

文章编号: 1000-8241(2020)05-0565-05

中俄东线唐山压气站励磁机振动故障诊断与处理

黄恩涛¹ 王猛² 张晏博¹ 王春明¹ 刘超²

1. 中国石油管道公司; 2. 中国石油管道压缩机组维修中心

摘要: 中俄东线天然气管道工程唐山压气站在投产前对3[#]电动机进行空载调试的过程中,当电动机运行至3 120 r/min时,励磁机端振幅快速上升并导致停机。为了解决这一问题,采用振动分析系统对励磁机端的振动图谱进行分析,判断故障原因为:励磁机端轴瓦负荷过高,导致励磁机转子局部负荷过高或局部摩擦,引起转子热弯,产生新的不平衡量而导致停机。拆卸轴瓦可见局部摩擦痕迹,验证了上述分析结果的正确性。通过调节励磁机端轴承底座高度,降低轴瓦负荷,消除了励磁机端振幅快速上升的现象,采用矢量图法对励磁机端进行平衡优化,使励磁机端振动满足API 546-2008《无刷同步电机:500 kVA及更高电压》的规定。采用该方法解决了唐山压气站3[#]电动机励磁机端振动过高的问题,为中俄东线天然气管道安全生产提供了保障。(图6,表1,参22)

关键词: 励磁机; 负荷; 热弯; 不平衡; 矢量图法

中图分类号: TE974

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.05.012

Vibration fault diagnosis and handling of exciter in Tangshan compressor station of China–Russia Eastern Gas Pipeline

HUANG Entao¹, WANG Meng², ZHANG Yanbo¹, WANG Chunming¹, LIU Chao²

1. PetroChina Pipeline Company; 2. PetroChina Pipeline Compressor-Set Maintenance, Repair & Overhaul Center

Abstract: In the no-load test of the 3[#] motor in Tangshan compressor station of China–Russia Eastern Gas Pipeline Project before commissioning, the amplitude of exciter end rose rapidly and resulted in the shutdown when the operating speed reached 3 120 r/min. To solve this problem, the vibration analysis system was used to analyze the vibration spectrum of the exciter end. It was determined that the fault was caused by the high load upon the bearing bush at the exciter end, which further led to the high local load or local friction of the exciter rotor, induced the hot bending of rotor, caused the new unbalance, and further resulted in shutdown. Local friction marks was found during removal of the bearing bush, and the above analysis conclusion was verified. Through changing the height of bearing base at the exciter end, the bearing bush load was lowered and the rapid amplitude rise at the exciter end was eliminated. The exciter end was balanced and optimized by vector diagram method to ensure that the vibration at the exciter end can meet the requirements of *brushless synchronous machines - 500 kVA and larger* (API 546-2008). Thereafter, the problem of high vibration at the exciter end of the 3[#] motor in Tangshan compressor station has been quickly solved, and the safe operation can be ensured. (6 Figures, 1 Table, 22 References)

Key words: exciter, load, hot bending, unbalance, vector diagram method

在长距离输油气管道生产运行过程中,电动机对于压缩机组、输油泵的安全运行及油气的稳定输送具有重要作用^[1-2],中俄东线天然气管道工程(简称中俄东线)^[3-4]唐山压气站在投产前调试过程中,3[#]电动机在3 120 r/min转速下励磁机端振幅快速上升而导致停机。为此,采用振动分析系统^[5-6]对励磁机端的振动情况进行深入分析,用以指导故障处理,并实现故障的

快速排除,为中俄东线的投产运行提供保障。

1 电动机参数及故障描述

中俄东线唐山压气站3[#]电驱离心式压缩机组防爆交流调速同步电动机(表1)由主电动机和励磁机组成。自2019年9月安装以来,在历次数据采集过程

表1 中俄东线唐山压气站3#电驱离心式压缩机组电动机参数

生产厂家	型号	最低工作转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	额定转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	一阶临界转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	二阶临界转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	轴承类型
上海电气集团股份有限公司	TZW 20 000-2	3 120	4 800	2 150	2 602	滑动轴承

