

# 数字化制造技术在液体火箭发动机导管 定制化加工中的应用

岳 婷, 李万鹏, 党 琰

(西安航天发动机有限公司, 陕西 西安 710100)

**摘 要:**针对液体火箭发动机导管定制化生产的特点,通过构建发动机参数化模型并依据现场实际测量数据进行参数化驱动,基于该模型开展以导管端面与其轴线垂直度、导管对接错位值等偏差最小为约束条件的导管虚拟装配和加工余量计算方法研究,确定最优导管加工方案,用虚拟环境中与现场实物状态一致的三维模型进行装配仿真代替目前在物理环境中采用的实物比对确定加工余量的方式,显著提高液体火箭发动机导管加工效率和一致性。应用该技术生产的导管,单根加工时间不超过 15 min,一次装配合格率达到 90%以上。

**关键词:**液体火箭发动机;导管加工;参数化模型;虚拟装配

**中图分类号:**V465 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2022)05-0093-08

## Application of digital manufacturing technology in customized processing of liquid rocket engine pipeline

YUE Ting, LI Wanpeng, DANG Yan

(Xi'an Aerospace Engine Co., Ltd., Xi'an 710100, China)

**Abstract:** According to the characteristics of customized production for liquid rocket engine pipelines, a parametric model of engine is constructed and the parametric drive is carried out according to the actual measurement data on site. Based on this model, the pipeline virtual assembly and the calculation method of machining allowance are studied with the minimum deviation between the pipeline end face and its axis perpendicularity and the misalignment value of pipeline butt as the constraints, and the optimal pipeline processing scheme is determined. Using the 3D model that is consistent with the physical state on-site to perform assembly simulation instead of the physical comparison currently used in the physical environment to determine the machining allowance, the processing efficiency and consistency of the liquid rocket engine pipeline can be significantly improved. The processing time of a single pipe produced by this technology is no more than 15 min, and the qualification rate of one-time assembly is more than 90%.

**Keywords:** liquid rocket engine; pipeline processing; parametric model; virtual assembly

收稿日期:2021-05-05;修回日期:2021-09-25

作者简介:岳婷(1992—),女,硕士,工程师,研究领域为数字化制造。

## 0 引言

导管是液体火箭发动机中连接各组件的重要组件,也是输送燃料、氧化剂和气体的通道。液体火箭发动机装配件中焊接形成的结构件数量多,焊接变形带来的误差累积造成发动机上导管接口位置一致性难以保证,所以导管加工需根据发动机的接口位置进行定制化生产,对误差累积予以补偿。

目前液体火箭发动机导管形状确定采用现场取样的方法,按照导管设计图样的走向在发动机上制取导管实样,依照样管形状进行真实导管折弯成形;导管加工余量的确定采用试装法<sup>[1]</sup>,即将弯曲后的导管在发动机上导管接口处比试以确定两端加工余量<sup>[2]</sup>。采用以上工艺方法,导管加工余量通过在真实发动机上取样及试装确定,可以保证导管与发动机上接口精确匹配,在一定条件下保证了导管装配精度,但在真实发动机上进行比对试装的方法决定了导管的加工过程与发动机装配过程只能串行,占用主装配流程时间较长,据统计,我国的新一代液氧煤油发动机导管的加工过程约占总装生产总周期的 56%,效率较低。

近年来,国内外相关研究机构相继开展了导管数字化测量、数字化制造等方面的研究,取得了大量的研究成果。在导管的数字化测量方面,马海钊等提出利用三坐标测量机自动化检测技术对某机型飞机导管构件进行数字化导管检测,通过采集点云进行模型对齐,采用圆柱拟合法进行导管构件法兰孔的测量,最终实现导管构件的自动化检测<sup>[3]</sup>。吕彦盈提出利用激光跟踪仪对导管的装配工装过程以及焊接完成后导管的尺寸进行检测,实现导管的数字化测量<sup>[4]</sup>。刘少丽等提出了基于蛇模型的管路三维重建方法,通过多目视觉系统拍摄照片并对照片进行图像处理,依据视觉投影原理重建管路三维模型<sup>[5]</sup>。张桁维等提出一种基于点云融合的管路模型精确测量方法,该方法利用机器视觉原理获得点云数据,利用点云融合技术得到管路三维数字化模型<sup>[6]</sup>。罗艺进提出了一种飞机多分支焊接导管法兰安装位姿视觉检测新方法,获得导管法兰在视觉测量场基准坐标系中的位姿,进而获得各法兰相对位姿关系并与三维数模进行对比输出误差

