

工业自动化系统中PID控制器的参数自整定方法研究

刘 杰

中国石化中原石油化工有限公司 河南 濮阳 457000

摘 要：在工业自动化进程中，PID控制器的参数自整定至关重要。基于继电反馈、模型辨识、智能算法以及专家经验的各类自整定方法不断涌现，各有其独特优势与适用场景。系统非线性及时变性、噪声与扰动，以及多变量耦合等问题，给参数自整定带来诸多挑战。引入自适应机制、增强抗干扰能力，以及采用多变量解耦与协同整定等手段，可有效应对这些难题，推动PID控制器在复杂工业环境中实现更精准、高效的控制。

关键词：工业自动化系统；PID控制器；参数自整定；方法

引言

在工业自动化领域，PID控制器是保障系统稳定运行的关键环节。其参数的精准整定直接决定控制性能优劣。然而，工业过程的复杂性与多变性，使得传统固定参数PID控制难以满足需求。本文深入剖析基于继电反馈、模型辨识、智能算法、专家经验等多种参数自整定方法，同时探讨其在系统非线性、噪声干扰及多变量耦合等复杂工况下遭遇的挑战，并提出创新性解决思路，旨在为提升工业自动化系统控制水平提供有力支撑。

1 PID控制器概述

在复杂的生产运行体系中，各类参数的动态平衡直接关系到整体流程的稳定性，而PID控制器作为实现这一平衡的核心手段，始终扮演着精准调节的角色。其通过比例、积分、微分三个环节的协同作用，持续感知系统输出与设定目标的偏差，借助实时运算生成调控指令，确保关键变量始终维持在预设区间，这种动态响应能力让整个生产链条得以在波动环境中保持有序运转。比例环节依据偏差大小即时输出调节信号，快速抵消大部分扰动带来的影响，为系统提供初步的稳定性支撑；积分环节则专注于消除长期存在的稳态偏差，通过对累积误差的持续修正，避免微小偏差随时间推移引发系统性波动；微分环节则通过预判偏差变化的趋势，提前施加反向调节，有效抑制参数突变可能导致的超调现象，三者的有机融合形成了一套完整的闭环控制逻辑。这种控制方式能够适应不同工况下的参数特性，无论是面对缓慢变化的工艺条件，还是应对突发的外部扰动，都能通过参数的动态调整保持调节精度，从而减少因变量波动造成的资源损耗，提升整体运行效率。在物料转化、能量传递等关键环节，其细腻的调节能力可以优化反应条件，让各类工艺参数在协同作用中达到最佳状态，间接推动整个生产体系向更高效、更稳定的方向演进。通过与各类传感设备和执行机构的无缝衔接，PID控制器将分散

的控制节点整合为统一的调控网络，使局部调节与整体平衡形成联动，这种系统性的控制思维不仅简化了复杂流程的管理难度，更在潜移默化中构建起一套自适应的运行机制，为持续优化生产模式提供了坚实的技术支撑。

2 工业自动化系统中PID控制器的参数自整定方法分析

2.1 基于继电反馈的自整定方法

(1) 该方法通过在控制回路中引入周期性继电特性信号，使系统产生等幅振荡，利用振荡过程中获取的临界参数（如振幅、周期）推算PID控制器的初始参数。其无需精确数学模型，在复杂工艺环境里适应性好，尤其契合难以精确建模的非线性环节，能在物料混合、温度调节等动态复杂场景快速生成基础参数，为后续精细优化提供起点。(2) 其核心逻辑在于将非线性继电反馈与线性控制规律相结合，通过检测系统在临界状态下的动态响应特征，自动匹配预设的参数计算公式，省去了人工试凑的繁琐过程，在处理高粘度流体输送、多相流反应等存在强耦合特性的控制对象时，可减少因参数设定偏差导致的调节滞后，让系统在动态平衡中更快趋于稳定。(3) 改进型继电反馈算法通过引入可变幅频特性，能在避免系统进入深度振荡的同时获取更丰富的动态信息，这种优化让其在处理含有纯滞后环节的工艺参数时，既保持了快速整定的优势，又降低了对生产过程的扰动，使整定过程与正常生产节奏形成良性互动，提升参数调试阶段的整体效率。

2.2 基于模型辨识的自整定方法

(1) 通过向控制对象施加特定激励信号（如阶跃信号、伪随机序列），采集输出端的动态响应数据，利用最小二乘法、卡尔曼滤波等算法构建系统的数学模型（如一阶惯性加纯滞后模型），再基于模型参数按照预设公式计算PID参数，这种基于数据驱动的建模方式能精准捕捉系统的动态特性，尤其适用于反应机理复杂的聚合反

