

面向误差补偿的热轧板带变形曲率积分重构分析

罗彩玉¹, 刘 明²

(1. 阿克苏职业技术学院 机电工程学院, 新疆 温宿 843100; 2. 华北理工大学 电气工程学院, 河北 唐山 063210)

摘要: 为深入分析热轧板带的变形重构过程, 通过分布式方法对热轧板带的表面区域实施检测, 确定采用曲率积分递推方式形成的误差补偿重构算法。然后对热轧板带开展模型仿真与变形分析, 以促进重构性能的显著提升。根据热轧板带表面的曲率数据判断分布应变特征, 计算得到热轧板带的变形数据, 形成多条曲线并进行插值, 从而对整体热轧板带完成变形重构的过程。结果表明: 逐渐提高载荷时, 形成了更大的重构方差, 使最大误差降低。与切角递推算法相比, 曲率积分递推算法具有更小的误差和耗时, 并可以获得较切角递推算法更优的重构性能。研究结果对控制热轧板带的变形程度具有很好的效果, 对提高板带轧制过程中的成形精度以及控制稳定性具有很好的实践价值。

关键词: 热轧板带变形; 曲线重构; 曲率; 误差补偿; 分布应变

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.03.019

中图分类号: TG156

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 03-0139-05

Integral reconstruction analysis on deformation curvature for hot-rolled strip with error compensation

Luo Caiyu¹, Liu Ming²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Aksu Vocational and Technical College, Wensu 843100, China;

2. College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: In order to analyze the deformation and reconstruction process of hot-rolled strip deeply, the surface area of hot-rolled strip was inspected by the distributed method, and the error compensation reconstruction algorithm formed by curvature integral recursive method was determined. Then, the model simulation and deformation analysis of hot rolled strip were carried out to promote the significant improvement of reconstruction performance. According to the curvature data of the surface of hot-rolled strip, the strain distribution characteristics were judged, and the deformation data of hot-rolled strip were calculated. Furthermore, the multiple curves were formed and interpolated, so as to complete the deformation reconstruction process of the whole hot-rolled strip. The results show that with the increasing of load, the larger reconstruction variance is formed, and the maximum error decreases. Compared with the tangent angle recursive algorithm, the curvature integral recursion algorithm has smaller error and time consumption and obtains better reconstruction performance compared with the tangential recursion method. Thus, the research result has a good effect on controlling the deformation degree of hot-rolled strips and has good practical value on improving the precision and stability control of strips in rolling process.

Key words: deformation of hot-rolled strip; curve reconstruction; curvature; error compensation; strain distribution

随着器件的轻薄化发展, 热轧板带结构件已经成为汽车、机翼等各行业的重要部件, 轧制过程中板带受力变形以及回弹过程对板材厚度的精度控制的影响很大^[1]。当热轧板带结构件处于力与弯矩的作用下时将会引起局部弯曲与扭转的情况, 或存在两种变形方式相互叠加的变形过程^[2]。当热轧板带的变形程度较小时, 可根据小变形假设将热轧板带

的弯曲计算过程转变为弹性偏微分。从工程应用层面考虑, 对热轧板带的大变形过程进行研究具备更大的参考价值^[3-4]。在不同变形程度下的结构受力状态也存在较大差异, 当采用小变形理论进行分析时, 处于不同程度的变形状态下的物体受力情况也存在较大差异, 这使得小变形和大变形之间表现出明显的差异性^[5]。当选择小变形方法进行处理时将会导致计算结果出现较大偏差, 无法适应工程应用要求。但对热轧板带结构开展大变形分析也面临很大的阻碍, 尤其是复杂的结构边界条件下无法构建准确的理论模型。即使是处理结构较为简单的结构

收稿日期: 2022-01-07; 修订日期: 2022-04-10

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目 (B2016209059)

作者简介: 罗彩玉 (1980-), 女, 硕士, 副教授

E-mail: a15134457133@163.com

边界时,对模型几何方程进行高次项运算时也会造成求解难度明显上升^[6]。针对以上情况,可通过传感器检测方式来分析热轧板带的应变程度,同时利用分布应变参数对热轧板带的变形状况进行快速重构,确保设备运行安全、稳定。

