

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.12.012

# 基于辊式调直理论的钢带调直影响因素分析\*

郑 义,马玉华,于艳杰,周淑芳,宋庆军  
(青岛黄海学院 智能制造学院,山东 青岛 266427)

**摘要:**针对钢带调直效果差和调直因素多样化的问题,分析了辊式调直原理,对钢带调直过程中挠度、曲率和转角的变化进行了分析。建立了辊和辊之间的力学模型,推导了力学方程,得到了钢带调直过程中力学性能变化曲线,建立了钢带调直机整体三维模型,进行了整体有限元分析,得到了钢带调直过程中辊子与钢带之间的力的变化;针对调直过程中工作辊和工件均产生挠度变化这一特点,通过解析法得到了其变化规律;通过受力分析得到了三辊之间的转角变化规律;分析了压下量的大小对调直精度的影响,得到了接触点的变化轨迹。研究表明:挠度、转角和压下量的变化可以满足调直精度要求;仿真结果验证了影响参数的分析方法是合理的。

**关键词:**钢带调直机;力学模型;影响因素分析

**中图分类号:**TH123

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-4551(2019)12-1294-04

## Analysis of influencing factors of straightening steel strip based on roller straightening theory

ZHENG Yi, MA Yu-hua, YU Yan-jie, ZHOU Shu-fang, SONG Qing-jun

(Institute of Intelligence and Manufacture, Qingdao Huanghai University, Qingdao 266427, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of poor straightening effect and diversification of straightening factors of steel strip, the principle of roller straightening was analyzed. During the process of straightening the steel strip, the changes of deflection, curvature and rotation angle were analyzed. Then, the mechanical model between the roller and the roller was established. Moreover, the mechanical equation was derived and the mechanical properties of the steel strip during the straightening process were obtained. The overall three-dimensional model of the steel strip straightening machine was carried out, the overall finite element analysis was carried out to obtain the change of the force between the roller and the steel belt in the straightening process of the steel belt. The deflection of work rolls and workpieces changes in straightening process, the law of change was obtained by analytic method. Through force analysis, the change rule of rotation angle between three rollers was obtained. Moreover, the influence of reduction on straightening accuracy was analyzed, and the trajectory of contact point was obtained. The results indicate that the variation of deflection, rotation angle and reduction meet the requirement of straightening accuracy. The simulation results show that the analysis of influencing parameters is reasonable.

**Key words:** straightening machine for steel strip; mechanical model; analysis of influencing factors

## 0 引 言

由于矿井生产条件特殊,尤其是地压大、岩石软会造成巷道严重变形,表现为支护型材料底部严重变形、

巷道开裂形变、巷道顶板下沉、支护钢架结构扭曲变形甚至断裂等等。

巷道的严重变形,尤其是巷道底板隆起使带式输送机、绞车等机械设备的工作地基遭到破坏,影响设备

收稿日期:2019-03-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674155);山东省重点研发计划资助项目(2018GGX106001);青岛黄海学院科技计划项目(2017kj04)

作者简介:郑义(1988-),男,安徽宿州人,博士研究生,讲师,主要从事机器人技术与装备方面的研究。E-mail:fw.2004@163.com

的正常运转,尤其对大型、传动链长的设备影响严重,危及矿井的正常生产。设备自身发生形变,表面发生倾斜,倾斜度达 10%<sup>[1]</sup>。严重的基础变形可导致设备倾斜、皮带机传动结构变形,设备无法正常使用。另外,巷道变形严重致使巷道断面减小、设备无法运输。巷道发生倾斜,使巷道顶层的挡板不稳定而发生掉落,严重影响人的生命安全。同时,支护型材料在不规则的作用力下也会产生疲劳而发生变形,如果重新替换支护型材料,则会使投入成本大大增加,所以,为使钢带能重复利用,钢带调直机的研究也成为了解决问题的关键<sup>[2-3]</sup>。

本研究将通过辊式调直理论建立一、二辊和二、三辊力学模型,分析调直过程中工件与工作辊间的曲率、转角等参数变化,推导调直过程中参数的变化方程。

### 1 辊式调直原理

利用辊式调直机对变形的工件进行调直时,起主要作用的部件是上、下辊。

上、下辊的排列有两种:

- (1) 交错排列;
- (2) 上、下对称排列。

本文以交错排列为例<sup>[4]</sup>,其调直过程为:工件从一端进入,经过前两个辊的工件在工作辊的挤压作用下进行弹塑性变形,变形后产生残余曲率,该曲率作为后面工作辊的原始曲率,再次进行调直,直到从最后两个辊出来,即被调直。

