

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2614933

双组份道路交通标线机器人喷涂工艺与 标线质量预测模型研究*

王砚麟^{1,2,3}, 苏政方^{1,2}, 顿俊杰⁴, 赵永盛^{1,2}, 单亚洋^{1,2}

(1. 兰州理工大学机电工程学院 兰州 730050; 2. 机械工业重载柔性机器人重点实验室 兰州 730050;
3. 成套装备智能化集成技术教育部重点实验室 兰州 730050; 4. 甘肃路桥建设集团有限公司 兰州 730050)

摘要:为解决设计的双组份道路交通标线智能施划机器人在实际施工过程中存在标线宽度/厚度与喷涂工艺参数之间关系不明确,难以精准控制施划标线宽度和厚度的质量。首先,通过搭建试验平台,结合对喷涂过程的机理分析,使用单因素试验与正交试验相结合的试验设计,研究各喷涂工艺参数对标线宽度和厚度的影响规律和存在的交互作用;然后,采用最小二乘法对试验数据进行拟合,获得了各喷涂工艺参数对标线宽度和厚度的最优拟合形式;并利用多元非线性回归方法分别建立了双组份道路交通标线宽度和厚度预测模型;并引入反向传播神经网络(BPNN)、高斯过程回归(GPR)和广义回归神经网络(GRNN)机器学习算法对预测效果进行对比与评估;最后,通过样机试验验证了双组份道路交通标线宽度和厚度的预测模型的正确性。试验结果表明:所选的喷涂工艺参数对道路交通标线宽度和厚度的决定系数分别为99.4%和99.3%;建立的多元非线性预测模型有效克服了机器学习模型在工程小样本工况下的过拟合缺陷,其模型预测拟合度(R^2)分别达到0.932 3和0.978 4,符合双组份道路交通标线施工要求。研究结果为双组份道路交通标线施划机器人通过调控喷涂工艺参数实现精准控制道路交通标线宽度和厚度提供依据,并为现场施工提供科学的技术决策,提升喷涂工艺自动化水平。

关键词: 道路交通标线;喷涂工艺参数;喷涂机器人;正交试验设计;预测模型

中图分类号: TH162 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.25

Research on robotic spraying process of two-component road traffic markings and prediction model for marking quality

Wang Yanlin^{1,2,3}, Su Zhengfang^{1,2}, Xie Junjie⁴, Zhao Yongsheng^{1,2}, Shan Yayang^{1,2}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Key Laboratory of Heavy Duty Flexible Robot of Machinery Industry, Lanzhou 730050, China;
3. Key Laboratory of Intelligent Integration Technology for Complete Equipment, Ministry of Education,
Lanzhou 730050, China; 4. Gansu Road & Bridge Construction Group Co., Ltd., Lanzhou 730050, China)

Abstract: To address the issue in the practical application of the designed intelligent spraying robot for two-component road traffic markings, where the relationship between marking width/thickness and spraying process parameters is unclear, making it difficult to precisely control the quality of the applied marking dimensions. First, by establishing an experimental platform and combining with the mechanistic analysis of the spraying process, this article adopts an experimental design that integrates single-factor and orthogonal experiments to investigate the influence patterns and interactions of various spraying process parameters on marking width and thickness. Then, the least squares method is employed to fit the experimental data, obtaining the optimal fitting forms for the relationship between each spraying process parameter and the marking width/thickness. Subsequently, multivariate nonlinear regression models are established to predict the width and thickness of the two-component road traffic markings, respectively. Furthermore, machine learning algorithms, including the back propagation neural network (BPNN), Gaussian process regression (GPR), and generalized regression

收稿日期: 2026-02-05 Received Date: 2026-02-05

* 基金项目: 甘肃省联合科研基金重点项目(N24JRRA861)、甘肃省科技专员专项项目(25CXGA076)、兰州市科技计划项目科技重大专项项目(2024-2-17)、甘肃省高校研究生“创新之星”项目(2026CXZX-557)资助

neural network (GRNN), are introduced to compare and evaluate the prediction performance. Finally, prototype testing is conducted to validate the accuracy of the predictive models. The experimental results indicate that the coefficients of determination of the selected spraying process parameters on the road traffic marking width and thickness are 99.4% and 99.3%, respectively. The established multivariate nonlinear predictive models effectively overcome the overfitting defects of machine learning models under small-sample engineering conditions, with their predictive fitting degrees (R^2) reaching 0.932 3 and 0.978 4, respectively, which meets the construction requirements for two-component road traffic markings. The findings provide a theoretical basis for the intelligent spraying robot to achieve precise control over marking width and thickness by regulating spraying process parameters, offering scientific support for on-site technical decision-making and contributing to the enhancement of the spraying process automation.

Keywords: road traffic marking; spraying process parameters; spraying robot; orthogonal experimental design; prediction model

0 引言

国家标准《GB 5768.3—2025 道路交通标志和标线》有力推动了我国道路交通标志和标线的标准化与现代化进程^[1]。道路交通标线通过提供视觉引导、规则指示及危险警示等功能,有效保障了交通安全与通行效率,其中标线宽度与厚度是两个关键的质量指标;精确的宽度确保了其视认性与规范性,而适宜的厚度则保障了标线的耐磨性与使用寿命^[2-3],因此,为精准优化和控制标线宽度和厚度,在双组份涂料配方优化与性能提升^[4-6]和道路交通标线智能施划装备^[7-9]等方面的研究已经取得了很好的进展。但喷涂过程涉及喷涂压力、喷枪高度、角度、车速等多个变量的复杂交互作用以及外部环境等众多因素的影响,仅凭提高涂料性能和智能装备控制难以稳定、精确地达到预设宽度与厚度的标准要求,所以,研究喷涂工艺参数对双组份道路交通标线质量的影响规律和建立标线质量的预测数学模型具有现实意义。

在道路交通标线喷涂工艺研究方面,赵健^[10]采用车载式外混划线机进行双组份标线喷涂,阐述施工工艺流程。王振庆等^[11]设计了一款集清扫、标线为一体的移动式路面标线装置,并将新型智能标线设备及施工方法应用于高速公路标线的施划。为进一步提高喷涂效果,国内外众多研究团队针对喷涂工艺参数与涂层之间存在的关系开展了研究。李龙等^[12]基于单通道轨迹涂层厚度分布模型引入对膜厚分布影响最大的几个关键参数(喷涂流量、喷涂速度、喷涂距离、雾化压力、扇形压力)建立了以喷涂工艺参数为自变量的涂层厚度分布泛化模型,并通过正交试验验证了模型的准确性。王国磊等^[13]基于 β 分布的涂层生长速率函数提出并验证了多变量涂层厚度分布模型的泛化能力。蔺明宇^[14]以椭圆双 β 分布模型作为爬壁机器人平面漆膜厚度的研究基础,结合等量油漆原理^[15-16]和微分几何放大法建立了曲面上的漆膜厚度成长模型^[17]和喷涂轨迹多目标优化。刘俊毅等^[18]提出一种多样性种群增强遗传算法用来提升路径规划性能。Zhang 等^[19]提出了一种“多通道-多参数”涂层厚度

分布模型,将机器人喷涂轨迹与动态喷涂工艺参数进行协同优化,实现对涡轮叶片涂层厚度的精准控制。

与此同时,将机器人喷涂工艺参数与试验设计相结合^[20-24]也是研究喷涂质量的关键技术之一。赵文浩等^[25]通过等离子喷涂正交试验优化了 Ar 气流量、送粉速率和喷涂距离等工艺参数,并分别确定了使涂层孔隙率最小和结合强度最优的两组最佳工艺参数组。Ashokkumar 等^[26]利用响应面法优化 AA2024/Al₂O₃ 冷喷涂涂层在 AZ31B 镁合金上的工艺参数,并构建二次回归模型,关联了工艺参数与孔隙率。

当前,针对道路交通标线宽度和厚度的研究,主要集中在智能装备研发及常规施工工艺方面,而关于喷涂工艺参数的深入研究多见于工业机器人领域。关键喷涂工艺参数对双组份标线几何特征的影响规律尚不明确,且鲜有关于宽度、厚度影响因素分析及参数间关系量化模型的研究报道。研究表明,结合试验数据^[27-28]和机器学习算法构建预测模型^[29-30]是实现精准控制的有效途径。为此,本文采用单因素试验与正交试验设计相结合的方法,系统分析试验数据,并建立双组份道路交通标线厚度与宽度的预测数学模型,最后通过样机试验验证预测模型的准确性,为双组份道路交通标线智能施划机器人精准控制实现标线高质量施划奠定基础。

