

# 轴表面误差对转子动平衡精度的影响

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001) 刘占生 黄森林 唐炳照<sup>1)</sup>

**摘要:** 在利用电涡流非接触式位移传感器测量汽轮发电机组的轴振位移时, 测得的信号中含有因轴加工误差和轴表面缺陷形成的表面误差成份。直接用这些测量信号进行动平衡, 平衡精度将会降低, 甚至不能将转子平衡。本文根据转子的振动特点, 提出了消除轴表面误差的矢量相减法, 通过实验验证, 这种方法大大提高了动平衡的精度。

**关键词:** 汽轮发电机组; 振动; 表面缺陷; 误差信号; 动平衡

中图分类号: TK268. +1 文献标识码: A

## 1 前言

电涡流非接触式位移传感器与被测对象无直接的机械接触, 其精度及可靠性较高, 被广泛应用于汽轮发电机组的振动测量中。国际上考核汽轮发电机组振动是以轴振为标准<sup>[1-2]</sup>, 在我国, 300 MW 以上机组及核电机组振动考核指标中明确规定以轴振为标准。然而, 由于电涡流位移传感器测量的是传感器与转轴表面之间的间隙, 因此所测到的“轴振动”信号是实际的轴振信号与轴表面误差信号之和。由于误差信号将始终同步附加在测量信号中, 根据这些测量信号进行动平衡, 平衡精度会受到影响。本文根据转子的振动特点, 提出了在低速下估计转轴表面误差的主矢量的幅值和相位, 在平衡转速下加以补偿的方法, 以瓦振为衡量标准, 衡量本方法的平衡精度。通过比较, 说明本方法较传统方法的平衡精度高。

## 2 轴表面误差对动平衡精度的影响

如果转轴存在表面误差, 这个误差信号将同步附加在测量信号中, 它对正确测量轴振有影响, 从而对动平衡的精度产生影响。下面就这一信号对动平衡精度的影响进行分析。

若用  $N$  个校正量来校正  $M$  个测点的振动, 则校正量必须满足下面的方程式<sup>[3]</sup>:

$$\{A_i\} + [C_{ij}] \{W_j\} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中  $\{A_i\}$  …… 原始振动响应列阵

$[C_{ij}]$  …… 影响系数矩阵

$\{W_j\}$  …… 校正量列阵

各量均为矢量。设轴表面误差的主矢量为  $\{E_i\}$ , 则测量的原始“振动”信号为实际振动信号  $\{A_i\}$  与误差主矢量  $\{E_i\}$  之和  $\{A_i + E_i\}$ 。设此时的校正量为  $\{W'_j\}$ , 则

$$\{A_i + E_i\} + [C_{ij}] \{W'_j\} = 0 \quad (2)$$

可以计算出真正校正量  $\{E_i\}$  与含有误差的校正量  $\{W'_j\}$  之差为:

$$\{W_j\} - \{W'_j\} = \frac{\{E_i\}}{[C_{ij}]} \quad (3)$$

如果将  $\{W'_j\}$  作为真实校正量进行平衡, 会产生剩余振动  $\{\Delta\}$

$$\{\Delta\} = \{A_i\} + [C_{ij}] \{W'_j\} \quad (4)$$

由式(1), (2), (4)可得  $\{\Delta\} = -\{E_i\}$

由此可见, 轴表面误差越大, 平衡效果越不理想。

## 3 解决方法

为了解决这一问题, 本文提出了一种矢量相减的方法。如图(1)所示, 选  $O$  点为极坐标原点, 当转轴在低速时, “振动”向量为  $OO'$ 。随着转速升高, 振动测量值的大小和方向在不断变化。设在  $O'$  点所对应的转速下, 转子没有振动, 则振动向量  $OO'$  完全是由轴表面误差带来的。本文提出的方法就是利用真实的原点  $O'$  来修正

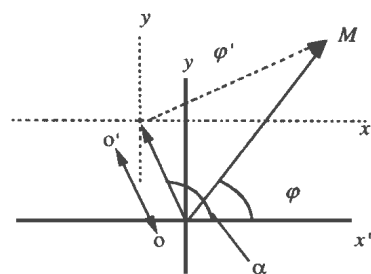


图1 矢量相减法原理图

了。本文提出的方法就是利用真实的原点  $O'$  来修正

原来混有轴表面误差的轴振的幅值和相位。如在某一转速下的  $M$  点, 按原坐标点  $O$  来计算, 其幅值大小为  $|OM|$ , 相角为  $\varphi$ ; 而真实轴振动的幅值应为  $|O'M|$ , 相角应为  $\varphi'$ , 用矢量可表示为:  $O'M = OM - OO'$

