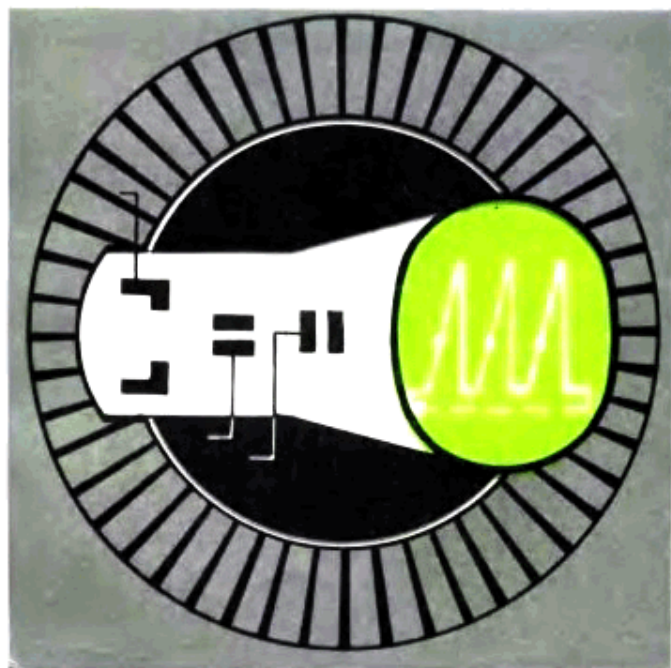


〔苏〕 И. Е. 萨勃洛斯基 И. А. 柯罗斯杰列夫 П. А. 谢鲍夫 著



涡轮机叶片振动的 非接触测量

吴士祥 郑叔琛 译 宋殿魁 校

650454

国防工业出版社

译者序言

用间断相位法 (ЛФМ) 非接触测量和监视涡轮机叶片振动的方法是近年来发明的一项重要新技术, 它和传统的应变计-集流器、应变计-无线电发报机方法比较具有一系列的优点。这种方法仅需在涡轮机的静止外壳上安装 1 ~ 2 个传感器就可将整级叶片的振动参数和变形情况在显示器屏上同时显示出来, 而在转动的涡轮机叶片上则不需要安装任何感受元件。利用这种新原理制成的叶片振动信号器还可在叶片振动超过预定值时实现自动报警。

运用间断相位法非接触测量的电子射线测量装置 (ЗЛУРА 仪器) 对于航空发动机、电站涡轮机及各类轴流式压气机动强度的研究和监视更有重要意义。本书系统地论述了这方面的原理、电路以及测量叶片振动的实例。

全书共六章。第一至第三章由郑叔琛翻译, 第四至第六章由吴士祥翻译, 宋殿魁同志校对了全部译文。由于译者水平有限, 难免有错误和不妥之处, 恳请读者予以指正。

译者

前 言

涡轮机叶片的振动是移动式 and 固定式蒸汽涡轮及燃气涡轮动力装置最普遍的现象。它将导致涡轮机调试时间的增长，降低其可靠性及使用寿命，甚至还会发生事故。

由于现代压气机及涡轮的工作轮是高速旋转着的，因而涡轮机叶片振动的测量问题是最复杂的技术问题。这一点可以从专家们对完善这类机械叶片振动参数的测量方法日益增长的兴趣而得到解释。近年来，除了一些已知的方法以外（这些已知的测量方法中最普通的是采用水银集流器的应变计），叶片振动的非接触式测量方法得到了迅速的发展。在1962年，以巴拉诺夫（П.И. Баранов）命名的中央航空发动机研究院制造了第一台这种形式的测振仪。

非接触式叶片振动测量方法与传统的方法比较有一系列的优点。其中最主要的是简单、可靠和实际上不受试验准备期限的限制。本书中详细叙述的间断相位法能够同时测量工作轮上所有叶片的振动。虽然非接触式测量方法得到了许多国家的注意，但是苏联在这个领域里创造性的工作是最有成效的，在技术上也处于领先地位。

