异型载荷适配器工艺方案及精度测量方法研究

杨自鹏[1],刘 敏[2],周佑君[1],董 鹏[2],杨传成[2]

(1. 北京宇航系统工程研究所,北京 100076; 2. 首都航天机械有限公司,北京 100076)

摘 要:为适应新型航天器的功能需要,载荷适配器的结构也越来越复杂。针对某航天器的结构特点进行异型载荷适配器设计,为抵消某再入航天器的质心大偏移量,实现分离设计的自调平。在分析铆接技术和增材制造技术特点的基础上,对铆接和增材制造两种不同的工艺方案进行对比分析。结合异型载荷适配器实际制造精度测量需要,选用激光跟踪测量技术作为精度测量的方法。通过在某型上面级发动机喷管安装后轴线测量的应用案例分析可知,基于激光跟踪仪及最小二乘法的测量及数据处理方法,可应用在异型载荷适配器的精度测量中,所得的精确数据可作为后续分离设计时分离弹簧选配的依据。

关键词:精测; 激光跟踪仪; 工艺方案; 异型; 载荷适配器

中图分类号:V421 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.S117001

Study on processing scheme and precision measurement method of payload adapter with irregular shape

Yang Zipeng[1], Liu Min[2], Zhou Youjun[1], Dong Peng[2], Yang Chuancheng[2]

(1. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;
2. Capital Aerospace Machinery Corporation Limited, Beijing 100076, China)

Abstract: The structure of the payload adapter was becoming more and more complex to meet the needs of the new spacecraft. In order to offset the large deviation of the center of mass of a reentry spacecraft and realize the self-leveling of separation design, a payload adapter with irregular shape was designed according to the structural characteristics of a reentry spacecraft. Based on the analysis of the characteristics of riveting technology and additive manufacturing technology, two different process schemes of riveting and additive manufacturing were compared and analyzed. According to the actual manufacturing precision measurement needs of the payload adapter with irregular shape, laser tracking measurement technology was selected as the precision measurement method. Through the application case analysis of axis measurement after the installation of a certain type of upper-stage engine nozzle, it can be seen that the measurement and data processing method based on laser tracker and least square method could be applied to the payload adapter with irregular shape. And the obtained accuracy data could be used as the basis for the separation of spring selection in the subsequent separation design.

Key words: precision measurement; laser tracker; processing plan; irregular shape; payload adapter

收稿日期:2018-11-08; **修订日期**:2018-12-18

基金项目:装备预先研究基金(30502030101)

作者简介:杨自鹏(1987-),男,工程师,硕士,主要从事空间飞行器结构总体设计方面的研究。Email:229585729@qq.com

0 引 言

随着航天技术的飞速发展,人类探索太空、了解宇宙的新型航天器也越来越复杂，运载火箭在发射这些复杂构型的航天器时需为其定制专用的载荷适配器。再入式航天器作为一种质心轴线偏离中心轴线距离较大的航天器，为满足其复杂外形的结构安装及分离时刻的姿态精度要求，需为其设计一种能够抵消质心偏移的异型载荷适配器，可降低运载器发射再入式航天器时的质心偏差,实现自调平,达到配重轻量化,有效提升载荷效率的目的。此种异型载荷适配器不仅在工艺方案选择上受到很大限制,还对制造精度要求很高,且制造周期长、生产成本高。对于这类结构不规则、特征复杂的产品,传统精度测量方法一般难以实现，激光跟踪测量是一种高精度的测量方法，可以实现对制造产品设计符合性进行检验和获取实际制造偏差。

文中针对此类适应质心大偏移异型载荷适配器的结构特点,进行生产工艺方案对比;由于制造精度偏差影响分离弹簧的选配或调整，为满足再入式航天器分离姿态指标要求，需结合制造精度偏差进行分离弹簧选配或调整，因此需对异型载荷适配器进行精度测量。通过激光跟踪仪在某型缩比样机中的应用案例分析可知，此异型载荷适配器的生产检验及相关数据的获取可采用激光跟踪测量及最小二乘法[1]实现。

