

基于 Kriging 插值方法的钢轨打磨温度预测

李雨田¹,赵筹²

(1. 西安航空职业技术学院,陕西 西安 710089; 2. 山西中方森特建筑工程设计研究院,山西 太原 030024)

摘要:选取砂轮线速度和磨削速度为自变量、打磨温度为因变量,构建基于 Kriging 插值方法的钢轨打磨温度预测模型。预测结果发现:在同样的磨削速度下,当钢轨砂轮线速度增大后,其表面温度会随之上升;在同样的砂轮线速度下,如果磨削速度增大,则钢轨温度也会上升。钢轨所能达到的最高打磨温度是 571.6℃,最低温度是 429.8℃。该模型与测试结果的最大误差是 4.5%,由此可以推断本研究构建的 Kriging 模型可以精确预测各打磨参数下的钢轨磨削温度。

关键词:钢轨打磨;磨削温度;Kriging 插值法

中图分类号:TC58; U216.4 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2019)04-0069-03

Prediction of Rail Grinding Temperature Based on Kriging Interpolation Method

LI Yutian¹, ZHAO Chou²

(1. Xi'an Faculty of Aviation Technology, Xi'an 710089, China;

2. Shanxi Sinter Institute of Architectural Engineering Design, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The independent variables of grinding wheel line speed and grinding speed and grinding temperature dependent variables are selected to build the prediction model of grinding temperature of rail based on Kriging interpolation method. The prediction results show that the surface temperature of the rail grinding wheel increases at the same grinding speed with the increase of the line speed of the rail grinding wheel. At the same grinding wheel line speed, if the grinding speed of abrasive particles increases, the rail temperature also increases. The highest grinding temperature of the rail can be up to 571.6℃, its lowest temperature can be down to 429.8℃. The error between the model and test results is ±4.5%, so it can be inferred that the Kriging model constructed in this study can be used to accurately predict the grinding temperature of the rail under various grinding parameters.

Keywords: rail grinding; grinding temperature; Kriging interpolation method

0 引言

钢轨打磨时会产生大量的磨削热大约 90%的磨削热都堆积在磨削区^[1],短时间内导致打磨区温度快速上升。当温度过高时,灼伤钢轨,使钢轨的金相显微组织结构发生变化,从而引起钢轨在打磨初期阶段产生“发蓝”现象^[2],增加了钢轨的变形程度。为了防止此类现象发生,需为钢轨构建精确的打磨温度模型来预测钢轨的打磨温度,在此基础上对打磨的工艺参数进行合理优化,使打磨温度控制在允许的范围内。聂蒙等^[3]以 Matlab 软件为基础,构建了单打磨头和多打磨头共同作业时对应的打磨温度模型,分析了单打磨头和多打磨头联合作业两种情况下模型温度的变化规律。张青等^[4]利用有限元分析方法研究钢轨打磨的三维热弹性模型,探讨了不同打磨参数下钢轨温度变化的规律。ZHANG 等^[5]把每个打磨砂轮都看成是移动热源,采用有限元分析方法研究了多个打磨砂轮进行联合作业时钢轨打磨温度变化的规律,为进一步优化打磨模型提供参考。以上研究都对控制钢轨的打磨温度以及优化其打磨参数起到了明显的促进作用,但在每次打磨工艺调整之后,都需要重新设置复杂的打磨温度参数及构

建新的有限元模型并对其进行分析。由于打磨参数的设计周期过长,无法实时设计与优化钢轨的打磨工艺参数,降低了其整体的打磨效率。所以,有必要对钢轨的打磨参数和时间构建更加精确的预测模型,达到实时预测钢轨打磨温度的目的^[6-9]。本文构建了打磨磨粒磨削温度模型,通过 Kriging 插值法预测钢轨的打磨温度,实现了在各打磨参数下对应打磨温度的在线实时预测,为构建列车钢轨打磨参数在线优化系统提供理论支撑。