所研制的这种仪器已广泛地应用于工业部门涡轮机的调试，以及进行科学研究工作。借助于这种仪器的帮助顺利地得到了一系列新的测试结果，所取得的这种结果如用其它已知的方法或者是不可能，或者是非常困难的。

我们可以毫不夸张地说，非接触式测量方法在涡轮机叶

片振动和其它旋转零件的振动研究上开创了一个新的局面。比如说，在同一个时间里得到工作轮上所有叶片应力分布的全部图像；测量多轴机器叶片的振动；监视飞机上压气机和涡轮叶片的振动；在现代电站观察汽轮机叶片在运行条件下的振动等等都是可能的了。

目前，关于叶片振动非接触式测量方法的知识可以从杂志和专利的叙述中得到，然而对于从事涡轮机叶片振动问题的研究人员和对使用这种仪器感兴趣的专家们来说，从中还难以了解其真谛。本书将对所指出的问题进行系统的叙述，以便促进这个领域科学技术的发展，进一步推广使用叶片振动非接触式的测量方法。

本书中列举和概括了这种方法最重要的内容，这对从事研究涡轮机的气体动力和强度问题的专家们都是有益的；还给出了叶片振动非接触式间断相位法的基本理论；叙述了仪器的制造和利用该仪器测量叶片各种形式振动的方法，以及用非接触式测量方法的某些研究成果。

本书对于涡轮机制造厂和科学研究机构从事气体动力、强度振动研究的工程师和科学工作者，各种类型涡轮机械（风机、压气机、涡轮、泵等等）的设计人员都将是有兴趣的。

在制造和运用这个间断相测量仪器的过程中，除了作者以外，尚有许多单位的专家参加了这一工作，作者对他们表示感谢。

目 录

主要符号	1
第一章 叶片振动和测量方法的基本概念	5
1.1 涡轮机叶片的动力特性	6
1.1.1 涡轮机叶片振动的振型和频率	6
1.1.2 叶栅几何和动力的不均匀性	11
1.1.3 叶片振动过程基本的相似参数	12
1.2 涡轮机叶片振动的种类	14
1.2.1 叶片的颤振（自激振动）	14
1.2.2 叶片的强迫（共振）振动	16
1.2.3 脱流振动（抖颤）和在强烈的气流旋涡中的振动（抖振）	17
1.2.4 旋转脱流时叶片的振动	18
1.3 叶片振动的测量方法	19
1.4 用间断相位法测量叶片的振动	24
1.4.1 测量叶片振幅的仪器	25
1.4.2 涡轮机工作轮叶片振动巡回信号器	29
第二章 涡轮机叶片振动间断相测量方法的基础知识	33
2.1 叶片振动相对位移的测量	35
2.2 叶片振动速度的测量	37
2.3 叶片振动频率的确定	40
2.4 测量叶片振动的相互位移和确定其相位	41
2.5 叶片振型的确定	43
2.6 叶片强迫振动的测量	46
2.6.1 用速矢端迹法测量叶片的强迫振动	46
2.6.2 叶片之间的相互联系性对用速矢端迹法测量振动精度的影响	53
2.6.3 用数个外缘传感器测量叶片强迫振动的方法	54
2.7 振幅测量时的静态误差	55
2.8 测量结果的数字处理	57

