

基于专家 PID 控制的圆环链淬火系统^①

李文江, 史春图, 王 璇, 包日南

¹(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105)

²(山东科技大学 电气信息学院, 青岛 266510)

摘 要: 针对目前圆环链淬火过程中温度控制精度不高、抗干扰能力差等问题, 本文提出了一种新型的基于专家 PID 算法的圆环链淬火控制系统. 描述了智能专家 PID 算法的原理和实现方法, 且将其应用到淬火控制系统中, 并就常规 PID 和专家 PID 在淬火控制效果上进行了对比. 运行结果表明, 基于专家 PID 算法的温控系统可以对圆环链淬火温度实现优良的控制, 并具有响应速度快、鲁棒性强的优点.

关键词: 圆环链; 淬火加热; 专家 PID; 控制规则; 参数整定

Application of Expert PID Controller in Quenching System for Round Link Chain

LI Wen-Jiang, SHI Chun-Tu, WANG Xuan, BAO Ri-Nan

¹(Liaoning Technical University, School of electrical and control engineering, Liaoning, Huludao 230039, China)

²(Shandong University of Science and Technology, Faculty of Electrical and Control Engineering, Qingdao, 266510, China)

Abstract: Aiming at low precision and weak robust of the temperature control in the quenching process of round link chain, this paper puts forward a new quenching system for round link chain which is based on expert PID controller. The paper describes the principle and implementation method of expert PID controller, applies the algorithms into the quenching system for round link chain, and compares the effect of the common PID and expert PID controller. The experiment results show that the quenching system for round link chain based on expert pid controller system can achieve good control of round link chain quencher temperature and hold the advantages of fast response and strong robustness.

Key words: round link chain; quench; expert PID; control rules; parameter tuning

矿用圆环链热处理工艺中, 淬火、回火的温度控制决定着圆环链的生产质量. 在经历了箱式炉、连续式油电联合加热炉、转底炉的低效率加热设备后, 目前普遍采用中频电源电磁感应^[1]进行热处理. 文献[2]采用有限元分析法推导出感应加热数学模型, 文献[3]分别采用数值模拟方法和实验测量手段得出工件感应加热时温度参数的变化情况, 文献[4]将感应加热应用到曲轴工艺中.

文献[5]将模糊控制器应用到温度控制中, 虽然在某些特定温度范围能够很好的控制温度, 但控制过程中动态性能不够理想, 响应速度较慢. 文献[6]和[7]将神经网络和自适应方法应用于淬火控制中, 但这两种控制方法前期都需要大量的样本数据, 这样在生产

开始阶段会影响圆环链的部分产品质量. 本文分析以上三种方法都不太适合在圆环链产过程中的应用. 为此, 本文在研究了圆环链热处理工艺的特点后, 结合常规 PID 算法和工艺人员的经验, 提出了新型的基于智能专家 PID 算法的温度控制系统, 并将其应用到圆环链淬火加热系统中. 生实验运行结果表明, 基于智能专家 PID 算法的感应加热控制系统有效的解决了系统超调震荡的问题, 提高了系统响应速度, 增强了系统的抗干扰性.

1 圆环链淬火加热控制系统

圆环链淬火工艺过程: 将编制好的圆环链以一定的速度通过淬火感应圈, 对圆环链进行感应加热, 使

① 收稿时间:2013-10-05;收到修改稿时间:2013-11-29

淬火感应圈出口处圆环链的温度达到 $800\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ，然后使其进入冷却水中迅速冷却，完成淬火工艺过程^[5]。其核心是保证圆环链的各个部位受热温度均匀恒定，是一种动态复杂的控制过程。

圆环链热处理电气控制系统由温度检测部分，以 PLC 为核心构成的专家 PID 控制器及由中频电源等部分组成的温度调节执行机构，整个系统是一个温度反馈闭环控制系统。

专家 PID 控制算法的输入为给定温度值和圆环链的实测值，其输出信号为电压信号，电压信号作为中频电源板的输入信号，控制中频电源的逆变引前脚，进而控制中频电源的输出功率，从而控制圆环链电磁感应受热温度，使整个系统的温度控制达到圆环链淬火的工艺要求。系统在无人运行的情况下根据控制系统的响应情况，通过智能专家判断，自动实现参数的最佳调整，从而以优化方式改变控制的电压输出信号，使中频电源根据温度反馈输出相适应的输出功率，实现系统的自动调节。系统结构图如图 1

