

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.07.011

迭代学习控制在 GTAW 焊接过程中的应用研究

刘建 卜旭辉 梁嘉琪 闫帅可
(河南理工大学 电气学院 焦作 454000)

摘要:针对相同工件的批量焊接,并且焊接轨迹相同的情况下,焊接过程具有极高的重复性。提出了基于迭代学习控制(ILC)的脉冲气体钨极氩弧焊(GTAW)焊接过程跟踪控制方法。根据GTAW焊接的动态过程模型,设计了GTAW焊接过程控制的ILC算法,并对算法的收敛性进行了证明。研究结果表明,ILC可以有效地利用焊接过程中的重复信息,经过60次迭代学习后,焊接系统输出可以较好的达到期望轨迹,并获得较高的控制精度,验证了方法的有效性。与PID控制相比ILC控制器不但可以获得较好的跟踪效果,而且还能有效抑制外部扰动的作用,具有较强的鲁棒性。

关键词: GTAW 焊接;迭代学习控制;跟踪控制

中图分类号: TP273;TN081 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Application of iterative learning control in control of GTAW process

Liu Jian Bu Xuhui Liang Jiaqi Yan Shuaike

(School of Electrical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The process of welding has strong repeatability for the welding of the same parts and the same welding track. A tracking control method for gas tungsten arc welding (GTAW) process based on iterative learning control is proposed. An iterative learning control algorithm for the control of GTAW process is designed based on the dynamic process model of welding. And the convergence of the algorithm is proved. The results of research show that the repeated information of welding can be effectively used by the iterative learning control in the process of welding. After about 60 times of iteration learning, the output of welding system can better track on the desired trajectory to meet the expected control effect. It verifies the effectiveness of the proposed method. The better tracking performance can be acquired by ILC in contrast to PID algorithm and it also can suppress the effect of repetitive external disturbances.

Keywords: GTAW weld; iterative learning control; tracking control

1 引言

脉冲气体钨极氩弧焊(gas tungsten arc welding, GTAW)是一种重要的金属焊接工艺,可以用来获得高质量的焊缝。GTAW焊接是在氩气等惰性气体环境下,使钨电极和母材间产生电弧,从而使母材以及添加焊材熔融、焊接的方法,广泛应用于航天等需要精密焊接制造的领域。为了提高焊缝成形质量,需要对焊接过程进行实时控制,因此对于焊接过程实时跟踪控制的研究具有实

际意义。

对于GTAW焊接过程跟踪控制问题,国内外学者做了大量的研究。文献[1]设计了GTAW非线性自适应校正控制器,通过调节焊接峰值电流将熔池背面熔宽控制到期望值,实现了焊缝的快速成型控制。文献[2]以背面熔宽的误差和误差的变化作为输入量,焊接平均电流作为输出量,进行了GTAW焊接模糊控制方法的研究。文献[3]在GTAW焊接中引入了粗糙集理论,介绍了基于粗糙集理论的铝合金脉冲GTAW过程的智能控制方法。文献[4]采用无模型自适应控制的方法对脉冲

GTAW 熔池动态过程进行研究,获得了较好的控制效果。文献[5]设计了基于模糊逻辑调节送丝速度的非线性复合智能控制器,实现了保证焊接过程中熔池背面熔宽和熔池高度同时稳定的目标。虽然上述研究取得了一定成果,但焊接动态过程是一个具有多变量、多线性、时变参数且含有诸多不确定因素和约束条件的复杂对象,无法建立精确的数学模型,因此对于焊接过程的实时跟踪控制难以实现。

在实际生产过程中,自动化焊接一般是执行重复焊接任务,重复性主要体现在相同的焊接工件和相同的焊接轨迹。迭代学习控制(iterative learning control, ILC)^[6-9]针对重复运行的系统,是一种有效的控制方法。它不需要精确地控制模型,能够实现在有限时间和区间上的完全跟踪。此外,与传统控制算法相比,迭代学习控制算法的计算量小,控制器结构简单,易于在实际系统中实现。近些年来,迭代学习控制开始广泛应用于实际控制工程领域^[10-15],如机器人控制^[16]和许多实时性要求较高的工业控制。本文就 GTAW 焊接过程跟踪控制问题提出了迭代学习控制算法,并利用 MATLAB 进行仿真,验证了该控制算法的有效性,取得了较高的控制精度。

