

表面失效及防护

平面喷涂漆膜厚度分布规律研究与搭接参数优化

刘雪梅, 刘涛, 杨连生, 李爱平

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: **目的** 实现大型船舶外板表面喷涂的自动化作业, 开展表面漆膜厚度分布规律研究, 优化平面喷涂轨迹, 求出最佳喷涂搭接参数。**方法** 以喷嘴雾幅宽度、距离、喷枪移动速度三个喷涂工艺参数为因素进行正交实验, 获得漆膜厚度分布数据, 使用 β 分布函数进行实验数据表征, 运用遗传算法优化拟合 β 分布模型的三个关键参数。基于 BP 神经网络算法建立漆膜厚度分布预测模型, 并对预测结果进行合理性分析。在此基础上, 研究每道漆膜之间的搭接规律, 运用 NSGA-II 算法求解最优漆膜搭接宽度。**结果** 计算得到 15 组实验数据对应 β 分布模型的 T_{\max} 、 w 及 β , 构建的漆膜厚度分布预测模型能准确预测在不同喷涂工艺参数下的漆膜厚度分布。以第 16 组实验为例, 计算得到了最优的漆膜搭接宽度为 41.76 cm。**结论** 建立了喷涂工艺参数和膜厚分布规律之间的映射模型, 该模型可以准确预测不同工艺参数下的涂层厚度分布, 应用该模型计算出的最优漆膜搭接宽度能获得厚度均匀的涂层, 为实现船舶外板的自动化喷涂做好了前期准备。

关键词: 自动化喷涂; 漆膜厚度分布; 遗传算法; BP 神经网络算法; 喷涂搭接参数; NSGA-II 算法

中图分类号: TH161 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)09-0116-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.09.016

Spray Painting Film Thickness Distribution on Panel and Optimization of Width of Paint Film Overlay

LIU Xue-mei, LIU Tao, YANG Lian-sheng, LI Ai-ping

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

ABSTRACT: The work aims to study the thickness distribution of paint film so as to achieve automatic spray painting on huge ship outer panel, optimize surface spraying trajectory and find out the best lap width of paint film. The orthogonal experiment was designed with 3 factors, including width of spray nozzle, distance and speed of spray gun to obtain the thickness distribution data of paint film. β distribution function was used to characterize experimental data, and Genetic Algorithm (GA) was applied to optimize 3 key parameters of the β distribution model. The thickness distribution prediction model of paint film was established based on BP (Back Propagation) neural network, and the prediction results were analyzed reasonably. The overlap rules of each paint film were studied and NSGA-II algorithm was used to solve the best lap width of paint film. The corresponding T_{\max} , w and β of the β distribution model were obtained for the 15 groups of painting experimental data. The prediction model could accurately predict the thickness distribution of paint film under different spraying parameters. For example, in the 16th group of

收稿日期: 2018-06-02; 修订日期: 2018-07-30

Received: 2018-06-02; **Revised:** 2018-07-30

基金项目: 国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项-04 专项项目(2013ZX04012-071); 上海市科学技术委员会科研计划项目(14111104400)

Fund: Supported by the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2013ZX04012-071); Shanghai Science and Technology Commission Scientific Research Project (14111104400)

作者简介: 刘雪梅(1969—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为数字化设计与制造、制造系统与自动化等。

Biography: LIU Xue-mei (1969—), Female, Doctor, Professor, Ph. D. tutor, Research focus: digital design and manufacturing, manufacturing systems and automation.

painting experiment, the best lap width of paint film was 41.76 cm. The mapping model between the spraying process parameters and the paint film thickness distribution is obtained. The mapping model can accurately predict the coating thickness distribution under different process parameters. The best lap width of paint film calculated based on this model can obtain the coating with uniform thickness, thus making good preparations for the automatic spraying of ship outer panel.

KEY WORDS: automatic spray painting; thickness distribution of paint film; genetic algorithm; BP algorithm; spraying lap width; NSGA-II algorithm

大型船舶外板表面喷涂作业中,人工喷涂是传统的作业手段。近年来,随着自动化技术、信息技术的不断发展,自动化喷涂作业开始有取代人工喷涂作业的趋势,而喷涂作业中漆膜厚度分布规律与机器人轨迹规划的研究是开展自动化喷涂作业的基础。

由于涂层成型过程的复杂性,漆膜在船舶外板表面的成形规律很难建立起准确的数学模型。现有的喷枪涂料沉积模型都是对其进行近似处理,主要有无限范围模型和有限范围模型两大类^[1]。无限范围模型有高斯分布模型^[2]和柯西分布模型^[3]等。在实际研究中,应用更多的是有限范围模型,因为其更接近实际物理模型。如 ARİKAN 等^[4]假设喷枪在平面上形成圆形喷涂区域,建立了截面漆膜厚度分布为 β 分布的模型,并进行了漆膜厚度仿真分析、实验验证。SUH 等^[5]假设喷枪在平面上形成圆形喷涂区域,建立了截面漆膜厚度分布为椭圆形分布的漆膜生长模型。张永贵等^[6]则假设喷枪在平面上形成椭圆形喷涂区域,分别在椭圆长轴和短轴上建立截面漆膜厚度分布模型,得到椭圆双 β 分布模型。虽然这些数学模型总结了一些影响漆膜厚度分布的因素,但是这些影响因素与实际喷涂作业中需要确定的影响因素相比过于抽象,需要进行复杂的换算,不利于实验数据的分析。同时,一旦喷涂工艺参数改变,这些模型就会失准。为得到不同工艺参数组合下的漆膜厚度分布模型,王国磊等^[1,7]、杨连生等^[8]运用 BP 神经网络建立了变工艺参数下的漆膜厚度分布模型。

喷涂过程中由于喷雾图形中部漆膜厚、边缘薄,为保证漆膜厚度均匀,必须严格控制喷雾图形搭接宽度^[9]。搭接的好坏直接影响到漆膜厚度的均匀性,而均匀性是衡量漆膜质量好坏的一个重要参数。吴洪键等^[10]以三个喷涂喷雾图形叠加为周期,计算出最佳搭接间距。汤养等^[11]采用极大极小法求解带约束条件的多目标优化问题,其中漆膜厚度均匀性为其中的一个优化目标。龚俊等^[12]则采用黄金分割法优化漆膜叠加宽度。孟慧杰等^[13]采用非劣排序遗传算法对漆膜厚度和喷涂效率两个目标进行了多目标优化。

