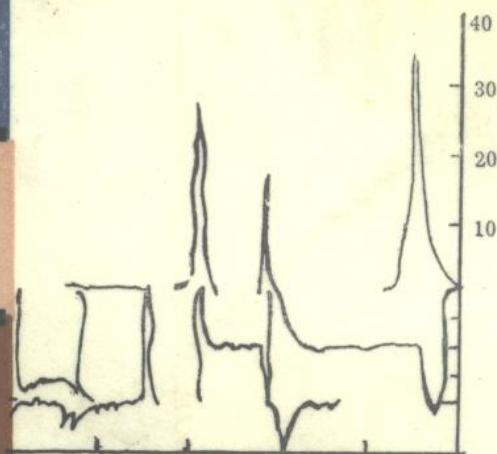


机械故障诊断



虞和济 韩庆大 原培新 编

振动诊断的 工程应用

(实例汇集)

冶金工业出版社

机械故障诊断丛书

振动诊断的工程应用

(实例汇集)

虞和济 韩庆大 原培新 编



冶金工业出版社

(京)新登字036号

2010/08

内 容 简 介

《振动诊断的工程应用》是机械故障诊断丛书之一，它主要讲述振动诊断技术在工程中应用的实例，介绍了旋转机械的振动诊断、往复机械的振动诊断、齿轮故障振动诊断、轴承故障振动诊断、转轴裂纹的振动诊断、工程结构损伤的振动诊断和工艺过程的振动诊断。

由于旋转机械在各工业部门中都是关键设备，振动诊断技术在汽轮机转子、压缩机转子、发动机转子、风机转子中的应用起步很早，而且比较成熟，所以重点介绍旋转机械转子各种故障的振动诊断方法。

本书适于大学或大专毕业后在工厂从事设备管理和维修工作的工程师或技术员阅读，也适于作为高等学校学生、研究生和教师的参考书。

机 械 故 障 诊 断 丛 书

振动诊断的工程应用

(实例汇集)

虞和济 韩庆大 原培新 编

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 9 字数 234 千字

1992年6月第一版 1992年6月第一次印刷

印数00,001~14,000册

ISBN 7-5024-0937-8

TH·158 定价5.90元

编 者 的 话

振动诊断是故障诊断技术中非常重要的一个方面。在诊断中采用振动信号,无论在信号的采集、数据的处理和故障的识别上都简便可靠,尤其适用于不停机在线监测和诊断报警。本书收集了国内外振动诊断在工程中的应用的实例87个,这些实例都是最近的研究成果,对各个工业部门的设备维护工作都有参考价值,而对冶金、化工、航空、电站及交通等部门更有意义。本书共分7章,第1章是关于旋转机械的振动诊断,第2章是往复机械的振动诊断,第3章是齿轮故障振动诊断,第4章是轴承故障的振动诊断,第5章是转轴裂纹的振动诊断,第6章是工程结构的振动诊断,第7章是工艺过程的振动诊断。

本书第1、2章由韩庆大编,3、4章由原培新编,5、6、7章由虞和济编,全书由虞和济主编。

编 者
1990.3

目 录

1 旋转机械的振动诊断	1
1.1 船用燃气轮机的故障诊断	1
1.2 振动分析在燃气轮机诊断中的应用	4
1.3 汽轮发电机组几种典型故障的分析	6
1.4 汽轮机转子模拟试验台“不对中”故障的实验研究 与诊断	9
1.5 航空发动机振动的故障诊断	12
1.6 转子不对中故障的诊断实例	16
1.7 大型汽轮发电机组轴系不对中的振动响应与故障识 别	19
1.8 转子不平衡故障诊断分析	23
1.9 轴弯曲故障特征分析及其诊断	26
1.10 弯曲转子的振动分析与对策	30
1.11 关于转子热弯曲影响整机振动的试验研究	33
1.12 转动设备的支承部件松动时其振动的谱图特点及故 障诊断	36
1.13 轧钢机传动系统扭矩在线监测	41
1.14 一种回转机械的单板机在线监测系统	44
1.15 大型电站机组的监测与故障诊断	48
1.16 旋转机器轴振动监测及评价	51
1.17 利用微计算机的机组振动监测和故障诊断系统 MMMD-1概要	55
1.18 旋转机械故障诊断系统的计算机自适应方法	57
1.19 离心压缩机组运行状态特征提取及趋势分析	59
1.20 旋转机械摩擦故障诊断方法	62
2 往复机械的振动诊断	68
2.1 发动机缸套振动研究与状态监测	68

