

民用飞机燃油箱富氮气体分配方案 选型设计方法初探

Preliminary Exploration on Type Selection Design of Fuel Tank Nitrogen-Enriched Gas Distribution Scheme for Civil Aircraft

郭军亮¹ 周 伟¹ 刘卫华² / Guo Junliang¹ Zhou Wei¹ Liu Weihua²

(1. 上海飞机设计研究院, 上海 201210; 2. 南京航空航天大学, 南京 210016)

(1. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘 要:

适航条款对民用飞机燃油箱内氧气浓度有明确规定, 从而对燃油箱富氮气体分配方案的设计提出较高要求。基于燃油箱冲洗惰化理论, 以某型飞机燃油箱为例, 对燃油箱富氮气体分配方案选型设计方法进行研究。根据燃油箱容积和惰化时间, 通过利用单舱燃油箱数学模型计算获得富氮气体需求量; 然后利用多隔舱燃油箱数学模型, 以简化管路布置为寻优目标获得富氮气体分配方案。使用数学模拟的方法可快速评估富氮气体分配方案性能, 特别适用于大量设计参数尚未确定的方案选型设计阶段。

关键词: 燃油箱惰化; 燃油冲洗; 惰化气体分配; 选型设计; 数学模拟

[Abstract] The oxygen concentration in the fuel tank of civil aircraft was prescribed in the airworthiness regulation. More attention shall be paid to the fuel tank Nitrogen-Enriched Gas (NEA) distribution scheme design to meet the airworthiness requirement. Based on fuel tank washing inert theory, the type selection design method for fuel tank NEA distribution scheme was introduced in this paper. The type selection design method was presented on a certain type aircraft fuel tank in this paper. The NEA flow could be calculated by using single-compartment fuel tank numerical model with fuel tank volume and inerting time. In order to simplify the tube placement, NEA distribution scheme could be designed by using multi-compartment fuel tank numerical model. Numerical simulation method could estimate the performance of NEA distribution scheme quickly, which is very useful for the type selection design phase while many inputs haven't been determined.

[Key words] Fuel Tank Inerting; Fuel Washing; Inert Gas Distribution; Type Selection Design; Numerical Simulation

0 引言

一直以来, 飞机燃油箱爆炸是航空安全的主要威胁之一^[1]。燃油箱惰化系统通过向飞机燃油箱充入惰化气体(又称富氮气体), 使燃油箱液面上方的氧气浓度维持在支持燃油燃烧所需的氧气浓度以下, 以防止由于点火源而引发燃油箱爆炸^[2-3]。

经过多年研究, 美国联邦航空局(FAA)于2008年7月21日正式发布 FAR25 部第 25-125 号修正

案《降低运输类飞机燃油箱可燃性》(Reduction of Fuel Tank Flammability in Transport Category Airplanes), 推荐采用燃油箱惰化系统加强对燃油箱可燃环境的控制。FAR25 部第 25-125 号修正案对飞机燃油箱惰性标准作出了明确的要求: 燃油箱每个隔舱内的总体平均氧气浓度在海平面从 0 到 10 000ft 高度之间不超过 12%, 10 000ft 到 40 000ft 高度之间的浓度值从 12% 线性增加至 14.5%, 高于 40 000ft 线性外推, 则该油箱被认为是惰性的。为

使每个隔舱内平均氧气浓度满足适航条款要求,对燃油箱富氮气体分配方案的设计提出了较高的要求。

虽然直接采用 CFD 计算仿真可对燃油箱隔舱惰化过程进行仿真模拟,并可获取各隔舱位置的浓度场和速度场等详细信息。但是对于构型复杂的多隔舱燃油箱,CFD 仿真的前处理和计算时间较长。在方案选型设计阶段,设计者所关心的重点是燃油箱各隔舱平均氧浓度的变化,并希望能根据平均氧浓度变化规律,来评估惰化系统管路设计。而且在系统方案选型设计阶段,往往有大量相关参数尚未确定并在不断更改之中,显然采用 CFD 方法很难迅速满足富氮气体分配方案选型设计的要求。本文提出基于燃油箱气相空间冲洗惰化数学模型的方法^[4],对燃油箱惰化气体分配方案进行初始选型设计,并以某型飞机燃油箱为例,其容积约为 6.615m^3 ,对富氮气体分配方案选型设计方法进行探讨。燃油箱构型如图 1 所示。

