

用于空间探测的静电分析器轻量化设计与验证*

杨墨欣^{1,2} 张爱兵^{1,2} 解世君²

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 针对空间探测载荷的轻量化需求,以空间等离子体探测的静电分析器为研究对象,进行了轻量化设计和验证。在材料及加工方式选择方面,充分利用增材制造这一新兴加工手段,打破传统轻量化设计时追求低密度材料的思路,对比多种材料及加工方式下设备重量及力学表现,确定铝合金为主要材料,3D打印为主要加工方式。在结构设计方面,基于3D打印加工的优势,在减小设备各部分结构厚度的同时,适当设置加强筋以解决薄壁在后处理时易产生形变的问题。采取上述方案设计的设备质量减少至1.2 kg,比使用镁合金及传统加工方式的设备质量(2.2 kg)下降45%。以典型航天任务的鉴定级力学试验条件作为输入,开展了设计模型的有限元仿真,完成实物加工装配以及力学试验,验证了该设计的抗力学性能。

关键词 静电分析器,选材,轻量化,增材制造,有限元法,力学试验

中图分类号 P354

Lightweight Design and Verification of Electrostatic Analyzer for Space Exploration

YANG Moxin^{1,2} ZHANG Aibing^{1,2} XIE Shijun²

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Aiming at the lightweight requirement of space exploration load, the electrostatic analyzer for space plasma exploration is taken as the research object, and the lightweight design and verification are carried out. In the selection of materials and processing methods, additive manufacturing, a new processing method, is fully used breaking the traditional idea of pursuing low-density materials in lightweight design. By comparing the weight and mechanical performance of equipment under various materials and processing methods, aluminum alloy is determined as the main material and 3D printing as the main processing method. In the aspect of structure design, based on the advantages of 3D print-

* 中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA1535010202, XDA15011200)

2022-03-02 收到原稿, 2022-11-07 收到修定稿

E-mail: yangmoxin18@mailsucas.edu.cn. 通信作者 张爱兵, E-mail: zhab@nssc.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ing processing, the structural thickness of each part of the equipment is reduced, and stiffeners is appropriately set to solve the problem that the thin wall is prone to deform during post-processing. The mass of the equipment designed in the above scheme is reduced to 1.2 kg, which is 45% lower than that of the equipment using magnesium alloy and conventional processing methods (2.2 kg). Taking the identification-level mechanical test conditions of typical aerospace missions as input, the finite element simulation of the design model was carried out, and the physical processing, assembly and mechanical tests were completed to verify the anti-mechanical properties of the design.

Key words Electrostatic analyzer, Materials selection, Lightweight, Additive manufacturing, Finite element method, Mechanical testing

0 引言

地球外层空间中几乎 99% 的物质是以等离子体形式存在的, 空间等离子体是深空探测研究重要的探测研究对象之一。随着人类空间探索活动的不断深入, 对于空间等离子体探测仪器的性能指标要求不断提高, 导致仪器尺寸和质量有所增加, 而未来仪器将向超轻量化、超低功耗及高功能密度的方向发展。

随着航天技术的发展, 工业部门对航天设备的研制提出更高要求, 轻量化等成为其性能提升面临的新挑战。由于单位质量载荷的发射成本很高^[1], 考虑经济性、工程可行性、资源可持续利用等多方面因素^[2], 航天设备轻量化是必然趋势, 实现轻量化设计是未来航天技术发展的一大战略目标。因此, 为同时满足空间等离子体载荷高性能指标和轻量化两方面的发展需求, 需有针对性地开展轻量化设计工作。

1 设计需求

1.1 带顶盖半球形静电分析器

静电分析器是空间等离子体就位探测的重要仪器, 具有可探测粒子能量范围宽、通量低的特点^[3,4]。根据结构可将其分为柱形静电分析器和球形静电分析器两种, 柱形静电分析器虽然容易实现小型化, 但是存在固有探测视场有限的缺点, 其应用较少。应用广泛的是球形静电分析器, 包括 1/4 球形、半球形等^[3], 其中带顶盖的半球形静电分析器是空间等离子体探测仪器传感器的主要形式^[5], 影响到仪器整体性能指标和质量。

带顶盖的半球形静电分析器具有旋转对称结构, 其电极由内外两个同心半球极板组成, 两极板加不同

电压, 极板间有径向电场; 加设顶盖, 顶盖接地; 为避免电场对外部环境的影响, 在粒子入口处增加电极环, 建立屏蔽栅网; 在顶盖和外半球电极间设有偏转板, 对其输入不同的扫描电压, 使得不同入射俯仰角粒子的轨迹偏转^[6]。

粒子从半球顶部进入静电分析器内部, 在径向电场的引导下沿 90° 的圆形狭缝轨道到达出口, 出口为两半球面之间所夹的 360° 圆环, 可以实现 360° 的大视场并具备角度分辨能力, 探测粒子的分布特征。静电分析器的理论结构及粒子运动轨迹如图 1 所示。顶盖、电极环、偏转板及内外半球电极需要使用导电性良好的导体材料, 且需要绝缘材料将这些零件组装拼接(该部分在图 1 中未给出), 因此设备由导体部分和绝缘体部分组成。

