

某型航空发动机空中停车故障分析与预防

蔡宇攀

(广州市交通技师学院, 广东 广州 510100)

摘要 航空发动机空中停车是由于机械故障、电子系统故障、油液系统故障、飞机操纵失误、外来物影响等原因引起的发动机喘振或燃烧室熄火, 进而导致发动机停止工作的现象, 是引发空难的最大危险因素之一。本文深入分析了某型航空发动机空中停车的故障现象、故障原因、故障机理, 探索了预防空中停车的具体措施, 为有效排除航空发动机空中停车故障, 最大限度降低故障安全风险提供了参考借鉴。

关键词 航空发动机 空中停车 故障预防 机械故障

中图分类号: V23

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2022)08-0016-03

航空发动机是飞机动力总成的最核心的部件^[1], 是飞机飞行动力、机载器部件工作运转的能量源泉, 一旦发生故障, 将使飞机直接失去推力和操纵, 是航空领域危险系数最高的机械故障之一。及时发现故障现象, 透过故障现象尽快弄清故障机理, 对第一时间正确有效应对故障, 降低故障引发的安全风险具有非常重要而现实的意义。本文深入剖析了某型航空发动机空中停车的故障现象, 归纳总结了主要原因, 研析了产生故障的机理, 探索了预防措施。

据资料表明, 某型航空发动机空中停车, 多发生在高度大于7千米的高空环境中, 其中高度在14千米以上的超高空占停车总数的88%左右。引起发动机空中停车的原因很多, 归纳起来, 可分为操纵使用不当、参数调整不当和机械故障三个方面。

1 操纵使用不当引起的空中停车

1.1 故障现象与原因分析

1. 飞行员操纵飞机在进行小半径转弯或者大机动飞行的同时, 急剧改变发动机工作状态引发空中停车。根本原因是发动机工作状态发生剧烈变化, 导致发动机压气机出现了喘振, 喘振发生后, 空气流不能顺畅进入发动机燃烧室, 在供油量不变的情况下, 进入主燃烧室混合气的油气比 α 远大于1, 主燃烧室出现富油熄火。在7千米以上高空飞行时, 受空气温度随高度升高而逐渐降低的影响, 发动机压气机的进口温度降低, 增加比增大, 空气进入低压压气机的冲角减小, 但同时进入高压压气机的冲角增大, 导致低压压气机的喘振裕度增大, 高压压气机的喘振裕度减小。高空小表速飞行时, 由于空气稀薄, 密度显著降低, 同等条件下进入发动机的空气含氧量明显下降, 使压气机

特征曲线向右下方移动。发动机高压涡轮效率低, 从主燃烧室进入高压涡轮的高温高压燃气流量减少, 保持相同转速时, 涡轮前燃气温度升高, 使飞机飞行高度在增大的同时, 压气机的稳定工作裕度迅速减小。飞机进行大机动飞行或者遇到大气扰流时, 总是带着迎角和侧滑角, 因此气流斜向流入进气道, 在对称形进气道内出现不对称流动, 在进气道内分别形成了高压区和低压区, 气流在压力作用下会从高压区向低压区串流, 进气道的喘振裕度减小, 同时使压气机进口流场不均匀程度加剧, 总压损失增大, 压气机喘振裕度减小。因此飞机高空飞行时, 使本来就小的压气机喘振裕度变得更小, 飞行高度越高, 压气机喘振裕度越小, 如果此时改变发动机工作状态, 很容易使发动机喘振停车。

2. 高空机动飞行加速推油门过快引发空中停车。发动机在加速时, 低压转子的共同工作线远离喘振边界, 高压转子的共同工作线靠近喘振边界。加速过程中, 高压转子转速上升快, 相当于低压转子出气更加顺畅, 气压的节流阻挡作用减弱, 这种情况下能有效避免产生喘振。高压转子因为发动机加速供油量不随外界条件变化, 飞行高度越高, 进气的含氧量就越低, 这时出现了富油现象, 涡轮前燃气温度随之会越来越高, 此时高压转子共同工作线向喘振边界偏移, 容易产生喘振停车。

3. 高空机动飞行时收油门减速过快引发空中停车。发动机减速时, 低压转子共同工作线靠近喘振边界, 高压转子共同工作线远离喘振边界。空中小表速飞行时, 转子共同工作线向左上方移动^[2]; 飞机进行大机动飞行时, 发动机进口的气流方向突变明显, 喘振边界向右下方移动。所以, 在高空小表速大机动飞行时,

压气机的喘振裕度减小明显,发动机稳定工作的范围迅速变小。如果减速时,收油门动作稍快一些,会使低压压气机的共同工作线进入喘振区引发喘振,高压压气机受低压压气机喘振影响,也会进入喘振状态,导致空中停车。

4. 飞机动力升限飞行时动作量过大引发空中停车。动力升限飞行特点明显:飞机迎角大、表速小、高度高。由于飞机迎角大,进气道处于不对称状态下工作,发动机进口气流流场很不均匀,使压气机喘振裕度减小较多;由于表速小、高度高,发动机转子的共同工作线向左上方移动,进一步减小压气机喘振裕度,此时发动机稳定工作的范围变得很小。如果操纵动作量大,则将使压气机的喘振裕度进一步减小,极易引起喘振停车。