2.2	微机在柴油机拉缸故障监测中的应用.....	73
2.3	利用缸盖表面振动信号研究发动机气阀的冲击特性...	76
2.4	轴向柱塞泵的振动状态监测与故障诊断.....	80
2.5	时序分析法用于柴油机故障监测和诊断.....	84
2.6	Q-485柴油机缸体动态特性分析	87
2.7	柴油机故障诊断和标准谱.....	89
2.8	内燃机振动故障诊断专家系统.....	92
2.9	8NVD48A-ZU船用柴油机气阀机构状态监测的研 究.....	95
2.10	CPCD5叉车状态监测研究.....	99
2.11	柴油机声源识别探讨	103
2.12	连杆铜套过盈量检测方法的研究	108
2.13	利用微机进行机械故障的振动监测	112
3	齿轮故障振动诊断	118
3.1	齿轮故障诊断方法.....	118
3.2	齿轮轮齿局部损伤信息的提取.....	119
3.3	齿轮传动脱啮原因分析.....	122
3.4	齿轮啮合冲击及动态耦合振动所引起的动态脱啮分 析.....	124
3.5	齿轮边频特征识别方法研究.....	127
3.6	边频特征识别.....	129
3.7	大型齿轮装置的故障诊断.....	133
3.8	用相位信息监测齿轮疲劳裂纹.....	133
3.9	利用相位突跳信息对圆弧齿轮疲劳裂纹诊断.....	138
3.10	圆锥齿轮局部损伤的振动诊断	140
3.11	贝叶斯(BAYES)分类器在上海牌汽车齿轮箱故障 检测和识别中的应用	144
3.12	用齿轮噪声特性诊断齿轮故障的研究	147
3.13	一种齿轮故障特征的提取方法	151
4	轴承故障的振动诊断	155

4.1 滚动轴承振动诊断方法概述.....	155
4.2 滚动轴承故障频率成分分析.....	157
4.3 308轴承的监测和诊断系统	160
4.4 滚动轴承疲劳故障的在线监视和诊断技术.....	164
4.5 精化特征信息的DDS模型方法在滚动轴承疲劳故障 诊断中的应用.....	167
4.6 国产大型汽轮发电机组运行中轴承不对中的特性...	171
4.7 影响滑动轴承载荷与油膜压力间关系各因素的实验 研究.....	173
4.8 球轴承故障的诊断和分析.....	178
4.9 用光纤传感器监测滚动轴承.....	182
4.10 用峰值采样法计算峭度系数诊断滚动轴承和齿轮故 障	184
4.11 诊断齿轮和轴承故障的分析技术	187
4.12 滚动轴承异常的诊断	191
5 转轴裂纹的振动诊断	194
5.1 具有横向裂纹的单圆盘转子的振动诊断.....	194
5.2 裂纹转子动态特性的实验研究及裂纹诊断.....	196
5.3 裂纹转子的振动特性及其诊断.....	200
5.4 具有横向裂纹转子轴系动力特性的解析法研究.....	202
5.5 万向接轴裂纹型损伤诊断.....	204
5.6 裂纹转子在耦合振动中的稳定性.....	208
5.7 转子轴裂纹深度振动测量分析.....	210
5.8 转子在线裂纹探查和监测系统的发展.....	213
6 工程结构的振动诊断	218
6.1 高压输电塔稳定性诊断.....	218
6.2 导管架式海洋平台模型破损检测的初步试验.....	219
6.3 车架胶接质量的振动检测.....	222
6.4 梁内裂纹型损伤的振动诊断.....	225
6.5 通过敏感区频响诊断结构故障.....	229

