

某型发动机风扇转子本机平衡试验研究

吴元东¹, 娄金伟¹, 范顺昌², 姜广义¹

(1.中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015; 2.驻沈阳黎明航空发动机集团公司军事代表室, 沈阳 110043)

摘要: 航空发动机转子结构特殊,在平衡机上无法达到工作转速,只能在低速下进行平衡,有时效果并不理想,在实际运行中仍会由于平衡问题导致振动异常。针对存在不平衡量偏大的某型航空发动机,利用三圆法并结合实际情况,对其结构进行改装,实现了风扇转子的本机平衡,有效降低了低压转子的振动水平,经试验验证表明改装合理,平衡方法有效。该方法对其他型号发动机的本机平衡有较大的借鉴意义。

关键词: 本机平衡; 低压转子; 振动; 三圆法; 航空发动机

中图分类号: V216.2+1

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2018.06.014

Experimental Investigation of Local Balancing for Aeroengine Fan Rotor

WU Yuan-dong¹, LOU Jin-wei¹, FAN Shun-chang², JIANG Guang-yi¹

(1.AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China;

2.Consumer Representative Office in Shenyang Liming Aeroengine Group Corporation, Shenyang 110015, China)

Abstract: The rotor structure of aeroengine is special, it can't reach the working speed on the balancing machine, it can only be balanced at low speed, sometimes the effect is not ideal, and the vibration anomaly will still be caused by the balance problem in the actual operation. Aiming at a certain aeroengine with large unbalance, the structure of the aeroengine was modified by using the three-circle method and combining with the actual situation. The balance of the fan rotor was realized, and the vibration level of the low-pressure rotor was effectively reduced. The experimental results show that the modification is reasonable and the balance method is effective. This method can be used as a reference for the balance of other engines.

Key words: local balancing; low-pressure rotor; vibration; three-circle method; aeroengine

0 引言

振动抑制是航空发动机研制过程中的重要考核目标,发动机出厂检验试车要求的振动水平比工厂内试车严格,振动超过限制值的发动机不允许出厂试飞。对某军用高推重比发动机振动问题分析表明,在诸多因素中,转子不平衡量过大是导致振动超限的主要原因之一。转子平衡技术(特别是转子在整机装配之前的动平衡)是抑制振动的关键技术之一,但目前由于受客观条件所限,平衡转速远低于发动机的实际工作转速,平衡不带叶片,而实际发动机转子运转带有叶片,且受到流体载荷和温度影响,试验室条件下

的转子平衡无法保证平衡品质^[1-6]。本机平衡是发动机在整机状态下,对其转子本身进行的动平衡,平衡转速即为工作转速,平衡结果直接决定实际振动大小,该方法已被民机所采用,但受结构特点的限制,在军机上难以应用^[7]。本机平衡对发动机的振动抑制具有重要意义,是航空发动机研制中的关键技术之一,也是其结构完整性研究中极其重要的内容^[8]。

某型军用小涵道比涡扇发动机在试车时,低压风扇转子基频的振动超标,不符合出厂检验试车标准,无法出厂装机。本文介绍了利用三圆法对其低压转子风扇进行本机平衡的整个过程,平衡之后振动值大幅度降低,符合出厂标准。

收稿日期:20170128 基金项目:航空动力基础研究项目资助

作者简介:吴元东(1983),男,工程师,硕士研究生,从事航空发动机结构强度与整机振动的试验工作;Email:wyd0_007@live.cn。

引用格式:吴元东,娄金伟,范顺昌,等.某型发动机风扇转子本机平衡试验研究[J].航空发动机,2018,44(6):74-78. WU Yuandong, LOU Jinwei, FAN Shunchang, et al. Experimental investigation of local balancing for aeroengine fan rotor[J]. Aeroengine, 2018, 44(6): 74-78.

