

暖通电动执行器智能控制研究

刘伟¹ 王一轩^{1,2} 马玉山¹ 何立军¹ 陈政洁¹

1 六盘山实验室

2 北京航空航天大学

DOI:10.32629/etd.v7i1.22230

[摘要] 暖通系统能耗占比持续攀升,电动执行器作为末端调节与输配系统的关键部件,其控制精度与响应速度直接决定系统运行效率与室内热舒适水平。引入高精度快速响应技术,不仅有助于优化设备协同、减少能量浪费,更能够强化系统动态调控能力。其核心价值在于深度挖掘节能潜力,同时兼顾舒适性,从而在保障环境品质的前提下最大限度降低运行能耗。本文从智能控制的角度出发,对暖通电动执行器所面临的问题及其技术难点进行总结归纳,并对比分析了模糊控制、神经网络、预测控制以及混合策略等多种智能控制方法的应用情况以及未来发展方向,在此基础上提出了一套包括感知加强、策略提升以及边缘计算部署三个方面的智能控制解决方案并对其在实际工程项目中可能采取的方法进行了讨论。研究发现,引入智能控制并不是简单地用一种新的算法取代现有的旧算法,而是要改变执行器端的数据驱动能力和通信结构,从而达到由原来的“被动反应”转变为现在的“主动预测”。

[关键词] 暖通; 电动执行器; 智能控制; 模糊控制; 预测控制

中图分类号: TU83 文献标识码: A

Research on Intelligent Control of HVAC Electric Actuators

Wei Liu¹ Yixuan Wang^{1,2} Yushan Ma¹ Lijun He¹ Zhengjie Chen¹

1 Liupanshan Laboratory

2 Beihang University

[Abstract] The proportion of energy consumption attributed to HVAC systems continues to rise. As a key component of terminal regulation and energy distribution systems, the control accuracy and response speed of electric actuators directly determine system operating efficiency and indoor thermal comfort. The introduction of high-precision, fast-response technologies not only helps optimize equipment coordination and reduce energy waste, but also strengthens the dynamic regulation capabilities of HVAC systems. Its core value lies in fully exploiting energy-saving potential while maintaining comfort, thereby minimizing operating energy consumption to the greatest extent possible while ensuring environmental quality. From the perspective of intelligent control, this paper summarizes the problems and technical challenges faced by HVAC electric actuators, and comparatively analyzes the application and future development directions of various intelligent control methods, including fuzzy control, neural networks, predictive control, and hybrid strategies. On this basis, an intelligent control solution covering three aspects—enhanced sensing, strategy improvement, and edge computing deployment—is proposed, and potential implementation approaches in practical engineering projects are discussed. The study finds that introducing intelligent control does not simply mean replacing existing algorithms with new ones; rather, it requires transforming the data-driven capabilities and communication architecture at the actuator end, thereby shifting the actuator from the original mode of “passive response” to “active prediction.”

[Key words] HVAC; electric actuators; intelligent control; fuzzy control; predictive control

引言

暖通系统能耗占建筑运行总能耗相当一部分,是实现“双碳”目标的重要一环。电动执行器作为系统的核心调控部件,

其性能优劣直接关乎室内的舒适体验与系统的节能效果,是决定整体运行品质的关键。暖通系统具有很大的时滞性:大热容量造成了明显的延迟,多个阀门之间的相互影响导致回路间产

生干扰, 在小开度的情况下是非线性的, 所以传统的PID控制器在不同的工况下缺少自我调整的能力, 无法达到节能的要求。虽然模糊控制、深度强化学习以及模型预测控制等先进方法为解决这一问题提供了新的思路, 但是要将它们从理论转化为有效的实践还需要跨越巨大的差距。因此, 优化电动执行器控制使之更好地适应复杂的运行条件并且提高准确性对促进暖通节能具有重要意义。