2.8.1 叶片频率和旋转频率不成倍数的窄频带振动	58
2.8.2 叶片频率和旋转频率成倍数的窄频带强迫振动	59
2.8.3 叶片的宽频带振动	60
第三章 脉冲传感器	61
3.1 脉冲传感器概述	62
3.2 传感器所引入的误差	65
3.2.1 系统误差	65
3.2.2 随机误差	66
3.3 电感式传感器	70
3.3.1 基本原理	70
3.3.2 电感式传感器的结构	72
3.3.3 电感式传感器的应用范围	74
3.4 电容式传感器	75
3.4.1 基本原理	75
3.4.2 电容式传感器的结构特点	80
3.4.3 实际说明	80
第四章 测量仪器	82
4.1 对仪器的要求	83
4.2 ЭЛУРА型仪器	84
4.3 ЭЛУРА-3М型仪器	85
4.4 ЭЛУРА-5型仪器	87
4.4.1 ЭЛУРА-5型仪器的方块图	88
4.4.2 脉冲整形器	89
4.4.3 转速扫描器	91
4.4.4 行扫描和时间延迟	93
4.4.5 旋转频率变为电压(电流)的转换器	96
4.5 ЭЛИА型仪器	99
4.6 间断相测量结果输入到电子计算机的装置	100
4.7 叶片振动巡回信号器ЦИКЛ	102
4.7.1 ЦИКЛ仪器的动作原理图	103
4.7.2 ЦИКЛ仪器的原理图	104
4.7.3 控制继电器的放大器电路	108

4.8 工作轮叶片折断指示器	108
第五章 用间断相仪器测量涡轮机叶片的变形	111
5.1 涡轮机的试验准备、仪器的校正和测量结果的判读	111
5.1.1 涡轮机的试验准备	111
5.1.2 间断相测量仪器的校正和调整	120
5.1.3 测量结果的整理	124
5.2 涡轮机零件静态变形参数的测量	128
5.2.1 叶片折断和损坏的指示	128
5.2.2 工作轮叶片安装节距差的测量	128
5.2.3 工作轮叶片弹性扭转的测量	130
5.2.4 轴的扭转的测量	131
5.3 涡轮机零件振动参数的测量	132
5.3.1 用Э.И.Р.А.仪器确定叶片振动的性质	133
5.3.2 叶片振动大小的指示	139
5.3.3 叶片振幅的测量	144
5.3.4 叶片振动频率的测量	148
5.3.5 叶片振动相位的测量	153
5.3.6 振动扭转分量的测量(扭转系数)	157
第六章 用间断相测量仪器研究涡轮机叶栅的振动	160
6.1 叶栅颤振激励形式的研究	160
6.2 涡轮机叶片强迫振动(共振振动)的研究	165
参考文献	174

主要符号

- A ——叶片外缘截面在圆周方向的振幅, 米;
 a ——叶片外缘截面在垂直于弦的方向的振幅, 米;
 α ——叶片的节距角;
 α_0 ——脉冲传感器之间的角度 (脉冲传感器之间的基准角);
 B ——叶片相对振动的振幅, 米;
 B' ——在离心力场中叶片的无量纲紧固系数;
 b ——在外缘截面上叶片的弦长, 米;
 C ——电容, 法拉;
 γ ——截面运动方向和叶片弦线的法线之间的角度;
 D ——直径, 米;
 D' ——分散度;
 $\bar{d}$ ——轮毂的相对直径;
 δ ——脉冲传感器的间隙, 毫米; 测量误差; 振动衰减率;
 ϵ ——叶片的局部频差;
 f ——叶片的振动频率, 赫;
 f_{cp} ——叶栅振动固有频率的均方值, 赫;
 f_{ca} ——叶片重复频率, $\left(f_{ca} = \frac{z}{2\pi} \Omega\right)$, 赫;
 θ ——叶片外缘截面的安装角;
 $\bar{h}$ ——叶片相对展弦比;

