

# 风筒振动监测与瞬时气隙扭矩监测在轴流风机预测维修效果上的对比

韦伯格 博士

贝克仪器公司

摘要：轴流风机在核工业场合应用比较广泛。由于风机的失效，可以导致非计划减产，影响设备的健康及安全以及造成相关设备的损坏等。常用的监测手段，如在轴承座上监测振动，已经不能应用于轴流式风机的监测上，这是因为风机及电机等设备是安装在风筒内的。本文给出了在可控制的实验室环境中用不同的方法对风机的监测结果：一种方法是将加速度传感器连接在风筒外侧（风机与风筒的安装连接处），另一种方法是观察用 Park 向量理论计算出的瞬时气隙扭矩变化情况，然后对比原始状态下及风机故障状态下信号中的频率分量。用该两种测试方法分别对不平衡载荷和轴承外环故障进行诊断。观测结果显示，在不久的将来有望改变此种形式设备的预测维修手段。

关键词：电机诊断，轴承故障，不平衡，轴流风机

## 1. 概述

检测设备的故障形式、合理地安排维修是预测维修理念的根本目的。安全、健康和低运行成本是靠早发现载荷能力下降，并在机组发生彻底破坏前有时间维修来保证的。

轴流风机比离心式风机具有更高的压力和流量来供气或排气，因此在核电工业应用广泛。风机的典型安装方式是水平或垂直安装于气流内，一端通过扩散器与风筒相连，另一端通过支撑板或支撑杆与风筒相连，如图 1 所示。

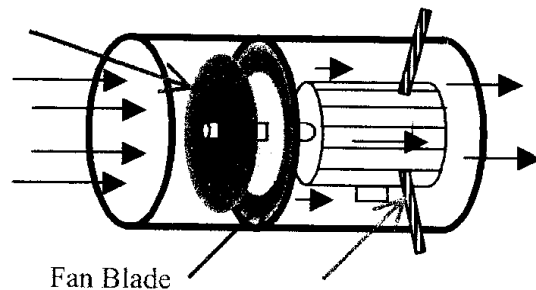


图 1 水平轴流风机

通常来说，检测滚动轴承失效的标准方法是在轴承座或轴承的承载区安装加速度传感器，通过采集到的振动信号进行分析。而安装在

风筒内的轴流风机则不适合用这种方式监测电机状况及风机的旋转状况。现场中最近的能够安放加速度传感器的点只能是风筒的外侧，因此如何评估安装在风筒外的加速度传感器所采集到的信号，也是本文所要观测内容的一部分。

Casada<sup>[1]</sup>提出了一种新的监测概念，即将感应电机本身作为其驱动设备的传感器来监测机组的运行状况。自 1996 年以来，电流分析及功率分析已经用于电动阀（MOV）的监测中。Riley<sup>[2]</sup>发现电机振动的频域数据被静子电流所调制。瞬时扭矩信号（ITS）是自然解调的（它可以根据 Park 的向量理论<sup>[3]</sup>来计算），已经用于一家化石加工厂进行预测维修，通过分析其时域波形信号进行分析诊断。

本文的第二个目的是确定 ITS 用于轴流风机诊断时的参考值。ITS 已经变换成频域的扭矩频谱信号。文中给出了风机原始状态的测量与故障发生后的测量比较分析结果。在本文中所研究的是两种情况的故障：机械载荷的不平衡和轴承的外环故障。

## 2. 实验室设置

### A 测试设备及设置

本实验中所用的设备为 Baldor 5 马力的 4 极电机，Aerovent 制造的 24 英寸风机。同种型式的风机应用在科曼奇峰电站中，用于电气控制大楼的排气。选择此种风机作为实验研究的原因在于其内部支撑系统中有较长的传输路径，即电机的轴承与风筒的连接杆较长。这样的结构可能衰减轴承的振动信号，以至于影响从风筒外侧测量所得的测试分析结果。图 2 给出了测试中所用的风机照片。



图 2 24 英寸轴流风机

为了确保测试中测量结果的正确性，实验中采用了多个系统同时监测的方法，从而可以相互验证。所用的测试系统有：Cognitive 系统的 CV395B 频谱分析仪，本特利公司的 208P 多通道振动分析仪，SWANTECH 公司的振动分析系统。其它的测试设备包括，空气流量表、加速度传感器、激光转速表、电流计、热电偶、万用表及湿度表等。

## B 检测仪器

振动信号的采集是用 100mv/g 的 ICP 型加速度传感器完成的，安装在风筒的外侧，如图 3、图 4 所示。另外还有一组 4 个加速度传感器安装在电机上，只是用来确定电机的不平衡程度及人为制造的故障程度。电机上安装传感器会对现场风机的运行造成影响，因此实际上是不安装传感器的，所以这里就不对测试结果进行评估。

