

# 航空导管弯曲成形自动建模与后处理

樊胜宝<sup>1</sup>, 鲍益东<sup>1</sup>, 王 雯<sup>1</sup>, 赵正大<sup>2</sup>, 舒 阳<sup>2</sup>, 罗 芸<sup>2</sup>

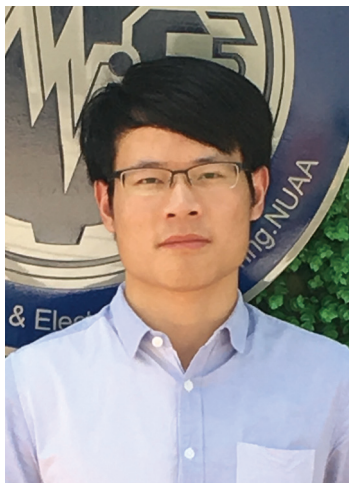
(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016;

2. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

**[摘要]** 随着航空导管空间几何形状设计的复杂化, 以及对制造精度要求的不断提高, 应用有限元分析方法研究最佳弯曲成形工艺已成为一种普遍的选择。研究了典型导管弯曲成形工艺方法的成形原理, 分析了导管弯曲成形性能评价指标。同时, 为提高导管弯曲成形有限元分析前后处理效率和降低使用难度, 使用 Python 编程语言开发了基于 ABAQUS 通用型有限元分析软件平台的弯管成形用户自定义界面。开发的用户界面提供了针对导管绕弯和自由弯曲成形的自动前后处理功能, 实现了导管弯曲成形性能指标的自动计算和分析报告自动生成的功能。

**关键词:** 弯管; 成形; 有限元模拟; 二次开发; Python

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.16.059



樊胜宝

硕士研究生, 主要研究方向为数字化设计制造技术。

飞机内部的液压、燃油、环控、氧气等系统错综复杂地分布着各种不同规格尺寸的导管, 这些导管起到压力传递、燃油和气体输送、电缆保护

等作用<sup>[1]</sup>。导管作为一架飞机的重要零部件之一, 其成形质量将直接影响飞机的飞行安全<sup>[2]</sup>。导管的弯曲成形是以直管材为毛坯, 通过各种塑性弯曲成形工艺方法制造出符合导管设计要求的弯曲曲率的加工方法<sup>[3]</sup>。传统的导管弯曲成形多采用手动的简单机械方式进行, 生产出的导管产品质量无法得到保证<sup>[4]</sup>。随着国内外对飞机导管空间几何形状设计的复杂化, 以及制造精度要求的不断提高, 传统的弯管工艺方法已经远远不能满足使用要求, 由此出现了更加高效、高精度的数控弯曲成形技术, 并逐步取代了传统的弯曲成形工艺<sup>[5]</sup>。随着有限元仿真技术在弯曲成形领域的深入应用, 通过数值模拟技术分析不同弯曲成形工艺对成形质量的影响, 以此来寻找最佳导管弯曲成形工艺, 从而实现飞机导管的高精

度制造, 已经成为一种主流趋势<sup>[6]</sup>。

导管弯曲成形有限元仿真具有一定的通用性, 基于通用型有限元软件的弯管成形二次开发能够为用户简化有限元分析定义和后处理过程, 缩短分析时间, 提高工作效率。蒋华兵等<sup>[7]</sup>开发出了数控弯管有限元分析前处理模块, 实现了弯管成形仿真有限元模型自动建立, 以此降低了使用 ABAQUS 软件进行导管弯曲成形仿真的难度。冯颖等<sup>[8]</sup>基于 ABAQUS 软件开发出了数控弯管专用后处理模块, 实现了弯管成形过程中生产工艺参数以及成形后管材回弹和延伸率等的自动提取输出。温馨等<sup>[9]</sup>对弯管成形前后处理进行了一定的整合, 为用户提供一种针对小半径单弯头导管高效的弯管成形数值模拟插件。拥有具备较为完整功能的导管弯曲成形有限元模拟插件,

能够在一定程度上降低使用难度,为其进入实际生产提供可能。

## 导管弯曲成形

导管弯曲成形工艺方法包括:推弯、压弯、绕弯、滚弯、拉弯以及新型的自由弯曲成形方法等。本文仅对导管绕弯和自由弯曲成形原理以及弯曲成形性能评价方法进行深入介绍。

### 1 导管绕弯成形

绕弯成形工作原理如图1所示。该系统由弯曲模、夹紧模、压模、芯轴、防皱模和球芯等部件组成<sup>[10]</sup>。弯曲成形时,芯轴和防皱模固定不动,夹紧模和压模同时下压;之后,弯曲模和夹紧模以同一角速度 $\omega$ 绕点 $O$ 运动,压模跟随管壁作直线运动,在弯曲模和夹紧模的拉力作用以及弯曲模和压模对导管的限制下成

