

用从明暗恢复形状方法提取焊接熔池的表面高度

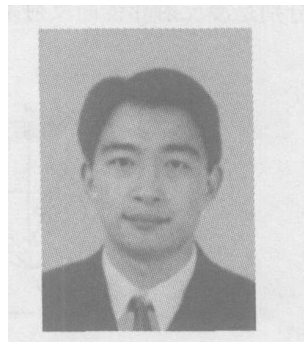
李来平, 林 涛, 陈善本

(上海交通大学 焊接工程研究所, 上海 200030)

摘 要: 介绍了 Lee-Kuo 提出的通用反射图方程, 引入光滑性约束条件和变化光滑因子以及收敛条件对该算法进行改进并对反射图方程的求解也进行了改进, 在实际成像条件下的合成图像恢复了物体的表面高度, 并与 Lee-Kuo 方法的结果进行了对比。分析了焊接过程中的成像特点, 得到了焊接熔池的反射图方程, 并获取了实际焊接熔池的正面形状信息。

关键词: 从明暗恢复形状; 通用反射图方程; 焊接过程成像特点; 熔池表面反射模型; 熔池表面高度

中图分类号: TP242.62 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2005)05-05-04



李来平

0 序 言

从明暗恢复形状方法是计算机视觉中的关键问题, 是从物体的图像中计算物体表面高度的方法。传统的 SFS (Shape from shading) 算法^[1~3]都做了理想性假设, 但是实际成像条件与假设不相符。Lee 和 Kuo^[4]分析并得到了近距离点光源反射图方程, 经线性化和离散化后采用光度立体法计算了物体表面高度。但是由于光度立体法需要多幅图像, 所以从一幅图像恢复物体表面的高度具有更加实际的意义。

焊接质量控制是实现焊接智能化、机器人化的关键。而获取熔池形状和尺寸是控制的基础。良好的焊缝成形要求正反面凸出, 而通常情况下熔池背面成形难以直接测量。

熟练的焊工通常通过观察熔池的形状和大小等信息感知并控制焊接熔池背面的成形。因此可以通过观察熔池的正面形状来预测并控制焊缝的背面成形。

由于焊接熔池具有体积小、温度高且分布不均匀、存在时间短、存在着运动的特点, 以及焊接过程中存在着电磁等干扰, 所以不能用机械和电子方法测量熔池的表面高度。而视觉传感方法具有信息量大, 抗干扰性强等特点, 通过模拟焊工的眼睛获取焊接熔池表面的有关信息, 因此应用较广。

焊接熔池的运动、图像的不完整性和被动式视觉传感的特点, 限制了图像序列方法、光度立体方法

和立体视觉的应用。从明暗恢复形状方法从单幅图像和经验知识来获取到物体的形状信息, 因此是计算焊接熔池表面高度的最有发展前途的方法。

Zhang Y M^[5]和赵冬斌^[6]分别用主动视觉和被动视觉的方法计算了熔池表面高度, 但是主动视觉的特点是结构复杂, 价格昂贵, 计算结果存在滞后问题。

作者首先对近距离点光源混合反射模型的从明暗恢复形状方法进行了改进, 计算了合成图像的高度, 分析了焊接熔池的成像特点, 得到了焊接熔池的反射模型, 最后计算了焊接熔池的表面高度。

1 从明暗恢复形状方法

1.1 Lee-Kuo 方法基本算法

图 1 是实际条件下的成像模型, 图中 p 表示物体上的点; n 是 p 点的表面法线; S 是点光源; r 是光源 S 到 p 点之间的距离; i 是光源方向的单位矢量; v 是摄像机方向的单位矢量; 镜面反射方向 h 是 i 和 v 的角平分线, $h = \frac{i+v}{\|i+v\|}$; θ_i 、 θ_v 、 α 分别是 n 和 i 、 n 和 v 、 n 和 h 的夹角。近距离点光源混合反射的反成图方程是

$$E = R = g \frac{\pi}{4} (v^T n_z)^4 \left(\frac{d}{f}\right)^2 L + b \quad (1)$$

式中: E 是图像中像素点的灰度值; R 是反射图函数; d 是摄像机镜头直径; f 是焦距; g 、 b 分别是摄像机的增益和常数; L 是物体表面的反射光强度, 即

$$L=\frac{I_0}{r^2}\max[0\ (\mathbf{i}^T\mathbf{n})]\cdot\left\{\frac{\beta_d}{\pi}+\beta_s\frac{\exp[-k(\cos^{-1}(\mathbf{h}^T\mathbf{n}))]}{(\mathbf{i}^T\mathbf{n})(\mathbf{v}^T\mathbf{n})}\right\},$$

