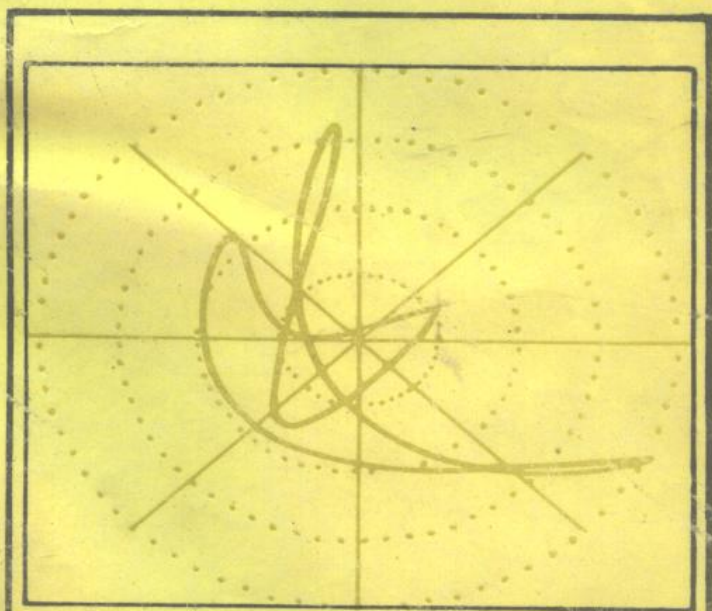




机械故障诊断丛书

计算机辅助监测 与诊断技术

屈梁生 陈岳东 著



西安交通大学出版社

机械故障诊断丛书之五

计算机辅助监测与诊断技术

屈梁生 陈岳东 著

西安交通大学出版社

内 容 提 要

本书讨论了大型回转机械的计算机辅助监测和诊断问题,是作者近年来在生产中开展这方面工作的经验总结。除了一些常规的信息处理方法外,书中还侧重介绍了新开拓的二维全息谱分析、三维全息谱分析、全息瀑布图、谱型的模糊分类和轴心轨迹的计算机模拟等方法,强调了相位信息的利用。这些内容在国内外尚属首次公开发表。

为了适应广大读者、特别是广大实际工作者的需要,书中删除了繁琐的数学推导,文字说明力求精练,可以作为石化、化工、冶金、矿山、电力、运输、轻工等有关行业大型回转机械维护运行人员和设备管理人员工作中的参考。亦可作为大专院校相应专业师生和研究生的参考用书。

20070/31
计算机辅助监测与诊断技术

屈黎生 陈岳东 著

责任编辑 石 白

*

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁西路28号)

西安电子科技大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32 印张 3.875 字数: 75 千字

1989年12月第1版 1989年12月第1次印刷

印数: 1—4000

ISBN7-5605-0278-4/TH·12 定价: 2.35元

《机械故障诊断丛书》总前言

机械故障诊断技术是有关设备运行、维护的一项新兴技术。它的推广和应用，不但根本改变了原有设备维修制度，而且在保证设备安全运行、消除设备事故方面起着巨大的作用。当前，机械设备的运行维护，已经从单凭直觉的耳听、眼看、手摸发展到采用先进的传感技术、计算机和信息处理技术。新的监测手段，诸如超声、声发射、红外等，层出不穷。人工智能、专家系统、模糊数学一类新兴学科也在机械故障诊断技术中找到了用武之地。

近年来，在国家经委、中国设备管理协会和有关学会的大力支持下，机械故障诊断技术在我国各行业中的推广和应用正在方兴未艾。它已经并将继续在实践中获得巨大的经济效益和社会效益。本丛书的出版就是为适应广大工程技术人员迫切需要而编写的。同时，也希望这套丛书能引起高等学校机械类专业广大师生和有关研究人员的兴趣。

我们在编写这套丛书时，既注意了它的科学性，又注意它的实用性。丛书保持了一定的理论深度，力求阐明机械故障诊断技术的理论基础，但又使之能为广大实际工作者所接受。对高等学校的师生和研究人员也有参考价值。为了尽量节约读者的精力和时间。丛书中每本就一个专题编写，字数限制在8万字左右。

