

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.05.008

复杂桁架结构管端实际切割角优化算法

王强, 徐雷*, 彭少峰, 李敏

(四川大学制造科学与工程学院, 四川成都 610065)

摘要:针对管-管复杂桁架结构中管端焊接装配面实际切割角易发生突变而影响正常装配这一问题,分析了其形成原因以及对数控管切割机的影响。在易于加工且不影响焊接装配的前提下,运用多项式插值的方法,对实际切割角突变弧段进行了优化,使管端焊接装配面平滑,易于加工。最后结合实例算法与仿真,通过分析其弧长-实际切割角曲线以及对比优化前后焊接装配面实际切割角三维模型效果,验证了该优化算法的可靠性。为数控管件切割方式的改进提出了一种新思路。

关键词:复杂管桁架;实际切割角;突变;多项式插值法

中图分类号:O241.3

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2015)05-0034-05

Optimization Algorithm of Actual Cutting Angle of Complex Truss Structure

WANG Qiang, XU Lei*, PENG Shaofeng, LI Min

(School of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: As the actual cutting angle of the welding assembly surface of the complex truss structure prone changes suddenly, its causes and effects on CNC pipe cutting machine have been analyzed. On the premise of easy processing without influencing the welding assembling surface and by using the polynomial interpolation, the actual cutting angle mutation arcs were optimized. So the welding assembling surface became smooth and easy to process. Finally, examples of algorithms and simulation were made to verify the reliability of the optimization algorithm by comparing the three-dimensional model before and after the optimization. It provides a new cutting method for the improvement of the numerical control tube.

Key words: complex truss structure; actual cutting angle; mutation; polynomial interpolation

在多管相贯的复杂管桁架结构中,管端口最终相贯线是被切管与各切管相贯线截取一段复合而成的^[1]。因此,各段相贯线的交点通常是相贯线轨迹的突变点。在管端坡口处理中,实际切割角的计算是以相贯线上点的两面角为根据的^[2-3],而相贯线又是分段的,这就极有可能造成实际切割角在各段相贯线交点附近大小发生突变。数控切割设备在切割突变点时,受设备本身的限制,实际加工角大小突变会使割炬瞬时摆角过大,超过割炬的最大允许摆动速度,使割炬火焰不易切透管壁。对于这类问题,传统的处理方式是:从机床切割速度着手,优化突变点切割速度,即根据实

际切割角突变量大小,分别计算切割速度。在保证管口焊接装配面无干涉的前提下,本文提出一种基于多项式插值进行实际切割角优化的方法:建立弧长-实际切割角曲线,并对突变点所在弧段的实际切割角进行多项式插值计算,使曲线在突变点平滑过渡,进而达到对实际切割角在突变点所在弧段优化的目地。

1 多管相贯焊接装配面数学模型

1.1 相贯线数学模型

多管件焊接时,各支管按管径大小依次焊接在主管上,且遵循大径优先的原则^[4]。设目标管半径为 r_0 ,主管与其余各支管半径分别为 $r_i(i=1,2,3\cdots)$ 。为了

收稿日期:2015-04-11;修回日期:2015-05-11

基金项目:四川省科技支撑计划(2014KJT085);四川省科技支撑计划(2014KJT085);成都市科技支撑计划(09RKYB980ZF-033)

作者简介:王强(1990),男,四川绵阳人,硕士研究生,主要研究方向为计算机辅助设计与制造。E-mail:729318578@qq.com

简化后续计算,以目标管和主管轴心线交点 o 为原点建立空间坐标系 $o-xyz$,如图 1 所示。其中 z 轴为目标管轴心线, y 轴位于主管与目标管轴心线确定的平面, x 轴由右手定则确定。

各切管相对于目标管空间几何关系如下:先绕 x 轴旋 α_i ,在此基础上,再绕 z 轴旋转 β_i ,最后再沿 x 轴方向移动 s_i ,设目标管相位角为 φ ,利用空间几何关系可得相贯线的参数方程:

$$\begin{cases} x = r_0 \cos \varphi \\ y = r_0 \sin \varphi \\ z_i = \frac{\sqrt{r_i^2 - (x \cos \beta_i + y \sin \beta_i + s_i)^2} + x \cos \alpha_i \sin \beta_i - y \cos \alpha_i \cos \beta_i}{\sin \alpha_i} \\ z = \max(z_i) \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (1)$$

