

# 基于质量管理工具的军用飞机事故分析

王知翰<sup>1</sup>, 蒋平<sup>2</sup>

1. 国防科技大学军政基础教育学院, 湖南 长沙 410073

2. 国防科技大学系统工程学院, 湖南 长沙 410073

DOI: 10.61369/ME.2024070030

**摘 要 :** 军用飞机的安全可靠运行是保持必要战备水平的基本保证。但是, 国内外每年都会发生多起军用飞机事故, 造成人员伤亡、财产损失, 导致任务失败。因此, 有必要通过质量管理的工具去分析目前国内外军用飞机事故, 总结经验教训。本文采用关联图、因果图、系统图等质量管理工具从环境条件、人为操作、设备质量三个方面, 对国内外发生的军用飞机事故开展系统分析, 给出了定量评估的方法, 最后分别提出了系统的改进建议。

**关 键 词 :** 军用飞机; 事故分析; 质量管理; 关联图; 因果图; 系统图

## Analysis of Military Aircraft Accidents Based on Quality Management Tools

Wang Zhihan<sup>1</sup>, Jiang Ping<sup>2</sup>

1. Military and Political Basic Education College, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073

2. School of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073

**Abstract :** The safe and reliable operations of military aircrafts are basic guarantees for maintaining the necessary combat readiness. However, there are always multiple accidents of military aircrafts over the world, which lead to casualties, losses and mission fails. So it is important to analyze these accidents of military aircrafts, by quality management tools, to summarize the lessons learned from the accidents. Inter-relationship Diagram, Cause & Effect Diagram, Systematic Diagram are applied to systematically analyze the accidents of military aircrafts, from the perspectives of environmental conditions, human operation and equipment quality, and quantitative methods are presented. Finally, improvement suggestions are systematically provided.

**Keywords :** military aircraft; accidents analysis; quality management; inter-relationship diagram; cause & effect diagram; systematic diagram

“战争胜负的决定因素在于人与武器的结合, 武器质量是关键性基础。”现代战争中, 科技高度密集的武器装备对质量管理形成严峻挑战, 其质量直接决定战斗力生成甚至战争走向。军用飞机的安全可靠运行是保持必要战备水平的基本保证。尽管航空技术不断进步, 但难以避免飞行事故的发生, 而事故发生会造成人员伤亡、装备损毁、任务失败等后果。因此, 系统分析军用飞机事故的成因, 构建科学防范体系, 对保障飞行安全和必要的战备水平具有战略意义。

国内外不同信息渠道针对军用飞机的事故有一些基础数据统计。例如, 1990–1994年间, 质量因素导致美军军用飞机灾难性事故占比27% (空军29%、陆军24%、海军及陆战队20%)<sup>[1]</sup>。美《航空周刊》数据显示: 2001–2005财年美国陆军直升机事故共341起, 主要类型为撞地 (87起)、硬着陆 (82起)、撞树 (62起)、灯火管制 (44起)、自标 (35起)、电线 (18起)、雪盲 (7起) 及仪表气象条件 (6起) 引发事故<sup>[2]</sup>。我们使用质量管理的工具, 对军用飞机事故和原因开展分析。

图1用关联图来开展事故归因。通过对大量文献的整理, 我们将主要从环境条件、人为操作、设备质量三方面进行, 并结合典型事例进行分析。

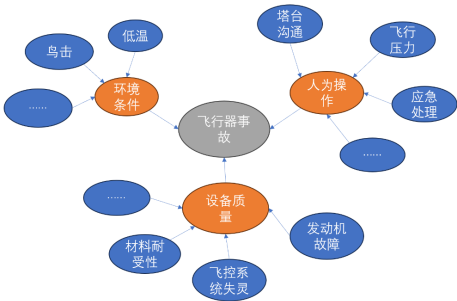


图1 事故归因关联图

## 一、环境条件

在军用飞机的寿命周期内，环境因素往往是不可控且极具挑战性的变量之一。不同于民用航空，军用飞机在执行任务时往往面临更加复杂的飞行环境，包括高空、高速、极端天气、复杂地形以及战时的敌对环境等。这些因素使得环境问题在军用飞机事故中占据了不容忽视的地位。近年来，诸如气象变化、气候异常、地形影响等环境因素所导致的军用飞机事故案例不断引发关注。

