

引文: 贾东卓, 王猛, 江新星, 等. 离心压缩机组转子转速变化对振动的影响[J]. 油气储运, 2025, 44(8): 952–959.

JIA Dongzhuo, WANG Meng, JIANG Xinxing, et al. Analysis of the impact of rotor speed variations on the vibration of centrifugal compressor units[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(8): 952–959.

离心压缩机组转子转速变化对振动的影响

贾东卓¹ 王猛¹ 江新星¹ 张宁¹ 李强² 钟震宇³

1. 国家管网集团储运技术发展有限公司; 2. 中铁十八局集团有限公司; 3. 国家管网集团北方管道有限责任公司项目管理中心

摘要:【目的】离心压缩机组运行期间需根据工况与输量的要求调节转子转速, 在工作转速范围内转子振动常随转速的变化而变化。在某些特定情况下, 设备可能发生振动异常, 因此分析转速调整时转动设备产生复杂振动现象的原因, 开展有针对性的维修作业, 对保障离心压缩机组安全、稳定运行尤为重要。【方法】系统梳理离心压缩机组振动随转速变化产生的复杂现象, 并对此类现象进行归类。基于转子动力学基本原理, 对转速变化时有可能影响振动的临界转速、不平衡量、各向异性刚度 3 个关键因素进行深入分析, 筛选出 1 倍频振幅、1 倍频相位、轴心轨迹、轴中心位置 4 项关键参数; 利用趋势图、轴心轨迹图、轴中心位置图等工具, 对国家石油天然气管网集团有限公司在役离心压缩机组实际运行情况进行解析, 验证所提分析方法的有效性与正确性; 通过对调节转速引发的异常振动进行深入剖析, 挖掘异常振动的根本原因, 并提出针对性的解决方法。【结果】接近临界转速引起的振动过高可通过调节转速与动平衡、优化转子系统等方式解决; 不平衡量变化引起的振动异常可通过动平衡或优化冷却系统功能进行改善; 各向异性刚度变化引起的振动异常可通过调整轴承安装位置、调节轴瓦间隙等方式解决。【结论】研究成果可帮助现场技术人员识别振动现象, 深入理解转子转速变化时引起离心压缩机组振动的各项诱因, 分析调节转速时产生振动异常的原因, 及时准确判断故障位置、查找故障原因、制定有针对性的维修计划, 保障长距离天然气输送管道离心压缩机组的稳定、安全运行。(图 5, 参 32)

关键词: 天然气管道; 离心压缩机组; 振动; 临界转速; 不平衡量; 各向异性刚度

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2025)08-0952-08

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2025.08.012

Analysis of the impact of rotor speed variations on the vibration of centrifugal compressor units

JIA Dongzhuo¹, WANG Meng¹, JIANG Xinxing¹, ZHANG Ning¹, LI Qiang², ZHONG Zhenyu³

1. PipeChina Storage and Transportation Technology Development Co., Ltd.; 2. China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd.;

3. Project Management Center, PipeChina North Pipeline Co., Ltd.

Abstract: [Objective] The rotor speed of operating centrifugal compressor units needs to be regulated according to working conditions and output requirements. Within the operational speed range, the rotors typically experience fluctuating vibrations in response to speed variations. However, in certain cases, rotor vibration can lead to abnormal equipment vibration. Therefore, analyzing the causes of complex vibrations occurring in rotating equipment due to speed regulation and implementing targeted maintenance operations are essential to ensure the safe and stable operation of centrifugal compressor units. [Methods] The complex behaviors of vibration in centrifugal compressor units due to varying speeds were systematically analyzed and classified. Based on the fundamental principles of rotor dynamics, an in-depth examination was conducted on three key factors that may affect vibration following speed changes: critical speed, unbalance, and anisotropic stiffness. As a result, four essential parameters were identified: 1× frequency amplitude, 1× frequency phase, shaft center trajectory, and shaft center position. By employing tools such as trend charts, shaft center trajectory plots, and shaft center position diagrams, the real-world operation of in-service centrifugal compressor units operated by the China Oil and Gas Pipeline Network Corporation was analyzed to verify the effectiveness and accuracy of the proposed analytical approach. This investigation into abnormal vibration caused by speed regulation revealed the root causes of such vibrations, supporting the targeted solutions subsequently proposed. [Results] Excessive vibration resulting

from approaching critical speed can be addressed through speed regulation, dynamic balancing, or optimization of the rotor system. Abnormal vibration caused by changes in unbalance can be mitigated by dynamic balancing or by optimizing the cooling system's functionality. In cases where abnormal vibration occurs due to changes in anisotropic stiffness, solutions include adjusting the bearing installation position and modifying the bearing shell clearance. **[Conclusion]** The research results can assist on-site technicians in identifying vibration behaviors and deepen their understanding of the various causes of vibration in centrifugal compressor units following rotor speed changes. The findings are valuable for analyzing the causes of abnormal vibration resulting from speed regulation, enabling the timely and accurate identification of the locations and causes of consequential faults, and helping formulate targeted maintenance plans. Ultimately, this analysis provides insights into ensuring the stable and safe operation of centrifugal compressor units in long-distance natural gas transmission pipelines. (5 Figures, 32 References)

