

轧制过程数学模型

Zhazhi Guocheng Shuxue Moxing

任 勇 程晓茹 编著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

轧制过程数学模型

任 勇 程晓茹 编著

北 京

冶金工业出版社

2008

内 容 简 介

本书从建立统计型数学模型的目的出发,比较详细地介绍了线性回归和非线性回归的原理和方法以及用于进行回归计算的 Matlab 程序和实例。本书所介绍的数学模型的内容,基本描述了轧制过程的一些主要关系,包括压力模型、能耗模型、温度模型、组织性能模型、板形模型、宽展模型和前滑模型等。

本书可作为高等院校材料成形与控制工程专业的教材,亦可作为轧钢厂科技工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

轧制过程数学模型/任勇,程晓茹编著. —北京:冶金工业出版社,2008. 1

ISBN 978-7-5024-4437-2

I. 轧… II. ①任… ②程… III. 轧制—数学模型 IV. TG33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 204397 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 朱华英 美术编辑 李 心 版式设计 张 青

责任校对 栾雅谦 责任印制 丁小晶

ISBN 978-7-5024-4437-2

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2008 年 1 月第 1 版; 2008 年 1 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 6.25 印张; 161 千字; 190 页; 1-3000 册
20.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

现代轧钢工业的技术进步,主要表现为生产过程的高度连续化和紧凑化,轧钢生产的自动化和完全的计算机自动控制,高精度轧制技术的发展,生产品种的多样化和复杂化等。在轧钢技术发展的过程中,数学模型始终占有着非常重要的地位,它是轧钢科学技术工作者进行技术创新的必要工具,也是大规模高速连续化生产的基本保证。

轧制过程数学模型是轧制系统各参数和变量之间所存在的某种数量相依关系,采用形式化语言,概括或近似表达出来的一种数学结构。从应用的角度,数学模型可分为分析用模型和控制用模型;从变量特点,可分为确定型模型、概率模型和随机模型;从建模方法,可分为理论模型、理论统计模型和统计模型。在实际生产过程中应用的模型一般都是在现场数据观测的基础上,经过回归分析方法建立的模型。实践证明,有些模型虽然看似简单,但却非常有效。本书正是以科学研究和生产实践为基础,介绍建立轧制过程理论统计型模型的方法和程序。

本书主要由三部分相对独立又互相关联的内容组成,其目的是为了介绍给读者学以致用的具体方法。第一部分是回归分析,主要以通俗易懂的方式介绍线性回归和非线性回归,避免了详细的理论证明和复杂的数学推导;第二部分为 Matlab 数理统计工具箱的应用,第三部分为轧制过程的数学模型,其内容涵盖了轧制过程中的主要关系。全书共 8 章,第 1、2、3、5、6、7 章由任勇编写,第 4、8 章由程晓茹编写。

本书是在多年教学工作的基础上编写的,特别是吸取了武汉科技大学杨节教授和李虎兴教授丰富的教学经验和研究成果,本书的编写也得到了武汉科技大学材料冶金学院和材材控制系同仁的大力支持,在此一并表示感谢。

由于水平所限,不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2007 年 10 月

目 录

1 轧制过程数学模型概述	1
1.1 数学模型的概念	1
1.2 数学模型在轧钢自动控制中的作用	4
1.3 塑性成形模拟中的数学模型	8
1.4 轧制过程数学模型的基本内容	12
1.5 生产中数学模型的自适应	14
2 建模数据分析法	17
2.1 一元回归分析	17
2.1.1 回归分析的基本概念与回归方程	17
2.1.2 回归方程的显著性检验	21
2.2 多元线性回归	26
2.2.1 多元回归数学模型	27
2.2.2 线性方程组消元公式	28
2.2.3 多元线性回归结果检验	31
2.3 逐步回归分析	32
2.3.1 逐步回归的基本思想	32
2.3.2 每个自变量的贡献	34
2.3.3 逐步回归算法	38
2.4 非线性回归	46
2.4.1 内线性模型	46
2.4.2 网格法	48
2.4.3 Gauss-Newton 法	49

