

冷轧带钢板形控制系统 优化策略

闫注文◎著

THE OPTIMIZATION STRATEGY IN
COLD ROLLING STRIP FLATNESS
CONTROL SYSTEM



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

冷轧带钢板形控制系统优化策略

The Optimization Strategy in Cold Rolling

Strip Flatness Control System

闫注文 著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

冷轧带钢板形控制系统优化策略/闫注文著. —北京:北京理工大学出版社, 2021. 1

ISBN 978 - 7 - 5682 - 8978 - 8

I. ①冷… II. ①闫… III. ①冷连轧 - 带钢 - 板形控制 IV. ①TG335. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 163496 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 12.75

字 数 / 193 千字

版 次 / 2021 年 1 月第 1 版 2021 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 57.00 元

责任编辑 / 孙 澍

文案编辑 / 孙 澍

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

冷轧板形控制技术是冷轧板带加工的核心技术之一。近年来，随着我国钢铁行业发展由粗放型转变为产业结构转型阶段，冷轧带钢的板形质量在企业的竞争中占有越来越重要的地位。本书以某 1 450mm 五机架冷轧机组的板形控制系统升级改造项目为背景，在分析与研究板形控制基础模型的前提下，对板形控制系统中的核心模型进行优化与改善，并将研究成果应用于实际生产，取得了良好的控制效果。主要研究内容如下：

(1) 基于辊系变形方程建立了辊间压力的迭代矩阵，分析了轧辊弹性变形和轧辊压扁对带钢板形的影响效果。研究了板形曲线设定中的不均匀温度补偿、卷取补偿及边部减薄补偿，并计算了板形测量值处理中的径向力、包角及面积覆盖因子。同时，研究了板形执行器调节量寻优模型，并基于容许方向法和单纯形法，设计了一种板形执行器调节量计算方法，该方法可以满足板形在线控制计算精度的要求。

(2) 提出了一种板形控制系统协同优化分配策略，并设计了基于神经网络和 Topkis - Veinott (T-V) 的协同优化算法。通过结合搜索与学习两类思维模式，改善搜索方向的确定方式并降低迭代轨迹走相似路线的可能性，确保了工作辊弯辊与中间辊弯辊调节方向的一致性，有

效地避免了调节效果相互抵消的情况，同时大幅减轻了轧辊的磨损程度。

(3) 提出了一种板形调节策略库模型，通过建立板形状况分析模型，并采用人工神经网络及遗传算法分别求解实际板形判别因子及板形调节执行机构调节量，根据判别因子的合理区间范围选择最优的调节机构组合方式，可以精准地为实际板形缺陷选择合理的板形调控手段，在充分发挥轧机板形调节能力的基础上，提高带钢板形的控制精度。

(4) 设计了一种板形目标曲线动态调节模型，并提出了基于 GENOCOP 的混合算法。通过分析调节机构饱和状态与板形目标曲线设定之间的关系，并求解调节机构饱和状态下消除板形偏差所需要的板形目标曲线干预量，可以成功地避免常规干预中板形系数过度调节或调节不充分的问题，并克服了常规干预只能调节单一板形系数的缺点，实现了对全部板形系数的全局调控功能。

(5) 介绍了某 1 450mm 五机架冷轧机组板形控制系统升级改造项目中的硬件配置、主界面功能、调节流程界面功能及调节参数界面功能。计算了板形控制系统中各类增益系数和执行机构的调节速度。针对薄规格带钢、常规规格带钢及厚规格带钢分别分析优化前后的板形控制效果，应用结果表明，优化后的板形控制系统运行稳定，板形控制精度显著提高。

本书内容是基于作者在带钢生产线的实际调试经验和近期的科研成果整理而成的，在此书出版之际，向张殿华教授、李旭副教授、孙杰副教授和书稿的评阅人等致以崇高的敬意和由衷的感谢。谨以此书献给我的妻子卜赫男博士，感谢她多年来所给予我的家庭温暖，使我可以全身心地投入科研工作。

