离心压缩机转子不平衡的常见原因与现场处理方法

杨 洋
沈阳透平机械股份有限公司，辽宁 沈阳 110000

[摘要]转子不平衡是引起离心压缩机组振动超标的常见原因，动平衡处理转子不平衡是最经济有效的方法。根据不平衡的原因进行分析，将制造装配偏差、检修配重变化归为初始不平衡原因，将介质结垢、叶轮磨损腐蚀、部件脱落归为运行中不平衡原因。在此基础上对现场振动判断的全过程进行了梳理，包括测点布置、一倍频和相位稳定性判据、不对中和油膜涡动等干扰的排除方法、基于影响系数法的现场动平衡操作步骤和验收要求。

[关键词]离心压缩机；转子不平衡；现场动平衡；振动诊断
DOI：10.33142/ect.v4i10.20659 中图分类号：TH452 文献标识码：A

Common Causes and On-site Treatment Methods of Rotor Imbalance in Centrifugal Compressors

YANG Yang
Shenyang Touping Machinery Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110000, China

Abstract: Rotor imbalance is a common cause of excessive vibration in centrifugal compressor units, and dynamic balancing is the most economical and effective method for dealing with rotor imbalance. Based on the analysis of the causes of imbalance, manufacturing assembly deviations and changes in maintenance weights are classified as initial imbalance reasons, while medium scaling, impeller wear and corrosion, and component detachment are classified as imbalance reasons during operation. On this basis, the entire process of on-site vibration judgment was sorted out, including the arrangement of measuring points, the criteria for frequency doubling and phase stability, the methods for eliminating interference such as misalignment and oil film vortex, the on-site dynamic balancing operation steps based on the influence coefficient method, and the acceptance requirements.

Keywords: centrifugal compressor; rotor imbalance; on-site dynamic balancing; vibration diagnosis

引言

离心压缩机在石化、天然气输送以及大型空分装置中担负着连续增压的任务，非计划停机常常会造成上下游生产链的连锁中断。振动超标的机率最大，转子不平衡居首。转子在制造、装配及长时间运行过程中都会出现质量失衡状况，所造成的周期性离心力经由轴承传给机壳和管路，轻者造成密封磨损和联轴器发热，重者引发结构疲劳失效。目前大多数机组都具备了在线振动监测的功能，但是现场条件下怎样准确判断不平衡并进行有效的校正，仍然是检修工程师需要解决的主要问题。

1 转子不平衡的基本概念与危害

转子不平衡的物理本质就是质量中心和旋转中心之间存在偏心距。当转子以角速度转动的时候，偏心质量就会产生离心力，该力随着转速的变化而变化，而且一直作用在轴承上。由于工业生产中不可能制造出完全平衡的转子，工程上要求残余不平衡量在可接受范围内。离心压缩机转子工作转速一般在一阶或者二阶临界转速以上，属于柔性转子，不平衡响应在不同转速区间的差别较大，在低速时不明显的质量偏心在高速运行时会被大幅放大。

不平衡对机组的危害有两条路径。第一，动态偏载造成轴承油膜压力分布不均，轴颈和轴瓦局部接触应力增大，油膜稳定性变差，容易引起半速涡动或者油膜振荡。第二，偏心运行的密封环间隙会周期性地变大，从而引起泄漏量增加，压缩机效率也会下降。转子长期受交变应力作用，键槽、联轴器螺栓、叶轮根部焊缝是应力集中薄弱处，疲劳裂纹从这里开始。

2 离心压缩机转子不平衡的常见原因

2.1 制造、装配和检修留下的不平衡

原始不平衡是由制造、装配环节造成的累积误差所引起的。叶轮是转子中质量最大的部件，它的铸造或者焊接

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

过程中壁厚不均、加工偏心、平衡孔位置偏差等，在装配之后就会产生初始偏心。API 617 规定叶轮、平衡鼓等主要转动部件在装配前要按 ISO 1940 G0.67 或更高等级做单面动平衡，每装入一个到两个主要零件就要做一次平衡校正，校正只能在刚装上的零件上进行[1]。实际检修时如果省略了中间的平衡步骤，那么累积的偏差就会在整机运转的时候集中出来。