Key words: natural gas pipelines, centrifugal compressor units, vibration, critical speed, unbalance, anisotropic stiffness

随着长距离天然气管道输送业务的发展,离心压缩机组越来越多地投入到生产运行之中^[1-4]。截至2024年12月,国家石油天然气管网集团有限公司(简称国家管网集团)范围内共装配离心压缩机组381台,占装机总量的90.7%,在天然气输送中发挥着至关重要的作用。离心压缩机组包括燃气发生器、动力涡轮、励磁机、电动机、齿轮箱、离心压缩机等主要设备^[5-8],运行期间需根据工况与输量的要求调节转速,在此过程中可能引发离心压缩机组的振动变化。一般情况下这种振动变化不会对离心压缩机组的安全、平稳运行造成不利影响,但在某些特定情况下仍有可能产生较高振幅或引发其他异常现象。因此,需对转速调节期间转子系统的振动响应进行深入研究,以便进行生产优化与故障排查。

在已有的研究中,国内外学者主要从以下3个方面评估振动随转速的变化情况:①使用波德图或极坐标图表示振动随转速的变化情况^[9-10],深入研究理想状态下转子振动随转速变化的一般规律^[11-14],但波德图与极坐标图主要评估振幅、相位随转速变化关系且不包含时间维度,无法深入分析转速发生变化时转子的振动行为;②利用振动与转速趋势图分析振动随转速的变化情况^[15],该方法虽然增加了时间维度,但剖析转子的振动行为上仍存在局限性;③通过波形图、轴心轨迹图、轴中心位置研究转子的振动行为^[16-17],该方法侧重于研究特定故障或特定参数变化产生的振动响应,对于转速发生变化时可能引起的多个参数的复杂变化情况未进行系统梳理。为此,在总结前人研究成果与成果局限性的前提下,对转速调整期间离心压缩机组产生复杂振动现象的原因进行分析;然后结合长输天然气管道离心式压缩机组的具体情况,排除外部工况、

环境等因素的干扰,挖掘引起振动变化的根本原因,重点分析离心压缩机组转子系统自身因素在转速变化时对振动产生的影响,筛选出1倍频振幅^[18]、1倍频相位^[19]、轴心轨迹^[20]、轴中心位置^[21]4项关键参数;最后通过相关案例分析,利用趋势图、轴心轨迹图、轴中心位置图等工具,分析转速调节过程中可能发生的设备转速接近临界转速^[22]、不平衡量^[23]变化、各向异性刚度^[24-25]变化对振动的影响,以期为输气站场技术人员深入理解影响压缩机组振动的各项因素提供参考,剖析转速调节期间产生异常振动的原因,采取针对性措施快速处理隐患,确保长距离天然气管道的安全、平稳运行。

1 离心压缩机组振动随转速变化现象

离心压缩机组的工作转速范围介于1阶临界转速与2阶临界转速之间,当设备在工作转速范围内运行时,转子振动以工作频率(1倍频)为主,在理想状态下,1倍频振幅应随转速上升而下降,最终趋于稳定,1倍频相位逐步升高,最终滞后重点约180°^[11],但实际情况往往较为复杂。截至2024年6月,国家管网集团装机的381套离心压缩机组中包含147套燃驱压缩机组、234套电驱压缩机组,涵盖11家驱动机厂家、8家压缩机厂家生产的百余种型号关键设备,具有设备种类多、工作环境复杂的特点,且每种型号压缩机组均具有较大范围的工作转速,因此需全面地分析工作转速范围内转速变化对振动造成的影响。通过对国家管网集团所辖离心压缩机组的集中监测,可知其振动随转速变化现象可分为4种情况:①随着转速的提升,某测量位置相互垂直安装的2个振动传感器测得的1倍频

振幅同时下降、1倍频相位同时上升。若某测量位置只安装1个振动传感器,该传感器测得的1倍频振幅下降、1倍频相位上升。②随着转速的提升,某测量位置相互垂直安装的2个振动传感器测得的1倍频振幅同时上升,而相位有可能上升或下降。若某测量位置只安装1个振动传感器,该传感器测得的1倍频振幅上升,而相位有可能上升或下降。③随着转速的提升,某测量位置相互垂直安装的2个振动传感器测得的1倍频振幅未同时上升或下降,甚至可能出现一个上升、另一个下降的现象,与此同时相位出现无规律变化。若某测量位置只安装1个振动传感器,其测得的1倍频振幅与相位发生无规律变化。④当离心压缩机组转速下降时,上述3种现象出现相反的变化。

