

引文格式: 宋朝阳, 吴建军, 吴为, 等. 空间管件自由弯曲成形工艺策略研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(3): 62-74.

SONG Chaoyang, WU Jianjun, WU Wei, et al. Research on acquisition strategy of space tube forming process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(3): 62-74.

空间管件自由弯曲成形工艺策略研究*

宋朝阳¹, 吴建军¹, 吴为², 徐鑫良², 刘龙¹, 喻忠平¹

(1. 西北工业大学, 西安 710072;

2. 中国航空制造技术院, 北京 100024)

[摘要] 基于空间管件自由弯曲成形原理, 将成形管件划分为稳定段和过渡段部分, 并分别对两部分进行成形工艺分析, 以获得空间管件自由弯曲成形工艺策略。针对稳定段, 分析了空间螺旋管的底圆半径和螺距与弯曲模偏移量和夹钳扭转速度之间的映射关系, 并使用 BP 神经网络对空间螺旋管的成形工艺参数进行了预测, 通过测试发现弯曲模偏移量的预测值与数值仿真试验的最大相对误差为 1.08%, 夹钳扭转速度的预测值与数值仿真试验的最大相对误差为 3.4%; 针对过渡段, 采用正交设计试验研究了空间管件成形过渡时的弯曲模偏移量和夹钳扭转的加载模式对管件成形的影响, 得到过渡段弯曲模和夹钳扭转的加载时间为 0.9 s。结合以上分析, 建立了基于一次等效逼近、二次优化的管件自由弯曲成形工艺获取策略, 并通过实例成形验证其可行性和有效性。

关键词: 管件成形; 工艺参数预测; 工艺规划; 自由弯曲; 工艺知识

Research on Acquisition Strategy of Space Tube Forming Process

SONG Chaoyang¹, WU Jianjun¹, WU Wei², XU Xinliang², LIU Long¹, YU Zhongping¹

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] Based on the free bending forming principle of spatial tube fittings, the formed tube fittings are divided into stable section and transition section, and the forming process of the two sections are analyzed respectively to obtain the free bending forming process strategy of spatial tube fittings. For the stable section, the mapping relationship between the bottom circle radius and pitch of the space spiral tube and the bending die offset and the clamp torsion speed is analyzed, and the forming process parameters of the space spiral tube are predicted by BP neural network. Through the test, it is found that the maximum relative error between the predicted value of the bending die offset and the numerical simulation test is 1.08%, and the maximum relative error between the predicted value of the clamp torsion speed and the numerical simulation test is 3.4%; For the transition section, the effects of the bending die offset and the loading mode of clamp torsion on the forming of spatial tube fittings are studied by orthogonal design experiment. It is obtained that the loading time of bending die and clamp in the transition section is 0.9 s. Combined with the above analysis, the acquisition strategy of tube free bending process based on primary equivalent approximation and secondary optimization is established, and its feasibility and effectiveness are verified by an example.

Keywords: Tube fittings forming; Process parameter prediction; Process planning; Free bending; Process knowledge

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.03.062

* 基金项目: 基础加强计划重点基础研究项目(173计划)(2020-JCJQ-ZD-188-01); 陕西省重点研发计划(2020ZDLY01-05)。

空间管件因易于满足轻质量、低能耗、高强度、高精度和高效率等方面的要求,广泛应用于大型客机、航空发动机和宇宙飞船等复杂工业装备中,用来实现油气输送或机构运动控制等功能^[1]。

尚琪等^[2]通过虚拟试验分析了工艺参数对管件成形过渡区曲率半径波动的影响,得出管件成形过渡区随着进给速度的加快而减小;随着弯曲模弯曲速度的加倍增加,进给速度的增大会使管件过渡区曲率波动幅度增大,同时波动区长度区间减小;扭转速度的增加会使管件过渡区曲率波动幅度逐渐变小,而波动区的长度区间几乎不变。王永安等^[3]把优化目标确定为管件的壁厚减薄率和截面畸变率,应用贝叶斯理论,求解了成形质量指标参数的正态分布特性,利用多目标决策理论得到多目标优化后的最优妥协解,得到质量评价参数的可信域,最终通过反向神经网络得到满足管件成形质量要求的工艺参数的优化区间。李海峰等^[4]利用薄壁管弯曲质量标准、有限元模拟结果和试验结果等大量数据,汇编了薄壁管领域的专业知识,研究开发了基于数据库技术的薄壁管数控弯曲知识库系统,结果表明,该系统可以指导实际的数控弯管制造过程,并为操作者和专家提供快速有效的建议。Guo等^[5]通过铝合金 AA6061-T6 管材的弯曲试验,建立了偏移量-成形半径($U-R$)关系来预测管件的成形,该预测方法对粉末硬化铝合金圆管具有良好的适用性。Engel等^[6-7]针对三辊轮推弯成形过程进行研究,通过试验结果对管件轴线曲率进行分析,并且针对成形过渡区的曲率分布表现出来的振荡现象,提出了优化方法,即通过改变模具的运动轨迹来减小过渡段长度;通过试验验证对比,过渡段长度减小后,曲率振荡区域也相应减小,整段管件轴线的曲率分布更加均匀;并且通过样条插值法来确定样条曲线的半径分布,转换为数控弯曲机的加工工艺参数,提出一种补偿校正模型,将初步计算的加工工艺参数通过迭代的方法校正至与目标轮廓外形非常相似的最优工艺参数。

Zhang^[8-9]和Wu^[10-11]等研究了弯曲半径、扭转角、残余弯曲半径和残余扭转角之间的联系,提出了管件成形过渡区的几何描述方法,并在此基础上建立了过渡区几何特征参数集与工艺参数集的映射关系;基于Frenet标架的空间管件拼接逼近技术完成了从目标形状到工艺模型的转换方案,建立了一种预测工艺参数并对其进行补偿的新策略:B&T技术,并进行常见空间管件的成形验证,显著降低回弹误差,对工艺参数的优化以及工艺决策方案的制定有一定的指导作用。

现阶段管件成形侧重于工艺参数的精确化控制和补偿修正,为了实现管件成形的智能制造,有必要建立

管件成形工艺的知识表示方法,进而构建管件成形工艺知识库。并基于管件成形工艺知识库,建立合理有效的工艺获取策略。

1 管件自由弯曲成形原理

典型的管件自由弯曲成形装置如图1所示,由弯曲模、固定模、夹钳等零部件组成。将固定模固定在机架上,管件毛坯由夹钳加持横穿固定模从弯曲模中穿出去,夹钳可以沿 Z 轴移动,也可以绕 Z 轴转动。在进行管件自由弯曲成形时,弯曲模相对于固定模发生移动和转动,强制管件毛坯发生塑性弯曲变形,夹钳夹持着管件毛坯沿 Z 轴方向移动,同时绕 Z 轴转动,使弯曲过程中的弯曲平面不断发生变化,最终成形出空间管件。

在初始状态时,弯曲模通常位于 OZ 轴上。成形过程开始时,弯曲模要从原始位置加载至目标位置,此时管件曲率半径是不断变化的,可视为不稳定弯曲状态。弯曲模到达目标位置后保持静止,此时管件的弯曲半径稳定,可视为稳定弯曲状态。在弯曲即将结束时,弯曲模从目标位置回到原始位置,此时管件曲率半径处于不断变化的过程中,也可视为不稳定弯曲状态。因此,由图1成形装置所加工的空间管件在几何外形上会表现出稳定区与不稳定区相间的特征(图2)。

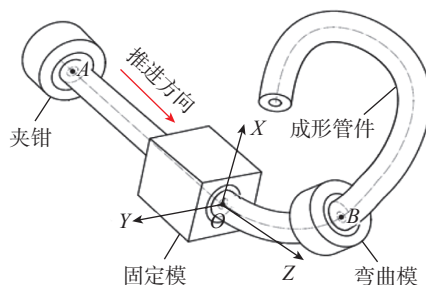


图1 管件自由弯曲成形装置原理图

Fig.1 Schematic diagram of the bending and twisting forming device for tube fittings

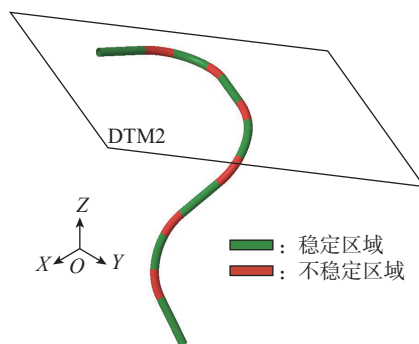


图2 自由弯曲成形装置中成形管件的几何特征

Fig.2 Geometric characteristics of formed tube fittings in bending and twisting forming device

