

文章编号: 2097-1974(2024)06-0076-07

DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20240612

火箭部段对接孔的数字量协调加工误差分析与控制方法研究

于炳涛, 王洋, 乔腾飞, 郭浩, 臧建新
(首都航天机械有限公司, 北京, 100076)

摘要: 针对火箭部段对接孔数字量协调的难点, 分析数字量协调加工的影响因素确定要因, 并通过对比试验和理论分析的方法分析测量误差和定位误差两种要因对加工精度的影响。在此基础上, 提出数字量协调加工控制方案, 并以典型部段端框为对象开展协调制孔试验, 试验结果表明, 数字量协调加工孔位精度符合装配协调要求, 与工装平台试对协调, 为端框数字量协调加工的工程化应用奠定了基础。

关键词: 运载火箭; 模拟量协调; 端框; 数字量协调; 误差分析

中图分类号: V421

文献标识码: A

Research on Error Analysis and Control Method of Digital Coordination Machining of Coordination Hole of the Carrier Rocket Part

YU Bingtao, WANG Yang, QIAO Tengfei, GUO Hao, ZANG Jianxin
(Capital Aerospace Machinery Company Limited, Beijing, 100076)

Abstract: In the view of the difficulty of digital coordination of coordination hole of the carrier rocket part, the influencing factors of digital coordination processing are analyzed and the main reasons are determined, and the influence of measurement error and positioning on the machining accuracy is analyzed through comparative test and theoretical analysis. On this basis, the digital coordinated machining control scheme is put forward, and the typical part is taken as the object to carry out coordinated hole test, the test results show that the digital quantity coordination machining hole position accuracy meets the requirements of assembly coordination, and the test coordination with the tooling platform, laying the foundation for the engineering application of the end-frame digital quantity coordinated machining.

Keywords: carrier rocket; analog coordination; end-frame; digital coordination; error analysis

0 引言

目前, 火箭制造成形涉及模拟量协调和数字量协调两种方式, 其中部段间协调一般采用模拟量协调方法, 即通过实体钻模定制对接协调孔, 从而保证对接协调孔的位置一致性。此种方法涉及大量钻模等工艺装备, 研制维护成本高、协调效率低、安全风险高, 已无法满足高速发展的火箭发射任务。近年来, 随着数控加工技术以及数字化测量技术的发展和深化应用^[1-7], 航天领域逐步在全新型号的研制过程中应用全数字量的协调技术^[8-9], 并取得了一定的技术积累。如某新型运载火箭研制初期就制定了数字量协调方案, 部段对接孔均采用数控加工方式。对于传统在

役产品, 为避免按理论值制孔后部段和现存的工艺装备不协调问题, 相关总装厂正在探索基于模拟量标准工装的改进型对接孔数控加工方法, 即将钻模的测量坐标作为数控制孔的点位输入, 指导加工。该方法针对性地解决了在役火箭部段对接孔的数字化协调问题, 但其误差源增多、机理更加复杂, 目前相关的理论和应用研究较少, 还需解决钻模孔位坐标的高精度测量、端框的数控协调加工定位偏差等导致加工误差的问题。

为此, 本文开展在役火箭部段对接孔的数字量协调加工误差分析研究, 分析各个环节的误差因素以及控制方法, 为实现现役产品数字量加工转型奠定

基础。

1 部段对接孔数字量协调加工影响要因分析

1.1 钻模协调

为保证产品的协调互换，尤其是各部段之间接口的协调，需要采用相互协调的工艺装备作为产品制造、检验的重要手段。

标准钻模是在运载火箭制造过程中，为部段各接口间工艺装备之间的协调和产品的互换而专门设计制造的工艺装备母体，只用于协调加工、复制、检修工作钻模，而不直接用于型号产品的生产和检验。标准钻模主要用于协调平面上对接孔的位置，是协调钻模的校验基准，也是工作钻模的协调依据^[10]。

