

轨梁辊矫过程矫直力波形分析与工程算法*

沈久珩

(北方工业大学, 北京 100041)

[摘要] 针对辊式矫直机常规理论计算方法的缺陷及矫直力实测中难于直接测量辊系中所有辊子矫直力的困难, 通过对国内首台巨型 1 300 矫直机矫直力的工程测试和上排辊矫直力的波形分析, 按压力阶梯(矫直力分量)剖析了矫直力和矫直过程, 揭示了超静定矫直力系的建立过程和各辊矫直力之间的力学关系, 拟定了矫直力系和矫直力分量的分割单元测量原理和总体便捷的工程测试方法, 给出了以矫直力矩和压力阶梯表示的矫直力通式及其工程算法, 并提供了计算工-56 及轨-50 矫直力的诺模图。这种确定矫直力的原理和方法, 可供各种重型辊式矫直机工程应用。

[关键词] 辊式矫直机; 矫直力; 矫直力分量; 压力阶梯; 波形分析; 工程算法; 诺模图

1 引言

轧件在多辊式矫直机中的辊矫过程, 是一个连续反复弹塑性弯曲的复杂过程。揭示矫直过程本质, 正确确定矫直力能参数, 对矫直工艺的合理安排、矫直机的合理使用和设计以及矫直理论的研究, 都具有重要意义^[1]。

由于矫直力与轧件的弹塑性变形有关, 再加上各矫直辊间力学关系复杂, 使矫直力的确定十分困难。迄今, 还没有计算矫直力的有效理论方法。当今国内外确定矫直力的可靠方法主要还是依靠直接测定。

本文以矫直机的工程测试为基础^[2], 对轨梁辊矫过程和矫直力进行了剖析, 并提出了可供实用的矫直力工程算法和诺模图。

矫直力的测定, 是在一台国内最大的 1 300 悬臂式八辊轨梁矫直机上进行的^[3]。辊距为 1 300 mm, 辊径为 1 000~1 250 mm。矫直件是 50 kg/m 的重轨(轨-50)及 56 号工字钢(工-56)。其中

重轨测量了 75 根(包括普轨 55 根及全淬轨 20 根), 工字钢测量了 55 根(包括 AD3 及 16Mn 两个钢种)。测试中采用了十余种压下方案和矫直速度。矫直力系的工程测试是采用作者拟定的分割单元测量原理和整体便捷测试方法完成的^[4]。

根据矫直机的结构特点和各辊矫直力之间的关系, 八个矫直辊上的矫直力都是通过测量四个上排辊的矫直力确定的。矫直力是用专门设计的电阻应变式传感器直接测量的, 图 1 给出了 1300 轨梁矫直机工作机座简图。

2 矫直力的波形分析

图 2 给出了上排辊矫直力的实测示波图。由图可知, 矫直力波形的主要特征是具有明显的阶梯性。整个波形可分三个阶段, 第一阶段是矫直过程建立阶段, 矫直力按阶梯状递增; 第二阶段(中间)是稳定矫直阶段, 表示该辊参与的矫直过程已经形成, 建立了稳定的矫直力; 第三阶段(最后)是矫直过程解除阶段, 矫直力按阶梯状递减, 最后

[收稿日期] 1999-07-27; **修回日期** 1999-09-21

[作者简介] 沈久珩(1931-), 男, 北京市人, 北方工业大学教授

* 在本文作者主持下, 参加矫直机测试工作的还有北京科技大学鹿鸣、邹家祥等, 攀枝花钢铁公司刘培志、鲍焕超、张恩光、聂志权、李乃福等以及攀枝花钢铁研究院张祖光、朱美华和杨秀明等同志

