

对焊钻杆热处理 β -GPC 控制系统 *

孙青林, 陈增强, 袁著祉, 刘忠信, 杨小军

(南开大学 自动化系, 天津 300071)

摘要: 介绍了对焊钻杆热处理预测控制系统. 系统对升温保温全过程实现闭环控制. 温度检测采用红外测温仪, 针对热处理过程不同阶段钻杆的辐射系数不同, 采用自动补偿的方法, 使红外测温仪能准确检测不同辐射系数的钻杆温度. 控制算法采用 β -GPC, 实际运行表明该方法的有效性.

关键词: 预测控制; 计算机控制; 对焊钻杆热处理; 温度补偿

中图分类号: TP274+.5

文献标识码: A

β -GPC control system of heat treatment for welded drill pipe

SUN Qing-lin, CHEN Zeng-qiang, YUAN Zhu-zhi, LIU Zhong-xin, YANG Xiao-jun

(Department of Automation, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: A predictive control system of heat treatment for welded drill pipe is presented. The whole process of heat treatment has been achieved by closed loop control. On-line infrared thermoscope is adopted to measure the temperature. To solve this problem that there are different radiation factor at different stage of heat treatment, we introduced the method of software compensate, and therefore the infrared thermoscope can measure drill pipe at different stage accurately. β -GPC, as a control arithmetic, is adopted. The running results show that the arithmetic is better.

Key words: predictive control; computer control; heat treatment for welded drill pipe; temperature compensate

1 引言(Introduction)

由于承受的应力和磨损程度的不同, 石油钻杆管体的使用寿命远高于接头. 因此更换接头实现钻杆再生, 可延续使用寿命. 其生产过程经过以下几道工序: 1) 切除报废接头; 2) 管体和新接头摩擦对焊; 3) 焊缝退火, 消除应力; 4) 焊缝取平; 5) 淬火升温, 淬火冷却和回火保温. 其热处理过程指的是 3), 5) 两道工序.

热处理过程对焊接质量起重要作用. 目前国内主要采用中频感应加热方式, 中频电源功率手调电位器给定, 加热时间人工计时. 因电源波动、环境温度变化和人为干扰, 往往使实际温度和加热时间不能达到要求, 影响钻杆质量. 针对上述问题, 开发了钻杆热处理智能控制系统.

2 系统结构及硬件(Framework of the system and the hardware)

系统结构如图 1 所示. 根据热处理工艺要求, 钻杆的内外表面都要求淬火, 因此中频电源的透热深度应为管壁的厚度, 透热深度公式(2.1):

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho \times 10^9}{\mu \cdot f}} = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} (\text{cm}). \quad (2.1)$$

式中: δ 为透热深度 (cm), ρ 为管体的导电系数 (Ω/cm), μ 为管体导磁系数, f 为中频电源的频率 (Hz). 根据计算选取 1000Hz, 100kW 的中频电源, 应低功率保温和闭环连续调整的需要. 设计了与工控机的接口, 使中频电源 5~100kW 连续可控.

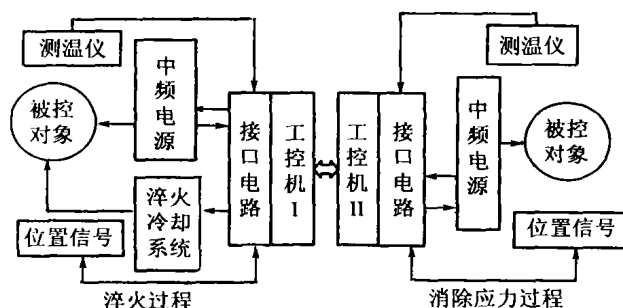


图 1 系统结构

Fig. 1 Diagram of the system

钻杆热处理过程一直处于旋转状态, 且被加热部分存在很强的电磁场, 故选用非接触式的红外测温仪.

3 红外测温仪在线自动补偿(Online automatic compensate for the infrared thermoscope)

红外测温仪对被测物体的辐射系数非常敏感,

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(60174021), 天津市自然科学基金重点项目(010115)和国家科技攻关计划(2001BA2004B01-02)资助项目.
收稿日期: 2000-12-28; 收修改稿日期: 2001-12-17.

