

引文格式: 韩志仁, 马志友, 车剑昭, 等. 基于CATIA/CAA 的数控弯管模具快速设计[J]. 航空制造技术, 2022, 65(19): 107-113.

HAN Zhiren, MA Zhiyou, CHE Jianzhao, et al. Rapid design of CNC tube bending die based on CATIA/CAA[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(19): 107-113.

## 基于 CATIA/CAA 的数控弯管模具快速设计\*

韩志仁<sup>1,2</sup>, 马志友<sup>1</sup>, 车剑昭<sup>3</sup>, 白 扬<sup>1</sup>, 杨文举<sup>3</sup>

(1. 沈阳航空航天大学, 沈阳 110136;

2. 沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 沈阳 110136;

3. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安 710089)

[摘要] 飞机制造中, 需要数控弯管模具弯制导管, 模具设计任务繁重。为提高数控弯管模具的设计效率, 解决弯管模具设计存在的问题, 依据传统设计人员的经验和数控弯管模具设计准则, 提出了零件之间存在的尺寸关联算法以及优化模具结构算法。基于 CATIA 开发出了相关的快速设计软件, 实现了数控弯管模具的参数化快速设计及标准件的快速装配。该软件的设计效率比传统设计方式提高了 20 倍左右, 为企业降低成本、提高效率提供了一种方法。

关键词: 模具设计; 二次开发; 参数化设计; 尺寸关联; CATIA

### Rapid Design of CNC Tube Bending Die Based on CATIA/CAA

HAN Zhiren<sup>1,2</sup>, MA Zhiyou<sup>1</sup>, CHE Jianzhao<sup>3</sup>, BAI Yang<sup>1</sup>, YANG Wenju<sup>3</sup>

(1. Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defence of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

3. AVIC Xi'an Aircraft Industrial Group Company Ltd., Xi'an 710089, China)

[ABSTRACT] In aircraft manufacturing, a pipe bending mold of computerized numerical control (CNC) is required to bend the pipe, and the mold design task is arduous. In order to improve the design efficiency of the CNC bending die, solve the problems existing in the design of the bending die, based on the experience of traditional designers and the design criteria of CNC pipe bending molds, an algorithm for dimensional association of parts and an algorithm for optimizing mold structure are proposed. Based on CATIA, the relevant rapid design software has been developed to realize the parameterized rapid design of CNC pipe bending molds and the rapid assembly of standard parts. Compared with traditional design methods, the design efficiency of the software is increased by about 20 times, which provides a way for enterprises to reduce costs and improve efficiency.

Keywords: Die design; Secondary development; Parametric design; Dimension association; CATIA

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.19.107

飞机导管零件分布在飞机的各个系统中, 主要包括液压、燃油、环控、供氧系统等<sup>[1]</sup>。在航空制造过程中, 大型企业主要利用数控弯管机弯制导管来提高生产效率。数控机弯制导管的过程中, 需要弯曲模、夹模、压模、防皱模、芯棒等模具。而弯管模具设计过程中, 不仅需

要考虑导管工艺性是否规范, 而且依赖设计人员的知识和经验。不同的设计人员操作会导致模具质量不稳定, 设计出的产品容易出现差异。由于飞机制造过程中需要大量的模具来弯制导管, 因此要求设计人员重复设计结构相似的弯管模具<sup>[2]</sup>, 费时费力, 消耗设计人员的精

\* 基金项目: 辽宁省自然科学基金(2019ZD0240); 国家自然科学基金(52001217)。

力,影响设计质量。

目前,国内的飞机制造企业使用CAD/CAM一体化设计制造技术,利用CATIA(Computer-graphics aided three-dimensional interactive application)强大的造型技术,在零件设计模块和虚拟装配基础上,实现数控弯管模具的数字化设计制造<sup>[3]</sup>。基于组件应用架构CAA(Component application architecture)二次开发的研究,宋波等<sup>[4]</sup>将飞机雷达罩成型模具分段设计,采用参数化方法,实现了成型模具的快速设计,提高了设计人员工作效率。刘明等<sup>[5]</sup>通过拾取构件的部分元素,开发出了发动机活塞模型的参数化设计软件,提高了模型的设计效率。

本文以减少时间成本,减轻设计人员工作压力,提高工装设计效率和设计质量稳定性为目标,基于CAA对CATIA软件进行二次开发,利用数字化设计与传统设计人员知识相结合的方式,实现弯管模具的参数化快速设计。

