

文章编号 1004-924X(2010)07-1620-09

振动诱导聚合物塑化过程中熔体温度分布的预测

张冬至, 杨艳娟, 蔡 军

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要:在振动力场诱导聚合物塑化成型作用下,建立了聚合物熔融挤出过程中的熔体温度分布模型,研究了模头温度、振动力场的振幅、频率等工艺参数对挤出过程中熔体温度的影响。提出了基于多项式和高斯 RBF 核函数变换的两种非线性岭回归模型(PT-RR 和 GRBF-RR),并对具有非线性、非等温、强耦合特征的熔融过程熔体温度分布进行研究。该建模方法实现了多变量输入样本的高维特征空间非线性映射与重构,充分挖掘了多影响因素之间的耦合信息。仿真实验结果表明了 PT-RR 和 GRBF-RR 模型的有效性,其回归预测值与实验测量值之间的相关系数均值分别为 0.994 0 和 1。由于 GRBF-RR 模型取得了满意的模型精度,本文基于对 GRBF-RR 模型的数值模拟分析了各影响因素对熔体温度分布的交叉耦合影响,表征了聚合物熔融挤出成型过程中熔体温度分布的规律。该项研究可为提高精密挤出制品质量及优化配置各工艺参数提供决策依据。

关键词:聚合物;熔体温度;非线性变换;模型预测;数值模拟

中图分类号:TQ320.66;TP391.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101807.1620

Prediction of melt temperature distribution in vibration induced polymer plasticization

ZHANG Dong-zhi, YANG Yan-juan, CAI Jun

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Melt temperature distribution models for melting and plasticizing process of polymer materials were presented in vibration field induced extrusion, and the influences of process parameters such as die temperature, vibration amplitude and frequency on the melt temperature were investigated. Two kinds of ridge regression models based on the nonlinear transforms of polynomial and Gaussian RBF (PT-RR and GRBF-RR) were established to predict the melt temperature distribution with the nonlinear, non-isothermal properties and strong-coupling extrusion. The two models have fulfilled the nonlinear mapping and reconstruction of high-dimension feature space from multi-variable input samples, and obtained the coupling relations among multi-factor influences by the numerical simulation based on GRBF-RR. The simulation and experimental results show that the two models are valid and the correlation coefficients between the predicted values and that measured values are 0.994 0 and 1 for PT-RR and GRBF-RR, respectively. As the GRBF-RR can offer higher model precision, it was

收稿日期:2009-12-29;**修订日期:**2010-03-02.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60801034);华南理工大学优秀博士学位论文创新基金资助项目(No. 200903023);华南理工大学聚合物成型加工工程教育部重点实验室开放课题基金资助项目(No. 20061004)

used to illuminate the influences of process parameters on the melt temperature distribution. Obtained results demonstrate that the model can provide a decision support for the quality control and process parameter optimization.

Key words: polymer; melt temperature; nonlinear transform; model prediction; numerical simulation

1 引言

近年来,以高速、高效和精密化为标志的聚合物挤出成型技术在国内塑料工业领域中得到了高度重视,聚合物塑化挤出机的性能得到显著提高,各种新工艺和新设备不断出现。20世纪90年代,瞿金平教授提出了电磁振动诱导聚合物动态塑化理论,首次将周期性振动力场引入聚合物挤出成型加工全过程,并研制出电磁动态塑化挤出机和电磁动态注塑机^[1-2]。在振动挤出机的熔融过程中,旋转螺杆在螺线管激振器周期性交变激励作用下作轴向振动,即复合脉动。振动力场的引入提高了挤出机的熔融能力、节能性能和制品质量,但使挤出机的熔融机理完全不同于传统熔融理论^[3-4]。因此,针对振动诱导聚合物挤出塑化过程的动态熔融性能研究应运而生。

在振动力场的作用下,动态熔融过程是一个非线性、非等温、强耦合的复杂时变系统,聚合物熔体中的压力分布、速度分布和温度分布都表现出很强的动态性和时间依赖性^[5]。刘跃军等基于恒速型毛细管动态流变装置对振动力场下聚合物成型过程中熔体非线性行为进行了研究,表明振幅和频率影响熔体的剪切应力、剪切速率和表观粘度^[6]。陈学峰等对振动力场下聚合物熔体挤出压力进行了实验研究,发现振幅和频率影响熔体的挤出压力变化^[7]。熔体温度分布作为熔融过程的重要指标,也是确保聚合物制品质量最为关键的工艺参数之一。各种制品的生产效率、表观质量、口模成型、模具强度和刚度指标等,均与熔体温度密切相关,而且熔体温度也会引起熔体黏度改变,进而造成压力和流动速率的变化^[8-9]。挤出成型过程中熔体温度的分布对于确定挤出机的熔融能力和各种影响因素,预测成型过程可能出现的突变现象及工艺参数优化具有重要意义^[10]。本文在前人工作的基础上,对振动诱导聚合物塑化过程中熔体温度分布进行了实验研究,提出了基于核函数变换的非线性岭回归的熔体温度分布

模型。研究了各工艺参数对聚合物挤出成型过程中熔体温度的影响规律,尤其是振动力场的振幅、频率对挤出熔体温度的影响规律,获取了挤出过程中聚合物熔体行为的变化特征,可为提高精密挤出制品质量及优化配置各工艺参数提供决策依据。