- i —— 电流强度, 安; $i = \sqrt{-1}$;
 K —— 扭转振动分量的振幅, 米;
 K_{ij} —— 定心相关系数;
 L —— 脉冲传感器基距, 米;
 l —— ЭЛНРА 仪器屏上亮线的长度;
 λ —— 速度系数;
 M —— 比例系数;
 m —— 叶片单位长度上的质量, 公斤/米;
 N —— 叶栅上的叶片编号;
 n —— 气流周向不均匀度的谐波编号; 振动倍数——
 振动频率与转子旋转频率之比;
 v —— 叶片的相对频率失谐;
 ξ —— 叶片外缘截面进气边和出气边振幅之比;
 $\bar{q}$ —— 脉冲传感器在轴向距工作轮进气边的无量纲
 距离;
 R —— 叶轮半径, 米;
 r —— 非定心相关系数;
 ρ —— 密度, 公斤/米³;
 s —— 外缘脉冲传感器的位移, 米;
 σ —— 应力, 帕;
 $\bar{\sigma}$ —— 叶片的无量纲刚性系数;
 σ_f —— 叶栅上叶片固有频率平方的均方差, 赫;
 $\bar{\sigma}_f$ —— 叶栅上叶片固有频率平方的相对均方差;
 T —— 周期, 秒;
 t —— 时间, 秒; 叶栅节距, 米;
 τ —— 时间间隔, 秒;
 u —— 涡轮机工作轮上叶片的圆周速度, 米/秒;

- v ——亮线沿着屏幕的运动速度, 米/秒;
 U ——电压, 伏;
 W ——叶片外缘截面在圆周方向振动的速度振幅, 米/秒; 概率密度;
 w ——叶片外圆截面在圆周方向上的振动速度, 米/秒;
 φ ——叶片振动相位;
 X ——电抗, 欧;
 x ——在ЭЛНУРА 仪器屏上的亮点离扫描点的距离;
 χ ——振动时截面的回转角;
 y ——叶片外缘截面在圆周方向上的变形, 米;
 ψ ——叶片外缘截面弯-扭结合无量纲系数 (扭转系数);
 z ——叶栅上的叶片数;
 Ω ——涡轮机转子的旋转频率, 弧度/秒;
 ω ——叶片振动的圆频率, 弧度/秒;
 ω_n ——叶片振动的动态固有频率, 弧度/秒;
 ω_{cr} ——叶片振动的静态固有频率, 弧度/秒;
 $\bar{\omega}$ ——旋转脱流区域的相对频率。

注 脚

- i, j ——叶片编号;
 o ——转速的;
 k ——根部的;
 π ——外缘的;
 cp ——平均的;
 np ——换算的;

HA——导流片；

PK——工作叶片；

1 —— 涡轮机工作轮前面或叶片进气边的参数；

2 —— 涡轮机工作轮后面或叶片出气边的参数。

缩 写

ЭЛУРА——电子射线振动测量装置；

ЦИКЛ——叶片振动巡回信号器；

ЭМИР——电子计数测量装置；

ЦИАМ——中央航空发动机研究院。

第一章 叶片振动和测量

方法的基本概念

在现代工业中，广泛使用着各种类型的涡轮机械，按其通流形式有轴流式、混合式、离心式和向心式；按其用途，有压气机、风机、泵、鼓风机、蒸汽涡轮机和燃气涡轮机、水轮机等等。不论这些涡轮机械的结构及用途怎样不同，它们叶片的振动强度都是研制过程中所遇到的最复杂和最重要的问题之一。不解决这个问题，就不可能使涡轮机械安全可靠的工作和使它具有相当的寿命。

各式各样涡轮机械叶片的结构有很大的差异。比如说，轴流式和离心式压气机的叶片形式就很不相同，以致于想使用一种方法来研究各种涡轮机械叶片的动力和气动弹性方面的特性都将是十分困难的，更何况在本书中，阐述的是另外一个题目——叶片振动的测量方法。然而在这里适当的叙述涡轮机叶片的动力和气动弹性特性的某些最重要的和一般的概念，对于理解本书中的基础部分所叙述的材料也是必要的。

