

拉杆转子临界转速随拉紧力变化规律试验*

何 鹏, 刘占生, 黄飞淋, 刘镇星

(哈尔滨工业大学动力机械振动及噪声控制技术研究所 哈尔滨, 150001)

摘要 为了研究拉杆转子临界转速随拧紧力的变化规律,搭建了拉紧力测量试验台,测量拉杆拉紧力随拧紧力矩的变化。设计并加工了模化拉杆转子,搭建了拉杆转子转动试验台,测量在不同拉紧力下拉杆转子的动力学响应。根据 5 组不同拧紧力矩下的动力学响应得到了拉杆转子前两阶临界转速,分析了临界转速随拉紧力的变化规律,并与理论计算结果进行了对比分析。结果表明,随着拉紧力的增加,拉杆转子在升速和降速过程中的前两阶临界转速随着拉紧力的增加而增加。与理论计算结果对比发现,理论模型计算的前两阶临界转速与试验结果比较接近,但仍需要进一步改进以更好地反映拉杆拉紧力对临界转速的影响。

关键词 拉杆转子; 拉紧力; 临界转速; 动力学试验

中图分类号 TK447; TK474.8; TH13

引 言

拉杆转子是燃气轮机常见的转子结构形式之一。拉杆转子由拉杆将各级轮盘组装而成,具有加工方便、重量轻和易于设计冷却通道等优点,在重型发电燃气轮机和航空发动机中应用广泛。拉杆转子结构的非连续性使得其动力学建模及分析较常规转子复杂。轮盘间的接触特性和拉杆的拉紧力对拉杆转子动力学特性有重要影响。

理论上,许多学者建立了拉杆转子动力学模型,分析了其动力学特性。饶柱石等^[1-3]采用粗糙表面弹性接触模型来研究轮盘间的接触刚度,研究了接触刚度随拉紧力的变化趋势,分析了拉杆转子的动力学特性。袁奇等^[4-7]在有限元模型中引入接触刚度,分析了拉杆转子的弯曲和扭转动力学特性。王艾伦等^[8-10]建立考虑接触的拉杆转子键合图模型,分析了拉杆转子弯曲、轴向和扭转振动特性。何鹏等^[11-12]分析了粗糙表面弹性、弹塑性接触对拉杆转子弯曲振动特性的影响。李辉光等^[13]通过有限元模拟粗糙表面弹塑性接触,研究了法向接触刚度和切向接触刚度对拉杆转子临界转速的影响。从这些研究可以看出,拉杆转子拉紧力是决定轮盘间接触刚度的重要参数,影响拉杆转子动力学特性。此外,拉紧力还可能引起拉杆转子非线性动力学特

性^[14-16]。鉴于此,有的学者研究拉杆转子拉紧力的计算方法^[17-18]以保证拉杆转子可靠稳定运行。

目前,拉杆转子动力学特性的试验研究主要是通过锤击法测量拉杆转子的固有频率^[1-4,6-10,19],以研究拉紧力对拉杆转子振动特性的影响。锤击法能够反映拉紧力对拉杆转子静态振动特性的影响,但未能真实反映对拉杆转子临界转速的影响。唐治平^[20]测量了模型拉杆转子在不同拉紧力下的临界转速,但由于临界转速变化较小,无法很好地体现拉杆转子临界转速的变化趋势。

笔者测量了不同拧紧力矩下的拉杆拉紧力,通过拉杆转子的振动响应研究拉杆转子临界转速随拉紧力的变化规律。

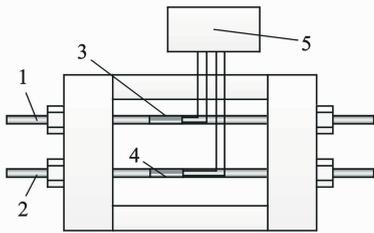
1 试验台简介

试验主要包括拉杆转子组装和转动两部分。由于在拉杆转子组装中,拉紧力是通过拧紧螺母施加,因此需要测定不同拧紧力矩下拉杆的拉紧力。拉杆转子的动力学响应是在转动试验中测得,进而得到拉杆转子的临界转速。

