

基于故障树分析的通用无人飞行器武控系统典型案例研究

冯楠^{1,2}, 付建超², 韩传润²

(1. 中国人民解放军 92941 部队 41 分队, 辽宁 葫芦岛 125000;

2. 中国人民解放军 92950 部队, 辽宁 兴城 125100)

摘要: 针对通用无人飞行器武控系统结构复杂、难于建立精确数学模型等特点, 利用故障树分析法, 以“网络接口发送正常, 接收异常”、“武控台显示对接训练弹加电查询异常”、“武控电源操控面板上指示灯不亮”等典型故障为例, 详细描述故障现象, 深入剖析故障原因, 全面梳理故障机理, 精准建立故障树, 标准表达故障格式; 依据专家经验, 给出故障的出现率及对武控系统的影响程度, 完成故障定性定量分析, 从而更高效地实现该故障的定位和排除, 同时可为维修保障过程中出现的各种故障提供完整的故障诊断案例借鉴; 因此, 具有一定的理论和实用价值, 为后续该型无人飞行器武器装备提供系统、全面、针对性和时效性强的作战使用技术保障产品打下坚实的基础, 进而全面提升该型无人飞行器武器装备使用和维修保障能力。

关键词: 故障树; 定性定量分析; 故障定位排除

Research on Typical Case of Common UAV Weapon Control System Based on Fault Tree Analysis

FENG Nan^{1,2}, FU Jianchao², HAN Chuanrun²

(1. Sub Unit 41, Unit 92941, PLA, Huludao 125000, China;

2. Unit 92950, PLA, Xingcheng 125100, China)

Abstract: Aiming at the problems of complex structure and difficulty to establish precise mathematical model in common unmanned air vehicle weapon control systems, a fault tree analysis method is adopted to analyze typical faults in detail, such as “the network interface sends normally and receives abnormally”, “the weapon control platform displays abnormality of power-on check for training unmanned air vehicle (UAV)”, and “the indicator light of weapon control power supply control panel does not light”, it describes above fault phenomena in detail, deeply analyzes fault reasons, fully sorting out the fault mechanism, accurately establishes the fault tree, accurately expresses the fault format. According to the experience of experts, it gives the influences of faults on weapon control system, achieves the fault qualitative and quantitative analysis, efficiently realizes the localization and elimination of faults, and provides complete fault diagnosis case reference during the process of maintenance and support. Therefore, it has some theoretical and practical value, lays a foundation on providing systematic, comprehensive, high pertinent and timely combat technology support products for the UAV weapon equipment in the future, and fully promotes the ability of operation and maintenance support.

Keywords: fault tree; qualitative and quantitative analysis; fault localization and elimination

0 引言

通用武器系统担负我海军水面舰艇末端防御任务, 是水面舰艇自卫反导的主战武器, 主要用于拦截来袭的反舰无人飞行器。其武控系统具有设备结构复杂、技术密集等特点, 导致了其出现故障时, 对故障的判断识别和维修有较大的难度。

故障诊断技术作为提高无人飞行器武器系统的可靠性和安全性的重要手段, 已经成为提升无人飞行器战斗力的一项关键技术。单纯的故障检测技术已经不能满足无人飞行器武器系统长寿命、高可靠性运行的要求, 预测技术开

始逐步应用到故障诊断当中, 更好地保证了无人飞行器武器系统的可靠运行^[1-3]。采用基于故障树分析法的案例推理策略, 不仅可以积累, 创造, 继承, 传播宝贵的故障诊断经验知识, 为装备操作管理人员提供大量有效的经验参考, 同时在无可参考经验的情况下还可以利用故障树中的专业原理知识对未发生过的故障进行分析判断^[4-5]。

本文以“网络接口发送正常, 接收异常”“武控台显示对接训练弹加电查询异常”“武控电源操控面板上指示灯不亮”典型故障为例, 阐述从故障现象描述到定位排除的分析过程, 帮助维修管理人员快速定位故障, 及时处理及

收稿日期: 2023-10-14; 修回日期: 2023-11-06。

作者简介: 冯楠(1981-), 女, 硕士, 工程师。

引用格式: 冯楠, 付建超, 韩传润. 基于故障树分析的通用无人飞行器武控系统典型案例研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(5): 178

排除故障, 对于提高整个武器系统的战斗力、降低维修费用等均有重要意义^[6-7]。

1 故障树分析原理

故障树分析法 (简记 FTA) 通过对可能造成系统故障的各种因素 (包括硬件、软件、环境、人为因素等) 由总体至部分按树状分支进行逐级细化分析。故障树分析在数学上是一种逻辑严密、自上而下、逐级演绎的分析方法, 在形式上以图形式表明了系统中故障事件和其它事件之间的相互影响, 直观地描述故障事件是如何发生的^[8-10]。故障树分析法可对系统或机器的故障进行预测和诊断, 画出逻辑框图, 从而确定系统故障原因的各种组合方式及其对系统的影响和它发生的概率, 采取相应的纠正措施, 从而提高系统可靠性的一种分析方法^[11-12]。故障树分析步骤见图 1 所见。