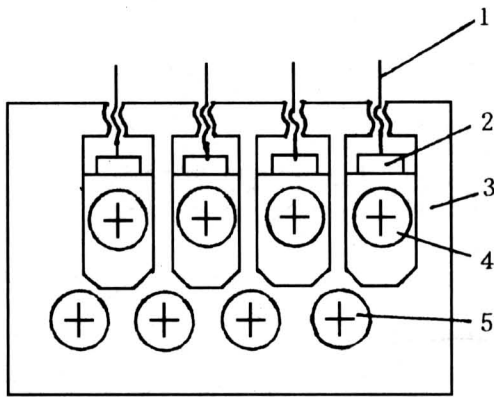


图1 1300 轨梁矫直机工作机座简图

1—压下螺丝；2—测力传感器；3—机架；4—上排矫直辊；
5—下排矫直辊

Fig.1 Rail-beam straightening mill stand

1—Screw down; 2—Straightening force sensors;
3—Frame; 4、5—top (Bottom) rollers

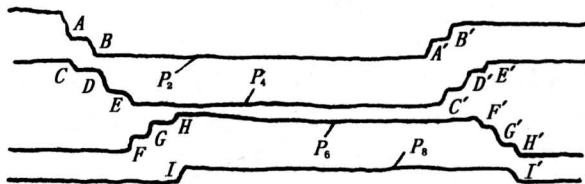


图2 上排辊矫直力实测示波图

P_2, P_4, P_6, P_8 —上排辊矫直力
 A, B, C, \dots, I 及 A', B', C', \dots, I' —矫直力分量
(压力阶梯)

Fig.2 Straightening forces oscillogram

P_2, P_4, P_6, P_8 —Straightening forces of top Rollers
 A, B, C, \dots, I and A', B', C', \dots, I' —Straightening forces components

回零。

当把各矫直力波形联系起来看时，第一阶段属于咬入阶段，是建立矫直过程的过渡阶段。在此阶段，轧件头部依次进入1~8辊，形成六次弯曲。从轧件头部离开第八辊到尾部离开第一辊以前，轧件受到所有矫直辊的加工；从轧件尾部离开第一辊到最后离开第八辊属于抛出阶段，是依次解除六次弯曲的过渡过程，直到轧件全部离开矫直机，达到平直要求，矫直过程全部结束。

图3是矫直力波形分析图表。图中左半部分为咬入阶段，其矫直力阶梯（简称压力阶梯）依次为A、B、C、……I；右半部分为抛出阶段，其压

力阶梯分别为A'、B'、C'、……I'。这一图表清楚地揭示出矫直力随着矫直进程而阶越变化的规律性，这对矫直力和矫直过程的剖析提供了便利。

在多辊矫直机中，每一组相邻的三个辊子就使轧件形成一次强迫弯曲，称为一个矫直单元或弯曲单元。把弯曲单元中三个辊子的中心连接起来形成的三角形，称为弯曲三角形（图4），每一弯曲三角形代表着各该弯曲单元对轧件的一次弯曲。

多辊矫直机弯曲单元或弯曲三角形及压力阶梯的数目q与m分别为：

$$q = n - 2 \text{ 及 } m = 3(n - 2) \quad (1)$$

从压力阶梯的分析中可以看出：

1) 压力阶梯不仅决定了一个辊子上的总矫直力，更重要的是体现了相邻各辊之间的力学关系及该辊参与的弯曲次数。这就使我们不仅能知道该辊的总矫直力，而且能把它分解，从而还能知道该辊为参与各次弯曲所付出的矫直力分量。

稳定矫直阶段以压力阶梯表示的各上排辊的总矫直力分别为：

$$\begin{aligned} P_2 &= A + B; P_4 = C + D + E; \\ P_6 &= F + G + H; P_8 = I \end{aligned} \quad (2)$$

