

气体动力系统压力波动对设备运行的影响及抑制

郭庆奎

中国电子系统工程第四建设有限公司 河北 石家庄 050051

【摘要】：气体动力系统是能量传输和工业生产的重要组成部分，它的稳定运行直接影响着能源的使用效率和环境污染程度。压力波动是系统运行中普遍存在的一种现象，其产生于负荷波动、管网特性和控制调控等多种因素，不仅会加剧设备振动和能量损耗，还会引起不必要的能量损耗和气体泄漏，形成潜在的环境负荷。传统的控制策略侧重于设备保护，而忽略波动带来的能量浪费和排放增量。随着节能减排需求的不断增强，压力波动抑制已由简单的设备维修问题拓展到系统能效优化和清洁生产中。从源头消减和过程调控两个方面来降低波动强度，达到提高运行稳定性和改善环境性能的目的，为气体动力系统绿色运行提供技术路径。

【关键词】：气体动力系统；压力波动；设备运行；影响及抑制

DOI:10.12417/3083-5526.26.02.025

工业气体系统的运行质量与其运行质量有着密切的关系，压力波动引起的非稳态工作状态使得压缩机偏离高值区，导致能耗增加和间接碳排放增加。管道振动会加速密封的老化，增加泄漏的可能性和无组织排放的风险。目前环境规制以末端治理为主，缺乏对工艺操作参数优化控制的系统性重视，造成大量不必要的环境影响。突破单点控制思路，基于系统动态特性，协调气源供应、管网蓄能和末端用能之间的动态关系，在保证工艺要求的前提下，降低能耗。因此，在压力波动控制技术框架中引入环保目标，探索节能减排策略，是推进气体动力系统绿色转型的重要切入点。

1 气体动力系统压力波动对设备运行的影响

1.1 冲击设备结构，降低机械寿命

气动系统的压力波动将对装备的核心机械结构造成持续的冲击，进而影响装备的整体力学性能和寿命。系统压力的骤升或骤降将导致设备的管道、阀门、接头等承受交变载荷，超过设计应力承受极限，在长时间的作用下极易发生金属疲劳，导致管道壁厚减薄，碳钢管道在交变压力载荷作用下，年壁厚减薄速率可达 0.1mm，远高于静态载荷下的腐蚀速率，密封面磨损，接头松动漏失。同时，由于压力波动引起的水击效应，会对泵、压缩机等动力设备的叶轮和缸体产生瞬态冲击，造成零件间的间隙增大和同轴度偏差，从而降低装备的传动效率^[1]。此外，压力波动还会加剧设备运动部件的摩擦损失，加速轴承、密封件等易损部件的老化，增加设备非正常停机的几率，大大缩短设备的总体使用寿命，提高设备的维修和更换成本。

1.2 干扰运行参数，降低工作精度

气体动力系统及其支撑设备的核心运行参数受到压力波动的影响，使其工作精度显著降低，不能满足生产需求。系统压力的不稳定将引起输送气体的流量和速度的无规则波动，从

而导致装置执行机构的动作强度和行程控制出现偏差，如气动执行器切换速度不均匀和定位精度下降等，从而影响生产过程的连贯性和精确性。对于依靠气压稳定的高精度检测和加工装备，压力波动将导致测试介质的传输状态发生变化，造成测试数据失真和加工尺寸偏差，在精密机械加工中，气压波动超过 $\pm 0.01\text{MPa}$ 时，零件加工尺寸偏差率将提升超 10%，导致产品合格率大幅下降。同时，压力波动还可能导致设备温度、速度调节等辅助系统参数偏离设定值，引起设备运行状态不平衡，进一步放大精度误差，给生产过程稳定性带来连锁反应。

1.3 引发系统泄漏，增加安全风险

气动系统压力波动频繁，是造成系统泄漏的主要原因，可增加生产现场的安全运行风险。当压力突然升高时，系统受压件密封面在瞬时高压作用下容易变形开裂，造成气体介质泄漏；在压力突然下降的情况下，零件内产生负压，密封面与接触表面形成间隙，也会引起泄漏。如果系统输送的是易燃易爆、有毒、有害气体，泄漏的介质将在现场积累，达到爆炸临界值或与人体接触，容易引起火灾、爆炸、人员中毒等重大安全事故^[2]。此外，泄漏还会进一步引起系统压力不平衡，形成波动-泄漏-更加剧烈波动的恶性循环，同时，泄漏点的局部气流还会加剧部件腐蚀，诱发二次失效，使现场安全隐患不断增大。