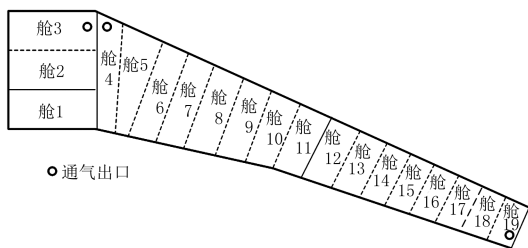


图 1 某型飞机燃油箱构型示意图

1 富氮气体需求量估算

进行富氮气体分配方案设计,首先要确定富氮气体的需求量。文献[4]采用微分计算方法,建立了燃油箱气相空间冲洗惰化的数学模型。虽然该模型属于单舱燃油箱模型,但可通过忽略多隔舱燃油箱内部结构,将多舱燃油箱作为单舱燃油箱来计算富氮气体需求量,并作为初始输入值。采用文献[4]所建数学模型,假设从 21% 氧气浓度惰化至适航要求的 12%,其惰化时间为 7min,并基于燃油箱空载这一极限条件进行计算,获得图 1 中燃油箱惰化所需富氮气体流量约为 60.5kg/h 。

2 燃油箱隔区划分

所谓燃油箱隔区指的是,由若干个相邻燃油箱隔舱组成,相邻隔区之间通气孔面积相比于隔区内各油箱隔舱之间通气孔面积小很多。对于民用飞机燃油箱而言,密封肋、半密封肋等通气孔面积往往很小,不

利于富氮气体在油箱隔舱间的扩散。图 1 中燃油箱各隔舱间通气孔的当量直径如表 1 所示。

表 1 燃油箱各隔舱间通气孔的当量直径

	通气孔当量直径(mm)
舱 1-舱 2	36
舱 1-舱 4	30
舱 2-舱 3	36
舱 2-舱 4	25
舱 3-舱 4	30
舱 4-舱 5	191
舱 5-舱 6	185
舱 6-舱 7	178
舱 7-舱 8	178
舱 8-舱 9	164
舱 9-舱 10	156
舱 10-舱 11	156
舱 11-舱 12	12
舱 12-舱 13	140
舱 13-舱 14	140
舱 14-舱 15	131
舱 15-舱 16	131
舱 16-舱 17	131
舱 17-舱 18	131
舱 18-舱 19	110

根据表 1 所示各隔舱间通气孔面积情况,可将燃油箱划分为 5 个燃油箱隔区。

- 1) 隔区 1:隔舱 1;
- 2) 隔区 2:隔舱 2;
- 3) 隔区 3:隔舱 3;
- 4) 隔区 4:隔舱 4 至隔舱 11;
- 5) 隔区 5:隔舱 12 至隔舱 19。

3 富氮气体出口初步布置

在每个燃油箱隔舱均布置 1 个富氮气体出口,对富氮气体在燃油箱内的扩散是最为有利的。但是,这样也会使得富氮气体分配管路设计十分复杂,管路重量较高,对于诸如图 1 中隔舱数量多的燃油箱影响更为明显。由于燃油箱隔区内的富氮气体扩散较为容易,在初始布置时,可根据隔区的划分情况初步确定富氮气体出口。如果忽略燃油箱

隔区内的阻碍结构,可将每个隔区视为一个单舱燃油箱。原则上,在每个燃油箱隔区布置一个富氮气体出口,并根据隔区的容积大小,通过在富氮气体出口处加装限流孔的方法分配不同的富氮气体流量,即可满足设计要求。对于图1中的燃油箱,为避开布置有通气出口的隔舱以及便于富氮气体快速扩散到各个隔舱,将隔区4的富氮气体出口布置在中间隔舱8处。又由于隔区5内各隔舱容积较小而隔舱间通气面积较大,可将富氮气体出口布置在隔舱12处,以减少管路长度。表2为各燃油箱隔区的容积及富氮气体分配流量。