中,电动机与压缩机均未联接。电动机的励磁机端布设2个振动监测点,编号分别为V1、V2,分别位于励磁机端 x 方向及 y 方向(图1)。

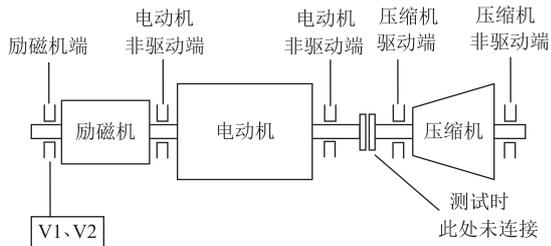


图1 中俄东线唐山压气站3#电驱离心式压缩机组振动监测点布设图

中俄东线唐山压气站投产前对3#电动机进行空载调试,励磁机端振动异常(图2):电动机启动后,提速至1 200 r/min 进行暖机;随后将电动机转速提升至3 120 r/min 并保持不变,提速期间,测得励磁机的实际共振频率为2 880 r/min ;电动机保持在3 120 r/min 运行期间,励磁机 x 方向测点(振动监测点V1)转子振幅由49 μm 迅速升至150 μm ,同时 y 方向测点(振动

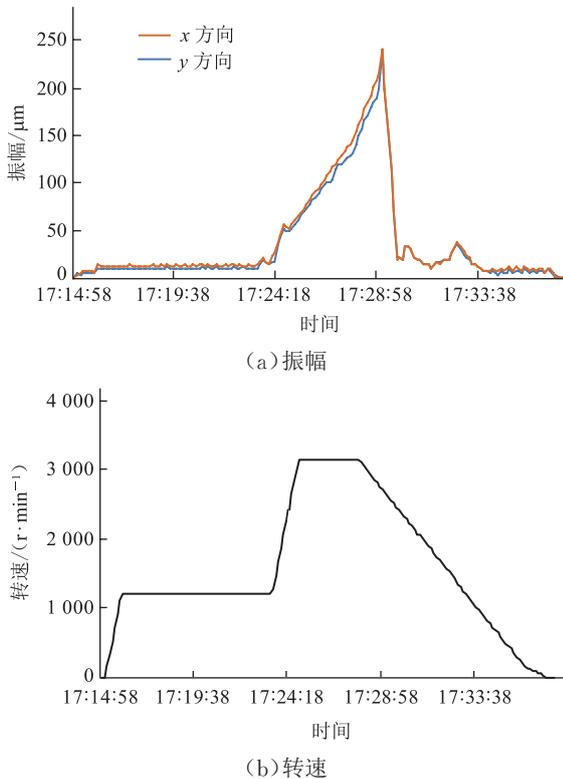


图2 中俄东线唐山压气站3#电驱离心式压缩机组电动机故障处理前励磁机转子振幅、转速随时间的变化曲线

监测点V2)转子振幅由53 μm 迅速升至147 μm ,超过电动机振动保护值(125 μm)而停机;在停机过程中,励磁机端 x 、 y 方向振幅持续上升,两振动测点均升至最高243 μm 后开始下降。经过多次启机试验,当电动机转速保持在3 120 r/min 时,励磁机端V1测点、V2测点均出现振幅快速上升的现象并导致停机,致使电动机在最低工作转速下无法正常运行,不能满足生产需求。

2 故障诊断与处理

2.1 故障诊断

对比不同转速下励磁机振动全频谱图(图3)可见,当电动机以3 120 r/min 运行时,相对于以1 200 r/min 运行时振幅明显上升,且上升的成分以1倍频为主。根据3 120 r/min 转速下励磁机端振动上升时的轴心轨迹(图4)可见,其呈较规则的椭圆形,由此可以推测是励磁机转子的不平衡造成了其振幅较高^[7-9]。