在空间几何的基本理论中,空间曲线的几何描述如图3所示。一般情况下,可以用曲线上某一点处的单位切矢 $t(s)$ 、单位主法矢 $n(s)$ 和单位副法矢 $b(s)$ 来表示该点的活动坐标系,也被称为坐标系,而曲线的 Frenet 标架同样是由 $t(s)$ 、 $n(s)$ 和 $b(s)$ 构成的三脚架来建立。

设 $r=r(s)$ 为曲线的自然参数方程,则曲线上某一点处的切矢 $t(s)$ 、主法矢 $n(s)$ 和副法矢 $b(s)$ 之间的关系如式(1)所示。

$$\begin{cases} t(s) = \dot{r}(s) \\ \dot{t}(s) = k(s) \times n(s) \\ b(s) = t(s) \times n(s) \\ \dot{b}(s) = -\tau(s) \times n(s) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $k(s)$ 和 $\tau(s)$ 表示曲线上一点处的曲率和挠率。 $k(s)$ 和 $\tau(s)$ 可以由式(2)计算得到。

$$\begin{aligned} k(s) &= \frac{|\dot{r}(s) \times \ddot{r}(s)|}{|\dot{r}(s)|^3} \\ \tau(s) &= \frac{[\dot{r}(s), \ddot{r}(s), \dddot{r}(s)]}{|\dot{r}(s) \times \ddot{r}(s)|^2} \end{aligned} \quad (2)$$

对空间管来说,轴线上某点的曲率和挠率可以反映空间管在该点处的弯曲和扭转情况。当管件发生回弹时,管材内部应力被释放,所有的管件单元的曲率和挠率都会出现减小的趋势。需要注意的是,这种分析方法只可以在挠率和曲率同时发生的特定条件下使用。如果用 $1/\rho$ 和 θ 分别表示空间管的单位长度弯曲角和单位长度扭转角,则其与轴线的曲率和挠率的关系可由式(3)表示。

$$\begin{cases} 1/\rho = k \\ \theta = \tau \end{cases} \quad (3)$$

螺旋线逼近法如图4所示。在两段相邻螺旋线单元 S_j 的交接点 p_i 处的切线向量 t_i 、主法向量 n_i 和副法向量 b_i 组成的局部坐标系 (LCS_{*i*}) 方向重合。经过简单的几何计算,便可以得到弯曲变形和扭转变形的螺旋单元中各段空间曲线的曲率和挠率。

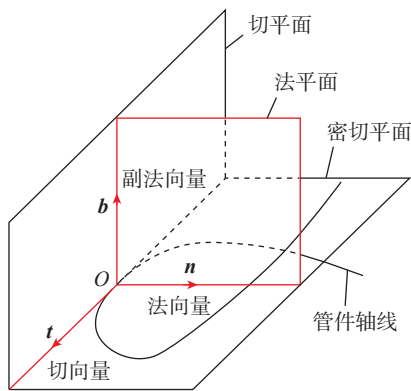


图3 空间曲线的几何描述
Fig.3 Geometric description of space curves

决定螺旋线的三要素是底圆半径、螺距、旋向。底圆半径和曲率之间存在非线性关系,而挠率和螺距之间存在非线性关系。选择逼近方法的主要原则是尽可能保证提取挠率的准确性,而螺旋逼近法相较于圆弧逼近法,其特点是变形均匀。因此,在空间管件成形分析过程中,本文采用螺旋逼近法来提取空间曲线的变形参数。

2 空间管件成形工艺知识表示

2.1 空间管件的轴线特征变化机制及成形工艺分析

空间管件稳态单元可以用简单函数直接表示,轴线的挠率和曲率可通过计算得到。稳态单元是在工艺参数确定情况下可以准确成形的管件单元。对于空间管件自由弯曲成形工艺来说,稳态单元主要由3类组成。

(1) 直线单元。弯曲模停留于初始位置,夹钳保持匀速直线运动,送进过程中夹钳可以匀速转动也可以不转动,形成的直线单元表现形式如图5(a)所示。

(2) 圆弧单元。弯曲模停留于目标位置,夹钳保持匀速直线运动且不发生转动,可以成形出半径稳定的圆弧单元,其表现形态如图5(b)所示。

(3) 螺旋单元。弯曲模停留于目标位置,夹钳保持匀速直线运动和匀速旋转运动,可以成形出底圆半径及螺距稳定的螺旋单元,其表现形态如图5(c)所示。

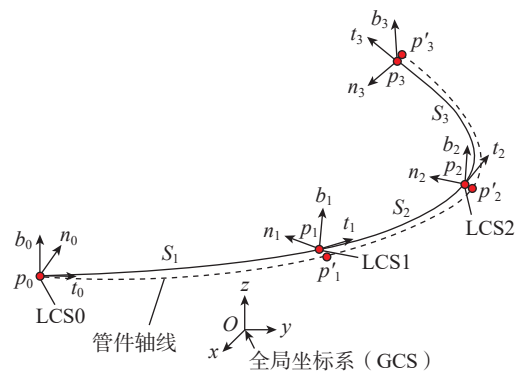


图4 空间曲线的螺旋线逼近法
Fig.4 Helix approximation method of space curve

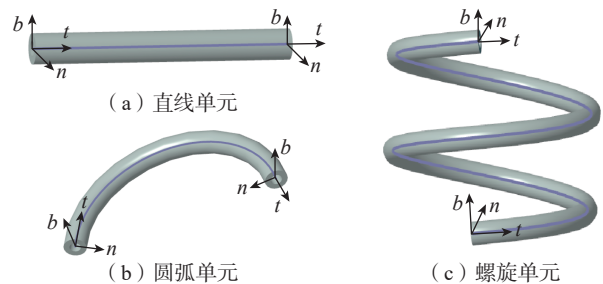


图5 空间管件几何特征
Fig.5 Geometry features of space tube fittings

对于空间管件自由弯曲成形工艺而言,任意管型都应该简化为由稳态单元(稳定段)和非稳态的过渡单元(过渡段)所组成的管型结构。不同类型的稳态单元在相互连接处,会表现出不同的过渡特征。而不同的过渡特征又会影响成形工艺参数,进而影响管件最终的成形质量。

通过空间管件成形几何特征分析,工艺参数(夹钳推进速度、模具偏移量、模具旋转角度、夹钳扭转速度等)保持稳定时就能得到成形稳定段,稳定段与工艺参数的稳定值是一一对应的关系,而工艺参数的每次变化都会产生过渡段。成形单元与工艺参数变化模块之间存在一一对应关系,如图6所示。显然,过渡段弯曲模具变化的速度、加速度和时间长度都会影响最终的管件成形。

空间管件单元的几何特征参数模块如图6(a)所示,每一个点代表一个稳定段的几何特征参数,而由一个初始点到另一个点的变化轨迹则代表两个稳定段之间的过渡段。空间成形管件的稳定段和过渡段单元所

对应的工艺参数模块如图6(b)所示,其中每一个点代表一个稳定段的工艺参数,当其他工艺参数不变的情况下,弯曲模偏移量和夹钳扭转速度的变化轨迹则代表过渡段所对应的工艺参数。

2.2 空间复杂管件成形工艺知识表示方法

针对空间管件自由弯曲成形工艺,管件数据包括管件编码、管件长度、管件厚度、管件直径、曲率、挠率以及轴线几何特征等数据;管件自由弯曲成形工艺参数有成形试验编码、弯曲模偏移量、弯曲角度和加载模式(包括线性与非线性)、夹钳扭转速度和加载模式、夹钳推进时间和速度。从需要获取内容来看,所需要获取的只是管件轴线的几何特征参数,所关联的属性包括了管件的物料信息和工艺参数信息。知识数据的组成结构由管件信息、工艺参数信息和几何特征信息组成,并以独立的个体存储。其详细表达如图7所示。

3 基于一次等效逼近、二次优化的初始工艺参数获取

空间管件初始工艺参数的获取:通过虚拟试验或真实试验可以建立能够描述管件稳定区和过渡区单元几何特性的空间管件几何特性知识库,该知识库包括稳定段成形时和过渡段成形时几何特征等效的工艺参数。

在进行一次等效逼近时,在空间管件成形知识库中用已知所有几何特征信息的稳定段单元,通过Frenet标架逼近目标空间螺旋管件。首先,使目标管件轴线的起始点与选用的第1条螺旋线(a_1, b_1)的起始点的坐标及Frenet标架一致,则该段螺旋线的终点坐标及Frenet标架便可由自身的 a_1 和 b_1 以及弧长 s_1 计算出。对于第2段螺旋线(a_2, b_2),其起点坐标与第一段螺旋线的终点坐标和Frenet标架一致。需要通过第1段螺旋线的计算结果,对第2段螺旋线的计算结果进行坐标变换。重复以上过程,得到完整的螺旋逼近空间管件轴线,并得到各段稳定区螺旋线对应的弯曲模偏移量和夹钳扭转速度。

