

航空发动机整机振动典型故障分析

郑旭东, 张连祥

(中航工业沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)



郑旭东(1972)男,硕士,高级工程师,从事航空发动机质量管理及结构强度设计工作。

收稿日期:2012-10-12

摘要:为解决航空发动机整机振动问题,根据测试结果描述了航空发动机整机振动的 3 种典型故障:转子热弯曲引发的振动故障、转静子碰摩引发的振动故障和甩油孔位置不当引发的自激振动故障,说明了振动故障的特征,经分析认为故障发生的原因甩油孔位置不当引发的自激振动,给出了排除上述故障的措施,经验证,排故效果良好,证明了采用的排故措施有效。

关键词:整机振动;自激振动;转子热弯曲;碰摩;航空发动机

Typical Failure Analysis of Aeroengine Vibration

ZHENG Xu-dong, ZHANG Lian-xiang

Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China

vibration failure was illustrated. The reason is self-exciting vibration caused by the out of position for oil hole. The good failure elimination result proves that the methods are valid.

Key words: engine vibration; self-exciting vibration; thermal bowed rotor; rub interaction; aeroengine

Abstract: To solve the aeroengine vibration failures, three typical failure of aeroengine vibration were concluded by the testing results. The vibration failures caused by the thermal bowed rotor, rotor-stator rub interaction and out of position for oil hole. The characteristic of vibration failure was illustrated. The reason is self-exciting vibration caused by the out of position for oil hole. The good failure elimination result proves that the methods are valid.

0 引言

整机振动历来是航空燃气涡轮发动机设计、制造加工和使用中的重大问题,多数发动机在研制过程中都经历过。有的发动机在研制中时常受到振动问题的困扰,其振动超标台次比例占总试验台次的 1/4 ~ 1/3,从而影响发动机调试工作的进展;有的发动机在交付使用后,因振动偏大造成的返厂率达 5%左右。振动的存在降低了可靠性,威胁使用安全,同时带来一定的经济损失。

整机振动故障产生的原因很复杂,多是各种综合因素共同作用的结果。因此,弄清整机振动的规律,确定发生振动故障的原因,寻求解决振动偏大故障的有效措施,是航空发动机振动理论和工程应用研究人员面临的重要任务。

本文阐述了航空发动机整机振动的典型故障,分析了故障产生的机理和原因,提出了解决故障所采取

的措施。

1 转子热弯曲引发的振动故障

国内外航空发动机研制部门非常重视对转子热起动问题的研究和验证工作。美国空军的涡轮发动机结构完整性大纲指出,从满足飞机战术要求来讲,应该将解决热起动问题列入修改结构或冷却流路等日程,并已将研究挠曲转子的起动问题列入新的设计和试验中。

在某型航空发动机研制期间,曾多次发生转子热弯曲引起的振动偏大问题。其振动特点为在起动过程中振动突然增大多倍,存在 1 个相当高的振动峰值,有时导致起动终止,有时引起压气机转子叶片与机匣以及转子封严篦齿与静子叶片封严环之间严重碰摩,严重时,造成转子叶尖多处掉角和出现裂纹等后果。

热起动过程的转子热弯曲问题发生在发动机停车后,此时发动机工作温度较高,叶片-轮盘-转轴封闭在机匣内,处于冷却过程中。外界气流不断从进口流向

发动机内。由于外界气流温度较低,发动机内气流温度较高,热气流密度较小,向上浮动,冷气流密度较大,向下流动。因此,转子周围温度分布不均,上部变热,下部变冷。在温度载荷作用下,转子上、下部膨胀量不同,以至发生弯曲变形。温差越大,弯曲变形程度越大,从而产生很大的不平衡量,引发较大的外传振动。

大量试车数据统计分析表明,在热起动过程中的振动响应不仅与热起动前的停车时间间隔有关,同时与发动机前次试车的工作时间和达到的工作状态有关。如果前次试车工作状态较高,在高状态下工作时间较长,表明发动机已经热透,转、静子间隙处于良好状态,在热起动过程中不会发生转、静子碰摩,外传振动不会增大。如果前次试车工作状态较低,在高状态下工作时间较短,即表明发动机没有热透,在热起动过程中则会发生转、静子碰摩,外传振动响应会增大,比已热透发动机的大 20%~50%。实践表明,为避免在热起动过程中出现较大的振动响应,设计时应综合考虑各种因素,合理确定发动机转、静子间隙,并设计具有一定程度弯曲的平动或俯仰型临界转速,距离慢车转速留有足够的裕度。使用时,对于具有较强热弯曲的转子,在一定的停车时间间隔范围内进行再次热起动,以避免发生转子热弯曲现象。