## 1 弯管模具结构及弯管工艺

数控弯管模具(图1)主要由弯曲模、夹模、压模、防皱模、芯棒组成。芯棒(图2)由芯杆、半芯杆、活动关节、整体关节、内形不带配合球面球头、内形带配合球面球头等组成。使用数控弯管机制作导管时,利用弯曲模和夹模将零件夹紧,并利用压模压住管件,采用绕弯的方式制作导管<sup>[6]</sup>。由于管件弯曲变形时,管件内侧容易出现褶皱,因此在内侧加装防皱模,防皱模工作型面与弯曲模型面配合滑动,另一型面与导管贴合,使内侧受力均匀可减少皱纹出现,提高管件弯曲成形质量。郭建军等<sup>[7]</sup>通过优化模具设计,控制防皱模和弯曲模切点距离,以及两模具贴合面的间隙来改善弯管褶皱。王玲等<sup>[8]</sup>发现,管材需要的弯曲长度较长时,可通过在管材内部加装芯棒对导管进行支撑,减少弯制后的管材横截面出现椭圆变形的畸变现象。吴青云等<sup>[9]</sup>研究发现,钣金件成形过程中普遍存在回弹现象,并详细阐述了数控弯曲回

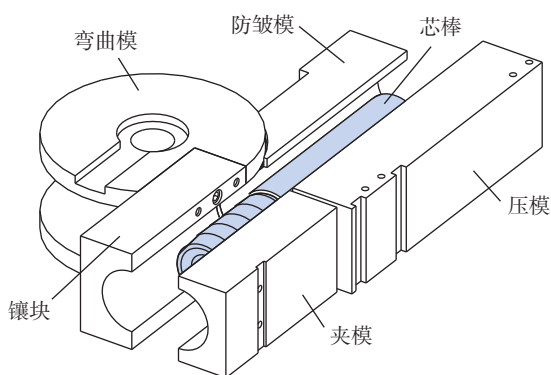


图1 组合式弯曲模  
Fig.1 Combined bending die

弹的规律,指出影响弯曲回弹的因素主要有弯曲角度、芯棒伸出量、芯棒的双面间隙值、管件和压模之间的摩擦系数等,其中回弹角随着弯曲角度、双面间隙值和管件与压模之间摩擦系数的增大而增大,随着芯棒伸出量的增大而减小。为解决回弹的影响,候海清<sup>[10]</sup>研究表明,每弯制一批导管都应测取回弹修正数据(比例回弹系数和固定回弹系数),通过参数化设计的模具,方便控制驱动参数为单一变量,快速设计出弯管模具,提高效率、节省时间。

## 2 传统弯管模具设计中存在的问题

### 2.1 模具组成方案的确定

数控弯管模具的组合方式依据导管的规格确定,而不同参数的导管需要的模具不同。判断组合类型主要依据两个因素:弯曲因子 $D'$ ( $D'$ =弯曲半径 $R$ /导管外径 $D$ )和壁厚因子 $F$ ( $F$ =导管外径 $D$ /壁厚 $t$ )。实际生产中,根据导管产品需求,计算 $D'$ 和 $F$ 因子,再通过查询模具结构方案表(表1),确定是否需要防皱模、芯棒、球头。从表1可知,有的弯管模具需要防皱模,有的需要芯棒和多个球头,需要无球头的柱形芯棒或不需要芯棒,因此弯管模具组合方式繁多,人工确定模具组合方案中可能存在诸多问题。

### 2.2 尺寸关联设计

在数控弯管模具的设计中,各个零件存在大量尺寸的关联,其中芯棒的活动关节和球头存在的尺寸关联最为紧密。人工设计芯棒时,需要反复查阅数据(表2)、约束设计草图尺寸和线条关系,非常烦琐,如图3所示(其中, $D$ 为球头型腔与倒角的距离; $E$ 为活动关节固定槽距离; $F$ 为球头型腔直径; $G$ 为对合关节底部直径; $H$ 为球头长度; $J$ 为球头左侧边与型腔中心的距离; $K$ 为关节底座高度; $M$ 为关节内型腔突出长度; $N$ 为垫圈卡槽长度; $N_1$ 为关节突出垫圈卡槽长度; $P$ 为球头外腔直径; $R$ 为倒圆角半径; $S$ 为键的宽度; $T$ 为键的高度; $Sd$

