

基于振动工程相位检测的故障诊断方法研究*

周有平¹, 罗中良¹, 郑辑光², 刘小勇²

(1. 佛山科学技术学院理学院, 广东 佛山 528000;

2. 西安交通大学自动控制系, 陕西 西安 710049)

摘要: 对故障诊断中涉及到的相位概念和相位分析的基本思想进行了阐述, 指出全息谱相位分析的合理性及其适用场合; 结合工程实践, 对基于机壳振动信号的相位分析相关问题进行了研究, 提出工程相位的概念, 设计了光电传感器对其检测方法, 并重点对转子质量不平衡故障的相位诊断原理进行了研究; 将相位分析成功应用于全息谱技术无法应用的基于机壳振动信号的分析, 具有一定的实用性和推广价值。

关键词: 相位分析; 不平衡; 全息谱; 故障诊断

中图分类号: TH165 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2009)02-0045-05

Research on Phase Analysis in Fault Diagnosis

ZHOU Youping¹, LUO Zhongliang¹, ZHENG Jiguang², LIU Xiaoyong²

(1. School of Science, Foshan University, Foshan 528000, China;

2. Department of Automatic Control, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Application of phase analysis in fault diagnosis is researched, and the rationality of phase analysis with holospectral and its suitable situation are pointed out. Through project practice, phase analysis based on vibration signal of machine shell has been studied, the concept of engineering-phase is defined. Its detection principle and methods based on photoelectric phase sensor is introduced, and the phase analysis principle of un-balance of rotor is described. Finally phase analysis is successfully applied to vibration signal of machine shell which the holospectral is not suitable for. The practice application shows it is utility and effective.

Key words: phase analysis; un-balance; holospectral; fault diagnosis

多年来进行振动故障诊断, 多从信号的时、频、幅域进行分析, 相位分析较少。自屈梁生院士首创全息谱技术^[1-3], 将信号的幅、频、相域信息组合起来进行分析, 相位分析才逐步受到人们的重视, 但基于全息谱技术的信号要同时进行测量, 所以一般都是在机器内部轴承座水平和垂直方向成90°安装两个非接触式电涡流传感器, 其测的是轴的相对振动信号^[4-6]。由于在机器内部每个测点都要安装传感器, 所以其一般运用在对大型设备进行状态监测与故障诊断的场合, 对于众多的中小型设备运用此类测量方法是不经济也不现实的^[7-10],

如一个几千元的小型发电机仅测前后两个轴承的振动, 最少也要装4个传感器, 其成本远远大于设备本身, 这与对设备进行状态监测的宗旨最大限度的降低企业的设备维护费用是相悖的。

在工程实际中, 对中小型设备进行状态监测一般是测其机壳绝对振动^[4,11], 传感器多用带磁座的压电式传感器, 这种测量方法的优点是传感器可以重复使用, 仅用一两个传感器便可以对所有设备进行状态监测, 但其必须测完一点再进行下一点的测量, 无法做到信号的同步测量, 所以全息谱技术对于此类方法测得的信号是不适用的^[7,12]。但工程事

* 收稿日期: 2008-10-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60605009); 佛山科学技术学院校级科研项目

作者简介: 周有平(1972年生), 男, 实验师; E-mail: zypfs@21cn.com

实表明, 仅靠频谱分析进行故障诊断是远远不够的, 很多不同故障类型频谱可能完全一样, 仅靠频谱分析无法区分^[2-5,12]。鉴于此, 本文结合工程实践, 对全息谱相位分析的合理性进行了理论说明, 并首次对基于机壳振动信号的相位分析相关问题进行了研究, 针对性提出工程相位的概念, 设计了基于光电相位传感器实施检测原理和方法, 并将相位分析成功应用于全息谱技术无法应用的基于机壳振动信号的分析, 重点对转子质量不平衡故障的相位诊断原理进行了研究。

1 工程相位的概念与检测方法

1.1 一般相位差的概念

在故障诊断中, 不单纯研究单一信号的相位而是相位差。研究相位差的两振动信号要保证是同时产生的, 在理论研究中都是假定从振动发生时就开始计时测量, 这在实际工程中是难以做到, 实际中所获得的信号都是以测量时刻为起点计时的。

设有两工程振动信号 $x = A_1 \sin(2\pi f_1 t_1 + \varphi_1)$, $y = A_2 \sin(2\pi f_2 t_2 + \varphi_2)$, 式中 t_1 、 t_2 都是以测量时刻为起点, φ_1 、 φ_2 分别表示测量时对应的初相。

