

# 矿用圆环链淬火温度控制系统<sup>①</sup>

李文江, 王晓光, 史春图, 吴威, 孙晓东

(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105)

**摘要:** 矿用圆环链的热处理是决定其产品质量和生产效率的关键所在。但由于控制方法和稳定性等原因, 目前国内矿用圆环链热处理中所使用的中频感应加热系统往往达不到工艺要求。本设计在对淬火工艺进行深入分析后确定了高质量圆环链淬火前最合理的温度。通过非接触式红外测温传感器对圆环链的淬火温度进行实时检测, 结合积分分离 PID 算法, 以 PLC 为控制核心, 利用 D/A 模块对中频电源控制模块进行控制, A/D 模块对系统反馈量进行采集, 并通过触摸屏对系统参数进行设置。最终实现对淬火过程的高精度闭环控制。针对工业现场的复杂环境进行了系统控制温度的稳定性分析, 从实际投入使用结果来看该系统对中频感应加热设备温度控制精度较高且操作简单方便, 人机界面友好, 长期运行稳定可靠。

**关键词:** 矿用高强度圆环链; 中频加热; PLC; 积分分离 PID; 淬火

## Mining Round Link Chain of Quenching Temperature Control

LI Wen-Jiang, WANG Xiao-Guang, SHI Chun-Tu, WU Wei, SUN Xiao-Dong

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technology University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** Heat treatment of mining round link chain is the key to the product quality and production efficiency. But because the control method and stability and other reasons, the medium frequency induction heating system used at present domestic chain in mining circular heat treatment often do not meet process requirements. The design determines the high quality chain before quenching the most reasonable temperature in deep analysis on the quenching process. The non-contact infrared sensor quenching temperature on the chain for real-time detection, integral separation PID algorithm, using PLC as the control core, control of the intermediate frequency power supply control module uses the D/A module, A/D module to collect feedback of the system, and through the touch screen to set the parameters of the system. The final realization of high precision is the closed-loop control of quenching process. In view of the complex environment of the industrial site stability analysis of the temperature control system, from the actual results of the system was put into use in intermediate frequency induction heating equipment temperature control accuracy is high and the operation is simple and convenient, friendly man-machine interface, the long-term stable and reliable operation.

**Keywords:** Mining high strength ring chain; induction heating; PLC; integral separation PID; quenching

## 0 引言

矿用圆环链使用在煤炭生产设备中会受到很大力的作用, 淬火工艺是影响圆环链性能的关键技术。精确而智能化的淬火温度控制系统可以精确、均匀控制链条淬火前温度, 使圆环链得到细的奥氏体晶粒, 高强度韧性<sup>[1]</sup>。

本文设计了一种新型矿用圆环链热处理设备的智

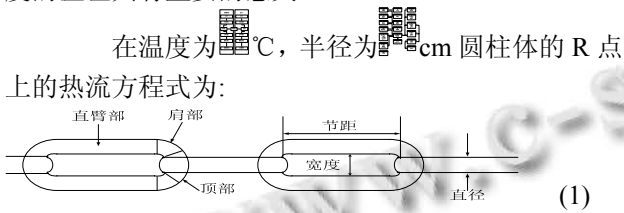
能控制系统。改善了以往圆环链感应加热温度不均匀以及一些接触性传感器的不稳定性等导致对圆环链淬火温度及回火温度的控制不精确以及系统震荡等问题。系统可按照设定的温度进行快速调整并且自动维持恒定, 友好的人机界面可执行监测和控制的功能, 通过非接触式红外测温对中频感应加热电源输出功率进行调节。系统可以监控加热炉温度、冷却水水位、

<sup>①</sup> 收稿时间: 2013-11-05; 收到修改稿时间: 2013-12-11

输出电压和电流等数据, 数据超限可发出报警. 实现对连续加热的圆环链工件精确、均匀地淬火, 大幅度提升系统自动化程度, 提高工艺水平, 使中频感应加热器的控制系统小型化、集成化、智能化, 提高矿用圆环链的生产效率, 保证设备安全可靠运行.