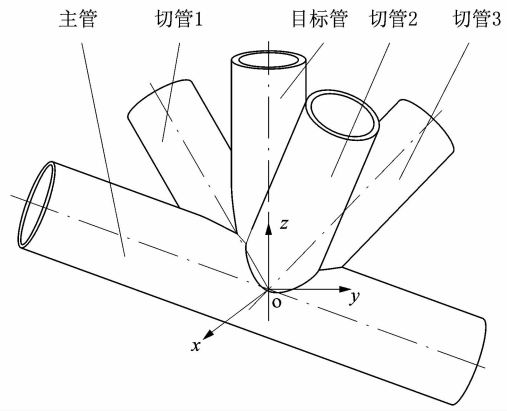


图 1 管-管相贯模型

Figure 1 Pipe - pipe intersection model

1.2 实际切割角数学模型

根据焊接工艺要求,焊接坡口角一般由相交管相贯线上点的二面角来确定的。基于现有管-管相贯带

斜边焊接坡口切割数学模型及经验公式^[5-6],可以直接推导出实际切割角 B_i 的计算公式:

$$\begin{cases} \theta_i = \arccos\left(\frac{x \cos \beta_i + y \sin \beta_i + s_i}{r_i}\right) \\ \omega_i = \arccos[\cos \varphi (\cos \beta_i \cos \theta_i - \cos \alpha_i \sin \beta_i \sin \theta_i) + \sin \varphi (\sin \beta_i \cos \theta_i + \cos \alpha_i \cos \beta_i \sin \theta_i)] \\ \gamma_i = \arctan\left[\frac{\cos \theta_i \sin(\varphi - \beta_i) + \cos \alpha_i \sin \theta_i \cos(\varphi - \beta_i)}{\sin \alpha_i \sin \theta_i}\right] \\ B_i = \arctan\left[\frac{\tan(\pi/2 - \omega_i + \rho)}{\cos \gamma_i}\right] \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ_i 为各切管相对于目标管的相位角; ω_i 为各切管与目标管相贯线上任意点的二面角; ρ 为坡口角,其取值根据二面角而定:当 $\omega < 90^\circ$ 则坡口角 ρ 取 $\omega/2$;当 $\omega > 90^\circ$ 时 ρ 取 45° ^[7]; γ_i 为各切管法剖面与目标管轴剖面夹角,分别取各段相贯线上点的坐标和其对应的实际切割角便是目标管焊接装配面的几何参数,也是本文优化的原始数据。

2 基于多项式插值的实际切割角优化

2.1 实际切割角突变的定义

在实际加工过程中,相贯线是通过以一系列离散的切割点形成的空间曲线逼近得到的近似曲线;实际切割角则是割炬在每一个切割点对应的偏转。在复杂桁架结构中,各段相贯线交点处实际切割角因各相贯管空间几何位置的不同,其大小可能发生突变,使得该小弧段焊接装配面呈现出“90度陡坡”的现象,本文将这类问题定义为实际切割角在该小弧段发生了突变。

2.2 实际切割角突变对数控管切割机的影响

数控切割机床对管件的切割运动的控制,是通过相对相贯线上离散点的控制来实现的。图 2 为五轴四联动数控切割机床简图:被切管绕 γ 轴实现 360° 回转,割炬沿 y 轴和 z_1 轴做直线运动,这三轴联动再配合 z_2 轴的微幅度调节控制割炬形成相贯轨迹。同时,割炬绕 θ 轴的摆动形成相应的焊接坡口的空间曲面^[8]。

由于控制数控切管机各轴的直流电机转角都是电枢电压脉冲,在一个单位脉冲内,若实际切割角变化过大,则转变成的电枢电压脉冲数也会过大,以致系统下载驱动数据时产生溢出,致使读取的脉冲数发生错误,造成管件未切透等现象^[9]。本文将通过多项式插值的方法对该弧段实际切割角进行优化,使管端焊接装配面平滑过渡,避免上述问题的发生。

2.3 实际切割角多项式插值优化

2.3.1 插值优化点的选取

为了方便简化计算,避免直接将目标管的焊接装

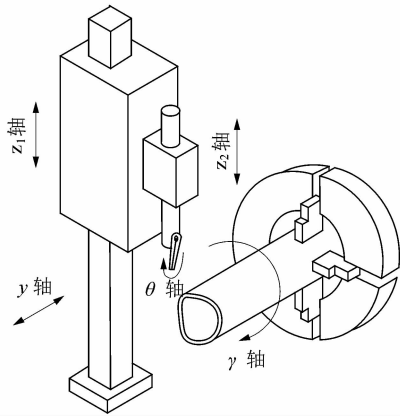


图2 五轴联动数控切管机三维造型结构示意图

Figure 2 Schematic of 5-axis CNC pipe cutting machine
 配面作为研究处理对象,本文通过对焊接装配面上各切割点的实际切割角进行一些数学处理,将问题转化成离散数据的多项式插值问题:将每个离散的切割点的实际切割角 B 与弧长值 L 相对应,并将两者的对应关系以二维曲线表示。通过对曲线插值平滑处理,进而对焊接装配面进行平滑处理。

