

基于点火系统故障的发动机起动冷悬挂排故分析

付敬红¹ 张加魁² 左寅¹

(1 空军工程大学航空机务士官学校 河南 信阳 464000; 2 中国人民解放军 95903 部队 湖北 武汉 430331)

摘要: 本文主要对某涡轴发动机点火系统故障引起的起动冷悬挂故障进行分析。首先分析了发动机起动过程, 其次建立了起动悬挂故障树, 然后根据现象排除故障, 并对故障原因进行深层次探索, 最后总结了起动悬挂的处理与排故经验, 为同类型发动机出现该故障时排故提供参考。

关键词: 涡轴发动机; 冷悬挂; 点火系统; 故障树

0 引言

涡轴发动机起动过程是指发动机从静止状态加速到慢车状态的过程^[1-3]。整个起动过程涉及发动机各系统、各部件及直升机相关系统的协同工作。根据直升机飞行需要, 发动机要能顺利地点火, 可靠地起动, 并且在不超温的前提下, 尽可能缩短起动时间^[4]。

本文就某型涡轴发动机起动过程中点火系统故障引起的冷悬挂故障进行分析, 从故障现象、原因分析、故障定位和排除等方面做了深入研究, 最后总结排故经验及使用、维护注意事项。

1 故障现象

某部一架直升机飞行起动过程中, 环境温度为30℃, 发动机采用自动起动方式。功率选择开关拨至地慢位置, 燃气发生器转速 Ng 从0开始上升。6s后 Ng 达到17.8%, 涡轮间燃气温度 ITT 开始上升, Ng 初始上升率为1%/s, ITT 初始上升率为70℃/s。之后 Ng 和 ITT 上升逐渐变慢。起动到26s时, Ng 最高为24%, ITT 达到450℃, Ng 上升率降为0.01%/s。发动机冷悬挂, 机组人员关闭发动机。

关车后检查发动机无异常, 经分析确认再次起动对发动机无影响, 当 ITT 降至61℃时按规定再次起动发动机, 起动成功。但是机组观察到在起动6~15s时 Ng 由18.4%上升到25%, 较正常起动上升慢。起动到15s之后发动机 Ng 和 ITT 变化正常, 加速到地慢状态。

2 发动机起动过程

涡轴发动机起动过程可分为三个阶段^[5]。第一阶段是燃气发生器转子由起动电机带转; 第二阶段是燃气发生器转子由起动电机和燃气涡轮共同带转; 第三阶段是燃气发生器转子由

燃气涡轮单独带转。起动过程中, 如果起动电机带转或涡轮带转任何一个发生问题, 都可能导致起动失败。

2.1 发动机起动特性

该型发动机正常起动过程如图1: 功率选择开关打至地慢位置时开始计时, 1s时 Ng 达到8%左右。6s时 Ng 达到16%~19%, 点火成功, ITT 开始上升, 初始上升率可达100~150℃/s。8s时 Ng 达到24%, 上升率为1.5~12.0%/s; ITT 继续上升, 上升率为60~170℃/s。20s时 ITT 达到最大值, 之后开始下降, 此时 Ng 上升率不变。35s后 Ng 达到65%, ITT 达到约560℃, 之后稳定, 发动机起动到地慢状态。起动过程中各阶段划分和发动机主要部件工作时序见表1。

2.2 故障发动机起动过程对比分析

发生故障时第一次起动过程中 Ng 和 ITT 随时间的变化情况见表2。发动机冷悬挂故障时冷状态起动、热状态起动与正常起动参数的对比见图2。

(1) 发动机冷状态起动: 起动前6s, Ng 与正常起动变化趋势一致, 说明起动的第一阶段起动电机带转正常。起动第6s时 ITT 开始上升, 说明发动机开始点火。但是点火后, ITT 初始上升率为70℃/s, 正常起动时 ITT