式中： I_0 是点光源强度； k 是表面粗糙度系数； β_d 、 β_s 分别是漫反射和镜面反射系数。

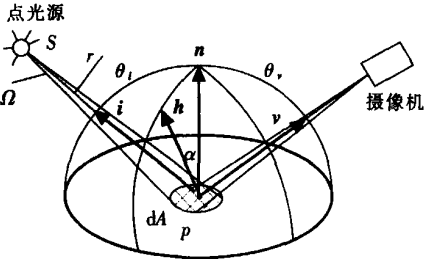


图 1 近距离点光源混合反射成像模型
Fig 1 Imaging mode under near po int light

从上式得到的反射图模型是连续的、非线性的，难以用数值方法来计算，所以采用了有限元方法分别对图像区域和物体表面进行了离散化处理。为了简化计算过程，利用泰勒级数得到线性化的通用反射图模型，即

$$R_k\approx\sum_{m=1}^{M_n}w_{kn}z_m+\xi_k,$$
 (2)

式中： $\xi_k=R_k(z_1^{n-1},z_j^{n-1},z_l^{n-1})-\sum_{m=1}^{M_n}w_{kn}z_m^{n-1},$

$$w_{km}=\begin{cases}\frac{\partial \mathcal{R}_k(z_p,z_p,z_l)}{\partial z_m}\Big|_{(z_1^{n-1},z_j^{n-1},z_l^{n-1})},m\in V_k.\\0\text{ otherwise}\end{cases}$$

为了从图像信息中得到节点的高度值 z_p ，采用泛函极值的方法，考虑代价泛函为

$$\epsilon_b=\sum_{k=1}^{M_l}(E_k-R_k)^2=\frac{1}{2}z^T A_b z-b^T z$$
 (3)

式中： z 是节点变量；刚性矩阵 A_b 和载荷矢量 b 的元素 a_{ij} 、 b_i 分别由下式确定，即

$$a_{ij}=2\sum_{k=1}^{M_l}w_{kn}w_{kn};$$

$$b_i=2\sum_{k=1}^{M_l}(E_k-\xi_k)w_{kn};\ 1\leq m,\ n\leq M_n.$$

求二次泛函极小值问题等价于求解下述线性方程组，即

$$A_b z=b$$
 (4)

由于刚性矩阵 A_b 是稀疏的、对称的、半正定的，所以方程组采用多重网格法求解。

图 2 是合成图像及计算结果。通常由反射图生成的合成图像来检验算法的可行性。假设物体表面是一个位于 $z=-50\text{ mm}$ 平面上横截面圆直径为 $5\ 656\text{ mm}$ 大圆直径为 6 mm 的球冠。摄像机的位置为坐标原点，镜头焦距为 $5\ 0\text{ mm}$ 。摄像机靶面的尺寸为 $4\ 8\text{ mm}\times 4\ 8\text{ mm}$ ，图像的最大尺寸为 $512\text{ mm}\times 512\text{ mm}$ 。物体表面的参数为 $\beta_d=0\ 2$