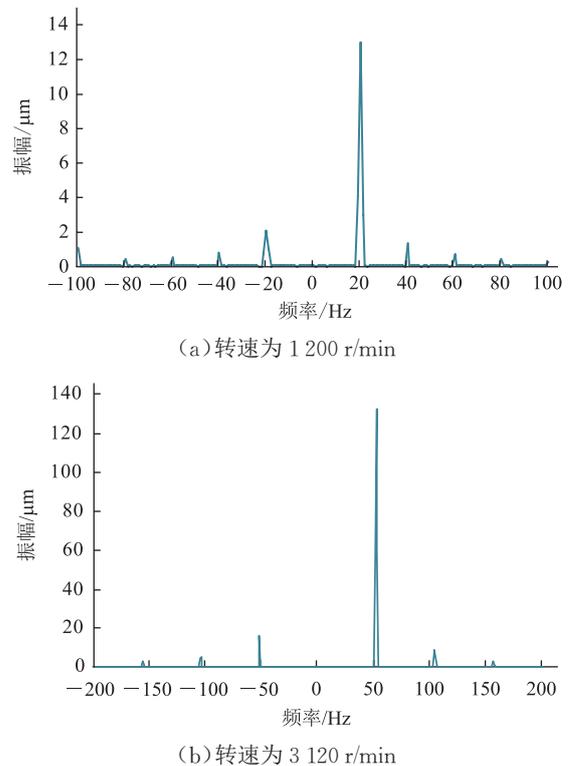


图3 中俄东线唐山压气站3#电驱离心式压缩机组电动机不同转速下励磁机端振动全频谱图

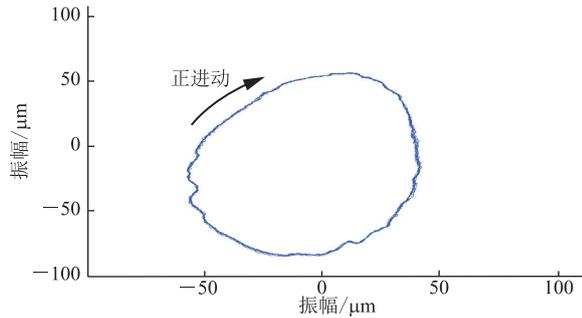


图4 中俄东线唐山压气站3[#]电驱离心式压缩机组电动机励磁机端振动上升时的轴心轨迹图

针对3 120 r/min 转速下励磁机端振动不断升高且升高成分以1倍频为主,触发停机后振幅继续上升,即不平衡量不断增长的情况,分析故障原因如下:

(1) 3 120 r/min 为机组工作的最低转速,与励磁机的共振频率2 880 r/min 相比,相差不足15%,使得励磁机对不平衡的响应较为敏感^[10-14]。

(2) 在现场调试过程中,多次对励磁机端轴承底座进行垫高操作,由此不但造成轴承、轴瓦负载过重,还极易导致转子与轴瓦发生碰摩。

(3) 电动机以3 120 r/min 转速运行,励磁机端的振动成分以1倍频为主,此时,励磁机转子沿轴心轨迹的振动周期 T_1 与励磁机转子的旋转周期 T_2 基本相等。若励磁机端轴瓦局部负荷过高或转子与轴瓦发生碰摩,则励磁机转子负荷过高或摩擦位置较为稳定(图5),使转子局部温度过高,形成热弯^[15-18]。

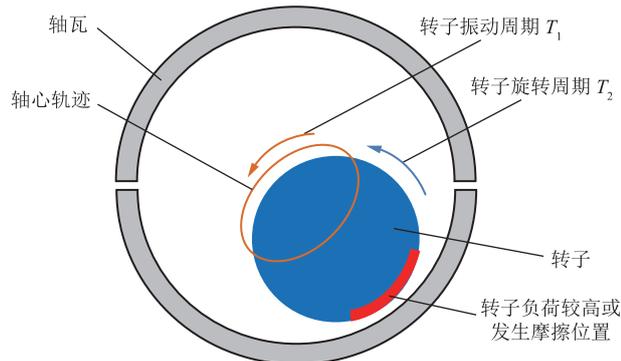


图5 中俄东线唐山压气站3[#]电驱离心式压缩机组电动机励磁机转子局部热弯机理示意图

(4) 热弯形成后,励磁机转子产生新的不平衡,导致励磁机端振幅上升,且当励磁机在共振转速附近运行时,振幅被进一步放大;振幅增大后,将加大转子的局部负荷且更易引发转子与轴瓦的局部碰摩,从而加剧转子热弯,导致励磁机端振幅不断上升。

(5) 励磁机端转子振幅上升至一定程度后,触发电动机停机,在停机初期,励磁机转速从3 120 r/min 开

始下降,逐步接近励磁机的共振转速2 880 r/min,导致励磁机端振幅继续快速上升。

拆卸电动机励磁机端轴承上盖及轴瓦,发现轴瓦内存在局部摩擦痕迹,验证了上述分析结论:轴承底座过高,导致轴瓦局部负荷过高,进而引发转子以1倍频运行时负荷过高或摩擦的位置相对稳定,使转子热弯,振幅上升,电动机保护停机。