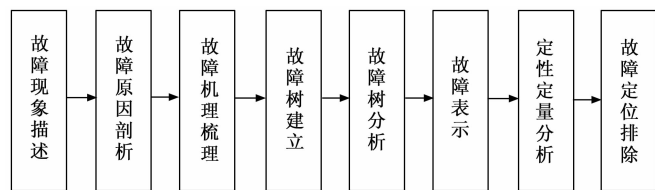


图 1 故障树分析步骤

2 基于故障树的典型案例分析

2.1 网络接口发送正常, 接收异常故障

2.1.1 故障现象描述及原因剖析

在执行通用无人飞行器武控系统试验过程中, 靶机进入后, 发射架调转, 武控台上显示简弹未加电, 发控设备在线、通信故障, 对发控设备断电后再加电, 故障消失, 发射正常。事后对现场录取的数据进行分析, 发现本次录取到的网络通信数据中, 发控设备只有定时一秒一次的心跳报文发出, 对于武控系统发出的需要接收确认的无人飞行器控制选择报文, 没有回馈接收确认报文, 也没有反馈执行结果, 同时发现, 发控设备发出的心跳报文时间间隔为 1 秒, 但报文中的时戳不正确, 从第一拍心跳开始, 时戳落后真实时间约 390 秒, 后一直不更新, 最大落后 555 秒, 然后更新了一次, 之后继续不更新, 到结束录取时, 已经落后真实时间 70 多秒, 可推断发控设备在本次过程中, 仅正常接收时码报文一次。

主要原因: 系统交换机发控口偶发故障; 网络电缆接触不良; 网络器件失效; 网络器件外围电路故障; 网络接收任务被阻塞; 协议栈 tNetTask 任务挂起; 网卡中断信号异常。

2.1.2 故障机理梳理及故障树建立分析

发控设备利用发控计算机主机, 通过内网交换机和双冗余以太网, 与武控系统进行网络通信, 其网络拓扑如图 2 所示。

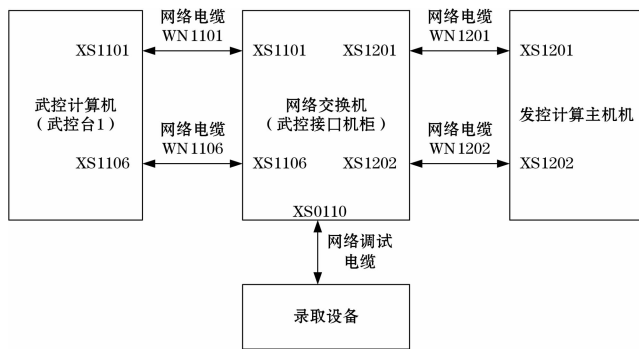


图 2 网络拓扑图

冗余网卡分别通过一对双冗余网络电缆与网络交换机对应端口连接, 设备加电后会选择 1 路网络进行通信, 另 1 路处于冗余备份状态, 当正在工作的 1 路网络出现链路故障时会自动切换至另 1 路冗余备份网络。

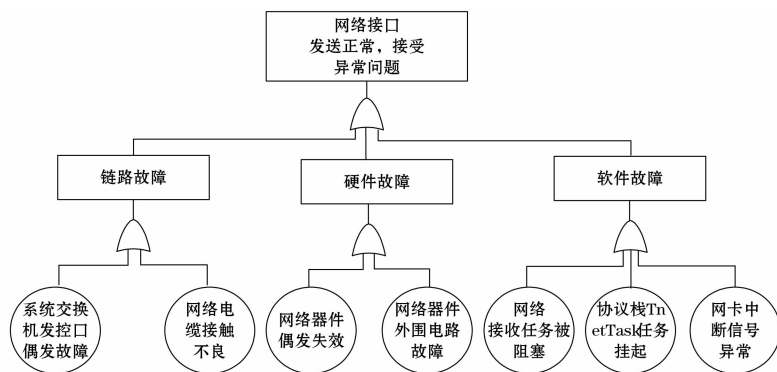
当问题出现时, 网络录取设备录取的报文表明, 武控设备正常发出了心跳报文、无人飞行器控制选择报文, 且无人飞行器控制选择报文的重复间隔时间符合 30 ms、60 ms 的设计值, 而发控设备只有心跳报文发出, 且发出的心跳报文中网络时戳不正确, 因此可以确认, 问题出现时, 发控设备可正常发出网络报文, 但无法正常接收网路报文。

为进行故障定位, 以“网络接口发送正常, 接收异常”为顶事件, 逐级建立如图 3 所示的故障树^[13-14]。图 4 为简化故障树。

2.1.3 故障表示及定性定量分析

$CF=X$ 表示可信度为 X , $0 < CF < 1$, 对于确定的故障树结构, $X=1$ ^[17]。

- 1) IF (G1 OR G2 OR G3) THEN (网络接口发送正常, 接收异常) $CF=1$;
- 2) IF (E1 OR E2) THEN (G1) $CF=1$;
- 3) IF (E3 OR E4) THEN (G2) $CF=1$;
- 4) IF (E5 OR E6 OR E7) THEN (G3) $CF=1$ 。



说明: G1—链路故障; G2—硬件故障; G3—软件故障; E1—系统交换机发控口偶发故障; E2—网络电缆接触不良故障; E3—网络器件失效故障; E4—网络器件外围电路故障; E5—网络接收任务被阻塞故障; E6—协议栈 tNetTask 任务挂起故障; E7—网卡中断信号异常故障。

图 3 “网络接口发送正常, 接收异常”故障树

如图 2 所示, 武控计算机和发控计算机的双

定性分析首先找出全部最小割集，用下行法进行分析^[18-19]。得系统的最小割集为：

{E1}, {E2}, {E3}, {E4}, {E5}, {E6}, {E7}。

依据专家经验， $CF(E1) = 1.53\%$ ， $CF(E2) = 73.96\%$ ， $CF(E3) = 18.42\%$ ， $CF(E4) = 0.23\%$ ， $CF(E5) = 3.31\%$ ， $CF(E6) = 1.71\%$ ， $CF(E7) = 0.84\%$ 。

