

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2020.06.003

# FDM 零件表面粗糙度偏最小二乘回归建模研究

黄昕龙<sup>1</sup>,花海燕<sup>2</sup>,陈世辉<sup>2</sup>

(1.福建江夏学院 工程学院,福建 福州 350108;2.福建工程学院 机械与汽车工程学院,福建 福州 350118)

**摘要:**产品的表面质量差严重制约了熔融沉积成型(fused deposition modeling,FDM)工艺的发展,通过粗糙度成型机理构建参数模型是提升FDM成型件表面质量的重要途径。文章以某FDM打印设备成型件的水平表面粗糙度为例,通过探讨参数三次曲线与多段直线拟合的丝宽模型,利用粗糙度的几何机理提出了基于3个主要工艺参数的回归模型,采用样条变换的非线性偏最小二乘回归(partial least squares,PLSR)建立对所选参数的有效预测模型,并对建模中未覆盖的不同打印参数下的实验数据样本进行校验,分析工艺参数对水平表面粗糙度的影响。通过以上研究方法,提高了水平表面粗糙度预测效率,获取了相关的经验知识。

**关键词:**FDM;粗糙度;参数三次曲线;丝宽模型;PLSR

中图分类号:TP391.7

文献标志码:A

文章编号:1672-4348(2020)06-0524-06

## Research on surface roughness modeling for FDM part based on partial least squares regression

HUANG Xinlong<sup>1</sup>, HUA Haiyan<sup>2</sup>, CHEN Shihui<sup>2</sup>

(1. School of Engineering, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** The low surface quality of products seriously affects the development of the fused deposition modeling (FDM) process. It is a very effective way to improve the surface roughness of FDM molded parts by constructing a parameter model through the roughness forming mechanism. The roughness of the horizontal surface in some FDM printing device was taken as an example. Based on the geometric mechanism of roughness, a regression model based on three main process parameters was proposed by researching the profile of extruded filament section shape fitted by the parameter cubic curve and the multi-segment straight line. An effective prediction model for selected parameters was established by the method of nonlinear partial least squares regression (PLSR) based on spline transformation afterwards. In order to verify the model, the experimental data which were not included in the samples of the regression model under different process parameters were tested. The influence of process parameters on the horizontal surface roughness was analyzed. Thus, the efficiency of predicting horizontal surface roughness was improved and relevant experience and knowledge was obtained.

**Keywords:** fused deposition modeling (FDM); surface roughness; parametric cubic curve; extruded filament section shape; (PLSR) partial least squares regression

随着 FDM 工艺日益成熟,其应用也越来越广泛<sup>[1]</sup>。成型件的表面质量精度低,稳定性差等问题成为了制约该技术发展的主要因素之一。目

前,研究阶梯效应的成型机理,分析阶梯效应与打印工艺参数的改善关系成为主流方向<sup>[2-3]</sup>。国内外许多学者从成型层厚度、成型面角度以及打印

材料等角度出发进行了深入研究,取得了显著成果<sup>[4-7]</sup>。但仍然存在许多不足,如:阶梯效应无法针对水平成型面或垂直成型面的表面粗糙度给出有效的解释;现有很多学者对表面精度提出了一系列的优化策略,主要是基于用户可调整的初始工艺参数,虽然易于调节,但存在工艺参数的组合优化不可控,微小调整量对表面质量的影响波动大等问题。

基于此,本研究在 FDM 工艺挤出材料截面形状的基础上,深入探讨水平成型面的表面粗糙度形成几何机理,分析设备固有参数对表面质量的影响,为成型设备的优化与开发提供导向。

## 1 模型构建

### 1.1 丝材的宽度模型

针对挤出丝截面的形状,现有研究提出了鼓型模型的概念,即将截面丝宽的模型简化为二次曲线与多段直线的组合,通常采用抛物线或圆弧做近似计算<sup>[8]</sup>,虽然建模简单,但在复杂成型条件下不具备一般性。本文提出的挤出丝的理想垂直截面形状如图 1 所示,可将其划分为矩形部分与弧线部分,考虑到理想形状为双向轴对称,因此,只需研究曲线段  $\widehat{AB}$  部分对丝材宽度建模的影响。

