

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2024.03.013

民用飞机辅助燃油系统加油通气性能分析

朱文君* 张锦

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

摘要: 民用飞机新增辅助燃油系统设计更改涉及飞机多个专业,系统安装环境较复杂且交联接口较多,需要考虑多专业输入以及输出参数的耦合。例如,压力加油子系统需要同时考虑加油流量和通气流量的适配性。基于仿真软件 FloMASTER 提出一种验证方式,以辅助油箱压力加油子系统和辅助油箱通气子系统作为分析对象,研究在不同加油压力下油箱内的气体压力变化、通气所需流量和油箱的承压能力,通过仿真结果判断系统是否符合设计指标。主要研究结论如下:1)辅助燃油系统在地面正常加油时,油箱的通气管路设计满足通气需求;2)辅助燃油系统在地面压力加油时辅助油箱内的压力不会超出最大设计工作压力;3)辅助燃油系统在地面加油切断失效(极限工况)时,辅助油箱内压力和基本油箱内压力均能满足系统设计压力范围。

关键词: 飞机;辅助燃油;仿真;压力加油;通气

中图分类号: V222

文献标识码: A

OSID:



0 引言

燃油系统为大型民用运输类飞机的重要组成部分,对保证飞行动力持续且稳定有重要作用^[1-6],辅助燃油系统指在原有的基础上附加的燃油箱、管路组件和其余系统设备,用于实现增加飞机航程的目的^[7]。辅助燃油系统分为辅助燃油箱和辅助燃油系统,其中辅助燃油箱一般安装于飞机客舱或者货舱内,辅助燃油系统包含将辅助燃油箱与飞机基本燃油箱连通的管路件、阀门以及传感器等设备。辅助燃油箱通常为基本型燃油箱的额外备份,对于短航程运输飞机,加装辅助燃油箱后即使油箱内空载,飞机也应该是飞行安全的^[8]。

辅助燃油系统主要应用于公务机^[9]、灭火机和医疗机等特殊用途飞机。目前国内辅助燃油系统研究为初步研发阶段,尚无加装辅助燃油箱的国产民用飞机交付航线运营^[10]。

民用飞机辅助燃油箱系统通常在地面阶段进

行加油、在巡航状态进行转输并且不直接向飞机发动机供油^[11]。辅助燃油箱系统在正式加装民用飞机交付前,需要结合仿真结果与试验室数据,通过不断迭代优化,得到符合设计指标的方案^[12]。辅助油箱的压力加油过程通常不与基本油箱同时进行,压力加油的方案需要在型号研制阶段提前确定,压力加油性能需要同时满足辅助油箱、基本油箱和系统管路的设计指标。因此本文提出一种验证方式,以辅助油箱压力加油子系统和辅助油箱通气子系统作为分析对象,研究在不同加油压力下油箱内的气体压力变化、通气所需流量和油箱的承压能力,通过研究结果判断系统运行是否符合设计指标。

1 仿真对象

1.1 概述

辅助燃油系统的主要组成为燃油存储子系统、通气子系统、压力加油子系统、转输子系统、引气增压子系统、燃油指示与控制子系统和辅助燃油

* 通信作者. E-mail: zhuwenjun2@comac.cc

引用格式: 朱文君,张锦.民用飞机辅助燃油系统加油通气性能分析[J].民用飞机设计与研究,2024(3):88-94. ZHU W J, ZHANG J. Analysis on the performance of refueling and venting system in auxiliary fuel system for civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(3):88-94(in Chinese).

压力测量子系统。本文以某型民用飞机辅助燃油压力加油子系统、辅助燃油通气系统和基本油箱通气系统作为研究对象。

根据燃油箱在货仓内安装位置的不同,仿真模型分为两种分别对应其在前、后货舱的安装构型。辅助燃油箱加油管路从基本燃油箱加油管路连接到前后货舱内的辅助燃油箱组内,经过辅助燃油箱上安装的切断阀对辅助燃油箱加油进行切断,并在每个辅助燃油箱内都安装一个加油管路出口。

