

航空发动机二元矢量喷管喉道面积 A8 控制回路故障分析

李文涛*, 曲涛, 石磊

中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 110015

摘要:本文研究了航空发动机二元推力矢量喷管喉道面积 A8 控制回路故障问题。首先,根据二元推力矢量 A8 控制系统架构建立了故障树,并分析了可能引发该故障的数字电子控制器、执行机构、作动筒和二元喷管故障模式;之后定位故障原因,由于作动筒内活塞杆与内置 LVDT 传感器之间磨损产生的金属屑末进入 A8 控制装置,进而导致阀芯卡滞;最后开展了控制系统半物理模拟试验和发动机地面试车验证,试验结果表明故障原因定位准确,改进措施有效。

关键词:航空发动机;二元推力矢量喷管;喷管喉道面积;控制系统

Analysis on Control Loop Fault of the 2-dimensional Convergent-divergent Nozzle Throat area

Li Wentao, Qu Tao, Shi Lei

AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China

Abstract: Analysis on control loop fault of the 2-dimensional convergent-divergent (2DCD) nozzle throat area is researched in this paper. First, based on the control framework of 2DCD nozzle throat area, fault tree was constructed, the possible causes of electronic controller failure, electrohydraulic device and actuator failure as well as 2DCD nozzle failure were analyzed in detail. Moreover, the fault cause was located. Due to the wear between the piston and LVDT sensor in the actuator, metal chip was introduced, which accordingly engendered the malfunction of electrohydraulic device. The cause of fault was verified and improvement measures were validated in the control system semi-physical test and engine rig trial afterwards.

Key Words: aero-engine; 2-dimensional convergent-divergent; nozzle throat area; control system

二元推力矢量技术通常指喷管在飞机俯仰平面内具备偏转能力的技术^[1]。喷管控制与飞机控制协调工作可以为飞机提供俯仰控制力矩,重点增强飞机俯仰控制能力^[2]。与轴对称推力矢量技术^[3]相比,二元推力矢量技术的另一大优势是可以增强飞机的隐身性能,大大增加了战时飞机的存活能力。二元推力矢量技术的应用,美俄等航空强国已经开展了几十年的预研和研制,上世纪 70 年代初开始二元推力矢量喷管方案的研究^[4,5],俄罗斯从 1980 年开始研究二元推力矢量技术。上世纪 80 年代末我国开始了对二元推力矢量技术、二元推力矢量喷管控制及运动机构方案相关研究。

1 问题描述

二元推力矢量发动机在地面试车过程中,发动机处于节流状态,高压换算转速在 81% 的稳态工作点,喷

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2019.S3.083

基金项目:国家自然科学基金(61890925)

管喉道面积 A8 回路控制逻辑为小喷口状态,下侧 A8 收敛调节片突然异常放开,数控软件闭环算法发现反馈与给定位置偏差加大,输出负方向电流纠正偏差,当反馈与给定差异超过阈值的累积时间满足 A8 回路判故障条件后,数字电子控制器发出“A8 下侧回路故障”信号,数字电子控制器按照相应故障重构策略控制 A8 面积。图 1 是故障发生时数据记录,其中竖线位置 A8 开始异常打开,红线 LA8X 表示 A8 作动筒的位移采集值,LA8XDem 是 A8 作动筒的位移目标值,I_LA8X 表示控制器控制电流,PLA 表示油门杆实际位置,N2r 是发动机高压换算转速。