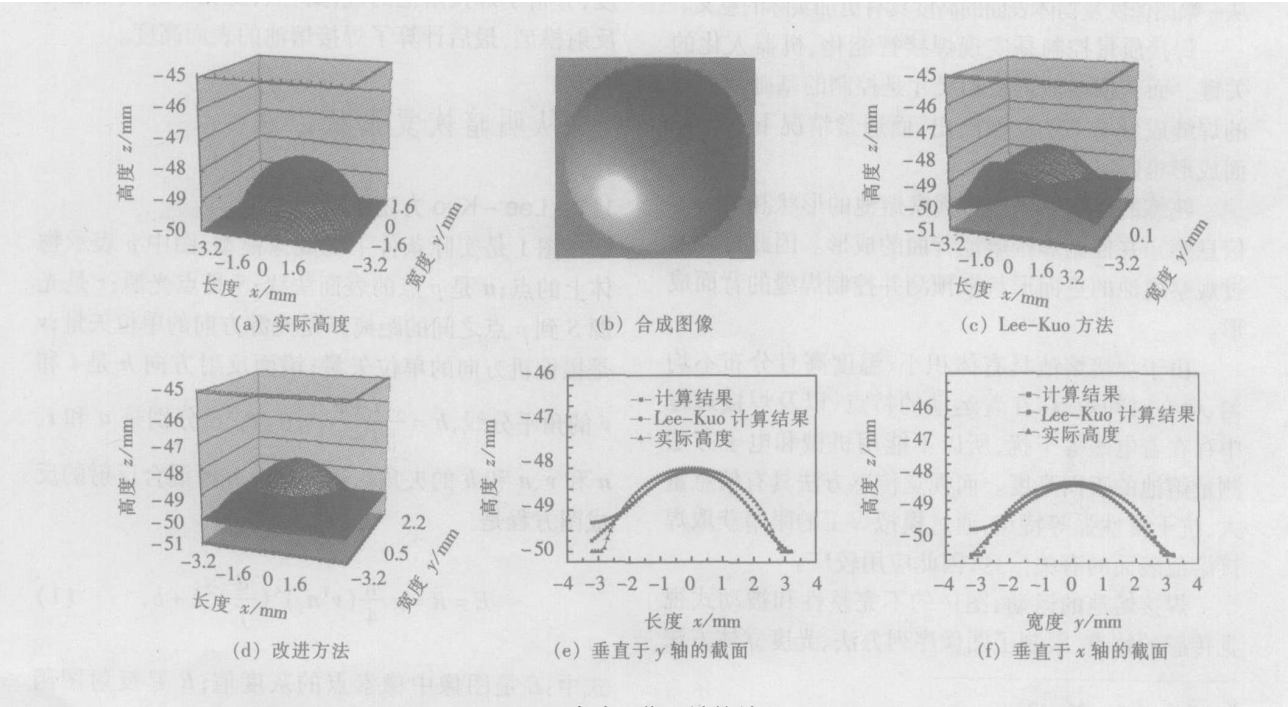


图 2 合成图像及计算结果
Fig. 2 Synthetic image and calculated result

$\beta_s=0.8$ $k=3.0$ 光源位于 $(50, 50, 0)$ 。图 2a 是实际物体表面的形状,图 2b 是合成图像,大小为 32×32 。图 2c 是采用 Lee-Kuo 方法计算的结果,图 2d 是加入约束条件后计算得到合成图像的恢复结果,图 2e 是垂直于 y 轴的横截面高度,图 2f 是垂直于 x 轴的横截面高度。

1.2 改进算法及计算结果

为了消除反射图方程的病态特性, Lee-Kuo 采用了光度立体法。由于光度立体法要求通过精确调整光照光源的位置来得到多幅图像限制了其应用。作者采用规则化方法来消除方程的病态特性。

1.2.1 规则化方法

规则化方法是在误差代价函数中加入约束项来改变方程的病态特性。假设物体表面是光滑的,引入表面光滑约束后可以得到新的代价函数为

$$\epsilon = \epsilon_b + \lambda \epsilon_s, \tag{6}$$

式中: ϵ_b 是灰度误差代价函数; λ 是光滑因子, $0 < \lambda < 1$; ϵ_s 是光滑性误差代价函数,用 Teiropoulos^[7]提出的连续性可控样条函数来表示,即

$$\epsilon_s = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \int_{\Omega} \rho(z_x^2 + z_y^2) + (1 - \rho)(z_{xx}^2 + 2z_{xy}^2 + z_{yy}^2) dx dy, \tag{7}$$

式中: ρ 是光滑性控制系数, $0 < \rho < 1$ 。第一项要求曲面高度连续,会使所重建的表面不光滑;第二项要求二阶偏导数连续,保证了曲面的光滑性,但往往导致曲面过分光滑,计算速度过慢,经加权处理后得到光滑性可控的曲面。则误差代价函数表示为

$$\epsilon = \frac{1}{2} z^T A z - b^T z + c \tag{8}$$

式中: $A = A_b + \lambda B$; B 是光滑性约束函数。表面光滑因子 λ 决定了计算的速度和精度。如果 λ 过大,则迭代次数过多,运算时间长;反之,计算精度较差,有可能导致算法发散。所以 λ 值为变化量,开始取较大值来稳定迭代过程,随着迭代过程的进行,逐渐减小来加速收敛过程,最后减小到零,消除正则化项的影响。同样,迭代判据 ϵ 也很重要, ϵ 过大,则计算时间短,计算精度差;反之,则计算时间过长,计算精度高。所以取 ϵ 变化来兼顾计算精度和计算速度。刚开始 ϵ 取较大值,逐渐减小 ϵ 使之为一个较小的值来保证计算精度。