2 焊接系统的动态特性模型

GTAW 焊接过程如图 1 所示。将钨电极夹持在电极夹上,从 GTAW 焊枪喷嘴中伸出,通过钨电极端部与被焊件母材间产生的电弧对母材进行焊接。焊接过程开始以后,电弧将热量传导至焊接工件,焊接工件温度迅速升高,局部熔化形成熔池。焊接过程中,喷嘴会在钨电极的周围喷出保护气体,避免焊接过程受到大气的侵害。当需要向熔池中填充金属时,可从电弧的前面把填充焊丝以一定的速度向熔池中送入。

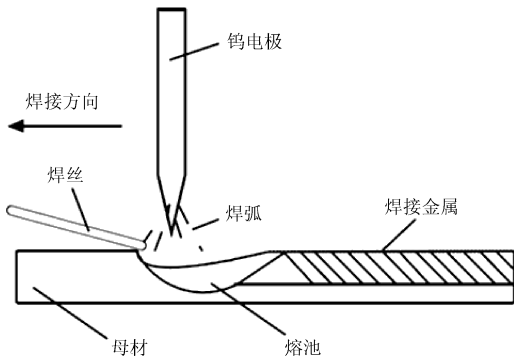


图1 GTAW 焊接过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of GTAW welding process

在 GTAW 焊接过程中,保证焊接质量的重要标准是熔透(单面焊双面成形焊缝),而能够最直接有效表达熔

透情况的是熔池的背面熔化宽度,即背面熔宽,所以熔透控制可以被归结为对熔池背面熔宽的控制。

在焊缝形成过程中,焊接电流是重要参数^[17],从系统控制角度来看,可以通过调节焊接电流,实现对熔池背面熔宽的控制,使其尽量保持均匀一致。本研究考虑的 GTAW 焊接过程以焊接电流为控制输入,以熔池背面熔宽为系统输出。

GTAW 焊接系统的动态特性模型为:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n a_i y(t-i) + \sum_{j=1}^m b_j u(t-j) \quad (1)$$

式中: $y(t)$ 表示焊缝背面熔宽, $u(t)$ 表示焊接电流, i, j 是系统时滞量, $n = 5, m = 6$ 。

式(1)可记为:

$$\begin{aligned} X(t) &= \begin{bmatrix} y(t) \\ y(t-1) \\ y(t-2) \\ y(t-3) \\ y(t-4) \end{bmatrix} = \\ & \begin{bmatrix} a1 & a2 & a3 & a4 & a5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(t-1) \\ y(t-2) \\ y(t-3) \\ y(t-4) \\ y(t-5) \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} b1 & b2 & b3 & b4 & b5 & b6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(t-1) \\ u(t-2) \\ u(t-3) \\ u(t-4) \\ u(t-5) \\ u(t-6) \end{bmatrix} \quad (2) \end{aligned}$$

因此,模型(1)的状态方程可表示为:

$$\begin{cases} X(t) = AX(t-1) + BU(t) \\ Y(t) = CX(t) \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{其中 } A = \begin{bmatrix} a1 & a2 & a3 & a4 & a5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} b1 & b2 & b3 & b4 & b5 & b6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C = I。$$

3 迭代学习控制器的设计

由于焊接过程的重复性,焊接过程在时间区间

$[0, T]$ 上重复运行, 因此, 式(3)可写为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}_k(t-1) + \mathbf{B}\mathbf{U}_k(t) \\ \mathbf{Y}_k(t) = \mathbf{C}\mathbf{X}_k(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: k 为迭代次数, $t \in \{0, 1, \dots, T\}$ 。

对于焊接控制系统, 给出如下假设条件:

- 1) 系统每次运行的初始状态相同;
- 2) 系统每次运行的期望输出相同, 即 $\mathbf{y}_d(t)$ 保持一致;
- 3) 对于给定的期望输出 $\mathbf{y}_d(t)$, 存在控制输入 $\mathbf{u}_d(t)$, 使得系统满足:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_d(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}_d(t-1) + \mathbf{B}\mathbf{u}_d(t) \\ \mathbf{y}_d(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}_d(t) \end{cases}$$