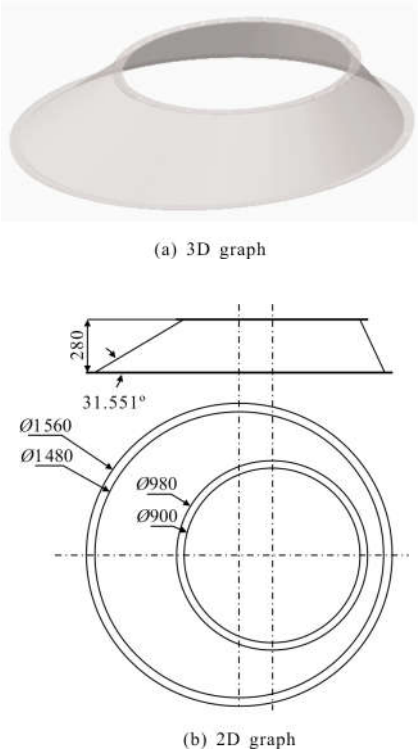
1 异型载荷适配器特点

某型再入航天器发射时，航天器横向质心与顶点坐标轴线存在较大偏移，运载器与航天器的质量特性见表 1。为了减少配重的质量、提升载荷效率，有效消除航天器大偏心对分离姿态的影响，设计了异型载荷适配器,三维建模及尺寸见图 1(a)、(b),其特点是载荷适配器为非对称结构，上端面理论轴线与航天器理论轴线重合，下端面理论轴线与运载器质心轴线重合，通过上端面理论轴线与下端面理论轴线预先偏移一定距离，实现航天器与运载器质心轴线的重合。

表 1 某航天器质量特性

Tab.1 Mass characteristics of a spacecraft

Product	Weight/kg	Horizontal center of mass/mm		Note
		Y	*Z*	
Spacecraft	980	52	0	Theoretical value
	±1.5%	±10	±5	Deviation value



(a) 3D graph

(b) 2D graph

图 1 异型载荷适配器理论图

Fig.1 Theoretical diagram of a payload adapter with irregular shape

2 载荷适配器工艺方案选择

为适应航天产品的功能需要，其构型也越来越复杂[2],传统的设计方法已无法满足新产品对功能、结构及质量等多约束的要求,但随制造技术的发展,设计思路也在发生着变化，以前结构设计过程除考虑产品要求外,更需要考虑结构设计的工艺可行性,限制了很多功能的发挥;如今随新技术的发展,可以以功能为优先的原则进行结构优化设计，工艺性不再成为制约结构优化的最大因素。异型载荷适配器结构可采用现有航天产品的大直径薄壁结构铆接技术、增材制造技术、复杂型面铸造技术、整体铣削技术等进行生产制造,考虑加工工艺性、生产效率及重量等因素影响，文中设计的非对称结构的异型载荷适配器，拟从铆接及增材制造两种工艺方案进行对

比分析,从中优选出最佳工艺方案。

2.1 铆接技术

在航天产品生产中普遍采用的铆接技术是一种特殊连接技术，通过铆钉或无铆钉连接技术将零件连接起来。简而言之就是指两个或多个且厚度不大的零件,在连接部位上打孔,然后安装铆钉,再用铆钉枪将其铆接成形,将不同零件连接在一起。异型载荷适配器采用铆接技术,其铆接工艺方案流程为:首先将上端框、下端框与型架工装进行定位及固定,然后将蒙皮与桁条、与上下端框进行固定,再在连接部位进行定位、打孔、铆钉安装,最后完成蒙皮与桁条或上下端框进行铆接。航天锥壳蒙皮加筋式产品的半自动钻铆,具有钻孔、铆接质量好、生产效率高、劳动条件好、操作者容易掌握等优点。

