

## 喷涂机器人油漆沉积率优化建模与仿真

夏薇, 杜铮, 于盛睿, 廖小平

(广西大学机械工程学院, 南宁 530004)

**[摘 要]** 油漆沉积率模型是自动编程工艺参数选取的重要依据, 为了建立符合实际工况的漆膜模型, 采用喷涂机器人喷涂时椭圆型雾锥的实验数据, 将贝叶斯归一化神经网络法和遗传算法分别用于漆膜模型的拟合。经过对比分析, 采用 2 种算法得出模型都具有较高的精度, 但遗传算法收敛速度更快, 并可得出油漆沉积率方程的具体表达式, 更适合油漆沉积率建模。

**[关键词]** 遗传算法; 贝叶斯归一化法; 油漆沉积率模型; 优化建模

**[中图分类号]** TG174.442; N945.12 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1001-3660(2010)03-0029-05

## Optimization Modeling and Simulation on Deposition Rate of Air Spray Painting

XIA Wei, DU Zheng, YU Sheng-rui, LIAO Xiao-ping

(College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**[Abstract]** Deposition rate model of air spray painting is important for determining technological parameters in automatic trajectory programming. Based on the experimental datas of elliptical paint pattern, and in order to build the film model of realistic operating conditions, the deposition rate model is fitted by using the Bayes normalization algorithm and genetic algorithm respectively. The result shows that all the two models have the high precision. However, compared with Bayes normalization algorithm, the genetic algorithm converges faster and can obtain a definite function expression of the paint deposition rate model. So genetic algorithm is better than Bayes normalization algorithm in modeling deposition rate.

**[Key words]** genetic algorithm; Bayes normalization algorithm; deposition rate model; optimization modeling

空气喷涂机器人在汽车、家电等领域的应用日益广泛, 机器人喷涂系统也随之迅速发展, 离线自动编程技术越来越成熟, 不仅可以提高喷涂产品的质量和使用效果, 而且避免了繁琐的人工示教过程, 减少漆料浪费和能源消耗<sup>[1]</sup>, 提高劳动生产率和生产稳定性。选取自动编程工艺参数最重要的依据之一是油漆沉积率模型, 在以往的研究中, 油漆沉积率模型都是在假设喷枪喷雾形状为圆锥的基础上建立的, 如高斯分布、柯西分布、 $\beta$  分布等<sup>[2-5]</sup>。而实际上, 枪口两侧的压缩空气会将漆雾圆锥压扁, 在垂直于喷枪轴线的平面上形成一个椭圆形漆膜区域。针对此问题, 张永贵等人<sup>[6]</sup>提出了双  $\beta$  椭圆分布模型, 但这些模型的建立大多采用实验建模方法, 不仅需要进行大量试喷来采集数据, 浪费许多时间、资源, 而且效率及准确率低。因此, 如何在椭圆形图幅的基础上快速建立与实际工况吻合的油

漆沉积率模型仍然是个值得探讨的问题。文中在试验的基础上, 采用了比圆锥雾型更接近实际喷涂的椭圆锥雾型, 并将贝叶斯归一化神经网络法和遗传算法应用到漆膜模型的拟合中, 得到了可以实际应用的平面油漆沉积率模型。

## 1 油漆沉积率模型

### 1.1 喷涂原理及模型构建

空气喷涂是利用压缩空气将涂料雾化成微小颗粒, 并使之沉积到工件表面形成连续漆膜的一种涂装工艺方法。在实际涂装作业中, 喷枪空气帽侧面空气孔喷出的压缩空气将从中心孔喷出的圆形雾锥挤压成椭圆形雾锥或橄榄形雾锥, 见图 1。

