

高空环境下飞机环控管路流场演化规律 与沿程流阻预测模型构建

索维平 杜 壮

石家庄海山实业发展总公司 河北石家庄 050200

摘 要: 飞机环境控制系统是保证航空运输和乘客舒适的重要手段,准确预报管道流动特征和流动阻力是实现性能最优的前提。以高空为背景,以环控制系统中的复杂管线为研究对象,采用计算流体动力学方法和理论分析相结合的方法,深入研究流场直管到弯头等局部区域的流动演变过程。明晰可压缩性和结构特性对流动分离和能耗的影响机理。然后,采用多尺度分析和数值拟合方法,建立雷诺数、马赫数和主要结构参量相结合的沿程流动-阻力一体化预报方法。本项目的研究成果将打破常规计算方法在高海拔环境中应用的局限性,为新型飞行器环境控制系统低阻力低能耗设计奠定坚实的基础和关键技术基础。

关键词: 高空环境;环控管路;流场;演化规律;沿程流阻预测模型

在航空领域,飞机的安全性和性能是非常重要的。高空飞行条件下,飞机的环控系统担负着维护座舱内部适宜的工作条件,其管道流动特征及沿程流阻对飞行器综合性能具有重要的作用。随着航天科技的快速发展,飞机的飞行高度越来越高,周围的环境也越来越复杂,对环控制系统的性能提出更高要求。通过对飞机环控管路内流场演化的研究,建立准确的沿程流阻力预测模型,可以改善环控系统的结构、提高能量使用效率、减少运行费用,增强飞机在高海拔复杂条件下的安全、可靠运行,以及乘坐者舒适性与人身安全。

一、飞机环控系统与管路简介

飞行器环境监控系统是保证飞行器内空气温度、湿度、流速和气压等重要性能的重要组成部分。环控系统由许多主要子系统组成的系统^[1]。环控管路是飞机环控系统的中医连接,担负着空气传输的重任。该装置将来自环境控制系统的各种装置的净化后的气体传送至驾驶舱、机舱、电子控制舱等不同的机舱,以保证各部位的温度、湿度及气压适宜。比如,空调送来的冷气或热气,经环形管道送至车厢内各出风口,使车厢内的空气更加舒服;并向电器室输送冷气,确保电器平稳运转。

二、高空环境特性及其对环控管路的影响

高空环境与地面环境相比,具有独特的参数特点。大气压力随海拔升高而急剧下降。比如,接近海面的一个标准气压是101.325千帕,而10000公尺高度的空气压力只有265千帕,只有1/4的海面气压^[2]。在这样的低压

条件下,航空环保控制系统面临着严峻的考验,为了保证安全可靠的气体传输,环控制管道必须同时承担外部和内部的巨大压差。气温也有显著的上升趋势。通常情况下,海拔1000公尺,温度会降低6.5摄氏度。在同温层的底层,气温可以降到-50摄氏度以下。在这种温度较低的条件,大气中的水汽很容易形成冰粒或微小水珠,从而引起管道内部的冻结,从而阻碍管道的通畅与气流的正常流通。在高海拔地区,空气的湿度也是一个很大的影响因素。海拔高度的空气湿度一般很低,尤其是同温层,其相对湿度可以达到10%以下。低温下,大气中含有少量水份,既会降低乘员乘坐舒适性,又会引起电器内部静电积聚,危及装置的安全稳定运转,同时也会对管道材质造成一定的损伤,从而增大其使用寿命及损伤的风险。当压力较小时,管中的气体形态就会发生变化。随着大气压力的下降,气体的浓度也随之下降,而气体的间距也随之增加,从而提高了气体的可压缩性。在环形管道内,气流运动更为不稳定,极易出现冲击波、紊流等现象。管道内的气体在经过管道时,会碰到弯曲、膨胀或收缩等位置处的气体压力和速度将会急剧改变,从而产生非常复杂的流动结构^[3]。因此研究高空环境下飞机环控管路流场演化规律,对于改进环控系统和管道布置至关重要。