本文研究内容针对基于静电分析仪器的高分辨率外日球层拾起离子探测器, 该仪器已按传统设计思路完成设计、仿真、加工和初步测试, 性能满足指标要求, 外包络尺寸为 $\phi 240 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。目前该类型

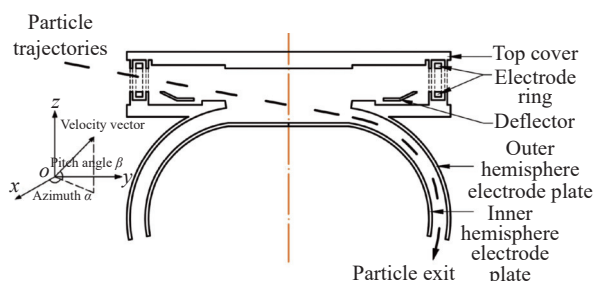


图 1 带顶盖的半球形静电分析器理论结构及等离子体运动轨迹

Fig. 1 Theoretical structure and plasma motion trajectory diagram of hemispherical electrostatic analyzer with top cover

设备导体部分材料多使用密度较小的镁合金,由传统手段加工,设备整体质量达到 2.2 kg。该质量仍超出预期,需要开展进一步的轻量化设计工作。

1.2 抗力学设计要求

航天设备在运输、发射过程中,会受到频率低于 100 Hz 的低频振动环境影响,低频振动可使航天器结构遭到破坏,因此该设备结构的模态频率下限设为 100 Hz。另外,在此过程中也存在复杂的力学环境,为保证设备的安全性,要求该设备各个部分、各种材料最小的裕度 M 应不小于 50%。

裕度的表达式为

$$M = \frac{[\sigma] - \sigma_{\max}}{\sigma_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

其中, $[\sigma]$ 为材料许用强度, $\sigma_{\max}$ 为所受最大应力,单位均为 MPa。

参照某任务的《环境与可靠性实验规范》,仪器需要完成鉴定级抗力学试验,包括加速度试验^[7]、正弦振动试验^[8]、随机振动试验^[9]、冲击响应谱试验^[10],各项抗力学环境条件见表 1~4。表 1~4 中,冲击持续时间为 10~20 ms,冲击方向为 x, y, z 三向,冲击谱的质量因数 $Q = 10$ 。

2 材料与加工方式的选择

航空航天常用轻型材料中,常用于导体的有镁合金、铝合金、碳纤维、钛合金等轻型金属;常作绝缘体的有硅胶、聚酰亚胺、聚醚醚酮等。这里将从镁合金、铝合金、碳纤维中挑选适用于本文静电分析器的

导体,从高韧性树脂、聚酰亚胺以及有机硅胶中选择合适的绝缘体,并根据材料特性选择合适的加工方式。目前静电分析器常用金属材料为镁合金、铝合金等,绝缘材料为聚酰亚胺等,紧固件采用铍青铜等。

除了应用轻质材料之外,使用轻量化成型技术也是航天设备轻量化的手段之一。增材制造技术(Additive Manufacturing, AM, 3D 打印技术)是一种快速成形的高新制造技术,具有整体结构件接近净成型的能力,并且具有精度高、能源消耗少、交付周期短等优点,已成为一种重要的加工方法并迅速发展。增材制造技术突破了传统加工手段的固有特性对结构设计造成的限制^[11],使得轻量化设计的实现更加高效,并且该技术材料利用率高,几乎没有废料,环保性高^[12]。因此这里选择增材制造技术作为各部件的首选加工方式。

目前,镁合金的增材制造手段^[13]有激光选区熔化(SLM)、电弧增材制造(WAAM)以及激光粉末熔合(LPBF)三种技术,但是镁合金的制造条件苛刻,增材制造技术尚不完善,仅能打印平板等简单结构,不具备加工本设备工作件的能力,因此镁合金的加工仍选用传统机加工手段。

铝合金的增材制造手段相比传统铸造方式具有高度柔性设计、力学性能提升^[14]、结构一体化,零件可靠性高寿命长等优势。应用于航空航天领域的增材制造方式主要有激光熔化沉积(LMD)、激光选区烧结(SLS)和激光选区熔化(SLM)三种。其中 LMD 加工速度快,但是加工精度低,需要大量后续处

表 1 加速度试验条件

Table 1 Acceleration test conditions

加载方向	x, y, z 三向
量级	10 g
加载时间	达到最大加速度后保持2 min
加载速率	不大于0.5 $g \cdot s^{-1}$

表 2 正弦振动试验条件

Table 2 Sine vibration test conditions

频率范围/Hz	5~15	15~100
鉴定级	11.03 mm(O-P)	10 g
方向	x, y, z 三向	x, y, z 三向
扫描速率	2 oct·min ⁻¹	2 oct·min ⁻¹

