

轧制参数 计算模型及其应用

刘相华 胡贤磊 杜林秀 等著



化学工业出版社

轧制参数计算模型及其应用

刘相华 胡贤磊 杜林秀 等著



化学工业出版社

· 北京 ·

内 容 提 要

本书阐述了轧制参数计算模型及其应用的现状和发展趋势,研究及介绍了轧制过程中的变形抗力模型、轧制力能参数模型(包括板带材热轧和冷轧的轧制力模型、力矩模型、能耗模型等)、厚度控制模型和算法(包括轧机刚度模型、辊缝设定模型、厚度补偿模型及模型自学习等)、宽展计算模型与宽度控制技术、温度计算模型等,给出了典型厂家轧制过程参数数学模型的结构形式,结合具体工况介绍了相关模型的使用方法和计算实例,并作了简要分析。

本书可供从事轧制技术领域工作的现场技术人员、工程设计人员、科研人员、高等院校的教师及材料加工工程专业的研究生参阅,也可作为从事轧制过程数学模型开发工作的硕士生、博士生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

轧制参数计算模型及其应用/刘相华,胡贤磊,杜林秀等著. —北京:化学工业出版社, 2007. 7
ISBN 978-7-122-00702-5

I. 轧… II. ①刘…②胡…③杜… III. 轧制-数学模型 IV. TG33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 091998 号

责任编辑:陶艳玲 彭喜英
责任校对:徐贞珍

文字编辑:余纪军
装帧设计:关 飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装:北京中科印刷有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 14½ 字数 379 千字 2007 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:38.00 元

版权所有 违者必究

前言

近年来,我国钢铁工业飞速发展,带动了轧制技术的进步。从20世纪90年代开始到进入21世纪以来,在全国各地建起了一大批现代化的轧机,成为我国轧制技术发展的主流。从事轧钢行业的技术人员越来越深刻地认识到,轧机的现代化程度越高,对数学模型的依赖程度越大,因而对轧制过程数学模型的开发、维护与优化受到越来越多的重视。数学模型已经成为各厂家轧制关键技术的核心,掌握了数学模型开发与维护知识和技能的技术人员成了轧钢厂的宝贵财富。

数学模型的开发与维护,既需要实践经验的积累,也需要知识更新和信息的交流。人们渴望能有机会更广泛、更方便地查找到有关轧制过程数学模型的文献资料,有机会了解兄弟厂家数学模型的使用情况和发展轨迹。在这种背景下,我们萌发了写作本书的愿望,初衷是为大家提供一本有关轧制过程数学模型的案头卷,使读者能够在需要的时候,可以方便地查阅有关轧钢数学模型方面的相关信息,对所从事的数学模型开发与维护工作有所帮助。

上述想法得到了化学工业出版社的大力支持。本书第1章由刘相华执笔,第2章由杜林秀、吴红艳执笔,第3章、第4章由胡贤磊执笔,第5章由刘相华、喻海良执笔,第6章由支颖、刘相华执笔,全书由刘相华审定。由于作者水平所限,书中难免存在不足之处,敬请读者给予批评指正。

需要指出的是,本书的部分内容是作者所在单位东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室(RAL)的师生多年从事相关科研工作累积的成果。正是由于作者多年在这个集体中工作、学习、生活,使我们有机会去深入钻研理论知识、广泛联系现场实际、动手解决具体问题,深化了对轧制过程数学模型的理解。在本书完成之际,我们衷心感谢RAL为本书的写作提供的良好的学术环境;向曾经或正在RAL工作、在轧制过程数学模型开发方面作出了贡献的各位老师、朋友和同学表示衷心感谢;特别向毕业于RAL的各位博士、硕士研究生表示感谢,正是由于他们在RAL完成学位论文期间所做出的出色研究工作,为本书积累了宝贵的素材;向对本书提出过建议,给予我们鼓励和期待的各位老师、朋友和同行表达谢意。

作 者

2007年2月

目录

第 1 章 轧制过程计算模型概述	1
1.1 模型在轧制过程控制中的作用	1
1.2 轧制过程计算模型的特点	2
1.2.1 轧制模型的系统性与相关性	2
1.2.2 快速计算要求和模型的简便性	2
1.2.3 轧制模型的精确性	3
1.3 轧制过程计算模型的建模方法	4
1.3.1 基于理论分析的建模方法	4
1.3.2 基于实验或生产数据回归的建模方法	4
1.3.3 基于人工智能的建模方法	4
1.3.4 数学模型与人工智能结合的建模方法	5
1.4 轧制过程计算模型的调优	6
1.5 发展趋势与展望	7
1.5.1 轧件组织性能演变的模拟、预测及在线优化控制	7
1.5.2 新一代控制冷却技术	9
1.5.3 柔性轧制技术	13
1.5.4 减量化产品生产技术	16
参考文献	19
第 2 章 变形抗力模型	20
2.1 变形抗力的概念及其影响因素	20
2.2 热轧钢材变形抗力模型	21
2.2.1 材料热轧变形抗力的测定	21
2.2.2 热轧变形抗力曲线	22
2.2.3 热轧变形抗力模型	23
2.2.4 典型钢种热轧变形抗力实例	25
2.3 冷轧钢材变形抗力模型	34
2.3.1 冷轧变形抗力的测定	34
2.3.2 冷轧变形抗力模型	35
2.3.3 几种钢材冷轧变形抗力实例	35
2.4 其他变形抗力模型	40

