

民用航空发动机振动配平功能设计

尚 洋

(中国商用飞机有限责任公司 上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘要: 振动故障是航空发动机常见并且危害较大的故障, 可能导致发动机运营事故或提前更换, 增加航空公司运营成本, 进行转子平衡是降低发动机振动的重要措施。根据民用涡扇发动机的设计特点和振动配平相关原理, 设计了利用 EVMU 进行发动机振动配平计算的功能, 并通过试验进行了验证。试验结果表明: 采用根据 EVMU 计算出的方案配平发动机, 能够有效地降低发动机 N_1 振动值, 满足航线使用需求。

关键词: N_1 振动值; 发动机配平; 影响系数法; 涡扇发动机

中图分类号: V231.96

文献标识码: A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2017.04.010

Engine Balancing Function Design of Civil Aircraft

SHANG Yang

(COMAC Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210)

Abstract: Vibration failure is a common and serious failure for the aeroengine. Vibration failure may result in engine operation accidents or early replacement of the engine. This would increase the operating cost of the airlines. Engine balancing is an important measure to reduce the engine vibration. According to the design characteristics of the civil aircraft turbofan engine and the principle of vibration balancing, the engine balancing function that used the EVMU was designed. The design was verified by test. The results show that the vibration can be reduced after balancing according to the solution given by EVMU, and the design can meet the needs of airlines.

Key words: N_1 vibration; engine balancing; influence coefficient method; turbofan engine

0 引言

航空发动机使用中会因转子不平衡而导致振动, 轻则造成发动机性能衰退过快, 在役时间大大缩短; 重则造成轴承、叶片损坏, 导致发动机运营事故或提前更换, 增加航空公司运营成本^[1]。因此, 如何将服役发动机的振动维持在较低水平, 保证发动机具有较高的可靠性、良好的经济性、较低的维修成本和较低的客舱噪声, 是发动机维护人员所要面对的重要课题。

随着计算机技术的发展, 目前国外先进飞机上都装载有专门的机载设备用于监控发动机振动以及计

算发动机振动配平方案。国内也已研发出机载设备用于实时监控发动机振动^[2], 但尚不具备计算发动机振动配平方案功能。针对发动机振动配平技术(也称转子动平衡技术), 国内部分高校及研究所进行机载设备等大量的研究及试验^[3-4]。

如果民用飞机不具备利用机载设备进行发动机振动配平计算的功能, 航线上发生发动机振动偏高的情况, 通常只能采用传统的三元法^[5-6]对发动机进行配平, 该方法需要进行至少 5~7 次高功率开车, 耗时长、不经济且需要人工计算配平方案。为提高民用飞机的竞争力, 本文利用机载软件进行发动机振动配平计算的功能设计。

收稿日期: 2016-12-05

作者简介: 尚洋(1987), 男, 硕士, 工程师, 从事民用飞机动力装置系统集成工作; E-mail: shangyang@comac.cc。

引用格式: 尚洋. 民用航空发动机振动配平计算功能设计[J]. 航空发动机, 2017, 43(4): 56-60. SHANG Yang. Engine balancing function design of civil aircraft[J]. Aeroengine, 2017, 43(4): 56-60.

1 发动机振动配平相关原理

1.1 转子不平衡

“不平衡力”是航空发动机振动主要原因。由于转子材质的不均匀、设计缺陷、热变形、制造装配的误差和转子在运行过程中介质黏附到转子上或有质量脱落等,使实际转子的质心与形心不一致,从而使转子出现质量不平衡^[7],这是导致航空发动机整机振动过大和产生噪声的重要因素^[8-9],不但会直接威胁到航空发动机安全可靠地运行,而且还容易诱发其他类型的故障。转子不平衡引起的振动故障是航空发动机常见并且危害较大的故障,识别并减弱发动机转子不平衡是减小发动机振动的重要措施。转子质量不平衡所引起的振动有以下特点^[10]:

(1)由不平衡引起的转子振动是与转速同频的简谐振动,相位比较稳定,可以根据对振动响应中同频振动分量的测量来确定转子的不平衡状况;

(2)不平衡响应的幅值与不平衡量呈线性关系,且工作转速不同时,线性系数也不同。

1.2 发动机振动测量系统

民用飞机发动机振动测量技术在国内已经比较成熟^[11-13],测量系统原理如图1所示。发动机上装有1个 N_1 转速传感器、1个 N_2 转速传感器和2个振动加速度传感器,2个振动加速度传感器根据安装位置分别称为前、后振动加速度传感器。在飞机电子/电气设备舱内安装有发动机振动监控装置EVMU。发动机的 N_1 、 N_2 转速信号和前、后振动传感器信号传递至EVMU,EVMU根据接收到的信号计算发动机的 N_1 、 N_2 振动值,并将计算结果发送到驾驶舱显示。

