

用于飞行品质分析的操纵差错分析及应用

张雨乐, 庄夏, 王泽潭, 孙晓雨
中国民用航空飞行学院, 四川 广汉 618307

摘要 : 作为飞行安全的决定因素, 飞行员核心胜任能力是民航安全的重要保障, 如何在初始训练阶段尽快实现从基于任务 / 科目的训练向基于胜任力的训练转变是当前全行业面临的课题。本文研究了用于飞行品质分析的飞行操纵差错分析技术, 构建了飞行航线差错评估体系, 开发了飞行员航线飞行操纵差错智能管理平台, 能实现航线飞行操纵差错的智能化识别和预警, 并把飞行员航线操纵出现的差错类型、持续时间、是否修正等因素进行统计, 形成科学的统计数据, 给训练机构作为训练方案制定的依据。

关键词 : 飞行品质分析; 操纵差错; 模型; 智能化

Analysis Technique and Application of Maneuvering Errors for Flight Quality Evaluation

Zhang Yule, Zhuang Xia, Wang Zetan, Sun Xiaoyu
Civil Aviation Flight University of China, Guanghan, Sichuan 618307

Abstract: As a determining factor of flight safety, the core competency of pilots is an important guarantee for civil aviation safety. How to quickly transition from task/subject-based training to competency-based training in the initial training stage is a current issue facing the entire industry. This paper investigates flight maneuvering error analysis techniques for flight quality evaluation, constructs an evaluation system for flight route errors, and develops an intelligent management platform for pilot flight maneuvering errors. This platform enables intelligent identification and early warning of flight maneuvering errors, and collects statistical data on the types of errors, duration, and whether corrections were made during pilot flight maneuvers. These scientific statistics provide a basis for training institutions to develop training programs.

Keywords: flight quality analysis; maneuvering errors; model; intelligence

引言

通用航空领域的飞行事故多数是人为因素造成的, 面对通航从业人员的技术薄弱环节, 民航局对飞行员训练和培训提出了更高要求。民航飞行员的培养模式要与时俱进, 需要实现三个转变, 即培训理念上, 从执照飞行员到职业飞行员培养的转变; 训练方式上, 从基于科目和时间的积累到基于核心胜任能力训练与评估的转变; 管理模式上, 从飞行员培训分阶段管理到全生命周期管理的转变。因此, 如何提高飞行员训练效率与质量 and 如何对飞行员操纵飞机时出现的差错进行监控、量化和评估, 是飞行品质监控研究的关键问题, 也是飞行员核心胜任能力训练与评估智能化、科学化的关键技术^[1]。

飞行训练成绩是判别飞行员训练水平最直观有效的方法。传统的飞行训练评分方法通常由飞行教员或专家根据对飞行员操纵行为的观察, 结合其飞行经验以及飞行参数与训练轨迹大纲要求的对比, 进行人工评分。然而, 这种评分方式容易受到评分人员的主观判断和能力差异的影响, 并且需要大量人力, 评分过程既耗时又低效, 且具有一定的随机性和主观性。因此, 运用大数据和新兴计算机技术, 建立飞行训练的差错分析和评估模型, 实现应用软件平台, 对飞行训练中的人工差错进行自动评分, 实现飞行训练数据和成绩的信息化管理, 这能提升飞行学员的飞行技能和安全意识, 从而减少飞行事故中由人为因素引起的风险^[2]。

一、TEM 模型

威胁与差错管理 (Threat and Error Management, TEM) 模型是一种以主动预防和动态干预为核心的安全管理工具, 旨在通过系统化流程帮助操作者识别、评估和应对威胁与差错, 从而

将风险控制在可接受范围内。在飞行训练品质监控中, TEM 模型不仅为提升训练效果提供理论支撑, 更成为优化飞行员决策能力、强化安全文化的重要工具。飞行训练的核心目标是通过模拟真实飞行环境, 培养学员的风险感知能力、技术操作水平和应急处置技能。训练过程中学员可能面临多重挑战, 传统训练模式往

基金项目: 四川省科技计划项目 (2023YFG0171)。

作者简介: 张雨乐 (1999.03-), 女, 在校研究生, 研究领域计算机网络。

往侧重技术动作的重复练习，而 TEM 模型则从“人－机－环境”交互的视角切入，强调在动态情境中培养学员的主动风险管理能力。这种理念与飞行训练品质监控的目标高度契合——后者需要通过数据收集、行为分析和反馈改进，持续提升训练的科学性与安全性^[3]。

(一) 威胁识别与训练场景设计

飞行训练品质监控的首要任务是确保训练场景能够真实反映实际飞行中的威胁。基于 TEM 模型，威胁可分为两类：显性威胁：如模拟湍流、引擎失效、起降跑道冲突等，需通过高保真模拟器或特情课目设计复现；隐性威胁：如学员的认知负荷超限、团队沟通障碍或决策犹豫，需借助生理监测设备（如眼动仪、心率传感器）和语音记录分析捕捉。