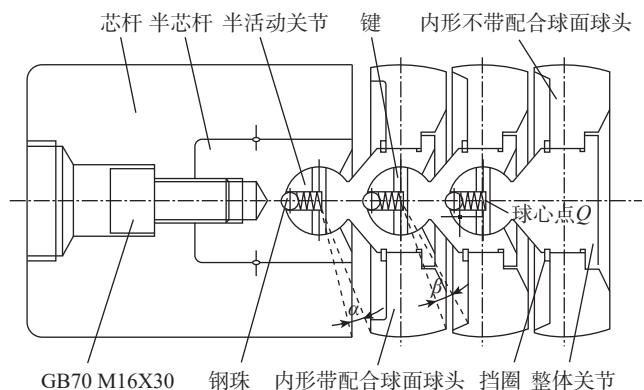


图2 芯棒结构  
Fig.2 Mandrel structure

表 1 模具结构方案  
Table 1 Mould structure scheme

壁厚因子 $F$	弯曲因子 $D'$							
	1	1.25	1.5	2	2.5	3	4	5
8~12	1Q	1Q	1Q	T	T	T	—	—
	+	+	—	—	—	—	—	—
13~17	2Q	1Q	1Q	1Q	T	T	—	—
	+	+	—	—	—	—	—	—
18~22	3Q	2Q	2Q	1Q	1Q	1Q	T	—
	+	+	+	—	—	—	—	—
...	...	...	...	...	...	...	...	...
	...	...	...	...	...	...	...	...
220~275	7Q	9Q	10Q	10Q	10Q	9Q	8Q	7Q
	+	+	+	+	+	+	+	+

注: Q 代表球头数量; T 代表需要无球头的柱形芯棒; “+” 代表此种导管需要防皱模; “—” 代表不需要此类模具。

表 2 芯棒尺寸  
Table 2 Mandrel size

芯棒的部分 设计尺寸	EL400RH 导管			VB300HP 导管			
	直径 127~152.4 mm	直径 101.6~127 mm	直径 88.9~101.6 mm	直径 76.2~88.9 mm	直径 63.5~76.2 mm	直径 50.8~63.5 mm	直径 44.45~50.8 mm
活动关节中心与 倒角之间的距离 $A$	12	10.2	9	7.8	7.3	7	5.5
球头型腔间距 $B$	34	30	26	23	21	19	16
活动关节与球头 咬合处距离 $C$	43.5	38	33	28.7	26.5	24	20
...	...	...	...	...	...	...	...
键长度 $U$	24	22.2	20	17.6	16.6	16	13

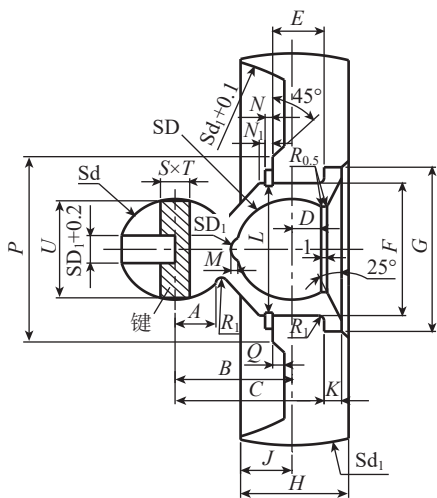


图 3 分半式活动关节和内形带配合球面球头组合图  
Fig.3 Combination diagram of split movable joint and inner belt with spherical ball head

为关节球直径;  $Sd_1$  为球头直径;  $SD$  为关节内型腔直径;  $SD_1$  为关节内型腔突出直径)。因此快速确定数控弯管模具中的尺寸关联、草图约束可以减轻设计人员工作量,减少错误,提高设计效率。

### 2.3 优化球头结构

导管弯曲过程中,球头与芯棒容易发生碰撞干涉。为避免碰撞干涉,需要反复调整干涉处尺寸。传统工装设计中,设计人员通过 AutoCAD 软件旋转球头的设计图(图 4),使球头刚好达到干涉状态下,即球头和芯棒发生接触,内形带配合球面球头和内形不带配合球面球头发生接触时,判断球心点  $b$  和点  $c$  是否在弯曲导管中轴线构成的圆  $D(x)$  内。若在圆内,则无须优化。反之则需增大芯杆倒角值和球头  $d_2$  值,直至球心点  $b$  和点  $c$  在圆  $D(x)$  内。如此反复修改干涉尺寸费时费力,因此需要便捷、智能的优化方式。

### 3 基于 CAA 解决数控模具设计中的问题

#### 3.1 数控弯管模快速建模设计流程

将设计人员的知识经验总结,确定模具设计规则,计算出弯曲因子  $D'$  和壁厚因子  $F$ ,通过 CATIA 读取 Excel 机制,获取 Part 或 Product 节点,查询得到

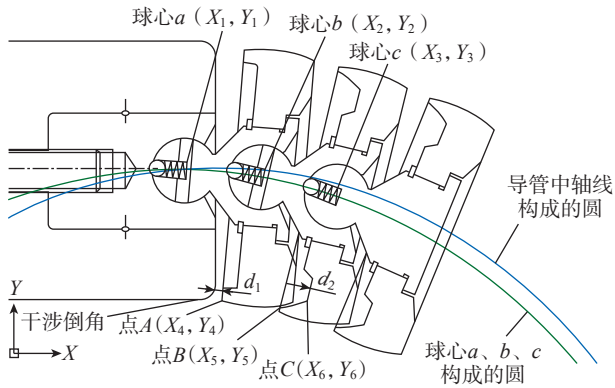


图 4 芯棒弯曲图

Fig.4 Mandrel bending diagram

CATDocument 接口,通过该容器获得 CATIPrtContainer 接口,再转换到知识工程模块调用该模块的 Create DesignTable 函数,创建设计表,并创建 Sheet 对象。最终通过 Cell 方法循环遍历读取表 1 中数据,确定模具组合方式。至此通过将  $F$  和  $D'$  因子作为参数,利用 CAA 函数确定了防皱模和芯棒球头数量,实现了模具组合方式的快速确定。