文献[5]在文献[4]研究的基础上,建立了多隔舱燃油箱地面惰化数学模型。该模型采用压差自

动调整和分配的方式来判断流经各隔舱的气流方向和流量。本文采用上述数学模型对表2中的富氮气体出口布置方式进行计算,得到燃油箱各隔舱内的平均氧气浓度随时间变化的关系如图2所示。

表2 富氮气体流量分配

隔区	容积(m^3)	富氮气体流量(kg/h)
隔区1	0.76	7
隔区2	0.819	7.6
隔区3	0.71	6.6
隔区4	3.338	30.2
隔区5	0.988	9.1

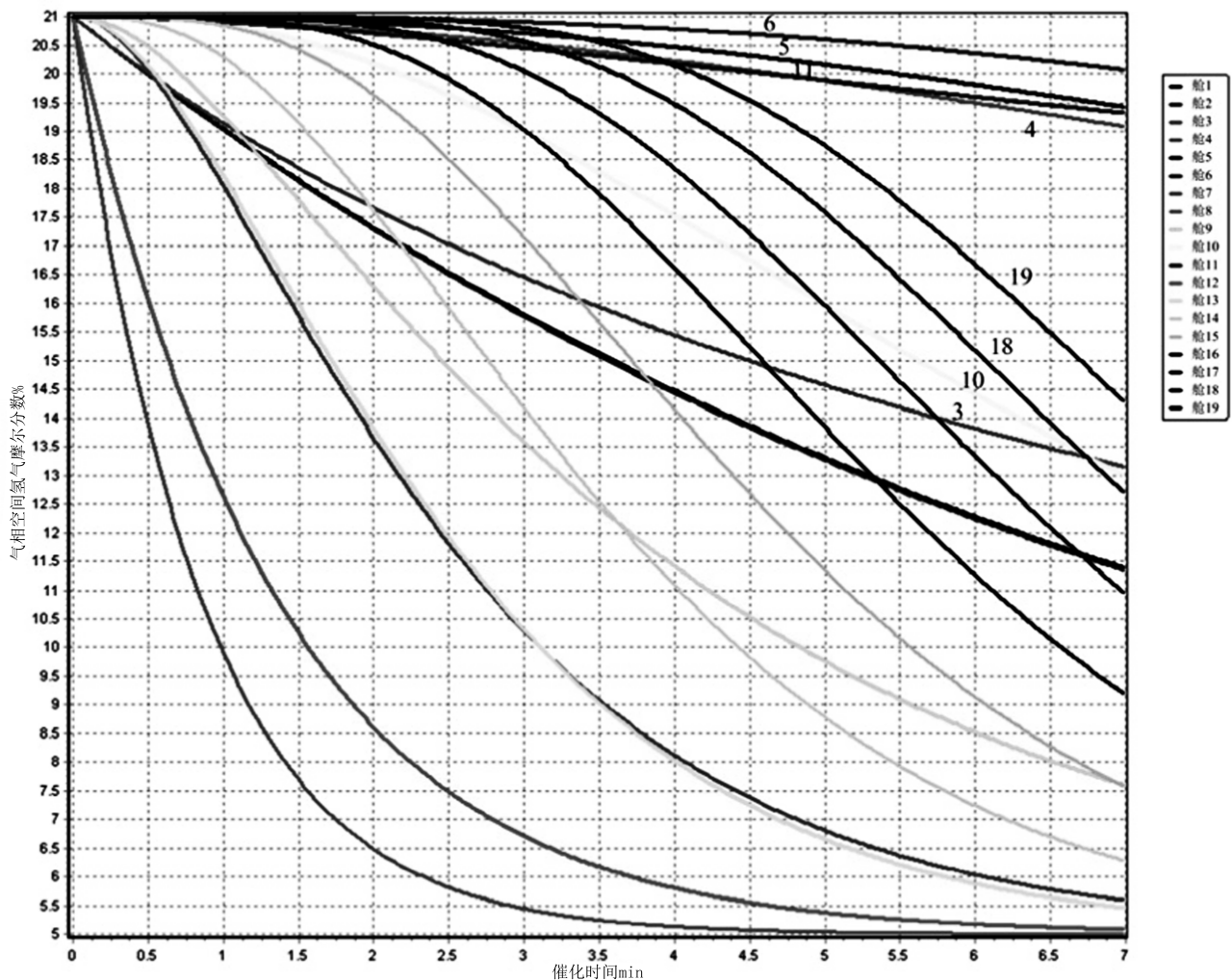


图2 富氮气体初步布置方式各隔舱内平均氧气浓度随时间的变化关系图

从图2中可以发现,隔区3中经过惰化的氧气浓度高于12%,这是由于隔舱3内的通气孔使得富氮气体排至舱外造成的。隔区4内有5个隔舱经过惰化的氧气浓度高于12%,由于这5个隔舱离布置

有富氮气体出口的隔舱(舱8)位置较远,隔舱间的肋板阻碍了富氮气体的扩散。隔区5内有2个隔舱经过惰化的氧气浓度高于12%,这是因为这2个隔舱同样离布置有富氮气体出口的隔舱(舱12)位置

较远,且隔舱 19 内布置有通气出口。

4 富氮气体出口布置优化