2.4.1	铝的变形抗力模型	40
2.4.2	铜的变形抗力模型	41
2.4.3	钨的变形抗力模型	43
2.4.4	BT20 钛合金的变形抗力模型	43
参考文献		44
第3章 轧制力能参数模型		46
3.1	板带材热轧轧制力模型	46
3.1.1	轧制力的计算及其影响因素	46
3.1.2	热轧轧制力的计算公式	55
3.1.3	典型厂家热轧轧制力模型	63
3.2	板带材冷轧轧制力模型	71
3.2.1	冷轧轧制力的计算公式	71
3.2.2	典型厂家冷轧轧制力模型	82
3.3	轧制力矩与功率模型	86
3.3.1	轧辊主传动系统的载荷	86
3.3.2	典型厂家轧制力矩和轧制功率模型	92
参考文献		94
第4章 厚度控制模型和算法		96
4.1	轧机刚度模型	96
4.1.1	常用轧机刚度模型	98
4.1.2	轧机刚度测试及处理	103
4.1.3	辊系弹性变形模型	110
4.1.4	新弹跳模型	113
4.2	辊缝设定模型	114
4.2.1	动态修正轧机弹跳法	114
4.2.2	轧件头部辊缝动态模糊设定技术	116
4.2.3	锁定目标厚度的辊缝调整法	120
4.3	厚度补偿模型	123
4.3.1	油膜厚度计算模型	123
4.3.2	偏心补偿模型	127
4.4	模型自学习	133
4.4.1	模型自学习算法	134
4.4.2	热连轧轧制力模型自学习	138
4.4.3	中厚板轧制力模型自学习	141
4.4.4	冷连轧轧制力模型自学习	145
参考文献		148
第5章 宽展计算模型与宽度控制		150
5.1	宽展在轧制中的作用	150
5.1.1	棒线材轧制的宽展	150
5.1.2	矩形件的宽展	151
5.1.3	板带材平轧的宽展	152

5.1.4	板坯立轧的宽向不均匀变形	153
5.2	描述宽展的几何参数	154
5.2.1	平轧宽向变形的几何参数	154
5.2.2	立轧宽向不均匀变形的几何参数	155
5.3	宽展的影响因素	155
5.3.1	最小阻力定律和最短线法则	155
5.3.2	几何尺寸的影响	156
5.3.3	摩擦对宽展的影响	157
5.4	宽展计算公式	157
5.4.1	宽展公式类型	157
5.4.2	理论及半理论宽展公式	158
5.4.3	宽展经验公式	158
5.4.4	其他宽展公式	159
5.4.5	宽展公式考虑的因素分析	160
5.5	宽展公式的计算结果	161
5.5.1	矩形坯无孔型轧制的宽展计算	161
5.5.2	热轧扁钢的宽展计算	162
5.5.3	热轧带钢粗轧道次宽展计算	164
5.6	板坯立轧不均匀变形的计算模型	166
5.6.1	不均匀变形的计算公式	166
5.6.2	板坯立轧不均匀变形的计算结果	167
5.6.3	立轧后平轧回展的计算结果	169
5.6.4	调宽效率的计算结果	171
5.7	宽度控制技术	173
5.7.1	板坯的调宽	173
5.7.2	轧件的宽度控制	178
5.7.3	中厚板的平面形状控制	183
	参考文献	186
第6章	轧制过程温度计算模型	187
6.1	概述	187
6.2	轧制过程温度计算的基本理论	187
6.2.1	热传导基本方程	187
6.2.2	求解温度场的有限差分法	189
6.2.3	求解温度场的有限元法	190
6.3	轧制过程温度计算方法	192
6.3.1	变形区内轧件温度计算	192
6.3.2	轧件空冷与水冷过程的温度计算	193
6.3.3	钢卷冷却过程的温度计算	194
6.3.4	热轧轧辊温度场计算	195
6.4	现场应用的典型冷却数学模型	196
6.4.1	意大利 ANSALDO 公司的冷却数学模型	197

6.4.2	德国西门子公司的冷却数学模型	198
6.4.3	美国 GE 公司的冷却数学模型	199
6.4.4	日本新日铁公司的冷却数学模型	200
6.4.5	日本三菱电机公司的冷却数学模型	201
6.5	轧制过程温度场的计算实例	203
6.5.1	计算条件	203
6.5.2	换热计算中各参数的确定	205
6.5.3	粗轧阶段温度场的有限元计算结果	206
6.5.4	精轧阶段温度场的有限元计算结果	207
6.5.5	层流冷却中轧件温降计算结果	210
6.5.6	钢卷冷却过程温降计算结果	217
参考文献		221

