

多管相贯结构中圆管分点平移试探排料算法

黄世游 徐 雷 罗 勋 任清川

四川大学,成都,610065

摘要:在多管相贯的桁架结构中,圆管端口截面相贯线通常为突变多、形状复杂的空间曲线。针对传统排料算法难以处理多管相贯模型下圆管排料的问题,利用空间解析几何知识和数值积分原理,在分析相贯线平面展开的基础上,提出了多管相贯结构中圆管的分点平移试探排料算法。该算法以细分点为自变量,通过对细分点位置进行平移,循环比较展开图中管件废料的积分面积,从而找出最优排料方案。该算法能有效处理端口截面相贯线为任意形状的圆管排料问题。对以该算法为基础的排料模型进行了仿真试验,验证了该算法的通用性和可靠性。

关键词:多管相贯;排料;分点平移;积分面积

中图分类号:TP301.6;TP391.7

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.09.013

A Nodal Translational Tentative Packing Algorithm of Circular Tubes in Multi-pipe Intersecting Structures

Huang Shiyu Xu Lei Luo Xun Ren Qingchuan
Sichuan University, Chengdu, 610065

Abstract: The port section intersecting lines of circular tubes are always mutational and complicated space curves in multi-pipe intersecting structures. Aiming at solving the packing problem of circular tubes in multi-pipe intersecting structures, this paper introduced a nodal translational tentative packing algorithm after analyzing development drawing which was based on analytic geometry and the principle of numerical integration. It gave the best packing scheme by using multipoint subdivision which was independent variable and integral area of waste tubes in development drawing. The packing problem of circular tubes that have port section intersecting lines in arbitrary shape can be solved effectively. Through examples, it can be seen that the algorithm is universal and efficient.

Key words: multi-pipe intersection; packing problem; nodal translation; integral area

0 引言

管桁架结构已经在现今的许多大跨度场馆建筑中得到了广泛运用。桁架结构中各圆管之间大量地出现多管相贯,其复杂的相贯线对管件的排料提出了更高的要求。现有对排料方法的研究大多集中于一维下料^[1],包括多目标优化的一维排样系统^[2],而针对圆管结构下料优化问题的研究^[3]只对某些简单的相贯线适用,不能有效地处理多管相贯模型下端口截面为复杂相贯线的问题。同时,已有的下料算法中,关于相贯线展开模型部分均没有对空间多体相贯中出现的“贯穿”问题进行研究。圆管的分点平移试探排料算法是讨论在同一管材上连续切割管端具有复杂相贯线形状的管件时,如何确定每次切割时切割起点的位置,以达到材料利用率的最高值。这个优化排料问题在管桁架结构的实际切割加工过程中广泛存在。本文讨论了将分点平移试探排料算法用于圆

管切割加工排料优化的求解问题。

1 圆管下料问题的数学模型

1.1 问题的定义

在圆管的机械自动切割加工过程中,原材料的长度 L 是给定的。将这种原材料加工成端口截面为相贯线结构的圆管,则相邻加工的两管件之间存在一段废料,其体积为 V 。加工完首段管件后,在剩余的圆管中如何正确地选择切割起点,使得本次及上次切割生成的端口截面相贯线合理结合,从而保证废料体积 V 最小,这就是相贯节点圆管结构的圆管下料问题。

1.2 圆管管端数控切割原理

对于多管相贯结构中的圆管,其管端截面相贯线中的每一小段都是由两个基本体的表面相交而得的。由于每相交两立体的形状、大小和相对位置不一样,相贯线形状复杂且形态各异,而管桁结构对焊接节点处有很高的强度要求,同时为了避免过大的角焊缝,当管壁厚度大于等于 6 mm 时需加工焊接坡口^[4],故加工出来的圆管管端截

收稿日期:2012-11-23

基金项目:四川省科技支撑计划资助项目(2010GZ0051, 2012ZZ0002);成都市科技支撑计划资助项目(09RKYB980ZF-033)

面为形状复杂的空间曲面。

相贯管件的机械加工大多采用专用的多轴联动数控机床。此类切割不仅可以提高加工效率，且能保证足够的加工精度^[5]。五轴四联动数控机床切割相贯节点圆管管端的原理如图 1 所示。