其辐射测温的原理如下:

$$W_{(\lambda T)} = \varepsilon_{(\lambda T)} \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad (3.1)$$

式中: $W_{(\lambda T)}$ 为黑体单位面积、温度 T 时、在 λ 波长处的辐射能量, 单位: $W/(m^2 \cdot \mu m)$. $\varepsilon_{(\lambda T)}$ 为物体的辐射率, C_1 为第一辐射常数, $C_1 = 3.7418 \times 10^{-16} W \cdot m^2$, C_2 为第二辐射常数, $C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} m \cdot K$, λ 为波长, 单位为 μm , T 为热力学温度, 单位为 K .

焊缝经过车床处理后表面光亮, 开始升温时的辐射系数大约在 0.4 左右. 淬火后钻杆变黑, 在同一工位进行回火保温时辐射系数约 0.8 左右. 如测温仪的辐射系数设定为 0.8, 检测亮管时的误差最大可达 $150^\circ C$. 辐射系数不可在线调整, 为使淬火升温 and 回火保温两个不同阶段都能准确测量, 对淬火升温过程进行温度软件补偿. 将测温仪的辐射系数设定在 0.8, 测得一组亮管的显示温度如图 2, 同时测出与之对应的实际温度如图 3. 采用在线线性插值的方法得出实际温度与检测温度的关系.

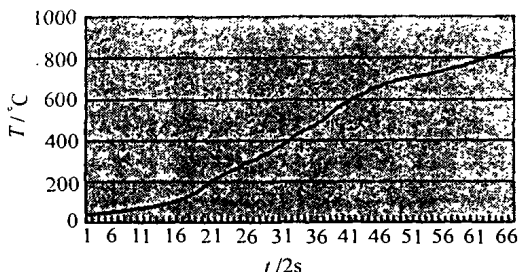


图 2 显示温度

Fig. 2 Displaying temperature

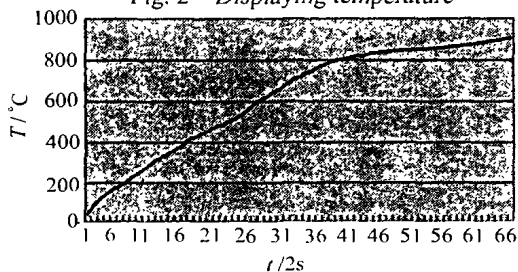


图 3 实际温度

Fig. 3 Actual temperature

在线控制时, 将补偿所得实际温度, 用于淬火升温控制. 回火过程检测温度即为实际温度. 从而解决了一台单色测温仪连续检测两种不同辐射系数目标.

4 控制方案(Control strategy)

用户从两方面提出了控制要求, 不仅要适应正常生产, 即在生产时温度精度达到 $\pm 1\%$, 升温时间精度 $\pm 2\%$, 基本无超调. 还须满足技术人员于不同工况条件下探索最佳工艺参数的要求, 即不修改控制参数的前提下, 设定温度在 $100^\circ C$ 范围内连续可

调, 升温时间在 $100s \sim 150s$ 内可调. 传统 PID 控制难以满足上述要求, 我们以 β -GPC 控制为主, 设计了可以相互切换的多种控制方法. 包括现场手动控制, 软手动控制, 顺序控制和闭环控制.

β -GPC 是基于传统 GPC 的改进. 传统 GPC^[1] 采用如下 CARIMA 模型作为预测模型:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-1) + \xi(t)/\Delta. \quad (4.1)$$

其中, $\{y(t)\}$, $\{u(t)\}$ 和 $\{\xi(t)\}$ 为系统的输出、输入和噪声序列, $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$ 是阶次为 na 和 nb 的关于 q^{-1} 的多项式, $\Delta = 1 - q^{-1}$. GPC 的目标函数为:

$$J = E \left\{ \sum_{j=1}^N [y(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_u} \Delta u(t+j-1)^2 \right\}. \quad (4.2)$$

λ 是控制加权因子, N 是预测时域, N_u 是控制时域.

