

离心压缩机喘振智能控制方法研究

冯思阳

(沈阳透平机械股份有限公司 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 离心压缩机是一种广泛应用于化工行业的大型工业设备,在离心压缩机的工作过程中,当进气气流不足时,气流会在扩压器与叶道中产生回旋气流造成机械的周期性振动,这一现象被称为喘振。喘振会对离心压缩机的运转性能造成严重影响,并有可能造成离心压缩机内部机械结构的损坏。目前,对于喘振的控制有众多方法,主要分为传统的结构优化方法与先进的智能控制方法,智能控制方法以其高精度、动态化、自动化的优势被学界与工业界不断研究与应用。本文介绍了模糊 PID 控制与强化学习控制两种智能化的喘振控制方法,并对两种方法进行对比,希望能够为业内人士提供参考与借鉴。

关键词: 离心压缩机;喘振控制;模糊 PID;强化学习

0 引言

离心压缩机是我国当前工业制造与智能制造的重点品类,而喘振是制约离心压缩机性能发挥的重要原因之一,因此对离心压缩机的喘振分析与控制具有很高的现实意义。传统工业环境中已经广泛运用了一些人工的喘振检测与控制方法,但这些方法适应性较差且误差率较高。随着信息技术的不断发展与普及,智能化防喘控制逐步取代传统方法,模糊控制、神经网络控制与预测模型控制的理论研究在实验室环境中也取得了一定成果,但喘振智能控制的更高适应性与工业化应用普及两个方面仍然有待进一步研究。

1 离心压缩机喘振机理分析

1.1 离心压缩机的工作原理

离心压缩机广泛应用于流体增压场合,根据压缩级数的不同分为单级压缩机与多级压缩机,其主要工作原理为离心压缩机内部的叶轮进行高速旋转对吸入的气体做功,气体通过叶轮的离心力作用获得较高的压强与较快的流速,叶轮动能的一部分被有效转换为气体的静压能;随后高压气体通过横截面积逐渐增大的通道使得气体的动能被有效转换为静压能,两次能量转换使得气体被大大增压。

1.2 离心压缩机喘振发生的原理与相关因素

在离心压缩机的工作过程中,离心压缩机的工作功率越大、叶轮转速越高则气体压力越高、气体流量越低,因此当离心压缩机的工作功率过大,气体流量减少到工作阈值以下时,流体就会沿着管道外侧向反方向扩展,而由于管道中的气压大于外界气压,气流很难向外扩张,就会在管道内产生气流涡旋,累积起来就会发生

流体在机械或管道中的周期性震荡,这种现象被称为喘振。

喘振现象是离心压缩机工作时的一种失稳状态,将不同转速下的压缩机特性曲线最高点连接起来所得的一条曲线,就能够得到喘振的阈值曲线,阈值曲线又被称为喘振线,如图 1 所示,喘振线左侧为喘振工况区,右侧为堵塞区。喘振的产生会对离心压缩机的工作产生十分严重的影响,轻则造成密封接口的断裂,重则造成加速轴承等部件的损坏,喘振还有可能引起管道与机械系统的共振,造成离心压缩机的整体性损坏。