二次优化则基于得到的稳定段几何特征检索对应的过渡区变化时间,进而再确定稳定段的推进时间。最终可以获得空间管件的初始工艺参数,以及确定出各单元的时间节点,如图8所示。

4 空间管件成形工艺知识的应用

4.1 管件自由弯曲成形有限元分析

研究过程中,以截面为 $10\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$ (直径 $D \times$ 厚度 t)的铝合金管(材料属性如图9和表1所示)为研究对象,管材毛坯为变形体,网格类型为C3D8R。固定模、弯曲模、导向和夹钳为刚体,单元类型为R3D4。有

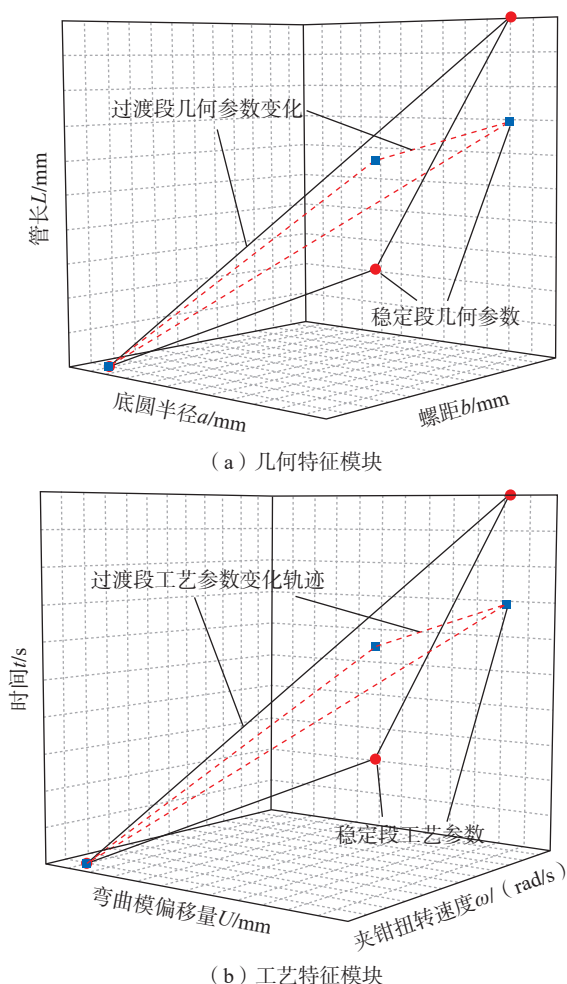


图6 空间管件单元的工艺参数模块示意图

Fig.6 Schematic diagram of process parameter module for space tube unit

限元模型如图 10 所示。

4.2 空间管件稳定区工艺参数预测

在工程实践中很多系统都具有复杂的非线性,难以采用数学方法对其进行准确建模。在这种情况下,可以使用 BP (Back propagation neural network, BPNN) 神经网络来拟合这些非线性系统。该方法把未知的过程当作是一个黑匣子,首先用系统输入输出数据训练 BP 神经网络,使网络能够表达该未知函数,然后用训练好的 BP 神经网络预测系统输出。BP 神经网络在结构设置为输入层—隐含层—输出层,为建立高精度的空间自由弯曲成形预测模型,充分考虑管材成形的材料非线

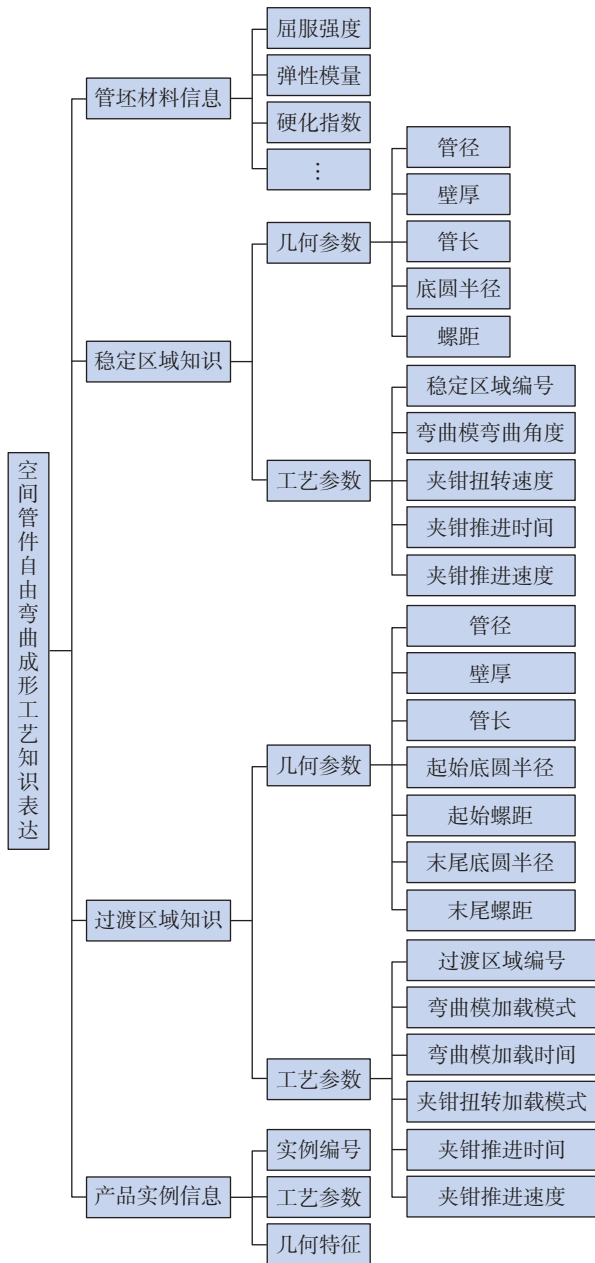


图 7 空间管件成形工艺知识

Fig.7 Knowledge of the forming process of space tube fittings

性、几何非线性等特征,使其更适用于空间管自由弯曲成形工艺参数的预测与应用。本文利用 BP 神经网络模型对空间管件自由弯曲成形工艺参数进行预测研究,并将得到的预测结果与实际试验值进行对比。

从曲率和挠率的物理意义可知,曲率主要受弯曲模

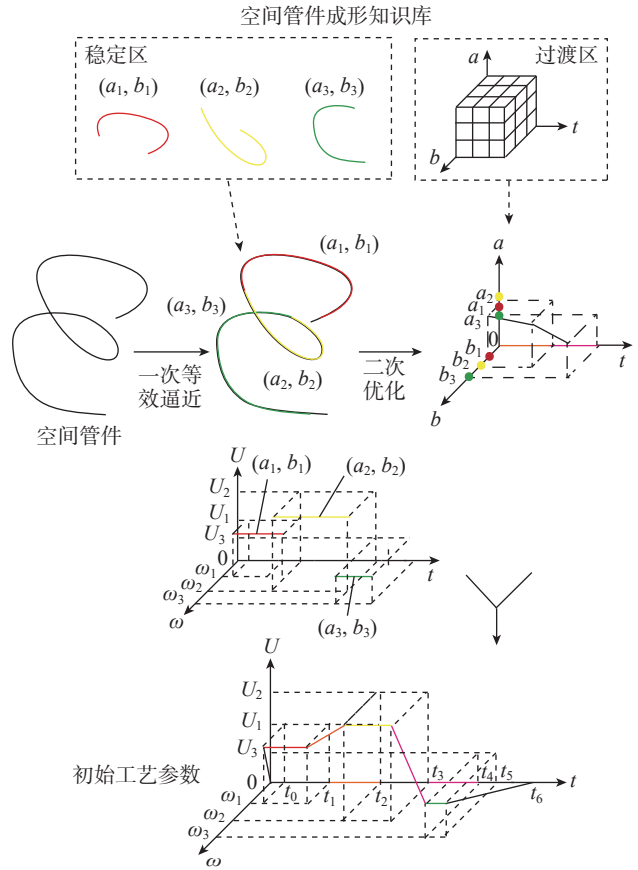


图 8 基于一次等效逼近、二次优化的空间管件初始工艺参数获取
Fig.8 Acquisition of initial process parameters of space tube fittings based on first-order equivalent approximation and second-order optimization