表 3 随机振动试验条件

Table 3 Random vibration test conditions

频率范围/Hz	20~100	100~600	600~2000
鉴定级	+3 dB·oct ⁻¹	0.125 $g^2 \cdot Hz^{-1}$	-9 dB·oct ⁻¹
总均方根加速度 (g_{rms})	10.13	10.13	10.13
实验方向	x, y, z 三向	x, y, z 三向	x, y, z 三向
试验时间	1 min/轴向	1 min/轴向	1 min/轴向

表 4 冲击响应谱试验条件

Table 4 Impulse response spectrum test conditions

频率 f / Hz	100~1000	1000~1500	1500~2000	2000~4000
冲击谱 及速度	+6 dB·oct ⁻¹	900 g	900 g	900 g

理工作提高精度, 适合大体积零部件的加工, 不适用于精度要求高的小零部件。SLS 技术中, 激光将低熔点材料粉末熔化作为黏合剂, 黏结高熔点的金属粉末, 其成形件内部多孔、表面粗糙度高、致密性低, 因而力学性能较差。SLM 加工过程中, 不需要黏合剂, 激光按照预定轨迹照射金属粉末, 使其熔化再凝固成形, 致密度高, 力学性能较好^[15], 相比其他 3D 打印技术更具优势, 且该技术发展成熟, 加工及后处理过程精简, 材料利用率较高。因此铝合金的加工方式选用增材制造中的 SLM 技术。

强度较高的碳纤维 T800 材料的常用加工方式有湿法铺层成型法、喷射成型工艺、模压成型等。其中湿法铺层成型法工艺较为简单, 适用面较广, 相比其他手段模具所需投资较低, 满足单件加工需求。但是由于需要大量环氧树脂结合碳纤维, 其导电性能并不理想, 需在工作表面电镀一层导电金属。并且其结构复杂, 整体加工过程步骤多, 周期长, 价格昂贵。

高韧性树脂的制造方式包括注塑成型、模压成型、滴塑成型、熔融沉积成型(FDM)、立体光固化成型(SLA)、数字光处理(DLP)等, 其中前三种需要制作模具, 成本高, 不适用于小批量加工的需求。FDM、SLA、DLP 均属于增材制造技术。FDM 技术是加热融化丝状的热塑性材料, 再通过微细喷嘴将材料挤出, 黏合在前一层材料上, 层层堆积成形, 加工速度慢, 成品精度低。SLA 与 DLP 技术成形原理相似, 在设定的区域中发生光聚合反应, 光敏聚合物液体逐层固化, 形成零件, 比其他方式的加工精度高。SLA 技术使用激光束照射设定区域, 由点画线再形成面固化材料, 其精度高但加工效率低。DLP 技术将设定图形投影到液体光敏材料表面, 直接以面固化材料, 成形速度快。在保证精度要求的同时追求效率, 所以高韧性树脂的加工方式选择 DLP 技术。

聚酰亚胺(PI)的制备方法有模压成型、注射成型以及传递模塑, 由于模具成本高, 可先选择模压成立方件再做传统机加工, 制造成品。

有机硅胶的加工方式有注塑、滴胶、挤出成形工艺、喷射等, 由于本文绝缘支撑零件形状复杂, 需采用具备复杂零件成形能力的注塑技术, 成本较高。

钢材作为紧固件被选用, 该设备装配用件均使用标准件, 互换性强, 成本低。

表 5 列出了计划选用材料的主要参数及对应加

工方式。

参考现有设备, 壁厚、法兰厚度等参数选用现有设备设计, 即内外半球电极以及顶盖壁厚设为 2 mm, 金属法兰厚度设为 5 mm; 绝缘材料法兰处厚度设为 6 mm。为该理论模型设计的实体模型如图 2 所示, 模型剖面如图 3 所示, 添加了绝缘支撑件及绝缘隔离件。

根据此模型筛选可选用的材料, 针对表 5 中的不同材料进行抗力学试验仿真, 并根据不同材料组合的质量、仿真结果(模态频率、材料强度裕度等)以及加工成本选择材料。图 4 和图 5 分别为不同材料组合

表 5 选用材料参数及加工方式
Table 5 Selection material parameters and processing methods

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(g·cm ⁻³)	材料强度/MPa	加工方式
镁合金	45	0.34	1.80	160	机加工
铝合金	70	0.34	2.70	450	增材制造(SLM)
碳纤维 T800	11.8	0.30	1.60	1600	湿法铺层成型
高韧性树脂	2.1	0.40	1.1	60	增材制造(DLP)
聚酰亚胺	2.7	0.34	1.53	115	机加工
有机硅胶	1.2	0.48	1.30	10	注塑
钢材	205	0.28	7.85	900	机加工