6.6	焊缝损伤诊断方法的初探.....	231
6.7	用计算机拟合实测导纳曲线的方法诊断基桩质量...	235
6.8	裂纹梁诊断中时间序列法模型参数的敏感度分析..	237
6.9	钢筋混凝土梁的故障诊断.....	239
6.10	钢梁上裂纹对梁的动力特性的影响	243
6.11	结构故障的频响函数诊断法	246
7	工艺过程的振动诊断	248
7.1	皮革削匀机刮削波纹成因的诊断及抑制措施的研究	248
7.2	刀具磨损信号的微机频域监测.....	251
7.3	金属切削过程颤振的计算机早期诊断与控制.....	253
7.4	一种切削颤振在线预报技术.....	254
7.5	用单板机在线控制车削颤振.....	259
7.6	振动球磨机磨矿质量监控及参数优化.....	262
7.7	丝杠运动误差的预报补偿与控制.....	264
7.8	诊断机床主轴回转误差源的生产试验法.....	268
7.9	用振动信号识别砂轮钝化状态.....	273
7.10	磨削振动的自回归诊断	275

1 旋转机械的振动诊断

旋转机械是工业上应用最广泛的机械，某些大型旋转机械，如：汽轮机、发电机、压缩机、发动机、轧钢机等，又是行业的关键设备。设备的好坏将影响到企业乃至国家的国民经济。

旋转机械最常见的故障有：转子（转轴）的不平衡，转子的不对中，轴承的油膜振荡，转轴的初始弯曲，热弯曲，摩擦热弯曲、半速涡动，共振，部件松动，转子结构缺陷、裂纹等。这些故障在机械运转中将产生各种振动信号，而某一振动信号将对应某一故障或几种故障的综合。因此，振动信号可以反映各种故障，从而为诊断旋转机械的各种故障提供了振动诊断方法。

振动诊断可在频域内进行，也可在时域内进行。主要是利用振动信号（如振幅）的变化，振动特征（如频率结构、能量）的变化等反映其故障的类别和程度。

为了保证大型旋转机械设备的正常运行，可以配置微型计算机，与振动测试系统配合组成监测系统，实现对设备运行的状态监测，各种故障可做到预测预报，以防止恶性事故发生而造成重大损失。

1.1 船用燃气轮机的故障诊断

于尧治

【摘要】利用谱分析、相关技术及传递函数的方法对船用燃气轮机机组试车中出现的振动过大故障进行理论与试验分析，特别是对燃气轮机中的随机振动原因及复杂转子系统的临界转速识别进行详细研究，找出了振动根源，并提出了有效的改进措施，经改进后使试车一次成功。

【方法介绍】燃气轮机中常见的故障有：叶轮、叶片振动；转子振动；壳体振动；支承振动；空气-燃气道的振动；轴承失

稳及振动；紧固件、附件、导管的松动；齿轮缺陷等。

燃气轮机的振动故障中由转子引起的确定性振动一般较常见。本例就因气流与水流的扰动产生的机组随机振动进行研究与分析。

1) 某台燃气轮机在动力涡轮支承处发生 $200\mu\text{m}$ 的低频大幅振动。经频谱分析，如图1-1所示，主要频率成分在22Hz左右，不依转速明显改变，带宽较宽，幅值大小与带宽有关。为找振源，对动力涡轮排气的脉动压力 P 、轴承振动的自相关函数 $R_x(\tau)$ 以及动力涡轮至轴承支承结构的传递函数 $H(f)$ 分析进行了测量与分析，结果如图1-2所示。排气脉动压力的频谱特性具有白噪声平坦连续谱的特性，而由动力涡轮至轴承支承结构的传递函数在22Hz附近有一共振峰特性。

