

液压张力温轧实验轧机薄带在线加热温度控制

孙涛, 李建平, 王贵桥, 吴志强

(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 采用电阻加热的方法对试样施加低电压大电流实现在线加热. 为保证薄板加热过程中的测温精度和温度均匀性, 设计了接触式测温仪和双回路加热装置. 温度控制器采用前馈控制器和反馈控制器相结合的方式, 以薄板电阻加热时的热平衡方程为基础进行前馈控制器设计, 反馈控制采用 PID 控制器, 将前馈和反馈控制量叠加后作为温度控制器的总设定值. 该技术能够满足试样加热速率和温度控制精度的要求, 通过在轧制过程中持续补温, 提高试样的温度均匀性.

关键词: 温轧; 实验轧机; 电阻加热; 温度控制; 前馈; 反馈

中图分类号: TG 335.5 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)10-1398-05

Temperature Control of Online Heating Strip on Hydraulic Tension Experimental Warm Rolling Mill

SUN Tao, LI Jian-ping, WANG Gui-qiao, WU Zhi-qiang

(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: SUN Tao, E-mail: suntao@ral.neu.edu.cn)

Abstract: The method of resistance heating was used to heat the workpiece online by applying low voltage and large current. The double loop heating devices and contact-type thermometers were designed to ensure the measurement accuracy and temperature uniformity of the thin plate. The temperature controller adopted the way of combining feedforward and feedback controllers and the setting value of the temperature controller was summed output from the two controllers, in which the feedforward controller was designed on the basis of the heat balance equation of the resistance heating sheet and the PID controller was used as the feedback controller. The results in practice showed that the technology could meet the requirements of heating rate and temperature-controlled precision, and the temperature uniformity was improved by continuous heating in the rolling process.

Key words: warm rolling; experimental mill; resistance heating; temperature control; feedforward; feedback

通常可以采用温轧工艺进行加工的难变形金属有高硅电工钢(约含 6.5% Si 的 Fe-Si 合金)、镁及其合金、钨、钼及其合金,以及铝质量分数达到 12% 以上的高铝青铜等^[1]. 其中高硅电工钢是黑色金属中具有极高应用价值的典型难变形金属,其室温塑性几乎为零,常温下难以加工^[2-3]. 目前只有日本 JFE 公司的化学气相沉积渗硅法(CVD)实现了高硅电工钢薄带的工业化生产,但该技术存在工艺流程长、环境负担重、生产效率

低、成本高等问题^[1]. 谢建新等^[3]发明了一种采用普通钢材对高硅电工钢进行包套后温轧,剥离包套后对其酸洗并冷轧的方法,制备出了表面光亮、组织均匀的高硅电工钢薄带. Bolfarini 等^[4]采用喷射成形及合金中添加铝的方法,制备出了高硅电工钢薄板,但该工艺难以实现大规模的工业化生产. 刘海涛等^[5-6]采用了铸轧、热轧、温轧加中间退火的方法制备出高硅钢电工钢薄板,是一种相对高效的高硅电工钢制备技术. 另一种具有

广泛应用价值的常温下难变形金属是镁及其合金^[7]。由于镁合金是密排六方晶体结构,塑性变形能力差,因此通常需在较高温度下成形,温轧是最适合的镁合金薄板生产工艺。

温轧是针对常温下难变形的金属材料,在冷轧设备基础上,采用特殊手段对试样进行加热,加热温度在金属的常温组织回复温度与再结晶温度之间。由于温轧时材料的塑性变形能力得到一定提高,与冷轧相比,材料容易变形,而且没有热轧的缺点,例如易生成表面氧化层导致表面粗糙,以及尺寸精度较差等。研究表明,适合高硅电工钢的温轧温度范围为 623 ~ 823 K^[8],适合镁及其合金的温轧温度范围为 473 ~ 673 K^[9]。

传统的温轧实验,对试样采用离线加热的方法,在轧机旁放置加热炉,将金属片加热至所需温度后,人工夹持试样送入轧辊进行轧制。这种方法效率低,降温太快而不能获得精确温度参数,不能对试样施加张力而造成板型及尺寸精度较差。为了模拟工业生产的温轧工艺过程,在液压张力冷轧实验轧机基础上增加试样在线加热功能,改造后的试验轧机称为液压张力温轧实验轧机,这种温轧实验轧机在国内外尚属首台套设备。其核心功能主要包括:试样在线温度控制、厚度自动控制、微张力控制等。本文重点研究试样在线温度控制。