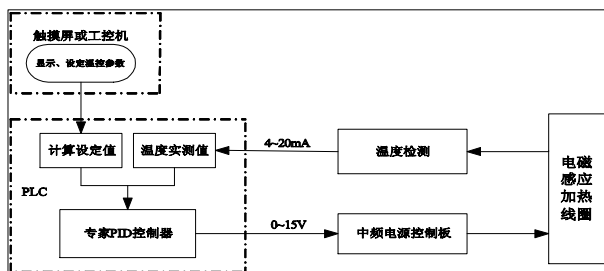


图 1 圆环链淬火加热控制系统

2 专家PID算法

2.1 PID 控制原理

PID 控制是经典控制理论中最具代表性的控制方法之一，在过程控制系统中得到很广泛的应用。

在应用中多采用数字 PID，它根据给定值 $r(t)$ 与实际输出值 $c(t)$ 通过对控制误差 $e(t)$ 进行比例 P、积分 I、微分 D 运算后，将运算结果加权作为控制器的输出^[6]。

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (1)$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \sum_{j=0}^t e(j) + K_d (e(t) - e(t-1)) \quad (2)$$

其中控制信号为 PID 运算结果 $u(t)$ ，同时作为执行机构的输入，控制被控对象。

2.2 专家 PID 算法

专家控制的实质是基于受控对象和控制规律的各种知识，并以智能的方式利用这些知识来设计控制器。而专家 PID 控制就是专家控制与 PID 控制的结合，即根据专家经验知识对 PID 控制的参数进行在线实时调整^[7]。

本文智能专家 PID^[8]是基于常规 PID 控制基础之上修改而成，其整体结构如图 2 所示。

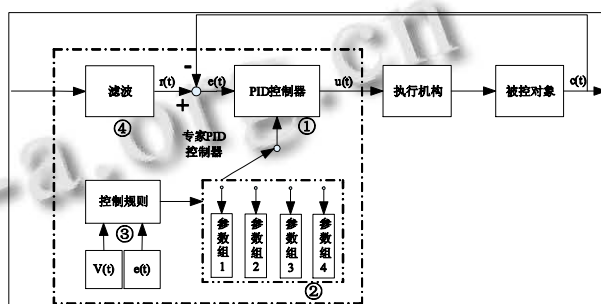


图 2 专家 PID 控制器

控制器主要由四部分组成：

① PID 控制器：根据控制规则选择不同的参数组对执行机构调节控制；

② 参数组：参数组是按照不同的控制规则设定的相应的控制参数；参数 1 是应用于加热系统全功率运行状态的；参数 2 是应用于圆环链受热温度大误差下的；参数 3 是应用与圆环链受热温度中误差下的；参数 4 是应用于圆环链受热温度小误差下的；

③ 控制规则：根据圆环链速度给进值 $V(t)$ 和差值 $e(t)$ ，选择不同的控制方法及控制参数，送入 PID 控制器；

④ 滤波设计：对采集到的温度检测值进行滤波控制，降低电磁对系统的干扰。

2.2.1 控制规则

PID 控制主要是将 PID 控制参数根据一定地控制规则进行分类设计及调整。在实际工程实践中，系统的状态会发生变化，一种在特定状态下整定好的最优 PID 参数在另一种状态下控制性能可能会很差，难以达到最佳的控制效果，相对于常规的 PID 控制，本文的专家 PID 控制器对不同的温度控制进行了优化。

$V(t)$ 为圆环链的给进速度， e_1 圆环链受热温度大误差值， e_2 圆环链受热温度中误差值， e_3 圆环链受热温度小误差值， $e_1 > e_2 > e_3$ ，根据给进速度的大小及

不同的温度误差值,设计 PID 控制算法,其中 e_1 、 e_2 、 e_3 是根据圆环链的淬火温度特性所人工设定的温度误差允许值,必要时可以根据现场的实际生产需要而略微放大和缩小这三个值。

具体控制规则如下:

① 在加热过程中,如果 $|e(t)| \geq e_1$,说明误差的绝对值很大,即圆环链的实际温度与设定温度相差甚远,应该考虑控制中频电源板按最大或者最小功率输出,已达到迅速调整误差的目的,使误差绝对值以最大速度减小;

② 若 $e_1 > |e(t)| \geq e_2$,误差绝对值依旧很大,为使系统具有较好的快速调整性能,尽量使比例作用加大,同时为避免系统响应出现超调,需对积分作用加以限制,取消积分作用;

③ 若 $e_2 > |e(t)| \geq e_3$,误差处于中等水平,为了保证系统的响应速度及超调量,应该减小比例系数,增加积分系数,适当调整微分系数;

④ 若 $|e(t)| < e_3$,误差已相对较小,为保证系统的稳态性能,适当加大比例积分系数,微分系数适量选取以防引起系统震荡。

2.2.2 滤波设计

在矿用圆环链热处理过程中,红外温度传感器检测温度环境恶劣、复杂,存在许多干扰,因此引入相应的滤波技术降低干扰是十分有必要的。本文结合热处理过程的环境,采用软硬结合:硬件上采用有源低通滤波,不再详述;软件上采用限幅滤波,