分析结果<sup>[7]</sup>。数字化测量技术的发展为导管的三维数字化测量提供了技术手段,为液体火箭发动机导管的数字化测量和三维重构提供了较好的思路。在导管的数字化制造方面,魏强等在运载火箭导管制造中提出了利用激光扫描设备建立箭体实物点云模型,逆向软件在箭体实物点云模型建立导管模型,导管模型导入数控弯管机弯管,弯管点云模型与导管模型比对的新制造方法,实现了运载火箭取样导管数字化制造<sup>[8]</sup>。赵长喜等提出了航天器管路实现全过程数字化制造的解决方案,将管路数字化制造技术应用于实践,实现了管路生产不再依赖安装现场取样,航天器管路生产与总装分离,管路以产品化形式交付<sup>[9]</sup>。在导管制造方面,目前研究主要集中于导管的形状制取,对于导管实际安装时的加工余量确定则没有较好的方法,特别是对于一致性不高的接口位置,还是采用在实际接口上进行多次试装的方法,效率较低<sup>[10]</sup>。

针对上述问题,本文提出一种通过构建液体火箭发动机参数化模型并对其进行实测驱动生成与发动机实物状态尺寸一致的数字孪生模型,基于模型进行虚拟装配以确定最优导管加工方案的方法,提高液体火箭发动机导管生产效率和一致性。

## 1 总体技术方案

本文采用基于 C++ 和 UG NX 组件的技术开发、基于 API 的几何模型交互操作及面向对象的数据及文件管理等技术手段,总体技术流程如图 1 所示,通过建立可驱动的参数化模型,依据装配生产现场的发动机实测数据实现模型驱动,生成与现场实物状态一致的发动机数字孪生模型,加载通过对导管半成品实物三维扫描得到的三维模型,在限定空间内调整装配参考点与设计参考点距离,使得导管装配参考点在设计参考点附近一球形空间内移动,在满足导管端面与其轴线垂直度、导管对接错位值等工艺要求的约束条件下,以导管端面与其轴线垂直度、导管对接错位值最小为目标,利用优化算法循环调用导管三维测量模型,进行虚拟装配,确定导管的最优匹配位置,输出导管切割余量等工艺参数,辅助进行导管加工。