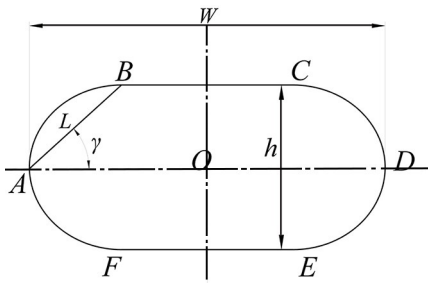


图 1 挤出丝截面模型

Fig.1 Cross-section of extruded filament

图 2 中挤出丝最大宽度为  $W$ ,打印分层高度为  $h$ ,曲线段两端点  $A$ 、 $B$  直线距离表示为  $L$ ,  $L$  与水平面夹角为  $\gamma$ 。考虑到一般曲线的几何不变性且易于定界,将曲线段  $\widehat{AB}$  三次参数化,如图 2 所示,其用参数表示形式如下:

$$p(u) = \sum_{i=0}^3 a_i \varphi_i(u) = \varphi(u) \mathbf{a}, u \in [0,1] \quad (1)$$

式中,  $\varphi(u) = (1, u, u^2, u^3)$  为参数曲线的多项式基;  $\mathbf{a} = (a_0, a_1, a_2, a_3)'$  为系数矢量。通过规定曲

线两端点  $p(0)$ 、 $p(1)$  和端点切矢  $r(0)$ 、 $r(1)$  来确定该系数矢量,可得系数矢量的矩阵形式为:

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 2 & -2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p(0) \\ p(1) \\ r(0) \\ r(1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

定义式中的参数点,即  $p(0) = (0,0)$ ,  $p(1) = (L,0)$ ,  $r(0) = (r_0 \cos \theta_0, r_0 \sin \theta_0)$ ,  $r(1) = (r_1 \cos \theta_1, -r_1 \sin \theta_1)$ , 其中,  $r_i > 0 (i = 0,1)$  表示端点切矢模量,  $\theta_i \in [0, \pi/2]$  表示端点切矢与端点连接线  $\overline{AB}$  间的夹角。

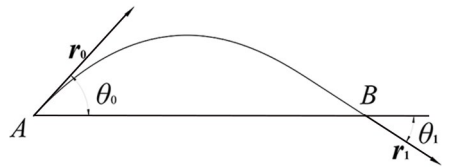


图 2 三次参数曲线

Fig.2 Cubic parametric curve

为方便确定三次曲线曲线段的几何特征与形状类型,引入  $u = 0,1$  两端点切矢的形状仿射不变量  $\lambda$  和  $\mu$ ,二者表示曲线段首尾两端切矢。对于呈现扁平状且无明显凸起的正常成型的丝材沉积截面,满足截面轮廓的三次曲线段内无拐点的几何形状特征,即此时曲线拐点不在  $0 \leq u \leq 1$  内,其拐点数为 1~2 个,若为 2 个拐点则存在单侧与双侧分布的情况。根据分布判别情况可知,三次曲线段的具体形状可用唯一的  $\lambda$  和  $\mu$  表示<sup>[9]</sup>。根据仿射不变量  $\lambda$  和  $\mu$  的定义,可用式(3)表示  $L$ :

$$L = \frac{r_0 \sin \theta_0}{\lambda} - \frac{r_1 \sin \theta_1}{\mu} \quad (3)$$

整理式(2)和式(3),可得曲线参数表达式为:

$$p(u) = [1 \quad u \quad u^2 \quad u^3] \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \\ a_{41} & a_{42} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,元素  $a_{ij}$ ,  $i = 2,3,4, j = 1,2$  为形状系数,与端点切矢及仿射不变量有关。在具体成型过程中,由端点切矢及仿射不变量确定的截面线宽曲线,所呈现的形态与打印工艺参数密切相关,因此在不考虑随机因素的情况下,可认为丝材的线宽

形态存在确定性,这是由现有 FDM 成型设备工艺参数的确定性及其合理性决定的。

最后,根据垂直截面形状,将曲线进行坐标变换,即逆时针转过  $\gamma$  角,利用坐标转换矩阵  $R(\gamma)$  的关系式可得旋转后的三次参数曲线  $p_i(u)$  :

$$p_i(u) = [x_i(u) \quad y_i(u)] =$$

$$\begin{bmatrix} x(u) & y(u) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma \\ -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} = p(u) \times R - 1(\gamma) \quad (5)$$