1.4 增加能耗损耗，降低运行效率

压力波动将显著增加气体波动系统的能量损失，显著降低设备整体运行效率，提高生产运行成本。为补偿因气压骤降而导致的功率不足，系统中的动力装置如压缩机、泵体等将持续超负荷运转，电动机的输出功率大幅增加，电耗大幅增加。当压力突然升高时，系统需要通过减压阀等部件泄压，使高压气体白白浪费，造成能源浪费。同时，由于压力波动引起的部件磨损和运行参数的偏差，降低设备的传动效率和能量转化效

作者简介：郭庆奎，男，1991-01-26，汉，山东菏泽，大学本科，中级，研究方向：气体动力专业。

率，在同样的生产负荷下消耗更多的能量。另外，为应对压力波动，现场需要添加频繁的人工调整和设备维修操作，这不仅增加了人力成本，而且由于设备停机和检修而降低生产效率，会极大降低系统的综合运行效益。

2 抑制气体动力系统压力波动对设备运行影响的有效策略

2.1 优化管路设计，减少流场扰动

对系统流场进行模拟计算，根据气体介质特性、输送流量和设计压力等因素，确定最佳管径，避免因管径突变而引起的速度突变，在同一输送段采用相同直径的管道，以减小局部阻力损失。采用曲率半径不小于3倍管径的弯头和斜支管代替直角弯头和正接支管，以减少流场涡电流的产生，在长距离输送管道中，每50~80m设置伸缩节，以吸收因温度和压力变化引起的管道变形，防止因应力集中引起的压力波动^[3]。在管道关键部位加装流场校正装置，在压气机和泵体出口处加装整流装置，对气流进行梳理，使气流沿管道轴向均匀流动，通过在大管径管道中设置导流板，打破涡流的形成条件，减小由于流场扰动引起的压力脉动。同时，优化管道支承和固定方法，采用弹性支吊架对管道进行固定，以吸收设备运转和气流冲击引起的振动，避免因振动传递而引起的管道压力波动，根据管道管径和重量，科学地设置支承间距，保证管道的平稳运行。此外，在管道设计上预留压力缓冲空间，在系统关键节点设置预留段，以应对因生产负荷变化引起的压力变化，同时，对排出口进行合理布置，及时将管线内的气体和液体排除，防止气-液两相流引起的压力剧烈波动。

2.2 加装缓冲装置，平抑瞬时波动

在动力设备的出口，如压缩机和泵体，安装一个大容量的储气罐，储气罐的容量要根据设备的额定排气量和压力的波动范围进行科学的计算，通常选择的容积是设备的5~10倍，储气罐安装在设备出口3米处，利用罐内气体的压缩和膨胀，吸收压力急剧上升的能量，补充压力急剧下降的动能，从而达到对压力的初步缓冲。在储气筒出口处加装膜片式缓冲装置，利用膜片的弹性形变来吸收中高频压力波动，并根据系统介质特性选择耐高压耐疲劳的氟橡胶材料^[4]。其次，在分支管、变径和精密仪器进口处加装微型压力缓冲器，精确稳定小范围内的局部压力波动，保证进入精密装置的气压稳定在±0.01MPa以内。在高压燃气动力系统中，增加了活塞型缓冲罐，利用活塞往复运动实现系统压力的平衡，活塞和气缸内壁采用高精度密封，降低气体泄露，提高缓冲效果。在安装之前，所有的缓冲装置都要做压力测试，测试压力是系统设计压力的1.5倍，保持压力30分钟没有泄漏，才可以使用。在安装过程中，在缓冲装置的进出口安装一个阀门，这样可以方便以后的维修和更换。同时，在缓冲装置中还设置压力表、压力变送器，对缓冲前后的压力变化进行实时监控，以便对缓冲效果进行实时监

控。

2.3 优化调控策略，实现精准稳压

应建立系统压力实时监控网络，在压缩机出口处、储气罐、管道关键节点、精密设备入口等处安装高精度压力变送器，其精度不低于0.5级，采样频率设在10Hz，以实现系统压力的全局实时采集，将所有的监测数据都传送到中央控制系统，并对各个监测点的压力值进行可视化显示，设定压力的上限和下限报警阈值，一旦超过这个阈值，就会发出声光警告。优化动力装置的变频调节策略，在压缩机和泵体上安装变频控制系统，利用压力变送器实时检测到的压力信号作为反馈值，并与设定的压力值相比较，利用PID调整算法对设备的工作频率进行自动调节，在系统压力上升时，降低设备工作频率，降低气体输出^[5]。当系统压力下降时，通过增加操作频率和增大输出量来实现压力动态调整，调整响应时间小于0.5秒，PID变频调节策略可使系统压力控制精度提升至±0.02MPa。同时，对泄压和补气系统的联动控制进行优化，在系统的高压端安装一个电动泄压阀，在低压端安装一个自动补气阀，并和中央控制系统进行联动，当压力超过上限时，电动泄压阀就会根据压力超数值，精确地调整阀门的开度，使其能够缓慢地排出压力，以防止压力过大引起的二次波动。当压力降至下限以下时，开启自动补气阀，补充高压气，直到压力恢复到设定范围为止。另外，制定分层调节方案，根据生产负荷变化提前调整压力设置，在负荷增加前5分钟适当提升系统压力，在负荷下降前5分钟适当降低压力，降低由负荷突变引起的压力波动，实现对压力的前瞻性调控。