文中为解决不同工艺参数下的船舶外板机器人喷涂路径规划问题,采用多种智能算法,寻找实验数据和理论模型之间的映射关系。以 β 分布函数作为漆膜厚度分布规律模型,通过遗传算法对 β 分布函数中的关键参数进行优化,将优化得到的 β 分布函数中的

关键参数作为 BP 神经网络训练的输出,喷涂工艺参数作为输入,运用神经网络完成对漆膜厚度分布的预测。在此基础上,采用 NSGA-II 算法确定最优的搭接宽度,为实际大型船舶外板表面喷涂提供理论指导。

1 喷涂工艺参数实验

船舶外板喷涂采用的是高压无气喷涂,影响喷漆膜厚的因素包括压力、距离、喷枪移动速率、喷嘴孔径、喷嘴雾幅、待喷油漆固体份(涂布率)、枪嘴与待喷表面角度等。此外,喷漆过程中还涉及流体雾化、油漆液滴沉积成膜时溶剂挥发等因素,作用机理复杂。考虑到喷涂装置、涂料特性等在同一喷涂机器人或者同一批喷涂作业来说是不变的,所以重点选择喷枪喷嘴和被喷涂表面的距离(h)、喷嘴雾幅宽度($w1$)、喷枪移动速度(v)三个喷涂工艺参数展开实验研究。

1.1 实验设计

为了获得足够的实验分析数据,采用正交实验设计法设计实验。 h 、 $w1$ 、 v 的实验参数取值见表 1。

表 1 正交实验因素水平
Tab.1 Orthogonal experiment factor level

Factors	$w1/cm$	h/cm	$v/(mm \cdot s^{-1})$
Level 1	20	20	600
Level 2	25	25	700
Level 3	30	30	800
Level 4	35	35	900
Level 5	40	40	1000

选择 $L_{25}(5^6)$ 正交实验方案进行实验,只需要 25 次实验,相比传统实验方法,大大减少了工作量^[14]。具体实验方案见表 2,其中实验号表示实验的次数。

1.2 实验材料、仪器

实验材料包括:枪嘴、油漆、样板等。需要的仪器包括喷漆设备、喷漆泵、搅拌器、钢尺、膜厚仪、空压机、秒表、相机等。同时,实验场地需要具备溶剂、漆雾等的收集、处理能力。主要实验仪器及设备有:罗隆工业机器人实验平台、Elcometer LDO1576 拓片式粗糙度仪、Elcometer456 干膜厚度检测仪、QPT6528K 喷漆泵等。

表 2 正交试验参数
Tab.2 Orthogonal experiment parameters

Experiment number	Factors		
	w1/cm	h/cm	v/(mm·s ⁻¹)
1	25	30	800
2	25	35	700
3	25	25	900
4	25	40	600
5	25	20	1000
6	30	30	900
7	30	35	800
8	30	25	1000
9	30	40	700
10	30	20	600
11	20	30	700
12	20	35	600
13	20	25	800
14	20	40	1000
15	20	20	900
16	35	30	700
17	35	35	600
18	35	25	1000
19	35	40	900
20	35	20	800
21	40	30	800
22	40	35	700
23	40	25	600
24	40	40	1000
25	40	20	900

实验选用的油漆是 HEMPADUR QUATTRO 17634 (以下简称 17634)。17634 油漆是一种可应用于包括船舶压载水舱在内的各种恶劣环境下的通用、厚浆型环氧油漆,其主要性能见表 3。这种油漆由

表 3 17634 油漆主要性能指标
Tab.3 Performance index of the paint 17634

Number	Performance	Performance parameter
1	color	red
2	finished surface	semi flat light
3	Solid content	72% ± 1%
4	theoretical spray rate	5.8 m ² /L(125 μm)
5	detonating temperature	27 °C
6	density	1.4 kg/L
7	the time of surface drying	4 hours below 20 °C
8	the time of solid drying	7 days below 20 °C
9	VOC	275 g/L

于固体份含量较高,干透后形成的漆膜较厚,便于在实验中测量其漆膜厚度,所以在实验中采用此种油漆。

1.3 实验步骤

设备安装调试完毕后,记录下环境参数,包括相对湿度和相对温度。根据正交实验表中的喷涂工艺参数进行喷涂实验,标注实验编号并将漆膜晾干。待漆膜完全干透后,用膜厚测量仪测量膜厚。喷涂后得到的漆膜厚度如图 1 所示。测量时以漆膜中心为原点,在平行于 x 轴的位置均匀地取截面,本次实验取 13 个截面,每个截面的间距为 5 cm。在每个截面上间隔 2.5 cm 取点,测量每个点的漆膜厚度并记录,将平行于 y 轴所有点的漆膜厚度值的均值作为一次实验的漆膜厚度数据。