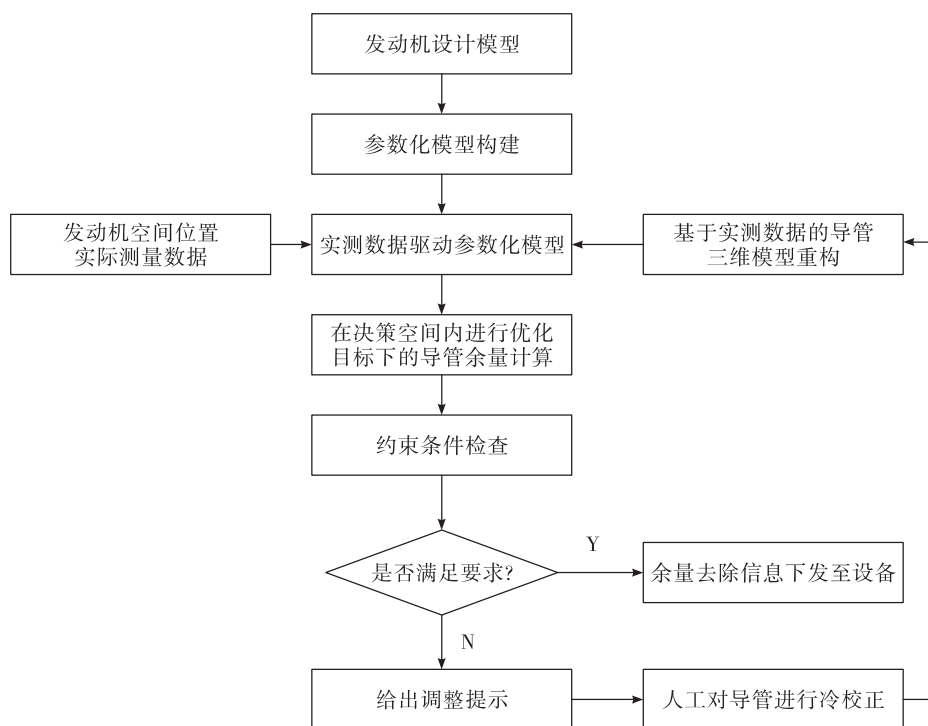


图1 导管虚拟定制化加工装配技术流程

Fig.1 Virtual customized processing and assembly technical process for pipeline

## 2 发动机参数化模型构建

为保证与导管装配相关的关键点空间位置与现场实际装配的发动机一致,将大组件间装配定位点、导管装配定位点、导管接口位置作为现场发动机空间位置测量点,在进行参数化建模时作为需驱动的参数<sup>[11]</sup>。

### 2.1 主体模型的参数化

发动机主要组合件在生产制造时应用焊接形式连接,焊接变形不可避免,为保证主要组合件外形尺寸与现场装配的尺寸一致,将模型在大组件的各焊缝处进行拆分,建立独立的特征,通过装配约束的方式将特征添加到模型中,并将特征通过表达式进行参数化,使各驱动特征与发动机整体空间位置产生关联。

### 2.2 导管接口的参数化

采用同步建模的方式进行导管法兰的参数化以实现通过实测数据驱动法兰位置的变化及方向的偏转。以设计模型上法兰端面圆心坐标及法向向量为标准值,表示为  $P_i(x_b, y_b, z_b)$ ,  $V_i(i_b, j_b, k_b)$ , 建立法兰端面圆心坐标和法向量实际测量值的

表达式,分别为  $P_i(x_s, y_s, z_s)$ ,  $V_i(i_s, j_s, k_s)$ , 通过同步建模移动面命令中点到点运动,设置出发点为法兰圆心坐标标准值,终止点为圆心坐标实测值表达式,通过读取现场实际测量圆心坐标,实现法兰位置的移动;通过同步建模移动面命令中轴与矢量对齐运动,设置枢轴点为法兰圆心坐标实测值表达式,设置终止矢量为法兰端面法向向量实测值表达式,实现法兰在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上角度的偏转。

参数化建模完成后,通过激光测量系统与制造执行系统集成,实现每台次发动机测量数据的自动采集、传输与存储,通过 UG NX 二次开发,可以读取制造执行系统接收的 XML 格式的测量数据,通过几何运算实现表达式中各参数的自动修改,最终实现参数化模型的实测驱动。

## 3 导管加工余量计算

导管加工余量计算实现的技术路线如图2所示:首先按照第2节所述方法构建关键定位位置及管口空间位置与发动机实物一致的发动机数字孪生模型,利用三维光学测量系统,通过多个高帧频、高分辨率的工业级相机,测量拟合得到导管的直径

和空间中心轴线,确定导管的空间参数,并快速构建出导管三维模型<sup>[12-16]</sup>;再将与导管实体一致的导管三维模型加载到相应的接管口,进行虚拟装配<sup>[17]</sup>。对齐测量导管两端直线段与管口几何中心、测量导管装配参考点与设计模型参考点,在限定空间内调整装配参考点与设计模型参考点的距离,获得一系列空间状态下的一组导管端面与其轴线垂直度、导管对接错位值等接口工艺参数<sup>[18-19]</sup>。

