

机械故障的 全息诊断原理

Holospectrum and Holobalancing Technique
in Machinery Diagnosis

屈梁生 著



科学出版社
www.sciencep.com

机械故障的全息诊断原理

**Holospectrum and Holobalancing Technique
in Machinery Diagnosis**

屈梁生 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书详细地介绍了二维全息谱、三维全息谱技术及由全息谱技术衍生的提纯轴心轨迹、合成轴心轨迹、滤波轴心轨迹、全息瀑布图、短时复谱和短时轴谱等技术及这些技术在机械故障诊断实践中的运用。此外,书中还对全息动平衡技术进行了介绍。这是一种把全息谱的原理和柔性转子动平衡技术结合的动平衡新技术,它在充分利用机组的结构信息和振动信息的基础上,应用先进的信息技术,如遗传算法和人工神经网络等,进一步提高了现场动平衡的精度和效率。书中还介绍了一些生产应用的诊断实例,书末附有光盘,内有 MATLAB 程序和一些现场典型故障数据。

本书适合机械、石化、冶金、电力等行业的工程技术人员、高校教师和研究 生以及从事机械故障诊断与状态监测的科技工作者阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械故障的全息诊断原理=Holospectrum and Holobalancing Technique
in Machinery Diagnosis/屈梁生著. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-019265-3

I. 机… II. 屈… III. 机械-故障诊断 IV. TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 095487 号

责任编辑:耿建业 田士勇/责任校对:张小霞

责任印制:刘士平/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 7 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007 年 7 月第一次印刷 印张:12

印数:1—2 000 字数:224 000

定价:36.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<环伟>)



屈梁生 中国工程院院士，西安交通大学教授、博士生导师，江苏省常熟市人。1952年毕业于交通大学，1952~1956年在哈尔滨工业大学研究生班学习。长期从事机械质量控制与监测诊断领域的基础性、开拓性研究，研究风格注重创新实践和学科间的移植沟通。首创的全息谱技术，全面集成机器振动的幅、频、相信息，显著提高了机器运行中故障的识别率，在此基础上开发的轴系全息动平衡技术，改善了现有转子的现场动平衡方法。他运用和发展机械信号处理技术，从发动机噪声中成功地提取了故障特征、揭示了机器声悦耳感的机理、提高了多种机电产品的传动精度。共获得国家级奖励两项，省部级奖励十四项，已授权国家发明专利九项，发表论文 230 篇，出版著作三部，主编丛书一套（15 册），培养了研究生 100 余名。

前 言

全息谱技术是针对国民经济重大、关键机械设备的运行状态进行监测和故障诊断而开发的一项技术，其所以命名为全息谱，是因为它在频域中集成了机组转子振动的全部幅值、频率、相位信息，从而大大地提高了对故障的识别能力。这项技术自 20 世纪 80 年代中期提出以来，在国内的许多工厂企业中经过长期的应用实践，积累了大量的现场案例，进而证实了它的有效性和科学性。这本书是写给我国石化、电力、核电、冶金等行业第一线科技工作者的关于全息谱技术的一个承前启后的总结。著者衷心希望它能够在自己的土地上继续发展壮大，为国家作出更多的贡献。

机械设备运行状态监测与故障诊断是一个既古老、又新颖的研究方向。说它古老，是因为从检测蒸汽机车开始，铁路上的巡检员就用榔头敲打车厢弹簧，凭它发出的声音来判断有无裂纹；说它新颖，是因为对这个领域的研究要运用当代的信息理论改造并发展传统的机械学科，使机器的运行和维护与机器的设计和制造一样，用科学来代替经验，用系统的理论来代替零碎的感性知识。抓住这一点，就能够高屋建瓴，势如破竹；在长期的研究工作中，认准方向、锲而不舍。科学研究好比一棵大树，根深才能叶茂，把信息论、系统论的原理运用到机械故障诊断和状态监测中来，就从整体上提升了传统学科，是在树的主干而不是在枝叶上搞研究。

