

# 波音 787-9 机型释压飘降应急程序设计研究

王时敏<sup>1\*</sup> 曾珂<sup>2</sup> 何志富<sup>2</sup>

(1. 中国商飞上海飞机客户服务有限公司, 上海 200241;  
2. 上海吉祥航空股份有限公司 AOC 运行控制中心, 上海 201210)

**摘要:** 根据《大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则》(CCAR-121-R8) 和咨询通告《高原机场运行》(AC-121-FS-2015-21-R1) 的规定, 高原航线的航路适应性分析主要包括飘降分析和供氧分析。针对波音 787-9 机型执飞的典型航段, 即距离长、海拔高、备降机场少、使用频率高的 SR-VIKUP 航段, 进行飘降分析和供氧分析。首先分析了高原航路飘降程序、客舱释压应急程序的法规要求、影响因素, 并以此确定了实例计算参数。其次, 计算一发失效后的航路性能, 并利用波音 787-9 机型大型脉冲式氧气系统可以根据地形灵活配置下降剖面的特点, 分析与航路最低安全高度的超障裕度。最后, 根据运行中的临时改航需求, 优化了一发失效后的飘降应急程序和客舱释压紧急下降应急程序。该研究解决了该类区域运行控制的一大难点, 对其它脉冲式氧气系统机型的运行和同类高原航线的运行具有积极的推广意义。

**关键词:** 高原航线; 客舱释压紧急下降; 飘降程序; 脉冲式氧气系统

中图分类号: V355

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

根据《大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则》(CCAR-121-R8) 和咨询通告《高原机场运行》(AC-121-FS-2015-21-R1) 的规定, 飞机必须在投入航线运营之前, 对该型飞机进行航路适应性评估。对于一条新开设的高原航线, 供氧分析和飘降分析<sup>[1-2]</sup> 是航路适应性分析的主要方面。

如果在高空巡航时出现座舱释压, 空气中的氧气不足以供机组和旅客呼吸使用, 飞机需要紧急下降以降低座舱压力高度, 并且为乘员提供用于生命保障的氧气, 所以高原航线需要供氧分析。机组的供氧要求比旅客的供氧要求更高, 所以本文重点讨论旅客的氧气供应要求。

目前主流的机载氧气系统包括化学氧系统和气体氧系统。化学氧系统依靠化学物质的分解产生氧气, 根据适航规章 CCAR 25.1443 要求的氧气流量, 按照预设的速率和持续时间发生化学反应,

发生器的设计决定了氧气供应的时间<sup>[3]</sup>。主流机型的化学氧供氧时间是固定的, 为 15 min 或 22 min。

目前高原航线的航路研究集中于化学氧系统, 多为针对从平原机场飞往高原机场的航路分析<sup>[4-6]</sup>, 少数研究是针对高原机场之间的短航路分析, 且周边有充足的备降机场可选<sup>[7]</sup>, 但缺少对气体氧气系统的应用研究。

波音 787-9 GENX-1B74-75 机型采用大型脉冲式氧气系统<sup>[7]</sup>, 属于气体氧系统的一种, 与化学氧系统固定的氧气剖面不同, 承运人可以根据地形灵活设计下降剖面, 也可以设置阶梯改平高度。但对于具体的设置原则, 法规并没有给出指导性意见, 本文为在该领域的一次尝试。

如果高空巡航时发动机失效, 剩余推力不足以平衡阻力, 则飞机不能继续维持高空巡航速度, 必须下降至更低的、空气密度更大的飞行高度, 从而增加剩余发动机的推力。因此, 需要对高原航线进

\* 通信作者. E-mail: wsmwsm1004@126.com

引用格式: 王时敏, 曾珂, 何志富. 波音 787-9 机型释压飘降应急程序设计研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2024(4): 125-136.

WANG S M, ZENG K, HE Z F. Study on emergency procedures design of depressurization and drift-down of Boeing 787-9 aircraft model[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(4): 125-136(in Chinese).

行飘降分析,以确保航路中发动机失效时,飞机以规定的裕度安全越障<sup>[7]</sup>。

典型的飘降程序是飞机在航路中一发失效后,将推力设置为最大连续推力(maximum continuous thrust,简称 MCT),保持平飞并减速到飘降速度,再保持飘降速度等表速下降,直到飞机自动改平<sup>[8]</sup>。飘降程序的设计与飞机的重量、起飘高度、航路风温等多种条件相关。大量论文侧重于研究外部环境参数变化对飘降轨迹的理论分析<sup>[8-10]</sup>,而未结合实际运行。在实际工作中常会遇到临时改航的情况,临时分析势必会耗费大量的时间,进而扰乱正常运行,只有提高飘降程序设计的适用性才能从根本上解决问题。本文结合实际运行中 SR 至 VIKUP 区域的改航需求,优化了原有飘降程序的设计,使程序具有广泛的适用性,对其它承运人也有借鉴价值。

## 1 研究样本简介

### 1.1 波音 787-9 机型客舱氧气系统简介

波音 787 机型的研制采用了大量新技术、新材料。飞机采用的脉冲氧气系统是最新型的氧气系统,重量轻、供氧持续时间长,可向旅客座椅区域、乘务员座位、顶部机组休息区、厨房以及洗手间提供氧气。传统化学氧系统需要两个容器间的化学反应制造氧气,而脉冲供氧系统只需一个氧气瓶即可为一排旅客提供氧气,大幅降低了飞机自重。

对于每个面罩,呼吸传感器通过感知旅客呼吸引起的供氧管路内压力的变化,生成供氧指令,氧气控制器根据供氧指令间断性地打开/关闭呼吸控制活门,以脉冲的方式向面罩供氧。

在假设外界温度为 40 ℃、保守地速 340 节的条件下,计算出的供氧时间及飞行距离如表 1 所示。

表 1 大型脉冲式氧气系统供氧剖面距离换算表

| 序号 | 释压高度/ft | 供氧时间/min | 供氧距离/n mile |
|----|---------|----------|-------------|
| 1  | 11 000  | 250      | 1 417       |
| 2  | 12 000  | 230      | 1 303       |
| 3  | 13 000  | 215      | 1 218       |
| 4  | 14 000  | 205      | 1 162       |
| 5  | 15 000  | 185      | 1 048       |
| 6  | 16 000  | 160      | 907         |

表 1(续)

| 序号 | 释压高度/ft | 供氧时间/min | 供氧距离/n mile |
|----|---------|----------|-------------|
| 7  | 17 000  | 135      | 765         |
| 8  | 18 000  | 120      | 680         |
| 9  | 19 000  | 105      | 589         |
| 10 | 20 000  | 95       | 538         |
| 11 | 21 000  | 85       | 482         |
| 12 | 22 000  | 75       | 425         |
| 13 | 23 000  | 65       | 368         |
| 14 | 24 000  | 60       | 340         |
| 15 | 25 000  | 55       | 312         |

