

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180114

基于热连轧实测数据的模型钢族层别优化

李维刚^{1,2}, 徐文胜¹, 马 威¹, 刘 翱^{2,3}

(1. 武汉科技大学冶金自动化与检测技术教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430081; 2. 武汉科技大学高温材料与炉衬技术国家地方联合工程研究中心, 湖北 武汉 430081; 3. 武汉科技大学服务科学与工程研究中心, 湖北 武汉 430065)

摘 要: 钢族层别是热连轧过程控制最重要的基础配置数据之一, 对轧制模型设定精度具有重要影响。现有的钢族层别划分以人工经验为主, 主要依靠碳当量来对钢族进行划分, 存在划分不合理、难以满足实际生产需要等不足。鉴于此, 提出一种新的线聚类算法来对钢族层别分类进行优化。首先, 大量收集某钢族层别的轧制历史数据; 其次, 绘制各带钢变形速率与变形抗力数据的散点图, 并观察数据散点的带状分布特征; 最后, 采用线聚类算法来优化钢族层别的分类, 挑选分离度较大的钢种到新的钢族。目前, 该技术已在宝钢1880等多个热连轧模型调试中使用, 对热连轧工程的达标达产和产品验证起到重要支撑作用。

关键词: 热轧带钢; 轧制模型; 钢族层别; 聚类分析; 优化

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)10-0054-07

Optimization for steel grade family of model based on measured data during hot continuous rolling

LI Wei-gang^{1,2}, XU Wen-sheng¹, MA Wei¹, LIU Ao^{2,3}

(1. Engineering Research Center for Metallurgical Automation and Measurement Technology of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. National-Provincial Joint Engineering Research Center of High Temperature Materials and Lining Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 3. Center for Service Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, Hubei, China)

Abstract: The steel grade family is one of the most important basic configuration data for the process control during hot continuous rolling. It has an important influence on the setting precision of rolling models. The existing divisions of the steel grade family are mainly based on the artificial experience, mainly relying on the carbon equivalent, which is unreasonable and difficult to meet the actual production needs. In view of this, a new line clustering algorithm to optimize the classification of steel grade family is proposed. First, collect a large number of rolling historical data from a certain steel grade family. Then, draw a scatter diagram of the strip steel about the deformation rate and the deformation resistance, and observe the distribution characteristics of the data. Finally, use the linear clustering algorithm to optimize the classification of the steel grade family, and select the steel with larger separation degree to an new steel group. At present, the technology has been used in the commissioning of several hot rolling models such as Baosteel 1880, which has played an important role in the standard production and the product verification of the hot rolling engineering.

Key words: hot rolled strip; rolling model; steel grade family; cluster analysis; optimization

钢族层别是热连轧过程控制模型最重要的基础配置数据, 是物性参数、工艺参数、模型参数与自适应参数最基本的索引号, 对模型设定精度具有重要影响^[1-3]。已有的钢族层别划分主要依赖于人工经验, 根据钢种大类、碳当量及特殊工艺路径等因素综

合确定, 经常出现划分不合理的情况, 要么划分过粗 (将本该分开的钢种归为同一层别), 要么划分过细, 导致模型自适应效果大打折扣, 尤其当钢种换层别轧制时问题突出, 模型设定精度显著下降^[4-6]。因此, 需要在现有钢族层别划分原则的基础上, 结合大量的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774219, 71701156); 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室开放课题基金资助项目(2017RALKFKT004); 武汉市青年科技晨光计划资助项目(2016070204010099); 湖北省自然科学基金资助项目(2017CFB427); 湖北省教育厅人文社会科学研究资助项目(17Q034)

作者简介: 李维刚(1977—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** liweigang.luck@foxmail.com; **收稿日期:** 2018-03-21

通讯作者: 刘 翱(1987—), 男, 博士, 讲师; **E-mail:** liuao@amss.ac.cn

轧制历史数据来研究热轧模型钢族层别的科学分类问题,确定一个“不大不小”的分类边界。

聚类分析是根据“物以类聚”的道理,对样品或指标进行分类的一种多元统计分析方法,聚类原则是同一类中的个体有较大的相似性,不同类别中的个体差异很大^[7-8]。一般聚类算法的聚类中心是一个点,划分聚类簇的距离依据是样本点到聚类中心点的欧式距离。本文根据热轧带钢变形抗力随变形速率呈带状分布的特征,提出一种新的线聚类算法。线聚类算法的聚类中心是一条函数曲线,线聚类计算的是样本点到曲线的最短距离,其算法复杂度更高。