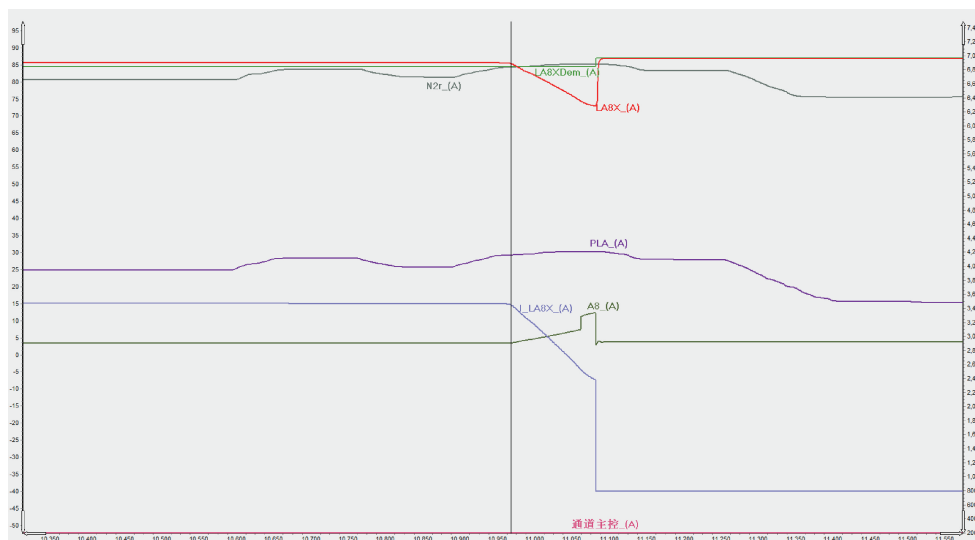


图 1 A8 回路故障数据曲线

2 故障树及底事件排查

二元推力矢量喷管控制系统是一个能够满足喷管收/扩调节片置位和协调各作动筒的驱动系统,功能实现主要由数字电子控制器、喷口油源泵、喷口燃油滤、A8 控制装置、A8 作动器及 LVDT 线位移传感器组成。系统利用控制装置中电液伺服阀驱动液压作动筒调节二元推力矢量喷管的调节片置位,并以作动筒 LVDT 位置传感器作为反馈形成闭环控制,如图 2 所示。

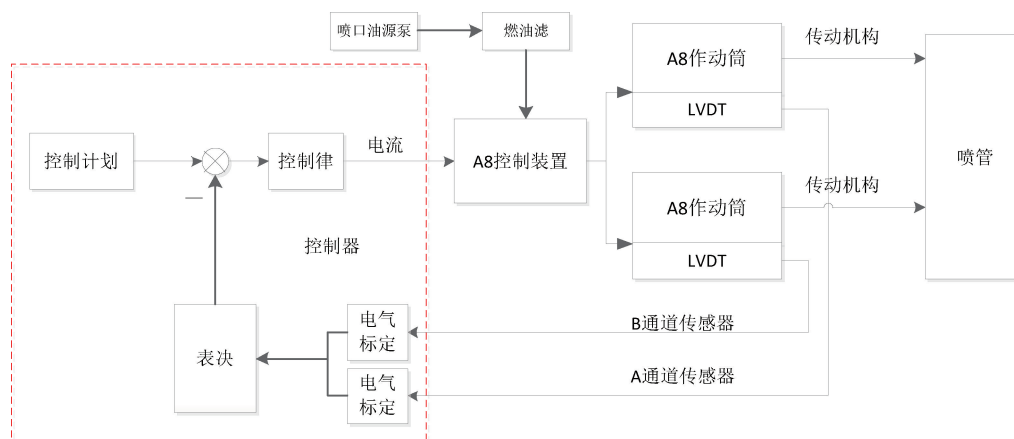


图 2 A8 控制系统架构

根据系统架构建立了 A8 回路故障树,包含数控系统、A8 控制装置、A8 作动筒和二元喷管四大方面,包含 21 个底事件,如图 3 所示。下面逐一分析排查。

2.1 数控系统

数控系统异常包含了 6 个底事件,由控制计划错误、控制逻辑错误、控制参数不匹配、表决机制错误、数字电子控制器硬件与传感器反馈异常组成。前 4 个属于数控系统软件范畴,后两个对应的数控系统电气子系统硬件集合。

将控制器内节流状态喷口控制计划数据导出,与数控系统软件要求一致,可以排除底事件 X1。

由于喷管 A8 回路报故前出现收敛调节片异常放开过程,数字电子控制器纠偏输出负方向电流,控制逻辑正确,可以排除控制逻辑错误底事件 X2。

A8 回路控制参数经过数控系统半物理试验验证,同时也经过发动机静态闭环试验复验,控制参数设计无异常,导出数字电子控制器内控制参数,验证无误,可以排除控制参数不匹配底事件 X3。

