气体分配方式对民机多隔仓燃油箱惰化的影响

冯诗愚 冯晨曦 汪其祥 刘卫华

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016)

摘 要: 在假设燃油箱整体和各隔仓无质量堆积的前提下,建立了一种可根据压力差自动确定流动方向和流量的数学模型,并给出了迭代法计算的步骤,然后采用微元法获得了惰化过程中各隔仓体积氧浓度随换气次数的关系. 以波音 747 中央翼油箱为对象,与国外文献中公布的实验数据进行了对比,验证了所建模型有较高的计算精度. 以国产某型客机中央翼燃油箱为研究对象,给出了 4 种不同的富氮气体进气孔设置及 2 种气体分配方式,比较了它们对惰化过程的影响,结果显示,将富氮气体按体积平均方式通入所有的隔仓具有最好的惰化效果,而将进气孔口设置在外侧隔仓并单独进气的惰化效果最差,而且在中部对称位置的隔仓上设置进气孔优于非对称位置设置进气孔.

关 键 词: 燃油惰化; 冲洗; 中央翼燃油箱; 多隔仓; 迭代

中图分类号: V 228; TQ 021.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)05-0595-06

Influent of inerting process of multi-bays central fuel tank for civil passenger airplane under various gas distributions

Feng Shiyu Feng Chenxi Wang Qixiang Liu Weihua

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the assumption of zero mass accumulation in the fuel tank and all bays, a mathematical model to automatically determine the flow direction and rate via the pressure difference was set up, and iterative steps were offered. Then, the mole concentration of the oxygen in the each bay related to volumetric tank exchange of ullage via the differential method was obtained. Adopting Boeing 747 central wing tank as the object of study, the calculating results of the models show highly accurate with the experimental data published on the foreign literature. The central fuel tank of an unnamed domestic passenger airplane was employed to study the inerting process influenced by 4 different configurations of the nitrogen-enriched air inlet port and 2 different gas distributions. The result reveals that the inering effect is the best to distribute the nitrogen-enriched air into all bays according to the volume average while it is the worst to solo distribute the nitrogen-enriched air into an outside bay. Moreover, it is better to emplace the inlet ports on the symmetrical bays than the asymmetrical bays.

Key words: fuel inerting; washing; central fuel tank; multi bays; iterative method

1996 年 7 月 17 日,环球航空公司的一架波音 747-100 客机于纽约长岛上空爆炸,机上 230 人全数丧命[1],事故最终调查结果表明是环控系统产生的热量导致客舱下部中央翼燃油箱温度升高,在外界点火源作用下造成着火爆炸,该事件引起人们对于中央翼燃油箱防火防爆及安全性问题的强烈关注,进而美国和欧洲开展了大量的研究工作,并最终认为利用机载制氮系统来惰化飞机

收稿日期: 2011-02-22; **网络出版时间**: 2012-05-22 16:10

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120522.1610.017.html

基金项目: 航空科学基金资助项目(50306017); 南京航空航天大学引进人才科研基金资助项目(S1030-014)

作者简介: 冯诗愚(1974 -),男,浙江绍兴人,副教授,shiyuf@nuaa.edu.cn.

油箱是一项可行有效的解决方法,并将其纳入适航条例之中[2~4].

民用客机燃油箱冲洗惰性化采用机载中空纤维膜分离空气获取富氮气体(NEA),并将富氮气体通入油箱上部气相空间置换其中的氧气和燃油蒸汽,使气相空间氧浓度达到所要求的极限氧浓度值以下[5]. 因此,在设计阶段必须采用合适的计算方法来分析富氮气体进入燃油箱后,气相空间氧浓度随时间的变化关系.

文献[6]中采用微分计算方法建立了燃油箱冲洗过程数学模型,但是所建模型仅适用于单舱油箱,而实际的民机中央翼油箱大多比较复杂,除空客 A320 外,诸如波音 737、波音 747 以及我国的 C919 等飞机的中央翼燃油箱均由多个隔仓组成,由于各隔仓之间惰化过程有所区别,因此该模型无法适应多隔仓燃油箱惰化过程的设计.