1.2 辅助油箱压力加油子系统

辅助油箱加油管路压力通常为 50 psig,最大压力为 55 psig^[13]。加油过程中,辅助油箱通气管路为开式通气,通气管路连通外界大气和油箱内部空间。辅助油箱的加油管路连通至基本油箱内,随基本油箱内加油管路延伸至机翼加油口盖处。

1.3 辅助油箱通气子系统

辅助燃油通气管路从辅助油箱连通至基本油箱,随基本油箱内通气管路延伸至外翼通气油箱与外界大气连通。辅助燃油箱在加油过程中设计最大承压为 12 psig。

1.4 基本油箱通气子系统

加油过程中,基本油箱内通气管路延伸至外翼通气油箱与外界大气连通。基本油箱在加油过程中油箱设计承压范围为-2~3.5 psig,在加油溢油工况下基本油箱设计最大承压为 12 psig。

2 分析思路和判据

通过仿真分析建立辅助油箱加油通气模型,根据加油地面研发的加油压力、加油速率和加油流量数据,校准辅助油箱加油模型,在此基础上分别仿真计算 20 psig、30 psig、35 psig、40 psig、50 psig 和 55 psig 加油压力下的模型,得出以下相关结果:

1) 通过辅助油箱和基本油箱通气流量的比对,确认基本油箱的通气系统可否满足辅助油箱的通气量;

2) 通过地面压力加油时辅助油箱内的压力仿真和理论分析,确认最大压力值会否超出辅助油箱最大设计工作压力 12 psig;

3) 通过加油溢流仿真,确认辅助油箱加油产生的通气量会否造成辅助油箱超压;

4) 通过理论分析,确认辅助油箱加油产生的

通气量会否造成基本油箱超压或者负压。

3 仿真建模

3.1 仿真软件

本文采用的 FloMASTER 软件是一个著名的热流体系统仿真分析平台,因其专为航空工业设计的专业性而被许多全球著名的航空用户所青睐,包括波音、空客、洛克希德·马丁、霍尼韦尔、西科斯基等公司。FloMASTER 流体系统仿真平台专注于燃油、环控系统仿真模拟方面,此次仿真过程中主要采用热流体仿真软件 FloMASTER V9.1。

3.2 软件建模

3.2.1 模型输入

将辅助燃油压力加油子系统、辅助油箱通气子系统和基本油箱通气子系统作为分析对象,根据安装的前、后货舱环境及构型的差异性,将分析对象分为两个构型。待分析的仿真对象如图 1 所示,参数特性如表 1 所示。

表 1 辅助油箱压力加油通气仿真模型
构型 1 及构型 2 参数特性

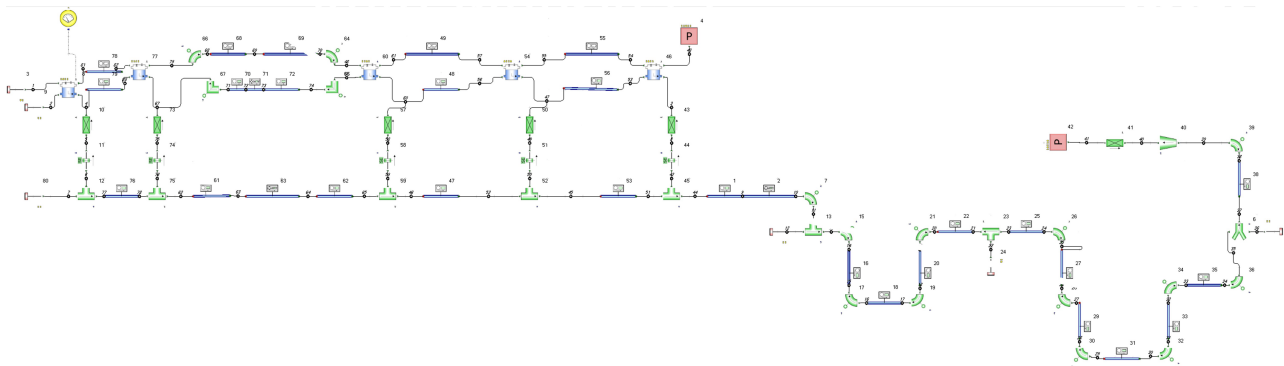
参数描述	数值		单位
	构型 1	构型 2	
液路的高度(出油口)	0.013	0.013	m
液路的截面积	0.005	0.005	m ²
液路的阻力损失系数	0.5	0.5	NA
气路的高度(出油口)	0.657	0.586	m
气路的截面积	0.005	0.005	m ²
气路的阻力损失系数	1	1	NA
气体模型	Compressible	Compressible	NA

