

离心式压缩机的振动原因分析

王宏波¹ 范云祥² 李江波³

1. 东华能源（宁波）新材料有限公司 浙江 宁波 315812

2. 嘉兴石化有限公司 浙江 嘉兴 314201

3. 新凤鸣集团浙江独山能源有限公司 浙江 嘉兴 314203

摘要：离心式压缩机作为工业领域的核心动力设备，其振动问题严重影响设备可靠性与生产安全。据行业统计，超半数压缩机停机事故由振动异常引发，会造成叶轮磨损、轴系断裂等严重后果，带来巨大经济损失。基于此，本文从转子系统故障（如转子不平衡、弯曲）、轴承系统异常（如磨损、润滑不良）、流体动力因素（如喘振、旋转失速）以及机械安装与连接问题（如对中偏差、紧固件松动）等多维度，系统分析离心式压缩机振动的典型诱因，结合工程实践案例阐述故障特征与诊断逻辑，并提出涵盖设计阶段优化、安装与调试控制、运行与维护策略等方面的针对性防治措施。

关键词：离心式；压缩机；振动原因

引言：在石油化工、天然气输送、能源电力等领域，离心式压缩机承担着气体压缩与输送的关键任务。据行业统计，超过半数的压缩机停机事故由振动异常引发，轻则导致叶轮磨损、轴承失效，重则引发轴系断裂、介质泄漏等安全事故。比如，某石化企业丙烯压缩机因振动超标导致叶轮螺栓松动脱落，造成生产线停产一周，直接经济损失超千万元。因此，深入剖析离心式压缩机的振动成因并建立科学防治体系，对保障工业装备安全运行、提升生产效率具有重要工程价值。

1 离心式压缩机振动的基本类型与特征

1.1 机械性振动

此类振动由设备机械部件缺陷引发，常见于转子系统与轴承系统异常。当叶轮结垢、部件脱落或制造误差导致转子质心偏移时，会产生周期性不平衡力，引发以转频为主的振动；而当轴承磨损、润滑不良时，振动频谱中会出现明显的高频分量，伴随异常噪声。

1.2 流体诱导振动

由气流动力学因素引发，主要包括喘振与旋转失速。当压缩机流量低于临界值进入喘振工况时，气流会产生周期性振荡，引发低频大幅振动，同时伴随压力与流量的剧烈波动；而旋转失速则因叶片表面气流分离导致，振动特征与叶轮叶片数相关，频谱中会出现明显的叶片通过频率分量。

1.3 结构共振

当外部激励频率接近设备固有频率时引发，表现为振幅急剧增大^[1]。如，某乙烯压缩机因管道支撑刚度不足，在特定转速下发生结构共振，振动烈度远超正常限

值，设备壳体出现明显抖动。结构共振常导致设备疲劳损坏，需通过调整支撑刚度或避开共振转速来消除。

2 离心式压缩机振动的典型原因分析

2.1 转子系统故障

2.1.1 转子不平衡

这是最常见的振动诱因之一，成因包括叶轮制造误差、介质结垢或部件脱落。比如，含尘气体长期流经叶轮会导致积灰，破坏转子动平衡；而叶片铆钉松动脱落则会直接改变转子质量分布。此类故障的振动特征为转频分量主导，振幅随转速升高而增大，相位稳定。

2.1.2 转子弯曲

可分为热弯曲与永久弯曲。热弯曲常见于启动过程中暖机不足，主轴因温度不均产生临时变形；永久弯曲则多因停机时冷却不均或意外碰撞导致。某空分装置压缩机紧急停机后未及时投用盘车，主轴产生热弯曲，开机后振动明显加剧，频谱中除转频外，二倍频分量也显著升高。

2.2 轴承系统异常

2.2.1 轴承磨损与间隙过大

润滑油污染、油温过高或轴向载荷超限会加速轴承磨损。当轴承合金层磨损导致间隙扩大时，油膜稳定性下降，振动频谱中会出现大量高频分量，伴随金属摩擦噪声。某天然气管道压缩机因润滑油中金属颗粒含量超标，径向轴承间隙从正常范围扩大近一倍，设备运行时发出刺耳异响，振动幅值较正常状态升高数倍。

2.2.2 轴承润滑不良

油泵故障、油路堵塞或油品劣化会导致润滑失效。当轴承供油压力不足或油膜破裂时，会引发低频涡动现象，

振动频率约为转频的0.4-0.5倍,振幅随负荷增加而突变。

2.3 流体动力因素

2.3.1 喘振故障

多由流量低于喘振边界、管网阻力突变或叶轮与扩压器匹配不良引发。进入喘振工况后,压缩机内部气流周期性倒流,导致机身剧烈振动,同时管网压力大幅波动。某乙烯装置压缩机因操作人员误关出口阀,瞬间进入喘振状态,振动幅值在短时间内急剧上升,若不及时处理,可能导致叶轮断裂等严重后果。