1 暖通电动执行器控制特性与核心难点

1.1 执行器工作特性与控制变量耦合

暖通电动执行器基本工作原理是通过模拟量或脉冲信号控制电机正反转, 在减速器作用下将角度旋转或者线性位移传给阀芯或者风门叶片从而改变流体流量, 而执行器自身动态特性可以简化为一阶惯性加纯滞后形式, 但是它的主要参数(增益、时间常数)并不是恒定不变, 而是随着阀门前后压差以及阀芯行程变化很大。例如常用的等百分比流量特性的调节阀, 在10%-30%的小开度范围内流量增益可达到大开度区几倍甚至十几倍, 这样大的增益非线性给固定参数控制器带来很大挑战^[1]。而在变水温的同时又存在变流量的情况下, 执行器的动作会对水流分配产生影响也会由于改变换热器传热系数进而影响到供水温差, 这就会造成水力和热力之间相互影响, 从而使执行器输出房间温度传递函数变得非常复杂。

1.2 非线性时变扰动与环境不确定性

暖通系统运行过程中, 外界温度变化、太阳辐射强度、室内外人数、设备发热量等因素都存在显著的日变化和季节变化并且伴有不确定性影响, 这些干扰都会以热量的形式作用到控制器输入端上, 需要执行机构对不同频率信号都能做出及时响应, 但是由于电动执行机构受到电动机最大输出转矩、阀杆摩擦力、动作时间限制, 在短时间内跟踪给定值容易出现过冲或者不到位现象。而且长时间使用后阀座磨损、密封圈老化、传动部件间隙变大等原因导致执行机构的真实参数发生变化, 而在线辨识得到的模型无法反映当前实际情况。传统的周期性人工标定方法虽然可以保证一定精度, 但是却需要较高费用并且两次标定之间的时间内执行机构一直处在未标定状态下工作。

1.3 既有控制策略的局限性评析

目前暖通领域执行器控制方式主要还是PID及其改进版本(例如PI加前馈)。在工程上一般使用齐格勒-尼科尔兹之类的经验法进行调节, 这些方法都是基于对象是线性和时间不变假设之上, 显然不符合实际情况。因此在某种特定情况下得出的最佳参数, 在负荷大幅度改变的情况下会导致控制器发生临界振荡或者响应缓慢。一些高级楼宇自控系统使用了自适应控制或者增益调度PID, 根据温度偏差或阀门位置不同而相应地改变参数设置, 但是由于传感器数目有限以及计算资源有限, 所以分段的方式比较简单而且不能很好地处理随机干扰^[2]。近年来有一些人把模糊控制、神经网络预测等应用于执行器控制, 仿真证明它们比PID更好, 但是因为要在线下进行学习或者设定规则需要针对一定条件下的数据集, 所以其不具备推广性从而不能保证在

实际应用中的效果。

2 智能控制方法的适配性与改进方向

2.1 模糊控制的规则简化与在线调整

模糊控制不需要知道被控对象精确数学模型, 而是利用专家经验编写类似于“当温度偏差大并且偏差变化率为正值时, 阀门位置增量很大”的模糊控制规则来进行决策。这使得模糊控制很适合用于暖通执行器控制中参数时变以及模型不确定性的情况。但是传统的模糊控制也有不足之处, 那就是模糊控制规则集完全取决于专家经验, 而且一旦确定之后就不再改变, 不能应对由于执行器老化引起的变化情况^[3]。一种方法是在控制器设计中加入模糊规则自我组织能力, 在线根据误差及其变化率统计特性用性能反馈来调整每一条规则重要程度; 另一种方法就是模糊控制与PID相结合的方法, 在大偏差范围内用模糊控制来获得较快响应速度, 在小偏差附近则使用经过模糊整定之后PID来消除剩余误差, 这样可以发挥两者长处并且易于实现。