3.2.2 正常加油工况输入

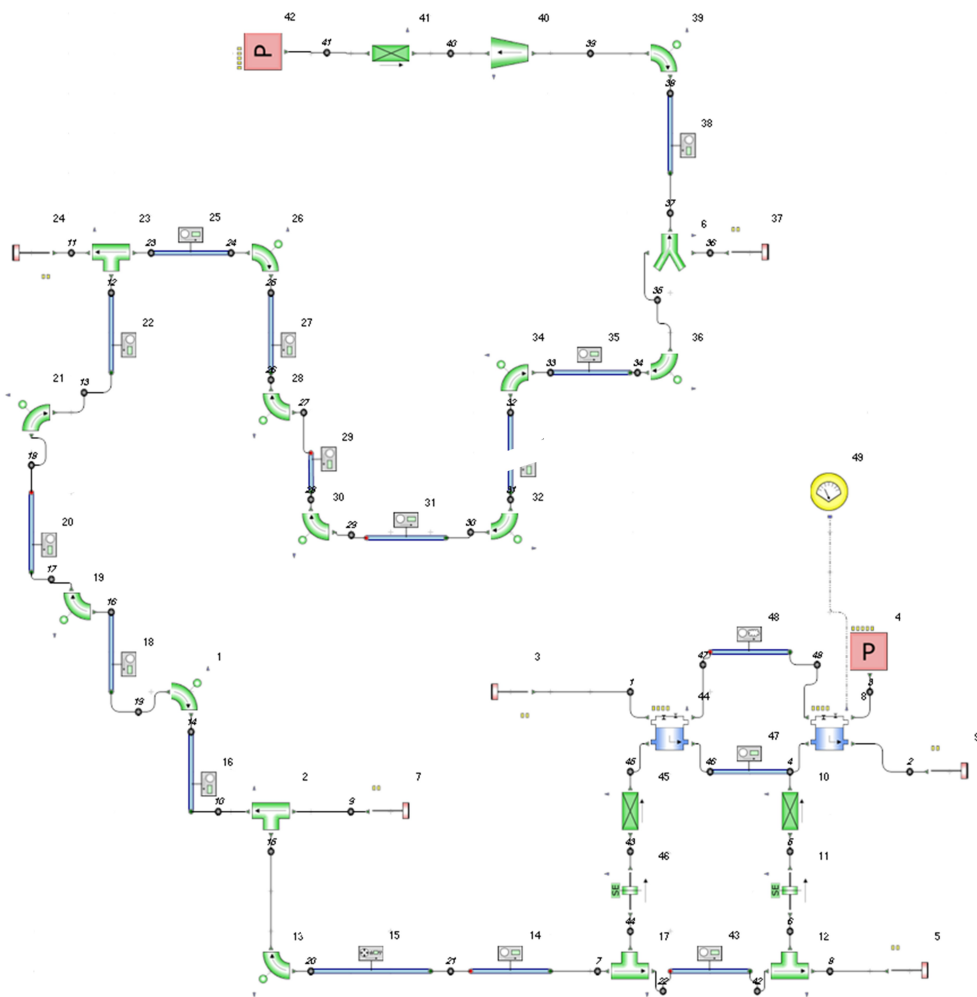
根据数模搭建辅助燃油系统压力加油模型,包含管路、油箱、转接头、单向阀以及限流孔等元件,如图 1(a)和图 1(b)所示。通过在压力边界中输入不同的加油压力,可以得到对应的油箱内压力变化以及通气流量值。

3.2.3 加油溢油工况输入

辅助燃油箱系统在地面加油时,两个串联的通气阀打开,使得辅助燃油箱与飞机基本燃油箱进行通气,保证辅助燃油箱不超压。当油箱加满后,若加油切断阀无法工作,燃油会从通气管路溢出,所以需要对该失效工况进行分析。通过仿真分析确认溢流发生时辅助油箱承压(包含油箱内油压和气



