

单盘刚性转子双平面液压主动平衡技术研究

苏奕儒, 何立东, 汪振威, 常健

(北京化工大学诊断与自愈工程研究中心, 北京市 朝阳区 100029)

Study on Dual-plane Active Hydraulic Balancing Technology for Single-disk Rigid Rotor System

SU Yi-ru, HE Li-dong, WANG Zhen-wei, CHANG Jian

(Diagnosis and Self-recovery Engineering Research Center, Beijing University of Chemical Technology,
Chaoyang District, Beijing 100029, China)

ABSTRACT: A dual-plane active hydraulic balancing method was proposed to eliminate the unbalance vibration of a rigid rotor with single disk online. Based on the analysis of the principle of dual-plane active hydraulic balancing, a test rig with a single-disk rotor was set up, and two active balancing schemes were made. Then, by means of the finite element method (FEM), a model of the test rotor was built to analyze the balancing effects of the two active balancing schemes and determine the best control method under each balancing scheme. Finally, the two active balancing schemes were experimentally investigated on the test rig. Results of FEM analysis and experiments indicate that the best control method that should be adopted is different under different balancing scheme. The dual-plane active hydraulic balancing method using an optimal control method can greatly depress the level of unbalance vibration.

KEY WORDS: single-disk rotor; dual-plane; active balancing; vibration; balancing head

摘要: 提出一种双平面液压主动平衡方法对单盘刚性转子的不平衡振动进行在线消除。在分析双平面液压主动平衡原理的基础上, 建立了一套带有单圆盘的转子实验台, 制定了双平面的2种安装方案。利用有限元法建立了该实验台的转子模型, 分析了2种安装方案的平衡效果, 并确定了各个平衡方案下的最佳控制方法。在实验台上对2种安装方案的平衡效果进行了实验验证。有限元分析和实验结果均表明, 不同的安装方案需要采用的控制方法各不相同, 采用最佳控制方法的双平面主动平衡技术可以有效地消除单盘转子的不平衡振动。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50635010)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (50635010).

关键词: 单盘转子; 双平面; 主动平衡; 振动; 平衡头

0 引言

单盘刚性转子结构在发电、石化、炼油、冶金行业有着广泛的应用, 如单级离心鼓风机、烟气轮机和超重力机等, 这些机器运行过程中由于轮盘磨损或结垢而产生的不平衡较大^[1-2]。传统的动平衡技术需要在停机的情况下进行, 不仅影响生产的正常进行, 也造成了人力和经济的损失^[3-6]。转子的自动平衡技术可以在不停机的情况下对转子进行在线平衡, 因此具有重要的应用意义^[7-10]。目前较为成熟的自动平衡系统有球型、电磁型和液压型自动平衡技术。球型被动式自动平衡系统仅能用于柔性转子, 对刚性转子不适用^[11-12]。一些学者对电磁型和液压型主动式平衡系统在刚性转子上的应用进行了大量的研究工作, 且大部分的研究都仅采用了单一主动平衡头(即单平面主动平衡)^[13-18]。

一般认为, 单盘刚性转子在平衡机上平衡或现场平衡时, 均可采用单平面平衡方法, 即通过在轮盘处加重或去重实现平衡。但是对于自动平衡来说, 受实际安装空间的限制, 平衡头不可能安装在轮盘处, 而通常只能安装在距离轮盘一定距离的轴段上, 所以单一平衡头提供的配重在补偿轮盘不平衡力的同时, 会产生一个新的不平衡力偶, 影响平衡效果。因此, 采用单平面主动平衡方法对单盘刚性转子的在线平衡效果具有一定的局限性。

采用2个平衡头进行在线平衡(即双平面主动平衡), 可以在补偿轮盘不平衡力的同时, 不产生新的不平衡力偶, 因此双平面主动平衡技术可以更有效地消除转子的不平衡振动。已有学者对双平面主