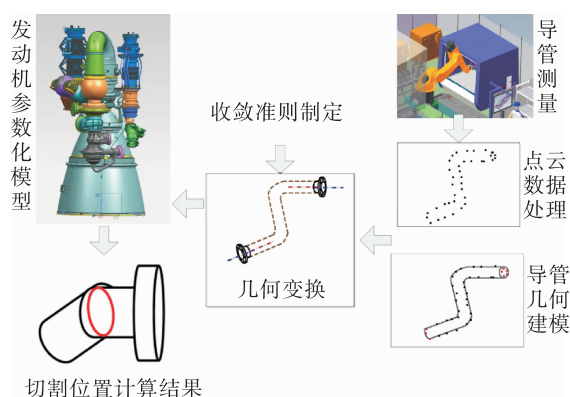


图2 导管加工余量计算技术路线

Fig.2 Technical route of machining allowance calculation for pipeline

### 3.1 导管三维模型重构

为提高建模效率,将导管三维数据由其中心线以及外径两个物理量来简化描述,通过测量得到导管两端圆心坐标及弯折点圆心坐标,通过等半径圆弧连线得到导管测量中心线,如图3所示,根据导管半径、测量中心线、等半径圆弧等特征信息<sup>[20]</sup>,自动完成导管的三维重建。

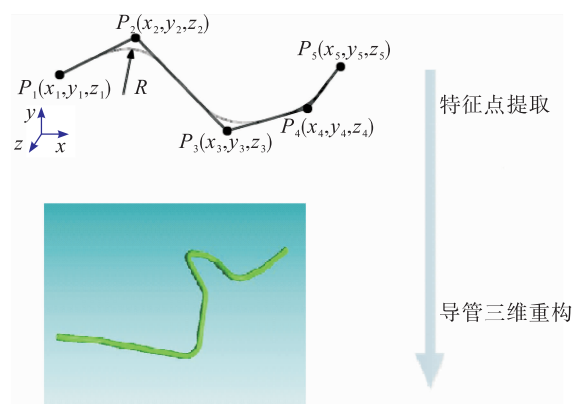


图3 导管中心线提取及三维重构

Fig.3 Centerline extraction and 3D reconstruction of pipeline

### 3.2 导管虚拟装配

将测量重构得到的导管三维模型加载到经过实际测量数据驱动的发动机参数化模型上,进行虚拟装配。经过实际测量数据驱动的与导管连接的两个法兰的空间位置都已固定,则两个法兰的轴向已经确定。导管与法兰A和法兰B装配后,最佳的效果应当是导管A端的轴向与法兰A的轴向重合,同时导管B端的轴向与法兰B的轴向重合,如图4所示。因此,先找出导管和法兰的轴向,然后通过空间坐标变换,将导管旋转平移到法兰坐标系,使它们之间的轴向距离偏差之和最小,此时的导管位置即为最佳装配位置。

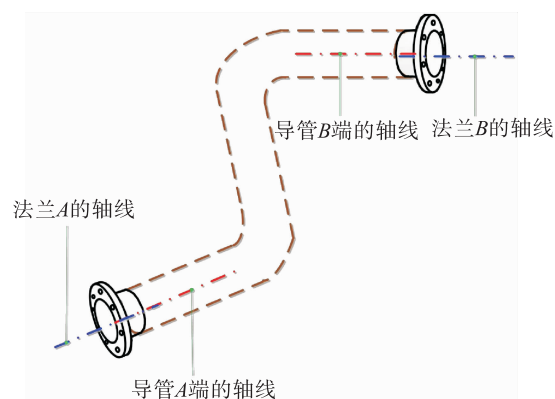


图4 导管与法兰虚拟装配

Fig.4 Virtual assembly of pipeline and flange

导管虚拟装配主要包括以下步骤:

- 1) 对齐测量导管两端直线段与法兰几何中心;
- 2) 对齐测量导管装配参考点与设计模型参考点;

3) 在限定空间内调整装配参考点与设计模型参考点的距离,获得一系列位姿空间状态下的一组导管端面与其轴线垂直度、导管对接错位值等接口工艺参数<sup>[22-23]</sup>。