1 试验原理与喷涂过程分析

本文以双组份道路交通标线智能施划装备的喷涂过程进行分析,如图1所示。该系统主要由喷涂系统、自行式底盘和智能控制系统组成。喷涂系统由液压泵、液压马达、A/B 组份柱塞泵、高压软管、高压无气式喷枪、喷嘴和涂料等部件组成,其工作原理为发动机通过皮带驱动液压泵和气泵转动,液压泵转动后产生高压液压油,高压液压油推动液压马达运转,液压马达进而带动柱塞泵上下往复运动,柱塞泵随之从吸料管吸入双组份涂料,其喷出的高压涂料经过滤器过滤后到达喷枪,最终通过喷枪开关控制喷涂。智能控制系统包括蓄电池、工业控制计算机(industrial personal computer, IPC)和底盘动力系统。

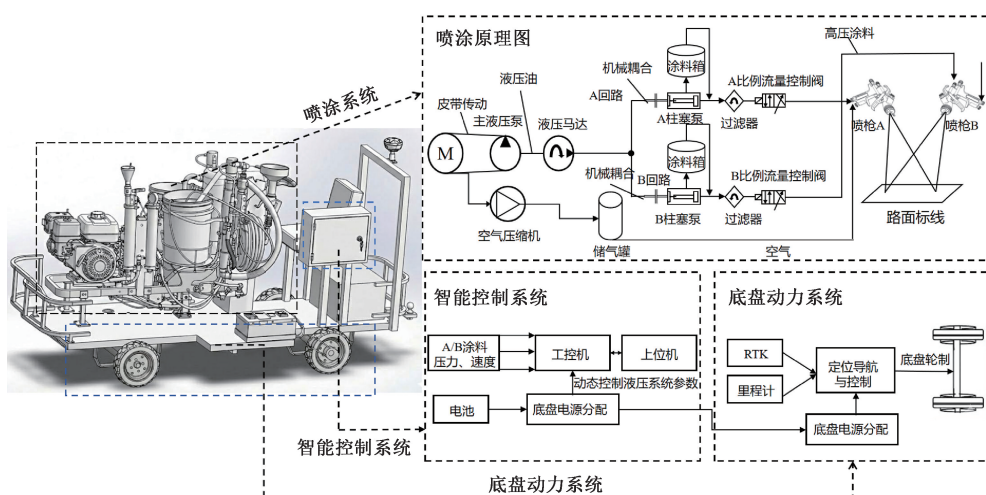


图1 双组份道路交通标线智能施划装备

Fig. 1 Two-component road traffic marking intelligent application equipment

A/B 组份涂料的压力和速度等传感器数据会实时反馈到 IPC 和上位机。系统根据预设参数动态调节运行状态,以确保 A 和 B 组份涂料的输出比例、压力和总流量的稳定性和精度。底盘动力系统通过融合实时动态定位 (real-time kinematic, RTK) 和里程计数据实现机器人的定位、导航和控制,从而确保精确的行驶速度。

为了便于对整个喷涂系统进行理论分析,建立了以下基本假设:涂层材料为不可压缩流体,流动为稳态流动,且粘性损失可以忽略不计,该喷涂系统同时满足伯努利方程和连续性方程。然而,实际的高压喷涂应用中必然存在能量耗散。为了考虑这些非理想因素,通过引入了流量系数 C_d 。来对实际流量进行建模,根据流体力学理论,管道中的流量可表示为:

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

其中, Q 为喷涂流量, C_d 为流量系数 (0.8 ~ 0.9 取决于涂料粘度), A 为喷嘴面积, ΔP 为喷涂压力差, ρ 为涂料密度。

在涂料从喷嘴喷出后,其运动可以看作是水平方向的匀速直线运动和垂直方向的自由落体运动的合运动。通过对垂直方向运动分析和和水平方向运动分析以及几何关系计算涂料宽度。不考虑重力时,可得到宽度 W 的计算公式为:

$$W = 2h \cdot \tan \frac{\theta_2}{2} \quad (2)$$

其中, h 为喷涂高度, θ_2 为喷嘴喷射角度。

基于体积守恒原理,通过伯努利方程确定的喷嘴压力流量特性和喷涂运动学参数决定的涂层几何分布,推导建立了路面标线动态厚度的数学模型,其道路交通标线厚度 d 的计算公式为:

$$d = \frac{V}{S} = \frac{Q \cdot t}{v \cdot t \cdot W} = \frac{Q}{v \cdot W} = \frac{C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2(\Delta P)}{\rho}}}{v \cdot 2h \cdot \tan \frac{\theta_2}{2}} \quad (3)$$

其中, V 为喷出涂料总体积, S 为路标覆盖面积, t 为喷涂时间, v 为行车速度。

上述推导基于体积守恒原理构建了道路交通标线质量的宏观几何分布模型。然而,双组份标线质量不仅受控于几何参数,更深层次地由雾化液滴的空间运动学与撞击动力学机制决定,在涂料流体从喷嘴高速射出并破裂成雾化液滴后,液滴在垂直落向路面的飞行阶段,主要受到重力 mg 与空气阻力 F_d 的共同作用。其瞬态空间运动方程可近似表示为:

$$m \frac{dv}{dt} = mg - \frac{1}{2} C_d \rho_a A_d v_m^2 \quad (4)$$

其中, m 为单个雾化液滴的质量, C_d 为空气阻力系数, ρ_a 为空气密度, A_d 为液滴的迎风截面积, v_m 为液滴的瞬时飞行速度。

综上所述,从对喷涂过程的机理分析,喷涂工艺参数本质上是通过改变涂料的初始射流动能、空间衰减历程、质量沉积通量以及涂料雾化液滴在空气中的飞行时间来影响标线质量。通过对整个喷涂过程的分析,为后续各工艺参数对标线宽度与厚度的试验结果分析奠定基础。

2 主要喷涂工艺参数与试验设计

2.1 主要喷涂工艺参数

双组份涂料从喷枪喷出后,在路面上形成标线的过程受到多种因素的影响,其影响标线宽度和厚度的因素可分为4类,如表1所示。

表 1 影响标线宽度和厚度的因素

Table 1 Factors influencing the width and thickness of road markings

序号	类型	因素
1	喷涂装置	发动机、液压泵、气泵、柱塞泵、喷枪、高压软管、液压马达等
2	外部环境	环境的温度、湿度、风力状况等
3	喷涂参数	柱塞泵工作压力、喷嘴孔径、流量、喷涂速率、喷嘴喷射角度等
4	路径参数	行车速度、喷涂高度、喷涂角度等

这么多参数在施工过程全部考虑进去显然是不现实的,喷涂装置和外部环境对于喷涂作业来说一般是不变的,喷涂参数和路径参数多为需要经常调控的变量。因此,基于对喷涂过程的理论分析以及实际操作中需要频繁调整的变量,本试验研究选取了 5 个喷涂工艺参数(喷涂压力、行车速度、喷涂高度、喷涂角度和喷嘴喷射角度)作为本文研究对象。

2.2 试验方案设计

为研究上述 5 个因素对标线宽度和厚度的影响规律,设计了 2 种试验:1)单因素试验:每次只改变一个影响因素的水平,其他 4 个因素保持固定不变,分析该单一因素对结果的影响规律;2)正交试验:采用 L25(5⁶) 正交试验表设计试验,以较少的试验次数,实现对多因素主效应及部分交互作用的分析。试验因素和水平如表 2 所示。

表 2 因素水平表

Table 2 Factor level table

水平	因素				
	喷涂压力 P/psi	行车速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	喷涂高度 h/cm	喷涂角度 $\theta_1/(\text{^\circ})$	喷嘴喷射角度 $\theta_2/(\text{^\circ})$
1	1 000	0.3	24	15	30
2	1 200	0.6	27	20	40
3	1 400	0.9	30	30	50
4	1 600	1.2	33	40	60
5	1 800	1.5	36	45	65

在数据采集方面,试验系统采用压力传感器、漆膜干膜测量仪、数显角度尺、试验基板和数显游标卡尺等工具,用于测量道路交通标线的宽度与厚度参数。

3 试验结果分析

3.1 单因素试验结果分析

基于单因素试验原理,为分析 5 个关键喷涂工艺参数(喷涂压力、行车速度、喷涂高度、喷涂角度、喷嘴喷射角度)对双组份道路交通标线宽度和厚度的影响规律,分别进行了 5 组试验,如图 2 所示,并采用最小二乘法对试验数据进行拟合分析。

