

光纤叶片振幅监测系统应用试验研究

沈阳航空发动机研究所 邓 勇* 盛鑫志 薛秀生

传统的转子叶片振动测量是使用“应变片—引电器—应变仪”或“应变片—遥测系统”进行测量。但这两种方法都受到诸如发动机结构、工作温度测量点数多方面的限制。我们研制的这种新的非接触式转子叶片振动测量装置,它具有使用方便、工作温度高、测量点数多等优点。在新机的整机试车中进行了多次应用,对该机的高压一级转子工作叶片进行振动监测,获取了该叶片在台架状态时各种情况下的叶片振动数据,保证了试车工作的安全进行。

一、系 统

1. 测量原理^[1,2] 图 1 为发动机横截面示意图。O 为转子转动中心。在机匣和转子轴上分别给出定点 Q、P; 设 O、P、Q 连线为一条以 O 点的射线时为初始状态,并以该线为极轴。这时每个叶片顶部及极轴的夹角为 θ_i ($i = 1, 2 \dots M$; M 为叶片数)。在叶片不振且转子以恒角速度 ω 旋转时,叶片顶部到达 θ 点的时间 t_i 与 θ 之间有如下关系 $t_i = \theta / \omega$ 。叶片振动时,叶片顶部的运动速度与叶片到 θ 点时刻都会发生变化。如果叶片作简谐振动,叶片到达 Q 点的时间为 t_i , 则 $\theta_i = \omega t_i + A \sin(\Omega t_i + \varphi)$ 。式中 Ω 为叶片振动角频率, A 为振幅。因为 $t_i = \theta / \omega$, 所以 $\omega t_i = A \sin[\Omega(\theta / \omega - t_i) + \varphi]$, 或 $t_i = (A / \omega) \cdot \{ \sin(\Omega\theta / \omega + \varphi) / [1 + (A\Omega / \omega) \cdot \cos(\Omega\theta / \omega + \varphi)] \}$ 。如果 $A\Omega / \omega \ll 1$ 则 $t_i = (A / \omega) \sin(\Omega\theta / \omega + \varphi)$ 。

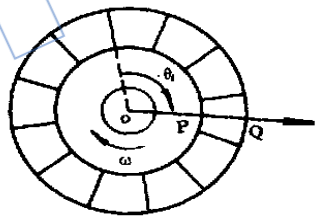


图 1 发动机横截面示意图

当叶片作随机振动时, 录取几百转的数据总可以得到 t_i 的幅值 $|t_i|_{\max} = A / \omega = KA$, 即叶片振幅 A 与 $|t_i|_{\max}$ 成正比。因而只要能测得 $|t_i|_{\max}$ 即可得知叶片顶部振幅 A。

2. 测得最大振幅的概率分析 从前面分析得知, t_i 的即时值除与叶片振幅 A 有关外, 还与叶片振动的即时相位有关, 即与 $\sin(\Omega\theta / \omega + \varphi)$ 有关。当该值近于 ± 1 时可认为得到叶片振动的最大偏移时刻 $|t_i|$ 。在叶片作随机振动时 (即 Ω 与 ω 不相关时), 测得叶片最大振幅的概率与正弦函数的幅值分布概率相同, 如以测得最大振幅的 90% 以上为标准, 则测得该值的概率大于 10%。每转对叶片作一次测量, 在 100 转的时间内必定可测到叶片的最大振幅。

3. 系统构成 这套光纤叶片振幅监测系统, 是以测量显示部分为中心, 加光纤传感器、磁钢传感器、综合信息显示、记录设备共五部分组成。测量显示部分还可分为同步跟踪、扫描信号发生器、控制电路、显示器四个电路模块。

4. 工作原理 系统工作时序图见图 2。信号 为磁钢信号相当于基本原理中的 P 点。

经过同步跟踪部分的高倍倍频锁相跟踪和控制,产生两个与其有一定相位关系的扫描控制信号“ ”送至扫描信号发生电路。扫描信号发生电路产生两路恒幅锯齿波“ ”分别输至 X、Y 轴,用屏幕扫描。这样就在显示器上形成了一个不随转速变化的稳定光栅。来自光纤信号“ ”在光栅上显示出叶片的即时位置。利用荧光屏的余辉,可累积显示在一定转数内叶片的各个即时位置,进而测出叶片的振动情况。