1.2.2 经验知识

在从明暗恢复形状算法中,经验知识可以改善计算结果。作者采用了对称关系和物体表面遮挡边缘信息。图 2d 是加入约束条件后, λ 初值为 0.5 ϵ 初值为 0.01 ,终值为 e^{-6} 。

2 焊接熔池表面高度的提取

2.1 焊接熔池成像特点

为了减小传感系统的成本和体积,增加实用性,通常采用被动式视觉传感方法。根据物体成像原理,图像上像素的灰度值决定于光源的特性、物体的形状和反射特性、摄像机的参数。

光源的特性包括光源的形状、发光强度、光谱分布和光源与熔池表面之间的距离。在被动式视觉传感中,成像光源与焊接材料、焊接工艺有关。小电流时焊接电弧收缩到钨极端部,简化为点光源。

钨极惰性气体保护焊工艺要求钨极与工件之间的距离只有几个毫米来保证电弧稳定燃烧,因此焊接熔池成像属于近距离点光源成像。

整个熔池在各种力的作用下呈现出半球球状。熔池表面凹凸不平,下塌的熔池表面会发生互反射现象,凸起的熔池表面会出现遮挡现象。

焊接熔池是由液态熔化金属、凝固金属和母材组成的,是由漫反射和镜面反射组成属于混合反射模型。

2.2 焊接熔池反射模型

焊接熔池成像的反射图方程为

$$E = g \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{f} \right)^2 (v^T \cdot n_z)^4 L + b \tag{9}$$

式中: $L = \frac{I_0}{r^2} \max[0, i^T \cdot n] \cdot \left(\frac{\beta_d}{\pi} + \frac{\beta_s FDG}{(v^T \cdot n)} \right) + E_{ext}$

几何衰减因子 G 描述熔池表面的微平面之间相互遮挡引起镜面反射分量的衰减,即

$$G = \min \left[1, \frac{2(h^T \cdot n)(v^T \cdot n)}{(i^T \cdot h^T)}, \frac{2(h^T \cdot n)(i^T \cdot n)}{(h^T \cdot v^T)} \right];$$

菲涅耳函数 F 描述熔池表面对焊接电弧的反射和折射特性,即

$$F = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\varphi - \theta)}{(\varphi + \theta)} + \frac{\tan^2(\varphi - \theta)}{\tan^2(\varphi + \theta)} \right],$$

入射角 $\varphi = \arccos(i \cdot h)$; 折射角 $\theta = \arcsin \frac{\sin \varphi}{\eta}$, η 是相对折射率;微平面的斜率分布函数 $D = \exp\{-k[\cos^{-1}(h^T \cdot n)]^2\}$; 面片间的互反射为 $E_{ext} =$

$$\frac{\int [n_A \cdot (-r_{AB})(n_B \cdot r_{AB})] I_B dB}{|r_{AB} \cdot r_{AB}|^2} I_B dB, n_A$$
 表示 $A(x, y, z)$

点处物体的表面法线单位向量; n_B 表示 $B(x, y, z_1)$ 点处物体的表面法线单位向量; r_{AB} 表示从 B 点指向 A 点的向量; I 表示 B 点处的入射光强强度; dB 表示 B 点处面元的面积。

3 焊接试验

3.1 试验结构

图 3 是熔池正面信息获取的原理图。图中物体坐标系 $Oxyz$ 的原点 O 在钨极的正下方, 焊接方向为 x 轴, 垂直于焊接方向的为 y 轴, z 轴指向焊枪, 用来描述熔池表面高度。熔池表面的反射参数为 $\beta_d = 0.2$, $\beta_s = 0.8$, $k = 3.0$ 。凝固熔池表面 $\beta_d = 1.0$, $\beta_s = 0$ 。不锈钢的折射率为 1.44 , $\rho = 0.8$ 。焊接参数为材料 1Cr18Ni8Ti 试件尺寸 $100\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$, 焊接电流 150 A , 焊接速度 2.5 mm/s 。取像电流 25 A , 取像时刻为焊接电流下降沿延迟 80 ms 。取像位置斜后方, 弧长 3 mm 。