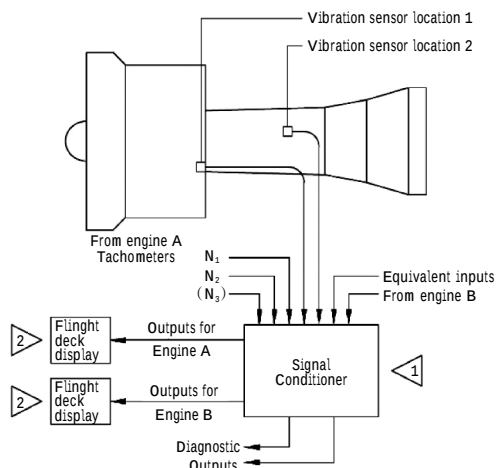


图1 测量系统原理

1.3 发动机振动配平原理

民用飞机涡扇发动机动平衡的方法主要有振型平衡法和影响系数法^[14-15]。振型平衡法基于叠加理论,主要应用于能准确计算或测出其振型的场合,由于其不易自动化,比较复杂,且对操作者要求较高,所以在目前众多测试系统中应用不多。影响系数法是1种完全建立在实验基础上的平衡方法,对转子的动态特性了解较少,特别适合现场动平衡,而且易于自动化,操作方便,因此被广泛应用^[16-17]。影响系数法将转子及支承系统近似地当作黑箱,平衡面上的试加质量(包括大小和相位)作为这一封闭系统的输入;在相同的平衡转速、测振位置和测振方向上,试加质量所引起的振动变化作为系统的输出,把输入与输出的传递关系定义为影响系数。影响系数的计算公式为

$$C = \frac{B-A}{U}$$

式中: A 、 B 分别为试加质量前、后的振动幅值和相位; U 为试加质量; C 为发动机影响系数。

得到发动机影响系数后,配平方案计算为

$$V_n = V_0 + C \cdot W = 0 \quad (1)$$

$$W = (V_n - V_0) / C \quad (2)$$

式中: V_0 、 V_n 分别为配平前、后的振动幅值和相位(理想状态下为0); W 为配重质量和相位,即配平方案。

2 发动机振动配平功能设计

2.1 平衡面的选取及配重部件介绍

民用涡扇发动机结构如图2所示。从图中可见,发动机风扇及低压涡轮的最后1级叶片易于接近,因此发动机振动配平功能仅对低压转子(即 N_1 转子)进行配平。在航线上通过在风扇前整流锥或低压涡轮最后1级叶片增加配重对发动机低压转子进行配平。

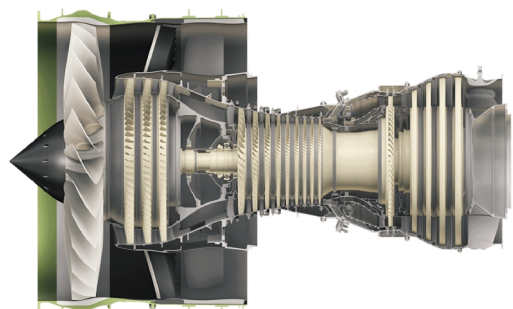


图2 民用涡扇发动机结构

发动机振动配平可采用单平面法和双平面法。单平面法仅在风扇前整流锥增加配重,双平面法在风扇前整流锥和低压涡轮最后 1 级叶片上增加配重。

发动机的风扇前整流锥上包含 36 个孔,如图 3 所示。每个孔上安装有 1 个配平螺钉,有 P1~P13 共 13 种构型,不同构型螺钉的质量不同,其中 P1 构型的螺钉对应的配重质量为 0,P1 和 P13 构型配平螺钉的实物如图 4 所示。



图 3 风扇前整流锥

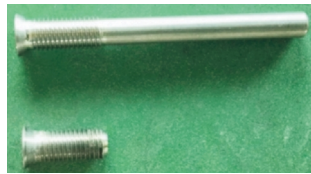


图 4 P1 和 P13 构型配平螺钉实物

针对低压涡轮最后 1 级叶片,可以通过在叶片的叶冠处增加配平夹的方式来改变低压转子的质量分布,民用涡扇发动机采用的配平夹实物如图 5 所示。配平夹有 1 种构型,质量一定,每个叶片能安装 1 个配平夹,可通过在连续几个叶片安装配平夹来调整配平质量,配平夹的安装效果如图 6 所示。