下面列举几个典型事例：

1.1960年，六架美军 B-52 轰炸机在极端寒冷天气中执行任务时，由于温度骤降和寒冷空气的影响，飞机的机械设备出现故障，其中一架因发动机失效坠毁。事故调查显示，低温导致了发动机燃料粘稠度的变化，进而影响了推进系统的正常工作<sup>[3]</sup>。

2.2024年4月，美国空军一架 F-16 在霍洛曼空军基地附近坠毁。调查显示，发动机风扇叶片在低温下因“维护盲区”发生断裂，导致动力丧失。而长期服役的 F-16 机队老化问题突出，低温环境加剧机械故障风险<sup>[4]</sup>。

3.2018年8月17日，一架 T-38C 在进行低空飞行时飞机右侧引擎起火并失去动力。据调查，一只鹰撞上了飞机并被卷入发动机，导致气压机损坏、漏油、转轴损坏等一系列问题并使引擎起火。这样的事件较难避免且损失一般较大<sup>[5]</sup>。

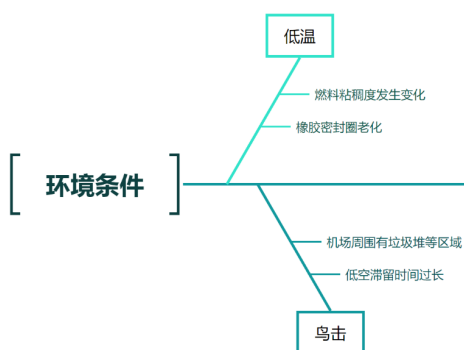


图2 环境问题引发事故的鱼刺图

从事例1、2可看出飞机在很多设计材料上要考虑到高空飞行时可能会遇到的极低温条件。经过不断的总结试错，更要进一步开发耐低温的高性能材料。同时应该建立程序化的模型，应对不同温度下的飞行条件，对飞行操作进行修正<sup>[6]</sup>。

事例3的鸟击情况相对复杂，我军也做了相当多的工作。2006年海军在工程大学正式设立海军机场鸟害防治研究室。同时，各场站也积极与驻地科研单位合作，极大地提高了对鸟撞飞机的防治能力。海军还积极筹集经费进行驱鸟措施的建设，配发驱鸟车、猎枪、遥控煤气炮等装备<sup>[7]</sup>。

生态综合防治是机场鸟击灾害防治的根本手段，从生态系统的食物链结构中，切断食物链的连接关系，减少各种鸟类的数量，从鸟类的栖息环境方面，尽可能地改变机场吸引各种鸟类的环境，减少机场环境对鸟类的吸引力，降低鸟类对飞行安全的威胁<sup>[8]</sup>。

环境条件比较复杂，有关变量较多，故可用逻辑回归模型：

$$P(\text{事故}) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 W + \beta_3 B)}}$$