2 实验装置与数据采集

文中采用华南理工大学聚合物新型成型装备国家工程研究中心瞿金平教授等研制的聚合物电磁动态塑化挤出机为实验装置(如图1所示)。在该装置中,单螺杆借助轴向电磁激振装置产生轴向脉动。在振动力场下,对LLDPE(牌号:218 W,熔融指数:0.194 g/min)挤出过程熔体温度分布进行了实验研究。该装置包括加料段、熔融段、计量段、过渡段、模头段等5段加热区。前4段加热区温度分别设置为175,185,195,190℃,模头段温度设置可调(170~180℃)。单螺杆轴向振动频率设置5~10 Hz,振幅取0.25~0.75 mm。采用NiCr-NiSi热电偶丝交错铰接而成的法兰式网状温度传感器对熔体温度进行了多点分布式测量。在实验中,通过改变模头温度、螺杆振幅及频率三因素进行实验设计,并采用研华ADAM-6018数据模块对熔体温度进行多点分布式采集。



图1 聚合物电磁动态塑化挤出成型装置

Fig. 1 Equipment for electromagnetic dynamic plasticizing extrusion of polymer

3 熔体温度分布模型

电磁振动诱导聚合物挤出加工过程中, 聚合物熔体行为受到诸如加热温度、振动特性、挤出压力等多因素的影响, 动态熔融过程呈现非线性、非等温、强耦合性质^[11]。熔体温度分布预测可视为一个多输入多输出(MIMO)的复杂系统, 其输入输出特性描述为:

$$\begin{cases} y_1^{(k)} = f_1(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_m^{(k)}) + \epsilon_1^{(k)} \\ y_2^{(k)} = f_2(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_m^{(k)}) + \epsilon_2^{(k)} \\ \vdots \\ y_n^{(k)} = f_n(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_m^{(k)}) + \epsilon_n^{(k)} \end{cases}, \quad (1)$$

简记为:

$$\begin{cases} y_i^{(k)} = \Psi^{(k)} \omega_i + \epsilon_i^{(k)} \quad \text{其中 } i=1, 2, \dots, n \\ \min \Omega(\omega_i) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^n \epsilon_i^{(k)2} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^n (y_i^{(k)} - \Psi^{(k)} \omega_i)^2 \end{cases} \quad (3)$$

文中分别采用满足 Mercer 条件的交积多项式 $K(x_i, x_j) = x_i^u \cdot x_j^v (u \in \mathbf{N}, v \in \mathbf{N}, u+v \leq s)$ 和高斯 RBF 核函数 $\Phi(x_i, x_j) = e^{-\|x_i - x_j\|^2 / (2\sigma^2)}$ 作样本矩阵非线性变换, 将 $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^m$ 向高维特征空间映射以充分挖掘变量之间的耦合信息。

3.1 基于多项式变换的岭回归模型(PT-RR)

采用多项式非线性变换是一种较为有效又易于实施的方法, 即引入各自变量的高次项和交积项构造高阶多项式, 从而实现样本相空间重建^[12]。对于 s 阶多项式模型, 其多项式基函数集合为:

$$\tilde{\mathbf{X}} = \{x_i^u \times x_j^v \times \dots \times x_l^q \mid u+v+\dots+q \leq s, i, j, \dots, l \leq m, u, v, \dots, q \in \mathbf{N}\}$$

$$\mathbf{Y}^{(k)} = F(\mathbf{X}^{(k)}) + \mathbf{E}^{(k)}, \quad (2)$$

其中: $\mathbf{X}^{(k)} = [x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_m^{(k)}]$ 为多变量耦合因素输入向量; $\mathbf{Y}^{(k)} = [y_1^{(k)}, y_2^{(k)}, \dots, y_n^{(k)}]$ 为熔体温度多点分布输出向量; $F = [f_1, f_2, \dots, f_n]$, 分量 f_i 为表征熔体温度分布点 i 相应的非线性输出特性; $\mathbf{E}^{(k)} = [\epsilon_1^{(k)}, \epsilon_2^{(k)}, \dots, \epsilon_n^{(k)}]$ 为具有零均值和有限方差的独立噪声向量; 样本采集次序 $k=1, 2, \dots, p$, 其中 p 为样本容量。

为对 MIMO 非线性函数 $F(\mathbf{X}^{(k)})$ 进行有效描述, 采用样本矩阵非线性变换方法实现输入样本高维空间的非线性映射和重构, 然后基于岭回归(RR)方法进行线性建模并辨识模型参数。设 $\Psi^{(k)}$ 为样本矩阵重构空间, $W = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]$ 为模型参数, 则式(2)及其目标函数可表示为:

其空间元素个数为:

$$t = \frac{(m+s)!}{m! s!}. \quad (4)$$

在模型辨识时, 须满足样本容量 $p \geq t$, 方能保证模型的唯一性。多项式阶次过高时, 模型辨识参数随多项式阶次成级数增长, 将会引发维数灾难和过拟合问题, 影响模型的鲁棒性。文中采用二次变换将样本空间 $\mathbf{X}^{(k)} = [x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}]$ 作非线性变换和相空间重构, 其中 $x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}$ 分别为聚合物挤出成型过程中的模头温度、螺杆振动的振幅及其频率三项主要影响因素。 $\mathbf{Y}^{(k)} = [y_1^{(k)}, y_2^{(k)}, y_3^{(k)}, y_4^{(k)}]$ 为基于热电偶网测量的熔体温度分布值(本文取 4 点), 则模型的回归方程为:

$$\begin{bmatrix} y_1^{(1)} & y_2^{(1)} & y_3^{(1)} & y_4^{(1)} \\ y_1^{(2)} & y_2^{(2)} & y_3^{(2)} & y_4^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_1^{(p)} & y_2^{(p)} & y_3^{(p)} & y_4^{(p)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1^{(1)} & x_2^{(1)} & x_3^{(1)} & x_1^{(1)2} & x_2^{(1)2} & x_3^{(1)2} & x_1^{(1)} x_2^{(1)} & x_1^{(1)} x_3^{(1)} & x_2^{(1)} x_3^{(1)} \\ 1 & x_1^{(2)} & x_2^{(2)} & x_3^{(2)} & x_1^{(2)2} & x_2^{(2)2} & x_3^{(2)2} & x_1^{(2)} x_2^{(2)} & x_1^{(2)} x_3^{(2)} & x_2^{(2)} x_3^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_1^{(p)} & x_2^{(p)} & x_3^{(p)} & x_1^{(p)2} & x_2^{(p)2} & x_3^{(p)2} & x_1^{(p)} x_2^{(p)} & x_1^{(p)} x_3^{(p)} & x_2^{(p)} x_3^{(p)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{10} & \omega_{20} & \omega_{30} & \omega_{40} \\ \omega_{11} & \omega_{21} & \omega_{31} & \omega_{41} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega_{19} & \omega_{29} & \omega_{39} & \omega_{49} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_1^{(1)} & \epsilon_2^{(1)} & \epsilon_3^{(1)} & \epsilon_4^{(1)} \\ \epsilon_1^{(2)} & \epsilon_2^{(2)} & \epsilon_3^{(2)} & \epsilon_4^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \epsilon_1^{(p)} & \epsilon_2^{(p)} & \epsilon_3^{(p)} & \epsilon_4^{(p)} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\text{记为: } \mathbf{Y}_{p \times 4} = \mathbf{\Psi}_{p \times 10} \mathbf{W}_{10 \times 4} + \mathbf{E}_{p \times 4}, \quad (6)$$

在给定模型结构的情况下,其模型辨识的实质是普通最小二乘(OLS)参数估计问题。模型参数估计值 $\hat{\mathbf{W}}$ 满足正规方程组 $(\mathbf{\Psi}^T \mathbf{\Psi}) \hat{\mathbf{W}} = \mathbf{\Psi}^T \mathbf{Y}$, 求解得:

$$\hat{\mathbf{W}} = (\mathbf{\Psi}^T \mathbf{\Psi})^{-1} \mathbf{\Psi}^T \mathbf{Y}. \quad (7)$$

为消除基函数输出之间存在的潜在相关性或不同程度的复共线性,避免重构空间矩阵可能出现的亏秩现象,引入岭参数 α 改进式(7),用 $\mathbf{\Psi}^T \mathbf{\Psi} + \alpha \mathbf{I}$ 替代原来的 $\mathbf{\Psi}^T \mathbf{\Psi}$, 则模型参数 $\hat{\mathbf{W}}$ 的 RR 估计形式为:

$$\hat{\mathbf{W}} = (\mathbf{\Psi}^T \mathbf{\Psi} + \alpha \mathbf{I})^{-1} \mathbf{\Psi}^T \mathbf{Y}. \quad (8)$$

3.2 基于高斯 RBF 变换的岭回归模型 (GRBF-RR)

径向基函数(Radial basis function, RBF) 是以待测点 x_i 与样本点 x_j 之间的欧氏距离为自变量的一类非线性单调函数,其中最常用的是 Gaussian RBF 核函数。任何函数在理论上都可以由一组径向基函数的线性叠加来表示^[13]。RBF 神经网络建模虽然可以处理复杂非线性问题,但网络训练过程较为复杂^[14-15]。基于 RBF 突出的非线性映射能力,本文首先通过 GRBF 变换重构输入样本核空间,引入参数 w_{ij} 建立核空间基

函数与目标输出 Y 之间的数学模型,然后采用 RR 方法辨识模型参数。文中 GRBF-RR 模型结构如图 2 所示。

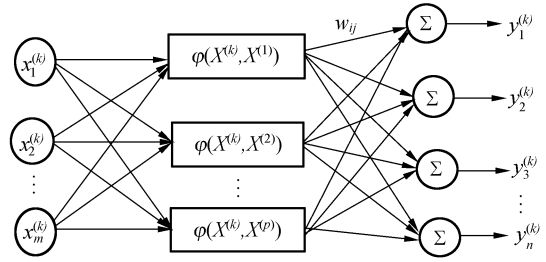


图 2 GRBF-RR 模型结构示意图

Fig. 2 Structure sketch of GRBF-RR model

设建模样本 $\mathbf{S}^{(k)} = \{(\mathbf{X}^{(k)}, \mathbf{Y}^{(k)})\}$, 其中 $\mathbf{X}^{(k)} = [x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_m^{(k)}]$; $\mathbf{Y}^{(k)} = [y_1^{(k)}, y_2^{(k)}, \dots, y_n^{(k)}]$, $k = 1, 2, \dots, p$ 。本文根据输入样本容量确定 GRBF 基函数的数目,分别以 $\mathbf{X}^{(i)} |_{i=1,2,\dots,p}$ 为 GRBF 核函数中心,则 GRBF 基函数构造为:

$$\varphi(\mathbf{X}^{(k)}, \mathbf{X}^{(i)}) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{X}^{(k)} - \mathbf{X}^{(i)}\|^2}{2\sigma^2}\right). \quad (9)$$