### 3.3 导管切割位置及加工余量最优值求解

以法兰管口为基准,构建基准平面,该平面与导管(假设已经配准)相交,得到一条封闭的交线,如图5(a)所示,该交线所在的平面即为导管的切割平面。通过计算导管端口到切割平面的距离,可以得出切割余量,如图5(b)所示。



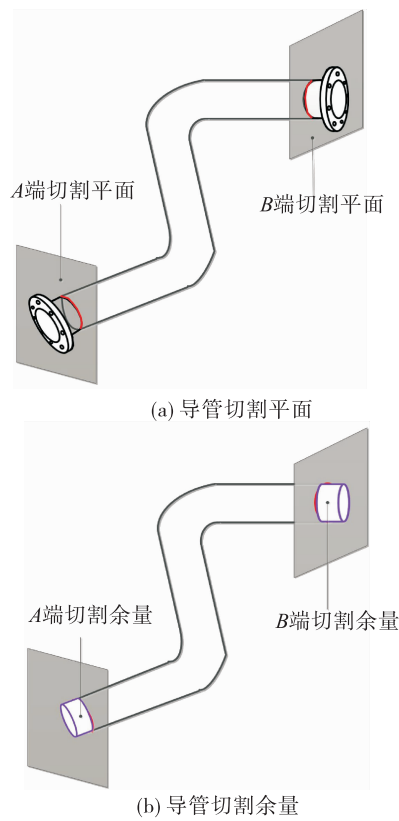


图 5 切割余量计算示意图

Fig.5 Schematic diagram of cutting allowance calculation

在导管装配时,以导管端面与其轴线垂直度、导管对接错位值等工艺要求作为约束条件,具体如下。

1) 导管端面与其轴线垂直度

导管端面与其轴线垂直度  $H$  如图 6 所示,理想状态下  $H$  值越接近于 0,导管焊接质量越好。导管端面与其轴线垂直度  $H$  工艺要求如表 1 所示。

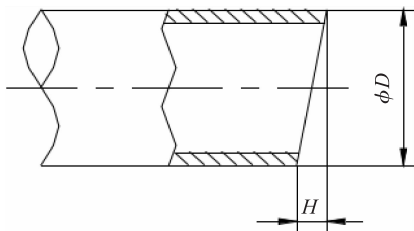


图 6 导管端面与其轴线的垂直度

Fig.6 Perpendicularity of pipeline end and its axis

2) 导管对接错位值

导管对接错位值是指导管两端与其焊接的零件的对接错位,如图 7 所示,工艺要求见表 2。其中, $\delta$  为管路壁厚。

表 1 导管端面与其轴线的垂直度  $H$  工艺要求值

Tab.1 Process requirement value of perpendicularity	
$H$ of pipeline end face and its axis 单位:mm	
管径 $D$	垂直度 $H$
$D \leq 12$	$H \leq 1.0$
$12 < D \leq 16$	$H \leq 1.3$
$16 < D \leq 20$	$H \leq 1.5$
$20 < D \leq 30$	$H \leq 1.7$
$30 < D \leq 48$	$H \leq 2.4$
$48 < D \leq 60$	$H \leq 3.0$
$D > 60$	$H \leq 3.5$

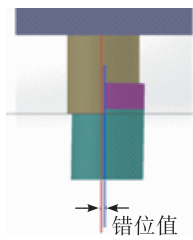


图 7 导管对接错位值

Fig.7 Misalignment value of pipeline butt

表 2 导管对接错位值工艺要求值

要求	焊缝全长 错位高度	局部	
		错位高度	错位占焊缝全长的百分比/%
I 级不大于	0.1 $\delta$	0.2 $\delta$	20
II 级不大于	0.15 $\delta$	0.25 $\delta$	20
III 级不大于	0.25 $\delta$	0.35 $\delta$	20