1.1 拉紧力与拧紧力矩试验

拉杆的拉紧力可以通过拉紧过程中的轴向应变测量,测量原理如图 1 所示。为了消除环境温度对应变

* 国家高新技术研究发展计划(“八六三”计划)资助项目(2008AA05A302)
收稿日期:2012-12-12;修回日期:2013-01-10



1-辅助拉杆(未拉伸);2-测试拉杆;3-温度补偿应变片;4-测量应变片;5-静态应变仪

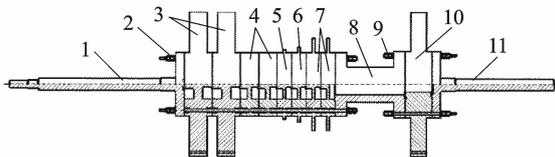
图 1 拉紧力测试原理简图

Fig. 1 Illustration of tighten force measurement test rig

测量的影响,在辅助拉杆上设置了温度补偿应变片。

1.2 拉杆转子转动试验台

设计的拉杆转子模型结构如图 2 所示。模型拉杆转子包括压气机部分、连接段和涡轮部分。压气机部分包括压气机端轴头、两级轮盘 a、两级轮盘 b、一级轮盘 c、一级轮盘 d 和两级轮盘 e,由 15 个周向均布的长拉杆 2 与连接段 8 组合在一起。涡轮部分包括一级轮盘 f 和涡轮端轴头,通过 18 个周向均布的短拉杆与连接段组合。整个模型拉杆转子质量为 427.6 kg。组装后的拉杆转子实物如图 3 所示。



1-压气机端轴头;2-长拉杆;3-轮盘 a;4-轮盘 b;5-轮盘 c;6-轮盘 d;7-轮盘 e;8-连接段;9-短拉杆;10-轮盘 f;11-涡轮端轴头

图 2 拉杆转子模型结构图

Fig. 2 Schematic of the tie-bolted rotor structure

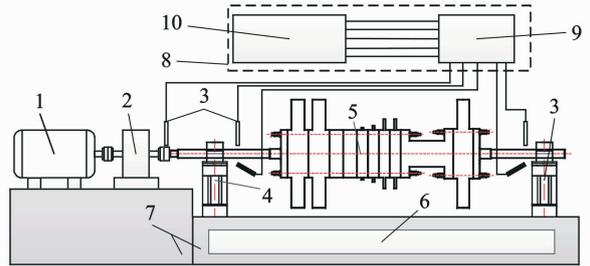


图 3 模型拉杆转子实物图

Fig. 3 Model tie-bolted rotor

拉杆转子转动试验台布置如图 4 所示。拉杆转子由两个 LBP 型四瓦块可倾瓦轴承支承。通过变频器控制电机转速,动力经过齿轮箱后驱动拉杆转子转动。拉杆转子的转速及振动信号由电涡流位移传感器采集,经过信号前置放大器后输入工控机,以

实现对转速和振动信号的实时监测和分析。



1-电机;2-增速齿轮箱;3-电涡流位移传感器;4-可倾瓦轴承及轴承座;5-拉杆转子模型;6-滑油系统;7-试验基础平台;8-信号采集及分析系统;9-信号前置放大器;10-工控机

图 4 拉杆转子转动试验台简图

Fig. 4 Schematic of tie-bolted rotor test rig

2 试验步骤

2.1 拉杆拉紧力与拧紧力矩关系试验

设定力矩扳手力矩,拧紧螺母。当达到设定力矩时,读取拉杆的轴向拉伸应变。在不同拧紧力矩下测量拉杆的拉伸应变。

2.2 拉杆转子组装

拉杆转子组装是将各部件按照顺序装配起来,通过拉紧拉杆而组合成转子。在拉杆转子组装过程中,各个拉杆的拉紧力需要保持一致。为了减小重力及拉杆拧紧顺序对拉紧力的影响,试验采用以下 3 个措施。