本书的出版和相关研究工作得到了江苏省自然科学基金青年基金项目《板形执行器超幅调节和抵消效应下策略库深度学习模型的研究》(BK20181024) 和《基于大数据的冷轧带钢板形预设定智能优化研究》(BK20180977)、国家自然科学基金青年基金项目《冷轧带钢预设定过程板形板厚耦合特性研究及协调优化》(51804133)、南京工程学院校级科研基金项目《板形执行机构协同调节策略研究》(YKJ201867) 的资助，在此表示感谢。

闫注文

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪 论	001
1.1 课题研究的背景和意义	001
1.2 板形调节机构	002
1.2.1 轧辊横移	002
1.2.2 轧辊倾斜	003
1.2.3 轧辊弯辊	004
1.2.4 轧辊分段冷却	004
1.3 板形测量机构	007
1.3.1 ASEA 板形辊	007
1.3.2 CLECIM 板形辊	008
1.3.3 激光板形仪	008
1.3.4 压电式板形辊	009
1.3.5 压磁式板形辊	010
1.4 板形的数学表示	010
1.5 板形控制方法的发展	014
1.6 板形理论的发展	015
1.6.1 变分法	016
1.6.2 解析法	016

1.6.3	有限元法	017
1.6.4	影响函数法	018
1.7	板形控制模型的发展	019
1.7.1	板形预设控制模型的发展	019
1.7.2	板形前馈控制模型的发展	021
1.7.3	板形反馈控制模型的发展	022
1.8	本章小结	024
第2章	板形控制基础模型的研究	026
2.1	板形曲线设定模型	026
2.1.1	标准板形目标曲线	027
2.1.2	不均匀温度分布补偿曲线	027
2.1.3	卷取补偿曲线	028
2.1.4	边部减薄补偿曲线	029
2.1.5	执行器手动修正量补偿曲线	029
2.2	板形测量值处理模型	030
2.3	塑性变形模型	032
2.4	板形调节系数模型	032
2.4.1	板形调节系数的影响因素	033
2.4.2	板形调节系数的自适应	033
2.5	影响函数法的研究	034
2.5.1	辊系弯曲影响函数	034
2.5.2	轧辊压扁影响函数	036
2.5.3	辊系变形方程	037
2.5.4	实例计算	039
2.6	板形最优控制算法	042
2.6.1	评价函数	042
2.6.2	约束条件	042
2.6.3	板形最优调节量	043
2.6.4	实例计算	046
2.7	本章小结	051

第 3 章 冷轧板形控制系统协同优化分配策略的研究	052
3.1 板形控制系统的构成	052
3.2 板形调节机构设定模型	053
3.3 目标曲线设定方法	053
3.4 设定计算类型	054
3.5 板形控制中的跨学科方法	055
3.6 板形执行机构调节方向约束算子	056
3.7 T-V 搜索方向的确定	057
3.8 搜索思维模式	059
3.9 学习思维模式	059
3.10 AINTV 协同优化步骤	061
3.11 应用效果	063
3.11.1 中间辊弯辊与工作辊弯辊的效果	065
3.11.2 协同优化分配策略与常规方法的效果	069
3.11.3 不同硬度带钢的控制效果对比	080
3.12 本章小结	096
第 4 章 板形控制执行机构调节策略的研究	097
4.1 非对称弯辊控制方法	097
4.2 板形调节手段替代模型	098
4.3 中间辊横移速度调节方法	099
4.4 板形执行器控制策略	100
4.4.1 执行器策略库评价函数	100
4.4.2 执行器调节效率	102
4.4.3 执行器调节策略	104
4.4.4 执行器调节策略控制算法	107
4.5 控制效果分析	115
4.5.1 不同带钢宽度的板形控制效果	115
4.5.2 不同轧制力的板形控制效果	117
4.5.3 不同压下量的板形控制效果	119
4.6 本章小结	121