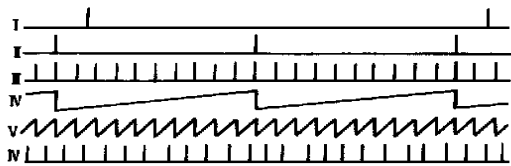


图 2 系统工作时序图

5. 标定方法 光导纤维叶片振幅监测系统除可观察同级全部叶片振动情况,显示直观、可在较宽的转速范围内自动跟踪外,另一个最大的特点就是系统设有内标定功能。光导纤维叶片振幅监视系统是利用显示屏上的光栅来测量叶片振幅的。光栅扫描一周的时间与发动机旋转一周所用的时间相等。光栅长度在不同转速下是不变的。因而显示屏上的光栅总长是与发动机转子叶片顶部的周长相对应的。这样系统所产生的误差将主要来源于显示器的非线性。为此,在系统内增设了一路标定信号,对显示器上线性最好区域进行实际标定以消除其线性误差,同时提高系统读数精度。标定信号由机内电路产生,在屏幕上形成了上下两排光点。光点的间距为 $1/10T$, T 为叶栅间隔。这样减小了非线性误差保证了系统测量精度。

二、叶片振动表现

叶片振动有多种表现模式,它们在本系统中的表现也是各不相同。

1. 叶片随机振动 叶片的随机振动是指叶片振动与转子转速无关、叶片之间没有相互联系的振动模式。这时系统屏幕上将显示出振动叶片的振幅和叶片间振动不相关的图像。

2. 叶片振动与转速相关^[2,3] 当叶片振动与转速相关时,每一叶片到达光纤传感器时的振动相位都是固定的。这样光点将随着发动机转速的变化而离开它的平衡位置,或是形成上下两个光点而分开。这种情况会很快随着转速的变化而消失。在一般情况下可以观察到起振和消振的过程。

3. 盘片耦合振动 盘片耦合振动最明显的特点是,叶片振动的相位是有规律分布的,而且全部同时振动。这时屏幕上将出现一种看上去是在滚动的一种图象,如果振动频率与转子转速成倍数关系,这种滚动会在某一瞬间停止而成一幅静止图象。由于盘片耦合的振动模式比较复杂,要在现场做出准确的判断是很困难的。需要在试验结束后综合各种信息才能做出较为准确的判断。

4. 转子整体运动产生的影响 转子叶片除振动外气动攻角、转子整体的向前、向后移动等变化量都会引起系统显示屏上光点的移动。这些移动一般情况下是稳定的随着发动机的转速而缓慢的变化,而且重复性很好,可在现场观测中判断出来,一般不会对发动机的正常工作造成损害。

三、实测结果及分析

本系统先后在某型压气机试验件、某型整机试车中应用多次,取得了比较好的效果。特别是在某型整机台架试车的高压一级工作叶片振动监测中,首次测得了该叶片在全台试车情

况下的叶片振动信息^[3],保证了该机车工作的顺利进行。并对该机叶片不同的榫头形式进行了对比测试。

1. 燕尾榫头叶片的振动情况 在某型第 $\times \times$ 台的试车中,使用燕尾榫头的高压一级工作叶片,并用光导叶片振幅监测系统进行了振动监测。系统在发动机试车过程中发现了两个明显的大应力共振区,最大振动应力达到了限制值 300MP。因而该次试车发动机未推到最大转速。图 3 给出了叶片振动应力随转速变化的示意图。在两个明显的大应力共振区,振动表现出了与转速相关、叶片间的振动相位相关这一振动特征,见图 4。结合强度计算分析,认为在这两个转速下分别出现了 3 节径和 4 节径的盘片耦合振动。