由于各类产业机械在运行中既有各自的特点，又有某些共同点，同时机械故障诊断技术本身又正处于迅速发展的阶段，因此，本丛书在编写中既注意它的广泛性，即着重讨论

多个行业中机械设备的共同技术问题，诸如轴承、齿轮、转子、润滑油等的监测与诊断，又注意在内容上具有开拓性，尽量向读者介绍和展示一些诊断方面的新技术、新动向。丛书中有相当的比重是编写者多年来自己从事实际工作的总结，加以汇编成册。希望能在我国的生产中进一步得到应用和推广。

丛书本身是作者、编者和读者间的桥梁。当它和广大读者见面之后，作为编者和作者，能得到来自广大读者的反馈信息，使之不断得到改进和提高，是我们衷心的希望。

《机械故障诊断丛书》编辑委员会

1988年6月

序

本书是作者在近年实践的基础上写成的。主要讨论了大型回转机械的计算机辅助监测和诊断中的软件支持问题。除了沿用的、行之有效的现场监测和诊断方法外，本书提出了以全息谱分析为基础的频域分析方法，包括二维和三维全息谱分析、全息瀑布图等；提出了谱型分类问题；强调了相位信息在监测和诊断中的重要性。书中的实例，绝大部份来自现场实测的结果。由于大型回转机械的振动机理十分复杂，实例中反映的一些现象，例如，二维全息谱中各阶分量的相对位置，全息瀑布图上图象的变化等，要想从理论和实践的结合上得到深入的解释，还有待于理论工作者和实际工作者的共同努力。

为了使本书能适应广大实际工作者的需要，基本上没有使用数学推导。书中第5节：“提高FFT谱质量的途径”使用了一些有关傅里叶变换的基本概念，可能会使一些工程技术人员遇到困难，所以放在本书的末尾，不影响全书的阅读，可以视情况加以略去，或者在阅读时辅以其他文献作参考。这一节连同第3节有五张插图选自文献[24]，在此谨向原作者致谢。

作者愿借此机会，谨向支持我室工作的国家科学基金委员会、中国设备管理协会、中国石化总公司、机械工业基金委员会，以及长期与我室协作的镇海石化总厂、兰州炼油

厂、天津石化总厂、乌鲁木齐石化总厂、独山子炼油厂等单位致以衷心的感谢。本研究室的刘雄、赵振毅两位同志，参加了本书初稿的工作，在此一并致谢。

作 者

1988年12月于西安交通大学

机械监测与诊断研究室

前 言

大型回转机械是电力、石油化工、冶金、煤炭、核能等许多工业中的关键设备，更是飞机、船舶等现代交通工具的心脏。它们的正常运行，可以为国民经济创造巨大的物质财富。反之，一旦出现事故，会造成整个车间、乃至整个企业停产，甚至造成灾难性后果。所以，管好、用好这些大型回转机械，是保证企业稳产高产的前提，也是保证安全生产所必需。

当前，我国的工业生产正处在高速发展时期。越来越多的电厂开始装备大机组，许多炼油厂、化肥厂、化纤厂开始投入运行。大型回转机械的需要量不断增加；这类机械本身也不断向大功率、高转速、大容量方向发展。应该说，不论在设计制造方面，还是在运行维护方面，经验都十分不足。特别是由于相应的监测诊断系统不配套，感性的经验便缺乏科学的依据和验证的手段。有的场合下，一旦事故发生，现场甚至无法提供足够的原始分析资料。所有这些，说明开展对大型回转机械的监测和故障诊断是何等重要，何等急需。

随着微型计算机质量的不断改善和在我国应用的逐步普及，计算机辅助监测和诊断技术必然会象计算机辅助设计和辅助制造那样，受到越来越多的重视。可以预料，在不远的将来，必然会发挥更大的作用。这是因为，机器监测和诊断技术所能带来的社会效益和经济效益，将不断为人们所认识，特别是为企业领导人所认识。一个监测和诊断系统的初