对第 3 节中富氮气体出口初步布置计算结果进行优化,首先,富氮气体出口布置在舱 12 可以减轻管路重量。理论上稍微提高隔舱 12 的富氮气体流量,即可使得隔区 5 内各隔舱的氧气浓度满足要求。其次,由于隔区 4 内各隔舱容积较大,舱间肋板对富氮气体的扩散十分不利。因此,只需在隔区 4 内增加富氮气体出口,以加快富氮气体在隔舱间的扩散。因为管路要一直延伸到隔区 5,必然经过隔区 4,而增加富氮气体出口不会增加较多管路重量。最后,由于提高了隔区 4 内富氮气体扩散性,由隔区 4 进入隔区 3 的富氮气体流量会增加。因此,隔区 3 的富氮气体流量可基本保持不变。基于上述分析

进行出口布置寻优,本文获得的富氮气体出口优化布置方式如表 3 所示。

采用文献[5]中数学模型对表 3 富氮气体出口布置方式进行计算,获得燃油箱各隔舱内的平均氧气浓度随时间变化的关系如图 3 所示。

表 3 富氮气体出口优化布置方式

隔区	容积(m ³)	富氮气体流量(kg/h)	富氮气体出口
隔区 1	0.76	7	舱 1
隔区 2	0.819	7.6	舱 2
隔区 3	0.71	6.6	舱 3
隔区 4	3.338	27.9	舱 5(14kg/h) 舱 8(8.5kg/h) 舱 11(5.4kg/h)
隔区 5	0.988	11.4	舱 12