形出和弯曲模曲率一致的弯曲形状。在下一弯曲动作前,各成型模具回复至初始工位,导管沿轴线方向前进和转动达到下一成形位置,由此成形出符合要求的导管空间几何形状。

导管绕弯成形方法成形过程简单高效,是目前导管弯曲成形领域中使用最为广泛的一种弯曲成形方法。但其在成形不同半径导管时需要频繁更换弯曲模,生产时需大量不同规格的弯曲模具,因此提高了导管弯曲的生产成本。

### 2 导管自由弯曲成形

针对传统导管绕弯成形过程中需频繁更换弯曲模的这一缺点,近几年,一种导管自由弯曲成形的工艺方法<sup>[11]</sup>被提出,其成形原理如图2所示。系统由弯曲模、导向机构、推进机构、球面轴承等组成,其中球面轴承仅在 $X-Y$ 平面内插补运动;弯曲

模具随球面轴承一起运动并绕球面轴承中心点自由转动;导向机构固定,起到限制导管运动方向的作用。弯曲成形时,球面轴承在 $X-Y$ 平面内移动一段距离 $u$ ,导管因此发生弯曲塑性变形,而导管在推进机构的作用下以相应的速度 $v$ 沿轴线方向进给,从而成形出特定弯曲曲率的导管。

自由弯曲成形是一种无精确成形模具的弯曲成形方法,其主要优势有:实现一种直径导管一个弯曲模具的多弯曲半径成形;通过连续变化 $u$ 值可实现导管弯曲半径的连续变化;能够成形更加复杂空间几何形状的导管<sup>[12]</sup>。

### 3 导管弯曲成形性能指标

导管弯曲成形过程中易产生管壁增厚、起皱,管壁减薄、开裂,弯头部位截面畸变和回弹等多种成形缺陷,导管精确弯曲成形性能主要由以下性能指标控制。

(1) 壁厚减薄率。

壁厚减薄率 $\xi_1$ 用来评价导管弯曲成形时的抗拉裂能力,其表达式为:

$$\xi_1 = \frac{(t - t_{\min})}{t} \times 100\% \quad (1)$$

其中, $t$ 是导管弯曲前壁厚; $t_{\min}$ 是导管弯曲成形后最小壁厚。

(2) 壁厚增厚率。

壁厚增厚率 $\xi_2$ 用来评价导管弯曲成形时的失稳起皱趋势,其表达式为:

$$\xi_2 = \frac{(t_{\max} - t)}{t} \times 100\% \quad (2)$$

其中, $t$ 是导管弯曲前壁厚; $t_{\max}$ 是导管弯曲成形后最大壁厚。

(3) 褶皱度。

褶皱度 $\eta$ 用来描述导管弯曲成形后弯头部位内侧的起皱程度,定义为:

$$\eta = \frac{(D_1 - D_2)}{D} \times 100\% \quad (3)$$

其中, $D_1$ 为导管成形后弯头部位最大外径; $D_2$ 为导管成形后弯头部位

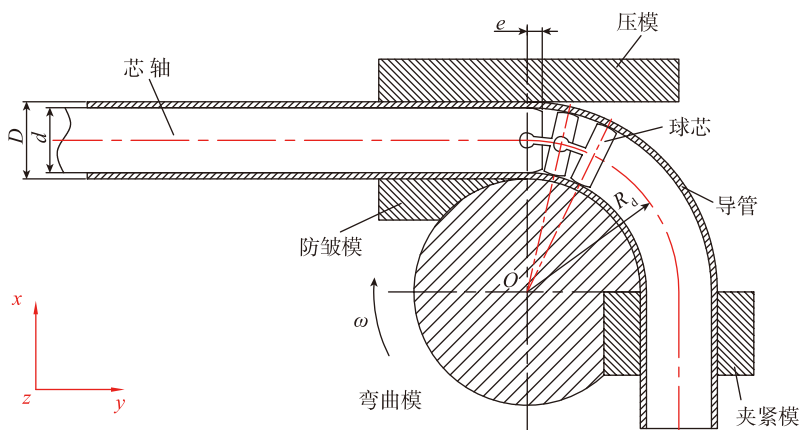


图1 绕弯成形原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of rotary draw bending

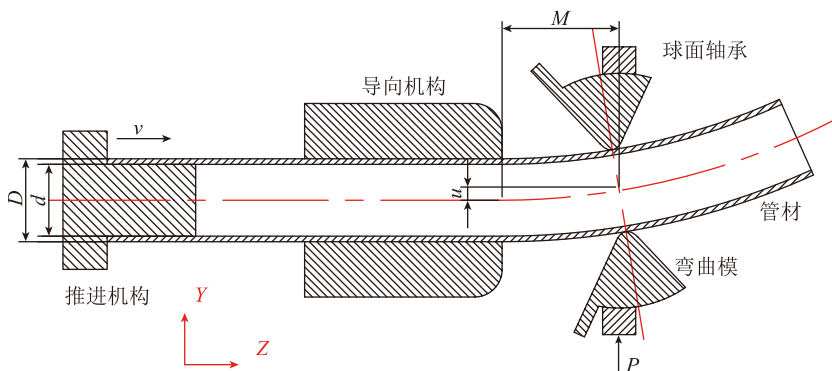


图2 自由弯曲成形原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of free bending

最小外径;  $D$  是导管弯曲前的外径。

(4) 椭圆度。

椭圆度  $\varphi$  用来表示导管弯曲成形后的截面变形程度,其定义为:

$$\varphi = \frac{(D_{\max} - D_{\min})}{D} \times 100\% \quad (4)$$

其中,  $D_{\max}$  是成形后导管某一截面的最大外径;  $D_{\min}$  是成形后导管某一截面的最小外径;  $D$  是导管弯曲前该截面的外径。