## 1.2 粗糙度几何机理

在 FDM 工艺中,相邻扫描线路上的挤出丝通过喷嘴的加热与挤压实现相互黏结,经历接触、扩散与黏结 3 个阶段。大量研究表明,丝材的挤出温度  $T_z$  越高,则 ABS 等聚合物共混物浸润的有效时间  $t$  越长,相邻丝材间的扩散程度与黏结强度也就越高,这在一定程度上对成型平面的微观形状造成影响。考虑到 ABS 材料熔融状态及高温分解碳化等问题,现有 FDM 打印设备的丝材挤出温度  $T_z$  一般控制在  $180 \sim 280^\circ\text{C}$ 。 $T_z$  与  $t$  关系可用关系式(6)表示:

$$t = g(T_z) = \frac{1}{\eta} \ln \frac{T_z - T_e}{T_g - T_e} \quad (6)$$

式中,  $T_g$  为热塑性材料的玻璃化转变温度,对于 ABS 材料而言,其玻璃化转变温度  $T_g = 94^\circ\text{C}$ ;  $T_e$  为打印设备成型室温度;  $\eta$  为热变化系数,与打印材料的热特性及截面形状有关。

根据实际水平成型面的成型情况,以直线往复扫描为例,假设打印平面不存在空间约束的情况,相邻沉积层截面的立面模型如图 3 所示。图 3 中描述一种均匀理想模型:  $A_c(j)$  为  $j$  段扫描路径打的横截面积;  $S_g$  为相邻丝材间隙;  $S_b$  为相邻丝材在有效扩散时间内的浸润面积。鉴于保持熔融沉积的均匀一致,打印喷头的挤出速度与扫描速度不变情况下,显然有  $A_c(1) = A_c(2) = \dots = A_c(j) = \dots = A_c(k)$  其中  $k$  为扫描路径总数;扫描路径间隔均匀,其扫描间距为  $b$ 。为保证成型强度和表面质量,相邻沉积层存在一定空间约束,即扫描间距  $b$  小于挤出丝最大宽度  $W$ ,从而使得间隙不会太大,对于商用设备,为保证打印质量稳定,扫描间距  $b$  为设计优选后的固定值。此时,类似于机加工中的残留面积,相邻成型面间的间隙作为轮廓谷,从而形成一种理论粗糙度。

考虑到理想打印表面的周期性与对称性,采

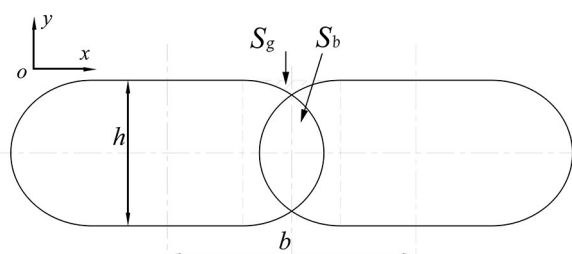


图 3 沉积层间隙立面图

Fig.3 Elevation of sedimentary interstitial spaces

用轮廓算术平均中线作为粗糙度评定基准线,选取评定长度为  $l_r$ 。根据定义,评定基准线将实际轮廓分为上、下部分,满足上部分面积之和  $F_U$  与下部分面积之和  $F_D$  相等,即  $F_U = F_D$ 。评定参数采用算术平均偏差  $R_a$  可表示为:

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |y(x)| dx = \frac{F_U + F_D}{l_r} \quad (7)$$

在评定长度内,间隙作为轮廓谷所占面积较小,评定基准线接近成型平面,此时  $R_a$  可近似表示为:

$$R_a = \frac{2k_r}{l_r} \left[ \frac{bh}{2} - \frac{1}{4} A_c^{(j)} - \frac{1}{4} A_c^{(j+1)} - \frac{1}{2} S_b - \Delta \right] \quad (8)$$