图 5 配平夹实物

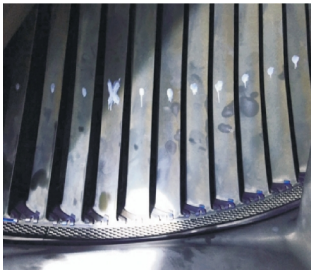


图 6 配平夹安装效果

2.2 发动机影响系数获取

根据第 1.3 节发动机振动配平原理,民用发动机影响系数需通过大量试验获取数据并计算得出,获取流程为:(1)发动机低压转子为平衡状态,记录发动机在不同转速下前、后振动传感器测得的低压转子振动幅值及相位;(2)通过在风扇前整流锥的已知位置增加已知质量的配平螺钉,将发动机的低压转子调整为不平衡状态,记录发动机在上述转速下前、后振动传感器测得的低压转子振动幅值及相位;(3)计算步骤(1)、(2)中记录的振动差值与风扇前整流锥上加装的配重之间的关系,即风扇配平面所对应的影响系数;(4)通过在低压涡轮最后 1 级叶片增加已知质量的配

平夹,将发动机的低压转子调整为不平衡状态,记录发动机在上述转速下前、后振动传感器测得的低压转子振动幅值及相位;(5)计算步骤(1)、(2)中记录的振动差值与低压涡轮最后 1 级叶片上加装的配重之间的关系,即低压涡轮最后 1 级配平面所对应的影响系数。

2.3 振动配平计算

得到发动机的影响系数后,可根据第 1.3 节发动机振动配平原理中的公式计算振动配平方案。由 EVMU 厂商将发动机影响系数及振动配平计算程序集成至 EVMU 中。

在发动机运转时,EVMU 能够记录特定转速下低压转子的振动幅值及相位。当低压转子振动值偏高时,可以操作 EVMU 利用记录的振动数据及内部的振动配平算法计算配平方案。

3 试验验证

为验证发动机振动配平功能,首先将发动机低压转子调整为不平衡状态,调整后发动机在整个 N_1 转速区间内前、后振动传感器测得的 N_1 振动值分别如图 7、8 所示。

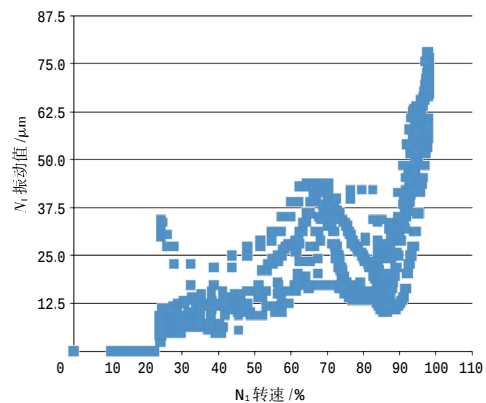


图 7 前振动传感器测得的 N_1 振动值

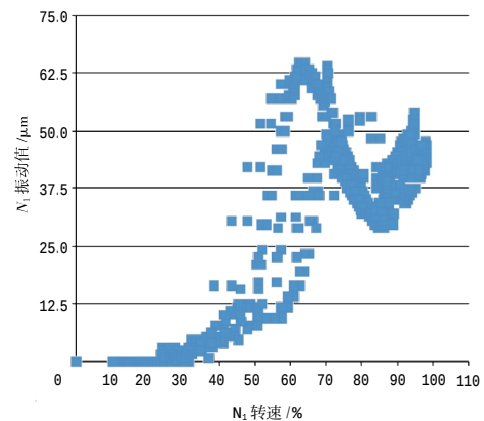


图 8 后振动传感器测得的 N_1 振动值

操作 EVMU 执行单平面法计算,EVMU 计算出的配平方案如图 9 所示。

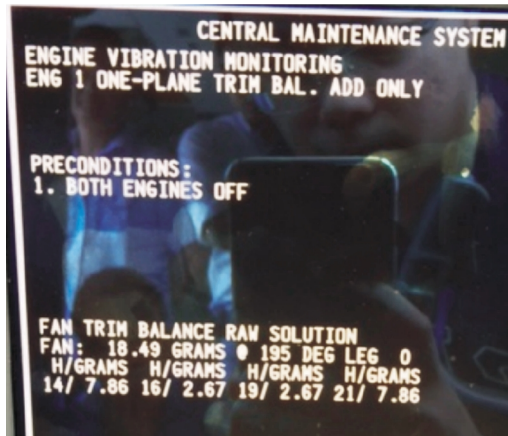


图 9 EVMU 计算的配平方案

从图中可见,需要在风扇前整流锥的 H14 孔增加 7.86grams(对应 P11 构型)的螺钉,在 H16 孔增加 2.67grams(对应 P4 构型)的螺钉,在 H19 孔增加 2.67grams(对应 P4 构型)的螺钉,在 H21 孔增加 7.86grams(对应 P11 构型)的螺钉。按照配平方案实施配平后,开车检查发动机的 N1 振动值。配平前、后 2 个振动传感器测得的发动机 N1 振动对比分别如图 10、11 所示。