1 本机平衡基本方法

目前本机平衡常用相位分析法和三圆法^[9-13]。

相位分析法要求测量振动的同时测量转子旋转的相位信号。通常是在转速脉冲信号中增加 1 个奇异脉冲,该脉冲对应转子的某个相位,再找到振动时域信号中的峰值相位,根据差值,便可确定转子初始不平衡量的相位,配重质量由初始振动大小决定。该型发动机不具备输出转子相位信号的条件,所以采用三圆法进行平衡试重。

三圆法只要求记录平衡面振动幅值。在发动机原始状态下测量转子的振动响应,假定其初始振动的振幅为 X_0 ,以 X_0 为半径,以 O 点为圆心作图,并将该圆分为 3 等分,标出圆周上的等分点 A 、 B 和 C ,如图 1 所示。

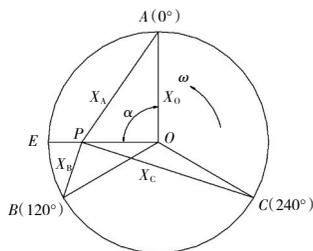


图 1 三圆法绘图方法

在转子校正面上 3 等分校正圆的 0° 、 120° 、 240° 位置上分别安放 1 个已知配重 m (假定校正圆的半径不变),依次测得相应的振动响应幅值为 X_A 、 X_B 和 X_C ,以 X_A 、 X_B 和 X_C 为半径画圆,3 个圆交于 P 点,从图上量出 OP 的数值,可得平衡校正量 m_e 。

$$m_e = \frac{OA}{OP} m$$

从图上沿转子转动方向量出 OA 和 OP 的夹角,然后从转子上安放试验配重的 0° 位置开始顺着转动方向量出 α 。于是, m 的安放位置即在校正圆上由 α 角所确定方位的 E 点。

理论上以 X_A 、 X_B 和 X_C 为半径画圆,3 个圆会交于 1 点 P ,但实际情况由于转子结构的复杂性以及测量误差,3 个圆往往不交于 1 点。可分 2 类讨论,1 是 3 圆围成 1 个公共区域(如图 2 所示),这时用 3 圆交点确定的 Δabc 的形心(中线交点)作为 P 点。

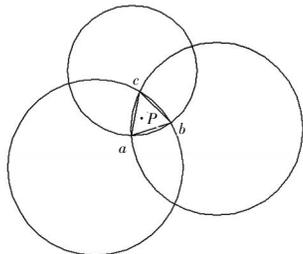


图 2 P 点常见的确定方式

另 1 种 3 圆没有公共区域,如图 3 所示,这种情况发生的概率较小。一旦出现,建议重新检查振动测试系统、配重质量和相位是否准确,确保精度,然后重新进行配重试验。如果现象重复出现,说明不平衡

量不是引起振动的主要因素,若继续进行配重,效果会不理想,建议不再继续进行本机平衡,考虑其他方法解决。

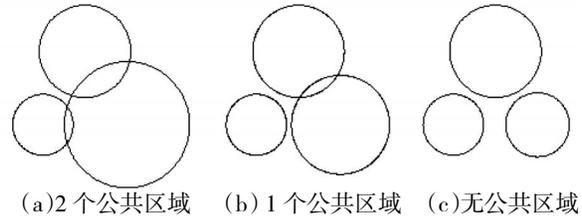


图 3 无法确定 P 点的情况

2 发动机的振动表现

本台发动机整机振动测试方案如图 4 所示。共有 A_1 、 A_{13} 、 V_2 、 V_3 、 A_4 、 V_5 6 个测点,分布在 3 个振动测试面 ($A-A$ 、 $B-B$ 和 $C-C$),分别在进气机匣、中介机匣和涡轮后机匣,此 3 个机匣均为转子系统的承力机匣,各测点测试参数见表 1。本次本机平衡针对 $A-A$ 截面, $A-A$ 截面即为转子矫正面。

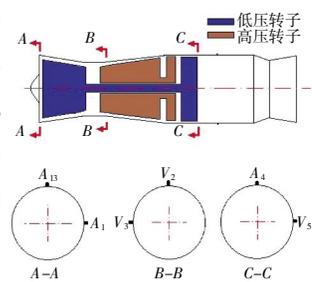


图 4 整机振动测试方案

表 1 整机振动测试参数

测点	跟踪转速基频	限制值	备注
A_1	$80\mu\text{m}$	低压转速 N_1	峰峰值
A_{13}	$80\mu\text{m}$	低压转速 N_1	峰峰值
V_2	50mm/s	高压转速 N_2	峰值
V_3	50mm/s	高压转速 N_2	峰值
A_4	$80\mu\text{m}$	低压转速 N_1	峰峰值
V_5	50mm/s	高压转速 N_2	峰值