2 离心压缩机组振动随转速变化原因

根据文献[11]中所建转子振动模型可知,转子转速处于1阶临界转速与2阶临界转速之间时,1倍频振动可能受转速、转子系统刚度、转子系统刚度强弱方向分布、转子质量、不平衡质量、不平衡质量与转子中心距离、不平衡质量的方向、阻尼等因素的影响。根据转子1倍频振动随转速的变化情况,可得到以下规律:①转子系统刚度、转子质量决定转子的临界转速,调节转速时有可能接近或远离临界转速,使1倍频的振幅、相位发生变化;②不平衡质量、不平衡质量与转子中心距离、不平衡质量的方向影响在转子旋转时不平衡量产生的离心力大小与方向,若调节转速时能够使上述参数发生变化,则1倍频的振幅、相位也将发生变化。③转子系统刚度强弱方向分布影响1倍频轴心轨迹的形状,若调节转速时能够使各向异性刚度发生变化,则1倍频的轴心轨迹也将发生变化。④在工作转速下阻尼对振动的影响较小,在此不做深入分析。可见,离心式压缩机调节转速时引发的接近或远离临界转速、不平衡量发生变化、各向异性刚度发生变化等问题,将对转子的1倍频振动响应产生影响,以下结合实际案例对各因素进行分析。

2.1 转速接近临界转速时的振动响应

某压气站电驱压缩机组的励磁机、电机生产厂家均为上海电气,型号分别为YF 56.97-4、TZW20000-2;压缩机生产厂家为沈鼓集团,型号为PCL803。该压缩机组各个轴承位 x 、 y 方向均安装了1个电涡流振动传

感器,测得励磁机在最低工作转速下1倍频振幅较高(图1)。可见,当励磁机转速由约3 760 r/min降至最低工作转速3 120 r/min时, x 方向1倍频振幅由约21 μm 达到最高81 μm , y 方向1倍频振幅由约19 μm 达到最高72 μm ; x 方向相位由约230°降至约172°, y 方向相位由约144°降至约90°。

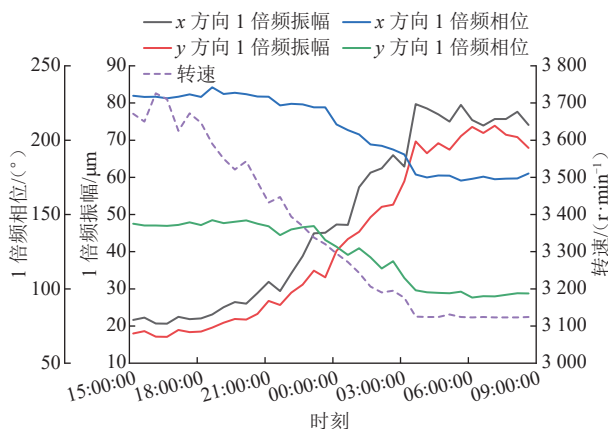


图1 某压气站电驱压缩机组励磁机1倍频振动随转速变化图
Fig. 1 Variations in $1\times$ frequency vibration parameters with speed for the exciter of an electric-driven compressor unit at a compressor station

上述为典型的在临界转速附近调节转速时产生的振动现象。该励磁机实测1阶固有频率为47.5 Hz (2 850 r/min)、转速为3 120 r/min时与1阶固有频率的差值不足20%,因此励磁机转速降速后接近1阶固有频率时,会出现1倍频振幅上升、1倍频相位下降的情况。该离心压缩机组工作转速降至3 120 r/min时,励磁机1倍频振幅已超过80 μm ,有可能影响机组平稳运行。为消除此类问题产生的隐患,应避免设备在共振转速下长时间运行,对该励磁机进行动平衡^[26-28]降低离心力产生的影响或对励磁机转子系统进行优化以改变其临界转速。

2.2 转速变化对转子平衡的影响

某压气站电驱压缩机组电机生产厂家为上海电气,型号为YZKS630;压缩机生产厂家为西门子,型号为STC-SV(08-3-A)。该压缩机组各个轴承位 x 、 y 方向均安装了1个电涡流振动传感器,测得电机驱动端与非驱动端1倍频振动随转速变化较为明显(图2)。可见,电机转速由3 590 r/min升高至4 144 r/min时,压气站现场HMI(Human-Machine Interface)系统观测到电机电压由约7 243 V升高约8 221 V,电流也由约672 A升至约838 A。在此工况下观察电机振动状态,发现电机驱动端与非驱动端4个振动测点的1倍频振幅上

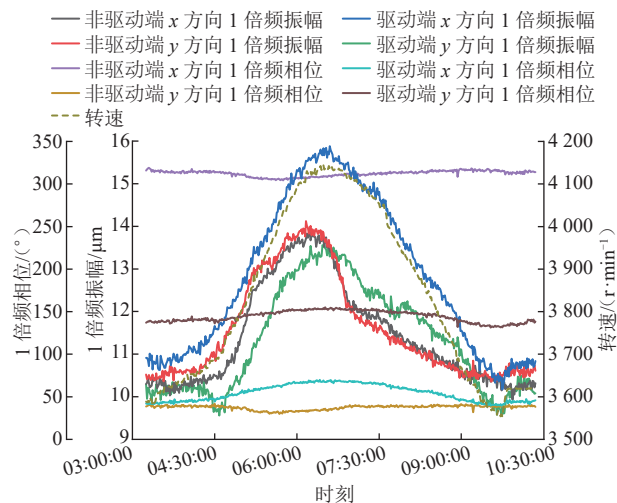


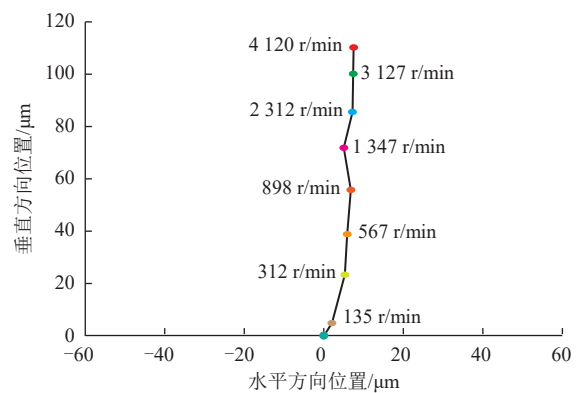
图2 某压气站电驱压缩机组电机1倍频振动随转速变化图
Fig. 2 Variations in $1\times$ frequency vibration parameters with speed for the motor of an electric-driven compressor unit at a compressor station