本文基于实际生产中积累的大量轧制历史数据,采用线聚类算法来研究钢族层别的科学分类问题。对某钢族层别下的每卷带钢,在同一张图上绘制所有带钢的“变形速率-变形抗力”数据的散点图,根据散点的带状分布特征来确定钢族层别的优化分类。

1 传统的钢族层别分类方法及其不足

1.1 传统的钢族层别分类方法

带钢热连轧过程控制中,对于钢种差异即钢种软硬度的区分,通常按照钢种成分不同来进行分组。例如,某热连轧机组将钢种按碳质量分数和合金质量分数分为 26 个钢族^[9]:按碳当量为 0.020%~0.860%,钢种分为 15 个钢族,对于含有特殊元素或者采用特殊工艺的钢种,分为铁素体不锈钢、高锰钢、高镍钢、奥氏体不锈钢、高速工具钢等 11 个钢族。又如,宝钢 1 580 mm 热连轧机组采用碳当量来区分不同钢种的软硬度^[10],碳当量 C_{eq} 的计算公式为

$$C_{eq} = w(C) + \frac{w(Mn)}{6} \quad (1)$$

式中: $w(C)$ 、 $w(Mn)$ 分别为带钢中碳、锰元素的质量分数。

上述方法可以对钢种硬度的大类进行比较合理的区分,但对于同一大类中不同出钢记号(对应具体钢种可分辨的最小单位)间的硬度差异不能进行细致分辨,如果放在同一个类别中会导致不同出钢记号的带钢间模型学习系数相互干扰,降低了轧制力模型与辊缝模型的设定精度,影响热连轧穿带过程的轧制稳定性。

针对上述问题,国内钢铁企业进行了大量的探索工作与应用实践。如宝钢 1 880 热连轧机组根据

产品的高质量要求,对钢族分类进行了探索研究与工程应用^[1]。根据产品大纲,1 880 热轧产品分为碳钢、合金钢、热轧高强钢、冷轧高强钢、IF 钢和硅钢 6 个大类层别,每个大类内又有若干中分类和小分类,钢族层别代码 SFC 可写为

$$SFC = SFC1 \times 1\,000 + SFC2 \quad (2)$$

式中: $SFC1$ 、 $SFC2$ 分别为中分类、小分类代码。

通过 SFC 可以区分出不同的钢族,轧制模型参数的索引就是通过 SFC 来实现的。例如,碳钢的中分类标准见表 1,小分类标准见表 2。表 2 中的碳当量计算采用式(3)。

表 1 碳钢中分类划分标准

Table 1 Middle classification standard for carbon steel

大分类	中分类及 SFC1 代码	中分类方法
碳钢	1 低碳钢 1	$0 \leq w(C) < 0.045\%$
	2 低碳钢 2	$0.045\% \leq w(C) < 0.075\%$
	3 低碳钢 3	$0.075\% \leq w(C) < 0.100\%$
	4 中碳钢	$0.10\% \leq w(C) < 0.15\%$
	5 中碳钢	$0.15\% \leq w(C) < 0.20\%$
	6 IF 钢	$w(C) \leq 0.005\%$, 且 $w(Nb) > 0$ 或 $w(Ti) > 0$
	7 中高碳钢	$0.20\% \leq w(C) < 0.35\%$
	8 中高碳钢	$0.35\% \leq w(C) < 0.50\%$
	9 高碳钢(刀锯钢)	$w(C) \geq 0.50\%$

表 2 碳钢小分类划分标准

Table 2 Small classification standard for carbon steel

中分类 SFC1	小分类 SFC2/%			
	1	2	3	4
低碳钢 1	<0.10	0.10~0.20	0.20~0.30	≥ 0.30
低碳钢 2	<0.10	0.10~0.20	0.20~0.30	≥ 0.30
低碳钢 3	<0.10	0.10~0.20	0.20~0.30	≥ 0.30
中碳钢	<0.20	0.20~0.30	0.30~0.40	≥ 0.40
中高碳钢	<0.35	0.35~0.45	0.45~0.60	≥ 0.60
高碳钢	<0.65	0.65~0.75	0.75~0.85	≥ 0.85
IF 钢	<0.10	—	—	—

$$C_{eq} = w(C) + w(Mn)/6 + w(Si)/24 + w(Cr)/5 + w(V)/14 + w(Ni)/40 + w(Mo)/4 \quad (3)$$

式中: $w(C)$ 、 $w(Mn)$ 、 $w(Si)$ 、 $w(Cr)$ 、 $w(V)$ 、 $w(Ni)$ 、 $w(Mo)$ 分别为碳、锰、硅、铬、钒、镍、钼元素的质量分数。