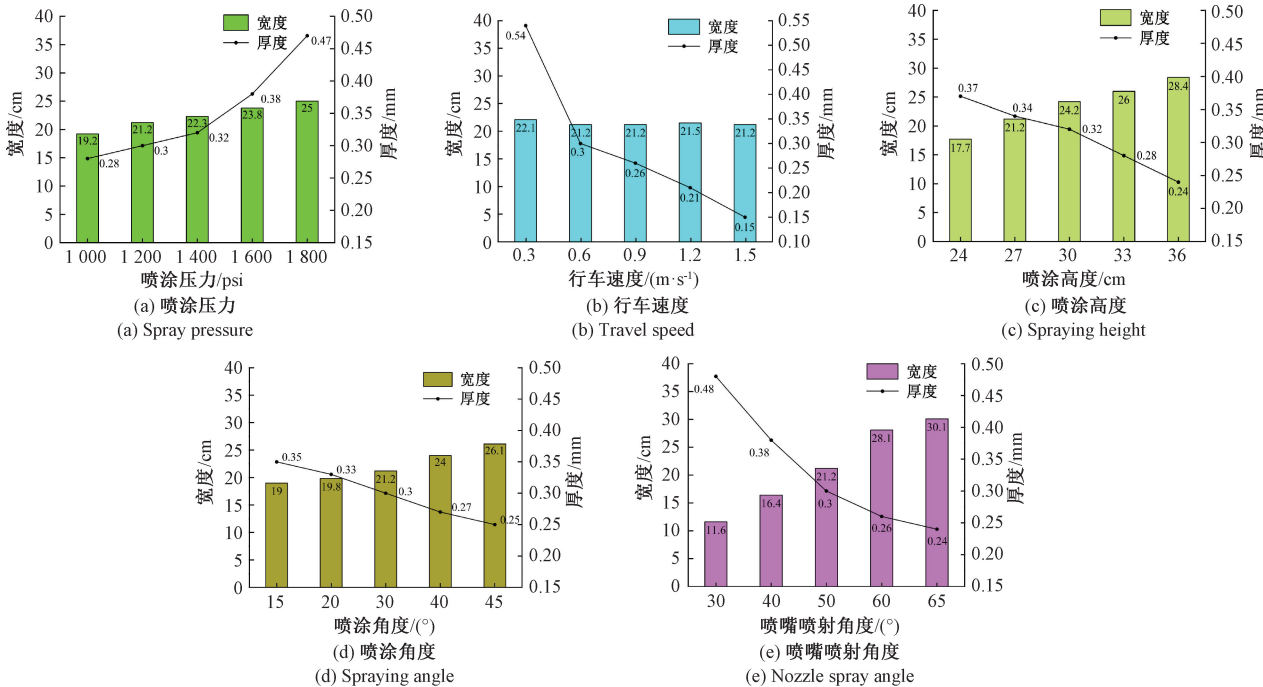


图 2 单因素试验结果

Fig. 2 Results of single-factor experiments

当行车速度为 0.6 m/s、喷涂高度为 27 cm、喷涂角度为 30°、喷嘴喷射角度为 50°、压力从 1 000 psi 增大到 1 800 psi 时,标线宽度和厚度变化如图 2(a)所示。由图可知,标线宽度随喷涂压力增大近似线性增加,当压力从 1 000 psi 增大到 1 800 psi 时,标线宽度从 19.2 cm 稳步增长至 25.0 cm,增幅约为 30%。从流体力学与高压无气雾化机理分析,高压使双组份涂料在喷嘴内部获得较高的初始动能,当高速流体从受限的喷嘴孔径射入相对静止的环境空气中时,流体表面与空气之间产生强烈的剪切作用,气液界面的表征气动迟滞力与流体表面张力之比的韦伯数(W_e)随喷射速度的平方急剧增大,导致液膜迅速发生破裂,产生更细小且动能更高的雾化液滴,进而使标线覆盖的宽度增加。喷涂压力对标线厚度的影响呈非线性增长,更高的压力驱动柱塞泵以更高的效率工作,单位时间出料量增加,且高压通常能产生更小的液滴,从而提升喷涂的覆盖均匀性和沉积效率。

当喷涂压力为 1 200 psi、喷涂高度为 27 cm、喷涂角度为 30°、喷嘴喷射角度为 50°,行车速度从 0.3 m/s 增大到 1.5 m/s 时,标线宽度和厚度变化如图 2(b)所示,行车速度的改变对标线宽度影响较小几乎可以忽略不计,5 组试验宽度数据基本一致,最大相差 0.4 cm。从动态质量守恒与相对运动学角度分析,雾化射流的宏观宽度主要由喷嘴的几何特征、喷涂高度和喷涂角度决定,在施划装备低速行驶下,空气相对于射流的横向剪切力不足以改变涂料雾化扇面的稳态三维形态,因此标线宽度基本保持恒定。然而,行车速度对标线厚度的影响却极为显著,数据点几乎呈单调下降趋势,变化幅度 72%。这表明行车速度是控制标线厚度的最关键、最敏感的工艺参数。这是由于标线厚度的形成本质上是单位时间内的涂料堆积过程,在喷涂总流量恒定的前提下,液滴在单位面积路面上的堆积时间与行车速度 v 成反比。根据稳态推移沉积模型,动态涂层厚度 d 的控制方程可表示 $d = Q/(v \cdot W)$ (如式 3 所示)。行车速度 v 的增加直接导致路面微观区域接受涂料射流的沉积时间缩短,动态质量沉积速率远低于试验基板表面的摊铺速度,从而造成标线厚度急剧下降。低速阶段(0.3 ~ 0.6 m/s)厚度的断崖式下跌,是由于涂料在极短时间内未能达到充分铺展与体积堆积的临界阈值所致。

如图 2(c)所示,当喷涂压力为 1 200 psi、行车速度为 0.6 m/s、喷涂角度为 30°、喷嘴喷射角度为 50°,喷涂高度从 24 cm 增大到 36 cm 时,标线宽度从 17.7 cm 持续增加至 28.4 cm,增幅高达 60%。基于雾化液滴的空间运动学与撞击动力学分析,喷涂高度的增加加剧了扇形喷雾靶面在二维路面投影上的几何放大,直接导致标线宽度增加,结合图 2(c)所表现的趋势,涂料从喷嘴喷出后,会以一个特定的几何形状映射在试验基板上,而喷涂高度决定几何形状的大小,所以喷涂高度越高,其扇形覆

盖就越宽。而标线厚度随着喷涂高度的增加从 0.37 mm 下降至 0.24 mm,降幅约为 35%。在重力与空气阻力的耦合作用下,雾化的涂料液滴群在长距离向路面堆积的过程中发生剧烈的动能衰减与空间弥散。当液滴最终撞击路面基板时,其残余的法向撞击动能已大幅降低,并且恒定的喷涂总流量被分配到了更宽泛的几何面积上,导致单位面积内的涂料质量通量急剧下降,单位面积上沉积的涂料量多,因此形成的标线厚度越厚。

如图 2(d)所示,当喷涂压力为 1 200 psi、行车速度为 0.6 m/s、喷涂高度为 27 cm、喷嘴喷射角度为 50°,喷涂角度从 15°增大到 45°时,标线厚度和宽度的趋势分别呈现出几乎线性增加和线性降低,从几何投影理论上,喷嘴形成的椭圆形雾化锥在路面上的截面投影遵循解析几何规律。当喷涂角度 θ_1 增大时,涂料雾锥体与水平路面斜交,其投影轮廓由近圆形改变为偏心率更大的椭圆,即标线宽度则越宽,而对于厚度而言,被喷嘴雾化的液滴群到达路面时的绝对撞击速度 v_i 被分解为法向分量 $v_n = v_i \cos(\theta_1)$ 和切向分量 $v_t = v_i \sin(\theta_1)$ 。喷涂角度增大导致法向撞击动能 v_n^2 显著削弱,涂料的法向渗透深度减小,同时,增大的切向动能 v_t^2 促使涂料雾化液滴产生强烈的前向不对称铺展甚至轻微飞溅倾向。几何投影面积的急剧扩大与法向沉积密度的降低相互叠加,在总出料量不变的情况下,必然会导致平均标线厚度降低。