1 基于 Kriging 插值方法的钢轨打磨温度预测模型建立

1.1 Kriging 插值方法

Kriging 插值函数包括回归部分和非参数部分^[10]。

$$y(X) = F(\hat{\beta}, X) + Z(X) \quad (1)$$

其中: X 为设计变量; $F(\hat{\beta}, X)$ 为回归模型。

$$F(\hat{\beta}, X) = \hat{\beta}_1 f_1(X) + \hat{\beta}_2 f_2(X) + \dots + \hat{\beta}_n f_n(X) = \hat{\beta}_1^T f^T(X) \quad (2)$$

其中: $\hat{\beta}$ 为回归系数; $f(X)$ 为基函数; n 为训练样本点数。

$Z(X)$ 是方差为 σ^2 的随机过程,两插值点的协方差为:

$$\text{Cov}[Z(x_i), Z(x_j)] = \sigma^2 R[R(x_i, x_j)] \quad (3)$$

其中: σ^2 为随机方差; R 为 $n \times n$ 阶的对称正定对角矩阵; $R(x_i, x_j)$ 为任意样本点 x_i 与 x_j 间相关函数,采用 Gaussian 相关函数:

$$R(x_i, x_j) = \exp\left(-\sum_{k=1}^h \theta_k |x_k^i - x_k^j|^2\right) \quad (4)$$

式中: h 为变量数目; x_k^i 和 x_k^j 为样本点在 k 方向的横纵坐标, θ_k 为相关系数。

任意插值点 x 的响应值 $\hat{y}(x)$ 为:

$$\hat{y}(x) = \hat{\beta} + r(x)^T R^{-1}(Y - f\hat{\beta}) \quad (5)$$

其中: r^T 为长度为 n 的相关向量; f 为长度为 n 的单位列向量; $\hat{\beta} = (f^T R^{-1} f)^{-1} f^T R^{-1} y$ 。

1.2 模型参数设置

砂轮随打磨车辆沿钢轨长度方向运动,砂轮上由并排分布相同的圆锥形磨粒组成,图 1 所示为圆锥形磨粒进行钢轨打磨磨削几何模型,与钢轨接触的磨粒头部的尺寸为 $R2$,磨粒长度 $h=1\text{ mm}$,磨粒角度 $\theta=64.7^\circ$ 。实验选择的钢轨打磨砂轮材质是氧化铝,使用 U75Mn 钢轨材料,2 种材料的物理性能参数见表 1。

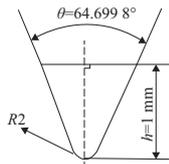


图 1 磨粒模型

表 1 氧化铝磨料和 U75Mn 钢轨材料物理性能参数

| 性能指标 | 氧化铝 | U75Mn 钢 |
|----------------------------------|------|---------|
| 密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$ | 3920 | 7860 |
| 杨氏模量 E/GPa | 375 | 212 |
| 泊松比 μ | 0.22 | 0.32 |

钢轨打磨过程中,砂轮随打磨车辆沿钢轨运动,需考虑打磨砂轮移动对打磨温度产生的影响。打磨车辆单次打磨的磨削量微小,在该微小磨削量下产生的热源带宽度有限,可以将之等效为一个线热源。基于预测保守性原则,将处于打磨砂轮最外沿磨粒的最高磨削温度作为该砂轮在对应转速下的标准打磨温度。

打磨砂轮的线速度 V 和打磨磨削速度(进给速度) v 共同影响钢轨的打磨温度。同时,打磨磨削速度 v 取决于砂轮的转速 n ,而砂轮线速度 V 则取决于打磨功率 p 。实验模型变量包括砂轮线速度 V 和磨削速度 v 自变量,打磨温度 T 因变量,来构建可以精确预测列车打磨最高温度的分析模型。选择 GMC-96X 列车作为打磨分析案例,砂轮线速度 $V(2500\text{ m/s}, 3000\text{ m/s}, 3500\text{ m/s}, 4000\text{ m/s})$ 和磨削速度 $v(28.5\text{ m/s}, 34.5\text{ m/s}, 41.8\text{ m/s}, 48.6\text{ m/s})$ 进行分析。