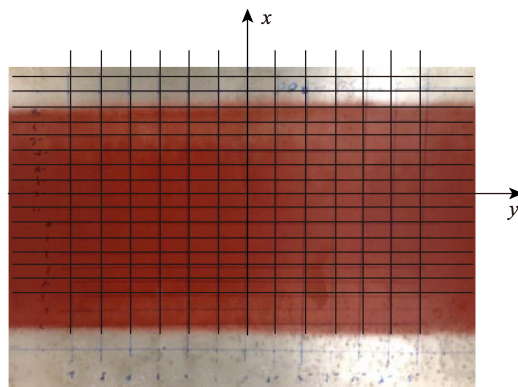


图 1 测量点分布
Fig.1 Measuring point distribution

2 基于 GA 的漆膜厚度 β 分布模型

在获得一系列有关漆膜厚度的离散数据点后,对这些数据进行处理,寻找离散点之间的内在联系,确定漆膜厚度分布规律。

其数据的典型分布如图 2 所示,大致呈中间厚、两边薄分布。根据大量文献分析可知,漆膜厚度的这

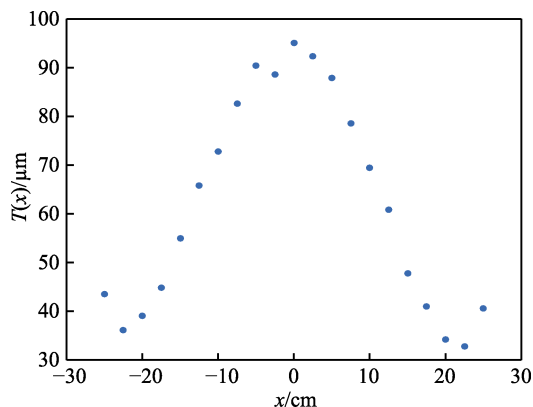


图 2 漆膜厚度测量值分布
Fig.2 Film thickness measurement value distribution

种分布形式可以用 β 分布函数很好地表征。在不同的喷涂工艺参数下，漆膜的分布情况不同，所对应的 β 分布函数也会有差异。为解决这一问题，文中采用遗传算法（GA）来确定多个不同的 β 分布模型。

2.1 β 分布模型的建立

β 分布模型是一个二维曲线模型，可以抽象为 β 分布函数。在喷涂过程中，如果喷枪一直匀速运动，那么每个截面处的漆膜分布可以认为是不变的，所以假设每一截面处的漆膜分布函数均为^[4]：

$$T(x) = T_{\max} \left(1 - \frac{4x^2}{w^2} \right)^{\beta-1} \tag{1}$$

式中： x 为图2所示位置坐标； T_{\max} 为最大漆膜厚度； w 为雾幅宽度，即 x 轴方向的最大值； β 为 β 分布函数中的一个待定参数； $T(x)$ 为对应 x 轴坐标下的漆膜厚度值。其漆膜厚度分布如图3所示。

对于特定截面来说， T_{\max} 和 w 可以根据漆膜厚度的几何性质直接确定，然后采用最小二乘法拟合曲线确定 β 取值。传统的最小二乘法拟合由于采用了对数变换，拟合精度低，对漆膜厚度分布问题并不适用。

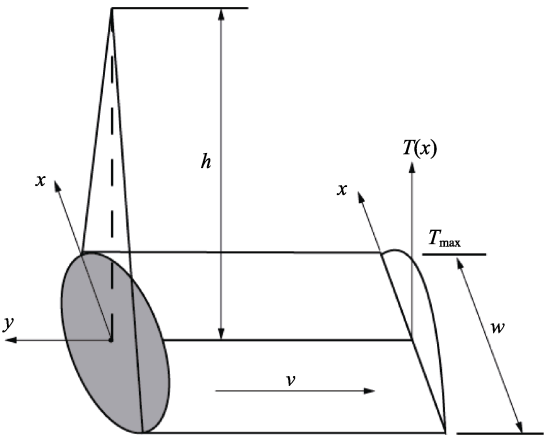


图3 漆膜厚度分布
Fig.3 Thickness distribution of paint film

文中采用GA对这一问题进行求解。GA是一种优化求解方法，在使用时需确定优化适应度函数、约束条件及边界条件。喷枪喷出的油漆在空间形成一定的锥状物，其漆膜厚度分布模型用 β 分布表示为：

$$T(x) = q_0 \left(1 - \frac{4x^2}{w^2} \right)^{\beta-1} \tag{2}$$

式中： q_0 为最大漆膜累积速率，与 w 及喷涂流率 Q_0 有关。

$$q_0 = \frac{8Q_0}{\pi w^2} \tag{3}$$

综合式(1)、(2)、(3)可知， T_{\max} 和 w^2 成正比关系，也即为约束条件。边界条件则根据 T_{\max} 和 w 的测量

值确定大致取值范围。适应度函数则可以参照最小二乘法取：

$$f_1 = \min \sum_{i=1}^n [T_i - T(x_i)]^2 \tag{4}$$

式中： n 为实验的总次数； T_i 为 x_i 对应点处的实验测量数据； $T(x_i)$ 为根据式(1)计算所得数据。

根据以上条件，建立的优化数学模型如式(5)所示。

$$f_1 = \min \sum_{i=1}^n [T_i - T(x_i)]^2 \tag{5}$$

$$\text{其中, } T(x) = T_{\max} \left(1 - \frac{4x^2}{w^2} \right)^{\beta-1} \quad (60 < T_{\max} < 200, \\ 0 \leq w \leq 120, 1 < \beta < 10)。$$

2.2 漆膜分布模型计算

运用Matlab遗传算法工具箱对优化模型进行求解。设置种群数量为800，进化代数为200，交叉概率和变异概率分别为0.8和0.2。将前15组实验的实验数据进行计算，得到对应 β 分布模型的 T_{\max} 、 w 及 β ，其值见表4。

表4 β 分布模型关键参数表
Tab.4 Key parameters of β distribution model

Experiment number	Maximum film thickness $T_{\max}/\mu\text{m}$	Width of paint film w/cm	β
1	81.03	86.00	6.50
2	75.59	89.09	6.93
3	118.29	71.22	8.00
4	89.31	81.95	4.33
5	164.21	60.41	7.19
6	72.55	90.94	4.12
7	81.64	85.72	3.30
8	82.29	85.39	8.00
9	73.25	90.50	3.58
10	160.98	61.01	4.63
11	81.66	85.72	3.63
12	79.65	86.79	3.05
13	86.42	83.31	4.64
14	54.87	104.57	3.28
15	99.53	77.61	6.49

随机取4组实验，将求得的 β 分布模型关键参数代入式(1)，画出 β 分布模型，与实验得到的数据点进行比较，结果如图4所示。可以看出，通过遗传算法优化得到的 β 分布模型对原始数据点拟合得相当好，能非常直观地反映出漆膜厚度的分布规律。