CFD(Computational Fluid Dynamics)方法可对多隔仓燃油箱惰化过程进行较为精确的仿真,但其计算时间较长,费用较高[7],且在工程设计的初始方案阶段,设计者仅关心燃油箱各隔仓平均氧浓度的变化,并需要进行多次计算,根据平均氧浓度高低,对惰化系统管路等进行调整优化,显然 CFD 方法很难达到此目的.

文献[8]建立了波音 747 多隔仓燃油箱工程计算模型,假设每个隔仓中各部分氧浓度相同,但各个隔仓间氧浓度有差别,当各隔仓之间流动方向确定后,可根据氧气质量平衡,得到各隔仓氧浓度与惰化时间的关系,计算结果与实验数据进行对比后显示,其精度可满足工程设计需要.

但文献[8]所述模型在实际应用时存在的最大难点是气体流动方向的确认,文献[8]中根据油箱的结构和惰化气体进出口位置人为指定流动方向,而相邻隔仓之间流动的气体流量首先根据面积比确定,然后与实验结果对比后再次人为调整以吻合实验结果. 显然,当燃油箱结构复杂,或富氮气体有多个进出口时,上述方法的适应性就大大降低,首先,对于复杂的油箱,人为判断流向会变得极为复杂,这对设计者的经验要求很高,其次,人为判断流向也很难编制相应的程序或导致程序通用性下降,最后,文献[8]也未考虑通气孔阻力对气体分配的影响.

从流体力学的基本知识可知,气体流动时是在压差推动下完成的,对于一个稳态的多隔仓燃油箱地面惰化过程,若忽略氧氮的密度差,则各隔仓内流入的气体质量等于流出的质量,而对于整个燃油箱而言,流入的气体总质量也等于通过排气孔流出的质量,即不存在质量堆积,这样各隔仓的压力是唯一确定的,且流向也可根据各相邻隔仓之间的压差确定. 有鉴于此,本文提出了一种根据压力差自动分析气体流动方向方法,在此基础上,给出了各隔仓氧浓度计算方法,并以波音 747 中央翼油箱为例,对所建立的模型进行了验证和分析. 然后,以国产某型民用客机中央翼燃油箱为研究对象,分析了不同的富氮气体分配方式对气相空间氧浓度的影响.

1 冲洗惰化过程数学模型

1.1 根据压力差确定气体流动方向数学模型

为了简化研究的复杂性,模型中做以下基本假设:

1)不考虑惰化过程中燃油中氧气逸出;

2)忽略氧氮的分子量差异,认为燃油箱中气体的密度仅与压力和温度有关;

3)燃油箱整体及各隔仓中均无质量堆积,即气体净流入量与净流出量完全相同;

4)富氮气体和燃油箱各处气体温度相同;

5)每个隔仓中上部的热力参数和浓度参数各处相同,但各隔仓间有所差别.

根据以上假设,首先假定各隔仓中的压力,然后根据隔仓间的压差、隔仓相互之间的拓扑关系、富氮气体流入量以及排气孔位置等信息,计算出本隔仓中堆积的气体质量和新的压力,然后循环迭代,直至本隔仓和整个燃油箱中净流入量和流出量相同,从而得到各隔仓中的压力分布关系,然后根据相互之间的压差得到气体的流动方向和流量等信息. 在整个过程中,流动方向非人为指定,且隔仓之间的压差由模型自动迭代而得.

假设第 i 个隔仓如图 1 所示,与其相邻共计有 n 个隔仓,流入该隔仓的富氮气体流量为 $\dot{m}_{\mathrm{NEA},i}$,与相邻第 j 个隔仓之间通气孔的面积为 A_j,其与外界环境连通的排气孔总面积为 $A_{\mathrm{b},i}$,该隔仓的压力为 p_i,若规定流入隔仓流量为正,流出为负,则显然该隔仓与第 j 个隔仓间的气体流量主要与孔口面积及相互之间的压差决定,考虑到燃油箱各部分温度相同,故可表示为