在品质监控中，教员需结合学员的能力阶段，动态调整威胁的复杂程度。例如，初级学员以单一威胁应对为主（如侧风着陆训练），而高级学员则需在多重威胁叠加的场景中（如低能见度下应对通讯中断）锻炼优先级判断能力。训练系统通过记录学员的决策路径、操作响应时间及错误率，量化其威胁管理水平，并为个性化训练方案提供依据。

(二) 差错分析与行为矫正

飞行训练中的差错是学员能力成长的必经环节，但未经管理的差错可能固化为危险习惯。TEM 模型强调“差错可管理”而非“零差错”，这一理念在飞行品质监控中体现为以下步骤：

差错分类：根据国际航空标准，将差错分为技能型（如操纵动作粗糙）、程序型（如检查单执行遗漏）和决策型（如绕飞路径选择不当）。

根源追溯：通过回放飞行参数（如舵面偏转幅度、航向保持精度）和舱内语音记录，分析差错是源自知识缺口、情境意识不足还是心理压力。

干预策略：针对高频差错设计专项训练模块。例如，若学员在紧急下降程序中频繁忽略高度检查，可通过虚拟现实（VR）场景强化视觉－听觉提示训练；若团队协作差错突出，则引入机组资源管理（CRM）模拟课目。

二、航线飞行操纵差错的智能化识别和预警机制

通过大数据处理平台，把监视数据、气象数据、航图数据、飞机性能数据和飞行计划数据等进行数据挖掘和数据融合处理，建立航线智能匹配算法，根据航线飞行操纵差错标准体系，建立地面实时评估预警平台。为飞行员对飞机在航线上的飞行操纵实时监测，时刻提醒飞行员飞机在航线上的姿态，为飞行学员的技术提高提供一种教学方法。为了实时智能化识别操纵差错并给出预警，需要涉及多个传感器的数据，包括数据获取、数据预处理、数据融合、算法匹配、预警方法和预警机制。

(一) 多源数据获取及预处理

多源数据获取是航线飞行操纵差错智能管理系统的核心基础，其目标是通过多样化的数据采集渠道与先进的技术手段，实时、完整地获取飞行运行中“人－机－环”多维数据，为后续差

错识别与预警提供可靠的数据支撑。本文针对通航飞机数据采集分散、实时性不足等问题，构建了一套融合机载传感器、地面监视系统与气象情报的多源异构数据采集体系，数据来源多样，各数据源在差错管理中的核心作用如下表所示。

表1 多源数据功能作用表

数据类别	典型参数	功能作用
机载传感器数据	俯仰角偏差、舵面响应延迟	直接量化飞行员操纵精度，识别杆量过大、修正滞后等技术短板
	ADS-B 轨迹数据	航迹偏离距离、地速波动
气象数据	侧风分量、湍流强度	区分环境干扰与人为失误，例如加强侧风下航向偏差的容错阈值动态调整
机型性能数据	失速速度	设定速度包线告警阈值，防止学员在低速机动中触发失速
语音与视频数据	检查单执行时间、标准喊话遗漏	评估 CRM（机组资源管理）能力，识别程序执行疏漏与非技术性差错

针对设备数据接口的多样性、数据传输协议各不相同，在数据集中处理平台的基础上，构建多源异构数据综合治理体系，包含统一的数据标准体系、数据采集、数据交换、数据开放、数据质量等的建设，实现对各类元数据处理，为多源异构数据的共享提供有效保证。数据预处理是确保数据质量的关键，主要步骤包括：缺失值处理、异常值检测与处理、时间格式统一、地理数据处理、数据规范化和特征工程等。

(二) 多源数据融合技术问题

1. 数据异构性与语义对齐

飞行训练数据涵盖结构化参数（如高度、速度）、半结构化数据（如飞行计划）及非结构化数据（语音指令、视频画面）。这些数据在格式、频率、语义上存在显著差异，如语音数据中的“检查单响应延迟”需与 SD 卡记录的舵面动作时间戳匹配。若未实现有效对齐，可能导致误判。解决方案：开发事件驱动架构（EDA），以 UTC 时间戳为核心构建全局事件总线，所有数据源在预处理阶段注入事件标签（如“起飞阶段开始”“进近指令下达”），通过复杂事件处理引擎实现跨模式关联。