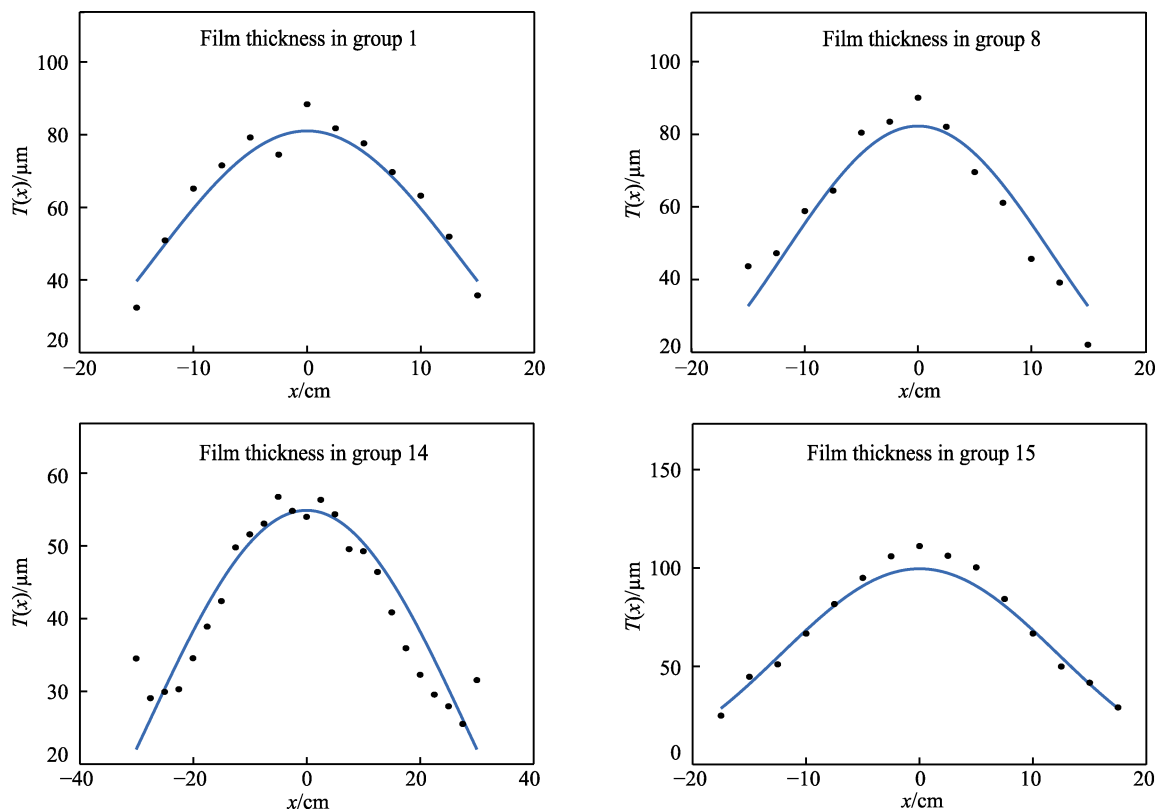


图4 遗传算法漆膜厚度拟合图
Fig.4 Fitting diagram of paint film thickness by GA

3 基于BP网络对漆膜分布规律的推广

第2节中基于遗传算法对已有的实验数据进行了分析,计算出了漆膜厚度分布的 β 分布模型。这种方法只能对已有的实验数据进行分析计算,即在特定喷涂工艺参数下获得的实验数据对应特定的漆膜分布规律,而对于没有实验数据的喷涂工艺参数组合,这种方法无能为力。为解决这一问题,文中采用BP神经网络算法来进行求解。

BP神经网络作为一种基于误差逆传播算法的多层前馈神经网络,无需建立精确数学方程就可以学习和反映大量的输入-输出之间的任意非线性映射关系。因此采用BP神经网络来预测在不同喷涂工艺参数组合下漆膜厚度的分布情况。

在已有的实验组合下,将遗传算法优化得到的 β 分布模型中的关键参数 T_{\max} 、 w 、 β 作为BP神经网络训练的输入,实验中的喷涂工艺参数 w_1 、 h 、 v 作为BP神经网络训练的输入,将训练后的BP神经网络用于在其他喷涂工艺参数组合下对 β 分布函数中关键参数的预测,即对漆膜厚度分布的预测,从而实现从实验中获得漆膜厚度分布规律到对漆膜厚度分布模型的推广泛化。

3.1 BP神经网络建立

采用的BP神经网络模型为单隐层结构,因为当

隐层神经元足够多时,就可以拟合任意精度的非线性函数。BP神经网络的建模过程如下:

1) 数据预处理。将喷涂工艺参数 w_1 、 h 、 v 按三因素五水平表确定的实验顺序排列成一个 3×15 的矩阵,作为BP神经网络的输入。将遗传算法确定的 β 分布模型中的关键参数 T_{\max} 、 w 、 β 排列成一个 3×15 的矩阵,作为BP神经网络的输出。

2) 各层神经元数目。由于BP神经网络的输入参数有3个,输出参数也有3个,所以设定网络输入层和输出层神经元数目均为3。同时将隐层神经元数目设定为20。

3) 传递函数及训练函数。隐层传递函数采用tansig,输出层函数采用purelin,训练函数采用trainlm。

在训练过程中发现这样设置神经网络会出现过训练的情况,虽然对样本集的拟合程度相当好,但是对于验证集和测试集的拟合程度会出现较大的偏差。为了提高网络的推广能力,采用修改性能函数和修改迭代收敛速率两种方法对BP神经网络进行修正。

第一种方法为修改性能函数。常用的神经网络性能函数为均方误差函数mse,若将此函数修改为msereg,其表达式如式(6)所示。这样可以保证网络训练误差尽可能小的情况下网络具有较小的权值,相当于减小了网络的规模,提高了网络的推广能力。

$$\text{msereg} = \gamma \cdot \text{mse} + (1 - \gamma) \text{msw} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \text{mse} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - \alpha_i)^2 \\ \text{msw} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \omega_j^2 \end{cases}$$