如果输入数据值超过了给定的阈值,我们就认为该值存在疏失误差,如果没有超过此阈值,就无需对其进行限制,即为限幅^[9]。

实现方法:将相邻两次的温度采集值相减求出其增量,并与允许的最大差值 ΔY 进行比较,若增量小于等于 ΔY ,则选用本次检测值;若增量小于等于 ΔY ,则选用上次检测值,如公式(3)。

$$Y = \begin{cases} Y(k), & |Y(k) - Y(k-1)| \leq \Delta Y \\ Y(k-1), & |Y(k) - Y(k-1)| > \Delta Y \end{cases} \quad (3)$$

3 仿真研究

圆环链淬火加热系统控制对象具有较大的非线性和时变性,根据文献[10]理论分析,近似认为传递函数为一阶惯性环节和滞后环节相串联的模型:

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}(1-e^{-Ts})}{s(T_0s+1)} \quad (4)$$

式中, K 为被控对象的稳态增益系数, τ 为滞后时间常数; T_0 惯性时间常数; T 为系统采样时间。

为了比较传统 PID 与专家 PID 在圆环链淬火温控系统中的有效性与实用性,经过采集现场大量的生产数据和经验得到惯性时间常数 $T_0=10s$, 滞后时间 $\tau=4s$, 系统参数 $K=1$, $T=1s$, 淬火温度设置为 920K。

分别以常规 PID 算法和专家 PID 算法设计控制器,用 MATLAB 进行仿真,其阶跃响应对比如图 3, 图 4。

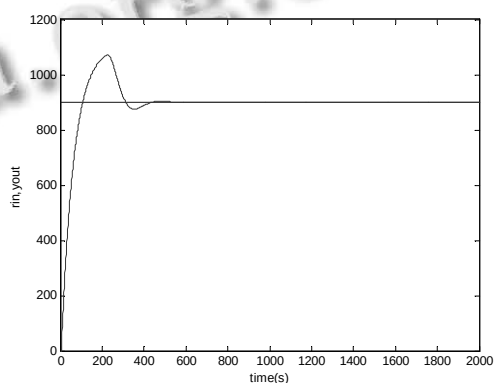


图 3 常规 PID 阶跃响应

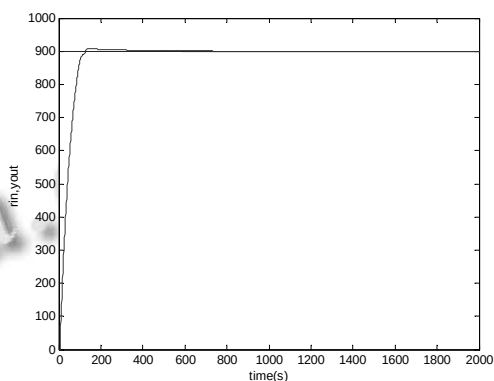


图 4 专家 PID 阶跃响应

由图 3 和图 4 中的阶跃响应曲线可以看出,采用常规 PID 的控制系统:超调量 $\delta=17.39\%$, 调节时间 $t_s=343s$, 存在着严重的超调及震荡,在实际加工中,超调会导致器件过热而烧毁,是不被允许的;相比于常规 PID,基于专家 PID 算法的淬火控制系统:超调量 $\delta=0.01\%$, 调节时间 $t_s=175s$, 几乎没有超调及震荡,调整时间上也大大减少,表现出系统具有良好的控制性能和较强的鲁棒性。

4 实验研究

基于以上专家智能 PID 控制方法为理论依据, 以 PLC^[11]为核心设计了圆环链智能感应加热系统, 并在吉林某机械制造厂试运行.

实验平台设计为: CPU 采用西门子 S7 224XP, 配以触摸屏 smart700 作为人机交互界面; 非接触式红外温度传感器用来快速采集圆环链加热温度; 中频加热电源的触发控制板为基于 CPLD 的 MPU6^[12]; 额定功

率 250KW; 额定频率 8000Hz; 逆变额定电压 750V; 输入三相交流电压 380V; 电源频率 50Hz; 输入功率 630KVA; 被控对象选用 $\Phi 38 \times 144$ 型号圆环链, 淬火温度 920℃; 给进速度 2.5cm/s.

分别运行常规 PID 和专家 PID 控制的圆环链淬火控制系统, 并实时记录圆环链温度. 实验温度数据如表 1、表 2. 图 5 为圆环链淬火控制系统在设定 920℃ 时的温升曲线图.