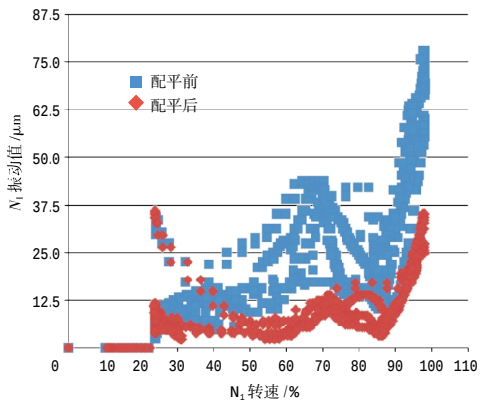


图 10 采用单平面法前振动传感器测得的 N₁ 振动值对比

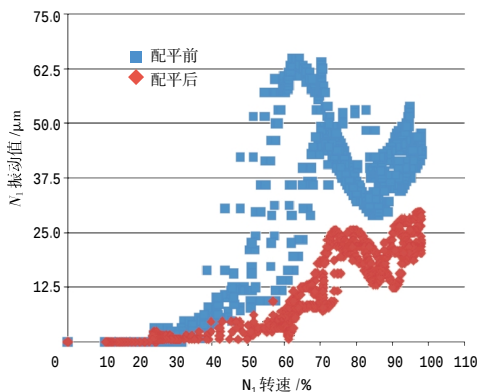


图 11 采用单平面法后振动传感器测得的 N₁ 振动值对比

对于双平面法,验证过程类似,不再赘述,仅列出配平前、后 2 个振动传感器测得的 N1 振动值对比,如图 12、13 所示。

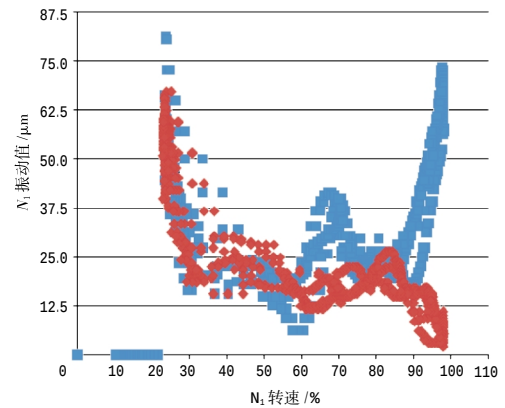


图 12 采用双平面法前振动传感器测得的 N₁ 振动值对比

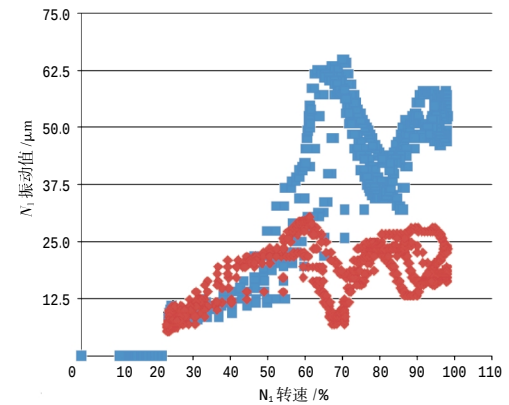


图 13 采用双平面法后振动传感器测得的 N₁ 振动值对比

从上述试验结果可以看出,根据 EVMU 计算的单平面方案和双平面方案配平发动机后,发动机的 N1 振动值相比配平前显著降低,表明设计的发动机振动配平功能有效。

4 总结

为了提高民用飞机的竞争力,利用机载设备 EVMU 进行发动机振动配平功能设计。通过试验,对所设计的功能进行了验证,试验结果表明,采用机载设备 EVMU 计算的单平面方案和双平面方案配平发动机后,能够有效降低发动机 N1 振动值。该功能相比传统的三元配平法,可以减少开车次数,为航空公司节约大量资金和时间,降低飞机的维护成本。对国产民用飞机和发动机的设计具备借鉴意义。

