

doi: 10.7690/bgzdh.2013.10.024

某小型涡喷发动机空中停车故障分析

阳再清¹, 欧阳中辉², 吕晓林¹

(1. 中国人民解放军 92419 部队, 辽宁 兴城 125106; 2. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 为解决某型无人机涡喷发动机在试飞中出现的空中停车问题, 应用故障树分析方法进行故障分析。通过对涡喷发动机空中停车故障的分析, 给出故障分析与定位的过程, 提出相应改进措施, 并进行验证。验证结果表明: 故障树分析方法对故障归零分析、发动机典型故障处理等有良好的借鉴作用, 可为发动机研究和应用者提供参考。

关键词: 无人机; 涡喷发动机; 空中停车; 故障分析

中图分类号: TP277 **文献标志码:** A

Failure Analysis of A Small Turbo-Jet Engine Power off During Flight

Yang Zaiqing¹, Ouyang Zhonghui², LYU Xiaolin¹

(1. No. 92419 Unit of PLA, Xingcheng 125106, China;

2. Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to solve the breakdown problem of a certain type of UAV during testing flight, the method of failure tree analysis is used to analyze the fault. Based on the analysis of the breakdown of a turbo-jet engine during testing flight, the analysis and location process of the breakdown problem is provided, corresponding improving measures have been raised and verified. The result shows that it is a good reference to the analysis of failure to zero and the disposal of typical failure of the engine and for the engine designers and users.

Key words: UAV; turbo-jet engine; power off during flight; failure analysis

0 引言

作为某无人机的主动力, 某引进的小型涡喷发动机在试飞过程中连续 2 架次出现空中停车, 在缺乏技术资料的情况下^[1-2], 笔者经过大量的试验验证, 排查了故障可能原因的基本事件, 分析掌握了其电子控制单元 (electronic control unit, ECU) 控制规律, 采取了可行的技术措施, 最终试飞成功。笔者对故障的现象进行描述, 应用故障树分析方法进行分析, 进而提出改进措施, 并进行了验证, 为从事小型涡喷发动机及其应用的研究者提供借鉴。

1 故障现象描述

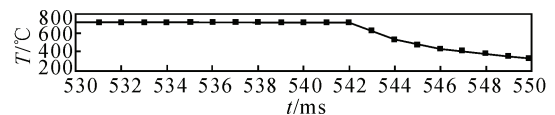
试飞过程中, 无人机在起飞后大约 20 s, 按照控制要求发动机将由大车状态转入巡航状态工作, 在这一状态转换之后, 发动机按照油门指令控制达到相应转速后并未正常稳定工作, 而是转速急剧变小, 直至停车, 而其他遥测参数正常。先后有 2 架飞机在同一状态下出现同一故障现象, 故障数据如表 1, 数据曲线如图 1、图 2。

2 个故障除发生时机相同。从故障数据看, 发动机转速很短 (0.6 s 左右), 由大车状态的近 100 000 r/min 急剧下降到不足 20 000 r/min, 不足以维持发动机正常工作, 导致空中停车; 在这个短暂的过程中, ECU

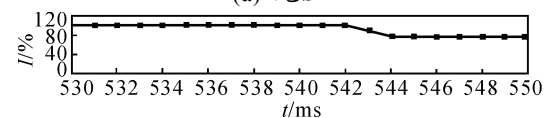
的电池供电电压等参数未发生明显变化。

表 1 故障前后遥测数据

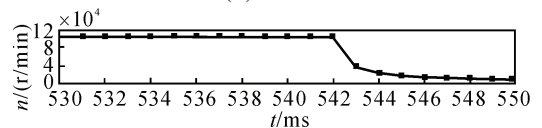
序号	特征时刻/s	转速/(r/min)	油门指令/%	转速变化量/(r/min)
第 1 架 无人机	0.01	96 500	100	560
	0.02	36 500	89	60 000
	0.03	22 500	76	14 000
	0.04	17 000	75	5 500
第 2 架 无人机	0.01	89 000	75	450
	0.02	45 500	75	33 500
	0.03	26 500	75	19 000
	0.04	18 500	75	8 000