3	MATLAB 建模程序	51
3.1	MATLAB 程序基础	51
3.1.1	MATLAB 的运行方式	51
3.1.2	MATLAB 的编程环境	52
3.1.3	MATLAB 数组	54
3.1.4	MATLAB 程序结构	57
3.2	MATLAB 数理统计工具箱	62
3.2.1	plot 函数的应用	62
3.2.2	散点图	64
3.2.3	添加最小二乘拟合曲线	65
3.2.4	q-q 图	65
3.2.5	多元回归—regress 函数	68
3.2.6	逐步回归—stepwise 函数	69
3.2.7	非线性回归	75
4	轧制压力模型与能耗模型	80
4.1	轧制压力模型	80
4.1.1	轧制压力模型的主要形式	80
4.1.2	压力模型的研制方法	86
4.2	能耗模型	111
4.2.1	能耗模型的理论基础及其特性	111
4.2.2	能耗模型的基本形式	113
4.2.3	建立能耗模型的试验方法	116
5	轧制温度模型	118
5.1	传热原理	119
5.1.1	辐射换热	119
5.1.2	对流换热	125
5.1.3	热传导	127

5.2 热轧过程温度计算	129
5.2.1 辐射热所引起的温降计算	131
5.2.2 轧件与轧辊接触传热	132
5.2.3 带钢与轧辊摩擦传热的计算	133
5.2.4 轧制过程中的塑性变形热	133
5.2.5 轧件水冷传热的数学模型	134
5.2.6 冷连轧过程的温度模型	135
6 金属组织性能模型	137
6.1 金属的热变形行为	137
6.1.1 热变形中金属的再结晶	137
6.1.2 变形条件下的相变	138
6.2 金属热变形基本模型	141
6.2.1 原始奥氏体晶粒尺寸	141
6.2.2 动态再结晶模型	141
6.2.3 静态再结晶模型	143
6.2.4 相变模型	145
6.2.5 金属组织与性能关系模型	146
6.3 热轧过程组织性能预报	151
6.3.1 国内外进展	152
6.3.2 组织性能预报系统的主要内容	153
7 板形模型	156
7.1 板形不良现象的物理实质	156
7.2 板形的表示方法	158
7.3 板形良好的几何条件	159
7.4 影响板形的因素分析	162
7.4.1 轧件不均匀变形与板形的关系	162
7.4.2 连轧张力与板形的关系	164
7.4.3 横向厚度分布与板形的关系	165

7.5 板形设定计算	166
7.6 板形目标控制	169
7.6.1 板形标准曲线的概念	169
7.6.2 板形标准曲线的设定方法	171
8 宽展模型与前滑模型	173
8.1 宽展模型	173
8.1.1 宽展模型的理论基础	173
8.1.2 宽展模型的基本形式	176
8.2 前滑模型	183
8.2.1 前滑模型的作用	183
8.2.2 前滑模型的理论基础	184
8.2.3 前滑模型的研制方法	185
参考文献	190

1 轧制过程数学模型概述

在轧钢科学技术中,数学模型始终占有着非常重要的地位,随着轧钢生产从过去的凭经验进行操作到现在生产流程的半自动和完全的计算机自动控制,高精度轧制技术的发展,生产品种的多样化和复杂化,轧制过程数学模型已经是轧钢科学技术工作者进行技术创新的必要工具,也是大规模高速连续化生产的基本保证。数学模型建模技术与方法已成为轧钢学科的重要分支,也是轧钢工程技术人员必须掌握的一种基本技能。

1.1 数学模型的概念

数学模型就是针对或参照某种问题(事件或系统)的特征和数量相依关系,采用形式化语言,概括或近似地表达出来的一种数学结构。

数学模型因问题不同而异,建立数学模型也没有固定的格式和标准,甚至对同一个问题,从不同角度、不同要求出发,可以建立起不同的数学模型。因此与其说数学建模是一门技术,不如说是一门艺术。它需要熟练的数学技巧、丰富的想像力和敏锐的洞察力,需要大量阅读、思考别人做的模型,尤其要自己动手,亲身体验。

建立数学模型的一般步骤:

(1)确定问题系统及变量关系。在对目标系统分析的基础上,确定描述问题的变量及相互关系以及问题所属系统,模型大概的类型,提出有关假说。

(2)确定最佳的试验方案和方法。由于工程技术问题均具有很强的工艺性,因此除少数试验在实验室进行外,应特别重视生

产性试验。

在进行试验时,必须配置性能稳定,具有一定精度的检测装置,而且要严格保持试验条件稳定,精心操作,详细记录,对数据进行正确的判断、筛选和分析。

(3)确定合理的模型结构。模型结构反映了实际过程的内在规律,对试验数据的拟合精度有着本质的影响,有些情况下要应用试验数据进行多种模型结构的拟合,从中选出最合适模型的表达形式。

