

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.06.007

CATIA V5变径弯头钣金放样及虚拟切割技术

谭子瑶, 熊勇刚

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 以NURBS样条曲面展开为理论基础, 路径控制、布尔运算为基本方法, 商用高级三维实体软件为工具, 研究了变径弯头钣金放样及虚拟加工的问题。通过实体进行曲面重构, 得到精确的弯头实体模型, 通过模型的曲面径向和切向误差分析, 验证了展开方法的正确性; 利用CATIA V5二次开发功能结合Excel软件, 构建出弯头钣金放样的虚拟仿真加工系统。

关键词: 钣金放样; 虚拟加工; 误差分析; 二次开发

中图分类号: TP391.72

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)06-0031-05

Technology of Adjustable Elbow Sheet Metal Lofting and Virtual Cutting Based on CATIA V5

Tan Ziyao, Xiong Yonggang

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Taking the NURBS surface expanding as theoretical basis, the control of the path and the Boolean calculation as basic methods and commercial high-level 3D software as a tool, the problems of the adjustable elbow sheet metal lofting and virtual machining CNC cutting were studied. The accurate physical model of the elbow was acquired by means of solid body surface reconstruction. The correctness of the expansion method was verified through the analysis of the radial and tangential errors of the surface. Combining the secondary development function of CATIA V5 with Excel software, the virtual simulation machining system of the elbow sheet metal lofting was constructed.

Keywords: sheet metal lofting; virtual machining; error analysis; secondary development

0 引言

在矿山、冶金、石油、化工等行业中, 需要大量形状各异的弯头构件, 尤其是变径弯头在这些领域使用非常广泛。目前, 形状不规则的弯头构件一般采用铸造的方法来制造, 而铸造工艺的优劣对构件的性能和质量影响较大。铸造工艺不好的构件很容易产生气孔和裂缝, 这对密封性要求较高的弯头构件的质量影响较大。从制造成本方面考虑, 铸造所需要的整套模具价格昂贵。因此, 改进制造方法

是解决上述问题的重要途径, 开发一整套变径弯头钣金件从放样到虚拟数控加工的系统具有非常重要的现实意义^[1]。

钣金件展开放样, 传统方法有图解法和计算法2种^[2]。传统方法对于简单的、精度要求不高的构件较容易画出其平面展开图。对于较复杂、精度要求较高的构件, 采用传统方法虽然能作出其平面展开图, 但利用这种平面展开图制成的构件精度不高, 生产的构件可能要经多次修补才能达到工况要求。

收稿日期: 2013-10-05

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(13JJ9014)

作者简介: 谭子瑶(1989-), 男, 湖南湘潭人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为汽车结构, E-mail: s250162@gmail.com

传统的图解法和算法已不再适应当今科技进步的时代，取而代之的是计算机辅助设计法。计算机辅助设计法能够精确绘制放样模型，它能改变了我国钣金放样精度不高、放样技术落后的现状。

H. T. Dean 等人^[3]对不规则几何形状钣金曲面展开尺寸的算法进行了详细研究；R. Baldacci 等人^[4]对钣金数控切割的走刀路径算法进行了研究，并进行了合理优化；然而他们均只针对单一方向进行了研究，并没有将设计方法与加工制造紧密联系起来。

综上所述，将变径弯头钣金放样与虚拟加工最大限度地结合起来，形成一套从设计过程到制造过程高度统一的完整体系是必然的趋势。该体系主要包括钣金模型建立与放样、钣金件虚拟数控加工、钣金件误差分析和软件二次开发。本文以 90° 变径弯头钣金件为例，具体论述该体系的操作流程。