2.3.2 旋转失速

进气冲角过大或叶片表面粗糙会导致气流分离,在叶轮通道内形成失速团。失速团沿周向旋转时会产生周期性激振力,振动特征与叶片数相关,频谱中叶片通过频率及其谐波分量显著增强。某空气压缩机在夏季高温运行时,因进气密度下降使叶片进口冲角增大,引发旋转失速,设备发出尖锐的气流啸叫声。

2.4 机械安装与连接问题

2.4.1 对中偏差

联轴器安装误差或基础沉降会导致转子轴线偏移。平行偏差或角度偏差过大会使联轴器产生附加力矩,引发以二倍频为主的振动,且轴向振动幅值通常大于径向^[2]。某化肥厂原料气压缩机因基础不均匀沉降,联轴器角度偏差超出允许范围,运行时机身出现规律性摆动,频谱分析显示二倍频分量占比异常。

2.4.2 紧固件松动

螺栓预紧力不足或交变载荷导致疲劳松动,会使部件连接刚度下降,引发冲击性振动。如,气缸螺栓松动会导致缸体位移,振动信号中出现明显的尖峰脉冲,时域波形呈现间歇性冲击特征。某天然气压缩机因缸体螺栓松动,运行时发出“咔嗒”异响,振动幅值周期性波动。

3 离心式压缩机振动的防治措施

3.1 设计阶段优化

3.1.1 转子动力学设计

转子是离心式压缩机的核心部件,其动力学特性直接决定着压缩机的振动性能。在设计阶段,应运用先进的仿真分析技术,对转子的临界转速进行精确计算和模拟。临界转速是转子在旋转过程中发生共振的特定转速,当压缩机的工作转速接近临界转速时,转子会产生剧烈的振动,严重威胁设备的安全运行。利用仿真分析,可提前确定转子的临界转速,并合理设计转子的结构参数,如轴的直径、长度、质量分布等,最大程度上确保临界转速避开工作转速区间,从而有效避免共振现象的发生。

3.1.2 叶轮设计

叶轮是离心式压缩机的关键做功部件,其设计质量对气流流动和压缩机的性能有着重要影响。采用三元流设计方法,能够更加精确地描述叶轮内部的三维气流场,优化叶片型线与进口角。合理的叶片型线可以减少气流在叶轮内的流动损失,降低气流分离的风险,使气流更加平稳地通过叶轮,从而减少因气流不稳定引起的振动。与此同时,优化进口角可以提高叶轮的进气效率,改善压缩机的整体性能,进一步降低振动产生的可能性。

3.1.3 轴承选型

轴承是支撑转子旋转的重要部件,其性能直接关乎着转子的稳定性和振动水平。其中,可倾瓦轴承具有独特的结构优势,相比传统的圆筒瓦轴承,其瓦块可以随着转子的旋转而自动调整位置,形成多个油楔,提供更好的润滑和支撑效果。这种结构能够显著提高轴承的抗失稳能力,减少转子在高速旋转时的振动和晃动,使转子运行更加平稳可靠。此过程中,需要注意的是,在实际设计中,应根据压缩机的工作参数和转子的特性,合理选择轴承的类型和尺寸,确保轴承能够满足设备的运行要求。

3.2 安装与调试控制

3.2.1 转子对中调整

转子对中对在离心式压缩机安装进程里占据着举足轻重的地位,其对中精度与压缩机的振动水平紧密相连^[3]。转子轴线若出现平行偏差或角度偏差,在转子高速旋转时,就会产生不平衡力,进而引发振动,严重影响压缩机的稳定运行。

激光对中仪为转子对中调整提供了高效且精准的解决方案。它借助激光束的高精度和直线性特性,能够迅速且精确地测量出转子轴线的偏差状况。在实际操作中,技术人员依据测量结果,通过精准调整电机的位置或者合理控制联轴器的间隙,将平行偏差与角度偏差严格控制在允许的范围之内。该过程需要技术人员具备丰富的经验和精湛的技艺,确保每一个调整步骤都精准无误,从而保障转子的对中质量达到最佳状态。高质量的转子对中能够有效减少因对中不良而产生的振动,为压缩机的平稳运行奠定坚实基础。

3.2.2 基础施工控制

压缩机基础作为承受设备重量和振动的重要结构,其施工质量对压缩机的振动性能起着决定性作用。在基础施工前,必须开展全面且细致的地质勘察工作,深入了解施工场地的地质条件,为结构设计提供准确依据。结构设计要充分考虑到压缩机的运行特点和要求,确保基

础具备足够的强度和刚度,能够承受压缩机运行过程中产生的各种载荷。

在施工过程中,刚度测试是不可或缺的环节。具体可采用专业的测试设备和方法,检查基础的固有频率是否与压缩机的工作转速接近。一旦发现固有频率与工作转速接近,必须及时采取有效措施,如调整基础的结构尺寸,改变其固有频率;或者增加减振措施,降低振动传递。以上手段能够有效避免基础共振现象的发生,为压缩机创造一个稳定可靠的运行环境。

