

压气机叶片的固有频率测试和有限元计算*

王 平

吴卫东

(盐城工学院 CAD/DAM 研究所, 江苏 盐城 224003 盐城工学院机械工程系, 江苏 盐城 224003)

摘 要 主要叙述了压气机叶片的固有频率测试技术和先进的有限元计算方法。固有频率测试采用了频率跟踪和振幅自动控制技术, 确保叶片始终处于共振状态。有限元计算中使用的是8节点40自由度超参数壳体单元, 计算结果和试验结果获得了令人满意的一致。

关键词 压气机; 叶片; 固有频率; 有限元

分类号 TB12

文献标识码 B

文章编号 1008-5092(2000)01-0026-03

压气机叶片是航空发动机的重要零件之一。由于叶片造型复杂, 工作条件又很恶劣, 如: 承受较高的离心负荷、气动负荷、高温等, 从而使叶片常常发生故障, 据统计^[1], 在航空发动机中, 叶片故障占相当大的比率, 振动故障率占发动机总故障率的60%以上, 而叶片故障又占振动故障70%以上。叶片故障有时会给飞机和发动机造成严重事故。随着发动机向高性能、重量轻、长寿命的方向发展, 叶片的使用可靠性问题就显得更为突出。

本文是在进行压气机叶片定寿研究时, 进行的叶片固有频率测试和有限元计算。由于目前对压气机叶片的定寿研究在试验上主要是进行一阶疲劳共振, 因而本文中所指的固有频率均指一阶固有频率。

1 叶片的固有频率测试

1.1 固有频率测试依据

在压气机叶片固有频率测试中, 采用了 YZP-2 型叶片疲劳试验自动控制仪, 它具有频率跟踪、恒幅控制及报警功能, 它是采用叶片的固有频率作为主振信号, 由电涡流传感器拾振产生的电信号作为系统的信号源, 它和叶片构成一个机电耦合的自激振荡系统。其振荡频率由叶片的固有频率决定, 使激振系统保持较高的稳定性, 此外, 信号源频率能随着试件固有频率的改变而改变。这样就确保叶片始终处于共振状态。

1.2 固有频率测试系统简介

叶片的固有频率测试系统如图1所示:

整个测试系统共分四大部分, 即夹具系统、激振系统、测量系统和控制系统。

夹具系统: 是用来夹持叶片, 夹具本身要有足够大的刚性。

激振系统: 包括功率放大器、直流励磁线圈、毫伏表、电容箱。其作用使叶片在交变的电磁力作用下产生振动。

控制系统: 由恒幅控制仪、功率放大器、电容箱、激振器、振幅位移测量仪组成。它是用来确保叶片在恒幅条件下共振。

测量系统: 主要是由频率计、示波器、读数显微镜及闭路电视组成。读数显微镜及闭路电视可用来控制叶尖振幅。示波器可监测叶片振动信号是否失真, 而频率计可直接读出叶片共振时的频率。

1.3 叶片的固有频率测试及分析

在实测过程中, 我们以压气机二级叶片为测试对象。首先将各仪器按上述系统框图连接好, 并调整各仪器处于工作状态, 然后慢慢转动功率放大器的旋钮, 使叶片有微小振动, 接着调节电容箱的电容, 使得功率因数表表头指针达到 $\cos \varphi \approx 1$ 的位置。再关闭功率放大器, 调整读数显微镜的位置, 使叶尖成像与读数显微镜中的十字准线相切, 并记下此时读数显微镜的位置 X_0 , 以此作

* 收稿日期: 1999-04-26

第一作者简介: 王 平(1964-), 男, 江苏建湖县人, 硕士, 讲师, 从事机械 CAD 研究。

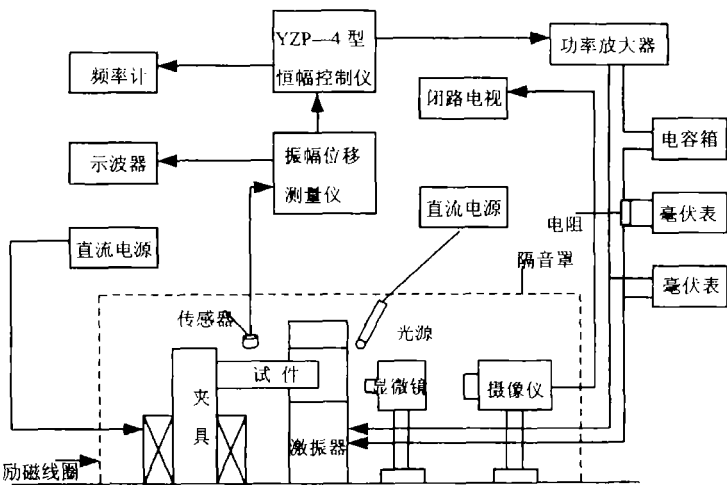


图 1 测试系统框图

Fig.1 The testing system of natural frequency

为叶片振动的零位。再将功率放大器打开,调节输出旋钮。当叶片达到规定的振幅时,记下此时频率计的值。该值即为叶片的固有频率值(见表 1)。

表 1 压气机二级叶片固有频率测试值
Table 1 The testing value of natural frequency
of stage 2 blade

