

民用飞机惰化系统富氮气体 分配方案分析与研究

薛 勇* 马克霖

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘 要: 提出了飞机惰化系统富氮气体(nitrogen-enriched air, 简称 NEA)分配系统的主要设计要求,并以 A320 和波音 737 飞机为代表,分析了窄体机的 NEA 分配系统。进一步分析了波音 787 和 A350 飞机的惰化系统 NEA 分配方案,发现其采用限流孔、气体喷嘴、排气笛形管、引射器等相结合的方案来实现 NEA 在燃油箱内的快速均匀分配,然而这两种方案并不能根据各燃油箱气相空间的实时变化而及时、主动地调节气流量的大小。提出利用燃油液面进行自动流量调节的 NEA 分配方案,通过在油箱内布置垂直向下的排气管路,并在管路分支上不断增加排气孔来实现排气量随着燃油箱气相空间实时正向变化的目的,达到按照每个隔舱气相空间的变化,调节排气量和排气位置的效果。对比 A350 和波音 787 飞机的 NEA 分配方案的主要特点在于能够主动根据燃油箱内液面变化,及时调节 NEA 流量,以达到更好的快速、均匀分配的效果,值得进行深入的理论和试验研究。

关键词: 惰化;分配;可燃性;氧浓度

中图分类号: V228.11

文献标识码: A

OSID:



0 引言

飞机燃油箱惰化系统的作用是通过空气分离器将高压引气中的富氮气体分离出来,充入到燃油箱的气相空间中,以降低燃油箱气相空间的氧浓度,使其处于不可燃的状态,以保护燃油箱的安全,使其可燃性满足 CCAR25.981(b)和附录 M、N 的要求^[1-3]。富氮气体(nitrogen-enriched air, 简称 NEA)分配系统的作用是将 NEA 快速、均匀地分配到燃油箱内,使得 NEA 尽快同时到达所有燃油箱并保持惰化状态。

一般来说惰化系统 NEA 分配方案在设计时应满足以下主要要求:

1) NEA 从排气口进入燃油箱后,应能够快速分配到燃油箱各隔舱和每个隔舱的各部分,尤其是油箱的偏远角落;

2) NEA 在油箱隔舱内的分布应尽量均匀,尽量使得所有的隔舱在同一时间达到惰化的状态;

3) 由于各燃油箱的燃油量变化,导致气相空间相应变化,应尽量根据燃油各隔舱气相空间的变化调节各隔舱的流量分配;

4) 尽量降低燃油箱内的燃油倒流到上游设备和管路的概率和倒流的数量,以防止管路内的燃油被点燃造成火焰串入燃油箱内;

5) 降低飞机下降阶段进入到燃油箱内的空气量,并防止期间燃油箱氧浓度的过度反弹。

针对上述要求 4),工程上一般使用单向阀来防止燃油箱内的燃油倒流,并将排气口设置在管路最高点之后来降低燃油倒流的概率和燃油倒流的数量,同时在 NEA 分配气体进入燃油箱前使用火焰抑制器来防止故障情况下产生的火焰进入燃油箱内点燃燃油箱,工程上有着较为成熟的设计

* 通信作者. E-mail: 13816271950@163.com

引用格式: 薛勇,马克霖.民用飞机惰化系统富氮气体分配方案分析与研究[J].民用飞机设计与研究,2023(2):13-17. XUE Y, MA K L. Analysis and study of nitrogen-enriched air distribution scheme in inerting system of civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2023(2):13-17(in Chinese).

防护措施。

针对上述要求 5), 一般采用增加下降阶段的 NEA 流量和提前掺混 NEA 和外界大气的方法来降低燃油箱内氧浓度在下降阶段的反弹, 以最终达到在飞机落地后每个目标燃油箱的氧浓度都应低于 11% 的性能指标^[3]。

本文着重对要求 1) 至 3) 进行分析研究, 即对 NEA 在燃油箱内的快速、均匀分配进行进一步的研究分析。

1 窄体飞机的 NEA 均匀分配设计

根据 CCAR 25.981(b), 传统的金属外翼一般可以等效为传统铝制非加热燃油箱, 不需要惰化燃油箱, 依靠大气的冷却就能满足 CCAR 25.981(b) 规定的可燃性要求, 因此窄体飞机只需要对中央翼燃油箱进行惰化。

波音 737 飞机在燃油箱内只有一个 NEA 排气口, 如图 1 所示。波音 737 飞机将 NEA 的排气口设置在中央翼燃油箱的左侧, 并使用引射器来引射右侧中央翼燃油箱的气流, 以在中央翼左右两侧形成排气环来流加速 NEA 的流动分配, 从而达到快速均匀分配的效果。