动平衡在柔性转子上的应用进行研究,但在刚性转子上的研究较少,并且主要采用的是电磁型主动平衡装置^[19-20]。电磁型主动平衡装置结构复杂,造价贵,且平衡能力一般比液压型小。

本课题组^[21]曾研究利用单平面液压主动平衡技术对风机转子振动进行在线平衡,尽管取得了一定的平衡效果,但平衡后残余振动仍较大。因此,本文利用双平面液压型主动平衡技术对风机这类单盘转子的不平衡振动控制问题做进一步研究。在分析双平面液压主动平衡控制原理的基础上,建立了有限元模型对控制方法进行优化选择,最后在实验台上进行了实验验证。

1 单盘转子双平面液压主动平衡原理

1.1 液压主动平衡系统

图1为H6000液压型主动平衡系统原理图,系统主要由控制器、传感器、平衡头、电磁阀单元、喷嘴单元和液体泵等组成,其中平衡头、电磁阀和喷嘴单元组成主动平衡系统的执行机构。

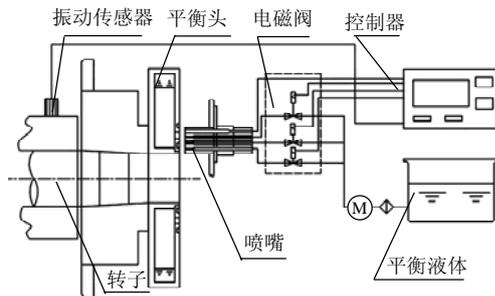


图1 液压主动平衡系统原理图

Fig. 1 Scheme of hydraulic active balancing system

液压主动平衡系统的基本原理是通过向安装在转子上的平衡头注入液体,使液体的质量形成一定的配重,对转子自身的不平衡量进行补偿,实现转子-平衡头系统整体平衡的目的。平衡头内部含有3个扇形容腔,每个腔体外部对应着一个进水槽。

主动平衡系统采用了坐标轮转换位寻优控制方法。当转子不平衡振动值超标时,控制器开启电磁阀并通过喷嘴向第1容腔注入试探量的液体,测量振动量的变化。如果振动减少,则继续向该容腔喷液;如果振动增大,则更换容腔进行重新试探,并在使振动降低的容腔继续喷液,直到振动降低到最低值(或门槛值)为止。平衡过程中,配重的大小和相位可由单个容腔液体质量确定,或者由2个容腔液体质量的合成矢量来确定。

1.2 单平面和双平面主动平衡原理的比较分析

若采用单平面平衡方法,即单独采用一个平衡

头,由于平衡头远离叶轮,它提供的配重 F_A 在补偿轮盘不平衡量 F_0 的同时,必然会产生一个新的不平衡力偶 $F_A l_A$,如图2所示,从而使转子的不平衡振动无法得到彻底消除。

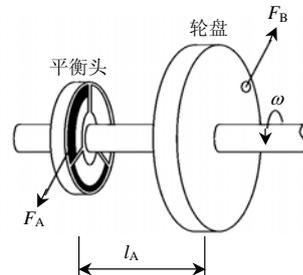


图2 单平面主动平衡原理示意图

Fig. 2 Principle sketch of single-plane active balancing

因此,轮盘的不平衡量 F_0 需要由2个平衡头同时补偿,即双平面主动平衡。图3为双平面主动平衡原理图,2个平衡头分布于轮盘的两侧,与轮盘距离分别为 l_A 和 l_B ,轮盘在运行过程中产生不平衡量设为 F_0 。则平衡头提供的配重 F_A 和 F_B 的相位可以选择与 F_0 相反的方向,且大小需要满足

$$\begin{cases} F_A + F_B = F_0 \\ F_A l_A = F_B l_B \end{cases} \quad (1)$$

为了满足上述要求,2个平衡头安装如图3所示,这样可以保证2个平衡头内液体提供的配重相位相同。通过控制2个平衡头喷液量的比例,可以使配重 F_A 和 F_B 的大小满足式(1)关系,从而使主动平衡装置在平衡转子不平衡力的同时,不会产生新的不平衡力偶,达到完全消除转子不平衡振动的目的。为了达到喷液量的比例,优化控制目标,可以对喷嘴口的大小或电磁阀孔径进行设计,使每个平衡头进入的液体流量所形成的配重比达到式(1)的设计要求。