则两者的相位差:

$$\Delta\varphi = 2\pi(f_1 t_1 - f_2 t_2) + (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (1)$$

1) 仅当 $f_1 = f_2$, 即两信号频率相同时, 相位差:

$$\Delta\varphi = 2\pi f(t - t_2) + (\varphi_1 - \varphi_2)$$

2) 仅当 $t_1 = t_2$, 即两信号同步测量时, 相位差:

$$\Delta\varphi = 2\pi(f_1 - f_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)$$

3) 当 $f_1 = f_2$ 且 $t_1 = t_2$, 即两信号频率相同且同步测量时, 相位差:

$$\Delta\varphi = (\varphi_1 - \varphi_2)$$

这里需说明的是, 虽然以上讨论相位差的信号都不是从振动发生时计时的, 其初相并不是振动发生时对应的初相, 但其相位差和理论假定从振动发生时就开始计时, 对于同频信号相位差等于振动初相差的结果是一致的。这点很重要, 因为故障的相位诊断原理本质上就是依据不同的故障其频率可能相同, 但其振动发生时的初相差一般不同而诊断的。

从以上讨论可以看出, 只有两振动信号频率相同且同步测量时, 其相位差才与时间、频率等因素无关, 等于它们的初相差。这也就是全息谱相位分析的合理性及利用全息谱技术时信号必须同步测量的理论根据。

1.2 工程相位的概念

说明: 为了和一般概念上的相位加以区分, 将下文所讲的相位命名为工程相位。

工程相位: 它实质是相位差, 但不同于上文所讲两正弦信号间相位差的概念, 是指基频(转子转速频率)信号波形上某特殊点相对于转轴上某一确定相位标志信号 O 之间的相位差, 即从产生相位标志信号到第一次出现波形特殊点所经过的相位角。因此, 工程相位相当于将标志信号对应点作为相位 0 点, 对应特殊点在波形中对应的相位。实际工程中, 特殊点通常取正峰点 P , 如图 1 所示。

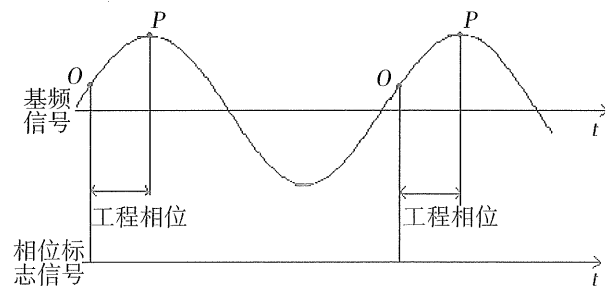


图 1 工程相位概念示意图

Fig. 1 Engineering-concept diagram

通过图 1 可以看出, 对于一信号的工程相位检测可不同步测量, 即解决了同步测量问题。同时, 工程相位具有现实合理性, 虽然这一定义下获得的信号相位概念不是通常概念上的相位, 但故障诊断中两路信号其工程相位的差值和振动初相差是一致的, 所以应用它们相位的差值进行故障诊断同样是合理的。另外, 通过不同步测量的两路信号的工程相位差与原同步测量的相位差一致性, 可以将传统 FFT 分析法应用于不同步测量的机壳振动信号故障诊断。

通过工程相位的定义可以得到其检测只与相位标志信号在基频信号对应的位置有关, 与测量时刻无关, 这样就打破了以往获得相位都要同步测量的概念, 使不同时刻测量的信号相位都具有可比性, 克服了同步测量在中小型设备状态监测中的不经济性。

1.3 工程相位的检测方法

传统对工程相位的检测多是在被测轴上设置凸键或凹槽作为相位标志, 通过电涡流相位传感器进行检测。这样相位传感器要固定在轴附近, 且对槽的尺寸和传感器的安装有很高的要求, 这既不方便也不安全, 更何况现场设备在轴上设置凸键或凹槽

不容易且这样多少会改变轴的质量分布，造成质量不平衡。结合工程实践，作者用光电相位传感器进行相位标志信号的检测，只需在转轴上贴一光标，且相位传感器可放在地面上离轴较远的任何位置，只需将激光红点瞄准光标所在轴圈区域内，既方便又安全，如图 2 所示。首先在转轴上贴一光标，压电式测振传感器放于机壳测点位置，光电相位传感器放于地面并调整使其激光红点位于光标所在轴圈区域内（图中虚线所示），轴每转一圈光标便和激光红点重合一次产生脉冲信号并通过光电相位传感器检测得到，同时转子基频振动信号通过测振传感器获得，两者通过数采器进行处理比较，便可得到此测点工频信号的工程相位。实践中虽刚开始时相位传感器的激光红点可放入光标所在轴圈区域内的任何位置，但当确定下来后在整个测点的测量过程中要确保激光红点的位置固定不动，光标的位置也不能变动，不然测出的相位就毫无意义。