某型发动机在不同起动条件下整机振动测试结果如图 1 所示。从图中可见,在冷起动过程中发动机振动很小,最大振动值为 7 mm/s,停车 46 min 后再次起动,最大振动值达 100 mm/s 左右。如果在再起动前进行 1 次冷运转,停车后 46 min 再次起动,最大振动值为 17 mm/s 左右。说明在再起动前进行 1 次冷运转,可以明显改善发动机转子热弯曲引发的振动响应。

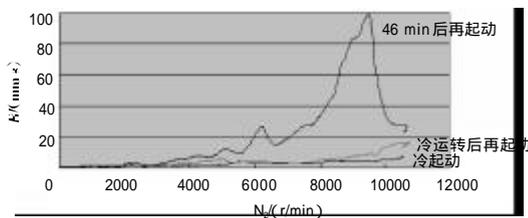


图 1 在不同起动条件下振动值随转子转速的变化

2 转、静子碰摩引发的振动故障

对于航空发动机而言,在不断提高推重比及提高作为主要循环参数的工作介质温度和工作压力情况下,对转、静子封严间隙提出了越来越高的要求,使得在工程上解决整机振动问题越来越困难。加大转、静

子间隙,势必影响发动机的效率和推力等,而缩小转、静子间隙,可能带来由于转、静子碰摩引发的部件或整机振动问题。

在某型航空发动机整机调试期间,曾发生与瞬态温度场有关的振动偏大故障,对该振动故障分析表明:

(1)根据振动测量和频谱分析结果,认为振动值较大时,主要表现在高压转子 1 倍频率分量较大,并有一定量值的高压转子 2 倍频率分量,而低压转子 1 倍频率分量相当小。故发动机振动偏大故障原因主要来自高压转子。

(2)在“充分暖机”后,在稳态和瞬态下,其振动值均较小,远小于振动限制值(为振动限制值的 1/5~1/3),即使在最高转速状态下,振动值也很小。说明该振动故障不是由于转子不平衡量较大引起的。

(3)在“充分暖机”后,其振动值均较小。仅在油门杆上推过程中,某一转速出现振动峰值,而在油门杆下拉过程中,不出现振动峰值。说明该振动故障不是转子共振或出现临界转速所造成的。

(4)认为该振动故障主要与发动机的温度场和工作转速有关。即在发动机处于某一状态下,在转、静子最小封严间隙部位,转子热变形和离心变形较大,而静子热变形较小,容易消除转、静子最小封严处间隙,以至发生碰摩。涂层较薄的封严件的涂层被磨光后,就会发生金属机体的“硬碰硬”磨损,从而产生较大的振动,一旦转、静子最小间隙处从接触到脱开,振动值便遽然减小。

针对该振动故障,将发动机分解后普查转、静子碰摩部位,对碰摩较为严重处加大局部间隙后,振动峰值明显减小,且出现振动峰值的转速减小,峰值驻留时间变短。该排故措施取得明显效果。振动偏大故障排除前、后的振动变化如图 2、3 所示。