### 1.2 航路地形数据

随着“一带一路”建设的推进,我国提出“六廊六路多国多港”共建“一带一路”的主体框架,这也是各国参与“一带一路”的经济合作走廊。中国-中亚-西亚是六廊之一,国内各航司客运需求旺盛。但中亚地区的天山地区地势较高,对客舱供氧能力提出了更高的要求。SR 到 VIKUP 航段位于天山区域,是从航路点 KAMUD 入境后的国际班机航线管制一号航路,从比什凯克、塔什干、杜尚别、巴库、德黑兰、迪拜入境的国际航线均需经过该航路,如图 1 所示。

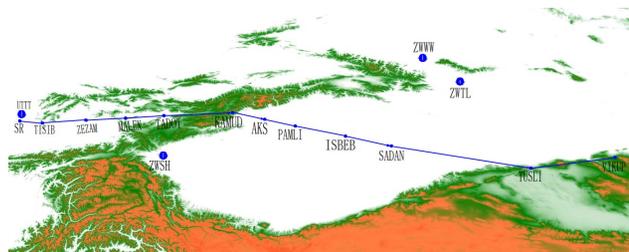


图 1 SR 到 VIKUP 航段的航路图

该区域地形属于典型的“高-低-高”类型,即两端地势较高,最低安全高度达到 20 000 ft 以上,而中间段较低,距离可用的备降机场较远。疆内可以接收波音 787-9 宽体机备降的机场非常少,仅有乌鲁木齐机场 ZWWW、吐鲁番机场 ZWTL 和喀什机场 ZWSH。这导致必须将从 SR 到 VIKUP 航段看作一个整体分析,该航段长达 1 200 n mile 以上,对决断点的选择和逃逸方案的设计都提出了更高的要求。从 SR 到 VIKUP 的航路最低安全高度详见表 2。

表2 从SR到VIKUP的最低航路安全高度剖面图

| 序号 | 航段          | 航段长度<br>/n mile | 累计距离<br>/n mile | 航路最低<br>安全高度/ft |
|----|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1  | SR-TISIB    | 46              | 46              | 13 900          |
| 2  | TISIB-MOKDU | 22              | 68              | 17 000          |
| 3  | MOKDU-DIPAX | 49              | 117             | 17 000          |
| 4  | DIPAX-ZEZAM | 19              | 136             | 17 000          |
| 5  | ZEZAM-MALEX | 81              | 217             | 16 900          |
| 6  | MALEX-TADOT | 78              | 295             | 18 100          |
| 7  | TADOT-KAMUD | 140             | 435             | 21 400          |
| 8  | KAMUD-AKS   | 68              | 503             | 19 342          |
| 9  | AKS-PAMLI   | 65              | 568             | 7 216           |
| 10 | PAMLI-ISBEB | 107             | 675             | 5 304           |
| 11 | ISBEB-SADAN | 98              | 773             | 5 419           |
| 12 | SADAN-OBDEG | 256             | 1 029           | 16 010          |
| 13 | OBDEG-TUSLI | 41              | 1 070           | 16 100          |
| 14 | TUSLI-VIKUP | 179             | 1 249           | 20 851          |

## 2 规章解读

### 2.1 客舱释压的法规要求

CCAR-121-R8已于2024年4月12日起施行。其中,对旅客所需氧气量作出了新的要求。

根据CCAR 121.329条的要求:对于座舱气压高度10 000 ft(不含)至13 000 ft(含)的飞行,超过30 min的,应在30 min后的飞行中为10%的旅客供氧;对于座舱气压高度13 000 ft以上的飞行,则需在此高度上飞行时间内为每一位旅客供氧。

如不能满足以上要求,经局方批准,可以按照以下要求运行:对于座舱高度10 000 ft(不含)至14 000 ft(含)的飞行,超过30 min的,应在30 min后的飞行中为10%的旅客供氧;舱高度在14 000 ft(不含)至15 000 ft(含)时,应在此高度为30%的旅客供氧;当座舱高度大于15 000 ft时,则需为此高度上飞行时间内每一位旅客供氧。

根据CCAR 121.333条的要求,在飞行高度25 000 ft及以下运行的飞机能在所飞航路的任一点上4 min内安全下降到飞行高度13 000 ft及以下时,如果座舱气压高度10 000 ft(不含)至13 000 ft(含)高度上飞行超过30 min,则对于30 min后的那段飞行应以规定的流量供氧率为至少10%的旅客

供氧;当飞行高度达到25 000 ft以上,或当飞行高度达到25 000 ft及以下且不能在4 min之内下降到飞行高度13 000 ft时,在座舱释压后在此段高度上如果超过30 min,则对于30 min后的那段飞行能以规定的流量供氧率为至少10%的旅客供氧,且对旅客的供氧时间不少于10 min。

如不能满足以上要求,经局方批准,可以按照以下要求运行:经在飞行高度25 000 ft及以下运行,能在航路的任意一点4 min内下降到14 000 ft及以下时,如果座舱高度在10 000 ft(不含)至14 000 ft(含)上飞行超过30 min,则对于30 min后的飞行以规定的流量供氧率为至少10%的旅客供氧。当飞机运行在飞行高度25 000 ft及以下且不能在4 min内安全下降到13 000 ft时,或当飞行高度在25 000 ft以上时,座舱释压后座舱气压高度在10 000 ft(不含)至13 000 ft(含)的飞行如果超过30 min,则对于30 min后的那段飞行以规定的流量供氧率为至少10%的旅客供氧,且对旅客的供氧时间不少于10 min。

### 2.2 飘降的法规要求

根据CCAR 121.191条的要求,对于双发飞机一台发动机失效的情况,飞机飘降净航迹要在航路两侧各25 km范围内所有地形和障碍物上空至少1 000 ft的高度上有正梯度,或者飘降净航迹能以至少2 000 ft的余度垂直超越预定航迹两侧各25 km范围内所有地形,两个要求满足其一即可。还要求发动机失效后在着陆机场上空1 500 ft有正梯度。

根据法规要求,需使用净航迹满足越障要求。对于双发飞机,一发失效净航迹为总航迹减去1.1%的梯度差所得到的。净飞行轨迹的计算还需基于以下假设条件:在航路上最不利的一点关键发动机失效;要考虑一发失效后的导航精度和定位方式;充分考虑不利的航路风;如果考虑应急放油导致重量减小带来的增益,需要承运人在手册中有相应的操作程序,且机组人员也达到了训练要求;在签派单中指定符合放行的气象条件的备降机场;一发失效后,燃油和滑油的消耗量与手册中净飞行轨迹数据所规定的一样。

## 3 程序设计方法与步骤

制定飘降程序和客舱释压供氧程序的基本方法和步骤如下:

第一步:梳理航路可选备降机场以及逃逸航路,确定逃逸航路的最低安全高度或地形高度加越障裕度。

第二步:通过制作飞行计划,计算航空器到达关键航路点时的剩余重量、巡航高度、航路风和温度等关键参数。

第三步:越障分析并设计决断点。如果一发失效后可以保持的飞行高度和客舱释压后紧急下降的高度均高于整个航路的最低安全高度,此时不需要设置决断点,在航段任意一点均可以安全越障紧急备降。否则,要综合考虑地形最低安全高度、航段距离、飞机的越障能力和备降场位置选择决断点,决断点的设置原则为在航路地势较高的区域。

第四步:根据初步拟定的决断点和逃逸方案,从第一步开始迭代验证是否满足越障要求。如果不满足,可先通过调整或增加决断点的方式提高越障能力,再从第一步开始迭代计算。如果程序优化后仍不能满足越障要求,则需要采取以下方法通过运行限制进一步改善越障能力:限制最小的起飘高度,或降低最大允许的起飞重量,或限制经过关键点时的最大重量,再从第一步开始迭代计算,直到满足运行需求。

第五步:考虑和其它程序的兼容性。飘降程序和客舱释压供氧程序都涉及到决断点和逃逸航路的设计,飘降程序的适用性还受起飘重量、风温条件等的影响。为了降低机组的操作难度,呈现给机组的程序设计中需尽量避免同一区域内多次经过关键航路点时的重量检查,避免过于复杂或频繁的决断点设计。同时,要尽可能考虑周全周边区域临时改航的情况,提高程序的适用性。

## 4 程序设计影响因素和计算参数

### 4.1 巡航高度

飘降程序的起飘高度对飞机一发失效后能保持的飞行高度有明显影响,客舱释压应急程序亦是如此,巡航高度越高,越有利于发生特情后的越障。由于空管和天气等因素,巡航时可能无法达到最佳巡航高度。在航线越障分析时,应按较保守的方式选择比日常运行低 1~2 个高度层的高度作为计算基准,以提高设计程序的适用性。在本例中,主要巡航高度为 FL350 至 FL370,为提高程序的适用性,

特殊程序设计选用起始高度 FL330。

### 4.2 飞机重量

飞机重量对航路性能的影响,主要体现在改平升限上。飞机重量越大,改平升限越低,越不利于越障。首先,使用结构限制的最大起飞重量对应的一发失效净升限与航路最低安全高度作比较,如果前者大于后者,则说明飞机可以安全越障。否则使用该航线预期的最大起飞重量检查越障。如果仍不能满足越障要求,还需要再限制经过关键航路点的重量,直到满足越障要求为止。在本例中,波音 787-9 机型的最大起飞重量的飘降升限无法满足越障要求,所以选取了经过关键航路点的限制重量,具体数值见表 3。

表 3 起始飘降重量及飘降升限

| 序号 | 航路点   | 起飘重量/t | 飘降升限/ft |
|----|-------|--------|---------|
| 1  | SR    | 210    | 18 500  |
| 2  | TADOT | 207    | 18 900  |
| 3  | SADAN | 202    | 19 700  |
| 4  | VIKUP | 197    | 20 300  |

### 4.3 温度

到达拐点温度前,温度虽在升高,但发动机仍几乎保持平台功率推力。随着温度进一步升高,到达拐点温度后,发动机推力减小。但大气温度越高,真实飞行高度越高,越有利于越障。因此,温度对飘降轨迹的影响没有定性的结论,要具体分析。

本例中,通过对比 ISA+5、ISA、ISA-5 时的最低改平高度,并经过低温修正,选取其中最保守的条件 ISA-5。波音 787-9 机型不同航路温度对应的飘降净航迹如图 2 所示,最大起飞重量 210 t 对应的飘降升限为 18 500 ft,静风时飘降到最低点的距离为 369 n mile。

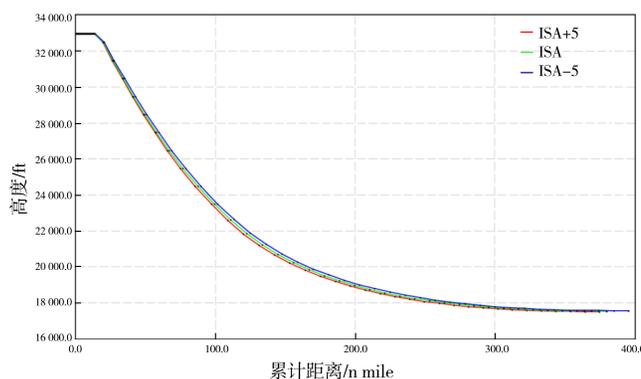


图 2 波音 787-9 机型不同航路温度对应的飘降净航迹

#### 4.4 航路风

顺风时有利于越障,逆风时不利于越障。在客舱释压后各高度层的巡航速度计算中,也受到了航路风的影响。本例中冬春季航路风为顺风,可采用保守数值静风计算,夏秋季为逆风,本文采用保守的 60 节逆风计算。

#### 4.5 释压下降剖面

与化学氧系统固定的氧气剖面不同,承运人可以根据实际地形灵活设计下降剖面,甚至可以限制设置阶梯改平高度。但对于具体的设置原则,法规并没有给出指导性意见,本文采取阶梯下降的设计思路,而不是选择直接下降到航路最低安全高度,主要出于以下几个因素考虑:在安全方面,采用阶梯下降可以让机组更充分地监控和调整飞机速度、高度和姿态,对机械部件的磨损也较小,避免进一步的机体损伤;在舒适度方面,逐步降低高度可以减少气压的急剧变化导致的乘客和机组身体不适;在燃油经济性方面,阶梯下降所需的燃油量较小。同时,为了减少特情下机组的操作负荷,尽量不涉及多于三个阶梯的下降方案,短航段只考虑一个下降高度。

#### 4.6 飘降结束后的速度

如果前方存在限制性障碍物,飞机需保持最大高度飞行,可以在改平后继续使用最大升阻比速度,此时随着飞机重量减小,飞行高度将逐渐变高。如果前方无限制性障碍物,则可以损失部分飞行高度,立即下降到较低高度并加速到一发失效远航速度。还有一种策略是保持平飞并加速到一发失效远航速度,在改平后保持等高飞行。此时油门不变,飞机重量减小,飞机会逐步加速,加速到一发失效远航速度后保持该速度等高飞行。本例中采用最后一种。

### 5 程序设计及越障分析

将波音 787-9 机型从航路点 SR 到 VIKUP 航段的释压剖面图、一发失效飘降净轨迹和最低航路安全高度对比后发现,如果继续沿航路飞行,将无法越障,如图 3 所示(图中粉色字母表示航路点;红色实线代表航路最低安全高度;蓝色实线表示释压供氧的性能剖面;棕色实线代表飘降净轨迹)。