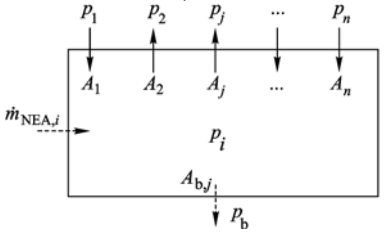


图 1 第 i 个隔仓与相邻隔仓流动关系示意图

$$\left.\begin{aligned}\dot{m}_{i,j} &= \alpha A_j\left[\frac{2p_j}{RT}(p_j - p_i)\right]^{\frac{1}{2}} \quad p_i \leqslant p_j\\ \dot{m}_{i,j} &= -\alpha A_j\left[\frac{2p_i}{RT}(p_i - p_j)\right]^{\frac{1}{2}} \quad p_i > p_j\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中,α 为孔口的流量系数.

类似地,通过排气孔流向外界环境的气体流量为

$$\left.\begin{aligned}\dot{m}_{\mathrm{b},i} &= \alpha A_{\mathrm{b},i}\left[\frac{2p_{\mathrm{b}}}{RT_{\mathrm{b}}}(p_{\mathrm{b}} - p_i)\right]^{\frac{1}{2}} \quad p_i \leqslant p_{\mathrm{b}}\\ \dot{m}_{\mathrm{b},i} &= -\alpha A_{\mathrm{b},i}\left[\frac{2p_i}{RT}(p_i - p_{\mathrm{b}})\right]^{\frac{1}{2}} \quad p_i > p_{\mathrm{b}}\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中,T_{b}为外界环境空气的温度;p_{b}为外界环境压力.

显然第 i 个隔仓中单位时间内质量增加量为

$$\Delta\dot{m}_i = \sum_{j=1}^{n}\dot{m}_{i,j} + \dot{m}_{\mathrm{b},i} + \dot{m}_{\mathrm{NEA},i} \tag{3}$$

若整个燃油箱共有 k 个隔仓,则燃油箱单位时间内总质量增率为

$$\Delta\dot{m}_{\mathrm{TANK}} = \sum_{i=1}^{k}\Delta\dot{m}_i \tag{4}$$

当惰化过程中气体流动为稳态时,则有

$$\Delta\dot{m}_i = 0 \qquad i = 1,2,\cdots,k \tag{5}$$

这样,显然也有 $\Delta\dot{m}_{\mathrm{TANK}} = 0$. 将式(5)代入式(3)中,并与描述流量的方程,即式(1)和式(2)联立求解方程组,则可获得每个隔仓中压力 p_i,并根据 $\dot{m}_{i,j}$的正负,判断出任意隔仓中气体流动方向和相应的流量.

但是考虑到所述方程组为隐式非线性方程组,解析方法很难对其求解,因此可采用迭代求解方法,其求解步骤如下:

1) 首先给所有隔仓的压力赋初值,该初值可定为外界环境压力 p_{b},将该时刻隔仓内压力记为 p_i^{old},其中 $i = 1,2,\cdots,k$;

2) 对于第 i 个隔仓,从燃油箱拓扑结构获取相邻隔仓的数量和编号,然后调整第 i 个隔仓内的压力,按式(1)~式(3)计算 $\Delta\dot{m}_i$,直至 $\Delta\dot{m}_i$ 小于给定的计算误差 ε_{c},从而获得第 i 个隔仓新的压力 p_i^{new},在此过程中,其他隔仓中压力仍为初始压力 p_j^{old};

3) 对所有隔仓均进行相同计算,获得所有隔仓新压力 p_j^{new},然后根据式(5)计算 $\Delta\dot{m}_{\mathrm{TANK}}$,若 $\Delta\dot{m}_{\mathrm{TANK}}$大于设定的计算误差 ε_{t},则用新压力将旧压力替代,即 $p_i^{\mathrm{old}} = p_j^{\mathrm{new}}$,其中 $i = 1,2,\cdots,k$;

4) 重复步骤 1)~3),直至整个燃油箱中的质量增量 $\Delta\dot{m}_{\mathrm{TANK}}$小于设定的计算误差 ε_{t},完成迭代过程.