机械故障诊断和状态监测又是一个十分实际的课题，随时随地都会受到实践的检验，来不得半点虚假。应该说，最熟悉设备的是生产第一线的技术人员和工人，搞故障诊断不到现场，岂不是悬丝诊脉。一台运行中的机器，你判断它隐含什么故障，只要停车揭盖，就可以检验你判断得对不对。书本上常常只告诉你应该做什么，应该怎样做，反面的教训往往要靠自己实践中获取。实践出真知，误诊经验的积累往往比确诊故障的经验更为宝贵。

与工程技术的其他领域一样，在机械故障诊断和状态监测领域里，我们的一些原创性思维也是来自生产实践。例如，将多个传感器输出的振动信号在频域中加以合成后所形成的全息谱就是地地道道土生土长的技术，不是舶来品，连它的英文名字也是著者杜拟的。全息谱第一篇论文发表时^[1,2]，英文该称之为什么呢？著者把前缀词 Holo 和 spectrum 连起来，就成了它的英文名称，并

且得到国外许多杂志的承认，一直沿用到现在，并成了 Google 检索的关键词。全息谱是在数据层集成信息，它在机组监测和故障诊断中的应用比国际上提出信息集成与融合的概念要早了很多年。

另一个来自生产实践的原创性思维是离散功率谱的谱线校正技术。20 世纪 80 年代，我们用快速傅里叶变换将采集到的信号转换为离散功率谱后，发现谱图上对应于机器转速的谱线频率和车间仪表盘所显示的机器转频相比总是相差一到两个赫兹。一两个赫兹的误差相当于每分钟转速上百转的偏差，是不可以忽略不计的。于是我们独立地采用内插技术来纠正离散功率谱的这种幅值、频率、相位误差。可是，几乎就在同时，IEEE 的仪器月刊正式发表了同样的方法。虽然在理论创新上失之交臂，但我们在计算机上得到的离散功率谱，比起当时一些贵重的进口仪器来，如 BK2032、HP5892A 以及小野测器的信号处理仪器要精确得多，也比当时流行的细化谱要精确得多。以此为契机，我们还独立开发出一系列诊断软件，从而在机械故障诊断和状态监测领域里，摆脱了对进口贵重仪器的依赖，走到了前列。实践证明，这是正确的方向。

机械故障诊断和状态监测所涉及的领域非常广泛，近年来发展了许多有效的分析方法，这些方法突破了傅里叶变换的束缚，当然也非全息谱所能替代。书中第 7 章和第 9 章扼要介绍了经验模式分解和贝叶斯诊断网络的原理，它们都不属于傅里叶变换的范畴；但两种方法都经过我们自己的实践，证实对机组诊断有效，值得推广，希望能略微弥补内容偏狭的不足。书末附的光盘是一些现场典型故障数据和有关全息谱的 MATLAB 程序，读者可以方便地调用。

在科学技术迅猛发展的今天，要想迎头赶上先进的国家，需要付出加倍的努力。有了一流的实验室、一流的仪器和设备，不一定就能向社会和国家回报一流的成果。要做出一流的成果，更需要创造性的劳动。历史上许多原创性的思维常常是那么通俗易懂，那么近乎常情，往往会使我们赞叹不已。在今天，这样的创造，其决定的因素与其说是天赋，不如说是用什么样的心态去参加科学与技术的奥林匹克。

著 者

于西安交通大学，2007 年 2 月

目 录

前言

第 1 章 机械故障诊断技术中的几个基本问题	1
1.1 机械状态监测和故障诊断	1
1.2 提高机械故障诊断中的确诊率	2
1.3 设备运行状态劣化程度的评估和中长期预报	3
1.4 智能诊断与远程诊断	4
第 2 章 全息谱技术的由来与发展	6
2.1 二维全息谱的构成	8
2.2 三维全息谱的构成	11
2.3 由频域变换后衍生的轴心轨迹	12
2.4 时频分析: 短时复谱	14
2.5 起停车过程与全息瀑布图	18
2.6 全息谱区别故障的能力	21
第 3 章 傅里叶变换与希尔伯特变换	25
3.1 时域分析与频域分析	25
3.2 傅里叶变换的几个基本性质	28
3.3 离散傅里叶变换与泄漏	31
3.4 谱校正方法	33
3.5 希尔伯特变换	37
3.6 解析信号	38
3.7 采样参数和采样方式的选择	41
3.7.1 采样参数选择的三项准则	41
3.7.2 采样方式	42
第 4 章 转频故障的识别	46
4.1 转频椭圆的性质	46
4.2 常见转频故障分析	48
4.2.1 失衡	48
4.2.2 支承刚性不足	51