式中: $\mathbf{x}_d(t)$ 为期望状态。在实际焊接过程中, 对于执行重复焊接过程的焊接控制系统满足上述 3 个条件。针对相同工件的的批量焊接, 每次焊接过程起点相同, 因此满足假设 1)。焊接过程中的期望输出为定值, 因此也满足条件 2)。假设 3) 是对于给定控制任务可控的条件, 若该条件不满足, 则焊接控制任务无法完成。

当系统初态为 $\mathbf{x}_k(0)$, 输入 $\mathbf{u}_k(t)$, $t \in [0, T]$ 时, 方程(4)的解可写为:

$$\mathbf{x}_k(t) = \mathbf{A}^t \mathbf{x}_k(0) + \sum_{s=0}^{t-1} \mathbf{A}^{t-s} \mathbf{B} \mathbf{u}_k(s) \quad t \in [0, T] \quad (5)$$

针对系统(4), 考虑采用如下 P 型迭代学习控制律:

$$\mathbf{u}_{k+1}(t) = \mathbf{u}_k(t) + \mathbf{L}\mathbf{e}_k(t) \quad (6)$$

式中: $t \in [0, T]$, \mathbf{L} 为学习增益矩阵, $\mathbf{u}_k(t)$ 为第 k 次迭代学习后的输入, $\mathbf{e}_k(t) = \mathbf{y}_d(t) - \mathbf{y}_k(t)$ 为系统第 k 次学习误差。

在学习律(6)的作用下, 定理 1 给出了在区间 $[0, T+1]$ 上输出误差的收敛性。

定理 1 对于由式系统(4)描述的系统, 给定可达的期望轨迹 $\mathbf{y}_d(t)$ ($t \in [0, T+1]$), 如果条件

- 1) $\|\mathbf{I} - \mathbf{LCB}\| \leq \rho < 1 \quad t \in [0, T]$
- 2) $\mathbf{x}_k(0) = \mathbf{x}_d(0) \quad k = 0, 1, 2, \dots$

则学习率(6)使得输出轨迹一致收敛于期望轨迹, 即当 $k \rightarrow \infty$ 时, $\mathbf{y}_k(t) \rightarrow \mathbf{y}_d(t)$ ($t \in [0, T+1]$)。

考察第 $k+1$ 次迭代时的控制误差

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{u}_{k+1}(t) &= \Delta \mathbf{u}_k(t) - \mathbf{LC}\Delta \mathbf{x}_k(t) = \Delta \mathbf{u}_k(t) - \\ &\mathbf{LC}[\mathbf{A}\Delta \mathbf{x}_k(t-1) + \mathbf{B}\Delta \mathbf{u}_k(t)] = (\mathbf{I} - \mathbf{LCB})\Delta \mathbf{u}_k(t) - \\ &\mathbf{LCA}\Delta \mathbf{x}_k(t-1) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $t \in [0, T]$, $\Delta \mathbf{u}_k(t) = \mathbf{u}_d(t) - \mathbf{u}_k(t)$, $\Delta \mathbf{x}_k(t) = \mathbf{x}_d(t) - \mathbf{x}_k(t)$ 。式(7)两端取范数:

$$\begin{aligned} \|\Delta \mathbf{u}_{k+1}(t)\| &\leq \|\mathbf{I} - \mathbf{LCB}\| \|\Delta \mathbf{u}_k(t)\| + \\ &\|\mathbf{LCA}\| \|\Delta \mathbf{x}_k(t-1)\| \leq \rho \|\Delta \mathbf{u}_k(t)\| + b_1 \|\Delta \mathbf{x}_k(t-1)\| \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $b_1 = \|\mathbf{LCA}\|$ 。

利用式(5)可将式(8)写成:

$$\begin{aligned} \|\Delta \mathbf{u}_{k+1}(t)\| &\leq \rho \|\Delta \mathbf{u}_k(t)\| + \\ &b_1 \sum_{s=0}^{t-1} \|\mathbf{A}^{t-s} \mathbf{B}\| \|\Delta \mathbf{u}_k(s)\| \leq \\ &\rho \|\Delta \mathbf{u}_k(t)\| + b_1 b_2 \sum_{s=0}^{t-1} \|\Delta \mathbf{u}_k(s)\| \quad 1 \leq t \leq T \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $b_2 = \sup_{1 \leq t \leq T, 0 \leq s \leq t-1} \|\mathbf{A}^{t-s} \mathbf{B}\|$ 。