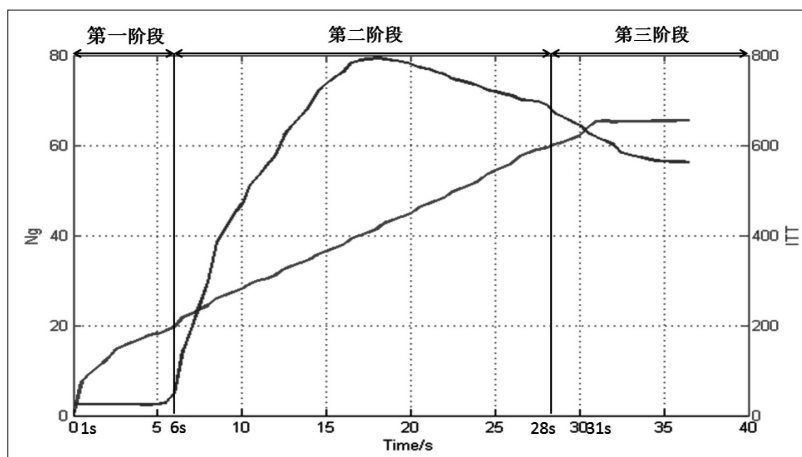


图1 某型发动机起动特性

表 1 某型发动机起动时序表

阶段	时间 /s	Ng/%	发动机工作情况
1	0	0	功率选择开关打至地慢位置；起动电机开始带转发动机；点火电嘴点火，燃烧室不供油
	1	8	燃调增压切断阀打开，燃油通过 7 个双油路喷嘴的主油路向燃烧室喷油
	6	16 ~ 19	开始点火，ITT 上升
2	8	24	14 个燃油喷嘴燃油分配阀打开，同时供油
	20	44	ITT 达到最大值，开始下降，Ng 上升率不变
	28	55 ~ 60	起动电机退出带转，点火激励器停止点火
3	35	65	Ng 和 ITT 稳定，发动机起动到地慢状态

表 2 发动机故障时 Ng 和 ITT 随时间变化表

序号	时间 /s	Ng/%	Ng 上升率 / (%/s)	ITT/℃	ITT 上升率 / (℃/s)
1	1	8.0195	—	40.3750	—
2	6	17.8393	1.6329	44.5000	69.9375
3	8	20.3203	0.9766	164.1875	49.7500
4	10	21.7969	0.5703	261.5000	33.1250
5	26	24.0156	0.0195	448.5000	3.7500

此时上升率为 100 ~ 150℃ /s，Ng 上升率为 0.5% /s，正常起动为 1% /s。可以看出起动 ITT 和 Ng 变化率从开始点火不正常，且与正常起动过程的差异随时间流逝逐渐增大。

(2) 发动机热状态起动：前 6s，Ng 变化正常，说明起动的第一阶段起动电机带转正常。6s 点火以后，ITT 和 Ng 的变化率开始与正常起动参数出现差异，并且随着时间的流逝而逐渐增大。直到起动第 15s 时，ITT 出现突升，之后 Ng 变化与正常起动相同，ITT 变化也恢

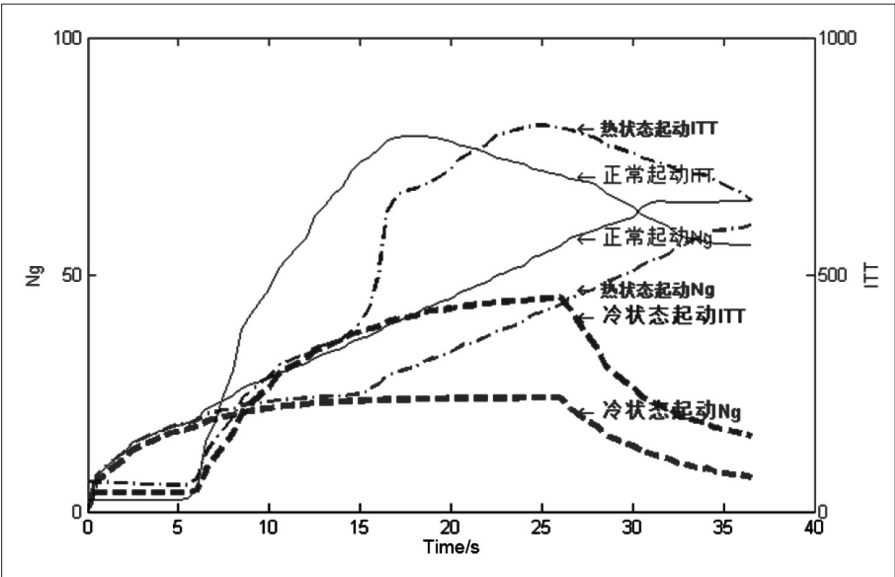


图 2 发动机起动参数对比

复正常，发动机起动到地慢状态。结合该型发动机的起动时序可以看出，单油路喷嘴供油时，发动机出现起动悬挂，一旦转速达到 24%，所有喷嘴参与供油，发动机起动恢复正常。

