

# 客改货飞机主货舱防火系统设计

李一德\*

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

**摘要:** 客改货飞机主货舱相比于原客机下部货舱,舱容更大,装载货物种类更多,一旦发生火灾事故,不仅货物受损,还会危及飞行安全,因此必须为主货舱配置防火系统。通过对条款的研究,分析总结主货舱防火系统的组成与设计要点。以单通道窄体客改货飞机为例,提出了一种由烟雾探测器、烟雾探测系统控制器和指示告警系统组成的主货舱烟雾探测系统架构,梳理了系统内设备的功能、性能与布置要求,并提供了一种验证主货舱烟雾探测系统性能的数值计算方法。根据条款要求,明确了主货舱火情抑制的主要措施与要求,针对机组人员在飞行中可能进入的客改货飞机主货舱,确定了手提式灭火器的布置要求。

**关键词:** 客改货飞机;防火系统;烟雾探测

中图分类号: V223+.2

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

客改货飞机是指将已退役且有改装价值的宽体客机或窄体客机,通过工程技术手段改装为适合进行货物运输的货机。目前我国全货机数量仅为美国全货机数量的31%,占比不足我国民航运输机队的5%,而民航发达的国家货机数量大约占民航运输机队的10%~15%。根据波音公司发布的2020年版《中国民用航空市场展望》,未来20年,中国将有750架改装货机的需求<sup>[1]</sup>。

客改货是一个较为复杂的飞机改装过程,飞机客舱改装为主货舱,用于装载集装箱(包括集装箱和集装板),可运输货物、邮件、快递、危险品、活体动物和冷链。主货舱相比于原客机下部货舱,舱容更大,装载货物种类更多,一旦发生火灾事故,不仅货物受损,还会危及飞行安全,甚至导致机毁人亡<sup>[2-3]</sup>。

根据中国民用航空规章第25部(CCAR-25-R4)<sup>[4]</sup>要求,客改货飞机主货舱必须配置防火系统,该系统应具备烟雾探测或火警探测功能,并可在驾驶员或飞行工程师工作位置处给出警告。系统还

应具备切断主货舱通风气流与释压功能,用于抑制主货舱火情<sup>[5-7]</sup>。本文以单通道窄体客改货飞机为例,提出一种客改货飞机防火系统设计方法。

## 1 主货舱防火系统条款分析与设计要点

主货舱防火系统设计适用的主要条款见表1。

表1 主货舱防火系统主要条款及内容

条款号	条款内容
25.857(e)(2)	有经批准的、独立的烟雾探测或火警探测器系统,可在驾驶员或飞行工程师工作位置处给出警告
25.857(e)(3)	有措施切断进入货舱的或货舱内的通风气流,这些措施的操纵器件是机组舱内的飞行机组可以接近的
25.858(a)	该探测系统必须在起火后1 min内,向飞行机组给出目视指示
25.858(c)	必须有措施使机组在飞行中能检查每个火警探测器线路的功能
25.858(d)	必须表明,探测系统在所有经批准的运行形态和条件下均为有效

\* 通信作者。E-mail: liyide@comac.cc

引用格式: 李一德. 客改货飞机主货舱防火系统设计[J]. 民用飞机设计与研究, 2024(3):100-105. LI Y D. Design of main cargo hold fire protection system for freighter[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(3):100-105(in Chinese).

表1(续)

条款号	条款内容
25.851(a)(3)	每个A级或B级货舱或行李舱和每个机组人员在飞行中可以到达的E级货舱或行李舱内,必须至少有一个易于接近取用的手提式灭火器

根据上述条款,主货舱防火系统一般由主货舱烟雾探测系统、主货舱火情抑制系统、手提式灭火器组成。其设计要点如下:

1) 必须为主货舱设置一套安全可靠的烟雾探测系统,该系统能够在主货舱任何位置起火后1 min内向驾驶舱发出清晰的视觉和听觉告警指示。但由于主货舱舱容较大,通风气流状况与下货舱存在显著差异,发生火情后,烟雾较难向上飘散以触发烟雾探测器,因此,主货舱烟雾探测系统设计应充分考虑探测器布置点与系统控制逻辑,确保系统性能满足要求。