根据实际问题,文中取 $m = 3, n = 4$, 对于样本容量为 p 的建模样本,可得到模型回归方程为:

$$\begin{bmatrix} y_1^{(1)} & y_2^{(1)} & y_3^{(1)} & y_4^{(1)} \\ y_1^{(2)} & y_2^{(2)} & y_3^{(2)} & y_4^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_1^{(p)} & y_2^{(p)} & y_3^{(p)} & y_4^{(p)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi(\mathbf{X}^{(1)}, \mathbf{X}^{(1)}) & \varphi(\mathbf{X}^{(1)}, \mathbf{X}^{(2)}) & \dots & \varphi(\mathbf{X}^{(1)}, \mathbf{X}^{(p)}) \\ \varphi(\mathbf{X}^{(2)}, \mathbf{X}^{(1)}) & \varphi(\mathbf{X}^{(2)}, \mathbf{X}^{(2)}) & \dots & \varphi(\mathbf{X}^{(2)}, \mathbf{X}^{(p)}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi(\mathbf{X}^{(p)}, \mathbf{X}^{(1)}) & \varphi(\mathbf{X}^{(p)}, \mathbf{X}^{(2)}) & \dots & \varphi(\mathbf{X}^{(p)}, \mathbf{X}^{(p)}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_{11} & w_{21} & w_{31} & w_{41} \\ w_{12} & w_{22} & w_{32} & w_{42} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{1p} & w_{2p} & w_{3p} & w_{4p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_1^{(1)} & \epsilon_2^{(1)} & \epsilon_3^{(1)} & \epsilon_4^{(1)} \\ \epsilon_1^{(2)} & \epsilon_2^{(2)} & \epsilon_3^{(2)} & \epsilon_4^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \epsilon_1^{(p)} & \epsilon_2^{(p)} & \epsilon_3^{(p)} & \epsilon_4^{(p)} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\text{记为: } \mathbf{Y}_{p \times 4} = \mathbf{\Phi}_{p \times p} \mathbf{W}_{p \times 4} + \mathbf{E}_{p \times 4}, \quad (11)$$

采用 RR 方法求解模型参数为:

$$\hat{\mathbf{W}} = (\mathbf{\Phi}^T \mathbf{\Phi} + \beta \mathbf{I})^{-1} \mathbf{\Phi}^T \mathbf{Y}. \quad (12)$$

岭参数 β 的引入突破了 OLS 方法无法处理非线性问题的局限性。辨识该类模型的关键在于确定岭参数的最优值,进而求取模型参数。设模型回归值 $\hat{y}_i^{(k)} = \mathbf{\Phi}^{(k)} w_i(\beta)$, 模型参数是岭参数的单变量函数,可通过求取如下目标函数的极小值而优化确定,即:

$$\min \Omega(\beta) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^n (y_i^{(k)} - \hat{y}_i^{(k)})^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^n (y_i^{(k)} - \mathbf{\Phi}^{(k)} w_i(\beta))^2. \quad (13)$$

4 实验研究与数值模拟

4.1 模型仿真研究

在聚合物电磁动态塑化挤出过程中,在不同的模头温度、螺杆振动频率及其振动幅度等参数设置下,测得熔体温度分布实验数据如表 1 所示。

表 1 熔体温度分布实验测试值

Tab. 1 Experimental values of melt temperature distribution

Die temperature	Vibration frequency	Vibration amplitude	Melt temperature distribution			
			point A	point B	point C	point D
170	5	0.25	152.173 5	150.626 3	152.263 2	151.157 9
170	5	0.50	152.963 2	151.563 2	152.142 1	153.010 5
170	7	0.75	153.247 4	153.215 8	153.126 3	153.915 8
170	10	0.25	153.910 5	154.073 7	153.710 5	153.563 2
170	10	0.50	154.315 8	154.073 7	153.668 4	153.552 6
170	10	0.75	155.284 2	154.847 4	154.505 3	154.262 1
180	5	0.25	159.884 2	160.031 6	155.089 5	153.184 2
180	5	0.50	161.163 2	160.084 2	158.573 7	158.036 8
180	5	0.75	162.047 4	161.678 9	159.273 7	160.500 0
180	10	0.25	161.294 7	160.436 8	159.221 1	159.268 4
180	10	0.50	161.894 7	162.521 1	159.478 9	160.315 8
180	10	0.75	162.126 3	163.273 7	162.363 2	161.221 1

为消除各参量基准不同对模型稳健性的影响,对实验数据作归一化预处理:

$$x_i^{(k)} = \frac{x_i^{(k)} - \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p x_i^{(k)} + \delta}{x_{i,max} - x_{i,min} + \delta} \quad i = 1, 2, 3. \quad (14)$$

$$y_i^{(k)} = \frac{y_i^{(k)} - 150}{15} \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (15)$$

其中: $x_i^{(k)}$ 和 $x_i^{\prime(k)}$ 表示影响因素归一化前后的数值; $y_i^{(k)}$ 和 $y_i^{\prime(k)}$ 表示熔体温度归一化前后的数值; δ 为避免归一化数据为 0 而引入的小正数,文中取 $\delta = 0.01$ 。令 $X^{(k)} = [x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, x_3^{(k)}]$, $Y^{(k)} = [y_1^{(k)}, y_2^{(k)}, y_3^{(k)}, y_4^{(k)}]$, 以 $\{X^{(k)}, Y^{(k)}\}$ 作为建模样本,分别采用 PT-RR 和 GRBF-RR 方法进行仿真研究,以模型预测值和实测值之间的均方差来指导岭参数的优化,其相应的监督曲线如图 3、4 所示。

