

# 金属线材校直器设计仿真与优化技术研究

张小粉

(咸阳职业技术学院机电(技师)学院, 陕西 西咸新区 712046)

**摘要:** 为了实现金属丝在自动化工业中的连续矫直, 本文选取平行辊式矫直中逐步减小曲率的方法, 确定辊式矫直机的基本形式, 设计出关键零部件的功能与外形结构, 基于金属铝丝与矫直设备在成型过程中的弹塑性与弯曲变形假设, 分析矫直成型中金属丝材料弯曲变形与曲率、压力、挠度之间的联系。根据矫直机理选择影响质量的关键结构参数进行试验, 对关键结构参数进行设计与计算, 得出下压量的基本分布规律, 总结出合理的设计流程。

**关键词:** 平行辊式; 矫直装置; 设计过程; 塑性变形

**中图分类号:** TG333.23

**文献标识码:** A

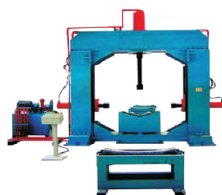
**文章编号:** 94047-(2019)03-059-05

金属线材为了便于运输、存储大多用卷材机卷成盘卷供应, 又称为盘条或盘圆, 弯曲变形改变了材料的质量, 对后续的加工使用产生很大的影响。在自动化工业生产中, 需要对其应用特定技术与工具使其恢复平直形态, 满足后续加工工序的要求, 这个过程称为矫直。矫直工序具有以下特点: ①连续生产; 线材从盘形恢复成直线后, 自动化生产线上矫直后将紧跟生产工序, 不能经常更换滚子、调整结构②质量稳定, 不断线; 矫直工序属于自动化生产线上前段工序, 一旦出错将影响生产线运行效率③有生产效率要求; 矫直工序提供的线材是后续生产工序的原料, 其

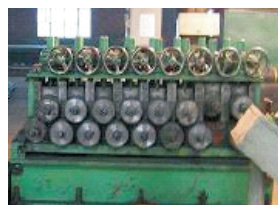
矫直速率越高越好④平直度要求。线材被矫直后, 其平直度需要符合生产要求, 不能两头翘曲超过允许偏差。⑤内应力要求。线材被矫直后, 线材内应力处于释放状态, 长时间搁置不变形。

## 1 矫直器结构分类

目前市场上的矫直装备根据工作原理与结构形式分成压力矫直机、平行辊矫直机、斜辊矫直机、转轭式矫直机和拉伸、拉弯矫直机(如图1)。其中平行辊矫直机具有连续化生产特点, 是适合流水作业的高工作效率矫直方式。



(a) 压力矫直机



(b) 平行辊矫直机



(c) 斜辊矫直机



(d) 转轭式矫直机



(e) 拉伸矫直机



(f) 拉弯矫直机

图1 矫直设备的分类

收稿日期: 2019-07-23

项目来源: 咸阳职业技术学院科研基金项目(2018KYC05)

作者简介: 张小粉(1977—), 女, 陕西渭南人, 硕士, 讲师, 主要从事机械设计及数字化制造方面的教学及研究工作。

## 2 辊式矫直工作原理分析与结构设计

本文选用连续式平行多辊的矫直结构，其工作原理如图2，一定曲率半径的盘形线材穿过一系列具有间隙滚子，出口处为直线形状线材。金属矫直过程是利用反弯、弹复与残留三个过程中曲率变化的内在联系，调整合理的变形量，恰好使弹复与反弯变形量相等，使残留曲率回落至零处，此工艺过程表现为矫直<sup>[1]</sup>。平行辊矫直机采用两排奇数个平行辊子，其工作原理表现在不管原始材料形态具有的弯曲程度，每一次弹复后残留的弯曲变形会逐渐减小，其形态趋于平直一致，在各辊组的反复矫直作用下，残留弯曲逐渐减小，从而达到矫直目的，如图3所示。

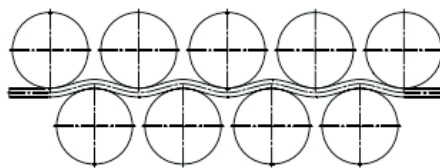


图2 多辊矫直机工作原理图

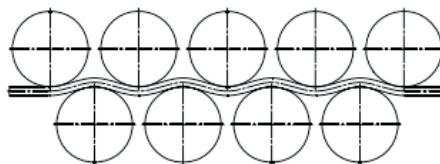
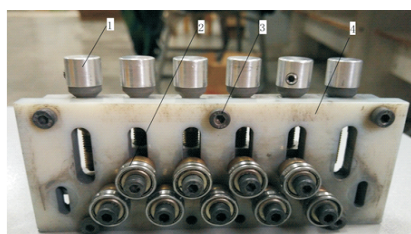