2.4 强化日常运维，消除波动隐患

加强燃气动力系统的日常运行管理，及时发现和消除各种压力波动隐患，是保证系统压力稳定、抑制波动影响的长效运行手段，需要建立标准化和常态化的运行维护流程（运维流程如表1）。

表1 运维流程

运维项目	操作频次	核心操作要求
压力监测设备校准	每月1次	采用标准压力计校准，误差控制在±0.005MPa内
管路密封面检查	每周1次	重点检查阀门、接头，及时更换老化密封件
缓冲装置维护	每季度1次	清理罐内杂质，检查膜片/活塞密封性能
动力设备点检	每日1次	检查叶轮、缸体间隙，排查振动、异响问题

开展设备的常态化点检，每天对压缩机、泵体等用电设备进行全面点检，对关键零部件如叶轮、缸体、轴承等的运行状况进行全面检查，对设备的振动、异响、温度异常等情况进行检查，及时对零件间隙进行调整，对磨损的易损件进行更换，以保证设备在正常工作状态下的正常工作，从根源上降低因设备故障引起的压力波动。加强管道系统的巡视和维修工作，每周对管道、阀门和接头进行全面的检查，检查密封面的渗漏，管道的变形，支架的松动，及时更换老化的密封，修补变形的管道，对松动的支架进行加固，每个月对管道进行压力测试，保证管道的承压能力达到标准，同时定期清理管道中的污垢和杂质，每六个月用高压气体吹扫管道，以确保管道内壁的平滑，降低因流动阻力引起的压力波动，标准化运维可使系统因设备故障引发的压力波动频次降低70%以上。此外，做好监测和调节设备的标定和维修工作，每月精确标定压力变送器和压力表等监测设备，并使用标准表对其进行对比校验，保证测量误差在可接受的范围之内，每季对调节装置如变频调速系统、电动阀等进行性能试验，检查调节反应速度和动作精度，并及时更

新控制程序，保证调节装置的可靠工作^[6]。另外，还可以建立系统的操作文件，对每天的压力监测数据、设备运行情况、维修进行详细的记录，对压力波动的规律和诱发因素进行分析，并对高频波动节点进行针对性的整改。同时，加强对操作人员的专业培训，提高他们识别压力波动隐患的能力，及时处理压力波动，定期组织压力波动应急演练，以保证在突发压力波动情况下，能够快速有效地应对，将对设备运行造成的影响降到最低。

3 结语

综上所述，抑制气体动力系统压力波动的研究对工业节能减排和清洁生产具有重要的现实意义。可通过优化操作参数和系统动态调控，有效减少能源浪费和泄漏排放，实现设备可靠性和环境性能的同时提高。未来，应深入研究新能源耦合作用下能源波动特征变化规律，探索智能传感和自适应控制技术的融合应用，强化对全生命周期环境影响的定量评价，形成兼顾运行效率和生态效益的气体动力系统绿色运行模式，为工业领域的低碳转型提供持续的技术支持。

参考文献：

- [1] 姜文熙,董鑫,赵远扬.超临界二氧化碳动力系统冷却条件变化瞬态特性研究[J].热力发电,1-10.
- [2] 谢黄骏,王树杰,李钦,张庭玮,姚怀宇.氦气与空气过流航天动力系统节流元件后的压力特性分析[J].液压气动与密封,2025,45(10):108-113.
- [3] 矫玲.氢能燃料电池动力系统制造项目产污环节及污染控制分析[J].黑龙江环境通报,2024,37(01):106-108.
- [4] 吴磊,赵子仪,李天义.以高压气体为动力的水压施加装置与控制系统设计[J].南华大学学报(自然科学版),2023,37(06):50-55.
- [5] 丁锦华,苗本健,李赛赛,赵婧,周小猛,胥嘉良,郭向荣.基于电器实验室用气特点的压缩空气动力系统节能改造分析[J].机电工程技术,2023,52(11):279-282.
- [6] 孙彩艺,陈静,侯蓉苗,徐文艺,杨丽芝,张璐.激动素对肾蕨切叶活性氧代谢及抗氧化系统的影响[J].北方园艺,2023,(07):61-69.