为消除该故障，对排气道结构系统进行改装，减少动力涡轮支承与动力涡轮轴销的间隙，提高支承刚度，其结果是使振动幅值下降至 $61\mu\text{m}$ ，达到 $80\mu\text{m}$ 的允许标准。

2) 另一台燃气轮机在陆上试车台试验中，其传动齿轮的振幅出现过 $250\mu\text{m}$ 轴向过大振动的故障。应用以上的方法找到了故障原因，主要是由试验水力测功器内，水的随机激励使悬臂梁共振造成的对机组惯性激励所致。拆除该悬臂梁后，振幅降至 $50\mu\text{m}$ 以下，达到 $50\mu\text{m}$ 的允许标准。

此外，对转子系统进行了模态分析与临界转速的识别。船用燃气轮机的转子系统是一个复杂的转子动力学系统，其临界转速难以精确计算。在试车中，曾出现临界转速共振，其振动加速度达 $3.7g$ ●，是船用规范所不允许的。通过模态分析的方法，进行了模态试验，找到了该振动峰值是由转子的临界转速所致。为此，在高速转子的中心孔内加装了 37kg 的配重，将临界转速调至最低运行工况以下，并利用内阻减少共振幅值。改装后，在运行工况范围内不再出现共振，振动加速度由 $3.7g$ ●下降至 $2.7g$ ●，并消

● $g = 9.81\text{m/s}^2$ 。

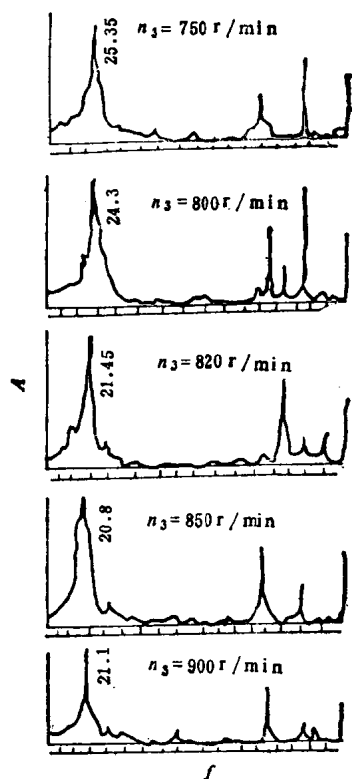


图 1-1 动力涡轮振动谱与转速关系 n_3 —转数

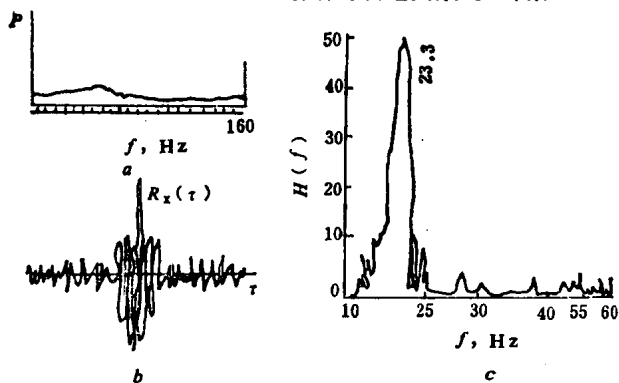


图 1-2 压力频谱、自相关函数、传递函数
a—排气脉动压力频谱；b—自相关函数；c—传递函数

除了共振峰。

〔结论〕 利用随机振动的理论，对转子系统进行谱分析，用相关技术、传递函数可确定振动故障源，采用相应的措施，消除了故障。

1.2 振动分析在燃气轮机诊断中的应用 吴震球

【摘要】 对于燃气轮机在研制中遇到的某些振动问题，归纳成常见的振动故障及诊断方法。主要介绍诊断旋转轴临界转速的“静态应力突变”法。此外，介绍一些其它的故障诊断技术。

〔方法介绍〕 燃气轮机结构复杂，价格昂贵，对安全性和可靠性要求特别高。所以，在设计阶段必须对转子-支承-机座系统进行振动特性分析。并在研制和使用中进行振动监视及故障诊断，以便及时改进设计及采取相应的对策。