图3 线材受力示意图

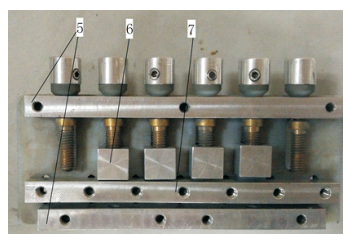
根据生产需求，设计出矫直器在水平方向的结构如图所示，竖直方向也具有类似结构。该矫直器包括支撑底板、固定板、移动滑块组、辊轮等，各个零部件及功能如下表，其结构如图。

表1 矫直器关键零部件设计说明

序号	名称	功能	结构设计说明
1	支撑底板	<ul style="list-style-type: none"> <li>●作为支撑部分为其它各个零部件提供连接。</li> <li>●板上带有导轨，沿着导轨，滑块可以直线运动</li> <li>●板与板之间可以连接，扩展，满足水平方向、竖直方向的矫直</li> <li>●支撑板将辊轮面暴露在工作区，其背面为支撑工作部分，支撑板能将灰尘、油污进行隔离</li> </ul>	带有直线导轨的平板； 导轨的数目与辊轮组相匹配； 板边缘之间用螺栓连接，预留连接结构； 板内带有定位用孔，可以用于悬挂、夹紧在外部结构上； 底板需要有一定强度，不能发生变形；
2	固定板	<ul style="list-style-type: none"> <li>●固定在支撑底板上；</li> <li>●为移动块、固定块提供支撑</li> <li>●固定板为辊轮组的基准</li> </ul>	长条形平板，固定在底板上； 平板上留有固定间距的孔； 固定板与支撑板之间采用螺钉连接； 螺钉上端可以手动调节，实现调节功能； 螺钉回转一圈，螺钉下降1个导程，导程最好控制在0.1~0.3mm之间，便于调节下压量； 滑块是辊轮的定位基准；
3	移动滑块组	<ul style="list-style-type: none"> <li>●由螺钉与活块配合使用，实现活块的竖直移动</li> <li>●螺钉的螺纹决定了活块行程</li> </ul>	高速回转的轴承 轴承外圈具有定位用浅沟槽 轴承内圈用螺栓固定在滑块上
4	辊轮	高速回转的轴承 轴承外圈具有定位用浅沟槽 轴承内圈用螺栓固定在滑块上	高速回转：1000~5000r/min； 易磨损，有表面硬度、光洁度要求； 有动平衡指标要求；



(a) 矫直器支撑板带辊轮面(正面)



(b) 矫直器支撑板反面

1调节螺钉；2辊轮；3固定螺钉、螺母；4底支撑板；5固定支撑板；6移动滑块；7固定板

图4 矫直器结构图

### 2.1 关键尺寸设计与计算

上所述，矫直工序关键参数选择如下：

1 辊轮直径  $d$ 。工件在矫直辊子的压力作用下产生弹塑性形变，辊子表面产生疲劳点蚀，如果辊

轮直径过大,会影响线材的咬合,辊轮直径过小,会导致疲劳点蚀,辊轮磨损加大,同时辊轮转动速度变大。对其制造质量要求也随之提高。d取值一般在10~30mm之间,在实际生产中,根据需求在一系列值中选取并购买。

2 辊轮组数目m, 间距s。为了零件制造上的方便,一般规定各个辊轮组m之间的距离是均匀的,距离为s。辊轮数目为2m+1个。常取m=4,即4组矫直结构,9个辊轮。辊轮组数目与间距受到结构空间的约束,m、s取值越大,校直器占用空间越大,在实际生产中,一旦选定m、s,支撑板结构被确定。

3 压下量  $\delta_i$ ,其中*i*=1,2,...,m。压下量的设定是实现矫直性能的重要途径,同时是保证矫直质量水平的关键因素。本文选用下排为固定辊的结构,需计算出上排矫直辊的每排的下压量。实际中很多是通过实验取得数据,但是采用实验的方法费时费力,且当组数增多时,反复调整都不能获得合理的数值。