1.2 现有钢族层别分类方法的不足

相对于传统方法,宝钢 1 880 热轧的做法已经有很大改进,但在实际生产中还是暴露出很多问题。例如,根据这个分类标准,1 880 热轧中分类为

1 的全部 62 个出钢记号中,被划分到小分类 2 中的只有 7 个,划分到 4 中的仅有 1 个,而划分到 3 中的则 1 个也没有,分布很不均匀。也就是说,小分类没有起到进一步细分的目的。可见,根据碳当量来划分小分类有不合理之处,寻找一个合理的分类边界值并不容易,即便通过优化边界值解决了不均匀分布的问题,依然存在另外一个问题:在同一个中分类中,也不是碳当量越大,热轧带钢的变形抗力就越大。图 1 所示为即便在相同的中分类中,且在变形温度、变形速率和压下率基本相同的条件下,变形抗力并非随着碳当量的增大而增大。为了过滤其他因素的影响,图 1 对变形温度、变形速率、压下率都取了一个较窄的过滤窗口。

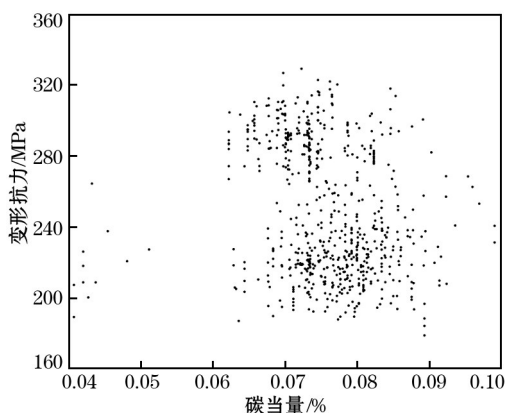


图 1 某低碳钢碳当量与变形抗力的关系

Fig. 1 Relationship between carbon equivalent and deformation resistance of low carbon steel

可见,热轧带钢的变形抗力与化学成分之间的关系非常复杂,通过简单计算碳当量来区分钢族层别的方法不能满足热连轧带钢高质量指标精度与轧制稳定性的要求。因此,需要寻找新的模型钢族层别划分策略。

2 基于线聚类的钢族层别优化

目前,热轧模型钢族层别大多依据碳当量与人工经验进行分类,划分结果往往不能满足实际生产的要求。本节基于实际生产中积累的大量轧制历史数据,对某钢族层别下的每卷带钢,绘制“变形速率-变形抗力”数据的散点图,观察数据散点的带状分布特征,并提出一种新的线聚类算法来确定钢族层别的优化分类。

首先,给出热轧模型钢族划分合理性的判别方法;其次,提出一种确定曲线聚类中心的线聚类算法;最后,介绍一个热连轧机组钢族层别优化的实际案例。

2.1 钢族划分合理性的判别方法

钢族层别可用于热连轧过程控制的多个方面,如 L2 过程控制模型、L1 基础自动化等,但最主要的用途是用于轧制力模型。这是因为轧线上使用的轧制力模型均为在理论上得到的简化模型,这些简化与条件假设限制了模型的设定精度。基于层别数据的自学习为提高轧制模型的计算精度提供了切入点,通过层别划分将轧制工况进行分组,一个层别对应一个自学习系数。每卷带钢轧制完成后,模型根据工况不断更新对应层别的自学习系数^[2]。

在轧制力模型中,又以变形抗力模型最为核心^[2]。因此,笔者通过观察变形抗力模型的表现来判断钢族层别划分的合理性,提出一种热轧模型钢族划分合理性的判别方法。

第 1 步,针对某钢族层别下的每卷带钢,根据模型自适应后计算(根据带钢穿带完成后获得的部分实测数据重新组织的轧制规程计算,与预计算对应)过程中获得的最新轧制过程实测数据(如实测的终轧厚度、终轧温度等),计算获得相应的变形速率与变形抗力,计算公式^[11-12]见式(4)~式(6)。

$$\varepsilon = \ln \frac{1}{1-r} = \ln \frac{H}{h} \quad (4)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon \cdot v_R}{\sqrt{R' \cdot (H-h)}} \quad (5)$$

式中: ε 为后计算获得的变形程度; $\dot{\varepsilon}$ 为后计算获得的变形速率; r 为机架压下率; H 、 h 分别为机架“等效实测”的入口厚度与出口厚度,根据机架间秒流量平衡方程及实测终轧厚度推算求得; v_R 为实测轧辊速度; R' 为轧辊压扁半径。

变形抗力计算公式为

$$Km^{POS} = (a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i) \cdot \exp\left(\frac{b_1}{t+273}\right) \cdot \varepsilon^{b_2} \cdot \dot{\varepsilon}^{b_3} \quad (6)$$