(5) 回弹量。

导管弯曲成形后的回弹,主要包括弯曲角度回弹和弯曲半径回弹。回弹角  $\Delta\theta$  和回弹半径  $\Delta R$  定义为:

$$\Delta\theta = \theta_0 - \theta \quad (5)$$

$$\Delta R = R - R_0 \quad (6)$$

其中,  $\theta_0$  是回弹前的弯曲角度;  $\theta$  是回弹后的弯曲角度;  $R_0$  是回弹前的弯曲半径;  $R$  是回弹后的弯曲半径。

对弯曲成形后的导管使用以上指标进行评价,确定导管成形质量,并能通过数值对比分析出不同成形工艺方法对导管弯曲成形质量的影响。

### ABAQUS 二次开发

ABAQUS 二次开发方式主要有脚本程序和用户子程序开发。脚本程序开发包括 Python 程序和 C++ 程序开发,前者可用于 ABAQUS 软件的前后处理以及用户界面(GUI)的开发, C++ 程序开发则为用户提供了一种对后处理数据快速处理的能力。用户子程序是通过 ABAQUS 为用户提供的相应子程序接口,使用 Fortran 语言对 ABAQUS 的求解过程进行二次开发。其具体使用环境如图 3 所示。

ABAQUS 软件为用户提供了基本的 GUI 构造器(RSG Dialog Builder),能够创建较为简单的用户操作界面。在实际使用过程中,通常先通过构造器建立基本的标准 GUI 插件(Standard plug-ins)程序,然后通过修改自动生成的程序文件来实现复杂的交互功能。

ABAQUS GUI 插件主要由注册文件、图形界面文件和内核执行文件组成。其中,注册文件用于申明 GUI 界面在 ABAQUS 菜单栏中的位置、关键字以及调用的用户界面文件和内核程序文件;图形界面文件包含了用户控件的定义以及控件间的通讯;内核执行文件实现从用户 GUI 到 ABAQUS 软件的单向通讯,是提交给 ABAQUS Python 解释器响应用户输入的文件。

ABAQUS GUI 开发是通过集成 ABAQUS 软件的部分功能来简化用户操作,节约有限元分析前后处理时间。

### 导管弯曲成形二次开发

#### 1 导管弯曲成形前处理模块

导管弯曲成形 ABAQUS 二次开发流程如图 4 所示,其 GUI 界面如图 5 所示,其中图 5 (a) 为导管绕弯

成形 ABAQUS 插件界面,图 5 (b) 为导管自由弯曲成形 ABAQUS 插件界面。

用户对导管弯曲成形的前处理过程均可在插件内进行,无需切换到 ABAQUS 软件界面下进行相关操作。该插件还提供了自定义成形模具的功能,以及通过 ABAQUS 插件自动刷新函数(processUpdates() 函数)对用户输入进行自动检查功能,其部分关键程序代码见表 1。

该插件实现了对导入的导管数模进行自动计算处理,提取出导管各段参数数据,如弯曲部位曲率和角度、直管段长度、两个弯曲部位的空间相对转角等,并为用户自动生成与 ABAQUS 软件相对应的分析步参数。