1) 立式施加拉紧力:将拉杆转子轴头和轮盘部件竖直装配,然后拧紧拉杆螺母。拉杆转子的装配原理及装配过程如图 5 所示。

2) 拉杆拧紧顺序:模型拉杆转子在压气机部分具有 15 个长拉杆,在涡轮部分具有 18 个短拉杆。为了减小拧紧顺序对拉紧力的影响,采用对称交叉顺序逐次拧紧各拉杆。图 6 为压气机部分长拉杆拧紧顺序编号。

3) 分步拧紧:在拧紧拉杆过程中,拧紧力矩是逐步施加的。假设设定的拧紧力矩为 M ,在拧紧过程中,依次施加 $M/3, 2M/3$ 和 M 的拧紧力矩,最终达到设定拉紧力矩。

按照上述方法依次拧紧压气机部分的长拉杆和涡轮部分的短拉杆,完成拉杆转子的组装。

2.3 拉杆转子转动试验

将拉杆转子安装在转动试验台上进行轴系对中

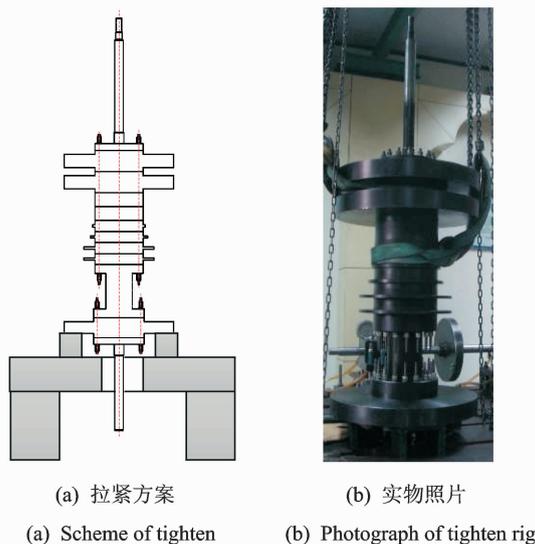


图5 拉杆转子组装

Fig. 5 Assemble of tie-bolted fastener rotor

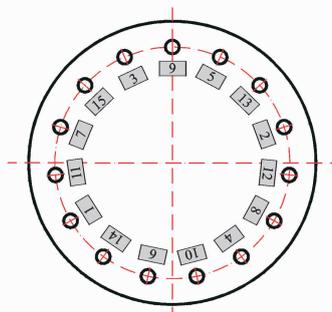
(a) 编号
(a) Number of bolt(b) 实物照片
(b) Photograph of number in test rig

图6 压气机部分长拉杆拧紧顺序

Fig. 6 Sequence of tightening the long rods in compressor section

及转子动平衡。通过变频器控制转速,测量拉杆转子的振动参数。改变拉杆转子的拧紧力矩,测量不同拉紧力下拉杆转子的振动特性。

3 试验结果

3.1 拉杆拉紧力与拧紧力矩关系

拉紧力随拧紧力矩的变化情况如图7所示。可以看出,拉紧力随着拧紧力矩的增加而增加,且拉紧力增加逐渐变缓。由于试验用拉杆螺纹在拧紧力矩为 $27.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时发生脱扣,所以试验测量得到的拉紧力是接近螺纹的极限载荷。

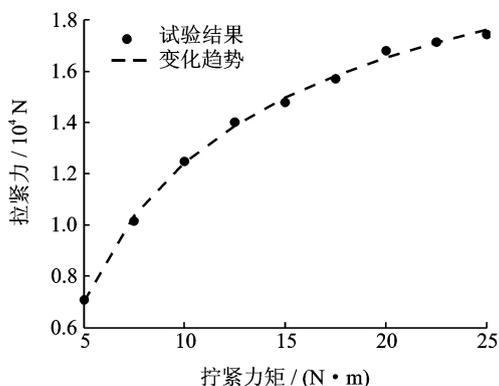


图7 拉紧力随拧紧力矩的变化

Fig. 7 Variation of tighten force with torque

3.2 拉杆转子的振动响应

转动试验可以测得拉杆转子在不同转速下的振动幅值。通过振动响应的峰值得到拉杆转子轴系的临界转速。

在升速和降速过程中,拉杆转子的振动特性稍有不同。图8为在 $17.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 拧紧力矩下,拉杆转子在升速过程中的振幅随转速的变化曲线。可见,在转速为 1091 r/min 时,拉杆转子轴系达到一阶临界转速,最大振幅为 $204 \mu\text{m}$;在转速为 2803 r/min 时,