式中: Km^{POS} 为后计算获得的变形抗力; a_i 、 a_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 为模型待定参数; t 为推算的实测轧制温度; x_i 为热轧带钢各化学成分的质量分数; n 为化学成分个数。

第 2 步,根据实测的轧制力反求“等效实测”的变形抗力 Km^{ACT} ,计算公式为

$$Km^{ACT} = \frac{F^{ACT}}{W^{ACT} \cdot L_d^{ACT} \cdot Q_p^{ACT}} + a_b \cdot T_b^{ACT} + a_f \cdot T_f^{ACT} \quad (7)$$

$$L_d^{ACT} = \sqrt{R' \Delta h} \quad (8)$$

$$Q_p^{ACT} = a_{f1} + a_{f2} \cdot r + (a_{f3} + a_{f4} \cdot r + a_{f5} \cdot r^2) \cdot \sqrt{\frac{R'}{h}} \quad (9)$$

$$R' = \left(1 + \frac{16 \cdot (1-v^2) \cdot F^{ACT} \cdot 1000}{\pi \cdot E \cdot W^{ACT} \cdot \Delta h}\right) \cdot R \quad (10)$$

式中: F^{ACT} 为实测轧制力; W^{ACT} 为实测带钢宽度; L_d^{ACT} 为轧辊压扁弧长; Q_p^{ACT} 为应力状态系数; T_b^{ACT} 为实测后向张力; T_f^{ACT} 为实测前向张力; a_b 、 a_f 为张力影响系数; a_{F1} 、 a_{F2} 、 a_{F3} 、 a_{F4} 、 a_{F5} 为模型参数; ν 为泊松比; E 为弹性模量; Δh 为压下量; R 为轧辊原始半径。

第 3 步, 在同一张图上绘制 $(\dot{\epsilon}, Km^{\text{pos}})$ 和 $(\dot{\epsilon}, Km^{\text{act}})$ 数据对的散点图, 观察变形抗力数据散点的带状分布特征: 如果数据散点集中分布在一个带状范围内, 则该层别划分较为合理; 如果分散为几条明显分割的带状分布, 则该层别划分不合理, 需要进一步细分层别, 即将一部分不应该放入该层别的出钢记号拓展到新的钢族层别。

上述判别方法既可以用于确定某一钢族层别是否需要细分, 也可以对划分过细的钢族层别进行合并。对需要合并的多个钢族层别, 收集来自各钢族的大量轧制历史数据, 在同一张图上绘制全部带钢(含多个钢族)的“变形速率-变形抗力”数据对的散点图, 如果这些数据散点都集中分布在一个带状范围内, 即表明这些钢族层别可以合并。

2.2 线聚类算法

热轧带钢变形抗力 Km 与变形速率 $\dot{\epsilon}$ 之间存在近似幂函数关系, 见式(11)。

$$Km = C \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (11)$$

式中: C 、 m 均为待定参数。

为了便于分析过程的描述, 下面只取后计算的“变形速率-变形抗力”数据来进行说明。变形抗力数据 $(\dot{\epsilon}, Km^{\text{pos}})$ 分布在幂函数曲线 $Km = C \cdot \dot{\epsilon}^m$ 周围的程度越集中, 则说明该数据集内所有的出钢记号属于同一钢族的程度越好。因此, 可通过对数据集 $(\dot{\epsilon}, Km^{\text{pos}})$ 进行线聚类计算来找出需要划分到新层别的出钢记号。

针对“变形速率-变形抗力”数据分层带状分布的特征, 本文提出一种新的以聚类曲线为“聚类中心”的线聚类算法。该算法具有一般聚类算法的原理特征, 以相似性为聚类基础依据, 即在一个聚类簇中的样本之间的相似性比不同类之间的相似性高。线聚类算法与常见聚类算法类似的地方都是基于距离的聚类算法, 都会随机初始化一个“聚类中心”; 不同点在于一般聚类算法的聚类中心是一个点, 划分聚类簇的距离依据是样本点到聚类中心点的欧式距离; 而线聚类算法聚类中心是一条函数曲线, 线聚类计算的是样本点到曲线的最短距离, 还包含一层优化计算的过程, 算法复杂度更高,