第 5 章 板形目标曲线动态调节的研究	122
5.1 板形目标曲线系数	122
5.2 板形目标曲线动态调节的评价函数	123
5.3 板形目标曲线动态调节的修正方案	124
5.4 板形目标曲线动态调节混合算法	125
5.4.1 混合算法的理论基础	125
5.4.2 混合算法搜索方向的确定	126
5.4.3 混合算法搜索方向的寻优	129
5.4.4 混合算法流程	135
5.5 应用效果	137
5.5.1 板形目标曲线动态调节模型消除对称 板形缺陷的控制效果	139
5.5.2 轧制速度变化引起的板形偏差的调节效果	143
5.5.3 出口厚度变化引起的板形偏差的调节效果	145
5.6 本章小结	148
第 6 章 板形控制系统的应用	149
6.1 板形控制系统数据通信	149
6.2 板形控制系统在线诊断	150
6.3 板形控制系统同步	151
6.4 板形控制系统数据传输	152
6.5 板形控制系统硬件	153
6.5.1 机架 UR5213	153
6.5.2 中央处理单元 CPU551	154
6.5.3 通信模板 CP50M0	155
6.5.4 通信模板 CP51M1	157
6.6 板形控制系统功能	157
6.6.1 板形控制系统主界面功能	158
6.6.2 板形控制系统调节流程界面功能	158
6.6.3 板形控制系统调节参数界面功能	164
6.7 板形控制效果分析	164

6.7.1 厚规格带钢板形控制效果·····	167
6.7.2 常规规格带钢板形控制效果·····	169
6.7.3 薄规格带钢板形控制效果·····	171
6.8 本章小结·····	173
第7章 结 论 ·····	175
参考文献 ·····	177

第1章 绪论

1.1 课题研究的背景和意义

近年来，由于我国钢铁行业板带材产能过剩情况日益严重，如何生产出高质量的冷轧带钢成为亟待解决的难题。冷轧板形控制技术是冷轧技术领域最核心的内容，板形质量的好坏反映了国家钢铁工业技术水平的高低，是衡量冷轧带钢质量的重要指标。随着我国国民经济结构性升级，各行业对冷轧板带材的板形质量提出了更严格的要求^[1]。板形控制系统与板形核心模型的优化将成为研究的热点与难点。

冷轧生产工艺技术复杂，设备装备水平要求很高。以我国目前的实力，已经能够进行冷轧生产线控制系统的开发、一些工艺的设计和部分的建造^[2]。然而，在核心技术和硬件设备的生产方面依然依靠进口。鉴于核心技术和设备的引进成本较高，在我国的钢铁企业中，相对中小型的钢铁企业而言，只有大型的钢铁集团才能够承担起装配的费用，这对于我国在整体上提高冷轧带钢产品等级的生产能力造成的阻碍是无法忽视的，克服这一困难是每一位钢铁人肩膀上神圣而庄严的责任。

尤其是冷连轧机板形控制系统这样极其复杂并且精度极高的控制系统，其核心技术仍然掌握在国外企业手中。为了实现技术垄断，国外公司通常将核心技术进行保密处理。从国外购买的板形控制系统中，重要数学模型和关键的控制功能往往只显示输入初始值和计算的最终结果，具体操作顺序和运算过程以“黑箱”的形式呈现在我国技术工作者面前。当面对板形控制系统升级和新功能、新产品开发时，将面临巨大的困难和挑战，对今后系统维护工作也将带来极大的不便。同时，引进的板形控制系统也存在

着缺点和不足,部分钢铁生产企业对于从国外购买的板形控制系统没有形成系统的科学认识,板形控制系统工作原理的复杂性和控制功能的多样性并没有在企业技术团队中得到足够的了解和熟练的掌握^[3~5]。在实际生产操作中,盲目的应用现象往往无法从根本上避免,板形控制系统实际上仅仅发挥出一部分作用,无法从真正意义上提升冷轧带钢成品的板形等级。

本书以国内某 1 450mm 五机架冷连轧机组为研究对象,立足原有的控制系统平台,采用板形理论和控制理论相结合的方法,对原有的控制模型进行优化与改进,建立更切合实际的板形控制模型,旨在充分发挥轧机设备潜力的同时提高轧机板形控制能力,以获得高板形质量的带钢。在板形控制系统的优化过程中,通过分析与处理板形控制中急需解决的复杂问题,并以严密的理论计算和复杂的轧制实验为基础,建立了板形控制系统核心模型并制定了板形控制策略。