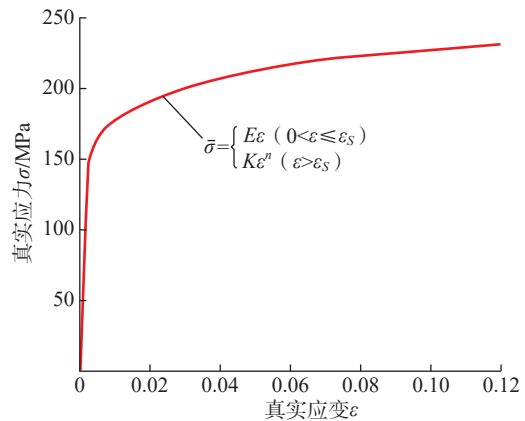


图 9 铝合金应力-应变曲线

Fig.9 Strain-stress curve of aluminum alloy

偏移量影响, 挠率受推进速度和夹钳的扭转速度影响。

由式(2)和(3)可以计算出圆柱螺旋管的单位长度扭转角 θ , 即

$$\theta = \tau / b / (a^2 + b^2) \quad (4)$$

因此, 当管件的推进速度为 v 时, 夹钳绕轴线的旋转速度 ω 为

$$\omega = \theta v = bv / (a^2 + b^2) \quad (5)$$

由于曲率和挠率是很敏感的变化量, 微小的变化就会导致底圆半径和螺距发生大的变化。因此, 将采用底圆半径和螺距为螺旋线的几何参量分析空间螺旋管成形过程中模具变化与成形管件之间的规律, 在空间管件成形过程中夹钳的扭转速度不为0时, 稳定区成为螺旋状态。很明显, 管件成形部分的弯曲半径会被弯曲模偏移量 U 和夹钳扭转速度所影响。则需要设计正交试验

表1 铝合金力学性能参数

Table 1 Mechanical properties of aluminum alloy

弹性模量 E/GPa	屈服强度 σ_s/MPa	强度极限 σ_b/MPa	泊松比 μ
68.4	149.2	228.2	0.3
密度/ (kg/m^3)	伸长率 $\delta/\%$	强度系数 K/MPa	硬化指数 n
2.71×10^3	11.9	296.76	0.1122

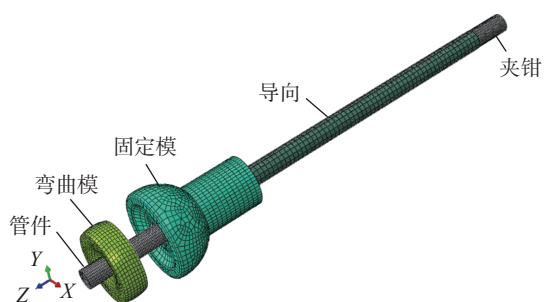


图10 管件成形有限元模型

Fig.10 Finite element model for tube forming

来进行分析, 夹钳推进速度固定为50 mm/s, 弯曲模偏移量 U 取值为18 mm、19 mm、20 mm、21 mm、22 mm、23 mm、24 mm、25 mm、26 mm、27 mm; 夹钳扭转速度 ω 取值为0.2 rad/s、0.3 rad/s、0.4 rad/s、0.5 rad/s、0.6 rad/s、0.7 rad/s, 成形螺旋形管件结果如表2所示。

正交试验完成后对其试验结果进行分析, 分析影响工艺参数弯曲模偏移量 U 和夹钳扭转速度 ω 分别对几何特征底圆半径 a 和螺距 b 的影响大小。

通过最大极差法分析影响底圆半径 a 和螺距 b 相关度。极差的计算如下。

第一列中

$$K_1 = r_1 + r_2 + r_3 + r_4 + r_5 + r_6$$

$$K_2 = r_7 + r_8 + r_9 + r_{10} + r_{11} + r_{12}$$

$$K_3 = r_{13} + r_{14} + r_{15} + r_{16} + r_{17} + r_{18}$$

$$K_4 = r_{19} + r_{20} + r_{21} + r_{22} + r_{23} + r_{24}$$

$$K_5 = r_{25} + r_{26} + r_{27} + r_{28} + r_{29} + r_{30}$$

$$K_6 = r_{31} + r_{32} + r_{33} + r_{34} + r_{35} + r_{36}$$

$$K_7 = r_{37} + r_{38} + r_{39} + r_{40} + r_{41} + r_{42}$$

$$K_8 = r_{43} + r_{44} + r_{45} + r_{46} + r_{47} + r_{48}$$

$$K_9 = r_{49} + r_{50} + r_{51} + r_{52} + r_{53} + r_{54}$$

$$K_{10} = r_{55} + r_{56} + r_{57} + r_{58} + r_{59} + r_{60}$$

偏移量 U 对底圆半径 a 的极差值 Ran_1 为

$$\text{Ran}_1 = \frac{(K_4 - K_9)}{10} = 8.7426 \text{ mm}$$

偏移量 U 对螺距 b 的极差值 Ran_2 为

$$\text{Ran}_2 = \frac{(K_{10} - K_1)}{10} = 17.0000 \text{ mm}$$

第二列中

$$K_1 = r_1 + r_7 + r_{13} + r_{19} + r_{25} + r_{31} + r_{37} + r_{43} + r_{49} + r_{55}$$

$$K_2 = r_2 + r_8 + r_{14} + r_{20} + r_{26} + r_{32} + r_{38} + r_{44} + r_{50} + r_{56}$$

$$K_3 = r_3 + r_9 + r_{15} + r_{21} + r_{27} + r_{33} + r_{39} + r_{45} + r_{51} + r_{57}$$

$$K_4 = r_4 + r_{10} + r_{16} + r_{22} + r_{28} + r_{34} + r_{40} + r_{46} + r_{52} + r_{58}$$

$$K_5 = r_5 + r_{11} + r_{17} + r_{23} + r_{29} + r_{35} + r_{41} + r_{47} + r_{53} + r_{59}$$

$$K_6 = r_6 + r_{12} + r_{18} + r_{24} + r_{30} + r_{36} + r_{42} + r_{48} + r_{54} + r_{60}$$

表2 成形结果数据

Table 2 Forming result data

试验编号	偏移量 U/mm	扭转速度 $\omega/(\text{rad}/\text{s})$	曲率 $k/(1/\text{mm})$	挠率 $\tau/(1/\text{mm})$	底圆半径 a/mm	螺距 b/mm
1	18	0.7	0.008963	0.021228	16.8808	39.9803
2	18	0.6	0.008683	0.017846	22.0452	45.3076
3	18	0.5	0.008454	0.015062	28.3388	50.4862
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
59	27	0.3	0.01236	0.007272	60.1019	35.3598
60	27	0.2	0.01203	0.00506	70.5646	29.7031

扭转速度 ω 对底圆半径 a 的极差值 Ran_3 为

$$Ran_3 = \frac{(K_1 - K_6)}{10} = 47.2908 \text{ mm}$$

扭转速度 ω 对螺距 b 的极差值 Ran_4 为

$$Ran_4 = \frac{(K_2 - K_6)}{10} = 7.7657 \text{ mm}$$

分析结果如表 3 所示。

(1) 影响因素主次的确定。

结果分析, 每列的极差是不相等的, 这说明偏移量和扭转速度对螺旋管件的底圆半径和螺距的影响大小是不相同的。极差越大, 表示该因素对某一试验参数的影响越大, 是影响该参数变化的最主要因素。从表 3 可看出, 偏移量对螺旋管螺距的影响程度最大, 对底圆半径的影响程度较小。扭转速度对螺旋管底圆半径的影响程度最大, 对螺距的影响程度较小。基于这个影响因素, 可以后续对螺旋管件成形补偿提供技术支撑。

(2) 空间螺旋管工艺参数神经网络预测模型建立。

目前, 回弹预测的常用方法有解析法、有限元法、人工神经网络法和试验法。其中神经网络预测回弹的方法仅可用部分数值模拟结果作为样本进行网络训练, 再用神经网络对回弹量进行预测和优化, 大大提高了成形数值模拟的效率和预测精度

为了构建空间螺旋管的底圆半径和螺距预测模型, 将弯曲模偏移量及夹钳扭转速度作为输入项, 合理配置 BP 神经网络。采用三层神经网络, 将底圆半径和螺距作为输入节点。训练目标和模型输出均赋值为弯曲模偏移量和夹钳扭转速度。采用一层隐层, 为提升精度, 设置隐藏层为分线性函数, 具体神经网络结构如图 11 所示。将 70% 的数据划分为训练集, 15% 的数据用于测试, 15% 的数据做验证集。为了使训练集和测试集在