升,同时1倍频相位也发生变化,当转速从4 144 r/min开始下降时,振动随转速变化逐步恢复至原状态。

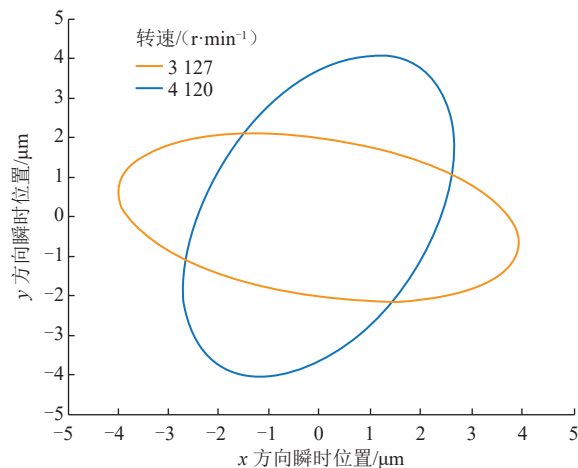
在上述案例中,电机由于自身温度的影响,在转速调整时平衡状态发生改变,进而影响1倍频的振幅与相位。对于国家管网集团所管理的电驱离心式压缩机组,励磁机与电机工作转速升高时需要的电流越大,转子自身产生的热量就越大;对于燃驱压缩机组,燃气轮机与动力涡轮的转速升高时需要的燃料气消耗速度越大,转子所处的工作环境温度就越高。因此,转速调整会使上述转子产生形变,从而影响转子的平衡状态。一般而言,转子温度越高形变越严重,产生的不平衡量越大,但不平衡量变化的方向难以确定,因此在振动上表现为1倍频振幅上升,但1倍频相位发生无规律变化。对于温度变化引起的振动变化,可通过改善冷却系统功能或动平衡的方式进行优化。

2.3 转速变化对各向异性刚度的影响

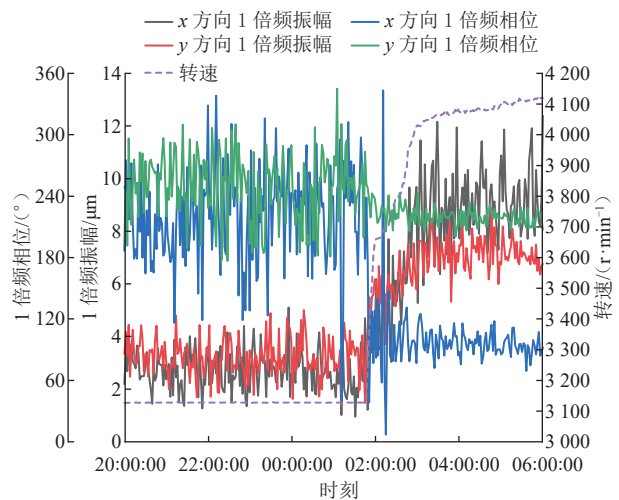
某压气站燃驱压缩机组燃气发生器生产厂家为通用电气,型号为LM2500+;动力涡轮、压缩机的生产厂家均为通用电气,型号分别为HSPT25+、PCL802。该压缩机组各个轴承位 x 、 y 方向均安装了1个电涡流振动传感器,测得压缩机驱动端1倍频振动随转速变化较为明显(图3)。可见,该机组转速由3 127 r/min上升至4 120 r/min后(图3c),压缩机驱动端轴中心位置上升约11 μm (图3a),1倍频轴心轨迹长轴方向在转速调整后发生变化(图3b)。同时, x 方向1倍频振幅由约3 μm 升至约10 μm , y 方向1倍频振幅由约3 μm 升至约8 μm , x 方向1倍频相位由约240°降至约75°,



(a)驱动端轴中心位置随转速变化



(b)驱动端轴心轨迹随转速变化



(c)压缩机驱动端1倍频振动随转速变化

图3 某压气站燃驱压缩机组驱动端振动随转速变化图
Fig. 3 Variations in drive-end vibration parameters with speed for a gas turbine-driven compressor unit at a compressor station

y 方向1倍频相位由约240°降至约200°(图3c)。

上述案例中,转速调整后压缩机转子的轴中心位置发生变化影响了转子的各向异性刚度,进而使轴心轨迹长轴方向发生变化,导致1倍频的振幅、相位发生不可预测的变化。国家管网集团范围内离心压缩机