在优化初期,必须先找出哪些切割点实际切割角发生了突变。管-管相贯中,实际切割角的计算是以相贯线上各点的二面角为根据的,而二面角是被切管与各交管相贯线上二者法向量的夹角。因此,各段相贯线的交点可能是实际切割角的突变点。设第 i 个切割点为相贯线的交点, ΔB 为该点与其相邻下一切割点实际切割角的差,即:

$$\Delta B = B_{i+1} - B_i \quad (3)$$

定义:若 $\Delta B >$ 机床割炬最大摆角,则该点实际切割角值发生突变,需要对该弧段实际切割角行优化。同时为了后续计算,在展开的二维曲线的基础上,再引入 2 个自定义参数:曲线向前导数 $\Delta\tau$,曲线向后导数 $\nabla\tau$ 。其计算方法如下:

$$\begin{cases} \Delta\tau = \frac{B_{i+1} - B_i}{\Delta\varphi r_0} \\ \nabla\tau = \frac{B_i - B_{i+1}}{\Delta\varphi r_0} \end{cases} \quad (4)$$

2.2.2 插值优化的原则

实际切割角优化应该遵循以下 2 个原则:一是优化后实际切割角值改变不会影响正常的焊接装配,不能对焊接装配有干涉重叠现象。针对这一问题,本文所采用的处理方式是在进行插值优化计算时取“值大优先”原则,即当两连续切割点实际切割角出现突变时,保持值大的切割点值不变,插值优化计算值小的弧

段;二是优化后优化弧段的焊接装配面与其它弧段的焊接装配面应是平滑过渡。因此优化计算时必须设定一段过渡弧段(过渡弧段包含的各切割点数根据实际加工情况和 ΔB 大小而定),数控切管机能通过割炬的正常摆动完成对该弧段的加工。

2.2.3 插值优化步骤

插值优化的思路就是在选定插值弧段 $C[i, i+T]$ 或 $[i-T, i]$ 构造一多项式高阶函数 $f(\lambda)$,该函数应满足上述 2 个基本原则,同时其在插值弧段函数值也与实际值相近似,优化计算过程就是用所构造的插值函数在插值弧段的函数值来代替插值弧段的实际切割角值。插值函数构造过程如下:

1) 按式(1)、式(2)分别计算各切割点上的相贯线坐标与实际切割角大小,同时找出相贯线的交点。

2) 将各切割点上实际切割角按弧长-实际切割角展开生成曲线,并按式(3)、式(4)找出突变点。

3) 设实际切割角发生突变的弧段两连续点实际切割角值大小分别为 B_i, B_{i+1} ,过渡弧段包括 T 个离散切割点。若 $B_i > B_{i+1}$,根据“值大优先”的原则,函数向后进行插值(反之则向前进行插值);过渡弧段为 $C[i, i+T]$,过渡弧段始末端点的实际切割角分别为 B_i, B_{i+T} ,再按式(4)分别计算出过渡弧起始端点的向后导数 $\nabla\tau_i$ 和过渡弧末端点的向前导数 $\Delta\tau_{i+T}$ 。为了使插值函数近似精度和光滑性更好, $f(\lambda)$ 必须满足以下条件:

$$\begin{cases} f(i) = B_i \\ f(i+T) = B_{i+T} \\ f'(i) = \nabla\tau_i \\ f'(i+T) = \Delta\tau_{i+T} \end{cases} \quad (5)$$

在满足上述条件后, $f(\lambda)$ 最高可以是一五阶多项式函数,其构造方式决定它在插值弧段的平滑、在区间端点处与其它弧段拥有良好的契合性^[10],将其化简整理后得:

$$\begin{aligned} f(\lambda) = & \frac{B_i(2\lambda - 2i + T)(\lambda - i - T)^2}{T^3} - \\ & \frac{B_{i+T}(2\lambda - 2i - 3T)(\lambda - T)^2}{T^3} + \frac{\nabla\tau(\lambda - i)(\lambda - i - T)^2}{T^2} + \\ & \frac{\Delta\tau_{i+T}(\lambda - i - T)(\lambda - i)^2}{T^2} \end{aligned} \quad (6)$$

若 $B_i < B_{i+1}$,函数向前进行插值,此时插值函数为:

$$f(\lambda) = \frac{B_i(2\lambda - 2i + 3T)(\lambda - i)^2}{T^3} -$$

$$\frac{B_{i+T}(2\lambda - 2i - T)(\lambda - i + T)^2}{T^3} + \frac{\nabla \tau(\lambda - i + T)(\lambda - i)^2}{T^2} + \frac{\Delta \tau_{i+T}(\lambda - i)(\lambda - i + T)^2}{T^2}。$$