应、催化转化等工艺环节。(2) 自适应模型辨识技术可实时更新模型结构与参数,当工艺条件因原料性质变化、设备老化等因素发生漂移时,能自动修正模型偏差,确保PID参数始终与当前系统特性匹配,这种动态适配能力在连续化生产流程中,可有效避免因模型失配导致的调节精度下降,维持工艺参数的长期稳定性。(3) 结合频域辨识方法能从响应数据中提取系统的幅频特性与相频特性,基于Nyquist稳定判据设计的PID参数可显著提升系统的鲁棒性,在处理存在高频噪声干扰的压力控制、流量调节等场景时,能滤除无效信号对模型辨识的干扰,使整定结果更贴近实际控制需求^[1]。

2.3 基于智能算法的自整定方法

(1) 将遗传算法、粒子群优化等智能优化算法引入PID参数寻优过程,通过构建以超调量、调节时间、稳态误差为目标的适应度函数,在参数空间中进行全局搜索,这种不依赖精确模型的优化方式能突破传统试凑法的局部最优陷阱,尤其在多变量耦合系统(如精馏塔多组分控制、流化床温度-压力协同调节)中展现出独特优势。(2) 改进型模糊PID自整定算法通过建立偏差与偏差变化率的模糊规则库,利用隶属度函数动态调整比例、积分、微分系数的权重分配,使控制器在处理非线性、时变特性显著的工艺参数(如高聚物粘度调节、溶剂回收塔液位控制)时,具备类人类决策的灵活响应能力,减少参数突变带来的系统波动。(3) 深度强化学习算法通过与控制对象的持续交互获取反馈信号,在探索-利用的动态平衡中自主学习最优控制策略,这种端到端的学习模式能自动适配复杂工业环境中的未知扰动,在应对突发工况(如原料进料量骤变、换热器结垢导致的传热效率下降)时,可快速生成自适应调节方案,提升系统的抗干扰能力。

2.4 基于专家经验的自整定方法

(1) 将领域内积累的典型工况调节经验转化为结构化的规则库,借助模糊推理引擎,把实时监测数据与规则库进行高效匹配,从而生成PID参数调整指令。这种融合实践智慧的方法,在处理类似历史工况的扰动时,能够迅速调用成熟的调节策略,有效缩短系统受到扰动后恢复稳定状态所需的时间。(2) 专家系统通过案例推理模块存储历史整定案例,当遇到新的工艺波动时,通过相似度算法检索最匹配的案例并适配参数,这种基于案例的推理机制在处理间歇式生产(如批次反应釜的温度曲线控制)中,能结合不同批次的原料特性实现参数的个性化调整,提升产品质量的一致性。(3) 融合知识图谱技术的专家系统可构建参数影响因子的关联网络,当某一工艺参数(如反应压力)发生异常波动时,能自动追溯其与流量、温度等参数的耦合关系,在调整PID

参数时兼顾多变量协同作用,这种系统性的调节思维在复杂化工装置的整体控制中,可避免局部调节对其他环节造成的次生扰动。

3 工业自动化系统中PID控制器的参数自整定方法面临的挑战与解决思路

3.1 面临的挑战

3.1.1 系统非线性及时变性的干扰

在工业生产环境中,控制对象的动态特性往往随着工况变化呈现显著的非线性特征,例如在化学反应过程中,随着反应物浓度的变化,反应速率常数可能呈现非线性变化,导致系统的传递函数参数随时间发生漂移,这种时变特性使得基于固定参数模型设计的PID控制器难以在全工况范围内保持理想的调节效果。当系统从低负荷状态切换到高负荷状态时,设备的动态响应速度可能发生显著变化,原本在低负荷下整定的PID参数在高负荷工况下可能出现调节滞后或超调量过大的问题,而频繁的工况切换会进一步加剧参数失配的程度,使系统长期处于非最优调节状态。设备的老化、催化剂活性的衰减等缓慢变化的因素,会使系统的动态特性在长期运行过程中逐渐发生改变,这种累积性的时变特性如果不能被及时感知并进行参数修正,可能导致系统的调节精度逐渐下降,最终影响产品质量的稳定性。