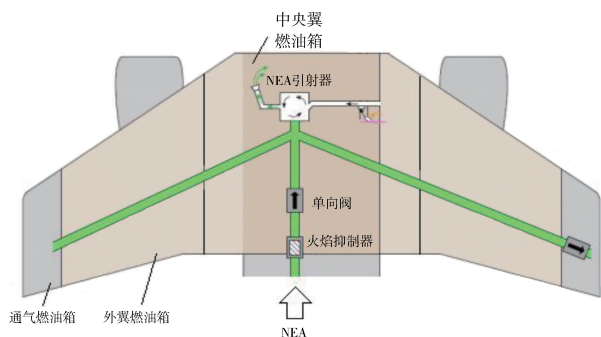


图 1 波音 737 惰化 NEA 分配系统示意图

A320 飞机同样只在中央翼燃油箱内设置了一个 NEA 排气口来分配 NEA, 如图 2 所示。A320 的中央翼燃油箱左右两个隔舱完全联通, 不存在实质的分隔面, 通过在燃油箱顶部设置一处 NEA 排气口来完成整个中央翼燃油箱的惰化。

由于窄体机的燃油箱较小, 且中央翼燃油箱较为规则, 没有明显的分隔面, 其中的燃油一般都处于相同液位高度, 没有严重的载油率区别, 因此采用单一的流量控制, 即可满足 NEA 快速、均匀分配的要求。

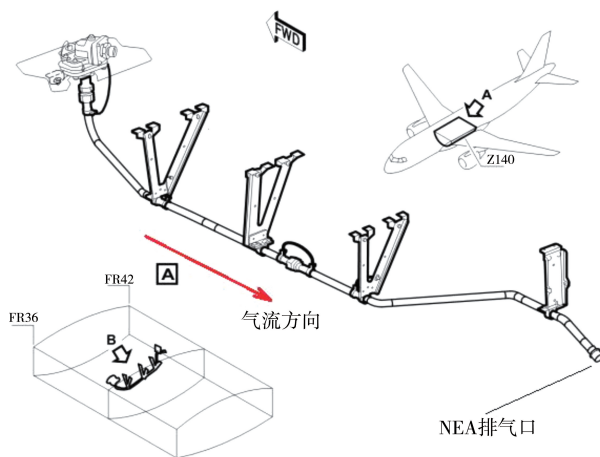


图 2 A320 惰化 NEA 分配系统示意图

2 基于双通道客机的 NEA 均匀分配设计

先进的双通道客机都采用复合材料燃油箱以节省结构重量, 由于复合材料的导热率显著低于铝合金, 导致外翼燃油箱散热不足, 因此必须对外翼和中央翼同时惰化才能够满足 CCAR 25.981(b) 规定的可燃性要求。以双通道客机波音 787 为例, 其燃油箱总体积大约是窄体机波音 737 燃油箱总体积的 6 倍左右, 再加上波音 737 不需要额外惰化外翼燃油箱, 因此就导致双通道客机需要惰化的燃油箱空间达到窄体机的 10 倍左右。由于燃油箱体积和复杂度的增加, 导致实现双通道客机 NEA 在不同燃油箱隔舱和单一燃油箱隔舱内部快速、均匀分配的设计难度急剧增加^[4]。

2.1 波音 787 惰化系统 NEA 分配系统

波音 787 燃油箱内的 NEA 分配系统主要由如下部件组成: 火焰抑制器单向阀、单向阀、隔离阀、笛形管、限流孔、引射管路等。波音 787 飞机 NEA 分配系统示意图见图 3^[2]。针对左右外翼燃油箱, 波音 787 飞机使用限流孔和笛形管进行各油箱隔舱的流量均匀分配。而针对中央翼燃油箱, 通过一侧的排气来驱动 NEA 向另一侧的通气排气管路流动, 来促进低氧浓度 NEA 向高氧浓度空间的定向流动。同时可以发现中央翼的 NEA 排气管路被安装在通气系统的管路内, 可以对中央翼右侧的气流进行引射, 以达到整个中央翼空间快速、均匀分配的目的。