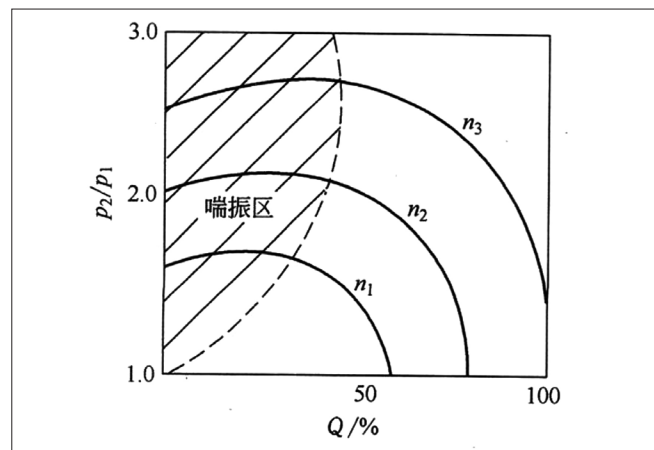


图 1 离心压缩机的特性曲线

喘振的发生与叶轮的转速、管道与机械的结构特性有关,一般来说管道系统的容量越大,则喘振越强,效率越低,即喘振情况与压力、流量与效率呈相关性。此外,喘振发生的主要问题在于气流无法有效排出,因此发生喘振的原因还可能为烟风道堵塞、叶轮并行工作时风机调节不同步、风机长期在低出力下运转等。

2 离心压缩机防喘控制分析

2.1 离心压缩机的喘振特性

在离心压缩机发生喘振时会发生三个主要现象：一是旋转脱离；二是气流脱离；三是失速。旋转脱离是指叶轮转动时各个叶道之间的气流会产生相互影响，而产生气团，气团向外逸散的过程中会受到叶轮旋转所产生的力导致其向进气方向偏移，这种偏移又会导致进气流体的运动方向受到影响，最终导致气流无法顺畅地通过流出扩压器，而是以多个不同运动方向的“脱离团”沿着与叶轮运动方向相反的方向移动。气流脱离是指当离心压缩机的进气流量处于非额定流量区间内，进气流体将被叶片切割而产生分流，分流的气体会以某一个与叶栅的运动方向相反的速度，从右侧朝左侧方向逐渐转移。失速是指离心压缩机内脱离团逐渐增多时，离心压缩机叶轮旋转阻力增大，失速还是一个量变到质变不断累积的过程，当失速过快时，离心压缩机的性能会大幅衰减，甚至不能正常运行。

2.2 现行离心压缩机的喘振控制方法

对于离心压缩机的喘振控制分为静态控制与动态控制两类，静态控制是指对离心压缩机的结构进行优化，主要应用于离心压缩机的设计阶段。在设计中应扩大离心压缩机的稳定工作范围，对于多级压缩机而言，还要注意各级之间的流量系数分配，采用前大后小的系数配比解决离心压缩机低速工作时的低喘振临界点。此外，还应在离心压缩机后几级的接口处加装防喘放气阀，迫使更多的气流流向前面几级，以保证气流流量。

动态方法是指对离心压缩机各部件进行动态控制，以适应不同流量与流速，主要应用于离心压缩机的运行阶段。与静态控制相比，动态控制更为灵活、效果更好，但实现难度更大。传统方法中对离心压缩机的动态控制主要是对离心压缩机导叶开口角度的调节，对叶轮角度的调节主要在于离心压缩机启动或关闭时流速快速变化的阶段，在叶轮转速在额定转速的 0.95 倍前调节角度至 45° ，在额定转速的 0.98 倍或 1 倍时调节角度至 80° ，当转速下降到额定转速的 0.875 倍时将角度调回至 44° 以满足不同流速下气流速度三角形的最优形态。

当前基于对气流量与增加情况进行调节的离心压缩机喘振抑制方法已经普遍运用于工业界。在喘振的检测与抑制中，技术人员将实时观察机器内各节点的气流、压力、速度等性能参数，并根据各参数情况判断离心

压缩机的排压与震动是否处于正常状态。但这种人工主导的控制仍然具有一定的局限性，同时控制精度与控制效率难以提高，因此需要自动化与智能化的控制方法对喘振控制进行改进。

3 基于智能控制的离心压缩机防喘控制

3.1 离心压缩机的动态模型建立

对于多级离心压缩机而言，其模型可视为多个单级离心压缩机的线性叠加，因此对单级离心压缩机进行建模。

离心压缩机的运行中重点关注进气口气流压力、进气口气流质量、出气口气流压力、出气口气流质量、机械损耗效率、转速共六个指标，并对这六个指标之间随着时间变化的相关情况进行系统构建，防喘控制阀对系统的影响视为加性影响，以动态模型对离心压缩机的性能曲线进行拟合与预测。