模具组合方式确定后,通过导管外径确定机床型号,即可确定模具设计尺寸。然后确定弯曲模结构,即可开始参数化建立弯曲模、镶块、夹模、压模、防皱模等。再读取表 2 获取芯棒设计尺寸,开始参数化建模,最后装配销钉、螺钉等标准件。软件设计流程如图 5 所示。

#### 3.2 尺寸关联的参数化建模

数控弯管模具主要特征相似,模具型面均与导管相关。弯管模具中最为复杂的设计在于芯棒,而芯棒中组件的尺寸均与导管内径相关(图 3)。因此通过导管直径和机床型号,可以确定模具主要特征尺寸。通过将尺寸参数化,可以实现数控弯管模具的参数化建

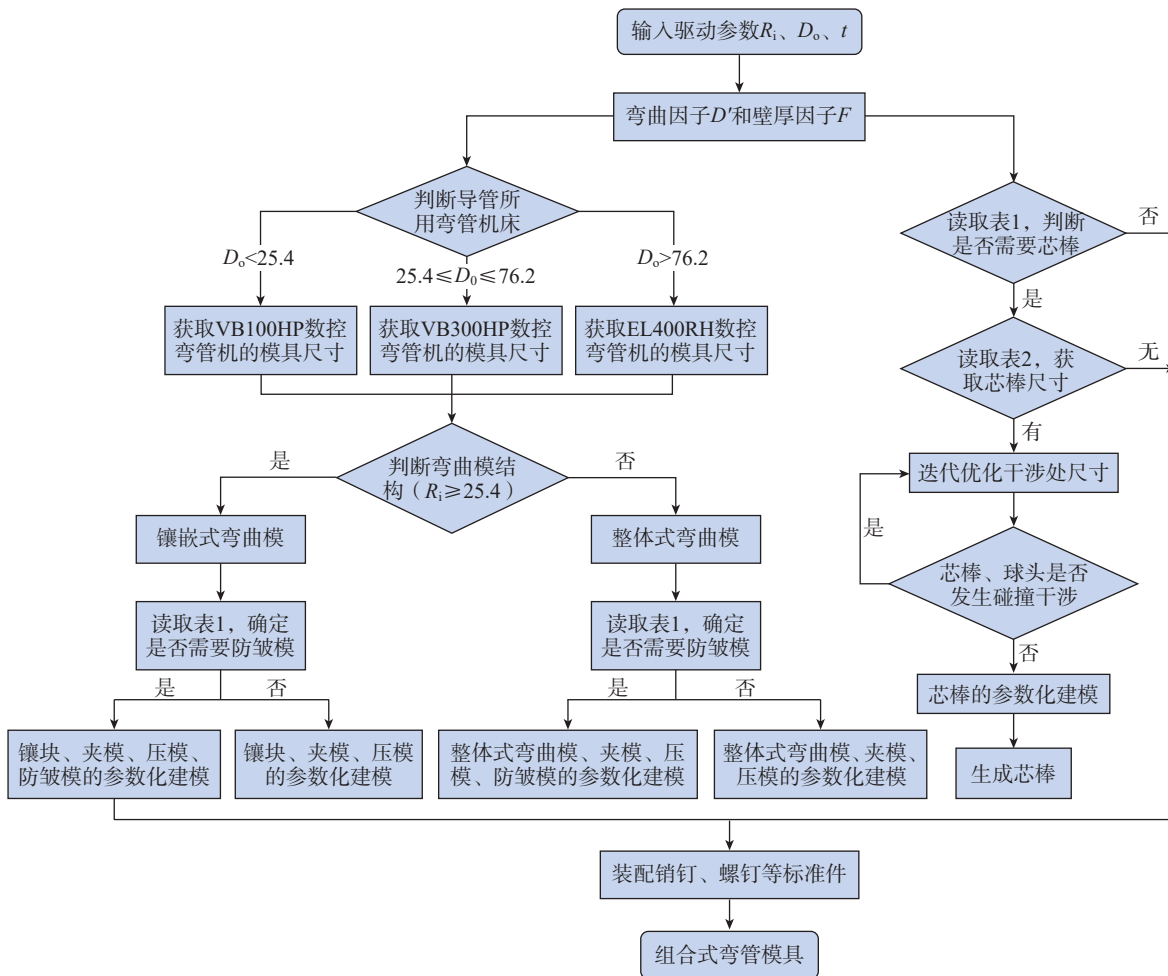


图 5 软件设计流程图

Fig.5 Software design flow chart

模(图6)。参数化设计过程中,定义模具尺寸变量均为 Double 类型,如镶块截面长度值为 Ske\_length,夹模截面宽度值为 Pad\_highh。部分关联尺寸如表3所示。通过 CATDocumentServices 接口中 New 方法创建 Product 或 Part,获取该 Part 结构容器。在结构容器中,可以获得 CATIA 中各个功能模块的接口。在零件容器接口下,进入草图,利用 CreateLine、CreateCircle、CreateCorner 等函数绘制草图。在零件设计接口下,通过 CreatePad、CreatePocket 等函数创建模具实体。最后在实体上通过算法避让干涉特征,确定凹槽、孔位等非关联特征。由于芯棒是旋转体,绘制尺寸关联的草图后可以通过 CreateShaft 方法旋转得到芯棒实体。

### 3.3 迭代算法优化球头结构

导管在弯曲过程中,为避免球头和芯棒、球头和球头之间发生碰撞干涉,可以利用迭代算法优化干涉处圆角半径和球头  $d_2$  尺寸。由于需要参数化设计,因此迭代时需要考虑关联尺寸的变化。

芯棒未发生弯曲时,通过表2可知,获得球头外径尺寸,推算出芯棒发生弯曲前点 A 坐标( $X_{40}, Y_{40}$ )。当芯棒发生弯曲时(图4),点 A 坐标为( $X_4, Y_4$ )。可计算出内形不带配合球面球头所能弯曲的最大角度  $\alpha$ 。故可确定弯曲后的球心 b 坐标( $X_2, Y_2$ ),比较该球心坐标是否在导管弯曲中轴线构成的圆  $D(x)$  内。当球心 b 在圆  $D(x)$  外,芯杆和球头发生干涉。芯杆圆角半径增