波音 787 惰化 NEA 分配系统相关保护专利为 US 20200307821A1^[5], 由波音 787 惰化系统的供应

商 EATON 公司于 2020 年 3 月公开提出申请,目前还未授权。

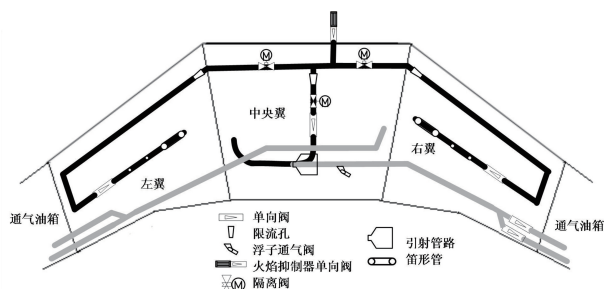


图3 波音787惰化NEA分配系统示意图

2.2 A350惰化系统NEA分配系统

A350惰化系统NEA分配系统包含内部单向阀、单向阀、引射器、相关管路等,其原理图如图4^[2]所示,使用排气管路/喷嘴和引射器结合的方法来实现NEA在燃油箱内的均匀分配。对于中央翼燃油箱中隔舱而言,其核心技术是在中央翼中隔舱使用了中心对称的排气管路射流,能够形成顺时针方向的旋转流场,让NEA充分搅动,快速、均匀分配。对于中央翼左侧和右侧隔舱,每侧只布置了一个排气喷嘴,而在左右一号肋上安装有排气引射泵来增强最偏远角落的气体流动来实现均匀分配。对于外翼燃油箱,通过使用5个分开布置的排气喷嘴来实现外翼狭长区域NEA的快速、均匀分配。

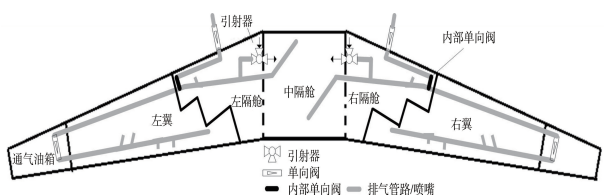


图4 A350惰化NEA分配系统原理图

A350惰化系统NEA分配方案相关专利号为US 8777165B2^[6],由空客公司于申请2012年1月,于2014年7月授权。

3 双通道客机惰化系统NEA分配新方案

波音787和A350飞机的惰化系统NEA分配方案虽然能够促进NEA在燃油箱内的快速和均匀分配,但是并不能根据各燃油箱气相空间的实时变化而及时、主动地调节气流量的大小。

本文提出了一种利用燃油液面进行自动流量

调节的NEA分配方案,如图5所示。该方案通过在油箱内布置垂直向下的排气管路,通过管路分支上不断增加排气孔来达到排气量随着燃油箱气相空间实时正向变化的目的,实现每个隔舱NEA流量的按需分配,同时可以对燃油箱不规则的空间进行排气量和排气位置的调节。

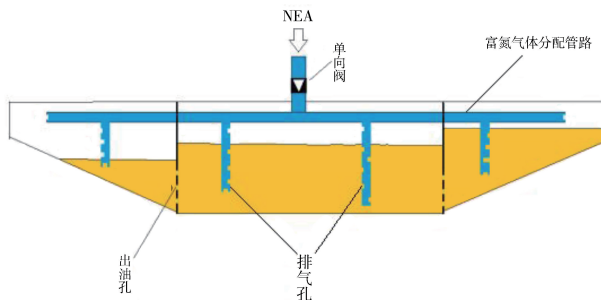


图5 利用燃油液面调节流量的NEA分配新方案

本技术方案的主要特点在于:1)随着燃油液面的降低,垂直分支管路有着更多的排气孔暴露在气相空间中,自动增加了该隔舱的NEA排气流量。NEA排气流量可根据油箱体积大小和液面高度而变化,以保证NEA分配流量比例同各隔舱的气相空间体积比例的正相关性。2)NEA排气支管上的排气孔可以根据周围空间的布置巧妙地进行周向分配,以确保NEA的流量和流向满足变化的空间分配要求。相比于波音787和A350的NEA分配方案,本方案不仅能够实现NEA分配流量比例同各隔舱的气相空间体积比例的正相关性,而且能够在垂直方向上调节气量分配,以达到更好的垂直方向的均匀分配效果。

本方案的技术效果包括:1)可实时根据燃油液面的变化进行动态调节,响应时间短、无需软件控制、无需任何作动机构,可靠性高、无需消耗能源;2)针对飞机持续盘旋可能会导致左翼机翼燃油量的显著不对称分布的情况,能够更好地调节惰化气体的流量分配,适用于下降阶段单侧盘旋的严酷工况;3)应急放油情况下将导致某隔舱气相空间快速增大^[10],可自动对该隔舱加大NEA流量,特别适用于该危险场景的燃油箱保护。

