

Research Program Design on Flight Technical Error under the Condition of RNP at the Plateau Airports

Xiaoli Luo, Dexian Chen, Guangming Zhang

Civil Aviation University of China, Guanghan, China

Email: crmluo@yahoo.com.cn, ccdx@msn.com, sunprince_8888@163.com

Abstract: This paper introduced the research advancements on human behavior characters under the condition of flight technical error, RNP and high elevation environment from the point of view of crew-aircraft-environment system, in order to advance the flight safety in the environment of quite high elevation and RNP; analyzed the role flight technical error plays in the total system error under the condition of RNP; proposed the main contain, crucial problems, and methods of the research on flight technical error at the plateau airports. Therefore, the research achievement can be applied in flight training, flight procedure design and flight operation at the high elevation airports.

Keywords: plateau airport with complex terrain; flight technical error; RNP; flight safety

高原机场 RNP 条件下飞行技术误差及其研究方案设计

罗晓利, 陈德贤, 张广明

中国民航飞行学院, 广汉, 中国, 618307

Email: crmluo@yahoo.com.cn, ccdx@msn.com, sunprince_8888@163.com

摘要: 为提高高原环境和 RNP 条件下飞行安全性, 从机组-飞机-环境系统角度, 介绍了飞行技术误差、RNP 和高原环境下人的行为特征研究进展; 分析了 RNP 条件下飞行技术误差在总系统误差中的作用; 提出了高原机场飞行技术误差研究的主要内容、关键问题以及研究方法思路。其结果可用于飞行训练、高原飞行程序设计和飞行操纵。

关键词: 高原复杂机场; 飞行技术误差; 所需导航性能; 飞行安全

1 引言

飞行技术误差 (Flight Technical Error, FTE) 是飞行系统总误差 (Total System Error, TSE) 的主要组成部分, 国际上航空发达国家和 ICAO (International Civil Aviation Organization, ICAO) 在不同时期针对不同的机载设备开展了持续不断的研究, 但大多是针对平原机场进行的, 对于高海拔地形复杂机场, 尤其是针对高原复杂机场 RNP (Required Navigation Performance, RNP) 下 FTE 的研究鲜有报道, 因为世界上高原复杂机场多数集中在我国的青藏高原, 我国海拔 1500m 以上的高原地区占全国总面积的 1/3。

高原机场分为一般高原机场 (1500m ≤ 标高 < 2438m) 和高高原机场 (标高 ≥ 2438m) 两类。截至 2007 年底, 我国共有一般高原机场 12 个, 高高原机场 7 个, 其中邦达机场标高 4334m, 为全球海拔最高的商用机场, 九黄机场

天气多变、气象条件恶劣, 林芝机场周边地形环境堪称全世界最复杂机场。近年来, 越来越多的航空公司加入高原航线运行, 多个高原机场开始规划和建设, 目前在建的标高 4000m 以上的机场就有 3 个。2010 年前后, 世界上海拔排名前 4 位的商用机场均在我国青藏高原。

与低海拔地区相比, 高原机场运行具有很多不同的特点和较大难度。主要表现在高原复杂气象、复杂地形、发动机与飞机性能严重衰退、起降阶段的缺氧环境、特殊的起降程序等人-机-环问题, 会给飞行机组造成很大安全压力, 如飞行中出现较大的 FTE, 将严重危及飞行安全。为此, 必须对高原复杂环境和飞行器性能变差条件下人的表现和由此导致的 FTE 进行研究。

2 国内外飞行技术误差的研究进展

2.1 国外飞行技术误差的研究进展

FTE 概念最早源于 20 世纪 40 年代, 是伴随飞行

国家自然科学基金/民航联合基金重点项目资助: 批准号 60832012

指引 (Flight Director, F/D) 系统的研究提出的^[1]。随着航空器性能的不断改进, 尤其是飞行管理系统 (Flight Management System, FMS) 和全球定位系统等新技术和新系统的出现, FTE 的研究一直在进行。20 世纪 90 年代, 随着 RNP 概念的提出^[2], 国内外学者和研究机构又从新的角度来认识和研究 FTE^[3]。