2) 必须为主货舱提供有效的火情抑制措施,与下部货舱不同的是,主货舱舱容较大,采用固定式灭火系统喷射灭火剂的方法无法满足条款对于货舱灭火剂浓度的要求。波音737货机、波音757货机等主流机型多采用关闭通风,将座舱压力高度增加到25 000 ft的办法,由此限制氧气供应,抑制火情。

3) 客改货飞机主货舱如果被定义为机组人员在飞行中进入的E级货舱,应在便于取用的位置布置至少一个手提式灭火器。

## 2 主货舱烟雾探测

### 2.1 系统功能与架构设计

主货舱烟雾探测系统一般由烟雾探测器、烟雾探测系统控制器和飞机级相关指示告警系统组成。

为了提升系统可靠性,提高飞机运营效率与派遣率,主货舱烟雾探测系统通常采用双通道冗余构架,两个通道之间电气隔离,使用不同的电源供电。主货舱内一半烟雾探测器应连接到控制器的A通道,另一半烟雾探测器应连接到控制器的B通道,控制器对A、B两个通道的烟雾探测器进行状态监测,当A、B通道同时有至少一个烟雾探测器发出烟雾告警信号时,控制器即判定主货舱发生火情,向指示告警系统发出烟雾告警信号。主货舱烟雾探测系统架构示意图如图1所示。

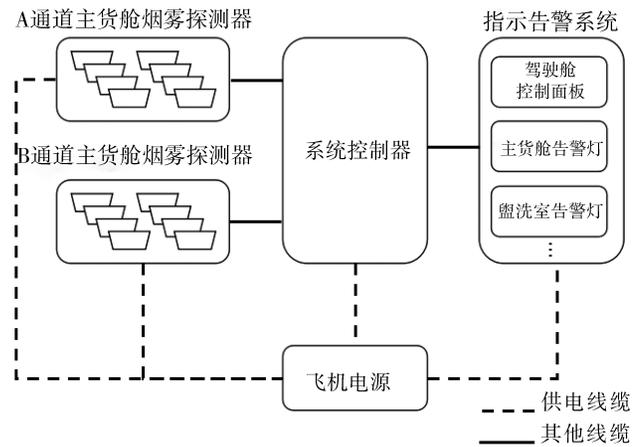


图1 主货舱烟雾探测系统架构示意图

### 2.2 设备功能与布置设计

#### 2.2.1 烟雾探测器

烟雾探测器为客改货飞机主货舱探测元件。当货舱内烟雾状态满足烟雾探测器报警条件时,烟雾探测器能够在30 s内向控制器发出告警信号。

主货舱烟雾探测器通常采用光电型烟雾探测器,利用光散射原理进行烟雾探测工作,光的透射率应为94%~96%。

烟雾探测器具备烟雾告警功能、故障告警功能、手动自检功能、周期自检功能。

烟雾探测器应通过设备鉴定试验,其鉴定结果满足定义的部件环境要求,满足RTCA DO-160G<sup>[8]</sup>等标准要求,保证能够在飞机运行和环境条件下执行预定功能,且不会影响其他系统或设备的正常工作。