2.2 增材制造技术

激光增材制造技术又称激光 3D 打印技术,是一种完全不同于切削、铆接、蚀除等传统去除材料加工方式的离散分层——逐层累加的新型增材制造技术[3-4]。异型载荷适配器采用增材制造工艺方案,流程为：利用专门的分层软件在计算机中将零件三维数学模型划分成一系列薄层，然后控制聚焦激光束运动轨迹，使其根据分层模型数据逐层扫描加工处理,通过分层叠加(“生长”)成形进行制造,见图 2。增材制造技术可从三维数学模型直接进行实物的生产制造,属数字化近净制造过程,具有生产周期短、成形质量高、成形零件力学性能好、材料利用率高、工艺简单等优势,该技术适合材料范围广泛,对零件复杂性的边际成本为零,也就是说产品越复杂,采用 3D 打印技术性价比优势就越突显[5]。3D 打印突破了结构几何约束，能够制造出传统方法无法加工的非常规结构特征，这种工艺能力对于实现零部件轻量化、优化性能有极其重要的意义。

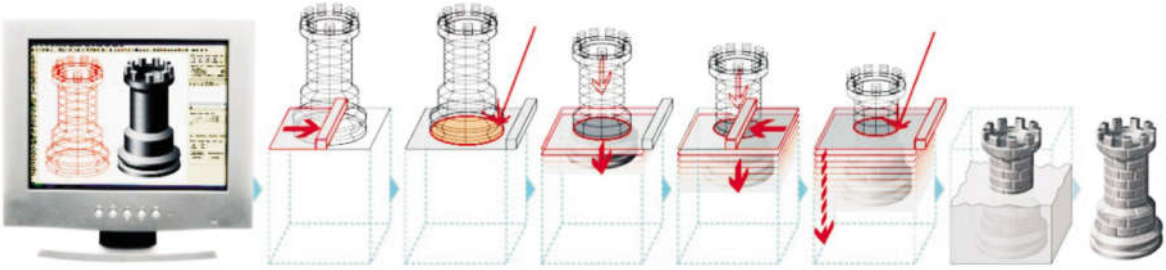


图 2 3D 打印设计模型至产品过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of 3D printing design model to product process

2.3 对比分析

铆接及增材制造技术均可实现非对称结构异型载荷适配器的生产制造，针对两种工艺方案的对比分析见表 2,后续可综合产品批量、生产周期、加工效率、成本控制及工艺成熟度等几方面因素从二者中选择较优的工艺方案。

表 2 工艺方案对比

Tab.2 Comparison of process schemes

Projects	Riveting	Additive manufacturing
Mode	Mechanical, no heat exchange, connected metal & nonmetal	Similar to welding or casting, heat exchange formed by melting metal & nonmetal
Machining process	Manufacturing fixture assembly, positioning drilling, riveting	Forming directly
Constraint	Limited by space & shape	Almost no limited
Thickness	Steel≤6 mm, Al≤11 mm	Almost no limited
Digitized degree	Low	High
Precision	Average	High
Tools	Special assembly frame	Without tools
Process cycle	Long	Short
Requirements	Hydraulic, pneumatic	Laser, protective gas: Ar, N_2
Energy consumption	Low	High
Noise level	High	Low

3 精度测量方法及案例分析

3.1 精度测量方法

精测技术被广泛应用在航空航天领域内大尺寸产品的测量，国内外常用的总装精测的方法和系统通常分为五大类[6]，包括：激光跟踪测量系统、激光扫描测量系统、数字摄影测量系统、经纬仪测量系统和室内 GPS 等。文中拟采用激光跟踪测量系统，进行异型载荷适配器产品检验和制造精度数据获取。

3.2 激光跟踪仪测量系统原理

激光推动着光学应用技术的革命，在激光增材制造、检测与精测、激光武器等领域都有广泛应用，成为了现代技术生产发展依赖的重要方法与手段[7]。激光跟踪仪是一种移动式的高精度光学三维坐标测量设备，是以球坐标方式实现对被测产品三维坐标的测量，主要由激光跟踪头、靶标反射镜、控制器、处理计算机以及附件等组成。激光跟踪仪的核心是一台激光干涉仪，激光跟踪头发射出激光束至球形靶标反射镜，激光束与反射镜的中心始终保持对准，激光束经靶标反射镜反射回到激光头，从而测得靶标反射镜与激光跟踪仪之间的距离[8]。