当喷枪相对于工件不动进行喷涂试验时, 先由技

**[收稿日期]** 2010-03-03; **[修回日期]** 2010-05-04

**[基金项目]** 国家自然科学基金(50765001); 广西教育厅科研基金(200708MS028); 广西科技厅科技创新能力基金(桂科能 0842006\_012\_Z)

**[作者简介]** 夏薇(1959—), 女, 副教授, 主要从事模具 CAD/CAM、智能控制的教学科研工作。

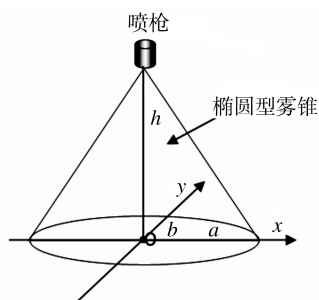


图1 椭圆型雾锥

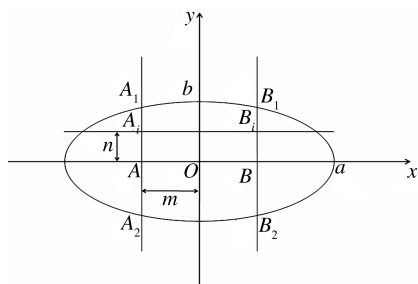
Fig.1 Elliptical painting cone

师根据油漆黏度、出漆量、枪口直径和空气压力等调好喷枪扇形角,并设置好其他各项参数,然后使喷枪轴线垂直于钢板进行喷漆。待漆膜干燥后,以图幅中心点为坐标原点,椭圆区域长轴方向为  $x$  轴,短轴方向为  $y$  轴,建立坐标系。在图幅上每隔 5 mm 进行采样,测量喷漆区域的几何尺寸和漆膜厚度,每点测量 3 次,取平均值作为测量结果。为建立漆膜厚度方程  $q(x, y)$ ,测量数据记作  $(x, y, q)$ 。同时,假设椭圆形喷漆区域最外层边界的曲线方程为:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad -a \leq x \leq a; -b \leq y \leq b \quad (1)$$

式中: $a$  和  $b$  分别为椭圆的长轴、短轴。假设在  $x$  向或  $y$  向断面上,漆膜厚度都服从  $\beta$  分布函数<sup>[5]</sup>,其分布指数分别为  $\beta_1$  和  $\beta_2$ ,且在平行的不同断面上  $\beta$  值是相同的。

在单个椭圆图幅的中心点建立坐标系,如图 2 所示。假设图幅内任意一点  $A_i(x, y)$  到  $y$  轴和  $x$  轴的距离

图2 椭圆图幅  $\beta$  分布油漆沉积率推导Fig.2 Deduction on  $\beta$  distribution paint deposition rate of elliptical pattern

离分别为  $m$  和  $n$ ,过  $A_i$  分别作  $x$  和  $y$  轴的平行线  $A_iB_i$  及  $A_1A_2$ ,其中, $A_1$  和  $A_2$  为直线  $A_1A_2$  与椭圆边界的交点, $A$  为  $A_1A_2$  与  $x$  轴的交点, $B_i$  为  $A_i$  关于  $y$  轴的对称点。再过  $B_i$  作  $A_1A_2$  的平行线,交椭圆边界于  $B_1$  及  $B_2$ ,交  $x$  轴于  $B$  点。

经推导可得椭圆双  $\beta$  分布油漆沉积率模型<sup>[6]</sup>:

$$q(x, y) = q_{\max} \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right)^{\beta_1 - 1} \left[1 - \frac{y^2}{b^2(1 - x^2/a^2)}\right]^{\beta_2 - 1} \quad (2)$$

同理:

$$q(x, y) = q_{\max} \left(1 - \frac{y^2}{b^2}\right)^{\beta_2 - 1} \left[1 - \frac{x^2}{a^2(1 - y^2/b^2)}\right]^{\beta_1 - 1} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} -a \leq x \leq a - b(1 - x^2/a^2)^{1/2} \leq y \leq b(1 - x^2/a^2)^{1/2}; \\ -b \leq y \leq b - a(1 - y^2/b^2)^{1/2} \leq x \leq a(1 - y^2/b^2)^{1/2}. \end{aligned}$$

若求得未知参量  $a, b, \beta_1, \beta_2$  和  $q_{\max}$  (由于测量存在误差,所以将最大漆膜厚度  $q_{\max}$  作为变量求解),该模型就可以确立下来。

## 1.2 喷涂实验

油漆自喷枪喷嘴出来,沿直线行进投射沉积在工件上后,工件上任意点的漆膜厚度等于本次行程与下次行程的单个油漆图幅沉积率模型与运枪速度的乘积对时间的积分之和。要想实现指定厚度质量指标,利用喷漆机器人进行离线编程作业,就必须首先探寻单个油漆图幅沉积在平面工件上的漆膜厚度分布规律。为了得到喷漆过程中工件表面上所形成的喷漆区域及该区域漆膜厚度的分布信息,需先进行喷涂实验。实验中选用川崎 K 系列喷涂机器人,设置参数时,根据经验固定比较复杂且难以控制的因素,同时忽略非重要因素,设置情况见表 1、表 2。