主货舱烟雾探测器示意图如图2所示。



图2 烟雾探测系统示意图

为了获得更好的烟雾探测性能,客改货主货舱烟雾探测器一般采用开放安装方式布置在主货舱天花板中心线两侧的位置,如图3所示。

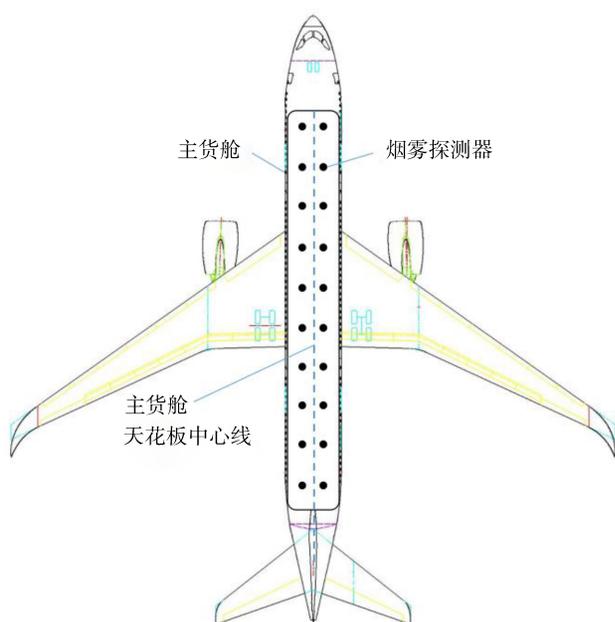


图 3 主货舱烟雾探测器布置示意图

与 C 级货舱相比,主货舱天花板存在多个空调进风口,主货舱烟雾探测器的布置位置应尽可能的远离天花板进风口,避免气流吹散烟雾,导致告警时间无法满足要求。

为了满足 CCAR-25-R4 中规定的主货舱烟雾探测系统必须在起火 1 min 内向机组告警的要求,实际烟雾探测器的布置应依据主货舱通风的流场状况与烟雾探测性能仿真分析进行设计,条款要求见表 1。

### 2.2.2 系统控制器

系统控制器为主货舱烟雾探测系统专用控制元件,主要功能有:

- 1) 接收主货舱烟雾探测器发出的告警和故障信号,并对信号进行逻辑判断;
- 2) 向指示告警系统发送烟雾告警信号;
- 3) 向指示告警系统发送系统降级信号;
- 4) 向指示告警系统发送系统故障信号;
- 5) 提供对主货舱烟雾器的故障检测功能。

控制器应通过设备鉴定试验,其鉴定结果应满足定义的部件环境要求,满足 RTCA DO-160G 等标准要求,保证能够在飞机运行和环境条件下执行预定功能,且不会影响其他系统或设备的正常工作。

系统控制器属于电子设备,通常应安装在飞机前货舱中部左三角区或电子设备舱内,安装位置应具备良好的可达性。系统控制器在安装时应通过

支架或其他方式进行有效固定,在规定的飞行载荷情况、地面载荷情况和应急着陆情况所对应的最大载荷系数下不会移动或造成危险。

### 2.2.3 指示告警系统

指示告警系统即当火灾发生时能够为机组成员提供告警指示的系统,指示告警系统包括且不限于驾驶舱控制面板、盥洗室告警灯等载人区域内的视觉与听觉告警装置。若在飞行过程中,主货舱允许机组人员进入,则主货舱内也应具备视觉与听觉告警装置。

驾驶舱控制面板为最主要的指示告警系统,直接为飞行机组提供主货舱烟雾探测系统告警与故障指示,其主要功能有:

- 1) 提供主货舱烟雾探测系统告警指示;
- 2) 提供主货舱烟雾探测系统故障指示;
- 3) 提供主货舱烟雾探测系统降级指示;
- 4) 提供主货舱烟雾探测系统测试操作功能。

驾驶舱控制面板应具有主货舱烟雾告警灯(红色“SMOKE”字符)、系统故障指示灯(琥珀色“FAULT”字符)、系统降级指示灯(“SYS DEGRADE”字符)、蜂鸣器(“BUZZER”字符)和系统测试开关(“TEST”字符),根据具体情况,可设计 1 块或 2 块控制板达到上述功能,示意图见图 4 和图 5。



图 4 烟雾告警灯、故障指示灯示意图



图 5 蜂鸣器、测试按钮、降级指示灯示意图

## 2.3 系统性能数值计算

### 2.3.1 概述

本文利用美国国家标准和技术研究院的火灾动力学模拟器(fire dynamics simulator,简称 FDS)模拟货舱烟雾传播和烟雾探测器对烟雾的响应,对某客改货飞机主货舱烟雾传播和烟雾探测器响应进

行了数值模拟研究<sup>[9-10]</sup>。计算过程如下:

- 1) 建立仿真模型;
- 2) 边界条件设置;
- 3) 计算结果分析。

### 2.3.2 建立仿真模型

客改货飞机主货舱烟雾探测系统仿真主要包含主货舱模型、烟雾探测器模型和烟雾源模型。

主货舱模型根据某客改货飞机主货舱烟雾探测系统布置方案建立,主货舱天花板设置8对共16个烟雾探测器,11对共22个通风进口。

烟雾探测器模型采用FDS软件中的标准烟雾探测器模型,由于货舱烟雾探测器对光的透射率通常为94%~96%,因此设置烟雾探测器的烟雾浓度超过4%,即触发烟雾探测器告警。

