

对称截面辊花参数化设计方法

肖子民¹, 阎 昱¹, 王海波¹, 邝 霜²

(1. 北方工业大学 机械与材料工程学院, 北京 100144; 2. 河钢集团唐钢公司, 河北 石家庄 050024)

摘要: 为了提高辊花设计效率, 解决传统辊花设计繁琐、修改困难等问题, 根据板料弯曲时截面中性层长度不变原理, 建立了描述成形截面形状变化的节点坐标映射模型。通过分析辊弯成形时板料弯曲截面圆弧节点坐标的变化规律, 以一段圆弧和直线作为板料弯曲的最小体素单元, 得出目标截面几何尺寸参数与截面上节点坐标之间的函数关系, 并推导出板料以定半径法和定长度法弯曲时, 描述对称型截面形状变化的节点坐标计算公式。最后, 以 8 弯角对称截面为例, 根据推导的节点坐标计算公式, 将断面特征识别转化为断面参数输入, 并结合参数化设计思想, 编写了基于 ABAQUS 二次开发的 python 脚本程序, 实现了多种对称型截面辊花图的绘制, 并通过尺寸对比, 验证了所设计辊花的合理性以及设计方法的可行性。

关键词: 辊花设计; 板料弯曲; 坐标映射; 参数化设计; 对称型截面

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.02.008

中图分类号: TG306

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 02-0062-09

Parametric design method for symmetrical section roll flower

Xiao Zimin¹, Yan Yu¹, Wang Haibo¹, Kuang Shuang²

(1. School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;
2. HISCO Group, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of roll flower design and solve the problems of cumbersome design and difficult to modify for traditional roll flower, according to the principle of constant neutral layer length for the section during the bending process of sheet, a node coordinate mapping model describing the shape change of the formed section was established, and by analyzing the changing rules of arc node coordinates for the bent section of sheet in roll forming, taking an arc and a straight line as the smallest voxel unit for the sheet metal bending, the function relationship between the geometric parameters of target section and the node coordinates on the section was obtained, and a node coordinate calculation formula describing the shape change of the symmetric section when the sheet was bent by the fixed radius method and the fixed length method was deduced. Furthermore, for the eight-bent angle symmetric section, according to the derived node coordinate calculation formula, the identification of section characteristics was converted into the input of section parameters, and combined with the parametric design idea, a python script program based on the secondary development of ABAQUS was written to realize the drawing of various symmetrical section roller pattern, and the rationality of the designed roll flower and the feasibility of the design method were verified by dimensional comparison.

Key words: roll flower design; sheet bending; coordinate mapping; parametric design; symmetrical section

辊花是辊弯成形过程中各机架中板料截面形状的叠加或排列, 也称为花形图, 是板料变形为目标截面形状时变形行为的示意图, 反映了断面的成形工艺^[1]。辊花设计是辊弯成形工艺中的核心内容,

其设计的好坏直接影响最终成形断面的尺寸精度以及轧辊孔型工艺的设计。传统的辊花设计往往需要依赖手工进行断面尺寸的计算, 过程复杂易错且极为耗时, 当辊花不符合要求时则需要重新设计和计算, 极大增加了生产成本和加工周期^[2]。

随着计算机辅助设计技术的兴起, 国内冷弯型钢生产商大量采用 CAD 绘图的方式进行辊花设计, 但这种设计方式依旧无法满足市场需求^[3]。德国的 data M 公司开发了一款专业的辊弯设计软件 COP-RA, 能够实现大部分断面的辊花设计, 但其辊花设计过程过于复杂, 需要用户不断输入成形参数, 分

收稿日期: 2023-06-23; 修订日期: 2023-10-11

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目 (KZ200010009041)

作者简介: 肖子民 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: 2285340519@qq.com

通信作者: 阎 昱 (1983-), 女, 博士, 副教授

E-mail: anneyan@126.com

步骤绘制辊花, 且价格过于昂贵, 难以广泛运用^[4]; 艾正青^[1]基于圆弧、直线实体的旋转和平移概念, 利用 AutoCAD 平台进行了辊花程序设计, 绘制出内卷边 C 型钢的辊花图; 肖瑞等^[4]基于 ANSYS 与 Solidworks 二次开发, 通过人机交互输入预设辊花参数的方式来绘制辊花图, 开发出针对 Z 型钢、槽钢、圆管和方矩形管等型钢的辊弯设计软件; 于辉等^[5]基于不动点理论和拓扑映射理论, 采用双圆弧插值方法, 建立了异形管闭式连续辊弯成形孔型设计数学模型, 实现了异形管辊花的自动化设计。

以上学者在各种断面的辊花设计方面均取得了显著成果, 但大部分都是基于 AutoCAD 的设计思路, 过于依靠几何参数的输入进行交互式设计, 自动化程度不高。本文基于板料弯曲变形理论和圆弧几何坐标变化规律^[6], 通过建立描述辊弯成形过程截面形状变化的节点坐标映射模型, 推导出了与断面成形参数有关的节点坐标计算公式, 实现了对称截面辊花的参数化设计方法。

1 断面分析

1.1 截面体素特征分析

辊花设计的第 1 步是进行断面分析, 任何成形截面的形状都可以分解为若干圆弧段和直线段^[6], 根据体素关系可知, 两点确定一条直线段, 三点确定一段圆弧, 故可以通过一个截面上所有节点的坐标来间接描述该截面的形状。如图 1 所示, 将板料等效为一条直线段, 圆弧段是通过直线段弯曲而成, 直线段经过一次弯曲形成一段圆弧, 每形成一段圆弧就会产生两个公共节点, 如 $P_1 \sim P_4$ 。