(3) 其他故障提示：通过对比起动时的飞参开量可知，冷状态和热状态起动期间燃油管路低限压力告警时间比正常起动时要长。正常发动机起动时，降压起动瞬间将整机电压由 28.5V 拉低至 18V 左右，燃油低限压力告警一般为 4 ~ 6s。该发两次冷悬挂时瞬间电压为 20V，但是燃油低限压力告警时间均为 10s。

综合来看，故障主要出现在起动的第二阶段，即起动电机与燃气涡轮共同带转的阶段。发现起动过程中主要存在如下问题：(1) 发动机点火后随即发生起动悬挂，说明发动机点火可能存在问题，不能形成稳定点火源；(2) 发动机热状态起动，Ng 在 24% 之前出现悬挂，在 24% 之后发动机起动恢复正常，且起动瞬间燃油管路低限压力告警时间长，说明发动机起动初始供油路可能存在问题，影响了发动机的起动。

3 故障定位

3.1 起动悬挂故障树的建立

机组进行原因分析时结合直升机与发动机的共同工作，从油、气、电三方面建立故障树如图 3。

3.2 故障定位

3.2.1 排除起动电源、燃油系统及其他部件的影响

机组首先检查起动供电。起动瞬间电压为 24.8V，之后恢复到 28.5V，电压正常。起动过程中蓄电池电流表指示一直为 0，说明起动过程中一直是地面电源供电，蓄电池无输出，排除电源供应故障的可能。

检查燃油供油管路无渗漏、堵塞等情况，密封性能良好；检查燃油增压泵工作正常，且根据经验，该型直升机地面起动不打增压泵，依靠发动机自吸油能够起动成功；检查防火开关、油门控制盒在规定位置。因此，排除飞机油路问题的可能。

检查放气活门和起动电机。放气活门开关正常，无卡滞现象。冷转测试起动电机性能，20s 内起动电机带转燃气发生器 Ng 可达到 24%，与正常的发动机相同，排除起动电机故障的可能。