T：温度，W：风速，B：鸟类密度

当  $P > 0.7$  时触发红色预警。

其中  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$  为待定系数，应根据历史数据进行求解拟合。

可以从以下几点解决此类问题：

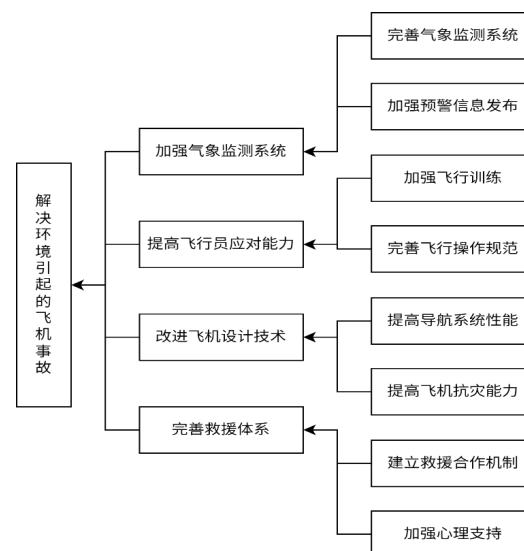


图3 解决环境问题引发事故的流程图

## 二、人为操作

在军事航空领域，飞机事故的发生通常是多种因素交织作用的结果。其中，由人为操作引起的事故尤为显著。这类事故往往涉及飞行员的操作失误、判断错误、沟通不畅等多方面的因素。与民用航空相比，军用飞机的飞行环境更加复杂，任务更加高风险，飞行员不仅要面对极端的飞行条件，还要执行高难度的战术任务。在这种高压环境下，人为错误往往会放大事故的后果。虽然现代军事航空技术不断进步，飞行员的训练水平逐步提升，但操作失误仍然是导致军用飞机事故的重要原因之一。理解和分析这些人为因素，对于提升飞行安全、减少类似事故的发生，具有重要的现实意义。

下面列举若干典型事例：

1.2020年6月8日，在科威特空军基地执行任务的军用飞机 C-130H 着陆时未能停下来，越过跑道并撞上混凝土障碍物。事故飞机受损严重，造成3590万美元损失。调查发现，机组未严格遵循着陆速度规范，且团队协作松散：塔台未及时提醒风险，飞行员过度自信，既未纠正操作偏差，也未有效沟通紧急预案<sup>[9]</sup>。

2.2015年10月2日凌晨，一架 C-130J 事故飞机在起飞后过早开始旋转变弯，俯仰角过大进而失速。飞机在坠毁时击中了一座瞭望塔，使机上11人及瞭望塔上3人共14人全部死亡。飞行员为方便装卸货物，在驾驶舱违规放置硬质夜视镜外壳，导致控制杆被卡死，飞机起飞后无法调整俯仰角度。失速下坠时，机组因

注意力分散未能及时移除障碍物，最终酿成失控坠机。这一非标准操作未被任何人监督或叫停，暴露出安全流程的严重漏洞<sup>[10]</sup>。

3.2018年6月11日，一架 F14-C 事故飞机（MA）在日本空军基地进行一次机动飞行时错误使用右满舵，飞行员在低于安全高度弹射出仓，飞机坠毁，没有人员死亡或平民受伤。在这次事故中，空间定向性障碍（spatial disorientation，SD）是很大一部分原因<sup>[11]</sup>。简单来说就是在飞行中，飞行员对飞机状态的感觉与飞机实际状态不一致。事故核心在于飞行员对复杂飞行动作的认知局限，以及训练科目未覆盖极端情况处置方法<sup>[12]</sup>。

4.2018年11月13日晚，美军 T-38C 在空军基地的例行训练飞行中飞机撞击地面，飞行学员在弹射时遭到致命伤害。教官在起飞时未选择最大动力，导致飞机右偏失控。事故反映其操作习惯松懈和应急处置能力不足，暴露训练体系的关键缺陷<sup>[13]</sup>。

5.2022年1月24日，美国海军 VFA-147 中队的一架 F-35C 战斗机在着舰降落时与航母发生撞击后坠海。新飞行员首次尝试高难度着舰时，因紧张未开启动力辅助系统（APC），导致飞机动力不足、下滑轨迹异常。他强行修正时反而拉高速度和高度，最终以错误角度撞击甲板坠海。事故主因是飞行员经验不足与关键操作程序执行缺失<sup>[14]</sup>。