再结合周边可用的备降机场比什凯克机场 UCFM、塔什干机场 UTTT、乌鲁木齐机场 ZWWW、吐

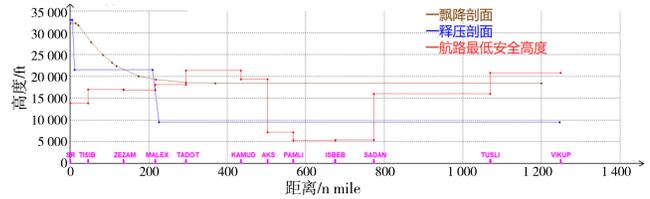


图 3 SR 到 VIKUP 航段的越障分析

鲁番机场 ZWTL 以及喀什机场 ZWSH,考虑以 TADOT 和 SADAN 为决断点,将 SR 到 VIKUP 航路分为三部分,分别是 SR 到 TADOT、从 TADOT 到 SADAN 和从 SADAN 到 VIKUP。

#### 5.1 SR 到 TADOT 段释压程序

该航段位于境外,周边可用的备降机场只有比什凯克机场 UCFM 和塔什干机场 UTTT,分别验证逃逸方案的可用性。

备降方案一:备降比什凯克机场 UCFM。

数据验证:从返回最困难点 TADOT 到 MNS 的航段距离及航路最低安全高度如表 4 所示,TADOT 到 MNS 的航路垂直剖面图及越障分析如图 4 所示。

表 4 TADOT 到 MNS 的航段距离及航路最低安全高度

| 序号 | 航段          | 航段长度 /n mile | 累计距离 /n mile | 航路最低安全高度/ft |
|----|-------------|--------------|--------------|-------------|
| 1  | TADOT-MALEX | 79           | 79           | 18 100      |
| 2  | MALEX-ZEZAM | 81           | 160          | 16 900      |
| 3  | ZEZAM-MNS   | 151          | 311          | 17 000      |

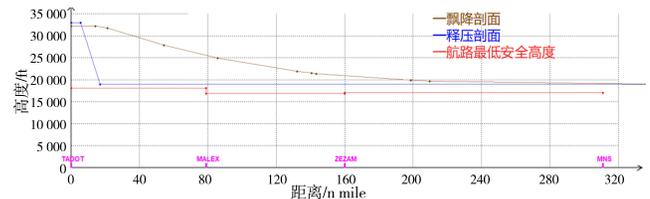


图 4 TADOT 到 MNS 的航路垂直剖面图及越障分析

从表 4 可知,如果在该航段发生释压,从巡航高度下降到 19 000 ft 沿原航路飞至 ZEAM 后沿 B351 飞至 MNS,备降比什凯克 UCFM。共飞行 311 n mile,小于可在 19 000 ft 以上飞行 595 n mile 的要求,满足供氧剖面要求。航路最低安全高度 18 100 ft,小于飞机在 TADOT 一发失效后的飘降升限 18 900 ft 的要求,所以飞机一发失效后按照释压程序路线飞行满足安全要求。

从前进最困难点 SR 到 MNS 的航段距离及航路最低安全高度如表 5 所示,SR 到 MNS 的航路垂直剖面图及越障分析如图 5 所示。

表 5 从 SR 到 MNS 的航段距离及航路最低安全高度

| 序号 | 航段          | 航段长度 /n mile | 累计距离 /n mile | 航路最低安全高度/ft |
|----|-------------|--------------|--------------|-------------|
| 1  | SR-TISIB    | 46           | 46           | 13 900      |
| 2  | TISIB-ZEZAM | 22           | 137          | 17 000      |
| 3  | ZEZAM-MNS   | 151          | 288          | 17 000      |

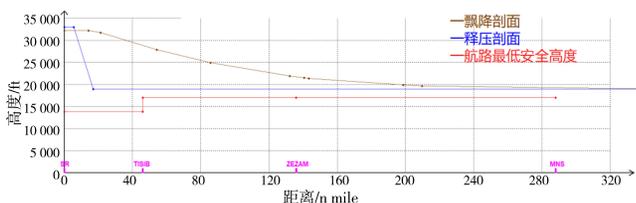


图 5 SR 到 MNS 的航路垂直剖面图及越障分析

从表 5 可知,如果在该航段发生释压,下降到 19 000 ft 沿原航路飞至 ZEZAM 后 B351 飞至 MNS,备降比什凯克机场 UCFM。共飞行 288 n mile,小于可在 19 000 ft 以上飞行 595 n mile 的要求,满足供氧剖面要求。航路最低安全高度 18 100 ft,小于飞机在 SR 一发失效后的飘降升限 18 500 ft 的要求,所以飞机一发失效后按照释压程序路线飞行满足安全要求。

备降方案二:备降塔什干机场 UTTT。

数据验证:从返回最困难点 TADOT 到 SR 的航段距离及航路最低安全高度,如表 6 所示,TADOT 到 SR 的航路垂直剖面图及越障分析如图 6 所示。

表 6 从 TADOT 到 SR 的航段距离及航路最低安全高度

| 序号 | 航段          | 航段长度 /n mile | 累计距离 /n mile | 航路最低安全高度/ft |
|----|-------------|--------------|--------------|-------------|
| 1  | TADOT-MALEX | 79           | 79           | 18 100      |
| 2  | MALEX-ZEZAM | 81           | 160          | 16 900      |
| 3  | ZEZAM-DIPAX | 19           | 179          | 17 000      |
| 4  | DIPAX-MOKDU | 49           | 228          | 17 000      |
| 5  | MOKDU-TISIB | 22           | 250          | 17 000      |
| 6  | TISIB-SR    | 46           | 296          | 13 900      |

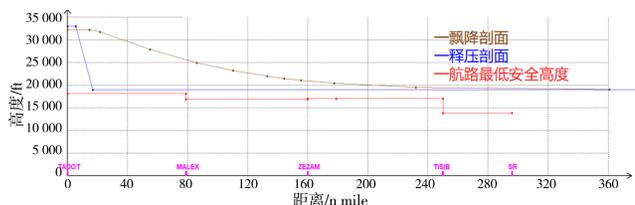


图 6 TADOT 到 SR 的航路垂直剖面图及越障分析

从表 6 可知,如果在该航段发生释压,下降到 19 000 ft 沿原航路飞至 SR 后备降塔什干机场 UTTT,共飞行 296 n mile,小于可在 19 000 ft 以上飞行 595 n mile,满足供氧剖面要求。航路最低安全高度 18 100 ft,小于飞机在 TADOT 一发失效后的飘降升限 18 900 ft,所以飞机按照飘降剖面下降并按照释压程序路线飞行满足安全要求。