2.2 故障处理

故障处理包括2个方面:①降低轴承底座高度,以降低轴瓦负荷,避免转子局部热弯;②采用矢量图法^[19-20]对转子进行动平衡,降低转子自身的不平衡量。

通过抽出轴承底座下方垫片降低轴承底座高度。在现场操作中,需要少量多次抽取垫片,每次抽取垫片之后均进行启机测试,观察励磁机端振动变化情况。在实际作业中,抽出垫片后轴承底座降低幅度较大,需要同步调节励磁机静子,以保证转子与静子线圈间隙均衡。最终,在励磁机端轴承底座降低2.2 mm、静子降低2.0 mm之后,进行电动机启动试验:励磁机端由于支撑刚度的下降,对励磁机的共振转速造成了影响^[21-22],实测共振转速由2 880 r/min 降为2 800 r/min,使得共振转速与最低工作转速3 120 r/min 的差距增大,降低了转子对不平衡响应的敏感程度,且励磁机端轴承底座降低后,解决了轴瓦局部负荷过大的问题,因此,励磁机端振动未出现剧烈上升的情况。

励磁机端转子振幅稳定后,采用矢量图法对转子进行动平衡调试,通过在励磁机端平衡盘添加合适的配重块,优化励磁机端的振动情况。参照API 546-2008《无刷同步电机·500 kVA 及更高电压》标准规定,在动平衡过程中,对于额定转速超过3 000 r/min 的电动机,稳态运行时未滤波振动最高允许值 A 为:

$$A = 25 \sqrt{\frac{12\,000}{N}} \quad (1)$$

式中: N 为最大额定转速,r/min。

中俄东线唐山压气站3[#]电驱离心式压缩机组电动机最大额定转速为4 800 r/min,因此,其稳态运行时最大振幅不得超过40 μm 。在故障排查及动平衡优化之后,启机测试,令其分别在1 200 r/min、3 120 r/min、3 500 r/min、4 000 r/min、4 500 r/min、4 800 r/min、5 040 r/min 转速下稳态运行,励磁机端V1测点最高振幅35 μm 、励磁机端V2测点最高振幅36 μm (图6),符合API 546-2008 标准规定。