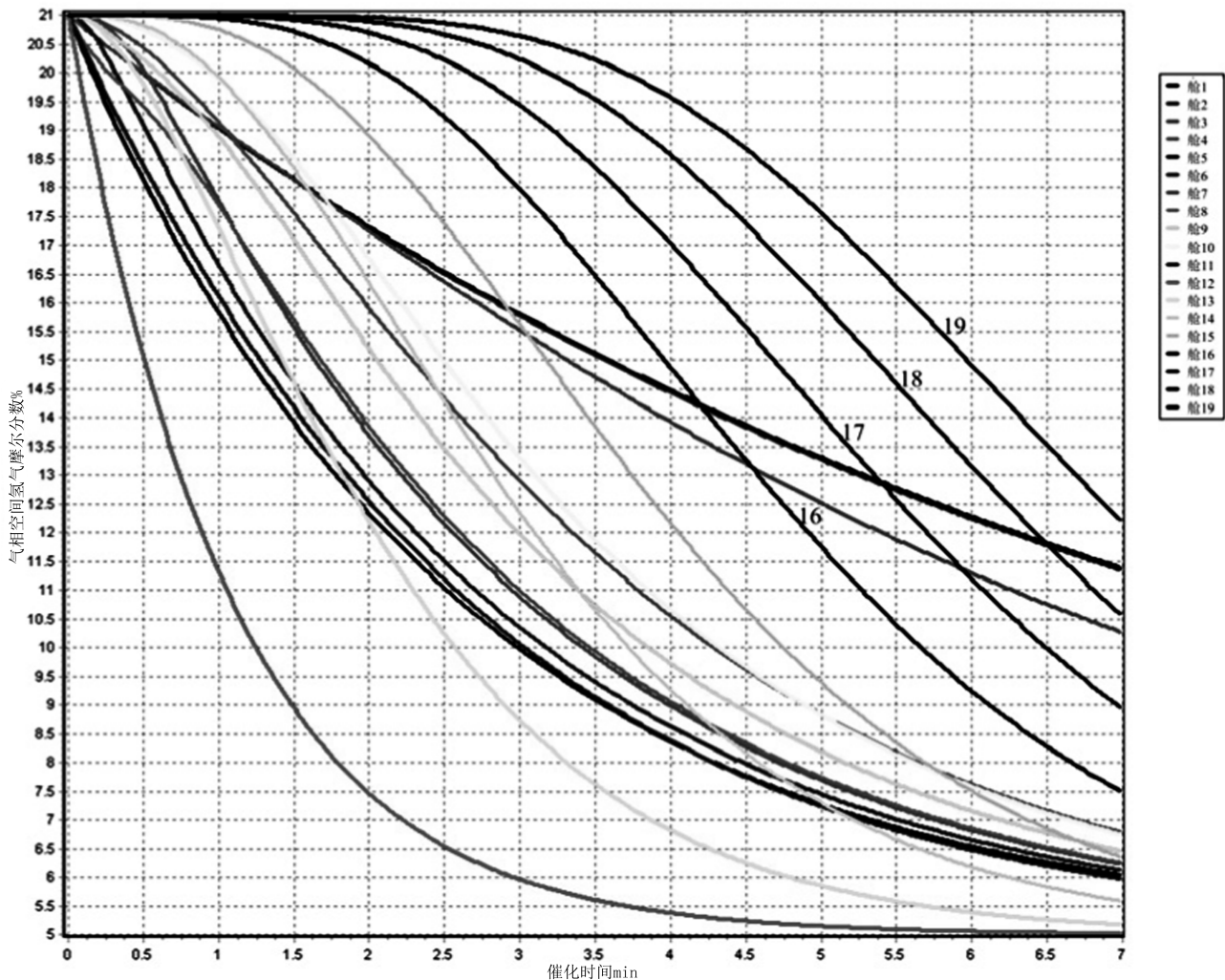


图 3 富氮气体优化布置方式各隔舱内平均氧气浓度随时间的变化关系图

从图 3 中可以发现,表 3 中的富氮气体出口布置方案实现了在 7min 内,使每个隔舱的氧气浓度从

21%降低到 12%的设计要求。值得注意的是,只需
(下转第 70 页)