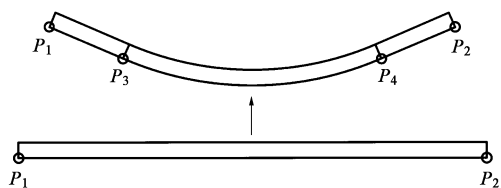


图1 直线段弯曲特征

Fig. 1 Bending characteristics of linear segment

根据以上体素特征关系, 可以通过截面上直线段和圆弧段的数量来确定描述该截面形状所需的节点个数, 如式 (1) 所示:

$$N_p = 2n_z + 3n_h - 2n_h = \begin{cases} 3n_z - 1 \\ 3n_h + 2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: N_p 为总节点个数; n_z 为直线段数量; n_h 为

圆弧段数量。

由于一个截面存在上、下两个表面, 在辊弯成形过程中, 板料上、下表面的轮廓一般被用来进行上、下轧辊的孔型设计, 故确定一个截面形状所需的节点个数的计算公式为:

$$N_p = \begin{cases} 6n_z - 2 \\ 6n_h + 4 \end{cases} \quad (2)$$

1.2 节点坐标映射模型建立

由于辊弯成形产品截面形状的复杂化和多样化, 本文仅针对对称型截面展开研究。尽管断面形状多种多样, 但实体特征主要由圆弧和直线组成, 将截面形状按弯曲角数量进行分析, 可得表 1 所示的结果。

表1 对称型截面的断面形状与弯曲角数量的关系

Table 1 Relationship between section shape and number of bending angles for symmetric section

弯曲角数量	弯曲角分布位置	型钢产品
1	对称轴	V 形件
2	对称轴两侧	U 形件
3	对称轴及两侧	W 形件
4	对称轴两侧	方矩形、C 形
5	对称轴及两侧	波纹板
⋮	⋮	⋮
$2n$	对称轴两侧	其他
$2n+1$	对称轴及两侧	其他

从表 1 可以看出: 当对称型截面的弯曲角数量 W_n 为奇数时, 在截面对称轴上必然存在一个弯曲角, 对称轴两侧各分布有 $(W_n - 1) / 2$ 个弯曲角; 当截面弯曲角数量 W_n 为偶数时, 截面弯曲角只分布在对称轴两侧, 各有 $W_n / 2$ 个弯曲角, 根据式 (2) 可得截面有 $(6W_n + 4)$ 个节点。

根据弯曲角数量确定了描述截面形状的节点数量, 需要从目标成形截面形状出发, 逆向分析成形截面的展开过程。如图 2 所示, 建立节点坐标映射模型, 将截面每一个道次的展开形状, 用一组节点 $(P_1^j, P_2^j, \dots, P_n^j)$ 来标记, 这样就建立了截面形状和节点坐标之间的映射关系, 其中 n 为节点总数, j 为道次编号。

这样就将辊花设计过程转化为截面展开时各节点坐标的计算, 可以通过分析板料弯曲时各体素特征节点坐标的变化关系, 从而推导出节点坐标的计算公式。

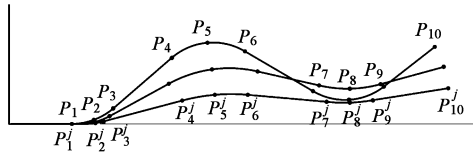


图 2 截面节点坐标映射模型

Fig. 2 Coordinate mapping model of sectional nodes

2 坐标公式推导

2.1 弯曲圆弧节点分析

在辊弯成形过程中, 辊花图用来描述板料经过

各道次成形轧辊时其截面形状的变化过程。成形截面形状的变化可以等效为截面上节点坐标的变化, 节点坐标可以根据给出的产品断面尺寸以及成形参数来确定。为了推导节点坐标计算公式, 需要确定成形截面在直角坐标系中的摆放姿态, 这主要取决于圆弧段的位置取向。由于圆弧可以通过起始角和终止角来确定, 且角度存在正负两种情况, 故板料弯曲产生的圆弧的位置取向有 4 种。将板料等效为一条直线段 ab , 弯曲 β 角时, 其在直角坐标系的姿态如图 3 所示。

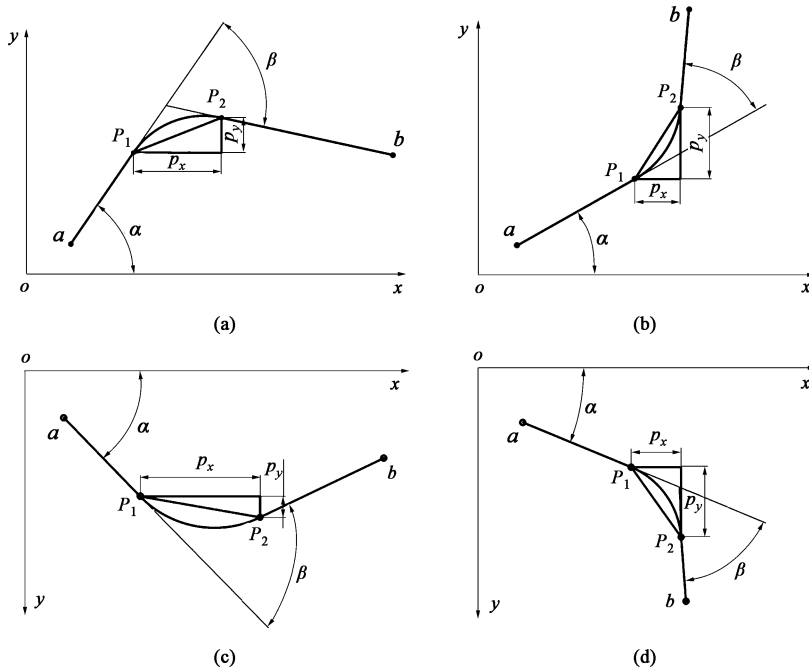


图 3 板料弯曲时圆弧的位置取向

(a) α 向上偏转, β 顺时针偏转 (b) α 向上偏转, β 逆时针偏转 (c) α 向下偏转, β 顺时针偏转 (d) α 向下偏转, β 逆时针偏转

Fig. 3 Position orientation of arc in sheet bending

(a) α upward deflection, β clockwise deflection (b) α upward deflection, β counterclockwise deflection
(c) α downward deflection, β counterclockwise deflection (d) α downward deflection, β clockwise deflection