#### 2 导管弯曲成形后处理模块

导管弯曲成形后处理插件界面如图 5 (c) 所示,为用户提供了自动

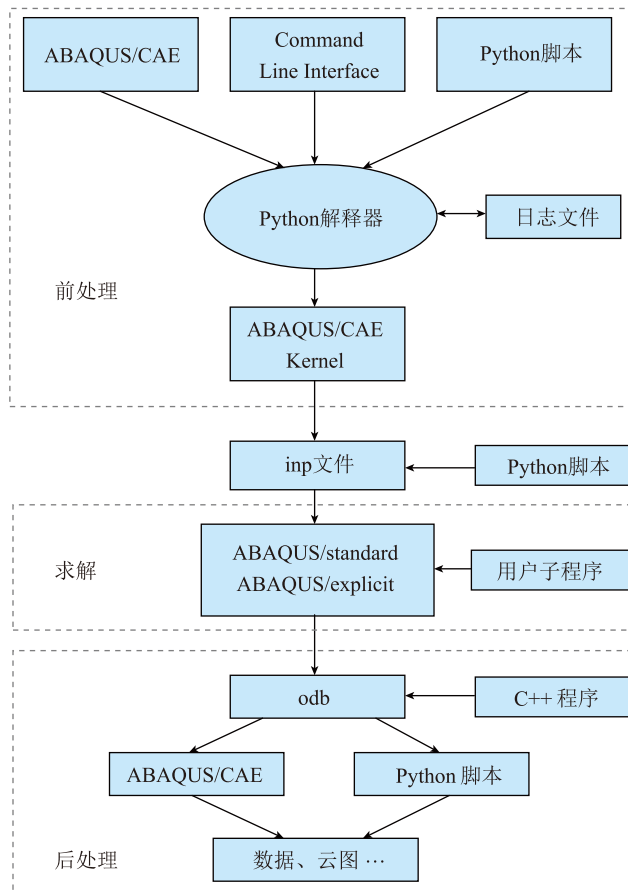


图3 ABAQUS软件开发环境

Fig.3 ABAQUS software development environment

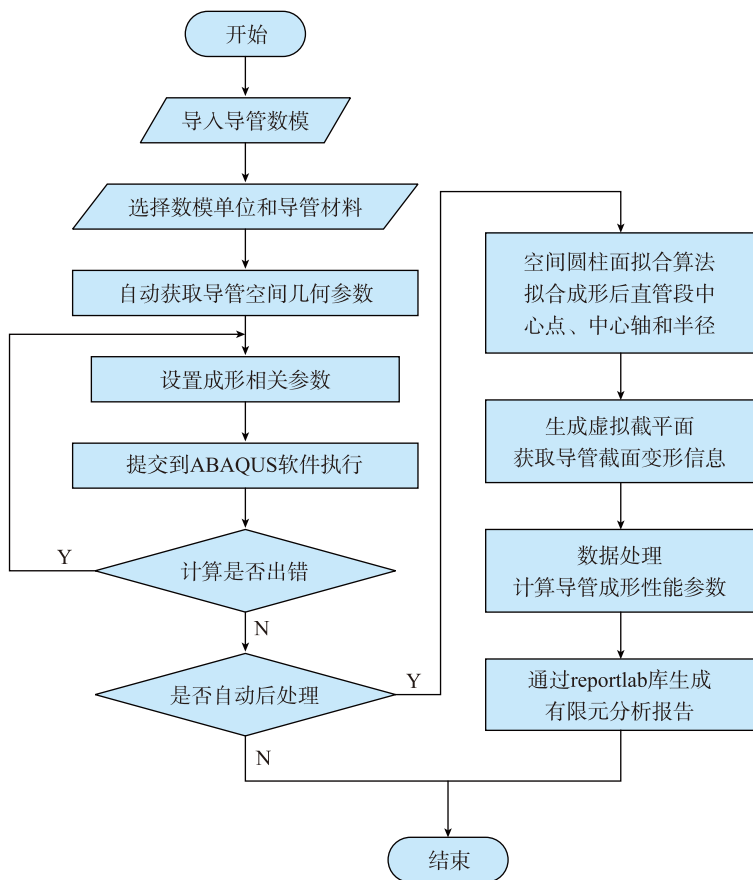


图4 弯曲成形二次开发程序流程图

Fig.4 Program flowchart for secondary development of bending forming

读取导管弯曲成形有限元仿真后处理文件(odt文件)中的多种场输出,并自动进行相应转换,计算出导管弯曲成形性能参数。

(1) 导管直管段空间圆柱面拟合算法。

有限元仿真成形后的航空导管,其各直管段可以看成是一个三维空间圆柱面。计算成形性能参数需提取直管段的轴线、中心点和半径信息,为此需对直管段进行三维圆柱面拟合。

空间圆柱面可由中心点 $(x_0, y_0, z_0)$ 、轴线方向向量 $(a, b, c)$ 和半径 $R$ 唯一确定。导管直管段任一节点坐标数据 $(x_i, y_i, z_i)$ 在该中心点和方向向量下的半径误差公式为:

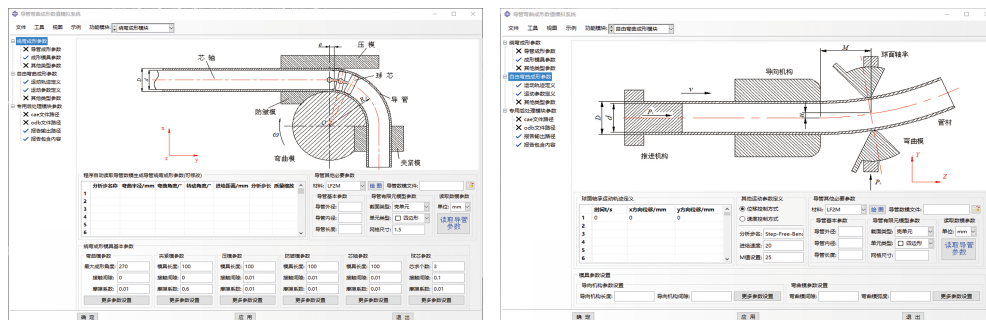
$$E_{rr}^i = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2 - (a \cdot d_x + b \cdot d_y + c \cdot d_z)^2} - R \quad (7)$$