其中步骤 2)可采用稳定的二分法避免发散. 迭代完成后,各隔仓及与外界之间的流量就确定了.

1.2　燃油箱各隔仓气相氧浓度计算数学模型

当隔仓之间及与外界环境的流量关系确定后,则可得到燃油箱氧浓度随时间的变化关系. 以第 i 个隔仓为例,假设在 t 时刻,其气相空间的氧气质量为 $m_{\mathrm{O},i}^t$,氧气质量分数为 $a_{\mathrm{O},i}^t$,相邻隔仓氧气质量分数为 $a_{\mathrm{O},j}^t$,经过 Δt 时刻后,该隔仓内的氧气质量变为

$$m_{\mathrm{O},i}^{t+\Delta t} = m_{\mathrm{O},i}^t + \dot{m}_{\mathrm{O,in}}\Delta t + \dot{m}_{\mathrm{O,out}}\Delta t + \dot{m}_{\mathrm{O},b} + \dot{m}_{\mathrm{NEA},i}a_{\mathrm{NEA}} \tag{6}$$

式中,$\dot{m}_{\mathrm{O,in}}$和 $\dot{m}_{\mathrm{O,out}}$是相邻隔仓流入或流出第 i 隔仓氧气流量,与前述定义相同,即流入隔仓为正,流出为负,故可表示为

$$\left.\begin{aligned}\dot{m}_{\mathrm{O,in}} &= \sum_{j=1}^{n}(\dot{m}_{i,j}a_{\mathrm{O},j}^t) \quad \dot{m}_{i,j} \geqslant 0\\ \dot{m}_{\mathrm{O,out}} &= a_{\mathrm{O},i}^t\sum_{j=1}^{n}\dot{m}_{i,j} \quad \dot{m}_{i,j} < 0\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

$\dot{m}_{\mathrm{O,b}}$是本隔仓与外界环境间的氧气流量,同样需要考虑其方向性,因此可表示为

$$\left.\begin{aligned}\dot{m}_{\mathrm{O,b}} &= \dot{m}_{\mathrm{b},i}a_{\mathrm{O,b}} \quad \dot{m}_{\mathrm{b},i} \geqslant 0\\ \dot{m}_{\mathrm{O,b}} &= \dot{m}_{\mathrm{b},i}a_{\mathrm{O},i}^t \quad \dot{m}_{\mathrm{b},i} < 0\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

式中,$a_{\mathrm{O,b}}$是外界环境氧气质量分数.

$t + \Delta t$ 时刻第 i 个隔仓中氧气分压为

$$p_{\mathrm{O},i}^{t+\Delta t} = m_{\mathrm{O},i}^{t+\Delta t}R_{\mathrm{O}}T/V_i \tag{9}$$

式中,R_{O}是氧气气体常数;V_i是第 i 个隔仓气相空间体积. 这样可得到 $t + \Delta t$ 时刻第 i 个隔仓中氧气摩尔分数为

$$x_{\mathrm{O},i}^{t+\Delta t} = p_{\mathrm{O},i}^{t+\Delta t}/p_i \tag{10}$$

按照以上过程,逐仓计算可得到在 $t + \Delta t$ 时刻所有隔仓的氧浓度分布,当所有仓计算完成后,将 $t + \Delta t$ 时刻参数替换 t 时刻参数,计算新时刻的氧浓度,直至计算到给定的终了时刻.

为了便于对不同体积的燃油箱及富氮气体流量下的惰化规律进行比较研究,定义一无量纲准则数——换气次数 n_{VTE}为

$$n_{\mathrm{VTE}} = \frac{\dot{Q}_{\mathrm{NEA}}t}{V_{\mathrm{U}}} = \frac{\dot{m}_{\mathrm{NEA}}t}{\rho_{\mathrm{NEA}}V_{\mathrm{U}}} = \frac{t\sum_{i=1}^{k}\dot{m}_{\mathrm{NEA},i}}{\rho_{\mathrm{NEA}}\sum_{i=1}^{k}V_i} \tag{11}$$

式中,ρ_{NEA}为富氮气体密度;$\dot{Q}_{\mathrm{NEA}}$为富氮气体总体积流量.