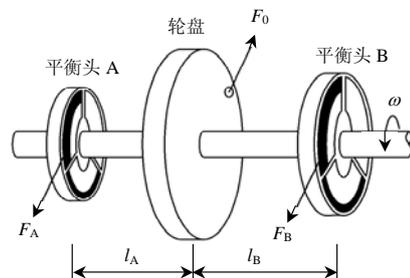


图3 双平面主动平衡原理示意图

Fig. 3 Principle sketch of dual-plane active balancing

2 主动平衡实验台

为了研究双平面液压主动平衡技术消除单盘转子不平衡振动的效果,建立了如图4所示的转子

实验台。整个转子由 2 个结构相同的可倾瓦轴承共同支撑，转轴直径为 50 mm，转轴总长 1020 mm，轴承跨距为 680 mm。在距离 1 号轴承 380 mm 的位置安装有一个外径为 270 mm 的轮盘，轮盘的边缘均布有 16 个 M8 的螺纹孔，通过在螺纹孔上施加不同大小的质量块，可以模拟实际轮盘在运行过程中产生的不平衡质量。在 2 个轴承的水平 and 垂直方向上分别安装了一套 bently 电涡流振动传感器，1 号轴承水平和垂直方向的测点分别表示为 1H、1V；2 号轴承水平和垂直方向的测点分别表示为 2H 和 2V。

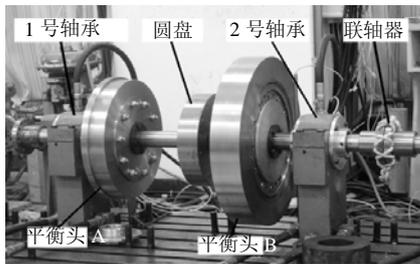


图 4 双平面主动平衡实验台

Fig. 4 Test rig with dual-plane active balancing system

在工程实际中，由于各类旋转机械的转子结构不同，可供平衡头安装的位置也不相同。因此平衡平面的选择需要对转子结构本身进行设计，转子结构不同，则需要采用的安装方案也不同。为了模拟工程实际不同的转子结构，本文对平衡头在不同安装位置的平衡效果进行研究，制定了 2 个平衡头安装方案：

- 1) 方案 I 是将平衡头 A 安装在轮盘左侧 150 mm 处，平衡头 B 安装在轮盘右侧 140 mm 处；
- 2) 方案 II 是将平衡头 A 安装在轮盘左侧 260 mm 处，平衡头 B 仍安装在轮盘右侧 140 mm 处。

在上述 2 个方案中，2 个平衡头的 3 个容腔所处的相位均一致。

3 双平面主动平衡控制方法的优化

3.1 转子系统有限元模型的建立

为了实现单盘转子双平面主动平衡，2 个平衡头提供的配重必须合适地匹配，否则与单平面主动平衡方法一样也会产生不平衡力偶而影响平衡效果。因此在 2 个安装方案下，优化 2 个平衡头的配重比是解决双平面主动平衡问题的关键。