在上述约束条件下,以导管装配综合偏差(导管端面与其轴线垂直度、导管对接错位值)最小建立导管余量去除多目标优化模型为<sup>[20]</sup>

$$\begin{cases} \min \delta(x) = \{\delta_1(x), \delta_2(x)\} \\ \text{st. } 0 < x < d \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\delta(x)$  为导管装配综合偏差,是目标函数; $\delta_1(x)$  为导管端面与其轴线垂直度; $\delta_2(x)$  为导管对接错位值,是子目标函数; $x$  为测量导管装配参考点与设计模型参考点之间的距离,是决策空间; $d$  为测量导管装配参考点与设计模型参考点之间距离的极值,是向量搜索上限。

导管切割位置及加工余量寻优流程如图 8 所示,为了获得导管最优装配位置及最佳切割余量,调整测量导管装配参考点与设计模型参考点之间的距离,并循环调用 UG NX 进行虚拟装配,获得导

管装配空间位置解集及导管切割参数集。以导管端面与其轴线垂直度及导管对接错位值最小为优化目标函数,采用决策理论对多个空间位置解集进行寻优<sup>[23]</sup>,求出  $x$  的 Pareto 最优解,进而确定管路两端最佳切割余量。系统根据 Pareto 最优解输出导管的各项切割工艺参数。

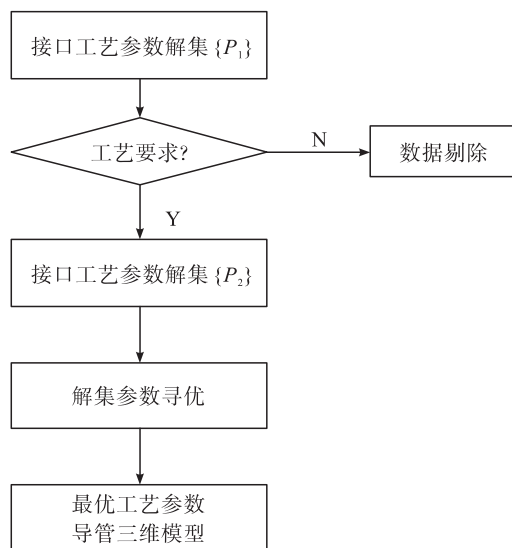


图 8 导管切割位置及余量计算寻优流程图

Fig. 8 Optimization flow chart of pipeline cutting position and allowance calculation

## 4 应用效果

以某管路为例,通过三维扫描,如图 9 所示,生成导管三维模型,如图 10 所示,并在发动机数字孪生模型上进行虚拟装配,通过改变设计参考点在球体内的空间位置(决策空间),以满足导管端面与其轴线垂直度、导管对接错位值工艺要求为约束条件,以导管端面与其轴线垂直度、导管对接错位值最小为目标函数,获取多组接口工艺参数解集(切割余量  $L$ , 导管端面与其轴线垂直度  $A$ )。