式中,  $k_r$  为单位取样长度内  $S_g$  个数。

因此,根据理论粗糙度评定机理,可以建立基于工艺参数的粗糙度非线性模型,其具体模型函数可表示为:

$$R_a = \frac{k_r bh}{l_r} - \frac{\pi}{2} \frac{k_r}{l_r} \frac{d_0^2}{b} \frac{v_e}{v_f} + \frac{2k_r}{l_r} \int_0^{g_u} y_i(u) \dot{x}_i(u) du + \delta_R = \frac{k_r b}{l_r} h - \frac{\pi k_r d_0^2 v_e}{2 l_r b} v_f^{-1} + \frac{2k_r}{l_r} \sum_{j=1}^5 \vartheta^j \psi_j(a_{kp}) [g(T_z)]^j + \delta_R \quad (9)$$

式中,  $d_0$  为打印喷嘴直径;  $v_e$  为挤出速度,其取值为打印设备缺省值;  $v_f$  为打印速度;  $\Psi_j = (a_{kp})$  为三次参数曲线形状系数构成的多项式函数;  $\vartheta$  为黏结速度相关系数,单位为  $s^{-1}$ ,考虑到丝材堆积时侧向的挤压力需要由路径规划中的丝材间距给出,当扫描路径间距  $b$  一定时,相邻丝材从浸润到粘结的速度保持不变,即在打印条件一定时可认为系数  $\vartheta$  为常量;  $\delta_R$  为误差项。

## 2 模型参数估计

根据上述对线宽模型及粗糙度机理的分析,可以确认可控变量与因变量粗糙度之间的回归模型。在模型方程中,  $h$ 、 $v_f$  和  $T_z$  作为非随机自变,  $R_a$  作为因变量, 分别记为  $x_i$  和  $y$ 。考虑在自变量非单一维数且自变量与因变量之间为非线性关系, 根据拟线性回归模型的思想, 对  $R_a$  的模型函数进行转换, 即

$$y = f_1(x_1) + f_2(x_2) + f_3(x_3) + \varepsilon \quad (10)$$

式中,  $f_i(x_i)$ ,  $i=1,2,3$  为自变量函数式;  $\varepsilon$  为误差项, 表示除了自变量之外干扰因素对  $Y$  的影响以及堆叠层的惯性误差。

显然模型中的自变量存在高阶及多元的情况, 因此, 对该模型的参数估计实际上是一个多元非线性回归的问题。对于这类回归问题中的参数估计最常用的方法有基于一般多项式的偏最小二乘回归、基于样条变换的偏最小二乘回归及基于有理插值样条的偏最小二乘回归<sup>[10]</sup>。自变量函数  $f_i(x_i)$  为已知函数关系式, 其中,  $f_1(x_1)$  为  $x_1$  上的线性函数;  $f_2(x_2)$  为  $x_2$  上的非线性函数, 可将自变量进行变量替换为  $v_i^{-1}$ , 记为新的  $x_2$ ;  $f_3(x_3)$  为  $x_3$  上的高阶非线性函数, 一般变量变换无法实现拟线性化, 同时为了有效避免龙格现象的出现, 需要结合低阶拟合函数求解。基于以上分析, 考虑到不同自变量的非线性程度不同, 为了能够获得较好的估计精度, 本文采用基于样条变换 (spline transformation, ST) 的偏最小二乘回归 (partial least squares, PLSR)。假设  $f_3(x_3)$  的样条拟合函数为  $\hat{f}_3(x_3)$ , 则有:

$$y = \beta_0 + f_1(x_1) + f_2(x_2) + \hat{f}_3(x_3) + \varepsilon \quad (11)$$

具体展开, 即:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \sum_{l=0}^{M+2} \beta_{3,l} \Omega_3 \left( \frac{x_3 - \xi_{3,l-1}}{h} \right) + \varepsilon \quad (12)$$

其中,  $\beta_j$ 、 $\beta_{3,l}$  为模型的待定参数, 并且

$$\Omega_3 \left( \frac{x_3 - \xi_{3,l-1}}{h} \right) = \frac{1}{3! h^3} \sum_{k=0}^4 (-1)^k C_4^k (x_3 - \xi_{3,l-3+k})^3_+ \quad (13)$$

式中,  $\xi_{3,l-1}$ 、 $h$ 、 $M$  分别为  $x_3$  上划分的区间分点、分段长度及分段个数, 其中

$$\begin{cases} \xi_{3,l-1} = \min(x_3) + (l-1)h \\ h = \frac{\max(x_3) - \min(x_3)}{M} \end{cases} \quad (14)$$