本文建立了实验转子的有限元模型，如图 5 所示，模型共分 9 单元、10 节点。其中，3 号节点为 1 号轴承，8 号节点为 2 号轴承，6 号节点为叶轮。

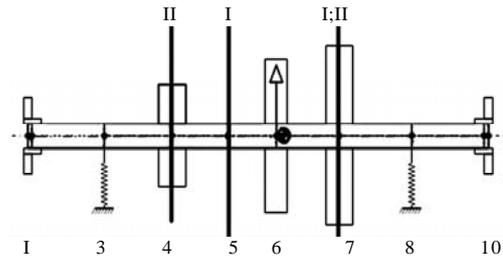


图 5 转子系统的有限元模型

Fig. 5 Finite element model of rotor system

3.2 有限元分析结果

当采用安装方案 I 时，平衡头 A 位于模型的 5 号节点，平衡头 B 位于 7 号节点；在叶轮上施加不平衡量 19.2 kg·mm (相位为 120°)，转速达到 1850 r/min 时，计算 2 个轴承的振动值分别为 128 和 105 μm。假设平衡头 A 提供的配重为 P_A ，平衡头 B 提供的配重为 P_B ，当 P_A/P_B 控制在 0.25, 1.2 和 4 时，计算得到 2 个轴承振动变化，如图 6 所示。

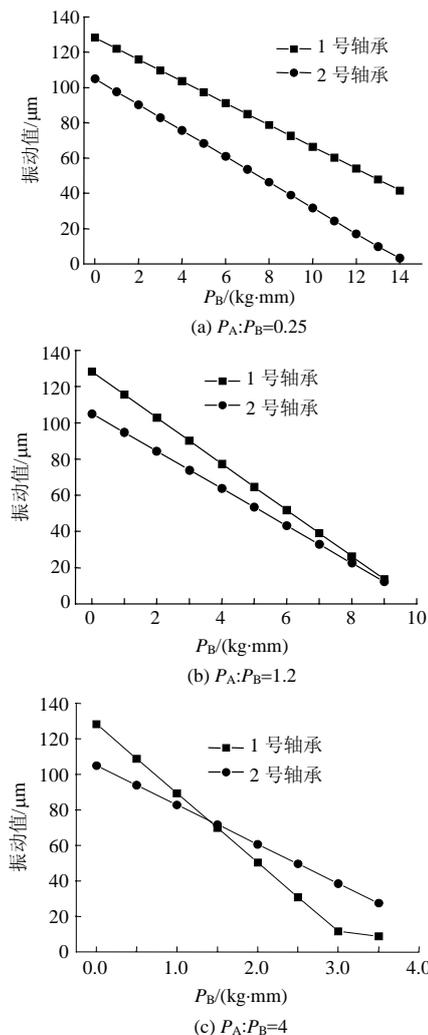


图 6 方案 I 采用不同控制方法的效果分析

Fig. 6 Balancing effect analysis of different control methods under scheme I

采用安装方案II时,平衡头A位于模型的4号节点,平衡头B仍位于7号节点;在叶轮上同样施加不平衡量 19.2 kg·mm(相位为 120°),工作转速达到 1 850 r/min时,计算 2 个轴承的振动值分别为 127 和 101 μm。当 P_A/P_B 取 2, 1.2 和 0.6 时,计算平衡效果如图 7 所示。

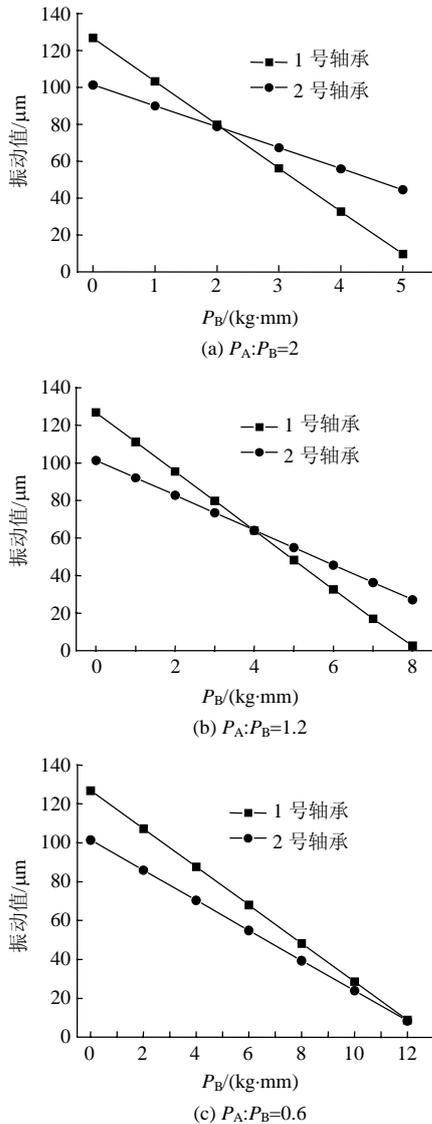


图 7 方案 II 采用不同控制方法的效果分析
Fig. 7 Balancing effect analysis of different control methods under scheme II