4.2.3	转子弯曲	52
4.2.4	支承座标高变化	55
4.2.5	转子的双稳态行为	57
4.2.6	50Hz 交流干扰	59
第 5 章	高倍频故障的识别	61
5.1	传感器安装不良	61
5.2	测量面缺陷	62
5.3	转子的横向裂纹	64
5.4	转子对中不良	67
5.5	动静部件径向碰磨	74
5.6	高倍频全息谱的分解	77
第 6 章	分倍频故障的识别	84
6.1	旋转脱离	84
6.2	喘振	86
6.3	流体激励	88
6.4	气封磨损	89
6.5	轴承座松动	90
6.6	管道激励	91
6.7	油膜涡动与油膜振荡	92
第 7 章	机组起停车过程分析	94
7.1	常规 Bode 图	94
7.2	改进的短时傅里叶变换与瞬时提纯轴心轨迹	97
7.3	经验模式分解	101
7.4	机组起停车过程分析	110
第 8 章	全息动平衡技术	114
8.1	全息动平衡中的几个基本概念	115
8.1.1	转频椭圆	115
8.1.2	初相点与转子重点	115
8.1.3	椭圆运动与等速圆周运动的转换	118
8.1.4	移相椭圆	118
8.2	三维全息谱的分解与应用	122
8.3	轴系的现场动平衡	125
8.3.1	获取转子运行的实测振型	126

8.3.2 确定迁移矩阵	127
8.3.3 线性校验	130
8.3.4 计算机模拟与遗传算法优化	131
第 9 章 贝叶斯诊断网络	135
9.1 贝叶斯网络的基本原理	135
9.2 机械故障诊断推理过程的不确定性	137
9.3 贝叶斯网络的拓扑结构	138
9.4 贝叶斯网络的推理计算	141
9.5 一台烟机诊断的实例	148
第 10 章 案例分析	152
10.1 烟机启动过程中的油膜涡动现象	152
10.2 用三维全息谱分析烟机转子的临时热弯曲	157
10.3 一台 80MW 燃气轮机发电机组的起车过程	159
10.4 空分装置的一些故障	162
10.5 一台 300MW 汽轮发电机组的故障诊断过程	165
10.6 一台数控机床主轴的调整与平衡	168
参考文献	171
附录——有关全息谱的 MATLAB 程序和现场故障数据	175
致谢	178

第 1 章 机械故障诊断技术中的几个基本问题

近 20 年来,机械故障诊断技术取得了令人瞩目的发展。首先,生产实践认同了这项技术可以取得很大的经济效益。充分利用设备、尽量减少和缩短停车时间、延长设备的服役期限、将计划性强制维修改为预知维修,这些措施已经越来越成为人们的共识。以化肥生产为例,1 套年产 30 万吨合成氨的设备,如果能将其每年的停车时间减少 1 个月,就可以增加 6000 多万元的产值,这是多么巨大的生产潜力!企业要增效挖潜,就必须首先了解设备,对设备的状态作出评估;对运行中的隐含故障不但要心中有数,而且要能对故障的形成和发展趋势作出正确的预测和预报,这就离不开故障诊断技术。

其次,这种进展还表现为基础学科和前沿学科的结合^[3]。机械故障诊断技术是以机器学为基础的一门综合性技术。它的实质是机器运行状态的模式识别问题,因此,一旦与信息科学、系统科学、人工智能、计算机技术相结合,这些当代前沿学科中的理论和方法必然会渗透到故障诊断技术中来,使得后者几乎能够与这些前沿学科同步发展。实践证明,紧密结合前沿技术,依靠计算机和软件开展机械故障诊断是正确可行的。