圆弧弯曲可以看做直线段 $\overline{P_1P_2}$ 绕左侧节点 P_1 旋转一个角度, 设直线段 aP_1 与 x 轴的夹角为 α , 弯曲角为 β , 圆弧 $\widehat{P_1P_2}$ 的半径为 R_p , 根据几何关系可求出以上 4 种情况下, 圆弧 $\widehat{P_1P_2}$ 的两端点 P_1 、 P_2 的坐标推导公式, 如式 (3) ~ 式 (6) 所示。

$$\begin{cases} P_1 = (x_{P_1}, y_{P_1}) \\ P_2 = (x_{P_2}, y_{P_2}) \\ \overline{P_1P_2} = 2R_p \sin \frac{\beta}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} p_x = 2R_p \sin \frac{\beta}{2} \cos(\alpha - \frac{\beta}{2}) \\ p_y = 2R_p \sin \frac{\beta}{2} \sin(\alpha - \frac{\beta}{2}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_1 = (x_{P_1}, y_{P_1}) \\ P_2 = (x_{P_2}, y_{P_2}) \\ \overline{P_1P_2} = 2R_p \sin \frac{\beta}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} p_x = 2R_p \sin \frac{\beta}{2} \cos(\alpha + \frac{\beta}{2}) \\ p_y = 2R_p \sin \frac{\beta}{2} \sin(\alpha + \frac{\beta}{2}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} P_1 = (x_{P_1}, y_{P_1}) \\ P_2 = (x_{P_2}, y_{P_2}) \\ \overline{P_1P_2} = 2R_p \sin \frac{\beta}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} p_x = 2R_p \sin \frac{\beta}{2} \cos(\alpha - \frac{\beta}{2}) \\ p_y = -2R_p \sin \frac{\beta}{2} \sin(\alpha - \frac{\beta}{2}) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_1 = (x_{P_1}, y_{P_1}) \\ P_2 = (x_{P_2}, y_{P_2}) \\ \overline{P_1P_2} = 2R_p \sin \frac{\beta}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} p_x = 2R_p \sin \frac{\beta}{2} \cos(\alpha + \frac{\beta}{2}) \\ p_y = -2R_p \sin \frac{\beta}{2} \sin(\alpha + \frac{\beta}{2}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: x_{P_1} 、 y_{P_1} 分别为点 P_1 的横、纵坐标; x_{P_2} 、 y_{P_2} 分别为点 P_2 的横、纵坐标; p_x 、 p_y 分别为节点 P_1 和 P_2 的横、纵坐标的增量。

从式 (3) ~ 式 (6) 的计算结果可以观察到, 4 种情况下的圆弧两端点坐标计算公式存在一定的相似性, 计算方法的选取随着圆弧两侧直线段的偏转方向不同而改变, 为了将式 (3) ~ 式 (6) 标准化, 引入判别变量 p 、 q 用来表示圆弧两侧直线段的偏转方向, 其取值原则如表 2 所示, 则圆弧两端点坐标的计算公式可表示为:

$$\begin{bmatrix} x_{P_2} \\ y_{P_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{P_1} \\ y_{P_1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2R_p \sin \frac{\beta}{2} \cos \left(\alpha + q \frac{\beta}{2} \right) \\ 2pR_p \sin \frac{\beta}{2} \sin \left(\alpha + q \frac{\beta}{2} \right) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\alpha \in [0^\circ, 90^\circ]$ 。

表 2 判别变量的取值原则

Table 2 Principles for taking values of discriminant variables

$\overrightarrow{aP_1}$ 偏转方向	$\overrightarrow{aP_1}$ 与 $\overrightarrow{P_2b}$ 的偏转方向	p 值	q 值
y 轴负方向	—	-1	—
y 轴正方向	—	1	—
—	方向相反	—	-1
—	方向相同	—	1

从式 (7) 可以看出, 只要确定圆弧弯曲半径、起始角、偏转角和弯曲方向, 通过圆弧的一个端点就能利用该公式计算出另一端点的坐标^[7]。由于不同圆弧之间是通过直线段连接的, 有必要推导出直线段两端点的坐标计算公式, 设直线与 x 轴的夹角为 φ , 起点坐标为 (x_a, y_a) , 终点坐标为 (x_b, y_b) , 直线段长度为 F , 则计算公式可表示为:

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F \cos \varphi \\ F \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.2 节点坐标计算公式推导

假设有一对称型截面, 其对称轴上不存在弯曲角, 弯曲角数量为偶数, 右对称面形状如图 4 所示。从图 4 中可以观察到该截面的 1/2 结构有 4 个弯曲角, 共有 8 个弯曲角, 确定该截面形状所需节点数量为 $6 \times 8 + 4 = 52$ 个, 以该截面的对称轴为 y 轴建立直角坐标系, 节点 P_0 的坐标记为 (x_{P_0}, y_{P_0}) , 各圆弧段的起始角记为 α_i , 偏转角记为 β_i , 弯曲角记为 θ_i , 其中 i 为圆弧编号, 可得该截面弯曲圆弧的几何信息如表 3 所示。

