

板形计法的定义及实验应用

张进之¹, 段春华¹, 朱健勤²

(1. 钢铁研究总院, 北京 100081; 2. 宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900)

[摘要] 板形测控数学模型、解析板形刚度理论和板形板厚协调规律的综合称为板形计法。采用两种实验方式验证了板形计法的正确性和实用性, 其一是通过轧铝板实验, 计算轧机板形刚度和轧件板形刚度, 由实测铝板凸度验证板形刚度方程; 其二是由CVC板形控制热连轧机实测数据, 用离线计算自适应系数的方法验证板形测控数学模型。

[关键词] 板形计法; 板形刚度方程; 测控数学模型; 后计算; 自适应

1 引言

板形理论的研究远早于厚控理论的研究, 但厚控技术已经推广应用, 并取得了明显的效果, 因而使板形问题更加突出, 提高厚度的控制精度也会使板形控制更加困难。板形理论的进步可分为三个阶段: 经典的简支梁板形理论、20世纪60年代开始的弹性基础梁理论和有限元计算方法以及70年代末日本和美国的轧件板形遗传理论。这些理论对轧制技术的进步和产品质量的提高起着十分重要的作用, 但还没有达到完备的程度。厚控理论中有轧机刚度和轧件塑性系数两个对偶参数, 而板形理论只有轧机横向刚度而无对偶的轧件参数, 缺少反映轧件特性的板形隐性参数。

笔者分析了板形理论, 提出轧机板形刚度和轧件板形刚度的新概念。并经过简单的数学变换, 在新日铁板形遗传数学模型的基础上构造出反映板凸度和平直度向量的板形测控数学模型^[1]。将板凸度模型微分可得出板形刚度方程, 并与经典的板形理论联立, 推出轧件板形刚度的计算公式^[2]。对板形测控数学模型全微分, 可得出轧制四维状态方程及板形板厚协调规律, 解决了板形板厚目标上的

矛盾^[3]。以板形板厚协调规律为基础, 推出动态设定型板形板厚自动控制系统^[4,5]的控制方案。

板形向量测控数学模型和解析板形刚度理论采用国外的轧制数据进行了验证, 获美国发明专利。1998年已在美国Citisteel 4 064 mm宽厚板轧机上成功应用^[6]。为加快该模型在国内的推广应用, 介绍在韶关2 500 mm中厚板轧机和宝钢2 050 mm热连轧机上的实验验证结果。对具有测压装置的所有板轧机, 这些实验是可重复的。

2 板形计法定义

板形计法包括三个内容: 板形向量测控数学模型、解析板形刚度理论和板形板厚协调规律。

2.1 板形向量测控数学模型^[1]

$$C_{hi} = \frac{q_i}{q_i + m} \frac{h_i}{H_i} C_{h(i-1)} - \frac{q_i}{q_i + m} h_i \Delta \epsilon_{i-1} + \frac{m}{q_i + m} C_i \quad (1)$$

$$\Delta \epsilon_i = \xi_i \left(\frac{C_{hi}}{h_i} - \frac{C_{hi-1}}{h_{i-1}} + \Delta \epsilon_{i-1} \right) + \Delta \epsilon_0 \quad (2)$$

其中: C_h 为板凸度; C 为机械板凸度; h 为板平均厚度; m 为轧机板形刚度; $\Delta \epsilon$ 为平直度; q 为

[收稿日期] 2000-12-01; 修回日期 2001-06-20

[基金项目] “九五”国家攻关计划资助项目(95-528-01)

[作者简介] 张进之(1937-), 男, 山西榆次市人, 钢铁研究总院教授级高级工程师

轧件板形刚度； ξ 为板形干扰系数； $\Delta\epsilon_0$ 为平直度修正项； i 为机架（或道次）序号。

2.2 解析板形刚度理论^[2]

包括板形刚度方程和轧件板形刚度计算公式。

$$k_c = m + q \tag{3}$$

$$q = \eta \omega m \tag{4}$$

其中： k_c 为辊缝刚度； ω 为单位板宽轧件塑性系数； η 为柔性系数，反映轧辊间及轧辊与轧件间压力分布系数，其计算公式见参考文献 [1]。

$$B_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\xi_i & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{q_i}{m+q_i} \left(\frac{C_{h(i-1)}}{h_{i-1}} - \Delta\epsilon_{i-1} \right) - \frac{Q_i}{b(m+q_i)} - \frac{q_i C_{h(i-1)} h_i}{(m+q_i) h_{i-1}} + \frac{h_i Q_i}{b(m+q_i) h_{i-1}} \\ -\xi_i \frac{C_{h_i}}{h_i^2} \quad \xi_i \frac{C_{h(i-1)}}{h_{i-1}^2} \end{bmatrix}$$