其中,  $d_x = x_i - x_0$ ;  $d_y = y_i - y_0$ ;  $d_z = z_i - z_0$ 。

通过最小二乘法求解出符合最小误差的成形后导管直管段拟合的空间圆柱面参数,表2列举出了该拟合算法求解过程的关键性程序。

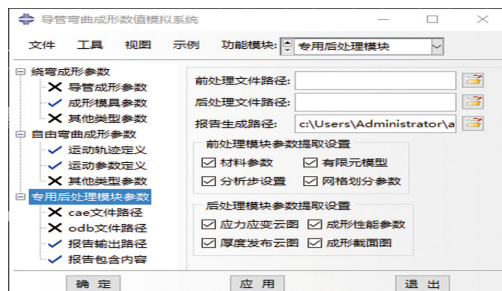
(2) 成形性能参数自动提取。

ABAQUS 软件为用户提供多种



(a) 导管绕弯成形界面

(b) 导管自由弯曲成形界面



(c) 导管弯曲成形后处理界面

图5 导管弯曲成形自定义用户界面

Fig.5 User graphics interface of tube bending process definition

表1 用户交互界面框架部分关键程序说明

关键程序代码	程序说明
<pre>ID_MYFILE = AFXDataDialog.ID_LAST self.fxpop = FXPopup(self) FXMAPFUNCS(self,SEL_COMMAND,self.ID_File_NewCreate,self.ID_File_SaveAs,     RotaryDrawBendingDB.onCmdBTN_File) FXMenuCommand(self.fxpop, '新建', None, self, self.ID_File_NewCreate) FXMenuCommand(self.fxpop, '打开', None, self, self.ID_File_Open) ... self.MySplitter = FXMatrix(self,n=7,opts=MATRIX_BY_COLUMNS,pl=0,pr=0,pt=0,pb=0,hs=0,vs=0) self.menuFileButton = FXMenuButton(self.MySplitter, '文件',None,     self.fxpop,opts=MENUBUTTON_NOARROWS) FXMAPFUNC(self,SEL_COMMAND,self.ID_BTN_PlotMaterial,RotaryDrawBendingDB.onCmdBTN_PlotMaterial) self.button_plot =FXButton(p=HFrame_2_1 ,text='绘图',ic=None,tgt=self,sel=self.ID_BTN_PlotMaterial, opts= BUTTON_NORMAL LAYOUT_FIX_WIDTH LAYOUT_FIX_HEIGHT,     x=0,y=0,w=40,h=25,pl=2,pr=2,pt=2,pb=2) self.button_plot.setTextColor(FXRGB(0, 0, 255)) self.sw_main = FXSwitcher(self.HFrame_Tree1) self.addTransition(form.ModelChangedKw,AFXTransition.EQ,0,self.sw_main, MKUINT(FXSwitcher.ID_OPEN_FIRST,SEL_COMMAND)) def onCmdBTN_File(self,sender,sel,ptr): if SELID(sel) == self.ID_File_NewCreate: ... </pre>	<p>消息 ID 值的设置 弹出按钮 菜单栏选项消息映射函数 数组 子菜单 1 子菜单 2</p> <p>新建菜单栏标题,并引入相应的子菜单栏 按钮消息映射函数 通过 FXButton 控件建立一个“绘图”按钮</p> <p>通过 FXSwitcher()、addTransition() 函数和关键字的值实现各模块之间的切换 按钮执行函数定义 识别的消息 ID 值,执行不同的用户响应</p>

表2 导管直管段空间圆柱面拟合算法关键程序说明

关键程序代码	程序说明
<pre>for i in xrange(0,data_size):     D = a*(data_coord[i][0]-x0)+b*(data_coord[i][1]-y0)+c*(data_coord[i][2]-z0)     dx = x0+a*D-data_coord[i][0];dy = y0+b*D-data_coord[i][1];dz = z0+c*D-data_coord[i][2]     S = math.sqrt(dx**2+dy**2+dz**2)     b1 = (dx*(a*(data_coord[i][0]-x0)+D)+dy*b*(data_coord[i][0]-x0)+dz*c*(data_coord[i][0]-x0))/S     b2 = (dx*a*(data_coord[i][1]-y0)+dy*(b*(data_coord[i][1]-y0)+D)+dz*c*(data_coord[i][1]-y0))/S     b3 = (dx*a*(data_coord[i][2]-z0)+dy*b*(data_coord[i][2]-z0)+dz*(c*(data_coord[i][2]-z0)+D))/S     b4 = (dx*(1-a**2)-dy*a*b-dz*a*c)/S     b5 = (-dx*a*b+dy*(1-b**2)-dz*b*c)/S     b6 = (-dx*a*c-dy*b*c+dz*(1-c**2))/S     b7 = -1     B.append([b1,b2,b3,b4,b5,b6,b7]); l1 = R-S ; L.append(l1) if abs(a)&gt;=abs(b)&gt;=abs(c):     C = np.array([[2*a,2*b,2*c,0,0,0,0],[0,0,0,1,0,0,0]])     W = np.array([[1-a**2-b**2-c**2],[mean_x-x0]]) if abs(b)&gt;=abs(a)&gt;=abs(c):     C = np.array([[2*a,2*b,2*c,0,0,0,0],[0,0,0,1,0,0,0]])     W = np.array([[1-a**2-b**2-c**2],[mean_y-y0]]) if abs(c)&gt;=abs(a)&gt;=abs(b):     C = np.array([[2*a,2*b,2*c,0,0,0,0],[0,0,0,0,1,0,0]])     W = np.array([[1-a**2-b**2-c**2],[mean_z-z0]]) B = np.array(B) L = np.array(L) Nbb = (B.T).dot(B) U = (B.T).dot(L) N = np.row_stack((np.column_stack((Nbb,C.T)),np.column_stack((C,np.zeros((2,2)))))) UU = np.append(U,W) para = (np.mat(N).I).dot(UU) </pre>	<p>变量 data_size 为点数据量大小, data_coord 为数据点坐标, a、b、c、x<sub>0</sub>、y<sub>0</sub>、z<sub>0</sub> 和 R 开始时提供初始值,对所有数据点组装成特定的矩阵</p> <p>比较 a、b、c 的大小,并根据比较结果赋予 C 和 W 一个特定的矩阵</p> <p>numpy 库进行矩阵计算 求解空间圆柱面参数,最后得到 para 的前 7 个参数分别为 a、b、c、x<sub>0</sub>、y<sub>0</sub>、z<sub>0</sub> 和 R,为达到较为收敛的结果,求解过程需要进行迭代计算</p>