## 1.3 基于实测数据拟合的漆膜厚度分布图

根据 1.2 中设置的参数进行喷涂,利用测厚仪测量喷漆区域的漆膜厚度,见表 3。基于 MATLAB 环境,根据试验数据绘制出漆膜厚度分布曲面图和等高线分布图,见图 3。

表1 工艺参数设置

Tab.1 Processing parameters setting

工艺环境		油漆特性		压缩空气		实验板材	
环境温度	25 ℃	种类	白色醇酸树脂	枪帽内压	无	材料	镀锌钢板
环境湿度	50%	固体份	25%	流量	500 L/min	用途	车身覆盖件
烘干工艺	150 ℃ × 30 min	黏度	12 s	图幅形状	椭圆形	镀层厚度	15 μm

表2 喷枪参数及空气压力设置

Tab.2 Gun parameters and air pressure setting

喷枪口径	枪距	出漆量	雾型	雾化	开枪时间	关枪时间	回流时间
1.1 mm	200 mm	500 mL/min	0.26 MPa	0.24 MPa	2.0 s	3.0 s	5.0 s

表 3 图幅第一象限部分喷漆试验数据  
Tab.3 Spray painting experimental data for a paint pattern

y/mm	x/mm												$\mu\text{m}$
	-130	-125	-120	-115	-110	-105	-100	-95	-90	-85	-80	-75	
-25								1.4	1.5	1.5	1.8	2.0	
-20						1.0	1.0	2.1	2.2	2.3	2.9	4.1	
-15				0.3	1.0	1.4	2.3	3.7	4.2	6.2	8.2	10.1	
-10	0.1	0.2	0.6	1.5	2.1	3.5	5.4	7.2	9.5	12.3	16.3	18.3	
-5	0.1	0.2	1.2	2.1	3.6	5.1	8.2	10.8	14.2	18.2	20.3	27.6	
0	0.2	0.3	1.6	2.8	4.2	6.4	8.9	12.6	15.2	18.8	20.8	28.5	

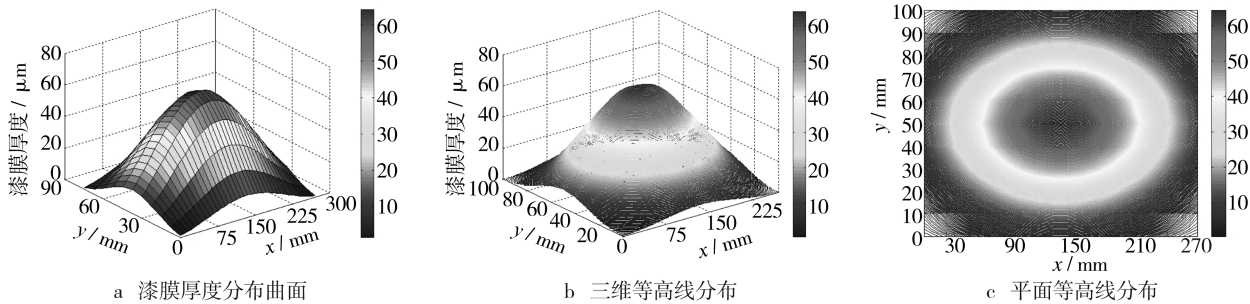


图 3 实测数据漆膜厚度分布  
Fig. 3 Film thickness distribution by real data

2 2 种建模方法

2.1 贝叶斯归一化 BP 神经网络法

传统的 BP 神经网络建立模型通常具有收敛速度慢;易陷入局部极小值;预测能力与训练能力矛盾;经常出现所谓“过拟合”现象,使得网络学习了过多的样本细节,而不能反映样本内含的规律等缺陷。因此,采用贝叶斯归一化训练算法,可以修正典型前馈网络的误差性能函数,即在均方差的基础上,增加包含网络权值和阈值的均方值一项,并以自动的方式决定最佳误差性能调整率,再由误差性能调整率来分配均方差与该项的比例,这种修正的误差性能函数可使网络获得较小的权值和阈值,并且防止网络被过度训练。建模过程如下:

1) 数据预处理。将单个椭圆形漆膜图幅试验数据整理成 600 行×3 列的矩阵数组,其中,第 1 和第 2 列为采样点的  $x, y$  坐标值,第 3 列是漆膜厚度,将其进行拟合可得喷漆区域的油漆沉积厚度模型。采用神经网络工具箱中的 Premnmx 函数对基础数据进行处理,归一化后的数据都处于  $[-1, 1]$  的区域范围内。拟合完成后,采用 Postmnmx 函数对数据进行反归一化处理。

2) 输入层、隐含层、输出层。输入层为二维的输入向量,所以定义输入层节点数为 2;隐含层的层数为 1,节点数为 15;输出层节点数为 1。

3) 传输函数的确定。隐层传输函数采用 tansig 函数,输出层采用 purelin 函数。

4) 训练函数相关参数的确定。网络的最大调整系数设定为  $10^{-5}$ ,网络训练精度设为  $10^{-4}$ ,最大训练次数为 4 000,最小梯度要求设为  $10^{-16}$ ,动量因子设为 0.95,网络性能函数定义为平方和误差性能函数 SSE。

贝叶斯归一化算法在经过 412 次迭代学习后,系统调整系数达最大值,这是一种典型的理想状况,表明算法已经收敛。经多次迭代后,平方和误差 (SSE) 达到 0.109 106,平方和权值 (SSW) 为 115.487,总均方误差为 0.047 6,且都基本无变化,也能够确定算法已经收敛。漆膜厚度曲面和等高线分布如图 4 所示,与图 3 相比,该漆膜厚度曲面非常光滑,等高线图形与实测数据绘制的基本吻合,在一些强数据噪声干扰点附近,模型具有较强的容错性和泛化能力,表明其具有很好的抗噪性能。

2.2 遗传算法

遗传算法是一种模拟生物群体进化的随机优化方法,具有很强的鲁棒性和通用的优化能力,原理上可较大概率找到优化问题的全局最优解,其基本计算包括 3 个过程:变异、竞争、选择。针对前述实验,设  $q_i$  是在点  $(x_i, y_i)$  的实测值 ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),则数据点的误差平方和为  $\sum_{i=1}^n [q_i - q(x_i, y_i)]^2$ ,根据最小二乘法,目标函数可以设置为:

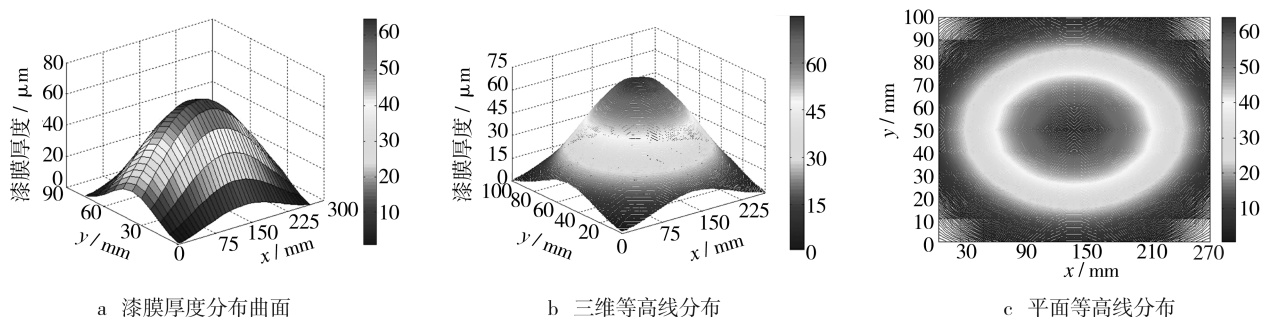


图4 神经网络拟合模型漆膜厚度分布

Fig. 4 Paint film thickness distribution model fitted by neural network

$$f = \min \sum_{i=1}^n [q_i - q(x_i, y_i)]^2 \quad (4)$$

则适应度函数可设为:

$$F(f(x)) = \frac{1}{1+c+f(x)} \quad c > 0, c+f(x) > 0 \quad (5)$$

文中采用实数编码。厚度模型中有 5 个待求变量,每个个体均为一个五维向量, $a, b$  和  $q_{\max}$  的变化区间参照试验测量数据确定,定义  $a$  的取值范围为  $[100, 300]$ ,  $b$  的取值范围为  $[20, 80]$ ,  $q_{\max}$  的取值范围为  $[20, 120]$ ;分布指数  $\beta_1$  和  $\beta_2$  的变化区间可参照文献[4]中图 2 提供的  $\beta$  分布曲线进行确定,  $\beta_1$  和  $\beta_2$  的变化区间为  $[2, 25]$ 。群体的规模为 200,子种群数目为 8,进化代数 400,代沟为 0.8,插入率为 0.9,交叉率为 0.8,变异率为 0.2,迁移率为 0.2,子种群迁移代数为 20,在所求得的每个参数范围内均随机产生 1 个由实数组成的初始种群。

根据上述算法,对实验所得数据进行拟合,对所求参数在全球寻优,将满足(5)式的个体保留下来。经过 400 代迭代后,遗传算法拟合模型的结果分析见图 5。从图 5 可以看出,其最优解与均值的变化在经过大约不到 150 代的迭代计算后就已收敛,在图中表现为呈水平直线分布,最后可以求得  $a=145.6532 \text{ mm}$ ,  $b=$

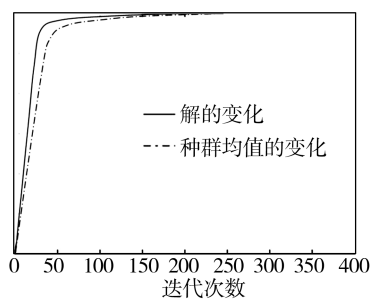


图5 模型结果分析

Fig. 5 Result analysis of the model

45.5423 mm,  $q_{\max}=69.0231 \mu\text{m}$ ,  $\beta_1=3.7567$ ,  $\beta_2=5.9346$ 。将以上参数代入式(2),从而可构建出油漆沉积率模型:

$$q(x, y) = 69.0231 \times \left(1 - \frac{x^2}{145.6532^2}\right)^{3.7567} \times \left[1 - \frac{y^2}{45.5423^2 \times (1 - x^2/145.6532^2)}\right]^{5.9346} \quad (6)$$

遗传算法拟合模型的漆膜厚度曲面和等高线分布见图 6,可以看出,该模型预测的漆膜厚度曲面非常光滑,等高线图形与图 3 中实测数据绘制的吻合,模型在强数据噪声干扰点附近具有较强的抗干扰能力和很好的精度。

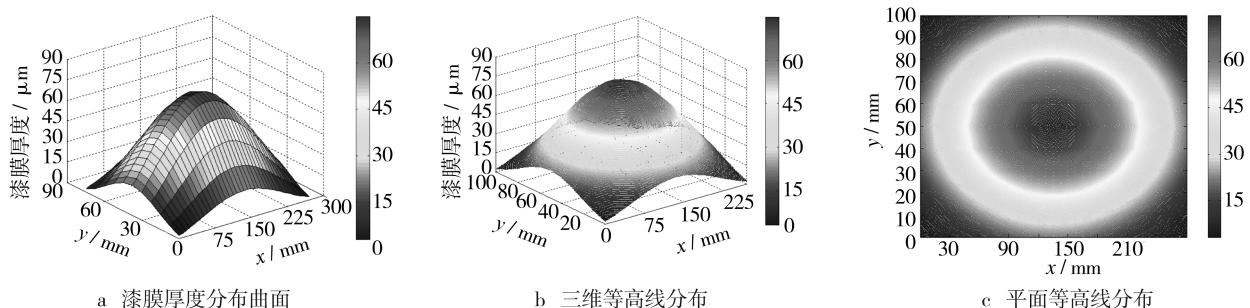


图6 遗传算法拟合模型漆膜厚度分布

Fig. 6 Paint film thickness distribution model fitted by the genetic algorithm



3 结果及分析

2 种算法拟合的模型的总均方误差和各断面均方误差非常接近,将数据绘制成断面漆膜厚度分布曲线,

并取断面  $x=40\text{ mm}$ ,  $x=-90\text{ mm}$ ,  $y=-15\text{ mm}$ ,  $y=10\text{ mm}$  进行比较,发现各断面预测值与实际测量值非常接近,而且 2 种算法的模型都具有较高的精度。见表 4。