1 符号及定义

l 为试样长度, m ; T_{spl} 为试样温度, K ; w 为试样宽度, m ; T_{rd} 为环境温度, K ; δ 为试样厚度, m ; T_{clp} 为钳口(轧辊)温度, K ; ρ_g 为试样材质密度, kg/m^3 ; σ 为玻尔兹曼常数, $W/(m^2 \cdot K^4)$; ρ_e 为试样材质电阻率, $\Omega \cdot m$; t 为时间, s ; c 为平均比热容, $J/(kg \cdot K)$; I 为电流, A ; λ 为导热系数, $W/(m \cdot K)$; ε 为试样的辐射系数; α 为对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

2 试样在线加热装置及原理

液压张力温轧实验轧机的主要设备布置如图 1 所示,与液压张力冷轧实验轧机相比,增加了一组在线加热及测温装置:可控硅(直流)变压器和(接触式)测温仪。液压夹钳和张力液压缸之间设有绝缘隔离,在下支撑辊传动侧轴端安装导电电刷。

液压张力温轧机的终轧厚度较薄,温度下降很快,要求在轧制过程中时刻保持加热才能保证温轧的顺利实施,如果单纯采用夹钳间通电加热

无法满足这一要求。试样在轧制过程中被分为两部分:轧机入口侧(H)和轧机出口侧(h),经过轧制变形, h 的厚度要小于 H ,因此 h 的电阻要大于 H 。如果在左、右夹钳之间通电加热,则将 H 和 h 两部分同时通电且电流相等,金属带材厚度越小电阻越大,所以最终得到加热的是 h 部分,而 H 部分才是需要加热的部分。

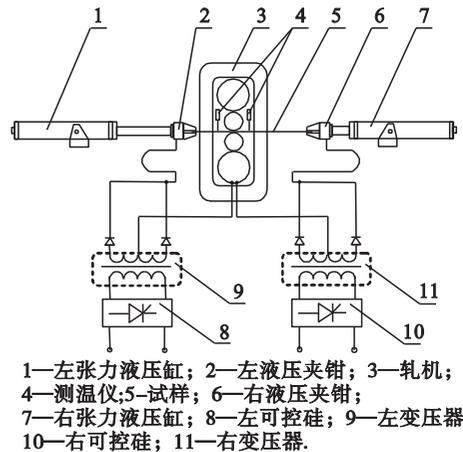


图 1 实验轧机设备布置图

Fig. 1 Schematic of equipment for experimental mill

因此,针对液压张力温轧机对轧制过程中保持加热的要求,加热系统设计为双变压器工作方式,共形成了左、右两个回路。以左侧为例,左变压器正端接左液压夹钳,负端接下支撑辊轴端的电刷,电流依次通过左液压夹钳、试样左侧部分、下工作辊、下支撑辊。这种双变压器工作方式,使得试样左右两部分可以单独加热,在轧制过程中也可以进行在线加热。

影响温度控制精度的关键环节是测温仪。由于温轧机试样包括很多种金属材料,而且不同材料在不同的温度阶段,其表面黑度系数随着氧化程度不同而发生剧烈变化,无法采用红外测温仪。在对硅钢进行加热温轧的实验过程中,用红外测温仪和在轧件表面焊接热电偶两种方法同时测量轧件的表面温度,热电偶测量温度为轧件表面的真实温度,其测量结果如图 2 所示,热电偶温度达到 660 °C 时,红外测温仪的测量值为 370 °C。用同样的方法对镁合金进行试验,热电偶温度达到 300 °C 时,红外测温仪测量值仅为 65 °C,失真更加严重。

为此开发了接触式测温仪,其结构如图 3 所示。该装置由气动元件和接触滑片式热电偶测温原件组成。热电偶滑片安装在气动测量头前端,通过控制电磁换向阀,改变活塞杆的运动方向,可以实现测温仪的往复升降。温轧轧制过程中需要测

量温度时,测温仪下降至试样表面使其热电偶滑片与其滑动接触,可以用滑动接触的方法连续测量带钢表面温度;不需要测量温度时,测温仪通过气动缸离开轧件表面。温轧过程中,为防止液压夹钳与接触式测温仪碰撞,气动缸需要根据张力液压缸位移自动升降。采用接触式测温仪能够针对不同金属带材更加真实准确地测量轧件温度,达到精确控制轧件加热温度的目的。