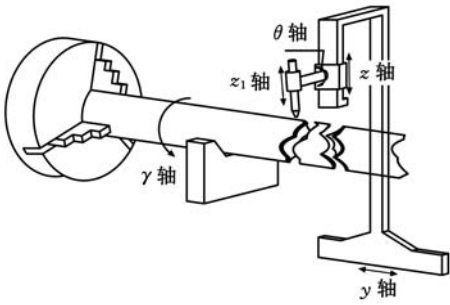


图 1 五轴四联动数控机床火焰切割原理图

原材料被加工时，割炬在圆管表面沿着相贯线轨迹切割。图 1 中的圆管绕 γ 轴做 360° 回转运动，同时割炬沿 y 轴和 z_1 轴做直线运动，此三轴联动可将管端相贯线精确切出。为了焊接方便，在实际加工过程中需要在加工相贯线时切出焊接坡口，所以，割炬还有一个绕 θ 轴的摆动运动。通过此四轴联动即可精确加工出管件所需要的端口截面相贯线及相应的坡口角。

1.3 传统算法描述

传统算法^[3]如图 2 所示。针对圆管管端截面为相贯线形状的下料问题，在同一基准平面内一左一右水平放置任意两段圆管的展开图，并保证

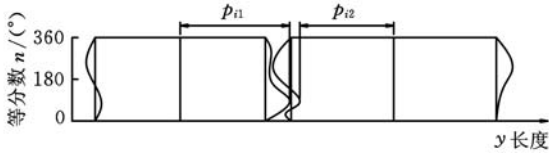


图 2 传统算法示意图

两杆件轴心处于同一水平线上。通过对杆件的不断旋转从而调整其中一幅展开图的展开线，使得左边圆管的右端截面展开线的最凸(凹)点与右边圆管的左端截面展开线的最凹(凸)点对应于同一水平线上。将展开图沿纵坐标方向分成 360 等份，并分别以两管的中截面为各自基准，对任一等分处，计算出左边圆管中截面到右端口处的距离 p_{i1} 和右边圆管中截面到左端口处的距离 p_{i2} ，通过对比距离之和 $p_i = p_{i1} + p_{i2}$ ，得出极大值 $p_{i,max}$ 。任意两根杆件的结合存在 8 种结合方式，故 $i=1, 2, \dots, 8$ 。通过比较所有方式下的极大值，得出最小值 $\min(p_i)$ ，即得出排料最优方案。

此种算法有效地处理了管端截面为简单相贯线情况下的下料问题。但对于管端截面为复杂相贯线的情况，两根圆管以 8 种结合方式的任意一

种方式结合，当排料最优时，其中一根管管端的最凸点基本不与另一根管管端的最凹点处于同一水平线上，所以传统算法缺乏通用性。文献[6]提出的是一个在钣金 CAD 中的排料算法，此算法的简化方法是运用板件展开图的最小包络矩形代替板件展开图进行排料，通过对矩形对称轴的不断旋转来获得冗余域的最小值。本文提出的算法也运用了相似原理以求得废料体积的最小值。

1.4 废料体积的数学模型

为了方便地描述模型，采用一对具有复杂相贯线且相邻加工的管件来建立一个通用的参数模型进行描述。如图 3 所示，管件切割时，先将圆管 I 切割下来。此时原材料 0 的被加工端口截面为相贯线 a 的形状。在加工下一根圆管前，由于圆管 I 的管端截面相贯线 b 与相贯线 a 不能完全吻合，所以需要先加工出圆管 II 的右端截面，此时就产生了一段废料。



图 3 管件排料示意图

图 4 为排料问题的数学模型示意图。在加工过程中，废料的体积 V 越小则排料方案越优。运用定积分思想求不规则物体体积的方法，将废料分成 n 个相同的近似长方体，每个小长方体的长和宽均为 Δl ，高为圆管壁厚 h ，其外表面积用 ΔS_j 表示，体积用 V_j 表示 ($j=1, 2, \dots, n$)。其中 n 越大，计算精度越高。