2.2 神经网络的实时参数辨识与补偿

神经网络有很强的非线性映射能力, 可以用来在线辨识执行器模型变化并且补偿其逆特性。即用径向基函数(RBF)神经网络建立执行器逆模型, 把期望流量作为输出反推出所需控制量来克服由于阀门非线性导致流量增益改变, 在控制系统里, 神经网络补偿器是前馈路径并与反馈控制器同时工作——反馈控制器确保系统的稳定性和鲁棒性, 而神经网络用于适应不断改变的非线性部分以实现精确补偿。这给实际应用带来一个问题就是神经网络权重更新的速度以及所花费的时间。因为执行器控制时间尺度一般很短(通常是秒级), 所以应该使用简单一些的神经网络并且添加动量或者自适应学习率等促进快速收敛的方法。但是需要注意的一点是神经网络并不是要达到一种“黑箱”的端到端控制方式, 而是为原来的控制器提供一个动态参数调整的方法, 形成一个透明可控的半透明控制系统。

2.3 模型预测控制的应用前景

模型预测控制(MPC)根据当前状态以及未来的输入序列预测系统的输出, 在滚动优化中得到最优控制量, 由于它能够考虑约束并且具有多步前瞻性因此对于暖通执行器有重要意义——比如可以预见阀门行程限位或者速度限制等问题从而防止发出使得执行器无法承受的命令造成过载失效, 在暖通上MPC最突出的地方就是可以根据建筑物热惯性和天气预报信息, 在未来一段时间内预测出需要做出的操作从而让执行器提前动作来对抗将要到来的负荷变化。最近几年随着基于数据驱动MPC和深度学习相结合的研究越来越多地出现这也就意味着这种方法的应用范围得到了扩大——使用长短时记忆网络(LSTM)建立系统预测模型解决了传统的模型构建工作量大而且难以及时更新的问题^[4]。但是也应当注意到的是由于MPC需要进行在线优化运算这对控制器的性能提出了很高要求而在价格低廉的执行器嵌入式设备上实现这一目标十分困难需要更加简洁高效的方法以及相应的硬件支持才能真正应用到实际生活当中去。

3 智能控制实现的工程路径

3.1 智能控制硬件架构与通信升级

智能控制方法实现到现场稳定运转,首先要解决执行机构部分硬件更新问题。传统执行机构内部仅有简单电机驱动电路以及位置反馈电位器,无任何数字计算与通信功能。而新型智能执行机构应具有“双核”异构计算结构:一个低功耗微控制器用于完成电机换向、过载保护、位置环路等对实时性要求非常高的底层控制工作;另一个有较多浮点运算能力处理器来执行智能算法推算、状态估算以及数据记录等功能。这两个核心通过共享内存或者高速总线进行通信,以免造成控制回路中有不可预测时延,在通讯上也从以往0~10V或者4~20mA模拟量信号变成可以使用4G、Rs485通讯,使用BACnet或者MQTT等网络协议使执行机构能与上位机进行交互(比如当前阀门开度、累计位移、输出转矩以及错误码等),从而让基于数据智能控制成为可能。

3.2 数据驱动与机理建模的互补策略

智能控制效果发挥程度很大程度上取决于执行器以及被控对象动态模型精度,在实际应用中,单纯依靠机理建模工作量大并且参数不易获得,而完全基于数据驱动又会遇到数据不足以及过拟合问题。一种折中方式就是采用“机理框架+数据学习”灰箱建模方法:首先建立执行器电机-传动机构-阀门简单物理模型(例如直流电机转矩平衡方程、减速齿轮动力学方程)确定该模型框架及其主要参数种类,其次通过执行器自带传感器所采集运行信息(行程位置、电流、电压、转矩等)来在线辨识出该模型未知参数,这种方法好处是物理模型给出了预测基本框架,而数据只是用来调整参数,从而大大减少对于训练集需求量同时也比纯黑箱模型具有更好泛化能力。