式(9)两端同乘 λ^t , $0 < \lambda < 1$, 可得:

$$\begin{aligned} \lambda^t \|\Delta \mathbf{u}_{k+1}(t)\| &\leq \rho \lambda^t \|\Delta \mathbf{u}_k(t)\| + \\ &b_1 b_2 \sum_{s=0}^{t-1} \lambda^{t-s} \lambda^s \|\Delta \mathbf{u}_k(s)\| \leq \rho \lambda^t \|\Delta \mathbf{u}_k(t)\| + \\ &b_1 b_2 \sum_{s=0}^{t-1} \lambda^{t-s} \sup_{0 \leq \tau \leq T} \{\lambda^\tau \|\Delta \mathbf{u}_k(\tau)\|\} \leq \rho \lambda^t \|\Delta \mathbf{u}_k(t)\| + \\ &b_1 b_2 \sum_{s=0}^{t-1} \lambda^{t-s} \|\Delta \mathbf{u}_k\|_\lambda \leq \rho \lambda^t \|\Delta \mathbf{u}_k(t)\| + b_1 b_2 \frac{\lambda(1-\lambda^T)}{1-\lambda} \|\Delta \mathbf{u}_k\|_\lambda \end{aligned} \quad (10)$$

由式(8)及收敛条件(2)可知, 式(10)对 $t=0$ 也成立。因此, 根据 λ 范数的定义:

$$\|\Delta \mathbf{u}_{k+1}\|_\lambda \leq \rho \|\Delta \mathbf{u}_k\|_\lambda$$

式中: $\bar{\rho} = \rho + b_1 b_2 \frac{\lambda(1-\lambda^T)}{1-\lambda}$ 。显然, 由 $\rho < 1$ 可找到足够小的 λ 使得 $\bar{\rho} < 1$ 。因此, $\lim_{k \rightarrow \infty} \|\Delta \mathbf{u}_k\|_\lambda = 0$ 。又由式(4)和(5)可知, 对于 $0 < \lambda < 1$, 有:

$$\begin{aligned} \lambda^t \|\mathbf{e}_k(t)\| &\leq \|\mathbf{C}\| \sum_{s=0}^{t-1} \|\mathbf{A}^{t-s} \mathbf{B}\| \lambda^{t-s} \lambda^s \|\Delta \mathbf{u}_k(s)\| \leq \\ &cb_2 \sum_{s=0}^{t-1} \lambda^{t-s} \|\Delta \mathbf{u}_k\|_\lambda \leq cb_2 \frac{\lambda(1-\lambda^T)}{1-\lambda} \|\Delta \mathbf{u}_k\|_\lambda \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $c = \|\mathbf{C}\|$ 。根据 λ 范数的定义得到:

$$\sup_{1 \leq t \leq T+1} \{\lambda^t \|\mathbf{e}_k(t)\|\} \leq cb_2 \frac{\lambda(1-\lambda^T)}{1-\lambda} \|\Delta \mathbf{u}_k\|_\lambda \quad (12)$$

因此, $\lim_{k \rightarrow \infty} \sup_{0 \leq t \leq T} \{\lambda^t \|\mathbf{e}_k(t)\|\} = 0$ 。至此, 利用条件(2)可证得该定理。

4 仿真实验与分析

通过 MATLAB 进行仿真, 设定 $\mathbf{u}_k(0) = 0$, 迭代学习控制律为 $\mathbf{u}_{k+1}(t) = \mathbf{u}_k(t) - 0.3\mathbf{e}_k(t)$, 熔池背面宽度的期望值 $\mathbf{y}_d(k) = 6 \text{ mm}$ 。焊接系统分别经过 5 次、10 次、60 次迭代学习以后其焊接过程跟踪控制效果如图 2 所示。由图 2 可以看出, 经过 60 次的迭代学习以后, 可以快速达到跟踪控制的效果, 且跟踪误差小于 0.015 mm。图 3 所示为每次焊接过程中误差绝对值的最大值随着焊接次数的变化曲线, 可以看出随着迭代次数的增加, 跟踪误差逐渐收敛到 0, 意味着焊缝的背面熔宽将完全达到期望值, 证明了迭代学习算法对 GTAW 焊接过程控制的