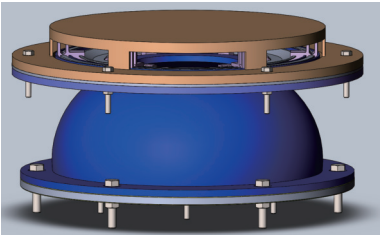


图 2 用于材料对比的传统模型
Fig. 2 Traditional model for material comparison

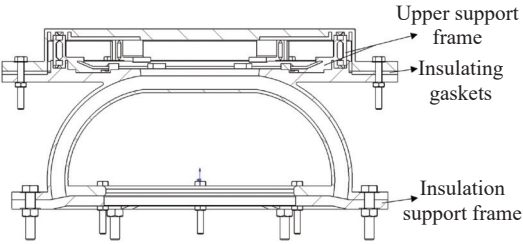


图 3 模型剖面
Fig. 3 Model section

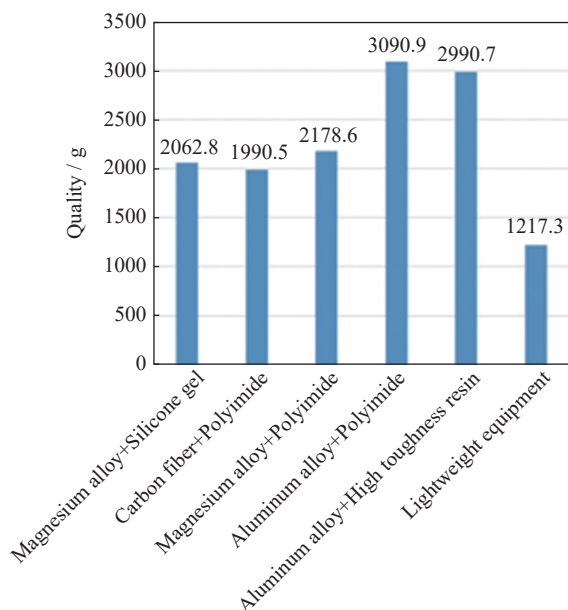


图4 不同材料组合的模型质量对比

Fig. 4 Comparison of model quality for different material combinations

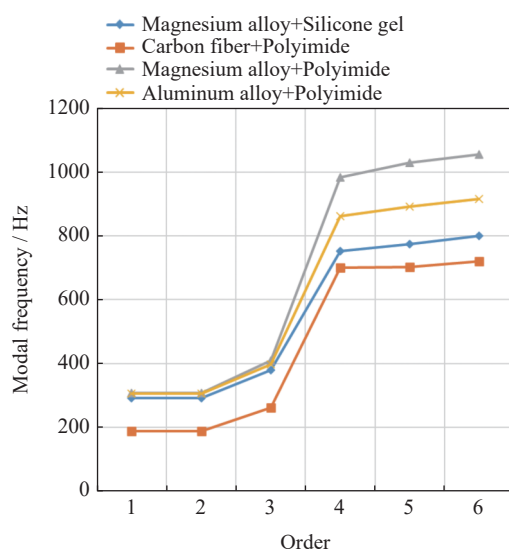


图5 不同材料的模型前六阶模态频率对比

Fig. 5 Comparison of the first six modal frequencies of the model for different materials

模型的质量对比和前六阶模态频率对比。

对模型进行抗力学试验仿真,包括随机振动、正弦振动、冲击响应谱以及加速度等试验,并记录对比最小裕度(见表6)。

由图4可见同样的模型,采用碳纤维和聚酰亚胺时模型质量最小。由图5可以看出,所有的材料组合

表6 不同材料组合的最小裕度

Table 6 Minimum allowances for different material combinations

	镁合金+ 硅胶	碳纤维+ 聚酰亚胺	镁合金+ 聚酰亚胺	铝合金+ 聚酰亚胺
导体最小裕度	38.68%	4961.00%	75.22%	177.10%
绝缘体 最小裕度	-48.02%	304.90%	264.81%	237.57%

均满足一阶模态频率大于 100 Hz 的要求,可进一步比较其他的结果。由表6可知,有机硅胶部件的最小裕度小于 0,其所受应力大于材料强度,将被破坏,不予选择。碳纤维和聚酰亚胺在抗力学试验仿真中都满足试验要求,但由于这两种材料加工成本较高,暂不考虑。选择与聚酰亚胺力学性能类似的高韧性树脂,在绝缘方面略逊色于聚酰亚胺,但力学性能与聚酰亚胺相似,对于抗力学试验,高韧性树脂的计算仿真结果及力学实验结果可作为聚酰亚胺应用的参考。因此,这里选用 SLM 技术制造的铝合金作为设备导体部分,DLP 技术制造的高韧性树脂作为设备绝缘体部分。

3 结构轻量化

将所选材料应用于传统模型,并针对该材料的力学特性、加工方式等,对传统模型进行轻量化设计。以下参数是轻量化设计的关键:设备各处壁厚、法兰厚度以及薄壁加强筋的设计。采用控制变量的基本方法,通过仅更改优化部分的参数,配合有限元分析软件进行力学仿真,模拟验证其力学性能,确定能够满足要求且质量减轻相对明显的参数。以内半球电极为例介绍轻量化的过程。

3.1 壁厚选择

针对内半球电极进行抗力学试验仿真,对比验算薄壁厚度分别为 0.6 mm, 0.8 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm 时能否满足一阶模态大于 100 Hz 的要求,并对比其质量和相同试验条件下受到的最大应力,结果列于表7。