在本书中所叙述的测量涡轮机叶片振动的间断相位法，原则上可以用来测量各类涡轮机叶片的振动，但对轴流式压气机和涡轮机来说更为重要。因为它们的叶片具有较大的相对展弦比（叶片长度与它的弦长之比），保证叶片的振动强度更复杂，而且利用间断相位法来测量叶片振动的经验，在很大程度上又是在航空燃气涡轮发动机（ГТД）的轴流式涡轮机上得到的，所以下面叙述的材料将以这种轴流式涡轮

机作为例子。如果不做特殊说明,则所叙述的将是轴流式压气机和涡轮机的问题。在轴流式压气机和涡轮机中存在各种各样的振动现象,这些现象常常明显地限制了发动机的运行工况。涡轮喷气发动机的轴流式压气机第一级通流部分表示在图 1.1 上。

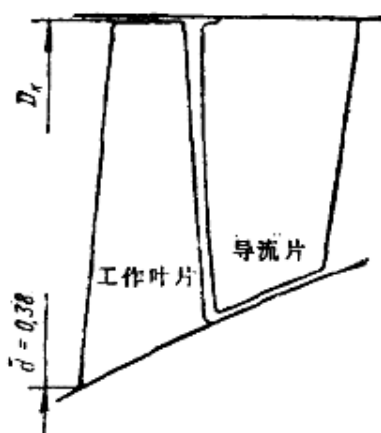


图1.1 涡轮喷气发动机的轴流式压气机第一级通流部分

1.1 涡轮机叶片的动力特性

1.1.1 涡轮机叶片振动的振型和频率

涡轮机叶片的激振过程在很大程度上取决于作为弹性体的叶片的机械特性。

现代大多数涡轮机(其中包括轴流式压气机和涡轮机)的主要特点是制造叶片的金属(钢、钛或铝合金)具有很高的相对密度和强度(见1.1.2)。涡轮机叶片的密度和强度比高速飞机机翼的相应参数分别大两个和一个数量级。如果将在燃气气流中振动着的叶片的质量和刚度的有效值与在真空中振动的相应参数做一个比较,我们可以看出与飞机的机翼相反,涡轮机叶片的惯性及刚度特性在改变绕流条件的时候没有明

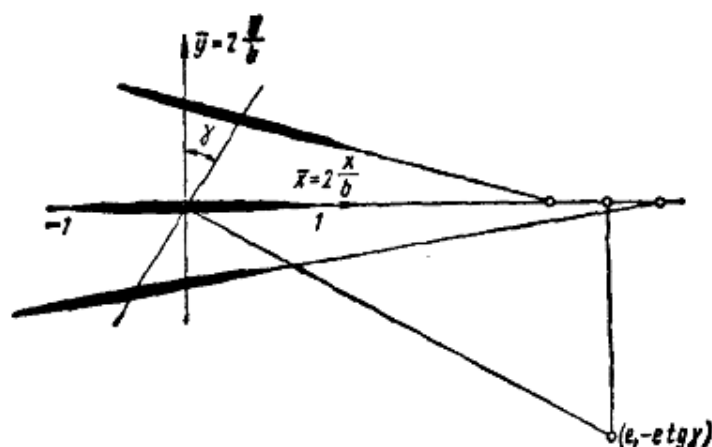


图1.2 在振动时叶片型面的运动

量的变化。因而通常确定燃气涡轮叶片的振型及频率时不必考虑它的绕流条件。

当叶片在液体介质中工作的时候（例如泵和水轮机），介质能够对叶片的动力特性产生明显的影响。这一点，在处理其振动测量结果的时候必须加以考虑。

现代轴流式压气机和涡轮机的大多数叶片具有复杂的几何形状，其中特别是轴流式压气机的前几级，尖部扭曲很大（达 60° ），叶片厚度、弦长、型线曲率等沿叶高都有变化，以及在叶轮上的倾斜安装等。这些截面的弯曲不可避免地导致一个截面相对于另一个截面的回转。因此，甚至叶片在做一阶弯曲振动时，叶片实际上也在做弯曲-扭转运动。