从程序运行方面来看,贝叶斯神经网络迭代 412 次

表 4 试验结果及对比分析

Tab. 4 Experimental results and contrastive analysis

算法	迭代次数	总均方误差/ $\mu\text{m}$	断面均方误差/ $\mu\text{m}$			
			$x=40\text{ mm}$	$x=-90\text{ mm}$	$y=-15\text{ mm}$	$y=10\text{ mm}$
贝叶斯神经网络法	412	0.047 6	0.032 7	0.011 8	0.062 1	0.046 0
遗传算法	150	0.049 7	0.034 2	0.014 3	0.058 7	0.042 6

收敛,而且需要多次训练才能得到满意的效果;遗传算法在进化不到 150 代已经收敛,要优于神经网络模型。其次,贝叶斯神经网络对模型的训练样本规模有一定要求;而遗传算法在已知函数形式的情况下,所需要的测量数据可以相对少些。此外,神经网络不能提供函数的具体表达式,训练拟合的模型只是一个隐函数的形式,物理意义不明确,难以指导工程设计;遗传算法则在识别模型参数的时候,可以一并求得椭圆喷涂区域的几何参数,得到一个显函数,这对于进一步研究喷漆机器人的工艺轨迹规划非常有利,因此较为实用。

4 结论

1) 神经网络和遗传算法所拟合的模型与实际测量数据拟合的模型基本吻合,较好地完成了对实际工件沉积漆膜厚度的模拟,且具有较高的精度,证明了建模方法的正确性。

2) 相对于贝叶斯神经网络法,遗传算法迭代次数较少,建模速度较快,表现出更好的整体寻优能力,更适合油漆沉积率模型的建模。

3) 遗传算法可得到模型的具体方程表达式,为自

由曲面油漆沉积率模型的建立和工件喷涂提供了理论和算法实现依据,更方便应用于实际喷涂中工艺轨迹的优化和喷涂仿真系统的开发。

[参 考 文 献]

[1] 叶素萍. 汽车涂装实施清洁生产的途径[J]. 表面技术, 2003,32(2):9-11,18.

[2] Hyotyniemi H. Minor Moves-global Results: Robot Trajectory Planning[C]// IEEE Conference on Decision and Control. USA:Honolulu,1990:16-22.

[3] Antonio J K. Optimal Trajectory Planning Problems for Spray Coating[C]// International Conference on Robotics and Automation. 1993: 2 570-2 577. (余不详)

[4] Asakawa Naoki,Takeuchi Yoshimi. Teachingless Spray-painting of Sculptured Surface by an Industrial Robot[C]// Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1997. (余不详)

[5] Arikan,Sahir Balkan M A,Tuna. Process Modeling,Simulation, and Paint Thickness Measurement for Robotic Spray Painting[J]. Journal of Robotic Systems,2000,17 (9): 479-494.

[6] 张永贵,黄玉美,高峰,等. 喷漆机器人空气喷枪的新模型[J]. 机械工程学报,2006,42(11):226-233.

[10] Xu Rui-dong, Guo Zhong-cheng, Pan Jun-yi. Corrosion Resistance of Electrodeposited RE-Ni-W-P-SiC-PTFE Composite Coating in Phosphoric and Ferric Chloride[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2006, 16(3): 666-670.

[11] Gao Y, Zheng Z J, Zhu M, et al. Corrosion Resistance of Electrolessly Deposited Ni-P and Ni-W-P Alloys with Various Structures[J]. Mater Sci Eng A, 2004, A381(1, 2): 98-103.

[12] 姚怀,王喜然,裴清华,等. 溶液温度对铝合金化学镀 Ni-W-P 三元合金的影响[J]. 表面技术,2010,39(2):61-63.

[13] Zhang B W, Hu W Y, Zhang Q L, et al. Properties of Electroless Ni-W-P Amorphous Alloys [J]. Materials Characterization, 1996, 37: 119-122.

[14] 卢燕平. Ni-P 合金镀层在盐酸溶液中的耐腐蚀性[J]. 材料保护, 1991, 24(1):17-20.

(上接第 28 页)