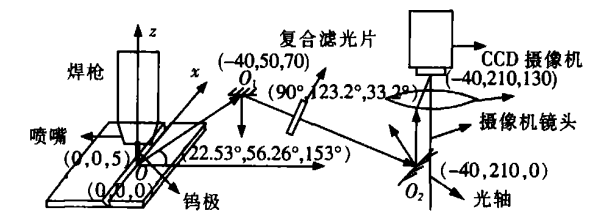


图 3 焊接熔池正面视觉传感图

Fig 3 Topside vision sensing of welding pool

3.2 计算结果

图 4a 是获取的焊接熔池图像, 图像平面的离散三角形的边长为 4 个像素。迭代计算的初始值为一

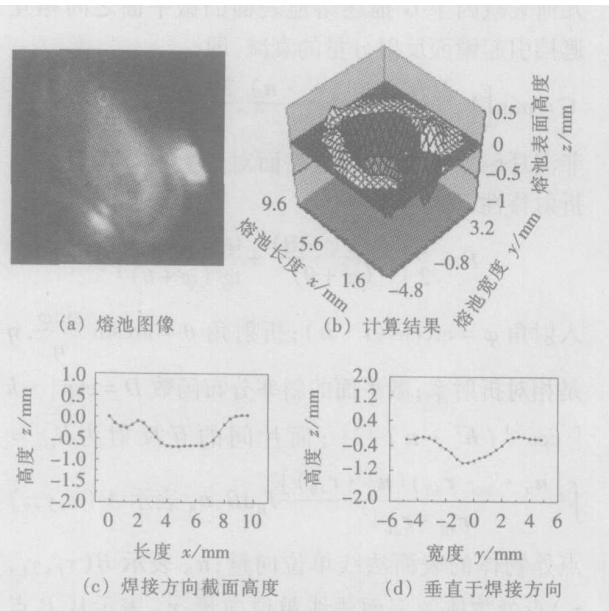


图 4 焊接熔池图像及计算结果

Fig 4 Welding pool image and calculated result

个平面, 高度值为 $z^{(0)} = 0$ 。熔池的表面高度以焊缝中心线对称。图 4b 是利用从明暗恢复形状算法计算的表面高度, 图 4c 是焊接方向的截面高度值, 图 4d 是垂直于焊接方向的截面高度值。从图中可以看出计算出来的表面高度值反映了焊接熔池的下塌特性。由于焊接熔池表面高度无法实时测量, 只能测量冷却的焊接熔池的横截面, 但是冷却的熔池由于熔化金属的回流而改变熔池的尺寸, 焊接后形成的凝固金属表面形状同计算结果相似, 验证了从明暗恢复形状方法的有效性。

4 结 论

在 Lee-Kuo 方法的基础上, 引入了光滑性约束条件和变化光滑因子以及收敛条件对该算法进行改进。分析了焊接熔池成像特点后得到了熔池表面的反射模型, 计算出了焊接熔池表面的三维形状, 计算出来的熔池表面高度反映了熔池的形状趋势。

参考文献:

[1] Horn B K P. Height and gradient from shading[J]. International Journal of Computer Vision, 1990, 5(1): 37-75.
[2] Horn B K P, Brooks M J. The variational approach to shape from shading[J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1986, 33: 174-208.
[3] Ruo Zhang, Ping Sing Tsai, James Edwin Cryer, et al. Shape from shading: a survey[J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(8): 690-706.
[4] Lee K M, Kuo C J. Shape from shading with a generalized reflectance map model[J]. Computer Vision and Image Processing, 1997, 67(2): 143-160.
[5] Zhang Y M, Beardsey M, Kovacevic R. Real time image processing for 3D measurement of weld pool surface[J]. Manufacturing Science and Engineering, 1994, 68(1): 255-262.
[6] Zhao D B, Yi J Q, Chen S B, et al. Surface shape reconstruction of weld pool during pulsed GTAW from its single image[A]. Robotic welding intelligence and automation[C]. Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2004.
[7] Terzopoulos D. The computer of visible surface representations[J]. IEEE Trans Pattern Anal Machine Intel, 1988, 10(4): 417-438.