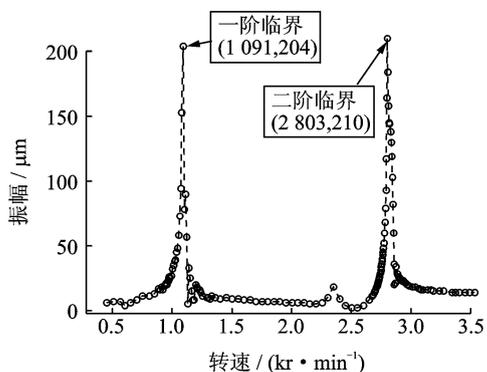


图8 拉杆转子轴系升速阶段振动幅值

Fig. 8 Vibration amplitude of tie-bolted rotor during speeding up

拉杆转子轴系达到二阶临界转速,最大振幅为210 μm。

图9为在17.5 N·m拧紧力矩下降速过程中的振幅变化曲线。在转速为1 044 r/min时,拉杆转子轴系达到一阶临界转速,最大振幅为181 μm;在转速为2 734 r/min时,拉杆转子轴系达到二阶临界转速,最大振幅为190 μm。

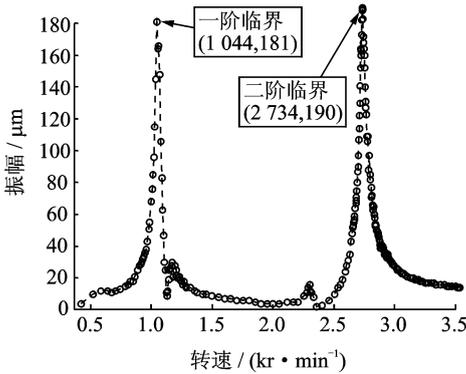


图9 拉杆转子轴系降速过程中振幅

Fig. 9 Vibration amplitude of tie-bolted rotor during speeding down

从振动响应特征可以看出,拉杆转子轴系在升速阶段的临界转速要稍大于降速阶段。这是由于阻尼、轴系振动响应随转速的变化存在一定的滞后,引起升速阶段临界转速偏大,而降速阶段临界转速偏小。

3.3 拉杆转子临界转速随拉紧力的变化

分别测量拉杆转子在拧紧力矩为15, 17.5, 20, 22.5和25 N·m这5种工况下的前两阶临界转速。不同拉紧力下拉杆转子在升速阶段的前两阶临界转速变化如图10,11所示。随着拉紧力的增加,拉杆转子前两阶临界转速逐渐增大。在拧紧力矩从15 N·m增加到25 N·m的过程中,拉杆转子的一阶临界转速从1 080 r/min左右增加到1 110 r/min左右,二阶临界转速从2 760 r/min左右增加到2 820 r/min左右。

在降速过程中,拉杆转子在不同拉紧力下的前两阶临界转速变化如图12,13所示。在拉杆拧紧力矩从15 N·m增加到25 N·m的过程中,降速阶段的一阶临界转速从1 030 r/min左右增加到1 065 r/min左右;二阶临界转速从2 700 r/min左右增加到2 780 r/min左右。

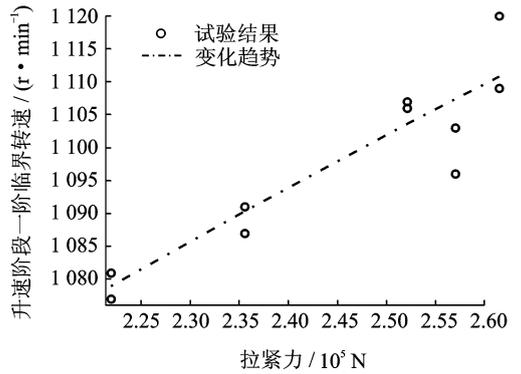


图10 不同拉紧力下降速阶段一阶临界转速变化
Fig. 10 The variation of the first critical speed with tighten force during speeding up