如图 2(e)所示,当喷涂压力为 1 200 psi、行车速度为 0.6 m/s、喷涂高度为 27 cm、喷涂角度为 30°,喷嘴喷射角度从 30°增大到 65°时,标线宽度随喷嘴喷射角度增加而显著增加,角度增加了 117%。而宽度从 11.6 cm 增加到 30.1 cm,增幅 160%,喷嘴喷射角度对标线宽度的变化非常敏感。而标线厚度随喷嘴喷射角度增加而稳定下降。标线厚度从 0.48 mm 减少到 0.24 mm,几乎减半。喷嘴喷射角度代表了无气喷嘴内部 V 型导流槽对流体的初始几何约束边界。从流体横向膨胀与破裂机制来看,更宽的喷嘴喷射角度迫使高压流体在溢出孔径的瞬间,获得较大的横向初始速度梯度,导致双组份涂料的覆盖范围变得更宽。厚度则显著下降,原因在于涂料流被摊薄覆盖更大面积,导致单位面积沉积量减少。因此出现宽度增大厚度减小的趋势。

综上,单因素试验揭示了 5 个关键工艺参数在双组份道路交通标线喷涂工艺中的独立作用机制,阐明各工艺参数对标线宽度和厚度的影响趋势。为后续多因素分析以及正交试验设计奠定基础。

3.2 正交试验结果分析

单因素试验结果分析得到了各因素对标线宽度和厚度直观影响。但在实际施工中必须考虑多个喷涂工艺参数同时变化时的交互作用,为此,利用正交试验设计的方法分析多因素的主效应及各因素间的交互作用,并通过

方差分析确定影响标线宽度和厚度的影响显著性,正交试验结果如表 3 所示。结果显示,试验数据分布均匀,跨度较大,表明正交试验设计的合理性,在实际施工中,可根据实际要求从表 3 中选择条件接近的参数组合。

表 3 L25(5⁶) 正交试验结果和分析

Table 3 Results and analysis of L25(5 ⁶) orthogonal experiment								
编号	喷涂压力 P/psi	行车速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	喷涂高度 h/cm	喷涂角度 $\theta_1/(\text{^\circ})$	喷嘴喷射角度 $\theta_2/(\text{^\circ})$	空列	厚度 T/mm	宽度 W/cm
1	1 000	0.3	24	15	30	1	0.47	6.0
2	1 000	0.6	30	40	65	2	0.24	31.5
3	1 000	0.9	36	20	60	3	0.11	34.2
4	1 000	1.2	27	45	50	4	0.15	18.5
5	1 000	1.5	33	30	40	5	0.11	19.8
6	1 200	0.3	36	40	50	5	0.44	35.0
7	1 200	0.6	27	20	40	1	0.32	15.5
8	1 200	0.9	33	45	30	2	0.27	18.0
9	1 200	1.2	24	30	65	3	0.26	20.8
10	1 200	1.5	30	15	60	4	0.12	31.6
11	1 400	0.3	33	20	65	4	0.38	38.0
12	1 400	0.6	24	45	60	5	0.41	27.4
13	1 400	0.9	30	30	50	1	0.24	25.2
14	1 400	1.2	36	15	40	2	0.16	23.2
15	1 400	1.5	27	40	30	3	0.25	14.2
16	1 600	0.3	30	45	40	3	0.55	24.8
17	1 600	0.6	36	30	30	4	0.35	23.0
18	1 600	0.9	27	15	65	5	0.29	35.5
19	1 600	1.2	33	40	60	1	0.18	39.0
20	1 600	1.5	24	20	50	2	0.28	16.5
21	1 800	0.3	27	30	60	2	0.54	31.9
22	1 800	0.6	33	15	50	3	0.36	32.0
23	1 800	0.9	24	40	40	4	0.43	17.6
24	1 800	1.2	30	20	30	5	0.32	10.2
25	1 800	1.5	36	45	65	1	0.23	47.0

注:第 7 列为空列的目的是估计试验误差,避免饱和设计。

通过对表 3 中的 25 组试验数据进行方差分析可得到各喷涂工艺参数对双组份道路交通标线宽度和厚度的显著性影响,如表 4~5 所示。

结果显示,标线宽度的各因素的效应量(Partial η^2)均非常高(0.822~0.990),表明所选参数是影响标线宽度的主要来源。通过 F 和 P 值可知,标线宽度的主要决定性因素为喷嘴喷射角度、喷涂高度和喷涂压力,其影响

表 4 宽度多因素方差分析结果

Table 4 Results of multi-factor analysis of variance for width				
因素	均方	F	p	Partial η^2
喷涂压力	30.147	8.420	0.031 *	0.894
行车速度	16.590	4.634	0.083	0.822
喷涂高度	164.307	45.891	0.001 **	0.979
喷涂角度	19.076	5.328	0.067	0.842
喷嘴喷射角度	362.313	101.194	0.000 **	0.990

注: $R^2 = 0.994$, $p^* < 0.05$, $p^{**} < 0.01$

表 5 厚度多因素方差分析结果

Table 5 Results of multi-factor analysis of variance for thickness				
因素	均方	F	p	Partial η^2
喷涂压力	0.018	25.190	0.004 **	0.962
行车速度	0.064	90.702	0.000 **	0.989
喷涂高度	0.010	14.892	0.011 *	0.937
喷涂角度	0.002	2.236	0.227	0.691
喷嘴喷射角度	0.003	4.310	0.093	0.812

注: $R^2 = 0.993$, $p^* < 0.05$, $p^{**} < 0.01$

均达到统计显著水平($p < 0.05$),其中喷嘴喷射角度与喷涂高度为优先控制的核心参数,而行车速度与喷涂角度的 p 值处于显著性边缘,但在实际施工中对调控标线质量也具有重要实际意义。标线厚度的最主导因素为行车速度,其次为喷涂压力与喷涂高度,三者均具有高度显著的影响($p < 0.05$)。行车速度直接决定了单位面积内的涂料沉积时间,而喷涂压力则影响双组份涂料的流量。二者共同调控涂料的体积沉积率,所以,要增加标线厚度,最有效的工艺策略是降低行车速度与喷涂高度,并提高喷涂压力。相比之下,喷涂角度与喷嘴喷射角度对厚度的影响则不显著。

总之,通过对正交试验多因素方差分析,所选的喷涂工艺参数对标线质量的决定系数分别为 0.994 和 0.993,这表明本文选取的 5 个喷涂工艺参数能够解释标线宽度和厚度变化的 99% 以上,验证了这 5 个参数作为核心控制变量的科学性与充分性。在实际施工中,可将影响显著性高的喷涂工艺参数作为首要优化目标,并结合其他关键参数调整实现双组份道路交通标线宽度和厚度的精准施划。

4 喷涂工艺参数数学模型

4.1 单因素拟合数学模型

利用对数函数、指数函数、幂函数、幂函数、二次函数、逆函数等多种函数对单因素试验数据进行拟合,确定最佳单因素拟合函数,计算不同函数的均方误差(mean

squared error, MSE) 和 R^2 , 从而选择拟合度最高的函数, 作为双组份道路交通标线宽度和厚度预测数学模型的模型拟合形式。双组份道路交通标线宽度和厚度单因素拟合公式如图 3~4 所示。