由于所受最大应力和内半球电极的质量都是越小效果越优,定义其乘积为参考系数 T ,有

$$T = \sigma_{\max} \times M. \quad (2)$$

式中, $\sigma_{\max}$ 为内半球电极所受最大应力, M 为内半球电极质量。 T 值越小代表该零件所受最大应力与质

量综合表现越优,所以选择 T 最小时的壁厚。 T 值随内半球电极壁厚的变化如图 6 所示。

由图 6 可得,壁厚越小时, T 值越小,其效果越理想。利用传统加工方式通常可加工 2 mm 壁厚,但若应用增材制造技术(3D 打印),可从加工技术上将壁厚缩减至 0.8 mm,而且 SLM 技术制造的铝合金力学性能优于传统铸造手段加工的铝合金,因此选用 3D 打印技术加工,壁厚选定为 0.8 mm。使用同样方法,优化外半球电极壁厚为 0.8 mm,顶盖厚度设计为 0.8 mm。

3.2 法兰厚度优化

选用同一绝缘支架,设置内半球电极法兰的厚度分别为 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm, 4.0 mm, 5.0 mm, 6.0 mm, 进行局部抗力学试验仿真,对比相同力学环境下内半球电极以及绝缘支架的最大应力,确定满足力学条件且工程可实现的轻量化法兰厚度。局部仿真中不同法兰厚度设置下最大应力如图 7 所示。

根据仿真结果,绝缘支架的材料安全裕度均满足要求,内半球电极法兰处厚度越小,其整体所受力学试验产生的最大应力越小,但考虑实际装配时螺栓紧

固件区域产生的预紧力等因素的影响,法兰厚度不宜过薄,内半球电极的法兰处厚度设为 2 mm(螺栓沉头处厚度为 1.5 mm)。

同理,结合局部仿真结果及装配经验,外半球电极法兰处厚度设计为 2 mm,绝缘支架法兰处的厚度设计为 3 mm,顶盖法兰处厚度为 2 mm。

3.3 薄壁加强筋的设计

金属增材制造过程中,零件有较大温度变化,存在残余应力,后处理时薄壁容易产生形变,因此需要在薄壁非工作表面加设筋网,所用加强筋有以下要求:均匀分布于壳体表面;尽可能稀疏以减轻质量。

根据加强筋要求以及单层球面网壳的结构及其力学性能分析,设计六边形加强筋网^[16],其形位数据如图 8 所示,左边为内半球电极的加强筋网格图,右边为外半球电极的加强筋网格图。

其绘制方式如图 9 所示, O 点为内半球电极回转中心, A 点根据图 8 给出的 α 和 β 角度确定射线 OA , OA 与内半球电极内壁交点随 α 和 β 在内半球电极内壁移动,绘制出网格。 $\alpha \in [0^\circ, 360^\circ]$,图 8 仅显示 $0^\circ \sim 60^\circ$ 内容,其余部分为圆周阵列,是该部分的重复。

根据仿真结果,有加强筋的设备比没有加强筋的设备总质量仅增加 4 g。轻量化处理后的模型如图 10 所示,其剖面如图 11 所示。此轻量化设计工程可实现,且质量明显减轻,可对其整体进行抗力学仿真以验证其力学性能。

表 7 不同壁厚仿真结果数据
Table 7 Simulation results data of different wall thicknesses

厚度/mm	一阶模态/Hz	最大应力/MPa	质量/kg
0.6	2373.5	8.4721	0.159
0.8	2100	10.693	0.18221
1	2046.1	10.774	0.20458
1.5	2145.2	10.14	0.26007
2	2443.8	11.234	0.31848
2.5	2750.1	11.445	0.36892