场输出,用户能够直接从场输出中提取某些成形性能参数,如通过读取“STH”场输出可直接读取成形后导管最大最下壁厚,可通过计算获得导管的减薄率和增厚率。其他成形性能参数需通过读取“COORD”场输出中的节点坐标值,并通过一定的坐标转换关系计算得出。人工提取操作过程较为烦琐,且无法得到较为精确的数值结果。而通过使用 Python 程序自动提取成形后导管弯曲部位的截面变形情况并自动计算相应成形性能指标。该程序能够自动搜索特定截面下的导管截面形状,图 6 中展示了算法在导管采用实体单元仿真成形后弯曲部位某一截面内外形

状的提取过程。该算法能够直观地显示理想状态下和有限元仿真成形后导管某些截面变形的对比结果,大大提高了有限元后处理效率。

(3) 成形分析报告自动生成。

Python 编程语言包含丰富的开源库,其中包含 reportlab 开源库,该库为用户提供了通过 Python 程序生成 pdf 文件的功能,且该库能够和 ABAQUS Python 解释器兼容。为此,通过 Python 程序调用 reportlab 库函数能够为用户自动生成有限元分析报告。

本文通过 reportlab 库实现了导管弯曲成形有限元模拟的报告自动生成,能够生成用户所要求的数据,

绘制成形后各弯曲部位截面的形状,并通过对比计算各成形参数。

### 弯曲成形算例

以典型的航空导管为例,利用所开发导管弯曲成形插件,实现航空导管的整管弯曲成形模拟。

#### 1 典型航空导管绕弯成形模拟

使用绕弯成形方法成形如图 7 所示的空间几何形状导管,对比分析有无芯球对导管成形性能的影响,图 8 (a) 为无芯球成形后导管厚度分布云图,图 8 (b) 为有芯球成形后导管厚度分布云图。表 3 列出了两种方法成形后的成形性能参数。

