

基于飞行数据可视化的通用航空事故调查技术分析

李明 宫献鑫

中国民用航空飞行学院, 四川 德阳 618300

摘要: 通用航空事故存在现场损毁严重、证据碎片化、飞行器机载记录配置不均衡等现实问题, 传统的调查手段难以完整还原事故过程。以多源飞行数据为依托, 通过时序解析、三维航迹重构和多信息融合可视化技术搭建适配通航场景的数据处理和场景复现体系, 对典型事故类型进行状态还原和诱因研判。飞行数据可视化技术将位置、操纵、动力等异构参数的时空联系打通, 将抽象的飞行参数变成可以观测的动态场景, 缩短异常状态识别周期, 清楚地还原出事故演变全过程。该技术可以丰富通航事故调查的量化分析手段, 数字孪生、云边协同等前沿方向会进一步提高事故溯源能力, 促进通航安全调查技术体系的更新换代。

关键词: 飞行数据可视化; 通用航空; 事故调查; 三维航迹重构; 多源数据融合

DOI: 10.64649/yh.shygl.issn3105-0085.202609026

0 引言

通用航空因其作业场景多样、运行环境复杂、航空器种类繁多, 事故率一直高于运输航空。传统的事故调查依靠残骸分析、目击者的陈述、飞行数据记录器的离线解读, 存在数据维度割裂、时序还原困难、空间态势模糊等问题^[1]。随着航电系统数字化程度提高, 现代通用航空器可以采集到数百个飞行参数, 包含气动、动力、操纵、导航等各个子系统, 如何从大量的时序数据中快速地提取出事故线索, 并建立起连贯的事件链条, 已然成为事故调查的主要难题。飞行数据可视化将抽象的参数转化为直观的图形、轨迹和态势图, 为调查人员提供跨维度、跨时序的认知工具。近年来, 三维地理信息系统、WebGL 渲染引擎、数字孪生等技术日趋成熟, 飞行数据可视化由原来的静态图表变为交互式的多模态呈现, 在事故原因定位中起着越来越重要的作用。

1 飞行数据可视化在通用航空事故调查中的应用基础

飞行数据可视化技术框架按照从原始数据到认知呈现的分层逻辑, 依次分为数据接入层、预处理层、分析计算层和可视化渲染层。数据接入层对接 FDR、CVR、GPS、ADS-B 等多源异构数据, 实现格式解析、时间对齐, 以事故时刻 t_0 为锚点统一时间轴。预处理层是保证可视化质量的重要环节, 包括异常值检测剔除、缺失值插值、坐标系统统一、单位标准化。

采用滑动窗口统计结合航空器物理边界约束识别异常值, 对于姿态角变化率, 设定物理上限阈值 $\theta_{\max}$, 当采样时刻 t_i 满足:

$$\left| \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{t_{i+1} - t_i} \right| > \theta_{\max}$$

则判定该采样点俯仰角 θ 为异常数据并标记。缺失值按照参数特性选择线性或者样条插值, 线性插值公式为:

$$x(t) = x_k + \frac{x_{k+1} - x_k}{t_{k+1} - t_k}(t - t_k), t \in [t_k, t_{k+1}]$$

坐标系将 WGS-84 大地坐标转换成以事故现场为原点的局部东北天切平面坐标^[2]。分析计算层派生垂直速度、航径角、剩余能量状态等指标, 航空器单位重量总能量 E 计算公式:

$$E = h + \frac{v^2}{2g}$$

式中: h 为离地高度, v 为真空速, g 为重力加速度。渲染层将计算结果映射为折线图、热力图、三维轨迹等形式, 在保证数据真实性的基础上最大化信息密度和交互效率。

2 飞行数据可视化的核心技术方法

2.1 时序数据可视化与异常状态识别

时序数据可视化是事故调查最基本的分析方法, 关键在于将多通道参数按统一的时间轴展开, 用参数的联动来揭示事故演化因果链条。现代时序可视化用分层联动的方式, 将时间轴当作公共维度来分组绘制子图, 十字光标可以同时读取多个参数的值, 解决了传统多折线图线条重叠的问题。