(4)确定模型中的最佳参数。目前广泛采用最小二乘识别的回归分析方法来确定模型中的最佳参数。

(5)检验修改模型。模型建立之后,能否与生产实际吻合,还需进行重复试验,确认后才能在生产中应用。模型只有在被检验、评价、确认基本符合要求,才能被接受,否则需要修改模型,这种修改有时是局部的,有时甚至要全部推倒重来。

建立数学模型的方法是多种多样的,一般有以下几种:

(1)理论分析法。在边界条件已知的情况下,咬入角模型、纵向力平衡模型等都可以用力平衡关系直接导出。理论分析法中也包括用数值方法来求解的问题,如上下界法、有限元法等。

(2)模拟法。它是一种用人们已经掌握的模型来模拟较复杂,但与已掌握的模型相类似的客观事物的方法。比如,用储水池储水到一定水位就把水全放掉的模型来模拟轧机储能振动问题。

(3)结构分析法。有些系统结构尚不十分清楚,又没有较充分的数据可以利用,做试验也较困难,此时可以预先设定该系统的结构,用此结构来计算一些结果,将此结果进行分析,看其出现的可能,并与生产实际比较进行修正。

(4)结构实验法。实际上这是理论与统计相结合的方法,即用理论方法确定系统的结构(包括各因素及其关系),然后用试验数据来确定其系数。这是最常用的一种方法,也比较实用、准确,

同时也便于修正。塑性加工过程中的大部分数学模型都是用这种方法得到的。例如,变形抗力模型、宽展模型等。

(5) 概率法。用概率分布律及其方法来建立模型,称为概率法。比如,连铸机浇注准备时间可按正态分布来建立模型,而轧机故障中断时间则可按指数分布建立模型。

(6) 统计回归法。在对系统的理论结构尚难弄清的情况下,可以实地采集必要的的数据,通过统计、回归方法,弄清它的结构和系数。比如,轧材质量问题就常用这种方法,因为影响轧材组织性质及尺寸精度等质量问题的因素很多,其中一些因素是可控的,有一些则是不可控的,它们之间的关系往往不太明确,这时就可以用收集的数据,用回归的方法来建立数学模型。在采集数据时要注意方法,以求尽量获得主要因素的关系。

模型的修改与简化,是建模中技巧性较强的环节。由于实际情况是复杂多变的,往往不能简单套用现有模型。例如,有的参数在某个场合容易得到,而在另一场合却得不到,这就迫使人们改用其他形式的模型;有时在构造模型的过程中发现必须拥有这样或那样的数据,或指出模型应朝哪一个方向修正;有时,虽然复杂的模型已经构出,但做试验或求解却十分困难,这也迫使人们采用较简单的近似模型。

常用简化模型的方法有:

(1) 除去一些变量。在机理分析中,在一定条件下,常将描述分布参数系统的偏微分方程,简化为集中参数的常微分方程。在统计分析中,则采用主成分分析法、向后回归法(淘汰法)和逐步回归方法,以减少变量个数。或在建模之前,采用正交试验方法,在众多因素(变量)中找出对指标有显著影响的少量因素再进行优选试验,进而建立模型。

(2) 合并一些变量。在构造模型时,把一些性质相同或相似的变量合并成少数有代表性的变量。尽管这样做降低了模型的精度,但只要能满足建模的基本要求,则是可行的。例如在经济

系统建模中,经过多年研究探索,将国民经济上千个部门合并成 61 个变量。

(3)改变变量的性质。常用的方法是,把某些非主要的或暂时的变量看作常量,把连续变量看作离散变量,或把离散变量看作连续变量。

(4)改变变量之间的函数关系。当处理非线性问题遇到困难时,或建模精度要求不高时,常将非线性函数在某点处展开(Taylor 展开),取前两项作为近似表达式,即用线性关系逼近非线性关系式,这一线性化方法在工程界被广泛采用。