咬入和抛出阶段，各矫直辊用于参与和退出同一矫直弯曲所建立和解除的矫直分力大致相等，即：

$$A = A'; B = B'; C = C'; D = D'; \dots, I = I' \quad (3)$$

对任意矫直辊来说，矫直力波形中在咬入或抛出阶段所包括的压力阶梯数目，等于该辊参与的弯曲次数，也等于以该辊中心为公共顶点的弯曲三角形的数目。

2) 在矫直过程中，任意弯曲单元中的相邻三辊之间，中间辊的矫直分力等于其前后两辊用于同一弯曲的矫直分力之和，且前后两辊用于同一弯曲的矫直分力彼此相等。换言之，每一弯曲单元之中三个辊子用于同一弯曲的力学关系，可按载荷对称的简支梁来处理。这一结论十分重要，它通过压力阶梯和弯曲单元建立了相邻各辊之间的力学关系，并且提示了各弯曲单元的可分离性，使我们有可能把一个由许多弯曲单元组成的超静定力学系统，分解为一个由三辊组成的最简单的静定分离体——简支梁来单独处理，从而解决了所有辊子的矫直力的确定问题。

把每一弯曲单元中各辊用于该次弯曲的矫直分

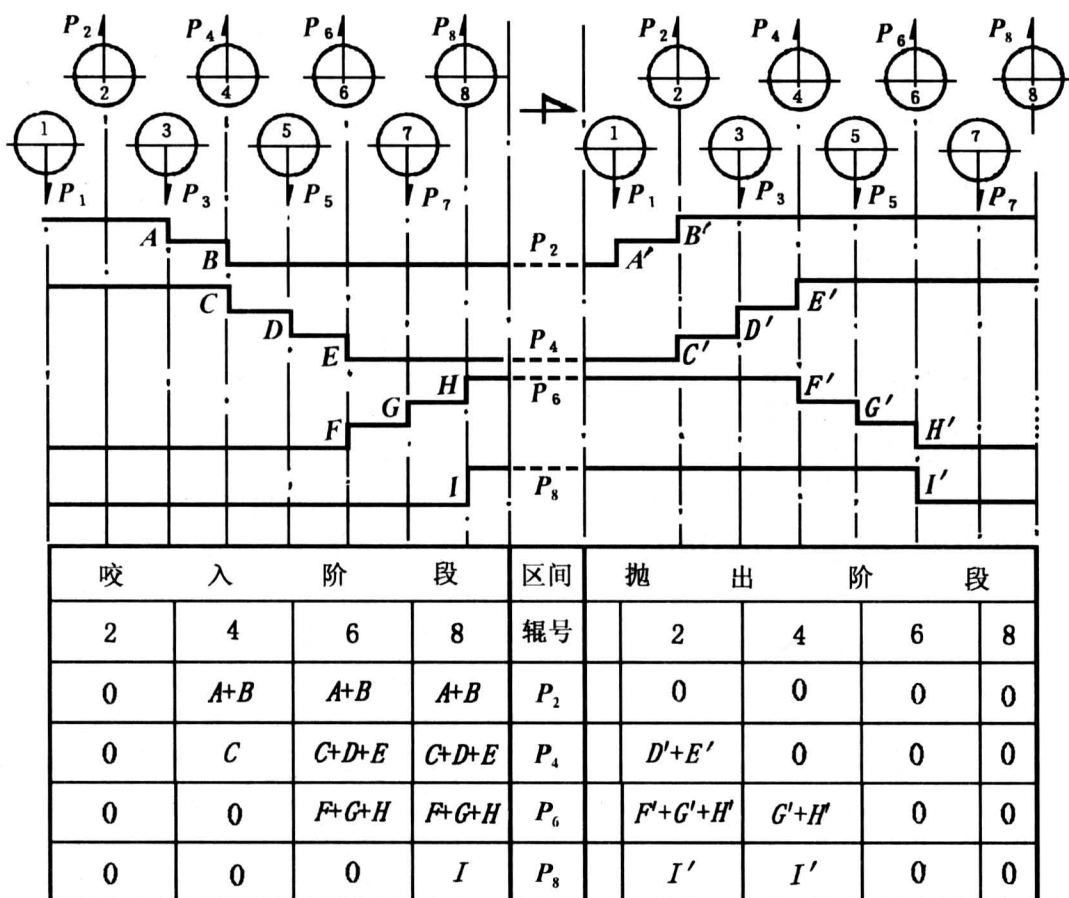


图 3 矫直力波形分析图表

Fig. 3 Straightening force waveform analysis diagram

力分别写在该弯曲三角形的相应顶点处，就得到各辊矫直力的分解计算图（图 4）。图中处于弯曲三角形上部顶点处的矫直分力，属于上排辊，处于下部顶点处的矫直分力，属于下排辊；把各弯曲三角形公共顶点处的矫直分力加起来，就得到该辊的总矫直力。因此得到用压力阶梯表示的各辊矫直力的公式分别为：

$$\begin{aligned}
 P_1 &= A/2 \\
 P_2 &= A + B \\
 P_3 &= (A/2) + B + C + (D/2) \\
 P_4 &= C + D + E \\
 P_5 &= (D/2) + E + F + (G/2) \\
 P_6 &= F + G + H \\
 P_7 &= (G/2) + H + I \\
 P_8 &= I,
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 \text{且 } B &= C \\
 E &= F \\
 H &= I.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