目前,已有较多学者从不同层面对薄壁构件变形过程进行了研究。Lee K 等^[7]重点分析了风机叶片在运行过程中受载荷作用发生的结构变形,根据模态分析数据对二阶模态实施插值获得应力参数,之后根据应力与挠度的关系确定挠度。张福范^[8]选择广义简支边构建仿真模型,以叠加计算的方式分析了集中载荷作用下热轧板带的弯曲情况。易金聪^[9]根据热轧板带小挠度弯曲过程,通过转换热轧板带的分布应变得到热轧板带曲率,再以切角递推方式完成热轧板带重构,重构精度明显提升。以上研究内容均是针对热轧板带小变形开展的应变测试与变形重构。在大变形研究方面,侯祥林等^[10]通过变分方法推导出热轧板带发生弯曲时对应的高阶非线性偏微分方程,从而计算出热轧板带发生简单变形时的解。按照移动最小二乘法确定最大弹性变形条件下的复变量无单元方法,依次针对各结构开展仿真测试。Parakkat A D 等^[11]根据 Delaunay 三角剖分方式构建了非参数曲线算法,同时从理论层面也可以判断采用上述方法可以重建得到原始曲线。王勇等^[12]对柔性矩形热轧板带进行动力性能分析时引入 B 样条插值的方法,完成热轧板带变形过程的离散计算后,再利用拉格朗日方程建立了柔性热轧板带在大范围空间内的运动方程,发现采用 B 样条插值方法对于柔性热轧板带大变形进行处理可以获得最高的精度,表现出了优异的综合性能。

上述内容从理论角度进行研究,需要构建复杂的算法,求解过程需要进行大量计算,并不能通过应变直接计算出变形结果,因此,并不适合对分布应变状态下的热轧板带进行变形重构。为深入分析热轧板带的变形重构过程,本文采用分布式方法对热轧板带的表面区域实施检测,由此得到热轧板带表面形成的应变参数,构建了曲率和分布应变之间的对应关系,由此确定采用基于曲率积分递推算法形成的误差补偿重构算法。之后对热轧板带开展模型仿真与变形分析,促进了重构性能的显著提升。

1 曲率积分递推算法

热轧板带的变形简图如图 1 所示,其中, p 为热轧平行方向、 v 为垂直方向、 w 为宽度方向, Δy

为宏观变形量, F 为施加载荷。按照图 1 所示结构,将热轧板带其中一端固定后,再对自由端设置载荷 F 作用,引起热轧板带发生弯曲变形,在热轧板带的 p 方向配备了信号探测的应变传感器,可以快速收集热轧板带在弯曲过程中形成的分布应变数据,根据热轧板带的分布应变数据判断分布应变的特征^[13]。之后在 p 方向上对曲率实施样条插值,由此计算得到热轧板带在 v 方向上的变形数据,形成多条 p 方向上的曲线,再以上述变形曲线作为边界,对宽度 w 方向进行插值,从而完成整体热轧板带的变形重构过程。

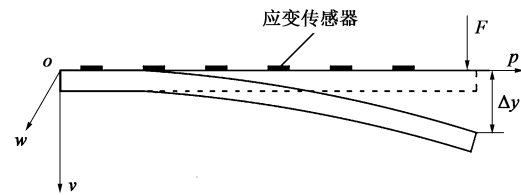


图 1 热轧板带变形简图

Fig. 1 Deformation diagram of hot-rolled strip

在进行热轧板带的弯曲分析时,假定热轧板带在变形期间形成的是连续光滑曲面,选择热轧板带的任一截面 pov ,得到的变形量 $y(x)$ 和曲率 $k(x)$ 之间的计算式为:

$$k(x) = \pm \frac{y''(x)}{(1 + y'(x)^2)^{3/2}} \quad (1)$$

式中: x 为沿 p 方向距 o 点的距离。

根据图 1 可知,当热轧板带的结构发生弯曲变形时,将 v 方向的正向变形作为正值。

对于纯弯曲结构的热轧板带进行分析,根据热轧板带的边界假设参数,在热轧板带的 p 方向进行变形曲线重构,此时曲线固定端的位移与变形量均等于零^[14]。存在以下关系:

$$\hat{y} = \sum_{j=0}^n \left\{ \left[\sum_{j=0}^n k_j \cdot l_j / \sqrt{1 - \left(\sum_{j=0}^n k_j \cdot l_j \right)^2} \right] \cdot l_j \right\} \quad (2)$$