4 矫直速率  $v$ 。线材通过辊轮的速率,单位是米/分钟,当前三组参数确定后,该数值受到线材直径、内应力与线材强度的影响,在实践上表现为不能断丝且辊轮的转动速率不能太大。在所有参数确定后通过实验获得许用最大值。

压下量  $\delta_i$  计算

矫直曲率比方程为<sup>[3-5]</sup>:

$$C_w = \frac{\pi}{4} \left[ \left( \frac{\delta}{6} - \frac{1}{3(C_0 + C_w)^2} \right) \left( 1 - \frac{1}{(C_0 + C_w)^2} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{(C_0 + C_w)}{2} \arcsin \left( \frac{1}{C_0 + C_w} \right) \right] \quad (1)$$

此时 $C_w-C_0$ 的关系曲线如图5所示,当材料经过曲率 $C_w$ 矫直后将出现回弹,回弹曲率为 $C_f$ ,回弹后残留曲率 $C_c$ ,是为弯曲曲率 $C_w$ 与弹复曲率 $C_f$ 之

差,即:

$$C_c = C_w - C_f = C_w - \frac{\pi}{4} \left[ \left( \frac{\delta}{6} - \frac{1}{3C_w^2} \right) \left( 1 - \frac{1}{C_w^2} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{C_w}{2} \arcsin \left( \frac{1}{C_w} \right) \right] \quad (2)$$

此时 $C_c-C_w$ 的关系曲线图6所示

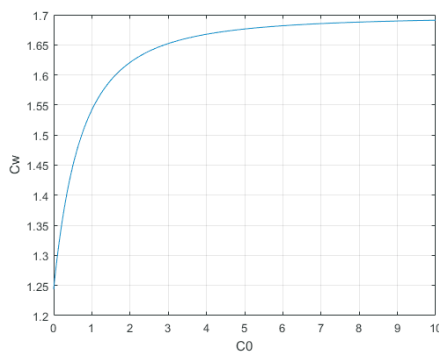


图5 圆形线材的 $C_w-C_0$ 曲线

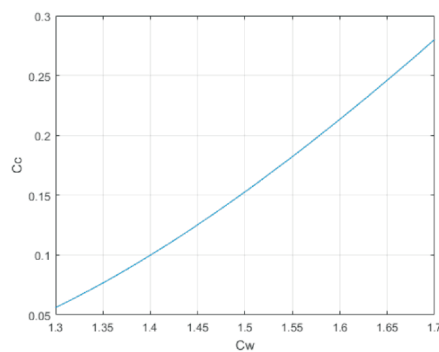


图6 圆形线材的 $C_c-C_w$ 曲线

由式公式(1)可知,首先确定原始曲率 $C_0$ ,再求出最小变形所需的矫直弯曲曲率 $C_w$ ,由于线材各部分曲率不尽相同,故先把最大的 $C_0$ 值矫直,同时将最小的 $C_0$ 值压弯成下组矫直的最小的 $C_0$ 值。如此逐步各组辊子作用矫直,最终达到允许残留弯曲值,辊组数即为矫直次数。故此得出矫直前后曲率对比规律,见表2。

表2 矫直作用前后曲率比

压弯次数 \ 曲率比	原始曲率比 $C_0$	反弯曲率比 $C_w$	残留曲率比 $C_c$	弹复曲率比 $C_f$
1	5~∞	1.69~1.7	0.25~0.3	1.41
2	0.25~0.3	1.25~1.4	0.08~0.15	1.30
3	0.08~0.15	1.25~1.4	0.04~0.06	1.26
4	0.04~0.06	1.15~1.25	0.02~0.03	1.146

经过上述设计过程与计算,针对直径0.35微细铝丝线材,可得上排4矫直辊的下压量,分别为0.45mm、0.35mm、0.30mm、0.28mm比较合适。辊式矫直中采取9个辊轮,分成4组,矫直辊直径15mm,辊距20mm,按照合理调节下压量时,矫直

精度可以满足 $\leq 2\text{mm}/20\text{cm}$ 。

## 2.2 设计步骤与流程

综上所述,要对校直器结构进行计算需要遵循以下步骤:

步骤1: 初选辊轮直径d, 辊轮间距s, 组数目

m。其中d按照最小值进行初选，s按照较大值初选，m可选成2或3即可。

步骤2：压下量  $\delta_i$  计算。根据上面所选参数计算压下量。

步骤3：线材平直度校核。对线材矫直后的平直度进行计算，如果符合要求，则进行下一步校核，否则需要增加辊轮组数目，返回步骤1重新计算。

步骤4：校直器空间校核。根据辊轮间距s与组数目m，可以计算出支撑底板所需要的长度尺寸，如果生产上能满足需求，则进行下一步校核，否则减小间距s，返回步骤1重新计算。