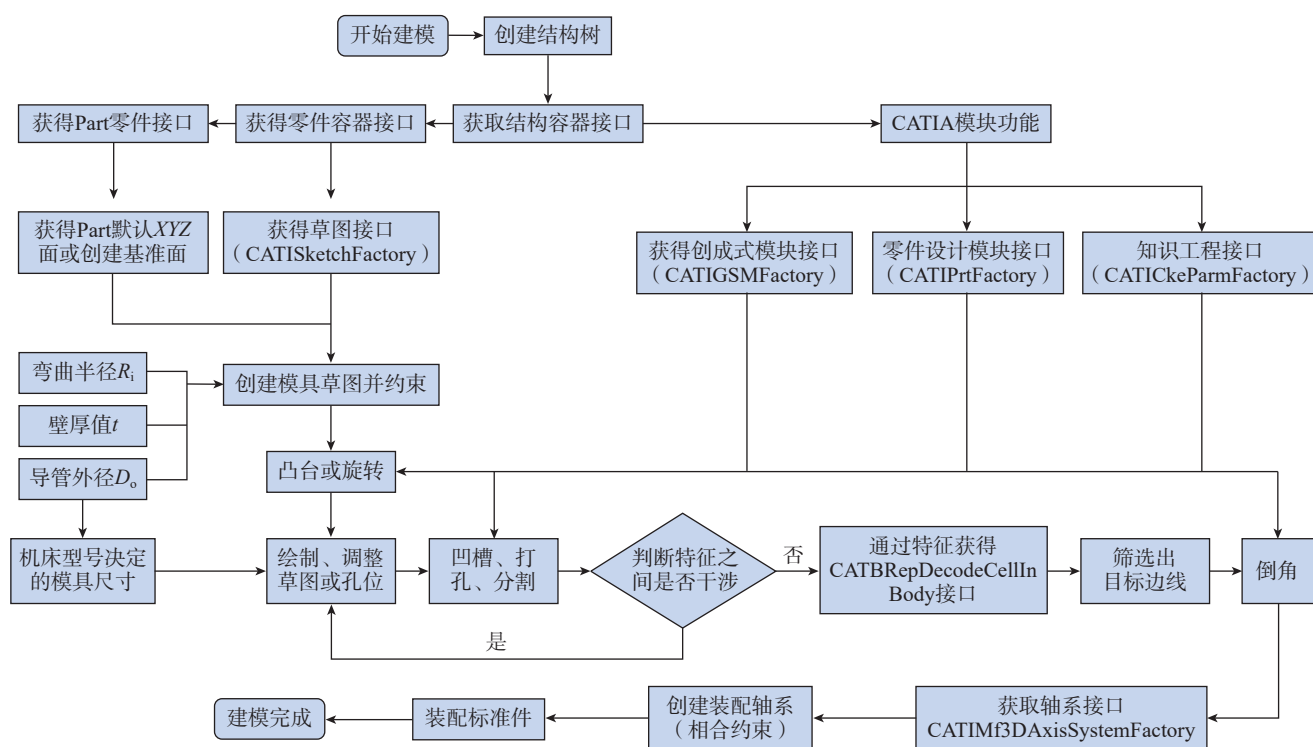


图6 参数化建模

Fig.6 Principles of parametric modeling

表3 尺寸关联的变量列表

Table 3 List of variables associated with dimensions

组件尺寸	弯曲模	镶块	夹模	压模	防皱模
型面直径	$D_o$	$D_o \sim 0.8 \text{ mm}$	$D_o \sim 0.8 \text{ mm}$	$D_o \sim 0.8 \text{ mm}$	$D_o \sim 0.8 \text{ mm}$
截面长度值	$R_i$	Ske_length	Ske_length	Ske_length	Ske_length-5
截面宽度值	Ske_length	$D_o$	Pad_highh	Pad_highh	$D_o$ 取整
模具长度值	—	$3 \times D_o$	$3 \times D_o$	$4 \times R_i$	$R_i + 80$
凹槽、孔位	与数控机床相关				

加 0.01 mm, 此时芯杆圆角处圆的方程为  $G(x)$ , 球头干涉点所在直线方程为  $F(x)$ 。通过  $H(x)=G(x)-F(x)$ , 计算临界状态下点  $A$  坐标  $(X_4, Y_4)$  和球心  $b(X_2, Y_2)$ 。再判断球心  $b$  是否在圆  $D(x)$  内, 直至符合弯曲要求。

$$\alpha = \arccos\left(\frac{(X_4 - X_0) / \sqrt{(X_{40} - X_0)^2 + (Y_{40} - Y_0)^2}}{\arccos\left(\frac{(X_{40} - X_0) / \sqrt{(X_{40} - X_0)^2 + (Y_{40} - Y_0)^2}}{\right)}\right) \quad (1)$$