工作钻模由标准钻模协调而来，用于部段之间接口的协调，以模拟量传递外形和交点结合尺寸并控制

其相对位置，直接用于部段产品接口的加工生产。

1.2 数字量协调加工工艺与流程

采取一种基于模拟量标准工装的改进型数字量协调方案是实现现役火箭部段对接孔数控加工的最优途径。其原理是将钻模的测量坐标作为数控制孔输入，具体流程如图1所示。将钻模的所有孔位坐标按照象限顺序依次精测，并建立钻模的数据库，为数控加工提供加工点位数据支撑^[11-15]。按照对接框实际孔位在数据库中挑选出相应点位坐标后，编制加工程序，在数控设备上完成定位后进行制孔工作。其中，钻模坐标采集使用三坐标或者其他精测设备完成数据测量采集，钻模数据库按照钻模编号分别以极坐标形式存储，对接框产品定位使用定位工装保证产品外形尺寸、加工过程刚度以及与设备转台同轴度满足要求。



图1 数字量协调加工流程

Fig.1 The process of digital quantity coordinates

1.3 影响要因分析

从数字量协调加工流程中可以看出，加工误差主要分为测量误差、定位误差、机床加工误差和其他误差。如图2所示，测量误差主要取决于精测设备的测量精度和测量方法，定位误差主要取决于工装、产品的定位精度以及对刀定位精度，机床加工误差取决于机床各轴自身的定位精度，其他误差主要与刀具磨损、机床振动等因素有关。可以看到，在协调加工过程中，需要人为控制的误差主要是测量误差和定位误差，其余误差均与设备本身精度相关。本文主要分析测量误差和定位误差对加工精度的影响，并给出控制措施。

2 基于对比试验的测量误差分析与控制

2.1 试验过程

选用某典型实体工作钻模作为测量对象，采用三坐标测量机和激光跟踪仪分别对工作钻模的点位进行数据采集，测量设备见图3。以钻模端面作为基准平面，分别以I、II、III、IV四个象限处的定位销孔为基准拟合圆周中心为坐标原点，I-III象限连线为X轴方向，II-IV象限连线为Y轴方向建立坐标系，测量孔位P的坐标，如图4所示。按照建立的坐标系分别顺时针测量出钻模上对接孔的极坐标值，得到实体钻模所有对接孔的数字化坐标信息。相同状态下，分别采用激光跟踪测量仪、三坐标测量机开展测量试验A、测量试验B，前16个测量结果如表1所示。