3.2.2 检查发动机燃油系统部件

更换燃油滤和热交换器后试车参数曲线见图 4。虽然本台发动机一次起动成功，并且燃油管路低限压力告

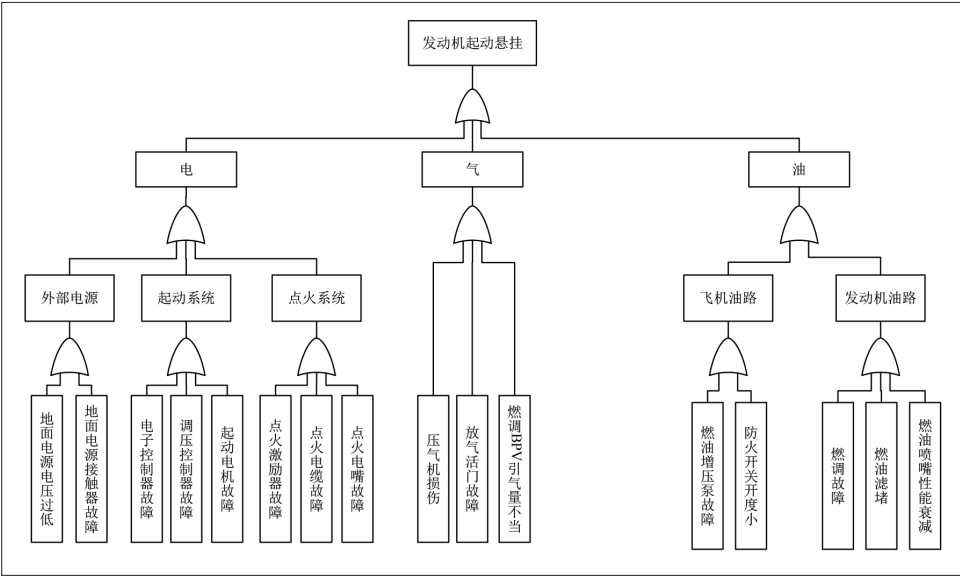


图 3 某型发动机起动悬挂故障树

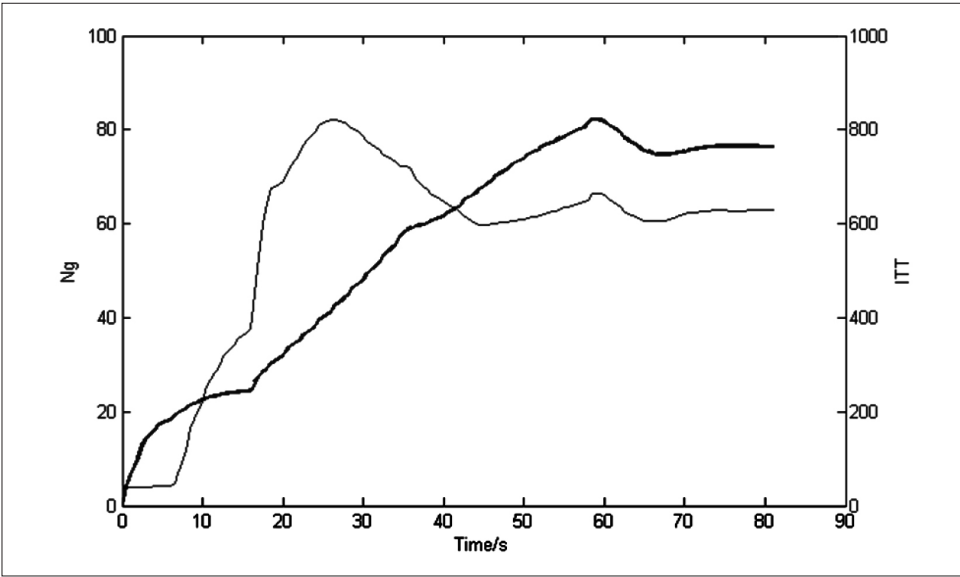


图 4 更换燃油滤和热交换器后试车参数

警 6s，时间正常，但是起动 9s 后，Ng 从 21.9% 上升至 24.5% 用时 7s，仍存在悬挂迹象；涡轮间燃气温度上升率为 20 ~ 40℃ /s，较正常偏慢。16s 之后发动机起动到地慢状态。

更换燃调和生态油箱进行验证，起动参数如图 5。本次起动过程中，Ng 在 6s 内达到 18.2%，之后 15sNg 上升到 24.4%；涡轮间燃气温度初始上升率为 40 ~ 60℃ /s，较正常值偏小。21s 之后发动机起动到地慢状态。本次起动中在 Ng 为 18.2% ~ 24.4% 之间仍存在冷悬挂现象。

截至本次起动，机组注意到这三次起动 Ng 都是在 24.5% 之前发生冷悬挂。根据国内车台实验数据：Ng 为 24% 之前，燃油通过 7 个双油路喷嘴的主油路向燃烧室喷油；在 Ng 为 24% 时，14 个燃油喷嘴所有油路全部打开，同时向燃烧室供油。因此机组怀疑喷嘴性能衰减导

致 Ng 在 24% 之前有部分双油路喷嘴主油路未打开，燃油供应量偏少引起冷悬挂。

换装新喷嘴继续试车，参数如图 6。Ng 在 6s 内达到 18.07%，之后 25sNg 上升到 23.24%；涡轮间燃气温度初始上升率为 40 ~ 60℃ /s，ITT 最高为 417.2℃，之后机械师关车。6 ~ 25s 之间发动机依然是典型的冷悬挂。因此，排除燃油喷嘴故障的可能。

3.2.3 更换点火激励器和点火电嘴

燃油系统排除后，机组更换点火激励器和点火电嘴后进行试车检查，发动机起动正常，起动参数如图 7。发动机起动曲线恢复正常，说明点火系统存在问题。

3.3 故障件研究

故障排除后机组为验证具体故障部位，将点火激励器和点火电嘴分别串件试车。试车发现发动机虽然起动成功，但是在低转速时加速性不好，确定是点火激励器和点火电嘴工作匹配不好。