故计算速度慢一些。

本文提出的线聚类算法流程如图 2 所示, 步骤如下: (1) 在数据集范围内随机初始化 k 条曲线作为聚类中心。由于本文分析的数据集存在 $Km = C \cdot \dot{\epsilon}^m$ 的关系, 所以随机初始化 k 条曲线即随机选取 k 组 C 、 m 系数值。(2) 计算所有样本点到这 k 条聚类中心线 $Km_{\text{cenj}} = C_j \cdot \dot{\epsilon}^{m_j}$ ($1 \leq j \leq k$) 的距离, 找到距离样本点最近的聚类中心线, 将其加入该簇。遍历完所有样本点后, 可将整个数据集分为 k 个簇, 即 k 个子集。(3) 采用最小二乘法分别对这 k 个簇的数据子集进行幂数曲线拟合, 更新出 C 、 m 系数, 即更新各聚类中心线, 再重复步骤(2), 直到前后两次迭代得到的聚类中心线一致, 停止迭代, 完成聚类计算。

其中, 上述步骤(2)中, 对任意样本 $X_i(Km_i, \dot{\epsilon}_i)$ ($1 \leq i \leq n$), 其到各聚类中心线的最短距离计算步骤如下。

(1) 计算 X_i 到第 j 条聚类中心曲线 $Km_{\text{cenj}} = C_j \cdot \dot{\epsilon}^{m_j}$ 上任意一点的距离函数 D_{ij}

$$D_{ij} = \sqrt{(Km_i - Km_{\text{cenj}})^2 + (\dot{\epsilon}_i - \dot{\epsilon})^2} \quad (12)$$

(2) 基于非线性最优化的一种算法——简单 Nelder-Mead 算法, 寻找 D_{ij} 的最小值 $\min D_{ij}$ 即为样本点 X_i 到第 j 条聚类中心曲线的最短距离。Nelder-Mead 算法是求多维函数极值的一种单纯形算法, 秉承“保证每一次迭代比前一次更优”的基本思想^[13]。因此, 点到曲线的最短路径可用 Nelder-Mead 算法来进行求解。

2.3 钢族层别优化案例分析

下面以宝钢 1 880 热轧的钢族层别 1001 为例来进行说明。选取来自该钢族层别的 3 000 条带钢数据, 根据上面的操作流程获得散点图如图 3 所示。可见: “变形速率-变形抗力”数据散点图存在两块分割比较明显的分布区域, 表明该钢族存在差异较为明显的 2 个类别, 需要进一步细分钢族层别。

根据图 3 的分布情况, 如果选择分成 2 类, 采用线聚类算法迭代 14 次后, 得到聚类结果如图 4 所示, 两条聚类中心线对应的参数为 $C_1 = 222.105$, $m_1 = 0.0019$; $C_2 = 252.807$, $m_2 = 0.0145$ 。可见, 图 3 中分割较远的数据点被分到 2 个类别, “•”形数据点均匀分布在聚类曲线 cluster_line1 ($Km_{\text{cenj}} = C_1 \cdot \dot{\epsilon}^{m_1}$) 周围, “×”形数据点均匀分布在聚类曲线 cluster_line2 ($Km_{\text{cenj}} = C_2 \cdot \dot{\epsilon}^{m_2}$) 周围。进一步追踪这些数据点所对应的出钢记号, 发现划分到第 1 类的出钢记号主要