表 1 系统在常规 PID 下的温升数据

t/s	30	60	90	120	150	180	210	240
T/℃	284.5	711.3	905.2	980. 1	1040. 7	1070. 1	1045. 3	963. 2
t/s	270	300	330	360	390	420	450	480
T/℃	910.0	875.5.0	905.2	910. 4	918. 6	921. 2	920. 0	920. 0

表 2 系统在专家 PID 下温升数据

t/s	30	60	90	120	150	180	210	240
T/℃	232. 2	500. 7	708. 3	812. 8	866. 0	921.3	919.2	920. 1
t/s	270	300	330	360	390	420	450	480
T/℃	920. 0	920. 0	920. 0	921.2	920. 1	920. 0	920. 0	920. 0

从表 1、表 2 可以看出, 基于传统 PID 控制的系统, 依旧出现了超调, 峰值达到 1070.1℃, 直到 390s 才将系统稳定在 920℃ 左右;

而基于专家 PID 控制的淬火系统在 180s 的时候系统基本达到了设定温度, 其间出现的超调 δ 不超过 0.01. 将数据连接成曲线如图 5 所示, 可以看出, 系统的温升曲线和上节仿真曲线基本吻合, 基于专家 PID 的圆环链淬火控制系统的应用效果在控制精度、响应速度上都有了大大的改善.

5 结语

矿用圆环链智能加热系统的研究是当前矿用圆环链热处理工艺技术的重要课题. 本设计在分析圆环链淬火加热过程的工艺要求后, 采用 PID 算法结合专家判断组成专家 PID 智能控制器用来控制中频电源的输出功率. 从实验结果来看, 基于专家 PID 的智能感应加热系统响应速度快, 抗干扰能力强, 同时也降低了

能耗, 有一定地社会效益.

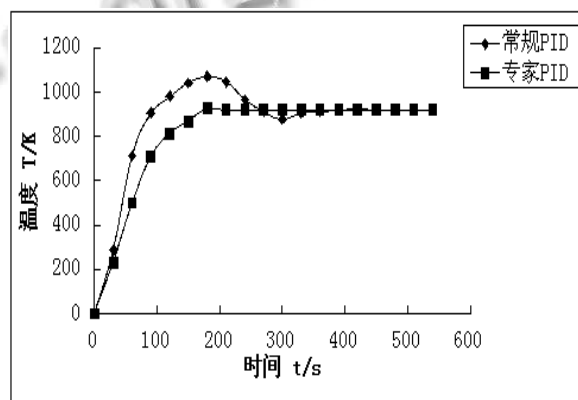


图 2 圆环链淬火控制系统在 920℃ 温升曲线

参考文献

- 1 李广义.感应加热炉温度智能控制系统研究[学位论文].洛阳:河南科技大学,2012,2-8.
- 2 夏永发,金玉龙.电渣炉夹具感应加热的有限元数值模拟.东

- 北大学学报(自然科学版),2010,(1):115-118.
- 3 张月红,王马华.感应加热参数对钢件温度分布的影响.金属热处理,2011,(9):61-64.
- 4 张长友,张锁怀.感应加热在曲轴红套工艺中的应用.兰州理工大学学报,2011,(5):36-40.
- 5 赵阳,曲兴华,李 睿.基于模糊算法的自调整温度控制系统.天津大学学报,2011,44(1):74-78.
- 6 左秀荣,陈蕴博,王森辉,李勇.基于人工神经网络的 P20 钢热处理工艺.材料热处理学报,2010,31(4):62-66.
- 7 宋文龙,曹军.基于自适应逆控制的干燥窑温度控制方法研究.农业工程学报,2006,22(3):95-98.
- 8 杨连弟.汽车零部件感应加热淬火设备知识讲座(二) 怎样看感应加热电源原理图.汽车工艺与材料,2007,(2):46-48.
- 9 郭楠,李智.专家 PID 算法在伺服系统中的应用与仿真.机械工程与自动化,2009,(6):61-63.
- 10 倪树,标张,冠文,刘日威等.专家 PID 温度控制算法在智能石墨消解仪中的应用.广东科技,2011,4(8):34-35.
- 11 Wang L, Du WC, Wang H, Wu H. Fuzzy self-tuning PID control of the operation temperatures in a two-staged membrane separation process. Journal of Natural Gas Chemistry, 2008,17(4):409-414.
- 12 张超,杨志义,马峻岩.限幅滤波算法在 WSN 数据预处理中的应用.科学技术与工程,2011,11(6):1207-1217.
- 13 刘永铨.钢的热处理.北京:冶金工业出版社,1981.
- 14 Siemens G. SIMATIC S7-300 Programmable Control Module Specifications References Manual. SIEMENS. 2002.
- 15 韩天锐,郭凤仪,曲春风.新型圆环链中频加热系统的研制.煤矿机电,2008,(6):90-92.