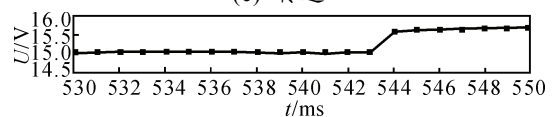
(a) 尾温



(b) 油门



(c) 转速



(d) 电池电压

图 1 第 1 架次故障数据曲线

收稿日期: 2013-04-11; 修回日期: 2013-05-16

作者简介: 阳再清(1966—), 男, 湖南人, 硕士, 高级工程师, 从事无人机技术研究。

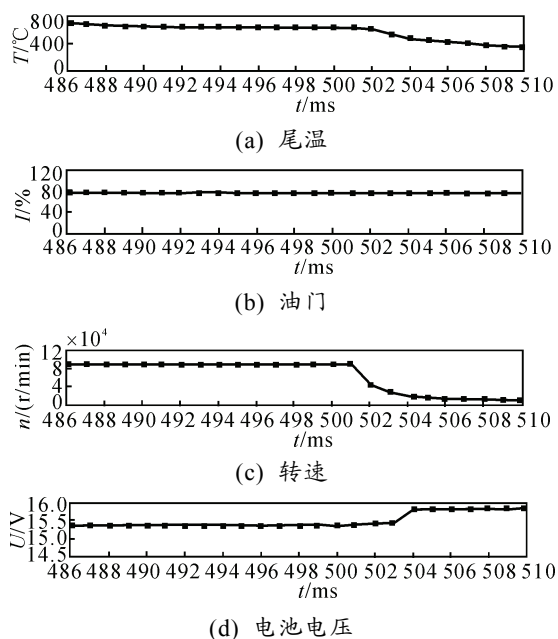


图 2 第 2 架次故障数据曲线

2 故障分析与定位

2.1 故障树形成

通过对该发动机构成、基本工作流程、使用环境条件等进行分析，笔者以发动机空中停车事件为顶事件建立故障树^[3-5]，分析了顶事件发生的全部可能性事件，出现空中停车的因素主要有：指令停车、燃烧室供油中断和 ECU 控制不正常，并逐次深入得出基本事件，对故障的原因进行分析定位，形成图 3 所示故障树。

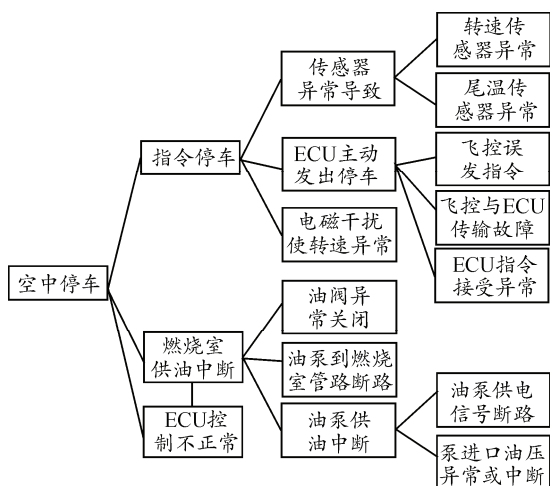


图 3 发动机空中停车故障树

2.2 故障排除与定位

按照故障树提供的基本事件，笔者根据发动机工作原理与遥测数据进行了分析，可以确认“ECU 主动误发停车指令”事件下的所有基本事件和“ECU

受电磁干扰导致转速异常”这一基本事件与遥测数据不一致，可以排除其可能性。对其他基本事件，笔者在实验室条件下进行模拟实验，逐一排查。

尽管实验室模拟发动机转速信号快速上跳 40 000 r/min、下跳 60 000 r/min，其结果会导致故障呈现的发动机停车现象；但是，若转速测量与实际转速不一致，会导致油泵指令、驱动电压等发生变化，而此时遥测数据显示这些参数并无显著变化，说明故障时转速测量与传感器输出是一致的，转速传感器是正常的，因此转速传感器异常的基本事件不是导致故障的原因。

对 ECU 测试发现，尾温传感器只在发动机启动阶段起作用，即在启动阶段当尾温小于某一标称值时，ECU 自动发出控制油泵指令，此时尾温传感器起作用，发动机正常工作后不再参与控制，因此该基本事件不是导致故障的原因。

发动机工作时油阀由 ECU 控制，在实验室实验时，在控制线上加装控制开关，发动机启动后模拟油阀异常关闭，测试结果与试验遥测数据吻合度较高，不能排除该基本事件是导致故障的原因。

油泵出口到燃烧室间的管路为泵出口到油阀间和油阀到燃烧室间 2 段，实验室实验时在 2 段间加装手动阀，发动机启动后关闭阀门，实验数据与空中飞行数据基本吻合。实际上该实验与油阀关闭结果是一致的。通过设备状态分析，2 台新品发动机，管路同时出现断裂的可能性极小，因此排除该基本事件是导致故障的原因。

在实验室实验时，人为断开油泵供电信号，检测到的转速变化率和电池电压与飞行故障数据均不符，因此该基本事件不是导致故障的原因。

油泵进口异常或供油中断包括油滤堵塞、进油管泄漏、进口油压过低、管路进气和油箱异常等因素，实验室实验时，将油管从油箱中完全拔出和短暂拔出来进行模拟测试，测试数据表明，该基本事件可以导致转速下降，同时电池电压基本不变，但转速变化率明显较缓，不足以导致极短时间内停车。

ECU 控制不正常是指程序设定与实际工作之间不协调和不正确，实验室实验中，检测到该发动机在大车状态是闭环控制，而在巡航状态采用等供油量开环控制，当发动机转速和进气条件发生变化时可造成油气比失当，情况严重时可导致停车。