检修环节的配重变化也不能忽略。更换叶轮、调整联轴器或者修磨轴颈之后，原来的配重块位置及数量要重新计算。部分检修时所用的工艺螺栓在最终装配时被产品螺栓所取代，如果两者质量有差别且没有做补正，残余不平衡量就会超过允许值。

2.2 运行中结垢、磨损、腐蚀和部件松动造成的不平衡

运行过程中产生的不平衡比初始不平衡更具有渐进性、隐蔽性。化工和天然气装置处理的介质常常含有冷凝液、聚合物粉尘或者催化剂细粉，这些物质在叶轮进口边和轮盘背面沉积之后会形成不均匀的垢层，造成质心沿径向偏移。结垢造成的不平衡一般会随时间慢慢增加，振动幅值呈阶梯式上升，每次停机检修之后重新启动时振动可能会短暂降低，但是运行数周后又会回升。

叶轮不均匀磨损、腐蚀也是另一个主要来源。工艺气中夹带的固体颗粒对叶片进口边、叶顶区域的冲蚀作用最集中，叶型改变的同时质量分布也发生变化。含硫化氢或者酸性水的介质会造成点蚀、局部减薄，腐蚀产物脱落后会在流道内堆积，加重质量偏心。零部件松动、脱落造成的不平衡是突然的。叶轮锁紧螺母松动、平衡块脱落或者密封片断裂的时候，转子的质量分布会在一瞬间发生很大的变化，振动幅值和相位都会出现明显的跳跃，和渐发性不平衡的缓慢增长趋势存在明显的区别。

3 现场振动判断与不平衡确认

3.1 测点选择与振动数据采集

现场振动数据有效性的首要保证就是测点布置。径向振动传感器应该安装在每一个轴承座附近，测点方向要覆盖水平和垂直两个方位。轴向位移测点用来判断是否出现碰摩或者轴向激振，在确认不平衡的时候用作辅助参考。带有键相探头的机组，键相信号给相位提供基准，使振动矢量可以分解成幅值和相位两个独立参数。数据采集要稳定在稳态工况，转速波动控制在额定转速的±1%之内，防止转速改变影响到振动幅值混入不平衡信号。采集时长不少于 30s，取平均值来消除随机噪声。

3.2 振动频率、相位与转速关系分析

转子不平衡的频谱特征有很强的识别性，振动能量集中在一倍频上，在转速频率处，基频幅值在全部振动中占据主导地位。时域波形为规则的正弦曲线，转速下降时幅值明显变小，这是不平衡和其它故障的不同之处。相位特征不能忽略。转子两端同向的基频相位差在 180°±30°内，同一截面相互垂直的 X、Y 方向相位差在 90°±30°内，数值稳定，可以判断为典型的不平衡激振力。相位差不在上述范围内或者波动大，就说明有非典型激振力，要继续查找其他的故障源。

3.3 排除不对中、松动、碰摩和油膜涡动等干扰

不对中故障在频谱上与不平衡有部分重合，但是两倍频分量一般会明显升高，轴向振动一般大于径向振动。联轴器两侧轴承的基频相位差接近 180°的时候，说明存在平行不对中或者角度不对中。部件松动的频谱特征更加复杂，除了基频之外还会出现很多倍频成分，时域波形呈削顶或者非对称形态，振动幅值对转速、负荷变化表现出不连续的跳跃[2]。碰摩故障的振动信号中包含较多高频成分，轴心轨迹出现尖角或者花瓣状畸变。油膜涡动的特征频率比转子一阶临界转速的一半要小一些，大约是 0.42～0.48 倍频，和基频有明显的分界。排除以上干扰之后，如果基频振动仍然占主导地位并且相位稳定，就可以确定不平衡是振动超标的根本原因。各种故障的振动特性见表 1。