### 5.2 TADOT 到 SADAN 段航路分析

从 TADOT 到 SADAN 段航路,周边可用的备降机场只有喀什机场 ZWSH 和吐鲁番机场 ZWTL,分别验证逃逸方案的可用性。

备降方案一:备降喀什机场 ZWSH。

数据验证:从返回最困难点 SADAN 到 KHG 的航路最低安全高度小于 10 000 ft,无需航路分析;从前进最困难点 TADOT 到 KHG 的航段距离及航路最低安全高度如表 7 所示,TADOT 到 KHG 的航路垂直剖面图及越障分析如图 7 所示。

表 7 从 TADOT 到 KHG 的航段距离及航路最低安全高度

| 序号 | 航段          | 航段长度 /n mile | 累计距离 /n mile | 航路最低安全高度/ft |
|----|-------------|--------------|--------------|-------------|
| 1  | TADOT-KAMUD | 140          | 140          | 21 400      |
| 2  | KAMUD-AKS   | 68           | 208          | 19 342      |
| 3  | AKS-LESVI   | 97           | 305          | 7 216       |
| 4  | LESVI-LEDEM | 54           | 359          | 7 666       |
| 5  | LEDEM-MAGIV | 101          | 460          | 7 666       |
| 6  | MAGIV-KHG   | 90           | 550          | 8 856       |

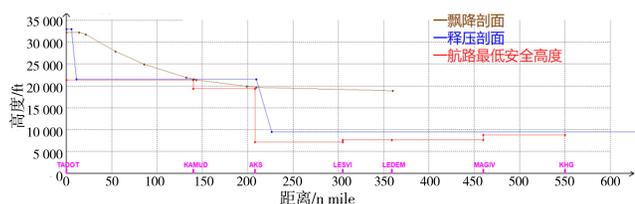


图 7 TADOT 到 KHG 的航路垂直剖面图及越障分析

从表7可知,如果在该航段发生释压,下降到21 500 ft沿原航路飞至AKS后下降到10 000 ft以下,沿AKS-LESVI-MAGIV-KHG备降ZWSH,在最低安全高度大于10 000 ft的航路上飞行208 n mile,小于可在22 000 ft以上飞行425 n mile的要求,满足供氧剖面要求。航路最低安全高度19 343 ft,飞机在TADOT一发失效后,到达KAMUD的高度为21 625 ft,到达AKS的高度为19 700 ft,所以飞机按照飘降剖面下降并按照释压程序路线飞行满足安全要求。

备降方案二:备降吐鲁番机场ZWTL。

数据验证:从TADOT到PTG的航段距离及航路最低安全高度如表8所示,TADOT到PTG的航路垂直剖面图及越障分析如图8所示。

表8 从TADOT到PTG的航段距离及航路最低安全高度

| 序号 | 航段          | 航段长度 /n mile | 累计距离 /n mile | 航路最低安全高度/ft |
|----|-------------|--------------|--------------|-------------|
| 1  | TADOT-KAMUD | 140          | 140          | 21 400      |
| 2  | KAMUD-AKS   | 68           | 208          | 19 342      |
| 3  | AKS-PAMLI   | 65           | 273          | 7 216       |
| 4  | PAMLI-ISBEB | 107          | 380          | 5 304       |
| 5  | ISBEB-SADAN | 98           | 478          | 5 419       |
| 6  | SADAN-KEL   | 92           | 570          | 6 892       |
| 7  | KEL-P51     | 28           | 598          | 9 840       |
| 8  | P51-P514    | 85           | 683          | 10 585      |
| 9  | P514-P205   | 87           | 770          | 7 850       |
| 10 | P205-PTG    | 74           | 844          | 8 607       |

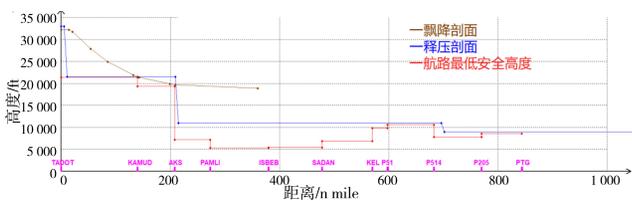


图8 TADOT到PTG的航路垂直剖面图及越障分析

从表8可知,如果在该航段发生释压,下降到21 500 ft沿原航路飞至PAMLI后下降到11 000 ft,飞至P514后下降到9 000 ft,备降ZWTL,在最低安全高度大于10 000 ft的航路上飞行683 n mile,小于可在该剖面上飞行945 n mile的要求,满足供氧剖面要求。TADOT-AKS航路最

低安全高度21 400 ft,之后航路最低安全高度10 585 ft,飞机在TADOT一发失效后,到达KAMUD的高度为21 625 ft,到达AKS的高度为19 700 ft的要求,之后飘降升限为18 900 ft,所以飞机按照飘降剖面下降并按照释压程序路线飞行满足安全要求。该航段分析已包含从返回最困难点SADAN到PTG的航段分析。

### 5.3 SADAN到VIKUP段分析

波音787-9机型在SADAN到VIKUP航段释压以后,可以按释压剖面安全下降,备降乌鲁木齐机场ZWWW,吐鲁番机场ZWTL。

备降方案一:备降乌鲁木齐机场ZWWW。

数据验证:从SADAN到WUR的航段距离及航路最低安全高度如表9所示,SADAN到WUR的航路垂直剖面图及越障分析如图9所示。

表9 从SADAN到WUR的航段距离及航路最低安全高度

| 序号 | 航段          | 航段长度 /n mile | 累计距离 /n mile | 航路最低安全高度/ft |
|----|-------------|--------------|--------------|-------------|
| 1  | SADAN-OBDEG | 256          | 256          | 16 010      |
| 2  | OBDEG-TUSLI | 41           | 297          | 16 010      |
| 3  | TUSLI-RUSDI | 40           | 337          | 15 102      |
| 4  | RUSDI-ESDEX | 114          | 451          | 7 544       |
| 5  | ESDEX-P205  | 73           | 524          | 6 580       |
| 6  | P205-PTG    | 74           | 598          | 8 607       |
| 7  | PTG-CWB     | 60           | 658          | 14 672      |
| 8  | CWB-WUR     | 29           | 687          | 15 679      |

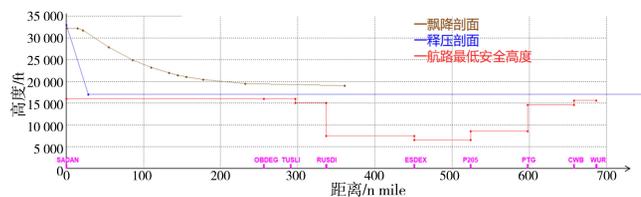


图9 SADAN到WUR的航路垂直剖面图及越障分析

从表9可知,如果在该航段发生释压,下降到17 000 ft,沿TUSLI-RUSDI-ESDEX-P205-PTG-CWB-WUR航路备降乌鲁木齐机场ZWWW,共飞行687 n mile,小于可在17 000 ft以上飞行765 n mile的要求,满足供氧剖面要求。航路最低安全高度16 010 ft,小于飞机在SADAN一发失效后的飘降升限19 700 ft的要求,所以飞机按照飘降剖面下降并按照释压程序路线