始投资，往往不及一次设备事故损失的百分之一乃至千分之几；而一旦一个监测诊断系统投入使用，在短短不到一年的时间内，就可以收到原投资额数百倍的效益。这笔帐，人们往往要付出学费以后才能算清。但不少场合下，这笔学费毕竟太昂贵了。

另一方面，除了经济效益之外，采用机器监测和诊断技术，可以延长设备连续运行的周期和大修期；做到对设备的状态心中有数，从而针对不同的设备采取不同的措施。属于正常运行状态的设备，按例行方法继续监测；属于故障进行性发展的设备，重点监测；而个别故障严重发展的设备，及时停车进行检修。这样，就使沿用的定期强制性维修制度转变为预知性维修制度。这不能不说是维修制度的根本变革。

从技术发展史上看，机械产品的性能总是在长期使用的过程中不断得到发展和提高的。脱离了使用来谈性能改进就脱离了现实和依据。监测诊断系统在设备的长期运行中可以为我们积累大量的动态信息。充分利用这些动态信息，必然会对产品设计和制造工艺的改进提供有力的依据，使我国在大型回转机械的设计和制造方面积累更多的经验，提高其设计和制造的能力。对于引进产品，它又是有力的考察手段，使产品引进转化为技术引进，这一点，对于当前我国机械工业的发展尤为重要。

计算机辅助监测诊断系统的高度柔性和广泛的适应性在很大程度上取决于其支持软件。后者是本书讨论的重点。一个完善的计算机辅助监测诊断系统还要考虑其他许多问题，诸如采样技术、I/O 接口、数据库的建立和管理以及信息的传输等。这些问题，将在丛书的其他书中加以阐述。

目 录

第一章 大型回转机械的监测与诊断技术	(1)
一、 振动信号的时域和频域的分析	(5)
二、 计算机辅助监测与诊断系统	(10)
第二章 振动信号的计算机辅助分析	(14)
一、 时域波形、轴心轨迹和谱分析的几 个实例	(17)
二、 相位信息	(29)
三、 二维全息谱的建立和应用	(39)
四、 三维全息谱的建立和应用	(53)
五、 全息瀑布图	(58)
第三章 振动信号的计算机在线监测	(65)
一、 谱型的模糊分类和应用	(67)
二、 趋势监测和控制	(78)
第四章 振动信号的计算机模拟	(86)
第五章 提高 FFT 谱质量的途径	(96)
参考文献	(107)

第一章 大型回转机械的监测 与诊断技术

当前计算机辅助设备和制造(CAD,CAM)技术已经逐渐在生产上得到承认和普及。它们的硬件和相应的软件支持也日趋完善并在现代技术进步中发挥了重要的作用。其经济效益十分明显。但在另一方面,用计算机监测关键设备的运行状态并诊断其故障的产生和发展,则是近年来开始发展起来的技术。我们不妨称之为计算机辅助监测和诊断技术。应该说,这一技术当前的水平远远落后于CAD和CAM。在多数化工厂、电厂、钢铁厂中,一般场合下是用便携式仪器对运行中的设备作所谓简易诊断。只有在特殊疑难的场合,采用一些信号处理仪器作频谱分析。这已经是属于所谓精密诊断的范畴了[18]。

是什么原因使计算机辅助监测技术的发展滞后于CAD和CAM技术呢?这不能不从关键设备的监测过程对监测系统本身所提出的要求来进行分析。我们要求系统具有足够的可靠性,能和被监测的设备一起常年连续运行;具有足够大的容量,能存储大量的原始数据;具有足够快的计算速度,能对异常状态迅速作出判断;具有处理突发事件的能力,能及时报警和实现连锁停车;当然,我们还要求系统具有较高的性能价格比。所有这些,对计算机辅助监测与诊断系统的硬件来说,是相当苛刻的要求。只能说,只是在近年来微型计