### 1 圆环链淬火前温度均匀分布的改进方法

工件在锻造以及冲压、挤压前的加热后的温度是否均匀将会对产品质量与模具的实用寿命带来直接的影响, 因此研究穿透感应加热时工件的表面与中心温度的温差具有重要的意义.



式中,  $T_0$  在半径为  $R$  处经过时间为  $t$  以后的温度(°C);  $q$  恒定的表面功率密度;  $R$  圆柱体半径(cm);  $\lambda$  热导率;  $a$  热扩散率;  $\rho$  比热容;  $\gamma$  密度;  $t$  加热时间(s);  $R$  半径(cm);  $n$  的正整数根为 0;  $J_0$  零阶一类贝塞尔函数<sup>[2]</sup>.

根据试验中的测量,  $\Phi 38 \times 144$  型号圆环链的表面与中心部的温差大致有 75°C, 表面高, 心部低. 当圆环链顶部温度为 994°C 时, 直臂温度刚达到 919°C. 以圆环链直臂部位为基准, 控制系统设定淬火炉的温度为 920°C, 这时炉内链条可以达到良好的性能.

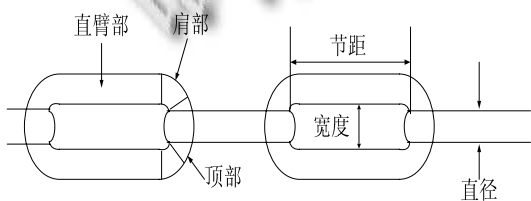


图 1 圆环链形状示意图

为了减小链环表面与中心的温差和链环顶部与直臂部的温差, 可以在感应器的设计上加以创新和改进. 本文在感应器纯铜线圈的内侧增加耐热层. 耐热层采用型号为 Cr25Ni20(高铬镍奥氏体不锈钢)的管材这种

材料高温下不易裂损, 导热系数高, 不脱落氧化皮. 耐热层的设计改变了线圈内的温度场分布, 使圆环链的淬火前温度更加均匀, 这样可以有效改善链环不同部位的温差, 红外测温仪也更容易测量到精确的炉内温度. 配合链条适当的给进速度, 链环表面与内部的温差也会适当改善. 本课题对于耐热层的应用与选型改良了以往圆环链感应加热温度不均匀的现象, 方便控系统对淬火温度的采集与控制, 延长了热处理设备的寿命, 提高了圆环链的质量.

### 2 积分分离PID控制算法设计

PID 控制中的积分控制是为了消除系统的稳态误差, 提高系统的控制精度. 但对于一些非线性、大惯性、大滞后的系统, 系统本身启动和停止都比较缓慢, 误差会一直很大, 若积分环节一直在作用则导致积分饱和或系统严重出现超调, 甚至导致系统震荡. 淬火温度控制系统就属于这样的系统, 积分分离 PID 控制方法可以很好的解决这样的问题<sup>[3]</sup>.

#### 2.1 积分分离 PID 控制原理

积分分离 PID 控制方法是根据反馈量和给定量的误差, 决定系统是否投入积分环节的一种改进型 PID 控制. 当控制器输入的误差较大的时候就去掉积分环节, 当输入误差小于一定值的时候就加入积分环节, 用来消除稳态误差. 控制算法流程如图 2.

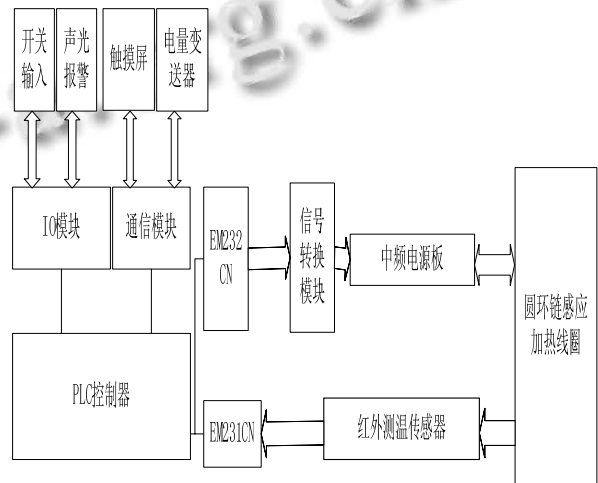


图 2 积分分离 PID 控制算法流程

首先初始化 PID 参数, 然后采集输入输出电压, 然后计算出误差  $e(k)$ , 然后判断误差是否大于设定值. 如果大于设定值:

$$u_k = Kp * e_k + Kd (e_k - e_{k-1}) \quad (2)$$

如果小于设定值:

$$u_k = Kp * e_k + Ki \sum_{j=0}^k e_j + Kd(e_k - e_{k-1}) \quad (3)$$

### 2.2 PID 参数整定

PID 参数整定就是改变比例系数、积分系数、微分系数和采样周期等参数,使系统的动态特性和静态特性满足系统指标的过程。

工程试验法不需要数学模型,通过工程试验确定系统参数,方法简单实用。工程试验方法有衰减曲线法、临界比例法、经验法,现在一般采用的是临界比例法。本设计采用的是临界比例法对参数进行整定。

表 1 临界比例法参数计算公式

控制器	比例系数	积分时间系数	微分时间系数
P	0.5		
PI	0.45 $K_u$	0.85 $T_u$	
PID	0.8 $K_u$	0.5 $T_u$	0.12 $T_u$

临界比例法是将系统中积分和微分环节去掉,调整比例系数使其由小到大变化,观察系统的输出,直到其出现等幅震荡的现象。同时记录临界比例系数  $K_u$ ,计算临界震荡周期  $T_u$ ,然后根据下表确定 PID 参数。但是,在某些不允许系统产生震荡的条件无法使用该方法。如表 1。

### 3. 系统硬件设计

矿用圆环链感应加热所用的设备,主要由电源、感应器、水冷系统、装卸链的机械和控制系统这几部分组成。

#### 3.1 工艺参数及控制系统结构

不同型号圆环链的传送速度和淬火温度是不一致的,本文以  $\Phi 38 \times 144$  型号圆环链为控制对象,设计对应的工艺参数,最佳淬火温度是  $920^\circ\text{C}$ ,链条在感应器中的移动速度应为中速,大致  $2.5\text{cm/s}$ 。圆环链的传送装置高 5.2 米,宽 3.5 米,架顶放置三个传送齿轮。传

送系统的传递速度由变频器控制,用一个旋转调速的开关进行调节,合适的走链速度和合理的淬火温度配合使用,以保证圆环链的质量。中空的纯铜线圈绕制成的螺旋形感应器,感应器的水路冷却液与水箱中的淬火、回火用的冷却水是同一循环系统,冷却水储存在水箱中。

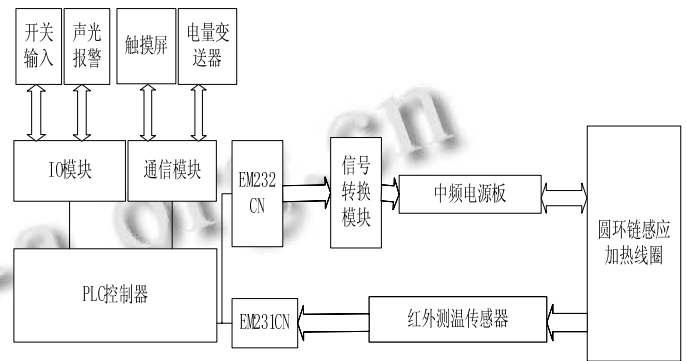


图 3 系统硬件框图

圆环链中频感应加热温度控制系统硬件框图如图 3。系统通过非接触式红外传感器采集圆环链表面温度,将温度值以电流信号传递给 PLC 的模拟量扩展模块 EM231CN。智能电量变送器 EDA9033A 对中频加热电源的三相电压、三相电流和功率等电量进行采集,并以 Modbus-RTU 通信方式将对应的数字信号通过 RS-485 接口输入 PLC。系统以圆环链的温度为 PID 闭环控制系统的反馈量,PLC 通过 EM232CN 输出的电流信号来控制中频感应加热电源的加热功率。中频电源板调功端的控制量是电压量,由于电压信号在由 PLC 传输到电源控制板的时候容易被干扰,所以 EM232CN 输出信号采用电流量,在电源控制板侧通过信号转换电路把电流量转换成电压量。

