

# 单平面主动平衡技术消除弯曲转子振动故障的研究

刘锦南, 何立东, 沈 伟, 高金吉

(北京化工大学 诊断与自愈工程研究中心, 北京 100029)

**摘 要:** 转子弯曲是导致转子振动量增大的重要故障源之一。首先分析各类转子弯曲原因, 提出利用单平面主动平衡技术消除弯曲转子振动故障, 并通过实验验证这种方法的可行性。实验结果表明, 利用单平面主动平衡装置可将弯曲转子一阶临界转速处的振动峰值从 550  $\mu\text{m}$  减小到 100  $\mu\text{m}$  以下, 降幅达到 80% 以上。可见应用单平面主动平衡技术, 可以非常有效地控制由转子弯曲所引起的振动, 具有良好的工程实用价值。

**关 键 词:** 弯曲转子; 主动平衡; 单平面; 振动故障

中图分类号: TK474. 8 文献标识码: A

## 1 引 言

转子弯曲是各种转子常见且较难消除的振动故障之一。国内已运行的汽轮发电机组转子存在明显热弯曲的约占 20%。美国西屋公司将热弯曲列为发电机最常见的振动故障之一, 我国从该公司引进的机组也出现了这类问题。英国 GEC 公司制造的多台 660 MW 发电机投运后出现热弯曲, 而该公司为我国大亚湾核电站制造的 900 MW 发电机同样出现了这种振动<sup>[1-3]</sup>。

对于转子弯曲问题的具体解决方案, 现在主要通过现场动平衡或对转子进行热处理校直等方法, 这些方法虽然可行但有其局限性, 因此本文提出采用单平面主动平衡技术来解决转子弯曲问题, 主要通过实验研究来探讨单平面技术解决弯曲转子振动问题的可行性, 并希望在实验研究的基础上能够进一步实现工程应用。

## 2 转子弯曲

转子弯曲一般可分为两类: 永久性弯曲和临时性弯曲。转子形成弯曲的成因不同, 诊断和消除变

形的方法也不尽相同。对于永久性弯曲主要采取现场动平衡和转子热处理校直, 而对于临时性热弯曲可以在设计和操作过程中进行有效预防为主。但无论采取哪种措施都需要对旋转机械进行多次启、停车, 甚至要将转子拆出进行大修, 必然会耗费大量的人力、财力和时间; 同时, 热弯曲的程度随工况变化而具有时变性和随机性, 现场动平衡不能从根本上解决由于热变形引起的振动问题。主动平衡技术是避免上述局限性的最好途径之一。

## 3 单平面主动平衡技术概述

主动平衡技术是一种有效保障旋转设备正常运转的平衡技术, 它能够在工作过程中对转子中未知的和时变的不平衡量进行实时监控和有效平衡, 使其振动值降到允许范围。主动平衡原理是利用振动传感器在线实时地检测出工作状态下转子振动的幅值和相位, 然后将此信息传递给控制器, 计算出转子的不平衡量的大小和位置, 平衡头自动动作, 使其产生相应的校正平衡量与转子自身的不平衡相抵消, 从而使转子及时得到平衡<sup>[4]</sup>。

对于一般的柔性转子采用双平面进行平衡是比较理想的, 但很多情况下由于安装位置等具体条件限制只能在单一平面上进行平衡。因此单平面平衡问题是具有一定的现实意义, 并且单平面主动平衡技术国外也已经进行一定的理论研究。1982 年 Bishop 提出了采用单平面主动平衡技术来平衡柔性转子的方法, 主要在理论上验证了其可行性。他提出, 如果将平衡平面放置在残余不平衡源附近, 也就是不平衡响应最敏感处, 那么单平面主动平衡技术就会产生很好的平衡效果<sup>[5]</sup>。1987 年 Lee 和 Kim 曾对单平面主动平衡方法进行了实验研究, 他们通过手动控制一个电池驱动的主动平衡头来实现平衡操作<sup>[6]</sup>。1999 年 Dyer 和 Jun Ni 等对基于自适应影响