通过分析认为，在起动 0 ~ 6s 内起动电机带转发动机加速正常。6s 时发动机点火，点火系统性能弱化导致点火电嘴能量不足，将部分燃气点燃。从压气机过来的气流有将燃烧的高温燃气吹出燃烧室的趋势，因此发动机冷状态起动时不能在燃烧室形成稳定点火源，导致起动第二阶段涡轮功率过小，造成冷悬挂。

在热状态起动时，虽然点火系统能量不足，点火初期燃气涡轮产生的功率较正常起动偏小，但是燃烧室余温使燃油雾化质量变好，能形成稳定的点火源。因此在点火初期 Ng 小于 24% 时，发动机能形成点火源但是燃气涡轮加速慢；一旦 Ng 超过 24%，14 个喷嘴同时向燃烧室供油时能稳定燃烧，发动机正常加速直至起动成功。

4 结语

本文介绍了一起非典型的点火系统故障引起的发动机起动冷悬挂故障的排除过程。现对发动机起动悬挂问题的处理与排故经验总结如下。

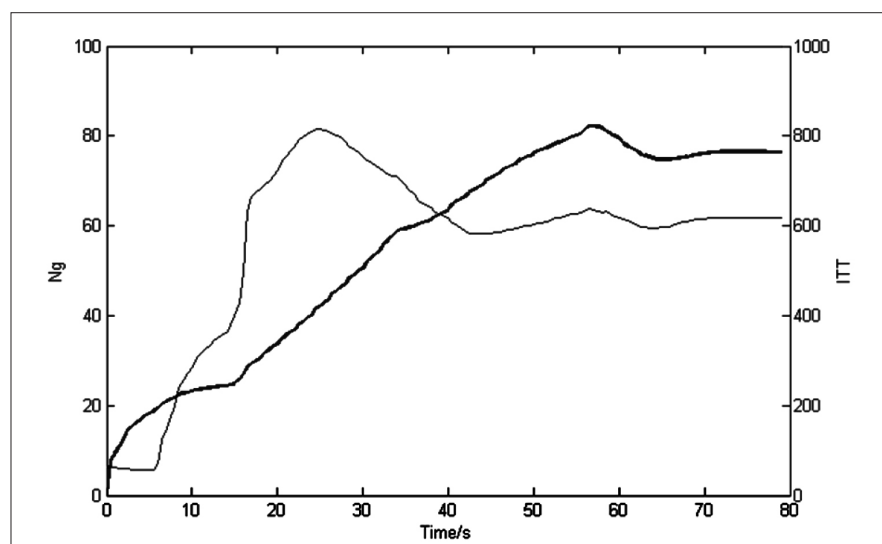


图5 更换燃调和生态油箱后试车参数

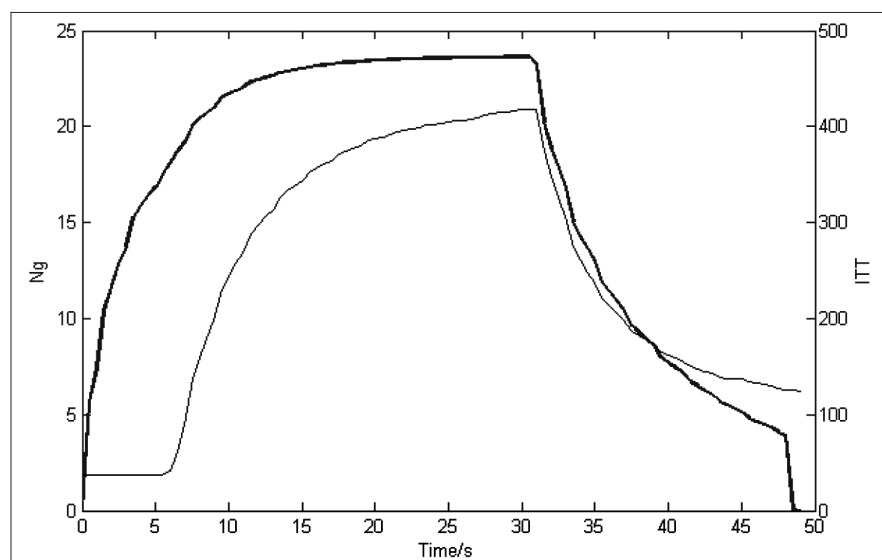


图6 更换燃油喷嘴后试车参数曲线

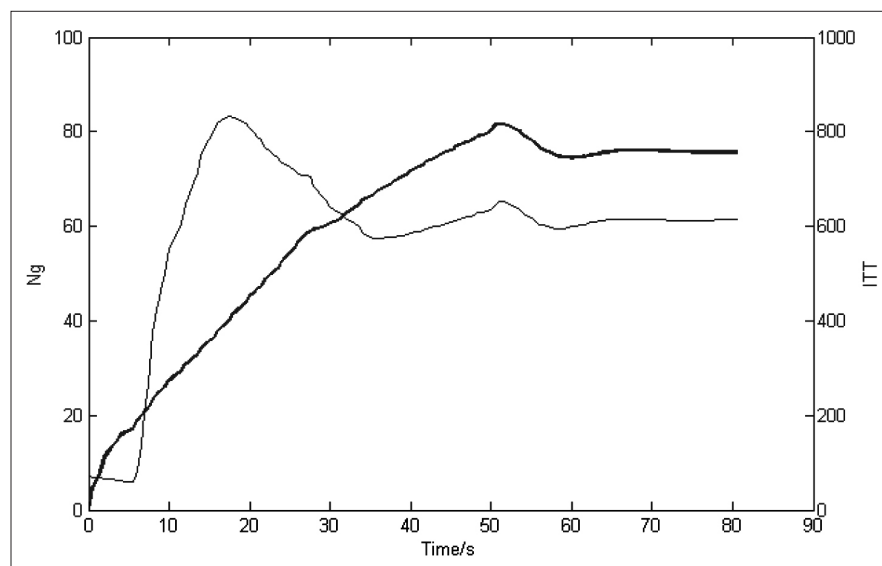


图7 更换点火系统后试车参数曲线

(1) 起动过程中监控好各项参数。根据经验该型发动机起动成功约需要 35 ~ 55s。在起动中机组要监控好各项参数, 保证起动过程中不出现超温、喘振等问题。

(2) 遇有特情处置要当机立断。起动过程中, 如果发动机有异响、参数变化异常、发参显示器报故或出现转速/温度过高等情况, 机组关车要迅速果断, 避免损坏发动机。同时, 要做好自动关车失效, 手动关车的准备。