表 1 离心压缩机常见振动故障特征对比

故障类型	主导频率	相位特征	转速敏感性	轴心轨迹特征
转子不平衡	1×基频	两端相位差约 180°，数值稳定	幅值随转速平方变化	椭圆或圆形
不对中	1×、2×基频	联轴器两侧相位差接近 180°	随负荷变化明显	香蕉形或外 8 字形
部件松动	1×及多倍频	相位波动较大	不连续跳变	不规则多边形
碰摩	1×及高频成分	相位不稳定	随转速升高加剧	尖角状或花瓣形
油膜涡动	0.42~0.48×基频	相位逐渐滞后	随转速和油温变化	内 8 字形扩散

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

3.4 判断不平衡方向、位置和严重程度

确认不平衡之后，还要确定配重施加的方向和大小。用键相基准把各个测点的基频振动矢量画在极坐标图上，振动高点和重点之间有一个滞后角，这个角度和转子的阻尼特性以及转速有关。对于工作转速远远大于一阶临界转速的柔性转子，滞后角接近 180°时，配重应放在振动高点的同侧；工作转速低于临界转速时，配重应放在振动高点的反侧。严重程度用振动速度有效值来衡量，按照 ISO 10816-3 对旋转压缩机的评价标准，把振动区域分为 A、B、C、D 四个等级，处在 C 区时应该进行动平衡校正，进入 D 区就应当立即停机处理。

4 现场处理方法

4.1 处理前安全隔离、工具和称重准备

现场动平衡作业安全前提就是完成工艺隔离、能量锁定。压缩机停止运行后应关闭进出口阀门，泄压到常压，保证润滑油系统停止工作并使转子完全静止。在联轴器处断开驱动机和被驱动机的机械连接，防止误启动。作业区要设置警示围栏，所有参加人员知道各自所负责任及应急撤离路线。对输送易燃、有毒介质的机组，在机壳法兰及仪表接头处要进行气体检测，保证可燃气体、有毒气体浓度小于安全限值后才能拆卸平衡盘护罩。能量锁定要包括电机供电、盘车装置、仪表风源等，锁定点设牌并指定专人保管钥匙。工具准备上，现场动平衡仪及配套传感器、键相探头需要提前校准，电缆及接头的绝缘情况要逐个检查。配重块一般用不锈钢制成，加工成与平衡盘上螺孔相匹配的螺栓或者垫片形式。电子天平用来准确称量配重块的质量，精度不小于 1 克。平衡盘圆周上角度刻度或者键相零点位置在作业前要核对清楚，防止因为角度基准不清而造成配重位置错误。作业前要转动转子数圈，看有无卡涩、异常摩擦现象，准备扭矩扳手、防松胶、标记笔等辅助工具。

4.2 试重法与影响系数法现场动平衡

影响系数法是现场动平衡中使用最广的方法。基本流程是在校正平面上加已知质量、角度的配重块，测量加试重前后振动矢量的变化，从而得到影响系数，然后根据原始振动矢量反算出所需要的配重质量、角度。影响系数的计算公式为影响系数=加试重后振动矢量-初始振动矢量/试重矢量。得到的配重矢量为负的初始振动矢量除以影响系数。初始振动矢量应在机组达到热稳定状态之后采集，连续三次测量的幅值和相位偏差小于 10%时取平均值。试重质量选择时要兼顾两个方面，过小造成振动响应淹没在背景噪声里，影响系数失真；过大会使振动幅值达到危险范围[3]。工程上一般取试重引起的振动变化量达到初始振动量的 30%～50%为宜。试重的安装角度要避开振动高点附近，防止单次试重后振动幅值过快升高。对于没有安装键相探头的机组，可以用三圆法代替，即在平衡盘圆周上每隔 120°分三次安装一个试重块，记录每次的振动幅值，用三个圆的交点来确定配重的位置和大小。该方法不需要相位基准，但是需要三次启动，适合于没有相位测量条件的场合。每次启动之后都要等转速、振动读数稳定下来，不能在升速的时候读取瞬时值造成计算误差。