统计特征上更好地代表样本总体, 保证模型的有效性和适用性, 采取完全随机原则选取样本。

(3) 神经网络预测结果。

在 60 组数据中随机抽取 55 组, 重复测试后, 可以稳定地实现与图 12 所示类似的 BPNN 性能: 无论是训练集 (图 12 (a))、验证集测试 (图 12 (b)) 还是测试集测试 (图 12 (c)), 数据都集中在最优曲线的拟合线附近; 训练集、验证集和测试集的训练目标和输出之间的相关系数 R 分别为 0.9997、0.9999 和 0.9999, 对应的均方误差 MSE 分别为 0.08147、0.02368 和 0.02858 (图 12 (a)~(c))。如图 13 所示, 除了可能由于测量不当而产生的极少量异常值外, 训练集、验证集和测试集的误差大多集中在 $(-0.5, 0.5)$ 范围内。

因此, 研究空间螺旋管的成形工艺参数时, BP 神经网络模型具有较高的预测精度。同时, 训练集和测试集拟合趋势、相关系数、均方误差和误差分布相对于目标结果都非常接近, 表明该模型具有优良的泛化能力, 可以有效地预测螺旋管件的成形工艺参数。

用剩下的 5 组数据对网络再进行测试, 测试结果如图 14 所示, 图 14 (a) 表示弯曲模偏移量与夹钳扭转速度的预测值和仿真试验的结果。图 14 (b) 表示弯曲模偏移量与夹钳扭转速度的预测误差百分比。显然可以看出, BP 神经网络预测结果与数值仿真试验结果基本一致, 5 组中的弯曲模偏移量的预测值与数值仿真试验的最大误差为 0.1327 mm, 最大相对误差为 1.08%, 夹钳扭转速度的预测值与数值仿真试验的最大误差为 -0.0142 rad/s , 最大相对误差为 3.4%。

根据空间管件成形工艺知识表示模型, 将得到的空间稳定区试验结果数据以及得到的 BP 神经网络储存在知识库中的空间稳定区部分, 以方便获取工艺参数。根据管件成形工艺参数偏移量和夹钳扭转速度与底圆半径和螺距对应关系可对知识库覆盖范围内圆弧管件的工艺参数进行预测。

4.3 空间管件过渡区工艺参数优化

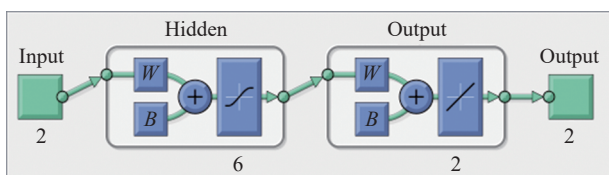
空间自由弯曲成形管件的过渡区应重点研究工艺参数, 管件自由弯曲虚拟试验采用正交设计法来逐一分析弯曲模偏移量和夹钳扭转速度变化曲线对成形管件几何特征的影响。以管件成形偏差为响应量来分析不同过渡区的加载曲线所带来的影响。

曲线的曲率是针对曲线上的点切线方向角对弧长的转动率, 以及挠率的绝对值度量曲线上邻近两点的副法向之间的夹角对弧长的变化率。由于曲率主要受弯曲模偏移量影响, 挠率主要受夹钳扭转速度影响 (推进速度不变的情况下), 因此, 可以用曲线的起点和终点的切线夹角和副法线的夹角来表示过渡区的夹角弯曲程

表 3 试验方案及结果分析

Table 3 Test scheme and result analysis

试验参数	底圆半径 a/mm		螺距 b/mm	
	偏移量 U	扭转速度 ω	偏移量 U	扭转速度 ω
极差 Ran	8.7426	17.0000	47.2908	7.7657
因素 (主→次)	$\omega \rightarrow U$		$U \rightarrow \omega$	



注: B 为神经网络的偏置; W 为神经网络的权重参数。

图 11 神经网络结构

Fig.11 Neural network structure

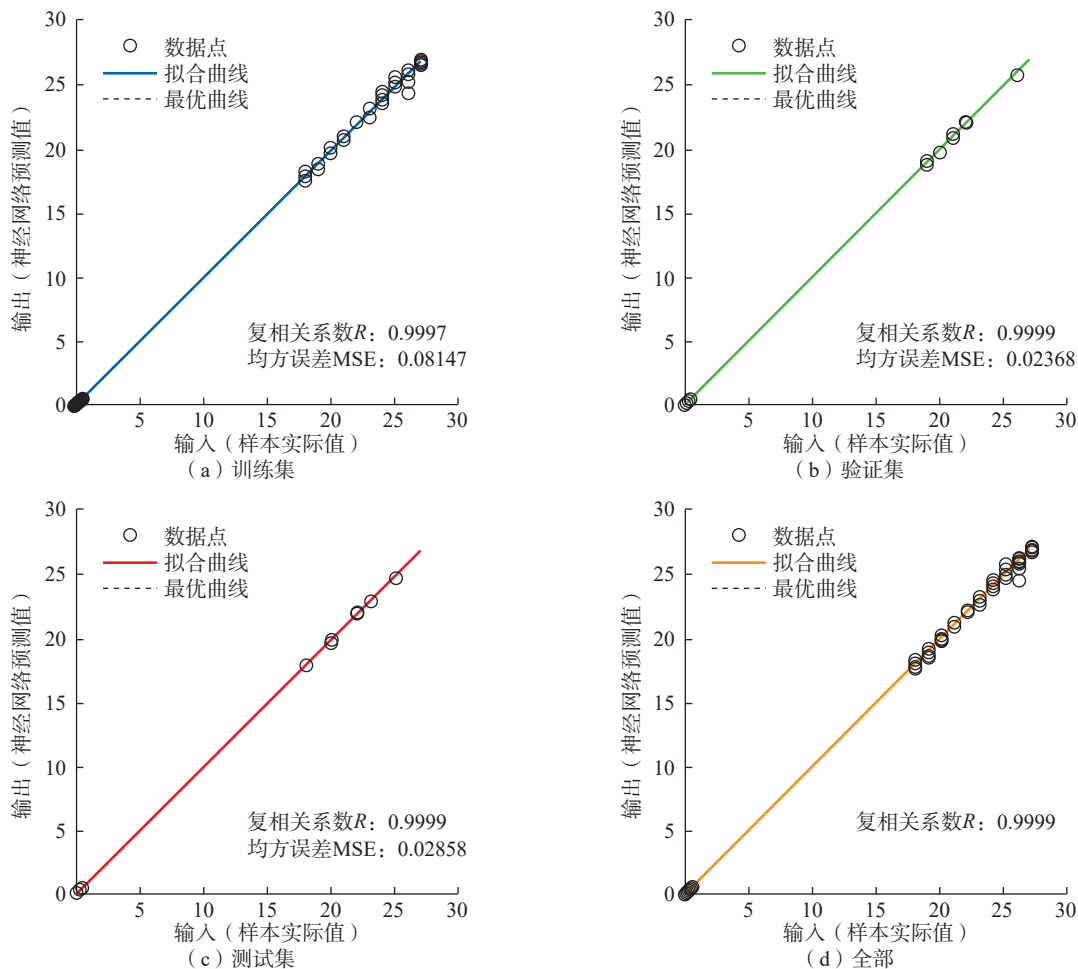


图 12 神经网络训练回归分析
Fig.12 Regression analysis of neural network training

度和扭转程度。

过渡段的变化时间包括弯曲模偏移量 U 的变化时间 U_i 和夹钳扭转速度 ω 的变化时间 ω_i , 具体的水平数如表 4 所示, 各分为 4 个水平数。

以目标管件 (图 15) 为例, 对空间稳定几何特征分析, 可将轴线划分为两个稳定段, 直线段对应的偏移量为 0 (旋转角度 0), 扭转速度为 0, 圆弧段对应的弯曲模偏移量为 28 mm (旋转角度 -1.02 rad), 扭转速度为 0.5 rad/s, 通过成形直线-圆弧型管件来分析该过渡区的影响变化。成形过程设置直线段为起始成形端。

对应的整段管件成形的工艺参数变化幅值如图 16 所示。

在对空间管件自由弯曲成形时, 从图 16 (a) 中选取弯曲模偏移量的幅值曲线, 从图 16 (b) 中选取夹钳扭转速度的幅值曲线, 对其进行数值模拟试验。对其结果轴线进行拟合处理, 可以得到不同组合的弯曲模偏移量的幅值曲线和夹钳扭转速度的幅值曲线, 对应的结果与目标管件轴线的对比图, 如图 17 所示, 目标管件落在