上世纪 70 年代, 结合区域导航 (Area Navigation, RNAV) 概念, 针对 FMS 的功能, 主要从 FTE 评估和仿真方面进行研究^[4,5], 目的是给 FMS 提供 FTE 预算。随着 RNP 概念的提出, 尤其当 RNP 值很小时, 如最后进近阶段 RNP 值可以小至 0.3 甚至 0.15, 对航空器总体误差 (TSE) 控制非常严格, FTE 预算也必须严格控制。因此, 近年来国际学术界, 主要从人的因素的角度对 FTE 进行研究, 其中美国航空航天局 (NASA) 近年在该领域的研究尤其活跃^[6]。2005 年, Dr. Benjamin S. Levy 等采用 Person 模型和 Johnson 曲线分析侧向、纵向、垂直向误差分布的相关性^[7], Williams, D.M. 等采用 SATS HVO 仿真和试验对 FTE 的特征进行分析^[8]。但是, 这些研究中都没有涉及到高原飞行 FTE 的特征研究。

1996 年, Naverus 公司总飞行技术师史蒂夫·福尔顿在 Juneau 机场为阿拉斯加航空公司设计了世界上第一个终端区 RNP 程序^[9]。波音公司最先为其 B737-300 和 B737-400 飞机组装 RNP 程序, 飞机执行 RNP 程序要求由 FMS 航迹定义误差 (PDE)、手动操作飞机或者自动驾驶的 FTE 和导航系统传感误差 (Navigation System Error, NSE) 构成的总误差必须在 95% 飞行时间里都小于 RNP 的精度。随着 RNAV 和 RNP 在世界上的推广, ICAO 在 RNAV 和 RNP 实践和技术基础上提出了基于性能导航 (Performance-Based Navigation, PBN) 的概念。PBN 通过新的三维引导飞机进场、进近和离场, 提高水平和垂直方向上的精度和可靠性, 从而提高了安全水平, 提高了空域的容量和效率^[10]。2006 年 Richard Barhydt 等提出 RNAV 和 RNP 的程序设计应该考虑到人的因素^[11]。

2.2 国内飞行技术误差的研究进展

在高原机场/地形复杂机场终端区飞行, 除会遇到飞行性能、气象条件等方面的挑战外, 对航空器实施安全导航也将面临巨大的挑战。吕小平^[12]将高原机场运行问题概括为以下几个方面: 1) 高原机场普遍存在甚高频 (Very High Frequency, VHF) 作用距离近,

HF (高频) 通信系统覆盖和通信质量不稳定的情况, 特别是成都至拉萨航线的地空通信和成都至九寨航线的 VHF 通信均存在覆盖盲区。其中, 成都至拉萨航线下方基本为高山地区, 多为无人地带, 无道路、电、地面通信设施, 无法建立 VHF 遥控台, 实现 VHF 陆空通信的航线全程覆盖; 2) 受地形影响, 在高原机场建设陆基导航设备投资巨大, 其设备性能受到限制, 影响导航精度和覆盖, 容易造成仪表飞行程序的残缺; 3) 高原机场的航线普遍不在雷达的监视范围之内, 部分高原机场 (例如拉萨、九寨、丽江机场) 流量较大, 增大了飞行和管制难度, 不利于安全; 4) 由于高原机场海拔较高, 温差变化大, 影响设备使用寿命和设备校验的正常进行; 5) 缺乏针对高原机场设备配置、组织机构和人员配置、相关规章及预案等运行标准的系统研究, 高原机场保障能力和水平严重不足。

很显然, 在这类机场如果采用传统的陆基导航系统实施导航, 难以保障飞行安全。据 ICAO、美国联邦航空局 (Federal Aviation Administration, FAA) 及中国民航局 (Civil Aviation Administration of China, CAAC) 的研究, 在典型高原机场终端区飞行时, 最佳方案是实施 RNP 程序运行。FAA 从 1996 年开始研究 RNP 运行方面的问题, 其所属的相关部门制定出程序设计标准和运行批准程序^[13]。CAAC 2006 年开始也陆续制定和发布了实施 RNP 程序运行的相关规章, 提出了高原机场 CNS/ATM 解决方案, 其中包括实施以星基导航系统为基础的 RNP 飞行程序的方案。目前, 美国的 Alaska/Juneau 国际机场、中国的拉萨/贡嘎机场、林芝/米林机场、九寨机场等, 是世界上典型的使用 RNP 程序运行的机场。