第 1 章

轧制过程计算模型概述

1.1 模型在轧制过程控制中的作用

现代轧制过程具有轧制速度快、精度要求高、连续化生产等特点，一般均采用计算机控制。20 世纪 80 年代以后，对连轧机组来说，传统的人工操作方式逐渐被硬件以工业控制计算机为核心、软件以数学模型为核心的自动控制系统所取代。如果说控制系统是现代轧机的中枢神经，那么数学模型就是轧机控制的灵魂。

高度自动化的现代轧机，在正常情况下，不是操作工控制轧机来轧钢，而是模型控制轧机去轧钢。操作工的职责变成根据需要调用模型、监视过程的进行和处理异常情况。模型的计算精度、工作状况和水平在很大程度上决定了轧制产品的产量、质量、成材率、成本和效益，所以没有理由不重视模型对现代化轧机的重要作用。

模型在轧制过程控制中的作用体现在以下方面。

(1) 轧制过程基本参数的计算，如轧件温度的计算，轧制力能参数的计算，轧件变形的计算，轧辊和机架变形计算等。

(2) 执行机构动作参数的设定计算，如辊缝的设定，轧制速度的设定，液压缸位置的设定，冷却水阀门开关组态的设定等。

(3) 动态调整控制量的给定，如 AGC 系统的辊缝调节量，板形控制系统的弯辊力调节量，活套控制系统的速度调节量，控制冷却系统的阀门组态调节等。

(4) 根据反映轧制过程控制效果的在线数据，对模型系数进行自学习，使模型能够工作在最佳状态。

人们对模型作用的认识逐渐深化。曾经有人认为，肯付出昂贵的代价，买最好的模型，自然就能得到最好的效果。其实不然，轧制模型需要不断地维护、整定和优化，才能适应轧制产品、设备状态和外部条件的变化，从而长期工作在最佳状态。放之四海而皆准的模型对轧制过程控制来说是不存在的，引进了好的模型就一劳永逸的想法是不切实际的。

模型是人类脑力劳动的产物，它没有什么神秘之处，也绝非高不可攀、深不可测，虽然有时人为地把它做成只能见到输入和输出的“黑箱”，最终它还要受到人的控制，在人的指挥下工作。分析模型、掌握模型、调教模型、优化模型是现代轧钢工作者控制轧制过程的重要任务，值得我们去认真学习、潜心研究、着力开发。

1.2 轧制过程计算模型的特点

表面上看傻、大、黑、粗的轧制过程，其关键控制参数的要求是高、精、尖、准的。现代大型冷连轧机组的板厚控制精度已经达到 $1\sim 2\mu\text{m}$ ，作为位置控制精度来说，其难度一点也不亚于回收载人卫星。考虑到轧制过程控制具有多变量、强耦合、快过程、深度非线性等特点，它对计算模型精确性、健壮性（robust）、可靠性、易维护性等方面的严格要求是不言而喻的。

1.2.1 轧制模型的系统性与相关性

轧制过程的影响因素众多，不是三个五个或十个八个单体模型所能控制得了的，需要有成套的模型，有时称为模型库。其中有关轧件温度的模型，就有空冷模型、水冷模型、机架间冷却模型、轧制中温降（升）模型、除鳞温降模型、温度设定计算模型、反馈控制模型、冷却路径控制模型、冷却策略控制模型等；轧制力能参数方面，有按所生产各类钢种的变形抗力模型、轧制力模型、力矩模型、能耗模型、张力模型、轧机刚度模型、摩擦系数模型等；轧件变形方面，有宽展模型、精轧机组拉窄模型、前滑模型、板坯立轧的狗骨形模型、轧件头尾的失宽模型、立辊短行程控制模型等；板形控制方面，有轧辊弹性弯曲模型、弹性压扁模型、轧辊热膨胀模型、轧辊磨损模型、弯辊力模型、轧辊横移模型、轧辊交叉模型等。

这些模型之间有些有着密切的依存关系，如轧制力的模型计算精度依赖于轧制温度的计算精度，而板厚控制精度又在很大程度上取决于轧制力的计算精度。有些模型之间有很强的耦合关系，如板厚和板形之间互相耦合，张力、速度与辊缝之间互相耦合，这种耦合关系，使得整个连续轧制过程形成牵一发而动全身的复杂系统，通常需要进行解耦控制或者补偿控制。

对轧制过程的控制水平是模型系统整体效果的体现。哪一个环节精确度的缺失都会对整体控制效果产生不利的影响。例如，只有好的轧制力模型而轧机刚度模型有问题就很难得到好的厚度控制效果，有好的轧辊弹性变形模型而热凸度模型和磨损模型有问题就会影响板形控制效果。模型工作者的一个典型任务就是在复杂的模型系统中，找到那些最关键、最活跃且没有工作在最佳状态的模型，使之得到恰当的维护和优化。这样不断地把“木桶理论”中最低一块板提升到平均高度以上，以期不断地提高木桶内水面的高度，达到模型整体水平最佳的效果。