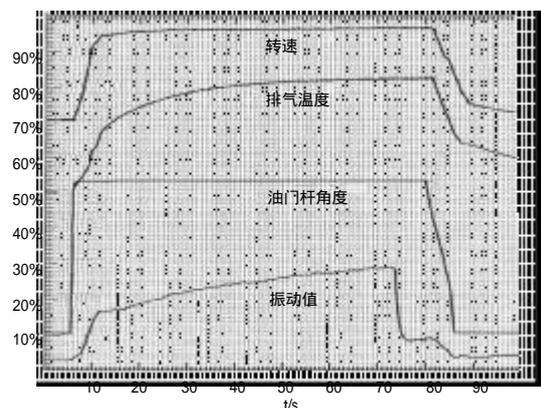


图 2 振动故障排除前参数变化曲线

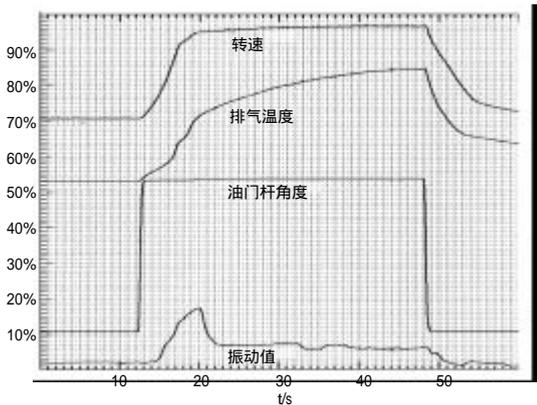


图 3 振动故障排除后参数变化曲线

3 甩油孔位置不当引发的自激振动故障

自激振动和失稳虽不经常发生,但一旦发生就易引发严重故障。因此,在设计和加工制造阶段应避免引发自激振动。但是,由于对自激振动失稳的机理了解得不够清楚,欲做到准确预估,防患于未然,还存在相当大困难。在某型航空发动机研制阶段,曾发生 1 起甩油孔位置不正确引发的自激振动故障。该发动机历经 3 次上下台装配、地面试验和分解,共试车 50 余次。在试车起动过程接近慢车转速时或在慢车转速停留一定时间(最短 5 s,最长 2 min),出现异常响声,并伴随振动突然增大现象,有时从喷口处有火星喷出。分解后发现故障主要集中在压气机前支点附近的转子和静子件。压气机各级转子叶片叶尖磨损严重,最大磨损量约 1 mm;转子鼓筒内有较多积油;压气机前支点石墨跑道与外环相摩;前支点轴承锁紧螺母松动,锁紧螺母锁片被剪断。

试车过程中的振动 3 维分析如图 4 所示。从图中明显可见,存在 1 个基本不变或稍微变化的振动频率(156 ~ 160 Hz),不随发动机转速频率变化而变化。在

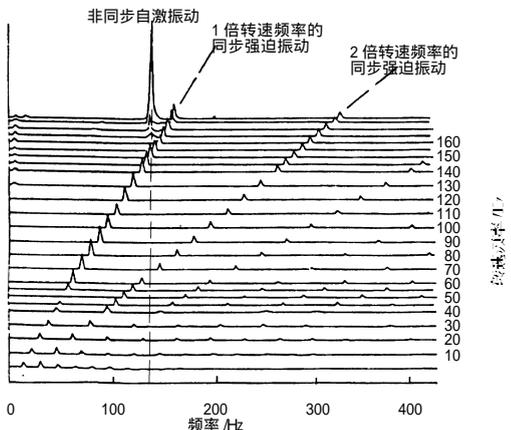


图 4 转子振动 3 维分析

慢车转速附近,该频率对应的幅值突然增大。发动机工作状态较低,工作时间很短,但将发动机分解后发现故障相当严重,说明振动能量很大。分析认为该振动故障不是一般的共振,也不是通常的强迫振动,而是比较典型的非同步自激振动。

该振动故障的机理:在发动机改装时,为适应工艺要求,在压气机前轴颈修改设计过程中,将内孔积油槽处的 2 个斜向甩油孔(5(a))改为直向甩油孔(图 5(b))且改变了位置,如图 5 所示。从图中可见,甩油孔偏离了内腔集油槽的最低点。在发动机工作时,如出现滑油泄漏情况,滑油流入压气机转子内腔时,致使内腔积油甩不出来。同时,由于装配时,空气导管与前轴颈的密封胶圈损伤,发生滑油泄漏,使压气机转子内腔积存滑油,在转子不平衡力作用下,作正同步进动时,积油被甩向远离中心的一侧,使不平衡量加大,不至引起自激振动。但当偶然出现次同步进动时,因转子自转转速 ω 大于公转转速 Ω ,在液体的黏性作用下,转子中的积油被转子自转带动向前方转动,使得积油质心位置总是超前于转子振动方向 1 个角度,如图 6 所示。积油除被转子带着作正进动之外,

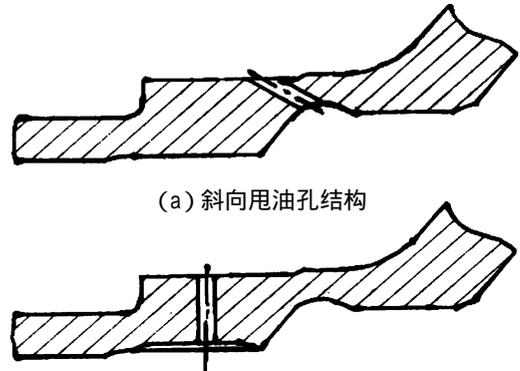


图 5 甩油孔结构变化

因液体黏性被转子自转带动有向前的速度,使得积液的惯性力方向不通过轴承中心连线,而是与 OO' 相交于 O 点上方。积液惯性力的分力 P_t 对转子是 1 种自激力,促使转子继续保持并发展次同步进动,严重时会导致压气机失稳,失稳开始时的频率与