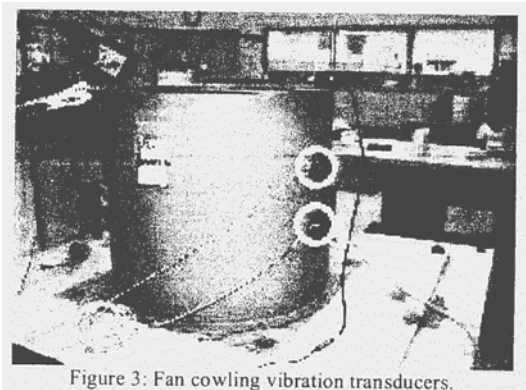


图 3 风筒外侧安装的加速度传感器

对预测维修程序来讲，能够方便有效地使用仪器是很关键的。如果所有的关键载荷都需要监测的话，安装扭矩传感器将是非常昂贵的花销。本文中我们所用的评估 ITS 工具是贝克仪器公司的电机探测者 II 系统。该系统用三个电流钳式传感器来监测电机的电流，同时将另外 3 个电压夹连接到端子上进行电压测量。这些传感器被安全地连接

到信号处理单元，由该单元进行数据的采集、分析处理及结果显示。该系统既可以在 MCC 操作，也可以直接与低压电机相连，或者对于大于 600 伏电压的电机，可以通过 PT 和 CT 的二次回路进行数据采集。

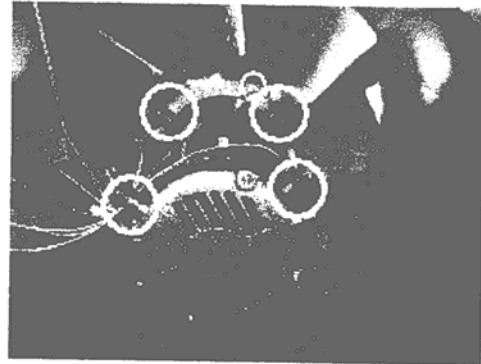


图 4 电机轴承座上安装的传感器

用来计算气隙扭矩的公式是标准  $dq$  公式，在文献<sup>[3]</sup>中有详细的描述。其计算结果为瞬时扭矩信号。上面提到的两种故障都是在频域内进行诊断的。计算出 ITS 频谱以后，就可以将这些扭矩信号的频率分量与振动频率分量进行比较。图 5 给出的是利用 ITS 工具获得的频谱信息。

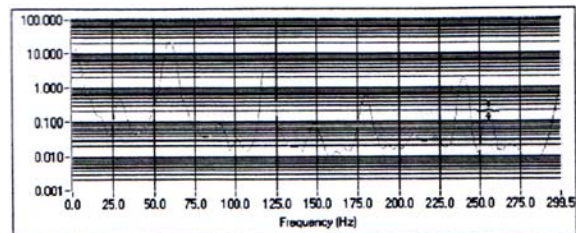


图 5 扭矩频谱 (Nm) 对频率 (Hz)

### 3. 测试协议

测试分成 3 个部分，每个部分都从两组不同的传感器中获取数据。第一步，从已经平衡并对中良好的风机上采集数据；第二步，人为地将风机调整至不平衡状态，然后采集数据；第三步，更换一只已有故障的轴承，调整机组为平衡状态，采集数据。在以上三种工况下，都是同时采集电机的电气数据和风筒的振动数据。

#### A 不平衡测试

在距风机中心 2 英寸的调整螺栓上引入 7.6 克的不平衡质量，从而产生 0.54 盎司英寸的不平衡量，使电机自由端轴承的振动达到不平衡前的 2 倍 (IPS)。图 6 所示的风机主视图中给出了不平衡加重的位置：平衡重量是加在右下角的螺栓上，而不平衡重量是加在上方的螺栓上，这些风机的螺栓是按 120 度轴向均布的。

通常用 1X 转速振动幅值（转速基频）来监测机器的不平衡量的增加。因此这个频率范围的振动是实验中所感兴趣的频段，我们要同时考查上面提到的两组传感器的监测结果：风筒外侧安装的加速度传感器和在 MCC 所做的 ITS 测量。