飞行满足安全要求。

从 VIKUP 到 WUR 的航段距离及航路最低安全高度见表 10, VIKUP 到 WUR 的航路垂直剖面图及越障分析如图 10 所示。

表 10 从 VIKUP 到 WUR 的航段距离及航路最低安全高度

| 序号 | 航段          | 航段长度 /n mile | 累计距离 /n mile | 航路最低安全高度 /ft |
|----|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 1  | VIKUP-TUSLI | 179          | 179          | 20 851       |
| 3  | TUSLI-RUSDI | 40           | 219          | 15 102       |
| 4  | RUSDI-ESDEX | 114          | 333          | 7 544        |
| 5  | ESDEX-P205  | 73           | 406          | 6 580        |
| 6  | P205-PTG    | 74           | 480          | 8 607        |
| 7  | PTG-CWB     | 60           | 540          | 14 672       |
| 8  | CWB-WUR     | 29           | 569          | 15 679       |

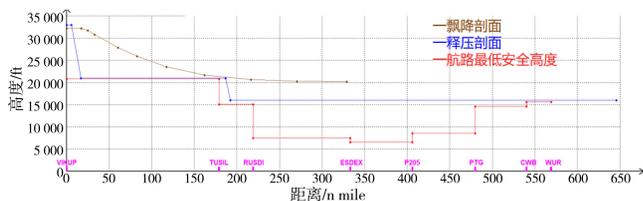


图 10 VIKUP 到 WUR 的航路垂直剖面图及越障分析

从表 10 可知,如果在该航段发生释压,下降到 21 000 ft 沿原航路飞至 TUSLI 后,下降到 16 000 ft 沿 RUSDI-ESDEX-P205-PTG-CWB-WUR 备降 ZWWW,共飞行 569 n mile,小于可在该剖面以上飞行 649 n mile 的要求,满足供氧剖面要求。VIKUP 到 TUSLI 航路最低安全高度 20 851 ft,之后航路最低安全高度 15 679 ft,飞机在 VIKUP 一发失效后,到达 TUSLI 的高度为 21 312 ft,之后飘降升限为 20 300 ft,所以飞机按照飘降剖面下降并按照释压程序路线飞行满足安全要求。

备降方案二:备降吐鲁番机场 ZWTL。

该航段分析已包含在备降到乌鲁木齐机场 ZWWW 的航段分析中,此处不再重复分析。

### 5.4 程序优化

至此,已可以满足沿预定航路的越障要求。但是实际运行中,由于气象条件的限制,常需要从 KAMUD 沿 A468 航路飞往 XKC,再沿 B215 航路飞往乌鲁木齐机场 ZWWW 备降。KAMUD 到 WUR 的航路图如图 11 所示,垂直剖面图及飘降越障分析如图 12 所示。

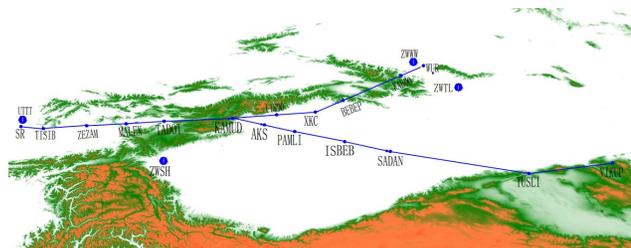


图 11 KAMUD 到 WUR 的航路图

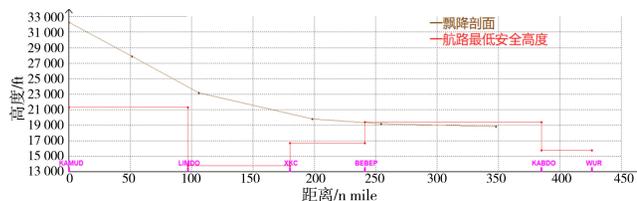


图 12 KAMUD 到 WUR 航路垂直剖面图及飘降越障分析

该航路的最低安全高度较高,但距离较短,可以满足客舱释压紧急下降的越障要求,但如果在最不利点 KAMUD 一发失效,飘降剖面无法满足安全越障的要求。

经观察,发现西侧地势较低,可显著降低航路最低安全高度,因此可尝试先飞至 KEL,再沿 X93 航路飞往 PTG,再备降吐鲁番机场 ZWTL 或乌鲁木齐机场 ZWWW。从 KAMUD 经 KEL 到 WUR 的航段距离及航路最低安全高度详见表 11, KAMUD 经 XKC 到 WUR 的航路垂直剖面图及越障分析如图 13 所示。

表 11 从 KAMUD 经 KEL 到 WUR 的航段距离及航路最低安全高度

| 序号 | 航段          | 航段长度 /n mile | 累计距离 /n mile | 航路最低安全高度 /ft |
|----|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 1  | KAMUD-LIMDO | 97           | 97           | 21 300       |
| 2  | LIMDO-XKC   | 83           | 180          | 13 800       |
| 3  | XKC-KEL     | 148          | 328          | 9 390        |
| 4  | KEL-P85     | 33           | 361          | 9 351        |
| 5  | P85-P83     | 70           | 431          | 14 049       |
| 6  | P83-PTG     | 58           | 489          | 12 294       |
| 7  | PTG-CWB     | 60           | 549          | 14 700       |
| 8  | CWB-WUR     | 29           | 578          | 15 700       |

KAMUD 点起飘重量 206 t,由图 10 可知, KAMUD-LIMDO-XKC 可满足安全越障要求。后续航路均低于单发净改平高度 18 800 ft,可飞至吐鲁番机

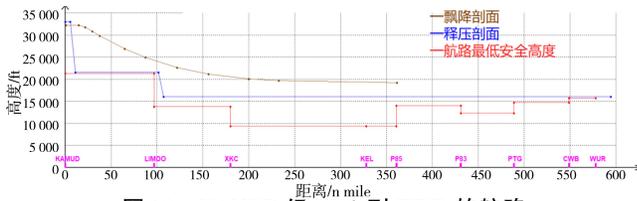


图13 KAMUD经XKC到WUR的航路垂直剖面图及越障分析

场ZWTL或乌鲁木齐机场ZWWW备降。

如果沿航路已经飞过了XKC点一发失效或客舱释压,继续沿原航路飞往乌鲁木齐机场ZWWW,或到达WUR后转X54航路飞往PTG备降吐鲁番机场ZWTL,可满足安全越障要求。从XKC到PTG的航段距离及航路最低安全高度详见表12。

