

智能抗扰温控系统的构建与研究

韩洲亮

河北钒昇科技有限公司, 河北 石家庄 050073

[摘要] 工业流程中精确温度控制是对产品品质和产量的基础保证,但是现实中普遍存在的各种各样的干扰严重影响着传统控制技术的效果。针对这个问题,此文从智能温度控制系统抗干扰的设计问题入手,着重探讨了面对抗干扰的智能温度控制系统的设计思路。详细阐述了影响温度控制器的各种干扰来源以及其对温度控制器的影响,并指出了寻找有效的抗干扰方案的任务。提出了基于自适应补偿、预测前馈及鲁棒控制的多种控制手段联合的智能化控制体系结构。此体系结构采用智能决策的方法来实时调整所用的控制算法以便对付已知和未知干扰。

[关键词] 智能温度控制; 扰动抑制; 自适应控制; 预测控制

DOI: 10.33142/ect.v4i1.18833

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Construction and Research of Intelligent Anti-interference Temperature Control System

HAN Zhouliang

Hebei Fansheng Technology Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050073, China

Abstract: Accurate temperature control in industrial processes is the fundamental guarantee for product quality and output, but various interferences commonly present in reality seriously affect the effectiveness of traditional control technologies. In response to this issue, this article starts with the design of anti-interference for intelligent temperature control systems, and focuses on exploring the design ideas for intelligent temperature control systems facing anti-interference. The various sources of interference that affect the temperature controller and their impact on the temperature controller were elaborated in detail, and the task of finding effective anti-interference solutions was pointed out. A comprehensive intelligent control architecture based on adaptive compensation, predictive feedforward, and robust control was proposed. This architecture adopts intelligent decision-making methods to adjust the control algorithms used in real time to deal with known and unknown disturbances.

Keywords: intelligent temperature control; disturbance suppression; adaptive control; predictive control

在工业制造上广泛应用的电阻炉、恒温箱等都需对其温度加以有效地控制。温度控制器就是其中不可或缺的重要一环。温度控制器制造商都期望自己所制造出来的温度控制器可以很好地把机器内的温度稳定在设定值周围并不会有太大的超调。同时,还要有很好的自恢复性能。而在实际生产生活中温度控制系统的运行免不了会受到各方面的干扰如负载量变动、环境温度改变、元件老化以及测量噪音等因素。所以怎样有效地消除干扰的影响也就成为了提高自动化的显著难题。随着人工智能技术、现代控制理念的发展建立一种能够自我学习、具备强大抗干扰能力的智能化温度控制系统成为了对付难以处理的干扰的一种方法。

1 系统扰动分析与问题描述

1.1 温度控制系统中的扰动来源及分类

对扰动源进行剖析是采取抑制措施的前提。扰动按作用点及时间维度进行分类。在传播途径方面分为影响被控对象输入端的过程扰动以及作用在输出端的测量扰动两大类。过程扰动直接影响被控对象的能量平衡。如进料温度下降或者热损失增大都会引起对象动态发生变化,过程扰动可以认为是加在控制器输出上的未知输入,它影响控

制器输出大小依赖于对象动态特性。测量扰动发生在反馈环节中,由传感器漂移误差以及噪声组成。这类干扰会被当成偏差而导致误动作。根据在时间上的表现,扰动可以被分成阶跃式、缓慢式和振荡式三类。负荷突然变动可以看作阶跃式扰动,它的冲击很大;设备性能老化为缓慢型的扰动;环境温度一天之内呈现周期变化^[1]。不同的类型需要不同的解决办法。比如前馈控制可以用来对付可测量到的阶跃干扰,而自适应能够对缓慢型的漂移加以追踪。正确地归类有利于有针对性地设计方案。

1.2 扰动对系统性能的影响与抑制需求

干扰的存在打破了完美假设,在指标方面产生了多米诺效应。在时域中,理想的 PID 在没有受到干扰的情况下表现出色,但在受到大冲击负载干扰时候响应出现超调、震荡,时间加长。干扰带来的不稳定因素使得系统的阻尼性能变差从而引起动态品质下滑。一直存在的干扰会使系统不在平衡点稳定从而导致稳态误差的形成对于需要严格控制温度的操作来说显然是不能够被容忍的。而在频域当中,干扰带来了新的频率分量,如果处在了系统的增益较高也就是通频带范围之内,或者在谐振频率附近则很容易激起强烈的振荡。而对于具有时变特性和强非线性