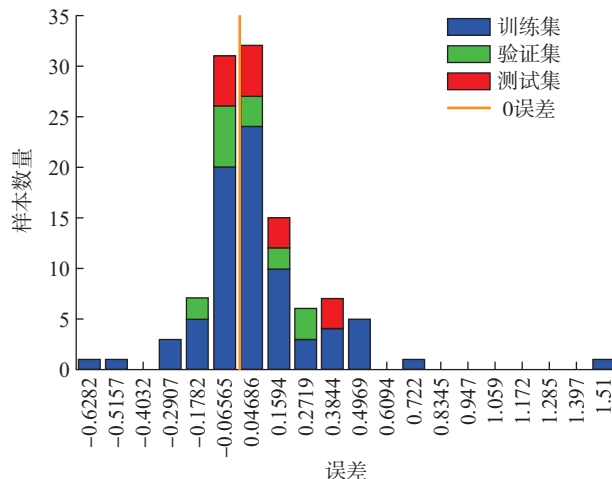


图 13 神经网络误差分析
Fig.13 Neural network error analysis

了成形曲线的第 3 个区间, 说明这个区间的过渡段工艺参数最接近目标管件的工艺参数。

(1) 偏移量 U 变化时间 U_i 和扭转速度 ω 变化时间 ω_i 对过渡段成形弯曲角度的影响。

如图 18 所示,过渡段的偏移量和扭转速度变化量不变,当过渡段扭转速度变化时间不变时,随着过渡段偏移量变化时间的增大,过渡段的弯曲角度逐渐减小;当过渡段偏移量变化时间不变时,随着过渡段扭转速度变化时间的增大,过渡段的弯曲角度基本保持不变,仅

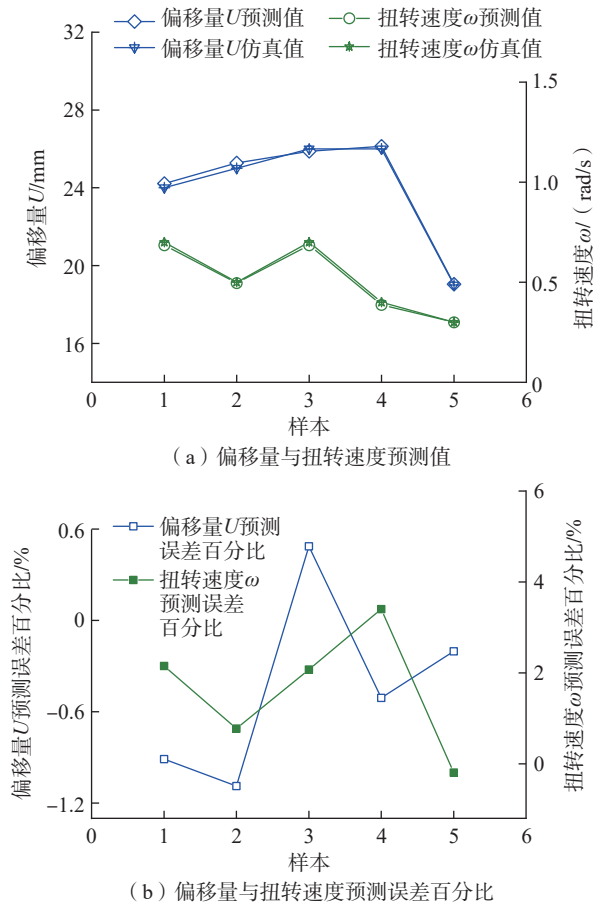


图 14 测试结果分析

Fig.14 Analysis of test results

表 4 过渡段模具变化时间

Table 4 Die change time in transition section

水平数	弯曲模变化时间 U_i	夹钳扭转速度变化时间 ω_i
1	0.6	0.6
2	0.9	0.9
3	1.2	1.2
4	1.5	1.5

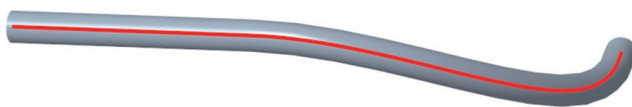


图 15 目标管件模型

Fig.15 Target fitting model

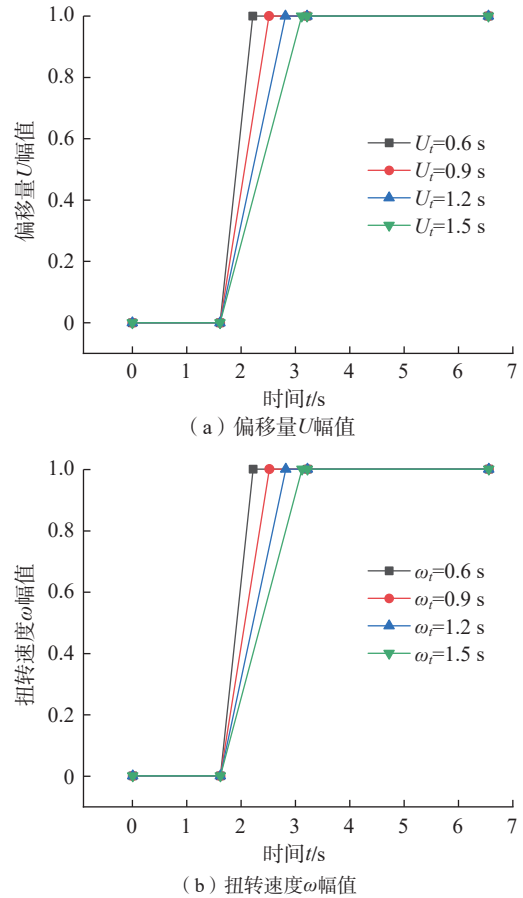


图 16 偏移量与扭转速度的幅值

Fig.16 Amplitude of offset and torsional velocity

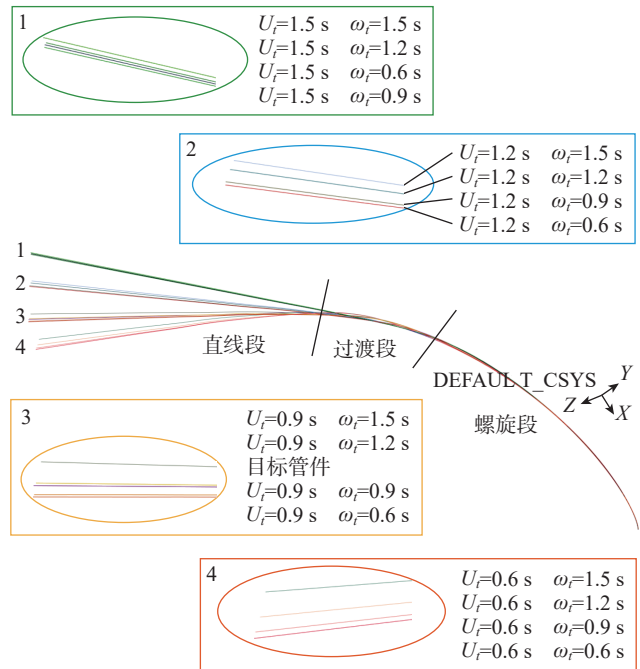


图 17 不同过渡区加载模式的管件轴线与目标管件轴对比

Fig.17 Comparison of the tube axis and the target tube axis in different transition zone loading modes

在过渡段偏移量变化时间为 0.9 s 时,过渡段的弯曲角度随着扭转速度变化时间的增大而增大。

(2) 偏移量 U 变化时间 U_t 和扭转速度 ω 变化时间 ω_t 对过渡段成形扭转角度的影响。

如图 19 所示,过渡段的偏移量和扭转速度变化量不变,当过渡段扭转速度变化时间不变时,随着过渡段偏移量变化时间的增大,过渡段的弯曲角度逐渐增大;当过渡段偏移量变化时间不变时,随着过渡段扭转速度变化时间的增大,过渡段的弯曲角度基本保持不变,仅在过渡段偏移量变化时间为 0.9 s 时,过渡段的弯曲角度随着扭转速度变化时间的增大而缓慢减小。

当过渡段偏移量变化时间不变时,过渡段扭转速度时间变化对整体管件成形的影响较小。因此,为方便获

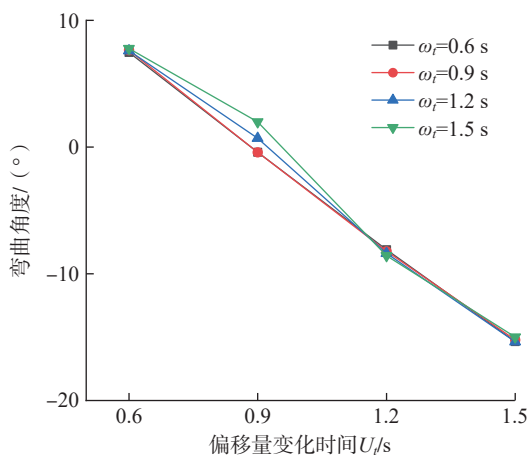


图 18 偏移量和扭转速度的变化时间对过渡段成形后弯曲角度的影响

Fig.18 Effect of the change time of offset and torsion speed on the bending angle of the transition section after forming