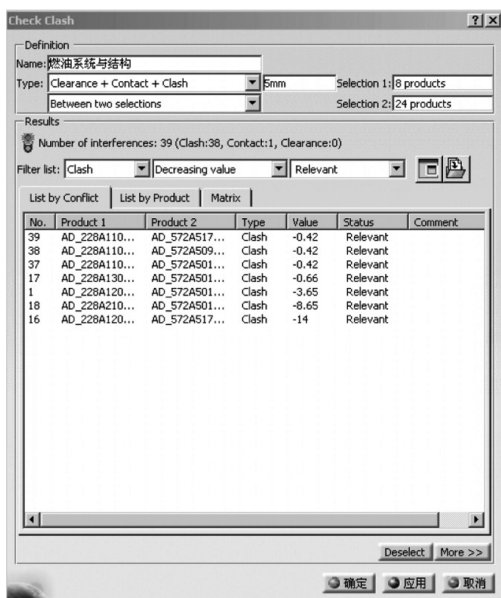


图 11 简化显示结果

要仔细将 CATIA 模型调整几个角度,检查除计算结果显示的干涉外是否存在其他干涉。

2.6 2D 批注

在进行干涉检查时,为了方便地找出干涉位置,

可以在完成干涉检查后利用 2D 批注记录干涉位置,双击结构树上的 application 中的某个干涉就可以显示干涉位置,对于大量的干涉检查,记录干涉位置是十分必要的,这样可以提高工作效率,尤其是在进行视频协调会议时,可以很方便地让大家看到干涉位置,而不用花时间在现场调整数模角度。该功能唯一的缺点是如果将模型转一个角度就无法显示干涉位置。

3 结论

通过 SPA 在数字样机中的应用与研究发现,利用 SPA 的分析功能,可以有效减少工程更改单的数量,大大提高设计质量,从而减少废品和返工现象。但是应用研究也发现,设计员不能完全依赖 SPA 的分析结果,它也有一定的缺陷,需要设计员对分析结果具备一定的判断分析能力。

参考文献:

- [1] 高秀华,王智明,王继新. 工程分析及电子样机模拟[M]. 北京:化学工业出版社,2004.

(上接第 51 页)

在隔舱 12 布置一个富氮气体出口,即可满足 9 号肋至 17 号肋之间隔舱的惰化需求。这样一来,仅需要将惰化管路布置到隔舱 12,即可减轻惰化管路重量。如果增加富氮气体出口,会更加利于富氮气体的扩散,进一步减小对富氮气体的需求量,从而降低对发动机引气量的需求。但是,富氮气体出口的增加也会带来管路重量的增加和系统构型的复杂化。所以,在富氮气体出口布置方案详细设计中,应从降低富氮气体需求量和减少富氮气体出口两方面综合考虑。

5 结论

本文采用数学模型方法,以某型飞机燃油箱为例,对燃油箱惰化系统富氮气体分配方案选型设计方法进行研究。燃油箱惰化系统富氮气体分配方案的选型设计流程如图 4 所示。

利用数学模型方法进行燃油箱惰化系统富氮气体分配方案选型设计,可以大大节省设计时间,提高设计效率,是一种快捷而有效的选型设计方法。

参考文献:

- [1] William M. C. Developing a fuel - tank inerting system[J]. Aircraft Survivability, Published by the Joint Aircraft Sur-

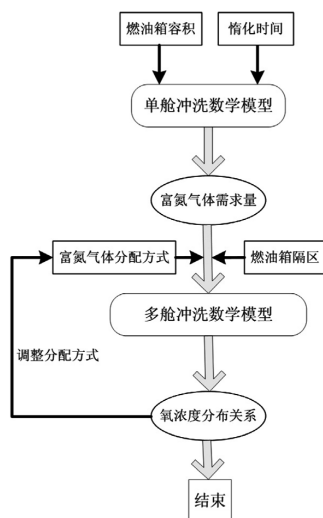


图 4 富氮气体分配方案选型设计流程

vivability Program Office,2005:20-23.

- [2] 王小平,肖再华. 飞机燃油箱氮惰化的机理分析及应用[J]. 航空科学技术,2008,8:24-26.

- [3] Bradford L. Moravec, etc. Commercial aircraft on-board inerting system; US, US 7152635 B2[P]. 2006.

- [4] 高秀峰,刘卫华,熊斌等. 飞机燃油箱冲洗惰化过程的理论研究[J]. 西安交通大学学报,2010,9:16-20.

- [5] 周宇穗,刘卫华,冯诗愚. 多隔舱燃油箱地面惰化过程理论研究[J]. 民用飞机设计与研究,2010 年增刊:16-20.