算机的发展才逐步满足了大部份要求[11]。与一些专用的信息处理仪器相比较,其性能价格比上的优势,也开始得到多数人的承认。

另一方面,完善的软件支持对于计算机辅助监测与诊断系统来说,尤为紧要。完善的软件,至少要能满足如下的一些要求:

- * 足够高的采样频率和快速的信号处理方法;
- * 能精确地确定机器的振动参数,即频率、幅值和相位;
- * 能对信号进行综合的处理和直观的演示;
- * 能正确地识别异常状态并及时提供分析的依据;
- * 具有有效的数据压缩功能和足够容量的数据库;
- * 具有自学习功能,随着数据的积累能自动修正门坎值。

很明显,前面三个要求是有效监测和诊断的基础。为此,我们选择了以快速傅里叶变换为基础的信号处理方法。目的和所能达到的水平是:当软件固化后一次变换的速度可以达到14毫秒。其次,为了提高傅氏变换的精确度,特别是保证相位的精度,针对其误差来源,提出了改进算法AFFT。在对信号的综合处理方面,提出了二维和三维全息谱以及全息瀑布图。在这些谱图上,综合反映了频率、幅值和相位信息,为全面分析大型回转机械的振动信息创造了条件[26]。

在机器的监测和诊断技术中,存在所谓漏检和谎报两类统计性误差。对重要的关键设备,我们当然不希望遗漏掉出现的故障。这些故障有时会产生灾难性后果。为此,我们往往把门坎值收紧。但这样做的结果,必然又会频繁地出现谎报。谎报的次数多了,监测系统也就失去了威信。这同样是

我们所不希望的[4]。目前,计算机辅助监测技术在大型回转机组上所达到的水平是:对于机组的一些渐发性故障和存在的隐患,多数能够根据对机组振动分析的结果进行监测和预报,指导生产进行预知性维修;如果除振动监测外辅之以工艺参数的监测,则对某些突发性的故障,如喘振,还能起到积极的预防作用,使现场操作人员做到心中有数;对个别突发性的跳闸停车,能够做到保存停车前的数据不丢失,以便事后分析,分清是属于自然事故还是责任事故;如果是属于前者,还可以判断是属于那一种自然事故。达到这样的水平,应该说要比80年代初期的水平大大地跨前了一步。

图1所示是用于大型回转机组监测和诊断的系统。由图

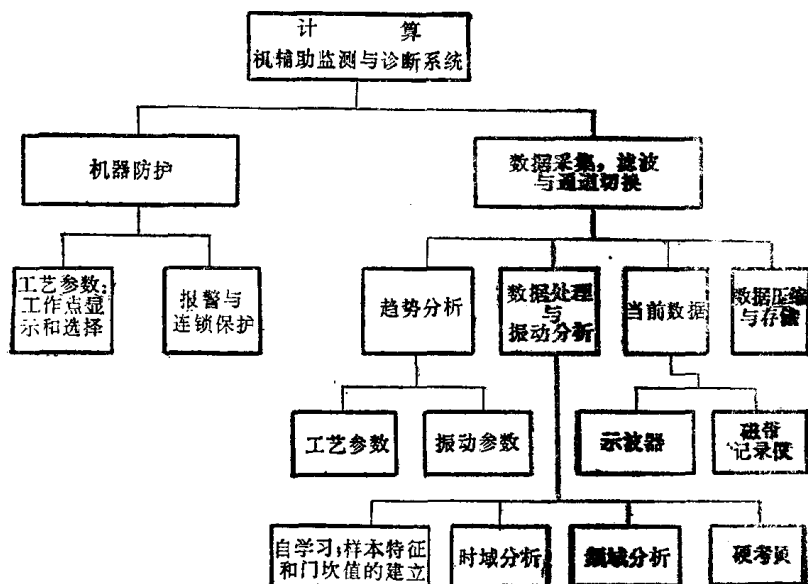


图1 计算机辅助监测与诊断系统的基本功能

可见,其基本功能应包括监测诊断和机组保护。在两个方面监测诊断功能上,应包括通道切换、滤波、A/D转换等预处理功能。然后,对数据进一步进行处理、振动分析、趋势分析、以及对数据进行压缩和存储等。此外,对当前的数据还应能用示波器作直观显示或作磁带记录。一旦出现突发性的故障,记录下来的数据即可用来进行分析而不会丢失。在机组保护方面,应包括对当前工作点的显示和对工艺参数选择的指导。至于自动报警和连锁停车,目前国内一般的系统还做不到这一点。但是,图1中所列的绝大部分功能已经能够用通用的微型计算机满足。