A 振动监视和诊断系统

某燃气轮机转子-支承-机匣系统的振动监视和诊断系统框图如图1-3所示。监视点为：1) 轴承机匣安装边水平与铅垂位置安装地震式传感器；2) 中轴承座壁、后弹性支承、涡轮机匣承力杆、燃气轮机支承、涡轮轴上粘贴应变片；3) 安装测速电机。

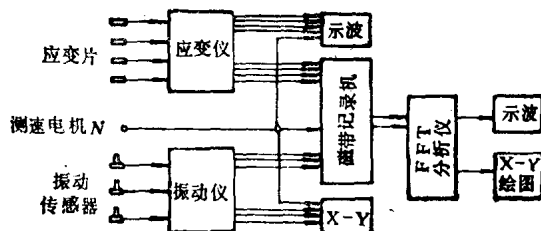


图 1-3 振动监视和诊断系统

B 振动分析应用实例

(1) 涡轮机转子的临界转速

调试在4700r/min时,无法正常运转。解体后发现,转子与定子间篦齿封严处严重磨损,涡轮轴磨损深达0.5mm。最后采用弹性支承及挤压油膜阻尼器后,排除了故障。

为了测定涡轮转子的临界转速可利用“静态应力突变”现象。由于转子质量偏心,旋转轴在旋转时将产生横向弯曲弓状回转运动,则轴的表面产生拉或压静态应力。在通过临界转速点前后,静应力将产生突变,如图1-4所示。亚临界时A点为拉应力,B点为压应力;临界时A和B点均为零应力;超临界时A点为压应力,B点变为拉应力,即通过临界转速时轴表面静态应力出现突变,突变时间往往不超过一秒,与理论一致。

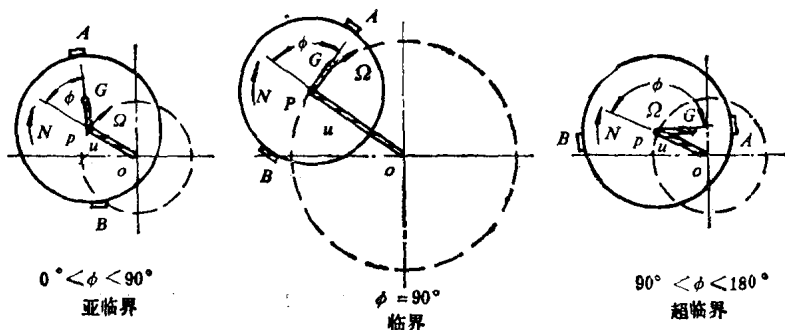


图 1-4 旋转轴通过临界转速时“静态应力突变”现象

(2) 涡轮转子进动速度大小与方向测定

当轴的进动(公转)速度与自转速度大小相等、方向相同即正协调进动时,定义为转轴的临界转速。

测量弹性支承杆的应力,校核临界转速。在相差90°的两弹性支承杆上测应力。理论分析振动应力波如图1-5所示,相差90°,与实测得到的应力波相同。由此断定转子的临界转速为4428r/min(73.8Hz)。