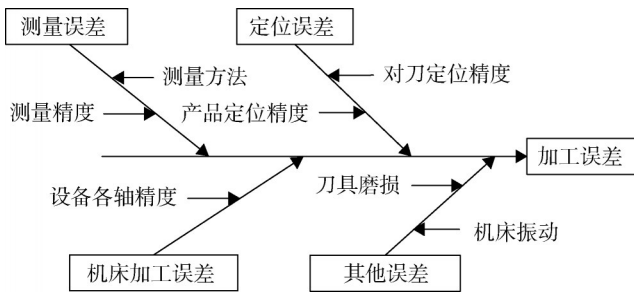


图2 加工误差分析

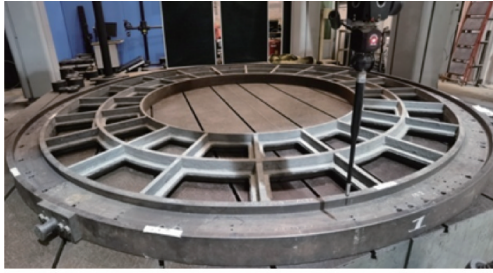
Fig.2 Machining error analysis diagram



a) 激光跟踪仪

图3 测量设备

Fig.3 Measuring equipment drawing



b) 三坐标测量机

续图3

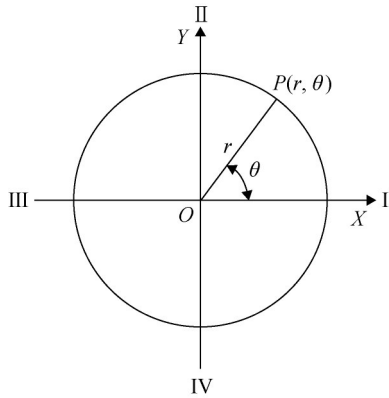


图4 测量坐标系

Fig.4 Measuring coordinate system

表1 测量结果

Tab.1 Measuring result

序号	理论角度/ 度/(°)	理论半径/ mm	试验A 角度/(°)	试验A 半径/mm	试验B 角度/(°)	试验B 半径/mm
1	0.0000	1646.0000	0.0000	1646.2010	0.0000	1646.0298
2	7.5000	1646.0000	7.4970	1646.0860	7.5016	1646.0250
3	15.0000	1646.0000	14.9930	1646.4200	14.9980	1646.0721
4	22.5000	1646.0000	22.5020	1645.9980	22.5046	1645.9560
5	30.0000	1646.0000	29.9960	1646.1470	30.0004	1646.0215
6	37.5000	1646.0000	37.4940	1646.2450	37.4990	1646.0646
7	45.0000	1646.0000	44.9950	1646.1800	44.9998	1646.0867
8	52.5000	1646.0000	52.4910	1646.3320	52.4973	1646.1257
9	60.0000	1646.0000	59.9920	1646.4440	60.0007	1646.2221
10	66.5000	1646.0000	66.4900	1645.8960	66.4978	1645.7509
11	68.5000	1646.0000	68.4920	1646.1160	68.5007	1645.9893
12	71.8445	1635.0000	71.8250	1635.0830	71.8360	1634.9476
13	78.1555	1635.0000	78.1380	1635.0520	78.1451	1634.9062
14	81.5000	1646.0000	81.4940	1646.1220	81.5028	1646.0049
15	83.5000	1646.0000	83.4900	1646.2440	83.4981	1646.0989
16	90.0000	1646.0000	89.9900	1646.1520	89.9998	1646.1061

2.2 数据分析

将测量试验A和测量试验B结果整理记录, 并与

钻模理论点位数据对比, 分别计算与理论点位的差值, 如图5所示。

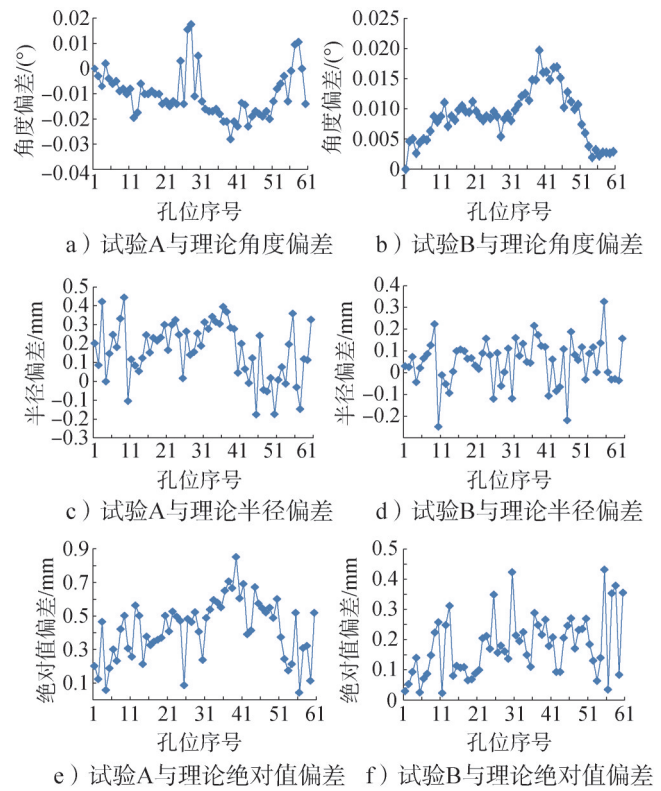
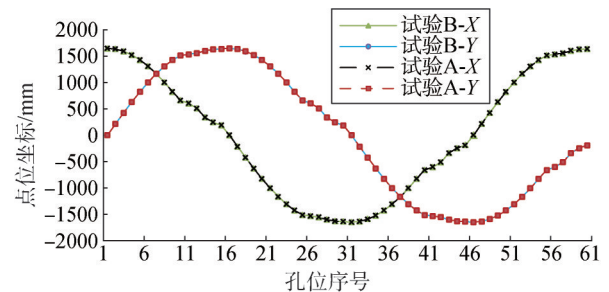


