证模型进行优化。等效管路拟合法是基于 Amesim 软件开发的管路结构简化算法,该算法可以保证计算结果与计算精度不变的

前提下,将多段复杂管路拟合成一段简单管路,简化前的灭火系统一维管网仿真模型如图 3 所示,简化后的灭火系统一维管网仿真模型如图 4 所示。其中,图 3 中编号为 A1、A2、A3、B1、B2、B3 的发动机实际复杂灭火管路模型被简化成图 4 中编号为 A1、A2、A3、B1、B2、B3 的简单管路模型。

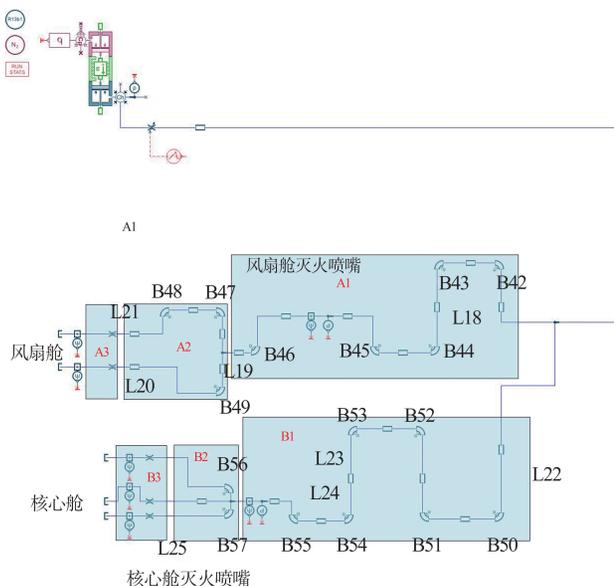


图 3 某飞机发动机灭火系统仿真模型(简化前)

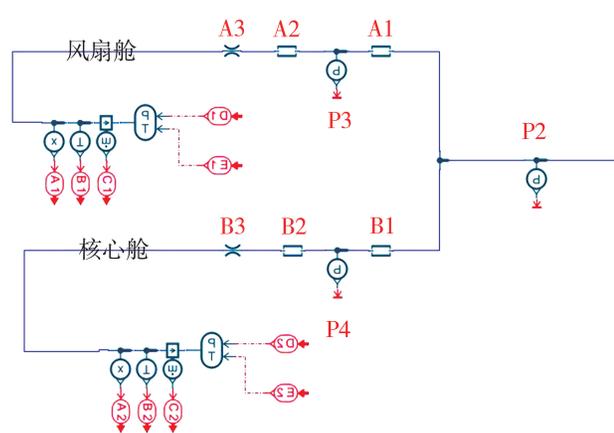


图 4 某飞机发动机灭火系统仿真模型(简化后)

1.3 设置边界条件

某飞机发动机灭火系统部分边界条件如表 1 所示。

表 1 某飞机发动机灭火系统边界条件

边界条件	数值
氮气填充压力	4.14 MPa
灭火瓶容积	0.008 78 m ³

表1(续)

边界条件	数值
灭火剂质量	5.36 kg
风扇舱通风流量	0.46 kg/s
风扇舱火区容积	2.92 m ³
核心舱通风流量	0.46 kg/s
核心舱火区容积	1.15 m ³

1.4 计算结果分析

对于发动机灭火系统的仿真计算,最关注的参数为发动机核心舱灭火剂浓度值,因此,选取灭火剂浓度值为准确性验证的关键参数,通过仿真计算得出的发动机核心舱灭火剂浓度值与试验测得的灭火剂浓度值的对比,验证模型准确性,如图 5 所示。其中,蓝线代表发动机核心舱灭火剂平均浓度试验值,通过对试验中核心舱灭火剂浓度取样点进行算术平均计算得出,红线代表发动机核心舱灭火剂平均浓度仿真计算值,由 Amesim 软件仿真计算得出。从图 5 可以看出,仿真计算的浓度与试验测得的浓度变化趋势基本一致,仿真计算的浓度峰值为 9%,试验测得的浓度峰值较低,为 7%。这是由于一维仿真模型为理想模型,忽略了管接头/管三通对灭火剂的流阻影响,进而导致灭火喷嘴流量比试验值大,灭火剂浓度峰值比试验值高。另一方面,一维仿真模型计算的是灭火剂在舱内的均匀浓度,图 5 中灭火剂平均浓度试验值是通过试验中灭火剂浓度取样点进行算术平均计算得出,并不能完全代表舱内平均浓度,因此,浓度峰值仿真值与实验值存在 2% 的误差是可以接受的。