3.3 控制策略分级协同架构

由于每一种智能控制方法都有一定的适用范围以及缺点,从工程实际考虑应采用分层合作的方式进行控制。可以分为三个层次:第一个层次是“实时响应层”,使用PID或者模糊PID等简单算法,在几毫秒内完成一次计算,保证执行机构的基本位置和对外界干扰的鲁棒性;第二个层次是“参数优化层”,每隔几分钟进行一次神经网络或者参数辨识,根据一段时间内的历史数据对PID增益或者模糊规则进行在线调整,使得第一个层次中的控制器能够随着工况的变化而持续改进;第三个层次是“决策调度层”,部署MPC或者基于强化学习的方法,每隔十几分钟到一个小时进行一次计算,在天气预报、建筑物负荷预测以及电价的基础上得到一段时期的执行器的目标值并将其下发给第一、二个层次作为目标参考。这三层不同时间尺度的存在有效地解决了计算量的问题并且让整个系统在不同的时间尺度上发挥各自的作用相互配合。

4 智能控制面临的挑战与展望

首先是对智能控制的评估标准不足。相比于传统的PID控制

有较完善的稳定性判据,大部分智能控制缺少有效的评估手段以及出现错误时的安全回退方案,在发生意外情况时如何平滑地进行切换还没有形成统一的标准。其次是对数据的要求高而难以获得高质量的数据集。智能控制需要大量的标记良好数据来训练模型,但是现实中的一些故障状态或者极端的情况很难获取;而且由于神经网络具有“黑箱”的特点,不符合工程师们希望了解原因和结果之间的关系的需要,因此让使用者充分相信它也需要一定的时间。另外随着边缘计算的发展可以解决算力的问题使得复杂的智能控制可以在执行器上运行;而数字孪生又可以给智能控制器提供一个仿真环境用于其前期离线训练以及后期上线后对其监控,使其更快地成熟起来。再者就是标准化的问题,目前迫切需要有一套关于智能执行器的功能分类、测试标准以及数据接口的相关规定,以利于整个行业共同发展。最后也是最重要的是要让执行器的智能控制融入到建筑整体能源管理系统当中,变成整个建筑的大局的一部分,而不是孤立存在的“单点智能”,这样才能发挥最大的作用。

5 结语

暖通电动执行器的智能控制是实现建筑能源系统精细化运行的重要技术支撑。本文在剖析执行器控制固有难点的基础上,论证了模糊控制、神经网络和模型预测控制等智能方法在应对非线性、时变与大滞后问题上的适配价值,并提出以“灰箱建模”替代纯黑箱数据驱动、以“分级协同架构”替代单一算法万能论的工程化实现路径。核心观点在于:智能控制的落地不在于算法本身的复杂度高低,而在于能否在实时性、可靠性、可维护性等工程约束下找到稳定有效的求解方案。未来研究应着重推进算法标准化、验证体系化与硬件平台化,使执行器真正成为暖通系统中具备感知、决策与执行能力的智能节点,而非被动接收指令的终端元件。

[基金项目]

宁夏自然科学基金“面向供热管网的多传感器电动执行机构感知运维及柔性控制策略研究”(项目编号:2026AAC030309)。

[参考文献]

- [1]张伟,王建民,刘洋.建筑系统电动执行器建模与非线性补偿方法综述[J].暖通,2024,54(3):12-20.
- [2]陈志强,李华.模糊PID控制在水系统调节阀中的应用研究[J].建筑科学,2023,39(10):185-192.
- [3]刘杰,孙晓峰,周明.基于RBF神经网络逆补偿的电动调节阀控制策略[J].控制工程,2024,31(5):897-904.
- [4]杨波,赵立.模型预测控制在建筑暖通系统优化运行中的研究进展[J].制冷学报,2025,46(2):1-10.

作者简介:

刘伟(1996—),男,宁夏固原人,硕士研究生,中级工程师,研究方向:智能控制、精密测量、通信系统和嵌入式系统。