组的励磁机、电机、动力涡轮、齿轮箱、压缩机均使用滑动轴承作为支撑轴承,其原理是转子旋转时带动润滑油流动,在转子与轴承之间形成油膜,从而达到支撑、润滑及降温的作用^[29]。当离心压缩机组转速调整时,油膜厚度发生变化,从而使转子的轴中心位置变化,影响各向异性刚度的大小与方向,致使转子1倍频振动发生变化。转速变化使转子轴中心位置发生变化,在影响各向异性刚度的同时会使转子与静子的相对位置发生变化,在特定情况下有可能产生局部负荷过高或局部摩擦的情况,此时可通过调整轴承安装位置或调节轴瓦间隙进行优化。

3 案例分析

在天然气长输管道业务中,根据负荷、输量要求调节压缩机组的转速是站场作业期间的常见操作^[30-31],一般不会引起异常振动。然而,由于每套离心压缩机组可能具有不同的特性,因此部分机组在进行转速调节时有可能出现振动过高的现象,甚至引发其他衍生问题,会对设备的稳定运行产生不利影响。

某压气站电驱压缩机组的励磁机、电机生产厂家均为上海电气,型号分别为YF 56.97-4、TZW20000-2;压缩机生产厂家为沈鼓集团,型号为PCL803。电机非驱动端、电机驱动端、压缩机驱动端、压缩机非驱动端的 x 、 y 方向及压缩机组轴向均安装了电涡流传感器,励磁机与电机报警值均设置为 $90\text{ }\mu\text{m}$ 、停机值均设置为 $125\text{ }\mu\text{m}$,压缩机报警值设置为 $63.5\text{ }\mu\text{m}$ 、停机值设置为 $88.9\text{ }\mu\text{m}$ 。该压气站设定固定出站压力,并利用负荷分配逻辑自动调节压缩机转速,某日5:53—9:00运行期间转速在 $3\text{ }200\sim 3\text{ }250\text{ r/min}$ 内波动,在此期间转速上升时振幅下降、相位上升,转速下降时振幅上升、相位下降(图4中蓝色虚线左段),有可能是接近临界转速或转子自身平衡状态改变引起了振动随转速的波动现象,在此阶段振幅较低,并无其他故障现象,无需对其过度关注。但在9:00—10:28这一阶段,励磁机开始减速直至转速降至约 $3\text{ }127\text{ r/min}$,励磁机振动1倍频与相位出现与转速不相关的上下浮动(图4中蓝色虚线与红色虚线之间段)。此阶段的振动现象符合由于摩擦或局部负荷过高导致转子热弯曲产生的新增不平衡量低于原始不平衡量的情况^[32],转子不宜在此状态下长时间运行。10:28之后,励磁机1倍频振动出现剧

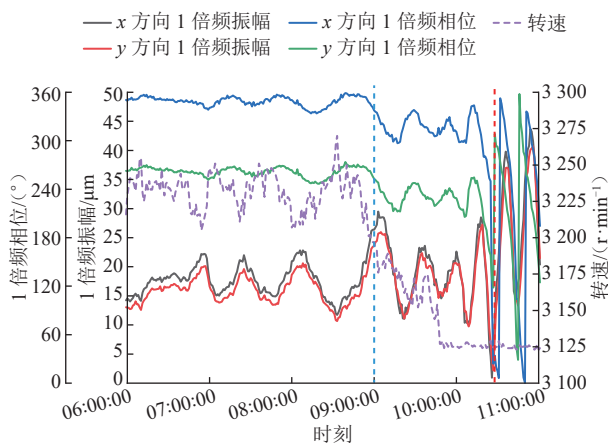


图4 某压气站电驱压缩机组励磁机1倍频振动随转速变化图
Fig. 4 Variations in $1\times$ frequency vibration parameters with speed for the exciter of an electric-driven compressor unit at a compressor station

烈波动,相位持续降低(图4红色虚线右段),该现象也符合由于摩擦或局部负荷过高导致转子热弯曲产生的新增不平衡量高于原始不平衡量的情况^[30],有可能使转子与静子发生磨损。

通过分析励磁机轴中心位置随转速的变化情况(图5)可知,励磁机降速期间轴中心位置向左下方移动约 $9\text{ }\mu\text{m}$,由此判断转速调节后轴中心位置的变化引起转子与静子间的间隙发生变化,导致局部摩擦或局部负荷过高。此时需关注静子(轴承、封严)与转子之间的间隙是否符合要求(轴承与转子之间的间隙应介于轴承直径的 $1\%\sim 1.5\%$ 、封严与转子之间的间隙应介于叶轮直径的 $1\%\sim 3\%$)^[11]。若不满足要求,应先调整轴承、封严与转子之间的间隙,随后观察振动变化情况,若振动仍出现异常,则进一步调整轴承的安装位置,以降低不正常的径向负荷。