2. 实时性与计算资源瓶颈

飞行数据具有高吞吐（单机1Hz产生200+参数）、低延迟（预警响应≤1.5秒）的特点，传统批处理架构难以满足需求。初期测试中，未优化的 LSTM 模型推理延迟达120 ms，导致多架次并行处理时系统吞吐量不足，预警延迟飙升至3秒以上。解决方案：采用分层计算优化策略，尽量匹配低冗余度方案，目前将实时性要求降低，待后续网云或硬件加速技术成熟后，再提高实时性指标。

3. 极端场景下的鲁棒性保障

飞行训练中偶尔出现 ADS-B 信号丢失、气象站数据中断等极端情况，可能引发系统误判。初期测试显示，在 ADS-B 信号丢失

超过30秒时,系统错误率上升明显。解决方案:设计动态降级策略:一级降级:信号丢失<10秒时,启用卡尔曼滤波预测航迹;二级降级:丢失10~30秒时,切换至SD卡数据+惯性导航补偿;三级降级:丢失>30秒时,触发“数据不可靠”告警,建议教员接管。

(三) 预警机制与方法

基于TEM模型,本文构建了“威胁预判→差错抑制→状态恢复”的三级闭环管理预计机制。其核心逻辑为:(1)威胁预判:通过历史案例库与实时环境数据预测潜在风险,例如在强侧风区域提前收紧航向偏差阈值;(2)差错抑制:利用规则引擎匹配飞行参数异常,触发标准化修正指令(如“增加右舵量10%”);(3)状态恢复:对持续未修正的UAS实施强制介入(如教员接管或终端告警),确保安全裕度恢复。

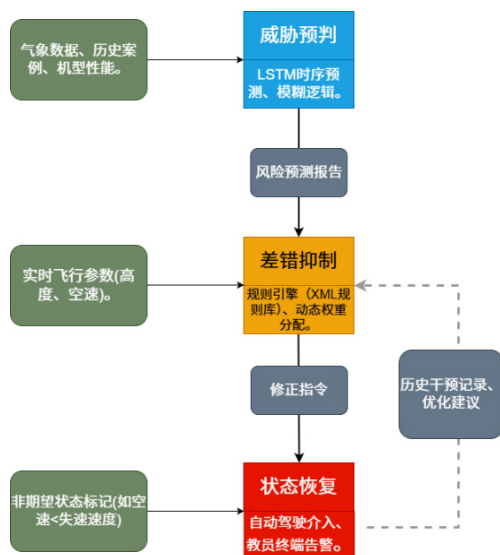


图1 三级闭环管理预计机制

本文采用基于规则的预警机制。根据《航线运输驾驶员整体课程训练大纲》中对学员航线飞行偏差控制的标准要求,结合威胁差错管理理念,将学员在航线飞行中出现的偏差按程度分为威胁、差错、非预期状态三类,利用大数据平台记录学员在航线飞行中出现的差错种类和频次,对学员飞行质量进行科学分析,并结合数据提出训练建议。

1. 私照转场阶段

威胁:高度偏差 $\pm 50\text{ft}$ 、航向偏差 $\pm 10^\circ$ 、航迹偏差 $\pm 0.5\text{NM}$ 、速度偏差 $\pm 10\text{kt}$ 。

差错:高度偏差 $\pm 100\text{ft}$ 、航向偏差 $\pm 15^\circ$ 、航迹偏差 $\pm 1\text{NM}$ 、速度偏差 $\pm 15\text{kt}$ 。

非预期状态:高度偏差 $\pm 200\text{ft}$ 、航向偏差 $\pm 20^\circ$ 、航迹偏差 $\pm 2\text{NM}$ 、速度偏差 $\pm 00\text{kt}$ 。

2. 仪表转场阶段

威胁:高度偏差 $\pm 50\text{ft}$ 、航向偏差 $\pm 5^\circ$ 、航迹偏差 $\pm 0.3\text{NM}$ 、速度偏差 $\pm 5\text{kt}$ 。

差错:高度偏差 $\pm 100\text{ft}$ 、航向偏差 $\pm 10^\circ$ 、航迹偏差 $\pm 0.5\text{NM}$ 、速度偏差 $\pm 10\text{kt}$ 。

非预期状态:高度偏差 $\pm 150\text{ft}$ 、航向偏差 $\pm 20^\circ$ 、航迹偏

差 $\pm 1\text{NM}$ 、速度偏差 $\pm 20\text{kt}$ 。

3. 商照训练阶段

威胁:高度偏差 $\pm 50\text{ft}$ 、航向偏差 $\pm 5^\circ$ 、航迹偏差 $\pm 0.3\text{NM}$ 、速度偏差 $\pm 5\text{kt}$ 。修正时间15s。

差错:高度偏差 $\pm 100\text{ft}$ 、航向偏差 $\pm 10^\circ$ 、航迹偏差 $\pm 0.5\text{NM}$ 、速度偏差 $\pm 10\text{kt}$ 。修正时间15s。