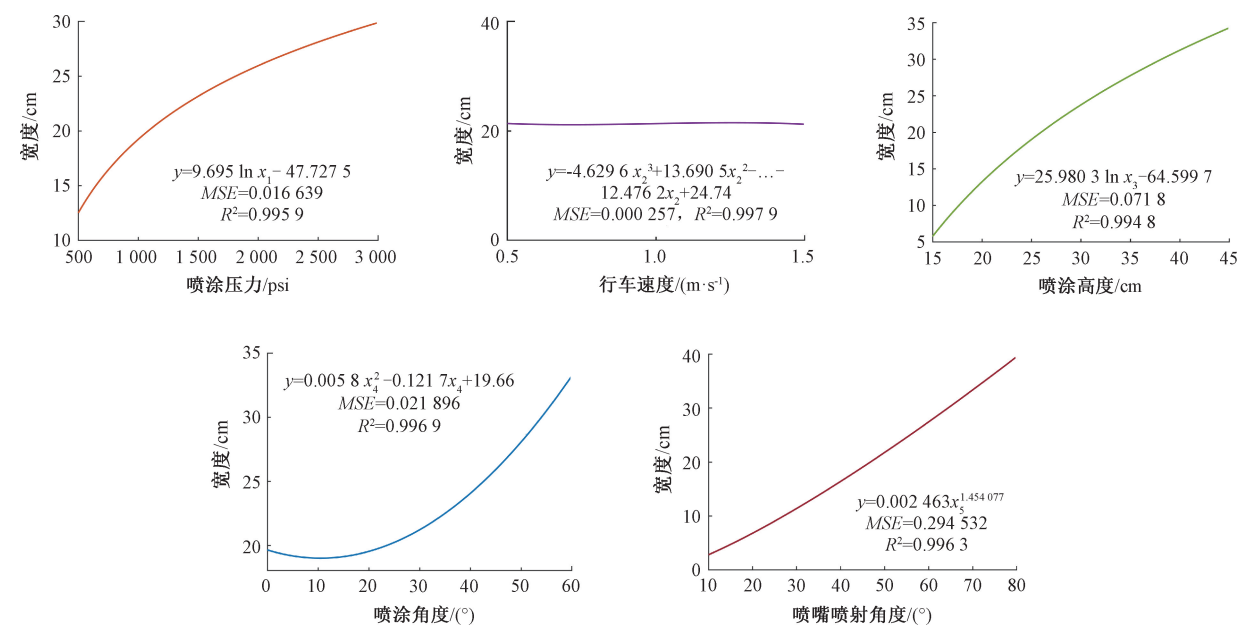


图 3 标线宽度各因素拟合公式
Fig. 3 Fitting formula for various factors affecting line width

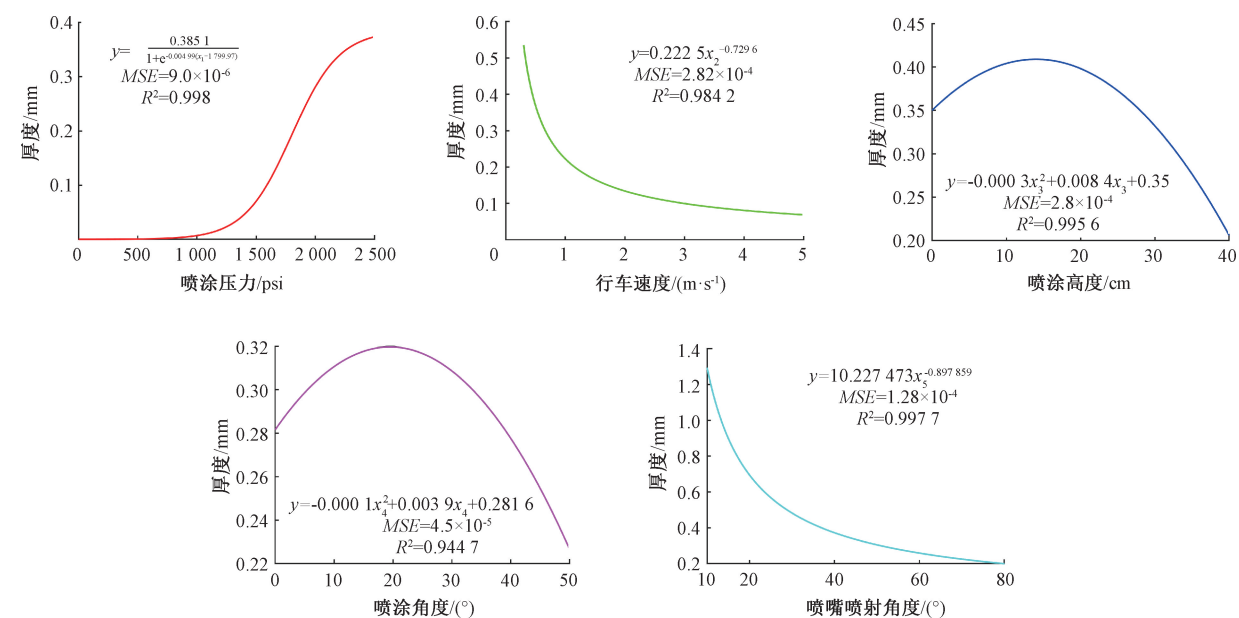


图 4 标线厚度各因素拟合公式
Fig. 4 Fitting formula for various factors affecting marking line thickness

图 3~4 中 x_1 代表喷涂压力, x_2 代表行车速度, x_3 代表喷涂高度, x_4 代表喷涂角度, x_5 代表喷嘴喷射角度。图 3 中 y 代表宽度, 图 4 中 y 代表厚度, R^2 为拟合度, 表示模型拟合程度, 越接近 1 拟合效果越好; MSE 为均方误差, 其值越小模型的预测值与真实值越接近, 模型的精度越高。

4.2 多元非线性回归模型

根据图 3~4 双组份道路交通标线宽度与厚度的单因素最优拟合公式, 构建道路交通标线宽度和厚度的多元非线性回归数学模型, 如式 (5) 和 (6) 所示。

$$y_1 = a_1 \ln(x_1) + a_2 + a_3 x_2^3 + a_4 x_2^2 + a_5 x_2 + a_6 + a_7^{\ln x_3} + a_8 + a_9 x_4^2 + a_{10} x_4 + a_{11} + a_{12} x_5^{a_{13}} \quad (5)$$

$$y_2 = a_1 / (1 + e^{(-a_2(x_1 - a_3))}) + a_4 x_2^{a_5} + a_6 x_3^2 + a_7 x_3 + a_8 + a_9 x_{24} + a_{10} x_4 + a_{11} + a_{12} x_5^{a_{13}} \quad (6)$$

其中, y_1 为道路标线宽度, y_2 为道路标线厚度, x_1 为喷涂压力, x_2 为行车速度, x_3 为喷涂高度, x_4 为喷涂角度, x_5 为喷嘴喷射角度, a_k 为回归系数, k 取值范围为 1~13。

基于单因素最优拟合公式和 25 组正交试验数据, 利用 Matlab 进行多元非线性回归, 以多元非线性回归模型拟合回归系数, 并在模型中引入交互作用项。

如图 5(a) 和(b)所示, 喷涂压力-喷嘴喷射角度、喷

涂角度-喷嘴喷射角度的交互曲面有明显的弯曲和倾斜, 喷涂压力-喷嘴喷射角度的效应数值范围为 8~28, 具有较强的正向叠加影响, 两者共同调整时, 标线宽度的实际变化高于两因素单独作用的预期值; 而喷涂角度-喷嘴喷射角度的效应数值范围为 -14~0, 属于较强的负向叠加影响, 则会低于两因素单独作用的预期值。

如图 5(c) 和(d)所示, 喷涂高度与喷涂角度并非独立影响厚度, 二者共同变化时会产生正向叠加影响, 交互效应为正向, 数值在 0~0.1; 而行车速度与喷嘴喷射角度的共同变化会产生负向叠加影响, 交互效应为负向, 数值在 -0.04~-0.005; 喷涂高度-喷涂角度、行车速度-喷嘴喷射角度的交互效应共同作用于标线宽度和厚度的质量。