#### 3.2 电流电压转模块及保护隔离电路设计

信号转换板的作用是将 PLC 输出的控制电流转换成中频电源板能够接受的电压信号。本文采用独立 IC 来实现电流到电压的转换工作。RCV420 在输入最大电流的时候导致的最大压降为 1.5V,且不需要额外的器件就可以正常工作,无需额外调整电路增益偏置。提高开发效率,投入成本更小,调试更容易。

中频感应电源的控制端允许的额定输入电压为 15V,对应 PLC 输出的额定电流为 20mA。但是由于工业现场复杂的电磁环境的干扰,信号转换板可能出现输入电流过大或输入短路的情况导致信号转换板输出

异常。

本文通过添加如图 4 的保护电路对转换电路进行保护。电路中的 LM193 为双电压比较器用来检测 RCV420 输出电压 VOUT 是过压还是欠压。LM193 是一款单电源供电的比较器，为开漏极输出。这个电路中 LM193 由单电源供电，与 U1 使用同一个电源。LM193 的输出 1OUT, 2OUT 都连接了 10K 的上拉电阻，并且上拉到+5V，这样做的目的是实现与 TTL 逻辑电平进行兼容。

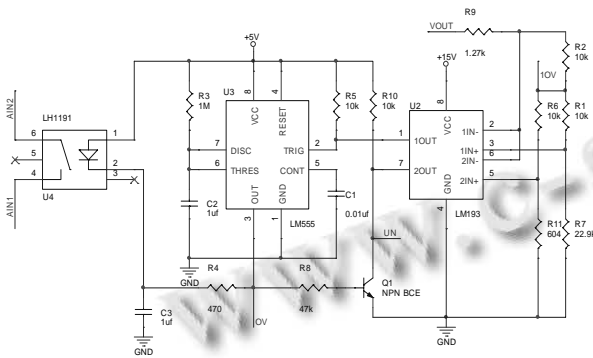


图 4 信号转换板保护电路

中频感应加热系统存在很大的干扰，为了提高系统的可靠性本设计把控制器部分和电源部分隔离开，通过隔离技术提高共模电压抑制比。

### 3.3 非接触式红外测温传感器的应用

目前，大多数企业使用中频电源加热矿用圆环链，热处理过程采用连续淬火、回火方式。由于圆环链在感应线圈内热处理时是运动着的，影响淬火温度的因素很多，如工件尺寸、形状、材质、给进速度等，接触式热电阻和接触式热电偶等类型温度传感器不便于测量，所以采用非接触式红外测温传感器测量圆环链的淬火、回火温度，可以达到测量精度高、实时性好的要求。

本课题选用 Raytek(雷泰)MI3 传感器，它具有独立的通讯电路盒及微型传感头，是一款功能强大的分体式红外测温度测量系统。依据矿用圆环链的温度范围，红外测温传感器选择 500℃至 1800℃量程，输出信号是 4~20mA 电流信号。Raytek MI3 传感器的工作电压是 24V，响应时间仅 10ms，可适应环境温度 0℃至 120℃，温度分辨率可精确到 0.1℃。此款高精度、多功能的红外测温传感器非常适合本课题的设计要求。



图 5 Raytek MI3 微型红外温度传感器

### 3.4 智能电量变送器

本文选用 EDA9033A 型号电量变送器，此款产品是山东力创科技有限公司生产的三相电参数采集模块，它集合功率、功率因数、电流、电压、电量等多种变送器的测量功能，能够节省空间，降低成本，方便布线，提高可靠性，并被于各种工业控制与测量系统广泛应用。