2 模型验证

以波音 747 中央翼燃油箱为验证对象,其拓扑结构关系和体积取自文献[9],进气方式按照文献[8]选取,采用本文建立的压差自动分配方法计算模型对其进行计算,选择富氮气体流量为 100 kg/s,富氮气体中氧气摩尔分数为 5%,迭代误差 ε_c 为 1×10^{-7} kg/s,ε_t 为 1×10^{-2} kg/s,计算结果如表 1 所示,从表中可见,根据流量的计算值正负性,可判断出流动的方向,在整个计算过程中没有进行人为方向的规定,结果显然与文献[8]所示的方向完全一致.

表 1 燃油箱结构参数及流动关系计算结果

仓号	容积/m^3	拓扑关系	流量/(kg·s^{-1})	面积/m^2	流动状态
1 舱	16.8	NEA 气体	0		
		与外界环境	-48.90	0.04	流出
		与 2 舱间	48.90	0.08	流入
2 舱	11.9	NEA 气体	0		
		与外界环境	0	0	
		与 1 舱间	-48.93	0.08	流出
		与 3 舱间	34.50	0.048	流入
		与 4 舱间	14.42	0.048	流入
3 舱	5.3	NEA 气体	100		流入
		与外界环境	0	0	
		与 2 舱间	-34.52	0.048	流出
		与 4 舱间	-35.86	0.064	流出
		与 5 舱间	-29.62	0.048	流出
4 舱	5.3	NEA 气体	0		
		与外界环境	0	0	
		与 2 舱间	-14.44	0.032	流出
		与 3 舱间	35.84	0.064	流入
		与 6 舱间	-21.40	0.032	流出
5 舱	6.4	NEA 气体	0		
		与外界环境	0	0	
		与 3 舱间	29.61	0.048	流入
		与 6 舱间	-29.61	0.048	流出
6 舱	6.4	NEA 气体	0		
		与外界环境	-50.99	0.04	流出
		与 4 舱间	21.39	0.032	流入
		与 5 舱间	29.60	0.048	流入

图 2 将本文计算结果与文献[8]进行了比较后显示,其计算结果与文献[8]中公布的实验数据吻合较好,与文献[8]中的计算结果也基本一致,证明了本文所提出的模型是可行的. 当然,文献中缺乏隔仓间通气面积及排气孔面积数据,因此面积为作者自行选取的值,与实际的油箱有一定差别,故第 2、第 5 和第 6 隔仓与实验数据差别较大,但是其趋势与实验基本一致,例如实验数据显示,第 6 隔仓惰化慢于第 2 隔仓,而第 2 隔仓慢于第 5 隔仓,而当 $n_{VTE}<1$ 时,本文计算结果也与此吻合,且优于文献[8]中的计算结果.

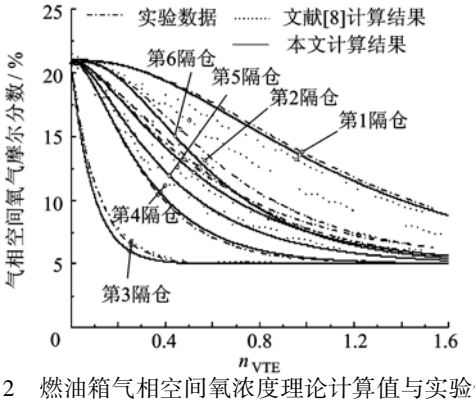
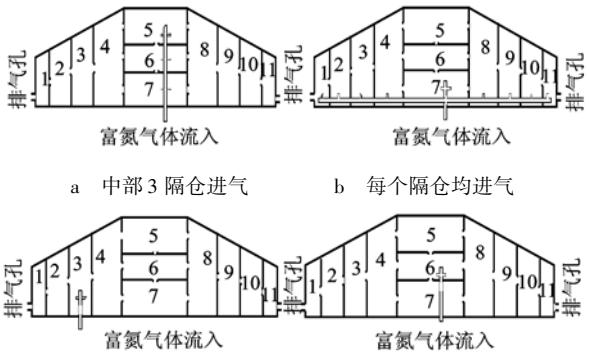