机场终端区实施 RNP 程序运行, 包含两层含义: 一是 RNP 特殊仪表进近程序设计; 二是特殊航空器和机组实施 RNP 程序。对于某机组驾驶某型号航空器, 在某机场终端区执行 RNP 程序飞行, 保障飞行安全的两个重要因素是对航空器实施精确导航和稳定精确的操纵和控制。要实现这一目标, 关键之处在于在任何时候任何条件下, 航空器的 TSE 与程序设计的 RNP 值之间, 必须满足 $TSE < RNP$ 。TSE 主要由 NSE 和 FTE 构成, 这两种误差的减小都有助于实现对 TSE 的控制。

从 FTE 的形成机理来看, 手操纵时远远大于采用自动驾驶飞行。因此在 RNP 运行程序中规定, 当某机场设计的 RNP 值较小时, 为满足 RNP 值要求, 在进场进近阶段决断高/高度之前必须接通自动驾驶仪

(Autopilot, A/P)飞行, 如果F/D或A/P故障, 必须立即执行飞行手册上公布的应急程序。相应地在起飞离场阶段, 新型波音飞机规定在离地1000英尺后即可接通A/P飞行。显然, 在执行应急程序或复飞程序、复飞决断至落地、起飞至接通A/P期间, 航空器必须采用手操纵。此时的FTE将比接通A/P时大得多, 而这些阶段又是影响飞行安全的关键阶段。

在高海拔机场, 决断高度对应的飞机释压高度很高。如邦达机场标高4334米, 14跑道决断高度修正海压5000米; 贡嘎机场标高3569米, 27跑道决断高度4200米。根据大气压力和密度随高度递减的基本规律, 在标高4000米高度对应的氧气密度约为海平面的67%, 5000米高度约为60%。从航路下降到高原机场到飞机起飞到达巡航高度, 在这种低氧环境里停留时间约需要1小时, 飞行员不可避免的会受到缺氧的影响和困扰, 出现反应迟缓、意识模糊、判断力下降等生理、心理现象^[14]。在这种复杂的地形、生理、心理环境下, 飞行员的操纵产生的FTE会大于低海拔机场飞行时产生的FTE。但迄今为止相关研究仅见于缺氧对于普通人群某些心理功能、行为变化和情绪变化的影响。

吴天一^[15]在“高原低氧环境对人类的挑战”一文中指出: 海拔2000米以上, 人体开始出现缺氧反应; 海拔3000米以上, 人体的氧离曲线开始陡峭, 缺氧明显化; 海拔4500米以上, 大气压近于海平面的1/2, 此时人体出现明显的低氧血症, 并引起显著的生理反应和一系列临床问题。李学义等^[16-17]研究了急性中度缺氧对注意广度及注意转移能力的影响, 结果表明: 急性中度缺氧对注意广度和注意转移能力已构成影响, 工效不能得到保证。吴燕红等^[18]研究了急性轻、中度缺氧暴露对人的心理运动及视觉反应时的影响, 结果表明: 3600 m缺氧暴露时选择反应时的平均反应时明显延长, 运动绩效下降, 且随着高度的增加影响进一步加重; 李学义等^[19]研究了急性轻、中度缺氧对人的情绪及焦虑状态的影响, 结果表明: 急性轻、中度缺氧暴露1 h在2800 m高度水平即对人的情绪及心境产生负面影响, 随着高度的增加上述影响进一步加重; 马勇, 肖润谋等^[20-21]对高原汽车兵智力、记忆等心理品质进行了研究, 结果表明: 驾驶人处于高原低氧环境时其智力、瞬态记忆力、短时记忆力及数字顺序和操作功能都会有很大的影响。

