

热力涡轮机械

文章编号: 1001 - 2060(2013) 06 - 0565 - 04

# 某台 600 MW 汽轮机组轴承载荷分配测试与分析

李燕勇<sup>1</sup>, 杨建刚<sup>2</sup>, 董 川<sup>1</sup>, 张世东<sup>2</sup>

(1. 云南电力试验研究院(集团)有限公司电力研究院, 云南 昆明 650217;

2. 东南大学 火电机组振动国家工程研究中心, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 建立了汽轮机组轴承载荷分配求解数学模型。在转子联轴器两侧各布置一组应变片, 采用全桥模式测试转子多个截面上的弯曲应变值, 由实测应变值求解轴承载荷。应用该法开发了汽轮机组轴承载荷应变检测系统, 针对某台 600 MW 汽轮机组开展了试验研究, 求出了汽轮机高压转子和两个低压转子轴承载荷分配, 分析了该机组轴系对中状况。试验结果表明, 该方法可以比较方便、准确地识别出轴承载荷和中心分布情况, 从而指导机组安装和检修。

**关 键 词:** 汽轮机; 轴承; 载荷; 弯曲应变片; 振动; 试验

中图分类号: TK263 文献标识码: A

## 引 言

滑动轴承对于汽轮机等大型旋转机械的安全、稳定运行至关重要, 轴承载荷对于滑动轴承动力特性的影响很大<sup>[1]</sup>。载荷过重, 轴承容易出现瓦温高、乌金碎裂、碾瓦等故障; 载荷过轻, 轴承容易出现油膜失稳故障。轴承载荷调整是机组故障诊断的重要手段。

轴承载荷调整前, 需要知道轴承所承受的实际载荷情况。汽轮发电机组轴系是由多根转子和多个轴承相连在一起的静不定轴系, 轴承所承受的载荷无法直接计算。目前常用的试验方法有油压法和顶举法<sup>[2-3]</sup>。油压法通过测量轴承内油压分布来识别轴承载荷。这种方法的影响因素和不确定因素很多, 识别误差较大。顶举法通过测试千斤顶作用下转轴上抬量, 由顶举曲线求出轴承载荷。顶举试验的工作量较大, 而且试验过程中很容易碰到上瓦, 从而产生一个来自于上瓦的反作用力, 导致结果误差较大。

为了能够准确、方便地识别机组各轴承所承受的载荷, 本研究提出了弯曲应变法。该法通过测试联轴器附近两个截面上的转轴弯曲应变值来识别轴承载荷。建立了轴承载荷计算数学模型, 研发了测试系统, 并将其用于 1 台 600MW 汽轮机组轴承载荷

测试和分析工作。

## 1 轴承载荷识别数学模型

### 1.1 测量截面弯矩计算方法

在转轴自重等载荷作用下, 转轴会产生弹性变形。将应变片粘贴在转轴表面。在图 1 所示两种状态下, 贴有应变片的转轴表面分别受拉伸和压缩, 变形传递到应变片上后改变了应变片阻值, 经过应变仪放大后, 即可测出转轴表面应变, 并由此计算出截面弯矩。为了提高测量精度, 可以采用如图 2 所示的测点布置和全桥应变测量模式。

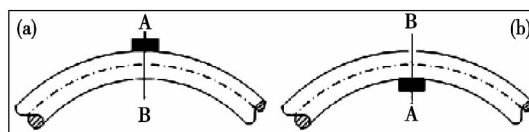


图 1 转轴旋转一周过程中弯曲变形情况  
Fig. 1 Bending and deforming changes in the process of the rotating shaft upon its completion of its revolution for 360 degrees

采用应变仪测量 0° 和 180° 下截面应变值。为消除误差, 测试前可先将转子连续盘动若干周。测试开始后, 以若干周内的平均值作为相应角度处应变值, 记为:  $\epsilon_{0^\circ}$ 、 $\epsilon_{180^\circ}$ 。