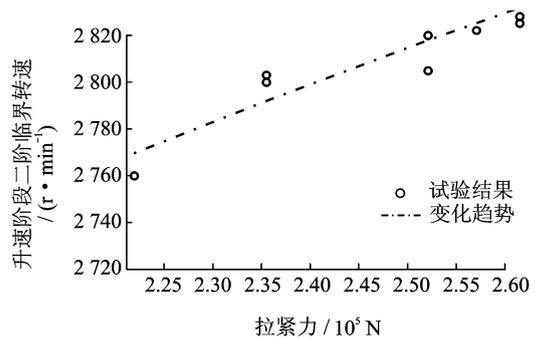


图11 不同拉紧力下降速阶段二阶临界转速变化
Fig. 11 The variation of the second critical speed with tighten force during speeding up

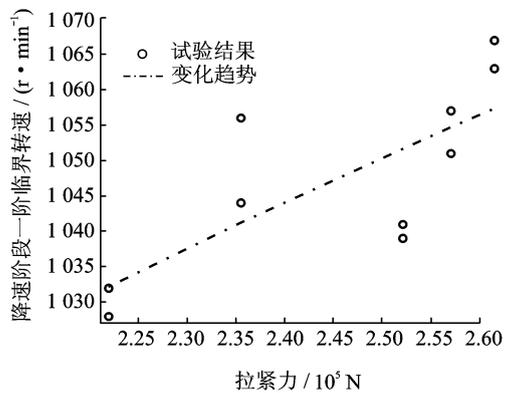


图12 不同拉紧力下降速阶段一阶临界转速变化
Fig. 12 The variation of the first critical speed with tighten force during speeding down

3.4 结果对比分析

试验测得的拉杆转子的临界转速与基于弹性接触的拉杆转子有限元模型^[11]计算结果进行对比,如图14,15所示。图14,15为前两阶临界转速的试验结果与文献[11]的计算结果对比。可见,第1阶临界转速的理论计算结果偏高,而第2阶临界转速与

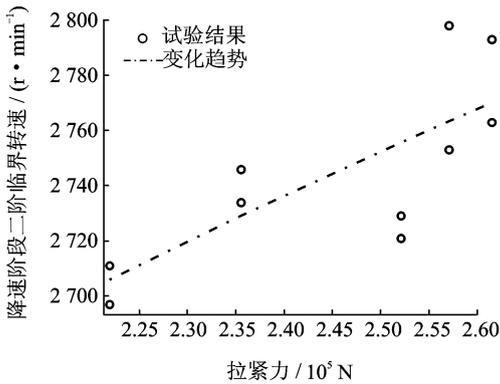


图 13 不同拉紧力下降速阶段二阶临界转速变化

Fig. 13 The variation of the second critical speed with tighten force during speeding down