1.3 钢轨打磨温度预测模型建立

钢轨打磨温度 Kriging 预测模型构建方案如图 2 所示。为了确保构建的 Kriging 模型可以精确地模拟钢轨的打磨温度,同时对模型计算量进行精确控制,应对 Kriging 模型包含的样本数量进行合理设定。利用拉丁超立方分析方法^[11]来抽取各个样本点,从打磨参数的设计空间中得到具有均匀分布状态的样本点,确保 Kriging 插值方法可以从全局范围内获取样本数据。

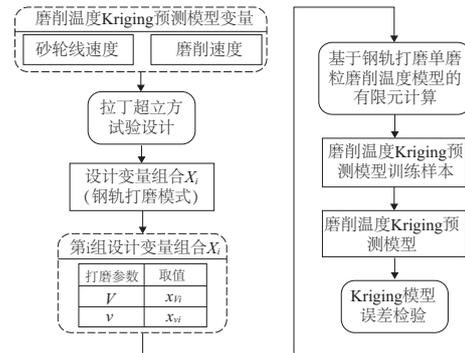


图 2 钢轨打磨温度 Kriging 预测模型构建方案

2 预测结果分析

模型通过拉丁超立方设计方法总共得到了 16 个打磨参数样本,由此产生 16 种不同的打磨模式,基于 Kriging 插值法的钢轨打磨温度预测,得到在不同的砂轮线速度条件下,计算的不同砂轮线速度 V 与磨削速度 v 下对钢轨进行打磨时产生的温度,如表 2 所示。

表 2 不同磨削速度 v 和砂轮线速度 V 下的钢轨打磨磨削温度 T ($^\circ\text{C}$)

| 磨削速度 $v/(\text{m}/\text{s})$ | 砂轮线速度 $V/(\text{m}/\text{s})$ | | | |
|------------------------------|-------------------------------|-------|-------|-------|
| | 2 500 | 3 000 | 3 500 | 4 000 |
| 28.5 | 429.8 | 435.3 | 451.3 | 478.5 |
| 34.5 | 448.6 | 477.2 | 496.3 | 509.6 |
| 41.8 | 493.2 | 499.2 | 518.6 | 531.2 |
| 48.6 | 509.8 | 522.2 | 541.6 | 571.6 |

从表 2 给出的结果可以发现:在同样的磨削速度下,当钢轨砂轮线速度增大后,其表面温度会随之上升;在同样的砂轮线速度下,如果磨粒磨削速度增大,则钢轨温度也会上升。

根据表 2 给出的各打磨模式下对应的钢轨打磨温度结果,构建钢轨的打磨温度 Kriging 预测模型,具体表达式为:

$$y(x) = \beta_i + r(x)R^{-1}(y_i - f\beta_i) \quad (6)$$

其中: r 为长度为 n 的相关向量; f 为长度为 n 的单位列向量; $\beta_i = (fR^{-1}f)^{-1}fR^{-1}y_i$; y_i 为训练温度值。

对表 2 所示结果进行三维图形表达见图 3 所示。由图 3 可知,在磨削速度介于 $28.5 \sim 48.6\text{ m/s}$ 范围以及砂轮线速度介于 $2500 \sim 4000\text{ r}/\text{min}$ 范围时,钢轨所能达到的最高打磨温度是 $571.6\text{ }^\circ\text{C}$,最低温度是 $429.8\text{ }^\circ\text{C}$ 。该温度值远远低于 U75Mn 钢轨材料中马氏体组织的再结晶温度,