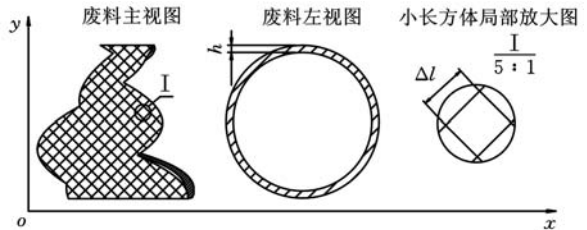


图 4 管件排料数学模型示意图

此时，每个小长方体的体积 ΔV_j 由下式表示：

$$\Delta V_j = \Delta l_j^2 h \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中， $n \geq 1$ 。当 n 趋于无穷大时，可认为 $\Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V_3 = \dots = \Delta V_n$ 。取

$$\lambda = \max\{\Delta l_1, \Delta l_2, \dots, \Delta l_n\} \quad (2)$$

则废料的体积 V 可由下式表示：

$$V = \sum_{j=1}^n \Delta V_j = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{j=1}^n h \Delta l_j^2 \quad (3)$$

至此可以得出，当废料的体积 V 按式(3)求得最小值时，排料是最优的。分析式(3)，由于 h

表征圆管壁厚,而在同一根原材料上加工时, h 是固定的,所以有

$$V = h \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{j=1}^n \Delta l_j^2 = h \sum_{j=1}^n \Delta S_j \quad (4)$$

由式(4)可看出,废料体积 V 与废料外表面积 S 成正比例关系,即当废料外表面积 S 最小时其体积 V 也达到最小值,排料方案最优。

1.5 纵向补偿问题

两相贯线相距太近时,由于切割温度太高而影响内相贯线的加工质量,所以,实际排料过程中必须给割炬一个纵向补偿量 δ :

$$\delta = h \tan \psi + \delta_1 \quad (5)$$

式中, ψ 为圆管加工的实际切割角^[7]; δ_1 是为避免两内相贯线相距太近而影响加工质量进行的纵向补偿,其大小依据实际加工情况而定。

2 多管相贯结构中圆管下料问题的求解方法

2.1 截面相贯线展开方法

2.1.1 两管相贯的数学模型

相贯线是不规则的空间曲线,切割出的端口截面也是不规则的空间曲面。对于两管相贯的情况,人们对其相贯线的数学模型进行了比较深入的研究,其数学模型如图 5 所示。

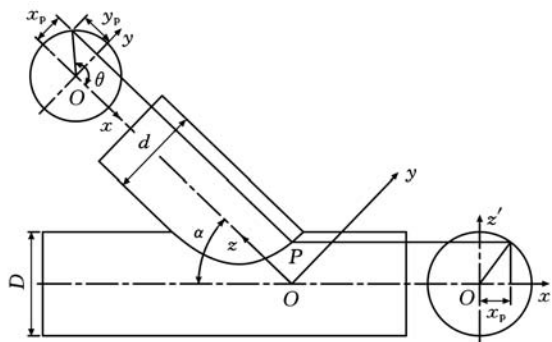


图 5 两管相贯数学模型示意图

取相贯线上的任意一点 $P(x, y, z)$, 相贯线数学模型^[7] 如下:

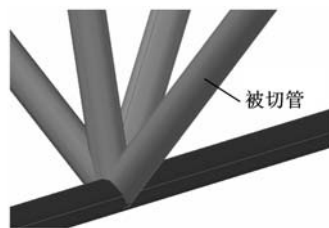
$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{d}{2} \cos \theta \\ y &= \frac{d}{2} \sin \theta \\ z &= \frac{\sqrt{(\frac{D}{2})^2 - (\frac{d}{2} \cos \theta)^2}}{\sin \alpha} + \frac{\frac{d}{2} \sin \theta}{\tan \alpha} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中, d 为支管直径; D 为主管直径; α 为两管轴线间的夹角; θ 为 OP 与 x 轴之间的夹角。

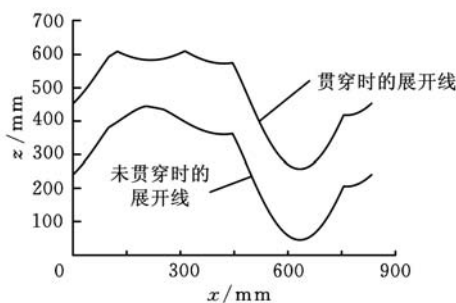
2.1.2 多管相贯的展开算法

对于多体相贯的情况,现有的相贯线数学模型^[7] 采用了取被切管与各切管相贯线的 z 值中的

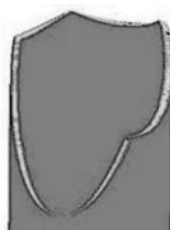
最大值,再利用扭转角修正坐标的方法,但忽略了被切管与切管相搭接时,管桁结构存在贯穿的情况(图 6),此时需要对现有数学模型进行修正。图 6a 所示的多圆管相贯桁架,其右上角那一根圆管实体代表被切管,其余均为切管。