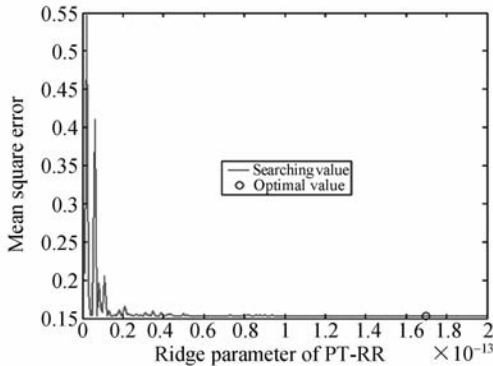


图 3 PT-RR 模型岭参数优化过程

Fig. 3 Optimal process of ridge parameter of PT-RR model

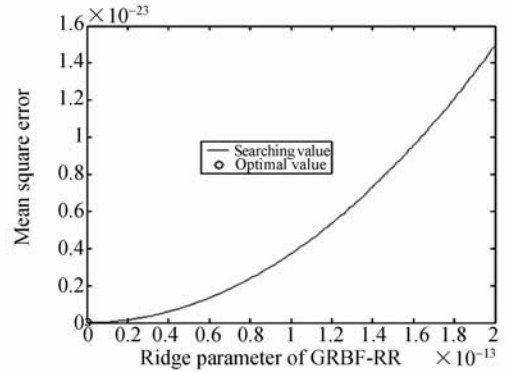


图 4 GRBF-RR 模型岭参数优化过程

Fig. 4 Optimal process of ridge parameter of GRBF-RR model

根据均方差最小原则,分别确定最优岭参数为 $\alpha_{opt} = 1.70 \times 10^{-13}$ 和 $\beta_{opt} = 0$ 。在最优岭参数下,依据式(8)和(12)建立熔体温度分布模型。两

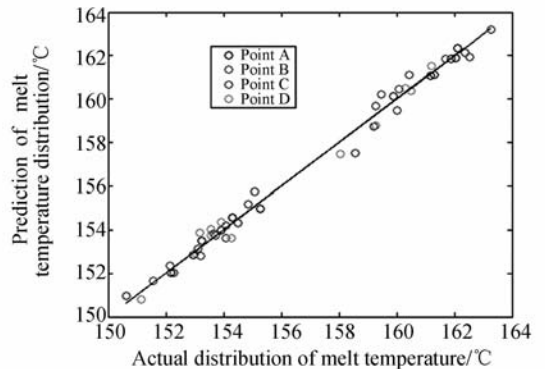


图 5 PT-RR 模型回归结果

Fig. 5 Regression results of PT-RR model

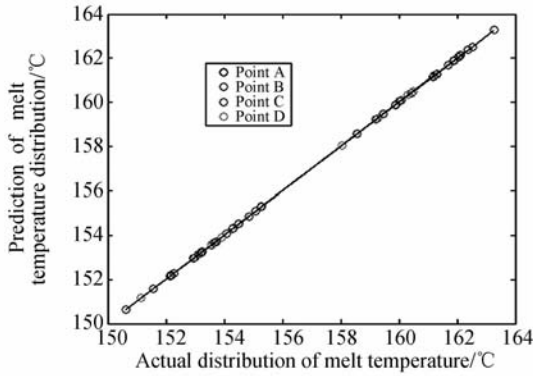


图 6 GRBF-RR 模型回归结果

Fig. 6 Regression results of RBF-RR model

模型的回归预测值与实验测量值之间的对比结果分别如图 5 和 6 所示。采用式(16)所示的相关系数(CC)指标评价两模型在各分布点的预测准确性,结果如表 2 所示。

$$R_i = \frac{(y_i^{(k)} - \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p y_i^{(k)})^T (\hat{y}_i^{(k)} - \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \hat{y}_i^{(k)})}{\left\| y_i^{(k)} - \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p y_i^{(k)} \right\| \cdot \left\| \hat{y}_i^{(k)} - \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p \hat{y}_i^{(k)} \right\|} \quad (16)$$

表 2 PT-RR 和 GRBF-RR 模型预测评价

Tab.2 Prediction and analysis for PT-RR and GRBF-RR models

Model	CCs of measured points				Mean of CCs
	A	B	C	D	
PT-RR	0.998 8	0.995 8	0.989 4	0.992 0	0.994 0
GRBF-RR	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0

实验仿真结果及预测评价表明了两模型的有效性,但在同等实验条件下,GRBF-RR 的模型精度明显优于 PT-RR 模型,而且在核空间重构中生成的基函数之间不存在复共线性,回归预测值和实验测量值具有较高的吻合性和一致性,有效揭示了各工艺参数对聚合物熔融挤出过程中熔体温度分布的影响规律。

4.2 数值模拟研究

模型仿真结果已表明,基于 GRBF 核变换的回归分析是一种更为有效的方法,更能表征聚合物动态挤出成型过程中熔体温度分布的内在规律。为研究单因素对熔体温度分布的影响,对聚合物动态挤出成型过程的下述 3 种工况条件进行数值模拟研究:①模头温度 $x_1 = 170 \sim 180 \text{ }^\circ\text{C}$,振