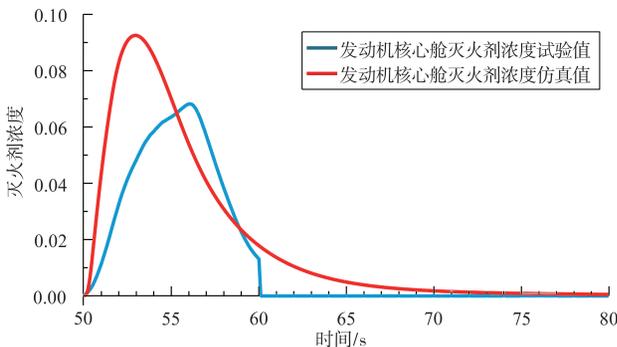
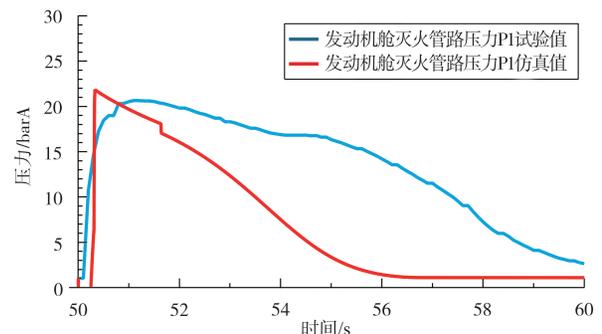


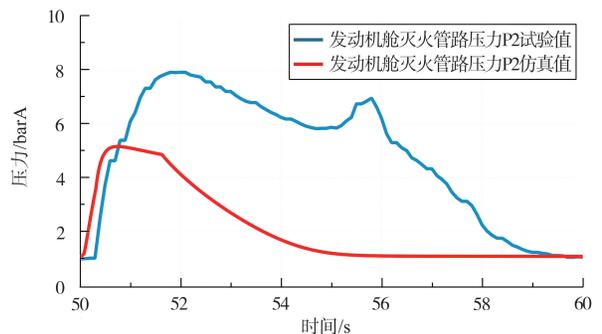
图 5 发动机核心舱灭火剂平均浓度时域图

此外,为了进一步验证模型准确性,选取图 1 中灭火管路/灭火喷嘴的四个压力值为补充验证参数,将仿真值与试验值进行对比,如图 6 和图 7 所

示。图 6 描述的是发动机舱灭火管路压力随时间变化的曲线,图 7 描述的是发动机灭火喷嘴压力随时间变化的曲线,其中蓝线代表在试验中测得的发动机舱灭火管路与喷嘴的压力变化曲线,红线代表通过 Amesim 软件仿真计算得到的发动机舱灭火管路与喷嘴的压力变化曲线,其中 P1、P2 为图 1 中的两个灭火管网压力测试点,P3、P4 分别为图 1 中风扇舱喷嘴、核心舱喷嘴的压力测试点。从图中可以看出,相对于灭火管路压力变化曲线,仿真计算的峰值压力与灭火剂释放时间存在较大误差,这是由于一维管网性能仿真模型为理想模型,忽略了管路高程与管接头/管三通对管路压降的影响。