为 AN0691D1、DP0161D1、AP0740D5 等, 划分到第 2 类的出钢记号主要为 AP1055E5。

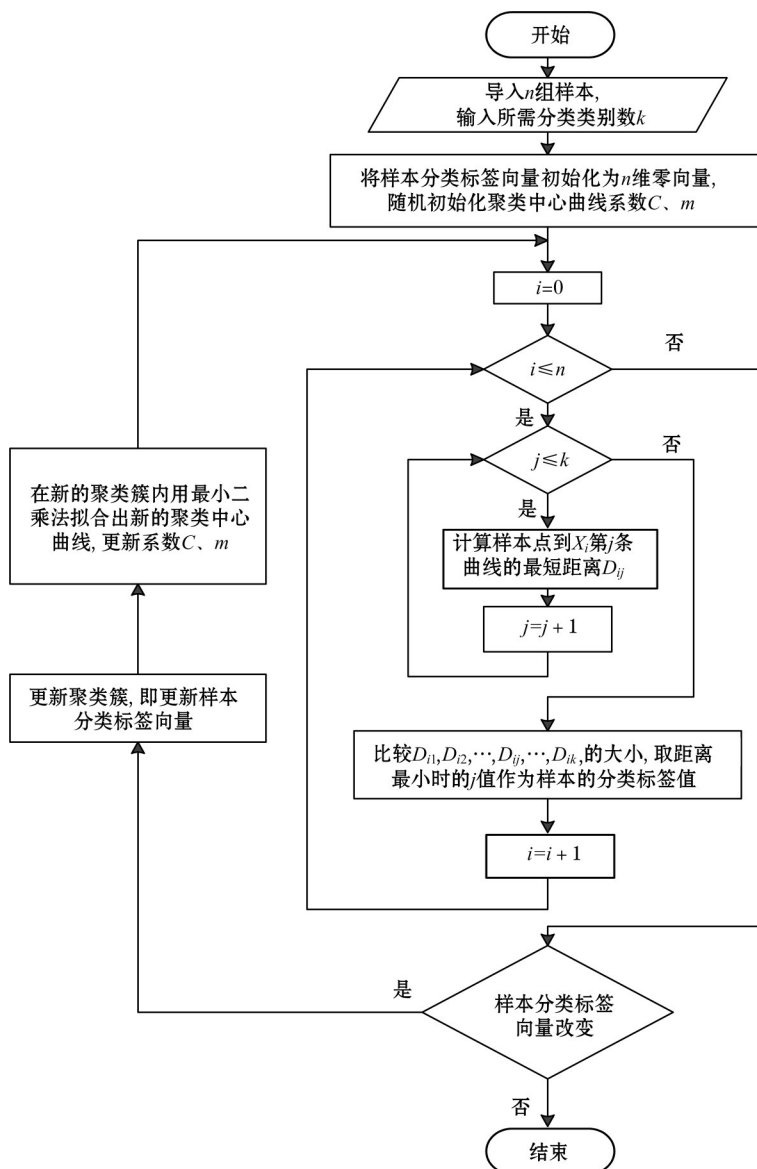


图 2 线聚类算法的流程图

Fig. 2 Flow chart of line clustering algorithm

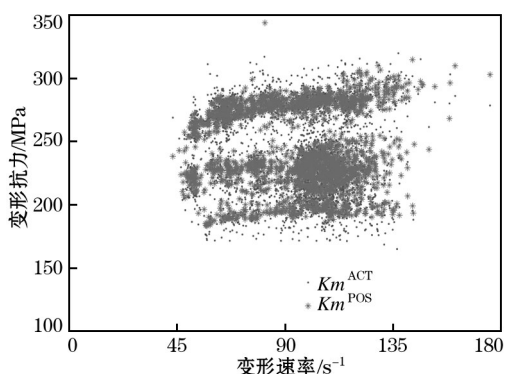


图 3 某钢族变形抗力与变形速率的关系

Fig. 3 Relationship between deformation resistance and deformation rate for a steel grade

如果选择分成 3 类, 采用线聚类算法迭代 24 次后, 得到聚类结果如图 5 所示, 3 条聚类中心线对应的参数为 $C_1 = 202.178$, $m_1 = 0.0084$; $C_2 = 196.989$, $m_2 = 0.0380$; $C_3 = 222.829$, $m_3 = 0.0470$ 。可见, 原数据集被分为 3 类, “·”形数据点均匀分布在聚类曲线 cluster_line1 周围; “×”形数据点均匀分布在聚类曲线 cluster_line2 周围; “◆”形数据点均匀分布在聚类曲线 cluster_line3 周围。追踪对应的出钢记号发现: 新划分的第 1 类主要为 DP0161D1、AN0691D1、AP0740D5 等出钢记号, 第 2 类主要为 AN0691D1、AP0740D5 等出钢记号, 第 3 类则主要为 AP1055E5。也就是说, 第 1 类、第 2 类都包含了较多

的 AN0691D1、AP0740D5, 区分效果不明显。

实际生产表明, 同属于原钢族层别 1001 的 AP1055E5、AN0691D1、AP0740D5 和 DP0161D1 等几个出钢记号中, AP1055E5 的变形抗力显著高于其他钢种。为了提高轧制力模型的预报精度, 需要将 AP1055E5 划分到新的钢族层别; 而其他几个出钢记号差别不大, 可以继续保留在原来的层别。