图5 测量结果与理论数据对比

Fig.5 The comparison between the measured results and the theoretical data

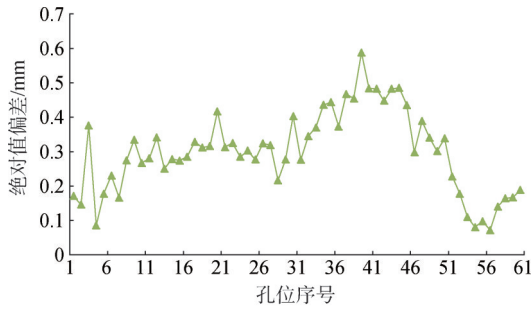
由图5可以看出, 实体钻模的实际点位坐标与理论点位坐标存在差异, 并存在明显波动, 这是由于实体钻模实际加工时产生的尺寸偏差以及长时间存放使用产生的变形导致的偏差。试验B与理论点位的偏差要小于试验A与理论点位的偏差, 将试验B与试验A的测量结果进行分析对比, 如图6所示。



a) 试验A、试验B直角坐标测量结果对比

图6 测量结果对比

Fig.6 The comparison between the measured results



b) 试验A、试验B绝对值偏差
续图6

由图6可以看到，试验A和试验B的测量结果走势基本一致，二者的测量数值相差较多，偏差范围在0.6 mm之内浮动。试验B一般需要在恒温条件下的固定位置进行测量，测量精度为0.01 mm，采用自动或半自动的测量方式，测量结果精度相对较高。试验A优点在于携带方便，可以适应复杂的现场环境，测量精度为0.02 mm，需要人工引导靶球进行测量，对操作人员要求较高。

2.3 结论与控制措施

由以上数据分析可以看出：

- a) 实体钻模的实际点位坐标与理论点位坐标存在明显差异，不可使用理论点位坐标直接进行数控协调加工，需要对实体钻模的孔位进行精测。
- b) 三坐标相较于激光跟踪仪来说测量精度更高，测量方式受人为操作干扰更小，更适合用于实体钻模的点位精测，可以减少点位坐标采集过程中产生的误差。

3 基于算法分析的定位误差理论分析

3.1 算法模型建立

端框的结构如图7所示，主要由L型截面型材折弯后拼接组合而成，在高度方向上分布成组对接孔，用于相邻部段之间的连接，加工设备采用回转台结构。设备示意如图8所示，其中x轴控制回转台中心与主轴中心的偏移量，z轴用于调整加工点位距回转台中心距离，B轴用于控制加工点位的旋转角度，Y轴控制加工深度。加工编程采用工艺孔对刀偏置编程方法，故影响产品加工精度的主要为x轴以及z轴的定位精度，简化模型如图9所示。



图7 端框示意
Fig.7 End-frame diagram

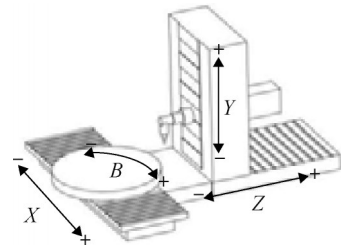


图8 加工设备示意
Fig.8 Machining equipment diagram

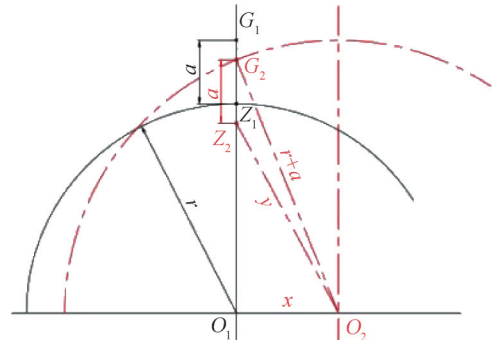


图9 误差分析模型
Fig.9 Error analysis model

可以看到G₁点为转台上一固定孔位，其到转台中O₁距离为r+a保持不变，当采用工艺孔对刀偏置编程方法时，加工点位Z₁会相对于G₁点偏移距离a，最终加工路径为以O₁为圆心，r为半径的圆。当x轴发生偏移距离x时，工艺孔位置变为G₂，加工点位Z₂会相对于G₂点偏移距离a，最终加工路径为以O₂为圆心，y为半径的圆。通过归纳可以得到：