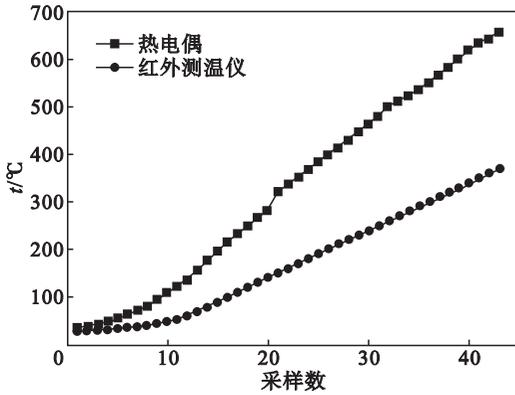
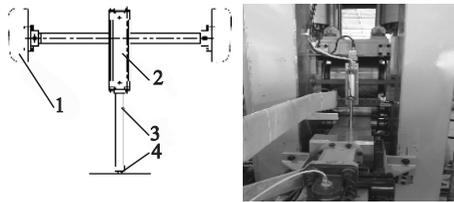


图 2 红外测温仪和热电偶测量结果比较

Fig. 2 Comparison of results from infrared thermometer and thermocouple



1—轧机牌坊; 2—气动缸; 3—活塞杆; 4—热电偶滑片。

图 3 接触式测温仪

Fig. 3 Contact-type thermometer

单片试样在线加热原理如图 4 所示。首先将左、右液压夹钳分别夹持在单片试样两端,轧辊压紧试样后,采用可控硅和变压器对试样施加低电压大电流,对其进行通电加热,设置在轧机两端的测温仪对试样进行测温,PLC 根据温度设定值和测量值偏差,动态调整可控硅,从而调整输出电压,实现试样的在线温度闭环控制。

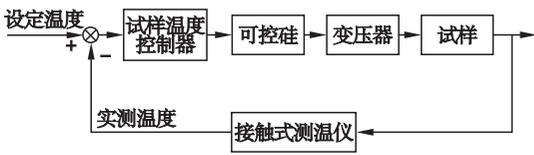


图 4 试样温度闭环控制框图

Fig. 4 Sample temperature closed-loop control diagram

试样加热有两种情况:静止加热和轧制过程中加热,同时每个加热情况均包括升温段和保温段,仅靠 PID 闭环控制调节,无法保证温度控制

精度。因此所设计的试样温度控制器包括前馈控制器和反馈控制器两部分。其中前馈控制器根据电阻加热数学模型计算预设定值,反馈控制器采用 PID 控制器。

3 温度控制器设计

PLC 通过设定可控硅控制量,改变电压输出,从而改变试样的加热功率。前馈和反馈控制器的输出相加后,作为可控硅的控制量。

3.1 前馈控制器

前馈控制器根据试样的材料属性及尺寸、设定升温速率、设定温度、环境温度等参数综合计算试样电阻加热时输入的电功率(P_{elec})。花福安等^[10]认为薄板电阻加热的瞬态热平衡方程为

$$P_{elec} = P_{ht} + P_{rad} + P_{conv} + P_{cond} \quad (1)$$

其中: P_{ht} 为试样的内能,使试样的温度升高; P_{rad} 和 P_{conv} 分别为辐射和对流而产生的热量损失; P_{cond} 为试样和左右钳口及轧辊间的热传导而产生的热量损失。具体计算公式为

$$P_{elec} = I^2 \rho_e \frac{l}{w\delta} \quad (2)$$

$$P_{ht} = \rho_g l w \delta c \frac{dT_{spl}}{dt} \quad (3)$$

$$P_{rad} = 2lw\epsilon\sigma T_{spl}^4 \quad (4)$$

$$P_{conv} = 2alw(T_{spl} - T_{srd}) \quad (5)$$

$$P_{cond} = 4\lambda w\delta(T_{spl} - T_{clp})/l \quad (6)$$

由于薄板加热时,对流和热传导产生的热损失相对较小,可以忽略不计^[10],因此只考虑内能和热辐射即可。

以高硅电工钢为例,假设升温速率为 15 K/s,计算升温段电加热功率如表 1 所示。 $\rho_g = 7800 \text{ kg/m}^3$, $\epsilon = 0.78$,玻尔兹曼常数 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$,试样有效变形区尺寸 $l \times w \times \delta$ 为 $0.6 \text{ m} \times 0.22 \text{ m} \times 0.002 \text{ m}$,比热容 c 与试样温度有关。