由于上述压力阶梯皆为已知（实测值），故下辊矫直力亦全部解出。由此可得结论：只要测得上排辊矫直力，就全部解决了所有辊子的矫直力。在一般情况下，已无须再对下排辊的矫直力进行单独测量。这就是作者拟定的矫直力分割单元测量原理和矫直力系总体便捷测定方法的理论依据。因此，只有逐一测出辊系所有辊子矫直力才能确定矫直力系的见解和作法，是既小可能而又实无必要的。

求得各矫直力后，很容易得出上排辊、下排辊以及所有辊子的总矫直力。

上排辊及下排辊的总矫直力为：

$$\begin{aligned}
 \sum P_{\text{上}} &= \sum P_{\text{下}} = A + B + \\
 &C + D + E + F + G + H + I,
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

所有辊子的总矫直力为：

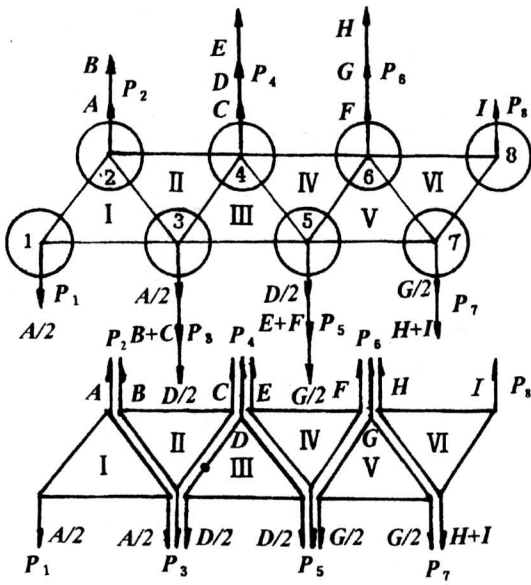


图 4 矫直力分解计算简图

1、2、3、……8—矫直辊序号；I、II、III、IV、V、VI—弯曲单元序号； $P_1、P_2、P_3、……P_8$ —矫直力

Fig.4 Straightening forces computation diagram
1、2、3、……8—Rollers No.；I、II、III、……VI—Bending No； $P_1、P_2、P_3、……P_8$ —Straightening forces

$$\sum P = 2(A + B + C + D + E + F + G + H + I)。 \quad (7)$$

矫直力方程亦可用相应的弯曲力矩（或矫直力矩）来表示。

根据图 4 所示的矫直力分解图，很容易得到用压力阶梯表示的各辊对应的弯曲力矩，它们是：

$$\begin{aligned} M_1 &= 0 \\ M_2 &= (t/4)A \text{ (第一次弯曲)} \\ M_3 &= (t/2)B = (t/2)C \text{ (第二次弯曲)} \\ M_4 &= (t/4)D \text{ (第三次弯曲)} \\ M_5 &= (t/2)E = (t/2)F \text{ (第四次弯曲)} \\ M_6 &= (t/4)G \text{ (第五次弯曲)} \\ M_7 &= (t/2)H = (t/2)I \text{ (第六次弯曲)} \\ M_8 &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