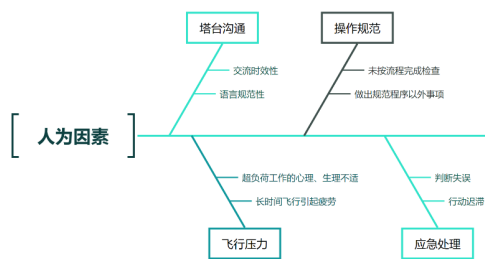


图4 人为因素引发事故的鱼刺图

人为操作失误仍是航空事故主因之一，涉及飞行员技术水平、心理状态及训练质量等综合因素。事故分析表明，机组与地面沟通不畅、指令执行偏差及应急协作失效常导致连锁风险，而超负荷飞行引发的疲劳、压力或生理不适会进一步削弱判断力。改进需多管齐下：通过高强度模拟训练提升复杂场景处置能力（如压力决策/警告响应），优化排班与健康监测以保障飞行员身心状态，并借助智能控制系统（如自动驾驶/实时纠错）降低人为错误概率，形成“人-技协同”的安全闭环。可通过 NASA-TLX 加权公式进行量化：

$$TLI = \sum_{i=1}^6 (w_i \times s_i)$$

$W_i$ ：六维度权重（脑力需求、体力需求、时间压力等），总和为1；

$S_i$ ：飞行员对各维度的主观评分（0-100）。

应用示例（案例5：F-35C 飞行员失误）：

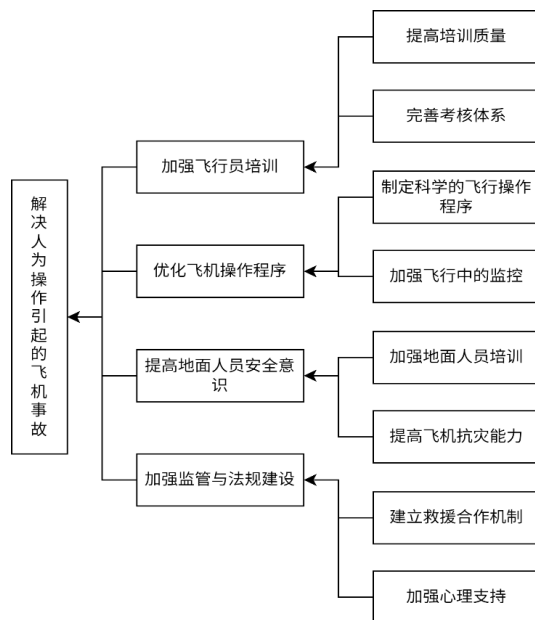
权重分配：时间压力  $w=0.3$ ，任务复杂度  $w=0.25$ ，设备交互  $w=0.2$ ；

主观评分：时间压力  $s=85$ ，任务复杂度  $s=90$ ，设备交互  $s=70$ ；

计算： $TLI = 0.3 \times 85 + 0.25 \times 90 + 0.2 \times 70 = 58.5$ 。

改进意义：TLI > 50 需优化任务设计，通过 VR 训练降低复杂度评分至  $s=60$ 。

可以从图5的措施来解决此类问题：



### 三、设备质量

军用飞机作为现代军事作战和战略部署的核心装备，其设计、制造和维护的质量直接关系到飞行员的生命安全以及任务的成功执行。随着航空技术的不断进步，现代军用飞机的性能日益提高，但由于其复杂的结构和高强度的使用环境，飞机设备的质量问题依然是导致航空事故的重要因素之一。设备质量问题涉及多个方面，包括发动机、飞行控制系统、航电系统、结构部件等关键系统的故障。任何一项技术故障都可能引发灾难性的后果，甚至导致飞机失事。虽然现代军用飞机采用了先进的技术和严格的质量控制标准，但由于飞机在长期高强度的飞行、复杂的战斗环境下运行，设备故障时有发生，且其引发的事故常常难以预见。

在这里我们将通过具体案例分析，揭示航空领域在设备质量管理中的挑战与应对措施。

1.2011年9月26日，事故飞机：一架 A-10C 在功能性检查飞行中经历了双发动机故障，迫降时撞击地面，飞行员安全弹射，飞机被摧毁，直接损失 14,70 万美元。飞机双发动机因核心锁装置故障同时停机，导致空中失去动力。核心锁异常可能在高空意外触发，使发动机转子锁死无法重启，最终迫降失败坠毁。<sup>[15]</sup>