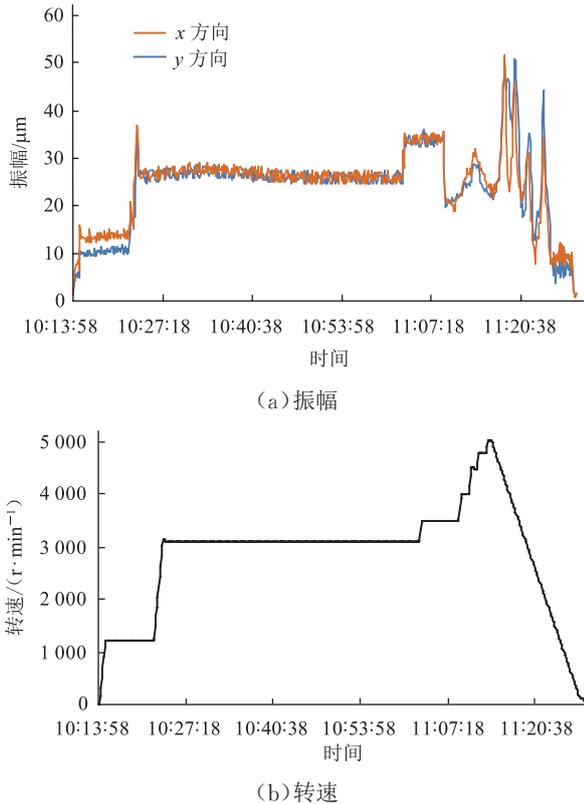


图6 中俄东线唐山压气站3[#]电驱离心式压缩机组电动机故障处理后励磁机转子振幅、转速随时间的变化曲线

3 结论

在解决中俄东线唐山压气站3[#]电驱离心式压缩机组电动机励磁机端振动过高问题的过程中,利用振动监测系统,分析励磁机端振动产生的原因及变化规律,综合考虑轴瓦负荷、转子热弯、转子共振对振动产生的影响,判断故障原因是励磁机端轴瓦负荷过高,由此导致转子以1倍频成分为主要振动成分运行时,局部负荷过高或与轴瓦发生碰摩,形成局部热弯,产生新的不平衡量,导致振幅上升,且当转子转速与共振转速相近时,励磁机对不平衡较为敏感,进一步加剧了振幅的上升,最终导致停机。拆卸励磁机端轴承及轴瓦,发现了局部摩擦迹象,初步验证故障原因分析的正确性。基于对该电动机励磁机端振动高原因的判断,首先降低励磁机端轴承底座高度,以降低轴承负荷;消除3 120 r/min励磁机端振幅快速上升的故障之后,采用矢量图法对励磁机进行动平衡,优化励磁机端的振动,使之符合API 546-2008标准规定。由此,故障得到了解决,有力保障了中俄东线唐山站的投产与运行,也为长距离输气管道压气站类似故障的解决提供了指导。

参考文献:

- [1] 董学刚,谭东杰,李柏松,杨晓峥,王瑛,房树松. 输油泵电机振动故障诊断及处理[J]. 油气储运, 2016, 35(2): 189-191, 207.
DONG X G, TAN D J, LI B S, YANG X Z, WANG Y, FANG S S. Fault diagnosis and handling for vibration of motors in oil pumps[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(2): 189-191, 207.
- [2] 张平,古自强,刘小龙,张晓松,韩亮,刘忠. 天然气长输管道集成式压缩机关键技术研究进展[J]. 油气储运, 2018, 37(11): 1213-1217.
ZHANG P, GU Z Q, LIU X L, ZHANG X S, HAN L, LIU Z. Research progress on the key technologies of integrated compressor for long-distance natural gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(11): 1213-1217.
- [3] 姜昌亮. 中俄东线天然气管道工程管理与技术创新[J]. 油气储运, 2020, 39(2): 121-129.
JIANG C L. Management and technological innovation in China-Russia Eastern Gas Pipeline Project[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(2): 121-129.
- [4] 程玉峰. 保障中俄东线天然气管道长期安全运行的若干技术思考[J]. 油气储运, 2020, 39(1): 1-8.
CHENG Y F. Technical insights into the long-term integrity and sustainability of China-Russia Eastern Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(1): 1-8.
- [5] 王猛,钟震宇,刘建臣,张衍岗,李刚,刘白杨,等. 基于3层C/S结构的离心式压缩机组振动监测系统[J]. 油气储运, 2017, 36(12): 1401-1407.
WANG M, ZHONG Z Y, LIU J C, ZHANG Y G, LI G, LIU B Y, et al. A vibration monitoring system for centrifugal compressor set based on C/S structure[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(12): 1401-1407.
- [6] 李刚,谷思宇,贾东卓,闫斌斌. 一种输气管道燃气轮机的综合故障诊断方法[J]. 油气储运, 2019, 38(5): 568-573.
LI G, GUS Y, JIA D Z, YAN B B. A comprehensive fault diagnosis method used for the gas turbines in gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(5): 568-573.
- [7] 虞磊,马会防,狄景艳,王卫国,廖明夫,王四季. 模型转子突加不平衡响应分析及试验验证[J]. 航空动力学报, 2019, 34(10): 2256-2263.
YU L, MA H F, DI J Y, WANG W G, LIAO M F, WANG S J. Analysis and experimental verification of model rotor sudden