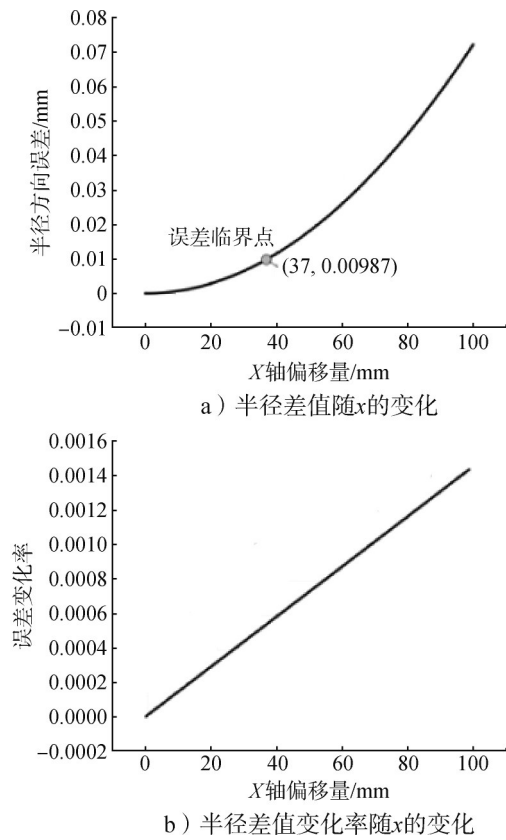
$$y = \sqrt{[(r+a)^2 + a^2 - 2a\sqrt{[(r+a)^2 - x^2]}]} \quad (1)$$

$$\Delta y = \sqrt{[(r+a)^2 + a^2 - 2a\sqrt{[(r+a)^2 - x^2]}]} - r \quad (2)$$

式中 y为实际加工点位半径；r为理论加工半径；a为工艺孔与理论加工半径差值；x为机床x轴偏移量；Δy为偏移后的半径与之前半径的差值。

3.2 数据分析

绘制半径差值随偏移量x变化的图像如图10所示，可以看到，随着x轴偏移量的逐渐增大，半径方向的误差也在增大，若要保证半径方向误差小于0.01 mm，则x轴的偏移量要小于37 mm。而在实际生产中，x轴的偏移量可以控制在1 mm以内，半径误差几乎趋近于零，说明半径方向的误差对x轴的偏差不敏感。

图10 半径差值随偏移量 x 的变化Fig.10 Plot of radius difference with offset x

3.3 结论与控制措施

通过数模分析可以看出,半径方向的误差对 X 轴的偏差敏感,主要受 Z 轴的偏差影响,圆周方向的误差由 B 轴的偏差决定,故在定位误差的控制上主要应减少 B 轴和 Z 轴的定位偏差。可以采用同心过渡环工装以及在平台或过渡环上制标准工艺孔作为基准孔的方式,减少产品的定位偏差,提高产品对接孔的加工精度。

4 试验验证

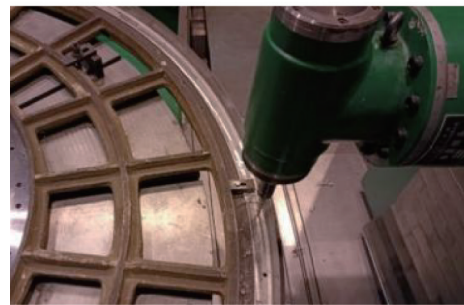
4.1 试验过程

针对前文试验及分析结果,得出对接孔数控协调加工的控制措施并开展试验验证。选取组合后直径为3 350 mm的铝合金半框作为加工试验件,加工对接孔数量44个,其中4个定位销孔,40个对接孔。试验设备及试验加工过程如图11所示。以测量误差分析试验中实体钻模的三坐标测量点位作为数据来源,选取其中4个定位销孔和40个对接孔的点位坐标输入。制孔设备采用立式镗铣床,该机床总体布局为刨台卧式侧挂主轴箱结构,前、后床身分离,T字型结构布局,

五轴在数控系统的控制下实现任意四轴联动加工。按照选取的点位坐标编制数控加工程序,先钻制4个定位销孔作为基准,随后按照I、II、III、IV的顺序依次完成其余对接孔的钻制。



a) 加工设备实物



b) 试验加工过程

图11 端框数控协调试验

Fig.11 End-frame NC coordination

4.2 验证情况分析

将制孔后的端框试验件进行三坐标测量,按照实体钻模的测量顺序测量端框试验件的对接孔,坐标系原点以对接框试验件4个定位销孔拟合圆心为原点测量,得到的前12个测量结果如表2所示。