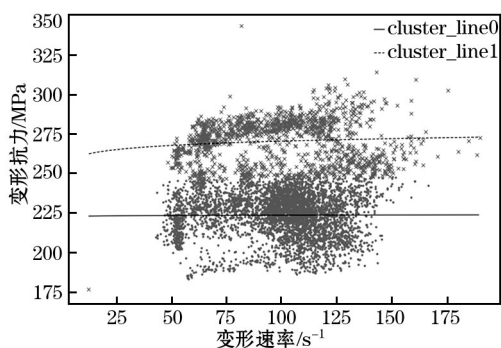


图 4 分为 2 类的聚类分析结果

Fig. 4 Clustering analysis results with two categories

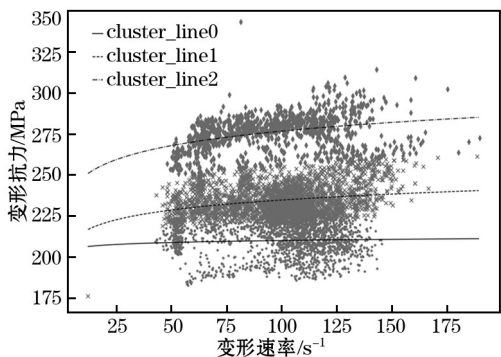


图 5 分为 3 类的聚类分析结果

Fig. 5 Clustering analysis results with three categories

进一步从各钢种层面来分析, 各钢种被分到各类别的情况见表 3。分为 2 类时, DP0161D1、AN0691D1、AP0740D5 基本上都被划分为第 1 类, 被划分进第 2 类的只占很小的比例; 而 AP1055E5 则主要被划分为第 2 类, 被划分为第 1 类的比例很小。由此可见, 分为 2 类时分类误差很小, 分类比较精确。分为 3 类时, 未能很好地将 AN0691D1、AP0740D5 划分到一个特征明显的类别, 虽然有大部分比例被划分到第 2 类, 但是仍有较大比例被划分到第 1 类。另外, 从表中数据可以看出, 分为 3 类时同一出钢记号被划分进第 1 类、第 2 类的比例总和近似等于划分为 2 类时的第 1 类比例。也就是说, 分 3 类时的第 1 类、第 2 类对应于分 2 类时的第 1 类。因此, 对此案例中的钢族层别 1001 没有必要分为 3 类。

表 3 各钢种分到各类别的分布比例

Table 3 Distribution proportion of steel grade for different categories %

出钢记号	2 类		3 类		
	类别 1	类别 2	类别 1	类别 2	类别 3
AP1055E5	0.55	99.45	0	0.55	99.45
DP0161D1	100.00	0	99.68	0.32	0
AN0691D1	88.66	11.34	33.87	62.26	3.87
AP0740D5	96.43	3.57	28.94	70.88	0.18

宝钢 1 880 热连轧机组原钢族层别 1001 中, AP1055E5、AN0691D1、AP0740D5 和 DP0161D1 都属于轧制数量较大的几个出钢记号, 其钢族层别划分是否合理非常关键。按上述方法将 AP1055E5 划分到新的钢族层别后, 上述各出钢记号的轧制力模型设定精度都显著提高, 避免了以前各钢种学习系数相互干扰的情况。本方法已应用到宝钢 1 880、宝钢 1 580、梅钢 1 780 等多个热连轧机组的模型调试中, 对热连轧工程的轧制设定模型精度、产品质量的提升起到较显著的作用。

3 结论

(1) 通过实际案例分析指出传统的热轧模型钢族层别划分策略存在不足, 提出基于热连轧实测数据的钢族层别优化策略。针对某一钢族层别, 通过收集大量的轧制历史数据, 绘制“变形速率-变形抗力”数据的散点图, 进而观察数据散点的带状分布特征, 如果集中分布在某一幂函数曲线周围的带状范围内, 则该层别划分较为合理; 如果分散为几条明显分割的带状分布, 则需要通过聚类分析进行细分层别, 并筛选出需要分到新层别的出钢记号。

(2) 针对变形抗力数据集分层带状分布的特征, 提出一种新的以聚类曲线为“聚类中心”的线聚类算法。该算法具有一般聚类算法的原理特征, 以相似性为聚类基础依据; 但不同在于: 普通聚类算法的聚类中心是一个点, 且划分聚类簇的距离依据是样本点到聚类中心点的欧式距离; 而本算法的聚类中心是一条系数随机待定的函数曲线, 划分聚类簇的依据是样本点到曲线的最短距离, 还包含一层优化计算的过程, 算法复杂度更高。

参考文献:

- [1] 单旭沂, 劳兆利. 热连轧过程控制系统关键技术的思考与实践[J]. 冶金自动化, 2009, 33(5): 1. (SHAN Xu-yi, LAO Zhao-li. Thinking and practice of key technology in the process control system of hot rolling process[J]. Metallurgical Automation,