步骤5：辊轮疲劳强度校核。根据辊轮材料的疲劳强度，其必须满足以下公式

$$\sigma_{max} = 0.418 \sqrt{\frac{F_{max} E}{bR}} \leq [\sigma]$$

式中： $\sigma_{max}$ 为最大接触应力；

$F_{max}$ 为最大矫直力， $F_{max} = 8M_t \overline{M_{max}} / P = 8\sigma_t Z_t \overline{M_{max}} / 2\beta P$ ；

$Z_t$ 为断面系数；

$E$ 为弹性模量；

$b$ 工件与矫直辊的接触宽度；

$R$ 矫直辊半径；

$[\sigma]$ 允许接触应力 $[\sigma] = 2\sigma_t$

如果满足疲劳强度，则进行下一步校核，否则需要增加辊轮直径d，返回步骤1重新计算。

步骤6：辊轮转速校核。根据矫直速率  $v$ ，可以计算出辊轮转速，如果满足生产需求，则进行下一步校核，否则需要增加辊轮直径d，返回步骤1重新计算。

将以上步骤整理成流程图，如图7所示。

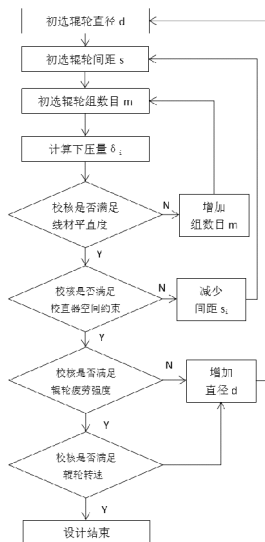


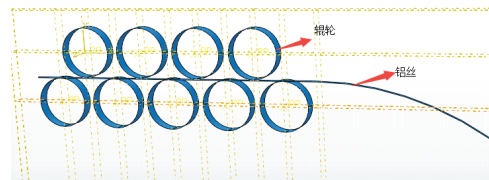
图7 辊轮组设计流程图

### 3 仿真与优化设计

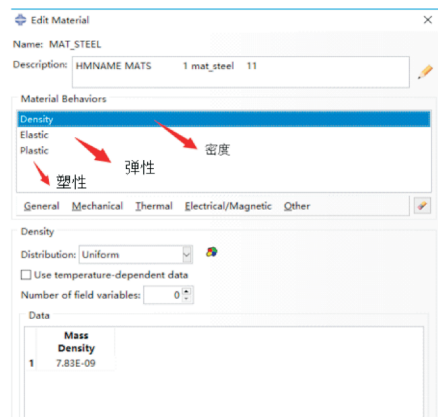
#### 3.1 仿真过程

有限元仿真是利用计算机对所需要分析的机构进行建模和分析，这大大提高了计算速度，而且减少了出错率，极大的缩短了产品的研发时间。本次仿真采用ABAQUS有限元分析软件，ABAQUS不但可以对单个部件进行分析，也可以对一个系统进行分析，针对弹塑性变形的工程问题，其仿真结果行业公认具有可行性。

仿真的步骤为建模、定义材料特性、设置边界条件，分析与处理计算结果。



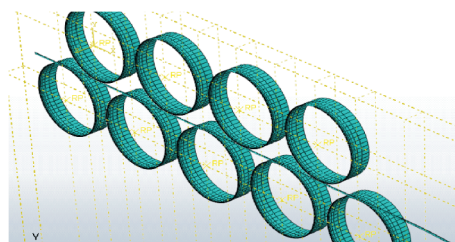
(a) 有限元建模



(b) 辊子材质特性设置

密度, kg/m <sup>3</sup>	弹性模量, GPa
2.7 × 10 <sup>3</sup>	69
屈服强度, MPa	泊松比
20	0.33

(c) 铝丝的特征参数



(d) 网格划分

图8 仿真各步骤和结果

### 3.2 最优参数分析

影响矫直效果的因素有很多，主要影响因素有三个辊径，辊距，以及压下量。本节采用正交试验来讨论三个因素对矫直效果的影响并确定一组最优参数，为后面的仿真分析奠定参数基础。矫

直过程模拟属于单指标多因素，采用单指标多因素正交试验设计。单指标为矫直平直度，平直度主要是矫直后y方向的坐标变化，这里取极差。多因素变量为辊径，辊距以及下压量。列出水平因素表如表3所示。