式中: γ 为比例系数, 一般取 0.5; t_i 为第 i 个样本的实际值; α_i 为第 i 个样本的计算值; ω_j 为网络的第 j 个权值。

第二种方法为修改迭代收敛速率。具体做法是修改 LM (Levenberg-Marquardt) 算法中的适应值 μ 。 μ 确定了学习过程是根据牛顿法还是梯度法来完成, LM 算法中的部分规则表述为:

$$\begin{aligned} \mathbf{jj} &= \mathbf{jX} * \mathbf{jX} \\ \mathbf{je} &= \mathbf{jX} * \mathbf{E} \\ d\mathbf{X} &= -(\mathbf{jj} + \mathbf{I} * \mu) \setminus \mathbf{je} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: \mathbf{jX} 是关于权值向量 \mathbf{X} 的雅克比矩阵; \mathbf{E} 和 \mathbf{I} 分别是误差矩阵和单位矩阵。随着 μ 的增大, 方程中的 \mathbf{jj} 项可以忽略, 使得学习过程主要依靠梯度下降, 即 $\mu \setminus \mathbf{je}$ 项。只要迭代使误差增加, μ 就会增加, 直到误差不再增加为止。因此设置 LM 算法中适应值 μ 的初始值为 1, 下降速度 μ_dec 和上升速

度 μ_inc 分别设置为 0.8 和 1.5。

3.2 BP 神经网络训练结果

开始训练后, BP 神经网络经 5 次学习迭代后收敛到最小值 34.7123, 如图 5 所示。

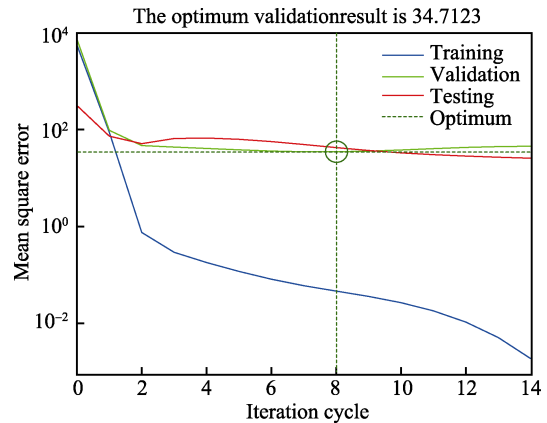


图 5 BP 神经网络学习过程

Fig.5 Learning process of BP neural network

对其进行回归分析, 结果如图 6 所示。从图中可以看到, 最终的相关度可以达到 0.979 74, 说明该网络性能相当好, 对于测试集来说也有较好的推广能力。

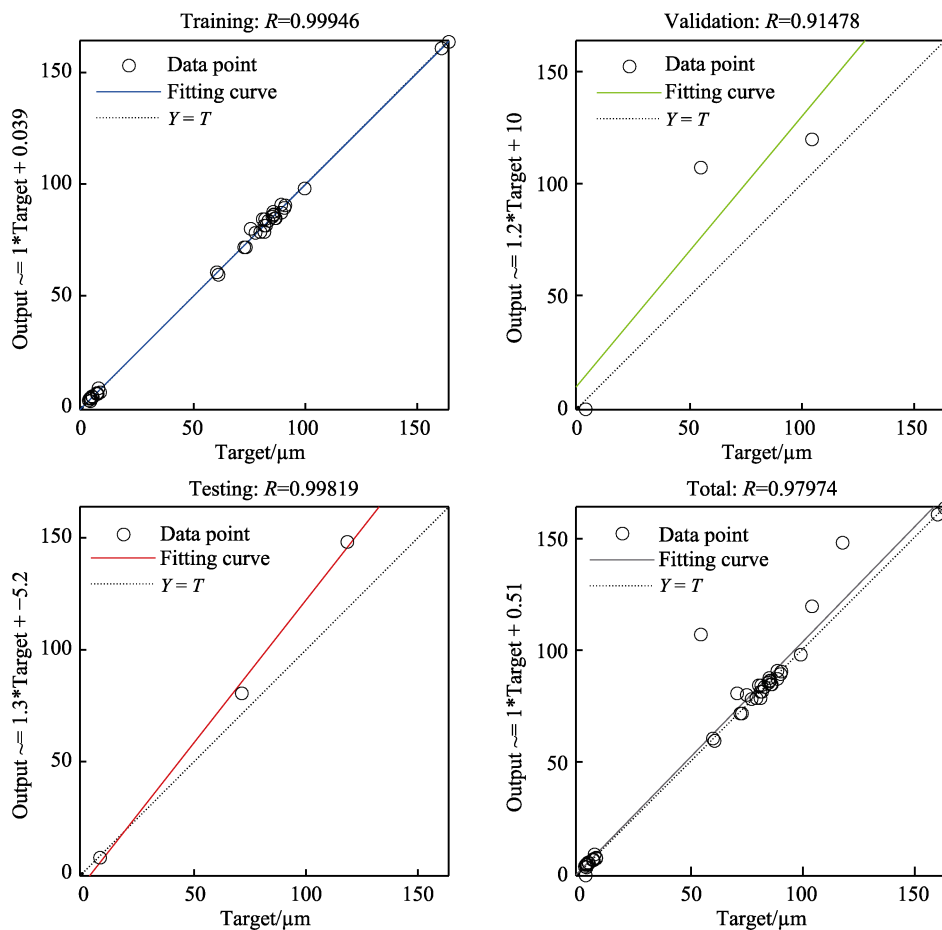


图 6 BP 神经网络回归分析

Fig.6 Regression analysis of BP neural network

对文中所要研究的问题来说,最根本的是需要对 BP 神经网络预测结果的合理性进行分析,而不是简单地从最佳验证性能和相关度两个维度来判断网络的好坏。保持喷嘴雾幅宽度 w_1 和喷枪速度 v 不变,改变喷嘴到喷涂表面距离 h ,来对 BP 神经网络预测漆膜厚度分布的结果进行验证。

从喷涂实验发现,如果保持喷嘴型号和喷枪速度不变,当喷嘴到喷涂表面的距离 h 从 20 cm 增加到 40 cm 时,漆膜厚度最大值 T_{\max} 和距离 h 成反比,而雾幅宽度 w 则和距离 h 成正比。因此在 BP 神经网络预测出多组 T_{\max} 、 w 、 β 后,需要判断漆膜厚度最大值 T_{\max} 是否有减小趋势,雾幅宽度 w 是否有增大趋势,即:

$$\begin{aligned} T_{\max}(i) &< T_{\max}(i-1), \quad i=1,2,\dots,n \\ w(i) &> w(i-1), \quad i=1,2,\dots,n \end{aligned} \quad (8)$$