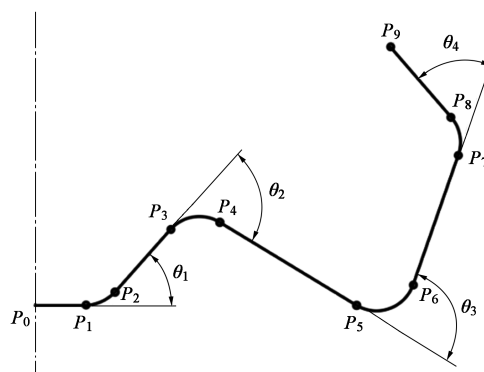


图 4 参考截面示意图

Fig. 4 Schematic diagram of reference-section

表 3 截面弯曲圆弧的几何信息

Table 3 Geometric information for bending arc of cross-section

圆弧段	起始角 $\alpha/(^\circ)$	偏转角 $\beta/(^\circ)$	弯曲半径 R_p/mm	p 值	q 值
$\overline{P_1P_2}$	0	β_1	R_1	1	1
$\overline{P_3P_4}$	β_1	β_2	R_2	1	-1
$\overline{P_5P_6}$	$ \theta_1 - \theta_2 $	β_3	R_3	-1	-1
$\overline{P_7P_8}$	$ \theta_1 - \theta_2 + \theta_3 $	β_4	R_4	1	1

为了方便表达, 如式 (9) ~ 式 (12) 所示, 记 H_x 和 H_y 分别为计算弯曲圆弧节点横、纵坐标的函数, Z_x 和 Z_y 分别为计算直线节点横、纵坐标的函数。

$$H_x(\alpha, \beta, R_p, q) = 2R_p \sin \frac{\beta}{2} \cos \left(\alpha + q \frac{\beta}{2} \right) \quad (9)$$

$$H_y(\alpha, \beta, R_p, p, q) = 2pR_p \sin \frac{\beta}{2} \sin \left(\alpha + q \frac{\beta}{2} \right) \quad (10)$$

$$Z_x(F, \varphi) = F \cos \varphi \quad (11)$$

$$Z_y(F, \varphi) = F \sin \varphi \quad (12)$$

由于截面尺寸给出的是各个弯角的弯曲角 θ , 而计算直线端点坐标需要直线倾角 (与 x 轴正半轴的夹角), 设第 1 段圆弧左侧直线倾角为 α_0 , 根据截面几何关系可以得出弯曲角与直线段倾角的关系如式 (13) 所示。

$$\varphi_i = \alpha_0 + \sum_{i=1}^i \theta_i u_i \quad (13)$$

式中: φ_i 为第 i 段圆弧末端所连接的直线段倾角;

u_i 为直线段的偏转方向, 逆时针方向为 1, 顺时针方向为 -1。

对于图 4 所示截面而言, $\alpha_0 = 0^\circ$, 根据式 (13) 可求得成形截面各直线段的几何信息, 如表 4 所示。

表 4 截面各直线段的几何信息
Table 4 Geometric information for each straight line segment of section

直线段	初始直线倾角 $\varphi_0 / (^\circ)$	长度 F / mm
$\overrightarrow{P_0 P_1}$	0	F_0
$\overrightarrow{P_2 P_3}$	θ_1	F_1
$\overrightarrow{P_4 P_5}$	$\theta_1 - \theta_2$	F_2
$\overrightarrow{P_6 P_7}$	$\theta_1 - \theta_2 + \theta_3$	F_3
$\overrightarrow{P_8 P_9}$	$\theta_1 - \theta_2 + \theta_3 + \theta_4$	F_4

以 P_0 点为基准点, 截面上各节点坐标的一般表达式如表 5 所示。

表 5 截面节点坐标表达式
Table 5 Expressions of section node coordinates

节点	横坐标公式	纵坐标公式
P_1	$Z_x(F_0, \varphi_0)$	$Z_y(F_0, \varphi_0)$
P_2	$x_{P_1} + H_x(\alpha_1, \beta_1, R_1, q_1)$	$y_{P_1} + H_y(\alpha_1, \beta_1, R_1, p_1, q_1)$
P_3	$x_{P_2} + Z_x(F_1, \varphi_1)$	$y_{P_2} + Z_y(F_1, \varphi_1)$
P_4	$x_{P_3} + H_x(\alpha_2, \beta_2, R_2, q_2)$	$y_{P_3} + H_y(\alpha_2, \beta_2, R_2, p_2, q_2)$
P_5	$x_{P_4} + Z_x(F_2, \varphi_2)$	$y_{P_4} + Z_y(F_2, \varphi_2)$
P_6	$x_{P_5} + H_x(\alpha_3, \beta_3, R_3, q_3)$	$y_{P_5} + H_y(\alpha_3, \beta_3, R_3, p_3, q_3)$
P_7	$x_{P_6} + Z_x(F_3, \varphi_3)$	$y_{P_6} + Z_y(F_3, \varphi_3)$
P_8	$x_{P_7} + H_x(\alpha_4, \beta_4, R_4, q_4)$	$y_{P_7} + H_y(\alpha_4, \beta_4, R_4, p_4, q_4)$
P_9	$x_{P_8} + Z_x(F_4, \varphi_4)$	$y_{P_8} + Z_y(F_4, \varphi_4)$

从表 5 可以看出, 截面上各节点坐标表达式的下标主要与弯曲圆弧的编号有关, 为了将公式标准化, 对截面节点重新编号, 如图 5 所示。

设该对称截面的 1/2 结构弯曲角的数量为 m , 将该结构按弯曲角的数量拆分为 m 个体素单元, 每个单元由 3 个节点组成, 包括一段圆弧和直线, 从对称轴向截面两侧依次给圆弧编号为 1~ m , 弯曲体素单元表示为 $(W_i P_1, W_i P_2, W_i P_3)$ 。可进一步得出弯曲体素单元节点坐标递推公式, 如式 (14) ~ 式 (16) 所示。