如图 3 所示，坐标系由激光跟踪头的水平轴(Y 轴)和竖直轴(Z 轴)及其交点(回转中心作为坐标原点 O)组成。将靶标球放置于被测点 P 处，坐标原点至被测点 P 的距离 r 通过激光干涉测距原理得到，激光头在水平面与 Y 轴的角度为水平方位角 α，与 Z 轴旋转的角度为垂直方位角 β，由公式(1)可求出被测点的空间坐标 $P(x,y,z)$[9]为：

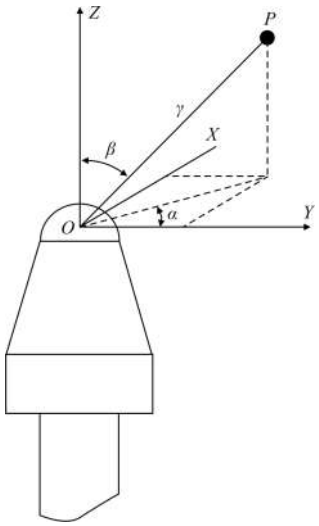


图 3 激光跟踪仪测量示意图

Fig.3 Measurement schematic diagram of laser tracker

$$\begin{cases} x=\gamma\sin\beta\sin\alpha \\ y=\gamma\sin\beta\cos\alpha \\ z=\gamma\cos\beta \end{cases} \tag{1}$$

3.3 测量点布局

在按照异型适配器技术图样完成生产后，需对适配器上下圆中心轴线相对偏移量及方位、8 个分离弹簧安装位置等进行精度测量，测得数据将作为分离弹簧力值调整及分离仿真分析的输入，确保飞行器分离安全且姿态满足指标要求。

根据载荷适配器的结构特征及测量目标，结合生产现场场地情况，进行激光跟踪仪使用数量及测点布局初定。对载荷适配器进行 360°均布取点测量，经分析可知一半的角度范围内的激光跟踪仪的光束会被结构遮挡，一台激光跟踪仪需调整放置位置，重新建立坐标基准后方可实现全角度范围的测量，由于位置调整带来额外的测量误差，将影响测量精度。为解决一台激光跟踪仪测量光束被遮挡的问题，在对异型适配器进行测点布局时，可采用对称布置两台激光跟踪仪进行测量的方案，精度测量总体布局示意见图 4。

图 4 中 $N_i(i=1\sim8)$为公共基准测量点，由此建立公共坐标系；P_i、$P_i'(i=1\sim8)$ 为异型适配器上端框外圆、下端框外圆目标采集点，由此建立测量坐标系。使用靶标球进行数据采集，对不同水平面目标点测量时，靶标球紧贴于载荷适配器下端框 (或上端框)外圆并尽量保持在同一水平面内。完成载荷适配器上端框与下端框外圆各 8 个目标点的测量后，采用最小二乘法，通过中间坐标转换矩阵将公共坐标系和测量坐标系整合到同一个基准坐标系下进行数据处理，得到上下端框外圆、同一水平面内圆心坐标投影，从而获得异型载荷适配器上下端框两圆轴线偏移距离和偏移方向。采用同样的方法可以测得 8 个分离弹簧相对于异型载荷适配器上端框或下端框的相对位置。