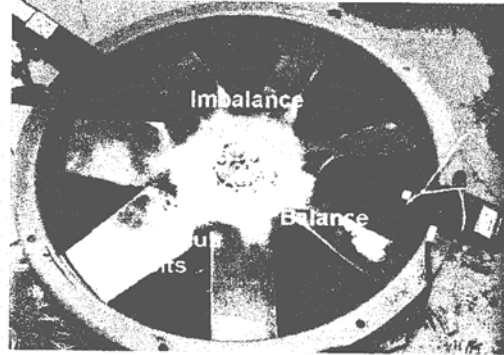


图 6 风机，连接螺栓，平衡重量及 7.6 克的不平衡重量

#### B 轴承外环故障

将一只外环有故障的轴承套装在靠近风机端的电机轴上，该轴承的外环上有长 12.7mm，宽 1.6mm，深 1.6mm 的刻痕。如图 7 所示，图中给出的是完成实验后切开的轴承外环。

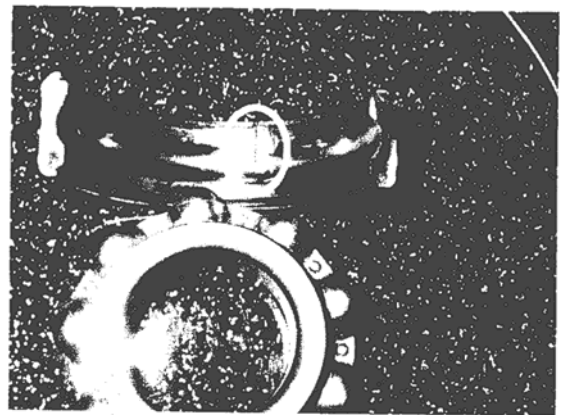


图 7 SKF 6503 深槽轴承

轴承外环的刻痕会产生以下的故障频率，如式 (1)

$$BPFO = \frac{n}{2} f \left( 1 - \frac{Bd}{Pd} \cos \beta \right) \quad (1)$$

式中 BPFO 为外环故障频率 (Ball Pass Frequency Outer race),  $n$  为轴承中滚动体的数目,  $f$  为旋转速度 (Hz),  $Bd$  为滚动体的直径,  $Pd$  为滚道直径 (内环与外环的平均直径),  $\beta$  为接触角。本实验中轴承的 BPFO 计算值为 107Hz, 这也是用两组传感器测量时所感兴趣的频率分量。

### C 统计计算

根据性能测试的特点以及用加速度传感器采集数据时测量条件变化等, 很有必要对测试结果进行统计计算。我们采用的统计方法是单侧  $t$  检验, 有关本实验所有的统计方法及背景已在文献<sup>[6, 7]</sup>中有详细的解释。最小采样数, 作为标准偏差及测量指数的函数, 可由式 (2) 进行计算

$$N_{pairs} = (U_{\alpha} + U_{\beta})^2 \frac{\sigma_{diff}^2}{\delta_{diff}^2} \quad (2)$$

式中  $N_{pairs}$  为测试的组数,  $U_{\alpha}$  和  $U_{\beta}$  是指与 1 类误差、2 类误差相关的标准偏差,  $\sigma_{diff}^2$  和  $\delta_{diff}^2$  是两种方法的偏差, 从工程角度来讲, 这是非常重要的。在工业上,  $\alpha$  和  $\beta$  值一般分别选择为 0.05 和 0.10。这意味着根据零假设理论, 1 类误差的可能性

是小于 5% 的, 由此可以转换成大于 95% 的测试性能指数。对于 2 类误差, 其可能性小于 10%, 意味着备择假设不被接受 (而实际上应该被接受)。

测试组数的最小计算值为 8.6, 实际测试时的测试组数应大于此数, 所以本实验中选取 11。

该性能统计计算是为了找出数据的比较结果是否能够显示出两组数据统计上的差异。为此, 采用以下的比较案:

- a) 比较风机原始状态下与机械不平衡时 1X 转速的频率分量
- b) 比较风机原始状态下与轴承外环有刻痕时 107Hz 频率分量

在这两种情况下分别对安装在风筒外侧加速度传感器采集的数据和用 ITS 方法从 MCC 得到的数据进行比较。另外, 用安装在电机上的加速度传感器进行测试前原始状态标准偏差估计, 同时也用该传感器来验证人为故障对风机的影响程度。

## 4. 结果

### A 不平衡对原始状态, 由轴承座测量

该实验用来考查引入的机械不平衡是否会改变轴承座上安装的加速度传感器所测振动分量的幅值。由此确定人为引入故障对振动产生

了影响，并以此计算出用于测试分析所设置的标准偏差。我们感兴趣的频率分量为 1X 转速分量，用电压（伏）表示。

表 I: 不平衡对原始状态，轴承座测量

次序	原始状态 1X	不平衡 1X
1	0.000835219	0.001401683
2	0.000901405	0.001448703
3	0.000902928	0.001451159
4	0.000923814	0.001451159
5	0.000973325	0.001495948
6	0.000925900	0.001450340
7	0.000925378	0.001402474
8	0.000924857	0.001451159
9	0.000948282	0.001404057
10	0.000924857	0.001451977
11	0.000924857	0.001403266