(a) 辅助油箱压力加油通气仿真模型构型 1







(b) 辅助油箱压力加油通气仿真模型构型 2

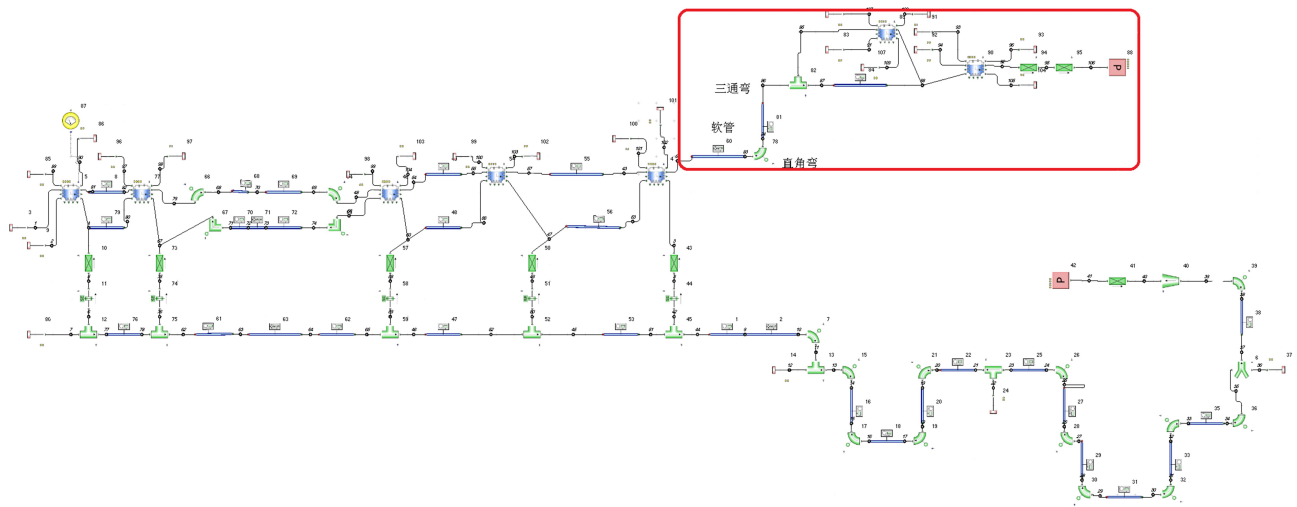
图 1 辅助油箱压力加油系统模型

压)不超过 12 psig,辅助油箱单个油箱内的最大油压为 0.75 psig(前油箱满油状态)。

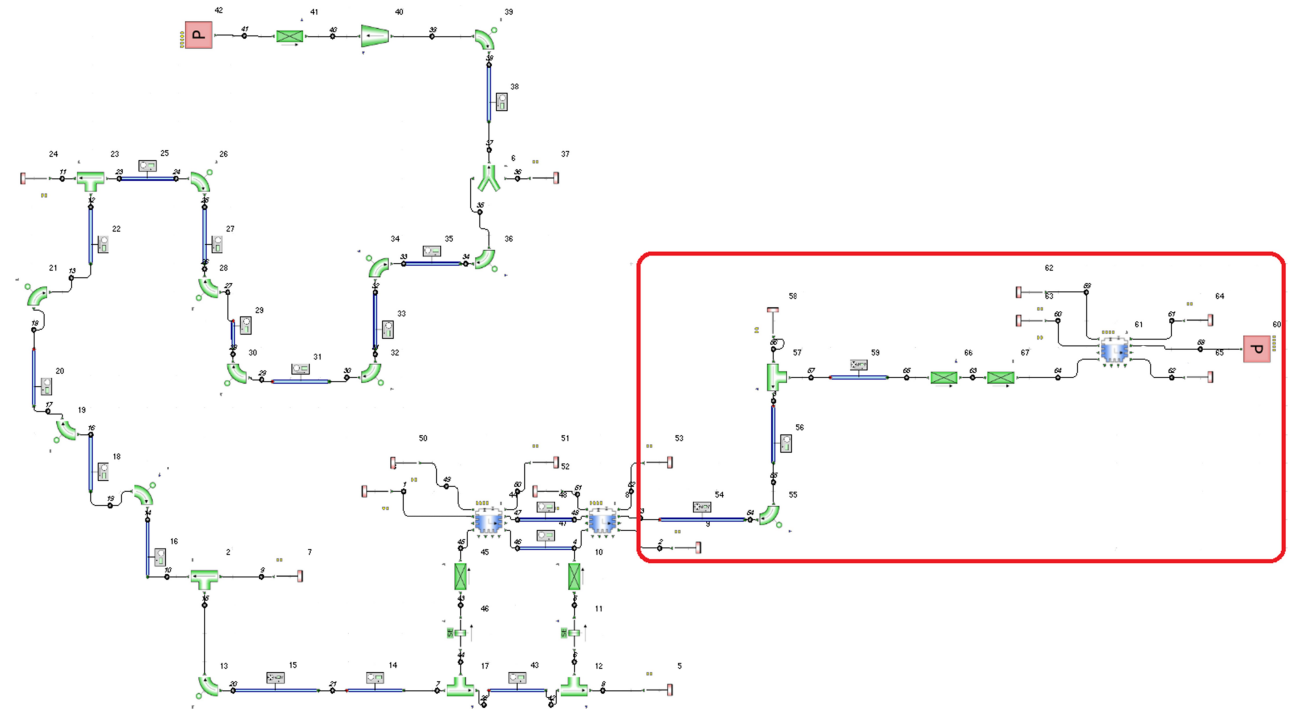
FloMASTER 中的仿真模型需要在辅助油箱压力加油模型的基础上更改油箱模型,将油箱模型上方的气体出口关闭,从而模拟油箱满油状态,同时

在油箱顶部新增油管模拟油箱溢油的状态,溢出的燃油经过辅助燃油管路与基本油箱内连通,具体如图 2 所示。

辅助油箱加油系统仿真模型说明:压力边界:;油箱元件:;阻力元件:;限制孔:.



(a) 辅助油箱构型1溢油仿真模型



(b) 辅助油箱构型2溢油仿真模型

图2 辅助油箱压力加油系统溢油仿真模型

3.3 简化与假设

在辅助油箱加油系统仿真模型中,作了如下简化与假设:

- 1) 实际系统管路的布置包括直管、弯管等管路件,由于管路件除了相对高度外,在仿真模型中的具体布置对系统仿真没有影响,所以建模过程中将相同高度下的部分弯管等管路件的流阻作为等效管长处理;
- 2) 以压力边界元件模拟当地大气以及加油压

力,提供恒定的当地大气压力值和加油压力值;