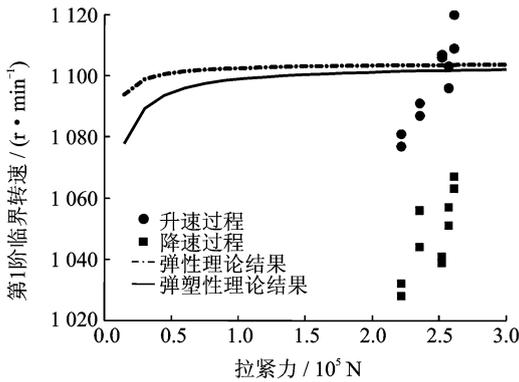


图 14 第 1 阶临界转速对比

Fig. 14 Comparison of the first critical speeds

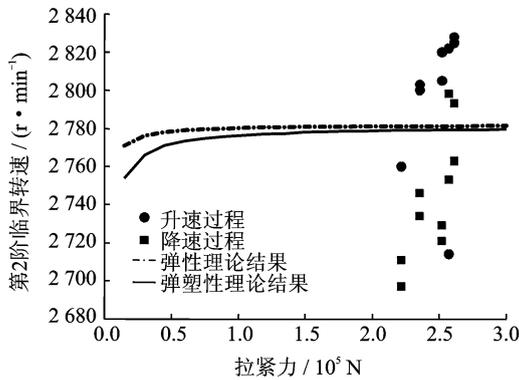


图 15 第 2 阶临界转速对比

Fig. 15 Comparison of the second critical speeds

试验结果比较接近。整体上理论模型与试验较为接近,但不能较好地反映临界转速随着拉紧力的变化趋势。在试验的拉紧力范围内,理论计算的临界转速变化偏小,变化量远小于试验结果。这可能是由于文献[11]采用弹性接触理论处理轮盘间的接触,得到的接触刚度整体偏大,使得临界转速随拉紧力的变化趋势不明显。可见,为了体现拉杆转子的临

界转速随拉紧力的变化,有必要改进拉杆转子理论计算模型。

4 结 论

1) 拉杆的拉紧力随着拧紧力矩逐渐增加。由于较为接近螺纹极限载荷,拉紧力随着拧紧力矩的增加逐渐变缓。

2) 由于阻尼的存在,拉杆转子的前两阶临界转速在升速和降速过程中有一定差别,但都随着拉紧力的增加而增加。

3) 基于弹性接触理论的拉杆转子模型计算的临界转速与试验结果接近,但在拉紧力范围内不能较好地体现拉杆转子临界转速随着拉紧力的变化情况,因此有必要进一步改进拉杆转子模型。

参 考 文 献

- [1] 汪光明,饶柱石,夏松波,等. 拉杆转子力学模型的研究[J]. 航空学报, 1993(8): 419-423.
Wang Guangming, Rao Zhushi, Xia Songbo, et al. The analysis of mechanical model of rod fastening rotor[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 1993(8): 419-423. (in Chinese)
- [2] 饶柱石,夏松波,汪光明. 粗糙平面接触刚度的研究[J]. 机械强度, 1994(2): 72-75.
Rao Zhushi, Xia Songbo, Wang Guangming. Research on the contact stiffness of nominal flat rough surfaces [J]. Journal of Mechanical Strength, 1994(2): 72-75. (in Chinese)
- [3] 饶柱石,夏松波,汪光明. 组合式特种转子振动模态的实验研究与计算[J]. 振动与冲击, 1996(1): 68-70.
Rao Zhushi, Xia Songbo, Wang Guangming. Experimental modal analysis and computation for special kind of composite rotor system [J]. Journal of Vibration and Shock, 1996(1): 68-70. (in Chinese)
- [4] Yuan Qi, Gao Rui, Feng Zengping, et al. Analysis of dynamic characteristics of gas turbine rotor considering contact effects and pre-tightening force[C]// ASME Turbo Expro. Berlin, Germany: [s. n.], 2008.
- [5] 高锐,袁奇,高进. 燃气轮机拉杆转子有限元模型研究及临界转速计算[J]. 热能动力工程, 2009(3): 305-308.
Gao Rui, Yuan Qi, Gao Jin. A study of a finite element model for gas turbine tie-rod rotor and its critical speed calculation [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2009(3): 305-308. (in Chinese)