目前,机械故障诊断的实践正在由单纯依靠个人经验和直观感觉逐步向依靠科学,实现由感性到理性的飞跃发展;但是,这一技术还没有完全达到定量诊断的水平。由机器运行中的物理现象(声音、振动、声发射、热现象等)来推断机器内部所隐含的故障,是一种典型的反向工程,其难度要比经典的力学方法大得多。另一方面,故障的诊断经验又往往不易积累,例如一个炼油厂一年生产中出现棘手的设备事故也就一两次,依靠这样的速度来积累故障案例,需要很长的时间。制造厂、使用厂和研究单位的通力合作势在必行。

1.1 机械状态监测和故障诊断

机械状态监测和故障诊断是两种具有不同目的和方法的技术。状态监测的目的是判断机器运行的状态是否正常,一旦出现异常可以报警或跳闸停车。对于生产上的重大关键设备,往往需要对其采用 24 小时连续监测的办法,以确保设备安全运行。监测系统的诊断功能十分有限,往往只能对设备运行的正常

与否作出判断，但它可以为进一步的故障诊断提供必要的数据和信息（后者如开关量连锁跳闸的次序、振动量的变化趋势等）。故障诊断的目的是判断机器在运行中内部隐含的故障，识别主导故障以及主导故障的发展和转移，还需要对设备的当前状态作出评估，并对其劣化趋势作出中长期预报。这样，故障诊断技术在一般情况下不需要对设备进行 24 小时连续诊断，诊断通常是在离线状态下进行的。日本的丰田利夫将诊断分为简易诊断和精密诊断两种。实际上，由于手段简易，所谓简易诊断，只能起到状态监测的作用，即简单地区别机器的运行状态是否正常，而不能发现设备运行中隐含的故障。因此，可以把简易诊断列入状态监测的范畴，而将精密诊断称为故障诊断，这样在概念上也许更为明确。

1.2 提高机械故障诊断中的确诊率

正确地判断机器在运行中所隐含的故障^[4]，是机械故障诊断技术取得成功的关键，也是诊断技术立足于生产实践的前提。为此，就必须不断地提高故障的确诊率，这是不言而喻的。图 1-1 所示是故障诊断过程和影响确诊率的一些因素。

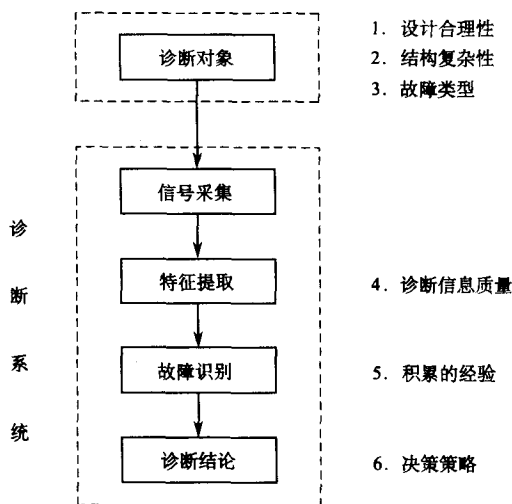


图 1-1 诊断过程和影响确诊率的一些因素

1. 确诊率的提高首先取决于设备的可诊断性

可以用故障熵作为衡量故障可诊断性的指标。设 1 台设备（1 个系统或 1

个车间), 发生各类故障的概率为 $p_1, p_2, \dots, p_n$, 这台设备的故障熵可以定义为^[5]

$$S = - \sum_{i=1}^n p_i \times \log(p_i); \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