3.1.2 噪声与扰动的影响

工业现场存在多种噪声源,如传感器的测量噪声、电机运行产生的电磁干扰、流体流动产生的湍流噪声等,这些噪声会叠加在系统的反馈信号中,导致PID控制器获取的偏差信号包含虚假信息,从而影响参数自整定的准确性,例如在流量测量中,高频噪声可能使自整定算法误判系统的动态响应特性,导致计算出的比例系数偏小,无法有效抑制扰动。生产过程中还存在各种不可预测的扰动,如原料成分的突然变化、外界环境温度的剧烈波动等,这些扰动会使系统的输出偏离预期轨迹,干扰自整定算法对系统动态特性的辨识,在参数整定过程中,如果不能有效滤除这些扰动的影响,可能导致整定出的参数无法适应系统的真实动态特性,降低控制器的抗干扰能力^[2]。

3.1.3 多变量耦合系统的整定难题

在复杂的工业自动化系统中,多个控制变量之间往往存在强耦合关系,例如在精馏塔控制中,塔顶温度和塔底液位之间相互影响,一个变量的变化会引起其他变量的波动,这种耦合特性使得单独对某一回路进行PID参数自整定难以获得理想的控制效果,因为整定某一回路的参数时,可能会对其他关联回路产生不利影响,导致整个系统的动态性能下降。多变量耦合系统的参数空间维度较高,自整定算法需要同时优化多个回路的PID

参数,这不仅增加了算法的复杂度,还可能由于参数之间的相互制约,导致寻优过程陷入局部最优解,无法找到全局最优的参数组合,耦合关系的动态变化也会使自整定算法的鲁棒性受到挑战,在工况变化时,原本整定好的参数可能不再适应新的耦合关系。

3.2 解决思路

3.2.1 引入自适应机制

为应对系统的时变特性和非线性特征,可在PID参数自整定算法中引入自适应机制,通过设计在线辨识模块,实时监测系统的动态特性变化,当检测到系统参数发生漂移时,自动触发参数重整定过程,使PID参数能够跟踪系统的动态变化。例如,采用递归最小二乘算法对系统的传递函数参数进行在线估计,根据估计结果实时更新PID参数的整定公式,使控制器能够在系统特性变化时快速调整自身参数,保持良好的调节性能。可设计变结构自适应控制策略,根据系统的运行状态切换不同的参数整定模式,在系统处于线性区域时采用常规自整定算法,在非线性区域则切换到针对非线性特性优化的算法,提高控制器在全工况范围内的适应性。

3.2.2 增强抗干扰能力

为提高PID参数自整定算法在噪声和扰动环境下的鲁棒性,可采用滤波技术对反馈信号进行预处理,例如使用卡尔曼滤波器对测量信号进行平滑处理,滤除高频噪声,使自整定算法能够基于更真实的反馈信息进行参数计算。在参数自整定过程中引入扰动观测器,通过构建扰动模型对系统中的未知扰动进行估计,并在参数整定过程中对扰动的影响进行补偿,减少扰动对系统动态特性辨识的干扰。可设计基于鲁棒控制理论参数自整定算法,在参数整定过程中考虑系统的不确定性和扰动范围,使整定出的PID参数能够在一定的扰动范围内保持系统的稳定性和调节精度,提高控制器的抗干扰能力。

3.2.3 多变量解耦与协同整定

针对多变量耦合系统的整定难题,可采用解耦控制技术,通过设计解耦补偿器消除变量之间的耦合关系,将多变量系统转化为多个近似独立的单变量系统,然后分别对每个单变量系统进行PID参数自整定,降低整定难度,例如在多变量系统中,采用对角优势化方法设计解耦矩阵,使耦合系统的传递函数矩阵近似为对角矩阵,实现各控制回路的近似解耦。可采用协同优化算法对多变量系统的PID参数进行整体整定,通过构建包含多个控制回路动态性能指标的综合目标函数,利用智能优化算法在高维参数空间中进行全局寻优,找到使整个系统动态性能最优的参数组合,在优化过程中,充分考虑各参数之间的相互影响,使整定出的参数能够协调各控制回路的动作,提高整个系统的控制效果^[3]。

结语

综上所述,PID控制器参数自整定方法在工业自动化系统中不断演进。尽管面临系统非线性、噪声干扰与多变量耦合等挑战,但通过引入自适应机制、增强抗干扰能力、推进多变量解耦与协同整定,有望突破困境。未来,应进一步融合新兴技术,如深度学习、边缘计算等,提升自整定方法的智能性与实时性,助力工业自动化系统向智能化、高效化迈进,以适应不断变化的工业生产需求。

参考文献

- [1]张子安.工业自动化中PID仪表控制系统的优化设计[J].工程建设与发展,2025,4(3):259-261.
- [2]黄策.自动化控制系统中的PID参数整定方法与应用研究[J].建筑工程与设计,2024,3(8):175-176.
- [3]刘冰琪,解初,刘鹏.PID控制器最优参数整定方法的研究[J].科技风,2022(19):1-3.