动频率 $x_2 = 7.5 \text{ Hz}$, 振动幅值 $x_3 = 0.50 \text{ mm}$; ②模头温度 $x_1 = 175 \text{ }^\circ\text{C}$, 振动频率 $x_2 = 5 \sim 10 \text{ Hz}$, 振动幅值 $x_3 = 0.50 \text{ mm}$; ③模头温度 $x_1 = 175 \text{ }^\circ\text{C}$, 振动频率 $x_2 = 7.5 \text{ Hz}$, 振动幅值 $x_3 = 0.25 \sim 0.75 \text{ mm}$ 。在各工况下,对熔体温度分布进行二维数值模拟,模拟结果分别如图 7、8、9 所示。由此可见,熔体温度各分布点在各输入变量激励下呈现非线性响应,具有工艺参数敏感依赖性。

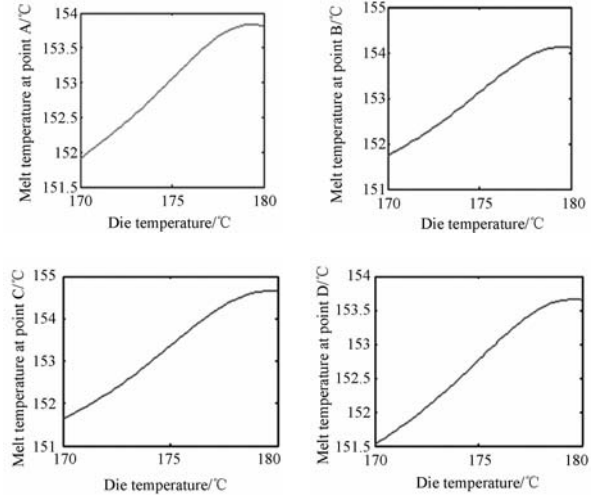


图 7 模头温度对熔体温度分布的影响 ($x_2 = 7.5 \text{ Hz}, x_3 = 0.50 \text{ mm}$)

Fig. 7 Influence of die temperature on melt temperature distribution ($x_2 = 7.5 \text{ Hz}, x_3 = 0.50 \text{ mm}$)

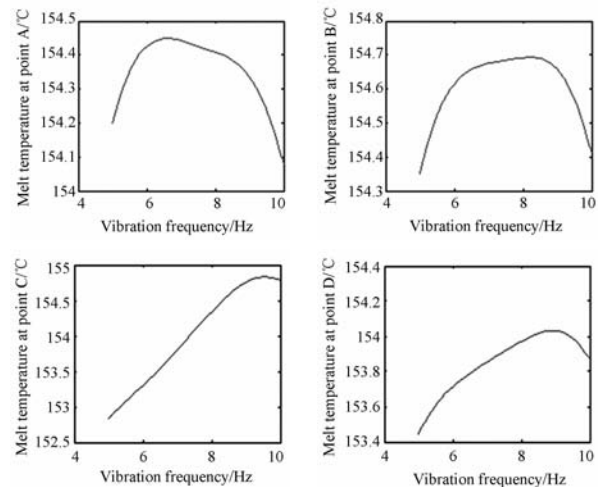


图 8 振动频率对熔体温度分布的影响 ($x_1 = 175 \text{ }^\circ\text{C}, x_3 = 0.50 \text{ mm}$)

Fig. 8 Influence of vibration frequency on melt temperature distribution ($x_1 = 175 \text{ }^\circ\text{C}, x_3 = 0.50 \text{ mm}$)

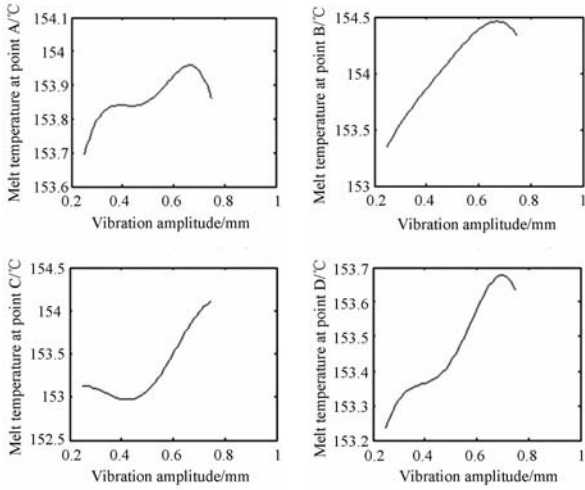


图 9 振动幅值对熔体温度分布的影响($x_1 = 175\text{ }^\circ\text{C}$, $x_2 = 7.5\text{ Hz}$)

Fig. 9 Influence of amplitude ratio on melt temperature distribution($x_1 = 175\text{ }^\circ\text{C}$, $x_2 = 7.5\text{ Hz}$)

为研究多因素对熔体温度分布的交叉影响,对聚合物动态挤出成型过程的下述 3 种工况进行数值模拟研究:①模头温度 $x_1 = 175\text{ }^\circ\text{C}$, 振动频率 $x_2 = 5 \sim 10\text{ Hz}$, 振动幅值 $x_3 = 0.25 \sim 0.75\text{ mm}$; ②模头温度 $x_1 = 170 \sim 180\text{ }^\circ\text{C}$, 振动频率 $x_2 = 7.5\text{ Hz}$, 振动幅值 $x_3 = 0.25 \sim 0.75\text{ mm}$; ③模头温度 $x_1 = 170 \sim 180\text{ }^\circ\text{C}$, 振动频率 $x_2 = 5 \sim 10\text{ Hz}$, 振动幅值 $x_3 = 0.50\text{ mm}$ 。在各工况下,对熔体温度分布进行三维数值模拟,模拟结果分别如图 10、11、12 所示。由此可见,熔体温度各分布点在多因素