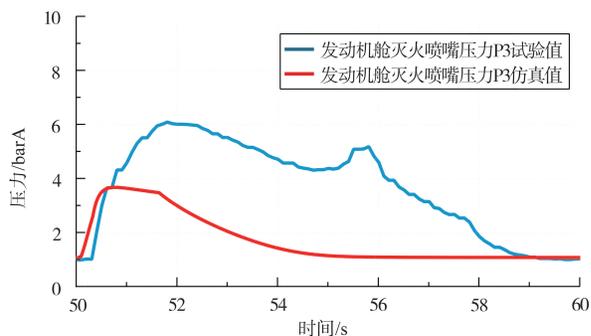
(a) P1 测试点



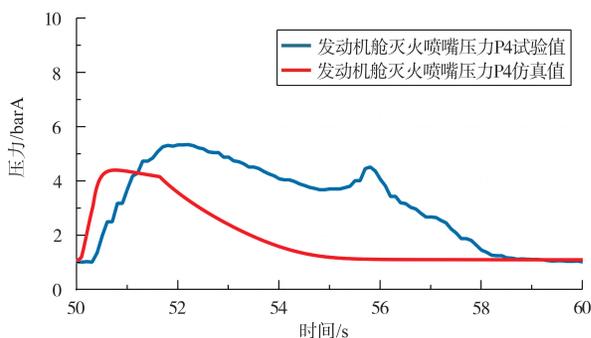
(b) P2 测试点

图 6 发动机舱灭火管路压力时域图

综上所述,发动机核心舱灭火剂浓度这一参数在发动机灭火管网两相流性能仿真计算中,其结果与试验测得的结果变化趋势基本一致。因此,可以认为基于 Amesim 软件建立的灭火系统仿真模型在灭火剂浓度计算上具备一定可靠性。然而,对于管路与喷嘴的压力值,仿真计算的结果与试验结果吻合程度较低,特别是在峰值压力与灭火剂释放时间方面,存在较大误差。



(a) P3 测试点



(b) P4 测试点

图 7 发动机灭火喷嘴压力时域图

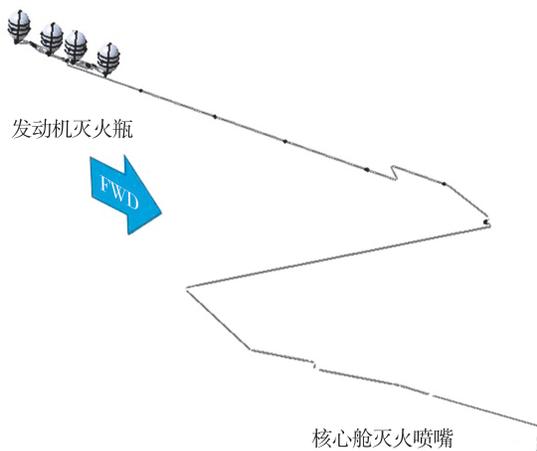


图 8 某飞机右发动机灭火系统管网初步数模

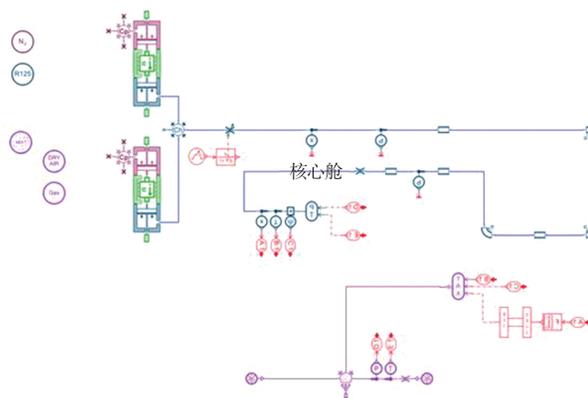


图 9 某飞机右发动机灭火系统一维管网仿真模型

2 性能仿真计算与分析

2.1 仿真模型

计算模型为某飞机右发动机灭火系统管网初步数模,如图 8 所示。某飞机左/右发动机将共用一套灭火系统,系统采用 HFC-125 灭火剂,可以为任一发动机提供两次灭火。系统设备包括发动机灭火瓶、T 型单向阀、流向阀、灭火管路和灭火喷嘴。灭火瓶释放的灭火剂经过灭火管路、灭火喷嘴喷射入发动机短舱内。

根据某飞机右发动机灭火系统管网初步数模,采用等效管路拟合法在 Amesim 软件中建立一维管网模型,由于一次灭火仅两个灭火瓶同时释放,因此在仿真模型中,仅建立两个灭火瓶,如图 9 所示。该模型同样分为两个模块,第一模块描述的是灭火剂在发动机灭火管网中进行两相流管网流动过程,采用 Amesim 软件提供的两相流库元件;第二模块描述的是由 APU 灭火喷嘴喷出的灭火剂进入发动机核心舱对核心舱火区进行灭火的过程,采用 Amesim 软件提供的混合气体库元件。其中,对模型做出以下假设:

1) 将发动机灭火瓶简化为一个理想的活塞容腔模型,容腔上部的高压氮气推动活塞向下运动,

活塞挤压容腔下部的灭火剂使其沿灭火瓶出口喷出,进入灭火管网;

2) 由于 Amesim 软件两相流库元件无法定义管路高程,因此,忽略灭火剂在管网内流动产生的高程压力损失。

2.2 边界条件设置

某飞机右发动机灭火系统部分边界条件如表 2 所示。

表 2 某飞机右发动机灭火系统边界条件

边界条件	数值
氮气填充压力	4.14/5.86 Mpa
灭火瓶容积	0.022 9 m ³
灭火剂质量	29.75 kg
核心舱通风流量	1.58 kg/s
核心舱火区容积	3.93 m ³

2.3 计算结果分析

图 10 描述的是采用内径为 2.844 8 cm 的灭火导管时,发动机核心舱灭火喷嘴流量随时间变化的曲线。其中,红线表示的是灭火瓶中氮气填充压力为 4.14 MPa 情况下灭火喷嘴流量变化曲线,蓝线表示的是灭火瓶中氮气填充压力为 5.86 MPa 情况下灭火喷嘴流量变化曲线。从图中可以看出,灭火瓶中氮气填充压力为 4.14 MPa 时,核心舱喷嘴流量峰值为 2.75 kg/s,喷射时长 11.8 s;当灭火瓶中氮气填充压力升高至 5.86 MPa 时,核心舱喷嘴流量峰值升高至 3.2 kg/s,喷射时长减少至 11.2 s。这是由于氮气填充压力的提高加快了灭火剂的释放流速,进而导致灭火喷嘴流量的增加和喷射时间的缩短。同时,尽管灭火剂填充压力增加,但流量与喷射时间的变化幅度较小,这说明氮气填充压力对灭火喷嘴流量的影响并不十分显著。

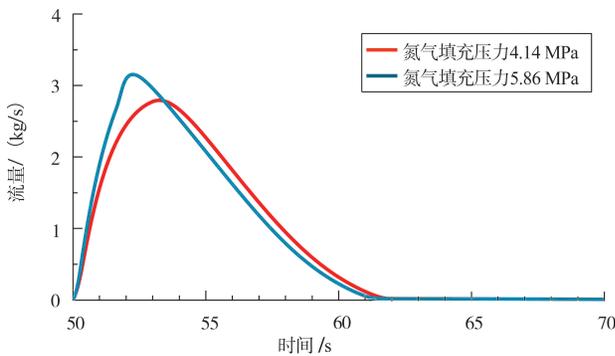


图 10 发动机核心舱灭火喷嘴流量时域图

图 11 描述的是氮气填充压力为 4.14 MPa 时,核心舱灭火喷嘴流量随时间变化的曲线,选取不同管径的灭火导管,计算灭火喷嘴流量。其中,红线表示的是选取内径为 1.422 4 cm 的灭火导管时,灭火喷嘴流量变化的曲线,蓝线表示的是选取内径为 2.844 8 cm 的灭火导管时,灭火喷嘴流量的变化曲线,黄线表示的是选取内径为 3.15 cm 的灭火导管时,灭火喷嘴流量的变化曲线。从图中可以看出,选取内径为 1.422 4 cm 的灭火导管时,灭火喷嘴流量峰值为 1 kg/s,灭火剂喷射时长为 40 s;选取内径为 2.844 8 cm 的灭火导管时,灭火喷嘴流量峰值为 2.75 kg/s,灭火剂喷射时长为 12 s;选取内径为 3.15 cm 的灭火导管时,灭火喷嘴流量峰值为 3.1 kg/s,灭火剂喷射时长为 10 s。由此可见,在一定范围内选取内径较大的灭火导管可以显著提高