1.2 板形调节机构

板形调节的控制手段主要是修订轧辊弹性变形状态和控制轧辊凸度,板形控制的实质是对轧机有载辊缝形状的调节。为了消除板形缺陷,获得良好的板形,可以针对板形的影响因素引起的辊缝形状变化进行相应的补偿。对于大多数冷轧板形控制机型而言,板形控制的核心思想就是使在线辊缝形状与带钢形貌保持一致,使沿带钢宽度方向上的各个纵条具有相应的延伸。从设备上可以分为轧辊横移、轧辊倾斜、轧辊弯辊以及轧辊分段冷却;从工艺上考虑包括轧辊热凸度的设定、张力分布的调节、轧制规程的制定、辊缝初始状态的控制等。

1.2.1 轧辊横移

轧辊横移技术的开发主要是为了将有害接触弯矩进行完全意义上的消除,而有害弯矩的形成主要是因为是在轧制带钢宽度之外存在辊间接触压力^[6,7]。

轧辊横移如图 1.1 所示,通过一对轧辊沿着不同方向发生指定的位移,可以使辊间的接触长度发生变化,保证仅在带钢宽度范围之内存在接触,能够最大可能地避免有害弯矩的发生。轧辊横移技术对于板形的改善效果十分显著,同时还能够使轧辊的磨损变得均匀。

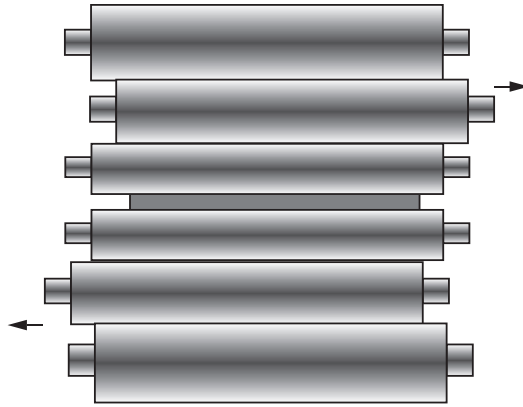


图 1.1 轧辊横移

1.2.2 轧辊倾斜

轧辊倾斜就是保持一侧辊缝不变，调整另一侧辊缝。这种手段能控制镰刀弯、单边浪等非对称板形缺陷，即绕着轧辊的中心点单侧压下。轧辊倾斜是借助轧机两侧压下机构差动地进行轧辊位置控制，使两侧压下位置不同，从而使辊缝一侧的轧制压力增大，另一侧的轧制压力降低，形成一个楔形辊缝。轧辊倾斜对带钢单侧浪形具有很强的纠正能力，尤其适用于来料为楔形的带钢，是板形自动控制系统中必不可少的调节机构^[8,9]。

轧辊倾斜如图 1.2 所示。在轧制过程中，使用轧辊倾斜技术将用到自保

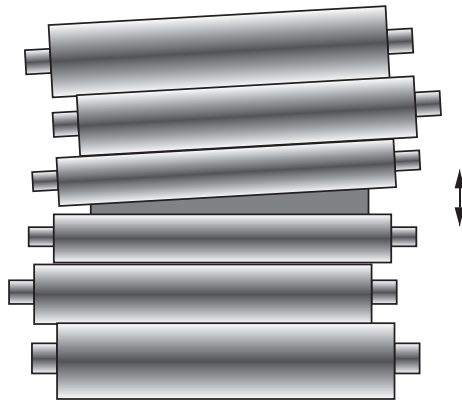


图 1.2 轧辊倾斜

护措施限制调节增量和调节总量。在投产试车阶段，轧辊倾斜调节增量和总调节量输入到计算机内，并给予校准，倾斜压下速度的最小可调节量是用一个瞬时手动干预来确定的。

1.2.3 轧辊弯辊

为了控制有载辊缝形状，最直接的想法是改变轧辊在垂直方向上的间隙，其技术原理为：利用液压装置对轧辊辊径施加液压弯辊力，瞬时地改变轧辊的有载辊缝形状，从而改变轧辊的有效凸度和轧后带钢的延伸横向分布^[10,11]。