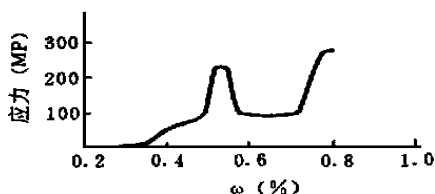


图 3 应力与转速关系

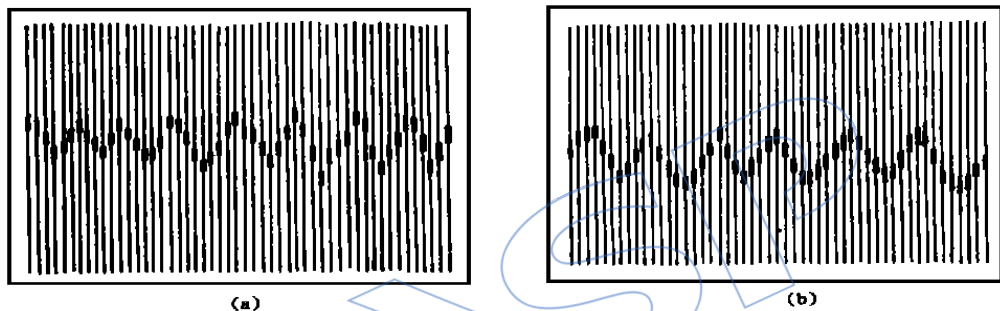


图 4 实测记录

2. 销钉榫头叶片振动情况 在采用燕尾榫头高压一级工作叶片的发动机试车结束后,为消除振动,换用销钉榫头再次试车。试车证明销钉榫头有很好的消振作用。但销钉榫头叶片也有其特殊性。其叶片应力在转速上升和下降过程中是不同的。见图 4。在降速过程中也出现了类似于燕尾榫头叶片的盘片耦合振动迹象。只是存在时间很短而且应力水平也比较低。

结论 光纤叶片振幅监测系统通过几次实测试用表明,这种测量方法是可行的。而且还具有发动机改装量小、测量点数多、温度范围宽等很多优点。特别适合于多转子发动机的测量。目前这一技术的应用在国内还处于起步阶段,进一步的发展还可测量叶片的攻角、扭振及振频等参量。使用温度也有希望在短期内达到 400 的水平,可在全部工作状态下对航空发动机的高压进口级进行状态监测,这是目前用其它测量手段在短期内难以实现的。因此,在当前条件下大力发展这一测量技术是十分必要的。可为我国的航空发动机研制提供一种新的测量手段。

致谢 在研制与发动机测试应用中始终得到我组王国祥同志大力协助。兄弟组许鄂俊、吴秋芳、钱金善、蒋国良等同志在工作中亦给以多方配合,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Roth H., "Vibration Measurements on Turbomachine Rotor Blades with Optical Probes".
- [2] 盛鑫志, "在机匣上观测转子叶片的振动", 航空发动机参考资料 1980 年第一期。
- [3] 邓勇, "14308-1 次高压一级工作叶片振动监测报告", 606 所科研报告, 14·SY·488。

FATIGUE STRENGTH RESEARCH OF DZ-22 SUPERALLOY UNDER COMPLEX STRESS CONDITION

Yue Yanfang and Rao Shouqi

(*Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083*)

ABSTRACT

Criteria for calculating low-cycle fatigue strength of DZ22 superalloy under complex stress condition are considered. The fatigue life of the material under complex stresses can be predicted according to the criteria, provided its straight axial strengths and any straight axial S—N curve are available. For DZ22 as a kind of directionally solidified high-temperature alloy, the low-cycle fatigue comparative tests have been made between the uniaxial tension-compression and tension-torsion at 850 °C and show that the results of tests and calculations are in good agreement.

LIFE PREDICTION OF LOCAL STRESS-STRAIN METHOD

Liu Xangsheng

(*Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015*)

ABSTRACT

The local stress-strain method is applied to LCF life prediction. The method and procedure for determining reliability life and flight life are provided. The influence of the variable-amplitude cycle loading on the lives and effects of the fluctuation of material fatigue constants on the lives are considered. In addition the present method is compared with the EGD-3 method.

A FIBRE-OPTIC AMPLITUDE MONITOR FOR BLADE VIBRATION

Deng Yong, Sheng Xizhi, Xue Xiusheng

(*Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015*)

ABSTRACT

The fibre-optic amplitude monitor is developed by our institute as a non-contact vibration measuring system for rotator blades, in which a magnetic needle is adopted as a one-per-rotation sensor and a fibre-optical cable as a blade-passing sensor. Multiple application of the present monitor in development of new-type engines demonstrates reliability and convenience in operation. It features high temperature resistance, it can work up to 350 °C and up to 400 °C in the near future. This monitor has been put in service as a main instrumentation to monitor the blade vibration in the high-pressure compressor of our new-type engine during its development.

*

*

*

*

*