设  $O'M = |O'M|e^{j\varphi'}$ ,  $OM = |OM|e^{j\varphi}$ ,  $OO' = |OO'|e^{j\alpha}$ , 则

$$\text{真实轴振幅值 } |O'M| = \sqrt{|OO'|^2 + |OM|^2 - 2|OO'||OM|\cos(\alpha - \varphi)}$$

$$\text{真实轴振相位 } \varphi' = \text{tg}^{-1} \frac{|OM|\sin\varphi - |OO'|\sin\alpha}{|OM|\cos\varphi - |OO'|\cos\alpha}$$

其中:  $|OM|$ ,  $\varphi$  分别为轴振测量值的幅值和相位  
 $|OO'|$ ,  $\alpha$  分别为轴表面误差主矢量的幅值和相位

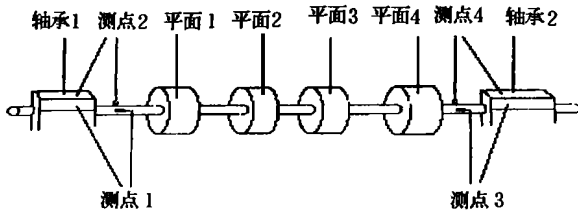


图 2 转子实验台简图

### 4 实验研究

为了证实轴表面误差对动平衡精度的影响, 作者在转子实验台上对同一根挠性转子进行了动平衡实验, 将本文提出的方法与传统的方法进行了对比, 转子实验台如图(2), 其中转轴直径 40 mm, 轮盘直径 400 mm, 轮盘厚度 40 mm, 轴承为圆柱动压润滑轴承, 转子第一阶临界转速为 1 640 r/min, 第二阶临界转速为 2 340 r/min。本次实验的平衡转速为 1 203 r/min, 轴振用电涡流位移传感器测量, 瓦振用速度传感器测量。

#### 4.1 单平面转子平衡

选平面 4 作为校正面, 以降低测点 4 的轴振为目标。在 112 r/min 转速下测得“轴振”, 实际上此时轴并没有振动, 因此可以将其作为轴表面误差主矢量。本文提出的方法是将误差主矢量从原始轴振信号和加试重后的轴振信号中减掉, 传统的方法没有将误差主矢量从原始轴振信号和加试重后的轴振信号中减掉。两者的平衡结果如表 1 所示。从表中可看出, 传统方法将测点 4 的轴振从 110  $\mu\text{m}$  降到 60  $\mu\text{m}$ , 降了 50  $\mu\text{m}$ , 占 45.5%, 测点 1, 测点 2, 测点 3 分别降了 24.1%, 48.2%, 14.5%; 本方法将测点 4 的轴振从 110  $\mu\text{m}$  降到 14  $\mu\text{m}$ , 降了 96  $\mu\text{m}$ , 占 87.3%, 测点 1, 测点 2, 测点 3 分别降了 63.9%, 65.5%, 93.4%。

表 1 单平面平衡数据(轴振单位: 幅值/ $\mu\text{m}$ , 相位/ $^\circ$ ; 瓦振单位: 幅值/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 相位/ $^\circ$ )

测点	低速测量值	原始振动		4 平面加试重		传统方法平衡的结果		本方法平衡的结果	
				54.3g, cm/185 $^\circ$		4 平面加重 193.3g, cm/160 $^\circ$		4 平面加重 130.6g, cm/186 $^\circ$	
		真实轴振	瓦振	真实轴振	瓦振	真实轴振	瓦振	真实轴振	瓦振
	幅值/相位	幅值/相位	幅值/相位	幅值/相位	幅值/相位	幅值/相位	幅值/相位	幅值/相位	幅值/相位
1	36/329	108/62	2.4/55	81/66	1.4/37	82/134	1.2/184	39/81	0.5/3
2	44/60	139/157	2.5/131	102/157	1.7/127	72/237	1.6/279	48/152	0.6/33
3	56/343	76/45	2.1/57	44/45	1.4/49	65/156	1.2/11	5/272	0.8/16
4	74/71	110/174	2.2/114	49/150	1.5/120	60/280	0.8/220	14/77	0.5/45