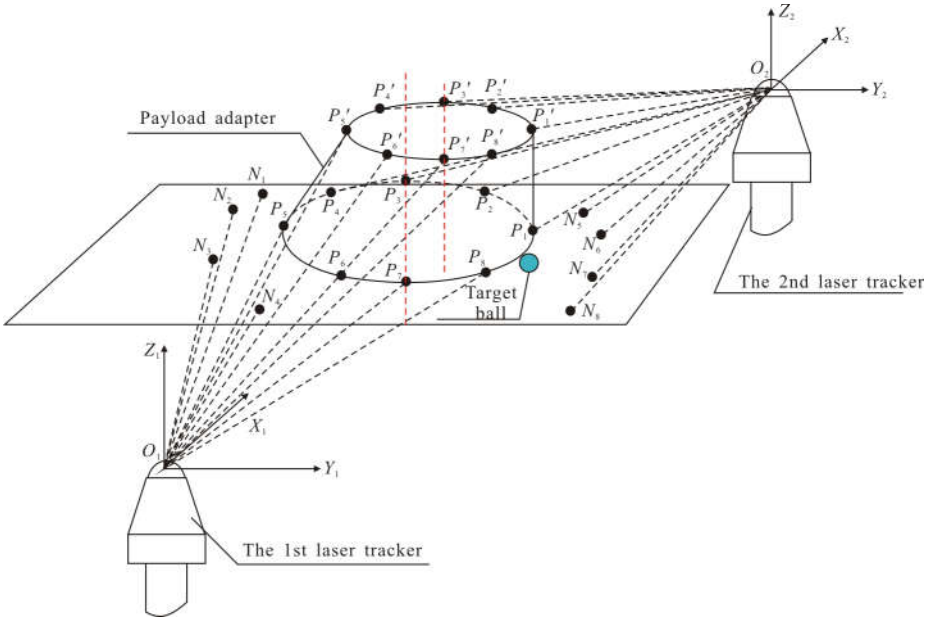


图 4 激光跟踪仪测量方案示意图

Fig.4 Schematic diagram of measurement layout of laser tracker

3.4 应用案例分析

上述激光跟踪仪测量的方法已在某型上面级缩比发动机喷管安装后轴线的精度测量中成功应用，得到的发动机喷管精度测量数据见表 3。根据测量得到的发动机喷管上下端面测量点数据，通过计算可以得到发动机喷管测量点拟合中心轴线与基准轴线之间的偏移量 ΔL 和偏斜量 $\Delta\alpha$。

表 3 某型上面级缩比发动机精度测量数据

Tab.3 Measurement data of precision of a certain type of upper-stage scaled engine

Measuring states	Points	X/mm	Y/mm	Z/mm
Circle of the lower end of engine nozzle	P_1	−0.105	20.295	63.370
	P_2	16.000	11.954	62.750
	P_3	20.445	−0.994	60.510
	P_4	14.254	−14.515	61.340
	P_5	−1.428	−20.368	60.680
	P_6	−18.451	−8.790	60.540
	P_7	−20.528	−0.102	61.830
	P_8	−14.496	14.161	61.420
Circle of the upper end of engine nozzle	P_1'	−0.330	35.570	9.830
	P_2'	20.161	29.270	10.540
	P_3'	35.448	−0.216	7.930
	P_4'	23.038	−27.289	10.640
	P_5'	−2.789	−35.750	8.730
	P_6'	−29.708	−20.708	7.660
	P_7'	−36.270	1.649	9.350
	P_8'	−0.469	35.584	10.470

采用最小二乘法对表 3 中的测量数据进行处理，通过 Matlab 进行安装后发动机喷管上下端面截面圆的拟合，如图 5 所示，计算得到某型上面级缩比发动机喷管上下端面圆心坐标分别为(−0.464，−0.177，8.299)、(−0.162，−0.122，60.457)，两圆心的连线即为发动机喷管轴线。发动机喷管轴线在公共基准面投影得到喷管安装后相对基准面坐标(0，0，0)的偏移量和偏斜量。数据处理后可得偏移量 ΔL 为 0.307 mm，偏斜量 $\Delta\alpha$ 为 0.337°，制造精度满足技术指标要求。

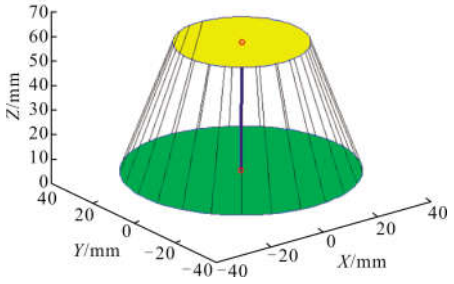


图 5 喷管上下端面拟合圆

Fig.5 Fitting circle of upper and lower end faces of nozzle

经对上述案例进行数据分析可以看出，异型载荷适配器与缩比发动机喷管的精测特征相同，均是通过测量公共基准测量点和上下端面圆周目标采集点数据，再利用数值分析的方法进行数据后处理，即可得到