其中 i 表示距离从 20 cm 增加到 40 cm 时取的离散点序号。若将这两个参数的变化趋势进行线性拟合,可以表示为 $k_T < 0$, $k_w > 0$, 其中 k_T 表示 T_{\max} 线性拟合后的斜率, k_w 表示 w 线性拟合后的斜率。

实验数据经程序处理后得到的线性趋势如图 7 所示。可以看出,漆膜厚度最大值 T_{\max} 呈下降趋势,雾幅宽度 w 呈上升趋势,与预期结果一致,说明该网络的预测效果较好。

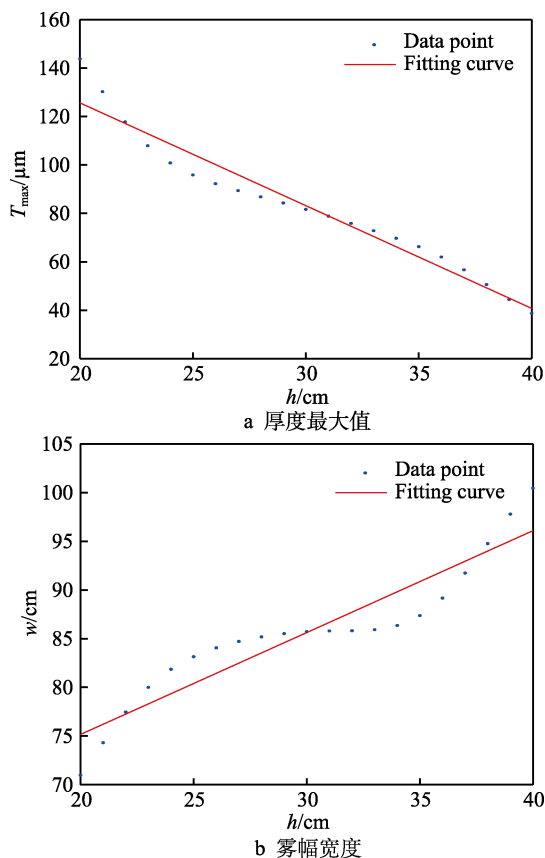


图 7 漆膜厚度最大值和雾幅宽度变化趋势
Fig.7 Trends of maximum film thickness (T_{\max}) and mist width (w)

获得每一组喷涂工艺参数下 β 分布模型中的 T_{\max} 、 w 、 β 后,代入 β 分布模型计算漆膜厚度分布,得到漆膜厚度分布与喷涂距离之间的三维漆膜厚度分布如图 8 所示。

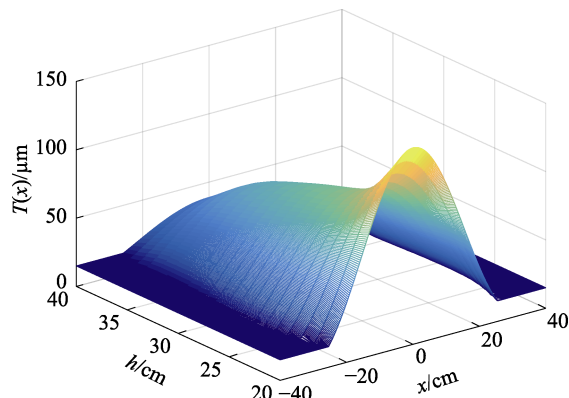


图 8 三维漆膜厚度分布
Fig.8 3D film thickness distribution

4 漆膜搭接宽度优化

大平面喷涂时喷枪的移动轨迹如图 9 所示。由于在不同的喷漆工艺参数下,漆膜厚度的分布情况不同,因此漆膜的搭接宽度 d 需要根据漆膜厚度的分布进行优化计算,以保证漆膜厚度均匀、喷涂时间最短。以漆膜厚度最均匀、喷涂时间最短即喷涂效率最高为优化目标,喷涂搭接宽度 d 为优化变量,喷涂搭接模型上每个点的漆膜厚度和期望膜厚 T_d 之差小于最大允许偏差 ε 为约束条件,建立漆膜的搭接宽度 d 最优化问题数学模型进行求解。

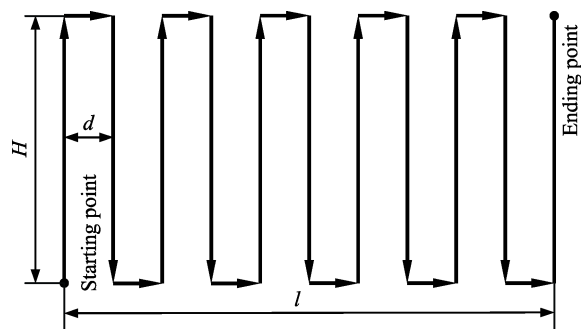


图 9 喷枪轨迹
Fig.9 Gun trajectory

4.1 喷涂搭接宽度的优化模型

合理的漆膜叠加宽度取值可以保证大平面上漆膜厚度的均匀性和较高的喷涂效率。要确定漆膜叠加宽度,首先需要知道漆膜叠加时的漆膜厚度分布情况。以两个有偏移的喷枪行程为例,其搭接区域的漆膜厚度分布规律如图 10 所示。

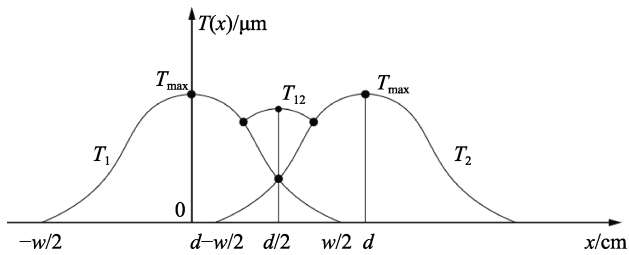


图 10 漆膜重叠区域涂层厚度分布
Fig.10 Film thickness distribution in the overlapping area

任意点处的漆膜厚度为：

$$T_{12} = T(x) + T(x - d) =$$
$$T_{\max} \left(1 - \frac{4x^2}{w^2} \right)^{\beta-1} + T_{\max} \left[1 - \frac{4(x-d)^2}{w^2} \right]^{\beta-1} \quad (9)$$