截面弯矩  $M$  可由应变值求出:

$$M = E \times \frac{\pi(D^3 - d^3)}{32} \times \frac{S_{180^\circ} - S_{0^\circ}}{2} \quad (1)$$

式中:  $E$ —转轴弹性模量;  $D$ 、 $d$ —轴外径和内径。

### 1.2 测量轴段内截面剪力计算方法

机组检修时, 揭开端盖后, 可以露出如图 3(a) 所示的轴段, 中间为联轴器, 两端分别对应着两根转子。该轴段力学模型如图 1(b) 所示。图 2 中,  $V_{exc}$

收稿日期: 2013 - 03 - 25; 修订日期: 2013 - 04 - 08

作者简介: 李燕勇(1972 -), 男, 云南昆明人, 云南电力试验研究院高级工程师。

为电桥激励电压;  $S_{ens+}$  为通道输入+;  $S_{ens-}$  为通道输入-;  $G_{ed}$  为模拟地。图3中  $M, Q$  分别代表截面处的弯矩和剪力, 方向定义如图所示, 单位分别为  $kg \cdot m$  和  $N$ ;  $q$  代表轴段单位长度质量  $kg/m$ ;  $L$  代表轴段长度  $m$ 。

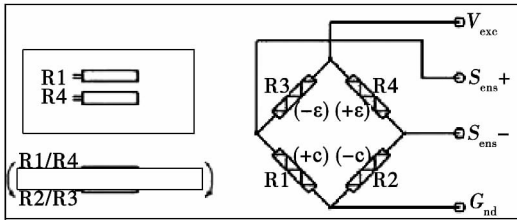
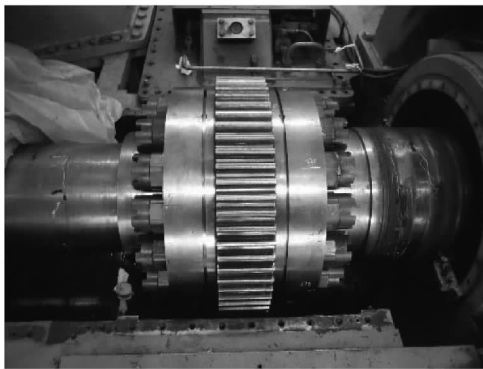
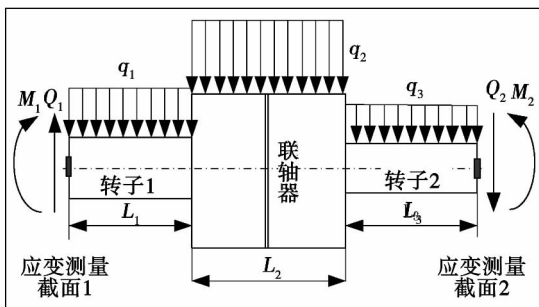


图2 应变测点布置和全桥测量模式  
Fig.2 Strain measuring point arrangement and whole bridge measurement mode



(a) 实物照片



(b) 轴段力学分析模型

图3 轴段实物和力学模型图

Fig.3 Shaft section object and chart showing the mechanics model

将转子和联轴器都视为均布质量, 可以列出力和力矩平衡方程:

$$Q_1 - \sum_{i=1}^3 q_i L_i - Q_2 = 0$$

$$q_1 \frac{L_1^2}{2} + q_2 L_2 (L_1 + \frac{L_2}{2}) +$$

$$q_3 L_3 (L_1 + L_2 + \frac{L_3}{2} + Q_2 \sum_{i=1}^3 L_i = M_2 - M_1 \quad (2)$$

式中:  $q_1, q_2, q_3$ —轴段单位长度质量;  $L_1, L_2, L_3$ —轴段长度;  $M_1, M_2$ —两端弯矩;  $Q_1, Q_2$ —两端剪力的未知数。