表2 端框试验件测量结果

Tab.2 Measuring results of end-frame test piece

序号	钻模角度/(°)	钻模半径/mm	试验角度/(°)	试验半径/mm
1	0.0000	1646.0298	0.0000	1646.0838
2	7.5012	1646.0256	7.5021	1646.1689
3	14.9981	1646.0721	15.0037	1646.2698
4	22.5043	1645.9567	22.5132	1645.7731
5	30.0000	1646.0213	30.0089	1646.1612
6	37.4999	1646.0641	37.5055	1646.2525
7	44.9998	1646.0865	45.0045	1646.1098
8	52.4971	1646.1257	52.4999	1646.0467
9	60.0000	1646.2223	60.0010	1646.0154
10	71.8365	1634.9474	71.8298	1635.1413
11	78.1453	1634.9062	78.1373	1634.8356
12	89.9999	1646.1063	89.9876	1646.2058

图12是试验测量结果,可以看到制孔后测量结果同钻模数据比对结果良好。试验件对接框测量结果与钻模的整体偏差在0.2 mm之内,符合装配协调精度要求。但存在个别点位偏差在0.3~0.4 mm之间,这是由于试验件对接框在制孔后整体结构偏软,没有实体钻模良好的刚性,测量时为自由状态,存在测量偏差。进一步将试验件对接框同型架平台试对,使用定位销插紧定位后试验件为压紧状态,故可以与型架平台协调。

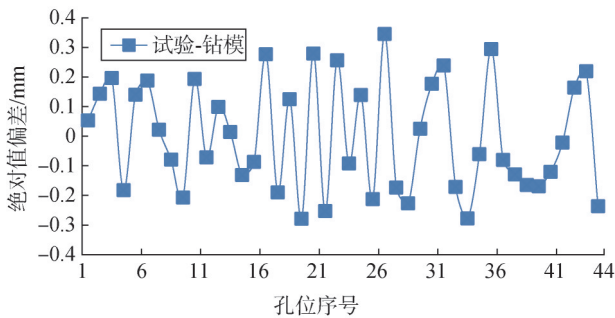


图12 试验测量结果对比

Fig.12 Comparison of measured results

5 结论

本文针对运载火箭部段对接框数字量协调的工艺流程,分析数字量协调工艺加工精度的影响因素,研究加工偏差随不同影响因素的变化规律,制定减少加工误差的工艺方法,并进行了验证试验。

a) 测量对比试验表明,实体钻模的实际点位坐标与理论点位坐标存在明显差异,不可使用理论点位坐标直接进行数控协调加工,需要对实体钻模的孔位进行精测;三坐标相较于激光跟踪仪来说测量精度更高,测量方式受人为操作干扰更小,更适合用于实体钻模的点位精测,可以减少点位坐标采集过程中产生的误差。

b) 误差理论分析表明,半径方向的误差对X轴的偏差不敏感,可以采用同心过渡环工装以及在平台或过渡环上制标准工艺孔作为基准孔的方式,减少产品的定位偏差,提高产品对接孔的加工精度。