## 4 软件实现

### 4.1 总体软件设计流程

主控制器 PLC 的程序设计是整体控制系统的核心部分，程序的逻辑要严密，语句要简洁，并应该注意控制好扫描时间，缩小网络每周周期循环的时间。

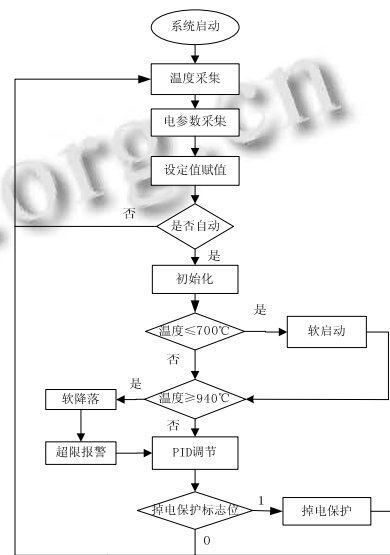


图 6 主程序流程图

在 PLC 的程序中针对整体控制过程编辑了初始化、软启动、软降压、掉电保护等部分功能的程序。例如采集电参数和处理电参数的部分以调用子程序方式处理，电量变送器通过 Modbus-RTU 通讯协议与主控制器传输数据部分也设置在子程中，利用积分分离

PID 算法对淬火温度的控制也设置了单独的子程序. 系统设置两种模式, 操作人员需要特定操作时可以采用手动模式, 热处理车间需要自动化生产时采用自动模式. 系统主程序如图 6 所示.

#### 4.2 淬火温度积分分离 PID 控制软件实现

淬火温度的闭环控制系统中, 被测量是连续变化的模拟量, 而 PLC 的 CPU 只能处理数字量, 所以要经过一些处理步骤. 如图 7 所示, 虚线中的部分是用 PLC 实现的.

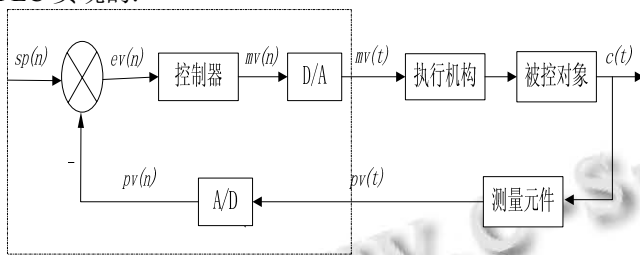


图 7 PLC 模拟量闭环控制系统方框图

图中  $sp(n)$  是给定值,  $pv(n)$  是 A/D 转换后的反馈量, 误差  $ev(n)=sp(n)-pv(n)$ . D/A 转换器将 PID 控制器输出的数字量  $mv(n)$  转换为模拟量  $mv(t)$ , 再去控制执行机构. 正如矿用圆环链淬火温度的闭环控制系统中, 用红外测温传感器检测中频加热炉的温度, 并将其输出的微弱的电压信号转换成设定量程的电流信号, 然后送给 EM231 模拟量输入通道, 经 A/D 转换后得到与温度成比例的数字量, CPU 将它与温度设定值比较, 并按照 PID 控制算法对误差值进行运算, 并将数字量的计算结果通过 D/A 转换电流信号送给 CPU 本机集成的电流模拟量输出通道. 因为 EM232 模拟量输出通道的输出电流信号范围是  $0\sim 20\text{mA}$ , 而控制中频电源加热频率的控制量是电压信号量, 所以我们再经过电流—电压转换电路, 最后用转换的  $0\sim 15\text{V}$  之间的电压量来控制中频加热电源的加热功率, 以此来控制矿用圆环链的淬火温度. 假设淬火温度值  $c(t)$  低于给定温度值, 反馈量  $pv(n)$  小于给定值  $sp(n)$ , 误差  $ev(n)$  为正, 控制器的输出量  $mv(t)$  将增大, 使中频电源的加热功率变大, 链条的温度升高, 最终链条温度接近或等于给定值.

在现场试验中, 最开始只设计了一个 PID 控制环节, 但是由于红外测温传感器的检测值的有误差, 上下波动, 室温的圆环链工件进入加热线圈等扰动因素, 破坏了圆环链温度的稳定, 并且 PID 的参数是按照加