烟雾源模型采用FDS软件中的燃烧塑料块,该烟雾源也是美国联邦航空局烟雾探测性能试验中采用的烟雾源。烟雾源的热释放率(heat release rate,简称HRR)设置为随时间变化:从0s到90s,烟雾源热释放率从0kW逐渐升高到5kW。

建模过程中可设置多个烟雾源着火点位置,根据仿真计算获得严酷的烟雾源位置(烟雾探测系统响应时间最长)。通常情况下选择距离烟雾探测器最远或靠近舱门区域的通风气流较大的位置,本模型中设置3个着火点,见图6。烟雾探测系统响应时间见表2。根据计算结果,确定着火点位置2为最严酷烟雾源头位置。

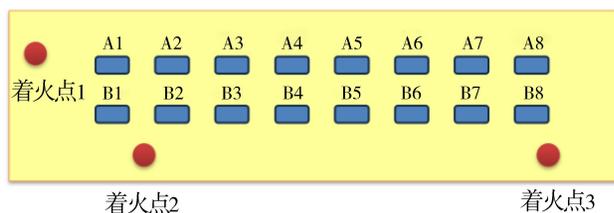


图6 着火点位置示意图

表2 主货舱烟雾探测系统响应时间

序号	着火点	系统告警时间/s
1	位置1	18.6
2	位置2	21.7
3	位置3	15.3

### 2.3.3 边界条件设置

客改货飞机主货舱烟雾探测系统进行性能仿真计算,为了模拟通风条件下舱内烟雾的传播,数

值模拟过程中,主货舱初始条件为气流静止状态、温度为20℃,从0s开始打开主货舱通风。通风2min后,舱内通风气流得到充分发展,此时烟雾源开始点火燃烧产生烟雾。

### 2.3.4 计算结果分析

通过数值模拟,在烟雾源发烟后可以得到烟雾在主货舱的扩散范围和触发的烟雾探测器,如图7所示。

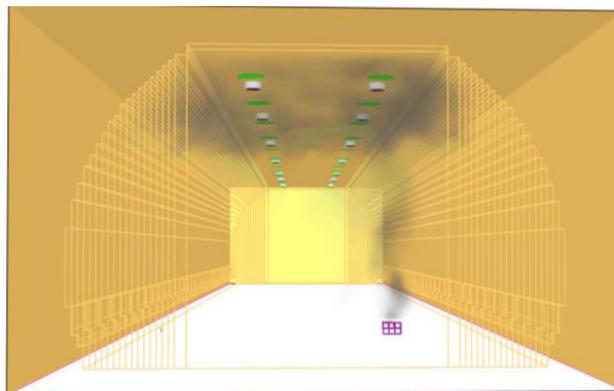


图7 发烟1min后烟雾分布示意图

烟雾探测系统的告警逻辑采用“与”逻辑,即当任意2个烟雾探测器告警时才发出告警,仅1个烟雾探测器告警时不发出告警。烟雾探测器的编号和告警时间见表3。

表3 着火点1主货舱烟雾探测系统响应时间

序号	A通道烟雾探测器	告警时间/s	B通道烟雾探测器	告警时间/s
1	A1	23.1	B1	23.4
2	A2	21.7	B2	21.5
3	A3	28.9	B3	28.6
4	A4	36.1	B4	36.3
5	A5	51.9	B5	51.7
6	A6	56.2	B6	56.8
7	A7	57.7	B7	58.0
8	A8	68.2	B8	66.6

根据模拟结果,在当前设计构型和烟雾源位置情况下,60s内发出告警的烟雾探测器多于2个,烟雾探测系统可满足60s内告警的需求。

## 3 主货舱火情抑制

客改货飞机为全货运飞机,主货舱为E级货

舱,根据 CCAR-25-R4 条款的要求,无需为 E 级货舱配置固定灭火系统,机组可通过关闭通风,将座舱压力高度逐渐增加,由此限制氧气供应,进而控制火情,直到飞机可以下降并着陆。