4 结论

本文提出了飞机惰化NEA分配系统的主要设计要求,并以A320和波音737飞机为代表,分析了窄体机的NEA分配系统,发现由于窄体机被惰化的

燃油箱空间较小,且仅需惰化的中央翼燃油箱较为规则,实现 NEA 分配系统的快速和均匀分配较为简单,通常仅设置一个排气口即可满足要求。

进一步分析了波音 787 和 A350 飞机的惰化 NEA 分配方案,发现其采用限流孔、气体喷嘴、排气笛形管、引射器等相结合的方案来实现 NEA 在燃油箱内的快速均匀分配,然而这两种方案并不能根据各燃油箱气相空间的实时变化而及时、主动地调节气流量的大小。

本文提出利用燃油液面进行自动流量调节的 NEA 分配方案,能够实时根据燃油液面的变化进行动态调节,响应时间短,无需软件控制,无需阀门作动,可靠性高,无需消耗能源,且能够在垂直方向上调节气量分配,能更好地达到在垂直液面的方向均匀分配 NEA 的效果。本方案对比 A350 和波音 787 飞机的 NEA 分配方案的主要特点在于能够主动根据燃油箱内液面变化,及时调节 NEA 流量,以更好地达到快速、均匀分配的效果,在双通道客机有潜在的应用前景,值得进一步进行深入的理论和试验研究。

参考文献:

- [1] 刘卫华,冯诗愚. 飞机燃油箱惰化技术[M]. 北京:科学出版社,2018:8-13.
- [2] 刘卫华,刘春阳,薛勇. 运输类飞机燃油箱可燃性与

适航符合性方法[M]. 北京:科学出版社,2018:41-55.

- [3] 刘卫华,王胜,薛勇. 飞机燃油箱防爆系统设计与适航[M]. 北京:科学出版社,2022:12-18.
- [4] 冯晨曦. 民机油箱气相空间氧浓度控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011:36-40.
- [5] Eaton Intelligent Power Limited. Aircraft fuel tank inerting system:US20200307821A1[P]. 2020-10-02.
- [6] ROSCOE P, LEHUUNHO E. Aircraft fuel system:US8777165B2[P]. 2012-08-02.
- [7] 寿荣中,何慧珊. 飞行器环境控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004:232.
- [8] SUMMER S M. Fuel tank flammability assessment method user's manual:DOT/FAA/AR-05/8[R]. Washington D. C. : Air Traffic Organization Operation Planning Office of Aviation Research and Development, 2008.
- [9] 黄雪飞,刘文怡,冯诗愚,等. 单流和双流模式对燃油箱冲洗惰化过程影响[J]. 南京航空航天大学学报,2018,50(4):435-441.
- [10] LANGTON R. 飞机燃油系统[M]. 颜万亿,译. 上海:上海交通大学出版社,2010:36-66.

作者简介

薛勇 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机惰化系统、燃油箱点火源防护。E-mail:13816271950@163.com

马克霖 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机惰化系统仿真、飞机能源系统与环境。E-mail:makelin@comac.cc

Analysis and study of nitrogen-enriched air distribution scheme in inerting system of civil aircraft

XUE Yong^{*} MA Kelin

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

Abstract: This paper puts forward the main design requirements for the NEA (nitrogen-enriched air) distribution system of aircraft inerting system and analyzes the NEA distribution system of narrow-body aircraft, taking A320 and Boeing 737 aircraft as examples. The NEA distribution scheme of the inerting system of Boeing 787 and A350 aircraft was further analyzed. It was found that the NEA distribution scheme adopts a combination of flow limiting hole, gas nozzle, exhaust flute pipe, and ejectors to achieve the rapid and uniform NEA distribution in the fuel tank. However, these two schemes cannot adjust the air flow in time and actively according to the real-time changes of the gas phase space of each fuel tank, and the optimal design of NEA distribution cannot be realized. This paper proposes a NEA distribution scheme using fuel fluid level for automatic flow adjustment, which achieves the purpose of real-time positive change of exhaust volume with the gas phase space of the fuel tank by arranging a vertical downward exhaust pipeline in the fuel tank and increasing the exhaust holes through the pipeline branches, so as to achieve the effect of adjusting the exhaust volume and exhaust position according to the size of the gas phase space of each compartment. Compared with the NEA distribution scheme of A350 and Boeing 787 aircraft, this scheme could adjust the NEA flow automatically by the fuel level, which is worthy of further in-depth theoretical and experimental research.

Keywords: inerting; distribution; flammability; oxygen concentration

^{*} Corresponding author. E-mail: 13816271950@163.com