

守护云端生命线：民航飞机客舱释压程序分析的演进、挑战与智能未来展望

李洁

中国东方航空股份有限公司 上海市 200000

DOI:10.32629/ems.v8i6.20561

[摘要] 客舱失压（释压）是民用航空飞行中虽不频发但后果极为严重的特情之一。本文从高空生理学必要性出发，系统阐述了现行释压程序分析的理论框架、手册要求与行业通用方法，剖析其在机组实操层面与程序动态更新层面存在的现实弊端。最后，结合人工智能、大数据与性能计算等前沿技术，展望了未来释压程序向实时化、个性化、智能化评估与辅助决策发展的趋势，旨在为提升民航应急安全冗余与运行效率提供理论参考。

[关键词] 客舱失压；应急程序；氧气系统；人工智能；航空安全

一、引言：云端之上的无形威胁与程序之盾

在万米高空，现代客机通过精密的座舱增压系统，在机身蒙皮之内维系着一个适宜人类生存的物理环境。然而，机体结构的微小破损、舱门或窗体的密封失效，都打破这个舒适的生存环境，引发客舱失压。这是一场直接危及生命的急性缺氧危机，历史上的太阳神航空 522 号航班等悲剧，深刻揭示了失压后意识丧失的致命性。

面对这一威胁，航空安全体系构建了一套计算、验证并写入手册的标准操作程序，这套程序的科学性与可靠性的依据就是释压程序分析。本文旨在深入探讨这一分析工作的内在逻辑、当前实践模式、存在的应用矛盾，并前瞻技术赋能下的演进方向。

二、必要性的生理学根基：与时间赛跑的高空缺氧

释压程序分析的终极目标，是为机上人员争取生命时间。其一切参数设定，均源于严酷的高空生理学现实。

1. 有效意识时间：以秒计算的生存窗口^[1]

20 世纪 50 至 70 年代，研究人员通过特殊设计的快速爆炸减压舱，模拟客舱壁被破坏的情景。随着座舱高度上升，大气压力与氧气浓度急剧下降，人体血液中的血氧饱和度随之降低，随之是视力下降（管状视野）、反应迟钝、判断力丧失、产生欣快感，随后迅速意识丧失。这一阶段的实验，确定了座舱失压后人的有效意识时间与高度存在明显关联，25,000 英尺时的有效意识时间为 3-5 分钟；35,000 英尺时这一时间缩短至 30-60 秒；在 40,000 英尺以上，有效意识时间仅有 15-20 秒。

2. 氧气系统的生理学角色：生命支持的“过渡桥梁”

客舱顶部的化学氧气发生器或机组手提式氧气瓶，其作用并非让乘客或机组人员舒适呼吸，而是在失压发生后、飞

机下降到安全高度前，提供临时的生命支持。释压程序分析必须精确计算出从发生失压到下降至安全高度（现行标准为 13,000 英尺，并确保机上氧气系统的额定持续时间大于此紧急下降所需的时间，且留有规定的安全余度（通常为 2 分钟或以上）。

3. 安全高度的演变：从 14,000 英尺到 13,000 英尺

1950-1960 年代，研究人员在结合飞机性能数据（在不同高度、重量下的最快下降率）和人体有效意识时间数据进行模拟和验证，得出了著名的“5 分钟下降至 25,000 英尺”规则，随后演变为更为严苛的“4 分钟下降至 14,000 英尺”规则。2024 年 5 月 14 日，中国民航基于更保守的生理学考量，在颁布的《大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则》第八次修订版 (CCAR-121-R8) 中将客舱失压后的紧急下降目标高度从 14,000 英尺调整为 13,000 英尺，为更广泛人群（包括老年人、心肺功能不全者）提供更好的安全保障。

因此，释压程序分析是一场基于最严苛生理条件、以秒为单位的“生命接力赛”规划。其必要性来源于人类生理极限，任何分析上的疏漏，都直接等同于安全余度的丧失。

三、现状：基于手册的体系化分析与符合性验证

当前，全球民航业的释压程序分析已形成一套标准化、基于规章符合性的成熟体系。

1. 规章与手册的顶层设计

以中国 CCAR-121 部^[2]、美国 FAR 121 部^[3]、欧洲 CS-25 部为核心的规章，明确了“25,000 英尺/5 分钟供氧”、“12 分钟供氧-下降规则”等黄金法则。飞机飞行手册 (FCOM) 或者快速参考手册 (QRH)，为飞行员可执行的行动指南。承运人（即航空公司）依据机型手册和自身运行特点（如常飞航路的地形），制定更细化的补充程序，如特定区域的紧急下降方案、

改航备降方案等。

2. 行业通用的分析方法: 基于“最极端情况”的保守分析评估

释压程序分析由飞机制造商提供软件和机型性能数据库,由承运人主导完成,其核心方法是建立多维度计算条件,验证在最恶劣条件下,满足法规规章的要求。

2.1 外界环境

选择飞机在发生密闭性损坏后，客舱环境立刻与外界大气环境趋于一致，座舱高度迅速升至飞行高度、最大起飞重量或以正常飞行油耗抵达高地形区域的最大重量（下降性能最差）、标准大气或高温条件（发动机推力小，下降慢）作为初始条件。