(3) 排故步骤要科学合理。排故分析要全面细致, 根据故障现象, 由易到难进行深入研究, 最终定位故障。本次排故过程中, 从现象和时机来看, 是由于燃油供应不足导致的冷悬挂, 因此排故人员一直按燃油系统故障来排, 但是当燃油系统排完之后故障仍然存在。这时就要转换思路, 从故障树中的其他方面入手, 最终排除故障。

参考文献:

- [1] 任丁丁, 张浩, 翟亚浩. 某涡轴发动机高原启动热悬挂分析[J]. 工程与试验, 2020, 60(03): 46-47.
- [2] 张元. 发动机的启动悬挂问题的研究[J]. 航空维修与工程, 2010(05): 43-45.
- [3] 李小彪, 马征, 邱续茂, 等. 航空发动机高原启动成功率提高措施[J]. 航空发动机, 2019, 45(04): 75-78.
- [4] 傅强. 某型航空涡轴发动机起动过程控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(08): 2428-2430.
- [5] 殷锴, 魏芳, 张荣, 等. 考虑限制保护的航空发动机起动控制技术[J]. 航空发动机, 2016, 42(02): 34-37.

作者简介: 付敬红 (1990.05-), 女, 汉族, 河南郑州人, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 直升机机械、涡轴发动机; 张加魁 (1991.08-), 男, 汉族, 河北邢台人, 本科, 空中机械师, 研究方向: 直升机特情、航空发动机可靠性研究; 左寅 (1986.11-), 男, 汉族, 河南郑州人, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 直升机机械、故障诊断。