叶片标号	振幅/mm	固有频率/Hz
2F8-32	18	232.4
2F8-127	18	241.3
2F8-131	20	245.6
2F4-147	20	232.4
2F8-9	20	227.6
2F8-221	20	249.5
1F4-156	22	225.5
1F4-136	22	231.7
1F4-194	22	227.6
2F8-35	25	227.0
1F4-149	25	226.0
2F7-288	25	233.1
2F4-44	25	240.4
2F7-256	20	220.0
2F3-134	22	222.2
1F4-10	22	220.5
1F4-220	25	224.8

从表 1 可以看出固有频率测试值最小为 220 Hz,最大为 249.5 Hz,无奇异值,说明固有频率测试值是可信的。

2 固有频率 的有限元计算

2.1 计算方法^[2]

ADINA84 是国际上著名的有限元程序,它广泛应用于结构静力学和动力学分析,其基本原理

可用下式表达:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [D]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{R\}$$

式中 $[K] = \int_v [B]^T [C] [B] dv$ 为刚度矩阵,

$[M] = \int_v [N]^T m [N] dv$ 为质量矩阵, $[D] = \int_v [N]^T D [N] dv$ 为阻尼矩阵, $\{R\} = \int_v [N]^T \{q_v\} dv + \int_s [N]^T \{q_s\} ds + \{R_o\}$ 为外载荷矩阵, $\{\delta\}$ 为节点位移列阵, $\{\dot{\delta}\}$, $\{\ddot{\delta}\}$ 为节点位移对时间的一、二阶导数; $[B]$ 是应变位移关系矩阵, $[N]$ 为插值形函数矩阵, D 是阻尼系数, m 是质量, $\{q_v\}$ 是体积力, $\{q_s\}$ 是面力, $\{R_o\}$ 是集中力。

2.2 计算的力学模型

(1)单元类型:对压气机叶片有三种单元类型可供选择:梁单元、体单元及壳单元。梁单元过于粗糙,精度较低。体单元要求网格不能太粗,单元在三个方向上的尺寸比值不能太大,计算时间长,费用高。采用壳体单元比较合理。本文在计算中使用了 8 节点 40 个自由度的超参数壳元,它考虑了横向剪切效应,能比较真实地模拟复杂叶片的几何形状和位移模式,计算精度较高。

(2)计算模型:叶片被划分成 56 个单元,199 个节点,如图 2 所示。

(3)边界条件:取叶片根部作为固支端。

(4)计算的整体坐标系: X 轴与 Y 轴分别与发动机转轴(顺气流方向)的夹角为 38° 及 128° , Z 轴沿截面重心连线,垂直于发动机转轴。

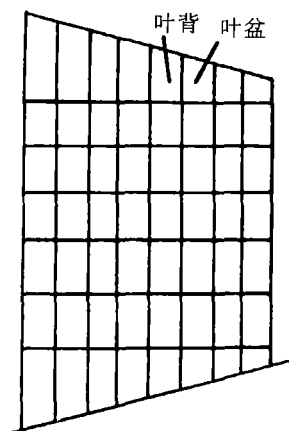


图 2 二级叶片的单元划分

Fig. 2 Mesh of stage 2 blade

2.3 计算结果及分析

表 2 为二级叶片在叶片厚度允差范围内固有频率的最大值和最小值。由此可见,二级叶片的 1 阶固有频率出现在 225 Hz ~ 253 Hz 之间。这是判断二级叶片是否发生 1 弯共振所不可缺少的依据。

3 结论

通过将测试结果与计算结果相比较,我们不

表 2 压气机二级叶片的固有频率计算值

Table 2 The calculating value of natural frequency of stage 2 blade

阶次	1	2	3	4
固有频率(Hz)	225 ~ 253	838	1915 ~ 1943	2924 ~ 2966

发现测试值与计算值是相吻合的,尽管有 4 个叶片的固有频率测试值较计算值略偏低,这是由于我们在做叶片固有频率测试时,先用的是表面质量好的,后 4 个叶片由于叶片表面有明显的缺陷(划痕),因而导致其固有频率测试值偏低。目前,作者用同样的方法对压气机一级叶片、三级叶片、四级叶片、五级叶片的固有频率进行了测试和计算,测试结果和计算结果也是吻合的。说明本文所阐述的叶片固有频率测试方法和计算方法是完全正确的,为今后叶片的设计及定寿提供了有力的理论依据。

参 考 文 献

- 1 宋兆泓.航空发动机典型故障分析[M].北京:北京航空航天大学出版社,1993.3~4.
- 2 李明达.有限单元法在燃气涡轮发动机强度计算中的应用[M].北京:国防工业出版社,1987.

The Test of Natural Frequency and The Calculation of Finite Element of Compressor Blade

Wang Ping¹⁾ Wu Weidong²⁾

(1) CAD/CAM research institute of Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224003, PRC
(2) Department of Mechanic Engineering of Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224003, PRC)

Abstract The test of natural frequency and advanced finite element calculation method are presented. In order to keep blade in the state of resonance, frequency following method and amplitude automatic control technology are used to test the natural frequency of compressor blade. superparametric shell element with eight nodes forty degrees of freedom is used in the calculation of finite element, the calculation results coincide with test results satisfactorily.

Keywords compressor; blade; the natura frequency; finite element