GPC 的控制律为^[1]:

$$\Delta u(t) = d^T(W - Y_0). \quad (4.3)$$

其中

$$d^T = [1, 0, \dots, 0](G^T G + \lambda I)^{-1} G^T. \quad (4.4)$$

对于一般的参数选择, GPC 并不一定稳定. 同时, 当存在建模误差并且预测步长较大时, 造成误差积累, 影响其鲁棒性, 控制品质急剧下降, 甚至造成系统失稳. 我们希望在增加预测步长、基本不改变运算复杂性的基础上提高系统的稳定性. 因此引入 β -GPC 控制方法, 即引入控制增量增益 β . 最优控制的控制增量由式(4.3)改为:

$$\Delta u(t) = \beta d^T(W - Y_0). \quad (4.5)$$

虽然只乘一个比例因子, 但它可使系统稳定性和鲁棒性有显著改善^[2]. 运算量基本没有增加, 非常适用于在线控制.

可以把 β 看作一个稳定-鲁棒性因子, 它无论在模型是否匹配时都是起作用的. 直观上就可以看出 β 增大可以加大控制动作, 反之减小控制动作. 分析表明^[2,3], β 对闭环的稳定性影响很大, 其值在某个区间上连续变化时, 可发现不稳定响应的包络线开口迅速变小直至稳定, 易于调试, 通常, 对于开环稳定对象, 可取 $|\beta| \leq 1$, 对于开环不稳定对象, 可取 $|\beta| \geq 1$. 该参数有效改变闭环动态特性.

5 实际控制结果(Application results)

被控量 y 为被控温度, 目标设定 $400^\circ C \sim 1000^\circ C$ 可调. 控制量 u 为中频电源的功率, 调整范围 $5kW \sim 100kW$. 升温时间、冷却时间、保温时间在 u 所能达到的范围内连续可调, 精度可达 $0.1s$.

系统参数选定为: $na = 2, nb = 3, N = 6, Nu = 2, \alpha = 0.8, \lambda = 3, \beta = 0.5$ (淬火), $\beta = 0.4$ (回火). 在这组参数下运算量虽小, 能达到理想的控制效果, 在不同的设定温度和升温时间, 都可使被控温

度基本无超调的精度达到 1% 以内. 淬火工序功率和温度曲线见图 4. 退火工序功率和温度曲线见图 5. 功率曲线中“ st ”为设定输出功率, “ r ”为实测输出功率.