在试车过程中,发现进气机匣跟踪低压基频的水平 A_1 和垂直 A_{13} 2 个测点,在低压转速 72% 附近振动超限, A_1 处最大 $200\mu\text{m}$, A_{13} 处最大 $150\mu\text{m}$,均超过限制值 $80\mu\text{m}$,如图 5 所示。

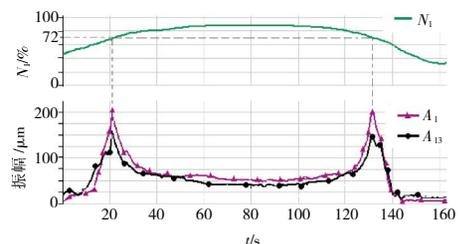


图 5 平衡之前振动表现

经过反复磨合之后,振动值仍然没有减小。该发动机进气机匣的振动表现是典型的低压转子过临界特征^[14],怀疑引起过临界振动超限的主要原因是风扇转子的初始残余不平衡量过大。

3 试重方案、准备及实施

根据发动机结构,选择风扇转子前支点轴承内部的分油盘,在分油盘上添加2个配重螺钉,如图6所示。配重质量为23g,质心半径为43mm,等效不平衡量为1000g·mm。

在试车台架上拆下发动机进气帽罩等相关组件,给分油盘添加配重。首次安装相位不作要求,标记为A状态,第2、3次分别依次逆时针旋转添加配重位置120°,分别标记为B状态和C状态,发动机原始状态标记为N状态。3次试重的试车程序保持一致,如图7所示。

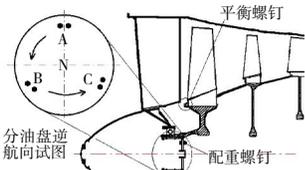


图6 试重方案

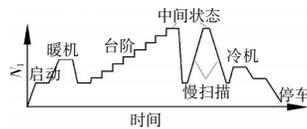


图7 试车程序

分别记录3次试重进气机匣2个振动测点 A_1 和 A_{13} 在不同转速下的大小,试重结果振动对比见表2, A_1 和 A_{13} 处试重效果如图8、9所示^[15]。

表2 试重结果振动对比

$N_1/\%$	μm							
	N 状态		A 状态		B 状态		C 状态	
	A_1	A_{13}	A_1	A_{13}	A_1	A_{13}	A_1	A_{13}
38	7.6	11.7	9.1	14.2	6.9	10.4	3.3	9.9
56	18.0	19.8	36.3	26.9	29.2	19.3	16.0	10.2
59	22.9	26.4	43.7	43.7	35.6	41.9	25.1	25.7
60	26.4	42.9	43.9	69.1	34.3	66.8	28.2	31.8
63	31.2	70.4	51.1	112.8	43.2	96.3	29.5	44.5
64	48.0	82.0	81.5	126.5	69.3	107.7	37.3	48.8
65	68.1	84.1	99.1	155.2	109.0	121.9	69.1	48.3
67	115.6	106.2	134.1	167.4	137.9	139.7	70.9	59.7
68	129.3	114.3	162.6	173.5	177.0	144.5	115.3	72.9
69	146.1	108.7	205.0	188.0	204.0	157.5	135.4	94.2
71	208.0	162.1	214.4	203.5	252.0	206.5	120.9	94.0