图 9 导管三维扫描

Fig. 9 3D scanning of pipeline

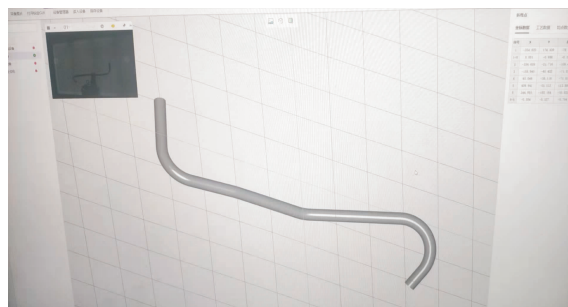


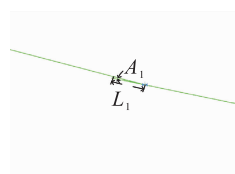
图 10 导管三维模型重构

Fig. 10 3D model reconstruction of pipeline

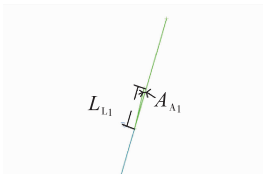
如图 11 ~ 图 13 所示,通过移动参考点位置获得了多组接口工艺参数解集。



(a) 虚拟装配空间位置1



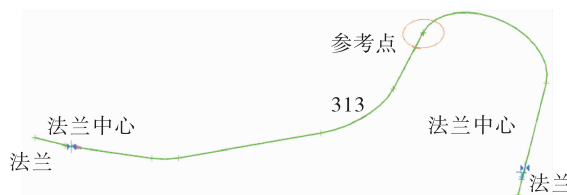
(b) A端求解结果



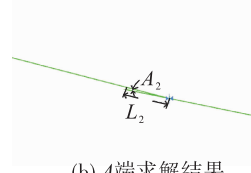
(c) B端求解结果

图 11 可行虚拟装配空间解 1

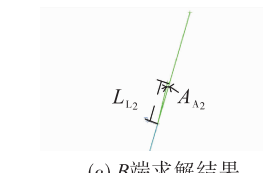
Fig. 11 Solution 1 of feasible virtual assembly space



(a) 虚拟装配空间位置2



(b) A端求解结果



(c) B端求解结果

图 12 可行虚拟装配空间解 2

Fig. 12 Solution 2 of feasible virtual assembly space

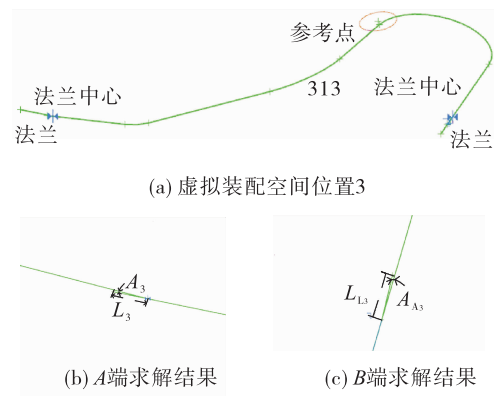


图 13 可行虚拟装配空间解 3

Fig. 13 Solution 3 of feasible virtual assembly space

通过多次迭代获得了如式(2)所示的接口工艺参数解集,依据导管端面与其轴线垂直度、导管对接错位值工艺要求对解集进行数据处理。首先剔除不满足工艺要求的参数组,其次依照参数优先级

对各参数组进行排序,最后反推出满足最优条件的控制点位置 and 对应导管的接口工艺参数,从而完成导管切割位置的寻优。

$$\left\{ \begin{matrix} A_1 & L_1 & A_{A_1} & L_{L_1} \\ A_2 & L_2 & A_{A_2} & L_{L_2} \\ A_3 & L_3 & A_{A_3} & L_{L_3} \\ A_4 & L_4 & A_{A_4} & L_{L_4} \\ \vdots & & & \\ A_n & L_n & A_{A_n} & L_{L_n} \end{matrix} \right\} \quad (2)$$

采用本文所述方法,针对某型液体火箭发动机 16 项导管进行加工,生产的 16 项导管全部符合工艺要求,单根导管加工时间不超过 15 min,一次装配合格率达 100%,部分导管工艺要求满足情况如表 3 所示。

表 3 导管加工工艺要求满足情况

Tab. 3 Compliance of pipeline processing process requirements												单位:mm	
序号	连接端	导管端面与其轴线垂直度		直线段		对接间隙		导管对接错位值		装配间隙			
		要求	实测	要求	实测	要求	实测	要求	实测	要求	实测		
1	A <sub>1</sub>	≤2.4	0.0	20~38	35	≤0.1	0	≤0.3	0.010	≥5	满足		
	B <sub>1</sub>	≤2.4	0.0	85~95	92	≤0.1	0	≤0.3	0.005				
2	A <sub>2</sub>	≤1.7	0.7	220~235	230	≤0.1	0	≤0.25	0.013	≥5	满足		
	B <sub>2</sub>	≤1.7	0.5	80~92	90	≤0.1	0	≤0.25	0.008				
3	A <sub>3</sub>	≤1.7	1.3	45~55	55	≤0.1	0	≤0.25	0.009	≥10	满足		
	B <sub>3</sub>	≤1.7	1.1	195~225	215	≤0.1	0	≤0.25	0.014				

5 结语

本文重点研究了数字化制造技术在液体火箭发动机导管定制化加工中的应用,针对液体火箭发动机导管定制化生产的特点,通过测量系统实际测量数据驱动发动机参数化模型,基于该模型以导管端面与其轴线垂直度、导管对接错位值最小的多约束条件下的加工余量计算方法可确定最优导管加工方案,采用本方法生产的导管全部合格交付,满足了装配要求,显著提高了导管生产效率,对液氧煤油发动机批量化生产具有积极意义。

参考文献:

[1] 朱光辰,魏鹏威,侯向阳,等. 提高航天器管路总装效率的技术途径研究[J]. 航天器工程,2009,18(4):78-83.