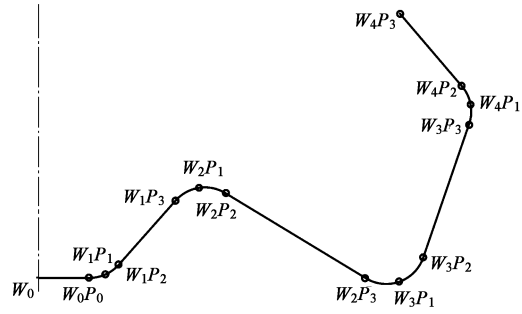


图 5 截面节点编号规则

Fig. 5 Numbering rules for section node

$$\begin{bmatrix} X_i P_1 \\ Y_i P_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{i-1} P_3 \\ Y_{i-1} P_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_x(\alpha_i, \frac{\beta_i}{2}, R_i, q_i) \\ H_y(\alpha_i, \frac{\beta_i}{2}, R_i, p_i, q_i) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} X_i P_2 \\ Y_i P_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{i-1} P_3 \\ Y_{i-1} P_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_x(\alpha_i, \beta_i, R_i, q_i) \\ H_y(\alpha_i, \beta_i, R_i, p_i, q_i) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} X_i P_3 \\ Y_i P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 P_3 \\ Y_0 P_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^i H_x(\alpha_i, \beta_i, R_i, q_i) \\ \sum_{i=1}^i H_y(\alpha_i, \beta_i, R_i, p_i, q_i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^i Z_x(F_i, \varphi_i) \\ \sum_{i=0}^i Z_y(F_i, \varphi_i) \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: $(X_i P_1, Y_i P_1)$ 、 $(X_i P_2, Y_i P_2)$ 、 $(X_i P_3, Y_i P_3)$ 分别为节点 $W_i P_1$ 、 $W_i P_2$ 、 $W_i P_3$ 的坐标; H_x 、 H_y 分别为弯曲圆弧节点横、纵坐标计算函数; Z_x 、 Z_y 分别为直线节点横、纵坐标计算函数。

由于截面圆弧的起始角和直线倾角均可以通过圆弧的弯曲角求得, 从式 (14) ~ 式 (16) 可以看出, 成形截面轮廓节点坐标仅与圆弧弯曲角度、弯曲半径、弯曲方向以及直线段长度有关, 将以上节点坐标计算公式表示为 $f(\theta, R, Q, F)$, 截面几何尺寸参数与截面形状之间的映射关系为:

$$f: (\theta^j, R^j, Q^j, F^j) \rightarrow (P_1^j, P_2^j, \dots, P_n^j) \quad (17)$$

式中: θ 、 R 、 Q 、 F 分别为成形截面的圆弧弯曲角、

弯曲半径、弯曲方向以及直线段长度； P_1, P_2, \dots, P_n 分别为截面轮廓上的节点坐标； j 为道次编号， $j=1, 2, \dots, N$ ； N 为总道次数。

成形截面的展开即弯曲角度从 θ 变为 0，从而引起截面上各节点坐标的变化，只要输入一组成形参数，就能得到与之对应的截面节点坐标集合，通过三维软件用圆弧与直线将各节点连接起来，从而实现辊花图的绘制^[8]。

3 辊花参数化设计方法

3.1 成形参数确定

截面展开方式主要有两种，定半径法和定长度法。定半径法可以看做板料以一恒定半径弯曲为目标截面形状，弯曲半径为名义半径，而定长度法则是在整个弯曲过程中圆弧段的中性层弧长保持不变^[9]。成形截面的展开就是对圆弧段的展开，展开后各体素的总长度应遵循与原成形截面中性层总长度一致的原则^[5]。进行辊花的参数化设计之前，需要确定断面的成形参数，假设某对称型截面尺寸如图 6 所示。其中， B 为截面厚度， R_0 为圆角内半径， $L_1 \sim L_4$ 为目标截面各直线段长度。

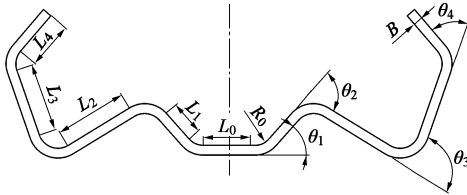


图6 截面尺寸示意图

Fig. 6 Schematic diagram of cross-sectional dimensions

当采用定半径法弯曲时，中性层偏移系数不发生变化，圆弧段弧长随着弯曲角度的增加而增加，由于截面总长度不变，圆弧弧长的增加必然要靠其两侧直线段的补偿^[5]，这导致直线段长度在弯曲过程中会发生变化，记圆弧内侧补偿量（靠近对称轴一侧）为 b_{in} 、其中， k 为中性层偏移系数，外侧补偿量为 b_{out} 。截面展开长度的计算表达式如表 6 所示。

表6 截面展开长度的计算

Table 6 Calculation of section spread length

参数	中性层弯曲半径/mm	断面展开长度/mm
计算公式	$R_0 + kB$	$2(R_0 + kB) \sum_{i=1}^m \theta_i + 2 \sum_{i=0}^m L_i$

记第 j 道次截面各弯曲角为 $\theta_1^j, \theta_2^j, \theta_3^j, \theta_4^j$ ，

各直线段长度记为 $FL_0^j, FL_1^j, FL_2^j, FL_3^j, FL_4^j$ 。可得直线段的计算公式为：

$$\begin{cases} FL_0^j = L_0 + b_{in}(R_0 + kB)(\theta_1^N - \theta_1^j) \\ FL_m^j = L_m + b_{out}(R_0 + kB)(\theta_m^N - \theta_m^j) \\ FL_i^j = L_i + b_{in}(R_0 + kB)(\theta_{i+1}^N - \theta_{i+1}^j) + \\ b_{out}(R_0 + kB)(\theta_i^N - \theta_i^j) \end{cases} \quad (18)$$

式中： FL_0 最内侧直线段长度； FL_m 为最外侧直线段长度； FL_i 代表中间部分直线段长度； L_i 为目标断面第 i 段直线段长度。

当采用定长度法弯曲时，圆弧段中性层长度在弯曲过程中不发生变化，由于弯曲角度是增加的，必然导致圆弧弯曲半径逐渐减小，但截面各直线段长度不发生变化^[10]。记目标断面各圆弧段中性层弧长分别为 Wh_1, Wh_2, Wh_3, Wh_4 ，可得各圆弧段中性层弯曲半径的计算公式为：

$$RE_i^j = \frac{Wh_i}{\theta_i^j} \quad (19)$$

式中： RE_i^j 为第 j 道次第 i 段圆弧的弯曲半径。

3.2 公式验证以及辊花图的生成

根据 3.1 节的分析，结合式 (18) 和式 (19)，进行参数化辊花设计时需输入的参数如表 7 所示，其中， $i=1, \dots, m, j=1, \dots, N$ 。