收稿日期: 2005-07-05; 修订日期: 2005-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375013, 50375014); 教育部重点研究基金资助项目(03024)

作者简介: 刘锦南(1980-)男, 辽宁锦州人, 北京化工大学硕士研究生

系数法的单平面主动平衡系统的控制算法进行了深入研究,并通过采用电磁式平衡头对机床转子进行了自动平衡实验,取得了很好的实验效果<sup>[7]</sup>。国内在单平面平衡技术上有一些实际应用案例。辽阳石化尼龙厂 83C102 压缩机组是从法国引进的关键设备,自 1980 年开车投入运行以来,一直振动较大,曾多次由于振动超标而连锁停车。1990 年 6 月年度大检修时,对该机组低压缸进行了现场动平衡。按单平面影响系数法进行动平衡,结果试车 4 次,在联轴节适当位置加 5.4 g 螺丝解决了机组振动过大的问题<sup>[8~9]</sup>。可见在单平面适当的加一定量的配重即可以解决柔性转子振动过大问题。以上研究都为单平面主动平衡技术解决转子因弯曲而产生的振动问题提供了理论和实验基础。

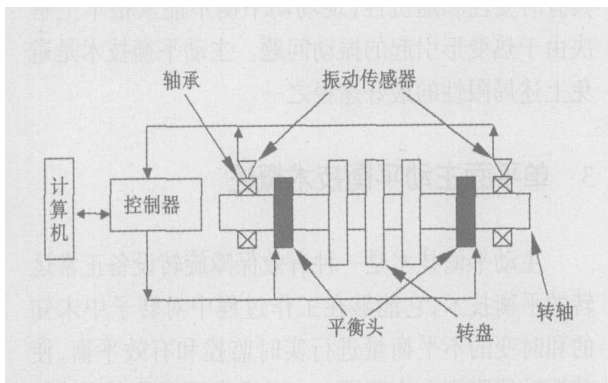


图 1 主动平衡系统原理图

本实验采用电磁式主动平衡系统,原理图如图 1 所示,由以下 3 个部分组成:振动传感器、控制器和平衡头,而平衡头是由连接在机体上的静环和连接在旋转轴上的动环组成。其中动环中有两个配重盘,在每个配重盘的外圈均匀镶嵌了大量永久磁铁,这些永久磁铁与配重盘两侧的电极板相互作用,起到了自锁的功能,使其在不通电的时候也能保持在上次调整后的最优平衡位置,使整个平衡头具有很高的可靠性。图 2 为平衡头动环中两个配重盘在平衡过程中各自位置示意图。当传感器测得的振动幅值小于预先设定的振动幅值时,两块配重通过其自身的永久磁铁使其自锁成 180° 放置,此时不提供不平衡量,如图 2 中虚线所示;当传感器测量的振动幅值大于设定的幅值时,控制器可以向平衡头发出电脉冲,利用静环中的线圈产生的电磁场与动环中的永久磁铁产生的磁场相互作用,驱动两块配重盘转动到相应的位置,产生一个有效的不平衡量,使其与转子自身的原始不平衡相抵消,从而达到平衡的目的,