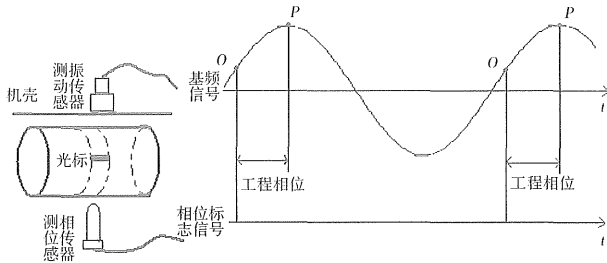


图 2 工程相位检测示意图

Fig. 2 Schematic diagram of engineering-phase detected

2 故障相位诊断原理

下面以转子质量不平衡故障的相位诊断为例说明采用工程相位进行诊断的原理，对应基础弱的诊断原理类似。假设坐标系和转子初态如图 3 所示，转子转动方向为逆时针，则当转子以 ω 为角频率转动时不平衡质量 m 引起的离心力便使整个转子系统作周期性强迫振动，其在水平（图中 x 轴）和垂直（图中 y 轴）方向相当于作周期性简谐振动，由简谐振动力和位移的关系知同一测点其在水平和垂直方向的振动信号（假设振动发生时就开始测量）。

从图 3 可以看出，两信号频率相同，都为工频（ $\omega/2\pi$ ），但初相不同，水平方向振动初相为 90° ，垂直方向振动初相为 0° ，初相差为 90° ，这就是同一测点水平和垂直方向振动信号频率为工频但相位差 90° 诊断为转子质量不平衡故障的理论根据。

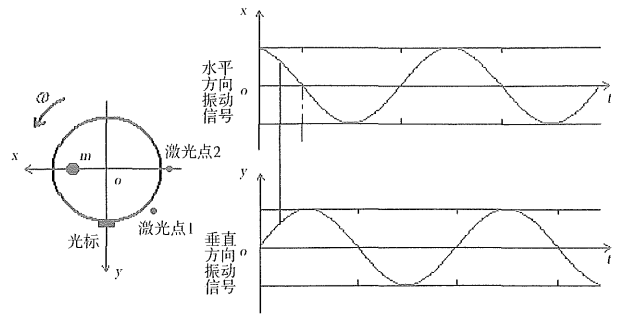


图 3 不平衡故障相位诊断原理图

Fig. 3 Phase imbalance fault diagnosis schematic

虽然实际工作中测到的信号一般都不可能是振动发生时就开始的，但从图 3 可以看出，两信号在每一时刻的相位差都等于其振动初相差 90° ，基于轴振动信号的全息谱技术对两信号相位差的获得正是巧妙应用这一特点，对同一测点水平和垂直两信号进行同时测量，然后应用 FFT 变换得出测量时对应的相位差，其在数值上和振动初相差是一致的^[3]。

基于机壳振动信号相位的概念和获取方法和基于轴振动信号的全息谱技术是不同的。假设光标位于转轴图示位置，光电相位传感器激光红点位于点 1，当光标和激光点 1 重合产生脉冲相位信号时，其在基频信号中的对应位置如图中实线所示，水平信号到第一次出现波峰共经历 315° ，垂直信号到第一次出现波峰共经历 45° ，所以其公称相位分别为 315° 和 45° ，两信号的工程相位差值为 $45^\circ + (360^\circ - 315^\circ) = 90^\circ$ ，也等于振动初相差。可以得到水平和垂直信号并非同时测量，但只要相位标志和相位传感器激光点为图示状态，则不论何时测量相位标志信号在基频信号中的对应位置都是图示结果。但当在测量过程中激光点位置有所变化，如测垂直信号时激光点位于点 1，而测水平信号时激光点位于点 2，则相位标志信号在基频信号中的位置将发生变化，如图中虚线所示，这时测得的水平工程相位为 270° ，垂直工程相位仍为 45° ，工程相位差 $45^\circ + (360^\circ - 270^\circ) = 135^\circ$ ，并非振动初相差。同样在测量过程中光标的位置变动也会引起相位标志信号在基频信号中的位置变化，所以为了使各测点相位具有可比性，光标在转轴上的位置和相位激光红点的位置都不能变动。