1.2 预防措施

1. 防止发动机空中停车,主要措施是详细了解各种飞行状态的特点,正确使用发动机。当夏季低空大速度飞行时,压气机的喘振上限转速是随着温度和飞行速度的增大而增大,在飞行中大表速状态下要收油门减速时,应分段收油门,不能速度太快、动作太猛。在条件允许的情况下,收油门减速与小半径转弯不要同时进行。

2. 要正确掌握接通和断开加力的时机。发动机加力的接通与断开,都是发动机工作状态的突变,不要在机动飞行全加力时猛关加力;断开加力时,先收到最大状态,停留不少于5秒后,再收油门至需要的转速;严格按规定使用偶遇加速。

3. 要防止空中供油中断,尤其要严格控制零、负过载飞行,不能超过规定值。

2 发动机参数调整不当引起的空中停车

2.1 故障现象与原因分析

1. 加速副油道油压调整不当引起推油门加速时出现空中停车,主要原因是加速副油道油压偏高。依据发动机升压限制器工作原理可知,副油道油压作用于升压限制器活门左边,在克服活门右边的弹簧力后,活门右移,打开随动活塞左侧的进油路和中间的回油路,限制随动活塞左移速度,避免供油量过多;同时,关闭活塞右侧通低压腔的油路,从定压活门后来的油液经层板节流器进入升压限制器活塞后,不能流回低压腔,活塞右腔油压增大,使活塞逐渐左移,增大活门弹簧力,又使活门左移,逐渐关小随动活塞进、回油路的开度,以控制随动活塞左移速度。若慢车副油道油压偏高,必将使加速供油量增加过快,加速时间

变短,燃烧室内过分富油,造成发动机熄火停车。

2. 发动机控制高空限制器活门开度的P2"调整不当引发空中停车。高空飞行时,加力燃烧室燃气压力低,燃烧条件差,空气流量小,加力供油量也小,加力喷嘴前的油压降低,燃油雾化变差,这些都使稳定燃烧范围大幅度缩小。如果P2"调整不当,造成加力燃烧室燃烧不稳定,极易产生推力脉动甚至熄火。加力燃烧室熄火后,涡轮后的压力发生突降,落压比激增导致涡轮功突然加大,涡轮带动低压转子转速N1突然增大,引起喘振停车。加力燃烧室熄火后,N1突增,发动机转速调节器调小供油量,易引起主燃烧室余气系统贫油熄火停车。

3. 加力供油速度和喷口收放速度不协调引发空中停车。主要在接通加力过程中,通过低压转子转速N1、高压转子转速N2和涡轮功的突增、急降,使压气机喘振裕度大幅度减小引发喘振。加力燃烧室的余气系数过贫或过富,超出稳定燃烧范围引起熄火,进而导致主燃烧室也出现富油熄火。在高空接通加力过程中,如果加力供油速度与喷口收放速度不协调,更容易引起空中停车,因为高空飞行时,加力燃烧室、主燃烧室的稳定燃烧范围小,压气机喘振裕度更小。

2.2 预防措施

1. 新发动机或新燃油泵装机后,启封或者磨合运转不彻底,也可能会造成推油门加速时停车,所以在装机后第一次试车时,应从慢车N1为33%到99%推收油门不少于8至10次;空中试飞时,应在高度5-10千米范围内,以发动机额定状态工作过不少于30分钟。

2. 为保证喷口收放速度与加力供油速度协调,一般情况下规定地面接通加力的瞬间(5秒钟内),低压压气机转子转速不超过106.5%,涡轮后温度急降在20至60℃之间,高压转子转速允许有急降现象。

3. 机务人员要严格落实飞机维护规程,定期开展喷口收放检查测量,及时消除隐患。

3 发动机机械故障引起的空中停车

3.1 停车现象与原因分析

1. 中央传动装置损坏引起空中停车。中央传动装置的从动圆锥齿轮在飞行中疲劳损坏,不能带动主燃油泵、转速传感器等附件工作,燃油不能正常供往发动机,致使发动机主燃烧室贫油熄火。故障特征是:低压转子转速N1指示10%左右,高压转子转速N2指零,发动机排气温度表、滑油压力表指零,发电机故障信号灯亮,且空中开车不成功。

2. 转子抱轴引起空中停车。发动机的前中介轴承

或后中介轴承因润滑不良而损坏,发动机抱轴,压气机和涡轮由双转子变成单转子。当低压转子转速 $N1$ 大于 85%, 发动机喘振停车, 空中开车不成功。

3. 压气机叶片折断引起空中停车。飞行中因意外撞鸟或进气道结冰, 打伤发动机一级叶片, 或一级叶片气流攻角增大接近临界攻角, 发生颤振, 使一级压气机叶片发生折断, 折断部分打伤后几级叶片, 使压气机喘振裕度减小出现喘振。严重时, 会卡死低压转子, 造成发动机空中停车。如果第二、三、四级低压压气机叶片折断, 压气机的喘振裕度会锐减, 在外界因素干扰下, 极易喘振停车。