轧辊弯辊如图 1.3 所示。按照弯辊力作用部位，弯辊通常可以分为工作辊弯辊、中间辊弯辊和支撑辊弯辊；按照弯辊力的作用面，弯辊可以分为垂直面弯辊和水平面弯辊；根据弯辊力作用方向，弯辊可以分为正弯辊和负弯辊。液压弯辊具有结构简单、响应速度快、板形控制效果明显以及易与其他调节机构相结合等优点。液压弯辊可使辊缝在一定范围内迅速变化，且能连续调整，有利于实现板形控制自动化。

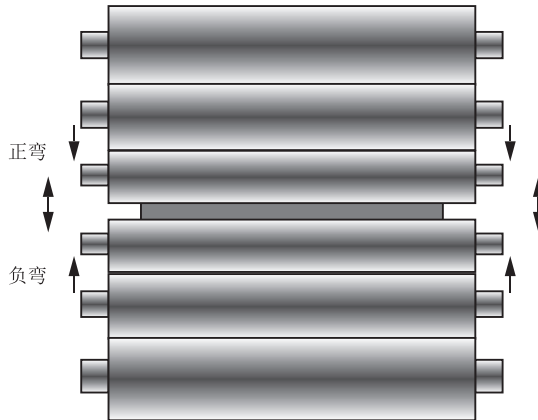


图 1.3 轧辊弯辊

1.2.4 轧辊分段冷却

工作辊分段冷却过程中，一般会发出向指定的测量段喷洒光滑液和冷却剂的指令，进而对该测量段上的轧辊热膨胀进行控制，最终达到调节不

同的测量段上轧辊凸度的效果，每个冷却区的控制都可以单独进行。在指定的冷却测量段上的冷却设定值需要通过数学模型计算，主要考虑的因素为轧辊分段冷却量。同时，该冷却量应与测量段上的带钢张力一一对应^[12,13]。在实际带钢的生产中，必须让所有冷却区域的基本冷却量不为零，该基本冷却量为最大冷却量的1/3。

轧辊分段冷却如图1.4所示。下级控制装置首先接收每个测量段上的冷却输出，其中冷却输出为基本冷却量与冷却量设定值共同作用的结果，最后控制阀被控制装置关闭或打开指定的时间。在板带轧制过程中，轧件变形及轧件与轧辊摩擦产生的热量会使轧辊发生不均匀热膨胀。轧辊的分段冷却技术就是对轧辊分段喷射冷却液，使每段轧辊上的热凸度按照要求发生变化，以控制板带钢相应段纵向上的延长率。

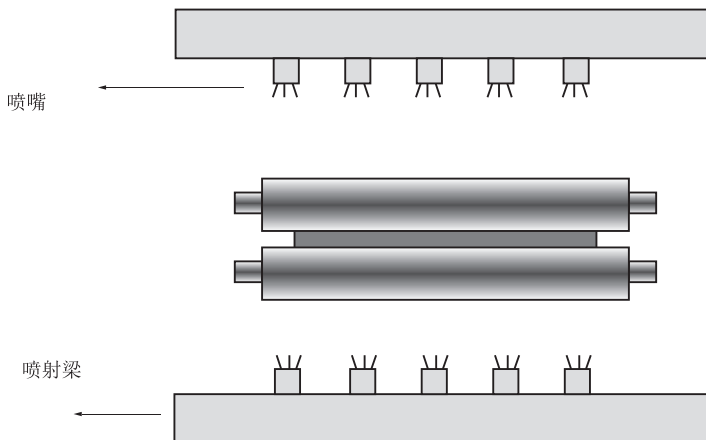


图 1.4 轧辊分段冷却

切条测量法如图1.5所示。在轧件上横切一个1m左右长度的试件，然后在试件表面划上标志线，以区别A边与B边，板1和板2，以及将被剖成窄条的次序，再按照1~9和8~10的次序，纵剪成条。此时窄条内的应力基本释放完了，并得以自由地伸长与缩短，然后将其按序号排列整齐，分别测量出其长度，并计算出其平均值。