如果 1 台旧设备, 各个零件都已经接近其寿命极限, 则发生各种故障的概率相等

$$S = S_{\max} = \log(n)$$

反之, 如大楼的照明系统, 一旦熄灭, 必然是保险丝出故障, 就有

$$p_k = 1, p_i (i \neq k) = 0, \quad S = 0$$

故障熵的大小反映了设备故障的可诊断性。由此可见, 可诊断性不但取决于设计, 而且取决于机器功能劣化的程度。

2. 提高诊断信息的质量

所谓诊断信息的质量, 既指信号的信噪比又指信息的完整性。在时间跨度上讲, 信息的完整性包括机器以年计的历史记录, 大修后以月计的近期记录, 以小时和分钟计的现状记录, 以及以毫秒计的瞬态行为。此外, 信息的完整性还指 1 台机器、1 根转轴部件对多种物理量采集到的整体信息, 而不是在个别测点、对个别物理量的局部信息。唯有在信息完整的基础上, 通过多传感器信息的集成与融合, 才有可能作出正确的诊断结论。

信息集成与融合可以在数据层、特征层或者决策层进行。针对大型回转机械开发的全息谱技术是在数据层上融合信息, 因此要求所融合的数据具有高度的一致性 (homogeneity)。传感器的特性、安装、所采集数据的频率、起始时刻都应保持高度的一致, 合成前各个频率分量的幅值、频率和相位应予以精确确定。这样才能获得良好的融合效果。全息谱技术由于在频域中集成了一个或多个轴承截面上 X、Y 两个方向振动信号的幅值、频率和相位, 特别是相位信息的利用, 使大机组中常见隐含故障的特征充分地显示出来, 得以正确识别和诊断。

1.3 设备运行状态劣化程度的评估和中长期预报

一台机器在长期运行过程中, 所隐含的主导故障有一个发生和发展的过程。掌握这一过程并对其未来的发展作出正确的中长期预测和预报, 就意味着达到了“预知”, 为实现预知维修创造了条件, 否则就成了盲目维修^[6]。

在一般的状态监测系统中, 多以机组振动的峰峰值作为趋势分析的对象。

这种方法固然简便易行，但不能对特定故障的发展趋势作出判断。比较完善的办法是用特征量来代替。图 1-2a 是用一台压缩机转频分量的幅值作出的趋势图，它反映了转子在长期运行中由于叶片表面积垢使失衡量不断增加；图 1-2b 所示是另一台压缩机转频分量和高频分量的变化趋势，从中可明显看出主导故障已由早期的失衡转移到动静部件的碰磨，具体反映在高倍频分量的比例不断上升。

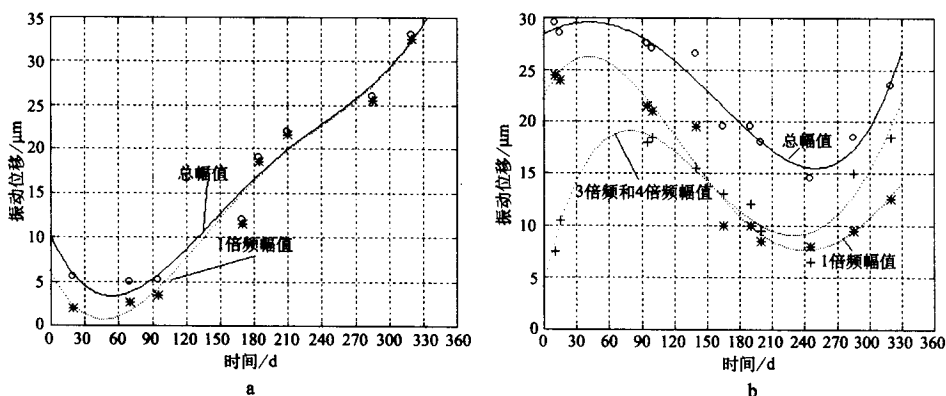


图 1-2 两台压缩机的特征量趋势

a. 主导故障单调上升；b. 主导故障发生转移

通常，机器性能的劣化过程是非稳态的。例如，加工中刀具的磨损过程，机器零件的失效过程，这些过程可以选择适当的特征量来表征。特征量瞬时分布的均值和分布形状均随着劣化进程而变化。