根据上述建模思路, 通过以下 5 个步骤即可计算获得模型参数。

(1) 对自变量  $x_3$  进行 3 次 B 样条变换。

1) 确定分段个数  $M$ , 求得区间分点  $\xi_{3,l-1}$ ;

2) 对  $x_3$  做 3 次 B 样条变换:

$$z_{3,l} = \Omega_3 \left( \frac{x_3 - \xi_{3,l-1}}{h} \right) \quad (15)$$

(2) 对所有自变量进行标准化处理, 即

$$\tilde{x}_j^{(p)} = \frac{x_j^{(p)} - \bar{x}_j}{s_j}, \tilde{z}_{3,l}^{(p)} = \frac{z_{3,l}^{(p)} - \bar{z}_{3,l}}{s_{3,l}}, \tilde{y}_i = \frac{y_i - \bar{y}}{s_y} \quad (l=0,1,\dots,M+2; j=1,2; i=1,2,\dots,n) \quad (16)$$

式中,  $\bar{x}_j$ 、 $\bar{z}_{3,l}$  和  $\bar{y}$  分别是  $x_j$ 、 $z_{3,l}$  和  $y$  的样本均值;  $s_j$ 、 $s_{3,l}$  和  $s_y$  分别是  $x_j$ 、 $z_{3,l}$  和  $y$  的样本方差。从而得到新的符合线性关系的函数关系式:

$$\tilde{y} = \sum_{l=-2}^{M+2} \alpha_{3,l} \tilde{z}_{3,l} + \varepsilon \quad (17)$$

(3) 对式 (17) 进行偏最小二乘回归 (PLS) 建模, 提出最多的 PLS 成分数, 并求得回归系数  $\alpha_{3,l}$ 。

(4) 将式 (16) 代入式 (17), 即  $\frac{y - \bar{y}_i}{s_y} =$

$$\sum_{l=-2}^{M+2} \alpha_{3,l} \frac{z_{3,l} - \bar{z}_{3,l}}{s_{3,l}} + \varepsilon, \text{ 最后整理得到:}$$

$$y = \beta_0 + \sum_{l=-2}^{M+2} \beta_{3,l} z_{3,l} + \varepsilon \quad (18)$$

(5) 将回归系数及样条函数变换式 (15) 代入式 (18), 得到  $y$  关于  $X$  非线性回归模型。

根据上述流程, 结合原始数据表 ( $X, y$ ) 可建立基于 3 次 B 样条变换所构建的局部非线性模型, 从而确定工艺参数与粗糙度二者间的函数关系。

## 3 实验与分析

### 3.1 实验数据获取

实验采用 ABS 作为打印材料, 使用封闭式的桌面级 FDM 打印机作为打印设备。如图 4 所示, 设计并打印 20 mm (长) × 20 mm (宽) × 15 mm (高) 的立方试件用于表面的粗糙度测量。由于试件底部作为支撑生成面, 表面质量无法控制, 因此选择试件的顶面, 测量仪器选用手持式表面粗糙度测量仪 (Mitutoyo SJ-210), 其最小测量精度



为 0.001 6 μm。



图 4 实验立方模型

Fig.4 Test specimens

结合所构建的粗糙度模型采用 3 因素 3 水平正交试验法进行实验,具体的因素水平见表 1。

表 1 因素水平表  
Tab.1 Factor levels

因素	水平		
	1	2	3
打印分层高度 $h/\text{mm}$	0.10	0.15	0.20
打印速度 $v_f/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	20	40	60
丝材挤出温度 $T_e/^{\circ}\text{C}$	260	270	280

3.2 PLSR 模型生成与分析

在多元线性回归中,提高自变量维度可在一定程度上降低标定误差,但是太高的成分数容易造成模型过度拟合,一般可通过不同成分数下的误差标准差  $S_h$  或预测误差标准差  $R_h$  进行判断

$$\left\{ \begin{aligned} S_h &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{hi})^2}{n}} \\ R_h &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{h(-i)})^2}{n}} \end{aligned} \right. \quad (19)$$