(a) 桁架图



(b) 展开线对比图



(c) 被切管贯穿



(d) 被切管未被贯穿

图 6 被切管贯穿问题示意图

由两管相贯的数学模型可以分别求得被切管与切管 1、切管 2、...、切管 k 的相贯线方程。设切管 1 为与被切管贯穿的圆管,此处称为弦管。由式(6)求得的被切管与切管 i 的 z 值以 z_i 表示。对于同一个 θ 值,除弦管外其余切管与被切管均不贯穿。按两管相贯数学模型中建立两管相贯坐标系的方法,在圆管轴线不偏心的管桁结构中,被切管与非贯穿切管生成的有效相贯线均处于此坐标系的正 y 半轴上,即 $y \geq 0$ 。由式(6)得出相应 y 值下的 z 值,其余 z 值均设为 0,记相应 z 值为 $z_1, z_2', z_3', \dots, z_k'$ 。最终相贯线 z 值的计算公式为

$$z = \max\{z_1, z_2', z_3', \dots, z_k'\} \quad (7)$$

由于求解每条相贯线时是在各自独立的坐标系下完成的,而 z 值的比较应处于同一坐标系中,所以在计算各切管的实际切割角时应加上扭转角 ζ 修正^[7],其计算公式如下:

$$\zeta_i = \arccos \frac{\cos \beta_i - \cos \alpha_1 \cos \alpha_i}{\sin \alpha_1 \sin \alpha_i} \quad (8)$$

式中, β_i 为第 i 根切管与弦管之间的夹角; α_i 为被切管与切管 i 的轴线间的夹角。

以轴线交点为原点, 以被切管轴线为 z 轴, 以被切管轴线与切管 1 轴线所形成平面的法向量为 x 轴建立平面直角坐标系。在此坐标系下, 将被切管从任一母线处展开即形成相应的展开图。

2.2 展开线的分点平移法

在 xoz 平面直角坐标系中作出原材料被加工端端口截面相贯线的展开图(图 7)。图 7 中, 展开线 1 为空间三重支管情况下被切管的端口展开线, 展开线 2 为空间四重支管情况下被切管的端口展开线。其中, 取圆管未被加工端端口轴心处 $z=0$, 取上一次切割时的起弧点位置处 $x=0$ 。根据上述所建立的数学模型, 为了方便地计算出废料表面积 S 的最小值, 将本次加工后形成的端口截面相贯线在图 7 中用展开线 2 表示。 x 取任意值, 由于其理论 z 值都应小于展开线 1 中对应 x 点的 z 值, 故展开线 2 位于展开线 1 的下方。

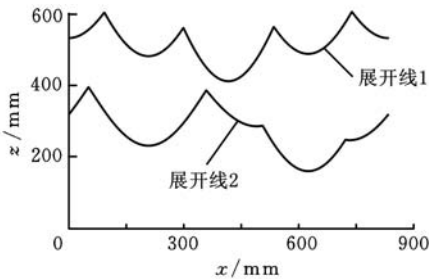


图 7 原材料被加工端端口截面相贯线展开图

为找到排料最省的方案, 本文提出相贯线的分点平移法, 其主要原理为: 保持起弧点位置不变, 改变圆周方向上展开线 2 相对于展开线 1 的位置, 即将展开线 2 绕圆管轴心旋转。根据旋转角度的不同, 两展开线之间的废料面积也不同。上述旋转过程转化在展开图中显示, 即为将展开线 2 平行于 x 轴向左移动。

根据圆管截面相贯线展开图进行分点平移, 具体步骤如下:

(1) 将圆管的内圆周平均分成 n 等份, 设 $n=720$ 。此处称等分数 720 为分点数, 在展开图中表现为展开线的最右端处 x 值为 720。

(2) 保持展开线 1 的位置不变, 将展开线 2 沿 x 轴负半轴方向水平平移 1 个单位。

(3) 取 $z_{720} = z_0$, 依据 z_{719} 、 z_{720} 的值画出相应两点间的展开线线段, 同时去除 x 负半轴上的展开线。

在展开图中通过步骤(1)~(3)即完成了一个单位的分点平移。为了能得到准确的结果, 上述分点平移必须重复 $n-1$ 次, 得出 $n-1$ 个结果

并进行比较。图 8 所示的展开图形象地表示了该分点平移法, 其中, 展开线 1 表示原展开线, 展开线 2 表示分点平移了 180 次后的展开线。

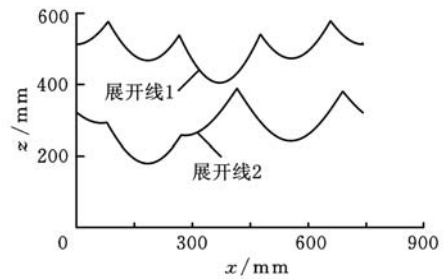


图 8 分点平移了 180 次后的相贯线展开图

在展开图中平移展开线这一行为在圆管表面就表现为管端截面相贯线绕圆管轴线的旋转, 并且展开图中的 x 坐标与管端截面相贯线的分点数相等。展开线每在 x 轴方向上移动一个单位, 就表明实际排样时管端截面相贯线绕圆管轴线旋转了一个分点数的角度。

2.3 展开线的试探排料算法

2.3.1 展开线的逼近原则

如图 8 所示, 将展开线 1、 $x=0$ 、 $x=720$ 及 $z=+\infty$ 所围成的平面点集记为 E , 将展开线 2、 $x=0$ 、 $x=720$ 及 $z=-\infty$ 所围成的平面点集记为 U 。

结合实际情况, 在不考虑纵向补偿量 δ 的前提下, 在一个展开图中展开两条相贯线将会出现三种不一样的情况: ① 点集 U 与点集 E 无公共点, 即 $U \cap E = \emptyset$; ② 点集 U 与点集 E 有且仅有公共边界点; ③ 点集 U 与点集 E 有公共内点。

将此三种情况下的展开图还原到圆管的理论加工过程中就相应表现为: ① 新端口截面相贯线完整切出且与原端口截面相贯线无交点; ② 新端口截面相贯线完整切出且与原端口截面相贯线有交点; ③ 新端口截面相贯线未能完整切出。

由此得出结论: 在使用分点平移排料算法时, 必须先将本次加工即将形成的相贯线展开在原相贯线的下方, 且保证两相贯线无交点或者有且仅有公共边界点, 即属于上文所述的情况 ① 或者情况 ②。此外, 当两相贯线的位置关系属于情况 ① 时, 为了计算得到废料表面积临界最小值 S' , 应当将相贯线 2 沿正 z 轴方向往上平移, 使得两相贯线的位置关系属于情况 ②。保证满足这些条件之后才能进行排料计算。

首次建立的展开图及每次分点平移后的展开图都应在上述结论中的条件下计算 S' 。

2.3.2 最优解的求法

按要求建立展开图之后, 废料表面积临界

最小值 S' 的表达式为

$$\left. \begin{aligned} f(x) &= (z'_x - z''_x)x \\ S'(x) &= \int_0^x f(t) dt \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中, z'_x, z''_x 分别为在同一坐标 x 下, 展开线 1 和展开线 2 的 z 值; x 表示展开线的分点数, 分点数越大, 废料表面积 S 的计算精度越高。

设本次加工的起弧点位置取在 $x=0$ 处, 则依式(9)可求得此时的废料表面积临界最小值 $S'(0)$ 。由分点平移法可知, 每一次平移后, 都能求得一个废料表面积临界最小值 S' , 依次记为 $S'(1), S'(2), \dots, S'(n)$ 。在这些临界值中, 取

$$\min(S') = \min(S'(0), S'(1), S'(2), \dots, S'(n-1), S'(n)) \quad (10)$$

考虑到割炬的纵向补偿量 δ , 废料的外表面积 S 为

$$\min(S) = \min(S') + \pi d \delta \quad (11)$$

联立式(10)、式(11)可知, 当 S' 取最小值时, 可以得到废料表面积的最小值 $\min(S)$ 。此时, 应将新相贯线在圆管内壁沿分点 n 至 0 方向绕轴线旋转相应个分点数的角度, 再进行割炬的纵向插补, 最后进行加工。例如, 对于 $\min(S') = S'(66)$, 应将新相贯线在圆管内壁沿分点 n 至 0 方向绕圆管轴线旋转角度 $\beta (\beta = 66 \times 2\pi/n)$ 。