参考文献:

- [1] 罗立,唐庆如. 航空发动机振动与平衡研究[J]. 中国民航飞行学院

- 学报, 2014, 24(1): 57-60.
- LUO Li, TANG Qingru. Research on vibration and balance of aero-engine [J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2014, 24(1): 57-60. (in Chinese)
- [2] 张群岩, 赵述元, 李飞行. 航空发动机试飞振动实时监控技术研究[J]. 噪声与振动控制, 2011, 31(2): 159-162.
- ZHANG Qunyan, ZHAO Shuyuan, LI Feixing. Study on vibration real-time monitoring technique of aeroengine in flight test[J]. Noise and Vibration Control, 2011, 31(2): 159-162. (in Chinese)
- [3] 王四季, 廖明夫. 航空发动机柔性转子动平衡方法[J]. 噪声与振动控制, 2011, 31(6): 91-94.
- WANG Siji, LIAO Mingfu. Phase analysis on high speed dynamic balance of aeroengine [J]. Noise and Vibration Control, 2011, 31(6): 91-94. (in Chinese)
- [4] 陶利民. 转子高精度动平衡测试与自动平衡技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.
- TAO Limin. Research on technology of high-precision dynamic balancing measurement and automatic balancing for rotors[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [5] 夏存江. 基于直角坐标的在翼航空发动机风扇三元配平方法研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2015, 28(3): 59-62.
- XIA Cunjiang. Research of fan trim balance for on-wing aircraft engines based on a rectangular coordinate system[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2015, 28(3): 59-62. (in Chinese)
- [6] 夏存江. 涡扇发动机风扇配平方法的优化[J]. 中国民航飞行学院学报, 2016, 27(4): 32-36.
- XIA Cunjiang. Optimization of the fan balancing method for turbofan engines[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2016, 27(4): 32-36. (in Chinese)
- [7] 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 dynamics characteristics and high speed dynamic balance of a aeroengine flexible rotor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [8] 左孔成, 陈鹏, 王政, 等. 飞机舱内噪声的研究现状[J]. 航空学报, 2016, 37(8): 2370-2384.
- ZUO Kongcheng, CHEN Peng, WANG Zheng, et al. Research status of aircraft interior noise[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(8): 2370-2384. (in Chinese)
- [9] CHEN Yi, HU Erming, HUANG Xizhi, et al. Exploring wing-mounted engine vibration transmission for new generation airplanes with turbofan engines of high bypass ratio[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2012, 30(3): 384-389.
- [10] 陶利民. 转子高精度动平衡测试与自动平衡技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.
- TAO Limin. Research on technology of high-precision dynamic balancing measurement and automatic balancing for rotors[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [11] 肖敏. 幅值和相位的精确测量及转子动平衡方法研究[D]. 汕头: 汕头大学, 2004.
- XIAO Min. Accurate measurement for the amplitude and phase and the research on rotor dynamic balancing[D]. Shantou: Shantou University, 2004. (in Chinese)
- [12] 郭俊华, 伍星, 柳小勤, 等. 转子动平衡中振动信号幅值相位的提取方法研究[J]. 机械与电子, 2011, 29(10): 6-10.
- GUO Junhua, WU Xing, LIU Xiaoqin, et al. Research on the methods of obtaining magnitude and phase of vibration signal for rotor balancing[J]. Machinery & Electronics, 2011, 29(10): 6-10. (in Chinese)
- [13] 王四季, 廖明夫, 杨申记. 发动机高速动平衡的振动相位分析[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2007, 20(4): 49-52.
- WANG Siji, LIAO Mingfu, YANG Shenji. Phase analysis on high speed dynamic balance of aeroengine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2007, 20(4): 49-52. (in Chinese)
- [14] 闻帮椿, 顾家柳, 夏松波. 高等转子动力学—理论、技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 51-53.
- WEN Bangchun, GU Jialiu, XIA Songbo. Advanced rotor dynamics—theory, technology and application [M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 51-53. (in Chinese)
- [15] 钟一谔, 何衍宗, 王正. 转子动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987: 105-106.
- ZHONG Yi'e, HE Xianzong, WANG Zheng. Rotor dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1987: 105-106. (in Chinese)
- [16] 张玉光. 动平衡测试技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.
- ZHANG Yuguang. Research on technology of dynamic balancing measurement[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [17] Zhou Shiyu, Dyer S W, Shin K K. Extended influence coefficient method for rotor active balancing during acceleration [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2004, 126(1): 219-223.

(编辑: 李华文)