根据三圆法的绘图规则,绘制各转速下的效果图,如图10所示。

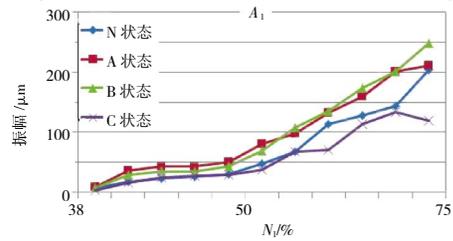


图8 A_1 测点试重效果

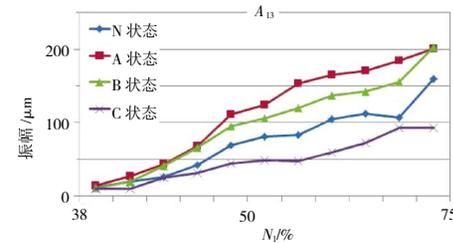


图9 A_{13} 测点试重效果

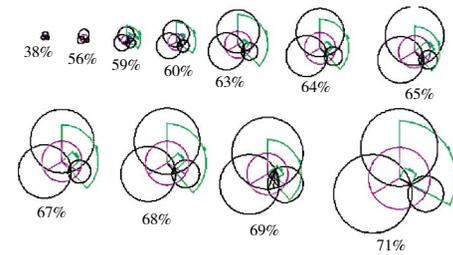


图10 不同转速下三圆法绘图结果

根据绘图结果,汇总各转速下的矫正不平衡量,见表3。

表3 不同转速下的相位和矫正不平衡量

$N_1/\%$	相位 $I(^{\circ})$	矫正不平衡量 $I(\text{g}\cdot\text{mm})$
38		
56		
59	125	2218
60	123	1817
63	135	1806
64	135	1875
65	138	1374
67	137	1752
68	138	2019
69	139	1967
71	118	2351

注:38%和56%状态,三圆法绘图无有效重叠区域。

不同转速下绘图结果有差异,主要原因是不同转速下的振动对不平衡量敏感程度不一样,以及 N_1 在接近70%附近,不平衡量引起的振动有可能被临界转速放大,所以暂不考虑临界转速附近的计算结果。

在低于临界转速 60%~64%范围内的计算结果比较稳定,考虑 60%、63%和 64% 3 个转速的矫正不平衡量非常接近,折中选取 63%的结果为参考。

另外,考虑局部振动的影响,进气机匣 2 个测点对转子振动的敏感程度不完全一致,发动机走台阶程序和慢扫描程序 3 次,进气机匣垂直测点 A_{13} 均比水平测点 A_1 的一致性要好,如图 11 所示。从图中可见, A_{13} 测点比 A_1 测点更能准确反映转子真实振动情况,所以最终选取垂直测点 A_{13} 为参考。

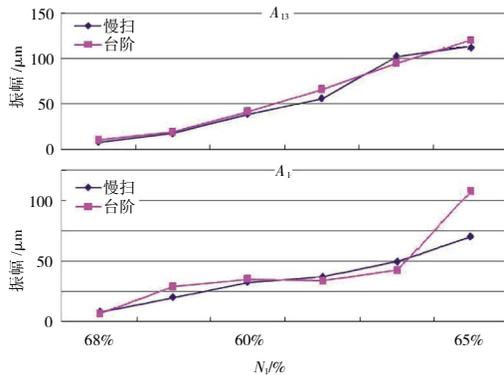


图 11 台阶和慢扫一致性对比

4 平衡方案、准备及实施

由于试重方案主要考虑现场操作的便利性,选择在靠近风扇转子前支点的端面增加配重螺钉,但此方法在发动机长时间运行后并不可靠。所以最终的平衡方案是将发动机下台返厂,分解进气机匣,在第 1 级风扇轮盘前缘螺钉处增加配重。

在轮盘对应的 135°(即 C 相位向 B 相位偏 15°)位置添加配重,使平衡矫正量约为 1800 g·mm,配重完毕,发动机恢复装配。

5 本机平衡效果

发动机返回试车台架,验证开车,试车程序与试重方案一致,进气机匣振动表现良好,在 A_1 测点不超过 65 μm,在 A_{13} 测点不超过 50 μm,振动幅值相对于平衡之前有大幅度减小,为验证振动的稳定性,连续试推了 3 次,重复性较好,如图 12 所示。