可见基于Kriging插值方法的钢轨打磨温度预测模型预测结果具有一定的可行性。

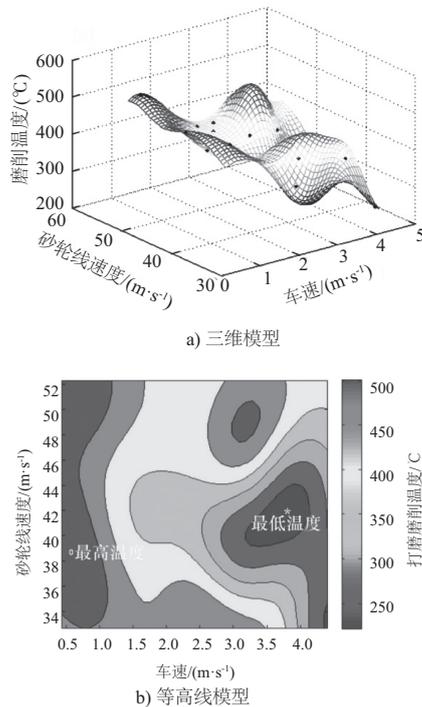


图3 钢轨打磨温度Kriging预测模型

之后,通过误差比对此模型预测精确性进行了验证,将28.5~48.6 m/s的磨削速度以及2500~4000 r/min的砂轮线速度范围的16组数据与各个打磨参数条件下钢轨打磨温度的实际测量结果进行比对,可以得到图4所示的Kriging预测模型统计误差数据。可以发现,该模型的最大误差是4.5%,由此可以推断本研究构建的Kriging模型可以精确预测各打磨参数下的钢轨磨削温度。

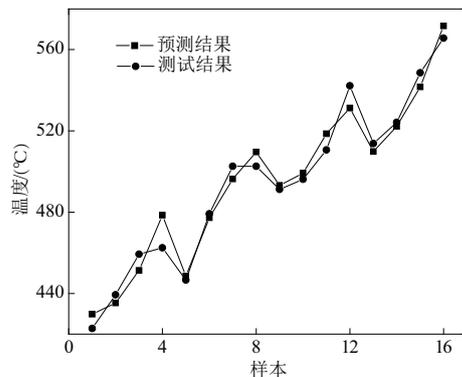


图4 Kriging模型预测误差分析

3 结语

1) 本文选取实验模型变量包括砂轮线速度 V 和磨削速度 v 为自变量,打磨温度 T 为因变量,构建基于Kriging插值方法的钢轨打磨温度预测模型。

2) 预测结果发现:在同样的磨削速度下,当钢轨砂轮线速度增大后,其表面温度会随之上升;在同样的砂轮线速度下,如果磨粒磨削速度增大,则钢轨温度也会上升。钢轨所能达到的最高打磨温度是571.6℃,最低温度是429.8℃。

3) 该模型与测试结果的最大误差是4.5%,由此可以推断本研究构建的Kriging模型可以精确预测各打磨参数下的钢轨磨削温度。

参考文献:

- [1] 李伯民, 赵波. 现代磨削技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [2] 贾春, 戴虹, 汪鹏举, 等. 钢轨现场焊打磨工艺对接头质量的影响 [J]. 电焊机, 2016, 46(8): 76-79.
- [3] 聂蒙, 李建勇, 沈海阔, 等. 钢轨打磨作业过程中磨削温度建模与仿真 [J]. 铁道学报, 2013, 35(10): 89-93.
- [4] 张青, 崔晓璐, 陈光雄, 等. 钢轨打磨热力耦合分析 [J]. 铁道学报, 2015, 37(5): 78-82.
- [5] Zhang Z Y, Shang W, Ding H H, et al. Thermal model and temperature field in rail grinding process based on a moving heat source [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 106: 855-864.
- [6] 智少丹, 李建勇, 樊文刚, 等. 钢轨打磨接触线模型研究 [J]. 铁道学报, 2013, 35(10): 94-99.
- [7] 商维, 王文健, 郭俊, 等. 基于SPH法的钢轨打磨单颗磨粒磨削 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2016, 36(3): 54-59.
- [8] Ohbuchi Y. Finite element modeling of chip formation in the domain of negative rake angle cutting [J]. Journal of Engineering Materials & Technology, 2003, 125(3): 324-332.
- [9] 究文涛, 李晓延, 孙建通, 等. 钢轨轨面堆焊温度场的数值模拟 [J]. 机械工程材料, 2015(8): 103-106.
- [10] Zeng Wei, Yang Yue, Xie Huan, et al. CF-Kriging surrogate model based on the combination forecasting method [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2016, 230(18): 3274-3284.
- [11] 王安麟, 孟庆华, 韩继斌. 基于拉丁超立方仿真试验设计的双涡轮变矩器性能分析 [J]. 中国工程机械学报, 2015, 13(4): 293-298.

收稿日期:2018-08-09