表3 水平因素表

水平	因素		
	压下量, mm	辊径, mm	辊距 ( 辊径的倍数 )
1	0.36, 0.38, 0.43, 0.53	10	1.1 倍
2	0.38, 0.40, 0.45, 0.55	12.5	1.2 倍
3	0.40, 0.42, 0.47, 0.57	15	1.3 倍

在列出水平因素表之后，需要对表头进行设计。主要考虑三个方面：一是将仿真影响因素安排到所选正交表相应的列中。二是因不考虑因素的间

的相互作用，一个因素占一列（可以随机排列）。三是留一列空白列用来做对比。列出表头，如表4所示。

表4 表头设计表

因素	A	空列	B	C
列号	1	2	3	4

完成水平因素表与表头设计之后，将之综合起来便是仿真方案。如表5所示。

表5 具体仿真方案表

仿真序号	因素			实验方案
	A	B	C	
1	1	1	1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>
2	1	2	2	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>
3	1	3	3	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>
4	2	1	2	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>
5	2	2	3	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>
6	2	3	1	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>
7	3	1	3	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>
8	3	2	1	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>
9	3	3	2	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>

按照表5选的方案进行仿真分析，仿真时注意按照规定的方案完成每一次仿真，实验次序可随

机，对结果分析没有影响。仿真结果如表6所示。

表6 仿真结果表

仿真序号	因素			Y 坐标极差
	A	B	C	
1	1	1	1	2
2	1	2	2	4
3	1	3	3	0.58
4	2	1	2	2.75
5	2	2	3	0.5
6	2	3	1	2.5

7	3	1	3	2	0.8
8	3	2	1	3	0.4
9	3	3	2	1	2
$K_1$	6.58	5.55	4.9	4.5	
$K_2$	3.83	7.9	7.15	7.3	
$K_3$	3.2	5.08	1.88	3.73	
$K_1$	2.19	1.85	1.63	1.5	
$K_2$	1.28	1.63	2.38	2.43	
$K_3$	1.07	1.69	0.62	1.24	
R	3.38	0.65	5.27	3.57	

表中 $K_i$ 表示任意一列水平号为 $i$ 时,所对应的实验结果之和。 $K_i=K_i/s$ , $s$ 为任意一列各水平出现的次数。 $R$ 为极差,且极差越大,因素越重要。由上表可知影响因素辊径大于辊距大于下压量。所以确定辊径为10mm,微调辊距和下压量得出最佳实验结果。进过多组实验分析得出辊径10mm,辊距12mm,下压量0.3mm,0.44mm,0.6mm,0.8mm矫直效果最好。

#### 4 结论

对生产中常用的微细线材(直径 $<0.35\text{mm}$ )进行矫直时,95%精度在理论计算范围内。由于矫直器本身的结构制造公差及矫直过程中震动的影响,5%的误差在生产加工要求精度之内。辊式矫直中选用逐步减小弯曲曲率的方法,即采取4组9辊矫直方案,合理调节下压量时,能得到较合理的参数方案,满足对材料损害较小且连续矫直的要求,最后一组压下量根据实际情况进行试验微调,可以取得

较良好的结果。

#### 致谢

本项目受到咸阳职业技术学院科研基金项目(2018KYC05)资助,项目名称“金属丝连续矫直器结构设计与三维打印技术研究”。

#### 参考文献

- [1]冯晓若.圆材矫直的理论与实践[J].山西机械,2002(2):34-35.
  - [2]曾志兴,王慧芳.冷轧带肋钢筋及其在工程中的应用[J].华侨大学学报(自然科学版),1999(01):43-46.
  - [3]李边境,尚金龙,张春生,王英杰.变截面细长轴矫直辊型数学建模及仿真[J].锻压技术,2014,39(04):143-148.
  - [4]杨瑛娣,刘瑞宁.高速钢棒材反弯压力矫直压下量计算方法探讨[J].河北冶金,2008(05):19-21.
- 冯建超,陈明和,梁伟明,胡旭.七斜辊矫直机应用程序设计与数值模拟[J].塑性工程学报,2013,20(01):16-20.

[责任编辑 王军利]

## Research on Design Simulation and Optimization Technology of Straightener for Metal Wire

ZHANG Xiao-fen

(Department of Mechatronic Engineering (Technician),  
Xianyang Vocational & Technical College, Shaanxi, China 712046)