2.1.4 故障定位排除

2.1.4.1 系统交换机发控口偶发故障

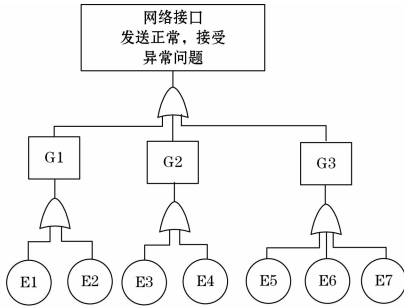


图 4 “网络接口发送正常，接收异常”简化故障树

采取定性分析方法中的下行法进行故障树分析，共得到 2 级共 7 个底事件构成了最小割级，如表 1 所示^[15-16]。

表 1 网络接口发送正常，接收异常故障模式表

顶事件	原因	
	二级	三级
网络接口发送正常，接收异常	链路故障	系统交换机发控口偶发故障
		网络电缆接触不良故障
	硬件故障	网络器件失效故障
		网络器件外围电路故障
	软件故障	网络接收任务被阻塞故障
		协议栈 tNetTask 任务挂起故障
		网卡中断信号异常故障

发控计算机主机在武器系统工作中，网络通讯接口连接至系统交换机与武控计算机通讯，利用组播工作方式收发数据。故障时的情况如下：

故障时，重启系统交换机，其他包括武控计算机未重启，故障消失。系统交换机提供了武器系统网络通讯平台。故障时未发现系统交换机重启导致其他网络接口通讯异常的情况。

故障时，使用第三方计算机记录了网络报文，解析出系统交换机按整秒通过网络接口向外发送的心跳报文，以及武控计算机的发送的时统报文。

正常工作下，发控计算机主机通过网络接口向外发送的心跳报文，需要实时将收到的时统报文的系统时间更新。故障时，发现系统交换机虽然按整秒通过网络接口向外发送的心跳报文，但心跳报文中系统时间没有更新。

由于交换机上的监控口未设置为镜像口，因此第三方计算机记录的网络报文，只能证明监控口能接收到武控给发控的报文，但不能证明给发控的接口也能接收到武控给发控的报文，因此需要复现故障进一步排查，目前尚不能

排除系统交换机故障。

2.1.4.2 网络电缆接触不良

试验前，系统对系统交换机使用的电缆均已经过检查。故障在系统交换机重启后就消失，系统其他设备未动作。

随后反复对系统交换机加电测试，故障均不复现。

发控计算机主机网络接口采用双网冗余设计。当其中正在通讯的网络线缆断开时，会产生 LINK 中断，CPU 执行网络接口切换操作，由另外一路网络线缆进行通讯。

采用 3 层交换机连接发控计算机主机进行了网络线缆模拟断开试验，情况如表 2 所示。

表 2 采用 3 层交换机进行网络线缆模拟断开试验的测试结果

序号	网络接口连接情况	网络切换情况	通讯情况
1	单独断开以太网 RX+	网络不发生切换	网络 PING 不通
2	单独断开以太网 RX-	网络不发生切换	网络 PING 不通
3	同时断开以太网 RX+、RX-	网络发生切换	切换后使用另外一路网口通讯；网络 PING 通
4	单独断开以太网 TX+	网络不发生切换	网络 PING 通
5	单独断开以太网 TX-	网络不发生切换	网络 PING 通
6	同时断开以太网 TX+、TX-	网络发生切换	切换后使用另外一路网口通讯；网络 PING 通

采用普通交换机连接发控计算机主机进行了网络线缆模拟断开试验，情况如表 3 所示。

表 3 采用普通交换机进行网络线缆模拟断开试验的测试结果

序号	网络接口连接情况	网络切换情况	通讯情况
1	单独断开以太网 RX+	网络不发生切换	网络 PING 不通
2	单独断开以太网 RX-	网络不发生切换	网络 PING 不通
3	同时断开以太网 RX+、RX-	网络发生切换	切换后使用另外一路网口通讯；网络 PING 通
4	单独断开以太网 TX+	网络不发生切换	网络 PING 不通
5	单独断开以太网 TX-	网络不发生切换	网络 PING 不通
6	同时断开以太网 TX+、TX-	网络发生切换	切换后使用另外一路网口通讯；网络 PING 通

尽管射前检查已经检查过了物理连接情况，同时在未动连接状态的情况下，只对发控进行断电加电操作，故障消失，但模拟验证试验的现象，与现场的现象一致，因此，网络电缆接触不良故障暂不能排除。

2.1.4.3 网络器件失效

网络器件（控制器件：LAN91C111i-NC）若存在缺陷，会导致网络通讯异常。

1) 变压器 ST-L1015NL；

网络变压器逻辑图，如图 5 所示。

系统交换机就会表现为网络发送功能正常，但接收功

能不正常的现象。然而线圈出现开路一般不易恢复, 故障现象稳定复现。系统交换机重启之后故障消失, 与变压器线圈开路的故障模式不符合。

2) 网络协议芯片 LAN91C111i-NC:

LAN91C111i-NC 的内部逻辑框图, 如图 6 所示。

分析图 6, LAN91C111i-NC 若内部存在异常有可能导致接收功能异常。网络器件失效故障暂不能排除。

2.1.4.4 网络器件外围电路故障

由于故障时, 系统交换机依然可以完成发送功能, 说明网络器件外围电路的晶振、电源、变压器发送端均工作正常, 否则, 就不能实现心跳报文通过网络的发送。

根据上述情况, 可以排除网络器件外围电路故障。

2.1.4.5 网络接收任务被阻塞

对应用层软件进行走读确认, 网络接收任务的优先级为 112, CAN 接收任务优先级为 113, 即网络接收任务的优先级高于 CAN 接收任务, 根据实时多任务系统的工作原理, 优先级高的任务总是可以被优先保证运行的, 从现场录取到的发控设备心跳报文中可以看出, 发控设备的 8 个通道均正常, 表明发控主机正常收到了发控 IO 控制器通过 CAN 总线发过来的心跳报文, 即低优先级的 CAN 接收任务可以正常运行, 因此可以推断高优先级的网络接收任务也可以正常运行, 发控设备之所以没有收到网络报文, 其原因不是应用层软件接收任务挂起。

底事件网络接收任务被阻塞故障可排除。后续如果问题复现, 可使用 i 命令、checkStack 命令查看系统中应用软件和系统任务的运行情况, 确认是否有任务出现异常。

2.1.4.6 协议栈 tNetTask 任务挂起

vxWorks 系统的网络协议栈在初始化时, 创建了一个名为“tNetTask”的任务。该任务是网络协议栈和网络驱动之间数据流入的一个主要接口, 网络驱动接收网络报文, 并传递给协议栈, 以及资源回收处理等工作都在这个任务中执行。如果这个任务因异常原因被挂起或者崩溃, 则接收方向的网络报文就无法被传递到协议栈中, 应用软件中的接收任务也收不到。而网络发送操作不使用该任务, 所有发送方向的报文不受影响。表现出来的故障现象就是接收不到网络报文但是能发送出去报文。

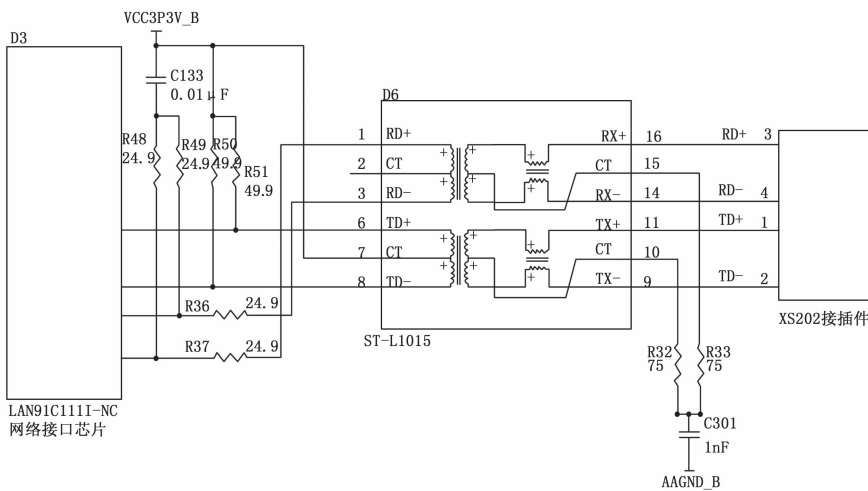


图 5 网络变压器逻辑图

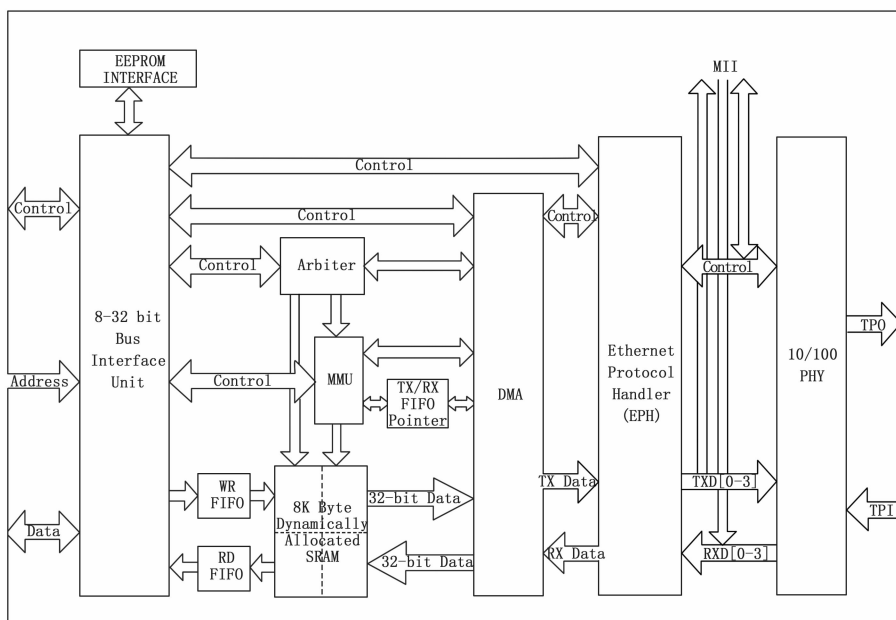


图 6 LAN91C111i-NC 逻辑框图

为进一步排除或者确认该故障因素, 做模拟试验, 使用“ts”命令将“tNetTask”任务临时挂起, 模拟该任务崩溃或异常挂起的状态。再进行网络通讯。发现应用层此时已经接收不到网络报文, 但是发送方向的报文仍能正常发出, 即故障时的现象可以模拟复现。