2.F-22“猛禽”战斗机是美军以数量取胜战略威慑的典范，但其频繁发生的质量安全事故和高昂的使用维护费用，使得 F-22 的命运成为全球关注的焦点。飞行控制软件存在致命缺陷，导致

飞机在演习和起飞时失控。该问题早在1992年原型机测试时已暴露，但未彻底修复，最终因系统误判飞行姿态引发多起坠机。<sup>[17]</sup>

3.2006年6月3日：一架隶属中国人民解放军空军的空警-200预警机在执行任务途中，在安徽省宣城市广德县柏垫镇梨山村上空失事坠毁，机上包括机组人员在内的40人全部罹难。机翼除冰系统失效导致结冰失控，同时飞机搭载40人及测试设备远超限额，加剧操作难度。多重因素叠加使飞机失速后爆炸解体。<sup>[18]</sup>

4.2001年1月哈萨克斯坦国防部长在南哈萨克斯坦州乘坐的米-8军用直升机失事原因是该飞机的升力系统的一个组成部分发生故障。飞机失事原因调查会在对事发地进行详细调查、收集直升机残片、译出黑匣子密码后得出了此结论。基洛夫机器制造厂的金相分析也确认了这一点<sup>[19]</sup>。

5.2021年8月17日，俄罗斯的一架伊尔-112V试验样机在训练飞行期间，库宾卡机场着陆时失事坠毁。机组成员全部罹难。飞机在着陆时，右侧发动机突然起火，随后飞机向右侧机翼倾斜，速度失控，机身倾覆坠毁。调查组发现右侧发动机故障起火，涡轮叶片断裂引燃油箱，火焰烧毁副翼操控装置。种种因素导致失控的飞机急剧倾斜，飞行员无法修正姿态而坠毁。<sup>[20]</sup>

6.7月25日上午，一架米-28直升机在卡卢加州日兹德林斯基区执行预定飞行任务时坠毁。机组人员在坠机中丧生。米-28飞机坠毁的初步原因是技术故障。这款直升机容易坠毁，原因之一可能是落后的设计。原因之二是飞机使用时间零部件寿命。原因之三是维护保养不到位。<sup>[21]</sup>

7.驻韩美军F-16战机坠毁：初步证据显示可能是机载电子设备故障导致仪表系统没有正常运行致使战机失控。<sup>[22]</sup>

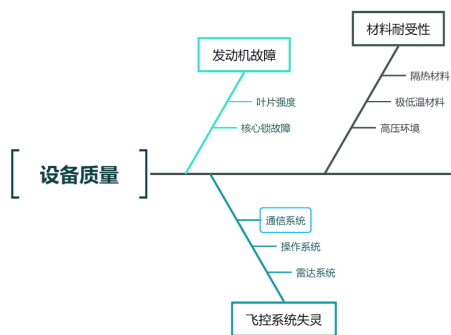


图6 设备质量引发事故的鱼刺图

从案例1可以看出，发动机是飞机的“心脏”，一旦出现故障，飞机将无法继续维持正常飞行。尤其是在复杂的战斗环境下，发动机故障往往难以进行有效的紧急修复。<sup>[23]</sup>

从案例6可以看出，航电系统也是影响飞机安全的重要因素之一。航电设备如果出现故障，飞机不仅无法正常获取实时信息，还可能误导飞行员作出错误判断。<sup>[24]</sup>

从案例2可以知道，材料的质量和结构部件的老化也是设备质量问题的另一个隐患例如，机翼、尾翼等承受巨大气动力的部件，若发生裂缝或断裂，飞机可能失去稳定性，甚至导致灾难性后果。<sup>[25]</sup>

从这些方面来看，设备质量问题不仅仅是飞机设计阶段的技

术问题，还涉及到制造、检验、使用、维护等多个环节的复杂因素。严格遵守设计、生产、测试、维护等标准，持续改进技术和工艺，是确保飞行安全的根本所在。<sup>[26]</sup>