控设备来说,干扰会与其进行交织加大控制难度。也就是说一般的单一定值参数控制器抗干扰效果不佳。这就要求设计更先进的方案,控制系统应该具有智能化消除外界影响的能力,即时监测扰动信息并且自主调节。针对抗干扰问题的智能化控制系统所追求的是要实现控制系统在不确定因素面前具有良好鲁棒性和自适应性以保证温度测量不受任何干扰的影响。

2 智能温度控制系统的总体设计

2.1 系统设计目标与性能指标

确立量化指标为导向设计的基础。系统的指标为:具有良好的设定值跟踪特性,无扰动或者轻微扰动下快速稳定地过渡至指定值,需要较小的超调与较短的时间;具有强的抗扰动恢复特性,加入扰动后可以有效消除,大的动态偏差小并且能够快速无差恢复。建立具体的考核标准:静态特性考查稳态误差;动态特性包括针对设定值响应的上升时间、超调量、调整时间,以及对于扰动的最大偏差与恢复时间。再引入集成鲁棒性指标,例如在发生参数变化的情况下还能保持稳定的能力以及控制器输出的变化程度。这些都是参考尺度。

2.2 面向扰动抑制的系统架构设计

对于多个目标,则使用分层递阶、多策略协作的智能化结构,包括感知层、决策层以及执行层这三层。感知层负责收集信息,比如获取温度反馈及环境温度等各种辅信息,经过预处理上传。决策层为大脑,精髓是以多策略协作的智能化决策方式为核心,其在接收到信息之后进行在线的状态和扰动识别,比如说由误差特性判断是给定突变还是负载扰动。再依据规则数据库或者机器学习策略,针对情况即时调度选用底层控制策略。而执行层是由一些提前编好的程序模块组成的,譬如自适应,预测前馈和鲁棒控制模块等,在接到命令之后根据相应算法规则运算出控制量输出。这种体系的优点就在于可以由高层次的调度来随机应变选用当前环境下最合适的控制器,从而取得总体最优的效果。

2.3 关键模块与功能定义

重要的模块实现特定的功能。信息融合与特征提取模块完成多传感器的数据同步、评价和特征运算。扰动检测与识别模块基于数据使用观测器或者在线辨识的方法,对总扰动进行实时计算。策略选择与参数管理模块中设置专家系统知识库,设定特定扰动特征和状态下被激活的控制器及其参数。多个控制量融合模块用于同时采用多控制器情况下控制量的加权集成或者平滑切换以防止命令突变。这些都是模块协作赋予系统的智能化。

3 扰动抑制的核心智能控制策略

3.1 基于自适应算法的扰动补偿

对于由被控对象参数缓慢漂移或未知的恒定负载所引起的扰动,自适应控制算法显示其独有的优越性。本文研究一种基于梯度下降的参数自适应律与传统 PI 控制相

结合的算法,将 PI 控制器的参数转化为可以在线调节变量,在系统运行的同时不断地观察系统的控制误差及误差微分的变化情况,根据所规定的性能指标函数,朝这一指标下降的方向及时对参数量值加以修正,若系统遭受缓慢时变的扰动而致性能下降,则这种参数修正能逐渐校正控制器的行为使之再次匹配当前对象的动态特性,进而克服了扰动的影响,这一过程自动完成。应说明的是自适应算法的收敛速率以及稳定问题须谨慎设定,太快的自适应会导致附加的震荡,在实际应用时常限制参数的变化速度及幅度来保证全域稳定。此策略特别适用于对象特性随时间变化缓慢但是规律无从知晓的一些工业连续炉窑。

3.2 基于预测控制的扰动前馈抑制

针对那些可以测量却又不受控的确定性扰动来说,前馈控制给出了防微杜渐的办法,而模型预测控制具备明确考虑限制并且能够进行多步优化的能力使其成为了实现高性能前馈抑制的理想架构。在这个控制系统里我们就构建了一个基于 DMC(动态矩阵)控制下的预报前馈模块:本质上预报控制器的核心就在于其内部具有一套描述了由扰动入口到出口处温度之间映射关系的扰动传递路径模型。当监测到了属于这类可测量扰动出现的时候,预测控制器就开始执行起来:它会借助这个扰动传递子模型对这段时期由于此次扰动而产生的影响做出若干时域后的预估值,并根据主体控制模型,把未来的温度预报值与期望值误差最小作为优化指标,在满足操纵变量的变化受限条件下不断滚动求取一组最优的未来期控制量增加值序列^[2],这样就可以事先下发一部分将来才要发生作用的控制指令来使得当扰动的实际效果显现出来之后大部分都被相应的抵消掉了,相对于常规静态前馈补偿而言预报前馈能更好地解决这一类具有预报特性的动态程序优化问题——如在这个塑机筒体温度控制系统就很好地解决了因螺杆定期往复所引起的一个可预见性的热负荷变动情况并大幅度削减了温度波动的程度。