有效性。

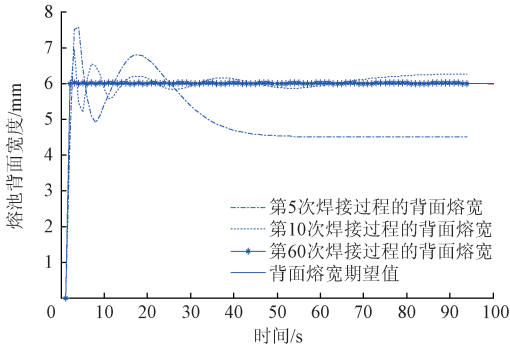


图2 背面熔宽跟踪曲线

Fig.2 Tracking curves of backside weld width

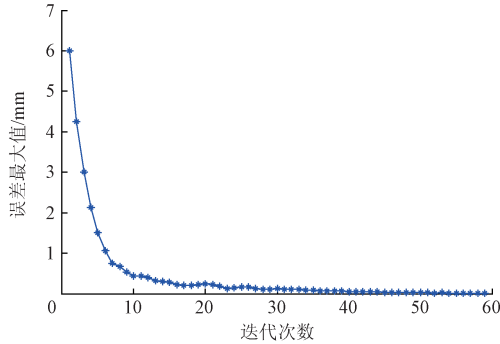


图3 迭代域上的最大跟踪误差

Fig.3 Maximum tracking error in iteration domain

当采用PID控制时,其控制效果如图4所示。从图4可以看出,在整个焊接过程中震荡较大,最大震荡幅度达到0.336 mm,存在较大误差,无法达到较好的跟踪控制效果。而采用迭代学习控制后在整个运行区间上均可以实现完全跟踪,且使用迭代学习控制时收敛速度快于PID控制,因此使用迭代学习控制可以更好地满足控制要求。

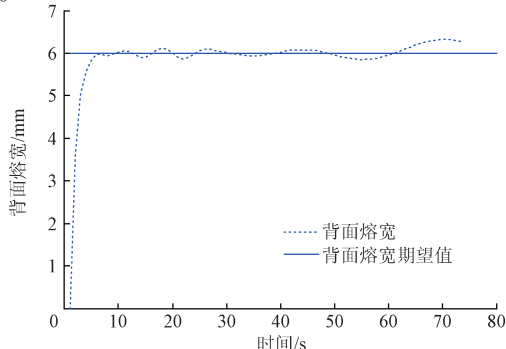


图4 PID控制背面熔宽跟踪曲线

Fig.4 Tracking curve of backside weld width based on PID control

以上研究过程是在没有外部扰动情况下进行的,但实际焊接过程中通常存在一定程度的外部干扰,下面就存在非重复性扰动 $w_k(t)$ 的情况下对不同控制算法在GTAW焊接过程中的控制效果进行研究分析。当焊接过程中存在扰动 $w_k(t) = 0.001 \times \text{randn}(1,1)$ 时,分别采用PID控制和ILC控制的结果如图5、6所示。PID控制器在整个焊接过程中由于扰动 $w_k(t)$ 的作用系统输出产生了较大的震荡,震荡最大幅度达到0.524 mm。而ILC控制器可以较好地抑制扰动的作用,使得控制输出对期望值的跟踪控制几乎没有受到影响,控制误差仍控制在0.015 mm的范围内。因此,采用迭代学习控制可以对焊接过程中的非重复性扰动具有一定的抑制能力,从而获得比PID控制更好的控制效果。