发动机灭火喷嘴流量。同时,灭火剂喷射时间显著降低,但超出一定范围时,选取更大内径的灭火导管,灭火喷嘴流量提高幅度较小,灭火剂喷射时间降低的幅度也较小。

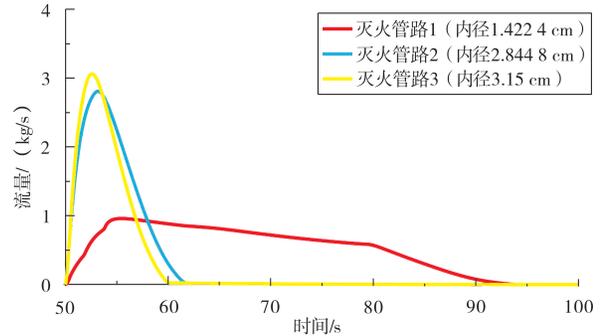


图 11 发动机核心舱灭火喷嘴流量时域图

图 12 描述的是采用内径为 2.844 8 cm 的灭火导管时,发动机核心舱灭火剂浓度随时间变化的曲线。其中,红线表示的是灭火瓶中氮气填充压力为 4.14 MPa 情况下灭火喷嘴流量变化曲线;蓝线表示的是灭火瓶中氮气填充压力为 5.86 MPa 情况下灭火喷嘴流量变化曲线。从图中可以看出,灭火瓶中氮气填充压力为 4.14 MPa 时,灭火剂浓度峰值为 16%,灭火剂在舱内存留时长约 30 s;当灭火瓶中氮气填充压力由 4.14 MPa 变为 5.86 MPa 时,灭火剂浓度的时域曲线基本无变化,仅流量峰值稍有提高,浓度峰值为 16.2%,灭火剂在舱内存留时长仍为 30 s。由此可见,氮气填充压力对发动机核心舱内的灭火剂浓度影响较小。

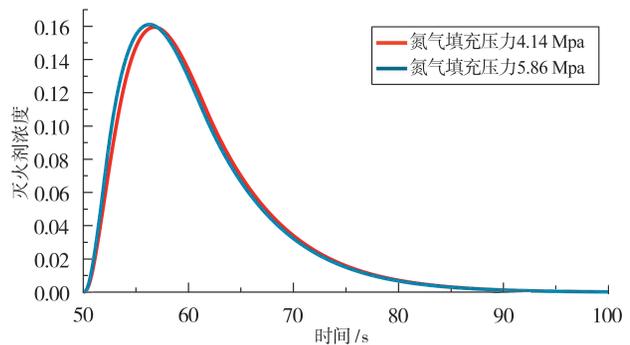


图 12 发动机核心舱灭火剂浓度时域图

图 13 描述的是氮气填充压力为 4.14 MPa 时,发动机核心舱灭火剂浓度随时间变化的曲线。其中,红线表示的是选取内径为 1.422 4 cm 的灭火导管时,核心舱灭火剂浓度变化曲线;蓝线表示的是选

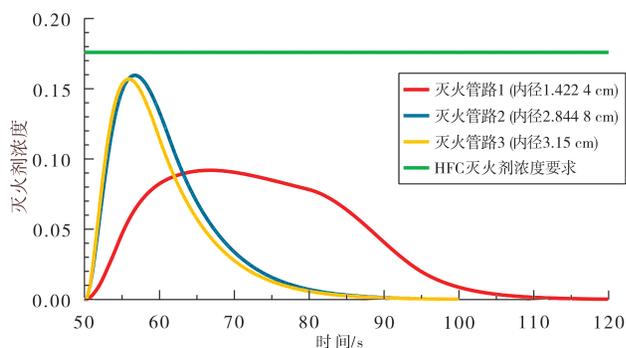


图 13 发动机核心舱灭火剂浓度时域图

取内径为 2.844 8 cm 的灭火导管时,核心舱灭火剂浓度变化曲线;黄线表示的是选取内径为 3.15 cm 的灭火导管时,核心舱灭火剂浓度变化曲线;绿线表示的是采用 HFC-125 灭火剂时要求达到的发动机舱内灭火剂浓度。从图中可以看出,选取内径为 1.422 4 cm 的灭火导管时,核心舱灭火剂浓度峰值为 9%,灭火剂在舱内存留时间约为 50 s;选取内径为 2.844 8 cm 的灭火导管时,核心舱灭火剂浓度峰值为 16%,灭火剂在舱内存留时间约为 30 s;选取内径为 3.15 cm 的灭火导管时,核心舱灭火剂浓度峰值为 15.6%,灭火剂在舱内存留时间约为 30 s。由此可见,在一定范围内选取内径较大的灭火导管可以提高发动机舱内灭火剂浓度。同时,灭火剂在舱内存留时间也会变短,但超出一定范围时,选取更大内径的灭火导管,舱内灭火剂浓度将不会提升且出现浓度变小的情况。