分析网络驱动中在“tNetTask”任务里执行的代码, 未发现可能导致任务崩溃或被异常挂起的缺陷。并且故障实际发生时, 由于现场未接调试串口线缆等观测设备, 无法通过调试终端确认“tNetTask”任务的状态。综合以上分析, 认为“协议栈 tNetTask 任务挂起”的故障模式, 只是一种理论上可能存在的因素, 目前无直接或间接的证据来证明其实际发生过。

可以排除协议栈 tNetTask 任务挂起。

2.1.4.7 网卡中断信号异常

当网络上有数据分发到发控计算机主机网络端口上时，网络驱动采用中断的方式进行数据接收。即当网卡控制器收到链路上的报文后，将报文暂存在硬件 FIFO 中，并产生中断信号通知网络驱动。网络驱动响应中断后，进行数据的拷贝接收以及向网络协议栈传递等一系列操作。如果网卡中断信号异常，则当数据分发到发控计算机主机网络端口上时，网络驱动收不到信号通知，无法进行数据接收，导致应用软件收不到网络报文。同时网络发送是一种主动操作，不需要等待中断信号即可进行，因此网络报文发送仍可正常进行。

根据试验，模拟关闭中断信号，会有两种现象：

1) 若外部没有发送到发控计算机主机的网络数据时，发控计算机主机可以正常完成定时发送网络报文功能。

2) 若外部持续发送报文给发控计算机主机，则发控计算机主机定时发送网络报文的功能也出现异常。

结合故障现场的实际情况，故障发生时武控是在定期发送报文给发控计算机，并且发控计算机主机的发送报文功能一直是正常的。

故障排除方法：

1) 系统交换机发控口偶发故障：对发控设备断电后，再加电。

2) 网络电缆接触不良：检查网络电缆，重新插拔接触不良的电缆；对虚焊点重新进行焊接。

3) 网络器件失效：更换失效网络器件。

4) 网络器件外围电路故障：检查故障电源，变压器等。

5) 网络接收任务被阻塞：对应用层软件进行走读确认，使用 i 命令、checkStack 命令查看系统中应用软件和系统任务的运行情况。

6) 网卡中断信号异常：更换网卡。

2.2 武控台显示对接训练弹加电查询故障

2.2.1 故障现象描述及原因剖析

对接训练弹加电配置查询时，武控台显示简弹故障。尝试多次加电配置查询后仍然显示故障；将对接训练弹更换弹位，进行 3 次加电配置查询，其中一次显示故障，其余两次正常。

主要原因：1) 发控地址位设置故障；2) 发控指令字错误；3) 指令字地址位与读取地址位不匹配；4) 自检数据错误；5) 2# 字地址时序不匹配。

2.2.2 故障机理梳理及故障树建立分析

对接训练弹的 1553B 总线通信初始化时，软件设计对 RT 地址位进行初始设置，若因时序导致 61580 芯片未及时置位，会导致 DSP 芯片读取到的发控地址位是错误的，从而无法执行完正确的自检流程。电路控制程序主要包含 DSP 芯片及通信的 61580 芯片。61580 芯片读取地址线通断序列获取地址位信息并上报给 DSP 芯片。在现有程序流程中，DSP 芯片在数据初始化过程中就要求读取 61580 芯片

地址位。在加电过程中，DSP 芯片和 61580 芯片存在一个加电准备好时序先后的可能，本次试验出现了在武器系统做加电配置查询时有简弹故障的现象。经分析，可能的原因是由于 DSP 芯片先准备好，此时读取地址位时，61580 芯片地址数据还未及时置位，导致 DSP 芯片在初始化过程中读取的地址位值为 61580 寄存器中的随机值，因此命令字中的 RT 地址可能不符合与对接训练弹实际置位地址，导致简弹查询故障。61580 芯片未完成初始化，则其地址位数据为随机值，完成初始化后默认值为 0000，读取通断序列后地址数据才为正常，因此 61580 芯片中存储的数据为随机数、0000、正常值 3 种可能。图 7 为指令字地址位与读取地址位匹配流程，图 8 指令字地址位与读取地址位不匹配流程。

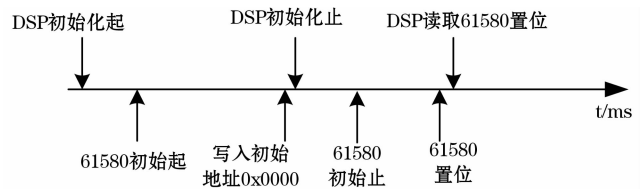


图 7 指令字地址位与读取地址位匹配流程

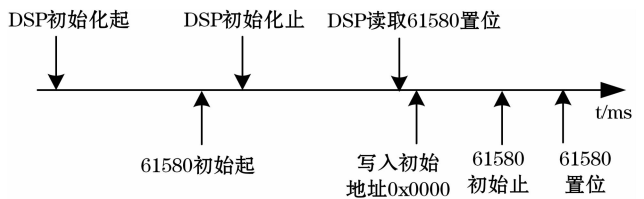


图 8 指令字地址位与读取地址位不匹配流程

通过分析总线监控数据，发现简弹回告数据时序为 0060、0421、0062（电池激活回告），如果发控给出第 2 个指令字的时间大于 4.35 s，则 2 号子地址的头子将写成 0062。