3.3 基于鲁棒控制的扰动不确定性处理

自适应以及预测前馈都对模型准确度有一定的要求,在现实中有大量的无法被量测或者预测的随机扰动与模型不确定性存在。而在面对这些有界但是不确定的扰动与模型误差问题上,则是基于鲁棒控制理论之上的。本文引入了混合灵敏度的设计的鲁棒控制器以作为本系统的底层保底策略。该控制器的设计理念并非是以得到名义模型的最佳性能为目标,而是在系统具有扰动以及有界外部扰动的情况下,依旧能够使闭环系统保持稳定并使得扰动影响限制在一个允许范围内。通过合理选择权重函数可以在不同的频率区间内对跟随性能、抗扰性能及控制成本等做出平衡妥协,最后设计出的控制器通常阶数相对较高,但是其计算量在当前时代的嵌入式 CPU 上是可以达成的,将其作为一个备选方案放在手边,在决策模块判定存在高

度不确定性和频繁出现的高频频带的不确定性的时候启用或者加大此路方案权值,保证即使是在最坏扰动情形下系统也不至于失去稳定性,从而为其它策略提供可靠的保险保证^[3]。

3.4 多策略协同的智能决策机制

单一策略有优点但是很难单独面对复杂的干扰情况,所以怎样使多策略和谐相处成为提高系统智能度的关键。本文所设计智能决策方案使用基于规则和基于指标在线评估两者的混合型方案。此决策方案内部含有一个状况评估器不断运算一些表征系统瞬态表现的性能指标例如最近一段时间的误差绝对值积分大小或者控制器震荡剧烈程度等;与此同时它也有自己的规则库记录了专家们的知识。其中规则库规定了当性能指标处于什么状况并且观测到了怎样的干扰特性时应该更侧重采取或强化哪一类控制对策,决策机制并不是简单的通断模式切换,更多时候使用软切换或者是模糊加权的方法,它可以给来自各个控制方法的产生作用量输出附与时变量权值因子然后加权相加得到最终的控制总命令。

4 系统实现与性能评估

4.1 系统软硬件实现平台

为实现从理论设计到物理实体的验证,本研究构建了一套完整的实验平台。硬件平台的核心采用了一款高性能嵌入式工业控制器,其配备了必要的模拟量与数字量输入输出接口,以满足信号采集与控制指令发出的需求。温度测量使用 K 型热电偶,并配合高精度的冷端补偿与信号调理模块,确保传感数据的可靠性。被控对象为自主设计的电加热水箱装置,通过调节加热管的输入功率来控制水温,通过可调节阀门向水箱内注入冷水以模拟负载扰动,并利用风扇制造可变的环境温度扰动。执行机构选用固态继电器,采用脉冲宽度调制方式实现对加热功率的连续调节。

软件部分,下位机的核心控制程序采用 C 语言开发,以确保运行的实时性与确定性。上位机监控软件运行于个人计算机,通过以太网与下位控制器进行通信,实现了参

数在线设定、实时曲线绘制、数据记录与回放分析等功能。整个系统的控制算法以固定周期循环执行,在每一个采样周期内,严格依次完成所有传感器的数据采集、控制策略的智能决策计算以及最终控制量的输出。为更直观地展示该实验平台的系统组成与信息流关系,其整体结构如图 1 所示。

4.2 扰动抑制功能的集成与实现

平台搭建好之后,把各种智能控制方法进行编程并整合在同一平台之下。自适应补偿部分实现了在线参数调整律;预测前馈部分使用动态矩阵预测及滚动优化及误差反馈的方法;鲁棒性控制器编写成状态空间表达式的数字滤波器的形式。其中最难的部分是智能决策系统的设计,它的知识库是以一个结构体数组的方式来存储的,状态评估以及规则选择均在一个控制周期运行一次。为了实现多个控制作用间的平滑结合使用变化的加权系数方式。加权系数由规则选取情况与当前时刻的性能指标实时确定,在切换主要策略的过程中,总的控制量也是连续变换的过程。各部分之间的信息传递通过共享全局数据缓冲区来同步时间顺序。在集成之前也分别对各个功能模块进行了大量的独立实验以及参数调试使其可以在典型情况下正常运作。