- unbalance response[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(10): 2256-2263.
- [8] 张焜琛,何立东,万方腾,李志炜. 基于刚体模态的弹性支承转子动平衡研究[J]. *机电工程*, 2019, 36(10): 1079-1082.
ZHANG Z C, HE L D, WAN F T, LI Z W. Dynamic balance of elastic support rotor based on rigid body modal[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(10): 1079-1082.
- [9] CHEN S L, LEE P H, TOH C S. Modeling and control of an unbalanced magnetic rotor-bearing system as a bearingless motor[J]. *Engineering Computations*, 2017, 34(7): 2212-2227.
- [10] 时培明,苏翠娇,赵娜,韩东颖,田广军. 基于AMD和自适应随机共振的旋转机械故障诊断方法研究[J]. *计量学报*, 2017, 38(1): 112-116.
SHI P M, SU C J, ZHAO N, HAN D Y, TIAN G J. Study on fault diagnosis method for rotating machinery based on adaptive stochastic resonance and AMD[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2017, 38(1): 112-116.
- [11] 王美令,温保岗,韩清凯. 弹支-刚性转子系统过共振瞬态响应特性研究[J]. *动力学与控制学报*, 2018, 16(6): 533-538.
WANG M L, WEN B G, HAN Q K. Transient response characteristic of a rigid rotor system with flexible supports across resonance[J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2018, 16(6): 533-538.
- [12] THOMAS B, FADI D, BASTIAN P. An approach to account for interfering parametric resonances and anti-resonances applied to examples from rotor dynamic[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2019, 97(3): 1837-1851.
- [13] HUANG D, LIU Y, LIU H, YI J. Resonances of elastic rotor induced by roller bearing with consideration of cage vibration[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2018, 232(4): 446-456.
- [14] STEFAN H, FABIAN B, STEPHAN R. Unbalance and resonance elimination with active bearings on a Jeffcott Rotor[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 85: 339-353.
- [15] 柳霆,孙逊,吴俊. 不同摩擦状态下滑动轴承与转子碰撞振动提取研究[J]. *润滑与密封*, 2018, 43(6): 67-71.
LIU T, SUN X, WU J. The extraction of collision vibration signal for sliding bearing and rotor under different friction states[J]. *Lubrication Engineering*, 2018, 43(6): 67-71.
- [16] 周临,邹翔,张蒙. 转子热弯曲造成的异常振动[J]. *电机技术*, 2016(3): 44-46, 50.
ZHOU L, ZOU X, ZHANG M. Abnormal vibration caused by thermal bending of rotor[J]. *Electrical Machinery Technology*, 2016(3): 44-46, 50.
- [17] 夏亚磊,杨建刚,张晓斌. 柔性转子转轴弯曲与不平衡耦合振动分析[J]. *动力工程学报*, 2016, 36(11): 877-882.
XIA Y L, YANG J G, ZHANG X B. Analysis of flexible rotor vibration under coupled action of shaft bend and rotor unbalance[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2016, 36(11): 877-882.
- [18] 李晚涛. 汽轮机转子碰摩热弯曲故障研究[D]. 南京: 东南大学, 2017: 20-35.
LI W T. Study on thermal bending of turbine rotor due to friction[D]. Nanjing: Southeast University, 2017: 20-35.
- [19] 吴焱,曹巨江,燕卫亮. 基于线性独立向量法的曲柄群驱动机构摆动力平衡分析[J]. *制造业自动化*, 2015, 37(9): 102-105.
WU Y, CAO J J, YAN W L. Dynamic balance analysis of crank group drive mechanism based on linear independent vector method[J]. *Manufacturing Automation*, 2015, 37(9): 102-105.
- [20] 全红飞,王胤龙,郭九梅. 离心压缩机现场动平衡[J]. *风机技术*, 2014, 56(增刊1): 149-152.
QUAN H F, WANG Y L, GOU J M. Dynamic balance for centrifugal compressor on work field[J]. *Compressor Blower & Fan Technology*, 2014, 56(S1): 149-152.
- [21] 郭红,夏伯乾,孙一休. 径向动静压浮环轴承-转子系统稳定性分析[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(5): 7-11, 29.
GUO H, XIA B Q, SUN Y X. Stability analysis of a journal floating ring hybrid bearing-rotor system[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(5): 7-11, 29.
- [22] 赵倩. 剪切增稠阻尼在转子系统振动控制中的应用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016: 13-28.
ZHAO Q. Research on vibration control of rotor system based on STF damping[D]. Shenyang: Northeastern University, 2016: 13-28.

(收稿日期:2020-02-25; 修回日期:2020-03-10; 编辑:刘朝阳)

基金项目: 中国石油管道公司科技攻关项目“基于设备全面国产化的压气站一键启停技术研究及应用”, 20180108。

作者简介: 黄恩涛,男,1986年生,工程师,2016年硕士毕业于中国石油大学(北京)工商管理专业,现主要从事长输油气管道设备管理工作。地址:河北省廊坊市广阳区新开路408号,065000。电话:18131632835。Email: huangentao@163.com