图 2 燃油箱气相空间氧浓度理论计算值与实验值对比

3 气体分配方式对惰化过程影响

富氮气体可选择不同的进气孔位置和数量进入燃油箱,很显然这将导致燃油箱各隔仓的惰化过程不尽相同,图 3 中给出了国产某型民用客机中央翼燃油箱示意图,其各隔仓容积如表 2 所示. 本文首先给出了 4 种不同气体流入方式,其中图 3a 是从中部 3 个隔仓进气,图 3b 将富氮气体引入每个隔仓,而图 3c 和图 3d 均将富氮气体通入某一个隔仓,在这 4 种方式中,与外界连通的排气孔均布置在中央翼燃油箱两侧的隔仓上,即第 1 和第 11 隔仓.



a 中部 3 隔仓进气　　b 每个隔仓均进气

c 从左侧第 3 隔仓进气　　d 从中部第 6 隔仓进气

图 3 不同进气方式示意图

表 2 本文选取中央翼燃油箱各隔仓容积

隔仓号	容积/m^3	隔仓号	容积/m^3
1,11	1.51	5	3.55
2,10	2.03	6	2.26
3,9	2.95	7	3.12
4,8	3.82		

其次,当进气孔的数量大于 1 个时,每个隔仓所流入的富氮气体流量也有 2 种方式分配,第 1 种称为数量平均,即每个隔仓流入的富氮气体流量相等,即

$$\dot{m}_{NEA,i}=\dot{m}_{NEA}/N_{NEA} \tag{12}$$

而另外一种称为体积平均,即每个隔仓流入

的富氮气体按照容积比例大小分配,可表示为

$$\dot{m}_{\mathrm{NEA},i} = \dot{m}_{\mathrm{NEA}} V_i \Big/ \sum_{i=1}^{N_{\mathrm{NEA}}} V_i \qquad (13)$$

式中,N_{NEA}为有富氮气体流入的隔仓总数量.

图 4 是有多个隔仓流入富氮气体时,各隔仓中气相空间氧气摩尔分数随换气次数的变化关系,从图中可见,当所有隔仓均按体积平均方式通入富氮气体时,所有隔仓中氧浓度变化均相同,即与文献[6]中所述的单舱惰化过程完全一致,而按数量平均时,则各隔仓惰化过程有一定的差异,其原因在于容积较大的隔仓所分配得到的富氮气体流量不足,导致惰化过程较慢,当然,这也与隔仓之间的流动特性有一定关系.

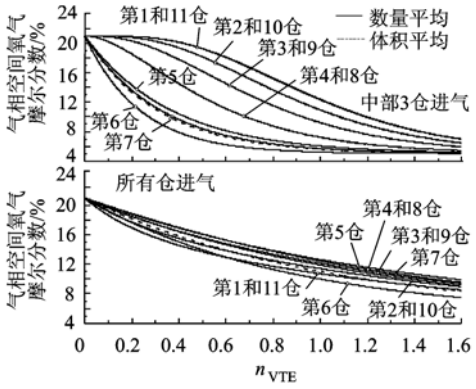


图 4　多隔仓进气时氧浓度随换气次数变化关系

当中部第 5 ~7 3 个隔仓通入富氮气体时,不论是按数量平均还是按体积平均进行惰化,各隔仓的惰化过程基本一致,其原因在于气体从中部向两侧的流动弥补了富氮气体分配差异所导致的不均匀性.

图 5 是将所有富氮气体通入某一个隔仓时的惰化过程,从图中可见,富氮气体流入的隔仓其惰化过程最快,而远离进气位置的隔仓惰化过程逐渐减慢,当进气设置在燃油箱中部的第 6 隔仓时,由于燃油箱的对称性,故第 1 和第 11 隔仓惰化最慢,而进气设置在左侧的第 4 仓时,则右侧第 11 仓离第 4 仓最远,故其所需的换气次数也最大.