(3) 弹性支承振动疲劳断裂

后轴承改用弹性支承后,解决了通过临界转速问题,但振动时间一长,弹性杆出现裂纹或断裂,断口为疲劳断口。综合分析

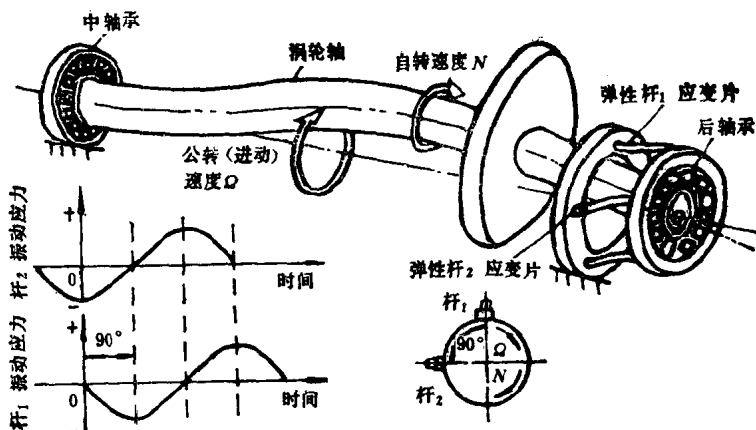


图 1-5 涡轮转子进动速度大小和方向的测定

认为，是结构和焊接工艺不合理。改进了曲梁式弹性环和阻尼器后，解决了疲劳断裂问题。

(4) 排气筒局部共振

某次调试，更换了新排气筒（原来正常），当转速达8460r/min(141Hz)时，后支点振动突增，分析后支点主频率为140Hz，而排气筒固有频率为147Hz，诊断为共振，后在新筒上加两道加强箍，排除了故障。

〔结论〕 用“静态应力突变”法测定旋转轴的临界转速是可行的，利用振动监视和诊断系统并结合实际可以排除故障。

1.3 汽轮发电机组几种典型故障的分析 姜兴渭

〔摘要〕 用振动监测技术对汽轮发电机组的故障进行诊断，详细讨论了轴系不平衡、不对中、油膜振荡等几种典型故障的识别与诊断及故障信号的提取与识别方法。

〔方法介绍〕 汽轮发电机组是电站的关键设备之一，对国民经济有直接影响。因此，早期预报故障，防止严重事故发生，

缩短检修周期, 提高运行效率是电厂十分重要的问题。利用外部的振动信号来诊断内部故障是简单、经济、有效及可靠的方法。

A 汽轮发电机组的典型故障分析

1) 转子不平衡 (偏心质量引起周期振动);

2) 轴系不对中 (安装不当引起平移、偏角或两者兼而有之);

3) 油膜振荡 (油膜内形成的油楔受到动态力、预负荷、间隙、润滑油等因素的作用, 激励轴承而引起)。

B 故障信息的提取——矩法

频谱分析方法较成熟、可靠, 同时配以其它方法可用于汽轮发电机组故障的综合诊断。但提取故障信息较困难, 类间与类内故障的区分都是很困难的。为此, 采用原点矩的方法。 n 阶原点矩为:

$$M(n) = \int_0^{\infty} X(f) f^n df \quad (n=0, 1, 2, \dots, 0N) \quad (1-1)$$

式中 $X(f)$ ——频谱;

f ——频率;

$M(n)$ ——原点矩。

设类间矩的最大距离 $d_{\max}$ 和类内矩的最小距离 $D_{\min}$ 分别为

$$d_{\max} = \max |M_k(n) - M_j(n)| \quad (n=0, 1, 2, \dots, N) \quad (1-2)$$

式中 $M_k(n)$ ——某一类现象的 n 阶原点矩;

$M_j(n)$ ——另一类现象的 n 阶原点矩。

$$D_{\min} = \min |M_k(n) - M_L(n)| \quad (n=0, 1, 2, \dots, N) \quad (1-3)$$

式中 $M_k(n)$ ——某一类内正常谱的 n 阶原点矩;

$M_L(n)$ ——同一类内异常谱的 n 阶原点矩。

若 $d_{\max} < D_{\min}$, 则取 n 为原点矩的阶数。

C 贝叶斯 (Bayes) 方法在诊断中的应用

为了降低实际测量中的干扰及噪声随机因素的影响, 采用贝叶斯方法。设 $P(x/\omega_i)$ 为在事件 ω_i 存在下 x 的条件概率密度函

数, x 为观察值, $\mu^{(1)} = E[x]$ 是均值 (数学期望)。

随机变量 $L(x)$ 为:

$$L(x) = \log \frac{P(x/\omega_1)}{P(x/\omega_2)} = \frac{1}{2} (x - \mu^{(2)})^T \Sigma^{-1} (x - \mu^{(2)}) - \frac{1}{2} (x - \mu^{(1)})^T \Sigma^{-1} (x - \mu^{(1)}) \quad (1-4)$$