1.2.2 快速计算要求和模型的简便性

轧制过程是典型的工业快过程，其中高速线材的轧制速度已经达到 140m/s ，冷、热连轧机组的轧制速度也达到了每秒数十米，往往需要在几毫秒内完成一次控制过程，这就要求控制模型的形式要简单，计算速度要快，完成一次计算的时间要短。

金属材料的塑性变形中既有本构关系方面的物理非线性，也有材料流动方面的几何非线性，要得到未加任何简化就能精确描述其真实过程的数学模型或者是不可能的，或者是其求

解过程极其复杂不能满足快速性的要求而不能在线应用。所以,在轧制过程控制的实用模型中往往使用简化的数学模型。

把复杂的非线性函数分段线性化,是把一个复杂的问题简化为多个简单问题的常用方法。把这种思想用于模型的简化,提出了所谓“层别”的概念和做法。其基本思路是:不是用一个公式去描述全部复杂的工况,而是以一种确定的模型结构为基础,按照不同的变量变化区间来选择模型系数,每一组系数只对应范围很窄的一组确定工况,这样来获得较高的计算精度。例如,要找到一个放之四海而皆准的轧制力公式几乎是不可能的,但是,如果我们按照钢种、厚度、宽度等参数把它分解成多种工况,设法通过调整模型系数使之能够在这个小范围内提高模型的精度,就会把问题变得容易得多。

现代轧机控制系统中采取这种做法的例子很多。事实上,把层别表做成数据库,按照当前所轧制产品的钢种、规格、轧制条件来检索出相应条件下的层别系数,构成适用范围很窄的计算模型,就能够更加容易得到较高的计算精度。这样一来,从某种意义上来说,把追求普适数学模型的努力,转变为适当划分层别及确定层别系数,使之更容易操作,这是一种化繁为简的好方法。

这样,确定层别系数就成为了一项至关重要的工作,它取决于正确的理论分析、实验数据、生产数据的积累和参考相关类似轧机的操作结果。层别系数表不应该是一经建立就一成不变的,它需要根据生产经验的积累和设备、工艺条件的变化来不断地加以修正。所谓对数学模型的维护,很大程度上就是对层别数据表的维护和调优。

1.2.3 轧制模型的精确性

提高轧制模型的精度有多种方法,例如,采用正确的理论建立合理的模型结构,根据实测数据来校正和修改模型系数,利用人工智能方法从海量数据中提取出规律对数学模型加以修正,利用数理统计方法分析误差的来源,找出减少误差的途径以及通过与实测数据比较利用自学习系数来提高精度等。

人们在不断改进模型结构、优化模型系数以提高模型计算精度的同时,逐渐发现自学习(self-learning)是一种提高模型精度的好方法,其基本思路是:以轧制参数的实测值作为比较的标准,通过比较模型计算结果和实测值,来找出一个修正系数(自学习系数)。在模型计算中考虑了自学习系数之后,可使后续的计算值能够更加接近实测值。

自学习可分为短期自学习和长期自学习。在热轧带钢中短期自学习也称为卷对卷的自学习,也就是把当前这一卷带钢的计算值与刚刚轧过的前一卷的实测值相比较,以这个实测值为准对计算值加以修正,以期减小当前计算值的偏差。长期自学习是轧制中更换规格品种时,从系数表中把过去生产同一规格品种时记录下来的自学习系数检索出来,作为当前的自学习系数,以此为基准值,进行短期自学习。轧制完这一批产品后,再把这段时间的自学习综合效果归纳为一个长期自学习系数存储起来,取代原来这个规格品种的自学习系数,使得这批生产中对自学习系数调整的经验得以保存,以便下一次再生产相同规格品种的产品时再次调用。

由于自学习是以实测值为基准的,所以采用自学习系数来提高模型的精度很有效。长期自学习和短期自学习结合起来,经过一段时间经验积累和数据处理,能够使模型的计算精度得到大幅度的提高。

1.3 轧制过程计算模型的建模方法

过去常用的轧制过程数学模型建模方法有：基于理论分析的建模方法、基于实验或生产数据回归的建模方法等；近年来随着人工智能技术在轧制领域中应用范围的扩大，又出现了基于人工智能的建模方法、数学模型与人工智能结合的建模方法等新方法。

1.3.1 基于理论分析的建模方法

基于理论分析的建模方法是开发数学模型的常用方法。它是通过对轧制过程物理/力学现象的分析，找出其主要影响因素和一般性规律，得到轧制过程关键参数的计算结果。很多轧制力、温度、板形控制和板厚控制等数学模型就是利用这种建模方法建立的。

由于轧制过程的复杂性、深度非线性、影响因素众多，在进行理论分析时往往不得不进行简化和假设，导致计算的结果偏离实际工况，所以轧制过程的数学模型很难不加以修正而直接使用，通常的做法是通过理论分析得到模型的结构，通过与实验和生产数据的比较确定部分模型系数，使模型的计算结果更符合实际。这类模型有时也称为半理论模型。