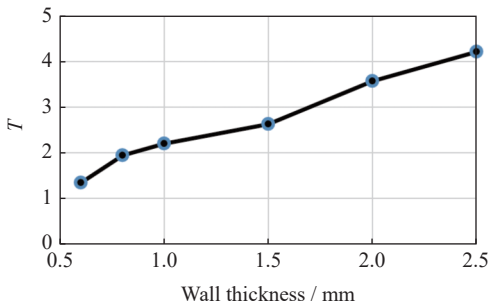


图 6 T 值随壁厚变化

Fig. 6 Variation of T value with wall thickness

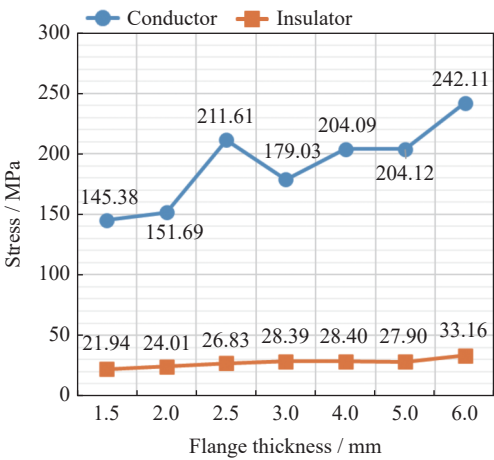


图 7 最大应力随法兰厚度变化

Fig. 7 Variation of maximum stress with flange thickness

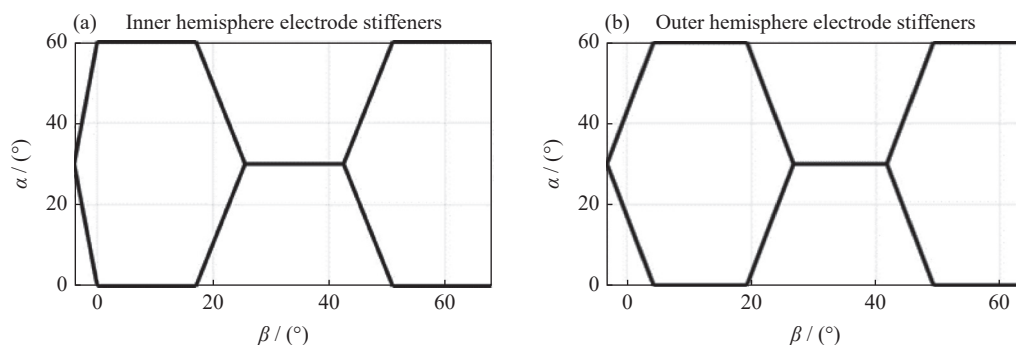


图 8 加强筋网格

Fig. 8 Grid diagram of stiffener

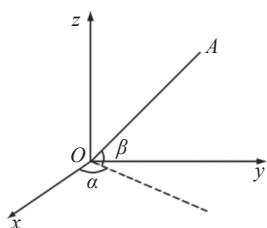


图 9 绘制网格

Fig. 9 Schematic diagram of drawing grid

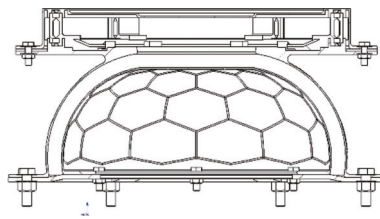


图 11 轻量化模型剖面

Fig. 11 Cross-section of lightweight model

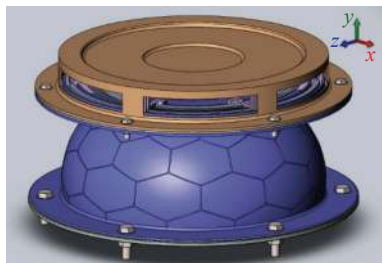


图 10 轻量化模型

Fig. 10 Lightweight model drawing

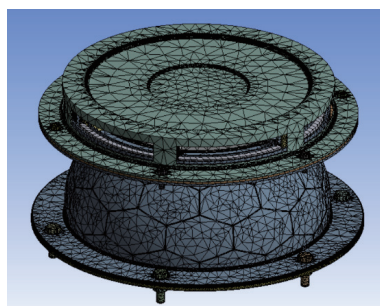


图 12 有限元网格划分

Fig. 12 Diagram of finite element meshing

4 仿真与结果分析

仿真软件可以避免许多实体试验带来的不便。在对实体进行加工和实验前,可先使用仿真软件对模型进行力学环境模拟,根据实验结果调整材料及结构等。

以下为仿真分析条件及结果。

(1)分析软件。采用建模软件建立三维模型,通过有限元分析求解其力学表现。模型长度单位为 mm。

(2)单元选取及网格划分。分析模型以四节点四面体为主。为保证数据安全可靠,在可接受的计算量内,尽可能划分更细的网格,其有限元模型如图 12 所示。

(3)边界条件。安装底面的六个螺栓固定约束,

底面固定约束(防止沿螺栓的轴向运动)。

(4)结果分析。模态分析结果见表 8。

设备一阶模态频率为 531.68 Hz, 高于基频 ≥ 100 Hz 的要求。模型固有频率振动模态如图 13 所示。根据仿真结果,抗力学试验中 y 方向所受应力总是三向中最大的,这里以 y 方向应力云图为例进行分析。模型加速度试验分析结果列于表 9,其整体最大应力以及绝缘体最大应力云图如图 14 所示。设备正弦振动试验分析结果见表 10,其整体最大应力以及绝缘体最大应力云图如图 15 所示。设备随机振动试验分析结果见表 11,其整体最大应力以及绝缘体最大应力云

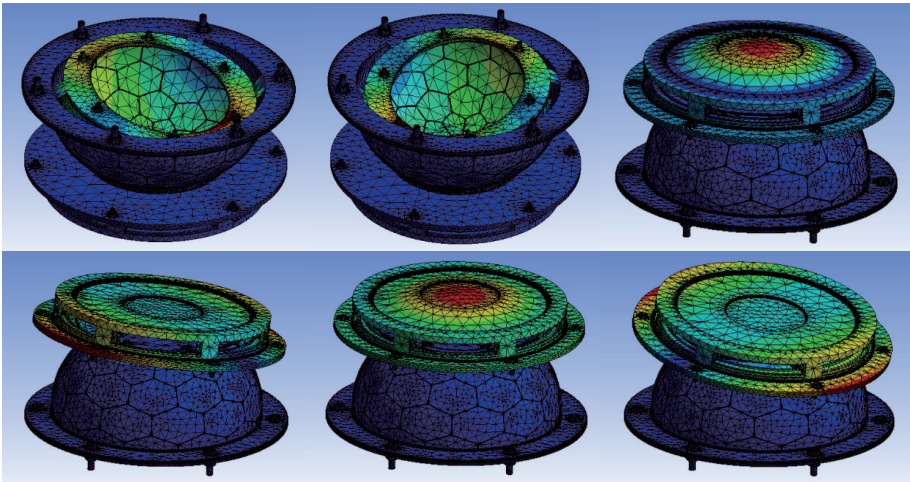


图 13 模型前六阶固有频率振动模式

Fig. 13 Schematic diagram of the first six natural frequency vibration modes of the model