从图 6 和图 7 可以看出, 2 个平衡方案采用的最优配重比各不相同。安装方案I下, 采用 $P_A/P_B=0.25$ 和 $P_A/P_B=4$ 均无法将 2 个轴承的振动值同时控制到最低点; 而采用 $P_A/P_B=1.2$ 可将 2 个轴承振动值同时降到最低点, 因此其平衡效果最好。同样由图 7 曲线可以看出, 安装方案II采用 $P_A/P_B=0.6$ 效果最好。仿真结果为实验提供了参考和依据。

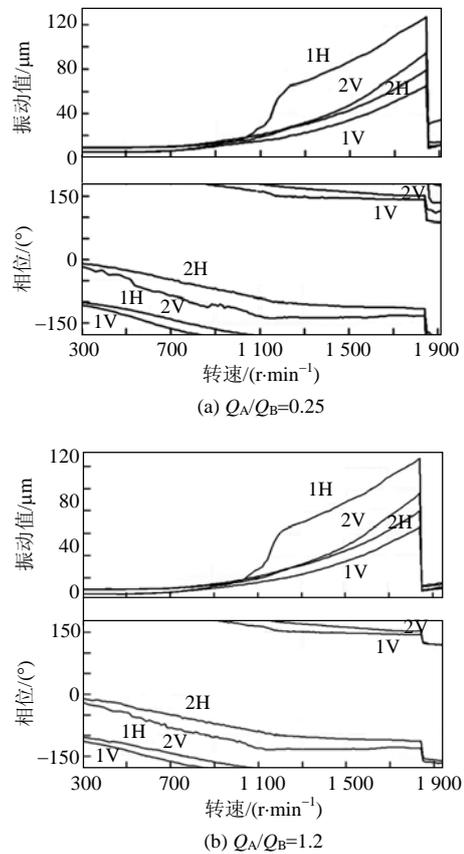
4 实验结果与讨论

4.1 方案 I 的平衡效果实验研究

在有限元分析的基础上, 对 2 个双平面平衡方案的平衡效果进行了实验比较研究。实验中, 通过控制 2 个平衡头喷液量比例 Q_A/Q_B , 达到控制配重比 P_A/P_B 的目的。

在实验转子的轮盘边缘的螺栓孔处添加 160 g 的螺钉, 提供的不平衡量为 19.2 kg·mm(相位为 120°)。2 个平衡头安装在方案I的位置, 运行转子到 1 850 r/min。转子在升速过程, 轴承上 4 个测点监测的振动值都十分明显地增大。其中, 1H测点的振动值达到了 122 μm(峰峰值, 下同), 2V测点的振动值达到了 94 μm, 可以看出不平衡量产生的振动已使转子处于危险的运行状态。

2 个平衡头喷液量比分别采用 $Q_A/Q_B=0.25$ 、 $Q_A/Q_B=1.2$ 和 $Q_A/Q_B=4$ 时, 主动平衡效果如图 8 所示。当采用 $Q_A/Q_B=0.25$ 和 $Q_A/Q_B=4$ 时, 1H测点在平衡后的振动分别为 32 和 47 μm, 残余振动仍较大; 而当喷液量比采用 $Q_A/Q_B=1.2$ 时, 4 个测点的振动都降低到了 20 μm 以下, 振动降幅均达到 84% 以上, 平衡效果明显提高。