式中: n 为变形曲线上弧线段的分段数量, $j=0, 1, 2, \dots, n$; \hat{y} 为曲线的变形量; l_j 为第 j 段弧线段沿 p 方向形成的投影长度,当处于均匀分段时,认为 $l_j = l/n$; l 为热轧板带的长度; k_j 为第 j 段弧线段沿 p 方向形成的曲率。

热轧板带第 i 段弧线段变形量的重构计算式为:

$$\hat{y} = \sum_{j=0}^n \left(\sum_{j=0}^n \frac{2 \cdot \varepsilon_j}{B} \cdot l_j \cdot l_0 / \sqrt{1 - \left(\sum_{j=0}^n \frac{2 \cdot \varepsilon_j}{B} \cdot l_j \right)^2} \right) \quad (3)$$

式中: B 为板材厚度; ε_j 为第 j 段弧线段沿 p 方向形

成的应变变量； l_0 为曲线在 p 方向的投影长度。

开展变形重构计算时，考虑到算法作了近似替代处理，因此会造成累积误差，而且由固定端到自由端形成更大的重构误差。进行误差补偿时，由于热轧板带发生纯弯曲变形并受到递推算法误差的影响，为热轧板带对称部位设置了较大的误差补偿系数 η ，同时为热轧板带两端设置了较低的补偿系数。

建立的误差补偿曲线重构计算式为：

$$\hat{y} = \sum_{j=0}^n \eta \left(\sum_{j=0}^i \frac{2 \cdot \varepsilon_j}{B} \cdot l_j \cdot l_0 / \sqrt{1 - \left(\sum_{j=0}^n \frac{2 \cdot \varepsilon_j}{B} \cdot l_j \right)^2} \right) \quad (4)$$

2 试验分析

图2为热轧板带变形测试系统，包括热轧板带、光纤光栅解调仪、NADO型光纤布拉格光栅应变传感器（精度为0.3%F.S.，响应时间为0.05 ms）、计算机控制系统、BJQ-FTM-351型激光位移传感器（量程为0.1 mm，分辨率为15 nm）。在与热轧板带侧边相距30 mm的部位，按照间距相同的条件配备4个光纤布拉格光栅应变传感器，同时利用光纤布拉格光栅应变传感器测试热轧板带变形曲线上形成的应变参数，将其输入重构算法中，再通过激光位移传感器测试曲线上产生的变形量。计算机接收热

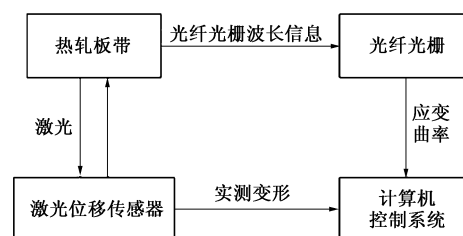


图2 热轧板带变形检测试验原理

Fig. 2 Test principle of deformation detection for hot-rolled strip

轧板带变形曲线的信号数据。

测试期间，按照同样载荷条件为自由端设置砝码，控制砝码的重力范围为0.00~3.92 N，每次加载1.96 N，测试前首先记录光纤光栅波长的初值并采集激光位移传感器参数，之后按照1.96 N的间隔进行加载砝码的操作，对后续各组应变参数和激光位移进行测试，直至到达3.92 N。共进行3次测试，将其中的粗大误差去除后，再计算3次测试应变与变形均值。为后续开展变形重构提供基础。

设定分段总数为600，以样条插值的方式测定光纤光栅传感器分布应变，依次输入经过插值处理的应变，以切角递推算法完成参数重构，对不同载荷作用下的变形和误差进行统计，得到图3和图4所示结果，重构精度结果见表1。