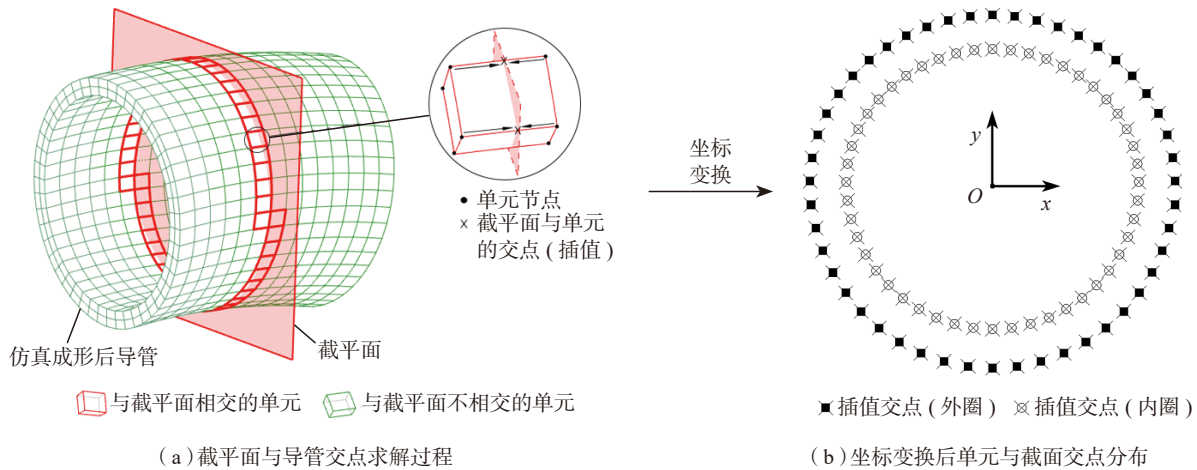


图6 导管成形后截面形状的确定

Fig.6 Method of determining the cross-section after tube bending

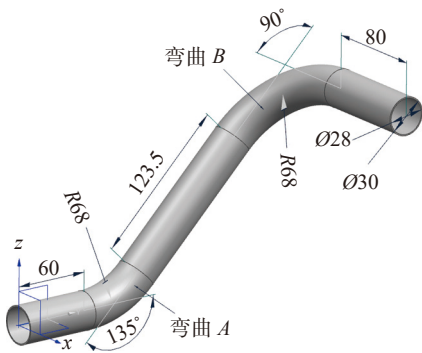
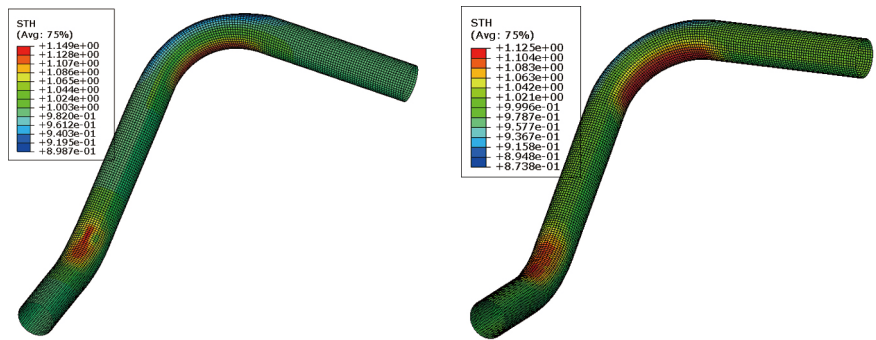


图7 导管三维空间几何参数

Fig.7 Three-dimensional geometric parameters of the tube



(a) 无芯球成形后厚度分布

(b) 有芯球成形后厚度分布

图8 绕弯成形后导管厚度分布云图

Fig.8 Thickness contour of rotary draw bending

## 2 典型航空导管自由弯曲成形模拟

由于自身模具结构的限制,自由弯曲成形多用于成形小直径的导管,如飞机上的液压导管。由图 9 可以看出采用自由弯曲成形的导管从直管段到弯曲段实现了圆滑过渡,具有优异的成形性能。

### 结论

本文利用 ABAQUS 软件提供的 Python 程序语言接口,完成了航空导管弯曲成形有限元模拟 GUI 界面的开发,并实现了以下功能。

(1)通过 Python 程序自动读取导管数模弯曲部位曲率和角度、各分段长度、两相邻弯曲部位的转角等空间几何参数信息。

(2)导管绕弯和自由弯曲成形的 GUI 界面开发,只需输入成形关键参数,程序自动校验所输入的参数并生成指定的弯曲成形有限元分析

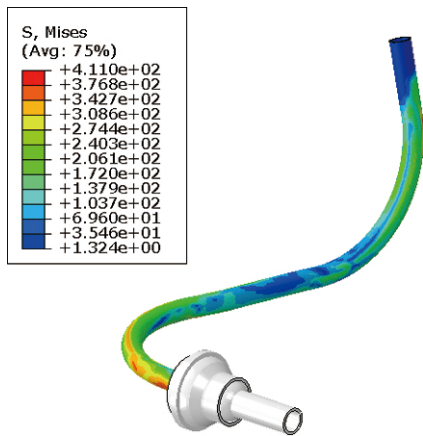


图9 自由弯曲成形应力云图

Fig.9 Stress contour of free tube bending

表3 导管绕弯成形性能参数

参数	无芯球成形		有芯球成形	
	弯曲 A	弯曲 B	弯曲 A	弯曲 B
最大减薄率 /%	9.8	10.1	12.0	12.6
最大增厚率 /%	14.9	13.4	11.1	12.5
褶皱度 /%	3.5	0.3	2.0	0.1
椭圆度 /%	5.8	14.5	3.1	5.2
回弹角 / (°)	0.53	2.18	0.86	2.47

模型。

(3)导管弯曲有限元仿真成形后的参数自动化读取,自动分析计算成形性能参数,并生成指定内容的成形分析报告。

### 参考文献

[1] 施红. 飞机空气导管安全性设计与泄漏探测技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

SHI Hong. Study on safety design and leakage detection technology of the aircraft pneumatic duct system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[2] 叶小奔. 数控弯管机工序动作及弯管截面质量研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.

YE Xiaoben. Research on the step action of NC pipe bender and the section quality of elbow [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.

[3] YANG H, LI H, ZHANG Z, et al. Advances and trends on tube bending forming technologies[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(1): 1-12.

[4] 张伟, 葛宇龙, 李晓星. 导管弯曲成形缺陷的定量分析及后处理方法 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24(4): 154-160.