$$D(x) = R_1 + \sqrt{(R_1^2 - (X - V)^2)} \quad (2)$$

$$G(x) = Sd_1 - R_2^2 + \sqrt{(R_2^2 - (X - V + R_2)^2)} \quad (3)$$

$$F(x) = X / \tan(\alpha) + (C - (C - B + J)) + V / \tan \alpha \quad (4)$$

内形不带配合球面球头和内形带配合球面球头干涉中, 分别计算出未弯曲时, 干涉点  $B(X_5, Y_5)$  坐标和干涉点  $C(X_6, Y_6)$  坐标。通过这两个点可确定内形带配合球面球头所能弯曲的最大角度  $\beta$ 。通过角度  $\beta$  确定弯曲后的球心点  $c(X_3, Y_3)$ 。比较弯曲后的球心点  $c$  是否在圆  $D(x)$  内。球心点  $c$  在圆外, 即两个球头会发生干涉。通过球头  $d_2$  增加 0.01 mm, 再重新计算干涉点  $B, C$ , 直至旋转后的球心点  $c$  在圆  $D(x)$  内, 此时的尺寸才满足弯曲要求。上述优化芯棒结构尺寸逻辑如图 7 所示。

$$\beta = \arccos\left(\frac{(H - J) / \sqrt{(X_5 - X_2)^2 + (Y_5 - Y_2)^2}}{\arccos\left(\frac{(C - E + Q) / \sqrt{(X_6 - X_2)^2 + (Y_6 - Y_2)^2}}{\right)}\right) \quad (5)$$