4. 涡轮装置损坏引发空中停车。高压涡轮叶片折断, 涡轮转子平衡性变差, 发动机振动值超标, 高压压气机转子转速摆动量超过 2%, 发动机工作极不稳定。另外, 高压涡轮叶片折断后, 还会引起高压转子转速下降, 高低压压气机和涡轮的转速差增大。此时高压压气机对低压压气机的节流作用增强, 低压压气机的喘振裕度变小, 也易造成低压压气机喘振停车。如果低压涡轮导向器叶片烧蚀变形, 在一般情况下, 使低压涡轮功减小, 低压转子转速 $N1$ 下降, 为保持 $N1$ 不变, 转速调节器会增大发动机的供油量, 使涡轮前燃气温度升高, 一方面使高压压气机的喘振裕度再次减小, 另一方面将进一步烧坏涡轮。如果烧蚀变形严重, 涡轮导流叶片和低压涡轮转子会发生严重摩擦, 进而导致发动机停车。

5. 燃油调节系统故障引起空中停车。主要是燃油调节系统的各调节元件不能根据飞行状态和发动机工作状态的需要自动调节发动机的供油量, 造成主燃烧室超出稳定燃烧范围而熄火停车。最常见的是燃油系统等差活门出现卡滞, 活门运动摩擦力增大。当收油门到自始转速以下位置时, 由于油门开关前后油压差急剧增大^[3], 等差活门两端的油压差亦随之增大, 仍能推动活门左移, 打开通往调节活塞左室进油路和中室的回油路, 以减小油泵的供油量。当油泵供油量下降后, 作用在等差活门两端的油压差力逐渐下降, 等差活门在弹簧力的作用下使活门右移, 关闭通往调节活塞的进、回油路, 以保持此时的供油量不再继续下降。但由于等差活门已被卡滞在打开位置, 弹簧力不能克服摩擦力和油压差力, 活门不能右移, 调节活塞左室和中室的油门不能关闭, 此时油泵的供油量继续下降, 致使发动机贫油熄火停车。

6. 加力系统故障引起空中停车。(1) 加力输油圈断裂、加力燃油不能雾化燃烧, 接不通加力, 但此时喷口已经放大, 使得加力燃烧室内温度下降, 涡轮后

压力降低, 低压转子的转速 $N1$ 突增, 引起低压压气机喘振停车。(2) 涡轮后 P4 导管断裂, 落压比调节器薄膜上的压差增大, 落压比调节器调大加力供油量, 加力燃烧室温度增高, P4 增大, 涡轮增压比减小, 高低压转子转速减小, 为保持转速 $N1$ 不变, 转速调节器调大供油量, 涡轮前温度增高, 易烧坏涡轮而引发停车。(3) 喷口操纵系统故障, 断加力时, 喷口收的过慢, 仍处于较大直径位置, 涡轮后压强降低, 涡轮落压比增大, 使低压转子转速增加, 转速调节器为了保持低压转子转速 $N1$ 不变, 减小供油量, 从而使涡轮前温度降低, 高压转子转速 $N2$ 随之降低, $N1$ 、 $N2$ 转速差增大, 高压压气机对低压压气机的节流作用增强, 使低压压气机喘振停车^[4]。

3.2 预防措施

1. 做好日常维护保养, 严格执行《飞机维护规程》规定, 保持燃油系统的清洁, 防止雨水、杂质等进入系统, 引起燃油系统的活门等运动机件锈蚀或卡滞; 严格执行质量检验制度, 把好放飞关。

2. 加强对油门操纵系统的检查维护, 防止操纵系统连接部件松脱造成操纵失灵。

3. 地面试车时注意观察发动机的参数变化, 遇有不符规定值时, 认真诊断修复。

4. 正确调整起动性能和加减速性能, 确保符合相关规定。

海恩法则警示我们, 只要及时斩断任何一条安全隐患链条, 都完全能够避免事故的发生。一台航空发动机有成千上万个零部件, 在使用过程中不可避免地会出现磨损老化, 甚至疲劳断裂失效, 这是一个从量变到质变的过程, 只要我们在日常维修工作中注意观察, 善于发现微小变化, 及时处置, 定能防患于未然, 保证飞行安全的万无一失。

参考文献:

- [1] 张志革, 王敏丰. 航空发动机机匣机械加工过程中变形因素分析及变形控制 [J]. 中国设备工程, 2020(15): 214-125.
- [2] 屈裕安, 谢寿生, 宋志平. 矢量喷管控制对发动机性能的影响 [J]. 航空动力学报, 2004, 19(03): 300-304.
- [3] 李吉. X6 发动机燃油调节器建模与仿真研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [4] 徐昌顺, 祝刚, 李罡. 对两次关加力引起空中停车问题的探讨 [C]//中国航空学会航空维修工程专业委员会年会. 中国航空学会, 2002.