式中： t —辊距。

经过相应变换，得到以矫直力矩表示的矫直力方程通式为：

$$P_i = (2/t)(M_{i-1} + 2M_i + M_{i+1})。 \quad (9)$$

对八辊矫直机而言，用矫直力矩表示的上排辊或下排辊的总矫直力为：

$$\begin{aligned} \sum P_{上} &= \sum P_{下} = (4/t)(M_2 + M_3 + M_4 + \\ &M_5 + M_6 + M_7) = (4/t) \sum_{i=2}^7 M_i, \end{aligned} \quad (10)$$

所有辊的总矫直力为：

$$\sum P = \frac{8}{t} \sum_{i=2}^7 M_i。 \quad (11)$$

3 确定矫直力的工程方法

为了便于生产中确定矫直机负荷，在大量实测数据的基础上，提出如下确定矫直力的工程方法。根据这个方法，只要知道钢种和各辊的压下量，就可以较容易地求出相应的矫直力。其要点是：

1) 根据实测数据，建立了矫直力矩 (M) 和压下量 (Δh) 的关系曲线 (见图 5)。使用中，只要知道压下量，便可根据此曲线直接查出需要的矫直力矩。

2) 将各辊所对应的矫直力矩代入矫直力通式 (9—11)，即得各辊的矫直力和总矫直力。

矫直力的计算过程，也可以用图解法求解。

由矫直力波形分析可知，矫直力通式 (9) 亦可写成如下形式：

$$P_i = \Delta P_{i-1} + \Delta P_i + \Delta P_{i+1} \quad (12)$$

式中 $\Delta P_i、\Delta P_{i-1}、\Delta P_{i+1}$ 为第 i 辊用于形成矫直力矩 $M_i、M_{i-1}$ 及 M_{i+1} 分别付出的矫直力分量 (压力阶梯)，其值分别为：

$$\begin{aligned} \Delta P_{i-1} &= (2/t)M_{i-1} \\ \Delta P_i &= (4/t)M_i \\ \Delta P_{i+1} &= (2/t)M_{i+1}。 \end{aligned} \quad (13)$$

利用实测得到的矫直力矩 (M) 与压下量的关系曲线 (见图 5) 和平行尺加法图解原理，可作出如图 6、图 7 所示的计算矫直力的诺模图，这样就可以在已知钢种及压下量的情况下，用图解法简便而迅速地求得所需要的矫直力。

计算矫直力，必须知道各辊对应的压下量。上排辊的压下量是预先设定的 (指针盘读数)，下排辊的对应压下量可按下式计算：

$$\Delta h_i = (\Delta h_{i-1} + \Delta h_{i+1})/2 \quad (14)$$

式中 $i=3、5、……(n-1)$ ， n 为矫直机辊数。

为了方便，下辊对应压下量也可用图解法求出 (见图 8)。在上辊压下量的平行标尺 $\Delta h_2、\Delta h_4、\Delta h_6$ 及 Δh_8 之间等距离点放下辊对应压下量平行标尺 $\Delta h_1、\Delta h_3、\Delta h_5$ 及 Δh_7 ，连接各相邻上辊压下量标尺上已知压下量各点的直线，与各下辊对

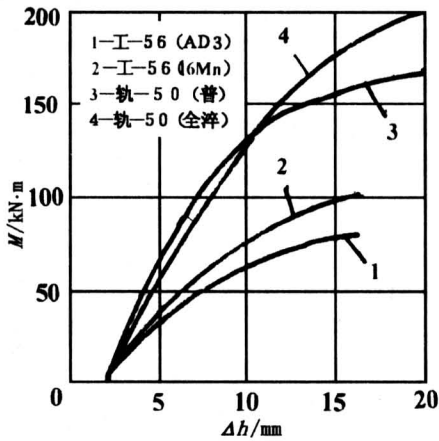


图 5 矫直力矩与压下量的关系曲线
Fig.5 Relational curve between the straightening forces and deflection