从图 4 和图 5 可见,以惰化至氧气摩尔分数 12% 为标志,4 种不同的进气位置及 2 种不同的气体分配方式将导致达到同样惰化效果时所需的换气次数有很大差异. 为了更加清晰地显示该特性,图 6 中比较了多种方式下所有隔仓中氧气摩尔分数均达到 12% 所需的换气次数,从图中可见,全部隔仓均按体积平均方式通入富氮气体所需的换气次数最少,而从第 3 隔仓单独进气所需的换气次数最多,从图中还可以发现,进气位置位于燃油箱中部效果较好,例如从第 6 隔仓单独进气与从中部 3 个隔仓进气效果基本一致.

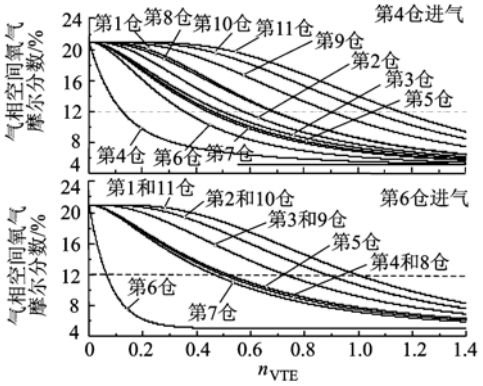


图 5　单隔仓进气时氧浓度随换气次数变化关系

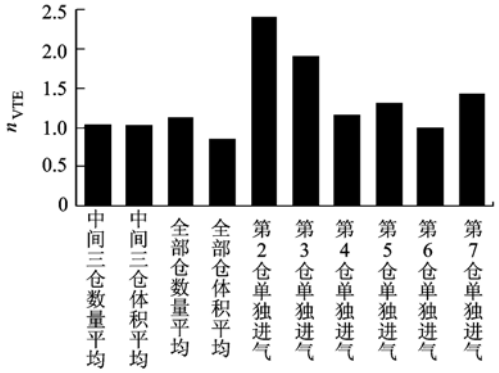


图 6　不同进气方式下所有隔仓均惰化完成所需换气次数

实际的工程应用中,由于管路布置及流量的控制问题,所有隔仓均按体积平均方式通入富氮气体是很难实现的,且进气位置越少越好,故对于本文所研究的中央翼燃油箱,从第 6 隔仓单独进气优于其他方案.

4　结　论

本文建立了民用客机中央翼燃油箱气体流动方向判断和惰化过程数学模型,与国外文献所提出的数学模型相比,整个计算过程中无需人为判断和指定气体的流动方向,且气体流量也不是通过简单的面积比来确定. 以波音 747 客机中央翼燃油箱为验证对象,将本文模型计算结果与国外文献的实验结果进行了对比后显示,模型具有较高的计算精度,且优于国外文献的计算结果,具有较高的可信度.

在上述计算模型的基础上,本文以国产某型客机中央翼燃油箱为研究对象,选择了多种进气位置和进气方式进行了惰化过程计算,计算结果显示将富氮气体按照体积比平均方式引入所有隔仓,所需的换气次数最少,而将进气孔设置在燃油箱外侧隔仓所需的换气次数显著增加. 此外,从燃

油箱中部3个隔仓进气或从中心第6隔仓进气惰化效果基本相同. 考虑到实际的工程应用中希望有最简单的进气流量分配和进气口开设数量,因此对于本文所研究的燃油箱,从第6隔仓进气是最佳设计方案. 本文的研究结果可为燃油箱惰化系统的设计和优化提供理论支持.

研究中未考虑飞机爬升时由于外界压力变化及燃油中氧氮逸出所造成的影响,因此在后续工作中将开展进一步的研究.