#### 4.2 双平面转子平衡

为了再次验证方法的有效性, 做了双平面转子平衡。选 1, 4 平面作为校正面, 以降低测点 1, 4 的轴振为目标。将在 112 r/min 转速下测量的“轴振”作为误差主矢量。本文提出的方法和传统的方法平衡结果如表 2 所示。从表中可看出, 传统方法将测点 4 的轴振从 110  $\mu\text{m}$  降到 75  $\mu\text{m}$ , 降了 35  $\mu\text{m}$ , 占 31.8%, 而测点 1, 测点 2, 测点 3 处的轴振都比初始

振动大, 这是因为轴表面误差使得轴振值偏离实际值, 由此计算出来的校正量与实际校正量有偏差, 从而平衡效果不理想; 本方法将测点 4 的轴振从 110  $\mu\text{m}$  降到 2  $\mu\text{m}$ , 降了 108  $\mu\text{m}$ , 占 98.2%, 测点 1, 测点 2, 测点 3 分别降了 74.1%, 82.7%, 92.1%。因此, 本文提出的方法平衡精度比传统方法的平衡精度高。

表 2 双平面平衡结果(轴振单位:幅值/ $\mu\text{m}$ , 相位 $^{\circ}$ ; 瓦振单位:幅值/ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 相位 $^{\circ}$ )

测 点	原始振动		1 平面加试重		传统方法平衡结果		本方法平衡结果		
			56.5g, cm/180°, 4 平面 加试重 54.3g, cm/185°		1 平面加重 94.4g, cm/137° 4 平面加重 90.7g, cm/142°		1 平面加重 67.2g, cm/176° 4 平面加重 64.5g, cm/181°		
	真实轴振		真实轴振		真实轴振		真实轴振		
幅值/相位	幅值/相位	幅值/相位	幅值/相位	幅值/相位	幅值/相位	幅值/相位	幅值/相位	幅值/相位	
1	36/329	108/62	2.4/55	28/107	0.7/55	128/143	1.7/142	28/329	0.2/90
2	44/60	139/157	2.5/131	30/186	0.6/5	146/241	2.0/24	24/238	0.4/11
3	56/343	76/45	2.1/57	10/41	1.1/17	77/139	0.8/352	6/179	0.4/219
4	74/71	110/174	2.2/114	17/138	0.8/93	75/252	1.4/226	2/71	0.4/87

### 4.3 瓦振测量结果分析

从瓦振测量结果来看,对于单平面法,传统方法使测点 1, 测点 2, 测点 3, 测点 4 处瓦振分别降了 50%, 36%, 43%, 64%; 本方法使这些测点处瓦振分别降了 79%, 76%, 62%, 77%。对于双平面法,传统方法使测点 1, 测点 2, 测点 3, 测点 4 处瓦振分别降了 29%, 20%, 62%, 36%; 本方法使这些测点处瓦振分别降了 92%, 84%, 81%, 82%。由此可见,瓦振较好地反映了轴振的情况,都说明了本方法比传统方法的平衡精度大大提高。

## 5 结论

通过以上的实验比较,可得出结论:

(1) 轴表面误差使得轴振测量值偏离实际值,由此计算出来的校正量有偏差,从而影响了动平衡的精度。

(2) 当去除因轴表面误差形成的初始干扰时,

动平衡的精度得到了提高。

(3) 本方法适用于不考虑轴向串动的情况。对于大型汽轮发电机组,由于转子的热膨胀,传感器在低速与高速测量时所对的转轴表面位置不一致,用低速时测量的误差主矢量代替高速测量时的误差主矢量将带来少量的误差,如何消除这个误差,是一个值得探讨的问题。

### 参考文献:

[1] Stroh C, Mackenzie J, Rebstock J. Options for low speed and operating speed balancing of rotating equipment[C]. **Proceedings of the 25<sup>th</sup> Turbomachinery Symposium**. 1996.

[2] Lyon D E. Thoughts on 1996 CMVA presenter's questions: in-situ balancing[C]. **Proceedings of the sixteenth Machinery Vibration Seminar**. 1997.

[3] 周仁睦. 转子动平衡—原理, 方法和标准[M]. 北京: 化学工业出版社. 1992.

[4] 钟一谭, 何衍宗. 转子动力学[M]. 北京: 清华大学出版社. 1987.