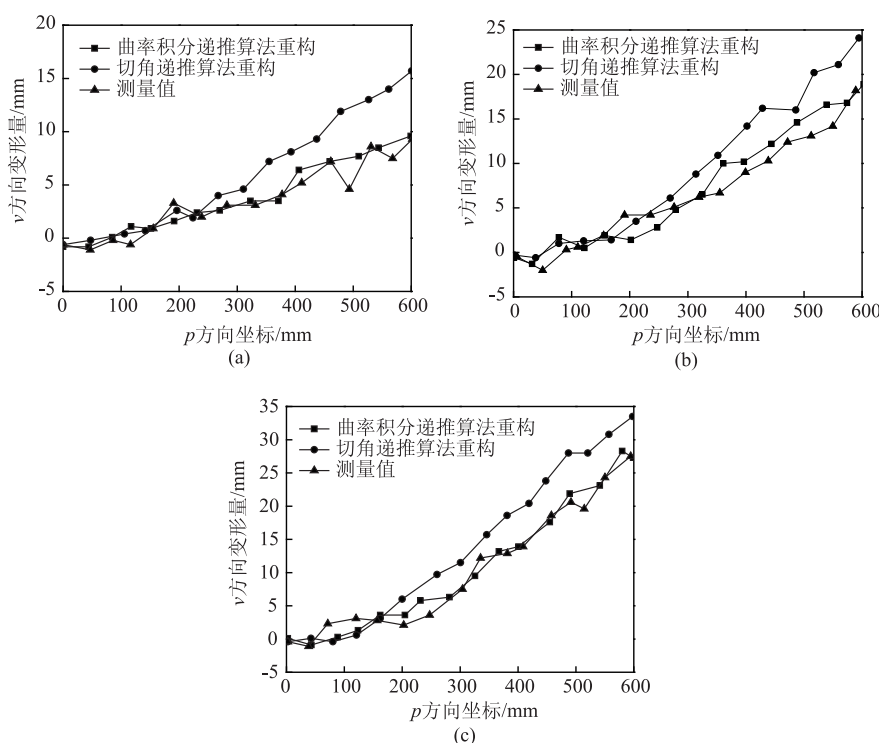


图3 不同载荷作用时重构变形与测量值对比

(a) 0.00 N (b) 1.96 N (c) 3.92 N

Fig. 3 Comparison between reconstructed deformation and measured values under different loads