式中： $T(x)$ 为对应 x 轴坐标下的漆膜厚度值，参见式（1）； d 是两个喷漆行程的间距； w 是单枪下漆膜的宽度； T_{\max} 是单枪漆膜厚度最大值。

由搭接区域漆膜厚度分布可知，漆膜厚度由 3 个点控制。要使漆膜厚度最均匀，必须保证漆膜在 $x = d/2$ 处的累积厚度和 $x = 0$ 或 $x = d$ 处的厚度偏差 L_1 （见式(10)）最小。

$$L_1 = \left| T(0) - 2 \cdot T\left(\frac{d}{2}\right) \right| \quad (10)$$

喷涂效率最高，即完成同一平面喷涂的时间最短。如图 10 所示，喷枪在竖直方向上的移动速度恒定为 v ，平面的宽为 l ，高度为 H ，漆膜搭接宽度为 d ，忽略横向移动时耗费的时间，则完成一块平面的喷涂所需的时间为：

$$L_2 = \frac{l \cdot H}{d \cdot v} \quad (11)$$

为保证膜厚的均匀性，漆膜叠加模型上每个点的漆膜厚度和膜厚期望 T_d 之差必须小于最大允许偏差^[9]，即 $|T(x) - T_d| \leq \varepsilon$ 。因此，喷涂搭接宽度 d 的选择问题可用多目标优化表示为：

$$\min L = (L_1, L_2)$$
$$L_1 = |T_{\max} - 2 \cdot T(d/2)|$$
$$L_2 = \frac{l \cdot H}{d \cdot v} \quad (12)$$

$s.t. |T(x) - T_d| \leq \varepsilon$

4.2 求解计算

从 4.1 节建立的数学模型可以看出，该优化问题中有两个优化目标，而且这两个目标并不是完全独立的，一个目标的改善会引起另一个目标性能的降低。因此，需要找到一种可以协调两者并使每个子目标尽可能达到最优的方法。

1985 年 Schaffer 将遗传算法引入了多目标优化求解领域^[15]，之后多位专家学者对该方法进行了改进。其中基于快速分类的非支配遗传算法（NSGA-

II），由于采用了精英策略、密度值估计策略和快速非支配排序策略，降低了计算复杂度，是求解多目标优化问题的一种比较优秀的算法。因此本文采用 NSGA-II 算法对该多目标问题进行求解。

为了说明大平面漆膜厚度的分布规律，首先设定大平面上的目标漆膜厚度为 80~90 μm。然后在正交实验中筛选出符合要求的实验组，其中第 1、4、7、8、16、18 组的最大漆膜厚度满足要求。

以第 16 组实验为例，说明整个计算过程。第 16 组实验的喷涂工艺参数为 $w_1=35$ cm， $h=30$ cm， $v=700$ mm/s，根据遗传算法得到的 β 分布函数中的关键参数为 $T_{\max}=81.66$ μm， $w=85.7176$ cm， $\beta=3.6343$ 。设定平面的大小为长度 $l=1000$ mm，高度 $H=10000$ mm。

运用 NSGA-II 算法，按照式（12）添加适应度函数、约束条件和边界条件，并调整 NSGA-II 算法的参数。设置种群数量为 80，Pareto 边界种群比例为 0.35，最大迭代步数为 100。运行 NSGA-II 算法后，得到 28 组非劣解，结果见表 5。

表 5 优化得到的非劣解表
Tab.5 Non inferiority solution obtained by optimization

Number	Objective 1 ($L_1/\mu\text{m}$)	Objective 2 (L_2/s)	Optimal variable (d/cm)
1	1.66	342.11	41.76
2	80.92	178.57	80.00
3	73.26	202.73	70.47
4	50.02	244.74	58.37
5	60.83	226.30	63.13
6	9.92	321.79	44.39
7	44.62	253.96	56.25
8	33.78	273.12	52.31
9	76.14	195.92	72.92
10	18.63	302.62	47.21
11	70.56	208.39	68.55
12	1.66	342.11	41.76
13	52.52	240.50	59.40
14	12.36	316.23	45.18
15	64.74	219.38	65.12
16	30.68	278.83	51.23
17	36.38	268.41	53.22
18	26.97	285.87	49.97
19	49.15	246.23	58.02
20	24.06	291.56	49.00
21	69.04	211.38	67.58
22	54.12	237.80	60.08
23	40.70	260.77	54.78
24	21.93	295.83	48.29
25	67.98	213.40	66.94
26	55.88	234.81	60.84
27	78.24	189.97	75.20
28	16.08	308.01	46.38

从表5中可以看到,优化目标1的最小值为1.66,其对应的优化变量 d 取值为41.76。说明此时漆膜厚度是最均匀的,漆膜最厚和最薄处只相差1.66 μm 。此时,喷涂的效率相较于其他组非劣解相对较低,因为其漆膜叠加厚度相对更小,需要的迂回次数更多。比较漆膜厚度最均匀和喷涂效率最高这两个优化目标,前一个目标是为保证喷涂质量,是喷涂过程中最需关注的因素。因此,这一优化目标的优先级更高,最终确定漆膜叠加宽度为41.76 cm。

综上所述,以雾幅宽度 $w_1=35\text{ cm}$,距离 $h=30\text{ cm}$,喷枪速度 $v=700\text{ mm/s}$,漆膜叠加宽度 $d=41.76\text{ cm}$ 进行喷涂作业时,喷涂质量最好。

运用Matlab进行仿真,仿真结果如图11所示。可以看出,其工作表面的漆膜厚度比较均匀,漆膜厚度偏差在允许的范围内,说明计算结果可信。实验结果显示,测量点漆膜厚度最大值为83.28 μm ,漆膜厚度最小值为80.89 μm ,验证了喷涂搭接宽度优化的有效性。