表12 从XKC到PTG的航段距离及航路最低安全高度

| 序号 | 航段          | 航段长度 /n mile | 累计距离 /n mile | 航路最低安全高度/ft |
|----|-------------|--------------|--------------|-------------|
| 1  | XKC-BEBEP   | 61           | 61           | 16 700      |
| 2  | BEBEP-KABDO | 144          | 205          | 19 400      |
| 3  | KABDO-WUR   | 41           | 246          | 15 800      |
| 4  | WUR-CWB     | 29           | 275          | 15 700      |
| 5  | CWB-PTG     | 60           | 335          | 14 700      |

XKC到PTG的航路垂直剖面图及飘降越障分析详见图14。

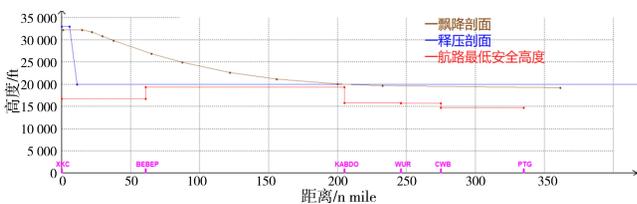


图14 XKC到PTG的航路垂直剖面图及飘降越障分析

综上所述,可得到以下2个备降方案。

备降方案一:备降吐鲁番机场ZWTL。

数据验证:下降到21 500 ft沿原航路飞至XKC后下降到16 000 ft,再沿XKC-H64-KEL-X93-PTG备降吐鲁番机场ZWTL。一发失效后使用最大升阻比速度,按照释压程序路线飞行。

备降方案二:备降乌鲁木齐机场ZWWW。

数据验证:下降到21 500 ft沿原航路飞至XKC后下降到16 000 ft,再沿XKC-H64-KEL-X93-PTG-WUR备降乌鲁木齐机场ZWWW。一发失效后使用最大升阻比速度,按照释压程序路线飞行。

但此时的决断点和原方案的决断点TADOT不一致,多套备降方案无法在一套程序中清晰地呈现给飞行签派员和飞行员。因此对原方案进行了优化,增加决断点KAMUD,并将从KAMUD经SADAN到PTG的逃逸方案,调整为从KAMUD经XKC和KEL到WUR的逃逸方案,KAMUD到SR航段的逃逸方案如图15所示。

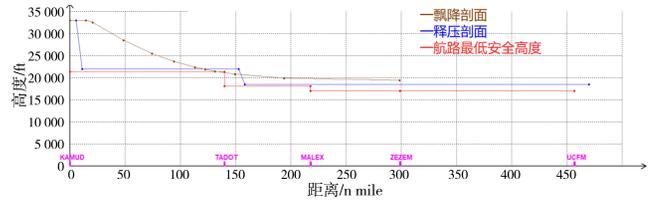


图15 KAMU到SR航段的逃逸方案

由于TADOT和KAMUD两个决断点距离较近,故进一步优化程序,即去掉决断点TADOT。但是经分析后发现,此时由于航路大逆风,在KAMUD至SR航段如果发生一发失效,飘降性能无法满足越障要求,因此该方案不可行。

## 6 分析结果

波音787-9机型在制定释压程序和飘降后,可以满足在SR-VIKUP航段限制要求。

### 6.1 SR-TADOT航段

方案一:备降比什凯克机场UCFM。如果发生释压,下降到19 000 ft沿原航路飞至ZEZAM后沿B351飞至MNS,备降比什凯克机场UCFM。一发失效后使用最佳升阻比速度,按照释压程序路线飞行。

方案二:备降塔什干机场UTTT。如果发生释压,下降到19 000 ft沿原航路飞至SR后备降塔什干机场UTTT。一发失效后使用最佳升阻比速度,按照释压程序路线飞行。

SR到TADOT航段的逃逸方案如图16所示。



图16 SR到TADOT航段的逃逸方案

## 6.2 TADOT-SADAN 航段

方案一:备降喀什机场 ZWSH。如果发生释压,下降到 21 500 ft 沿原航路飞至 AKS 后下降到 10 000 ft 以下,沿 AKS-LESVI-MAGIV-KHG 备降 ZWSH。一发失效后使用最佳升阻比速度,按照释压程序路线飞行。

方案二:备降吐鲁番机场 ZWTL。如果发生释压,下降到 21 500 ft 沿原航路飞至 AKS 后下降到 11 000 ft,飞至 P514 后下降到航路最低安全高度,备降 ZWTL。一发失效后使用最佳升阻比速度,按照释压程序路线飞行。

方案三:备降乌鲁木齐机场 ZWWW。KAMUD 经 XKC 到 WUR 的航路,下降到 21 500 ft 沿原航路飞至 XKC 后下降到 16 000 ft,再沿 XKC-H64-KEL-X93-PTG-WUR 备降 ZWWW。一发失效后使用最大升阻比速度,按照释压程序路线飞行。

TADOT 到 SADAN 航段的逃逸方案如图 17 所示。

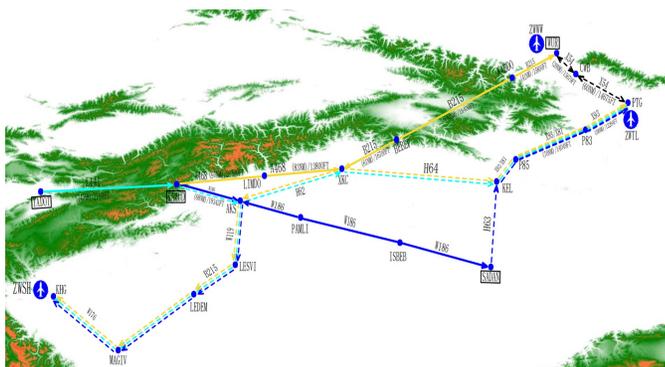


图 17 TADOT 到 SADAN 航段的逃逸方案

## 6.3 SADAN-VIKUP 航段

方案一:备降乌鲁木齐机场 ZWWW。如果释压,下降到 21 000 ft 沿原航路飞至 TUSLI 后,下降到 16 000 ft 沿 RUSDI-ESDEX-P205-PTG-CWB-WUR 备降乌鲁木齐机场 ZWWW。一发失效后使用最佳升阻比速度,按照释压程序路线飞行。

方案二:备降吐鲁番机场 ZWTL。如果释压,下降到 21 000 ft 沿原航路飞至 TUSLI 后,下降到 16 000 ft 沿 RUSDI-ESDEX-P205-PTG 备降吐鲁番机场 ZWTL。一发失效后使用最佳升阻比速度,按照释压程序路线飞行。