表7 辊花设计输入参数

Table 7 Input parameters for roll flower design

成形参数	表达式
弯曲方向变量 q	1, -1, -1, 1
各道次弯曲角	$\theta_1^j, \theta_2^j, \theta_3^j, \theta_4^j$
各圆弧段起始角	0, $\theta_1^j, \theta_1^j - \theta_2^j , \theta_1^j - \theta_2^j + \theta_3^j $
各圆弧段偏转角	$\theta_1^j, \theta_2^j, \theta_3^j, \theta_4^j$
直线段长度	$FL_0^j, FL_1^j, FL_2^j, FL_3^j, FL_4^j$
直线倾角	0, $\theta_1^j, \theta_1^j - \theta_2^j, \theta_1^j - \theta_2^j + \theta_3^j, \theta_1^j - \theta_2^j + \theta_3^j + \theta_4^j$

根据本文推导出的节点坐标计算公式，基于 ABAQUS 二次开发功能，在有限元软件 ABAQUS 中编写了 Python 脚本程序^[11]，该程序能够通过输入相应的成形参数，实现从 1~8 个弯曲角的对称型截面辊花的自动化设计以及不同成形方式辊花图的绘制，程序流程图如图 7 所示。

以图 6 所示的 8 弯曲角的成形截面为例，测试程序的功能，输入截面具体尺寸如表 8 所示。

选择同时弯曲方式，采用余弦曲线法进行弯曲角度的分配^[5]，结果如表 9 所示。

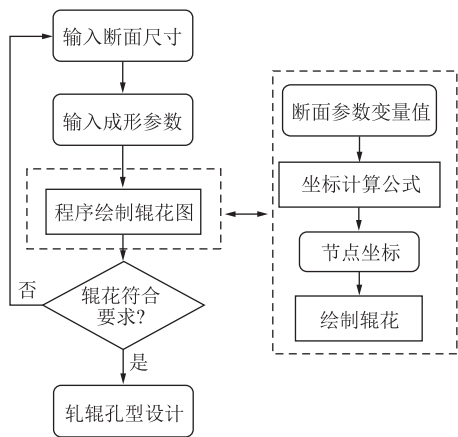


图 7 辊花参数化设计程序流程图

Fig. 7 Flow chart of parametric design procedure for roll flower

表 8 截面尺寸参数

Table 8 Section size parameters

参数	数值
弯曲角 $\theta_1^N, \theta_2^N, \theta_3^N, \theta_4^N / (^\circ)$	48, 79, 102, 60
各直线段长度 $L_0 \sim L_m / \text{mm}$	26, 35, 74, 70, 48
截面厚度 B / mm	10.0
圆角内半径 R_0 / mm	20.0
道次数 N	10
定半径补偿量 / mm	内侧 0.5, 外侧 0.5

表 9 弯曲角度分配 (°)

Table 9 Bending angle assignment (°)

弯曲角	角度分配结果
θ_1^j	1.2, 4.6, 9.9, 16.6, 24.0, 31.4, 38.1, 43.4, 46.8, 48.0
θ_2^j	1.9, 7.5, 16.3, 27.3, 39.5, 51.7, 62.7, 71.5, 77.1, 79.0
θ_3^j	2.5, 9.7, 21.0, 35.2, 51.0, 66.8, 81.0, 92.3, 99.5, 102.0
θ_4^j	1.5, 5.7, 12.4, 20.7, 30.0, 39.3, 47.6, 54.3, 58.5, 60.0