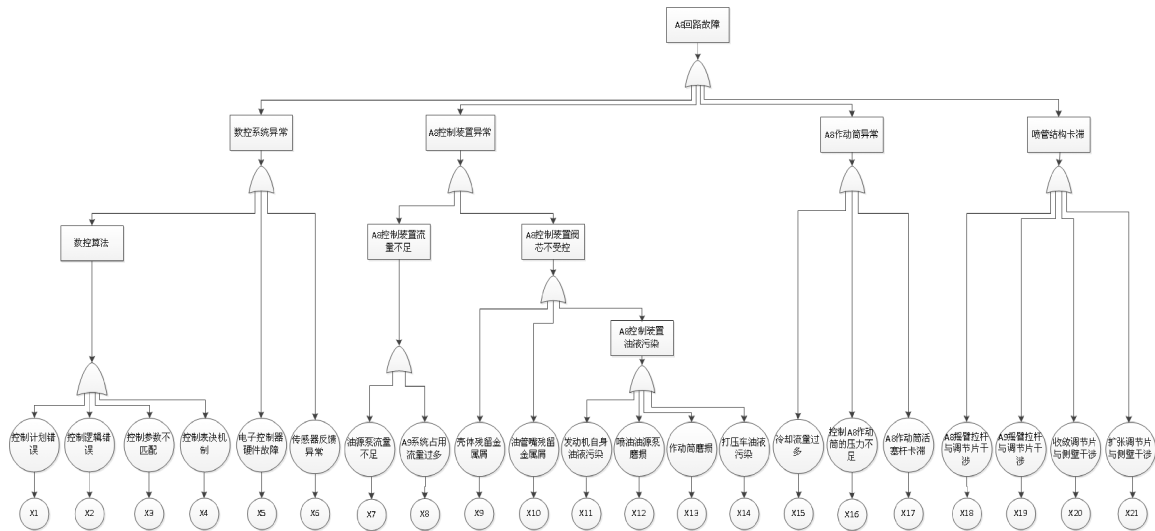


图3 A8 控制回路故障树

从数字电子控制器中下载并导出作动筒位置传感器电气标定曲线,与首次半物理试验数据对比,无异常,可以排除底事件 X4。

断开 A8 下侧控制装置与数字电子控制器的电连接器,使用模拟电阻(模拟控制装置内部电阻值)与数字电子控制器组成回路。利用二元推力矢量喷口地面调试软件控制数字电子控制器开环周期输出极大值和极小值电流,模拟电阻两端电压与电阻值之比与控制器电流输出始终保持一致,可以排除数字电子控制器电流输出硬件异常底事件 X5 可以排除。

A8 回路故障后按照故障处置策略控制故障侧作动筒,复查试车数据中作动筒位置传感器数据与实际位置符合,所以作动筒传感器故障和数字电子控制器传感器信号采集功能故障 X6 故障可以排除。

综合上述工作,数控系统异常顶事件可以排除。

2.2 A8 控制装置及作动筒

根据式(1)当流通面积一定的情况下,流量只影响作动筒的移动速度,不会造成作动筒反向作动。故障前发动机处于节流状态稳态,且发动机并未矢量偏转,A9 控制回路处于闭环稳态控制,因此排除控制 A8 作动筒的流量不足底事件 X7,可以排除 A9 系统占用过多流量的底事件 X8,也可以排除因冷却流量过大而导致控制 A8 作动筒的流量不足底事件 X15。

$$Q = A \cdot v \quad (1)$$

式中: Q 是流量; A 是面积; v 是速度。

通过数字电子控制器开环周期输出极大值和极小值电流,A8 作动筒有杆腔和无杆腔测压传感器输出维持不变。之后维持数字电子控制器输出电流不变化,改变油源压力,无杆腔压力随油源压力正相关变化,可确认控制装置工作异常,需进一步排查。更换控制装置,在地面打压测试过程中控制回路再次异常,本次收敛调节片在作动筒收缩位置卡滞。新换上的控制装置油管嘴加工完成后,在装配前对油管嘴进行了超声波清洗,产品初调完成,对产品分解后,再次经过清洗工序;控制装置壳体加工完成后,在装配前对壳体进行了超声波清洗,产品初调完成,对产品分解后,再次经过清洗工序,所以可以排除油管嘴和壳体加工金属屑末残留 X9 和 X10 底事件。

拆下发动机燃油系统总燃油滤,未发现有金属屑及异物,发动机燃油受到污染的底事件 X11 可以排除。

拆下发动机喷口油源泵出口油滤,未发现有金属屑及异物,排除由喷口油源泵磨损导致油液污染的可能性,底事件 X12 可以排除。

发生故障后更换打压车内的燃油,更换控制装置后仍然异常,可以排除是由打压车油源污染而导致首次 A8 回路故障的概率,所以排除底事件 X14。

故障前发动机处于节流状态稳态,且发动机并未矢量偏转,A9 控制回路并没有分压,故障过程上侧作动筒控制正常,故障后根据故障重构对策仍可以控制作动筒,证明当时压力足够,可以排除 A8 作动筒压力低的底事件 X16。