3.2 基于模糊 PID 控制的离心压缩机防喘智能控制

如图 2 所示，模糊 PID 控制是一种采用模糊控制与传统 PID 控制结合的动态控制算法，模糊算法是指对通过人为设定一种模糊规则而不断迭代进行逐次求精的过程；PID 算法是通过比例、积分、微分三种运算对系统进行反馈控制，比例可用于系统的缩放调节、积分控制可消除稳态误差、微分控制可加快大惯性系统响应速度以及减弱超调趋势。利用模糊算法对 PID 参数进行调节能够提高 PID 模型的精度并且实现实时性调节。

基于模糊 PID 控制的离心压缩机防喘控制是通过控制防喘振气阀的开关角度降低排气压力，实现压缩机气流流量的增加以缓解喘振。以离心压缩机特性曲线的喘振线作为基准，以左右 $3\% \sim 8\%$ 作为喘振裕度，当工况脱离这一工作区间时模糊 PID 系统进行自动控制。模糊 PID 控制的控制策略为在小偏差范围内采用 PID 控制，当偏差较大时则采用模糊控制进行。当工况处于喘振线左端时，PID 增益调高使得排压阀大角度张开；当处于喘振线右侧时，增益降低使排压阀关闭，模糊控制使得 PID 调节能够快速响应。

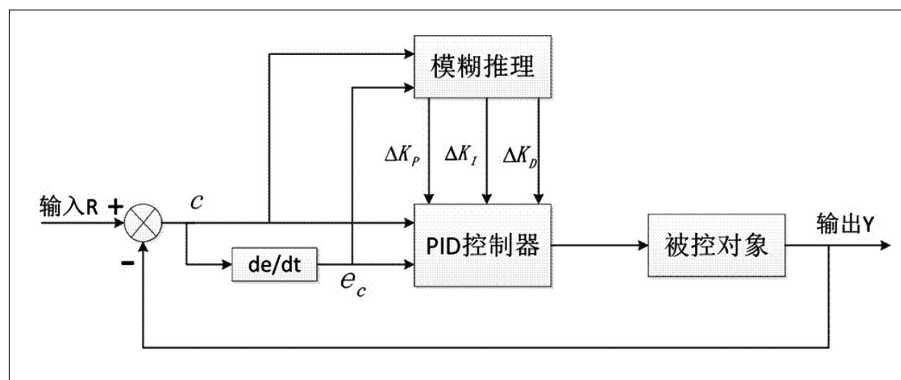


图 2 模糊 PID 算法控制原理图

3.3 基于强化学习的离心压缩机防喘智能控制

对离心压缩机的防喘控制主要是通过控制各器件实现对各级气流流量的动态调节。在众多智能控制算法中，强化学习（图 3）是一种对时序信息的预测与控制最为精确的控制算法。在离心压缩机喘振模型的构建中，可以将模型视为一个马尔可夫过程，即下一时刻的变化只受到当前时刻的影响而与历史影响无关，这一性质是强化学习的基础条件，因此可以利用强化学习进行模型的计算。

在强化学习中，模型会进行两步运算，一是基于当前数据与信息的预测步运算，二是对预测值与实际值之间差异的评价，当发生预测值与实际值的差异时，采用策略梯度的方式对模型的参数进行更新，与传统的机器学习控制算法不同，强化学习不仅能够对控制目标的调节幅度进行控制，还能够智能化的进行下一步行为的预测，实现完全去人工的自动化控制。

此外，智能化的控制策略在实现防喘功能的基础上还应当兼顾离心压缩机的运行效率与运行产出，降低由于排气压力过高导致的放气阀能量逸散现象，因此工况还不宜过大。上述提到，喘振情况与压力、流量与效率呈相关性，因此根据这两项指标在压力与流量特性曲线、效率与流量特性曲线中绘制平衡线，平衡线的绘制应当在保证流量范围的情况下保证运行效率尽可能高，能量逸散在额定流量范围内尽可能小。以当前工况与目标平衡线的欧氏距离作为评价指标，对当前参数下的工况曲线进行拟合，采用惩罚系数的方式引导曲线通过不断自适应调参使得运行曲线不断靠近平衡曲线。