表 I 中是一组用于统计计算的原始数据的例子。不平衡状态与原始状态的比较是非常重要的，它能够显示出 1X 转速频率分量处两种状态下的统计偏差。其它两种传感器的测量结果比较用来确定是否这两种传感器能够监测到机组振动上的差异。

下面的计算结果是按照文献<sup>[6, 7]</sup>中描述的统计计算方法完成的，用 WINKS 4.65 软件包进行计算。

测试结果统计如下：原始状态所测得的数据中，有%99 以上的数据是在 0.00089 至 0.00095 之间，其中值为 0.00092，标准偏差为 1E-4。在不平衡状态下，有%99 以上的数

据是在 0.00141 至 0.00147 之间，其中值为 0.00145，标准偏差为 3E-5。用不平衡状态下的中值除以原始状态下的中值，我们可以得到一个与引入的不平衡有关的 1.58 倍的扩大系数，代表着 1X 转速分量的变化程度。

从上面的统计结果来看，零假设（假设两种测量的数据之间没有显著的差别） $P=0.001$ ，被否决，而备择假设（假设幅值上有明显的差别）被接受。

## B 不平衡对原始状态，由风筒外侧测量

该实验用来考查载荷不平衡所产生的影响是否会在风筒外侧安装的加速度传感器中反映出来，尤其是在 1X 转速频率分量上。

测试结果统计如下：原始状态所测得的数据中，有%99 以上的数据是在 0.0002871 至 0.0002873 之间，其标准偏差小于 1E-7。在不平衡状态下，有%99 以上的数据是在 0.0003062 至 0.0003064 之间，其标准偏差小于 1E-7。用不平衡状态下的中值除以原始状态下的中值，我们可以得到一个 1.067 倍的扩大系数。

从上面的统计结果来看，零假设（假设两种测量的数据之间没有显著的差别） $P=0.001$ ，被否决，而备择假设被接受。这就意味着可以

观测到风筒外侧测量的结果与原始状态的变化，但值得注意的是，由于人为不平衡处理后测得的结果只比原始状态增加了 6.7%，这在通常的现场测试中都可能被忽视。因此即使从统计学的角度上看，所测的两组数据有明显的差异，但对于实际应用中并不能作为一种预测维修用的结论，因为实际测量数据的增加量不是足够大。

### C 不平衡对原始状态，ITS 测量信号

该实验用来考查载荷不平衡所产生的影响是否会在 MCC 上测量的 ITS 信号中反映出来，尤其是在 1X 转速频率分量上。

测试结果统计如下：原始状态所测得的数据中，有 %99 以上的数据是在 0.00013 至 0.000139 之间，其标准偏差小于 4E-5。在不平衡状态下，有 %99 以上的数据是在 0.0196 至 0.0209 之间，其标准偏差小于 6E-4。用不平衡状态下的中值除以原始状态下的中值，我们可以得到 150 倍或 40dB 的增益，这么大的增益表明该测试方法是对预测维修是非常有用的。

从上面的统计结果来看，零假设（假设两种测量的数据之间没有显著的差别） $P < 0.001$ ，被否决，而备择假设（假设幅值上有明显的差别）被接受。这意味着两种状态下所测的结果存在明显的差异。

### D BPOR 对原始状态，由风筒外侧测量

该实验用来考查外环上有刻痕的轴承所产生的故障频率是否会在风筒外侧安装的加速度传感器中反映出来，特别是在 107Hz 处（轴承的 BPFO）的频率分量处是否会产生幅值的变化。