发动机静态下对 A8 作动筒地面打压可以正常可控,排除作动筒不受控故障,所以排除底事件 X17 存在异常的可能性。

2.3 二元喷管系统

A8 故障发动机停车后,分别排查收敛和扩张调节片与垂直侧壁间隙和表面,表面没有划伤,且没有变形,仍然存留一定间隙,可以排除喷管收敛调节片与垂直侧壁干涉,也可以排除喷管扩张调节片与垂直侧壁干涉,可以排除底事件 X20 和 X21。

3 故障定位及解决措施

3.1 原因定位

按照 A8 回路的串联关系,以数控系统数字电子控制器为起始,依次是 A8 控制装置、A8 作动筒、A8 喷管结构进行分段排查,确定了 A8 控制装置卡滞是导致 A8 回路故障的直接原因。由于 A8 控制装置前项来油经过的油滤无杂质,目标锁定在 A8 作动筒内部污染物通过回油管路进入控制装置,分解作动筒,发现位置传感器与活塞杆之间存在轻微划痕,且作动筒无杆腔内部发现有少量金属屑,则确认作动筒磨损底事件 X13 为可能故障原因。

从机理上分析,本次 A8 控制装置不受控故障发生在 A8 作动筒处于收进状态,当无杆腔与电液伺服阀回油沟通时,铁屑会从无杆腔进入伺服阀的阀芯和阀套之间的缝隙导致阀芯的不受控,使得阀芯卡在大喷口位置卡滞或者在不受控的位置向喷口放大方向运动,与试车故障和地面测试故障现象一致。通过进一步分析,可以得出 A8 作动筒磨损产生的少量金属屑末进入 A8 控制装置电液伺服阀内部导致阀芯卡滞是本次 A8 控制回路故障的根本原因。

3.2 改进措施

针对作动筒产品的传感器安装存在间隙偏小风险制定了改进措施:一是增大传感器与活塞的设计间隙,二是增加 LVDT 传感器外表面处理工艺,增加表面硬度进而提高耐磨性。

4 试验验证

为验证故障定位的准确性及改进措施的有效性,利用二元推力矢量发动机仿真模型及真实二元推力矢量喷管控制系统开展了半物理模拟试验,其中包含两支同一故障批次作动筒和两支落实改进措施状态的作动筒,经过 21 小时半物理试验,没有落实改进措施的两支作动筒均发生 A8 控制回路故障,而落实改进措施的作动筒工作正常。

半物理模拟试验后,将 4 支落实改进改进后的作动筒(包含半物理模拟试验过程中参试的 2 支改进作动筒)装机开展地面试车验证。所有作动筒随二元推力矢量发动机完成了慢车、节流、中间、加力等全状态及包括矢量偏转在内的全部功能和性能试验,A8 控制系统工作正常,未出现回路故障。

5 结论

通过二元矢量喷管控制系统架构建立了故障树,逐一排查底事件后定位故障原因。由于作动筒位置传感器与活塞的配合间隙较小,产品运动过程中活塞杆受力后造成活塞与传感器相互磨损,产生少量金属屑末,通过回油管路进入控制装置中,导致电液伺服阀阀芯卡滞,进而导致 A8 回路不受控。通过控制系统半物理试验和发动机地面试车的充分验证,证明了 A8 回路故障原因定位准确,作动筒改进措施有效,提高了二元推力矢量发动机可靠性。

参考文献

- [1] 李文涛.二元推力矢量喷管出口面积 A9 过渡态控制问题分析[C]//中国航空学会第十九届航空发动机自动控制专业学术交流会议论文集,2018:818-821.
- [2] 宁怀松,张志学,邵万仁,等.二元收扩喷管气动方案优化设计[J].航空发动机,2014,40(3):52-55.
- [3] 丁凯峰,樊思齐.矢量喷管与发动机的共同工作研究[J].航空动力学报,2000,15(1):96-98.
- [4] 陈怀壮.二元推力矢量喷管的结构设计及优化[D].南京:南京航空航天大学,2008.
- [5] Karr C L. Two-dimensional thrust vectoring nozzle optimization techniques[R].AIAA 90-2027.

作者简介

李文涛(1984-)男,硕士,工程师。主要研究方向:航空发动机建模、控制和故障诊断。

Tel:024-1565/1568-814/13940387136

E-mail: 315590130@qq.com