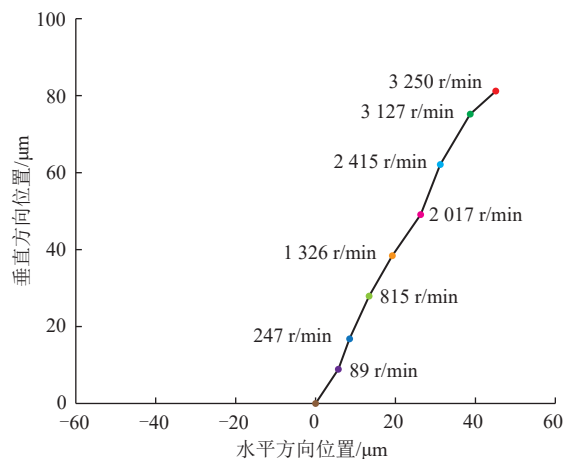


图5 某压气站电驱压缩机组励磁机轴心位置随转速变化图
Fig. 5 Variations in shaft center position with speed for the exciter of an electric-driven compressor unit at a compressor station

经现场拆机检查,发现电机非驱动端轴承下瓦有明显的挤压、摩擦痕迹,将轴瓦打磨并调整安装位置后未再出现上述异常现象。

在分析该类问题时,需注意转速调整一般不会引起异常振动,但在该案例中,由于轴瓦位置安装不当、转速调节时转子与静子之间的间隙变化共同作用,导致转速降低后油膜厚度过薄,进而造成轴瓦与转子的局部磨损,最终导致振动出现异常波动。通过对该案例中振动异常波动的影响因素、故障原因进行针对性分析,故障得到准确排查与快速处理,保障天然气长输业务的稳定开展。

4 结束语

通过对介于1阶临界转速与2阶临界转速的转子振动行为随转速变化情况进行全面梳理,阐明了转子转速发生变化时1倍频振动受临界转速、转子平衡状态及各向异性刚度的影响。通过对长距离天然气输送管道的离心压缩机组相关实例的振动数据进行细致分析,验证了离心压缩机组振动随转速变化的普遍性及危害性。在现场实际工作中,一般状态下无需关注转速调整引起的离心压缩机组振动变化,但在特定情况下,转速调整引起的振动变化有可能与其他因素共同作用导致离心压缩机组出现异常振动,甚至影响机组平稳运行。此时需进行有针对性的原因分析,以利于准确判断引起异常的根本原因,并在此基础上制定维检修策略,降低运维成本,提高维检修效率,进而提升离心压缩机组的运行可靠性,保障长输管道业务的稳定开展。

参考文献:

- [1] 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. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2020.02.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2020.02.001).
- 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.
- [2] 张世斌, 贾立东, 魏义昕, 史威, 王健. 输气管道 SCADA 系统网络安全策略探索与实现: 以中俄东线天然气管道工程为例[J]. 油气储运, 2020, 39(6): 685-691. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2020.06.013](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2020.06.013).
- ZHANG S B, JIA L D, WEI Y X, SHI W, WANG J. Exploration and implementation of network security strategy for gas pipeline SCADA system: taking the China-Russia Eastern Gas Pipeline Project as an example[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(6): 685-691.
- [3] 蔡永军, 蒋红艳, 王继方, 王潇潇, 李莉, 陈国群, 等. 智慧管道总体架构设计及关键技术[J]. 油气储运, 2019, 38(2): 121-129. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2019.02.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2019.02.001).
- CAI Y J, JIANG H Y, WANG J F, WANG X X, LI L, CHEN G Q, et al. The overall architecture design and key construction technologies of intelligent pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(2): 121-129.
- [4] 李柏松, 王学力, 徐波, 孙巍, 王新, 赵云峰. 国内外油气管道运行管理现状与智能化趋势[J]. 油气储运, 2019, 38(3): 241-250. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2019.03.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2019.03.001).
- LI B S, WANG X L, XU B, SUN W, WANG X, ZHAO Y F. Operation and management status and intelligentization trend of global oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(3): 241-250.
- [5] 王鹏飞, 王猛, 雷狮子, 王浩然. LM2500+ 燃气发生器动平衡方法改进[J]. 油气储运, 2023, 42(5): 586-591. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.05.013](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2023.05.013).
- WANG P F, WANG M, LEI S Z, WANG H R. Improvement of dynamic balancing method of 2500+ gas generator[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(5): 586-591.
- [6] 蒲斌, 李星星, 杨福超, 孙义伟. 变频器低电压穿越引起的压缩机喘振及改进措施[J]. 油气储运, 2024, 43(4): 439-448. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.04.009](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2024.04.009).
- PU B, LI X X, YANG F C, SUN Y W. Analysis of compressor surge induced by converter low-voltage ride through and improvement measures[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(4): 439-448.
- [7] 古自强, 韩刚, 李华, 将辉娟, 许亮. 天然气管道压缩机组故障预测与健康研究[J]. 油气田地面工程, 2024, 43(9): 58-62. DOI: [10.3969/j.issn.1006-6896.2024.09.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-6896.2024.09.010).
- GU Z Q, HAN G, LI H, JIANG H J, XU L. Research on fault prediction and health management (PHM) of natural gas pipeline compressor units[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2024, 43(9): 58-62.
- [8] 张家玮. 长输气管道压缩机组负荷分配优化控制研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2023.