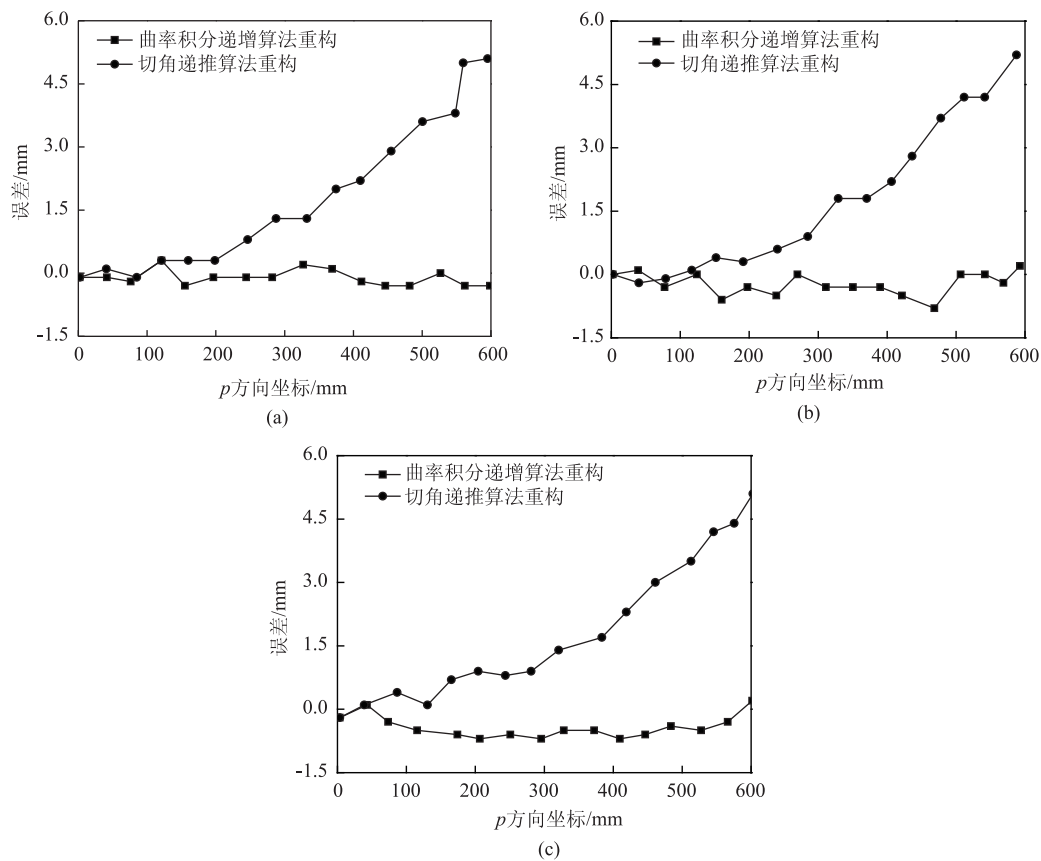


图4 不同载荷作用时重构误差对比
(a) 0.00 N (b) 1.96 N (c) 3.92 N
Fig. 4 Comparison of reconstruction errors under different loads

表 1 不同载荷作用下两种算法的重构精度
Table 1 Reconstruction accuracy of two algorithms under different loads

载荷/ N	切角递推算法			曲率积分递推算法		
	均方差/ mm	最大误差/mm	耗时/s	均方差/ mm	最大误差/mm	耗时/s
0.00	2.2599	5.4975	1.123	0.1354	0.2662	0.382
1.96	2.3061	5.3860	1.693	0.1784	0.1559	0.563
3.92	2.3550	4.9808	3.127	0.2172	0.0268	0.802

通过测试发现,逐渐提高载荷时形成了更大的重构均方差,同时最大误差降低,与切角递推算法相比,曲率积分递推算法形成了更小的误差,由此可以推断,采用曲率积分递推算法可以获得较切角递推算法更优的重构性能。对误差的形成原因进行分析可知,递推算法仅能通过补偿来减小累积误差,并不能达到彻底消除的效果。

通过比较耗时的结果可以看到,曲率积分递推算法较切角递推算法用时更少,具有更高的计

算效率。随着载荷的增加,耗时表现出增加的规律,这是因为载荷越大,工况越复杂,增加了计算难度。

3 结论

(1) 根据热轧板带表面曲率数据判断分布应变特征,计算得到热轧板带的变形数据,形成多条曲线并进行插值,从而完成整体热轧板带的变形重构过程。

(2) 通过试验测试可知:逐渐提高载荷时,形成了更大的重构均方差,最大误差降低。与切角递推算法相比,曲率积分递推算法形成了更小的误差和耗时,采用曲率积分递推算法可以获得较切角递推算法更优的重构性能。

参考文献:

- [1] 陈彤,李永亮,邝霜,等. 热轧带钢均匀化冷却问题分析与控制措施 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 83-89.
Chen T, Li Y L, Kuang S, et al. Analysis and control measures