4) 过渡弧段为 $C[i, i+T]$ 中,用插值函数代替原实际切割角值。若还存在突变点,重复 2)~4) 步骤,最终得到平滑的弧长-实际切割角曲线。

该插值函数优点:①优化计算后插值函数值与原实际切割角值近似度较好;②优化计算过程中前一段优化弧不会对后一段造成影响;③优化计算后各弧段管口焊接装配面能够平滑过渡,不会有干涉现象而影响焊接装配。

3 算法实例与分析

以图 1 复杂管桁架结构为例,目标管与各交管空间几何关系见表 1。

表 1 实例参数

Table 1 Instance parameters

名称	半径 r/mm	壁厚 t/mm	绕 x 轴夹角 $\alpha/(\circ)$	绕 z 轴夹角 $\beta/(\circ)$	偏心距 s/mm
被切管	35	5	/	/	/
主管	55	5	85	0	/
切管 1	35	5	65	90	15
切管 2	35	5	35	245	-5
切管 3	35	5	55	320	0

根据上述方法,以 AutoCAD VBA 为开发平台,进行参数化编程,将生成的装配面数据绘制成实际切割角-弧长曲线,如图 3 所示。再由式(3)、式(4)确定出实际切割角突变点并计算突变点曲线向前导数 $\Delta \tau$ 、曲线向后导数 $\nabla \tau$ 。最后根据各相贯线交点 B_i, B_{i+1} 之间大小,分别代入式(6)进行插值计算,生成切割角-弧长曲线如图 3(b)所示。

图 3 中优化前的曲线说明:①多管相贯的复杂管桁架结构中,由于各相贯管的空间几何位置不同,实际切割角存在发生突变的可能;②实际切割角的突变位置一定是相贯线的交点处,但并不一定超出加工机床的割炬的最大摆角,如图中第 263 个切割点。再同时对比优化前、后两曲线,发现在突变点总是采取“值大优化”的原则;优化弧段与原曲线平滑过渡。优化计算不会改变非优化弧段的实际切割角值,而且还能与之形成良好的过渡。

4 实例三维仿真及对比

为了更直观地验证该优化方案可靠性,再以上实例生成数据的进行三维实体仿真,生成优化前后管口焊接装配面的三维模型,如图 4 所示。

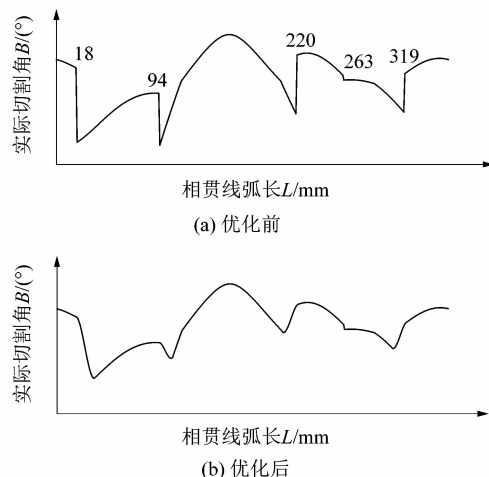


图 3 实际切割角-弧长曲线

Figure 3 Actual cutting angle-arc curve

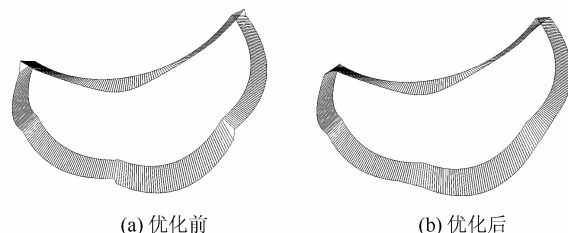


图 4 三维模型对比

Figure 4 Three-dimensional model comparison

图 4(a)为优化前焊接装配面的三维模型,由于实际切割角的突变在相贯线交点处形成了“90 度陡坡”的凹凸弧段。再对比图 4(b)优化后的三维模型,可以直观地看出,优化后管口焊接装配面平滑、易于加工,达到了预想的结果,从而验证了插值函数的可靠性。

5 结语

分析了多管相贯的复杂管桁架结构中管口实际切割角发生突变的原因和影响。从易于加工和不影响装配的角度出发,通过多项式插值的数学处理方式,优化了突变点弧段实际切割角,使得管口焊接装配面平滑、易于加工和美观。该方法为数控管件的切割方式的改进提出了一种新思路。此外,还可推广至方管、锥管、环管等管口的处理。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 谢新房,王国栋. 多管相贯焊接坡口数控切割研究[J]. 工程图学报,2007,28(4):150-155.
- [3] 苏永琳. 相贯线空间管桁架 CAD/CAM 技术研究[D]. 济南:山东大学,2006:26-28.