4.3 配重块安装、角度调整和紧固检查

配重块的安装位置、固定方式对校正效果及运行安全有影响。对有键相探头的机组，在极坐标图上计算得到的配重角度要转换成平衡盘上的实际安装角度，操作时先将平衡盘上的参考零点转到键相探头位置，再按角度值盘动转子到安装点。配重块装入螺孔后用扭矩扳手按制造厂规定力矩值紧固，防止高速旋转时松脱。对无螺纹孔的平衡盘，可用夹具式配重块安装，安装后检查夹具与平衡盘端面的贴合间隙，必要时加装防松垫片。配重块质量及安装角度应逐一记载，在平衡盘上做永久标记，供以后检修使用。多次配重迭代属于现场动平衡的一种方法。首次配重之后如果残余振动仍不达标，则把当前配重当作新的试重，再次算出影响系数并更新配重方案，一般两到三次迭代就能使振动控制在可接受范围内。迭代过程中要关注影响系数的一致性，如果两次计算的影响系数相差大于 30%，就需要检查试重安装是否牢固、振动测量是否可靠。每次迭代之后都要盘车检查配重块和静止部件之间的径向间隙，保证没有碰摩的风险。

4.4 开机复测、验收和运行跟踪

配重安装完毕后，恢复联轴器的连接，取下临时工具，检查机壳内没有工具或者零件。按照操作规程启动机组，逐渐提高到额定转速，在稳定运行 15min 后收集振动数据[4]。升速过程中要监视各个轴承的振动幅值和相位变化趋势，在临界转速附近出现短时峰值，然后迅速回落，是正常的；如果振动持续上升并且相位明显漂移，就应立即停机检查。验收标准按照 ISO 10816-3 中 B 区上限，额定功率大于 15kW 的旋转压缩机，轴承座振动速度有效值一般不大于 4.5mm/s。振动值达标后，保存最后的振动数据到设备档案中。运行跟踪上，在动平衡处理以后的一周之内增加振动检测频率，观测振动是否有异常上升的趋势。振动稳定说明不平衡已经得到校正；如果振动数日后又上升，就说明存在配重块松动或者结垢不断发展的可能。还

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

要注意轴承温度和润滑油回油温度的改变，如果温度一起上升，说明残余不平衡量还在加剧轴承的磨损。

5 结束语

离心压缩机转子不平衡的原因涉及设备的整个生命周期，制造时的加工误差以及检修时的装配变动是最初的不平衡颜色，运行过程中结垢、磨损、腐蚀等会在这基础上增添逐渐的差别。现场判断的关键并不在于单个频谱峰值的大小，而是要保证基频占据主导地位，并且相位保持稳定，排除掉那些类似频谱表现的干扰故障，比如不对中、松动以及油膜涡动等。影响系数法配合三圆法构成现场动平衡基本工具集，有效性取决于试重质量的合理选取、配重安装的可靠紧固和迭代过程中数据的一致性检验。实际工程中把动平衡处理同结垢趋向监测、密封间隙检查融合起来，要比单独处理一次振动超标具有更长久的价值。对于反复出现不平衡的机组，应该从介质净化和转子结构两方面查找原因，不能依靠频繁的配重调整来解决。

[参考文献]

[1]张正华,莫天洋,易健雄,等.高速离心压缩机转子平衡工艺研究[J].压缩机技术,2024,11(6):54-58.

[2]王胤龙.现场动平衡技术在离心压缩机中的应用[J].辽宁科技学院学报,2025,27(2):23-27.

[3]李蕾.离心式压缩机振动特性与故障诊断研究[J].化学工程与装备,2025,12(11):93-95.

[4]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.

作者简介：杨洋（1990—），男，辽宁葫芦岛人，助理工程师，2013 年辽宁信息职业技术学院数控技术专业毕业（专科），2018 年大连理工大学机械设计制造及其自动化专业毕业（专升本）现就职于沈阳透平机械股份有限公司，从事离心压缩机的装配及振动分析等工作。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.