总的来说，设备质量问题已经成为现代军用飞机事故的重要原因之一。尽管航空工业界已经取得了显著进展，飞机的安全性和可靠性有了很大提升，但仍需进一步加强设备质量管理，提升故障预防和应急处理能力。只有从根本上提高设备质量，减少潜在故障，才能最大限度地降低飞行事故的发生概率，确保飞行员的生命安全，并提高飞机的作战效能。

可以通过风险优先数（RPN）公式进行评估：

$$RPN=S \times O \times D$$

S(严重度)：故障对系统的影响程度，评分范围1-10（1=轻微，10=灾难）

O(频度)：故障发生的频率，评分范围1-10（1=轻微，10=灾难）

D(探测度)：现有控制措施检测故障的能力，评分范围1-10（1=轻微，10=灾难）

在F-16发动机叶片断裂事故中运用RPN进行评估：

S=9（叶片断裂可能导致坠机）；

O=80=8（低温环境下每千小时发生1次）；

D=1D=1（涡流检测可提前发现裂纹）；

$$RPN=9 \times 8 \times 1=72 \quad RPN=9 \times 8 \times 1=72。$$

RPN > 60需优先改进，建议替换为Sc/Cf复合材料叶片。

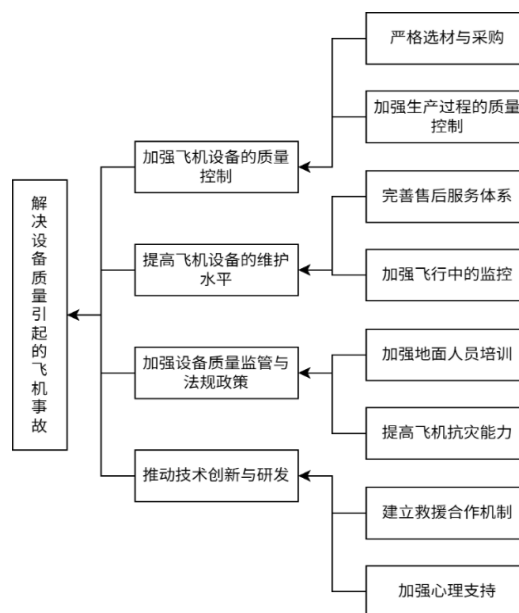


图7 解决设备质量引发事故的流程图

当然，军用飞机事故的原因通常是环境条件、人为操作、设备质量共同作用的结果。如2022年1月，美国一架F-35C战机在与航母甲板撞击后坠海；9个月后，一架F-35A战机又坠毁在跑道上。2023年9月美国沃斯堡海军航空站联合储备基地，一架F-35B战机在垂直降落时失控坠毁。一年多的时间里，美军F-35战机的3种型号都发生了重大坠机事故。<sup>[28]</sup>通过鱼刺图可分析如下：

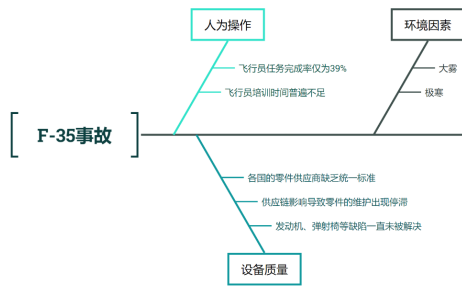


图 8 F-35 事故的鱼刺图

从人为操作方面，可以开发 AI 任务规划平台，实时匹配飞行员能力与任务需求。并通过模仿大雾、雷暴等极端天气对飞行员

进行训练。

从环境因素方面，可以运用全天候的导航矩阵，适配可能的极端环境。并加强发动机叶片的耐受性，使之在低温下也能够正常运作。

从设备质量方面，要建立标准化工程，或者使零件尽量国产化来提高可控性。并且加强飞行中的监控，让整个飞行过程处在实时监控之下。

只有通过全面分析各种潜在风险因素，完善飞机的设计、提高设备质量、加强飞行员训练、强化环境应对能力，才能有效减少飞行事故的发生，确保飞行任务的安全完成，并最大限度地保护飞行员的生命安全。