为进行故障定位，以“武控台显示对接训练简弹加电查询故障”为顶事件，逐级建立如图 9 所示的故障树^[20-21]。图 10 为简化故障树。

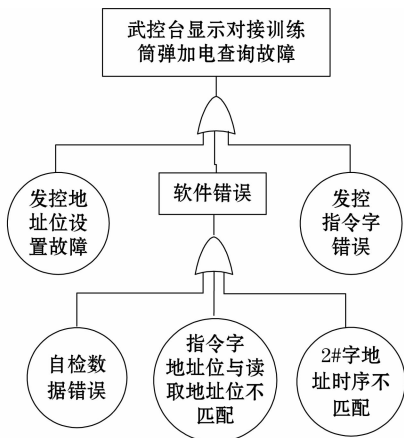
采取定性分析方法中的下行法进行故障树分析^[22]。共得到 3 级共 5 个底事件构成了最小割级，如表 4 所示。

表 4 武控台显示对接训练简弹加电查询故障模式表

顶事件	原因	
	二级	三级
武控台显示对接训练简弹加电查询故障		发控地址位设置故障
	软件错误	指令字地址位与读取地址位不匹配
		自检数据错误
		2# 字地址时序不匹配
		发控指令字错误

2.2.3 故障表示及定性定量分析

$CF = X$ 表示可信度为 X ， $0 < CF < 1$ ，对于确定的故障树结构， $X = 1$ 。



说明: G1—软件错误; E1—发控地址位设置故障; IE2—指令字地址位与读取地址位不匹配; E3—自检数据错误; E4—2# 字地址时序不匹配; E2—发控指令字错误。

图 9 “武控台显示对接训练筒弹加电查询异常”故障树

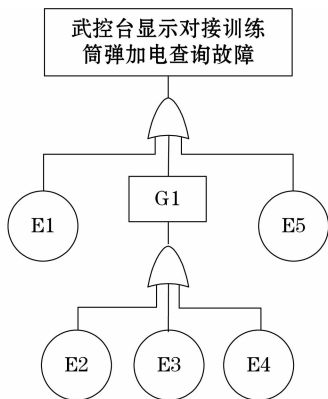


图 10 “武控台显示对接训练筒弹加电查询异常”简化故障树

① IF (E1 OR G1 OR E5) THEN (武控台显示对接训练筒弹加电查询故障) CF=1;

② IF (E2 OR E3 OR E4) THEN (G1) CF=1。

定性分析首先找出全部最小割集, 用下行法进行分析, 得系统的最小割集为:

{E1}, {E2}, {E3}, {E4}, {E5}。

依据专家经验, $CF(E1) = 20.78\%$, $CF(E2) = 53.44\%$, $CF(E3) = 3.66\%$, $CF(E4) = 20.89\%$, $CF(E5) = 1.23\%$ 。

2.2.4 故障定位排除

2.2.4.1 发控地址位设置故障

地址位设置由发控电缆内多根地址线通断序列来实现, 每个弹位的地址码是唯一固定的, 通过硬件实现, 若地址线序列错误, 会导致无人飞行器读取地址位错误, 引起通信失败。使用对接训练弹进行发控点火电流测试, 观察每个弹位上发控和对接训练弹通信是否正常, 从而说明发控设备地址位设置是否正确。

2.2.4.2 指令字地址位与读取地址位不匹配

模拟器电路在收到发控指令后, 会将指令中的地址位与启动时刻软件读取的发控地址位进行匹配, 如不匹配, 软件不执行后续流程。从故障发生的现象和总线的数据包分析, 在这一步骤出现问题的可能性很大。进一步分析, 在排除发控发送的指令字地址位出现问题的可能后, 出现不匹配, 有可能是软件启动时读取到的地址位是错误的。

2.2.4.3 自检数据错误

分析软件流程可知, 如前面流程正确, 则如果后续写入的无人飞行器自检结果数据有错误, 则也会报故障; 但从监控数据中如果并未检测到无人飞行器自检结果(头字 0061), 表明流程尚未执行到数据写入, 因此无人飞行器自检结果是未被写入, 而不是写入的数据错误。

2.2.4.4 2# 字地址时序不匹配

发控与筒弹通信中连续多次使用 2# 子地址, 且有严密的单次逻辑顺序要求, 若任何一帧通信有时序或数据方面的任何错误, 则整个通信都是故障的。考虑可靠性因素, 在加电 2 开始计时后 4.35 s, 若仍未查询到无人飞行器自检结果的指令字, 则软件自动填写 0062 为头字的数据。若出现发控流程稍有不同, 则可能会导致发控读取不到头字为 0061 的无人飞行器自检结果, 导致发控判故。

2.2.4.5 发控指令字错误

如果通信通道故障, 发控发送的指令字有错误或未能发送到对接训练筒弹, 则流程也会中断。

故障排除方法:

1) 使用对接训练弹进行发控点火电流测试, 将对接训练弹分别放置于 24 个弹位, 观察每个弹位上发控和对接训练弹通信是否正常;