表 1 硅钢加热电功率

Table 1 Heating electric power of silicon steel

T_{spl}/K	573	673	773	873
$c/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	502	515	536	565
P_{ht}/W	15 506	15 907	16 556	17 452
P_{rad}/W	1 259	2 395	4 169	6 782
P_{elec}/W	16 765	18 302	20 725	24 234

以同样的升温速率和试样尺寸,计算镁合金薄板升温段电加热功率如表 2 所示。 $\rho_g = 1820 \text{ kg/m}^3$, $\epsilon = 0.4$ 。

表 2 镁合金加热电功率

Table 2 Heating electric power of Mg alloy

T_{spl}/K	423	523	623	723
$c/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	1 050	1 120	1 200	1 280
P_{ht}/W	7 568	8 072	8 649	9 225
P_{rad}/W	192	448	902	1 636
P_{elec}/W	7 759	8 520	9 551	10 861

考虑到变压器的效率和功率因数, 变压器的设定功率为

$$P_{control} = \frac{P_{elec}}{\eta \cos\varphi} \quad (7)$$

其中: η 为变压器效率; $\cos\varphi$ 为变压器功率因数. 这里, 效率和功率因数分别取 0.7 和 0.75(实际应用中, 效率和功率因数还与电缆选型有关, 可以根据实测数据进行调整), 例如高硅电工钢加热到 873 K 时, $P_{elec} = 24\ 233\ W$, 则 $P_{control} \approx 46\ 158\ W$.

上述模型中, 式(3)中升温速度取零时, 计算结果便是保温段功率设定值. 前馈控制器计算出的可控硅的控制量 U_{ff} (取值 0 ~ 80)为

$$U_{ff} = 80 \frac{P_{control}}{P_{max}} \quad (8)$$

其中 P_{max} 为变压器额定功率. U_{ff} 最大值取 80, 是指最大控制量的 80%, 剩余 20% 是反馈控制器的控制量 U_{fb} (取值 -20 ~ 20).

前馈控制器的输出值和反馈控制器的输出值相加作为可控硅的总控制量:

$$U = U_{ff} + U_{fb} \quad (9)$$

3.2 反馈控制器

反馈控制器输入信号为试样设定温度和实测温度偏差, 采用一个 PID 控制器对试样温度进行闭环控制, 输出信号为可控硅的反馈控制量 U_{fb} .

温度控制系统可以用带有时间延迟的一阶模型来描述:

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (10)$$

其中: K 为增益; T 为时间常数; L 为滞后时间; s 为复变量. 在开环状态下, 给定阶跃为 50% 的控制量, 获得试样温度的开环阶跃响应曲线, 便可以离线计算模型参数, 并在此基础上计算 PID 参数的预设值. 由于模型参数与轧件材质、尺寸、环境温度等因素相关, 忽略影响较小的环境温度, 还需要获得每种材质不同尺寸轧件的温度阶跃响应曲线, 并离线计算 PID 参数. 控制系统根据不同材质和轧件尺寸进行变参数 PID 温度控制.

以尺寸为 $0.6\ m \times 0.1\ m \times 0.001\ m$ 的高硅电工钢为例, 模型参数: $K = 0.024\ 5$, $T = 14.96$,

$L = 1.73\ s$. PID 参数: $K_p = 9.543$, $T_i = 22.91$, $T_D = 0.33$.

轧制过程中, 轧机入口侧被加热试样的 H 部分的宽度和厚度未发生变化, 而长度逐渐变小. 根据式(1), 前馈控制器的输出量也逐渐变小. 由于接触式测温仪可以在试样运动过程中测得温度值, 反馈控制器也可以继续投入. 如果接触式测温仪抬起, 则 PID 控制器输出值锁定.

4 应用效果

以镁合金为例, 试样有效变形区尺寸为 $0.6\ m \times 0.22\ m \times 0.002\ m$, 加热速率为 $15\ K/s$, 目标温度为 $673\ K$. 静态加热过程中的实测温度及温度控制器控制量 U 的曲线如图 5 所示.