### 1.3 轴承载荷计算方法

对于任意形式的转子, 在两个轴承外侧各布置两组应变片, 按上述方法求出剪力和弯矩后, 即可由该轴段内的力和力矩平衡方程解出两个轴承所承受的载荷。

### 1.4 轴承载荷测试装置

转轴弯曲应变测试时, 为了减少测量误差, 通常需要将转子连续盘动若干圈。为此研发了无线信号发射和接受装置测量旋转过程中转轴表面动态应变值。测试前, 由汽轮机图纸建立机组轴系轴段力学分析模型。试验过程中, 测出并输入各截面应变值后, 即可快速求出轴承载荷。图4为无线信号发射和接受装置测量系统示意图。

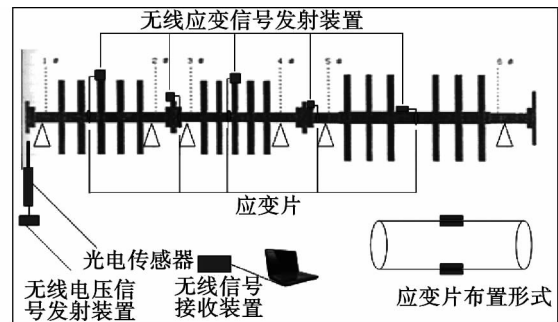


图4 测量系统示意图

Fig.4 Schematic drawing of the measurement system

## 2 某台 600 MW 汽轮机轴系载荷的测试与分析

图5给出了某台 600 MW 汽轮机组及其力学分析模型。建模时将汽轮机组轴系视为变截面连续梁, 各轴段自重作为均布质量, 联轴器、推力盘、叶片等作为集中质量。图6给出了应变测点布置图, 沿轴向共布置了6组测点。图7给出了旋转过程中3个测点应变动态变化情况。

将无线应变信号发射装置固定到机组应变测点所在截面附近, 将应变片与无线应变信号发射装置用全桥方式相连, 将无线接收装置与计算机相连。在轴上任一位置粘贴反光条, 将光电传感器对准反光条, 光电传感器输出信号接至专用无线电压信号

发射装置。通过安装光电传感器实现测量转速和 0°、90°、180°、270°等定角度触发采样。

实际测量时,应变片输出信号初始值可能并不为零,这并不影响测量结果。截面弯矩计算时,采用了 0°和 180°应变信号相减的方法,初始值偏差误差在相减的过程中被抵消了。

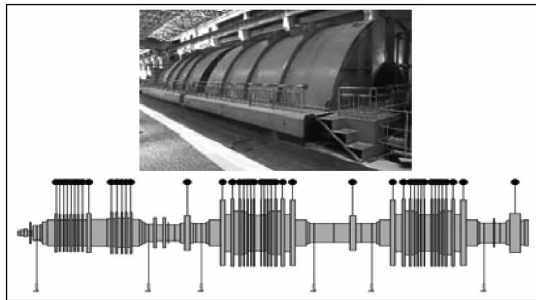


图 5 600 MW 汽轮机照片和力学模型  
Fig. 5 Photo of a 600 MW steam turbine and its mechanics model

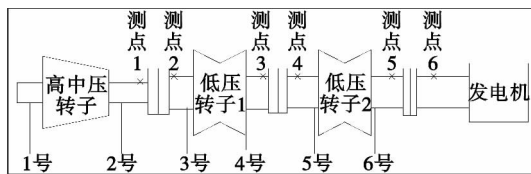


图 6 测点布置示意图  
Fig. 6 Schematic drawing of the measurement point arrangement

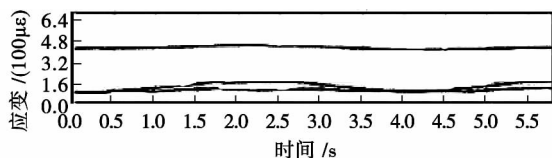


图 7 旋转过程中 3 个应变测点应变值变化情况  
Fig. 7 Changes of the strain values at three strain measurement points during the revolution

表 1 给出了 0°和 180°下测点应变值,表 2 给出了由此计算得到的轴承载荷。对这些结果进行分析,可以发现:

表 1 0°和 180°下测点应变值(με)  
Tab. 1 Strain values at the measurement points located at the position of 0 and 180 degrees

角度	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号
0°	-57.9	168.5	106.6	452.1	-566.6	-3.5
180°	-73.9	43.6	89.8	436	-568.7	-3.5

(1) 轴转动时,应变片的受力从压缩变为拉伸,应变变化应该如同正弦波或余弦波一样。本次试验所测转动过程中各点应变近似呈现三角函数变化,说明本装置能够比较高灵敏度地测量转轴应变。

表 2 识别得到的轴承载荷值(10<sup>3</sup> kg)  
Tab. 2 Bearing load values identified and obtained

1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	总和
13.44	1.66	44.09	27.82	30.75	32.55	150.3

(2) 汽轮机转子总重为  $154.53 \times 10^3$  kg,本次试验各轴承的总载荷为  $150.3 \times 10^3$  kg,两者误差仅为 2.74%,说明本方法的准确度较高。

(3) 2 号低压转子重量为  $64.085 \times 10^3$  kg,所识别出的两侧 5、6 号轴承载荷分别为  $30.75 \times 10^3$  kg 和  $32.55 \times 10^3$  kg,载荷分布基本均匀,总重近似等于 2 号低压转子重量。

(4) 1 号低压转子重量为  $63.393 \times 10^3$  kg,所识别出的两侧 3、4 号轴承载荷分别为  $44.09 \times 10^3$  kg 和  $27.82 \times 10^3$  kg,载荷分布不均匀,总载荷达到  $71.91 \times 10^3$  kg,超出 1 号低压转子本身重量 13.4%。

(5) 高中压转子重量为  $20.053 \times 10^3$  kg,所识别出的两侧 1、2 号轴承载荷分别为  $13.44 \times 10^3$  kg 和  $1.66 \times 10^3$  kg,载荷分布不均匀,总载荷达到  $15.1 \times 10^3$  kg,低于高中压转子本身重量 24.7%。

(6) 试验发现,1~4 号轴承载荷分配不均匀,突出表现在 2 号轴承载荷轻,3 号轴承载荷重。该机组 2 号轴承位于高压缸进汽侧,运行中受漏汽等因素影响,2 号轴承处环境温度较高,轴承会上抬。如果冷态安装时高低联轴器采取 0-0 的对中方式,就必然会导致热态下 2 号轴承载荷过重。为了避免出现该现象,检修中通常采取预留轴承标高补偿值的方法<sup>[4]</sup>,即在找好轴系中心后,从 2 号轴承底部抽出 0.8 mm 垫子,人为降低冷态下 2 号轴承标高,减轻 2 号瓦载荷。本次试验是在机组停机后冷态工况下进行的。试验结果表明 2 号轴承载荷很小,轴承基本脱空,证实了该现象。

### 3 结 论

研究提出通过测量联轴器两侧截面应变值来识别轴承所承受的载荷,研发了轴承载荷测试系统。针对某台 600 MW 汽轮机组所进行的测试结果,可以得到如下结论:

(1) 测量装置获得的轴承总载荷与转子总重之间的误差仅为 2.74% ,说明本方法准确度较高。

(2) 试验测试是在机组冷态下进行的 ,2 号轴承载荷很小 ,基本脱空 ,在检修中采用了预留轴承标高补偿值的方法 ,证实了 2 号轴承热态抬升、载荷增加的现象。

(3) 根据图 7 和表 2 中反映出的数据 ,测试装置能够比较准确地识别出汽轮机各轴承载荷分布和轴系中心情况。

(4) 采用该方法测试时 ,只需在联轴器两侧布置应变测点 ,无需揭缸 ,工作量较小 ,因而具有较强的工程应用价值 ,可以解决大型旋转机械轴承载荷难以测试的难题。

参考文献:

[1] 杨建刚 ,周世新 ,黄葆华 等. 多支撑汽轮发电机组轴承载荷灵敏度计算与分析 [J]. 中国电机工程学报 ,2000 ,20( 7) : 79 - 82.  
 YANG Jian-gang ,ZHOU Shi-xin ,HUANG Bao-hua ,et al. Calcula-

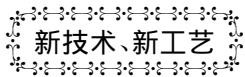
tion and analysis of the bearing load sensitivity of a multi-supported turbo-generator unit [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2000 20( 7) : 79 - 82.