3.2.3 转子动平衡控制

转子动平衡是降低离心式压缩机振动的重要环节。制造过程中,转子材料的不均匀性、加工误差等因素不可避免地会导致转子质量分布不均匀,从而产生不平衡力。在安装前,对转子进行严格的动平衡试验至关重要。要按照高速运行的要求,精确控制动平衡等级,特别是对于高转速压缩机,动平衡精度需达到更高标准。精确的动平衡调整,可最大程度减少转子的不平衡力,有效降低因转子不平衡引起的振动,确保压缩机在安装后能够稳定、高效地运行。

3.3 运行与维护策略

3.3.1 防喘振控制

喘振作为离心式压缩机运行中潜藏的重大隐患,时刻威胁着设备的稳定与安全。当压缩机流量因各种因素降低至特定临界状态时,内部气流便会失去原有的稳定秩序,呈现出紊乱、无序的流动状态。不稳定气流会引发压缩机剧烈的振动,同时还会伴随尖锐的噪音,严重影响工作环境。更为严重的是,若喘振持续发生且得不到有效控制,压缩机的关键部件如叶轮、转子等将承受巨大的交变应力,极易导致部件疲劳损坏,进而引发设备故障,造成生产中断,给企业带来巨大的经济损失。

为有效防范喘振这一危险工况,必须制定一套严格且完善的防喘振控制方案,并设置双重保护机制。一是在压缩机的关键部位精心安装流量、压力等高精度传感器。这些传感器能够实时、精准地监测压缩机的各项运行参数。一旦检测到流量接近喘振边界这一危险信号,控制系统会迅速做出反应,自动打开防喘振阀等设备,及时增加流量,使气流重新恢复稳定流动,从而避免喘振的发生。二是设置喘振报警和联锁保护装置。当压缩机不幸发生喘振时,该装置能够迅速发出清晰、响亮的报警信号,提醒操作人员及时采取措施。并且,它还会自动触发停机等保护动作,将压缩机的运行点始终保持在喘振裕度之外,为设备的安全运行筑起一道坚实的防线。

3.3.2 润滑油管理

润滑油在离心式压缩机的运行中扮演着不可或缺的角色,为设备的正常运转提供着关键支持。优质的润滑油能够减少轴承、齿轮等部件之间的摩擦和磨损,降低能量损耗,还能起到冷却、密封等重要作用,确保设备在高温、高压等恶劣工况下稳定运行^[4]。为保证润滑油的质量,需建立一套科学合理的润滑油定期检测制度。定期对润滑油的粘度、酸值、水分、杂质等关键指标进行全面检测和深入分析,及时掌握润滑油的质量变化情况。并且,采用先进的在线滤油装置,可实时对润滑油进行过滤和净化,有效去除油液中的杂质和污染物,维持油液的清洁度,减少杂质对设备部件的磨损和腐蚀,降低因润滑不良引起的振动。除此之外,还应根据设备的使用说明书和实际运行情况,合理选择润滑油的品种和更换周期,确保润滑油的性能始终满足设备的要求,为压缩机的稳定运行提供有力保障。

3.3.3 智能振动监测

智能振动监测系统是及时发现和处理离心式压缩机振动问题的关键手段。该系统利用高精度的振动传感器,实时采集压缩机各部件的振动信号,并采用人工智能算法对振动数据进行处理。通过对振动信号的频谱分析、趋势分析等,可以提前预测轴承、转子等部件的潜在故障,如轴承的磨损、转子的裂纹等。一旦发现异常情况,系统能够及时发出报警信号,通知维修人员进行处理,避免故障的进一步扩大,减少非计划停机的次数,提高设备的可靠性和运行效率。

结语

综上所述,离心式压缩机振动的防治需要从设计、安装调试和运行维护等多个阶段入手,采取综合性的措施。通过在设计阶段进行优化,提高设备的固有可靠性;在安装调试阶段严格控制质量,确保设备的安装精度;在运行维护阶段加强管理和监测,及时发现和处理潜在问题,可以有效降低离心式压缩机的振动水平,保障设备的安全、稳定运行,为工业生产的高效进行提供有力支持。

参考文献

- [1]佐亮.离心压缩机振动故障原因分析与处理措施探讨[J].中国设备工程,2021(17):61-62.
- [2]刘尚明.离心式压缩机振动故障分析及处理措施研究[J].山东化工,2021,50(07):111-112.
- [3]吴俊学.离心式压缩机故障原因及处理方法[J].设备管理与维修,2021(21):63-65.
- [4]石奇峰.离心压缩机故障原因分析及措施[J].中国设备工程,2020(17):157-159.