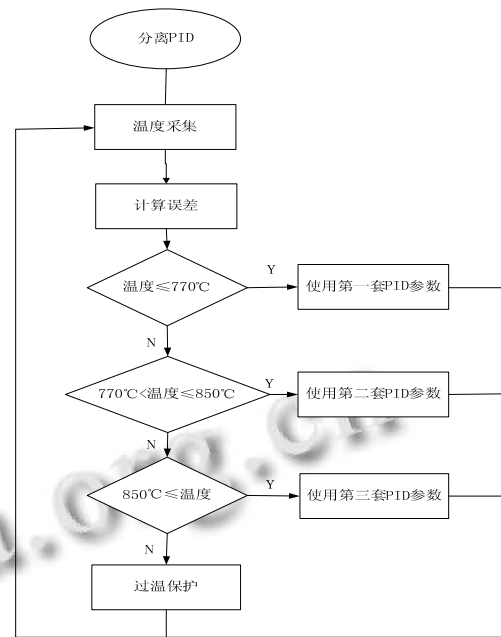


图 8 积分分离 PID 控制方法流程图

热线圈进入设定温度某一范围内, 经工程实验法设置的, 所以按照这个参数进行控制会产生较大的超调量, 需要经过一定时间才能逐渐稳定. 而在生产中存在需要严格控制的淬火温度, 温度过高会损坏耐热保温钢筒, 也会影响圆环链的质量, 所以这种控制方式是不适合设备启动阶段圆环链温度缓慢升高的这个过程. 因此, 本文采用了积分分离 PID 控制方法就能很好的解决这个问题. 本文制定了三套 PID 参数, 第一套采用较大的比例系数 ( $P=22$ ), 不加入积分和微分环节, 在  $770^{\circ}\text{C}$  之前迅速提高圆环链的温度, 在进入  $770\sim 850^{\circ}\text{C}$  温度范围后, 采用较小的比例系数 ( $P=10$ ), 合理的积分参数 ( $I=15$ ), 不加入微分环节, 使链条的温度缓慢过渡到目标温度  $850^{\circ}\text{C}$ . 当温度大于  $850^{\circ}\text{C}$  时, 使用经现场环境工程法调试出来的 PID 参数 ( $P=15, I=10.2, D=0.001$ ), 链条温度可稳定在  $920^{\circ}\text{C}$ , 温度变化小, 无明显震荡. 下面我们根据图 8 了解圆环链淬火温度控制的软件设计过程.

PID 回路指令(包含比例、积分、微分回路)在逻辑堆栈栈顶(TOS)值唯一的前提下用来进行 PID 运算. 如图 所示为 PID 回路控制指令. 该指令有两个操作数 TBL 和 LOOP, 两者都是 BYTE 型, 限用 VB 区域. 其中 TBL 是回路表的起始地址; LOOP 是回路号, 可以是  $0\sim 7$  的整数. 在程序中最多可用 8 条 PID 指令. 如果两个或者两个以上 PID 指令用同一回路号, 即使回路

表不一样, PID 运算也会相互干涉. 回路表的格式如表 2 所示.

表 2 回路表地址

偏移地址	变量名	数据类型	变量类型	描述
0	过程变量 PVn	实数	输入	必须在 0.0~1.0 之间
4	设定值 SPn	实数	输入	必须在 0.0~1.0 之间
8	输出值 Mn	实数	输入 / 输出	必须在 0.0~1.0 之间
12	增益 Kc	实数	输入	比例常数, 可正可负
16	采样时间 Ts	实数	输入	单位为秒, 必须为正数
20	积分时间 Ti	实数	输入	单位为分钟, 必须为正数
24	微分时间 Td	实数	输入	单位为分钟, 必须为正数
28	积分项前项 MX	实数	输入 / 输出	必须在 0.0~1.0 之间
32	过程变量前值 PVn-1	实数	输入 / 输出	最后 PID 运算的过程变量, 必须在 0.0~1.0 之间

如果要以一定的采样频率进行 PID 运算, 采样时间必须输入到回路表中, 且 PID 指令必须便如定时发生的中断程序, 或者由主程序中定时器控制 PID 指令的执行频率.

S7-200 的 PID 没有设置控制方式, 只有在控制器接通时, 才执行 PID 运算. PID 指令的使能位 EN 检测由 0 到 1 的信号时, PID 指令执行动作,

在许多控制系统中, 有事只应用一种或者两种闭环控制方法, 本设计中只应用了比例控制盒积分控制, 所以将微分时间数值设置为 0.0. 若果其他系统中不需要积分控制, 那么只要把积分时间常数设置为无穷大“INF”即可.