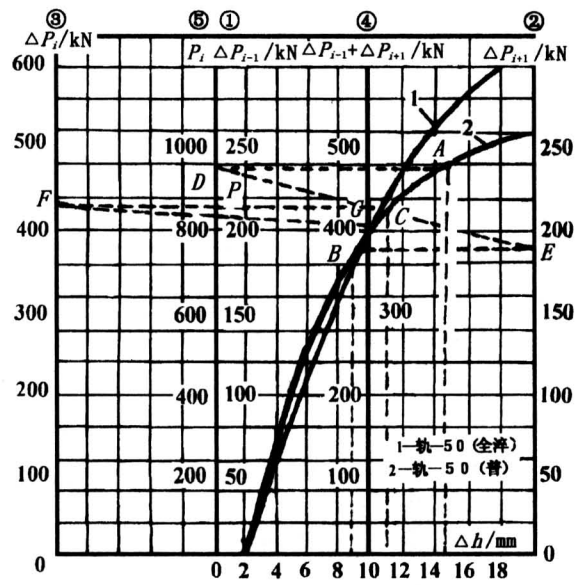


图 7 1300 矫直机轨 - 50 矫直力计算诺模图
Fig.7 Rail - 50 straightening forces computation nomogram straightening mill 1300

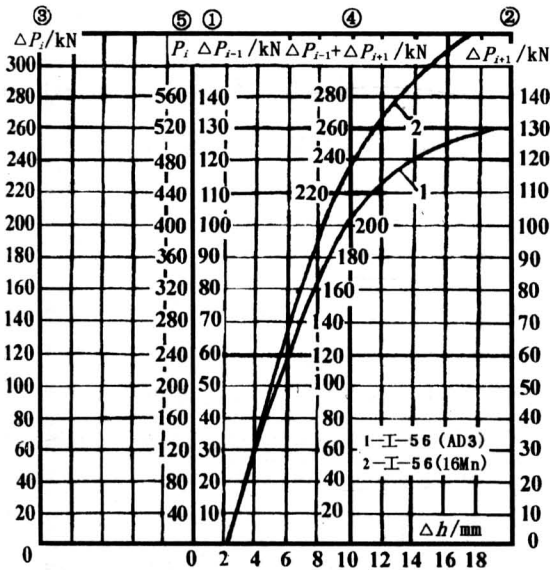


图 6 1300 矫直机工 - 56 矫直力计算诺模图
Fig.6 I₅₆ Straightening forces computation nomogram of straightening mill 1300