- ZHANG J W. Research on optimal control of load sharing of compressor units in long gas transmission pipeline[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2023.
- [9] 唐振寰, 周海仑, 成晓鸣. 转子系统非协调进动在波德图中的响应分析[J]. 机械设计与制造, 2018(4): 84–86. DOI: [10.3969/j.issn.1001-3997.2018.04.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3997.2018.04.024).
- TANG Z H, ZHOU H L, CHENG X M. Research on response of non-synchronous of rotor system in the bode diagram[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(4): 84–86.
- [10] 张志强, 梅检民, 赵慧敏, 常春, 沈虹. 基于 MOMEDA 和极坐标时频特征级联增强的轴承早期特征提取[J]. 振动与冲击, 2020, 39(19): 168–173. DOI: [10.13465/j.cnki.jvs.2020.19.025](https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2020.19.025).
- ZHANG Z Q, MEI J M, ZHAO H M, CHANG C, SHEN H. Early bearing fault feature extraction based on CEMP time-frequency features[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(19): 168–173.
- [11] BENTLY D E, HATCH C T, GRISSOM B. Fundamentals of rotating machinery diagnostics[M]. New York: ASME Press, 2002: 51–203.
- [12] PÁEZ CHÁVEZ J, VAZIRI HAMANEH V, WIERCIGROCH M. Modelling and experimental verification of an asymmetric Jeffcott rotor with radial clearance[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 334: 86–97. DOI: [10.1016/j.jsv.2014.05.049](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.05.049).
- [13] 解庆春. 电机振动监测研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- XIE Q C. Research of motor vibration monitoring[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [14] 刘保侠, 王猛, 马云雷. 离心式压缩机组转子系统故障判定方法[J]. 油气储运, 2023, 42(6): 685–693. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.06.010](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2023.06.010).
- LIU B X, WANG M, MA Y L. Fault diagnosis method for rotor system of centrifugal compressor units[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(6): 685–693.
- [15] 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. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2017.12.009](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2017.12.009).
- 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 the three-layer C/S structure[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(12): 1401–1407.
- [16] 朱锐, 沈景凤, 卢明明, 顾春兴. 液体动静压球轴承转子系统振动特性分析[J]. 机械强度, 2025, 47(5): 1–11. DOI: [10.16579/j.issn.1001.9669.2025.05.001](https://doi.org/10.16579/j.issn.1001.9669.2025.05.001).
- ZHU R, SHEN J F, LU M M, GU C X. Motion analysis of bearing rotor system and phase control of spindle vibration[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(5): 1–11.
- [17] 邢欢, 刘子良, 许琦, 贾磊, 姚红良. 含碰摩故障的吸振器-转子系统振动特性分析[J]. 中国工程力学, 2025, 23(1): 120–124. DOI: [10.15999/j.cnki.311926.2025.01.019](https://doi.org/10.15999/j.cnki.311926.2025.01.019).
- XING H, LIU Z L, XU Q, JIA L, YAO H L. Vibration characteristics analysis of vibration absorber rotor system with rub-impact fault[J]. Chinese Journal Of Construction Machinery, 2025, 23(1): 120–124.
- [18] 罗轶超. 基于振动信号提取的转子主动平衡[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- LUO Y C. Active balancing technology of rotor based on unbalanced vibration signal extraction[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [19] 于哲, 陈淑江, 马金奎, 路长厚, 李昊. 轴承-转子系统运动分析及主轴振动的相位控制[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(9): 894–899. DOI: [10.15918/j.tbit1001-0645.2019.09.003](https://doi.org/10.15918/j.tbit1001-0645.2019.09.003).
- YU Z, CHEN S J, MA J K, LU C H, LI H. Motion analysis of bearing rotor system and phase control of spindle vibration[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(9): 894–899.
- [20] EBRAHIMI A, AKBARZADEH S, MOOSAVI H. Geometrical analysis of elliptical journal bearings and its effects on friction and load capacity[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2020, 234(5): 743–750. DOI: [10.1177/1350650119868090](https://doi.org/10.1177/1350650119868090).
- [21] 岑黎明, 李一兴, 戴娜娜. 基于轴心位置监测的船用汽轮机对中调整方法研究[J]. 船舶工程, 2016, 38(增刊 2): 117–119, 123. DOI: [10.13788/j.cnki.cbge.2016.s2.117](https://doi.org/10.13788/j.cnki.cbge.2016.s2.117).
- CEN L M, LI Y X, DAI N N. Study on shafting alignment method of marine steam turbine unit based on axis position monitoring[J]. Ship Engineering, 2016, 38(S2): 117–119, 123.
- [22] 张琳, 张源盛, 李军, 臧磊, 魏超, 严运兵. 空载湿式离合器临界碰摩转速影响机理分析[J]. 武汉科技大学学报, 2024, 47(3): 190–199. DOI: [10.3969/j.issn.1674-3644.2024.03.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-3644.2024.03.005).
- ZHANG L, ZHANG Y S, LI J, ZANG L, WEI C, YAN Y B. Influence mechanism of critical rub-impact speed of no-load wet clutch[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2024, 47(3): 190–199.
- [23] 秦思远, 李峥峰. 风轮不平衡的风电机机械振动信号频域特