式中 Q_i 为轧件塑性系数。

板形向量数学模型和板形刚度方程是可以实验验证的，因为式（3）中的 k_c 可以实测， m ， q 可以由解析板形刚度理论的公式进行计算。板形板厚协调规律是板形向量数学模型通过微分运算得到，不用单独验证。板形刚度方程的实验验证了轧件板形刚度 q 计算公式的正确性，同时证明解析板形刚度理论的可验证性。

3 板形刚度方程的实验验证

3.1 实验过程及数据记录

实验是在韶钢 2 500 mm 中厚板轧机上进行的。轧制两种宽度规格的铝板，每种宽度规格轧制 4 个试样，得到不同试样的轧制压力、轧制厚度和板凸度。试样在轧制之前画格，测出试样头尾的厚度分布，得到轧件的平均板厚和原料板凸度；轧制之后在相应位置测出试样的厚度分布。表 1 为轧机参数，表 2、表 3 为不同宽度轧件的轧制记录。

表 1 韶钢 2 500 mm 四辊中厚板轧机主要参数

Table 1 Main parameters for 4-high plate mill (2 500 mm) of Shaogang

长度 /mm	工作辊		支撑辊		压下螺 丝间距 /mm	辊径直 径/mm
	直径 /mm	材质	直径 /mm	长度 /mm		
2 500	800	高 NiCr 铸铁	1 550	2 400	60CrMnMo	3 650 1 000

3.2 实验数据的处理

1) 计算每个试样轧制时的轧辊实时凸度，将这些轧辊实时凸度取平均，得到轧辊实时凸度的实际估计值，代入板形向量测控数学模型，得出板凸

2.3 板形板厚协调规律^[3]

$$X_i = A_i X_{i-1} + B_i u_i \tag{5}$$

式中： $X_i^T = [\Delta C_h \quad \Delta^2 \epsilon]$ ，

$$u_i^T = [\Delta h_{i-1} \quad \Delta h_i]$$

$$A_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\xi_i & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{q_i h_i}{(m+q_i) h_{i-1}} & -\frac{q_i h_i}{m+q_i} \\ -\frac{\xi_i}{h_i} & 1 \end{bmatrix}$$

度的理论计算值。其理论结果与实测结果见表 4。

表 2 800 mm 宽铝板轧制记录

Table 2 Rolling records of aluminum plate (800 mm)

	轧制压力/t	入口板凸度/mm	出口板凸度/mm
1	600	0.030	0.045
2	670	-0.015	0.030
3	720	0.010	0.045
4	850	-0.005	0.035

表 3 1 200 mm 宽铝板轧制记录

Table 3 Rolling records of aluminum plate (1 200 mm)

	轧制压力/t	入口板凸度/mm	出口板凸度/mm
1	720	0.030	0.050
2	920	-0.010	0.045
3	860	0.035	0.045
4	780	-0.010	0.030

表 4 理论计算值与实测值比较

Table 4 The comparison of calculation and survey value

	1	2	3	4	5	6	7	8
计算值/mm	0.036	0.033	0.035	0.035	0.037	0.039	0.040	0.036
实测值/mm	0.045	0.030	0.045	0.035	0.050	0.045	0.045	0.030

2) 理论计算结果与实测结果比较，相差的标准差为 0.003 mm，最大差 < 0.02 mm，而中厚板轧机板凸度要求约 0.3 mm，证明了板形刚度

理论的正确性和实用性。

4 宝钢 2050 热连轧机的板形向量数学模型验证

宝钢 2050 热连轧机是 80 年代全套从德国引进的 CVC 板形控制轧机，1993 年又引进了 CVC 设定控制软技术，在国内外都属于第一流的板形控制热连轧机。成品机架有板凸度、平直度和厚度测量仪，各机架有液压压下和测压仪。轧前有板形参数设定，轧制时可取得各种实测数据，并有后计算自适应系统，这些可以对板形计法进行验证。

取轧后的 PFC 实际记录数据，用板形计法离线计算自适应系数，它与在线计算的方法相同，只是模型有所区别。离线计算时轧辊热凸度、轧辊磨损、CVC 变换采用 2050 轧机的原板形模型，即 PFC 中的计算值，其他部分采用板形计法中的板形向量模型。