$L(x)$ 的条件数学期望为:

$$E(L|\omega_1) = \frac{1}{2} (\mu^{(1)} - \mu^{(2)})^T \Sigma^{-1} (\mu^{(1)} + \mu^{(2)}) = \frac{1}{2} J \quad (1-5)$$

$$E(L|\omega_2) = -\frac{1}{2} J \quad (1-6)$$

而方差为:

$$\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = (\mu^{(1)} - \mu^{(2)})^T \Sigma^{-1} (\mu^{(1)} + \mu^{(2)}) = J \quad (1-7)$$

考虑其正态分布可以导出错误分类概率为:

$$R_0 = \int_{-\infty}^{-\frac{1}{2}\sqrt{J}} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{2\pi}}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (1-8)$$

式中 J ——发散度 (亦称 Mahalanobis 距离)。

当 J 较大时, 则概率 R_0 较小, 反之则大。因此亦可用 J 来判断两类现象之间的接近程度。根据分析可求出一个门限值 J_T 。若 $J \geq J_T$ 则认为没有故障, 如果 $J < J_T$ 则认为已出现故障。

D 汽轮发电机组故障的识别

故障识别的试验是在多跨转子试验台及 10 万 kW 转子模拟试验台上进行的。人为地制造一些典型故障, 进行动态测试、分析。其结果见表 1-1。

从各种情况二阶矩看: 平衡与不平衡相差很大, 而不平衡的 2W 与 3W 间仅相差 1/8; 正常与不对中应用原点矩法更为明显; 矩法用于油膜振荡时, 正常与振荡相差十多倍。用贝叶斯方法的

表 1-1 振 动 幅 值

状态		幅 值, μm			二 阶 矩	J	备注
不平衡	平 衡	9.38	1.88	0.63	42328.1	$J_{12} = 621.8$	2W
	不平衡	16.88	4.13	1.88	86359.4	$J_{13} = 6.56$	2W
	不平衡	12.50	5.63	1.50	91587.5	$J_{23} = -0.21$	3W
不对中	正 常	16.88	0	0	263.7×10^3	$J_{13} = 0.03$	2W
	不对中	16.25	23.75	1.88	2001.9×10^3	$J_{12} = 7.57$	2W
	不对中	17.50	7.50	4.63	830.1×10^3	$J_{23} = -0.01$	3W
油膜振荡	正 常	13.75	63.75	0	67.2×10^4	$J_{12} = 5.9 \times 10^{13}$	2W
	振 荡	375.00	812.50	0	906.3×10^4	$J_{12} = 9.2 \times 10^4$	开始
	振 荡	750.00	350.00	0	537.5×10^4	$J_{23} = 8.6 \times 10$	严重

判据标准 J 更为明显。

【结论】 应用原点矩法与贝叶斯方法来识别诊断轴系不平衡、不对中及油膜振荡等是比较有效的方法，特别是在有干扰与噪声的情况下更为有效。

1.4 汽轮机转子模拟试验台“不对中”故障的 实验研究与诊断

徐世昌

【摘要】 本例叙述了转子模拟试验台“轴系不对中”情况下的故障特征。采用模糊故障诊断方法进行了分析，并应用“频谱的主方向”概念较深入地讨论了谱特征在诊断中可能遇到的问题及原因。

【方法介绍】 汽轮机转子模拟试验台“轴系不对中”故障的实验研究与诊断如下：

A 实验方案

汽轮机转子模拟试验台如图1-6所示。电机带动高、低压转子（发电机脱开），轴承为滑动轴承，用非接触式涡流传感器测垂直与水平方向的振动。实验工况为：1）正常（即平衡与对中良好）；2）故障（即人为垫高或减低轴承座的垫片，造成轴系不对中）。