对设备的运行状态作出中长期预报，是生产发展的需要。随着现场数据的不断积累和预报方法的改进，预报的期限将会不断加长。目前，用人工神经网络已可以预报二到三个月的机组振动状态，开始具有实用意义。但总的来说，这些技术还处于初步的尝试阶段。

1.4 智能诊断与远程诊断

近年来，人工智能和计算机技术迅速发展。它们在设备故障诊断中的应用也越来越广泛，国内外也不乏成功的实例。例如用于大机组和燃气轮机的诊断专家系统，采用概率神经网络、自组织映射和径向基函数网络的智能诊断神经网络等。Zadeh 曾将专家系统、模糊集合、神经网络、概率计算和遗传算法统称为软计算。将软计算中各种方法集成，形成各种类型的混合系统，如用于诊

断的模糊专家系统、模糊神经网络等,使各种方法互相取长补短、相辅相成,是一种值得关注的动向。

远程诊断是计算机网络技术发展的产物。目前尚处于初始阶段。前面提到,设备诊断的案例积累,不能仅仅依靠单个工厂,必须一个行业乃至制造厂、使用厂和研究单位的社会性协作。从这一角度看,远程诊断将发挥极其重要的作用。就当前而言,首先要解决的是数据格式的统一问题。没有统一的数据格式,就谈不上诊断信息的交流,也谈不上远程诊断,其结果只能是个别公司垄断我国重大关键设备的运行经验。为此,不少学者强烈呼吁迅速促成、完善这一工作。这是我国机械诊断技术发展的一件大事,有着深远意义。互联网发展起来以后,一些学者提出智能维护系统的设想。最早用在激光打印机的维护上,当墨粉将用完时,由制造厂家自动提供墨粉的服务。以后,人们开始认识到:未来的制造企业必须能够在全世界范围内提供产品全生命周期服务支持。这使得制造理论与技术都要做相应的改变和发展。人们常说的信息,其中有一类就是关于产品各种特征随时间变化的信息。过去产品的性能,是以出厂时检测合格为目标,而现在则需要控制产品在整个生命周期中性能的变化和衰退。由于这种形势,维护工作发生了两项具有根本意义的变化。其一是维修的责任由产品使用方向产品提供方转移。为此,产品提供方不得不维持一支专业维护服务队伍和设备;其二,少维修、免维修和预测维修就成为制造业的重要命题。智能维护系统被称为零故障科学(zero break-down science)。发展到目前,制造业中有的跨国公司的服务收入已经占据了公司营业额的一半以上。由于业务发展的需要,这些跨国公司还陆续兼并了一些从事监测、诊断的小企业。

近年来,无线传感器和传感器网络在一些行业中开始得到推广和应用,如森林火警、军事侦察、石油化工生产中大量机泵的运行维护等,这无疑是机械状态监测和故障诊断中的一个值得注意的新动向。今后随着硬件的不断改善,还会有更多的应用场合。

上面阐述了设备故障诊断技术中的几个基本问题。这些问题是:设备的状态监测与故障诊断的目的和方法;影响确诊率的因素和提高途径;设备运行状态劣化的评估和中长期预报;智能诊断和远程诊断问题。设备故障诊断技术来源于生产实践,它的每一个进展又必须受到生产实践的检验。只要我们遵循理论结合实际的原则,广泛地吸取前沿技术的营养,在新的世纪里,这一技术必将能继续保持旺盛的生命力,实现新的飞跃。

第2章 全息谱技术的由来与发展

全息谱是一种将机组的振动信号在完成频域转换后,进一步将频谱上的谱线加以集成而形成的谱图或轴心轨迹。因此,它是一种在频域中融合信息的方法。由于它是以傅里叶变换为基础,所以它处理的对象主要是平稳信号。长期的实践证明,全息谱由于综合反映了机组振动的全部幅值、频率、相位信息,在生产中能够比一般方法更为准确地识别机组运行中存在的隐患,从而为保障关键、重大设备的安全运行创造条件。全息谱是在20世纪80年代末期提出的^[7],随后开始在我国石化、电力、冶金等行业推广应用,解决了许多生产上的难题,经受了实践的检验;全息谱技术本身,也得到了充实和发展^[8],建立了二维全息谱、三维全息谱、提纯轴心轨迹、合成轴心轨迹、滤波轴心轨迹、全息瀑布图、短时复谱和短时轴谱等方法构成的一整套全息谱分析和故障诊断技术。