2.3 故障原因分析

通过故障定位分析可知，油阀异常关闭和 ECU

控制不正常是造成此次故障的可能原因。

油阀异常关闭只能是关闭油阀的机械力大于 ECU 控制产生的电磁力才能引起。ECU 的控制和油阀本身都可能导致其异常关闭，尽管遥测数据故障过程中 ECU 未误发指令、驱动电压电流等也正常，但在经过发射的冲击和油门转换等变化后，遥测数据监测不到的油阀机械部分是否突变、连接器是否松动或脱落等可能直接导致故障发生。从故障数据分析，油阀异常关闭后，供油减少导致转速急剧下降，而此时发动机处于等油开环控制，ECU 不对油泵状态进行调整，电池电压基本保持不变。在后续过程中，转速持续下降，ECU 检测到转速过低，停转油泵，主动停车，此时电池电压向上跳变。这一过程飞行数据和实验室实验数据都得到验证。

ECU 控制不正常，一方面可能是控制策略、控制时序等设计不合理；另一方面可能是在使用过程中对控制理解不准确，应用不合理。故障过程中，飞机处在起飞段，要经受较大的冲击易造成各部件状态突变和姿态改变，较易造成进气量发生变化，实际工作中，油门又进行了较大调整，而发动机采取等油开环控制，油门和转速急剧变化得不到有效调整，极端情况下就会出现停车。而这一因素重复出现的几率比油阀本身故障的几率要大得多。

3 改进措施及验证

故障批发动机油阀采用的是电动控制方式，在供电异常、控制异常等诸多因素下均可造成其异常关闭，导致停车，为消除这一可能的故障因素，将该阀改用手动方式控制，即在发动机开车前手动打开，工作期间保持常开状态，停车后适时关闭。这一措施消除了电动控制的不可靠因素，无疑是有效的，且该方式已广泛使用在其他类似系统中^[6-8]。

改变 ECU 控制不正常最有效的措施是：各种工作状态下采用闭环控制，需要设计者参与，而使用者对其控制策略重新编程难以实现。为此，笔者通过调低最大转速，利用大车状态闭环控制规律，将发动机空中飞行段设定为大车状态，来实现闭环控制。通过近 10 架次的空中试飞，数据正常，未再出现故障现象。图 4、图 5 是验证试验中的 2 个架次数据曲线图。采取这一措施，使得发动机长时间工作在大车状态，对油耗、动力航程、寿命等有不利影响，但提高了工作稳定性和巡航速度等性能，对于引进的国外批量低成本设备而言，不失为一种有效的方式。

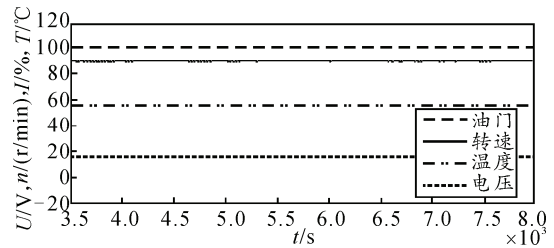


图 4 第 1 架次发动机故障验证试验曲线

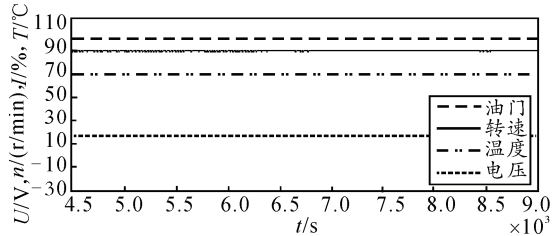


图 5 第 2 架次发动机故障验证试验曲线

4 结束语

故障分析是一门很重要的工程实践科学，有严格的要求和标准^[9-10]，但在实际工作中，故障的原因是多种多样的，设计者、使用者和管理者都可以从不同角度进行分析总结。随着认识的深入，所采取的措施也会不断完善。笔者仅从一个使用者的角度，基于理论和实际相结合的方法，分析了故障的原因，提出了保障故障不再发生的措施，理论上是正确可行的，实践上是实用有效的。

参考文献：

- [1] 蒋新桐. 飞机设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2005: 25-30.
- [2] 祝小平. 无人机设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 78-85.
- [3] 朱安石, 路平, 蔚建斌. CPLD 在无人机发动机转速检测中的应用[J]. 信息技术, 2011, 14(1): 140-143.
- [4] 肖波平. 弹用涡喷发动机性能监视与诊断系统软件研制[J]. 推进技术, 2001, 22(2): 111-113.
- [5] 谢海刚, 苏三买. 基于 RTOS 的无人机发动机数据系统软件设计[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(9): 1335-1338.
- [6] 邱楚楚, 盖强, 马路. 基于故障树的无人机发动机点火系统维修性建模[J]. 应用科技, 2011, 38(16): 5-8.
- [7] 陈巍, 杜发荣, 丁水汀, 等. 某微型涡喷发动机地面试车故障分析及措施[J]. 航空动力学报, 2011, 26(4): 752-759.
- [8] 潘宏亮, 周鹏, 康伟. 涡喷发动机用于无人机飞行试验可行性探索[J]. 西北工业大学学报, 2010, 28(3): 312-317.
- [9] 胡银彪, 昂海松, 李志宇. 无人机发动机参数测量系统的研制[J]. 传感器技术, 2004, 23(7): 34-36.
- [10] 李永科, 陈自力, 田庆民. 无人机发动机点火停车电路故障在线检测研究[J]. 测试技术学报, 2003, 17(3): 229-232.