作者简介: 李来平, 男, 1974 年 1 月出生, 博士研究生。研究方向为智能焊接机器人关键技术的研究, 发表论文 10 篇。

Email: lp117@sjtu.edu.cn

MAN TOPICS ABSTRACTS & KEY WORDS

Study on drawing force of flux cored wire LI Zhi-xin JIANG

Jian-mia HUANG Fu-ping TANG Chun-tian(Welding Institute Beijing University of Technology Beijing 100022 China). p1-4

Abstract By analyzing the drawing stress of flux cored wire(FCW), a new model for the calculation of the drawing force for FCW was formed. The factors that influence drawing force were also discussed. Mechanical properties of the steel strip, deformation of flux cored wire, the hole size of dies, drawing speed, friction and lubrication conditions had obvious effects on the drawing stress. The drawing stress increased with the speed rise at low speed. At moderate speed, the drawing stress decreased. The drawing stress did not change when the speed increase further.

Keywords flux cored wire, drawing force, math model

Research on shape from shading in welding pool topside height ac-

quisition LI Lai-ping LIN Tao CHEN Shan-ben(Welding Engineering Institute Shanghai Jiaotong University Shanghai 200030 China). p5-8

Abstract The general reflectance map equation proposed by Lee and Kuo was introduced and the resolution method was improved. The surface height was calculated from its synthetic image under real imaging characteristics and compared with Lee Kuo. Based on the imaging characteristics of welding process, reflectance model of welding pool was set up. The surface height of welding pool was calculated from its image.

Keywords shape from shading, general reflectance map equation, imaging characteristics of welding process, reflectance model of welding pool, surface height of welding pool

Effect of ball milling condition on formation of Sn-0.7Cu alloy

LIU Xian XIA Zhi-dong LEI Yong-ping SHI Yao-wu(The Key Laboratory of Advanced Functional Materials Ministry of Education China Beijing University of Technology Beijing 100022 China). p9-12

Abstract The mixed Sn and Cu powder was milled by mechanical ball milling. The milled powders were analyzed by X-ray diffraction, differential thermal analyzer and scanning electron microscope. The effect of ball milling conditions on the formation of Sn-0.7Cu alloy was investigated. The results showed that voltage, ball to powder mass ratio and milling time affect the formation of Sn-0.7Cu alloy significantly. The mechanism of mechanical alloying Sn-Cu was that the mechanically induced atom diffusion drives substitutional solid solution and interface dissolution, as a result of which Cu₆Sn₅ was formed.

Keywords mechanical alloying, Sn-0.7Cu alloy, ball milling condition, reactive mechanism

Prediction of tensile properties of welded joint with mechanical heterogeneity

ZHU Liang CHEN Jian-hong(State Key Lab of Gansu New Nonferrous Metal Materials Lanzhou University of Technology Lanzhou 730050 China). p13-16-26

Abstract An approach to evaluate the strength of welded joints with mechanical heterogeneity was proposed. The hardness measurement and tensile testing were performed on the specimens which were cut from the undematching joints of pipeline steel. According to the relation between hardness and strength for metals, methods were developed to determine the yield stress, true stress at maximum load and work hardening component from the hardness measurement. Thereby, the local material properties across welded joints could be obtained from the hardness distribution on them. Finite element model of welded joints was constructed to calculate their yield strengths and tensile strengths. In this model, weld and heat affected zone were divided into small partitions to be given the special material properties. Comparison between the results from finite element analysis and tensile test showed that with this model, the strength of welded joints with mechanical heterogeneity could be predicted with an accuracy of ± 40 MPa.

Key words strength of welded joint, mechanical heterogeneity, finite element analysis, hardness

Weld width prediction based on artificial neural network YU

Xiu-ping¹, SUN Hua², ZHAO Xi-ren¹, Alexandre Gavrilov³ (1. School of Automation Harbin Engineering University Harbin 150001 China; 2. Harbin University of Science and Technology Harbin 150080 China; 3. Bauman Moscow State Technical University Moscow 107005 Russia). p17-19-45

Abstract The method of weld width prediction based on artificial neural network (ANN) was studied, and the weld quality could be estimated by it. Problems and questions relating to the welding process monitoring system were considered, such as picking up the characteristics of arc welding, welding quality prediction and the application of ANN. The welding quality monitor system based on ANN was designed and its composing structure was given. The weld quality prediction model based artificial neural network is built up, and simulation is given. The results of simulation showed that the ANN model could predict the weld width, and the welding quality monitor system based on ANN was efficient.

Key word artificial neural network, weld quality prediction system, weld width prediction

The thermodynamic calculation and evaluation for Sn-Ag-Cu-Ce lead-free solder alloy system

XUE Song-bai¹, CHEN Yan², LÜ Xiao