- 3) 油箱采用4-arm油箱元件和控制器元件模拟,参数根据实际油箱结构进行设置。

3.4 仿真模型输入

仿真模型的工作条件为环境温度 25 ℃,加油系统出口端地面环境大气压力为 1 bar,仿真介质为 Jet-A,密度在环境温度下为 0.803 kg/L。

油箱元件输入见表 1;管路元件输入见表 2。

表 2 管路元件参数

参数描述	数值	单位
长度	0.1	m
内径(d)	0.044 04	m
绝对粗糙度	0.01	mm

3.5 仿真模型校准

3.5.1 试验数据校准

本文对辅助燃油箱系统的仿真计算是基于地面台架试验的结果进行的。地面台架试验的辅助燃油箱构型与装机构型保持一致,台架试验的基本油箱为试验工装,与基本油箱连接的管路长度与装机构型不同,在校准模型时需要考虑对应管路件的长度,模拟地面加油状态。

本文仿真模型校准所用的通气流量数据来源于地面台架试验的数据,通过调整模型参数使仿真结果趋于地面台架试验的数据,得到可靠性更高的仿真模型。

3.5.2 限流孔与阻尼校准

辅助油箱加油系统仿真模型按实际构型搭建完成后,需要确认对应的限流孔径值,达到控制燃油加油流量的作用。采用 FloMASTER 实验计算模块(Experiments),可以得到辅助燃油箱加油入口处燃油加油流量和加油限流孔孔径关系曲线。通过输入不同的加油流量,可校准对应的限流孔孔径大小。