近年来,随着人工智能科学向实用化发展,在推广医疗诊断系统的同时,也开始出现了机器诊断专家系统[21,22,23]。这不能不认为是一个新的动向。目前已经有一些机器诊断专家系统建立并投入使用。但是,它们必须是建立在对所监测的大型回转机械具有全面而透彻了解的基础上。否则,搜集个别维修人员的浅知识而形成的知识库并不一定可靠,甚至是有疑义和争论的。关于这一点,从近年来一些大型机组事故会诊的情况就足以说明。因之,原有专家的经验有待通过计算机辅助监测系统的应用而得到深化和扩展;而系统监测过程中所获得的深知识,有待专家们加以总结和提高。二者不是互相排斥,而是相辅相成的。

从当前来看,发展计算机辅助监测和诊断技术,不论从硬件,还是从软件的支持来看,客观条件日趋成熟,可以有计划、有步骤地的一些生产流程连续的企业,诸如石油化工、冶金、有色、建材、电厂和民航交通等部门逐步开展和推广应用,使之不断得到发展和完善。

一、 振动信号的时域和频域的分析

机器在运转过程中，受到外界的作用和机器本身零部件之间的相互作用，不可避免地要产生振动。在产生振动的诸多因素中，机械部件本身的缺陷占有相当大的比重。由于分析方法的进步和对机械特性的深入研究，使得我们有可能通过对振动信号的处理，提取出反映机械特性及其缺陷的信息，用科学方法进行分析和推断，来判明机器所处的工作状态，诊断出机器的各种缺陷和故障。现在，振动分析已经成为大型回转机械状态监测和故障诊断技术中的重要手段。目前，我国多数大型回转机械均装备有涡流传感器，直接摄取转子相对基座的振动位移。在一些旧式的大型回转机械上，虽然没有配备涡流传感器，不少工厂在基座上安装了加速度传感器，摄取基座的振动量。由于基座一般质量很大，转子振动信息的传输和摄取，一般说，采用后一种方法要比前一种方法的可靠性要差一些。

简谐振动是机械振动中最基本的形式。其力学模型是弹簧连接的质量块在无阻尼情况下的自由振动。用数学公式表示，就是随时间作周期性变化的余弦函数。在任一时刻 t 的振动值

$$a = A \cos(2\pi ft + \varphi);$$

式中，幅值 A 表示振动量的大小，频率 f 表示振动变化的快慢程度，单位为 Hz，相位 φ 反映振幅相对于坐标原点的位置，单位为度或弧度。简谐运动的形式唯一地决定于这三个参数。