参数相关性热力图将两参数相关系数用颜色矩阵表示出来, 可以迅速找出异常耦合, 升降舵偏转和俯仰角速度相关性突然下降, 则说明操纵系统出现问题。异常识别常用包线阈值检测、统计模型离群检测, 前者将飞行包线叠加时序图自动高亮越限参数, 后者用正常数据训练自编码器判定异常时段。时序可视化的核心价值就是通过多参数联动来确定事件的先后

顺序和因果关系, 扭矩下降和空速下降的时间差可以区分出发动机失效减速还是飞行员主动收油门, 对事故认定意义重大。

2.2 三维飞行轨迹重建与空间态势分析

三维飞行轨迹重建将离散的位置和姿态数据变成连续的空间运动模型, 是还原事故空间环境、航空器相对态势的主要技术。轨迹重建用FDR或者GPS位置数据作为输入, 通过贝塞尔曲线拟合或者动力学约束的状态空间插值来生成平滑的航迹, 防止转弯段出现折线现象^[3]。

姿态信息叠加是在每一个采样点上附加俯仰、横滚、航向这三个自由度的姿态矩阵, 通过三维飞行器模型来展示航空器的空间朝向和操纵状态, 可以直接观察到机翼异常倾斜、机头持续下俯等危险姿态。空间态势分析将数字高程模型、卫星影像、障碍物数据库、气象数据叠加到同一个三维场景中, 数字高程模型生成离地高度时序曲线可以精准定位撞地接触点和接触角度, 障碍物数据库以碰撞体形式评价杆塔、建筑物、风力发电机等的穿越风险, 气象数据将风场、云层、能见度插值到轨迹时空位置, 用流线或者体渲染呈现不利气象区域。

2.3 多源数据融合与协同可视化

多源数据融合与协同可视化就是打破单一数据源的信息壁垒, 将飞行参数、语音、雷达、气象等异构数据在统一的时空框架内整合呈现, 给事故调查提供全景式的证据视图。

数据融合的第一大难题就是时空对齐, 需要依靠事件关联法将不同时间源的时间轴精确对准到毫秒级。设数据源A时间序列为 t_A , 数据源B时间序列为 t_B , 时间偏移量为 Δt_{offset} , 校准模型:

$$t_A = t_B + \Delta t_{\text{offset}}$$

例如用CVR起落架收起音响和FDR起落架位置信号的对应关系完成校准。融合之后采用多视图联动架构, 即三维轨迹、时序参数、语音转写、雷达画面和事件时间线视图, 所有视图共享同一个时间游标, 调查人员观察机动作作的时候可以同时看到机组对话和操纵面数据, 从而形成完整的事件链。语音协同可视化可以提取近地告警语音、失速警告抖杆声等重要的音频事件, 并自动标注, 和飞行参数异常时刻进行交叉验证。更高阶的语义级融合是从各个数据源中提取出结构化的事件来构建因果图, 当数据源描述不一致的时候系统会自动标记出差异并提示核查。

3 基于飞行数据可视化的通用航空事故调查应用

3.1 典型事故场景中的可视化应用

3.1.1 可控飞行撞地与空间态势还原

可控飞行撞地是指航空器在完全可控的情况下, 由于机组对地形没有感知而撞地, 是通用航空致死率最高的事故类型。核心调查问题就是确定撞地前是否具备正常飞行性能、机组是否知道地形威胁、为什么没有规避。三维轨迹和数字高程模型叠加可视化是还原空间态势的首要方式, 将重建的航迹投影到高精度地形表面, 展示航空器相对于山脊峡谷的空间位置, 计算离地高度变化曲线, 在撞地点标注接触角和速度。典型山区事故中经常出现进近阶段持续低于标准剖面的情况, 机组由于夜间低能见度不能感知地形抬升, 近地告警时刻和规避动作之间的时间差可以用时序联动视图来准确测量。