1 钣金件模型建立与放样

1.1 钣金件模型建立

根据变径弯头工程图（见图 1），并利用 CATIA V5 软件建立三维实体模型，如图 2 所示。

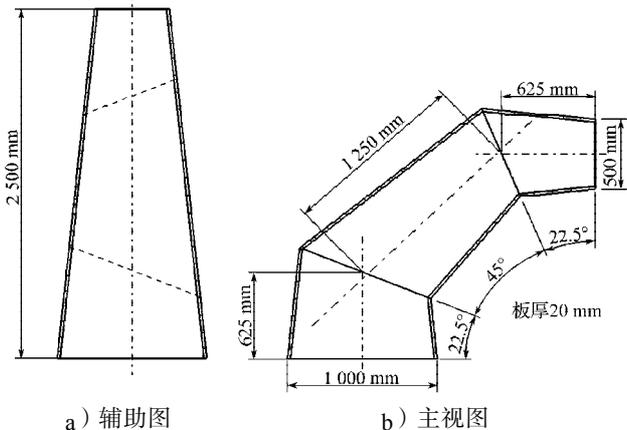


图1 变径弯头工程图

Fig. 1 The engineering drawing of the variable diameter elbow

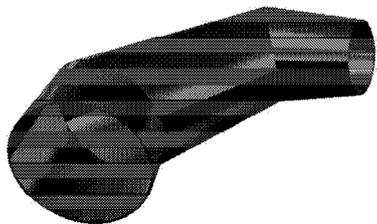


图2 三维实体模型

Fig. 2 The three-dimensional entity model

1.2 钣金件模型放样

通常，使用 CATIA V5 软件中的钢板类钣金展开功能，需要确定 4 个主要参数：

1) 钣金厚度 δ ；

2) 折弯半径 r （内径）；

3) 折弯端口处止裂类型（折弯方式）， \max （最大止裂型）表示不去除材料折弯；

4) 折弯系数比例因子 K （中性层到折弯内径之间的距离与钣金厚度的比），钢板类 K 的计算公式为

$$K = \frac{\lg \left(\min \left(100, \frac{\max(20 \times r, \delta)}{\delta} \right) \right)}{\lg 100 \times 2} \quad (1)$$

根据图 1 和钢板类 K 的计算公式，确定出钢板类钣金展开参数如表 1 所示。

表1 钢板类钣金展开参数

Table 1 The parameters of the steel sheet metal unfolding

参数	δ /mm	r /mm	止裂类型	K
取值	20	250~500	max	0.5

利用 CATIA V5 的钣金展开功能，根据表 1 确定的参数值，将工程图 1b 的弯头构件分为 3 段，弯头构件分段形状如图 3 所示。将 3 段弯头分别按其中性层展开，钣金展开形状如图 4 所示。

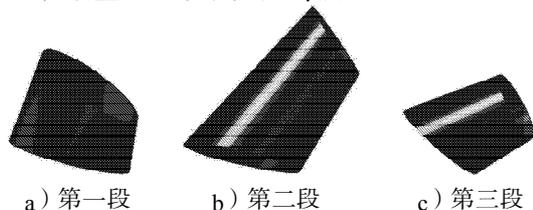


图3 弯头构件分段形状

Fig. 3 The sectional shapes of elbow members

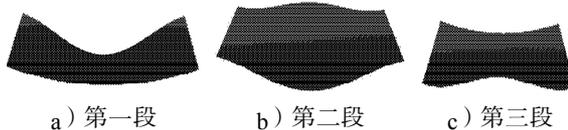


图4 钣金展开形状

Fig. 4 The shape of sheet metal unfolding

2 钣金件虚拟数控加工

2.1 钣金毛坯件虚拟下料

钣金毛坯件的下料尺寸，可参见图 1a 所示的锥形圆筒。该圆筒按图 1b 的尺寸分为 3 段，改变段与段之间的焊接方向即可加工成所需弯头。锥形圆筒展开前与展开后的毛坯模型如图 5 所示。