(a) $Q_A/Q_B=0.25$

(b) $Q_A/Q_B=1.2$

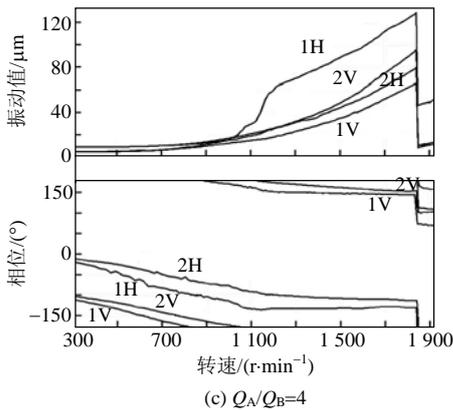


图 8 方案 I 采用不同喷液量比的平衡效果

Fig. 8 Balancing effect of different spraying quantity ratios under scheme I

4.2 方案 II 的平衡效果实验研究

为了进一步研究平衡头不同安装位置的最优喷液比及其平衡效果，将 2 个平衡头的安装位置调整到方案 II 的位置，轮盘所施加的不平衡量与方案 I 一致。在方案 II 下，2 个平衡头的喷液量之比采用 $Q_1/Q_2=2$ 、 $Q_1/Q_2=1.2$ 和 $Q_1/Q_2=0.6$ 三种情况。

主动平衡过程振动曲线如图 9 所示。从图中曲线可以看出，当喷液量选择在 $Q_1/Q_2=2$ 和 $Q_1/Q_2=1.2$ 时，平衡后 1H 测点仍分别残留有 50 和 38 μm 的振动；而当采用 $Q_1/Q_2=0.6$ 时，1H 测点的残余振动仅有 14 μm ，且其他各测点也均达到 20 μm 以下，平

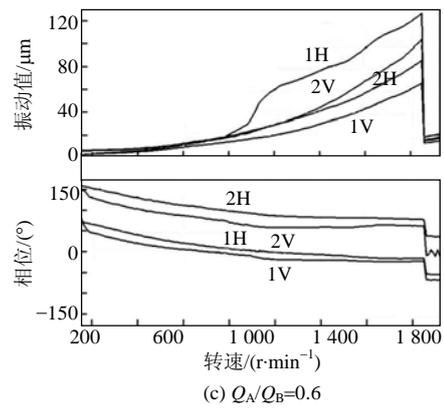


图 9 方案 II 采用不同喷液量比的平衡效果

Fig. 9 Balancing effect of different spraying quantity ratios under scheme II

衡效果有明显提高。

5 结论

本文分析了单盘转子单平面主动平衡的局限性，提出了一种液压型的双平面主动平衡方法。研究了平衡头在不同安装位置时，2 个平衡头配重的协调优化控制。

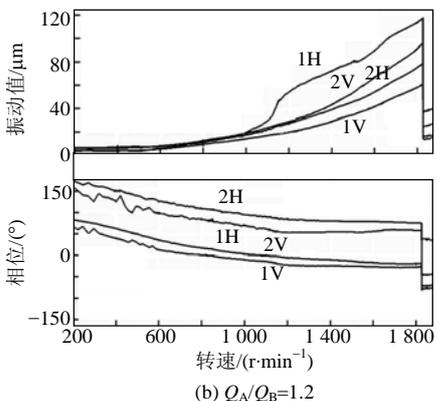
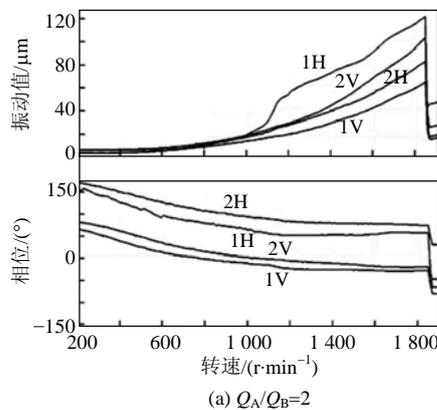
从有限元分析结果可以看出，平衡头不同的安装方案需要对配重比进行协调控制。方案 I 中 2 个平衡头的配重比采用 $P_A/P_B=1.2$ ，而方案 II 的配重比采用 $P_A/P_B=0.6$ ，均可以取得良好的平衡效果。2 个方案采用优化的控制方法时，均可将轴承处的振动峰值降低到 20 μm 以下。