(5)改变约束关系。为简化模型有时还可以对变量的约束条件加以改变,如增加一些约束,或去掉一些约束,对约束进行一些修改等等。例如在求解数学规划问题时,若要求目标函数的极大值,而真正解不一定能找到时,则增加约束后求得的可行解一般是偏低的,称之为保守解或悲观解;去掉一些约束求得的解往往偏高,称之为冒进解或乐观解。虽然它们都不是问题的真正的解,但可以通过它们来了解真正解的范围,这对问题进行初步评价是有用的。

(6)模型结构的转换。若某种模型在理论上很漂亮,但求解很困难,甚至无法求解,或者某种模型,要求具备某种数据,而这种数据不具备或不易得到,只有改用其他形式的模型,即改变模型的结构。模型结构的转换,需要在对问题透彻理解和想像的基础上,实现视角的转换,即从不同的角度观察问题,进而采用不同的数学工具来描述同一问题。

1.2 数学模型在轧钢自动控制中的作用

在轧钢工业中,应用计算机进行生产过程的自动控制无疑是一场深刻的技术革命,它是现代轧钢工业的基石。现代轧钢生产的大型化、高速化和连续化都必须依赖于计算机的在线快速控制,在计算机自动控制中,数学模型又是控制系统的基础和

灵魂。

在人工操作阶段,轧机的调整和过程的实时调节主要是凭经验进行的。由于连轧过程是非常复杂的物理过程,轧制条件和状态不断发生变化,而且该过程又必须保持各机架间金属秒流量相等和遵从能量守恒定律,过程特性更趋复杂和难以掌握,所以单凭经验操作不易达到上述要求,因此轧机的各项技术经济指标都比较低,连轧技术的进一步发展也很困难。从20世纪60年代开始采用计算机控制技术以后,连轧技术获得了具有划时代意义的发展。计算机不仅可对生产过程进行更有效的调节和控制,而且还可加强管理、调度生产线上的物流,同时还有可能采用现代控制技术(自适应控制和最优控制)、发展新的连轧技术(如阶梯带钢)和新的连轧方式(全连续轧制)等。

计算机控制系统由计算机系统(硬件和软件)、调节系统和检测系统所组成,各个系统质量的优劣都影响控制效果。但目前一般认为软件系统(主要指数学模型)是影响计算机控制效果的关键因素。

现以热连轧机精轧机预设控制为例来说明数学模型在计算机控制中的作用及其重要性。

热连轧精轧机设定模型的基本任务是根据来料条件及对成品的要求,通过数学模型的计算,确定精轧机组各机架的辊缝、速度等,以保证获得尽可能准确的带钢成品尺寸。主要计算内容为:

(1) 计算各机架的负荷分配,即在合理分配负荷的前提下确定各机架的出口厚度;

(2) 根据最大生产率和对带钢终轧温度的要求,确定末机架穿带速度;

(3) 计算各机架轧制温度;

(4) 根据流量方程,确定各机架速度;

(5) 计算轧制力和轧机的弹跳值,决定空载辊缝设定值——

轧制力模型和弹跳模型；

(6) 确定弯辊力、活套高度、单位张力值等。

设定系统计算流程如图 1-1 所示。

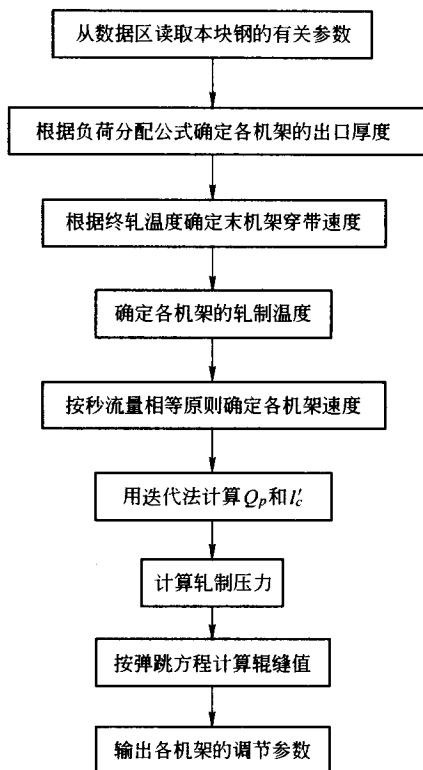


图 1-1 设定系统框图

在设定系统的计算中,首先通过能耗模型、压力模型和变形量来进行负荷分配。不管采用什么模型,一般情况下,都是按事先确定的累计分配系数来计算各架轧机的出口厚度。例如,根据著名的今井一郎的能耗 a 关系式