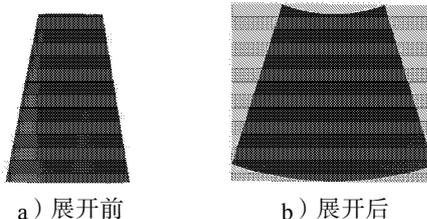


图5 锥形圆筒毛坯模型

Fig. 5 The blank model of tapered cylinder

毛坯选材选用优质碳素结构钢 20# 钢^[5]。通过查表^[6]可知, 20# 钢力学性能如表 2 所示。

表 2 20# 钢力学性能

Table 2 The mechanical properties of the 20# steel

参数	强度极限	屈服极限	伸长率	断面收缩率
	σ_a /MPa	σ_b /MPa	δ_s /%	ψ /%
取值	245	410	25	55

从表 2 可知, 20# 钢的强度极限和屈服极限都较高, 能较好地满足普通压力容器的制造要求; 而且还具有价格适宜, 切屑性能好等优点。因此选用 20# 钢作为毛坯下料材料。

2.2 加工参数的设定

1) 定义机床类型及其辅助工序。将机床类型选定为 2D 切割机床, 并将加工坐标系以及夹紧等其他附着工序设置好。工序定义模块如图 6 所示。

2) 选择合适的刀具、定义刀具路径。在钣金实际切割中, 常用的刀具类型是火焰喷嘴和等离子喷嘴, 而 CATIA V5 中缺少这类刀具, 因此只能采用立式铣刀代替。经过平面切割机床实际验证, 采用立式铣刀模拟加工过程生成的 NC 加工代码, 不会影响实际切割结果, 即可认为 2D 火焰切割或等离子切割机床默认不识别刀具代码, 只需手动调节火焰切割的火焰大小或等离子切割的电流强度。此外, 刀具路径的定义应遵循保证切割质量的原则, 因此刀具路径选择顺序如图 7 所示。