目前国外对大型回转机械比较广泛应用的监测方法仍然是FFT幅值谱、轴心轨迹、瀑布图、趋势图等,反映了国外通过振动信号诊断机组故障的手段多年来没有太大的变化。这些方法的主要缺点是:分析结果不直观,幅值谱和相位谱分离;相位谱由于误差太大基本不用;转子在垂直和水平两个方向的振动分别孤立地考虑,因此对转子在一个支承截面内的振动,很难根据分析的结果在头脑中得到一个完整的印象;在时域中,轴心轨迹往往有很大的噪声干扰,对于复杂的轨迹,不能提取故障特征。因此,有必要寻找一种新的分析方法将转子在一个支承截面上的综合振动情况既精确又直观地表达出来。二维全息谱就能很好的反映转子一个支承面的振动情况,三维全息谱还能反映整根转子的振动情况和在任意转速下的振型。由全息谱衍生出来的其他技术,如提纯轴心轨迹、合成轴心轨迹、滤波轴心轨迹等,也在大机组的故障诊断中发挥其各自的作用。

图2-1是由单个传感器测量机组振动所采集的信号。同样的振动由于传感器放置的位置不同,所采集到的信号波形也不同,频域中对应的FFT谱也各异。如果我们将两个方向安装的传感器采集的信号加以合成,所得到的谱图或轴心轨迹的形状,就不会随传感器的安装位置改变。图2-2是转子在一个支承截面内的提纯轴心轨迹,它是由X和Y两个FFT谱中相应的倍频分量重新合

成以后得到的。当两个传感器一起在机座上转过一个角度时,合成轴心轨迹的形状没有变化;而且,由于消除了信号中的噪声,轨迹清晰。轨迹上有许多突变的尖点,说明有可能存在动静碰磨。由于有分倍频分量存在,转子每转所描绘的轨迹不完全重合。