2.2 机型参数

飞机性能模拟使用飞机制造商研制的分析软件和机型性能数据库,通过在计算软件中模拟飞机在紧急下降过程中的状态,获得下降剖面和各阶段所需时间,如图1所示。模拟时,飞机的气动构型一般选择较为保守的构型,例如慢车推力,光洁气动构型(在某些情况下,需要放下减速板), V_{MO}/M_{MO} 速度等。

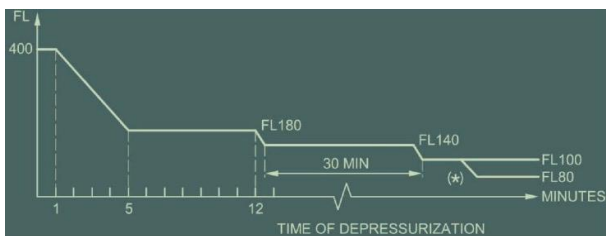


图 1 12 分钟氧气系统飞机紧急下降剖面

2.3 氧气系统

现今民用航空飞机上装载的氧气类型主要为化学氧气发生器型和氧气瓶两种类型。

化学氧气发生器在座舱压力传感器检测到快速释压，或乘客手动拉下某个面罩时，即会触发氧气发生器工作。化学氧气发生器一旦启动，反应不可停止，直至所有化学药剂消耗完毕。目前，绝大多数航空用化学氧气发生器采用以氯酸钠为主要产氧剂的“氯酸盐蜡烛”。



化学氧气发生器供氧时间通常为 12-22 分钟，这正好满足飞机从巡航高度紧急下降到安全高度（约 13,000 英尺）所需的时间。

装载了氧气瓶系统的飞机,是预先将高纯度氧气以高压形式储存在特种钢或复合材料气瓶中,通过减压阀和调节器,将高压氧气降至安全可用的压力和流量范围,供给旅客或机组成员。常见的氧气瓶压力有 1800 psi 或 1850 psi。氧气

瓶系统会根据座舱的压力情况，控制氧气流速。

2.4 地形条件

在确定了飞机氧气系统和最苛刻的下降条件后，飞机是否能安全完成飞行任务的另一个关键因素是航路安全高度。规章规定，飞机在任何时候的飞行高度（真高），必须高于所飞越区域的地形高度，并保有一定的安全余度，即在平原地区增加 1000 英尺，在山区增加 2000 英尺。飞机在释压情况下的紧急下降轨迹也必须高于航路安全高度，否则，应对沿航路两侧各 25 公里的区域进行地形分析。通过地图作业，将航路安全高度较高的航段“碎片化”，缩短高安全高度要求的航段距离，从而使飞机紧急下降的剖面能够“覆盖住”航路安全高度。

四、存在的弊端与挑战：带有假设条件的固定程序与复杂现实的缝隙

当前释压程序分析通过“基于最坏情况”的设计,为所有“可能情况”提供了安全覆盖。但将静态的、基于“最坏情况”的分析结果,应用于动态万变的真实飞行环境,就会暴露出一些固有弊端。

1. 对机组操作的“刚性”假设

分析通常假设机组反应“标准且迅速”：立即识别、立即戴上氧气面罩、立即执行记忆项目、立即建立最佳下降形态。然而，现实中的“人因”变量被极大简化，例如，非预期失压可能伴随巨响、雾气、温度骤降，带来短暂恐慌和判断迟疑；在戴上氧气面罩、通信方式改变（需使用面罩麦克风）的情况下，机组间的沟通协调效率下降，完成标准喊话和交叉检查可能耗时超出模型假设；在紧急下降过程中，机组需同时操纵飞机、导航、监控系统、执行检查单、向管制员宣布紧急状态、进行客舱广播、监控地形和冲突。这些额外负荷在分析中未被量化，却可能影响下降轨迹的“最优性”。

2. 分析程序“一刀切”与运行环境多样性的矛盾

释压程序分析时一般会使用标准化假设条件，例如，在设置大气条件时，往往选择标准大气模式，但真实运行环境千变万化，强烈的颠簸会严重影响飞机性能，使实际下降率远低于评估值。超出评估范围的逆风会影响地速，进而造成飞机过早下降高度，发生触地风险。同样，实际温度低于分析时的温度范围，则会导致飞机的真实飞行高度偏低，发生越障风险。

另外，程序中给出的改航备降方案缺乏精准的燃油评估能力。在某些苛刻的条件下，释压程序方案可能会选择较远距离的备降场，但是不会给出在低高度飞往较远备降场的燃油评估。

3. 程序的跟踪与修订存在滞后性

21 世纪初期, 国内各航司开始建立航线释压处置程序工作机制。由于起初的释压程序分析手段单一, 加之从业人员对释压程序的重要程度尚未有清晰认识, 航空公司并未针对释压制定有效的管理措施。即使分析条件已经发生变化, 原有分析条件可能已不“保守”, 但释压分析程序一旦完成, 很少会根据实际情况进行及时修订。