现有的研究表明^[22], 心理加工速度(如选择反应时)和反应准确度以及工作绩效的好坏, 受任务复杂

度和环境因素影响。很显然, 由于高原复杂机场飞行时飞行员工作环境和任务的复杂性与普通人群和汽车驾驶员有巨大差异, 上述研究结果不能作为高原飞行时FTE评估的依据, 因此研究在高原低氧、复杂地形和复杂气象条件下不同飞行阶段FTE的特征, 可以为高原复杂机场决断高度、飞行程序的修订提供理论支撑, 对研究高原机场安全飞行技术具有重要的意义。

3 目前主要研究内容和关键问题

结合国内外对低海拔机场终端区实施RNP程序飞行的研究和应用现状, 针对我国现有典型高原机场地形、气象特点和人的因素, 以及RNP运行现状, 提出如下研究内容:

1) 高原机场FTE误差特征分析: 高原机场无论是自动驾驶还是手操纵所产生的FTE在横向、纵向和垂直向都具有分布特点, 根据统计原理对飞行员在环(即手操纵)FTE和非在环(即自动驾驶仪操纵)FTE的误差特征进行分析, 找出分布规律。

2) 空中风、气温、气压对FTE的影响分析和研究: 空中风将影响飞机的航迹, 气温、气压将影响气压高度表的测高精度。虽然在高原复杂机场RNP运行的航空器都必须通过认证并具备高度表温度补偿能力, 但由于高原机场终端区可能出现超绝热现象, 风、气温、气压变化快, 可能导致气压高度表测高精度降低, 产生FTE增加TSE。

3) 人的因素对FTE的影响分析和研究: 在高原复杂机场终端区飞行, 由于高原缺氧和心理紧张, 飞行员在环手操纵时, 反应和决断时延可能会增大, 错误率可能会增加, 操纵精确度可能会下降, 导致FTE和TSE增高; 非在环自动驾驶仪操纵时, 也可能会由于缺氧与心理紧张, 导致机组脱漏视听信息(如仪表信息、管制信息等), 增加FTE和TSE。

目前需要解决的关键问题有:

1) 高原机场FTE统计模型建立: 不同的统计模型对FTE的统计分析结果将会有所区别, 一个恰当的统计模型能非常近似拟合高原机场终端区飞行时, 所产生的FTE的分布规律。

2) 气温、气压突变对气压高度表测高精度影响模型建立: 高原机场终端区域由于超绝热现象的出现, 气温、气压不按照标准状况变化和分布, 对气压高度表测高精度的影响是综合的而不是孤立的, 建立精确的误差模型是该问题研究的关键。

3) 高原机场驾驶员的行为特性以及不良人机耦合的关键诱因、触发机制: 虽然针对平原环境普通人群简单任务的高原缺氧行为特征已有大量研究, 但针对高原复杂机场、情绪紧张以及复杂飞行任务条件下的飞行员行为特征的研究尚未见报道, 该问题的解决是正确评估 FTE 的关键。

4 研究方案设计

通过对典型高原航路和机场的 QAR 飞行数据 (Quick Access Recorder, QAR) 进行分析, 提取与 FTE 相关的数据和信息, 结合高原气象和人的因素建立高原飞行 FTE 统计分析模型, 研究高原飞行 FTE 的特征。采用低压舱并结合飞行练习器实验与心理测量方法, 模拟典型高原机场进离场环境的氧含量、温度、湿度等环境参数, 研究飞行员完成飞行任务的绩效变化(如航迹变化)及行为特征(如反应速度和错误率变化、认知与情绪变化等); 采用心理测量方法, 研究机组心理特征及影响飞行员工作绩效的因素, 为正确评估 FTE 提供支撑。分为两个子方向: 1) 高原环境人的行为特征研究: 研究飞行员在高原缺氧和复杂任务条件下的反应和决断时延、错误率; 非在环 (即自动驾驶仪操纵) 和在环时的飞行技术误差 FTE 和系统总误差 TSE。2) 高原机场复杂环境下 FTE 评估及其对 RNP 运行影响: 根据高原环境下人的行为特征对飞行员在环(即手操纵)FTE 和非在环 FTE 的误差特征统计分析, 找出分布规律。结合高原机场复杂气象环境对垂直导航精度的影响, 研究产生 TSE 的机理并对 FTE 评估, 分析产生 FTE 的主要诱因及其对飞行安全, 尤其是对 RNP 安全运行的潜在威胁。研究方案见图 1:

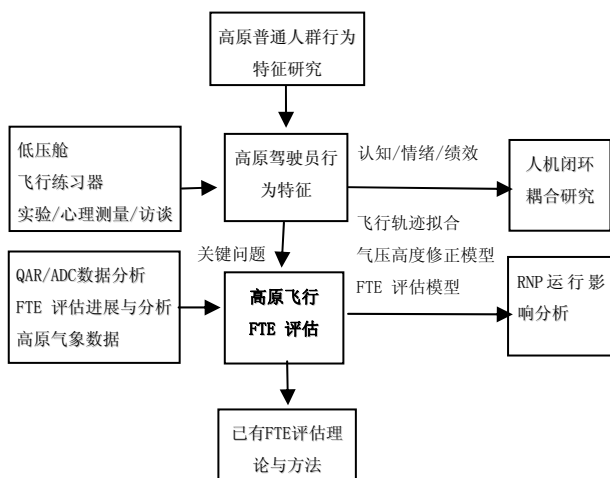


图 1. 高原机场 FTE 评估及飞行员行为特征研究方案

5 小结

随着RNP程序在高原航线的推广, 以及PBN概念提出后航行方式从基于传感器导航转变到基于性能导航, PBN作为未来导航技术主要发展方向, 在与其他技术不断融合的情况下^[23], 本课题将提出基于复杂地形、复杂气象条件、人的因素等重要影响因素下, 高原复杂机场终端区飞行时FTE分布特征及对RNP运行的影响的评估方法, 并通过理论分析和数值仿真等手段, 评价所提出的新理论和新方法, 为高原复杂机场终端区实施RNP程序安全飞行提供理论支撑。

References (参考文献)

- [1] Michael Carriker, Darcy Hilby, Drew Houck, H. Rolan Shomber. Flight Technical Error [EB]. http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/aero_16/navigation_flight_tech_error.html.
- [2] Doc 9613-AN/937, Manual of Required Navigation Performance [S].ICAO, 1999.
- [3] Required Navigation Performance[R].Boeing, 2003.11.
- [4] Adams,R.J. An Operational Evaluation of Flight Technical Error[R].1975.7.
- [5] Eldredge, Donald, Crook, Warren G. Crimbring, William R. Simulation Tests of Flight Technical Error in 2D/3D Area Navigation(RNAV) Using a Multiple Waypoint RNAV System with and without a Flight Director System[EB]. <http://stinet.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA047246>
- [6] Richard Barhydt, Catherine A. Adams. Human Factors Considerations for Performance-Based Navigation [R].NASA, 2006.12.
- [7] Dr.Benjamin S.Levy, Dr.Pradip Som, Dr.Richard Greenhaw. Analysis of Flight Technical Error on Straight Final Approach Segments[C].59th ANNUAL MEETING PROCEEDINGS, 2003, P456-467.
- [8] Williams,D.M., Consiglio,M.C. Flight technical error analysis of the SATS higher volume operations simulation and flight experiments[C].Digital Avionics Systems Conference,2005.
- [9] Fred George. RNP Approach and Departure Procedures [J].FIP Journal, 2009.8.
- [10] David Nakamura, William Royce. 2008, Operational Benefits of Performance-Based Navigation, Boeing Company, 2008[EB]. www.boeing.com/commercial/Aeromagazine.
- [11] Richard Barhydt and Catherine A. Adams. Human Factors Considerations for Performance-Based Navigation[R]. NASA, 2006.12.
- [12] Li Xiaoping. The CNS/ATM Solution of the Plateau Airports in China [J].China Civil Aviation, 2006.7,P27-31(Ch). 吕小平.中国民航高原机场 CNS/ATM 解决方案[J].中国民用航空, 2006.7, P27-31.
- [13] United States Standard for Required Navigation Performance (RNP) Approach Procedures with Special Aircraft and Aircrew Authorization Required (SAAAR) (8260.52)[S]. FAA, 2005.6.
- [14] Research on Hypoxia Physiology and Plateau Medicine [A]. Xiangshan Science Conference the 166th Seminar[C]. China Basic Science, 2001.9, P37-42(Ch). 低氧生理学高原医学研究[A].香山科学会议第 166 次学术讨论会会议综述 [C]. 中国基础科学, 2001.9, P37-42.
- [15] WU Tianyi. The Challenge of Plateau and Hypoxia Environment to Human being [J].Journal of Medical Research, 2006.10, P1-3(Ch). 吴天一.高原低氧环境对人类的挑战[J].医学研究杂志, 2006.10,