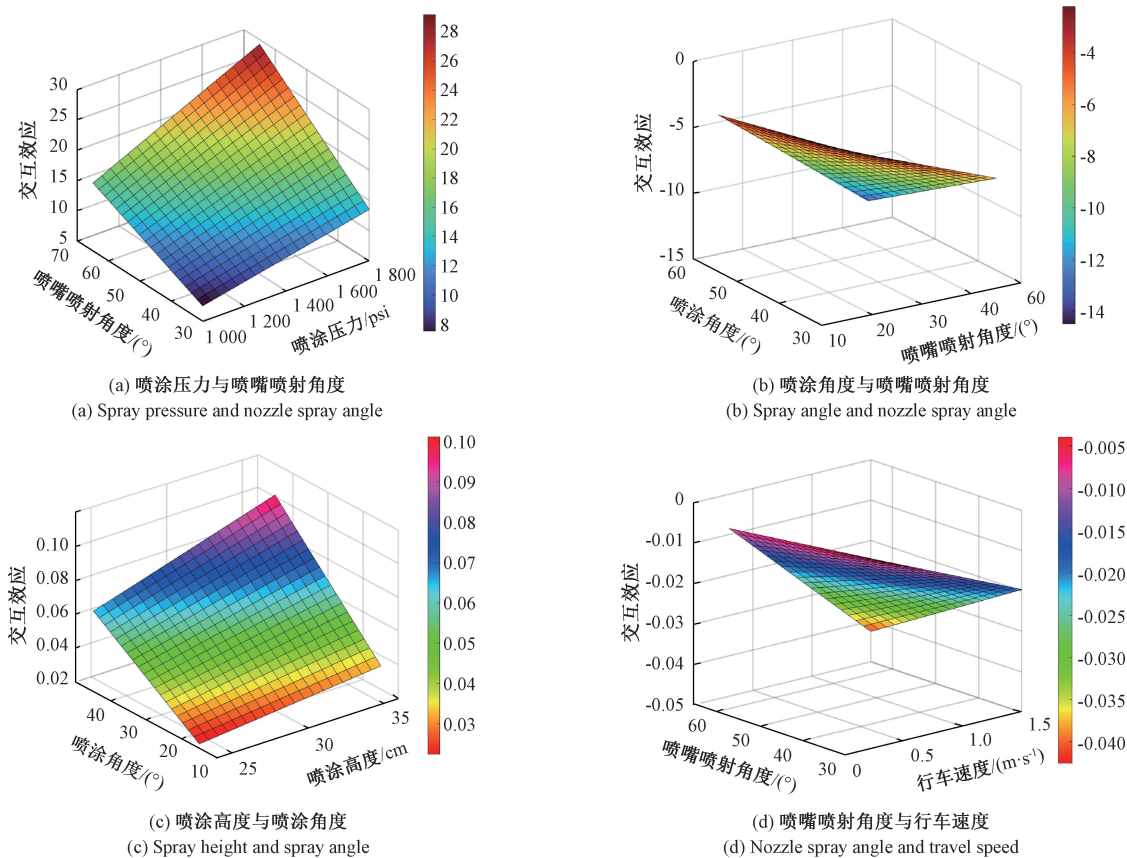


图5 标线宽度和厚度因素交互作用

Fig. 5 Interaction of factors affecting marking width and thickness

根据图 3~4 中单因素拟合公式以及图 5 标线宽度和厚度因素交互作用, 建立双组份道路交通标线宽度和厚度的多元非线性预测数学模型, 如式(7)和(8)所示。

$$y_1 = -6.30125 \ln x_1 + 17.089989x_2^3 - 43.683458x_2^2 + 29.829253x_2 + 35.4500 \ln x_3 + 0.00725x_4^2 - 0.088141x_4 + 0.201909x_5^{-1.138748} + 0.00025x_1x_5 - 0.004952x_4x_5 - 85.35682 \quad (7)$$

$$0.00092848x_3^2 - 0.06659x_3 - 0.00004787x_4^2 - 0.00020634x_4 + 0.5970742x_5^{-0.2521} + 0.000062x_3x_4 - 0.000436x_2x_5 - 2.638227 \quad (8)$$

5 模型评价与样机试验验证

5.1 预测模型对比与评估

为验证双组份道路交通标线宽度和厚度的多元非线性

$$y_2 = 6.5760931/1 + e^{-0.000112x_1} + 0.22717506x_2^{-0.5478} +$$

性回归预测数学模型的正确性与工程适用性,针对表3的25组正交试验数据,引入机器学习领域在小样本非线性回归场景下表现优异的反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)、高斯过程回归(Gaussian process regression, GPR)以及广义回归神经网络(generalized regression neural network, GRNN)这3种模型与多元非线性回归模型进行对比分析,4种回归模型对标线质量的预测效果如图6所示。

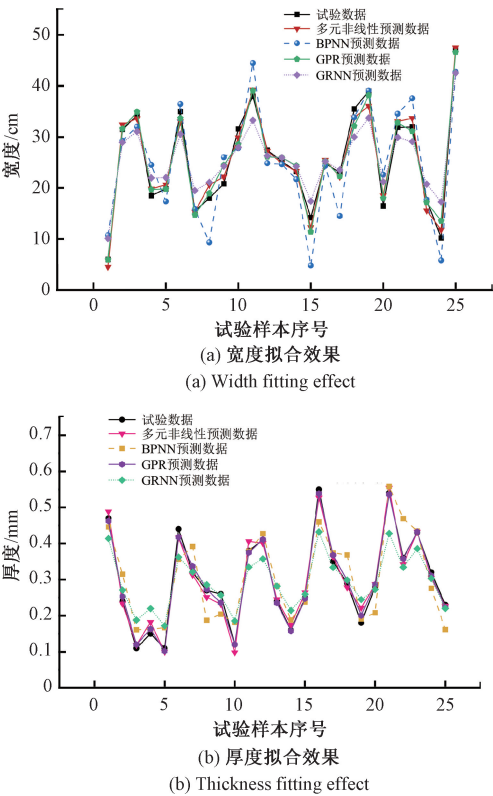


图6 4种模型对标线质量的预测效果
Fig.6 The predictive performance of four models on paving quality

结果显示,多元非线性回归模型在宽度预测方面(图6(a)),试验编号1~7、5~8、10~18和21~25区间的预测变化与实测变化趋势一致;其预测数学模型的拟合度 R^2 为0.9323;在第7和第12号试验的实际值为15.5和27.4 cm,预测值分别为15.3069和27.2287 cm,其预测的相对误差小于0.1 cm。其在试验编号19处实际值为39 cm,预测值为36.0784 cm,相对误差为2.9216 cm,预测值小于真实值。而厚度预测方面(图6(b)),在试验编号1~3、5~18和20~25区间表现出较高精度,其真实值和预测值最大误差为0.09 mm,且模型的拟合度 R^2 为0.9784;其余部分预测值与实测值之间存在一定偏差,但在19号试验的相对误差偏大,其实际值为0.18 mm,预测值为0.221 mm。预测值大于真实值。在道路交通

标线宽度和厚度的预测模型验证中,试验编号19的相对误差都偏大,因为模型对宽度和厚度的预测是独立的,但实际上宽度和厚度相互影响,导致涂料流动从“沉积主导”转为“扩散主导”,也有可能是因为表3试验的偶然性导致的。从整体来看,该模型对道路标线宽度和厚度的预测结果可靠,预测曲线能够紧密跟随试验数据点的波动,准确反映了实际宽度和厚度的变化规律。

与3种机器学习预测模型对比结果如表6所示,多元非线性回归的拟合度 R^2 远高于和GRNN,表明在小样本环境下,BPNN出现了明显的泛化能力不足,而多元非线性回归依然稳健。虽然GPR的拟合度 R^2 略高于多元非线性回归,但多元非线性回归的RMSE仅为1.4674是优于GPR的1.6548,表明多元非线性回归在预测极端或边缘工况时,产生的绝对偏差更小,预测结果更为可靠。在标线厚度预测上,多元非线性回归的拟合度 R^2 依然高于BPNN和GRNN,且MRE在6.65%的水平,完全满足实际工程中对厚度精度的要求。尽管GPR在厚度预测上表现出了最优的拟合度,但多元非线性回归的拟合度与其差距仅相差0.0071,两者在实际工程意义相同。

表6 预测模型对比与评估结果				
Table 6 Comparison and evaluation results of prediction models				
标线质量	预测模型	R^2	RMSE	MRE/%
宽度	多元非线性回归	0.932 3	1.467 4	6.392 0
	BPNN	0.795 7	4.414 0	15.300 0
	GPR	0.971 3	1.654 8	6.154 0
	GRNN	0.862 6	3.619 5	16.700 0
厚度	多元非线性回归	0.978 4	0.018 3	6.650 0
	BPNN	0.789 1	0.057 3	7.741 6
	GPR	0.992 0	0.011 2	3.636 9
	GRNN	0.811 9	0.054 1	18.941 7

综上所述,双组份道路交通标线宽度和厚度的多元非线性预测数学模型的拟合度 R^2 分别为0.9323和0.9784,表明预测数学模型具有较高的预测精度和拟合度。BPNN、GPR和GRNN虽然具备一定的拟合能力,但在前向推理时需要依赖大量复杂的矩阵迭代运算,而多元非线性回归模型为显式代数方程,计算时间短,可以直接嵌入道路交通标线智能施划机器人的底层控制器中,契合喷涂工艺参数实时闭环控制的工程需求,为通过调控相关喷涂工艺参数实现标线施工宽度和厚度的精准控制提供依据。

5.2 样机试验平台搭建和方案设计

为进一步评估多元非线性回归模型在真实样机上对标线质量的预测效果,搭建如图 7 所示的双组份道路交通标线智能施划试验平台。

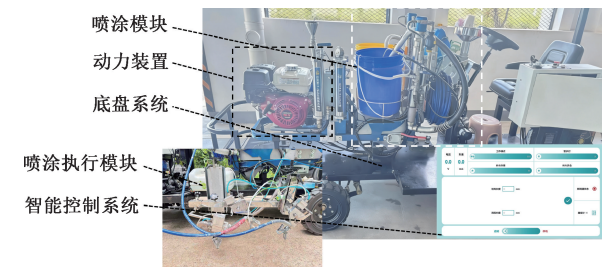


图 7 双组份道路交通标线智能施划试验平台
Fig. 7 Intelligent application test platform for two-component road