1.3.2 基于实验或生产数据回归的建模方法

基于实验和生产数据回归建立模型也是一种常用的方法，这样建立的模型通常称为经验模型。用这种方法建模需要对轧制参数的影响因素有透彻的了解，正确选择主要影响因素作为回归参数，选择合适的函数类型构成模型骨架，以生产数据或实验数据作为依据，依照数理统计方法进行回归分析，对模型的精确度、相关性等做出评价，最后得到能够在线应用的数学模型。这种数学模型虽然已经反映了生产或实验中实测数据的规律，但是仍然需要通过在线的自学习来体现当前轧制条件的变化对计算结果的影响，从而进一步提高计算精度。

1.3.3 基于人工智能的建模方法

利用人工智能方法进行轧制参数的预报是近年发展起来的一种新方法，主要有利用人工神经网络（ANN）预报轧制力、卷取温度、轧件力学性能等。人工智能方法与传统方法不同，它避开了过去那种对轧制过程深层规律的无止境的探求，转而模拟人脑来处理那些实实在在发生了的事情。它不是从基本原理出发，而是以事实和数据作根据，来揭示轧制过程中参数的变化规律^[1]。

以轧制力模型为例，在传统方法中，首先需要基于假设和平衡方程推导轧制力公式，研究变形抗力、摩擦条件、外端等因素的影响，精度不能满足要求时再加经验系数进行修正。而利用人工神经网络进行轧制力预报，所依据的是大量在线采集到的轧制力数据和当时各种参数的实际值。为了排除偶然性因素，所用的数据必须是大量的，足以反映出统计性规律。

利用大量的数据通过一种称之为“训练”的过程告诉计算机，在什么轧制条件下，什么钢种（C、Mn及其他各种元素含量的多少），多高的温度，压下量多大，在第几机架实测到的轧制力是多大，经过千百万次的训练，计算机便“记住”了这种因果关系。当你再次给出

相似范围内的具体条件,向它询问轧制力将是多少时,凭借类比记忆功能,计算机就会很容易地给出一个答案。这个答案是可信的,因为它基于事实,是过去千百万次实实在在发生了的真实情况。

这样,不必再去担心哪一条基本假设脱离实际,也不必怀疑哪一步简化处理过于粗糙,只要相信传感器,相信过去发生的事件,相信采集到的数据是真实可靠的,就有理由相信预报的结果。

1.3.4 数学模型与人工智能结合的建模方法

利用数学模型与人工智能结合的方法,可以充分发挥二者各自的优点,进一步提高模型的预报精度。仍以轧制力模型的建立为例,利用数学模型预报轧制力的主值,利用神经网络来预报轧制力的偏差,把两者综合起来作为轧制力的预报值。

$$P = P_m + \delta P_{ANN} \quad (1.1)$$

或

$$P = P_m \lambda P_{ANN} \quad (1.2)$$

这里 P_m 是轧制力的主值,由数学模型预报; δP_{ANN} 是轧制力的偏差值, λP_{ANN} 是轧制力的偏差系数,由神经网络来预报。对应于式(1.1)和式(1.2),开发了两种网络,分别称为加法网络与乘法网络,如图 1.1 所示。

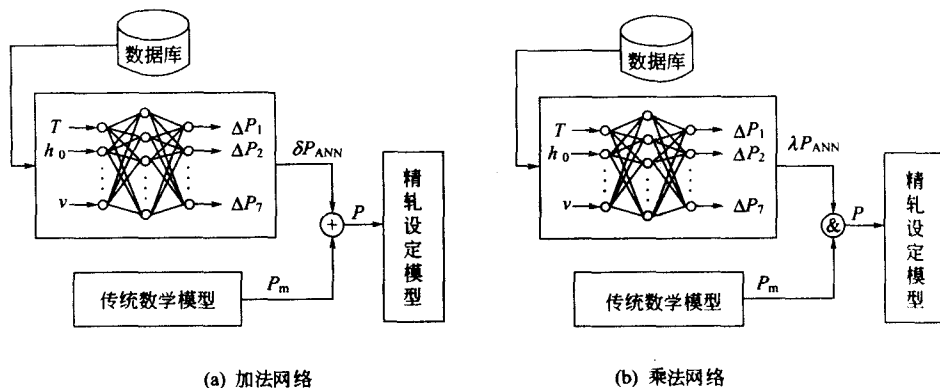


图 1.1 数学模型与神经网络结合的加法网络与乘法网络

根据轧制力偏差表现出的特点,确定选用加法网络或乘法网络。如果轧制力经常出现一个稳定的偏差,可选用加法网络;如果偏差与轧制力的大小相关,可选用乘法网络。

这种数学模型和神经网络相结合的方法利用了两者的优点:数学模型具有坚实的理论依据,能够反映轧制力变化的主要趋势,所以用它来预报轧制力的主值;神经网络容易反映扰动因素对轧制力的影响,所以用它来纠正轧制力的偏差。两者优点的组合,可收到最佳的效果。