实验结果表明，通过改变 2 个平衡头的喷液量可以有效地控制配重比，从而达到良好的平衡效果。在 2 个平衡方案下，采用合适的喷液量比均可以使轴承上 4 个测点的振动峰峰值降低到 20 μm 以下，测点处的最大振动降幅可达到 88.5%，平衡效果显著。所提出的双平面液压主动平衡技术可以有效地降低单盘转子的不平衡振动，因而研究结果对主动平衡技术在工业单盘转子上实现工程应用具有一定的指导意义。

本文采用的实验转子为刚性转子，而将该主动平衡技术应用于柔性转子时，需要考虑转子的模态振型特性，应避免将平衡头安装在对不平衡响应不敏感的振型节点处。另外，需要依据转子的振型特性，使 2 个平衡头的安装相位相互匹配，以免影响主动平衡技术的平衡效果。

参考文献

[1] 孔文梅, 阙红林. 电厂风机现场动平衡案例分析[J]. 汽轮机技术, 2005, 47(6): 460-461.



- Kong Wenmei, Que Honglin. Balance examples analysis of fan in power plant[J]. Turbine technology, 2005, 47(6): 460-461(in Chinese).
- [2] 陈明忠. 烟气轮机的振动超标及解决办法[J]. 炼油与化工, 2003, 14(3): 24-25.
Chen Mingzhong. Vibration standard exceeding and solution of fume turbine[J]. Refining chemical industry, 2003, 14(3): 24-25(in Chinese).
- [3] 沈佩华, 顾晃, 任浩仁. 关于引进型 300 MW 汽轮发电机组振动异常问题的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 267-271.
Shen Peihua, Gu Huang, Ren Haoren. A research of the vibration malfunction problem for imported type 300 MW turbogenerator sets [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 267-271(in Chinese).
- [4] 何成兵, 顾煌炯, 陈祖强. 质量不平衡转子的弯扭耦合振动分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 134-139.
He Chengbing, Gu Yujiong, Chen Zuqiang. Coupled flexural-torsion vibration of rotors with unbalance mass[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 134-139(in Chinese).
- [5] 朱传银, 姜和, 关凤志. 100 MW 汽轮发电机组轴系转子不平衡故障的诊断及治理技术[J]. 振动工程学报, 2004, 17(S): 434-436.
Zhu Chuanyin, Jiang He, Guan Fengzhi. Imbalance fault diagnosis and management for Czechic 110 MW steam turbine generator [J]. Journal of Vibration Engineering, 2004, 17(S): 434-436(in Chinese).
- [6] 焦映厚, 陈照波, 刘福利, 等. Jeffcott 转子一可倾瓦滑动轴承系统不平衡响应的非线性分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 227-232.
Jiao Yinhou, Chen Zhaobo, Liu Fuli, et al. Nonlinear analysis of unbalance response for Jeffcott rotor-tilting pad bearing system [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 227-232(in Chinese).
- [7] 何立东, 沈伟, 高金吉. 转子在线自动平衡及其工程应用研究的进展[J]. 力学进展, 2006, 36(4): 553-563.
He Lidong, Shen Wei, Gao Jinji. Advance of the rotor on-line active balancing technology and its engineering applications[J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(4): 553-563(in Chinese).
- [8] 邓旺群, 唐广, 高德平. 转子动力特性及动平衡研究综述[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2008, 21(2): 57-62.
Deng Wangqun, Tang Guang, Gao Deping. Research summary of rotor dynamic characteristics and dynamic balance[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2008, 21(2): 57-62(in Chinese).
- [9] 张涛, 朱焜秋. 无轴承永磁同步电机转子质量不平衡补偿控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(15): 33-37.
Zhang Tao, Zhu Huangqiu. Rotor's mass unbalance compensation control in bearingless permanent magnet-type synchronous motors [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(15): 33-37(in Chinese).
- [10] 欧阳红兵, 曾胜, 汪稀萱. 转子系统在线动平衡综述及展望[J]. 机械强度, 1997, 19(4): 20-24.
Ouyang Hongbing, Zeng Sheng, Wang Xixuan. Summary and prospects for automated balancing on line of rotor system[J]. Journal of Mechanical Strength, 1997, 19(4): 20-24(in Chinese).