- P1-3.
- [16] LI Xueyi, WU Xingyu, FU Chuan, SHEN Xiaofeng, YANG Chang-bin, WU Yanhong. Effects of Acute Exposure to Mild or Moderate Hypoxia on Human Psychomotor Performance and Visual-reaction Tim[J]. *Aerospace Medical and Medical Research*, 2000.4, P235-239(Ch).
- [17] LI Xueyi, WU Xingyu, HANG Liping, LI Ying, WANG Tao. The Impact of Acute and Moderate Hypoxia on Attention Scope and Attention Diversion[J]. *Journal of Fourth Military Medical University*, 1999.1, P71-73(Ch).
李学义, 吴兴裕, 韩厉萍, 李应, 王涛. 急性中度缺氧对注意广度及注意转移能力的影响[J]. 第四军医大学学报, 1999.1, P71-73.
- [18] WU Yanhong, LI Xueyi, WU Xingyu, YANG Changbin, CAO Xinsheng, ZHANG Shu. The Impact of Acute Mild or Moderate Hypoxia on Psychomotor and Reaction Time[J]. *Journal of Preventive Medicine of Chinese People's Liberation Army*, 2004.2, P82-85(Ch).
吴燕红, 李学义, 吴兴裕, 杨长斌, 曹新生, 张舒. 急性轻、中度缺氧暴露对心理运动及反应时的影响[J]. 解放军预防医学杂志, 2004.2, P82-85.
- [19] LI Xueyi, WU Xingyu, FU Chuan, SHEN Xiaofeng, WU Yanhong, WANG Tao. The Impact of Acute Mild or Moderate Hypoxia on Emotion[J]. *Space Medicine and Medical Engineering*, 2000.13, P1-5(Ch).
李学义, 吴兴裕, 付川, 沈小凤, 吴燕红, 王涛. 急性轻、中度缺氧暴露对人情情绪的影响[J]. 航天医学与医学工程, 2000.13, P1-5.
- [20] MA Yong, ZHANG Rong. Analysis of the Intelligence, Memory and Psychologic Tests of Automobile Soldiers[J]. *Journal of China Mental Health*, 1999 .1, P48-49(Ch).
马勇, 张戎. 高原汽车兵智力、记忆、心理测验分析[J]. 中国心理卫生杂志, 1999 .1, P48-49.
- [21] XIAO Runmou, YUN Weigu, XU Tianbing. The Vehicle Drives Safety on the Long, Flat and Straight Roads[J]. *Journal of Chang An University(natural science edition)*, 2007 .3, P76-79(Ch).
肖润谋, 运伟国, 徐田兵. 高原长平直线公路汽车行驶安全[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2007 .3, P76-79.
- [22] YAN Jinhong. The Relationship of Reaction Time and Accuracy of Action Speed[J]. *Sports Science*, 2001.1, P66-78(Ch).
严进洪. 反应时与动作速度精确度之关系[J]. 体育科学, 2001.1, P66-78.
- [23] China Civil Aviation PBN Implementation Route Map[S]. *Civil Aviation Administration of China*, 2009.10.
中国民航基于性能的导航实施路线图[S]. 中国民航局, 2009.10.