$$a = a_0(u^m - 1) \quad (1-1)$$

式中 u ——延伸系数;

m ——系数, $m = 0.31 + 0.21/h_0$ 。

可按第 i 架累计能耗系数 φ_i 确定的第 i 架出口厚度 h_i , 即

$$h_i = \frac{h_0 h_n}{[h_n^m + \varphi_i (h_0^m - h_n^m)]^{1/m}} \quad (1-2)$$

当 $\varphi_i = 0$ 时, $h_i = h_0$ 即为带坯厚度;

当 $\varphi_i = 1$ 时, $h_i = h_n$ 即为成品厚度。

轧制压力的计算, 可以用各种轧制压力公式, 但为了适应控制系统速度的需要, 压力公式需做一些简化, 一般是根据具体的工艺设备条件建立理论统计型或统计型经验公式用于在线计算。

设定系统还需根据所存储的轧制压力 p 、机座刚度系数 K_m 、前滑值 S_h 、单位前张力 γ_f 等的数学模型, 按下列式子将空载辊缝 S_i 、轧辊速度 v_i 、张力 γ_i 等的设定值计算出来:

$$S_i = h_i - \frac{p_i}{K_{mi}} \quad (1-3)$$

$$v_i = \frac{U_s}{h_i (1 + S_{hi})} \quad (1-4)$$

$$\gamma_i = B h_i \gamma_f \quad (1-5)$$

式中 U_s ——单位宽度的秒体积流量;

S_{hi} ——第 i 架的前滑值。

由上述可知, 能耗、轧制压力、前滑和机座刚度系数等数学模型是设定控制计算的基础。负荷分配相当于人工操作时制定压下制度, 从本质上讲, 它决定了未来轧制过程的状态特性, 其合理与否, 对轧机产量的高低、调整的难易、产品质量的优劣和事故的多少等均有重要影响; 未来的轧制过程能否按负荷分配所确定的状态特性运行, 或者偏离程度的大小, 取决于上述设定值的计算精度。然而, 它们的计算精度又取决于上述各个数学模型的预报精度。也就是说, 数学模型的预报精度, 直接影响设定控制的精度和效果。轧制过程自动控制水平是比较高的, 主要有自动厚度

控制、自动宽度控制、板形动态控制、轧件位置跟踪和控制、轧件温度控制及组织性能预报等。这些控制过程都是以数学模型的计算为基础的,因此,数学模型在计算机控制中具有十分重要的作用和地位。

1.3 塑性成形模拟中的数学模型

自20世纪70年代以来,塑性加工理论已取得了惊人的进展。这主要是因为数值计算方法在计算机帮助下已被引入到塑性加工领域。进展的主要标志是塑性加工已进入超前的数学模拟时期。

塑性加工理论的发展,到目前为止,可以分为三个时期,即萌芽时期、物理模拟时期和数学模拟时期。萌芽时期是漫长的,人们以经验为依据理解轧制变形过程,缺少基本理论和试验。1925年T. 卡尔曼建立了力平衡方程,1933年西贝尔(Siebel)借助测压仪测得了压力,尔后奥罗万又建立了另外一个平衡方程,塑性加工理论才进入了物理模拟时期。在这个时期,人们对变形过程的实质和其数学模型进行了广泛的研究。20世纪50年代又引进了各种数值方法,如变分法、滑移线法、有限法等解析方法或数值计算方法,为塑性加工理论研究提供了能反映各种不同水平的数学模型。借助计算机又把各种有关数学模型组合起来,描述全过程,并且用优化方法能对塑性加工问题进行超前的数学模拟。这就标志着塑性加工理论研究已进入第三阶段,即数学模拟时期。

模拟时期的主要特点是把全过程的有关因素组合在一起,超前地用系统观点来研究生产过程。在它形成过程中吸收了很多运筹学的观点和方法。数学模拟是指在一定约束条件下,由系统模型中,获取满足目标函数的最优解或者近似最优解的数值方法。数学模拟所研究的对象,不是某一个参数变化的数学模型问题,而是一个由多参数组成的过程最优化问题,或者说是一个系统的最优问题。这个过程是由多种数学模型所组成的系统模型