- [11] Rajalingham C, Bhat R B. Complete balancing of a disk mounted on a vertical cantilever shaft using a two ball automatic balancer [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 290(1): 169-191.
- [12] 谭青, 周铁, 黄秀祥. 球式自动平衡装置的数值仿真与实验研究[J]. 噪声与振动控制, 2008, 28(3): 142-145.
Tan Qing, Zhou Tie, Huang Xiuxiang. Numerical simulation and experimental study of an automatic ball balancer[J]. Noise and Vibration Control, 2008, 28(3): 142-145(in Chinese).
- [13] 孙宝东, 须根法, 黄文虎, 等. 转子自动平衡技术的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 1995, 15(5): 317-322.
Sun Baodong, Xu Genfa, Huang Wenhui, et al. Experimental study of automatic balancing technique of rotor[J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(5): 317-322(in Chinese).
- [14] Moon J D, Kim B S, Lee S H. Development of the active balancing device for high-speed spindle system using influence coefficients [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(9): 978-987.
- [15] Hredzak B, Guo G X. Investigation of the feasibility of active balancing of hard disk drives[J]. Mechatronics, 2004, 14(7): 853-859.
- [16] Hredzak B, Guo G X. New electromechanical balancing device for active imbalance compensation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 294(4): 737-751.
- [17] 欧阳红兵, 赵永彬, 汪稀萱. 电磁式自动平衡头在线动平衡实验及应用研究[J]. 振动与冲击, 2002, 21(1): 24-26.
Ouyang Hongbing, Zhao Yongbin, Wang Xixuan. Experiments and applications of online auto-balancing with electromagnetic auto-balancing head[J]. Journal of Vibration and Shock, 2002, 21(1): 24-26(in Chinese).
- [18] 李晓冬, 王立威, 冀清发. 径注式砂轮在线液体平衡装置的研究[J]. 兵工学报, 2004, 25(3): 326-329.
Li Xiaodong, Wang Liwei, Ji Qingfa. A study on radial online liquid equilibrators for the grinding wheel[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(3): 326-329(in Chinese).
- [19] 熊四昌, 金振峰, 孙建辉. 在线动平衡调节器的改进快速寻优策略[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2008, 42(8): 1415-1418.
Xiong Sichang, Jin Zhenfeng, Sun Jianhui. Improved fast optimization strategy for online balancing adjustor[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 42(8): 1415-1418(in Chinese).
- [20] 何立东, 沈伟, 刘锦南, 等. 双平面和单平面主动平衡控制转子振动的对比实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 106-109.
He Lidong, Shen Wei, Liu Jinnan, et al. Study on the contrast experiments between double and single plane active balancing to solve the vibration problem for the rotor[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23): 106-109(in Chinese).
- [21] 汪振威, 何立东, 苏奕儒. 液压自动平衡技术在风机转子上的应用[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(5): 86-90.
Wang Zhenwei, He Lidong, Su Yiru. Application of hydraulic automatic balancing technology on a fan rotor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(5): 86-90(in Chinese).



苏奕儒

收稿日期: 2009-06-23.

作者简介:

苏奕儒(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事主动平衡技术及转子的振动控制方面的研究, syr_142@163.com;

何立东(1963—), 男, 研究员, 主要从事叶轮机械结构设计、主动平衡和密封技术的研究;

汪振威(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事转子系统的建模仿真及振动控制的研究;

常健(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事旋转机密封技术及自愈控制的研究。

(责任编辑 车德竞)