参考文献(References)

[1] William M C. The effect of fuel on an inert ullage in a commercial transport airplane fuel tank[R]. DOT/FAA/AR-05/25, 2005

[2] 王小平,肖再华. 飞机燃油箱氮气惰化的机理分析及应用[J]. 航空科学技术,2008,20(8):24-26
Wang Xiaoping, Xiao Zaihua. Fundamentally analysis on inerting of aircraft fuel tank with nitrogen-enriched air and its application[J]. Aeronautical Science and Technology, 2008, 20(8): 24-26 (in Chinese)

[3] 刘小芳,刘卫华. 飞机供氧和燃油箱惰化技术概况[J]. 北华航天工业学院学报,2008,18(3):4-7
Liu Xiaofang, Liu Weihua. Outline of airborne oxygen supplied and its fuel tanks inerted[J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2008, 18(3): 4-7 (in Chinese)

[4] Michael B, William M C, Richard H, et al. Flight-testing of the FAA onboard inert gas generation system on an airbus A320[R]. DOT/FAA/AR-03/58, 2004

[5] Michael B, William M C. Ground and flight testing of a Boeing 737 center wing fuel tank inerted with nitrogen-enriched air[R]. DOT/FAA/AR-01/63, 2001

[6] 高秀峰,刘卫华,熊斌,等. 燃油箱冲洗惰化过程理论研究[J]. 西安交通大学学报,2010,46(9):16-20
Gao Xiufeng, Liu Weihua, Xiong Bin, et al. Theoretical study of washing inerting process in aircraft fuel tank[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 46(9): 16-20 (in Chinese)

[7] Michael B, William M C. Inerting of a vented aircraft fuel tank test article with nitrogen-enriched air[R]. DOT/FAA/AR-01/6, 2001

[8] William M C, Ole K. Inerting a Boeing 747sp center wing tank scale model with nitrogen-enriched air[R]. DOT/FAA/AR-02/51, 2002

[9] William M C, Timothy B. Modeling in-flight inert gas distribution in a 747 center wing fuel tank[R]. AIAA 2005-4906, 2005

(编 辑:张 嵘)

(上接第594页)

参考文献(References)

[1] 陶国智,郗继贵,叶声华. 光栅式结构光传感器的编码方法[J]. 航空精密制造技术,1999,35(3):18-20
Tao Guozhi, Zhu Jigui, Ye Shenghua. Coding method of the grate structure sensor[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 1999, 35(3): 18-20 (in Chinese)

[2] Pages J, Salvi J, Forest J. A new optimised de bruijn coding strategy for structured light patterns[C]//Josef K, Marin E, Mark N. Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2004: 284-287

[3] Chen S Y, Li Y E, Zhang W. Vision processing for realtime 3-D data acquisition based on coded structured light[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(2): 167-176

[4] 孙军华,魏振忠,张广军. 一种高密度光栅结构光编码方法[J]. 光电工程,2006,33(7):78-82
Sun Junhua, Wei Zhenzhong, Zhang Guangjun. A coding method for high-density grating structured light[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(7): 78-82 (in Chinese)

[5] 于晓洋,关丛荣,吴海滨,等. 高采样密度彩色结构光三维测量技术仿真研究[J]. 系统仿真学报,2011,23(2):346-350
Yu Xiaoyang, Guan Congrong, Wu Haibin, et al. Research of high sampling density color structured light 3D measurement technique simulation[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(2): 346-350 (in Chinese)

[6] Lu C, Cho G. Accurate 3D scanning of swaying human body parts by one projection based on OIMP technique[C]//Tang Y Y, Wang S P, Loettem G, et al. Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE Computer Society, 2006: 1-4

[7] Gorthi S S, Lolla K R. A new approach for simple and rapid shape measurement of objects with surface discontinuities[C]//Wolfgang O, Christophe G, Erik L N. Proceedings of SPIE. Bellingham: SPIE, 2005: 184-194

[8] 谢光辉,魏振忠,刘震,等. 一种光栅式双目立体视觉传感器光条匹配方法[J]. 北京航空航天大学学报,2008,35(1):113-116
Xie Guanghui, Wei Zhenzhong, Liu Zhen, et al. Light-stripes matching method for raster binocular stereo vision sensor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 35(1): 113-116 (in Chinese)

[9] 张广军. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社,2005
Zhang Guangjun. Machine vision[M]. Beijing: Science Press, 2005 (in Chinese)

(编 辑:刘登敏)