采用两种展开方式绘制的两种类型的辊花图, 如图 8 和图 9 所示。

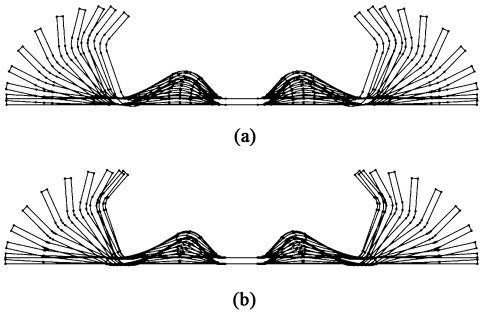


图 8 叠加型辊花图

(a) 定长度法 (b) 定半径法

Fig. 8 Superimposed roll flower diagrams

(a) Fixed length method (b) Fixed radius method

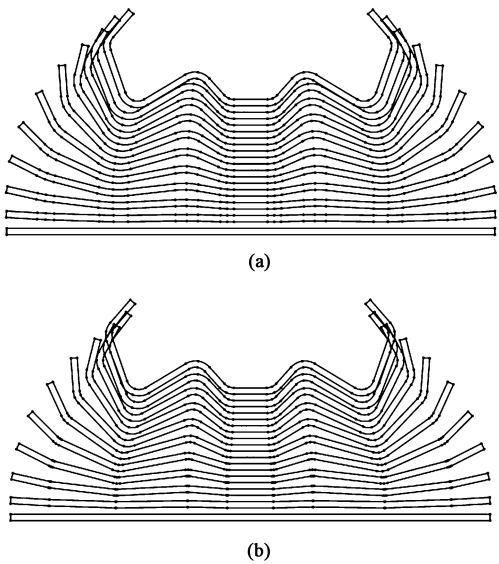


图 9 排列型辊花图

(a) 定长度法 (b) 定半径法

Fig. 9 Alignment type roll flower diagrams

(a) Fixed length method (b) Fixed radius method

当采用下山法或上山法成形时, 可以通过更改程序参数, 给节点坐标公式中的纵坐标施加偏移量, 即可生成相应的辊花^[12], 如图 10 所示。

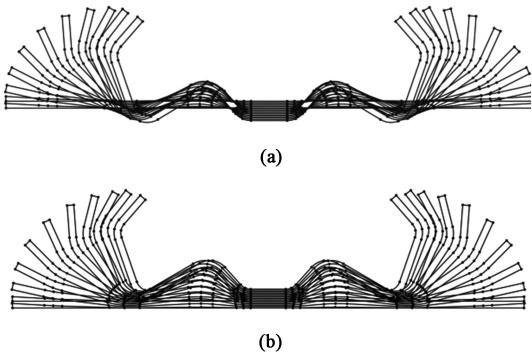


图 10 成形底线偏移的辊花图

(a) 下山法成形 (下山量为 2) (b) 上山法成形 (上山量为 2)

Fig. 10 Roll flower diagrams of formed bottom line offset

(a) Downhill forming (downhill amount of 2)

(b) Uphill forming (uphill amount of 2)

从图 11 可以看出, 根据参数化设计出的辊花, 其最后一道次的截面尺寸与表 8 所示的理论设计截面尺寸完全一致, 证明了程序设计的辊花在理论上是合理的, 进一步验证了本文所述辊花图的参数化设计方法的可行性。

根据节点坐标计算公式结合程序设计来绘制辊花图, 不局限于以上截面形状的设计, 如图 12 所

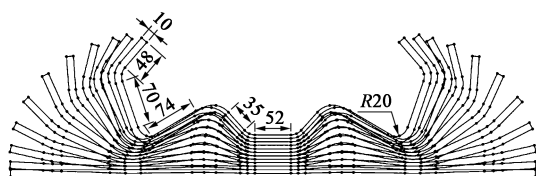


图11 辊花图尺寸验证

Fig. 11 Dimensional verification of roll flower

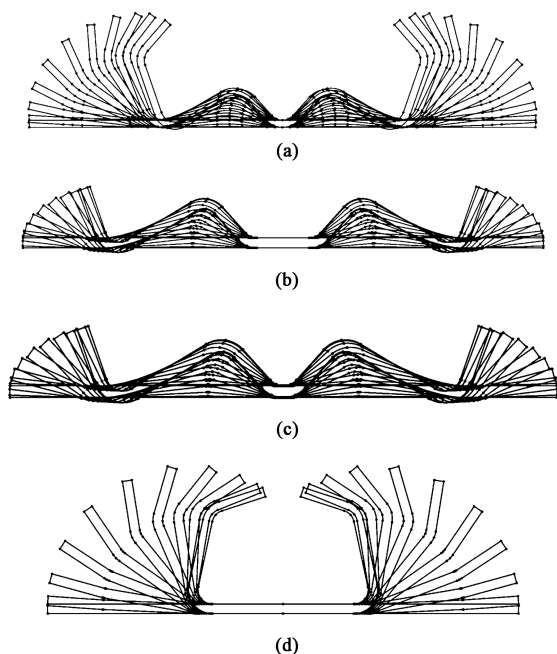


图12 不同输入参数所绘制的辊花图

(a) $L_0 = 0 \text{ mm}$ (b) $L_4 = 0 \text{ mm}, \alpha_4 = 0^\circ$ (c) $L_0 = L_4 = 0 \text{ mm}, \alpha_4 = 0^\circ$ (d) $L_0 = L_1 = 0 \text{ mm}, \alpha_1 = \alpha_2 = 0^\circ$

Fig. 12 Roll flower diagram with different input parameters

示，当改变公式中直线段长度以及描述圆弧弯曲方向所对应的参数输入值时，几乎可以实现任意对称型截面辊花的设计^[13-15]。对于非对称型截面而言，当成形基准线处于水平方向不变时，依旧可以采用本文所述方法，分成左右两部分来进行辊花设计。采用不同的角度分配方案，能够实现各弯曲角弯曲次序的改变。

辊花参数化设计思想，可看作是将断面特征的识别转化为断面参数的输入，只要根据目标截面的几何特征，调整需要输入的成形参数，就能实现任意对称型截面辊花图参数化设计^[16-17]。通过将参数化辊花设计方法融入到辊弯成形的软件开发中，能够极大地缩减设计人员在轧辊设计过程中的时间，实现辊花的快速修改和优化。

4 结论

(1) 将对称型截面的形状按弯角的数量进行了分类分析：当截面弯曲角数量为偶数时，截面弯曲角仅分布在对称轴两侧；当弯曲角数量为奇数时，有一个弯曲角在对称轴上，其余分布在两侧。

(2) 通过分析辊弯成形时板料弯曲变化规律，建立了节点坐标与截面轮廓形状之间的映射关系，推导出根据对称型截面几何参数，计算其轮廓上节点坐标的计算公式。

(3) 推导出采用定半径法和定长度法弯曲时，在不同弯曲角度下，截面几何参数的计算公式。

(4) 提出利用节点坐标公式结合程序设计方法，实现对称型截面辊花的参数化设计方法，并验证了该方法的可行性，为辊弯成形计算机辅助设计软件的开发提供了理论支撑。

参考文献：

- [1] 艾正青. 冷弯成型计算机辅助辊花设计 [J]. 北方工业大学学报, 2000, (1): 66-68.
Ai Z Q. Computer-aided roll design for cold-forming [J]. Journal of North China University of Technology, 2000, (1): 66-68.
- [2] 姜屹楠. 柔性连续冷弯成型的工艺设计与优化研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2022.
Jiang Y N. Process Design and Optimization Study of Flexible Continuous Cold-forming [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2022.
- [3] 李凡, 王安恒, 王雷, 等. 基于 ABAQUS 二次开发的非对称 Z 截面型材多道次滚弯成形工艺 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (4): 152-161.
Li F, Wang A H, Wang L, et al. Multi-pass roll forming process for asymmetric Z-section profiles based on secondary development of ABAQUS [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (4): 152-161.
- [4] 肖瑞. 基于 SolidWorks 二次开发的辊花设计与辊弯模拟 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2010.
Xiao R. Roll Flower Design and Roll Bending Simulation Based on SolidWorks Secondary Development [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2010.
- [5] 于辉, 付志强, 杜凤山. 闭式冷弯成形辊花设计映射数学模型及实验研究 [J]. 工程力学, 2017, 34 (3): 227-231.
Yu H, Fu Z Q, Du F S. Mapping mathematical model and experimental study of closed cold-forming roll flower design [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34 (3): 227-231.
- [6] 李冲, 韩飞. 非对称截面辊弯成形扭曲有限元分析 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (1): 66-71.