取 2000 年 4 月份一卷钢的板形数据及相应的轧制规程。测得的板凸度、平直度及相应的轧制规程数据见表 5 和表 6。

表 5 轧辊参数

Table 5 Roller parameters

辊号	1	2	3	4	5	6	7
工作辊直径/mm	770	816	828	702	695	732	750
支撑辊直径/mm	1 585	1 577	1 570	1 603	1 590	1 623	1 605

表 6 轧制数据记录 (钢号 1032007)

Table 6 Rolling records of NO 1032007

道次	1	2	3	4	5	6	7
出口厚度/mm	23.62	13.46	8.67	5.86	4.35	3.59	3.04
轧制力/kN	20187	18003	18.013	15703	11020	8877	7180
CVC 位置/mm	-94	-64	-15	44	22	6	33
弯辊力/kN	275	575	632	614	526	541	465
热凸度设定值/ μm	160	176	150	164	151	132	113
轧辊磨损值/ μm	92	93	138	529	357	368	345
凸度设定值/ μm	319	191	123	83	61	51	40
平直度设定值/ Δ	35	12	7	13	14	11	3

* 来料厚 43.99 mm，来料凸度 352 μm ；凸度测量值每 8 s 测一次，测 5 次的平均值为 40 μm ；平直度测量值 1 s 测 1 次，测 7 次的平均值为 -7 Δ ；表中轧制力和弯辊力都是头部测量 3 次求得平均值。

宝钢 2050 热连轧机上板形控制的执行机构包

括 CVC 工作辊轴向移动机构和工作辊弯辊装置。目前，CVC 的轴向窜动量 S 与等效凸度 C_R 之间的关系为：F1~F3 机架 $C_R = -215 + 3.65 S$ (μm)，调节范围 $-580 \mu\text{m} < C_R < 150 \mu\text{m}$ ；F4~F7 机架 $C_R = -35 + 3.05 S$ (μm)，调节范围 $-340 \mu\text{m} < C_R < 270 \mu\text{m}$ ；弯辊力与凸度近似成线性关系；工作辊和支撑辊的热凸度值及磨损值采用宝钢模型计算的设定值。该卷钢的设定、目标、实测和理论计算结果比较见表 7。

理论模型的计算结果分析：

表 7 原规程设定与计算结果比较

Table 7 Comparison of setting, calculation value of old schedule

机架号	板凸度值/ μm		板平直度/ Δ	
	CVC 设定	模型计算	CVC 设定	模型计算
1	319	163	35	-1
2	191	110	12	-1
3	123	85	7	2
4	83	72	13	-37
5	61	52	14	74
6	51	55	11	48
7	40	40	3	-25

* 成品凸度的目标值为 40 μm ；实际测量值为 40 μm ；成品平直度的目标值为 0 Δ ；实际测量值为 -7 Δ 。

1) 从两种规程的设定、计算结果可以看出，理论模型计算的结果在前面机架有一定差异，后面道次的成品板凸度与设定值差别不大，并且与实测值比较吻合。平直度的计算结果与实测值差别较大，这与最后机架弯辊力的设定有关。适当改变弯辊力的设定值可得到与实测值较为一致的结果。

2) 理论模型采用的数据未经过任何的修正，在实际应用中可采取适当的参数调整，使理论计算的结果与实际值较为接近。宝钢 2050 热连轧机对平直度进行了闭环控制，控制效果较好，主要问题是控制板凸度。该模型为板凸度和平直度的闭环控制提供了理论依据。