3 结论

本文选取填充 Halon1301 灭火剂的某飞机右发动机灭火系统为仿真模型准确性验证对象,采用 Amesim 软件对其开展仿真建模与计算,通过计算结果与试验数据的对比确定仿真模型的准确性。结果表明:发动机核心舱灭火剂浓度的仿真值与试验值时域曲线变化趋势基本一致,仿真模型具备一定准确性。

本文选取填充 HFC-125 灭火剂的某飞机发动

机灭火系统为仿真对象进行建模与计算,分析灭火瓶内氮气充装压力、灭火管路直径参数变化对灭火喷嘴流量、舱内灭火剂浓度的影响。结果表明:发动机灭火喷嘴的流量与发动机核心舱内的灭火剂浓度随着灭火瓶氮气填充压力的升高而升高,但升高幅度较小;在一定范围内选取内径较大的灭火导管可以显著提高发动机灭火喷嘴流量,灭火剂喷射时间也显著降低,但超出一定范围时,选取更大内径的灭火导管,灭火喷嘴流量提高幅度较小,灭火剂喷射时间降低的幅度也较小。

参考文献:

- [1] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
- [2] 王嘉一, 江民节. 民机发动机灭火剂浓度测量适航审定试飞方法研究[J]. 科技视界, 2019(18): 37-38.
- [3] 马进涛. 民用飞机新型灭火剂试验方法研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2012(增刊1): 155-158.
- [4] 朱日兴, 朱兆优. 民用飞机防火系统适航审定技术分析与研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2021(1): 123-127.
- [5] 宣扬, 干鹏, 银未宏. 民用飞机 Halon 1301 发动机灭火系统管网性能计算[J]. 科技信息, 2014(14): 60, 63.
- [6] 安凤林, 干鹏. 民机发动机舱灭火系统管网仿真计算研究[J]. 科技信息, 2012(28): 425-427.
- [7] 田傲, 屈昕. 民用飞机发动机短舱灭火系统的设计计算[J]. 中国科技信息, 2013(6): 106, 108.
- [8] 张兆钧. 基于 CFD 的三氟溴甲烷管内流动特性数值模拟研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- [9] 赵询霞. 基于 CFD 的三氟甲烷灭火系统运行规律研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [10] 姜雪丹, 王靖. 某型飞机发动机舱灭火性能仿真计算[J]. 科技与创新, 2023(9): 132-134, 137.

作者简介

李一德 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 民用飞机防火系统设计。E-mail: liyide@comac.cc

Performance calculation and analysis of civil aircraft engine fire extinguishing system

LI Yide *

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: Using Amesim software and based on the multiphase flow theory formula, a certain type of engine fire suppression system using Halon1301 fire extinguishing agent was modeled, and the accuracy of the model was verified by comparing it with its experimental data. Model and calculate the fire extinguishing system of a certain type of engine using HFC-125 fire extinguishing agent, and analyze the influence of parameters such as fire extinguishing agent filling pressure and fire extinguishing pipeline diameter on the spray flow rate and concentration of fire extinguishing agent. The results show that the flow rate of the engine fire extinguishing nozzle and the concentration of fire extinguishing agent in the engine core compartment increase with the increase of nitrogen filling pressure in the fire extinguishing bottle, but the increase is relatively small; selecting a fire extinguishing duct with a larger inner diameter within a certain range can significantly increase the flow rate of the engine fire extinguishing nozzle. At the same time, the spraying time of the fire extinguishing agent is significantly reduced. However, when the range is exceeded, selecting a larger inner diameter fire extinguishing duct will result in a smaller increase in the flow rate of the fire extinguishing nozzle and a smaller decrease in the spraying time of the fire extinguishing agent.

Keywords: engine; fire suppression system; performance calculation

* Corresponding author. E-mail: liyide@comac.cc