表 8 模态分析结果

Table 8 Modal analysis results

阶次	模态频率/Hz	模态振型
一阶	531.68	顶部往复摆动
二阶	539.28	顶部往复摆动
三阶	619.24	顶部上下摆动

表 9 加速度试验分析结果

Table 9 Analysis results of acceleration test

工况	导体最大应力/MPa	铝合金 (400 MPa) 强度裕度/(%)	绝缘体最大应力/MPa	高韧性树脂 (60 MPa) 强度裕度/(%)
x 方向	1.264	31546	0.39036	15270.43
y 方向	3.6323	10912	1.0154	5809.00
z 方向	1.3263	30059	0.34918	17083.11

图如图 16 所示。设备冲击响应谱试验分析结果见表 12, 其整体最大应力以及绝缘体最大应力云图如图 17 所示。

图 13~17 云图中浅色区域所受应力大, 深蓝色处所受应力小, 该区域已减重, 接近加工可实现的极限值, 应力最大处也满足材料裕度大于 50% 的要求。经仿真软件对该模型整体进行抗力学试验模拟后, 计算结果满足力学环境要求。

5 抗力学试验及结果

对上述力学仿真验证后的模型进行加工, 所有零

(a) Whole

(b) Insulator

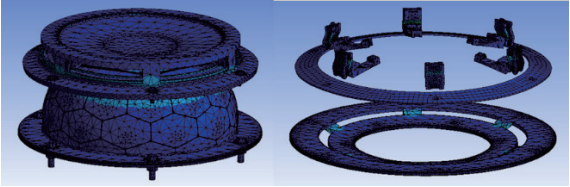


图 14 加速度 (y 方向) 试验最大应力

Fig. 14 Schematic diagram of the maximum stress in the acceleration (in y direction) test

表 10 正弦振动试验分析结果

Table 10 Analysis results of sinusoidal vibration test

工况	导体最大应力/MPa	铝合金 (400 MPa) 强度裕度/(%)	绝缘体最大应力/MPa	高韧性树脂 (60 MPa) 强度裕度/(%)
x 方向	2.8398	13985	0.27292	21884.46
y 方向	6.7773	5802	0.74832	7917.96
z 方向	3.0565	12987	0.23768	25144.03

件均未出现缺陷。对实物进行组装和力学试验, 进一步验证设备在力学环境中的可靠性。抗力学试验委托中国科学院国家空间科学中心可靠性与环境试验中心开展。由于 y 轴方向的试验所受应力最大, 以 y 方向为例进行试验过程分析。其中正弦振动试验和随机振动试验使用图 18(a) 所示振动试验台进行; 冲击试验使用图 18(b) 所示冲击谱台进行; 加速度试验使用图 18(c) 所示离心机进行。将试验件安装于振动试验台后为试验件扫频, 得到其一阶振动频率为

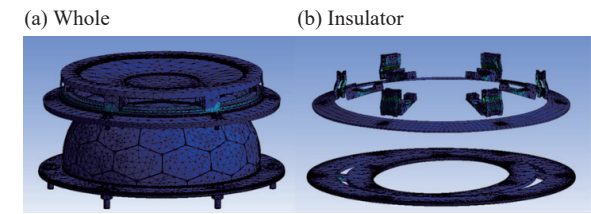


图 15 正弦振动 (y 方向) 试验最大应力
Fig. 15 Schematic diagram of maximum stress in sinusoidal vibration (in y direction) test

表 11 随机振动试验分析结果
Table 11 Random vibration test analysis results

工况	导体最大应力/MPa	铝合金 (400 MPa)强度裕度/(%)	绝缘体最大应力/MPa	高韧性树脂 (60 MPa)强度裕度/(%)
x 方向	62.003	545	1.8129	3209.61
y 方向	124.88	220	5.0756	1082.13
z 方向	62.04	545	1.5629	3739.02

注 比例因子值为 3σ 。

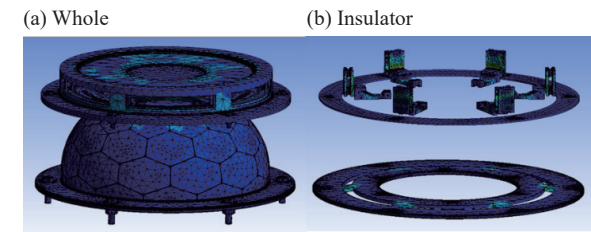


图 16 随机振动 (y 方向) 试验最大应力
Fig. 16 Schematic diagram of maximum stress in random vibration (in y direction) test