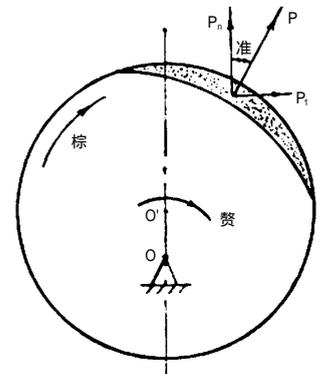


图 6 转子内腔积液引起自激力分析

转速频率比为 0.5 ~ 1.0。

4 结束语

发动机再次装配时,恢复原甩油孔位置,并将直向甩油孔改为斜向甩油孔,使压气机转子内腔积油迅速排除,从而使发动机运转到最高状态,再没有发生异常响声、振动突然变大以及结构损坏等故障。验证了该故障为甩油孔位置不当引发的自激振动,同时表明排除该振动故障的措施是有效的。

参考文献:

- [1] 晏砺堂. 航空燃气轮机振动和减振[M]. 北京:国防工业出版社,1991:27-102.
YAN Litang. Vibration and vibration reduction of aero gas turbine [M]. Beijing:National Defence Industry Press, 1991: 27-102.(in Chinese)
- [2] 晏砺堂,朱梓根,宋兆泓. 结构系统动力特性分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1989:35-41.
YAN Litang, ZHU Zigen, SONG Zhaohong. Dynamic characteristic analysis of structure system [M]. Beijing:Beihang University Press,1989:35-41. (in Chinese)
- [3] 晏砺堂,朱梓根,李其汉. 高速旋转机械振动[M].北京:国防工业出版社,1994:23-56.
YAN Litang, ZHU Zigen, LI Qihan. High-speed rotating machinery vibration [M]. Beijing:National Defence Industry Press,1994:23-56.(in Chinese)
- [4] 栾艳华. 某型航空发动机机匣同轴度测量[J]. 航空发动机,2012,38(1):44-46.
LUAN Yanhua. Casing coaxiality measurement for an aeroengine[J].Aeroengine 2012,38(1):44-46.(in Chinese)
- [5] 郑旭东,张连祥,刘廷毅. 航空发动机整机振动特性及应变能计算与分析[J]. 航空发动机,2000,26(2):42-46.
ZHENG Xudong, ZHANG Lianxiang, LIU Tingyi. Calculation and analysis of vibration characteristic and strain energy for aeroengine[J].Aeroengine 2000,26(2):42-46.(in Chinese)
- [6] 可成河,巩孟祥,宋文兴. 某型发动机整机振动故障诊断分析[J]. 航空发动机,2007,33(1):24-26.
KE Chenghe, GONG Mengxiang, SONG Wenxing. Fault diagnosis analysis of an Aeroengine vibration [J]. Aeroengine, 2007,33(1):24-26.(in Chinese)
- [7] 黄庆南,张连祥,刘春华,等. 航空发动机转子非包容顶层事件安全性分析与思考[J]. 航空发动机,2009,35(2):6-9.
HUANG Qingnan, ZHANG Lianxiang, LIU Chunhua, et al. Safety analysis and thought of uncontained top event for aeroengine rotor [J]. aeroengine 2009,35(2):6-9. (in Chinese)
- [8] 李宝凤,王德友. 某型航空发动机300h持久试车中的整机振动分析[J]. 航空发动机,2004,30(3):18-21.
LI Baofeng, WANG Deyou. Analysis of typical aeroengine vibration in 300h endurance test [J]. Aeroengine 2004,30(3):18-21.(in Chinese)
- [9] 曹茂国,孟憬非. 某型发动机整机振动故障分析[J]. 航空发动机,1994,20(4):15-21.
CAO Maoguo, MENG Jingfei. Failure analysis of an aeroengine vibration [J]. 航空发动机,1994,20(4):15-21.(in Chinese)
- [10] 李文明. 新机研制中整机振动及其限值—实验与思考[J]. 航空发动机,2002,28(2):22-26.
LI Wenming. Engine vibration and its limit in development of new engine practice and consideration [J]. Aeroengine, 2002,28(2):22-26.(in Chinese)

喜讯:《航空发动机》被收录为 中国科技核心期刊

“中国科技核心期刊”(中国科技论文统计源期刊)是中国科技信息研究所(ISTIC)受国家科技部委托,编辑出版《中国科技期刊引证报告》所收录的中国最优秀的科技期刊。

近年来,《航空发动机》在论文的学术能力、编辑标准化与规范化、版面装帧与设计等方面严把质量关,被波兰“哥白尼索引”、美国“乌利希国际期刊指南”等数家国内外期刊数据库收录,且排名靠前。目前所取得的成绩固然可喜,但与广大作者和读者的支持密不可分!

2013年,《航空发动机》与您继续共同进步!

《航空发动机》编辑部
2013年2月