的,如图 2 中实线所示。

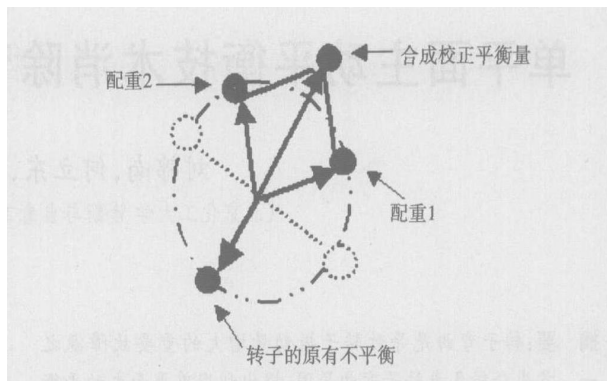


图 2 平衡过程中动环配重示意图

#### 4 弯曲转子振动故障的实验研究

对于一个新设计的转子系统,可以通过敏感性分析事先预留出最优的主动平衡装置的安装位置,这是一种最好的情况;而对于现有的转子系统,由于受到很多因素的制约,尤其是现有的转子结构很难在有限的轴向位置上找到最优的安装平面,只能选择相对比较合适的轴向安装位置。本文所讨论的转子系统,可供安装的位置只有两个:一处是左端轴颈附近,另一处是右端轴颈附近,如图 3 所示。实验证明双平面对于解决这种弯曲转子的振动问题具有很好的效果,左、右测量平面的振动峰值降低了约 93%。本文通过单独启动左侧或右侧主动平衡装置的方法来验证单平面解决弯曲转子振动故障问题的可行性。

##### 4.1 弯曲转子的振动特性

本试验转子由 48 kW 的直流电机通过增速齿轮箱驱动,转轴长为 1 130 mm,滚动轴承的跨距是 953 mm,安装轴承的轴径为 30 mm。转子上有 3 个圆盘,圆盘间距离均为 200 mm。两侧的转盘结构相同,外直径 210 mm,内直径 40 mm,宽度 30 mm,质量 7.81 kg。中间的转盘外直径 210 mm,内直径 53 mm,宽度 30 mm,质量 7.59 kg。最初转子呈“弓形”弯曲,沿转子轴向测量,转轴中部的最大弯曲跳动量为 120 μm。该转子的一阶临界转速在 2 800 r/min 附近,当转子升速到 1 300 r/min,左、右测量平面水平方向的振动幅值达到 80 μm,继续升速至 2 600 r/min,水平方向的振幅幅值剧增到 500 μm,如果继续升速,振幅将远大于 500 μm。从转子频谱图可以看出,转子的振动只是工频振动,主要是由转子存在的较大轴弯曲导致的。

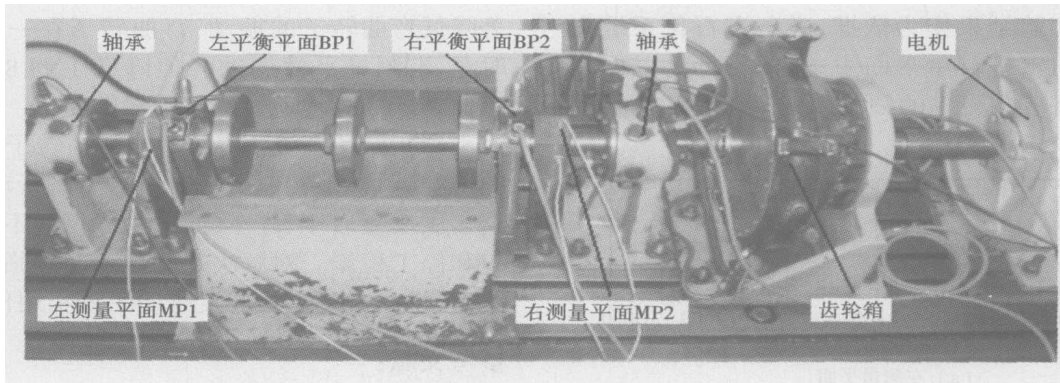


图3 柔性弯曲转子自动平衡实验台实物图

为了解决弯曲转子产生的剧烈振动问题, 首先对弯轴进行了校直, 使转子的最大弯曲跳动量由  $120 \mu\text{m}$  降到  $55 \mu\text{m}$ , 但仍有一定残余弯曲。然后在动平衡机上对该弯曲转子进行了低速动平衡。经过几次平衡后, 转子的残余不平衡量为  $21.25 \text{ g} \cdot \text{mm}$ 。平衡之后转子升速测得转子振动曲线如图 4 所示。可以看出经过动平衡后的转子, 在  $1300 \text{ r/min}$  时振幅降低到  $20 \mu\text{m}$  左右, 在  $2600 \text{ r/min}$  之前振幅降低到  $50 \mu\text{m}$  以下, 平衡效果是明显的。并且右侧测量平面在  $2000 \text{ r/min}$  以后随着转速的升高振幅还有一个下降的趋势, 这主要是由于弯曲所产生的力和转子不平衡所产生的力相互作用而有所抵消, 并且弯曲的作用力小于不平衡, 则在一阶临界之前出现振幅下降的现象。但是在  $2800 \text{ r/min}$  的临界转速附近时的振幅仍很大, 最高达到  $550 \mu\text{m}$ , 仍不能满足实际使用要求。