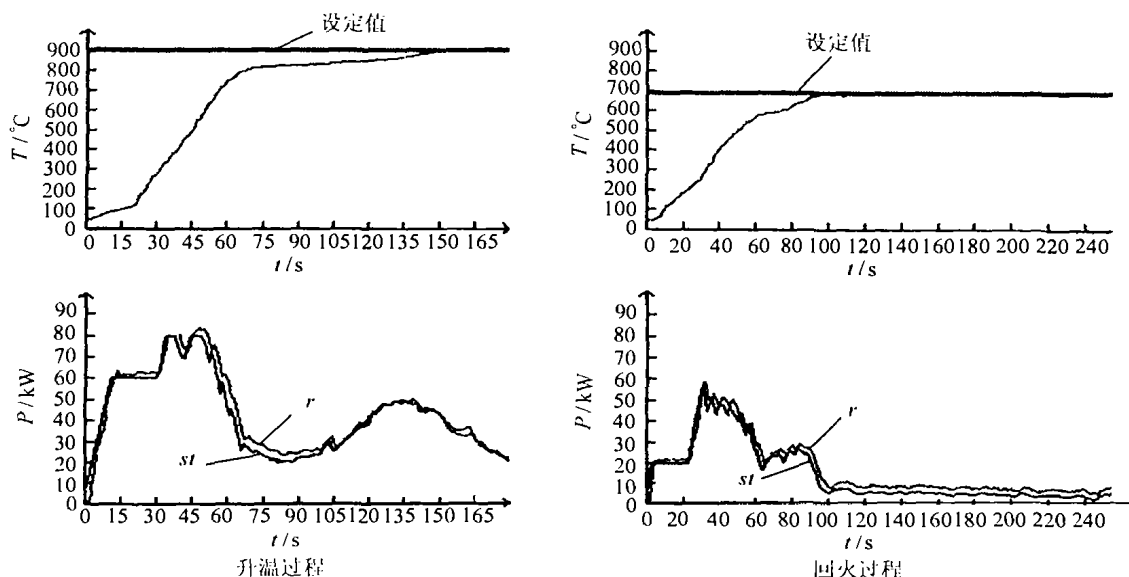


图 4 淬火工序功率、温度曲线

Fig. 4 The power and temperature orbits with quenching process

运行结果表明预测控制的效果明显, 温度在达到设定值之前功率已从峰值开始下降, 以图 4 升温过程为例: 规定达到设定温度的时间 150s, 功率在 50s 左右已开始向下调整, 使温度上升平滑、少波动、无超调, 准确达到设定值. 在保温阶段同样采用 β -GPC 控制温度波动小于 $\pm 0.3\%$. 不改变控制参数, 设定温度可在 $400^{\circ}\text{C} \sim 1000^{\circ}\text{C}$ 范围内调整, 设定升温时间在 100s ~ 150s 变化. 淬火工序的升温 and 回火两个过程采用同一控制模型和参数, 都可达到满意的控制效果. 可见 β -GPC 具有较强的稳定性和过渡响应性能.

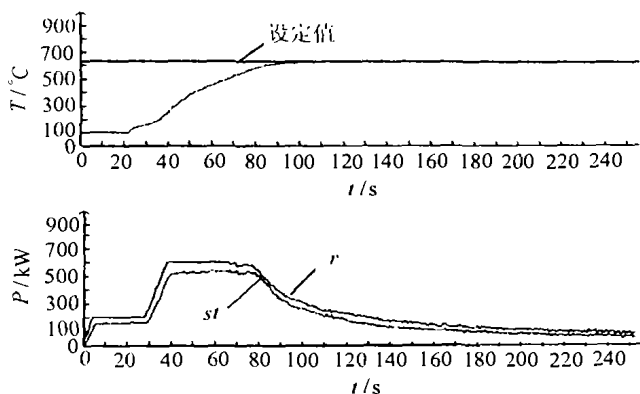


图 5 退火工序功率、温度曲线

Fig. 5 The Power and temperature orbits with temper process

6 结论 (Conclusion)

系统经运行表明各项性能指标达到了设计标准, 满足了用户的要求. 已通过胜利油田鉴定, 并获总公司科技进步一等奖. 首次将 β -GPC 用于实际系统, 实践表明引入 β -GPC 算法对于提高控制系统的鲁棒性和稳定性可以起到很好的作用. 该系统通过计算机软件补偿的方法成功解决了用一台单色测温仪连续检测两种不同辐射系数目标的难题.

参考文献 (References)

- [1] Clarke D W, Mohtadi C, Tuffs P S. Generalized predictive control, Part 1: basic algorithm [J]. Automatica, 1987, 23(1): 137 - 148
- [2] Sun Mingwei, Chen Zengqiang, Yuan Zhuzhi. β type incremental generalized predictive control [J]. Control Theory and Applications, 2000, 17(2): 165 - 168 (in Chinese)
- [3] Sun Mingwei. Stability analysis and algorithm research on predictive control [D]. Nankai: Nankai University, 2000 (in Chinese)

本文作者简介

孙青林 1963 年生. 南开大学副教授. 研究方向为自适应控制, 智能检测与控制. Email: sunql@eyou.com

陈增强 见本刊 2002 年第 2 期第 270 页.

袁著祉 见本刊 2002 年第 2 期第 270 页.

刘忠信 1975 年生. 南开大学自动化系博士生. 研究方向为自适应控制, 智能控制, 计算机通讯.

杨小军 1976 年生. 南开大学自动化系硕士生. 研究方向为自适应控制, 计算机应用.