应压下量标尺之交点，即为该下辊的对应压下量。

下面举一个用图解法求矫直力的实例：

求矫直普轨 - 50 时第三辊的矫直力。已知各上辊压下量分别为：

$$\Delta h_2 = 14.5 \text{ mm}, \Delta h_4 = 9 \text{ mm},$$

$$\Delta h_6 = 6 \text{ mm} \text{ 及 } \Delta h_8 = 3 \text{ mm},$$

解：先根据图 8，将各上辊压下量标尺上代表

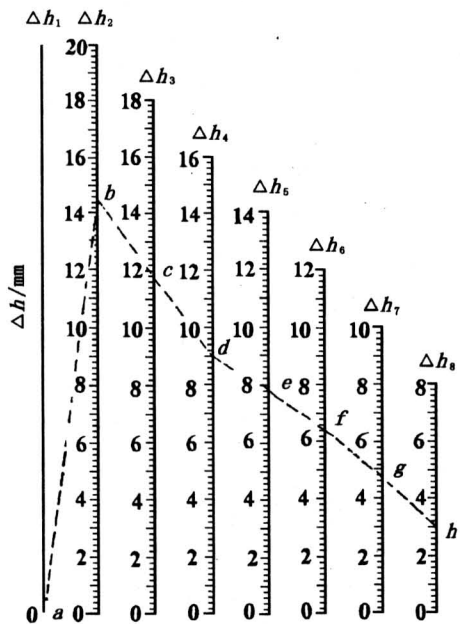


图 8 确定下辊对应压下量的诺模图
Fig.8 Bottom rollers deflection nomogram

相应压下量数值的各点 b、d、f、h 依次连起来，在各下辊压下量标尺上分别得到 a、c、e、g 各点，从而得到各下辊的压下量分别为 $\Delta h_1 = 0$ ， $\Delta h_3 = 11.75 \text{ mm}$ ， $\Delta h_5 = 7.75 \text{ mm}$ 及 $\Delta h_7 = 4.75$

mm。

对第三辊来说, $i = 3$, $\Delta h_i = \Delta h_3$, $\Delta h_{i-1} = \Delta h_2$, $\Delta h_{i+1} = \Delta h_4$ 。

根据图7求 P_3 。

第一步, 根据相邻三辊的压下量 $\Delta h_{i-1} = 14.5$ mm, $\Delta h_{i+1} = 9$ mm, $\Delta h_i = 11.75$ mm, 在曲线2上分别找出A、B、C三点, 在标尺①②及③上得到D、E、F三点及相应的压力阶梯为 $\Delta P_{i-1} = 238$ kN; $\Delta P_{i+1} = 188$ kN; $\Delta P_i = 438$ kN。

第二步, 边DE, 交标尺④于G, 得到 $\Delta P_{i-1} + \Delta P_{i+1} = 426$ kN。

第三步, 连GF, 交标尺⑤于P, 得到所求的矫直力, $P_i = P_3 = 864$ kN。

由实测得知, 该矫直力为859 kN, 故计算值与实测值十分接近。

上述方法在现场制定矫直规程和在矫直机调整

中使用, 收到了既简便又准确的效果。这一方法的另一优点, 是能反映实际压下方案的影响, 而一般的理论计算方法, 则不能反映这一实际情况。

应指出, 上述确定辊式矫直机矫直力的构思、原理及方法可用于各种重型矫直机矫直力的计算。

参考文献

- [1] 采利柯夫·А·И, 斯米尔诺夫·В·В. 轧钢设备 [M]. 赖明道, 胡锡增, 敖维骊, 等译. 北京: 机械工业出版社, 1961
- [2] 沈久珩. 机械工程测试技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985
- [3] 沈久珩. 1300 矫直机矫直力测定研究 [J]. 重型机械, 1978, (2): 27~41
- [4] 沈久珩. 辊式矫直机辊组矫直力系及矫直力分量的分割单元测量原理及其工程应用研究 [J]. 北方工业大学学报, 1986, 2 (1): 19~35

The Waveform Analysis and Engineering Computation of the Rail-beam Straightening Force in the Straightening process

Shen Jiuheng

(North China University of Technology, Beijing 100041, China)

[Abstract] As against the defects of the conventional calculating method for the straightening forces of the roller type straightening mills and the difficulty of straightening forces monitoring of all rollers directly, this paper, through the straightening forces engineering monitoring of the heavy rail-beam straightening mill 1300 (the first and biggest set in China) and straightening forces waveform analysis of top rollers, analyzed straightening forces and straightening process by way of pressure steps (straightening forces component). The built-up process of the indeterminate straightening forces system and the relations among straightening force of every roller was revealed. The division unit measurement theory of straightening forces system and straightening force componentit was discribed and the altogether convenient engineering monitor measurement method was introduced. The general straightening force equation and its engineering computation was given. The straightening force nomogram of H-beam 56 and rail 50 was provided.

The above-mentioned theory and methods of straightening forces may be used for heavy roller type straightening mills.

[Key words] roller type straightening mills; straightening forces; straightening forces components; pressure steps; waveform analysis; engineering computations; nomogram