为解决强化学习中参数学习的样本数据不具备独立同分布特性，采用经验回放的方法进行算法改进，经验回放是指对机器学习中出现网络收敛不稳定时对网络训练与参数更新过程的改进。当完成了一次预测与评价计算后，先将学习到的样本数据存放于经验库中进行整合，将同分布的数据进行归类后再次进行计算，最终完成权重的更新。

3.4 模糊 PID 控制与强化学习的喘振控制比较

两种控制方法均能够实现对喘振的有效抑制，并使得离心压缩机工作于特性曲线的防喘控制线附近。但模糊 PID 算法控制下的机器工作效率平均小于强化学习控制，模糊 PID 控制的响应速率也要小于强化学习控制，此外模糊 PID 的模糊策略设置受到人为经验的影响较大，算法初值的选择对于控制效果也有着较大的影响。但模糊 PID 算法直接控制了流量控制与流量设定，对于防喘排压阀的开合度控制收敛度更高，此外模糊 PID 算法的计算成本要远小于强化学习，因此两算法均有其适用场景。

4 结语

离心压缩机的喘振现象会随着气流的减少不断加深，喘振程度的加深又会导致压缩机进气口的负流量问题，因此喘振现象得不到有效控制时必然会不断恶化，智能化的喘振控制能够最大限度地避免离心压缩机工作于喘振区。强化学习在喘振控制上的应用是重要的技术路线创新，有效提高了控制的响应时间，进一步提高了智能控制系统工业部署的可行性。在未来的技术发展中，算法融合将助力智能控制方法进一步精进，而信息与通信技术的发展又会使得智能控制更广泛地运用于不同场合。

参考文献：

[1] 姜丽霞. 离心式压缩机的防喘振控制设计探讨 [J]. 山东化工, 2022, 51(2): 161-162+165.

[2] 秦晓东, 邓琳纳, 李泊翰, 等. 天然气离心式压缩机防喘振优化控制技术研究 [J]. 石油和化工设备, 2021, 24(9): 87-88.

[3] 韩永, 林乐, 赵惠. 离心式压缩机防喘振智能控制系统研究 [J]. 中国设备工程, 2020(9): 33-34.

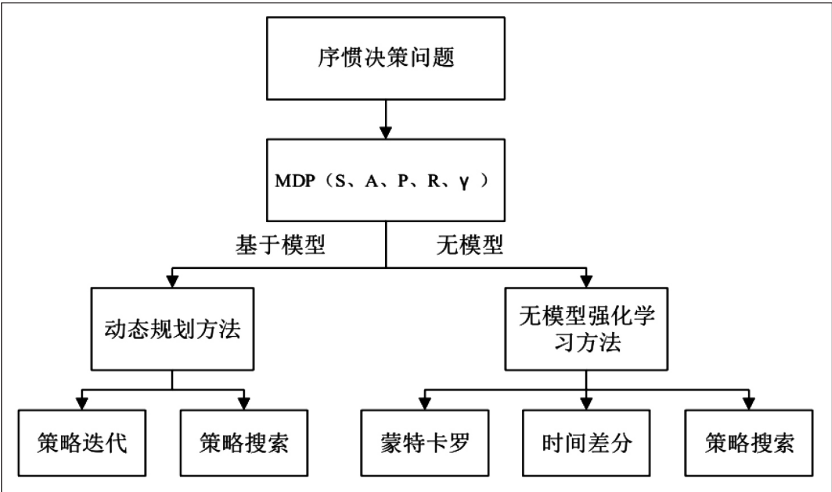


图 3 强化学习的原理与方法