2) 解析软件流程。

2.3 武控电源操控面板上指示灯不亮故障

2.3.1 故障现象描述及原因剖析

故障现象一: 当舰电已给武控系统供电但武控电源操控面板上的“舰电源输入”指示灯不亮; 故障现象二: 武控电源操控面板上的“变压器输出”指示灯不亮。

主要原因: 舰电输入异常; “舰电源输入”指示灯故障; “变压器输出”指示灯故障。

2.3.2 故障机理梳理及故障树建立分析

武控电源操控面板通过舰电完成对武控系统总加电、总断电和总复位功能, 结合面板上的加电、断电和复位按键, 可完成对武控系统加/断电和复位控制。

为进行故障定位, 以“武控电源操控面板上指示灯不亮”为顶事件, 逐级建立如图 11 所示的故障树^[23-24]。图 12 为简化故障树。

采取定性分析方法中的下行法进行故障树分析^[25]。共得到 2 级共 3 个底事件构成了最小割级, 如表 5 所示。

2.3.3 故障表示及定性定量分析

$CF = X$ 表示可信度为 X , $0 < CF < 1$, 对于确定的故障

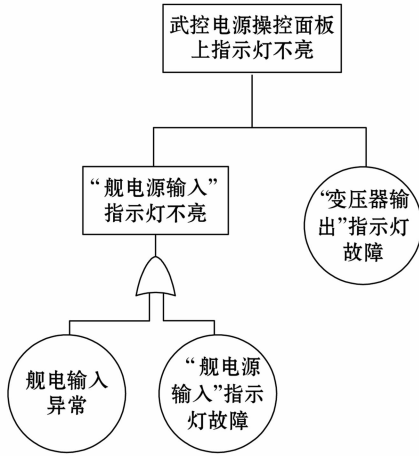
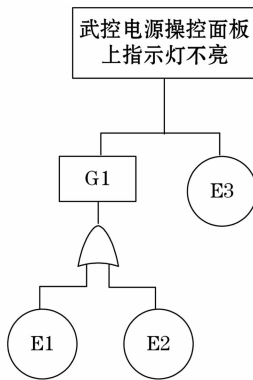


图 11 武控电源操控面板上指示灯不亮故障树



说明：G1—“舰电源输入”指示灯不亮；E1—舰电输入异常；E2—“舰电源输入”指示灯故障；E3—“变压器输出”指示灯故障。

图 12 武控电源操控面板上指示灯不亮简化故障树

树结构， $X=1$ 。

IF (G1 OR E3) THEN (武控电源操控面板上指示灯不亮) CF=1;

表 5 武控电源操控面板上指示灯不亮故障模式表

顶事件	原因	
	二级	三级
武控电源操控面板上指示灯不亮	“舰电源输入”指示灯不亮	舰电输入异常
		“舰电源输入”指示灯故障
		“变压器输出”指示灯故障

IF (E1 OR E2) THEN (“舰电源输入”指示灯不亮) CF=1。

定性分析首先找出全部最小割集，用下行法进行分析^[20]。得系统的最小割集为： $\{E1\}$ ， $\{E2\}$ ， $\{E3\}$ 。

依据专家经验， $CF(E1) = 13.22\%$ ， $CF(E2) = 46.58\%$ ， $CF(E3) = 40.20\%$ 。

2.3.4 故障定位排除

2.3.4.1 舰电输入异常

开启舰电电源后，若舰电电源输入电压表显示无电压，

且“舰电电源输入”指示灯不亮，则故障定位在舰电输入异常。

2.3.4.2 “舰电电源输入”指示灯故障

开启舰电电源后，若舰电电源输入电压表显示电压正常，但“舰电电源输入”指示灯不亮，则故障定位在“舰电电源输入”指示灯故障。

2.3.4.3 “变压器输出”指示灯故障

开启舰电电源后，若舰电电源输入和输出电压表显示电压正常，同时“舰电电源输入”指示灯亮，只有“变压器输出”指示灯不亮，则“变压器输出”指示灯故障。

故障排除方法：

对于故障现象一，应按以下步骤排除：

1) 旋钮开关 SA1 依次置于“L1”“L2”“L3”档，观察舰电电源输入电压表所指示的电压值是否正常；

2) 若舰电电源输入电压表显示电压正常，则通知舰电关闭电源，卸下该指示灯的灯罩，将内部的发光二极管取出换上一个新的发光二极管后重新装上灯罩，指示就可恢复正常。

对于故障现象二，应按以下步骤排除：

1) 旋钮开关 SA2 依次置于“L1”“L2”“L3”档，观察输入电压表所指示的电压值是否正常；

2) 若输入电压表显示电压正常，则将“舰电电源”短路保护器置于“OFF”的位置，卸下该指示灯的灯罩，将内部的发光二极管取出换上一个新的发光二极管后重新装上灯罩，指示就可恢复正常。

3 结束语

本文采用故障分析法对“网络接口发送正常，接收异常”“武控台显示对接训练弹加电查询异常”“武控电源操控面板上指示灯不亮”典型故障进行了完整的诊断分析，包括故障现象描述、故障原因剖析、故障机理梳理、故障树建立、故障树分析、故障表示、定性定量分析和故障定位排除等方面，以达到快速故障定位、积累故障子样等的目的。

参考文献：

[1] 姚志强. 案例推理在故障诊断中的应用研究 [D]. 神州：福州大学，2013.

[2] 钟秉林，黄仁. 机械故障诊断学 [M]. 北京：机械工业出版社，2000.

[3] 胡昌华，许化龙. 控制系统故障诊断与容错控制的分析和设计 [M]. 北京：国防工业出版社，2000.

[4] 关惠玲，韩捷. 设备故障诊断专家系统原理及实践 [M]. 北京：机械工业出版社，2000.

[5] 余鑫. 基于故障树和信号分析的电力变压器故障诊断技术研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2017.

[6] 王文晶. 基于故障树与实例推理的汽车故障诊断系统的研究与设计 [D]. 银川：宁夏大学，2014.

[7] 刘晶. 基于案例推理的电力变压器故障诊断系统研究 [D].

南昌:华东交通大学,2015.