该装置采用机电液一体化的架构,主要集成移动底盘系统、动力驱动装置、双组份喷涂模块及智能控制系统。其中,智能控制系统作为核心单元,通过人机交互界面设定作业参数,实时驱动喷涂执行模块,实现对双组份涂料流量与混合比的精准调控。本试验针对标线质量的宽度与厚度进行验证,对喷涂工艺参数设计了 5 组样机试验,随机改变如表 7 所示的喷涂工艺参数组合进行样机试验验证,为排除基材自身纹理对测量的干扰,选取了标准的聚碳酸酯 (polycarbonate, PC) 工程塑料板作为试验基板。其物理特性与真实开放道路的对比如表 8 所示,由表 8 可知,与真实沥青和水泥路面的高孔隙率和高粗糙度不同,PC 基板具有接近于零的构造深度与孔隙率,有利于精准检验预测模型的准确度,因此,采用 PC 基板进行标线试验研究对理论模型具有更高的要求。此外,在后续工程实践中,以模型为核心框架,针对实际路面类型的表观构造深度 (mean texture depth, MTD) 与孔隙率引入相应的“粗糙度补偿系数”和“环境干扰修正项”来进行补偿。

表 7 随机试验验证组合

水平	因素				
	喷涂压力	行车速度	喷涂高度	喷涂角度	喷嘴喷射角度
	P/psi	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	h/cm	$\theta_1/(^{\circ})$	$\theta_2/(^{\circ})$
1	1 000	0.6	27	30	30
2	1 200	1.2	27	30	50
3	1 200	0.6	27	45	50
4	1 200	0.6	36	30	50
5	1 400	0.6	30	30	50

表 8 试验基板与真实路面的特性

物理特性参数	真实沥青路面	真实水泥路面	试验基板 (PC)
表观构造深度 (MTD)/mm	0.8~1.2	0.4~0.6	<0.01
表面孔隙率/%	3.0~5.0	<1.0	0
抗滑摆值 (BPN)	50~65	45~55	30~45

5.3 样机试验验证结果分析

基于搭建的样机试验平台,选取表 7 的试验数据进行验证,5 组喷涂试验效果如图 8 所示。

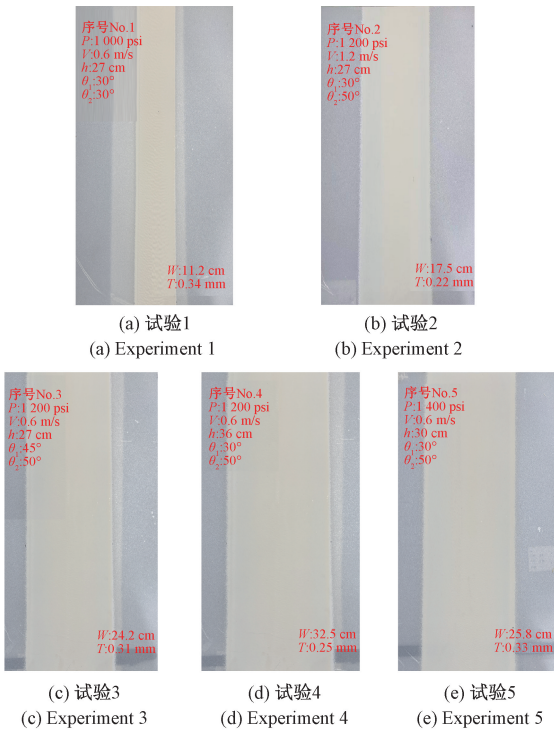


图 8 5 组喷涂试验效果图

Fig. 8 Effect diagrams of five groups of spraying tests

随后,将样机试验数据与多元非线性回归模型、BPNN、GPR 以及 GRNN 模型的预测结果进行对比。采用 5 组独立验证样本,对 4 种模型标线宽度与厚度预测效果如图 9 所示。

由图 9(a) 可知,多元非线性回归模型与 GPR 模型的预测结果基本与试验数据的变化趋势一致。相反,BPNN 与 GRNN 模型在序号 1、2 处出现了明显偏离,结合相对误差柱状图分布可知,BPNN 与 GRNN 的预测相对误差呈现剧烈波动,而多元非线性回归模型的相对误差始终保持在较低的水平。与此同时,从图 9(b) 的标线厚度预测效果上,多元非线性回归模型的预测结果依然与试验

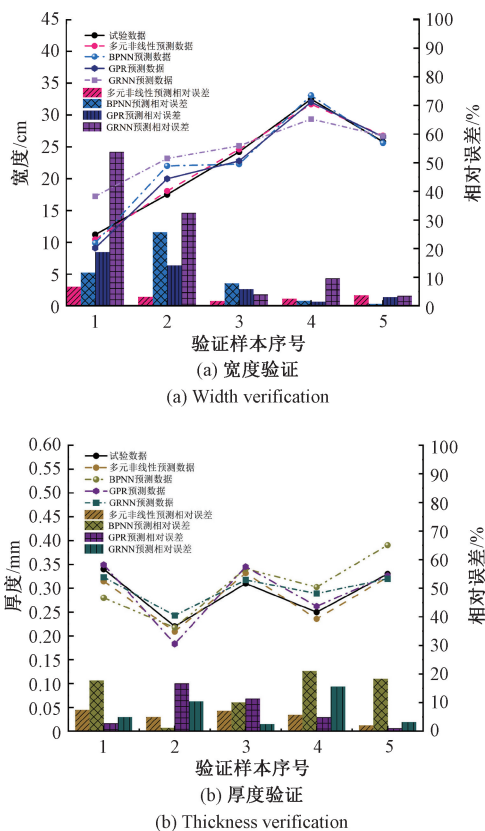


图9 试验值与预测值对比

Fig. 9 Comparison of experimental values and predicted values

厚度数据变化趋势高度吻合。而 BPNN 模型的预测趋势则严重偏离试验数据,在样本 1、4、5 处均高于实际厚度的预测值,同样地,GRNN 模型的折线也表现出局部预测效果较差的现象。从误差分布柱状图来看,BPNN 的相对误差柱体显著高于其他模型,而多元非线性回归模型的各样本点的相对误差分布均匀且均处于较低区间。

综上所述,机器学习模型尽管在训练阶段具有较强的非线性拟合能力,但在面对小样本验证时,容易陷入过拟合的现象,导致其在独立验证集上的预测误差较大,且相对误差波动剧烈。而多元非线性回归模型在实际样机验证中具有较强的抗过拟合能力与泛化鲁棒性,有效抵抗小样本数据的扰动。且机器学习模型依赖执行前向推理预测,受限于控制芯片算力,往往易引发控制延迟。综上,试验结果充分验证了建立的多元非线性标线宽度和厚度预测模型的有效性与可靠性,为通过调整喷涂工艺参数实现双组份标线宽度和厚度的精准控制施划提供科学指导。

6 结 论

1) 本文基于设计的双组份道路交通标线喷涂机器人,采用单因素试验与正交试验的研究设计,系统获取了

多喷涂工艺参数(喷涂压力、行车速度、喷涂高度、喷涂角度、喷嘴喷射角度)耦合作用下的试验数据。确保数据的全面性与可靠性,为后续探究标线成型机理及构建高精度预测模型奠定了坚实的数据基础。

2) 结合流体动力学、空间运动学与液滴动力学理论,分析了各喷涂工艺参数对双组份道路标线质量的影响机理,精准量化了各参数对标线宽度与厚度的影响显著性,各参数对标线宽度和厚度的影响显著性分别依次为喷嘴喷射角度>喷涂高度>喷涂压力>行车速度>喷涂角度、行车速度>喷涂压力>喷涂高度>喷涂角度>喷嘴喷射角度。

3) 利用多元非线性回归分析方法构建了双组份道路交通标线宽度与厚度的预测数学模型,并通过机器学习模型(BPNN、GPR 和 GRNN)进行模型评估和对比试验分析,验证了多元非线性回归模型施划场景下的可靠性。

4) 考虑到在实际道路施工中可能存在路面类型、施工环境等不同的情况,后续将扩大样本覆盖范围,纳入不同环境温度、基材特性、设备参数等工况下的试验数据,并在本文模型的基础上引入“路面粗糙度补偿系数”与“环境干扰修正项”,提升模型对复杂施工场景的适应性,并在实际交通路面进行试验研究。

参考文献

[1] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 道路交通标志和标线第3部: 道路交通标线: GB 5768.3—2025[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Road traffic signs and markings-part 3: Road traffic markings: GB 5768.3—2025[S]. Beijing: Standards Press of China, 2025.

[2] ZHU B CH, SONG C C, GUO ZH Y, et al. Effectiveness of active luminous lane markings on highway at night: A driving simulation study[J]. Sustainability, 2021, 13(3): 1043.

[3] PASETTO M, BARBATI S D. Experimental investigation on road marking distress evolution: Beyond testing, quality assurance and maintenance improvement[J]. Advanced Materials Research, 2013, 723: 846-853.