### 5 积分分离PID控制系统现场运行

#### 5.1 积分分离 PID Simulink 仿真分析

积分分离 PID 的仿真模型其中采样周期为 1s;  $k_p=5$ ;  $k_i=0.05$ ;  $k_d=0.20$ .

给系统输入一个阶跃信号, 幅度为 900, 可以得到下面两个阶跃响应的曲线. 图 10 是使用普通 PID 时的阶跃响应曲线. 图 11 是使用积分分离 PID 时的阶跃响应曲线. 通过仿真结果可以发现, 积分分离 PID 对系统性能有了很大提高. 从图 11 可以看出, 积分分离

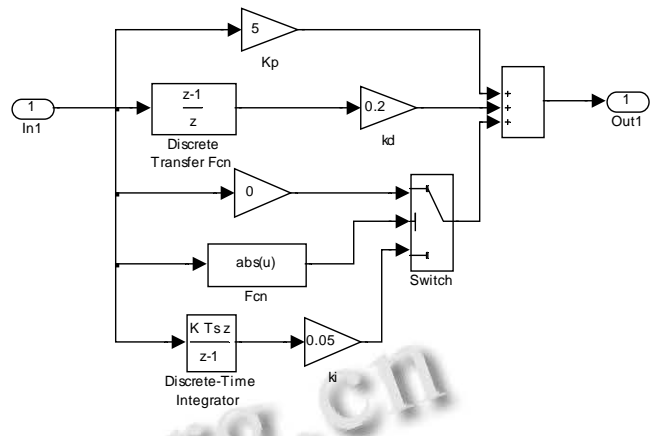


图 9 积分分离 PID Simulink 仿真模型

PID 有效抑制了普通 PID 在调节过程中出现的严重超调, 这就保证了控制系统的开关器件不会因为严重的超调导致器件过热烧毁, 同时也保证了控制系统的动态特性和稳态特性.

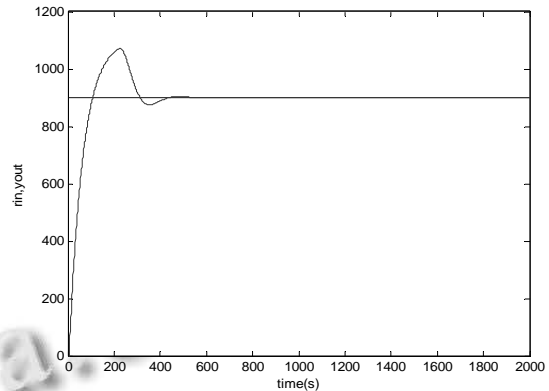


图 10 普通 PID 阶跃响应曲线

通过仿真初步确定控制系统的 PID 参数, 然后在现场调试的时候以这组参数为依据, 再进行手动微调, 最后达到理性效果.

#### 5.2 现场运行

矿用圆环链淬火温度 PID 控制系统在吉林省长春市某公司圆环链的热处理车间全面投入使用, 至今已运行 8 个月. 实际运行状况表明, 该系统控制精度高, 自动化程度高, 操作简单方便, 系统运行稳定可靠,

提升了淬火工艺, 保证圆环链产品质量, 提高车间的生产效率. 矿用圆环链淬火温度 PID 控制系统的各项性能指标达到了项目要求.