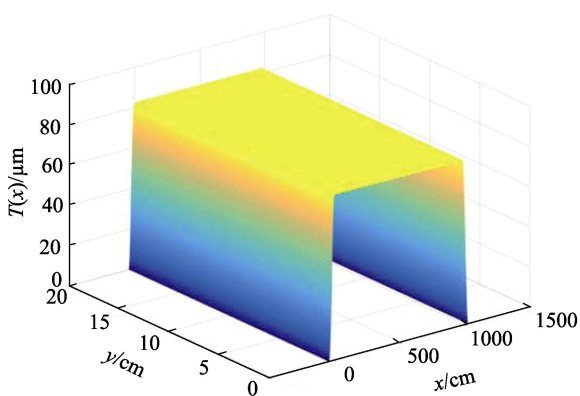


图11 叠加后的漆膜厚度分布

Fig.11 Film thickness distribution after superposition

5 结语

为实现大型船舶外板表面喷涂的自动化作业,文中对船舶外板表面漆膜分布规律进行了研究。通过设计正交实验得到了不同喷涂工艺参数下的漆膜分布数据,并采用遗传算法改进已有的漆膜厚度 β 分布模型。然后建立基于BP神经网络算法的漆膜厚度分布模型,预测了在不同喷涂工艺参数下的漆膜厚度分布情况。最后采用NSGA-II算法平衡了喷涂效率和喷涂质量两者之间的矛盾,得到最优的漆膜搭接宽度。

通过这一系列的研究,简化了喷涂工艺参数和漆膜分布规律之间的映射关系,避免不必要的喷涂模型重建,有效减少喷涂实验次数。找到了最优的漆膜搭接宽度,为实现船舶外板的自动化喷涂做好了前期准备。

参考文献

- [1] 陈雁, 邵君奕, 张传清, 等. 喷涂机器人自动轨迹规划研究进展与展望[J]. 机械设计与制造, 2010(2): 149-151.
CHEN Yan, SHAO Jun-yi, ZHANG Chuan-qing, et al. Developments and prospects of research on automatic trajectory planning for painting robot[J]. Machinery design & manufacture, 2010(2): 149-151.
- [2] ANTONIO K J, RAMABHADRAN R, LING L T. A Framework for trajectory planning for automated spray coating[J]. International journal of robotics and automation, 1997, 12(4): 124-134.
- [3] FREUND E, ROKOSSA D, ROSSMANN J. Process-oriented approach to an efficient off-line programming of industrial robots[C]// Proceedings of the 24th annual conference of the IEEE industrial electronics society. New York, USA: IEEE, 1998.
- [4] ARİKAN M A S, BALKAN T. Process modeling, simulation, and paint thickness measurement for robotic spray painting[J]. Journal of robotic systems, 2000, 17(9): 479-494.
- [5] SUH S H, WOO I K, NOH S K. Development of an automatic trajectory planning system (ATPS) for spray painting robots[C]// Proceedings of the 1991 IEEE international conference on robotics and automation. Sacramento, CA: IEEE, 1991.
- [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, 2007, 42(11): 226-233.
ZHANG Yong-gui, HUANG Yu-mei, GAO Feng, et al. New model for air spray gun of robotic spray-painting[J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2007, 42(11): 226-233.
- [7] 王国磊, 伊强, 缪东晶, 等. 面向机器人喷涂的多变量涂层厚度分布模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(3): 324-330.
WANG Guo-lei, YI Qiang, MIAO Dong-jing, et al. Multi-variable coating thickness distribution model for robotic spray painting[J]. Journal of Tsinghua University (science & technology), 2017, 57(3): 324-330.
- [8] 杨连生, 李爱平, 祁国栋, 等. 基于优化BP算法的涂装机器人喷涂漆膜厚度成长模型的研究[J]. 中国造船, 2016, 57(1): 193-199.
YANG Lian-sheng, LI Ai-ping, QI Guo-dong, et al. A modified BP based model of thickness growth of film sprayed with painting robot[J]. Ship building of China, 2016, 57(1): 193-199.
- [9] 潘玉龙, 王国磊, 朱丽, 等. 管道喷涂机器人喷枪运动

- 速度优化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(2): 212-216.
- PAN Yu-long, WANG Guo-lei, ZHU Li, et al. Optimization of spray gun speed for pipe painting robot[J]. Journal of Tsinghua University(science & technology), 2014, 54(2): 212-216.
- [10] 吴洪键, 刘敏, 邓思豪, 等. 涂层厚度数学模型的建立及喷涂轨迹间距优化[J]. 热机加工工艺, 2017, 46(16): 127-132.
- WU Hong-jian, LIU Min, DENG Si-hao. et al. Establishment of coating thickness mathematic model and optimization of spacing of spray track[J]. Hot working technology, 2017, 46(16): 127-132.
- [11] 汤养, 陈伟. 喷涂机器人喷枪轨迹规划的优化算法研究[J]. 机械设计与制造, 2007(10): 144-146.
- TANG Yang, CHEN Wei. A study on optimization algorithm of the trajectory planning for painting robots[J]. Machinery design & manufacture, 2007(10): 144-146.
- [12] 龚俊, 陆保印, 曾勇. 喷炬新模型在平面喷涂轨迹优化中的应用研究[J]. 机械设计与制造, 2010(8): 63-65.
- GONG Jun, LU Bao-yin, ZENG Yong. Application research of the spraying trajectory optimization in-plane for the new model of spray gun[J]. Machinery design & manufacture, 2010(8): 63-65.
- [13] 孟慧杰, 尹志新. 喷漆机器人喷漆工艺分析及优化研究[J]. 机械与电子, 2009(4): 3-6.
- MENG Hui-jie, YIN Zhi-xin. Study on technology and optimization of robotic spray painting[J]. Machinery & electronics, 2009(4): 3-6.
- [14] 王国磊, 陈恳, 陈雁, 等. 变参数下的空气喷枪涂层厚度分布建模[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(1): 188-192.
- WANG Guo-lei, CHEN Ken, CHEN Yan, et al. Film thickness distribution model with variable parameters for air spray gun[J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition), 2012, 42(1): 188-192.
- [15] SCHAFFER J D. Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms[C]// International Conference on Genetic Algorithms. Pittsburgh, PA, USA: [s.n.], 1985: 93-100.