- 2009, 33(5): 1.)
- [2] 李维刚, 邓肯, 赵云涛, 等. 基于连续曲面的轧制模型自学习方法[J]. 钢铁, 2017, 52(12): 61. (LI Wei-gang, DENG Ken, ZHAO Yun-tao, et al. Self-learning method of rolling model based on continuous surface[J]. Iron and Steel, 2017, 52(12): 61.)
- [3] 彭良贵, 龚殿尧, 张殿华, 等. 基于面向对象技术的热轧卷取温度模型开发[J]. 中国冶金, 2017, 27(1): 24. (PENG Liang-gui, GONG Dian-yao, ZHANG Dian-hua, et al. Development of coiling temperature model based on object-oriented technology[J]. China Metallurgy, 2017, 27(1): 24.)
- [4] 田野, 李洁. 热连轧新品种新规格首卷钢尺寸精度控制方法研究[J]. 轧钢, 2015, 32(4): 70. (TIAN Ye, LI Jie. Study on the precision control method of the new specification of new type of hot rolling new product[J]. Steel Rolling, 2015, 32(4): 70.)
- [5] 邵健, 何安瑞, 孙文权, 等. 面向生产全过程的热轧带钢精准控制核心技术[J]. 中国冶金, 2017, 27(5): 45. (SHAO Jian, HE An-rui, SUN Wen-quan, et al. Precise control core technology of hot rolling strip in whole production process[J]. China Metallurgy, 2017, 27(5): 45.)
- [6] 朱鹏举. 自适应在中厚板生产中的应用[J]. 轧钢, 2015, 32(2): 72. (ZHU Peng-ju. The application of adaptive to medium thickness plate production[J]. Steel Rolling, 2015, 32(2): 72.)
- [7] 张海刚, 张森, 尹怡欣, 等. 高炉料面特征提取与聚类分析[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(7): 938. (ZHANG Hai-gang, ZHANG Sen, YIN Yi-xin, et al. Feature extraction and cluster analysis of high burden surface[J]. Control Theory and Applications, 2017, 34(7): 938.)
- [8] 崔桂梅, 胡登飞, 马祥. 基于神经网络预测模型的高炉喷煤操作模式优化[J]. 钢铁研究学报, 2014, 26(8): 8. (CUI Gui-mei, HU Deng-fei, MA Xiang. Operational-pattern optimization in blast furnace PCI based on prediction model of neural network[J]. Journal of Iron and Steel, 2014, 26(8): 8.)
- [9] 李海军. 热轧带钢精轧过程控制系统与模型的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008. (LI Hai-jun. Study on the Process Control System and Model of Hot Rolled Strip Mill[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.)
- [10] 王金涛. 宝钢 1 580 mm 热轧带钢厚度控制优化研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010. (WANG Jin-tao. Optimization Research on the Thickness Control of 1 580 mm Hot Rolled Strip in Bao-steel[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.)
- [11] 李维刚, 冯宁, 王慎德, 等. 热轧相变过程变形抗力模型研究与开发[J]. 钢铁, 2017, 52(6): 63. (LI Wei-gang, FENG Ning, WANG Sheng-de, et al. Study and development of deformation resistance model of hot-rolled phase transition process[J]. Iron and Steel, 2017, 52(6): 63.)
- [12] 李维刚, 陈水宣, 刘相华. 热轧带钢精轧过程考虑相变的轧制力模型研究[J]. 东北大学学报, 2013, 34(10): 1425. (LI Wei-gang, CHEN Shui-xuan, LIU Xiang-hua. Study on rolling force model considering hot strip continuous rolling process[J]. Journal of Northeastern University, 2013, 34(10): 1425.)
- [13] 苏宏升, 殷凯乐. 基于 Nelder-meard 单纯形法的改进人工蜂群算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(24): 50. (SU Hong-sheng, YIN Kai-le. Research on improved artificial bee colony algorithm based on Nelder-meard simplex method[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(24): 50.)

(上接第 45 页)

- [21] 陈兴润, 胡桓彰. 中间包覆盖剂对 430 不锈钢钢水洁净度的影响[J]. 中国冶金, 2017, 27(8): 36. (CHEN Xing-run, HU Huan-zhang. Effect of tundish fluxes on cleanliness of 430 stainless steel[J]. China Metallurgy, 2017, 27(8): 36.)
- [22] Katsuhiro Sasai, Yoshimasa Mizukami. Reoxidation behavior of molten steel in tundish[J]. ISIJ International, 2000, 40(1): 40.
- [23] Qiyu Wang, Xiaodong Zou, Hiroyuki Matsuura, et al. Evolution of inclusions during the 1 200 °C heating process of EH36 shipbuilding steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2018, 49(1): 18.
- [24] Shibata H, Tanaka T, Kimura K, et al. Composition change in oxide inclusions of stainless steel by heat treatment[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2010, 37(7): 522.
- [25] Ichiro Takahashi, Toyoyuki Sakae, Takeshi Yoshida. Changes of the nonmetallic inclusion by heating-study on the nonmetallic inclusion in 18-8 stainless steel (II) [J]. Tetsu-to-Hagane, 1967, 53(3): 350.
- [26] Ying Ren, Lifeng Zhang, Chris Pistorius P. Transformation of oxide inclusions in type 304 stainless steels during heat treatment[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48(5): 2281.