- on uniform cooling for hot rolling strip steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 83-89.
- [2] 刘明华, 张强, 刘英华, 等. 基于机器学习的热轧制力预测 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (10): 233-241.
Liu M H, Zhang Q, Liu Y H, et al. Prediction of rolling force in hot rolling based on machine learning [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (10): 233-241.
- [3] 王少, 陈斌, 司小明, 等. 热轧板带表面质量智能化自动判定系统的开发应用 [J]. 中国冶金, 2019, 29 (7): 70-73, 78.
Wang S, Chen B, Si X M, et al. Development and application of intelligent automatic judgment system for surface quality of hot rolled strip [J]. China Metallurgy, 2019, 29 (7): 70-73, 78.
- [4] 马明, 丁桦, 唐正友, 等. 双相不锈钢 2205 热轧板微观组织及塑性变形的均匀性 [J]. 材料与冶金学报, 2018, 17 (4): 254-262.
Ma M, Ding H, Tang Z Y, et al. Microstructure and plastic deformation uniformity of dual-phase stainless steel 2205 hot rolled sheet [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2018, 17 (4): 254-262.
- [5] 杨淑贞, 董彬. 基于 PSO-BP 的双辊热轧 AZ91D 镁合金板横向厚度预测 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (11): 1212-1214.
Yang S Z, Dong B. Prediction of transverse thickness of twin-roll hot rolled AZ91D magnesium alloy plate based on PSO-BP [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2018, 38 (11): 1212-1214.
- [6] 王建功, 赵虎, 夏银锋, 等. 常规热连轧线 Ti-IF 钢铁素体轧制工艺研究与应用 [J]. 钢铁, 2017, 52 (10): 65-71.
Wang J G, Zhao H, Xia Y F, et al. Research and application of Ti-IF steel rolling process in conventional hot strip rolling line [J]. Iron and Steel, 2017, 52 (10): 65-71.
- [7] Lee K, Aihara A, Puntsagdash G, et al. Feasibility study on a strain based deflection monitoring system for wind turbine blades [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 82: 117-129.
- [8] 张福范. 悬臂矩形板的弯曲 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1979, (2): 43-51.
Zhang F F. Bending of a rectangular cantilever plate [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1979, (2): 43-51.
- [9] 易金聪. 基于 FBG 传感阵列的智能结构形态感知与主动监测研究 [D]. 上海: 上海大学, 2014.
Yi J C. Shape Perception and Active Monitoring for Smart Structure Using FBG Sensor Array [D]. Shanghai: Shanghai University, 2014.
- [10] 侯祥林, 郑夕健, 张良, 等. 热轧板带弯曲大变形高阶非线性偏微分方程推导与优化算法研究 [J]. 物理学报, 2012, 61 (18): 9-18.
Hou X L, Zheng X J, Zhang L, et al. Research on derivation and optimization algorithm of high-order nonlinear partial differential equations for thin plate bending large deformation [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61 (18): 9-18.
- [11] Parakkat A D, Muthuganapathy R. Crawl through neighbors: A simple curve reconstruction algorithm [J]. Computer Graphics Forum, 2016, 35 (5): 177-186.
- [12] 王勇, 章定国, 范纪华, 等. 基于 B 样条插值法的柔性矩形热轧板带的动力学分析 [J]. 振动工程学报, 2019, 32 (5): 811-821.
Wang Y, Zhang D G, Fan J H, et al. Dynamic analysis of flexible rectangular thin plate based on B-spline interpolation [J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32 (5): 811-821.
- [13] 谭跃刚, 黄兵, 刘虎, 等. 基于分布应变的薄板变形重构算法研究 [J]. 机械工程学报, 2020, 56 (13): 242-248.
Tan Y G, Huang B, Liu H, et al. Research on deformation reconstruction algorithm of thin plate based on distributed strain [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56 (13): 242-248.
- [14] 马晓彬, 张杰, 李洪波, 等. 基于曲率积分法考虑包辛格效应的辊式矫直交变弯曲研究 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (6): 118-124.
Ma X B, Zhang J, Li H B, et al. Research on roller straightening alternating bending considering baushinger effect based on curvature integral method [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (6): 118-124.

警惕不法网站, 保障投稿安全

近期, 本刊接到多名作者投诉, 网络上出现冒充《锻压技术》杂志官方网站的伪网站, 如 www.dyjszz.cn, 这些网站盗用本杂志官网内容及相关行业信息, 误导和欺骗广大投稿作者, 骗取文章版面费、套取作者文章及个人信息, 侵犯了广大作者的切身利益。

特此声明, 本刊唯一官方网站为 www.fstjournal.net, 投稿方式为网站注册登录投稿, 不接受邮箱投稿。请作者投稿时务必认准杂志官方网站, 谨防受骗。

本刊郑重警告伪网站相关人员尽快停止违法行为, 否则将严肃处理, 并将运用一切法律手段维护本刊的权利。

请广大读者协助本刊监督网络上的不法行为, 一经发现, 请联系本刊, 本刊将及时处理, 共同努力营造良好的期刊网络氛围。

《锻压技术》杂志联系方式: fst@263.net; 010-62920652。

《锻压技术》编辑部