3.1.2 失速螺旋与操纵时序分析

失速螺旋事故多发生在训练飞行、农林作业、低空通场等阶段, 调查重点是确定失速触发条件、螺旋进入过程、改出操纵有效性。时序数据可视化在这里起着不可替代的作用, 因为失速螺旋的演化是在数秒到数十秒内完成的, 需要很高的时间分辨率来还原操纵输入和响应之间的因果关系。分析时用联动时序图来展示空速、迎角、姿态角和各舵面偏转的联动情况, 标注失速警告触发、机翼下坠、螺旋完全发展等重要节点。螺旋进入阶段主要分析方向舵副翼使用是否正确, 错误蹬舵或者打副翼会加剧偏航滚转耦合, 时序图中表现为操纵面偏转和响应的反常相位关系。三维轨迹显示螺旋旋转方向、圈数、下降率, 时序联动视图可以准确测量改出动作的延迟时间、幅度是否达标^[4]。

3.1.3 发动机失效与滑翔决策评估

发动机失效属于单发通用航空器最严重的紧急情况, 调查时要评判失效缘由, 滑翔决策是否合理, 迫降场挑选是否恰当。发动机监控数据时序可视化是诊断的起点, 将转速、涡轮间温度、燃油流量、扭矩等参数按照时间轴排列起来, 可以发现突然停转、功率下降或者异常超温等失效模式, 突然停转伴随着燃油流量突然下降, 指向供油中断。三维轨迹和能量状态协同可视化是评价滑翔决策的主要手段, 将失效后的高度、空速、位置投影到三维地形上, 叠加根据滑翔比计算出的可达区域, 判断迫降场是否在可达范围内, 是否存在更好的选择。很多事故中飞行员为了返场或者选择远处的场地而转弯过头造成高度损失超滑翔能力, 三维轨迹中转弯半径和可达区域的收缩可以清楚地

看到决策失误，CVR 记录还原决策时间线。以上要点归纳为表 1。

表1 典型通用航空事故场景可视化分析要点

事故类型	核心可视化方法	关键监控参数	调查重点
可控飞行撞地	三维轨迹 + 地形叠加	离地高度、航径角、下降率	地形感知盲区、进近剖面偏差
失速螺旋	时序联动 + 姿态三维	迎角、空速、坡度、舵面偏转	操纵时序、改出动作有效性
发动机失效	轨迹 + 能量区域叠加	高度、空速、N1/N2、燃油流量	滑翔距离、迫降场选择合理性

4 结语

综上，飞行数据可视化已经成为通用航空事故调查不可或缺的技术手段，可以将多源异构的飞行参数转化为直观的视图，解决传统调查中数据维度割裂的问题。三类核心技术方法成熟应用之后，就可以对典型事故场景进行全要素的连贯还原，提高事故认定的准确性以及效率。

未来飞行数据可视化会沿着三条主线发展，

一是实时化和云边协同，使调查能力得以延伸，将安全关口前移；二是智能化和 AI 辅助归因，将模式发现和专业判断结合起来，形成人机协同的调查模式；三是沉浸式和数字孪生融合，提高事故还原水平，提供更好的认知工具。三者交汇会促使通用航空事故调查朝着数据和智能驱动方向转变，进而形成事故知识反哺安全管理、训练以及航空器设计改进的闭环，从源头上降低事故率。

参考文献：

[1] 高越松,张成巍,沈延臣,等.通用航空安全事件调查和分析技术初探[J].湖北应急管理,2026,(10):72-74.

[2] 吴璇,姜兴奇.关于建立通用航空事故调查实验室的思考[J].科技视界,2021,(10):168-169.

[3] 李梅杰,周雪,佘庆民,等.基于鱼骨图的民用直升机飞行事故调查方法研究[J].科学技术创新,2020,(17):34-35.

[4] 仇争平.基于人的因素的通用航空飞行员检查单设计[J].广西质量监督导报,2020,(3):31-32.

[5] 仇争平.关于人为因素的通用航空事故调查方法体系构建[J].广西质量监督导报,2020,(2):65-66.

作者简介: 李明(1984.12—),男,汉族,四川三台人,本科,高级工程师,研究方向:通信导航、航空安全管理。

项目信息:《面向通航事故调查的飞行关键数据实时传输研究与应用》,项目编号: MHAQ2026001。