为了更直观地表现本次本机平衡的效果,把平衡前后进气机匣的振动数据放到同一坐标系下对比,并把横坐标切换为低压转速 N_1 ,如图 13、14 所示。

本次平衡是针对低压转子的前端——风扇转子,平衡之后,低压转子的后端——低压涡轮的振动也有所改善,如图 15 所示。

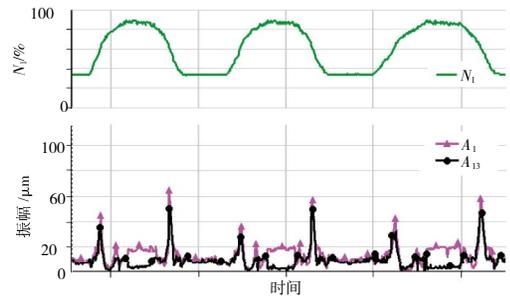


图 12 本机平衡之后振动表现

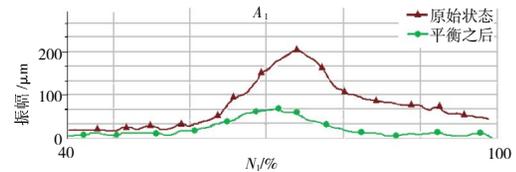


图 13 进气机匣水平 A_1 测点对比

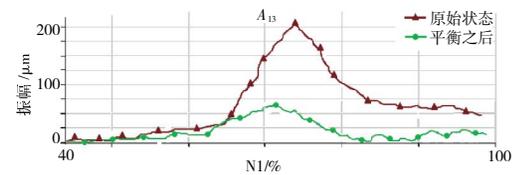


图 14 进气机匣垂直 A_{13} 测点对比

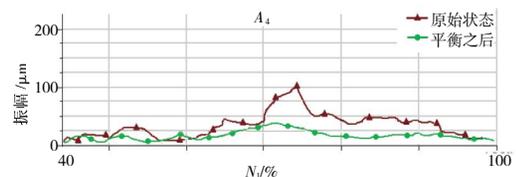


图 15 涡轮后机匣垂直 A_4 测点对比

由于本次平衡针对低压转子,平衡之后,高压转子振动的变化具有不可预测性,所以把高压转子的振动情况也作了对比,如图 16 所示。从图中可见,本次平衡之后,高压转速 N_2 最大值略有增大,但增大非常有限,仍远小于限制值。可见本机平衡未对高压振动造成显著影响。

平衡之后对发动机进行出厂检验试车,整机振动符合出厂标准,发动机顺利出厂。

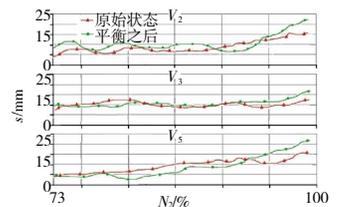


图 16 高压转子振动对比

6 总结

- (1) 本次本机平衡过程,采用三圆法现场平衡,能够有效定位某军用航空发动机风扇转子不平衡量的方位,并给出合理的矫正不平衡量;
- (2) 对于三圆法绘图过程中出现没有公共交集的

情况,本文既给出合理的处理方法,又阐述了可能发生的原因;

(3)矫正不平衡量平衡之后的发动机的低压转子振动值大幅度减小,并小于振动限制值,平衡结果有效;

(4)针对低压风扇转子的平衡,不仅能有效降低风扇转子的低压振动,而且对低压涡轮的振动也有抑制作用;

(5)低压转子本机平衡之后,未对高压转子振动造成显著影响;

(6)作为试验器的初始动平衡的补充,本机平衡可确保发动机在全转速范围内的振动不超限,为发动机安全运行提供保证。

参考文献:

- [1] 邓旺群. 转子高速动平衡技术在涡轴发动机整机减振中的作用[J]. 航空动力学报, 2015, 20(20): 78-85.
DENG Wangqun. Effect of high speed dynamic balance technique on turboshaft engine vibration reduction [J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 20(20): 78-85. (in Chinese)
- [2] 邓旺群, 王桢, 舒斯荣, 等. 涡轴发动机细长柔性转子动力特性及高速动平衡技术研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(7): 162-170
DENG Wangqun, WANG Zhen, SHU Sirong, et al. Dynamic characteristics and high speed dynamic balance technique for a power turbine rotor of a turboshaft engine [J], Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(7): 162-170. (in Chinese)
- [3] 邓旺群, 唐广, 舒斯荣, 等. 对转发动机模拟低压转子高速动平衡试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2010, 23(4): 5-9.
DENG Wangqun, TANG Guang, SHU Sirong, et al. High speed dynamic balance experiment research on an simulated low pressure rotor of a counterrotating engine [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2010, 23(4): 5-9. (in Chinese)
- [4] 邓旺群. 航空发动机柔性转子动力特性及高速动平衡试验研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2006.
DENG Wangqun. Experiment investigation of dynamic characteristics and high speed dynamic balance of a aeroengine flexible rotor [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [5] 邓旺群, 高德平, 郭飞跃. 航空发动机动力涡轮单元体高速动平衡试验研究[J]. 机械强度, 2007, 29(3): 380-386.
DENG Wangqun, GAO Deping, GUO Feiyue. Experiment research of high speed dynamic balance of a power turbine module of aeroengine [J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(3): 380-386. (in Chinese)
- [6] 邓旺群, 高德平, 廖学军, 等. 汽轮机转子高速动平衡技术研究[J]. 汽轮机技术, 2004, 46(1): 49-51.
DENG Wangqun, GAO Deping, LIAO Xuejun, et al. High speed dynamic balance technique research of a turbine rotor [J], Turbine Technology, 2004, 46(1): 49-51. (in Chinese)
- [7] 姜广义. 大型发动机转子本机平衡技术试验研究[J]. 航空发动机, 2008, 34(1): 19-23.
JIANG Guangyi. Experiment investigation of local balanced technique for large aeroengine rotor [J]. Aeroengine, 2008, 34(1): 19-23. (in Chinese)
- [8] 陈炳贻. 航空发动机平衡工艺技术 [J]. 航空科学技术, 1996(4): 12-19.
CHEN Bingyi. Aero-engine balancing technology [J]. Aviation Science and Technology, 1996(4): 12-19. (in Chinese)
- [9] 李洪升, 刘丹, 朱世林, 等. 利用三圆法处理压缩机驱动侧振动问题[J]. 风机技术, 2017, 59(2A): 64-66.
LI Hongsheng, LIU Dan, ZHU Shilin, et al. Deal with vibration on driven side of centrifugal compressor based on three circle method [J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2017, 59(2): 64-66. (in Chinese)
- [10] 阮苗英. 轴流风机三圆法现场平衡研究 [J]. 经验交流, 2014(3): 484-493.
YUAN Miaoying. Study on field balance of axial flow fan by three-circle method [J]. Experience and Exchange, 2014(3): 484-493. (in Chinese)
- [11] 全红飞, 王胤龙, 郭九梅. 离心压缩机现场动平衡[J]. 运行与维护, 2014(4): 149-152.
QUAN Hongfei, WANG Yinlong, GUO Jiumei. Field dynamic balancing method and practice on centrifugal compressor [J]. Operation and Maintenance, 2014(4): 149-152. (in Chinese)
- [12] 苏少林. 锅炉离心通风机现场动平衡 [J]. 风机技术, 2003(2): 29-32.
SU Shaolin. Dynamic balance on site of centrifugal fan for boiler [J]. Fan Technology, 2003(2): 29-32. (in Chinese)
- [13] 毛军. 关于风机转动平衡的解决方法 [J]. 应用科技, 2011(3): 12-22.
MAO Jun. A solution to the balance of Fan rotation [J]. Applied Science and Technology, 2011(3): 12-22. (in Chinese)
- [14] 刘永泉, 王德友, 洪杰, 等. 航空发动机整机振动控制技术分析[J]. 航空发动机, 2013, 39(5): 7-8.
LIU Yongquan, WANG Deyou, HONG Jie, et al. Analysis of whole aeroengine vibration control technology [J]. Aeroengine, 2013, 39(5): 7-8. (in Chinese)
- [15] 陈曦, 廖明夫, 邓旺群, 等. 柔性转子动平衡测试数据库系统开发与验证[J]. 测控技术, 2015, 34(11): 24-28.
CHEN Xi, LIAO Mingfu, DENG Wangqun, et al. Development and validation for flexible rotor balancing test database system [J]. Measurement & Control Technology, 2015, 34(11): 24-28. (in Chinese)

(编辑:刘 亮)