2.3.3 圆管端口截面平整情况的处理

对某根圆管原材料进行首次切割或者对某根加工过的管端截面平整的圆管进行排料计算, 这属于上述算法的一种特殊情况, 此时运用本文算法时: ① 展开图中, 展开线 1 为一条与 x 轴平行的线段; ② 计算废料的 $\min(S)$ 时不需要用分点平移法。即按要求建立展开图后, 可直接求 $\min(S)$:

$$\left. \begin{aligned} \min(S'(x)) &= \int_0^x f(t) dt \\ \min(S) &= \min(S') + \pi d \delta \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

由式(12)可知, 只需先让相贯线展开图满足 2.3.1 节中的情况①, 再加上割炬的纵向补偿量 δ 即可进行加工。

3 程序实例及运行结果

为了验证分点平移算法的准确性, 以 AutoCAD 2007 为建模平台, 以 VBA 为开发工具, 采用上述排料算法, 编制了圆管下料优化模块。该模块在 AutoCAD 2007 上作为一个功能模块进行集成, 其人机交互界面见图 9。

利用该系统连续加工两根具有复杂相贯线的圆管。圆管参数如下: 外径 200 mm, 壁厚 9 mm, 第一根管坡口角度为 45° , 第二根管坡口角度为 60° , 补偿量 $\delta_1 = 2$ mm。为形象地比较优化前后

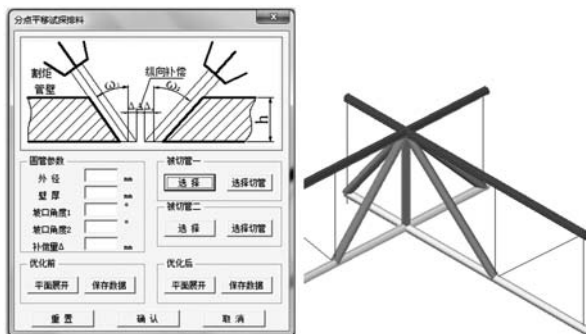


图 9 下料优化系统用户界面

圆管的排料效果, 在本次试验中摘录了其中的三组数据生成图 10 所示的展开图。这三组数据分别代表排料最优时、排料最大时以及分点平移 532 次时三种情况的圆管管端截面展开图。

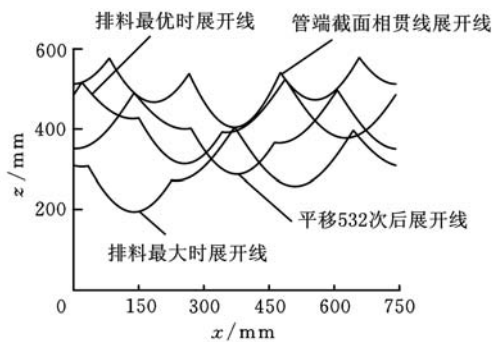


图 10 优化前后展开线对比图

在优化系统中提取每平移一次后所产生的相贯线及废料的各项数据。本实例采用了 720 个分点, 此处每隔 60 个分点采取一组数据, 如表 1 所示。表 1 中, 距离 l 表示原材料未切割端口截面在轴线方向上距新相贯线上某一点的最短距离。省料比 $P(i) = \min(S_j)/S_n$, 其中, S_n 为展开线 2 平移了 n 步以后所得的废料外表面积。

表 1 分点平移排料算法数据表摘录

平移步数 n	废料外表面积 $S(\text{mm}^2)$	距离 $l(\text{mm})$	省料比 $p(\%)$
292	40 418.91	2869.59	48.92
0	79 128.29	2817.26	0.00
60	51 435.21	2855.48	35.00
120	64 129.71	2836.37	18.95
180	54 251.78	2850.21	31.84
240	64 748.11	2835.16	18.17
300	41 923.50	2867.86	47.02
360	86 099.91	2805.55	-8.81
420	98 714.25	2788.58	-24.75
480	62 717.58	2838.34	20.73
540	56 933.08	2864.91	28.05
600	67 608.02	2831.64	14.56
660	95 372.65	2793.80	-20.53
719	79 794.10	2814.75	-0.84