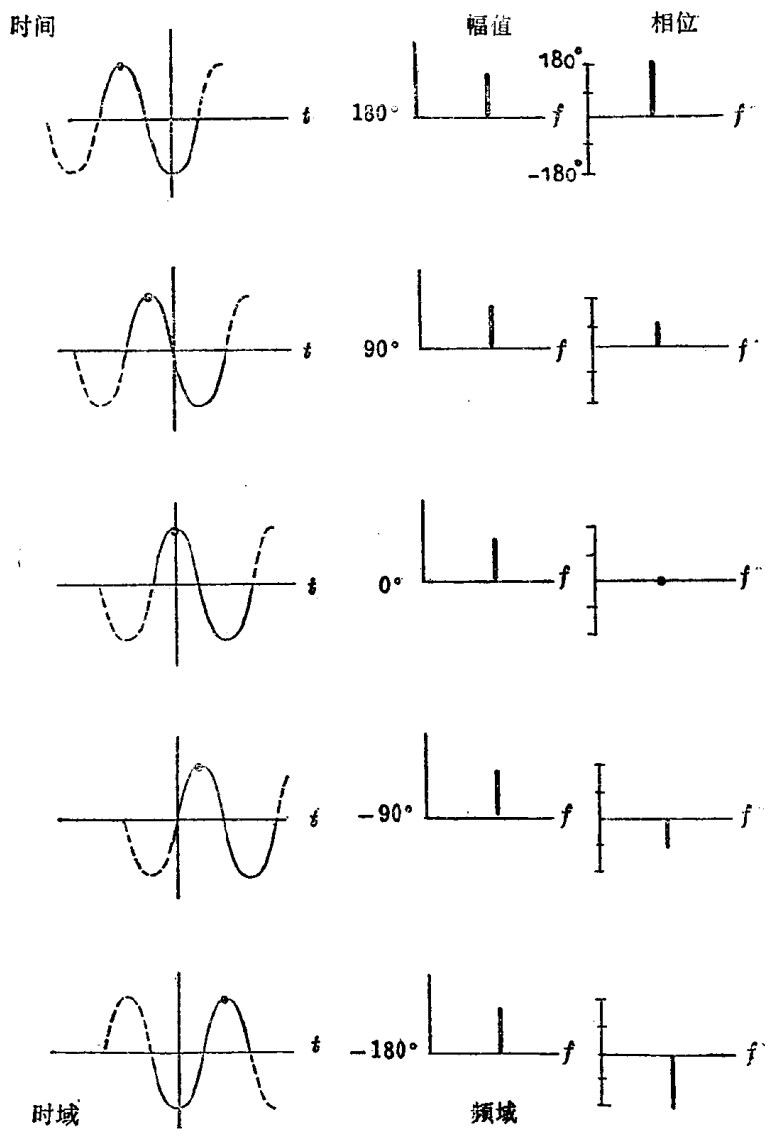


图 2 同一余弦信号在相位不同时的描述

图 2 左侧[24]是一组简谐振动信号，它们的振幅和频率都相同，分别为 A_0 和 f_0 ，而相位各不相同，依次为 180° ， 90° ， 0° ， -90° 和 -180° 。当相位由 180° 经 0° 变到 -180° 时，振动信号在时间坐标轴上刚好移过一个周期。由于余弦信号的周期性，相位的变化范围只能在 -180° 到 180° 之间。这种在时间坐标轴上表示振动信号的方法叫做时域方法。图上的曲线称为振动的波形曲线。因此，时域方法是直观地描述振动的方法。

现在，我们换一下思考问题的角度，用另一种方法来表示刚才的简谐振动。首先，用频率 f 为横坐标，振幅 A 为纵坐标，构成频率-幅值直角坐标系；以坐标 (f_0, A_0) 表示简谐振动的频率是 f_0 ，幅值是 A_0 ；同时，再构造一个频率-相位直角坐标系，以坐标 (f_0, φ_0) 表示具有频率 f_0 的简谐振动的相位为 φ_0 。这样，在图 2 的右侧就列举了两种谱图：幅值谱和相位谱。由于这组简谐振动信号的幅值相同，因此各个幅值谱相同；只有相位谱中的相位各不相同。这种在频率坐标轴上表示振动的方法称为频域方法。虽然在频域中没有直观地将振动的波形表示出来，但幅值谱和相位谱同样唯一地确定了一个简谐振动的三个要素。以后将会看到，由于引入了频域方法，对振动信号的分析能力也极大地提高了。

实际的机械振动是由许多因素综合作用的结果，所以一般都不是简谐振动，波形要复杂的多。如果在一个三维坐标系中，以幅值、时间和频率作为坐标，显然幅值-时间曲线就是时域波形，而幅值-频率平面就构成幅值谱，如图 3 所示。在图 3 中，时域波形是由两个正弦曲线合成的，它们的