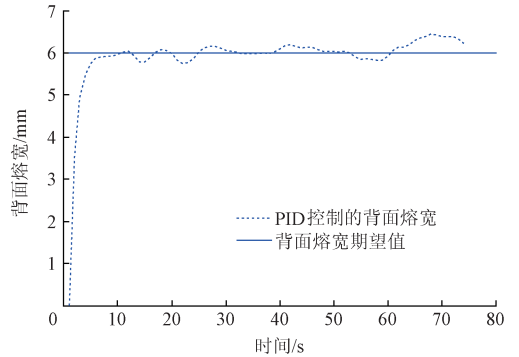


图5 存在外部扰动时的PID控制效果

Fig.5 Control result of PID with external disturbance

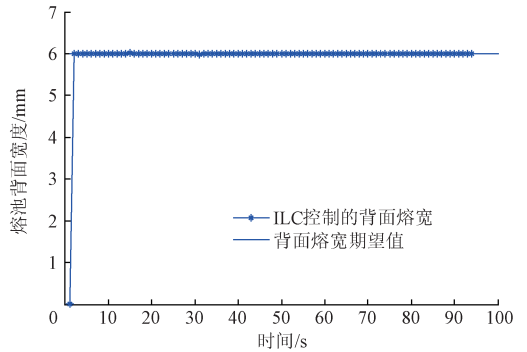


图6 存在外部扰动时的ILC控制效果

Fig.6 Control result of ILC with external disturbance

仿真结果表明,本研究设计的迭代学习控制器可以实现焊接过程高精度跟踪控制的同时,能够快速地实现误差收敛,可以满足实际运行需求。

5 结论

基于相同工件批量焊接过程具有重复性的特点,

本文采用 P 型迭代学习控制算法对 GTAW 焊接过程控制进行了分析和研究。仿真结果表明,迭代学习控制不仅克服了基于精确数学模型控制方法的局限性,并且在有限时间内能够更快速地实现高精度熔池背面熔宽跟踪控制。与 PID 控制相比,迭代学习控制在保证输出效果的前提下,收敛速度更快,并且能够较好地抑制外部扰动,弥补了本文提到的控制方法的不足。

接下来将考虑基于初始误差的情况对 GTAW 焊接过程的迭代学习控制进行研究,设计适应不同情况下的迭代学习代控制器,以更好地满足实际需求。

参考文献

- [1] 杜全营. 填丝脉冲 GTAW 熔池三维特征实时提取与智能控制[D]. 上海:上海交通大学, 2006.
DU Q Y. Real time extraction and intelligent control of the three dimensional characteristics of the filling wire pulsed GTAW welding pool [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2006.
- [2] 彭超. 铝合金 GTAW 背面熔宽实时检测与控制 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
PENG CH. Real time detection and control of back weld width in aluminum alloys GTAW welding [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [3] 王文怡. 基于粗糙集理论铝合金脉冲 GTAW 过程知识建模的智能控制方法研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2009.
WANG W Y. Research on Rough Set based modeling for controlling of aluminum alloy pulsed GTAW process [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009.
- [4] 吕凤琳. 脉冲 GTAW 熔池动态过程无模型自适应控制方法研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2008.
LV F L. Study on model-free adaptive control of weld pool dynamic process in pulsed GTAW welding pool [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009.
- [5] DU Q Y, CHEN S B, LIN T. Inspection on shape of weld based on the shape from shading [J]. Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 27(7):667-671.
- [6] 李仁俊, 韩正之. 迭代学习控制综述 [J]. 控制与决策, 2005, 20(9):961-966.
LI R J, HAN ZH ZH. Survey of Iterative Learning Control [J]. Control and Decision, 2005, 20(9):961-966.
- [7] 马航, 杨俊友, 袁琳. 迭代学习控制研究现状与趋势 [J]. 控制工程, 2009, 16(3):286-290.
MA H, YANG J Y, YUAN L. Current state and trend of iterative learning control [J]. Control Engineering of China, 2009, 16(3):286-290.
- [8] 曹伟, 丛望, 孙明. 初态学习下时滞非线性系统的迭代学习控制 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(2):315-320.
CAO W, CONG W, SUN M. Iterative learning control with initial state study for nonlinear time- delay system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(2):315-320.
- [9] 田森平, 毛琳琳. 带控制时滞广义系统的 PID 型迭代学习算法 [J]. 控制工程, 2012, 19(1):65-68.
TIAN S P, MAO L L. PID-type iterative learning control for singular systems with control delay [J]. Control Engineering of China, 2012, 19(1):65-68.
- [10] 余发山, 岳伟超, 张瑞庄, 等. 基于迭代学习的矿井提升系统跟踪控制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(2):138-145.
YU F SH, YUE W CH, ZHANG R ZH, et al. Mine hoist system tracking control based on iterative learning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(2):138-145.
- [11] 耿冲, 余发山, 卜旭辉, 等. 迭代学习控制在吊车-双摆系统中的应用研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1):99-105.
GENG C, YU F SH, BU X H, et al. Application of iterative learning control in double-pendulum-type crane system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(1):99-105.
- [12] 崔志恒, 栗三一. 存在始误差的三维桥式起重机位置迭代控制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(7):1042-1049.
CUI ZH H, LI S Y. Iterative control of three-dimensional bridge crane location tracking in existing initial error [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(7):99-105.
- [13] 卜旭辉, 侯忠生, 余发山, 等. 基于迭代学习的农业车辆路径跟踪控制 [J]. 自动化学报, 2014, 40(2):368-372.
BU X H, HOU ZH SH, YU F SH, et al. Iterative learning control for trajectory tracking of farm vehicles [J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(2):368-372.
- [14] 黄攀雄, 罗安, 黎群辉. 迭代学习控制算法在中药生产过程提取工段的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(8):1434-1439.
HUANG ZH X, LUO AN, LI Q H. Applications of iterative learning control algorithm in extracting procedure of Chinese traditional medicine production [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(8):1434-1439.