实际上,利用数学模型预报轧制力是现有轧机控制系统的普遍做法,考虑到现有轧机的适度规模改造与软件维护,完全摒弃数学模型另起炉灶未必是最佳选择。因而仍以数学模型为主预报轧制力主值,辅以神经网络为其纠正偏差,这样对现有系统的改动小,技术难度小,改动风险小,投入产出效果明显,是在现有轧机上采用智能技术的一个容易被接受的方案。

利用某钢铁公司热轧带钢厂生产过程中的实际数据,对轧制力预报综合神经网络进行离线学习和预报,以建立网络各层的权系数矩阵。训练样本采用 700 块带钢,另外选取 50 块带钢为预报样本。网络训练输入向量包括:工作辊直径、轧辊转速、轧件入口厚度、压下率、带钢前后张力、带钢温度、带钢各成分含量等。输出为 7 个机架的轧制力计算值与实测值之间的差值,再与数学模型计算结果相结合,得到精度很高的轧制力预设定值。

利用所开发的轧制力的智能纠偏系统预报轧制力的效果如图 1.2(c) 所示。为了便于比较,图中同时给出了仅用数学模型 (a) 和仅用神经网络 (b) 的预报结果。在这个例子中,仅用数学模型的预报偏差约在 15% 以内,仅用神经网络的预报偏差可控制在 10% 以内,而综合运用数学模型与神经网络的预报精度基本上在 5% 以内。

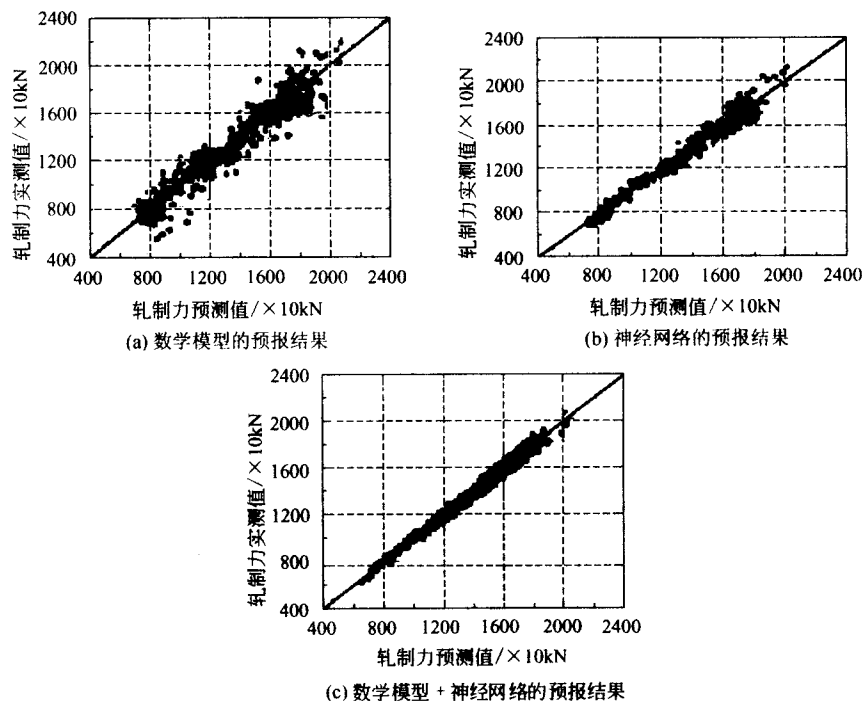


图 1.2 轧制力预报值与实测值的比较

1.4 轧制过程计算模型的调优

如前所述,轧制过程的数学模型不是一经建立就一劳永逸了,它需要不断整定、维护、调优。图 1.3 给出了模型优化在轧机生命周期中的作用。一般说来,随着工厂运行时间的加长,设备状态会逐渐变差,对设备的维护和保养能够延缓设备变差的过程;而操作技术的积累与操作诀窍的产生,能够挖掘设备的潜力,使运行效果得到改善与提升。模型优化是改进运行效果的最有效手段,随着运行时间的加长和操作经验的不断积累,为模型优化提供了数据基础,通过模型优化来获得良好的操作效果是以软件之长补硬件之短的有效途径,是最经济、最方便、最有效、最实用的优化轧制过程方法。没有模型和软件的优化,设备运行状态将会由于磨损、老化、疲劳等因素变得越来越差。目前我国骨干钢铁企业轧制设备的硬件条件已经达到了国际一流水平,但是产品质量和操作水平还有较大的差距,除了管理因素以