[2] 姚德祥 ,孙 敏. 由测试轴承油膜压力推算轴承负荷和标高调整的试验研究方法 [J]. 江苏电机工程 ,1998 ,17( 1) : 15 - 19.  
 YAO De-xiang ,SUN Min. Method for experimentally studying the load and elevation adjustment of a bearing calculated by measuring the bearing-oil film pressure [J]. Jiangsu Electric Machinery Engineering ,1998 ,17( 1) : 15 - 19.

[3] 孔 源 ,田国成. 超临界汽轮发电机组励磁转子的安装找正及对尾瓦轴振的影响 [J]. 山东电力技术 ,2011 ,14( 1) : 56 - 60.  
 KONG Yuan ,TIAN Guo-cheng. Influence of the installation and alignment of the excitation rotor of a supercritical turbogenerator unit on the shaft vibration at the bearing installed at the rail portion [J]. Shandong Electric Power Technology 2011 ,14( 1) : 56 - 60.

[4] 曹国华 ,杨建刚 ,张 新. 多转子系统轴系标高变化对振动的影响分析 [J]. 汽轮机技术 ,2006 ,48( 6) : 441 - 443. CAO Guo-hua ,YANG Jian-gang ,ZHANG Xin. Analysis of the influence of the shafting elevation changes of a multi-rotor system on its vibration [J]. Steam Turbine Technology 2006 48( 6) : 441 - 443.

( 辉 编辑)



### MT30 船用燃气轮机的研制和应用

在由 ASME 举办的 2011 年“国际燃气轮机会议和博览会”上 ,Rolls - Royce 公司负责 MT30 研制的主管领导和主任工程师 Pearson D 和 Newman 发表了题目为“Rolls - Royce MT30 船用燃气轮机的研制和应用”的论文 ,该论文被收集在会议论文集 中。

该文跟踪了 MT30 的研制 ,从完全有依据地确定航空 Trent 母型 ,探讨必要的改进到使燃气轮机适用于舰船的使用。

展示了 MT30 研制的计划 ,包括进行严格的试验 ,以便证明该发动机能符合美国船级社的入级规则。

给出了 MT30 现在和未来的用途。提出了利用电动机用于巡航 ,利用 MT30 用于加速组成高效混合的推进系统。

探讨了 DDG - 1000 级驱逐舰和伊丽莎白女王级航空母舰上同时使用的最新全电力船舶推进系统 ,尤其是瞬时负荷电源问题。

采用创新设计 ,在保持可维护性的同时 ,紧凑的箱装体结构使系统拥有良好的功率密度。

在船用燃气轮机中 ,MT30 是唯一能提供 36 MW 输出功率并且在高环境温度 (38℃) 下能保持该功率的发动机。从一开始它就被设计成满足机械驱动和电力驱动推进系统的要求。并且已得到商船和海军船级社的入级证书。

特殊要求已经引进新挑战 ,通过试验台设计、研制和鉴定试验、控制策略和安装设计方面的改进来应对这些挑战。

( 吉桂明 摘译)

新型注空气循环燃气轮机技术进展及性能研究 = **Recent Advances and Performance Study of the Novel Type Air – injected Cycle Gas Turbine Technology** [刊 汉] HAO Ji-cai , LIN Feng , HE Bin ( CSIC No. 703 Research Institute , Harbin , China , Post Code: 150078 ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2013 28( 6 ) . – 559 ~ 564