式中,  $S_h$  的大小反映了成分为  $h$  时因变量的误差标准差。一般而言,随着  $h$  的增大,  $S_h$  会逐渐减小,若  $S_h$  不减小反而增加时,表明成分个数太大已造成过度拟合;  $R_h$  则反映了成分数为  $h$  时,在交

叉舍一方法下计算的预测误差标准差,与  $S_h$  同理,若其减小不明显或者增加时,成分数的增加将造成过度拟合。

图 5 是  $h$  为 1 ~ 6 时,  $S_h$  与  $R_h$  的变化情况。从图 5 可看出,由于样本数据较少,在实际数据处理中无法通过  $R_h$  获取成分数的最优点,因此本文直接采用回归数据下的误差标准差进行最优判断,即选取成分数  $h = 4$ 。根据实验数据,以  $h$ 、 $v_f$ 、 $T_e$  作为自变量,并进行样条变换,同时以平面粗糙度  $R_a$  作为因变量,最后通过软件编写程序进行 PLSR 迭代计算,求得标准化回归方程

$$\begin{aligned} \tilde{y} = & 0.001\,2\tilde{x}_1 + 0.152\,4\tilde{x}_2 - 0.039\,8\tilde{z}_{3,0} - \\ & 0.039\,8\tilde{z}_{3,1} + 0.117\,1\tilde{z}_{3,2} + 0.156\,9\tilde{z}_{3,3} + \\ & 0.039\,8\tilde{z}_{3,4} - 0.117\,1\tilde{z}_{3,5} - 0.117\,1\tilde{z}_{3,6} \end{aligned} \quad (20)$$

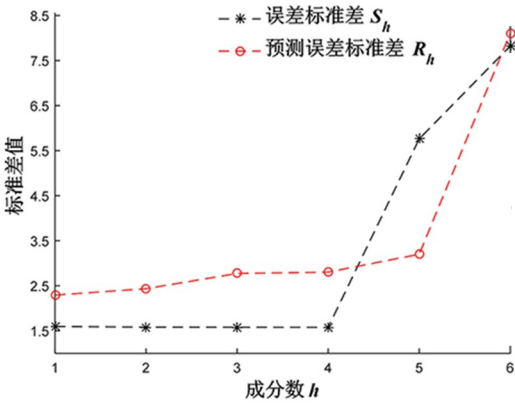


图 5 误差标准差  $S_h$  和预测误差标准差  $R_h$

Fig.5 Standard deviation  $S_h$  of error and standard deviation  $R_h$  of prediction error

对  $\tilde{y}$  逆标准化运算

$$\begin{aligned} y = & 4.874\,0 + 0.060\,3x_1 + 39.942\,9x_2 - \\ & 0.904\,1z_{3,0} - 0.226\,0z_{3,1} + 2.657\,5z_{3,2} + \\ & 0.890\,4z_{3,3} + 0.904\,1z_{3,4} - 0.664\,4z_{3,5} - \\ & 2.657\,5z_{3,6} \end{aligned} \quad (21)$$

最后将样条函数变换式 (21) 带入转化为实际参数,即求出  $R_a$ 。从回归方程可以看出,水平打印表面的粗糙度主要受打印速度与丝材挤出温度的影响,而打印分层高度对其影响有限。图 6 是在打印分层高度  $h = 0.06\text{ mm}$  时,根据回归方程模拟的水平面粗糙度,从图中可看出,随着打印速度增大,水平面粗糙度呈现整体增大的趋势;对于丝材挤出温度,则是在可调区间内存在最适温度,这与实验表现出来的结果基本相符。

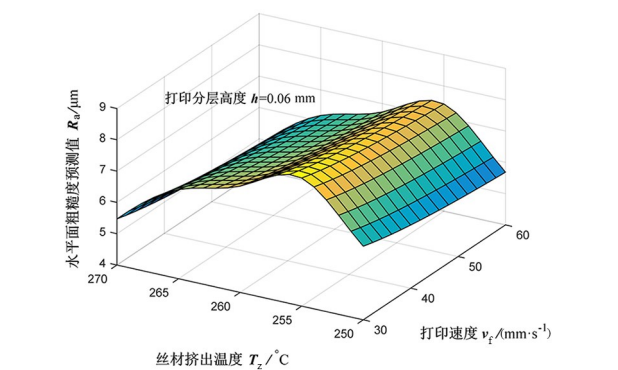


图 6 不同丝材挤出温度及打印速度下的水平面粗糙度变化曲面

Fig.6 Surface of horizontal roughness variation under different extrusion temperature and printing speed