随着技术的发展, 航空公司使用的计算机飞行计划系统已经具备了基于气象预报和实际航路计算释压程序的能力。但是, 由于计算条件依然基于预测(而非实际发生时的条件), 无法做到实时精准评估。同时受限于航路走向及管制要求, 释压处置方案中的改航方案多采用直飞至备降场策略, 而对于直飞航段的地形依旧缺乏精细分析。

4. “基于最坏情况”的分析带来的经济损失

现行“基于最坏情况”的释压程序分析体系, 其本质上是通过牺牲部分潜在运行效率与经济效益换取的。例如, 为满足紧急下降的性能要求, 飞机常需限制起飞重量, 从而“牺牲”业载; 或为满足改航至较远备降场的要求携带额外燃油, 同样会挤压业载空间。

这些弊端的核心, 在于当前的分析是一种“静态的、离线的、基于设计的”安全演算, 而运行面对的是“动态的、在线的、基于情景的”复杂系统。二者之间的缝隙, 构成了潜在的安全风险和管理挑战。

五、未来展望: 迈向实时、智能、情景感知的释压决策支持

随着算法和大数据挖掘的迅猛发展, 未来的释压程序分析有望从“后台设计工具”走向“前台支持伙伴”, 实现从“固定程序”到“动态策略”的范式转变。

1. 核心愿景: 实时释压程序评估与优化系统

构想一个集成于飞机航电系统的智能释压评估决策系统。当失压发生时, 飞行管理计算机 FMC (Flight Management Computer) 能够瞬间获取飞机当前的重量、重心、剩余燃油、发动机状态等参数, 融合实时外界环境, 接入高精度气象数据、地形数据库等信息, 通过基于 FMC 中的性能计算模块, 在数秒内精准计算紧急下降剖面以及备降改航方案。同时, 释压程序将不再是单一图形化的指令, 而是为机组提供情景化选项, 并用可视化方式(如垂直剖面图、3D 地图), 结合机载导航数据库的自动导航功能呈现。

另外, 实时的计算分析可以视情提供多方案选择。例如, 在地形允许的情况下, 可以选择最缓和方式下降, 以提高旅客舒适度感受; 在紧急下降的过程中, 给出建议的航向、目

标高度、下降时机, 以及抵达备降场所需油量等评估结果, 并避开限制区、禁区、危险区等空域限制, 还可以在必要时协助机组完成紧急状态的宣布等辅助功能。

2. 对运行流程的简化与赋能

简化机组操作。机组从“记忆程序-执行-应对突发情况”的模式, 转变为“评估智能建议-决策-监控执行”的模式。系统可自动完成部分通信(如向管制单位发送改航意向等), 大大减轻初期工作负荷。

动态风险评估。系统可实时计算并显示“安全余度”指标, 如“当前轨迹下, 氧气余量预计剩余 4 分钟”, 或“备降至 XXXX 机场所需油量为***吨, 机上剩余油量满足要求”等, 给予机组更直观的情景感知。

这一展望并非要取代飞行员的核心决策权, 而是通过技术手段, 弥补当前“静态程序”与“动态现实”之间的缝隙, 将释压处置从一项高度依赖记忆、训练和临场决断的挑战, 部分转化为一个由数据、算力和人类经验共同驱动的高效协同决策过程。

六、结论

民航客舱释压程序分析, 从高空生理学的紧迫需求出发, 已发展出一套严谨、保守、基于最坏情况的成熟评估体系。然而, 该体系在面对真实世界运行的复杂性和人为因素的变量时, 显露出“刚性程序”与“弹性环境”之间的匹配问题。

未来的安全增益, 不仅在于对程序分析本身的持续精进, 更在于利用人工智能、实时数据融合与高性能计算, 将释压分析从“事前验证”转变为“事中决策支持”。我们有望通过构建实时、情景感知的智能辅助系统, 为飞行机组在应对这场“云端时间赛跑”时, 提供更精准、更灵活、更直观的决策选项, 将人类的智慧、经验的韧性与机器的算力、数据的洞察力深度融合, 最终将民航安全的边际推向新的高度。

[参考文献]

- [1]Ernsting, J., Nicholson, A. N., & Rainford, D. J. (Eds.). (1999). Aviation Medicine (3rd ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [2]中国民用航空局. CCAR-121-R8 大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则[S]. 北京: 中国民航出版社, 2024.
- [3]U. S. Federal Aviation Administration. (2023). Airworthiness standards: Transport category airplanes (14 C. F. R. 25).

作者简介: 李洁, 出生年月: 1979.5.3, 女, 汉族, 学历: 研究生, 籍贯: 新疆, 职称: 初级, 研究专业方向: 飞机性能。