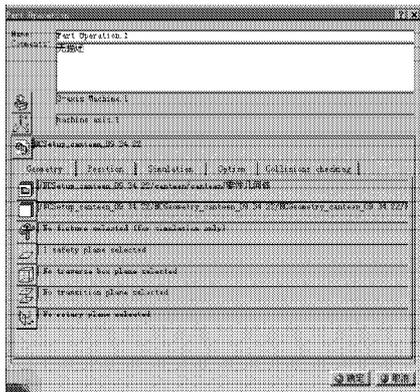


图 6 工序定义模块

Fig. 6 The module of process definition

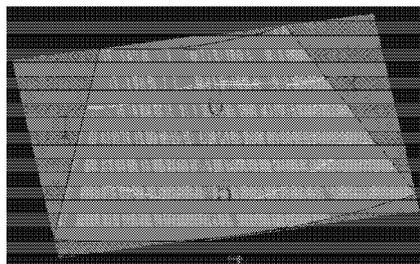


图 7 刀具路径选择顺序

Fig. 7 The selection order of tool path

2.3 钣金毛坯件虚拟切割仿真

利用 CATIA V5 的数控虚拟仿真模块, 对图 5b 所示展开后的毛坯件进行虚拟切割仿真, 如图 8 所示。

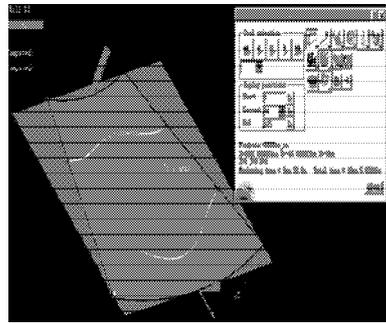


图 8 虚拟切割仿真

Fig. 8 The simulation of virtual cutting

2.4 NC 代码的生成

使用 CATIA V5 的数控加工模块所生成的 NC 加工代码如图 9 所示。此代码适用于 SIEMENS 公司生产的 SINUMERIK 系列数控系统和 FUNUK 公司生产的 FUNUK 系列数控系统。NC 代码格式为 .TXT 或 .U00, 将生成的代码程序拷贝到移动存储设备, 并将存储设备插入到数控加工设备或将计算机直接连接到数控加工设备上, 就能使数控机床按代码上的指令进行精确走刀。

```

G0T0 F=1000.17058,-1589.67573,-2.00000
TRAPREF =0.85194,-0.30733,0.00000
TLOW G0T0F/ 62363.2 / 1507.86690,-1573.00729,-2.00000,$
25.00000,0K (1.34E) / 1007.86690,-1576.18029,-2.00000,$
-1031.85534,-1583.17582,-2.00000)
G0T0 F=1000.10363,-1525.51586,-2.00000
G0T0 F=1007.86690,-1487.63582,-2.00000
G0T0 F=1004.58006,-1409.55124,-2.00000
G0T0 F=1100.73006,-1291.27189,-2.00000
G0T0 F=1116.22535,-1252.86267,-2.00000
G0T0 F=1121.16644,-1234.16471,-2.00000
G0T0 F=1145.31751,-1175.26331,-2.00000
G0T0 F=1158.77694,-1116.37683,-2.00000
G0T0 F=1171.54264,-1057.25242,-2.00000
G0T0 F=1183.81285,-997.67418,-2.00000
G0T0 F=1184.58612,-938.56618,-2.00000
G0T0 F=1205.66090,-879.02799,-2.00000
G0T0 F=1215.62540,-819.26569,-2.00000
G0T0 F=1224.30554,-759.59679,-2.00000
G0T0 F=1233.47845,-699.71114,-2.00000
G0T0 F=1241.34546,-639.73494,-2.00000
G0T0 F=1248.50636,-579.67045,-2.00000
G0T0 F=1254.66252,-519.52693,-2.00000
G0T0 F=1265.13120,-459.30872,-2.00000
G0T0 F=1265.75223,-399.03014,-2.00000
G0T0 F=1270.00490,-338.69551,-2.00000
G0T0 F=1273.70962,-278.31416,-2.00000

```

图 9 NC 加工代码

Fig. 9 The NC processing codes

3 钣金件误差分析

3.1 实际数控加工误差分析

实际操作的数控加工设备, 在确定两点之间的路径时并不是完全依照制定的轨迹运行, 而是通过数控插补的方法进行走刀。数控插补是数控加工的技术难点, 所谓插补就是指数控机床按照一定的算法完成加工路径的过程^[8]。插补一般有直线插补和圆弧插补, 在一些较高级的系统中还会提供螺旋线等高级路径的插补算法。下面对直线插补和圆弧插补 2 种方法进行误差分析。

1) 直线插补。该方法指定的走刀路径为从 $A(x_0, y_0) \rightarrow B(x_1, y_1)$ 的直线段, 而实际走刀路径为 $A(x_0, y_0) \rightarrow C(x_1, y_0) \rightarrow B(x_1, y_1)$ 的折线段, 如图 10 所示。

2) 圆弧插补。该方法指定的走刀路径为从 $A(x_i, y_i) \rightarrow B(x_{i+1}, y_{i+1})$ 的圆弧, 而实际走刀路径为从 $A(x_i, y_i) \rightarrow B(x_{i+1}, y_{i+1})$ 的弦, 如图 11 所示。

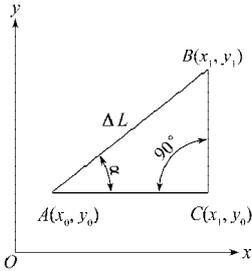


图 10 直线插补

Fig. 10 Linear interpolation

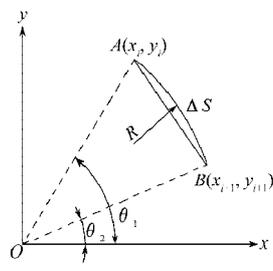


图 11 圆弧插补

Fig. 11 Circular interpolation

3.2 利用 CATIA V5 软件虚拟放样误差分析

3.2.1 NURBS 介绍

非均匀有理 B 样条 (non-uniform rational B-spline, NURBS) 方法的提出, 是为了找到与描述自由型曲线、曲面的 B 样条方法相统一的, 又能精确表示二次曲线弧与二次曲面的数学方法^[9]。NURBS 方法主要有以下 4 个特点:

1) NURBS 不仅可以表示自由曲线、曲面, 还可以精确表示圆锥曲线和规则曲线。因此, NURBS 为计算机辅助几何设计提供了统一的数学描述方法。

2) NURBS 具有影响曲线、曲面形状的权因子, 故可设计相当复杂的曲线、曲面形状。若运用恰当, 将更便于设计者实现自己的设计意图。

3) NURBS 方法是非有理 B 样条方法在四维空间的直接推广, 多数非有理 B 样条曲线、曲面的性质及计算方法, 可直接推广到 NURBS 曲线、曲面。

4) NURBS 方法计算稳定且快速。

3.2.2 CATIA 钣金放样原理, NURBS 曲面展开

CATIA V5 中钣金放样是依照 NURBS 曲面函数来进行计算, 双参数变量分段有理多项式定义的 NURBS 曲面计算公式为

$$p(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \omega_{ij} d_{ij} N_{ik}(u) N_{jl}(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \omega_{ij} N_{ik}(u) N_{jl}(v)}, \quad (2)$$

式中: 控制顶点 d_{ij} ($i = 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n$) 呈拓扑矩形阵列, 形成一个控制网格;

ω_{ij} 是与顶点 d_{ij} 联系的权因子, 规定四角顶点处用正权因子, 即 $\omega_{00}, \omega_{0n}, \omega_{m0}, \omega_{mn} > 0$, 其余 $\omega_{ij} \geq 0$;

$N_{ik}(u)$ 和 $N_{jl}(v)$ 分别为 u 向 k 次和 v 向 l 次的规范 B 样条基, 它们分别由 u 向与 v 向的节点矢量 $U = [u_0, u_1, \dots, u_{m+k+1}]$ 与 $V = [v_0, v_1, \dots, v_{n+l+1}]$ 确定。

由于 NURBS 曲面与 B 样条曲面采用相同的基函数, 因此 NURBS 曲面具有和 B 样条曲面相同的性质。除此之外, 由于权因子的作用, 使 NURBS 曲面具有更大的灵活性, 且表达能力大大增强, NURBS 曲面能统一表达二次曲面 (如球面、柱面、圆环面等), B 样条曲面和 Bezier 曲面等。

3.2.3 虚拟放样前与虚拟放样后尺寸误差分析

为了测试用 NURBS 曲面展开后与实际情况之间的误差, 故对折弯系数比例因子 K 作改变。为方便测量, 令 $K=0$ 并将钣金件按内表面层展开。如图 12 所示, 分别测量钣金件展开前和展开后截面周长, 并将测量结果进行分析比较, 如表 3 所示。

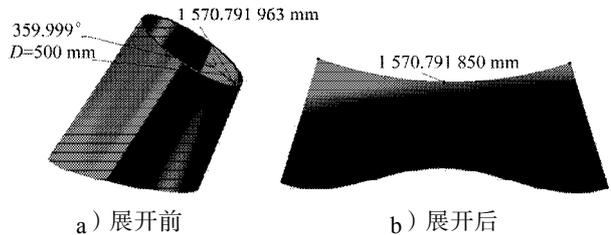


图 12 钣金截面周长

Fig. 12 The section perimeter of sheet metal

表 3 分析结果

Table 3 The analysis results

参数	截面周长 /mm		误差值 /mm	误差比
	展开前	展开后		
取值	1 570.791 963	1 570.791 850	0.000 113	7.19×10^{-8}

由表 3 可以看出, 采用 NURBS 函数计算钣金展开后的尺寸误差很小, 精度已经达到很高要求, 在生产实际中, 误差值可以忽略不计。

4 软件二次开发

利用 CATIA V5 自带的生成 Excel 表格链接功能, 容易实现全参数化设计, 只需在 Excel 表格中输入尺寸数据, 就能完整地自动建模。该功能不但节约了重复设计的时间, 而且减少了新模块开发的数量, 从而提高了工作效率^[10-11]。例如, 通过 CATIA V5 的自动连接 Excel 工作表功能, 在 Excel 工作表内分别输入:

顶圆内径 A2=1 000,

底圆内径 B2=2 000,

总高度 C2=2 500,

板厚 D2=20。

Excel 工作表如图 13 所示, 自动生成的全参数化

模型如图 14 所示。

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Geometri	Geometri	Geometri	PartBody	ThickSurface.1	First Offset	(mm)	
2	1000	2000	2500	20				