ZHANG Wei, GE Yulong, LI Xiaoxing. Quantitative analysis and post processing method of bending defects of tube[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24(4): 154-160.

[5] 王萌. 飞机导管数控弯曲成形技术的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

WANG Meng. Digital agile manufacture technology of airplane tube[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

[6] FANG J, LU S, WANG K, et al. Three-dimensional finite element model of high strength 21-6-9 stainless steel tube in rotary draw bending and its application[J]. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, 2015, 22(2): 141-152.

[7] 蒋华兵, 詹梅, 杨合. 基于 ABAQUS 的数控弯管专用前处理模块开发 [J]. 航空工程进展, 2010(2): 184-189.

JIANG Huabing, ZHAN Mei, YANG He. Development of preprocess module of NC tube bending based on ABAQUS software using python[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2010(2): 184-189.

[8] 冯颖, 杨合, 陈德正, 等. 基于 ABAQUS/Python 的数控弯管专用后处理模块的拓展 [J]. 塑性工程学报, 2011, 18(2): 7-12.

FENG Ying, YANG He, CHEN Dezheng, et al. ABAQUS/Python based extension study on post-processing module of NC tube bending[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2011, 18(2): 7-12.

[9] 温馨, 刘俊, 肖龙飞, 等. 基于 ABAQUS 的弯管成形数值优化插件开发 [J]. 计算机辅助工程, 2015(6): 30-36.

WEN Xin, LIU Jun, XIAO Longfei, et al. Development of numerical optimization plug-in for bended tube forming based on ABAQUS[J]. Computer Aided Engineering, 2015(6): 30-36.

[10] 曾珊珊, 郑阿黎, 江勇. 工艺参数对管材绕弯成形的影响分析 [J]. 机械设计与制造, 2013(12): 213-216.

ZENG Shanqi, ZHENG Ali, JIANG Yong. The analysis for the influence of process parameters on rotary-draw tube bending forming[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(12): 213-216.

[11] GANTNER P, HARRISON D K, SILVA A K D, et al. The development of a simulation model and the determination of the die control data for the free-bending technique[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2007, 221(2): 163-171.

[12] 熊昊, 马燕楠, 周曙君, 等. 三维复杂轴线空心构件自由弯曲成形技术研究 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25(1): 100-110.

XIONG Hao, MA Yannan, ZHOU Shujun, et al. Free bending forming technology of three dimensional complex axis hollow component[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(1): 100-110.

通讯作者: 鲍益东, 博士、副教授, 研究方向为金属板料成形快速模拟程序开发、管材成形有限元仿真和复合材料成型工艺模拟, E-mail: baoyd@nuaa.edu.cn.

## Automatic Modeling and Post-Processing of Aviation Tube Bending Forming

FAN Shengbao<sup>1</sup>, BAO Yidong<sup>1</sup>, WANG Wen<sup>1</sup>, ZHAO Zhengda<sup>2</sup>, SHU Yang<sup>2</sup>, LUO Yun<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

**[ABSTRACT]** With the complication of the three-dimensional geometry of the aerial tube and the increasing requirements of the manufacturing precision, the application of the finite element analysis method to study the optimum bending process has become a universal choice. In this paper, the forming principle of typical tube bending forming process is studied, and the evaluation index of tube bending performance is analyzed. To improve the efficiency and reduce the difficulty of using the finite element analysis in the tube bending, the user defined interface of the bending tube forming based on the ABAQUS general finite element analysis software platform is developed by using the Python programming language. It provides both preprocessing and post-processing functions of the rotary draw bending and free tube bending. By analyzing the finite element analysis results of tube bending, it can automatically calculate the evaluation index of tube bending and produce the analysis report.

**Keywords:** Tube bending; Forming; Finite element simulation; Secondary development; Python

(责编 铃兰)

(上接第 58 页)

## Research and Development of Multi-Platform 3D Sheet Metal Laser Cutting Process Simulation System

CHEN Gengming, QIU Xiaoli, XING Yan

(College of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**[ABSTRACT]** For virtual simulation demand of three dimensional sheet metal pieces laser cutting and the shortcomings of the current laser cutting process simulation system, with gantry five-axis machine tools, vertical axis robot and upside-down six-axis robot cutting platform as sample, multi-platform three-dimensional sheet metal laser cutting process simulation system, including virtual machining scene 3D visualization, machine kinematics calculation based on site data, laser cutting technology and processing code output is developed. Configuring node sequence to realize virtual machining scene construction, based on Nurbs surface fitting, this paper realizes the mapping of the cutter site data with the shape of non-vertical sidewall cutting. Based on the cutter point data, the laser head pose matrix is solved, and the  $D-H$  motion coordinate system is established to realize the kinematics calculation of the machine tool and the simulation of machine tool motion. The process of cutting process is established, and the cutting process is realized, including the embodiment of cutting process defect, the detection and processing of interference collision, and the display of the transition trajectory between the cutting ring. Finally, corresponding reliable platform processing code is output.

**Keywords:** Laser cutting; Process simulation; 3D visualization; Kinematics calculation; Optimizing processing

(责编 文竹)