- [6] Gao Jin, Yuan Qi, Li Pu, et al. Effects of bending moments and pretightening forces on the flexural stiffness of contact interfaces in rod-fastened rotors[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 134(10): 1-8.
- [7] 高进,袁奇,李浦,等. 燃气轮机拉杆转子考虑接触效应的扭转振动模态分析[J]. 振动与冲击, 2012(12): 9-13.
Gao Jin, Yuan Qi, Li Pu, et al. Torsional vibration modal analysis for a rod-fastened gas turbine considering contact effects [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012(12): 9-13. (in Chinese)
- [8] 王艾伦,骆舟. 拉杆转子轴向振动的动力学模型[J]. 中国机械工程, 2009(13): 1524-1527.
Wang Ailun, Luo Zhou. Research on rod fastening rotor dynamics-axial vibration[J]. China Mechanical Engineering, 2009(13): 1524-1527. (in Chinese)
- [9] 王艾伦,骆舟. 拉杆转子扭转振动研究[J]. 振动与冲击, 2009(5): 165-168.
Wang Ailun, Luo Zhou. Study on rod fastening rotor's torsional vibration [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009(5): 165-168. (in Chinese)
- [10] 章圣聪,王艾伦. 盘式拉杆转子的振动特性研究[J]. 振动与冲击, 2009(4): 117-120.
Zhang Shengcong, Wang Ailun. Analysis of vibration characteristics of a disk-rod-fastening rotor[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009(4): 117-120. (in Chinese)
- [11] 何鹏,刘占生,张广辉,等. 分布拉杆转子动力学建模与分析[J]. 汽轮机技术, 2010(1): 4-8.
He Peng, Liu Zhansheng, Zhang Guanghui, et al. Dynamic modeling and analysis of distributed rod fastening rotor[J]. Turbine Technology, 2010(1): 4-8. (in Chinese)
- [12] He Peng, Liu Zhansheng, Zhang Guanghui, et al. Rotor dynamic analysis of tie-bolt fastened rotor based on elastic-plastic contact[C]// ASME Turbo Expo 2011. Vancouver, Canada:[s. n.], 2011.
- [13] 李辉光,刘恒,虞烈. 考虑接触刚度的燃气轮机拉杆转子动力特性研究[J]. 振动与冲击, 2012(7): 4-8.
Li Huiguang, Liu Heng, Yu Lie. Dynamic characteristics of a rod fastening rotor for gas turbine considering contact stiffness [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012(7): 4-8. (in Chinese)
- [14] 李辉光,刘恒,虞烈. 周向拉杆转子系统非线性动力行为及稳定性[J]. 机械工程学报, 2011, 47(23): 83-91.
Li Huiguang, Liu Heng, Yu Lie. Nonlinear dynamic behaviors and stability of circumferential rod fastening rotor system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(23): 83-91. (in Chinese)
- [15] 钱征文,程礼,陈卫,等. 盘式拉杆转子双稳态振动特性[J]. 航空动力学报, 2011(7): 1563-1568.
Qian Zhengwen, Cheng Li, Chen Wei, et al. Analysis on bistable response of a disk-rod-fastening rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2011(7): 1563-1568. (in Chinese)
- [16] 程礼,钱征文,陈卫,等. 结构参数对拉杆转子双稳态振动特性的影响[J]. 振动、测试与诊断, 2012(5): 767-772.
Cheng Li, Qian Zhengwen, Chen Wei, et al. Influence of structural parameters on the bistable response of a disk-rod-fastening rotor [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012(5): 767-772. (in Chinese)
- [17] 郭飞跃,邓旺群,成晓鸣. 涡轴发动机组合压气机转子轴向预紧力计算方法[J]. 航空动力学报, 2004(5): 623-629.
Guo Feiyue, Deng Wangqun, Chen Xiaoming. A method for calculating axial preload of turbo-shaft engine combined compressor rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2004(5): 623-629. (in Chinese)
- [18] 李辉光,刘恒,虞烈. 周向均布拉杆转子预紧力的确定[J]. 航空动力学报, 2011(12): 2791-2797.
Li Huiguang, Liu Heng, Yu Lie. Determination of preload force of circumferential distributed rod fastening rotor[J]. Journal of Aerospace Power, 2011(12): 2791-2797. (in Chinese)
- [19] 施丽铭,张艳春. 燃气轮机转子模态试验与分析[J]. 燃气轮机技术, 2007, 20(2): 47-49.
Shi Liming, Zhang Yanchun. Model test and analysis of gas turbine rotor [J]. Gas Turbine Technology, 2007, 20(2): 47-49. (in Chinese)
- [20] 唐治平. 拉杆转子振动特性与故障模拟分析[D]. 武汉:华中科技大学, 2007.



第一作者简介:何鹏,男,1983年11月生,博士研究生。主要研究方向为发动机强度与振动、转子热弹耦合动力学。曾发表《考虑杨氏模量随轴向温度分布变化的转子有限元建模方法研究》(《振动与冲击》2012年第31卷第14期)等论文。
E-mail: hepey@163.com