为了更直观地验证算法,基于 OpenGL 和 3DSMax 平台,并在 OpenGL 中通过参数驱动导入的 3DS 静态模型,实现了加工过程和结果的三维动态演示。导入排料最优、排料最大两种情况的数据后,生成对应的三维图形如图 11 所示。



(a)优化后排料最大废料 (b)优化后排料最优废料

图 11 废料三维仿真图

采用分点平移算法进行多管相贯结构中圆管的排料,可以得到两条相邻相贯线在不同结合位置情况下的省料比。通过比较下料方案中材料省料比的大小,系统将自动为用户提供最优的下料方案。此外,通过比较距离 l ,发现废料面积最小时,距离 l 刚好达到最大值。此数据表明当使用分点平移排料算法得出排料最优方案时,从原材料加工下来的圆管也是最短的。这也佐证了分点平移算法的准确性与可靠性。

4 结论

(1)本文针对多管相贯结构中圆管的排料问题,运用空间解析几何知识和数值积分原理,提出了一种具有通用性的分点平移试探排料算法。采用该算法可得出排料最优方案,提高了材料的利用率,节约了生产成本。

(2)本文算法可靠且易于在计算中编程实现,可简化工程技术人员的工作,提高工作效率。

(3)本文算法对其他不同类型的管件或实体下料具有参考意义。

参考文献:

- [1] 贾志欣,殷国富,胡晓兵,等. 一维下料方案的遗传算法优化[J]. 西安交通大学学报,2000,36(9):967-970.
- Jia Zhixin, Yin Guofu, Hu Xiaobing, et al. Optimization for One-dimensional Cutting-stock Problem Based on Genetic[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2000, 36(9): 967-970.
- [2] 刘睿,严玄,陈菲,等. 考虑多目标优化的一维排料系统[J]. 计算机应用与软件,2010,27(1):23-25.

Liu Rui, Yan Xuan, Chen Fei, et al. One-dimension Layout System Considering Multi-objective Optimisation[J]. Computer Applications and Software, 2010, 27(1): 23-25.

- [3] 雷永富,龚景海. 圆管结构下料优化问题的研究与应用[J]. 四川建筑科学研究,2007,33(6):237-239.
- Lei Yongfu, Gong Jinghai. Research and Application of Tubular Structure's Cutting Stock Problem [J]. Sichuan Building Science, 2007, 33(6): 237-239.
- [4] 肖聚亮,阎祥安,王国栋,等. 管锥相贯焊接坡口数控切割[J]. 焊接学报,2005,26(5):69-72.
- Xiao Juliang, Yan Xiang'an, Wang Guodong, et al. Numerical Control Cutting of Welding Groove for Intersecting of Pipe and Con[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(5): 69-72.
- [5] 聂晓根,刘艳斌,曾露莎. 管件数控火焰切割割炬轨迹建模[J]. 工程图学学报,2008,29(3):145-150.
- Nie Xiaogen, Liu Yanbin, Zeng Lusha. Modeling of Flame Incision Tracks for NC Flame Cutting of Pipe Joints[J]. Journal of Engineering Graphics, 2008, 29(3): 145-150.
- [6] 黄宜军,施德恒,许启富. 钣金 CAD 中一个较优的排料算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2000,12(5):380-383.
- Huang Yijun, Shi Deheng, Xu Qifu. A Better Nesting Method for Sheet Metal CAD[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2000, 12(5): 380-383.
- [7] 王旗华,殷国富,徐雷,等. 管桁结构管端焊接装配面模型及切割精度控制[J]. 焊接学报,2011,32(10):81-84.
- Wang Qihua, Yin Guofu, Xu Lei, et al. Pipe End Mating Face Model and Cutting Precision Control Method for Pipe Truss Structure[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(10): 81-84.

(编辑 苏卫国)

作者简介:黄世游,男,1989年生。四川大学机械制造科学与工程学院硕士研究生。主要研究方向为 CAD/CAM。发表论文 2 篇。徐雷,女,1973年生。四川大学机械制造科学与工程学院副教授、博士。罗勋,男,1988年生。四川大学机械制造科学与工程学院硕士研究生。任清川,男,1986年生。四川大学机械制造科学与工程学院硕士研究生。