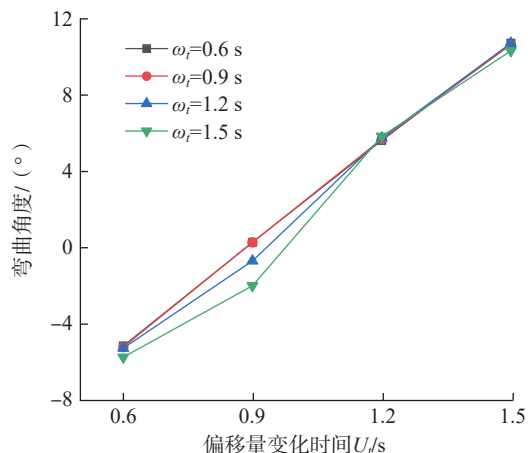


图 19 偏移量和扭转速度的变化时间对过渡段成形后扭转角度的影响

Fig.19 Influence of the change time of offset and torsion speed on the torsion angle after the transition section is formed

取空间管件成形工艺参数,可设置扭转速度变化时间与过渡段偏移量变化时间相等,可得式(6)。

$$U_t = \omega_t \quad (6)$$

从分析结果可知,当 $U_t = \omega_t = t = 0.9$ s 时,过渡段与目标管件之间的偏差最小。将该时间与过渡区起始和末尾的底圆半径等数据存储于知识库中的平面过渡区,以方便后续获取过渡区工艺参数。

5 实例验证

(1) 几何信息提取。

待成形目标管件如图 20 所示,测量提取其几何信息如表 5 所示(其中 C 表示圆弧半径; L 表示管件长度; a 和 b 表示螺旋线的底圆半径和螺距)。

(2) 工艺分析。

根据提取的几何信息,目标管件被划分为 3 个稳定段,分别为圆弧型、直线型和螺旋型管件。其次,通过稳定段的几何特征二次优化可确定过渡段的类型,第 1 段与第 2 段之间的过渡段为圆弧-直线型,第 2 段与第 3 段之间的过渡段为直线-螺旋型管件。

(3) 管件自由弯曲成形工艺参数设计与预测。

第 1 段为圆弧型管件,可以在平面稳定区工艺知识库中检索成形参数,若参数不存在时,则可以进行插值计算。根据材料参数、管径、管厚、半径与长度,预测出的偏移量、时间和推进速度如图 21 所示。

第 2 段为直线型管件,根据推进速度和直线长度,得到时间为 2.9 s。

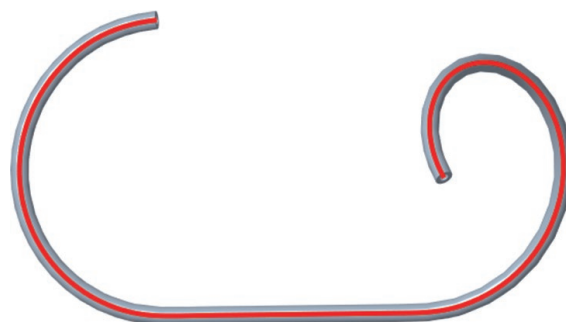


图 20 目标管件几何特征图

Fig.20 Geometric feature diagram of target tube fittings

表 5 各段轴线的几何参数

Table 5 Geometric parameters of each section of the axis mm

阶段	第 1 段	第 2 段	第 3 段
参数 1	$C=82$	—	$a=51.5$
参数 2	—	—	$b=38.8$
参数 3	$L=255$	$L=145$	$L=405$

第3段为螺旋型管件可以在空间稳定区工艺知识库中检索参数,根据材料参数、管径、管厚、底圆半径、螺距与长度,预测出偏移量、时间、扭转速度和推进速度,如图22所示。

第1段与第2段的过渡区为圆弧-直线型过渡区管件,可以在平面过渡区工艺知识库中检索参数,根据材料参数、管径、管厚、起始端半径、末端段半径与长度,预测出时间,如图23所示。

第2段与第3段的过渡区为直线-螺旋型过渡区管件,可以在空间过渡区工艺知识库中检索参数,根据材料参数、管径、管厚、起始端底圆半径和螺距、末端段底圆半径和螺距、长度预测出时间,如图24所示。

管件单元在拼接后,成形单元与夹钳之间的距离会发生变换,该变化会影响成形过程中的载荷传递。因此,获得的各段工艺参数只可作为初始工艺参数,对于过渡区中至少有一端为空间管件时,则需要对其扭转速度和

管件成形工艺知识											
材料参数	首页										
平面稳定区管件工艺知识	添加										
平面过渡区管件工艺知识	材料: AI6061										
空间稳定区管件参数工艺知识	管径: 10	管厚: 2.5	管长: 255.0	半径: 82	搜索						
空间过渡区管件参数工艺知识	实验编码	材料名称	管径(mm)	管厚(mm)	管长(mm)	半径(mm)	时间(s)	偏移量(mm)	弯曲角度(°)	推进速度(mm/s)	操作
	0	AI6061	10.0	2.5	255.0	82.0	5.1	28.0	-1.02	50.0	编辑 删除

图 21 平面稳定区管件工艺知识
Fig.21 Process knowledge of tube fittings in the plane stability zone

管件成形工艺知识													
材料参数	首页												
平面稳定区管件工艺知识	添加												
平面过渡区管件工艺知识	材料: AI6061												
空间稳定区管件参数工艺知识	管径: 10	管厚: 2.5	管长: 405.0	底圆半径: 51.5	螺距: 38.8	搜索							
空间过渡区管件参数工艺知识	实验编码	材料名称	管径(mm)	管厚(mm)	管长(mm)	底圆半径(mm)	螺距(mm)	时间(s)	偏移量(mm)	弯曲角度(°)	扭转速度(°/s)	推进速度(mm/s)	操作
	61	AI6061	10.0	2.5	405.0	51.5	38.8	8.0	28.0	-1.02	0.5	50.0	编辑 删除

图 22 空间稳定区管件工艺知识
Fig.22 Tube fitting process knowledge in the space stability zone

管件成形工艺知识														
材料参数	首页													
平面稳定区管件工艺知识	添加													
平面过渡区管件工艺知识	材料: AI6061													
空间稳定区管件参数工艺知识	管径: 10	管厚: 2.5	管长: 46.5	半径1: 82.0	半径2: 0.0	加载时间(s): 0.93	搜索							
空间过渡区管件参数工艺知识	实验编码	材料名称	管径(mm)	管厚(mm)	管长(mm)	半径1(mm)	半径2(mm)	加载时间(s)	偏移量1(mm)	弯曲角度1(°)	偏移量2(mm)	弯曲角度2(°)	推进速度(mm/s)	操作
	1	AI6061	10.0	2.5	46.5	82.0	0.0	0.93	28.0	-1.02	0.0	0.0	50.0	编辑 删除

图 23 平面过渡区管件工艺知识
Fig.23 Process knowledge of tube fittings in the plane transition zone

管件成形工艺知识																		
材料参数	首页																	
平面稳定区管件工艺知识	添加																	
平面过渡区管件工艺知识	材料: AI6061																	
空间稳定区管件参数工艺知识	管径: 10	管厚: 2.5	管长: 45.0	底圆半径1: 0.0	底圆半径2: 51.5	搜索												
空间过渡区管件参数工艺知识	螺距1: 0	螺距2: 38.8	搜索															
	实验编码	材料名称	管径(mm)	管厚(mm)	管长(mm)	底圆半径1(mm)	螺距1(mm)	底圆半径2(mm)	螺距2(mm)	时间(s)	偏移量1(mm)	弯曲角度1(°)	扭转速度1(°/s)	偏移量2(mm)	弯曲角度2(°)	扭转速度2(°/s)	推进速度(mm/s)	操作
	1	AI6061	10.0	2.5	45.0	0.0	0.0	51.5	38.8	0.9	0.0	0.0	0.0	28.0	-1.02	0.5	50.0	编辑 删除

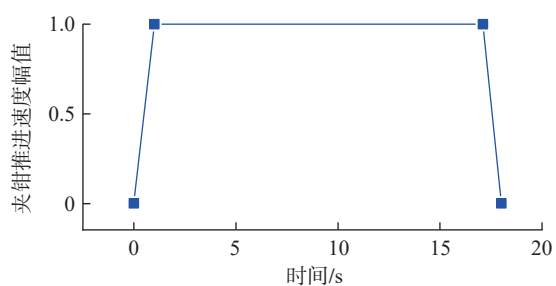
图 24 空间过渡区管件工艺知识
Fig.24 Process knowledge of tube fittings in space transition zone