- [8] PVAS. Parameter Estimation, Condition Monitoring and Diagnosis of Electrical Machines [Z]. Clarendon Press, Oxford, 1993.
- [9] 曹哲. 基于神经网络与案例推理的车载设备故障诊断研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.
- [10] 周东华,叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [11] 吴今培,肖健华. 智能故障诊断与神经网络[M]. 北京:科学出版社,1997.
- [12] 钟宇,白云,胡小江,等. 某自动测试系统神经网络故障诊断模块设计与实现[J]. 航天控制,2011,29(5):58-62.
- [13] 范会来,闫英敏,杨凤彪. 基于新型故障树的微控制器系统故障诊断方法[J]. 研究与开发,2012,31(1):56-59.
- [14] FUSSELL J B, VESELY W E. A new methodology for obtaining cut sets for fault trees [J]. Trans American Nuclear Society, 1972, 15(6):262-263.
- [15] 朱大奇. 电子设备故障诊断原理与实践[M]. (第2版). 北京:电子工业出版社,2004.
- [16] 袁润,等. 基于故障树的复杂系统故障诊断软件设计研究[J]. 核科学与工程,2012,32(1):74-78.
- [17] 王道平,张义忠. 故障智能诊断系统的理论与方法[M]. 北京:冶金工业出版社,2001.
- [18] WILSON J M. Modularizing and minimizing fault trees [J]. IEEE Trans Reliability, 1985, 34(10):320-322.
- [19] 史宏亮,张东,刘春来. 电路板故障诊断系统的快速控制原型方法研究[J]. 电子测试,2013,3(5):87-89.
- [20] 虞和济,韩庆大,李沈. 设备故障诊断工程[M]. 北京:冶金工业出版社,2001.
- [21] TANKA H, et al. Fault-tree analysis by fuzzy probability [J]. IEEE Transaction in Reliability, 1983, 32(5):161-175.
- [22] 石志军,陈倍在. 舰载雷达智能故障诊断系统研究[J]. 舰船电子工程,2013,33(3):111-113.
- [23] 徐章遂,房立清,王希武,等. 故障信息诊断原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
- [24] FRANK F M. Fault diagnosis in dynamic system using analytical and knowledge-based redundancy-a survey and some new results [J]. Automatica, 1990, 26(3):459-474.

(上接第177页)

6 结束语

课题提出一种导弹电液伺服机构的动态测试系统设计方案。根据测试需求,对伺服机构动态测试系统的硬件进行选型,结合虚拟仪器技术,采用模块化思想,对伺服机构动态测试系统的软件部分进行设计,结合选择的多功能数据采集卡 PCI-1742U,对测试过程中的激励信号产生、信号采集以及信号处理等关键问题进行软件实现。

参考文献:

- [1] 沈秀存,李漠喜,陈世年,等. 导弹测试发控系统[M]. 北京:宇航出版社,1994.
- [2] 董海迪,王哲,袁胜智,等. 电动伺服机构三闭环控制器设计[J]. 系统仿真技术,2021,17(3):159-164.
- [3] 申军. 基于 chirp 信号的导弹伺服机构动态测试系统[J]. 兵工自动化,2018,37(4):28-30.
- [4] 马瑞萍,董海迪. 基于正弦相关分析法的导弹伺服机构动态测试系统设计[J]. 工业控制计算机,2018,31(5):39-40.
- [5] 张晓雨,何华锋,郑建飞,等. 基于 PXI 总线的伺服机构测试系统[J]. 兵工自动化,2016,35(12):1-3.
- [6] 王建华,岳瑞华,顾凡. 基于 chirp 信号导弹伺服机构频率特性测试研究[J]. 现代防御技术,2017(4):180-185.
- [7] 孙运吉,肖卫国,谢廷毅. 基于虚拟样机的导弹伺服机构非线性特性研究[J]. 计算机与仿真,2011:196-200.
- [8] ZHAO X J, LIN F. Modeling and testing of linear electric servo system [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 241:1411-1417.
- [9] 李旭方. 基于 chirp 信号的电液伺服系统频率特性测试方法研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2014.
- [10] KOTOV K Y, MAL'TSEV A S, NESTEROV A A. Development and identification of a servo model based on experimental data [J]. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2013, 49(6):561-568.
- [11] 周江平,杨鹤. 伺服机构动态特性测试系统设计[J]. 计算机测量与控制,2019,27(8):25-29.
- [12] 黄浩然,文丰,贾兴中. FPGA 的高精度 DDS 信号发生器设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2022,22(12):75-79.
- [13] 张文广,王朕,刘生华. 基于 PXIe 总线的便携式电动舵机测试系统设计[J]. 国外电子测量技术,2018,37(7):122-126.
- [14] 付晓云. 基于 LabVIEW 的正弦响应法状态滤波器动态特性测试研究[J]. 精密制造与自动化,2021(1):17-22.
- [15] 时连君,朱琳,时慧喆. 基于虚拟仪器的伺服阀测试系统设计与实现[J]. 机床与液压,2022,50(19):66-72.
- [16] 夏本松,李思亮,邢科礼,等. 基于 LabVIEW 的伺服阀动态试验研究[J]. 计量与测试技术,2019,46(7):31-33.
- [17] 李晓涛,张跃军,魏列江. 电液伺服阀动态特性数据处理方法的研究[J]. 液压与气动,2018(8):102-106.
- [18] 李庆. 伺服电机负载模拟系统控制研究[J]. 现代制造技术与装备,2022,58(1):206-208.
- [19] 成兆义,陈安平,李俊岩,等. 基于伺服机构模拟装置的仿真模型分析[J]. 液压与气动,2019(4):133-138.
- [20] 孙玉凯,张仁嘉,吴志刚,等. 航模舵机的动态特性测试与系统辨识[J]. 北京航空航天大学学报,2020,46(2):294-303.