设计过程采取的措施是在压调系统软件中增加专用于货机型号的座舱高度限制功能,限制阈值设定为 24 200 ft,以达到限制座舱高度的目的。

## 4 主货舱手提式灭火器

客改货飞机主货舱被定义为机组人员在飞行中进入的 E 级货舱,应在便于取用的位置布置手提式灭火器。

主货舱手提式灭火器采用 2-BTP 洁净型手提式灭火器,2-BTP 手提式灭火器的瓶体内贮存有 1.7 kg 的 2-BTP 灭火剂并用氮气进行增压。当机上出现火情时,操作人员将灭火瓶从安装支架上拆下,打开保险销,按压释放压杆,使瓶体内贮存的灭火剂通过喷嘴喷向着火区域,对局部火情实施灭火。灭火瓶上配置有压力表,便于日常检查维护。

通常情况下,选择在客改货飞机储藏柜壁板上新安装 1 个 2-BTP 手提式灭火瓶,该灭火瓶位置距离主货舱、厨房均较近,便于机组人员接近与取用。机组可通过目视检查或查看 2-BTP 手提式灭火器的压力表确认设备的工作状态。

## 5 结论

本文通过对 CCAR-25-R4 条款的研究,分析总结主货舱防火系统的组成与设计要点。以单通道窄体客改货飞机为例,提出了一种由烟雾探测器、烟雾探测系统控制器和指示告警系统组成的主货舱烟雾探测系统架构,梳理了系统内设备的功能、性能与布置要求,并提供了一种验证主货舱烟雾探

测系统性能的数值计算方法。

本文进一步明确了主货舱火情抑制的主要措施与要求,并针对机组人员在飞行中可能进入的客改货飞机主货舱,确定了手提式灭火器的布置要求以确保在紧急情况下能够及时有效应对火情。该设计和配置可以为后续客改货飞机主货舱防火系统设计提供参考与指导。

### 参考文献:

- [1] 马鹏飞. 我国客改货市场的发展趋势[J]. 大飞机, 2021(6):28-31.
- [2] 陈彦伟. 民用飞机货舱烟雾探测系统研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2019(4):66-69.
- [3] 银未宏,于水,唐宏刚. 民用飞机防火设计要求研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2014(2):11-13,30.
- [4] 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, 2016.
- [5] 马健. “客改货”的适航审定要求探讨[J]. 国际航空, 2010(8):71-72.
- [6] 张建勇. 以波音 737-800BCF 为例浅谈客改货飞机的关注点[J]. 航空维修与工程, 2021(9):70-71.
- [7] 王哲. 飞机货舱防火设计要求研究[J]. 航空标准化与质量, 2014(5):13-15,34.
- [8] RTCA. Environmental conditions and test procedures for airborne equipment: RTCA/DO-160[S]. Washington, D. C.: RTCA, 2010.
- [9] 程书山. 货舱烟雾探测最严酷火源位置数值模拟研究[J]. 科技视界, 2017(9):21-22.
- [10] 程书山,安凤林,王渊明. 民用飞机货舱烟雾探测系统性能验证[J]. 科技视界, 2016(18):25-27.

### 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

## Design of main cargo hold fire protection system for preighter

LI Yide \*

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

**Abstract:** Compared with the lower cargo hold of the original passenger aircraft, the main cargo hold of the passenger to cargo aircraft has a larger capacity and more types of loaded cargo. Once a fire accident occurs, not only the cargo will be damaged, but also the flight safety will be affected, so it is necessary to configure the fire protection system for the main cargo hold. This paper analyzes and summarizes the composition and design points of the main cargo compartment fire protection system based on the research of aviation regulations. This paper proposes a main cargo hold smoke detection system architecture composed of smoke detectors, smoke detection system control unit, and indication alarm systems. This paper sorts out the function, performance and arrangement requirements of the equipment in the system, and provided a numerical calculation method to verify the performance of the main cargo hold smoke detection system. According to the requirements of the regulations, this paper specifies the main measures and requirements for fire suppression in the main cargo compartment, and this paper determines the arrangement requirements of portable fire extinguishers for the main cargo compartment of the passenger to cargo airplane, which is accessed by the crew during the flight.

**Keywords:** preighter; fire protection system; smoke detection

---

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