4.3 系统静态与动态性能测试

整合后进行实验测试。静态特性实验测试无扰动情况下系统的稳态精度,在不同的给定点稳定一段时间并读取波动情况。实验结果表明此时的稳态误差保持在正负 0.1 摄氏度范围内具有较高的精度。而在动态性实验中又分为给定值跟踪与抗扰动性能测试。给定值跟踪即记录其由室温升高过程中的反应曲线图。抗扰动试验是在恒定时输入阶跃干扰量,周期性和环境等因素的扰动,获得最大的动态偏差以及返回时间。整个过程重复进行了若干次。根据曲线可以发现智能控制器在阶跃信号干扰的情况下比传统的控制方式所受到的冲击要小并且也能更快的恢复正常,在面对周期型干扰的时候可以有效的限制了波动幅值。

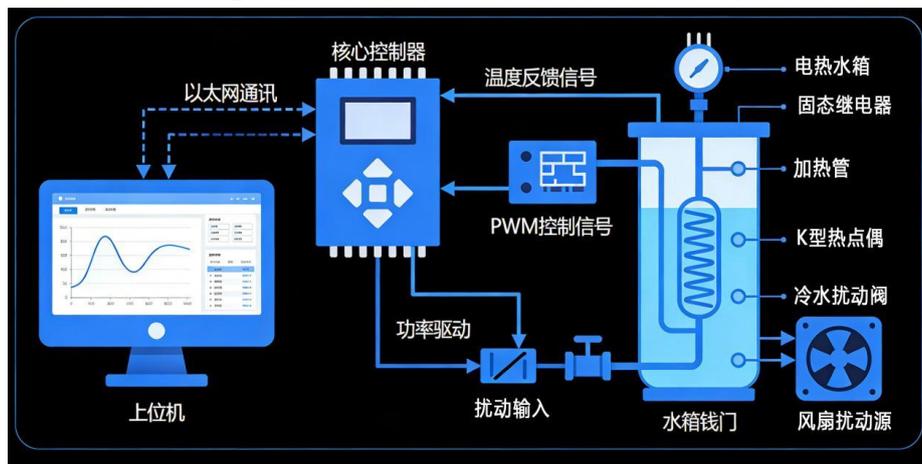


图 1 智能温度控制系统实验平台结构图

4.4 抗扰动鲁棒性对比分析

对经过精细调整的标准控制器在同一条件下对比试验。测试指标有最大动态偏差,恢复时间和控制信号变化量。阶跃负荷试验中智能系统的最大偏差点平均降低了近百分之四十五,而恢复时间减少了百分之六十左右。周期性干扰下的温度变化也被限制在了峰值的一半以上^[4]。更换发热元件以及调整流量以引起模型失配来测试其鲁棒性,原来的控制器需要进行再设计或者性能会变差,但对于智能控制系统即使参数产生波动仍旧可以保持稳定而且性能恶化得十分缓慢。通过对控制量波形观察发现智能控制系统的输出更为平稳。比较说明融合多种策略联合控制提高了系统抗干扰性和适应性。

5 结束语

本文针对扰动问题这一课题研究了智能温控的设计问题。基于对抗动的研究提出了基于架构融合多策略的协同学结构,并说明各模块及其决策机制。最后利用实验平台建立系统并做实验测试分析得到智能系统较原有方案

有更高的静特性、更快的动力特性及更强的抗干扰性能,显示了基于架构融合多策略是解决过程控制中不确定因素问题的有效思路,后续可以引入在线学习来丰富规则库并尝试拓展到更大的被控工业体上来增加实用价值。

[参考文献]

- [1] 欧阳嘉艺,汪明,马岱农,等.一种应用于焦炉加热系统的智能控制系统[J].燃料与化工,2025,56(6):35-40.
- [2] 卿晓梅,马子超.一种面向二维材料制备的智能测量与控制系统设计[J].现代电子技术,2025,48(22):21-25.
- [3] 岳斌.智能控制算法在热力站温度调节中的研究与应用[J].现代工业经济和信息化,2025,15(9):161-162.
- [4] 金公羽,史宇超,张家利,等.基于空气制冷的智能变电站户外柜温度调节系统分析[J].暖通空调,2025,55(1):439-442.

作者简介:韩洲亮(1991.5—),男,毕业院校:内蒙古科技大学,所学专业:控制工程,当前就职单位:河北钒昇科技有限公司,职称级别:中级工程师。