SADAN 到 VIKUP 航段的逃逸方案如图 18 所示。

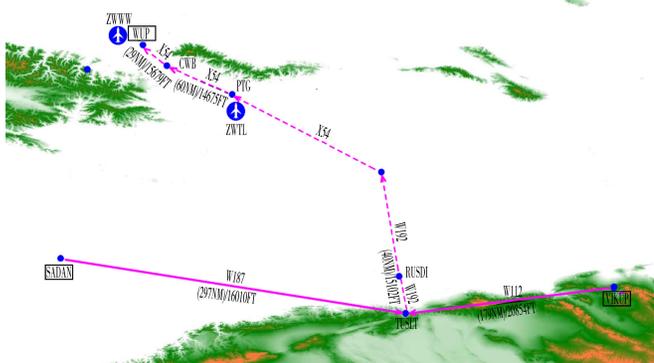


图 18 SADAN 到 VIKUP 航段的逃逸方案

## 7 结论

本文依据《大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则》(CCAR-121-R8)和咨询通告《高原机场运行》(AC-121-FS-2015-21-R1)的规定,分析了高原航路飘降程序和客舱释压应急程序的法规要求、影响因素、计算参数,并提供了优化算例。文章设计了客舱释压情况下的飞行剖面,并计算了单发失效情况下的飘降净轨迹。同时,结合实际运行中可能需要改航的情况,通过超障分析和方案优化,确保了在航路中遇到单发失效或客舱释压等紧急情况时,飞机能够安全飞行。

以往的研究大多集中于从平原机场飞往高原机场的航路分析,而对于高原机场之间的短航路分析相对较少,且这些短航路周边通常有充足的备降机场可供选择。本文针对波音 787-9 机型执飞的 SR-VIKUP 航段进行了典型案例分析。这一航段距离长、海拔高,可选的备降机场较少,使用频率却很高。航段位于天山区域,是国际班机航线管制一号航路的一部分,从航路点 KAMUD 入境后开始。该区域地形具有“高-低-高”的典型特征,且中间段缺乏合适的备降机场,这要求我们必须将从 SR 到 VIKUP 的航段作为一个整体进行分析。选取的案例具有很强的代表性,其中决断点的选择和逃逸方案的设计均符合运行要求。

以往的研究多是基于配置化学氧气的机型,其氧气剖面是固定的。而本文的研究主体是具有大型脉冲式氧气系统的波音 787-9 机型,与化学氧系统固定的氧气剖面不同,承运人可以根据实际地形灵活设计下降剖面。考虑到低高度飞行耗油量较大,本文的设计思路为采取阶梯下降的方式,而不是尽量贴合航路最低安全高度。同时,为了降低程

序的操作复杂性,尽量不涉及多于三个阶梯的下降方案。该方案兼顾了经济性和安全性,具有较好的应用价值。

以往的研究多侧重于应急程序的设计,一旦外部环境变化了,原有程序将不再适用。本文侧重于结合实际工作中常会遇到临时改航的需求,优化了飘降程序的设计,将多套备降方案在一套程序中清晰地呈现给飞行签派员和飞行员,提高了原有程序的适用性,避免了一线运行的混乱,解决了该区域运行控制的一大难点,对其它脉冲型氧气系统机型的运行和同类高原航线的运行具有积极的推广意义。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 中国民用航空局. 高原机场运行:AC-121-FS-2015-21-R1[S]. 北京:中国民用航空局,2015.
- [ 2 ] 中国民用航空局. 大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则:CCAR-121-R8[S]. 北京:中国民用航空局,2024.
- [ 3 ] 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,2011:13.
- [ 4 ] 陈琳,张序,刘雪涛,等. 成都—拉萨高原航线飘降和客舱释压问题分析[J]. 中国民航大学学报,2013,31(2):40-45.
- [ 5 ] 张序,周川,俎振洲,等. 阿坝/红原机场签派放行与运行控制研究:以“成都-红原”往返航线为例[J]. 民用飞机设计与研究,2019(4):7-13.
- [ 6 ] 张序,徐菡悦,郝帅. 高原航线飘降释压应急程序设计研究:以A319-115“西宁/曹家堡-玉树/巴塘”航线为例[J]. 民用飞机设计与研究,2022(3):1-8.
- [ 7 ] 余江. 高原/复杂地形机场和航线运行的飞机性能分析(第二版)[M]. 成都:西南交通大学出版社,2015.
- [ 8 ] 刘小川,张俐娜,李纪红. 基于参数敏感性的飘降升限影响因素分析[J]. 飞机设计,2018,38(4):15-19.
- [ 9 ] 骆昕. 浅谈起飞—发失效应急程序的总体设计[J]. 中国民用航空,2013(12):99-100,84.
- [ 10 ] 王小磊,钟育鸣. 基于空气动力参数的飘降过程分析[J]. 民航学报,2022,6(1):73-76,84.

#### 作者简介

**王时敏** 女,硕士,工程师。主要研究方向:配载平衡、释压、飘降程序设计、新开航线和机场性能评估、波音性能软件后台管理等。E-mail: wsmwsm1004@126.com

**曾珂** 男,本科,工程师。主要研究方向:高原航线运行控制与应急处置、新开航线和机场评估、地空通信等。E-mail: zengke@juneyaoair.com

**何志富** 男,本科,助理工程师。主要研究方向:高原航线运行控制与应急处置、复杂机场运行控制等。E-mail: hezhifu@juneyaoair.com

## Study on emergency procedures design of depressurization and drift-down of Boeing 787-9 aircraft model

WANG Shimin<sup>1\*</sup> ZENG Ke<sup>2</sup> HE Zhifu<sup>2</sup>

(1. COMAC Shanghai Aircraft Customer Service Co., Ltd., Shanghai 200241, China;

2. AOC Juneyao Airlines Co., Ltd., Shanghai 201210, China)

**Abstract:** According to the requirements of “Rules for Operational Qualification and Certification of Public Air Transport Carriers of Large Airplanes” (CCAR-121-R8) and Advisory Circular called “Operation of Plateau Airports”, the route adaptability analysis of plateau routes mainly includes drift-down analysis and oxygen supply analysis. In this paper, drift-down analysis and oxygen supply analysis for SR-VIKUP flight segment are carried out, which is a typical case of long distance, high altitude, few alternative airports, and high frequency of use operated by Boeing 787-9 aircraft. This paper firstly analyzes the regulatory requirements and influencing factors of the drift-down procedures and cabin depressurization procedures for plateau routes, and determined the calculation parameters. Secondly, it calculates the route performance after one engine failure, followed by obstacle clearance analysis based on the feature that the large pulsed oxygen system of the Boeing 787-9 model can flexibly configure the descent profile according to the terrain, in combination with the minimum safe altitude of the flight segment. Finally, according to the temporary re-routing needs in operation, the emergency procedures for drift-down after the failure of one engine and the emergency procedures for cabin depressurization are optimized. This study has solved a major difficulty in operation control in this area, and is of positive significance to the operation of other impulse oxygen system models and similar plateau routes.

**Keywords:** plateau route; emergency descent for cabin depressurization; drift-down procedures; pulse oxygen system

---

\* Corresponding author. E-mail: wsmwsm1004@126.com