外,关键就是模型和过程优化有差距,从这个意义上说,了解和掌握模型调优的方法,对提高我国轧钢技术水平具有十分重要的意义。

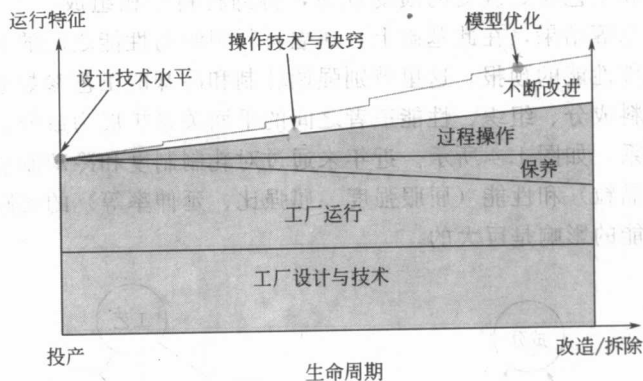


图 1.3 模型优化在轧机生命周期中的作用

在一般情况下,对轧制模型的日常维护通常是对模型系数的优化,调整系数值以使模型能够得到与实测值更加接近的计算结果。这种工作需要有人集中精力去跟踪模型的运行状况,在大量的实测数据与计算数据中找出规律性。对一个具体的数学模型,发现它的计算结果存在偏差需要调整时,具体要调哪些系数,调整量取多少,需要用模拟计算(在线模拟轧钢或离线模拟计算)作检验,有时可以采用人工智能方法(如神经网络)从大量的生产数据中提取出规律性的知识,用于模型系数的修改。

也可以参照自学习系数的取值来修改模型系数。一般说来,自学习系数取值应该在 1 附近,如果自学习系数稳定地偏大或者稳定地偏小,可以考虑把过分偏大或过分偏小的部分通过模型系数的改变加到模型中,使得自学习系数取值在 1 附近就能够得到理想的计算结果。

对模型结构的调整应很慎重,一般是在控制系统升级改造时,考虑是否对部分模型的结构加以改造。模型结构改造以后,已有的模型系数、自学习系数等需要重新设置,这等于经过长期积累的轧制经验需要重新开始,所以日常对模型的维护,一般不涉及模型结构的变化。

1.5 发展趋势与展望

轧制模型的发展趋势要适应轧制技术的进步,当前,值得关注的新进展有以下几个方面。

1.5.1 轧件组织性能演变的模拟、预测及在线优化控制

(1) 组织性能预报

近年来人们对轧件质量的关注的重点逐渐从形状尺寸精度转移到内部组织性能控制。自从奥钢联(VAI)、西门子^[2](Siemens)等成功地将轧件性能预报用于热连轧生产线之后,对轧件组织与性能的性能预报越来越引起人们的重视,近几年成为轧制领域研究和关注的一个热点。

对轧件性能的预报有两种途径。一种是从物理冶金的基本原理出发,建立再结晶、相变、析出的数学模型,用来描述轧制过程中在有变形参与条件下,化学成分确定的材料其微观组织随轧制条件和工艺参数改变的演变规律,得到材料中相组成、各相所占的百分比、晶粒尺寸、析出物形态等结果,在此基础上,建立材料组织与性能之间的关系,实现在不同轧制参数条件下对轧件性能的预报。这里特别强调轧制和冷却的工艺参数对轧件组织与性能的影响,把过去对材料成分、组织、性能三者之间的平面关系扩展为成分、工艺、组织、性能四者之间的立体关系,如图 1.4 所示。近年来通过对轧制制度和冷却制度的优化来改变钢材的组织(如获得细晶粒)和性能(屈服强度、屈强比、延伸率等)的实践表明,轧制和冷却工艺参数对组织性能的影响是巨大的。

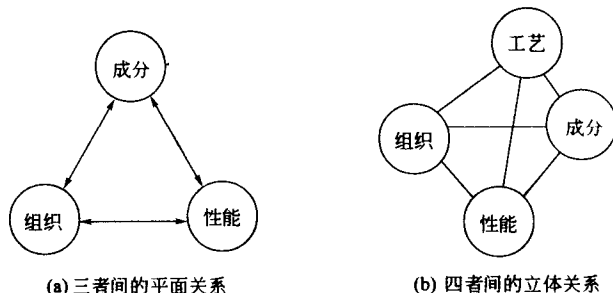


图 1.4 组织、性能、成分、工艺之间的关系

另一种途径是基于大量的生产数据利用神经网络进行组织性能预报。对一种化学成分确定、规格尺寸确定的钢种,在一定的变形制度和冷却制度条件下,其组织性能也应该是确定的。这里主要影响因素有道次压下量、中间坯尺寸、轧制温度、开冷温度、终冷温度、冷却速度、冷却路径等。这种对应关系由大量产品性能的实测数据反映出来,用这些实测数据训练神经网络,使之“记住”什么样化学成分的钢,在何种工艺条件下得到的性能实测值是多少,把成分和工艺条件告诉训练好的神经网络,它会根据对实测数据的“记忆”结果,对产品性能做出预报。这种“记忆”是通过一种称为连接神经元的“权值”数据集来实现的^[3]。