非预期状态:高度偏差 $\pm 150\text{ft}$ 、航向偏差 $\pm 20^\circ$ 、航迹偏差 $\pm 1\text{NM}$ 、速度偏差 $\pm 20\text{kt}$ 。修正时间30s。

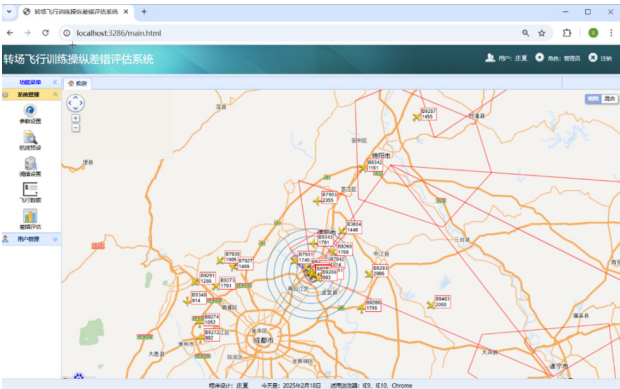
三、飞行员航线飞行操纵差错智能管理平台

基于本文理论,开发实现的飞行员航线飞行操纵差错智能管理平台涉及飞行管理、航空器监控、轨迹还原、飞行任务及航空器航线规划等方面,利用后台基础数据如航图、地形、人员、飞行课程及飞机信息等数据,绑定飞行器和飞行学员、飞行教官等不同角色,参照飞行大纲要求,以多源数据为驱动,评价航线飞行操纵品质、还原飞行行为、改进飞行操纵等为飞行训练评价提供支撑。基于现有的ADS-B系统,融合SD卡中的飞行参数、气象数据、航图数据、飞机性能数据和飞行计划数据,实现飞行参数的获取和实时传输,最终构建飞行员航线飞行操纵差错评估模型,实现对飞行员在航线上操纵飞机时出现差错的智能评估和管理^[4-5]。



图2 飞行员航线飞行操纵差错智能管理平台系统构架

飞行员航线飞行操纵差错智能管理平台设计目标是提高飞行安全性,通过实时监测和分析飞行员的操纵行为,及时发现潜在的操纵差错,减少事故风险;为飞行员提供针对性的培训建议,帮助其提升操作技能和应对能力;为飞行训练和飞行管理部门提供决策支持,优化飞行操作流程和管理策略;通过智能分析和优化建议,帮助飞行员更高效地完成飞行任务。系统平台上线后,在绵阳分院进行了试用,经过近半年的系统使用和测试,不断优化完善系统功能,实测该平台性能参数优异,其监控目标数: ≥ 500 个/秒;信息显示响应时间: ≤ 1 秒;系统并发数: ≥ 50 个;虚假率: $\leq 5\%$;平均无故障时间: $\geq 7 \times 24$ 小时。基于该平台的飞行操纵差错标准体系在飞行教员及学员中的满意度超过90%^[6-7]。



> 图3 管理平台数据源处理显示

四、结论

本文阐述了威胁与差错管理模型在飞行品质监控中的应用场景，研究了用于飞行品质分析的飞行操纵差错分析技术，构建了飞行航线差错评估体系，开发了飞行员航线飞行操纵差错智能管理平台，对飞行训练中的人工差错进行自动评分，实现飞行训练数据和成绩的信息化管理，这能提升飞行学员的飞行技能和安全意识，从而减少飞行事故中由人为因素引起的风险。

参考文献

- [1] 周长春, 蒋澜, 赵新宇. 通用航空飞行品质监控运行管理 [J]. 中国民航飞行学院学报, 2019, 30(01): 39-42.
- [2] Munir N, Awrangjeb M, Stantic B. Power Line Extraction and Reconstruction Methods from Laser Scanning Data: A Literature Review[J]. Remote Sensing, 2023, 15(4): 973.
- [3] Sun H, Zhou X, Zhang P, et al. Competency-based assessment of pilots' manual flight performance during instrument flight training[J]. Cognition, Technology & Work, 2023, 25(4): 345-356.
- [4] 尹大伟. 基于飞参数据的飞行学员飞行训练质量辅助评估研究 [J]. 航空标准化与质量, 2023, (S1): 116-120.
- [5] 汪磊, 邹颖, 王朔. QAR 数据驱动的飞行员不安全操作行为量化评价 [J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(05): 49-56.
- [6] 徐建航. 私照训练阶段飞行学员胜任力评级标准研究 [D]. 中国民用航空飞行学院, 2024.
- [7] 刘浩, 王昊, 孟光磊, 等. 基于动态贝叶斯网络和模糊灰度理论的飞行训练评估 [J]. 航空学报, 2021, 42(08): 250-261.