调直过程中,工件的弯曲程度靠工件的曲率来体现,而工件弯曲挠度的影响因素很多,主要有弯曲形式不同、总的曲率大小不同、工件起始弯曲曲率大小,以及工作辊的转角等因素。

调直过程一个弯曲单元如图 1 所示。

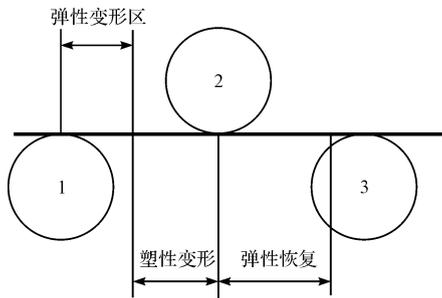


图 1 调直过程时一个弯曲单元

工件的挠度是调直过程中的重要参数。一般情况下,工件在受弯曲作用力的同时,还会承受其他的几种载荷的共同作用,造成挠度计算比较复杂。因此,要分析工件挠度和曲率之间的关系<sup>[5]</sup>,须考虑工作辊转角

对工件的影响。

调直机过程中压力元件是从上往下作用的,压头两侧对称,所以在计算挠度时,按照对称关系来计算。辊式调直机和压力调直机因工作原理不同,结构也不对称,挠度的计算方法也不同。

### 2 力学模型创建

#### 2.1 一、二辊间力学模型

力学模型建立之前,首先要对工作辊进行受力分析<sup>[6]</sup>,之后根据受力情况,在弯曲状态下建立一、二辊的受力模型。

一、二辊间的力学模型如图 2 所示。

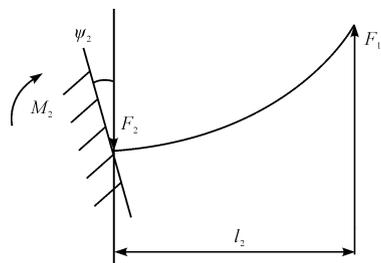


图 2 一、二辊间的力学模型

在一、二辊受力变形中,首先要分析挠度的存在状态。经分析后发现,挠度包括两部分:

- (1) 工作辊转角引起的挠度;
- (2) 工件在调直力作用下产生的挠度。

第一部分的挠度计算公式为:

$$\delta_1 = \psi_2 \times l_1 \tag{1}$$

由于工件在调直力的作用下引起挠度变化,要想计算这一部分挠度,必须要建立工件在调直力作用下的力学模型。

弹塑性状态下的力学模型如图 3 所示。

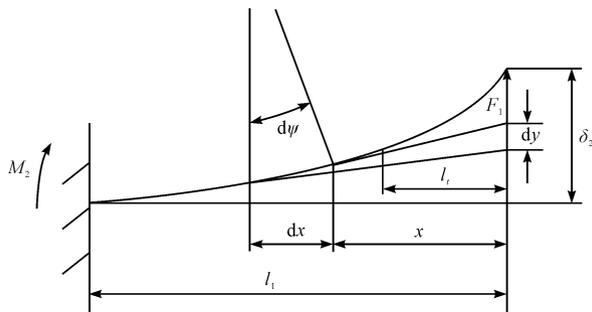


图 3 弹塑性状态下的力学模型

假设第二辊处的总变形曲率为  $C_{c2}$ ,则图 3 中距离  $x$  处的反弯曲率为:

$$C_{\rho x} = C_{c2} - C_{ro} \tag{2}$$

$$\delta_2 = \int x dy = \int_0^1 x \frac{(C_{cx} - C_{ro})}{\rho_w} dx =$$

$$\int_0^1 x \frac{C_{cx}}{\rho_w} dx - \int_0^1 x \frac{C_{ro}}{\rho_w} dx \quad (3)$$

其中： $d\psi = dx/\rho_x = C_{\rho_x}/\rho_w dx$ ,  $dy = x d\psi = x C_{\rho_x}/\rho_w dx$ , 所以前两辊间总的挠度为：

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \psi_2 \times l_1 + \int_0^1 x \frac{C_{cx}}{\rho_w} dx - \int_0^1 x \frac{C_{e0}}{\rho_w} dx = \psi_2 \times l_1 + \int_0^1 x \frac{C_{cx}}{\rho_w} dx - \frac{l_1^2}{2r_0} \quad (4)$$