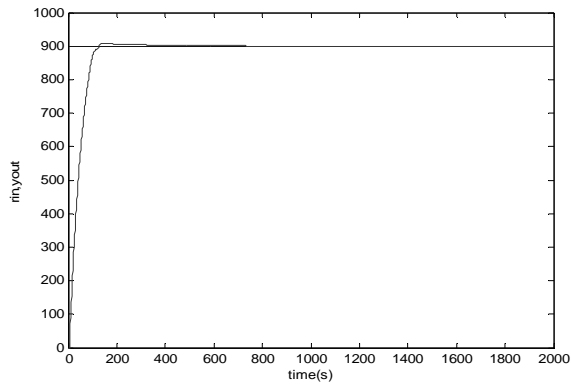


图 11 积分分离 PID 阶跃响应曲线

通过实验确定的 PID 参数, 在 STEP 7-Micro/Win 软件的 PID 调节控制面板中, 监测的加热线圈的温度变化曲线如图 12 所示。

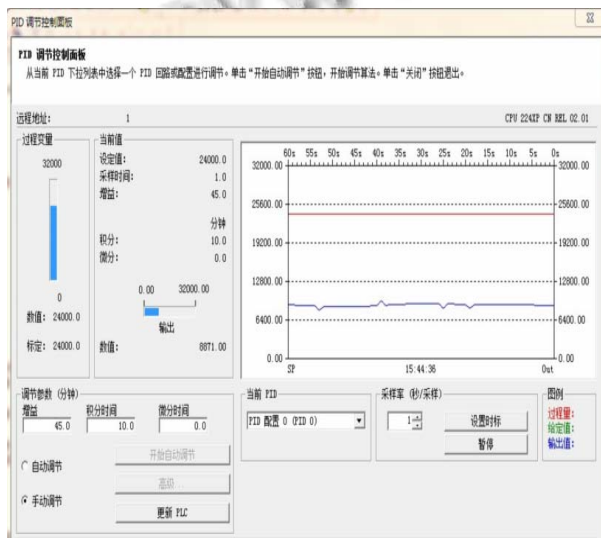


图 12 积分分离 PID 控制系统圆环链温度变化曲线

观测图 13 可发现, 由单片机为控制器的控制系统线圈的温度变化波动较大, 与其相比较, 采用 PLC 作为控制器的控制系统, 加热线圈温度变化小、波动少, 改变设定温度后温度过渡平缓, 温度控制精度高, 系统整体性能更优越, 精确, 更智能化。

## 6 结论

本课题设计了一种新型的矿用圆环链淬火温度控制系统, 该系统通过非接触式红外测温传感器对圆环

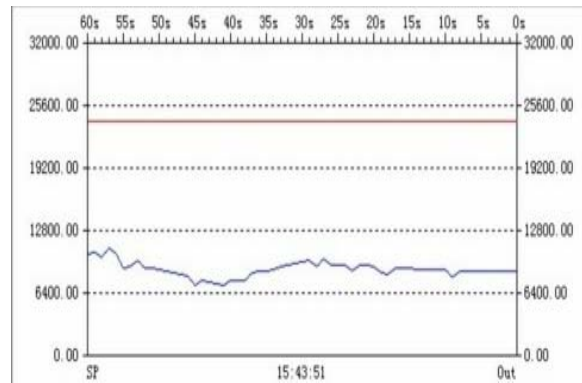


图 13 单片机控制系统圆环链温度变化曲线

链的淬火温度进行实时检测, 结合积分分离 PID 算法, PLC 对中频感应加热电源的输出功率进行调节, 从而控制圆环链的淬火温度. 研究表明, 当圆环链肩顶部温度达到 971℃~994℃ 时 (直臂部温度为 894℃~918℃), 圆环链获得最佳强韧性配合. 本系统提高了淬火工艺, 保证了矿用圆环链的质量, 也大大提高了热处理车间的生产效率。

## 参考文献

- 1 武兴旺, 王维喜, 马瑞勇, 高爱民, 樊志刚, 王宝奇. 矿用高强度圆环链用钢的研究进展. 金属热处理, 2008, 2: 34-35.
- 2 付正博. 感应加热与节能——感应加热器(炉)的设计与应用. 北京: 机械工业出版社, 2008. 9.
- 3 赵磊, 赵连玉. 积分可分离式 PID 控制器及其性能仿真. 组合机床与自动化加工技术, 2008, 12: 36-40.
- 4 廖常初. 西门子人机界面(触摸屏)组态与应用技术. 北京: 机械工业出版社, 2011. 1.
- 5 赵秉章. 矿用圆环链的焊接及热处理. 煤矿机械, 2012. 6.
- 6 Tian YX, Lu MH, Cai HY, Yin GH, Xu Z. Effects of quenching temperature on microstructure and mechanical properties of H13 mandrel steel. Baosteel Technical Research, 2010, 3: 58-64.