图 13 Excel 工作表

Fig. 13 The Excel worksheet

5 结论

本文阐述了 90° 变径弯头钣金从放样到虚拟加工制造的全过程, 并进行了误差分析, 这在一定程度上创新了与以往钣金设计不同的全参数化理念。由此可得以下结论:

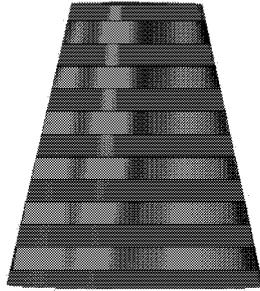


图 14 全参数化模型

Fig. 14 The full parametric model

- 1) 钣金中性层位置的确定对钣金展开尺寸的误差影响较大, 而且尺寸基数越大, 误差值也会增大。
- 2) 钣金毛坯下料时, 应按最小毛坯尺寸确定。
- 3) CATIA V5 中 NURBS 函数对曲面展平尺寸计算精确程度很高, 而且展开面的控制点数越多, 虚拟放样与实际放样间的误差值越小。
- 4) 参数化设计适应于大批量生产相同形状不同尺寸的零部件。

参考文献:

- [1] 廖敏, 殷国富, 罗中先, 等. 实用钣金展开 CAD 系统的开发技术与应用研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2004(1): 37-40.
Liao Min, Yin Guofu, Luo Zhongxian, et al. Research on Development Methods and Application of CAD System of Practical Sheet Metal Expansion[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2004(1): 37-40.
- [2] 梁少华. 钣金展开放样计算手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1987: 1-10.
Liang Shaohua. Calculation Handbook of Sheet Metal Unfolding Lofting[M]. Shenyang: Liaoning Science and

Technology Press, 1987: 1-10.

- [3] Dean H T, Tu Y, Raffensperger J F. An Improved Method for Calculating the No-Fit Polygon[J]. Computers & Operations Research, 2006(33): 1521-1539.
- [4] Baldacci R, Boschetti M A. A Cutting-Plane Approach for the Two-Dimensional Orthogonal Non-Guillotine Cutting Problem[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 183(3): 1136-1149.
- [5] 庞国星. 工程材料与成形技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 234-349.
Pang Guoxing. Fundamentals of Engineering Materials and Forming Technology[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005: 234-349.
- [6] 阎邦椿. 机械设计手册: 第 1 卷[M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2010: 34.
Yan Bangchun. Mechanical Design Manual: vol. 1[M]. 5th ed. Beijing: Mechanical Industry Press, 2010: 34.
- [7] Lodi A, Martello S, Monaci M. Two-Dimensional Packing Problems: A Survey[J]. European Journal of Operational Research, 2002, 141(2): 241-252.
- [8] 明兴祖, 熊显文. 数控加工技术[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2008: 8-18.
Ming Xinzhu, Xiong Xianwen. NC Machining Technology [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 8-18.
- [9] 复旦托业 CAD 培训中心. CATIA 曲线曲面设计基本理论[EB/OL]. [2013-06-17]. <http://www.doc88.com/p-604926953757.html>.
Fudan TOEIC CAD Training Center. Fundamental Theory of Curves and Surfaces in CATIA[EB/OL]. [2013-06-17]. <http://www.doc88.com/p-604926953757.html>.
- [10] 武刚, 朱世和, 郭津津. 基于 CATIA Active X Automation 机械零部件参数化系统的开发技术[J]. 天津理工学院学报, 2003, 19(4): 60-62.
Wu Gang, Zhu Shihe, Guo Jinjin. Development Technology of Parametric Design System of Mechanical Part Based on CATIA Active X Automation[J]. Journal of Tianjin Insitute Technology, 2003, 19(4): 60-62.
- [11] 张明. 基于 CATIA V5 的钣金产品设计可成形性仿真系统 SFA[D]. 华中科技大学, 2007.
Zhang Ming. Formability Analysis Molding System for Sheet Metal Product Design Based on CATIA V5-SFA[D]. Huazhong University of Science and Technology, 2007.

(责任编辑: 邓光辉)