实际偏移量、偏斜量及方位等参数。因此,激光跟踪仪测量方法可应用到异型载荷适配器上下圆中心轴线相对偏移量及方位、8 个分离弹簧安装位置等参数的精度测量，获得的测量数据可作为航天器分离弹簧选配及分离安全性分析的依据，此种方法的应用对提高分离姿态精度,提升分离可靠性将产生有益的影响。

4 结 论

文中结合某型再入式航天器的载荷适配器结构特点,对比分析了异型载荷适配器的不同工艺方案。通过模型缩比样机中激光跟踪仪的应用案例分析，给出了激光跟踪测量及最小二乘法的配合使用可以作为异型载荷适配器进行精度测量及生产检验的一种有效手段,获取的精准的精度测量参数,可实现分离弹簧选配的数值量化,将有效提高分离分析的精度,提升分离可靠性。

参考文献：

[1] Zhang Yingfang, Zhang Aiguo, Su Jicong, et al. Observation of multiple arbitrary points on the circle and its center coordinates fitting [J]. ***Journal of Heilongjiang Institute of Technology***, 2014, 28(2): 27-31. (in Chinese)
张应芳, 张爱国, 苏积聪, 等. 观测圆上多个任意点及其圆心坐标拟合[J]. 黑龙江工程学院学报, 2014, 28(2): 27-31.

[2] Liu Wei, Liu Feng, Ni Yangyong, et al. Application research of intelligent assembly technology for complicate products [J]. ***Astronautical Systems Engineering Technology***, 2018, 1(2): 33-36. (in Chinese)
刘炜, 刘峰, 倪阳咏, 等. 航天复杂产品智能化装配技术应用研究[J]. 宇航总体技术, 2018, 1(2): 33-36.

[3] Huang Chunping, Huang Shuowen, Liu Fencheng. Metal material additive manufacturing technology [J]. ***MW Metal Forming***, 2016(2): 34-38. (in Chinese)
黄春平, 黄硕文, 刘奋成. 金属材料增材制造技术 [J]. 金属加工(热加工), 2016(2): 34-38.

[4] Tian Guoqiang, Lu Zhongliang, Li Dichen. Digital manufacturing method of complex-structure mould based on additive manufacturing technology [J]. ***Aeronautical Manufacturing Technology***, 2014(9): 38-41. (in Chinese)
田国强, 鲁中良, 李涤尘. 基于增材制造技术的复杂结构模具数字化制造方法[J]. 航空制造技术, 2014(9): 38-41.

[5] Dong Peng, Liang Xiaokang, Zhao Yanhua, et al. Research status of laser additive manufacturing in integrity and lightweight [J]. ***Aerospace Manufacturing Technology***, 2018(1): 7-11. (in Chinese)
董鹏, 梁晓康, 赵衍华, 等. 激光增材制造技术在航天构件整体化轻量化制造中的应用现状与展望 [J]. 航天制造技术, 2018(1): 7-11.

[6] Yan Bingcong. Research on key technologies of measuring assembly precision of a certain type of product based on laser tracker [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
颜丙聪. 基于激光跟踪仪的某型号产品总装精测技术研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学, 2015.

[7] Deng Hui. Analysis and improvement of measurement method of laser tracker [J]. ***Science and Technology & Innovation***, 2017(21): 72-73. (in Chinese)
邓辉. 激光跟踪仪测量方法分析与改进 [J]. 科技与创新, 2017(21): 72-73.

[8] Zhan Yufeng, Han Yongwei, Ning Rui, et al. Application of installation accuracy of measurement in aircraft radar antenna panel with laser tracker [J]. ***Aeronautical Science & Technology***, 2012(2): 47-49. (in Chinese)
詹玉凤, 韩永伟, 宁锐, 等. 激光跟踪仪在飞机雷达天线面板安装精度测量中的应用 [J]. 航空科学技术, 2012(2): 47-49.

[9] Yang Chuancheng, Zhang Bin, Yang Zipeng, et al. Application of laser tracker to accuracy measurement after assembling engine of upper stage [J]. ***Aerospace Manufacturing Technology***, 2017(6): 50-53. (in Chinese)
杨传成, 张斌, 杨自鹏, 等. 激光跟踪仪在上面级发动机总装后精度测量中的应用[J]. 航天制造技术, 2017(6): 50-53.