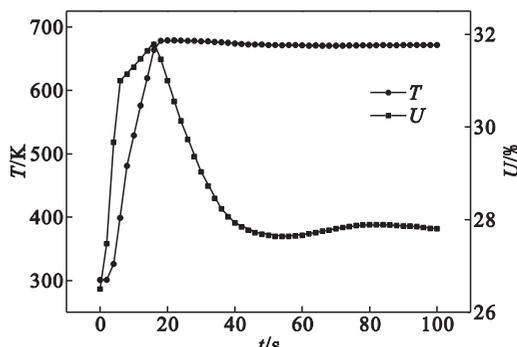


图 5 镁合金静态加热过程中温度与控制量曲线
Fig. 5 Temperature and controller output curves of heated Mg alloy in stationary state

根据式(1)可以得出前馈控制器输出值 U_{ff} 为 26.5. 由于反馈控制器从室温加热便开始投入, U_{fb} 的最高点为 5.4%, 此时 U 为 31.9%, 总体加热速率达到 $20\ K/s$, 加热温度超调量为 $5.8\ K$, 稳态控制精度为 $\pm 2\ K$. U 的稳态输出值约为 27.8%, 比前馈控制器输出值略大, 这是用于弥补前馈控制器中忽略掉的对流和热传导产生的热损.

图 6 为轧制过程中的加热温度和控制量曲

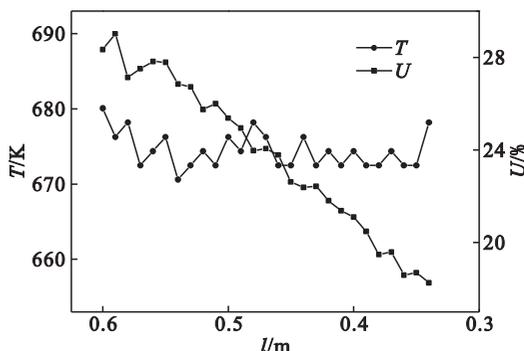


图 6 镁合金轧制过程加热温度与控制量曲线
Fig. 6 Temperature and controller output curves of heated Mg alloy in rolling process

线,当长度小于 0.34 m 时,接触式测温仪抬起,图中只给出了试样 H 部分的长度从 0.6 m 至 0.34 m 之间的曲线。随着试样被加热部分变短,温度控制器的输出逐渐减小,反馈控制器在接触式测温仪抬起后锁定输出值。经统计,沿试样长度方向的温度均匀性可达 ± 10 K。

5 结 论

液压张力温轧机是轧制技术及连轧自动化国家重点实验室自主开发的新型实验设备,在国内外尚属首台套。采用了特殊设计的双变压器加热装置以及接触式测温仪,开发了前馈控制器和反馈控制器相结合的温度控制技术,可以保证试样的静态加热速度和精度,并且能够在轧制过程中进行补温,保证了试样的温度均匀性。该技术已获得了成功应用,取得了良好的控制效果。为难变形金属薄板温轧工艺研究提供了可靠的保障。

参考文献:

- [1] 谢建新. 难加工金属材料短流程高效制备加工技术研究进展 [J]. 中国材料进展, 2010, 29(11): 1 - 7. (Xie Jian-xin. Development of compact processes for high efficiency fabrication of hard-to-working metals [J]. *Materials China* 2010, 29(11): 1 - 7.)
- [2] Fu H D, Zhang Z H, Pan H J, et al. Warm/cold rolling processes for producing Fe-6.5wt% Si electrical steel with

columnar grains [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 2013, 20(6): 535 - 540.