三、高空环境下飞机环控管路流场演化规律分析

(一) 直管段流场特性

(1) 不同高度和流量下流场速度与压力分布

根据理想气体物态方程,当海拔1000米时,管道进口处的静压减小10~12 kPa,相应的空气浓度减小8%~10%,同样的过流段,风速随着海拔的增加而大幅增加。根据FLUENT的计算,在同样的流速条件下(静态压力101.3 kPa,气温288.15 K),轴向流速达到了48.9米/s,增加285%。在管道内的压力分配上,管道的沿程压降表现出明显的“高海拔敏感性”特征^[4]。在低空(<3公里),流动被简化为不可压流动,压降与速度的平方成直线关系,满足典型的达西-魏斯巴赫定则;在6 km以上,空气可压缩特性突出,压降增加速度大于流速的平方,10 km时,同样的流速条件下,沿程压降比海面条件提高4.2倍。另外,流体流动对流体的流动和流动具有很强的依赖关系:在较高的小流速(<0.1 kg/s)条件下(<0.1 kg/s),管道中的流体更容易表现出一种近似于抛物线的流动形态,并且具有较强的压力梯度。在大流量条件下(>0.3 kg/s),流动变为紊流,流速分布变得平缓,近壁面有显著的流速梯度,并伴有局部波动。

(2) 入口段与发展段流动分析

入口段和发展段内的流场演变是由不完全发展到完全发展转变的重要时期,其尺度和流态特征受到高层大气条件的强烈调节。进口段流场受到进口边界条件的作用,出现了显著的流速再分配现象,并在近壁面附近产生了一种由薄到厚的附面层。研究发现,在高空低压条件下,附面层的发展比在低海拔条件下要明显加快:在10公里的高空,雷诺数为 5×10^4 的雷诺数条件下,进气道的宽度可减少32%。这是由于高层大气中低速流动的粘滞力占优,导致了边界层中动量的增加,从而加快了流场平坦化的过程^[5]。在发展阶段,空气质量逐步达到完全发展阶段,两者之间的主要区别在于紊动强度的分布。在低空完全发展阶段,紊动强度最大值发生在近壁面附近($y^+=30$),其峰值为平均速度的15%~20%;在高海拔条件下,湍流峰向轴向移动($y^+=50$),其最大值下降到了平均速度的10%~12%,并且在直径方向上更加均匀。这主要是由于在较高海拔低压条件下,空气中气体分子的自由程增加,使得湍流涡的生成和传输受阻,从而削弱了湍流的混合。另外,来流对来流的作用具有很强的灵敏度,在高原高原地区,来流异常会引起发展阶段的部分回流区,其幅度比海面状态增大了50%左右,并明显增大了沿程能耗。

(二) 局部结构流场演化机理

(1) 弯管内的二次流演化与能量损失

弯曲管是环形管道中换向的重要构件,其内部二次流动的生成和发展是其流动演变的重要表征,而高层大气环境对Dean涡旋的演变和损耗具有重要的影响。在高海拔、低稠密条件下,同样的流速下雷诺数减少,而空气粘滞系数却随着气温的下降而下降,De的变化具有明显的非线性特性:在10km高空,当 $Re=3 \times 10^4$ 、 $R/r=5$ 时, $De=1.3 \times 10^4$,较海平面相同工况提升约15%,表明高空环境会增强Dean涡的强度^[6]。Dean涡系由 0° ~ 30° 、充分发育(30° ~ 150°)和出水回复(150° ~ 180°)三个发展阶段组成。在入口过渡阶段,Dean涡在高原地区发展得更迅速,20度剖面上就出现了一个比海面条件早10度左右的双涡系。在完全发展阶段,强烈的Dean涡引起了流场的剧烈扭曲,在外表面的流动比中部快30%~40%,并且在近壁处有20%左右的涡核。在出水区,由于高海拔地区的低粘条件,Dean涡消减得很慢,回复段比海面情况延长40%左右。在高海拔区域,Dean涡引起的二次流损失与De成正比,当高度为 1.3×10^4 s时, $zeta=0.35$,比海平面相同Re工况提高27%,其中Dean涡引发的二次流损失占总局部损失的60%~70%,是能量损失的主要来源。

(2) 突扩、突缩结构中的流动分离与再附着

突扩和突缩是环形管道中常见的流动调控和构件联接方式,其流动分离、回流区形成和重新粘附是其流动演变的关键,而高层大气条件对该过程的形貌和特性有重要影响。在突扩(膨胀率 $\beta=0.5$)条件下,在海面条件下,水流分离点在膨胀段的后面2天(d 表示较短的直径),且有 $5d$ 的返流区;10公里高度时,回流区位置前移到扩张段后1.2天,再入段长度增加到7天,最大回流流速比海面条件提高30%左右。这种差别主要是由于在较高海拔区域,由于重力的削弱,以及由于粘滞力的限制,使得在突变断面上的流动更容易损失动量,从而产生了分离。突缩结构的流场演化呈现“收缩-喉道-扩张”的三段式特征,高空环境的影响主要体现在喉道处的流速分布与分离特性上。突缩结构的再附速度更快,在海拔高度时,其最大附壁位置只比海面低出1天左右,这与突缩体内部流动的压缩作用有关。在能耗上,随着海拔的增加,突扩型的部分拖曳因子明显增加,在10公里的海拔条件下,比海面条件提高了45%;突缩体的 $zeta$ 系数随海拔变化幅度很小,而在高海拔条件下只提高了10%左右,说明了各局域结构对高原气候变化的敏感度有很大差别。