上述两种预报组织性能的方法各有优缺点,数学模型法的基础是物理冶金原理,能够反映组织性能变化的一般性的规律,但是目前纯理论模型还远远不能达到实用的精度要求;神经网络法的基础是大量的实测数据,它记住的是实实在在发生的事情,但是其外推的能力受到很大限制,对没有选做输入参数的一些因素的影响也难以得到反映。把二者的优点结合起来,利用物理冶金原理建立起模型的骨架,利用神经网络基于实测数据来确定模型参数,便能够进一步提高组织性能的预报精度。

组织性能预报技术出现的初期,一些人把它的应用着眼于减少在线性能检测的取样量,加快获得性能数据的时间,从而加快产品的周转速度。近来人们逐渐认识到:利用组织性能预报的结果对轧制过程进行在线优化控制比减少取样量具有更加重要的意义。

(2) 组织性能在线优化控制

如果利用组织性能预报技术,可以知道正在生产线上的某一块钢在后续轧制与冷却工艺条件下能够获得什么样的组织与性能,那么就可以比较组织性能的预报值与目标值之间的差异,如果预报值集合落在目标值集合之中,则可以按照既定的工艺执行,得到组织性能合格的产品;如果有部分或者全部预测值落在目标值集合之外,则需要调整后续的轧制与冷却工

艺参数,在可能的条件下通过工艺优化(如增加/降低终轧温度、加大/减小冷却速度、提高/降低卷取温度等)设法把组织性能控制在所希望的范围内。这就是组织性能在线优化控制的基本思路,这样就比原来那种“事后诸葛亮”式的单纯预报又向前迈进了一大步。

没有检测就谈不上控制,但目前实现钢材组织性能的在线直接检测还很困难。采用前述的方法,可在已知化学成分的情况下,通过对当前工艺参数的检测,来间接预测组织性能。参照软接触测量的思路,我们提出钢材组织性能在线软测量的概念,在组织性能预报软件的基础上开发组织性能软测量检测器(SDMP, Soft Detector of Microstructure and Properties),通过与组织性能目标值的比较,来给出组织性能的控制量,如图 1.5 所示。

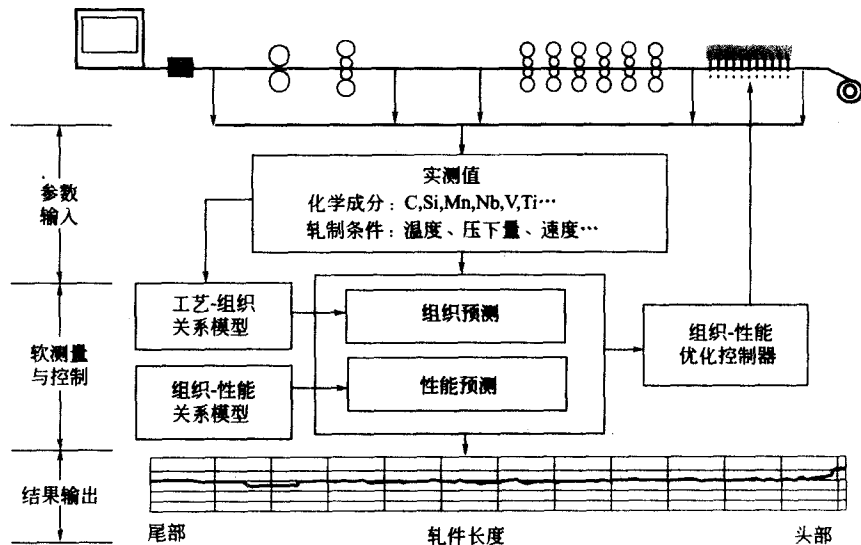


图 1.5 组织性能的在线软测量

软测量不是不测量,而是通过间接测量一些辅助量来获得所需要的信息。例如:目前的技术水平还达不到在线测量晶粒尺寸的要求,但是可以通过对变形温度、变形速度、变形程度的测量,通过工艺-组织关系模型来间接获得晶粒尺寸的“软测量”值,通过组织-性能关系模型来间接获得强度与塑性的“软测量”值。

由于轧件尺寸控制条件的限制,利用改变轧制规程的方式控制组织性能是有限且困难的。对热轧带钢来说,可以通过调整机架间冷却来控制终轧温度,通过层流冷却控制冷却速度、冷却路径和卷取温度,从而控制轧件的组织与性能。在有组织性能在线软测量值的情况下,可以在已知的化学成分、轧制规程、轧件实测温度等参数的基础上,利用计算模型,给出机架间冷却和层流冷却的调整量。这部分工作由称为组织性能模型计算器(MCMP, Model Calculator of Microstructure and Properties)的软件来完成,MCMP与SDMP组成组织性能在线优化控制器(COMP, Controller of Online Optimizing Microstructure and Properties)嵌入过程控制计算机中,如图 1.6 所示,实现对轧材组织性能的在线控制^[4]。

1.5.2 新一代控制冷却技术

(1) 超快速冷却技术

近来人们越来越充分地认识到:通过轧后控制冷却来改善轧件的性能是热轧产品开发的有效途径。热轧带钢生产线中,层流冷却已经成为不可或缺的重要工艺环节。近年来在轧钢