测试结果表明，零假设被接受，即在原始状态下测得的幅值与轴承外环故障时测得的幅值没有明显的差别。这意味着安装在风筒外侧的加速度传感器不适合于对轴承故障进行监测。

### E BPOR 对原始状态，ITS 测量信号

该实验用来考查是否可以从 ITS 信号中监测到轴承的外环故障。

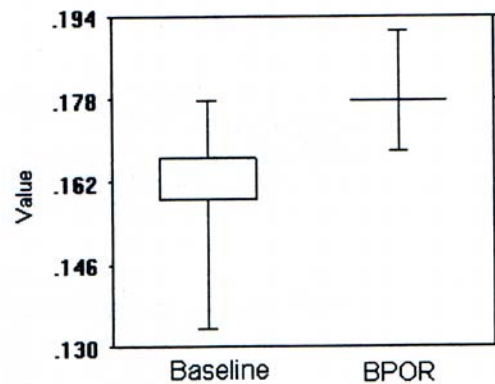


图 8 盒须图：原始状态、轴承故障状态

测试结果统计如下：原始状态下的 ITS 的平均值为 0.159，而当轴承外环有故障时所测得的 ITS 信号的平均值为 0.178，增益为 12%，其标准偏差分别为 0.014 和 0.007。图 8 为两种监测结果的盒须图，从图中可以看出，最低的 BPOR 值低于最高的原始状态测量值。另外还可以看出在 BPOR 状态下主要测量值（在 25%与 75%之间）的幅值与原始状态下测量值的最大值是非常接近的。从图中测量数据的分布性可以看出统计估算的重要性，尤其判断是否可以把这种监测 BPOR 的方法作为预测维修手段使用时则显得更加重要。

从上面的统计结果来看，零假设被否决，而备择假设被接受。这意味着在两种状态下所测的结果存在统计上相关的差异。此测试中  $P=0.002$ 。

## 5. 结论

本文将一台典型的 5 马力 4-极电机拖动风机作为实验研究对象，探讨可能的预测维修方法。实验中的特殊之处则是电机安装在风筒的里面，用常规的振动监测方法无法将加速度传感器直接安装到电机的轴承处。实验中人为制造了两种故障，一种是风机的不平衡，另一种是轴承外环故障，并用两种不同形式的测试手段进行监测、评

估。第一套传感器是安装在风筒外侧的加速度传感器，对于这种“筒中风机”类的设备而言，这是现场振动监测时最接近的风机的测试位置。第二套传感器其实是一台与 MCC 相连接的仪器，它通过电机电流和电压的测试，来计算瞬时扭矩。在这两种测试中，主要是考查已知频率分量（代表着早期故障类型）数值的变化程度，频率分量分别为：代表着不平衡故障的 1X 转速分量及代表着轴承外环故障的 107Hz 分量。

表 II 测试结果汇总

	加速度传感器	ITS 信号
不平衡	可以观察到，很低的增益	可以观察到，很高的增益
轴承外环故障 (BPOR)	不能观察到	可以观察到，低增益

表 II 是测试结果的总结。从表中可以看出风筒外侧安装的加速度传感器不能够检测到轴承外环故障，而对于不平衡故障也只是在一定程度上可以检测到。这是因为在人为制造的很明显的的不平衡故障产生后，所测的幅值仅比原始状态高出 6.7%，这样的幅值变化不足以引起现场预测维修人员的注意。

ITS 信号对载荷不平衡有很强的识别能力，同时它还可以识别轴承

故障，但测量轴承故障时其增益只有 12%。虽然这样的幅值变化比理想的低，但是对于趋势分析是很有用的（比如，每天都采集 ITS 信号）。到目前为止，这种方法是唯一的适合于这种类型机器的现场故障检测方法。

本文的测试结果表明，核电站中轴流风机的传统监测方法可以改变。以前，只能用安装在风筒外侧的加速度传感器监测风机振动（实验证明，这种测试方法不容易捕捉机组的故障），而现在，ITS 测试方式的出现，使其已经作为此类应用的首选，正成为为预测维修的标准测试手段。

## 6. 参考文献

[1] Donald A. Casada, 'Method and Apparatus for Monitoring Motor Operated Valve Motor output Torque and Power at Valve seating', United States Patent 5,483,841

[2] Caryn M.Riley, Brian K.Lin, Thomas G.Habertler, Randy R.Schoen, 'A Method for Sensorless On-Line Vibration Monitoring of Induction Machines', IEEE IAS Proceedings, 05\_1 New Orleans, 1997

[3] Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D.Sudhoff, 'Analysis of Electric Machinery', IEEE Press, New York, 1995

[4] E.Wiedenbrug, A.Ramme, E. Mattheson, A.von Jouanne, A.Wallace, 'Modern on-line testing of Induction Motors for Predictive Maintenance', IEEE 2001 Pulp and Paper Industry Technical Conference, Portland OR, pp. 163

[5] Arthur R Crawford, 'The simplified Handbook of Vibration Analysis', Volume one, Computational Systems Incorporated, 1992

[6] Douglas C.Montgomery, 'Design and Analysis of Experiments', John Wiley and Sons, fourth edition 1997. ISBN 0-471-15746-5

[7] Donald S. doan, 'Using Motor Electrical Signature Analysis to Determine the Mechanical Condition of Vane-Axial Fans'. Thesis presented to University of North Texas, 2002