(复 编辑)

### 工程消息

## 广东将建液化天然气进口终端

据“Modern Power Systems”1999 年 4 月号报道,广东省正考虑建设液化天然气(LNG)进口终端,以便有助于满足对能源日益增长的需求。据说,该工程项目是在中国的第一个此类项目,计划于 2005 年完成。

该项目已得到初步批准,但还需得到国务院的批准。一旦得到批准,可能将在今年下半年进行可行性研究。

最有希望的 LNG 终端场址是紧挨香港的深圳和经济特区。该项目将由一些公司合建,预计将由中国国家海上石油公司领导,将包括广东省的有关部门。外国石油公司也可能被包括进来。

该终端将连接到一条新建的 400 km 管道,把天然气输送到广东南部。燃料将被输送给珠江三角洲现有的烧煤电站以及工业和个人用户。

其余的天然气将供一座具有电功率 2 000MW 装机容量的新电站用作为燃料。该电站很可能将在惠州建造。存在进一步的计划,在中国东海岸建造两个以上 LNG 终端。

(思娟供稿)

210096), Lu Chunmai (Power Engineering Department, Shandong Polytechnical University, Jinan, Shandong, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 387~389

This paper focuses on the results of an experimental study on the coal briquette desulfurization characteristics under the high temperatures specific to an industrial boiler as well as on the efforts aimed at improving the desulfurization efficiency. The study results indicate that the coal briquette desulfurization effectiveness varies to a large extent with temperature. The desulfurization products formed by a desulfurization reaction under a relatively low temperature may undergo a decomposition at an elevated temperature. Based on the principle of "countering waste with waste" it is possible to effectively enhance desulfurization efficiency by way of adding a calcium-based desulfurization agent into a suitable additive.

**Key words:** coal briquette desulfurization, calcination, desulfurization characteristics, additive

日本小型贯流式燃油蒸汽锅炉国产化设计中的若干问题= **Several Issues Encountered During the Implementation of a Domestic Production-oriented Modification Design of Japanese-made Small-sized Once-through Oil-fired Steam Boilers** [刊, 汉] / PENG Tao (Qingdao Caiyuan Environmental Protection Equipment Co. Ltd., Qingdao, Shandong, China, Post Code: 266042) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). 390~392, 395

In view of the differences existing between the Chinese and Japanese standards and specifications with regard to small-sized once-through oil-fired steam boilers some problems will arise during the implementation of the domestic production-oriented modification design of such Japanese-made boilers following their entry into the Chinese market. After an analysis of the design issues in connection with this implementation some pertinent approaches have been proposed to cope with the above-cited issues. **Key words:** once-through boiler, oil-fired boiler, domestic production-oriented modification design

深圳西部电厂4号机海水脱硫系统的调试及其分析= **Commissioning Tests and Data Analysis of a Sea-water Desulfurization System of Machine Unit No. 4 at Shenzhen West Power Plant** [刊, 汉] / WU Lai-gui, MOU Zhi-cai, DONG Xue-de, Yao Ting-sheng (Environmental Protection Engineering Co. Ltd. under the Shenzhen Energy Group, Shenzhen, China, Post Code: 518052) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 393~395

The working principle and technological process of China's first set of sea-water desulfurization system has been described along with a discussion of the system's commissioning tests and an analysis of the relevant parameters. **Key words:** sea-water desulfurization, commissioning test, desulfurization efficiency, hydraulic characteristics

轴表面误差对转子动平衡精度的影响= **The Influence of Shaft Surface Error on the Precision of Rotor Dynamic Balancing** [刊, 汉] / LIU Zhan-sheng, HUANG Sen-lin (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), TANG Bing-zhao (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power . — 2000, 15(4). — 396~398

During the measurement of shaft vibration displacements of a turbogenerator unit by the use of electric eddy-current sensors of non-contact displacement there exists a surface error component in the measured signals, which results from shaft fabrication errors and shaft surface defects. The direct use of these signals for rotor dynamic balancing will lead to a reduction in the balancing precision, and in extreme cases a failure to effect a balance of the rotor. Based on the specific features of rotor vibration the authors have proposed a vector subtractive method to eliminate the shaft surface error. Through experimental tests it has been verified that the use of the proposed method can dramatically increase the precision of the dynamic balancing. **Key words:** turbogenerator, bearing, vibration, surface defect, error, signal, dynamic balancing