- [15] 闫中奎,陈春俊,孙宇. 大数据高速列车车内压力波动仿真控制研究[J]. 中国测试,2016,42(5):93-97.
YAN ZH K, CHEN CH J, SUN Y. Simulation and control research of air pressure fluctuation in high-speed train based on big data[J]. China Measurement & Test, 2016, 42(5):93-97.
- [16] 刘国荣,张扬名. 移动机器人轨迹跟踪的模糊 PID-P 型迭代学习控制[J]. 电子学报, 2013, 41(8): 1536-1541.
LIU G R, ZHANG Y M. Trajectory tracking of mobile robots based on fuzzy PID-P type iterative learning control [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(8): 1536-1541.
- [17] 张刚,樊丁,石珩,等. 焊接电参数对 GTAW 熔透状态的影响 [J]. 焊接学报,2016,37(2):25-28.
ZHANG G, FAN N, SHI Y, et al. Effect of welding parameters on the penetration of GTAW [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(2):25-28.

作者简介



刘建,2014 年于黄淮学院获得学士学位,现为河南理工大学硕士研究生,主要研究方向为工业过程控制。
E-mail:923258217@qq.com

Liu Jian received B. Sc. from Huanghuai University in 2014. Now he is a M. Sc. candidate in Henan Polytechnic University. His main research interest includes industrial process control, etc.



卜旭辉,分别在 2004 年、2007 年于河南理工大学获得学士学位和硕士学位,2011 年于北京交通大学获得博士学位,现为河南理工大学副教授,主要研究方向为数据驱动控制、迭代学习控制、交通控制等。
E-mail:272011951@qq.com

Bu Xuhui received B. Sc. and M. Sc. both from Henan Polytechnic University in 2004 and 2007, and Ph. D. from Beijing Jiaotong University in 2011, respectively. Now he is an associate professor in Henan Polytechnic University. His main research interest includes data-driven control, iterative learning control, traffic control, etc.



梁嘉琪,2014 年于河南科技大学获得学士学位,现为河南理工大学硕士研究生,主要研究方向为迭代学习控制、多智能体控制。
E-mail:1459485470@qq.com

Liang Jiaqi received B. Sc. from Henan University of Science and Technology in 2014. Now she is a M. Sc. candidate in Henan Polytechnic University. Her main research interest includes iterative learning control, multi-agent control, etc.



闫帅可,2014 年于河南城建学院获得学士学位,现为河南理工大学硕士研究生,主要研究方向为迭代学习控制、网络控制。
E-mail:1294938417@qq.com

Yan Shuaike received B. Sc. from Henan University of Urban Construction in 2014. Now he is a M. Sc. candidate in Henan Polytechnic University. His main research interest includes iterative learning control, network control, etc.