在叶片做小振动的情况下，单独截面的运动（其中包括外缘截面），可以表示为以围绕着一个带无量纲坐标 $(e, -etg\gamma)$ 的不动的中心做回转形式的运动（图1.2）。换句话说，每个截面的运动能够看做是在与截面弦线成 $\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right)$ 角度下向前方的平移和绕某些中心转动的总和，其转动的角度正比于向前方的平移。

数值 $\psi = 1/e$ 被称之为型面扭转系数或弯曲-扭转系数。

ψ 值越大，型面运动中扭转部分所占比例也越大。数值 ψ 与 ξ 有如下关系：

$$\psi = \frac{\xi - 1}{\xi + 1}$$

例如在压气机叶轮上被刚性固紧的叶片当以基本音调振动时，角度 γ 是正的，可能达到 30° 。当以二阶弯曲振型振动的时候，其角度通常是负的，且等于 $10^\circ \sim 20^\circ$ 。在按第一种振型振动的情况下各个叶片的扭转系数在一个很大的范围（从 $0.02 \sim 0.6$ ）变化，其扭转中心的位置离截面中心为 $1 \sim 50$ 个半弦长距离。

在压气机的叶片与叶轮为非刚性连接的情况下，振动将在叶栅平面以摆形出现。其摆动角度为 $\left(\frac{\pi}{2} - \vartheta\right)$ 。在这种情况下角度 γ 能够达到 60° ，型面的扭转系数则接近于零。

系数 ψ 的值与叶片的下述基本几何特性有关：扭转角度、相对厚度、弯曲度和展弦比。比如对 ЦИАМ 研制的解析翼型的等截面叶片，可用公式计算：

$$\psi = \frac{0.0993 \bar{f} \varphi_0}{\bar{c}^2 \bar{h}^2 \left[1 + 0.0375 \left(\frac{\varphi_0}{\bar{c} \bar{h}} \right)^2 \right]}$$

式中 $\bar{f}$ ——翼型相对最大弯度；

$\bar{c}$ ——翼型的相对厚度；

$\bar{h}$ ——叶片的相对展弦比；

φ_0 ——叶片的扭转角度。

在理论上，叶片有无数个固有振动振型和频率。对于具有最简单外形的叶片，从这些振型中能够精确的分出一系列弯曲振型（其节点分布在叶片横向）和一系列扭转振型（节点只有一个，位于叶片的扁平部，也可能出现沿横向分布

的节点), 以及平板形式的振动 (在其上有多于一个的纵向节点)。在叶片具有复杂的轮廓时 (带有沿叶高变化的参数, 在叶轮上倾斜安装等等), 这些形式之间的区别经常是趋向消失甚至完全消失。但是, 在大多数情况下, 每一个固有形式的振动是与“纯”弯曲、扭转或平板形式振动相对应的 (其中给出的“混合”振型是在叶片不断的变换时转换的, 比如对于具有沿高度等截面的平板叶片不断的变换)。

图 1.3 给出涡轮喷气发动机压气机叶片固有振动频率的格雷斯金特 (Гринстед) 曲线图, μ_1 表示固有振动形式的横节点数, 而 μ_2 表示纵向节点数。在 $\mu_2 = 0$ 时是弯曲振型, 而在 $\mu_1 = 1$ 时是扭转振型。

实际上, 通常所遇到的叶片的振动是相对的低频振动形式, 而用非接触式的测量方法测高频振动通常也是相当困难的。

所以在本书中, 如果叶片尺寸不超过 200 毫米的话, 我们将首先讨论 3 ~ 5 种 (甚至主要是 1 ~ 3 种) 叶片最低阶频率的振型, 因为正是这些形式的叶片振动是最危险的。但是, 如叶片尺寸较大, 则所研究的阶数应该多一些。