当  $C_c \leq 1$  时, 工件在变形时,  $C_{cx}$  为线性函数, 即:

$$\frac{C_{cx}}{\rho_w} = \frac{M_x}{EI} = \frac{Fx}{EI} \quad (5)$$

由以上公式可得:

$$\delta = \psi_2 \times l_1 + \int_0^1 \frac{Fx^2}{EI} dx - \frac{l_1^2}{2r_0} = \psi_2 \times l_1 + \frac{M_2 l_1^2}{3EI} - \frac{l_1^2}{2r_0} \quad (6)$$

由  $1/r_{c2} = C_{c2}/\rho_w = M_2/EI$  可得:

$$\delta = \psi_2 \times l_1 + \frac{C_{c2} l_1^2}{3\rho_w} - \frac{l_1^2}{2r_0} \quad (7)$$

当  $C_c > 1$  时, 工件达到弹塑性变形, 部分为塑性变形, 其表达式为:

$$\int_0^1 \frac{C_{cx}}{\rho_w} dx = \int_0^{1c} \frac{C_{cx} x}{\rho_w} dx + \int_{1c}^1 \frac{C_{cx} x}{\rho_w} dx = \frac{Fl_1}{3EI} + \int_{1c}^1 \frac{C_{cx} x}{\rho_w} dx \quad (8)$$

其中:

$$F = \frac{M_w}{l_i} = \frac{M}{l_1}, \frac{l_i}{l_1} = \frac{M_w}{M} = \frac{1}{M}$$

$$x = [(1 - \eta) \left(1.5 - \frac{0.5}{C_{cx}^2}\right) + \eta C_{cx}] l_i$$

根据第一项可得:

$$\frac{Fl_1^3}{3EI} = \frac{M_w l_1^2}{3EI} =$$

$$\frac{l_1^2}{3\rho_w} \left[ (1 - \eta) \left(1.5 - \frac{0.5}{C_{cx}^2}\right) + \eta C_{cx} \right]^2 \quad (9)$$

根据第二项可得:

$$\int_{1c}^1 \frac{C_{cx} x}{\rho_w} dx = \frac{1}{\rho_w} \int_1^{C_2} C_{cx} \left[ (1 - \eta) \left(15 - \frac{0.5}{C_{cx}^2}\right) + \eta C_{cx} \right] l_i^2 \times \left[ \frac{(1 - \eta)}{C_{cx}^3} + \eta \right] dC_{cx} \quad (10)$$

经整理后可得:

$$\int_0^1 \frac{C_{cx}}{\rho_w} dx = \frac{l_1^2}{\rho_w} \times \frac{(w_2 + w_3)}{w_1} \quad (11)$$

当  $C_{c2} > 1$  时, 其挠度为:

$$\delta = \frac{l_1^2}{\rho_w} \times \frac{(w_2 + w_3)}{w_1^2} + \psi_2 \times l_1 \quad (12)$$

其中:

$$w_1 = (1 - \eta) \left(1.5 - \frac{0.5}{C_{c2}^2}\right) + \eta C_{c2}$$

$$w_2 = -1.5 \frac{(1 - \eta)^2}{C_{c2}} + 1.6 \times \frac{(1 - \eta)^2}{C_{c2}^3} + 0.5\eta(1 - \eta) \ln C_{c2} + \frac{1}{3\eta^2} C_{c2}^3$$

$$w_3 = \frac{4}{3(1 - \eta)^2} + 0.75\eta(1 - \eta) - \frac{1}{3\eta^2} + \frac{1}{3}$$

### 2.2 二、三辊间力学模型

同理, 建立二、三辊之间的力学模型<sup>[7]</sup>。

弯曲状态的力学模型如图 4 所示。

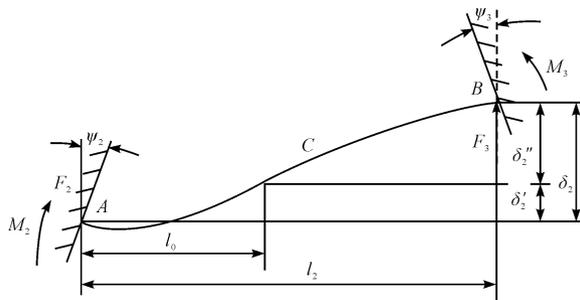


图 4 弯曲状态的力学模型

由图 4 可知:

在二、三辊之间的力学模型, 可以通过简化成简支梁模型来处理。

### 2.3 一、二辊和二、三辊间角度改变量

工件经过一、二辊时, 在一辊处存在转角<sup>[8]</sup>, 转角组成示意图如图 5 所示。

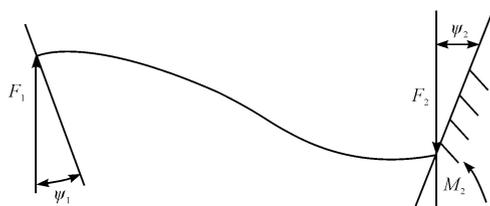


图 5 转角组成示意图

工件在受力作用下存在的弹塑性弯曲变形会引起角度的变化, 可通过测量得到一辊和二辊处转角情况。

第三辊的转角由两部分组成:

- (1) 二辊的转角;
- (2) 工件在调直力作用下的转角变化。

其角度测量方法与一、二辊间的测量方法一致。

### 2.4 压下量分析

调直机工作时, 工作辊间存在转角, 工作辊的辊距

和工作辊的直径也不同,因此,工件并不与工作辊表面直接接触,而是会产生一定的偏移量<sup>[9]</sup>。

偏移量会产生两方面的影响:

- (1) 给定的压下量大于实际的压下量;
- (2) 工件与工作辊接触点发生相对滑动。

由于上述原因,给出的压下量不能达到理论上的调直精度。

接触点偏移如图6所示。

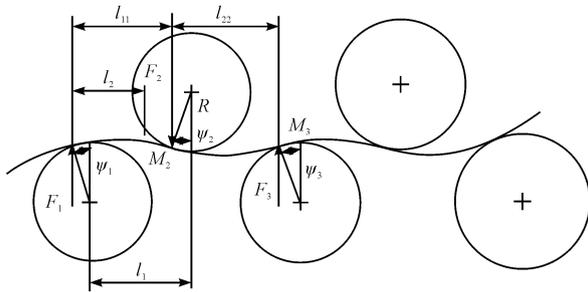


图6 接触点偏移

### 3 结束语

本文介绍了辊式调直理论,并建立了一、二辊和二、三辊力学模型,分析了调直过程中工件与工作辊间的曲率、转角等参数变化,并推导出了调直过程中参数变化方程,通过解析法得到了调直过程中挠度的变化规律;其次,通过受力分析,本文得到了一辊、二辊和三辊处的转角变化规律,分析了压下量的大小对调直精度的影响,并得到接触点偏移规律。

通过以上分析结果表明,挠度、转角和压下量的变化满足调直精度要求。

### 参考文献(References):

- [1] 许艳霞,郭俊杰,冯宪琴. 煤矿用全液压坑道钻机的设计[J]. 煤矿机械,2014,35(7):21-23.
- [2] 王立彬,吴勇. 超大跨径 CFRP 主缆悬索桥静力性能理论分析[J]. 土木建筑与环境工程,2014,36(2):48-56.
- [3] 王立彬,吴勇,金泊含. 基于重力刚度法的三塔悬索桥形变特征研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2015,34(1):6-11.
- [4] 杨玮玮,彭立山,李国鹏,等. 感应加热弯管热处理前后热影响区组织和性能的变化[J]. 焊管,2015(6):58-62.
- [5] 陈士忠,王永华,吴玉厚. 钢筋调直机调直辊设计与分析[J]. 建筑机械化,2015(3):76-79.
- [6] 张涛. 特厚煤层综放工作面超前液压支架的应用[J]. 煤矿机械,2013,34(9):222-223.
- [7] 李艳辉,宋华,苗露. 不同压弯量对无缝钢管斜辊矫直残余应力分布的影响[J]. 锻压技术,2015,40(4):64-68.
- [8] 王永贞,刘军锋. 基于有限元分析的护帮设计研究及应用[J]. 煤炭技术,2017,36(9):45-47.
- [9] CAI Zhong-yi, SUI Zhou, CAI Fu-xi, et al. Continuous flexible roll forming for three-dimensional surface part and the forming process control[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 17(1):58-65.

[编辑:程浩]

#### 本文引用格式:

郑义,马玉华,于艳杰,等. 基于辊式调直理论的钢带调直影响因素分析[J]. 机电工程,2019,36(12):1294-1297.

ZHENG Yi, MA Yu-hua, YU Yan-jie, et al. Analysis of influencing factors of straightening steel strip based on roller straightening theory[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019,36(12):1294-1297.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>