#### 4 数控弯管模具参数化快速设计的应用

基于 CAA 开发出了数控弯管模具参数化快速设计

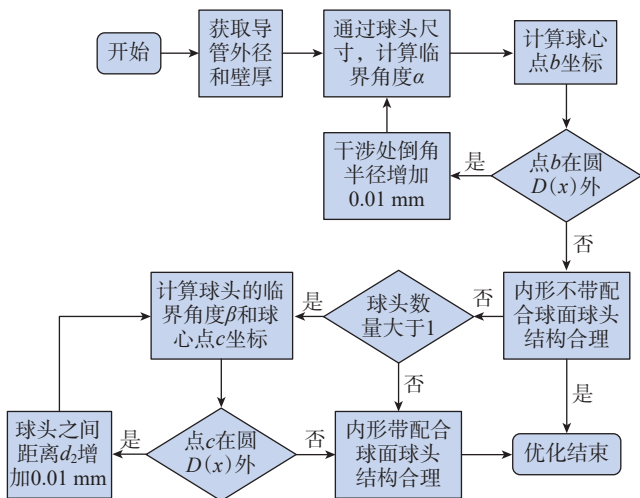


图 7 芯棒结构优化算法流程图

Fig.7 Flow chart of mandrel structure optimization algorithm

软件。操作步骤如下。

(1) 进入导管参数输入模块(图 8), 输入管件的 3 个驱动参数, 如弯曲半径为 300 mm, 导管外径为 100 mm, 壁厚值为 2 mm。程序进行导管工艺性审查, 若弯曲因子、壁厚因子不在表 1 范围内或导管外径不在表 2 范围内, 则输入参数不合理, 程序将弹窗提示用户修改参数。参数输入合理, 则软件读取表 1 和表 2, 确定模具组成结构和获取芯棒尺寸。通过导管外径确定数控弯管机型号, 数控弯管机型号决定模具其他设计尺寸。上述输入的驱动参数的模具组成为镶嵌式弯曲模、镶块、夹模、压模、防皱模、芯棒, 球头数量为 3 个。数控机床型号为 EL400RH, 获取该机床对应的模具设计尺寸。

(2) 进入模具设计模块(图 9), 该对话框将第 1 步确定的模具组成方案信息, 放在上方的弯管模具组成信息控件中, 便于用户了解模具结构。下方缺省参数框内放入第 1 步获得的部分尺寸、缺省参数, 并支持修改。确认缺省参数框中的参数符合要求后点击预览按钮, 程序自动生成规范模型结构树和模具, 若缺省参数填写不合理, 程序会弹窗提示参数输入存在设计问题, 用户修改参数

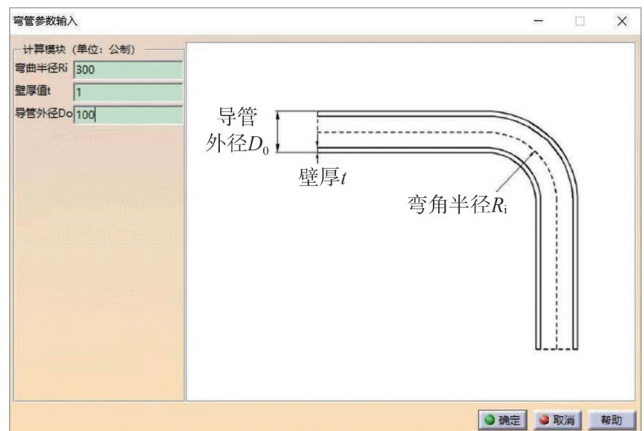


图 8 导管参数输入模块

Fig.8 Tube parameter input module

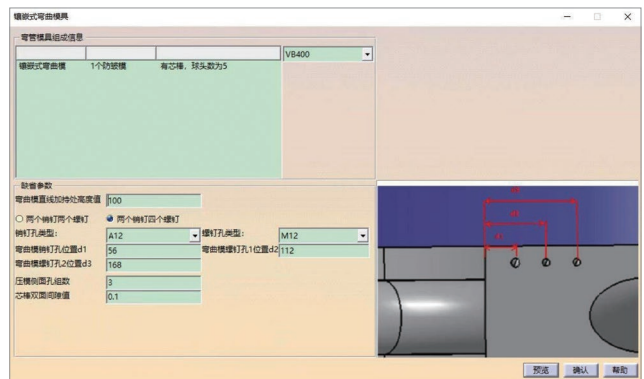


图 9 模具设计模块

Fig.9 Mold design module

后再次点击预览即可重新生成模具。上述输入的驱动参数无须修改缺省参数,点击预览则会生成模具。

(3) 进入装配模块(图10),参考控件中的提示信息,依次点击对话框中导入标准件按钮,软件将导入目标文件夹下的标准件,再点击自动装配按钮,程序将通过轴系相约束装配标准件。本组参数生成的模具为镶嵌式弯曲模具,需要导入销钉、螺钉。同时该模具具有芯棒和球头,需要导入键、弹簧、钢珠、挡圈。最后点击装配按钮完成模具标准件的装配,结果如图11所示。

## 5 结论

针对数控弯管模具传统设计方法中存在的复杂、烦琐问题,提出了基于CATIA/CAA的数控弯管模具快速设计方案,在VC++中编写代码,开发了数控弯管模具快速设计软件。该软件在保证工装设计质量的前提下,实现了数控弯管模具的快速参数化建模、结构优化以及标准件的快速装配。通过该软件设计数控弯管模具需要8 min,设计人员调整处理40 min。与传统工装设计耗费13~20 h相比,设计效率提高了20倍左右,有效地节省了时间,缩短了模具设计制造周期,为参数化模具设计提供了参考方案。