- 性分析[J]. 可再生能源, 2022, 40(9): 1202–1208. DOI: [10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2022.09.015](https://doi.org/10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2022.09.015).
- QIN S Y, LI Z F. Analysis on frequency domain characteristics of mechanical loads on wind turbine rotor imbalance[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(9): 1202–1208.
- [24] 刘占生, 黄森林, 苏杰先, 黄文虎. 非对称柔性转子系统的动力特性分析[J]. 振动工程学报, 2002, 15(2): 210–214. DOI: [10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2002.02.018](https://doi.org/10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2002.02.018).
- LIU Z S, HUANG S L, SU J X, HUANG W H. Dynamic analysis of unsymmetrical flexible rotor system[J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(2): 210–214.
- [25] 刘瑞杰, 王雪仁, 贾地. 正交各向异性梁结构自由振动分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(4): 556–561. DOI: [10.11990/jheu.201812037](https://doi.org/10.11990/jheu.201812037).
- LIU R J, WANG X R, JIA D. Free vibration analysis of orthotropic beam structures[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(4): 556–561.
- [26] 黄恩涛, 王猛, 张晏博, 王春明, 刘超. 中俄东线唐山压气站励磁机振动故障诊断与处理[J]. 油气储运, 2020, 39(5): 565–569. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2020.05.012](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2020.05.012).
- HUANG E T, WANG M, ZHANG Y B, WANG C M, LIU C. Vibration fault diagnosis and handling of exciter in Tangshan compressor station of China–Russia Eastern Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(5): 565–569.
- [27] 董涛, 雪会斌, 刘鹏, 肖志, 李治国. 矢量法在 PCL 型压缩机现场动平衡调整中的应用[J]. 中国科技信息, 2019(9): 78–79. DOI: [10.3969/j.issn.1001-8972.2019.09.030](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-8972.2019.09.030).
- DONG T, XUE H B, LIU P, XIAO Z, LI Z G. Application of vector method in on site dynamic balance of pcl compressor[J]. China Science and Technology Information, 2019(9): 78–79.
- [28] 赵洪亮, 刘培军, 王帅, 邢海峰, 拜禾, 王朋飞, 等. 三圆平衡法在 LM2500+燃气发生器转子动平衡中的应用[J]. 油气储运, 2018, 37(10): 1158–1162. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2018.10.012](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2018.10.012).
- ZHAO H L, LIU P J, WANG S, XING H F, BAI H, WANG P F, et al. The application of three-circle balancing method to the rotor dynamic balance of LM2500+ gas generator[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(10): 1158–1162.
- [29] 李岩, 廖明夫, 王四季, 赵清周, 赵璐. 挤压油膜阻尼器同心度及碰摩对转子振动特性的影响[J]. 振动与冲击, 2020, 39(1): 150–156, 174. DOI: [10.13465/j.cnki.jvs.2020.01.021](https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2020.01.021).
- LI Y, LIAO M F, WANG S J, ZHAO Q Z, ZHAO L. Effects of squeeze film damper concentricity and rubbing on rotor vibration characteristics[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(1): 150–156, 174.
- [30] 许洁. 天然气管道压缩机组国产化的现状与展望[J]. 中国石油大学胜利学院学报, 2020, 34(4): 32–35. DOI: [10.3969/j.issn.1673-5935.2020.04.0008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5935.2020.04.0008).
- XU J. The current situation and prospect of the localization of natural gas pipeline compressor units[J]. Journal of Shandong Institute of Petroleum and Chemical Technology, 2020, 34(4): 32–35.
- [31] 马凯, 王华强, 张保平, 王东升. 天然气管线压缩机组加载/卸载及负荷分配控制研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2018(6): 86–88, 93. DOI: [10.3969/j.issn.1000-0682.2018.06.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0682.2018.06.021).
- MA K, WANG H Q, ZHANG B P, WANG D S. Research on loading & unloading and load distribution control of gas pipeline compressor unit[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2018(6): 86–88, 93.
- [32] 王猛, 张雪琴, 牛亚琨, 姜博文. 离心式压缩机组转子径向摩擦热弯曲振动响应分析[J]. 油气储运, 2022, 41(4): 444–450. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2022.04.012](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2022.04.012).
- WANG M, ZHANG X Q, NIU Y K, JIANG B W. Analysis on vibration response to thermal bending on rotor of centrifugal compressor set caused by radial friction[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(4): 444–450.

(编辑: 张雪琴)

基金项目: 国家管网集团科技攻关项目“管道大数据分析与应用研究”, WZXGL202107。

作者简介: 贾东卓, 男, 1969 年生, 高级工程师, 2008 年毕业于兰州大学计算机科学技术专业, 现主要从事管道压缩机维修、故障诊断方向的研究工作。地址: 河北省廊坊市广阳经济技术开发区畅祥道 6 号, 065000。电话: 18632639128。Email: 25918342@qq.com

通信作者: 王猛, 男, 1987 年生, 工程师, 2014 年硕士毕业于沈阳工业大学计算机应用技术专业, 现主要从事机械设备振动分析、故障诊断方向的研究工作。地址: 河北省廊坊市广阳经济技术开发区畅祥道 6 号, 065000。电话: 18232678841。Email: 455877816@qq.com

• Received: 2024-07-19

• Revised: 2024-08-19

• Online: 2025-05-19