在完成辅助油箱加油通气系统初步建模后,输入研发试验中的加油压力,通过调整系统阻尼从而更接近对应的加油流量值,对辅助油箱加油系统仿真模型进行校准,提升模型的可靠性。

4 分析结果

4.1 正常加油工况计算数据

基于校核后的模型,对辅助燃油系统实施加油压力值 20 psig、30 psig、35 psig、40 psig、50 psig 和 55 psig 等工况下通气性能分析,经计算,获得各加油压力下所需的通气流量结果见表 3。由于仿真模型中的油箱元件通气管路与大气相通,导致油箱内油液上表面的气压变化不显著。因此,本文通过仿真分析油箱在通气性能溢油工况下的气压变化,进一步探究油箱内的气压变化。

表 3 辅助燃油箱系统的通气性能

加油压力/psig	通气流量/L·min ⁻¹		
	构型 1	构型 2	总流量
20	106.59	49.51	156.10
30	131.11	60.32	191.43
35	140.16	65.07	205.23
40	149.43	69.50	218.93
50	167.62	77.62	245.24
55	175.36	81.37	256.73

4.2 加油溢油工况计算数据

基于图 2 的仿真模型,对辅助燃油系统进行溢油仿真分析,经计算,获得不同加油压力工况加油溢流极限情况下辅助油箱内的气压,如表 4 所示。

表 4 加油溢流工况辅助油箱内压力

加油压力/psig	辅助油箱内压力最大值/psig		基本油箱内压力/psig
	构型 1	构型 2	
20	6.64	0.40	5.68
30	6.72	0.80	5.81
35	6.77	0.99	5.87
40	6.81	1.18	5.94
50	6.91	1.56	6.08
55	6.99	1.74	6.14

4.3 初步分析评估

根据某型民用飞机数据,在 35 psig 加油压力下,基本燃油箱从空油箱(油箱初始油量 130 kg)一直加到满油(总油量 10 280 kg)用时为 20.3 min,单侧通气流量约为 311 L/min;在 50 psig 加油压力下,基本燃油箱从空油箱(油箱初始油量 140 kg)一直加到满油(总油量 10 140 kg)用时为 16.45 min,单侧通气流量约为 379 L/min。

根据仿真结果可以得出结论,辅助燃油箱系统的通气子系统性能与基本油箱通气系统相匹配,未超出原机通气系统的最大通气能力;同时由于通气性能相匹配,辅助油箱内气体空间与外界通过通气管路连通,气压变化不显著,故正常压力加油工况下,助油箱内的气压不会造成辅助油箱的超压。

4.4 溢油工况分析评估

辅助燃油箱系统在地面加油时,当油箱加满后,若加油切断阀无法工作,燃油会从通气管路溢

出,造成通气管路中气体流通体积和通气流量减小,当无法满足辅助油箱通气需求时,辅助油箱会形成憋压造成压力上升。

由于气体压力值随着体积变化显著,导致在发生通气管路溢油的瞬间,油箱内气体压力会因体积压缩而增大,当油箱内的气体压力和溢油流量达到一个新的平衡时,辅助油箱内的压力会逐渐减小并趋于一个稳定值。

根据辅助油箱在加油溢流极限工况下的仿真结果可以说明,辅助燃油在基本油箱满油且为最大压力的情况下,加油出现溢流后,前、后辅助油箱内的压力都不会超出辅助油箱结构设计的最大工作压力 12 psig。

4.5 理论分析评估

辅助油箱与基本油箱不同时进行加油,辅助油箱的加油流量小于基本油箱的加油流量,辅助油箱系统使用基本油箱两侧通气管路进行通气,前辅助油箱的通气管路包括前辅助油箱通气管路以及与之相连的基本油箱右侧通气管路,后辅助油箱的通气管路包括后辅助油箱通气管路以及与之相连的基本油箱左侧通气管路。

由于前、后辅助油箱的通气流量均小于基本油箱单侧的通气流量,因此基本油箱通气管路可以承受辅助油箱的通气量,不会造成基本燃油箱的超压或负压。根据辅助油箱在加油溢流极限工况下的仿真可以说明,辅助燃油在基本油箱满油且为最大压力的情况下,即便加油出现溢流后,基本油箱内的压力都不会超出油箱结构设计的最大工作压力 12 psig。