3.3 数据校验

为验证回归模型的可行性,采用有别于回归实验方案下的自变量样本数据,并测得实际平面粗糙度值  $R_a$ 。通过回归模型获得预测打印试件的平面粗糙度  $R'_a$ 。预测平面粗糙度  $R'_a$  与实测平面粗糙度值  $R_a$  对比的散点图如图 7 所示。图 7 中,以平面粗糙度的实测值为横坐标,以预测值为纵坐标取得对比点,并用“x”表示,这些点大部分都分布在参考线附近,表明对于新的参数方案样本点,回归模型可获得较好的预测精度。

4 结语

通过提出一种基于参数三次曲线与多段直线

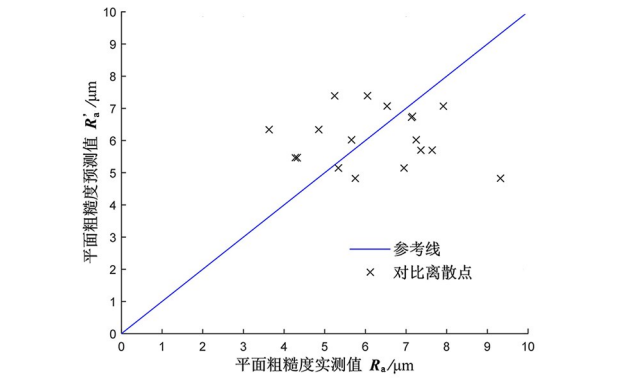


图 7 PLSR 模型预测值与实测值的对比结果

Fig.7 Comparison results of predicted values and measured values with the PLSR model

拟合的丝宽模型,结合粗糙度的几何机理,对 FDM 打印件的水平表面粗糙度进行建模,得到了水平表面粗糙度的一般理论模型,并在此分析上,从多个加工参数中选择 3 个主要参数作为控制变量,并通过基于样条变换的非线性偏最小二乘回归(PLSR),实现了粗糙度参数预测模型的建立。PLSR 模型较为直观明了地解释了主要参数对水平面粗糙度的影响程度与方向。最后通过不同的实验样本数据对回归预测模型完成了校验,获得了较好的预测精度。该分析方法从 FDM 成型件的水平表面粗糙度出发,为 FDM 打印设备的设计与调试提供理论依据与重要参考,提高了打印质量预测的效率。

参考文献:

[1] ALAFAGHANI A, QATTAWI A, ABLAT M. Design consideration for additive manufacturing: fused deposition modelling [J]. Open Journal of Applied Sciences, 2017, 7(6): 291-318.

[2] RAYEGANI F, ONWUBOLU G. Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE) [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(1/2/3/4): 509-519.

[3] 龚运息,陈晨,夏名祥,等. FDM 3D 打印模型表面阶梯效应的分析[J]. 制造技术与机床, 2016(4): 27-30.

[4] 王玉,陈子谦,李后起,等. 增材制造中耦合零件表面粗糙度及支撑面积的建造方向优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 1180-1188.

[5] RAJAN J, SUGAVANESWARAN M, PRASHANTHI B, et al. Influence of vapour smoothing process parameters on fused deposition modelling parts surface roughness at different build orientation[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 22: 2772-2778.

[6] LALEGANI M, ARIFFIN M, ISMAIL M. Effects of CNC machining on surface roughness in fused deposition modelling (FDM) products[J]. Materials, 2020, 13(11): 2608.

[7] PRAMANIK D, MANDAL A, KUAR A. An experimental investigation on improvement of surface roughness of ABS on fused deposition modelling process[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 26: 860-863.

[8] 潘鑫龙,陈元枝,邓艳. FDM 的出丝模型完善和补偿方法优化研究[J]. 精密制造与自动化, 2015(1): 31-34.

[9] 刘植,李晨,谢进,等. 一类双参数三次 Bézier 曲线的形状分析[J]. 图学学报, 2015, 36(3): 356-362.

[10] 王惠文,吴载斌,孟洁. 偏最小二乘回归的线性与非线性方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 191-215.