[2] 刘检华,刘少丽,宁汝新,等. 管路数字化布局设计与制造及检测集成技术[J]. 计算机集成制造系统,2015,21(4):941-954.

[3] 马海钊,陈雪梅,李光俊,等. 导管构件的三坐标测量机自动化检测技术的研究与应用[J]. 锻压技术,2021,46(4):172-179.

[4] 吕彦盈. 航空导管数字化制造技术研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学,2017.

- [5] 刘少丽,张文雄,吴天一,等. 基于蛇模型的管路三维重建方法[J]. 北京理工大学学报,2021,41(7):721-727.
- [6] 张桁维,梁晋,孟繁昌,等. 基于点云融合的管路精确测量方法[J]. 航空制造技术,2018,61(5):51-54.
- [7] 罗艺进. 飞机多分支焊接导管法兰安装位姿的摄影测量方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2020.
- [8] 魏强,刘凤财,苏再为,等. 基于点云测量的运载火箭异形管路数字化制造技术[J]. 深空探测学报(中英文),2021,8(1):34-41.
- [9] 赵长喜,姜坤,张佳朋,等. 航天器管路数字化制造技术与实践[J]. 航天器环境工程,2013,30(6):659-662.
- [10] WU X J, ZHOU T Z, TONG Z X. Experimental study on surface quality in elasticity ball-end grinding of M330 steel[J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience,2017,14(11):5372-5377.
- [11] 王艳红,高亚飞,赵小青,等. 液体火箭发动机导管数字化制造技术分析[J]. 机械研究与应用,2019,32(2):46-49.
- [12] 王津,徐寅,董振义,等. 大型运载火箭尾舱管路总装过程仿真技术研究[J]. 航空精密制造技术,2020,56(2):28-30.
- [13] 陈志英,樊江,魏文庆,等. 发动机外部管路系统的计算机辅助敷设研究[J]. 推进技术,1999,20(6):58-61.
- [14] 许旭东,李光俊. 飞机导管数字化生产线探讨[J]. 航空制造技术,2005,48(9):83-85.
- [15] 许旭东,李光俊. 焊接类导管数字化柔性制造技术[J]. 航空制造技术,2007,50(6):48-50.
- [16] 王成恩,柳强,白晓兰,等. 航空发动机复杂约束空间内管路敷设技术[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(11):2327-2332.
- [17] 徐斌,宋宝玉,王兆海. 发动机零件特征参数化模型[J]. 哈尔滨工业大学学报,2000,32(1):8-11.
- [18] 刘元朋,陈良骥,李明,等. 航空发动机管路测量数据分割方法[J]. 航空学报,2008,29(2):285-291.
- [19] 张天,唐承统,刘检华. 基于多目视觉的弯管空间参数测量方法[J]. 仪器仪表学报,2013,34(2):260-267.
- [20] 金鹏,刘检华,刘少丽,等. 基于中心线的管路端点位置精确测量方法[J]. 计算机集成制造系统,2016,22(10):2284-2293.
- [21] 毛燕,詹梅. 数字化制造技术在 ARJ21 飞机导管研制中的应用[J]. 锻压技术,2008,187(4):120-123.
- [22] 刘元朋,陈良骥,冯宪章,等. 基于特征的航空发动机管路反求建模方法研究[J]. 机床与液压,2008,36(5):22-25.
- [23] 李振强,侯清海,王永军,等. 导管三维快速建模及模型预处理技术研究[J]. 制造业自动化,2007,29(3):15-18.