5 结论

民用飞机辅助燃油系统压力加油子系统需要同时考虑加油流量和通气流量的适配性,本文基于仿真软件 FloMASTER 提出一种验证方式,以辅助油箱通气子系统和辅助油箱压力加油子系统作为分析对象,研究在不同加油压力下油箱内的气体压力变化、通气所需流量和油箱管路的承压能力,通过仿真结果判断系统是否符合设计指标,结论如下:

1) 辅助燃油系统在地面正常加油时,基本油箱的通气管路满足辅助油箱通气需求;

2) 辅助油箱在地面压力加油时不会使辅助油箱内的压力超出辅助油箱设计的最大工作压力;

3) 辅助燃油系统在地面加油切断失效(极限工况)时,辅助油箱内的压力和基本油箱内的压力均能满足系统设计压力范围。

参考文献:

- [1] 兰顿. 飞机燃油系统[M]. 颜万亿,译. 上海:上海交通大学出版社,2010.
- [2] 赵士洋. 民用飞机燃油箱通气系统技术研究[J]. 科技信息,2013(16):409-411.
- [3] 张洋. 民机燃油系统安全性评估研究[D]. 上海:上海工程技术大学,2019.
- [4] 祝世兴,田静. 飞机液压与燃油系统[M]. 北京:兵器工业出版社,2004.
- [5] LANGTON R, CLARK C, HEWITT M, et al. Aircraft fuel systems[M]. New York: Wiley, 2009.
- [6] 王冠茹. 民用飞机运营事件风险评估方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
- [7] 刘德刚,周宇穗,游胜龙. 民用飞机辅助燃油系统研究[J]. 装备制造技术,2014(9):156-158.
- [8] FAA. Auxiliary fuel system installations: AC25-8[S]. U. S. ;Federal Aviation Administration, 2006.
- [9] 王畅. 浅谈 BBJ 公务机辅助燃油系统的维护[J]. 航空维修与工程,2020(1):69-71.
- [10] 龚昊. 基于差分进化算法的辅助燃油系统燃油转输参数优化[J]. 科学技术与工程,2020,20(4):1690-1696.
- [11] 姚莉君. 民用飞机辅助燃油箱系统燃油转输油出口位置研究[J]. 民用飞机设计与研究,2021(3):49-55.
- [12] 姚蔡翔,张剑睿,曹飞龙,等. 关于民用飞机辅助燃油箱安装的研究[J]. 军民两用技术与产品,2016,12(2):9-10,121.
- [13] 兰顿. 大飞机出版工程:飞机燃油系统[M]. 颜万亿,译. 上海:上海交通大学出版社,2010:47-51.

作者简介

朱文君 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机燃油系统集成验证。E-mail: zhuwenjun2@comac. cc

张锦 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机燃油系统集成验证。E-mail: zhangjin1@comac. cc

Analysis on the performance of refueling and venting system in auxiliary fuel system for civil aircraft

ZHU Wenjun* ZHANG Jin

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

Abstract: The design of auxiliary fuel system for civil aircraft involves several systems on aircraft which is related to complicated installing environment and the coupling of inputs and outputs for multiple systems. As the design of refueling system, it needs to consider the coupling of refueling flow and venting flow. Based on the software FloMASTER, a validation method is proposed in this paper which takes the refueling and venting system of auxiliary fuel system as the study objects. The main research content is based on the simulation including the change of gas pressure in fuel tank under different refueling pressure, the requirement of the venting flow and the pressure capacity of fuel tanks, which will be evaluated whether it meets the design specifications or not. The results show that: 1) the capacity of venting tubes in fuel tanks meets the requirement of venting flow while the auxiliary fuel system is refueled on the ground; 2) the gas pressure in auxiliary fuel tank will not over the maximum design pressure value of auxiliary fuel tank during ground refueling; 3) the pressure in both auxiliary fuel tank and original fuel tank will meet the design pressure under limiting condition (the failure of ground refueling cutting-off).

Keywords: aircraft; auxiliary fuel; simulation; refueling; venting

* Corresponding author. E-mail: zhuwenjun2@comac.cc