3 工程相位分析的实例

相位分析在作者的工程中已成功得到应用，诊断案例多起，解决了长期以来基于机壳振动信号诊

断仅靠频谱分析无法确诊故障的难题,下面通过实例进行分析说明。

某矿某机组机头结构简图如图4所示。整个机组由一台额定功率45 kW,转速为1 500 r/min的电机通过液力耦合器驱动减速器组成,固定在由水泥地板和钢板支架做成的专用刚性基础上。在机组运行过程中,矿方通过简易诊断系统检测到此机组振动偏大,要求我们对其进行精密诊断。开始我们仅进行了频谱测量,分析发现各测点都主要为1 500 r/min的工频,按经验这主要是基础弱或质量不平衡故障引起,但无法确诊究竟是哪类故障,为此对整个机组再次进行了相位测量。限于篇幅,这里仅给出部分重要数据(见表1)和简要分析过程。

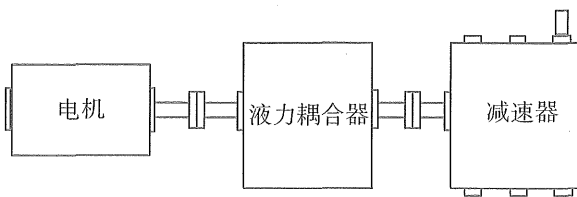


图4 机组机头结构俯视简图

Fig. 4 The engine structure over look schematic of the units

表1 测量的部分数据

Table 1 Part of the actual measurement data

测点位置	测量方向	振动总量(有效值 mm/s)及相位	
		第一次	第二次
电机输出端	水平	7.9	8.5/323
电机输出端	垂直	4.4	3.5/30
液力耦合器输入轴	水平	12.8	14.8/106
液力耦合器输入轴	垂直	5	4.4/129
液力耦合器输出轴	水平	13.1	12.4/127
液力耦合器输出轴	垂直	5	5/143
基础架振动最强点	垂直	5.3	6.1/116

从两次测量数据看,各测点振值均是水平大于垂直,且液力耦合器振值最大,其次为电机,分析其频谱,几乎都是1 500 r/min的工频成分(图略),但其相位特征是电机同测点水平和垂直方向相位差90°左右,液力耦合器同测点水平垂直方向相位几乎相同;同时整个机组基础各部分垂直方向相位和液力耦合器各测点相位几乎相同。

根据相关相位诊断原理得出,液力耦合器振动偏大主要是因为基础偏弱引起,导致基础与其共同振动,而电机振动偏大则主要是其本身质量不平衡所致。实践验证,诊断是完全正确的。同时作者实

践中发现由于测量误差等因素影响,不平衡故障的相位差并非严格为90°,基础弱故障相位差也并非严格的为0或180°,均有30°范围的误差。

4 结论

本文主要对基于机壳振动信号相位分析涉及到的相位的概念和检测原理与方法进行了阐述,对转子质量不平衡的相位诊断原理进行了研究,结合工程实践,将相位分析成功应用于全息谱技术无法应用的基于机壳振动信号的分析,并从一般相位差的概念出发,指出基于轴振动信号的全息谱技术相位分析的合理性,但两者并不是矛盾对立的,只是适用的场合不同而已。基于轴振动信号的全息谱技术更适用于大型设备,而基于机壳振动信号的分析更适用于中小型设备,它们各自对相位的概念和获取方法虽然不同,但其最终得出的都是两信号间的振动相位差,从相位进行分析诊断的原理都是一致的,所以两者只是形式上的差别,本质是相同的。两者相辅相成,共同推动设备故障诊断技术在工程中的应用。

参考文献:

- [1] 屈梁生,史东锋. 全息谱十年:回顾与展望[J]. 振动、测试与诊断,1998,18(4):235-242.
QU Liangsheng, SHI Dongfeng. Hologram during the past decade: review & prospect[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 1998, 18(4): 235-242.
- [2] 屈梁生,邱海,徐光华. 全息动平衡技术:原理与实践[J]. 中国机械工程,1998,9(1):60-63.
QU Liangsheng, QIU Hai, XU Guanghua. Rotor balancing based on hologram analysis: principle and practice[J]. China Mechanical Engineering, 1998, 9(1): 60-63.
- [3] 刘石,屈梁生. 回转机械故障诊断中的三维全息谱技术[J]. 西安交通大学学报,2004,38(9):900-903.
LIU Shi, QU Liangsheng. Three-dimensional hologram in rotating machinery diagnosis[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(9): 900-903.
- [4] 刘石,屈梁生. 全息谱技术在现场动平衡前故障诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断,2004,6(4):188-192.
LIU Shi, QU Liangsheng. Fault diagnosis prior the field balancing based on hologram[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2004, 6(4): 188-192.
- [5] 李力,屈梁生. 谱相关特性在机械信号特征提取中的应用研究[J]. 中国机械工程,2006,17(4):334-338.