涡轮机旋转着的工作轮的离心力场实质上将影响到叶片的动力特性——它的频率和振型。对于叶片的纯弯曲振型有下列的近似关系式

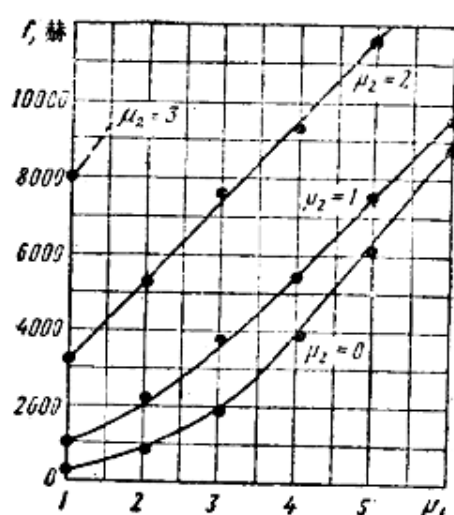


图1.3 压气机叶片的格雷斯金特 (Гринстед) 曲线

$$\omega_n^2 = \omega_{cr}^2 + B' \Omega^2$$

式中 B' ——叶片的紧固系数，它取自文献〔3〕。对于给定的工作轮上的叶片其紧固系数可以按下式确定

$$B' = 0.81 \frac{1 + \bar{d}}{1 - \bar{d}} + 0.37 - \cos^2 \varphi_0 \quad (1.1)$$

并且，叶片的扭转角度 φ_0 应该在 0.75~0.80 叶高处的截面上选取。显然，较高阶振动的频率受工作轮旋转速度的影响较小。扭转叶片的扭振频率随着旋转频率的增长甚至有某些降低。压气机叶片的振动频率与工作轮旋转频率的关系在图 1.4 上给出。

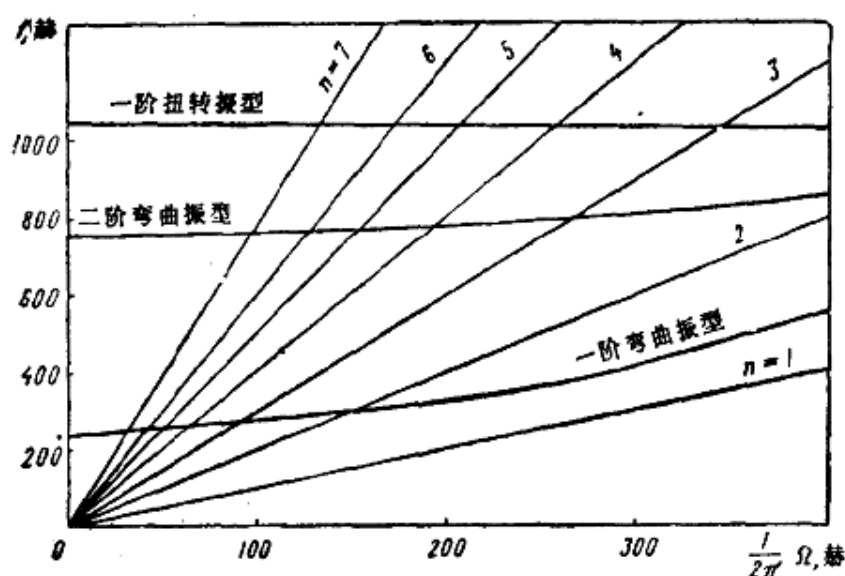


图1.4 压气机叶片的共振曲线

当旋转频率处于曲线 $f_i(\Omega)$ 和射线 $f = n \frac{\Omega}{2\pi}$ 相交的时候，将产生叶片和不均匀气流的 n 阶谐波的共振（该谐波相对于涡轮机机座是静止的），这将使动应力急剧增加。

离心力场的影响还将产生另外一个效果，即旋转叶片的弹性扭转。它的角度正比于旋转频率的平方 $\Delta\vartheta = \zeta \Omega^2$ ，并且