- [3] 谢建新, 付华栋, 张志豪, 等. 一种高硅电工钢薄带的短流程高效制备方法 [CN201010195520.4] P. 2010 - 05 - 31. (Xie Jian-xin, Fu Hua-dong, Zhang Zhi-hao, et al. A kind of method and equipment for fabricating high silicon steel bar with continuous columnar crystals [CN201010195520.4] P. 2010 - 05 - 31.)
- [4] Bolfarini C, Silva M C A. Magnetic properties of spray-formed Fe-6.5% Si and Fe-6.5% Si-1.0% Al after rolling and heat treatment [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 2008, 320(1): e653 - e656.
- [5] Li H Z, Liu H T, Liu Y, et al. Effects of warm temper rolling on microstructure, texture and magnetic properties of strip-casting 6.5 wt% Si electrical steel [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 2014, 370(1): 6 - 12.
- [6] Liu H T, Liu Z Y, Sun Y, et al. Development of λ -fiber recrystallization texture and magnetic property in Fe-6.5 wt% Si thin sheet produced by strip casting and warm rolling method [J]. *Materials Letters* 2013, 91(1): 150 - 153.
- [7] Friedrich H, Schumann S. Research for a " new age of magnesium " in the automobile industry [J]. *Journal of Materials Processing Technology* 2001, 117(1): 276 - 281.
- [8] Li H, Liang Y F, Yang W, et al. Disorder induced work softening of Fe-6.5 wt% Si alloy during warm deformation [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2015, 628(1): 262 - 268.
- [9] 刘庆. 镁合金塑性变形机理研究进展 [J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1458 - 1472. (Liu Qing. Research progress on plastic deformation mechanism of Mg alloys [J]. *Acta Metallurgica Sinica* 2010, 46(11): 1458 - 1472.)
- [10] 花福安, 李建平, 赵志国, 等. 冷轧薄板试样电阻加热过程分析 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, 28(9): 1278 - 1281. (Hua Fu-an, Li Jian-ping, Zhao Zhi-guo, et al. Analysis of resistance heating process for cold-rolled strip samples [J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)* 2007, 28(9): 1278 - 1281.)

(上接第 1382 页)

统,用 QPSO 算法调整优化所设计的区间二型模糊逻辑系统及两种一型模糊逻辑系统的参数。三种模糊逻辑系统用于基于实际历史数据的两个仿真研究,说明了所设计的区间二型模糊逻辑系统优于相应的一型模糊逻辑系统。

在以后的工作中,作者将进一步研究区间二型模糊逻辑系统及普通二型模糊逻辑系统的参数优化,寻求其他全局优化算法等。

参考文献:

- [1] Huang J, Korolkiewicz M, Agrawal M, et al. Forecasting solar radiation on an hourly time scale using a coupled autoregressive and dynamical system (CARDS) model [J]. *Solar Energy* 2013, 87: 136 - 149.
- [2] Barbounis T G, Theocharis J B. Locally recurrent neural networks for wind speed prediction using spatial correlation [J]. *Information Sciences* 2007, 177(24): 5775 - 5797.
- [3] Khosravi A, Nahavandi S, Creighton D, et al. Interval type-2 fuzzy logic systems for load forecasting: a comparative study [J]. *IEEE Transaction on Power Systems*, 2012, 27(3): 1274 - 1282.
- [4] Wu D. On the fundamental differences between interval type-2 and type-1 fuzzy logic controllers [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 2012, 20(5): 832 - 848.

- [5] Zarandi M H F, Torshizi A D, Turksen I B, et al. A new indirect approach to the type-2 fuzzy systems modeling and design [J]. *Information Sciences* 2013, 232(20): 346 - 365.
- [6] Mendel J M. On KM algorithms for solving type-2 fuzzy set problems [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 2013, 21(3): 426 - 446.
- [7] 胡怀中, 赵戈, 杨华南. 一种区间型二型模糊集重心的快速解法 [J]. 控制与决策, 2010, 25(4): 637 - 640. (Hu Huai-zhong, Zhao Ge, Yang Hua-nan. Fast algorithm to calculate generalized centroid of interval type-2 fuzzy set [J]. *Control and Decision* 2010, 25(4): 637 - 640.)
- [8] Wei F, Jun S, Ping X Z, et al. Convergence analysis of quantum-behaved particle swarm optimization algorithm and study on its control parameter [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(6): 3686 - 3694.
- [9] Wang X, He Y, Dong L, et al. Particle swarm optimization for determining fuzzy measures from data [J]. *Information Sciences* 2011, 181(19): 4230 - 4252.
- [10] María D L A H, Patricia M, Gerardo M M, et al. A hybrid learning method composed by the orthogonal least-squares and the back-propagation learning algorithms for interval A2-C1 type-1 non-singleton type-2 TSK fuzzy logic systems [J]. *Soft Computing* 2015, 19(3): 661 - 678.
- [11] Oscar C, Leticia A A, Juan R C, et al. A comparative study of type-1 fuzzy logic systems, interval type-2 fuzzy logic systems and generalized type-2 fuzzy logic systems in control problems [J]. *Information Sciences* 2016, 354: 257 - 274.
- [12] Hsu C, Juang C. Evolutionary robot wall-following control using type-2 fuzzy controller with species-de-activated continuous ACCO [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2013, 21(1): 100 - 112.