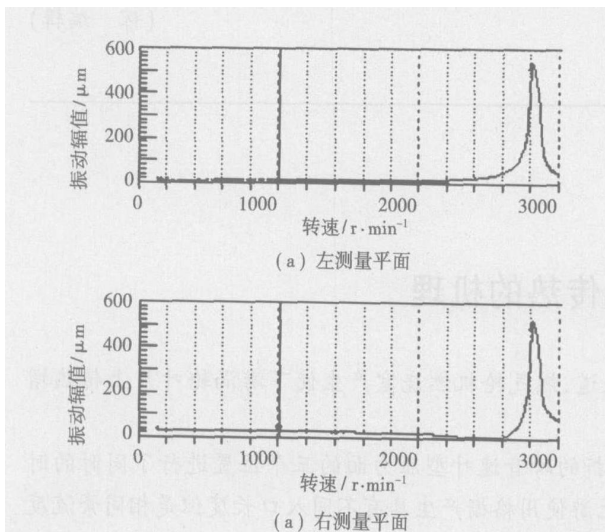


图4 动平衡后弯曲转子水平方向振动曲线图

#### 4.2 单平面主动平衡技术解决弯曲转子振动问题

#### 的实验结果

通过单独启动左或右主动平衡装置的方法来验证单平面解决弯曲转子振动问题的可行性, 将转子由  $0 \text{ r/min}$  一直升高到  $3000 \text{ r/min}$ , 其间通过转子的一阶固有频率, 左右测量平面测得两侧的轴振动, 测量结果如图 5 和图 6 所示。

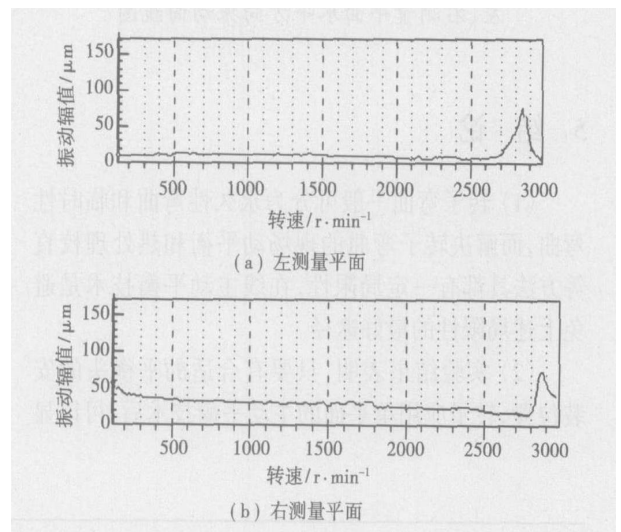


图5 左侧主动平衡装置单独动作, 左、右测量平面水平方向振动曲线图

从图 6 和图 7 的结果可以看出, 采用单平面主动平衡技术基本上将弯曲转子在一阶临界转速处的振动值从  $550 \mu\text{m}$  降低到  $100 \mu\text{m}$  以下, 振幅有了明显下降。通过实验结果可以得出这样的结论: 如果选择合适的平衡位置和平衡头的平衡能力, 采用单平面主动平衡技术来解决弯曲转子振动问题是完全可行的。