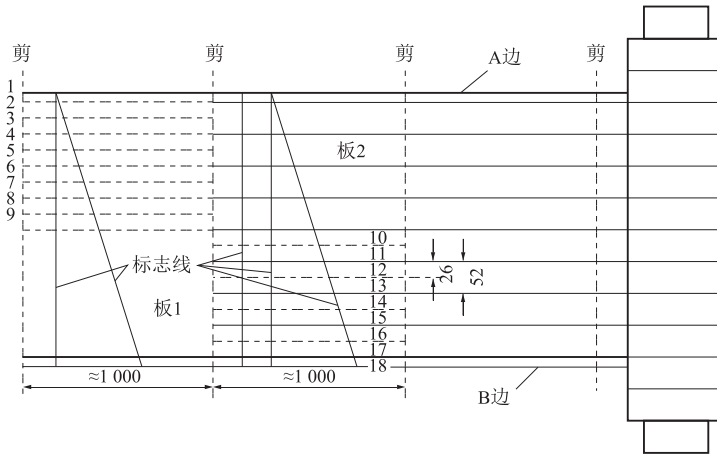


图 1.5 切条测量法

内应力法，轧件剖分后，小窄条的长度差正比于剖分前不同宽度位置上的内应力差^[14,15]。采用内应力法时板形表达式为

$$I = \Delta L / L = \Delta \sigma_i / E \quad (1.1)$$

式中， ΔL ——带钢长度方向上纵条长度与基准长度的差值；

L ——带钢基准长度，各纵条长度的平均值；

$\Delta \sigma_i$ ——轧件宽度方向的内应力差；

E ——弹性模量；

I ——板形值。

因为铁磁材料的磁性对材料内部的应力比较敏感，所以通过利用磁性-弹性效应制作的探头来制作板形仪。

外应力法，由于轧件内部因延伸不均而产生纵向内应力，所以张力在轧件的宽度方向上产生差异，它与轧件的延长成正比^[16~18]，即

$$I = \Delta L / L = \Delta T / E \quad (1.2)$$

式中， ΔL ——带钢长度方向上纵条长度与基准长度的差值；

L ——带钢基准长度，各纵条长度的平均值；

ΔT ——轧件宽度方向的外应力差；

E ——弹性模量；

I ——板形值。

该方法将测轧件长度转换为测轧件宽度上的张力差。

1.3 板形测量机构

1.3.1 ASEA 板形辊

ASEA 板形辊是一种测量张力沿着板宽分布的工具，安置在轧机与卷取机之间，并代替导向辊使用，其测力传感器装在辊内。这是瑞典 ASER Industrial Systems 与一些单位共同开发的。早在 20 世纪 60 年代初期，Alcan 公司 Kinstom 工厂的铝轧机，British 钢铁公司 Llanwern 工厂的四机架 1 730mm 冷轧机上都配置了这种板形辊，当年虽然还没有闭环自控，但也起到了良好的测量和指示作用。ASEA 板形辊已经成为应用最广泛的板形测量工具之一。

ASEA 板形辊有一个实心的芯轴，芯轴的圆周上有 4 个槽，槽内放置测压头，每一个钢环为一个测量区段，各自与 4 个测压头相接触，用来感应该区段的径向压力。整个组装好的辊子，磨平外圆，喷镀硬质合金，使其有较高的耐磨性能，辊子直径与其所受的载荷有关。工作时板形辊由轧件拖动，做同步旋转，本身不需要动力，但仍在其一端装有驱动电机，其目的是帮助板形辊克服在轧机启动和制动时的惯性，以免轧件将辊面擦伤。板形辊芯轴槽内有测压头，它是一种压磁压头，主绕组输入 150 ~ 2 000Hz 的交变电流，次级组输出的是调幅信号，在板形辊的另一端，有一个 46 通道的滑环将信号引出^[19~21]。

这种板形辊的测力范围较宽。虽然轧件对辊子的径向压力随卷材直径增大而变化，但板形只涉及板宽方向上的应力差值，故径向压力逐渐变化不影响测得的板形结果。板形辊可以设置在卷取机和轧件之间，代替导向辊使用。此外，这种板形辊是整体结构，极为牢固，故在轧件头尾通过时不必移开。辊子上的所有零件都具有相同的速度。钢环之间无磨损，辊面磨损也小，辊子需维护保养的只是信号引出用的滑环。测得的信号经计算机处理后，一方面送给执行机构，进行轧件板形调节；另一方面送给显示和记录装置。计算机调控中需作若干补偿，包括轧件边部区段的补偿、轧