c) 对接框试验件对接孔与型架平台试对协调,误差范围在0.2 mm之内,验证了采用实体钻模采集点位坐标数据进行数控协调加工工艺方法的可行性。

本文的研究结果为对接框数字量协调加工的工程化应用奠定了基础,对火箭制造数字化进程有重大

意义。

参 考 文 献

- [1] 黄小春,李强,申定贤,等.新一代大型运载火箭数字化对接技术系统研究[J].航空精密制造技术,2021,57(5):20-23.
HUANG Xiaochun, LI Qiang, SHEN Dingxian, et al. Research on digital docking technology system of new generation large-scale launch vehicles assembly[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2021, 57(5): 20-23.
- [2] 成书民,张海宝,康永刚.数字化装配技术及工艺装备在大型飞机研制中的应用[J].航空制造技术,2014(22):10-15.
CHENG Shumin, ZHANG Haibao, KANG Yonggang. Application of digital assembly technology and process equipment in large aircraft development[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(22): 10-15.
- [3] 邹冀华,刘志存,范玉青.大型飞行器舱段数字化装配方法[J].制造业自动化,2007(1):1-4+24.
ZOU Jihua, LIU Zhicun, FAN Yuqing. Digital assembly method for large aircraft section[J]. Manufacturing Automation, 2007(1): 1-4+24.
- [4] 国冰,孙伟,赵鸿飞,等.新型运载火箭芯一级发动机垂直接装配方案设计[J].导弹与航天运载技术,2019(2):101-105.
GUO Bing, SUN Wei, ZHAO Hongfei, et al. Design of vertical docking assembling between the rocket engine and main structure body of a launch vehicle's core first stage[J]. Missiles and Space Vehicles, 2019(2): 101-105.
- [5] 李光丽,孟月梅,司守钰.面向三维装配工艺的数字化检测规划技术研究[J].航空制造技术,2015(21):130-133+137.
LI Guangli, MENG Yuemei, SI Shouyu. Assembly measure process planning based on the 3D assembly process model[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(21): 130-133+137.
- [6] 田俊,李晓青,王亮,等.某型飞机数字量协调技术分析及在精加工生产线中的应用[J].航空制造技术,2015(21):150-154.
TIAN Jun, LI Xiaoqing, WANG Liang, et al. Digital coordination technology analysis and application in finish machining production line of an aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015 (21): 150-154.
- [7] 郭具涛,戴铮,钟珂珂,等.基于数字孪生的航天产品自适应装调方法研究[J].航天制造技术,2021(6):56-60+66.
GUO Jutao, DAI Zheng, ZHONG Keke, et al. Research on adaptive assembly and adjustment method of aerospace products based on digital twin[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2021(6): 56-60+66.
- [8] 王学刚,李扬,郝丁,等.基于数字量协调技术的航天产品工艺容

- 差应用研究[J]. 航天制造技术, 2017(3): 25-28.
- WANG Xuegang, LI Yang, HAO Ding, et al. Application research on aerospace product process tolerance based on digital coordination technology[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2017(3): 25-28.
- [9] 李洋, 韩磊, 赵怡, 等. 一种基于模拟量的数字量协调补偿制孔加工方法[J]. 机械工程师, 2022(9): 170-172.
- LI Yang, HAN Lei, ZHAO Yi, et al. A digital quantity coordination compensation hole-making method based on analog quantity[J]. Mechanical Engineer, 2022(9): 170-172.
- [10] 周奕善. 关于工艺装备的厂际协调问题[J]. 航天工艺, 1992(3): 55-57.
- ZHOU Yishan. Coordination between plants on process equipment [J]. Aerospace Technology, 1992(3): 55-57.
- [11] 程雅南. 三坐标测量机的应用与功能拓展[J]. 机械管理开发, 2018, 33(10): 45-46.
- CHENG Yanan. Application and function expansion of CMM[J]. Mechanical Management and Development, 2018, 33(10): 45-46.
- [12] 杜锦文, 张大勇, 赵文利, 等. 大型数控龙门铣床加工对接协调孔的精度补偿技术[J]. 制造技术与机床, 2013(9): 96-98.
- DU Jinwen, ZHANG Dayong, ZHAO Wenli, et al. Accuracy compensating technique of machining butt coordination hole on large NC gantry milling machine[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2013(9): 96-98.
- [13] 舒荣辉. 利用加工精度监测系统在数控机床上加工钻模[J]. 航天工艺, 1997(3): 28-31.
- SHU Ronghui. The drilling jig is machined on NC machine tool by using machining precision monitoring system[J]. Aerospace Technology, 1997(3): 28-31.
- [14] 王艳红. 钻模钻孔精度分析[J]. 精密制造与自动化, 2009(2): 60-64.
- WANG Yanhong. Analysis of drill die drilling accuracy[J]. Precise Manufacturing Automation, 2009(2): 60-64.
- [15] 伍世荣. 钻模钻孔位置误差分析[J]. 工具技术, 1999(12): 33-34.
- WU Shirong. Error analysis of drill hole position[J]. Tool Engineering, 1999(12): 33-34.

作者简介

于炳涛 (1994—), 男, 工程师, 主要研究方向为运载火箭部段铆接装配工艺。

王洋 (1988—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为运载火箭部段铆接装配工艺。

乔腾飞 (1998—), 男, 工程师, 主要研究方向为运载火箭部段铆接装配工艺。

郭浩 (1990—), 男, 技师, 主要研究方向为运载火箭部段铆接装配工艺。

臧建新 (1985—), 男, 高级技师, 主要研究方向为运载火箭部段铆接装配工艺。