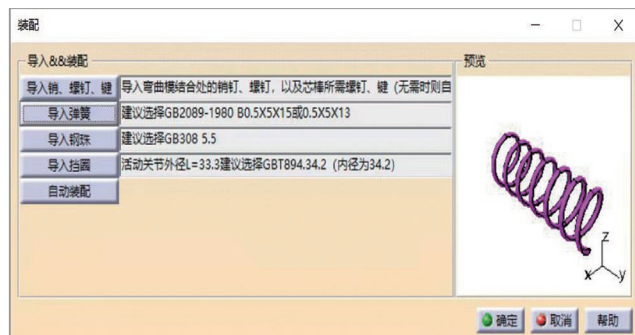


图10 装配模块  
Fig.10 Assembly module

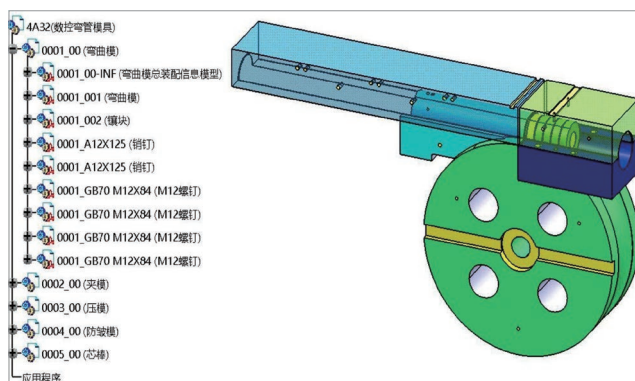


图11 装配后的组合式弯管模具  
Fig.11 Assembled combined bending die

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 舒送, 阚艳, 程宗辉, 等. 航修模式下的导管数字化制造框架设计研究[J]. 机械设计与制造, 2015(2): 233-237.  
SHU Song, KAN Yan, CHENG Zonghui, et al. Research on the framework design of the tube digital manufacturing based on aviation repairing mode[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(2): 233-237.
- [3] 韩志仁, 梁文馨, 刘宝明, 等. 飞机导管工艺性审查技术研究[J]. 机械设计与制造, 2015(7): 261-263, 267.  
HAN Zhiren, LIANG Wenxin, LIU Baoming, et al. Research on the examination technology for aircraft tube manufacturability[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(7): 261-263, 267.
- [4] 宋波, 安鲁陵, 郭保腾, 等. 分段铸造式飞机雷达罩成型模具的参数化设计[J]. 航空制造技术, 2018, 61(1): 93-97.  
SONG Bo, AN Luling, GUO Baoteng, et al. Parameterized design about forming die of aircraft radome of paragraphing and casting way[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(1): 93-97.
- [5] 刘明, 郝博, 刘滕. 基于CATIA二次开发的发动机活塞参数化设计[J]. 成组技术与生产现代化, 2016, 33(2): 6-10, 53.  
LIU Ming, HAO Bo, LIU Teng. Parametric design for engine piston based on secondary development of CATIA[J]. Group Technology & Production Modernization, 2016, 33(2): 6-10, 53.
- [6] 马春敏, 康存锋, 黄旭东, 等. 数控弯管机加工工艺规划的研究[J]. 制造技术与机床, 2009(1): 21-24.  
MA Chunmin, KANG Cunfeng, HUANG Xudong, et al. Research on the process technical layout of NC pipe bending machine[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2009(1): 21-24.
- [7] 郭建军, 杨立乐, 戴钦, 等. 薄壁弯管成形工艺分析及弯管模设计[J]. 模具工业, 2021, 47(3): 18-21.  
GUO Jianjun, YANG Lile, DAI Qin, et al. Analysis on forming process of thin-walled bend tube and the bending die design[J]. Die & Mould Industry, 2021, 47(3): 18-21.
- [8] 王玲, 付冬雪. 数字化导管加工与常规导管加工对比浅析[J]. 航空制造技术, 2012, 55(16): 84-86, 93.  
WANG Ling, FU Dongxue. Analysis on comparison of digital tube manufacturing with conventional tube manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(16): 84-86, 93.
- [9] 吴青云, 顾彬, 李淑慧. 小直径LF6铝合金管数控弯曲回弹规律[J]. 塑性工程学报, 2015, 22(5): 63-68.  
WU Qingyun, GU Bin, LI Shuhui. Springback laws of small diameter LF6 aluminum alloy tube in NC bending[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22(5): 63-68.
- [10] 侯清海. 数字化弯管系统及关键技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.  
HOU Qinghai. Research on digital pipe bending system and key technology[D]. Xi'an: Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006.

通讯作者: 韩志仁, 教授, 博士, 研究方向为钣金成形 CAE 和飞机数字化制造技术。

(责编 七七)