The gas turbine air injection cycle denotes one in which after directly entering a cycle or having been humidified , the air compressed by an additionally installed compressor will absorb the waste heat from the exhaust gas outgoing from a gas turbine and then will be injected into the combustor. Such a cycle can absorb the waste heat and at the same time can increase the mass flow rate of the working medium and enhance the power and efficiency of the gas turbine. It has been found that the air quantity injected has a maximum value due to the limitation of the surge of the compressor , the rotating speed of the gas generator and the temperature of the exhaust gas. When the dry air injection is chosen , the best choice will be the mode keeping fuel oil quantity constant and when the wet air injection is chosen , the best choice will be the version having a highest humidity of the air injected. **Key words:** gas turbine , air injection cycle , shaft-split gas turbine , power , efficiency

某台 600 MW 汽轮机组轴承载荷分配测试与分析 = **Testing and Analysis of the Load Distribution Among Bearings in a 600 MW Steam Turbine Unit** [刊 汉] LI Yan-yong , DONG Chuan ( Electric Power Research Institute , Yunnan Electric Power Test Research Institute ( Group ) Co. Ltd. , Kunming , China , Post Code: 650217 ) , YANG Jian-gang , ZHANG Shi-dong ( Research Center for Thermal Power Generator Unit Vibration National Projects , Southeast University , Nanjing , China , Post Code: 210096 ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. – 2013 28( 6 ) . – 565 ~ 568

Established was a mathematical model for solving the load distribution among bearings in a steam turbine. A group of strain gauges was arranged at both sides of the couplings of the turbine rotor and the whole bridge mode was adopted to measure and test the bending strain values at multiple sections of the rotor , thus obtaining the loads on bearings by using the strain values actually measured. The method in question was used to develop a strain system for testing the loads on bearings of a steam turbine. An experimental study was performed of a 600 MW steam turbine unit and the loads distribution among bearings of a high pressure rotor and two low pressure rotors were obtained with the alignment of the shafting system of the unit being analyzed. The test results show that the method un-

der discussion can be used to conveniently and accurately identify the load and center distribution of bearings ,thus offering guidance for installation and maintenance of the unit. **Key words:** steam turbine ,bearing ,load ,bending strain method ,vibration ,test

燃气轮机进气防冰系统国内外技术对比分析 = **Contrast and Analysis of the Worldwide Technologies for Gas Turbine Inlet Air Deicing Systems** [刊 ,汉] CHEN Ren-gui ,CHEN Lei ( Tarim Oil Field Company ,China National Petroleum Corporation ,Korla ,China ,Post Code: 841000) ,WANG Qing-liang ,KANG Cheng-jia ( West Pipeline Company ,China National Petroleum Corporation ,Urumchi ,China ,Post Code: 830012) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28( 6) . -569 ~572

At present ,the air inlet systems for gas turbines introduced from abroad are often provided with heating and deicing devices for silencers and air inlet bell-mouths. However ,such devices are incapable of preventing the high efficiency cartridges from being iced and clogged ,even the safe and stable operation of gas turbines in frigid regions in winters are seriously affected and the relevant standards of China are not met. The authors analyzed the major difference in the air inlet deicing technologies for gas turbines in the world and the main causes for protective shutdown of some units often tripped by deicing systems and performed reconstruction of the units by employing the deicing technology developed in domestics. It has been found that the units after the reconstruction can not only enhance the reliability of the operation of the gas turbines in winters but also save a large amount of energy. **Key words:** gas turbine ,inlet air ,deicing ,reliability

天然气热电联供系统改造及焓经济分析 = **Modification and Exergoeconomic Analysis of a Natural Gas Heat and Power Cogeneration System** [刊 ,汉] HU Jia-hao ,LUO Xiang-long ,CHEN Ying ( College of Materials and Energy Sources ,Guangdong University of Technology ,Guangzhou ,China ,Post Code: 510006) ,HUA Ben ( Research Center for Natural Gas Utilization ,South China University of Science and Technology ,Guangzhou ,China ,Post Code: 510640) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28( 6) . -573 ~579

On the basis of a traditional natural gas heat and power cogeneration system ,put forward was an improved electricity ,steam and hot water cogeneration system. One of the specific features of the system in question is to realize the u-