偏移量进行补偿。根据对过渡区工艺参数的影响分析,需对过渡区的夹钳扭转速度和弯曲模偏移量进行补偿,补偿结果如图 25 所示,分别表示了夹钳推进速度、夹钳扭转速度和弯曲模偏移量的幅值曲线。

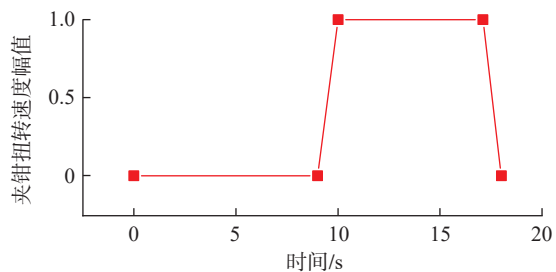
得到数值模拟结果,为了分析过渡段对整段目标管件带来的影响,需要使用式(7)计算逼近结果的总体偏差,逼近结果和偏差分布云图如图 26 所示,逼近残差 $\Delta e=2.3872$ mm,最大偏差 $E_{\max}=4.3439$ mm。逼近残差 Δe 和最大偏差 E_{\max} 与管件总长度 L 的比值对应为 0.1274% 和 0.2162%。该形状偏差值能够被大多数工程计算项目所接受,因此可认为基于一次等效逼近、二次优化技术的结果可靠,以及本文所提基于知识库的工艺获取策略与补偿方法可行。

$$\begin{cases} \Delta e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta l_i^2} \leq \varepsilon \\ E_{\max} = \max_{1 \leq i \leq n} \{\Delta l_i\}_{\max} \leq \delta \end{cases} \quad (7)$$

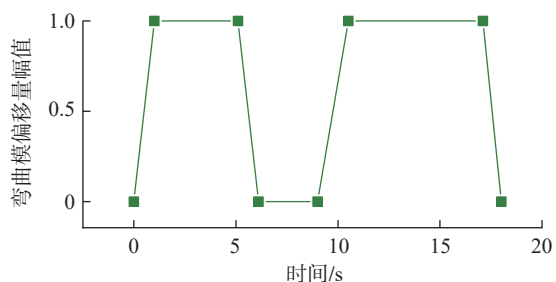
式中, Δl_i 为成形管件与目标管件对应节点之间的距离; n 为节点总个数; ε 、 δ 为逼近误差限。



(a) 夹钳推进速度幅值



(b) 夹钳扭转速度幅值



(c) 弯曲模偏移量幅值

图 25 补偿后的工艺参数加载幅值曲线

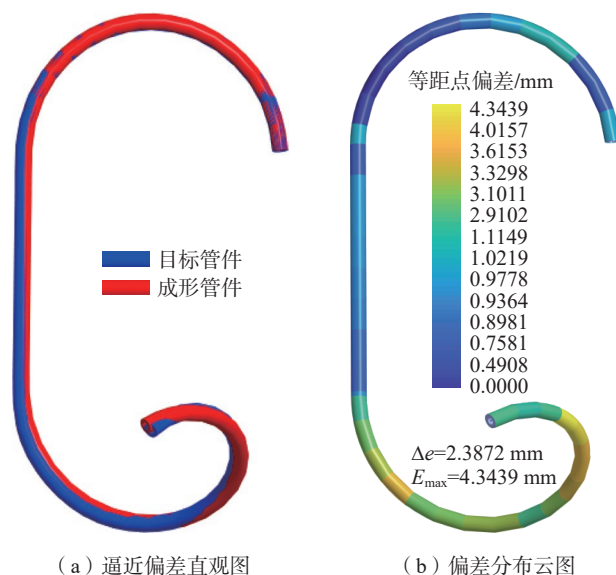
Fig.25 Process parameter loading amplitude curve after compensation

根据试验要求,基于弯曲模和夹钳的运动幅值曲线将其转化为设备的控制参数,如图 27 所示,根据弯曲模偏移量、夹钳扭转速度和夹钳推进速度的幅值曲线在设备控制界面输入工艺参数。

经过自由弯曲成形试验设备,如图 28 所示,试验结果如图 29 所示。经检测得到与仿真结果基本一致。因此,初步验证以上所述的工艺参数获取策略在工程实践过程中具有可行性和有效性。

6 结论

(1) 通过采用最大极差法分析了弯曲模偏移量 U 和夹钳扭转速度 ω 与螺旋管的底圆半径 a 和螺距 b 之间的相关性,偏移量 U 对螺旋管螺距的影响程度最大,对底圆半径的影响程度较小。扭转速度 ω 对螺旋管底



(a) 逼近偏差直观图

(b) 偏差分布云图

图 26 空间管件逼近结果及偏差分布

Fig.26 Approximation results and deviation distribution of spatial tube fittings



图 27 设备工艺参数输入界面示意图

Fig.27 Schematic diagram of equipment process parameters input interface



图 28 管件弯曲试验设备
Fig.28 Tube bending test equipment



图 29 管件成形结果
Fig.29 Tube forming results

圆半径的影响程度最大,对螺距的影响程度较小。

(2) 基于 BP 神经网络拟合了空间螺旋管成形后轴线的底圆半径和螺距与工艺参数偏移量 U 和夹钳扭转速度 ω 的关系,建立了空间螺旋管工艺参数神经网络预测模型。通过测试验证,5 组中的偏移量 U 的预测值与数值仿真试验的最大相对误差为 1.08%,夹钳扭转速度的预测值与数值仿真试验的最大相对误差为 3.4%。

(3) 通过对过渡段工艺参数包括弯曲模偏移量 U 的变化时间 U_t 和夹钳扭转速度 ω 的变化时间 ω_t 进行正交设计仿真试验,分析了 U_t 和 ω_t 变化曲线对成形管件几何特征的影响,当 $U_t = \omega_t = t = 0.9$ s 时,过渡段与目标管件之间的偏差最小。

(4) 基于上述分析,提出了基于一次等效逼近、二次优化的空间管件工艺获取策略,通过实例成形验证,管件成形结果逼近残差 Δe 和最大偏差 E_{\max} 与管件总长度 L 的比值对应为 0.1274% 和 0.2162%,验证了该策略的可行性和有效性。

参考文献

[1] 张深,吴建军.空间弯管的回弹预测[J].航空学报,2011,32(5):953-960.

ZHANG Shen, WU Jianjun. Spring-back prediction of non-planar tube bending[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(5): 953-960.

[2] 尚琪,乔顺成,吴建军,等.管件弯曲过渡区研究及回弹控制[J].塑性工程学报,2020,27(1):38-45.

SHANG Qi, QIAO Shuncheng, WU Jianjun, et al. Research on bending transition zone of tube and springback control[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(1): 38-45.

[3] 王永安,吴建军,李非凡,等.薄壁管数控弯曲成形工艺参数区间研究[J].塑性工程学报,2018,25(1):111-118.

WANG Yongan, WU Jianjun, LI Feifan, et al. Range of process parameters of thin-walled tube NC bending[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(1): 111-118.

[4] 李海峰,杨合,詹梅,等.基于数据库的薄壁管数控弯曲知识库的构建[J].塑性工程学报,2008,15(4):32-36.

LI Haifeng, YANG He, ZHAN Mei, et al. Construction of database-based knowledge base for thin-walled tube NC bending[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(4): 32-36.

[5] GUO X Z, XIONG H, XU Y, et al. U-R relationship prediction method for aluminum alloy circular tube free-bending process based on sensitivity analysis of material parameters[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99(5-8): 1967-1977.

[6] ENGEL B, KERSTEN S, ANDERS D. Spline-interpolation and calculation of machine parameters for the three-roll-pushbending of spline-contours[J]. Steel Research International, 2011, 82(10): 1180-1186.

[7] GROTH S, ENGEL B, LANGHAMMER K. Algorithm for the quantitative description of freeform bend tubes produced by the three-roll-push-bending process[J]. Production Engineering Research & Development, 2018, 12: 517-524.

[8] ZHANG Z K, WU J J, LIANG B, et al. A new strategy for acquiring the forming parameters of a complex spatial tube product in free bending technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 282: 116662.

[9] 张增坤.空间管件塑性成形回弹的预测及控制策略研究[D].西安:西北工业大学,2019.

ZHANG Zengkun. Investigation to the springback prediction and springback control strategies in spatial tube forming[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019.

[10] WU J J, ZHANG Z K, SHANG Q, et al. A method for investigating the springback behavior of 3D tubes[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 131-132: 191-204.

[11] WU J J, ZHANG Z K. An improved procedure for manufacture of 3D tubes with springback concerned in flexible bending process[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(11): 267-276.

通讯作者:吴建军,教授,博士生导师,主要从事金属材料塑性加工及成形技术研究。

(责编 阳光)