5 板形计法在 2050 热连轧机上的后计算自适应计算的应用

2000 年 9 月份在宝钢 2050 热轧厂取得的 19 卷钢的板形记录对板形向量模型进行了验证，其结

果如表8所示。

表8 宝钢19卷数据分析结果

Table 8 The data analysis results of 19 coils of Baogang

卷数	规格/m·m	设定值		实测值		原模型差值		板形计法后计算		差值	
		凸度值/ μm	平直度/ I	凸度值/ μm	平直度/ I	凸度值/ μm	平直度/ I	凸度值/ μm	平直度/ I	凸度值/ μm	平直度/ I
01	4.60×1268	35	0	26	-3.0	9	-3.0	24.8	13.8	-1.2	16.8
02	4.60×1268	37	0	35	2.0	2	2.0	33.8	15.2	-1.2	13.2
03	4.60×1268	43	0	47	-5.0	4	-5.0	45.9	9.5	-1.1	14.5
04	4.60×1278	37	0	47	0.0	10	0.0	45.7	20.6	-1.3	20.6
05	4.60×1278	33	0	36	-1.0	3	-1.0	34.4	17.7	-1.6	18.7
06	4.08×1278	40	0	41	-15.0	1	-15.0	39.7	0.5	-1.3	15.5
07	4.08×1278	39	0	33	-4.0	6	-4.0	31.6	8.8	-1.4	12.8
08	4.08×1321	37	0	39	-7.0	2	-7.0	37.3	5.4	-1.7	12.4
09	4.08×1321	37	0	47	-11.0	10	-11.0	45.2	5.9	-1.8	16.9
10	4.08×1321	37	0	43	-10.0	6	-10.0	41.2	2.7	-1.8	12.7
11	4.08×1321	39	0	44	-2.0	5	-2.0	41.9	14.6	-2.1	16.6
12	4.08×1321	40	0	38	-1.0	2	-1.0	36.2	14.1	-1.8	15.1
13	4.08×1321	38	0	42	-24.0	4	-24.0	40.4	-7.6	-1.6	16.4
14	4.08×1321	37	0	34	0.0	3	0.0	32.3	16.2	-1.7	16.2
15	4.08×1321	38	0	34	-12.0	4	-12.0	32.0	6.5	-2.0	18.5
16	4.08×1321	39	0	36	-13.0	3	-13.0	34.3	0.1	-1.7	13.1
17	4.12×1321	35	0	41	-7.0	6	-7.0	39.2	12.6	-1.8	19.6
18	4.11×1321	33	0	39	0.0	6	0.0	37.2	12.7	-1.8	12.7
19	4.08×1321	35	0	38	0.0	3	0.0	36.1	16.7	-1.9	16.7

从上面计算结果可以看出,有板形控制装置的热轧板卷板凸度差要求小于0.02 mm,而计算值与实测值之差小于0.01 mm。说明经过自适应系数离线计算的结果是可行的。

6 结论

1) 用实验的方法对板形计法的理论模型进行了验证,证明了板形计法理论模型的正确性,提供了对轧辊实时凸度进行估计的新方法。

2) 以宝钢2050热轧厂的实际数据为基础,将板形动态矢量模型计算值与实测值及设定值进行了比较,对板形计法模型进行了进一步验证,证明其达到实用的程度,为热轧厂板形模型改造提供了理论依据。

参考文献

- [1] 张进之,板带轧制过程板形测量和控制的数学模型[J].冶金设备,1997,12(6):1~5
- [2] 张进之.解析板形刚度理论[J].中国科学E,2000,30(2):187~192
- [3] 张进之.板形理论的进步与应用[J].冶金设备,2001,1:1~5
- [4] 张进之,段春华.动态设定型板形板厚自动控制系统[J].中国工程科学,2000,2(6):67~72
- [5] 张进之.基于板形板厚协调规律的板带轧制过程互联控制方法[P].中国专利:991192427
- [6] 张进之,王琦.Citisteel 4064 mm宽厚板轧机板形问题的分析和改进措施[J].宽厚板,2000,6(4):1~6

Definition and Verification of Shape Meter Method

Zhang Jinzhi¹, Duan Chunhua¹, Zhu Jianqin²

(1. *Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China;*

2. *Baoshan Steel & Iron Co. Ltd., Shanghai 201900, China*)

[**Abstract**] Shape survey and control mathematics model, analytical theory for shape stiffness and the shape and gauge coordination control law are called shape meter method. In this paper, two experimental methods had been adopted to verify the correctness and practicality of the shape meter method: one is to roll aluminum plate and calculate the shape stiffness of mill and rolled piece, then survey aluminum plate crown to verify shape stiffness equation; the other is to calculate survey data off-line of hot continuous roll, and verify the shape survey and control mathematics model by self-adaptation method.

[**Key words**] shape meter method; shape stiffness equation; survey and control mathematics model; follow-up calculation; self-adaptation

(cont. from p. 46)

A Fuzzy Neural Network Based on Rough Sets and Its Applications to Chemical Fiber Production

Chen Shuangye, Yi Jikai

(*Electronic Information & Control Engineering College, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China*)

[**Abstract**] A fuzzy neural network based on rough sets is presented in this paper. First, a set of rough rules are found from the given training data by using rough sets theory, then the structure and model are designed according these rules, and then the model is trained by neural network technique. The experiments that simulate the control process of side-wind for chemical fiber are carried out. The results proved its efficiency and feasibility.

[**Key words**] rough sets; fuzzy logic; neural network; rules extracted

※

※

※

※

※

更 正

本刊 2001 年第 11 期中文目次页倒数第 2 行的“形象技术”应为“形象艺术”;同期第 61 页式(1)上半式应为 $\xi + 2\zeta\Omega\xi + \Omega^2\xi = Du$,