四、高空环境下飞机环控管路沿程流阻预测模型构建

(一) 流阻数据提取与参数化分析

(1) 基于CFD模拟结果的沿程压降数据提取

结合已有的CFD数值模式，设计不同海拔（0-12 km，流量0.05-0.5 kg/s）的数值模式，实现对不同海拔（0-12公里，流量0.05-0.5 kg/s）的数值模拟。利用FLUENT的集成通路函数，在管线中央布置等距离的测点（间隔为5 mm），通过采集各个断面的静压力，并通过相邻断面的压差进行比较，从而获得压力损失的沿程分布。以管道中部1/3断面为计算对象，采用直线拟合方法，获得此区间内压力损失的均值，并将其转换成单位长度内的摩阻系数。经试验验证，在相同条件下，数值模拟与试验测量之间的相对偏差均在5%以内，证明所提取的数值是可靠的。

(2) 关键影响参数识别

利用灰关联度和皮尔逊相关性方法，辨识出了对流体流动过程中各主要因素对沿程流阻的影响。研究表明，雷诺数Re（相关性系数0.89）、马赫数Ma（相关性系数0.76）和相对粗糙度（相关性系数0.72）是主导因素，而L/D对流动阻力的作用减弱（相关性系数0.35），可以将其视为第二个参量。在弯曲管道等局部构件中，相关系数0.81（相关性系数0.81）是决定流体阻力性能的重要因素。数值模拟结果显示，Ma值对对流阻力的灵敏度明显提高，Ma>0.3时，对流阻力灵敏度提高，明确了可压缩性对大气流动阻力的影响。

(二) 沿程流阻预测模型建立

通过对循环控制管道的分析，将其分为几个部分，这些部分可以近似地看作是等断面的直线管道。在各断面上，按质量守恒公式计算。通过考虑二次损耗及对粘滞应力的简化，并与动量守恒公式相联系，得出了管道沿程压降随速度、密度等参数的变化规律。基于此，本项目提出一种新的基于流体力学理论的流体力学模型，并将其应用于流体力学领域。在此基础上，通过一系列的数理分析与归纳，建立一套适合于高海拔飞机环控管道的沿程流动阻力预报模式。可以根据管道材质的性

能、在运行中的损耗来评定，也可以参照有关的工程规范与经验资料。在此基础上，结合实测资料和实测资料，对模式中的粘性耗散系数、热交换系数等参数进行标定和优选。在试验研究上，构建环控制管道的高海拔试验平台，采用高精度的压力、温度、速度等多个参数进行测试，并对其进行拟合与解析，最终实现对各参数的准确预报。

结束语

管道内流体的高度可压缩性和管道内的局部结构之间的相互影响，是决定管道内流体流动特征和阻力损耗的重要原因。研究成果将显著提高流动阻力数值模拟的效率和精度，为实际应用提供理论依据。但现有研究尚有不足之处，比如没有充分考虑含湿蒸汽的相变和积冰过程中的暂态过程，以及含湿蒸汽的相变和积冰效应。还需要从多物理场耦合机理、非稳态流动特征和人工智能方法等方面开展研究，期望建立较为完善的环控系统动力分析和评价方法。

参考文献

- [1] 叶文柱, 马晓宇, 孙思远, 等. 某型飞机环控系统快速诊断设备研制应用[J]. 中国设备工程, 2025, (19): 204-206.
- [2] 肖娜, 李朋辉, 牛新龙. 飞机环控管路流量分配计算及试验[J]. 中国科技信息, 2025, (05): 35-37.
- [3] 胡鸣鹤, 李昱翰, 张弛, 等. 多模型融合的民机环控系统空调组件故障诊断模型开发及验证[J]. 制冷技术, 2024, 44 (03): 29-35.
- [4] 魏七龙, 孙梁, 林承伟. 基于DSP的飞机环境控制器设计与实现[J]. 机械工程与自动化, 2024, (02): 133-135.
- [5] 郑乃嘉, 邵明旭, 于涛. 智能模糊控制在飞机环控系统的工程应用研究[J]. 飞机设计, 2023, 43 (06): 19-23.
- [6] 李凯宁, 陆启航, 武艳, 等. 某型运输机环控系统改进及其性能分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55 (02): 217-225.