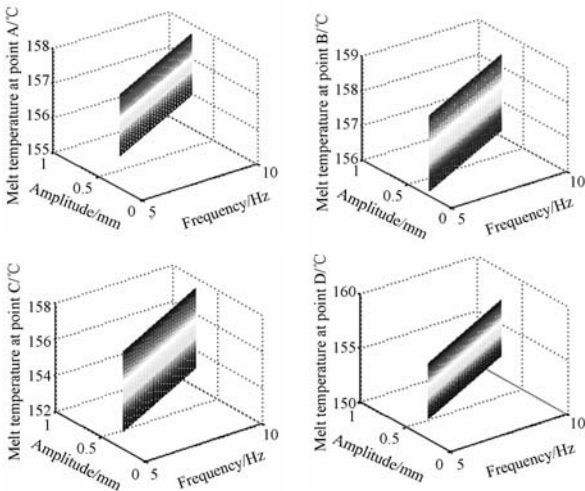


图 10 振动频率与振幅对熔体温度分布的影响($x_1 = 175\text{ }^\circ\text{C}$)
Fig. 10 Influence of vibration frequency and amplitude ratio on melt temperature distribution ($x_1 = 175\text{ }^\circ\text{C}$)

交叉激励下具有更为复杂的工艺参数耦合敏感性,进一步揭示了聚合物动态挤出成型过程中熔体温度分布预测是一个多参数强耦合的复杂非线性系统。

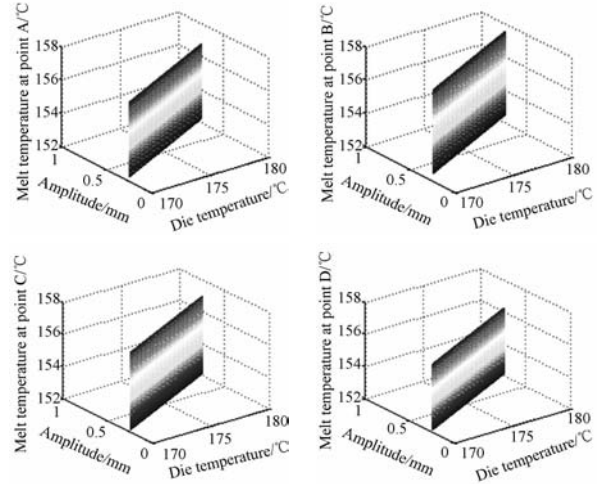


图 11 模头温度与振幅对熔体温度分布的影响 ($x_2 = 7.5\text{ Hz}$)
Fig. 11 Influence of die temperature and amplitude ratio on melt temperature distribution ($x_2 = 7.5\text{ Hz}$)

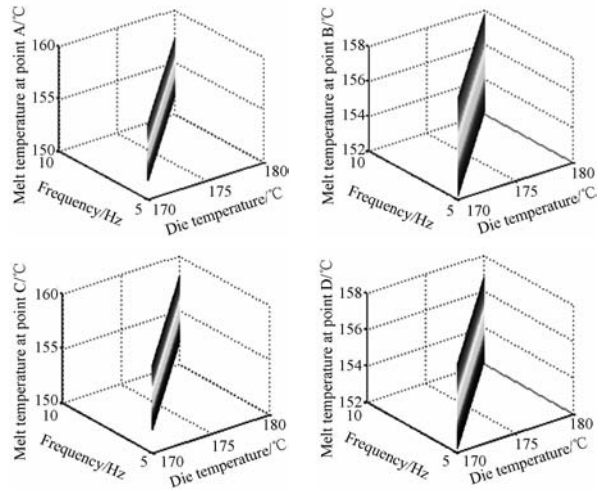


图 12 振动频率与模头温度对熔体温度分布的影响($x_3 = 0.50\text{ mm}$)
Fig. 12 Influence of vibration frequency and die temperature on melt temperature distribution ($x_3 = 0.50\text{ mm}$)

5 结 论

文中在实验建模的基础上,提出了基于核函数变换的非线性岭回归的熔体温度分布模型,通

过改变模头温度、振动力场的振幅、频率等工艺参数对聚合物熔融挤出过程中熔体温度的影响规律进行研究。仿真实验结果表明了 PT-RR 和 GRBF-RR 模型的有效性,实现了输入样本向高维特征空间映射以充分挖掘影响因素之间的耦合信息。基于 PT-RR 和 GRBF-RR 模型的回归预

测值与实验测量值之间的相关系数均值分别为 0.994 0 和 1。GRBF-RR 模型取得了满意的模型精度,能更准确地表征聚合物熔融挤出成型过程中熔体温度分布的内在规律,为优化挤出加工过程,合理配置各工艺参数,提高精密挤出制品质量提供决策依据。

参考文献:

- [1] 瞿金平. 聚合物挤出成型的新方法与新设备[J]. 中国塑料, 1997,11(3):69-73.
QU J P. Novel method and equipment for the polymer extrusion processing[J]. *China Plastics*, 1997, 11(3):69-73. (in Chinese)
- [2] 张绍华, 瞿金平, 曾广胜, 等. 纯振动场作用下聚合物的熔融塑化过程[J]. 塑料科技, 2009,37(5):45-48.
ZHANG SH H, QU J P, ZENG G SH, *et al.*. Melting and plasticating process of polymer under pure vibration force field [J]. *Plastics Science and Technology*, 2009,37(5):45-48. (in Chinese)
- [3] QU J P, ZENG G SH, FENG Y H, *et al.*. Effect of screw axial vibration on polymer melting process in single-screw extruders[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006,100(5):3860-3876.
- [4] ZENG G SH, QU J P, FENG Y H. Melting process and mechanism for vibration induced single-screw extruder[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007,104(4):2504-2514.
- [5] FENG Y H, QU J P, HE H ZH, *et al.*. Simulation of nonisothermal flow of melt during melting process of vibration-induced polymer extruder [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, 102(6):5825-5840.
- [6] 刘跃军, 瞿金平. 高分子材料动态成型过程中熔体非线性行为的研究[J]. 高校化学工程学报, 2004, 18(3):381-384.
LIU Y J, QU J P. Nonlinear behavior of polymer melt in the dynamic processing [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese University*, 2004,18(3):381-384. (in Chinese)
- [7] 陈学峰, 瞿金平. 振动力场作用下聚合物挤出压力的时频特性研究[J]. 塑料, 2008,37(2):78-82.
CHEN X F, QU J P. The research on the time-frequency properties of polymer extrusion pressure with vibration field[J]. *Plastics*, 2008,37(2):78-82. (in Chinese)
- [8] 杨艳娟, 蔡军. 塑料挤出成型过程中熔体温度测量和控制[J]. 塑料工业, 2008,36(5):5-8.
YANG Y J, CAI J. Measurement and control of melt temperature in plastics extrusion [J]. *China Plastics Industry*, 2008,36(5):5-8. (in Chinese)
- [9] 朱伟, 唐跃. 聚合物挤出加工中温度分布的计算、测量与控制[J]. 塑料, 2005,34(4):29-32.
ZHU W, TANG Y. Calculation, measurement and control on the temperature distribution in the polymer extrusion[J]. *Plastics*, 2005,34(4):29-32. (in Chinese)
- [10] RASID R, WOOD A K. Effect of process variables on melt temperature profiles in extrusion process using single screw plastics extruder[J]. *Plastics, Rubber and Composites*, 2003, 32(5):186-192.
- [11] 文生平, 赵国平, 瞿金平. 精密挤出成型过程中的多变量模糊解藕控制[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007,35(12):1-5.
WEN SH P, ZHAO G P, QU J P. Multivariable fuzzy decoupling control of precise extrusion processing[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 35(12):1-5. (in Chinese)
- [12] 张冬至, 夏伯锴, 曾蕾蕾, 等. 基于多传感器技术的原油含水率预测模型研究[J]. 化工自动化及仪表, 2006,33(4):61-63.
ZHANG D ZH, XIA B K, ZENG L L, *et al.*. Research on prediction model of water content in crude oil based on multi-sensor technology [J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2006,33(4):61-63. (in Chinese)
- [13] 周晓宇, 颜学峰, 钱峰. 基于径向基函数的非线性岭回归方法及仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2006,18(10):2738-2741.
ZHOU X Y, YAN X F, QIAN F. Nonlinear ridge regression modeling method based on radial basis function and its simulation research [J]. *Journal*

of System Simulation, 2006, 18(10):2738-2741.
(in Chinese)

- [14] 金靖, 张忠钢, 王峥, 等. 基于 RBF 神经网络的数字闭环光纤陀螺温度误差补偿[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2):235-240.
JIN J, ZHANG ZH G, WANG ZH, *et al.*. Temperature error compensation for digital closed-loop fiber optic gyroscope based on RBF neural network [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):235-240.

(in Chinese)

- [15] 洪喜, 续志军, 杨宁. 基于径向基函数网络的光电编码器误差补偿法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4):598-604.
HONG X, XU ZH J, YANG N. Error compensation of optical encoder based on RBF network [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4):598-604. (in Chinese)

作者简介:



张冬至(1981—),男,山东聊城人,博士研究生,2004年于山东理工大学获得学士学位,2007年于中国石油大学(华东)获得硕士学位,主要从事工业生产过程建模仿真控制与优化、智能信息处理方面的研究。E-mail: dz.z@mail.scut.edu.cn



蔡军(1982—),男,湖北天门人,硕士生,2006年、2009年于华南理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事电力管理仪表智能管理终端、嵌入式软件系统的研发与设计。E-mail: caijunjun2008@mail.scut.edu.cn



杨艳娟(1973—),女,黑龙江肇东人,副教授,1992年、1999年、2002年于哈尔滨工程大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事制造过程在线检测技术与故障诊断、智能控制方面的研究。E-mail: yyjscut@scut.edu.cn

●下期预告

小型 Offner 结构 Féry 棱镜超光谱成像系统的设计

程欣^{1,3},洪永丰¹,张葆¹,薛庆生^{2,3}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033;

3. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

为了减小超光谱成像系统的质量和体积,减小光谱成像的谱线弯曲,提出了一种新型基于 Offner 结构 Féry 曲面棱镜的超光谱成像系统。在该系统中,一对 Féry 曲面棱镜位于 Offner 中继系统的两臂,光束两次通过 Féry 棱镜进行分光,因此当获得指定大小的色散值时该结构具有比传统结构更小的质量和体积。为了减小可见近红外(VNIR)光谱通道的非线性色散,在该结构中再引入一对消色差火石 Féry 棱镜。设计了应用于可见近红外和短波红外(SWIR)两个光谱通道的超光谱成像系统,并给出了设计结果。分析结果表明该光谱成像系统在两个光谱通道内的谱线弯曲均小于 0.1 pixel,色畸变小于 0.045 pixel,非线性度小于 0.1,可满足机载或星载超光谱成像仪的要求。