X-波形图

X-FFT 谱图

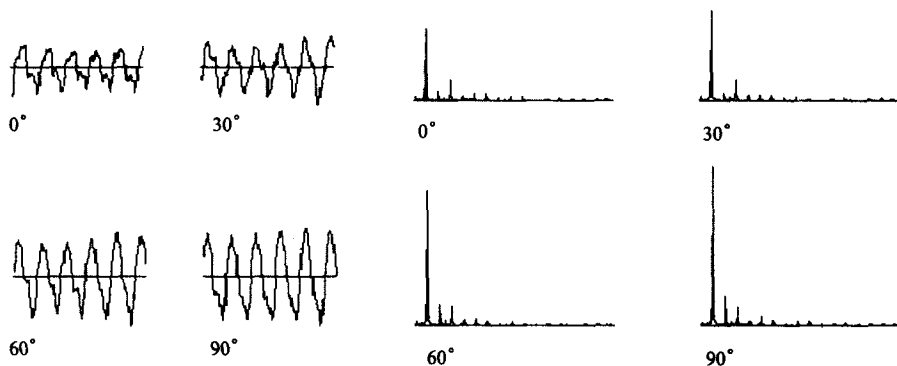


图 2-1 单个电涡流传感器测量机组振动的时域波形及相应的幅值谱, 图中传感器的安装角度分别为 0°, 30°, 60°, 90°

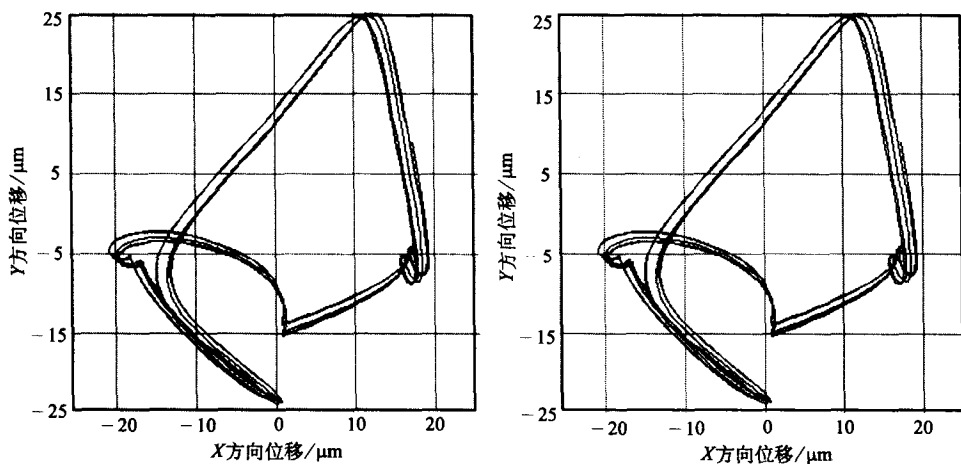


图 2-2 合成轴心轨迹

a. 传感器 0°, 90°位置安装; b. 传感器 45°, 135°位置安装

由于全息谱是在数据层对信息进行融合, 所以对所集成的信号有严格的要求。归纳起来, 主要有以下几个方面: ①传感器安装条件相同; ②传感器特性一致; ③信号传输路径相似; ④采样频率相同; ⑤起始采样的时间一致; ⑥各

分量的幅值、频率、相位数值精确。由此可见,需要深入细致的准备工作,才能正确地构造全息谱和正确地使用全息谱技术。

2.1 二维全息谱的构成

二维全息谱是在频域中集成了转子一个支承截面内 X 、 Y 两个方向信号的幅值谱和相位谱的谱图(图 2-3)。它综合地反映了转子在一个支承截面内的振动情况;不仅反映了转子在两个方向上振动的幅值,也反映了它们之间的相位关系。二维全息谱的基本组成是以阶次(频率)为横坐标,在横坐标上排列各阶的振动椭圆。在特殊情况下,椭圆可以退化成直线或圆。当 X 、 Y 两个方向上信号幅值相等并且相位相差 90° 或 270° 时,椭圆将退化成圆;当 X 、 Y 两个方向上信号相差 0° 或者相差 180° 时,椭圆退化成直线,直线的斜率取决于两个信号的幅值比。在一般情况下,二维全息谱是偏心率不等的椭圆。在二维全息谱上,还可标注出有关的特征参数,如长轴倾角、进动方向等。

在全息谱的构造过程中,对测量面 X 和 Y 方向的判别如下:从观察到转子旋向为逆时针的方向看,转子进动过程中第一个经过的测振传感器为 X 方向传感器,逆时针旋转 90° 后的另一个则是 Y 方向的传感器。

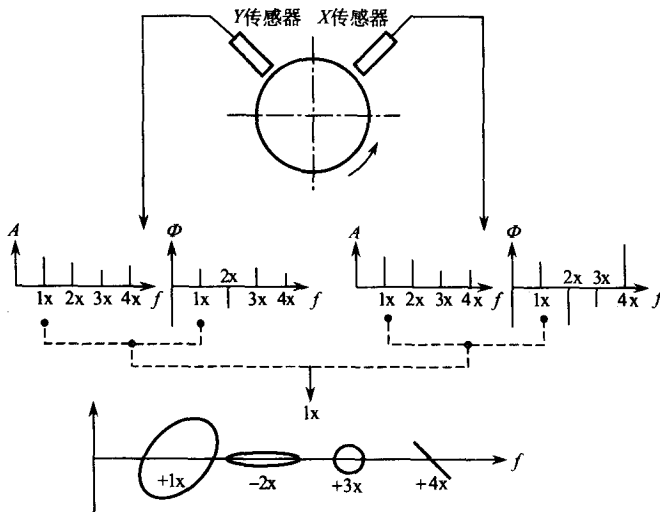


图 2-3 二维全息谱的构成原理图

图中横坐标上标有旋向,逆时针进动为+,顺时针进动为一