[4] 袁明园, 周启伟. 常温型双组份道路标线涂料的研制与应用[J]. 公路交通技术, 2024, 40(6): 7-13.
YUAN M Y, ZHOU Q W. Development and application of ambient temperature dual component road marking coatings[J]. Technology of Highway and Transport, 2024, 40(6): 7-13.

[5] 宋莉芳, 魏勇, 陈跃伟, 等. 基于混合实验设计的 MMA 双组份标线涂料配方设计及其性能[J]. 材料科学与工程学报, 2024, 42(2): 213-221, 231.
SONG L F, WEI Y, CHEN Y W, et al. Formulation design and performance of MMA two-component marking

- paint based on mixing experimental design[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2024, 42(2): 213-221, 231.
- [6] 段志. 甘肃临合高速项目双组份标线涂料与热熔反光标线涂料的应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(7): 46-48.
- DUAN ZH. Application research of two-component marking coatings and hot-melt reflective marking coatings in the Lin He highway project, Gansu [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology Edition), 2015, 11(7): 46-48.
- [7] 李双虎. 智能道路标线系统的研究设计[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2023.
- LI SH H. Research and design of an intelligent road marking system [D]. Qufu: Qufu Normal University, 2023.
- [8] WAHYUNI S, BUDIARTO H, JAMILAN N. Mobile robot painted dashed lines as road markings [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1125(1): 012080.
- [9] 焦世蒙. 自动行走道路划线机控制系统研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- JIAO SH M. Research on control system of automatic walking road marking machine [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [10] 赵健. 一种车载式外混双组份标线施工工艺研究[J]. 四川水泥, 2021(8): 123-124.
- ZHAO J. Research on a vehicle-mounted external mixing two-component marking construction process [J]. Sichuan Cement, 2021(8): 123-124.
- [11] 王振庆, 贾进学, 黄劲星. 高速公路智能道路标线施工技术研究[J]. 中国设备工程, 2022(13): 200-202.
- WANG ZH Q, JIA J X, HUANG J X. Research on intelligent road marking construction technology for expressways [J]. China Plant Engineering, 2022(13): 200-202.
- [12] 李龙, 郑权, 赵东波, 等. 机器人多参数喷涂厚度模型分析与试验研究[J]. 机床与液压, 2025, 53(5): 47-51.
- LI L, ZHENG Q, ZHAO D B, et al. Analysis and experimental study of multi-parameter spraying thickness model of robot [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2025, 53(5): 47-51.
- [13] 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 G L, YI Q, MIAO D J, et al. Multivariable coating thickness distribution model for robotic spraying painting [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017, 57(3): 324-330.
- [14] 蔺明宇. 面向爬壁喷涂机器人的船舶喷涂工艺建模技术研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
- LIN M Y. Research on modeling technology of ship spraying process for wall climbing spraying robot [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2021.
- [15] YU D Y, SU CH ZH, WANG EN G, et al. Method of 3D coating accumulation modeling based on inclined spraying [J]. Sensors, 2024, 24(4): 1212-1231.
- [16] YANG G CH, WU ZH J, CHEN Y, et al. Modeling and characteristics of airless spray film formation [J]. Coatings, 2022, 12(7): 949-968.
- [17] XU F, ZI B, WANG J Y, et al. Multi-objective trajectory optimization for rigid-flexible coupling spray-painting robot integrated with coating process constraints [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2024, 37(6): 421-438.
- [18] 刘俊毅, 汪洋. 多样性种群增强遗传算法机器人全局路径规划研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(9): 39-54.
- LIU J Y, WANG Y. Research on genetic algorithm for robot global path planning with diversity population enhancement [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(9): 39-54.
- [19] ZHANG X J, FU Y C, HU X B, et al. Research on multi-pass multi-parameter coating thickness distribution model for robotic spraying process on gas turbine blades [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2025, 239(18): 7444-7462.
- [20] 宋厚生, 孔令杰, 张伟平, 等. 正交实验设计法优化大气等离子喷涂氧化铝涂层工艺参数[J]. 表面技术, 2025, 54(7): 235-246, 259.
- SONG H SH, KONG L J, ZHANG W P, et al. Optimizing of process parameters of atmospheric plasma sprayed alumina coatings by orthogonal experimental design [J]. Surface Technology, 2025, 54(7): 235-246, 259.
- [21] 王喜印, 周三平. 基于神经网络和正交实验设计的CO₂柱塞泵容积效率的数值模拟分析[J]. 化工技术与开发, 2024, 53(12): 70-76.
- WANG X Y, ZHOU S P. Numerical simulation analysis of volumetric efficiency of CO₂ plunger pump based on neural network and orthogonal experimental design [J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2024, 53(12): 70-76.

- [22] 蒋仲安, 许峰, 王亚朋, 等. 空气雾化喷嘴雾化机理及影响因素实验分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(10): 2360-2367.
- JIANG ZH AN, XU F, WANG Y P, et al. Experiment analysis of atomization mechanism and influencing factors of air atomizing nozzle[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(10): 2360-2367.
- [23] AI Y W, SUN N, HAN SH B, et al. Investigation of the effects of laser welding process parameters on weld forming quality based on orthogonal experimental design and image processing[J]. Materials, 2025, 18(15): 3627-3642.
- [24] DING H G, LI Y L, ZHU Q M, et al. Position servo with variable speed pump-controlled cylinder: Design modelling and experimental investigation[J]. International Journal of Hydromechanics, 2024, 7(2): 155-175.
- [25] 赵文浩, 韩书音, 王雷. 喷涂工艺参数对绝缘轴承涂层孔隙率和结合强度的影响[J]. 机车车辆工艺, 2024, 60(4): 28-32.
- ZHAO W H, HAN SH Y, WANG L. Influence of spraying process parameters on porosity and bonding strength of insulated bearing coatings[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2024, 60(4): 28-32.
- [26] ASHOKKUMAR M, THIRUMALA IKUMARASAMY D, SONAR T, et al. Optimization of cold spray coating parameters using RSM for reducing the porosity level of AA2024/Al₂O₃ coating on AZ31B magnesium alloy[J]. International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 2023, 19(1): 1-15.
- [27] XUE K J, WANG J S, CHEN Y, et al. Improved BP neural network algorithm for predicting structural parameters of mirrors[J]. Electronics, 2024, 13(14): 2789-2807.
- [28] NASRAOUI H, TRABELSI A, REZGUI M A. Applying the ANN and the GPR models to predict energy consumption for AM-FDM of isovolumetric mechanical components[J]. Concurrent Engineering: Research & Applications, 2025, 33(4): 189-201.
- [29] 王蜜, 白雨铎, 刘杰贵, 等. 水平气液两相流压降实验和预测模型研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(11): 152-160.
- WANG M, BAI Y X, LIU J G, et al. Experimental and

modeling studying on pressure drop in horizontal gas-liquid two-phase flow[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(11): 152-160.

- [30] 郭万金, 郝钦磊, 徐明坤, 等. 考虑动态因素影响的机器人磨削表面粗糙度预测[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(3): 110-122.

GUO W J, HAO Q L, XU M K, et al. Dynamic factor-influenced surface roughness prediction in robotic grinding[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(3): 110-122.

作者简介



王砚麟(通信作者), 2017年于兰州交通大学获得硕士学位, 2022年于哈尔滨工程大学获得博士学位。现为兰州理工大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为特种机器人技术。

E-mail: wangyanlin@lut.edu.cn.

Wang Yanlin (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Lanzhou Jiaotong University in 2017, and his Ph. D. degree from Harbin Engineering University in 2022. He is currently an associate professor and master's advisor at Lanzhou University of Technology. His main research interest includes special robot technology.



苏政方, 2024年于河南工程学院获得学士学位。现于兰州理工大学攻读硕士学位, 主要研究方向为机电与液压控制系统、特种机器人技术。

E-mail: 13849078682@163.com.

Su Zhengfang received his B. Sc. degree from Henan Institute of Engineering in 2024. He is currently pursuing a master's degree at Lanzhou University of Technology. His main research interests include electromechanical and hydraulic control systems, special robotics technology.



颜俊杰, 2018年于兰州交通大学获得硕士学位。现为甘肃路桥绿色智慧建造研究院智能装备中心主任, 主要研究方向为建筑科学与工程。

E-mail: 332633896@qq.com.

Xie Junjie received his M. Sc. degree from Lanzhou Jiaotong University in 2018. He is currently a director of the Intelligent Equipment Center at the Green and Intelligent Construction Research Institute of Gansu Road & Bridge Group. His main research interest includes building science and engineering.