国内外已经有很多设备应用了单平面主动平衡技术, 尤其在磨床上已经大量应用了该项技术, 取得了很好的效益, 也有的将该项技术应用在风机上。

本中心以该实验结果作为依据,准备在石化系统常用的烟气轮机上进行单平面主动平衡研究,以期能将该项技术在国内更多的领域内实现工程应用。

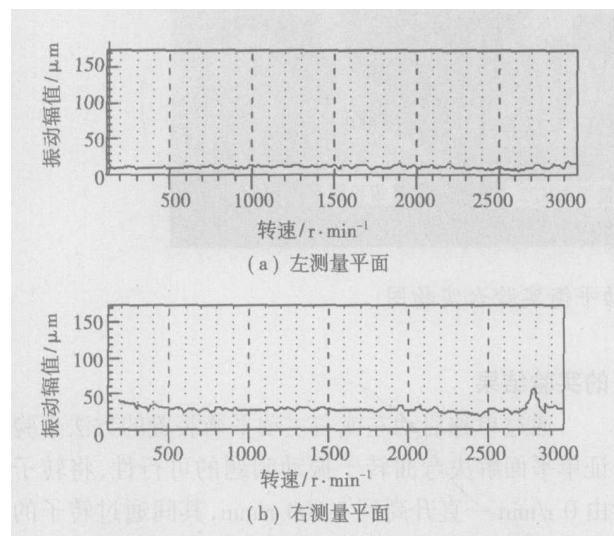


图 6 右侧主动平衡装置单独动作,左、右测量平面水平方向振动曲线图

## 5 结 论

(1) 转子弯曲一般可分为永久性弯曲和临时性弯曲,而解决转子弯曲的现场动平衡和热处理校直等方法具都有一定局限性,在线主动平衡技术是避免上述局限性的最好途径。

(2) 实验结果表明,只要有合适的平衡头的安装位置,转子应用单平面的主动平衡技术后,可以显

著降低弯曲转子的振动,弯曲转子在一阶临界转速时左、右测量平面振动峰值降低了约 80%,有助于弯曲转子顺利地通过一阶临界转速。

(3) 在线主动平衡技术能够在转子系统不停机的情况下,在多转速下随时对转子进行动平衡,免去了多次反复启车、停车的动平衡过程,不需要人工参与和停工检修。对解决永久性弯曲和临时性弯曲都具有很好的作用,具有良好的工程实用价值。

## 参考文献:

[ 1 ] PENNACCHI P. Accuracy in the identification of a generator thermal bow [ J ] . *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 274(6): 273- 295.

[ 2 ] RAJA, B. A numerical model for thermal mapping in a hemetically sealed reciprocating refrigerant compressor [ J ] . *International Journal of Refrigeration*, 2003, 26(6): 652- 658.

[ 3 ] NOEJAMES C. Gas turbine generator set, 1997, 17(3): VII.

[ 4 ] HRDZAK. Investigation of the feasibility of active balancing of hard disk drives [ J ] . *Mechatronics* 2004, 14(7): 853- 859.

[ 5 ] BISHOP R E D. On the possibility of balancing rotating flexible shafts [ J ] . *Journal of Mechanical Engineering Science* 1982, 24: 215- 220.

[ 6 ] LEE, C W. Modal balancing of flexible rotors during operation; Design and manual operation of balancing head [ J ] . *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers*, 1987, 201(5): 349- 355.

[ 7 ] STEPHEN W DYER. Adaptive influence coefficient control of single-plane active balancing systems for rotating machinery [ J ] . *Manufacturing Science and Engineering*, 1999, 10: 747- 755.

[ 8 ] 高金吉. 离心压缩机转子轴系不平衡及其防治方法 [ A ] . 设备诊断工程文集 [ C ] . 辽阳 中国石化机电仪研修中心, 2001.

[ 9 ] 沈 伟, 何立东. 主动平衡技术在带尾透的离心压缩机上的应用研究 [ J ] . *热能动力工程*, 2006, 20(2): 174- 177.