- Li C, Han F. Finite element analysis of distortion of roll forming with asymmetric cross section [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (1): 66-71.
- [7] 小奈弘, 刘继英. 冷弯成形技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- Hiroshi D, Liu J Y. Cold Forming Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [8] 哈姆斯. 冷弯成型技术手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008
- Halmos G T. Handbook of Cold Forming Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008
- [9] 杨光友, 周国柱, 张建钢, 等. 数控加工编程中圆弧圆心坐标几何求解法 [J]. *湖北工学院学报*, 1996, (4): 28-30.
- Yang G Y, Zhou G Z, Zhang J G, et al. Geometric solution method of circular center coordinates of arc in CNC machining programming [J]. *Journal of Hubei University of Technology*, 1996, (4): 28-30.
- [10] Chen W Y, Jiang J M, Li D Y, et al. Flower pattern and roll positioning design for the cage roll forming process of ERW pipes [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 264: 295-312.
- [11] Mynors D J, English M, Castellucci M, et al. Controlling the cold roll forming design process [J]. *CIRP Annals*, 2006, 55: 271-274.
- [12] Sheu J J, Yu C H, Wang J K. Die designs of cold roll forming process for car bumper using advanced high strength steel [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 207: 1308-1313.
- [13] 曹金凤. Python 语言在 Abaqus 中的应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- Cao J F. Python Language in Abaqus [M]. Beijing: China Machine Press, 2020.
- [14] 郑子君, 陶裕梅. 工件厚度不均匀性对辊弯成形曲率半径的影响 [J]. *锻压技术*, 2022, 47 (9): 58-65.
- Zheng Z J, Tao Y M. Effect of workpiece thickness inhomogeneity on the radius of curvature of roll bending forming [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2022, 47 (9): 58-65.
- [15] Mynors D J, English M, Castellucci M, et al. Controlling the cold roll forming design process [J]. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 2006, 55 (1): 271-274.
- [16] 高青军, 冯劲松, 陈卓宁. 基于绘图过程的参数化设计方法 [J]. *机电一体化*, 2000, (2): 30-33.
- Gao Q J, Feng J S, Chen Z N. A parametric design method based on drawing process [J]. *Mechatronics*, 2000, (2): 30-33.
- [17] 裴新元. 直缝焊管辊弯成型孔型设计及工艺研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
- Pei X Y. Design and Process Research of Roll Bending Forming Hole Pattern for Straight Seam Welded Pipe [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2022.

(上接第 61 页)

- [14] Zhang H, Liu N, Li X X, et al. Optimization design and experimental research of magnetic pulse welding system based on uniform pressure electromagnetic actuator [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 121 (11-12): 8447-8465.
- [15] Xu J H, Huang L, Xu Y K, et al. Effect of pulsed electromagnetic field treatment on dislocation evolution and subsequent artificial aging behavior of 2195 Al-Li alloy [J]. *Materials Characterization*, 2022, 187: 111872.
- [16] Xie B X, Huang L, Xu J H, et al. Microstructure evolution and strengthening mechanism of Al-Li alloy during thermo-electromagnetic forming process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 315: 117922.
- [17] Xie B X, Huang L, Wang Z Y, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of 2219 aluminum alloy from different aging treatments to subsequent electromagnetic forming [J]. *Materials Characterization*, 2021, 181: 111470.
- [18] 徐佳辉, 黄亮, 谢冰鑫, 等. 铝锂合金电磁形变复合热处理工艺研究 [J]. *机械工程学报*, 2022, 58 (16): 58-67.
- Xu J H, Huang L, Xie B X, et al. Study on electromagnetic deformation combined with heat treatment process of Al-Li alloy [J]. *China Mechanical Engineering*, 2022, 58 (16): 58-67.
- [19] Su H, Huang L, Li J, et al. Formability of AA 2219-O sheet under quasi-static, electromagnetic dynamic, and mechanical dynamic tensile loadings [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 70: 125-135.
- [20] 唐天宇, 黄亮, 徐佳辉, 等. 跑道型线圈调控板料电磁成形磁场分布研究 [J/OL]. *中国机械工程*, 1-11 [2024-02-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20230907.1717.010.html>.
- Tang T Y, Huang L, Xu J H, et al. Research on the magnetic field distribution of sheet metal electromagnetic forming controlled by runway coil [J/OL]. *China Mechanical Engineering*, 1-11 [2024-02-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20230907.1717.010.html>.
- [21] 耿辉辉. Al-Fe 磁脉冲焊接及其接头失效机制研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- Geng H H. Magnetic Pulse Welding and Fracture Behavior of Al-Fe Joint [D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [22] Sharafiev S, Pabst C, Wagner M F X, et al. Microstructural characterisation of interfaces in magnetic pulse welded aluminum/aluminum joints [A]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [C]. IOP Publishing, 2016, 118 (1): 012016.
- [23] Sapanathan T, Raelison R N, Buiron N, et al. In situ metallic porous structure formation due to ultra high heating and cooling rates during an electromagnetic pulse welding [J]. *Scripta Materialia*, 2017, 128: 10-13.