## 参考文献

- [1] 外军装备质量事故案例集锦 <https://www.doc88.com/p-60529008172316.html>
- [2] 淡风, 雅楠. 空天消息 [J]. 航空知识, 2006, (4): 4-7
- [3] 50 年前致命坠机成就美轰炸机 B-52 “老兵传奇” - 中新网
- [4] 美媒: 美国空军一架 F-16 战斗机坠毁, 飞行员在飞机坠地前弹射逃生 - 新华网
- [5] UNITED STATES AIR FORCE AIRCRAFT ACCIDENT INVESTIGATION BOARD REPORT T-38C, T/N 68-8206
- [6] 翟鹏飞, 马玲, 王航臣, 刘资涵. 民用飞机冬季运行低温修正与评估研究 [J]. 民用飞机设计与研究, 2023, (4): 134-140
- [7] 王朝武, 章汉亭. 海军机场打响驱鸟战 [J]. 当代海军, 2008, (3): 21-24
- [8] 朱云斌. 军用机场鸟击防范对策研究 [D]. null, 2010
- [9] UNITED STATES AIR FORCE AIRCRAFT ACCIDENT INVESTIGATION BOARD REPORT C-130H3, T/N 94-6706
- [10] UNITED STATES AIR FORCE AIRCRAFT ACCIDENT INVESTIGATION BOARD REPORT C-130J, T/N 08-3174
- [11] UNITED STATES AIR FORCE AIRCRAFT ACCIDENT INVESTIGATION BOARD REPORT F-15C, T/N 84-0008
- [12] 造成科比飞机失事的“空间定向障碍”到底是啥? \_新闻\_央视网 (cctv.com)
- [13] UNITED STATES AIR FORCE AIRCRAFT ACCIDENT INVESTIGATION BOARD REPORT T-38C, T/N 68-8152
- [14] 1 · 24 美舰载机坠毁事故 \_ 百度百科
- [15] UNITED STATES AIR FORCE AIRCRAFT ACCIDENT INVESTIGATION BOARD REPORT A-10C, T/N 80-0282
- [16] 国外武器装备质量事故案例: 美国 [J]. 国防科技工业, 2011, (2): 59-62
- [17] “重建” F-22 [J]. 兵器知识, 2022, (2): 5
- [18] 安徽广德 6 · 3 空难 \_ 百度百科
- [19] 淡风, 雅楠. 空天消息 [J]. 航空知识, 2006, (4): 4-7
- [20] 张娜. 伊尔-112V 军用运输机坠毁事件回顾与思考 [J]. 国际航空, 2021, (12): 15-18
- [21] 7 月 25 日一架米 28 武装直升机在俄罗斯失事, 机组人员全部遇难 \_ 腾讯新闻 (qq.com)
- [22] 驻韩美军公布去年 5 月 F-16 战机坠毁事故原因 | 韩联社
- [23] 峰峻, 安彦. 军用飞机最大故障速度计算 [J]. 中国民航大学学报, 2021, 39(2): 7-11
- [24] 张涛, 扈盛超. 航空电气中电缆故障与对策 [J]. 中国航班, 2019, (9): 48-49
- [25] 胡嘉旭; 王海涛; 徐显海; 张学伟; 陈威. 军用飞机火灾特点及救援对策 [J]. 消防界 (电子版), 2022, 8(18): 45-47
- [26] 薛宇敬阳. 我国通用航空飞行事故原因研究 [D]. null, 2019
- [27] 张献逢, 屈轶, 范洪波. 美国空军飞机抢救经验及启示 [J]. 航空维修与工程, 2018, (2): 51-53
- [28] 军工世界 | F-35 为何坠机事故频发 \_ 光明网 (gmw.cn)