( 辉 编辑 )

## 理论研究

# 涡轮叶片紊流传热的机理

据《ASME Journal of Turbomachinery》2005 年 7 月 号报道,燃气轮机燃烧室产生使下游涡轮叶片上传热增加的紊流,但是紊流传热的机理尚未完全清楚。

在得到美国空军支持的一项研究工作中,在高度转折的跨音速叶型压力面的三个位置进行了同时的时间分辨的表面热流和速度的测量。在直列涡轮叶栅的上游使用格栅产生具有不同入口长度但是相同紊流度的自由流紊流。使用高频响应测量仪表得到稳态和非稳态的测量。

测量结果表明,对于具有较小积分长度的紊流流动,其时间平均的传热更大。频率域分析证明了在宽广的频率范围内热流和速度波动的相干性。这一点直接表明,自由流紊流旋涡通过附面层完全透入叶片表面。

( 吉桂明 供稿 )

单平面主动平衡技术消除弯曲转子振动故障的研究=A Study of the Elimination of Vibration Faults Occurring in a Bended Rotor through the Use of a Single-plane Active Balancing Technology[刊, 汉] / LIU Jin-nan, HE Li-dong, SHEN Wei, et al (Diagnosis and Self-healing Engineering Research Center under the Beijing University of Chemical Engineering, Beijing, China, Post Code: 100029) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 165 ~ 168

A rotor affected with bending is one of the major fault sources leading to an increase in vibration level of a rotor. The causes of the bending occurring on various kinds of rotor are first analyzed. Then, it is proposed to use single-plane active balancing techniques to eliminate the vibration fault of a bended rotor. Moreover, the feasibility of the proposed method is verified by tests. The results of the tests indicate that by using a single-plane active balancing device it is possible to reduce the vibration peak value of the bended rotor at a location of the first-order critical speed from 550  $\mu\text{m}$  to below 100  $\mu\text{m}$ , a reduction higher than 80%. From this example it can be seen that the technique under discussion can very effectively control the vibration caused by the bending of a rotor, demonstrating its high value in engineering practice. **Key words:** bended rotor, active balancing, single plane, vibration fault

环形扩压叶栅弯叶片对流场性能的影响= The Impact of Bowed Blades of an Annular Diffuser Cascade on Flow Field Performance[刊, 汉] / ZHANG Yong-jun, FENG Guo-tai, SU Jie-xian, et al (College of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 169 ~ 174

After a contrast study of the different phenomena displayed at the suction-side corner zone and at the lower end-wall flow field by the straight-blade cascades and bowed blade ones it has been found that the bowed blades exercise a relatively great influence on the separation flow structure at the corner zone. The bowed blades can also significantly lower the dimensions of horseshoe vortex and weaken the transverse secondary-flow near the end-wall zone. With the location and intensity of three-dimensional flow-oriented vortices (passage vortex and concentrated shed vortex) in different cascades and in sections along the flow direction serving as an object of investigation a detailed analysis was conducted of the variation of vortex location and intensity prior to and after the adoption of the bowed blades. The results of the analysis indicate that the location of two kinds of vortex is subject to a relatively great influence of the bowed blades. The variation of the intensity of the passage vortex along the flow direction due to the influence of bowed blades is comparatively evident while the influence of the bowed blades on the intensity of concentrated shed vortex is very small. Mach number of an incident flow, the turning angle of a blade profile and solidity exercise in a certain range a regular influence on the function of the bowed blades. At a Mach number of 0.7 the bowed blades with an optimal curved angle will lower losses by 7%. When the Mach number is 0.2, the above-mentioned blades can reduce the losses by only 4%. **Key words:** low speed, compressor, bowed blade, separated flow, passage vortex, concentrated shed vortex

燃煤可吸入颗粒物声波团聚效果的实验研究和数值分析= Experimental Study and Numerical Analysis of the Acoustic Agglomeration Effectiveness of Inhalable Particles of Burned Coal[刊, 汉] / YAO Gang, ZHAO Bing, SHEN Xiang-lin (Education Ministry Key Laboratory of Clean Coal Power Generation under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(2). — 175