(下转第53页)

- WANG Haining, SU Jianwei, DING Ming, et al. Photovoltaic grid connected power conditioner system [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(2): 75 - 79.
- [3] 张国荣, 张铁良, 丁明, 等. 光伏并网发电与有源电力滤波器的统一控制 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(8): 61 - 66.
- ZHANG Guorong, ZHANG Tieliang, DING Ming, et al. Combined control of active power filter and pv grid connected generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(8): 61 - 66.
- [4] 韩京清. 从PID技术到“自抗扰控制”技术 [J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13 - 18.
- HAN Jingqing. From PID technique to active disturbances rejection control technique [J]. Control Engineering of China, 2002, 9(3): 13 - 18.
- [5] 雷元超, 陈春根, 沈骏. 光伏电源最大功率点跟踪控制方法研究 [J]. 电工电能新技术, 2004, 23(3): 76 - 80.
- LEI Yuanchao, CHEN Chungeng, SHEN Jun, et al. Research on control method of maximum power point tracking for photovoltaic power system [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2004, 23(3): 76 - 80.
- [6] 韩京清. 自抗扰控制技术 [J]. 前沿科学, 2007(1): 24 - 31.
- HAN Jingqing. Auto disturbances rejection control technique [J]. Frontier Science, 2007(1): 24 - 31.
- [7] 张淼, 吴捷. 基于自抗扰技术的光伏发电并网控制系统 [J]. 控制理论与应用, 2005, 22(4): 583 - 587.
- ZHANG Miao, WU Jie. Control system of renewable energy connected grid based on the auto-disturbances rejection control technology [J]. Control Theory & Applications, 2005, 22(4): 583 - 587.
- [8] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽. 带有MPPT功能的光伏阵列Matlab通用仿真模型 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1248 - 1251.
- MAO Meiqin, YU Shijie, SU Jianhui. Versatile matlab simulation model for photovoltaic array with MPPT function [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(5): 1248 - 1251.
- [9] 赵为. 太阳能光伏并网发电系统的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.
- [10] 汪进进. 光伏并网控制方法和系统的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2002.
- [11] MEKHILEF S, AHMED M E, YOUNIS M A A. Performance of grid connected photovoltaic inverter with maximum power point tracker and power factor control [J]. IEEE, 2008(s): 1129 - 1134.
- [12] RAHIM N A, MEKHILEF S. Implementation of three-phase grid connected inverter for photovoltaic solar power generation system [J]. IEEE, 2002, 1(s): 570 - 573.

(上接第48页)

- LI Li, QU Liangsheng. Spectral correlation in mechanical signal feature extraction [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(4): 334 - 338.
- [6] 蔡亦鸣. 煤矿机械设备的使用维修和故障诊断 [J]. 煤炭技术, 2008, 21(11): 17 - 19.
- CAI Yi ming. Use of maintenance and fault diagnosis of coal mine mechanical device [J]. Coal Technology, 2008, 21(11): 17 - 19.
- [7] ZHANG S, MATHEW J, MA L. Best basis-based intelligent machine fault diagnosis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(2): 357 - 370.
- [8] CHEN Changzheng, MO Changtao. A method for intelligent fault diagnosis of rotating machinery [J]. Digital Signal Processing, 2004, 14(3): 203 - 217.
- [9] BAI Mingsian, HUANG Jiamin, HONG Minghong. Fault diagnosis of rotating machinery using an intelligent order tracking system [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 280(325): 699 - 718.
- [10] 周龙才, 李娟, 娄红. 基于小波分析的水泵机组振动故障诊断 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2008, 41(5): 23 - 25.
- ZHOU Longcai, LI Juan, LOU Hong. Vibration fault diagnosis of pump unit based on wavelet analysis [J]. Journal of Wuhan University, 2008, 41(5): 23 - 25.
- [11] 张正松. 旋转机械故障监测及故障诊断 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991: 429 - 444.
- [12] 盛兆顺, 尹琦岭. 设备状态监测与故障诊断技术及应用 [M]. 北京: 工业装备与信息工业出版中心, 2003.