237 Hz, 由于受到夹具的影响, 数据比仿真数据有所减小, 但仍满足基础频率大于 100 Hz 的要求。

本次试验过程执行情况符合 GJB1027 A-2005 《运载器、上面级和航天器试验要求》的要求, 满足试验技术条件, 无异常情况, 试验设备满足受试环境要求, 未出现超出偏差的情况, 试验设备功能均未发生异常。测试过程中, 被测试件外观未见变化, 试验结束将被测试件拆卸, 所有零部件外观及结构均未产生变化, 该试验通过。

6 结论

以带顶盖半球形静电分析器作为研究对象, 根据

表 12 冲击响应谱试验分析结果
Table 12 Impact test analysis results

工况	导体最大应力/MPa	铝合金 (400 MPa)强度裕度/(%)	绝缘体最大应力/MPa	高韧性树脂 (60 MPa)强度裕度/(%)
x 方向	69.558	475	3.3484	1691.90
y 方向	245.46	63	39.622	51.43
z 方向	69.335	477	5.8245	930.13

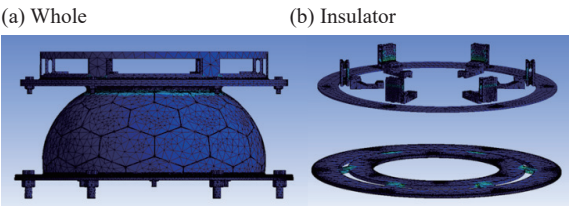


图 17 冲击 (y 方向) 试验最大应力
Fig. 17 Schematic diagram of maximum stress in impact (in y direction) test

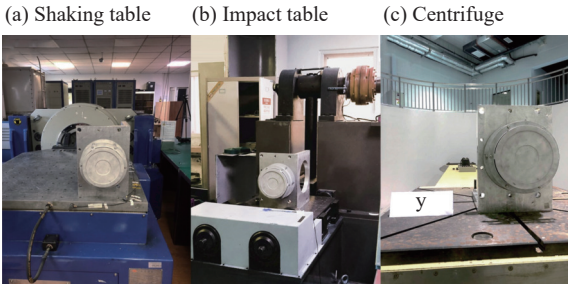


图 18 试验件以 y 方向为实验方向安装于试验台
Fig. 18 Test piece is installed on the test bench with the y direction as the experimental direction

典型航天任务的力学试验条件, 对静电分析器进行轻量化设计。选用轻质、可加工的低成本材料, 充分利用增材制造技术高度柔性设计的优势, 选择 SLM 技术加工的铝合金作为设备导体部分, DLP 技术加工的高韧性树脂作为设备绝缘体部分, 为其设计轻型化结构, 优化设备壁厚、法兰厚度等, 并在薄壁加设加强筋解决薄壁在后处理时易产生形变的问题。最终设计的顶盖以及内外半球电极薄壁厚度为 0.8 mm, 法兰厚度为 2 mm(螺栓沉头处为 1.5 mm), 绝缘体支撑架法兰厚度为 3 mm。构建三维模型, 利用有限元仿真软件, 验证了该轻量化模型在力学性能方面满足工程要求。对该模型进行实物加工、组装和力学试验, 进一步验证了设备在力学环境中的可靠性。

轻量化后的静电分析器质量为 1.2 kg, 相比传统设备质量(2.2 kg)下降了 45%。减重后的指标满足轻量化的工程要求, 该指标在相似尺度(200 mm)的静电分析器研究领域达到先进水平。设备质量的减轻降低了发射成本, 增加了卫星的有效载荷, 节省的运力为进一步拓展卫星任务创造了可能。该轻量化设计方案在探索低密度材料的基础上, 综合考虑材料强度和加工方式, 利用 3D 打印技术制造出传统加工手段难以实现的轻量化结构并在一定程度上提升了材料的机械性能, 同时通过薄壁加筋的方式解决了 3D 打印薄壁可能出现形变的问题。本研究尝试基于 3D 打印技术加工空间环境探测载荷传感器, 为航天设备选材以及结构设计提供了新思路, 可被扩展应用于其他设备的设计、制造中。

致谢 林强和高萍老师对仿真工作及抗力学试验给予了帮助与支持。

参考文献

- [1] LI Lian, WEI Wei. Analysis and enlightenment on the low cost of SpaceX' Rocket based on the perspective of financial management[J]. *Aerospace China*, 2018(8): 51-55 (李莲, 魏威. 基于财务管理视角的SpaceX公司火箭低成本分析及启示[J]. *中国航天*, 2018(8): 51-55)
- [2] ZHONG Qumpeng, YOU Yiliang, ZHANG Zheng, *et al.* On the main technical ways to lightweight mechanical equipment components[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, **48**(18): 2-6 (钟群鹏, 有移亮, 张峥, 等. 机械装备构件轻量化主要技术途径的探讨[J]. *机械工程学报*, 2012, **48**(18): 2-6)
- [3] KONG Linggao, SU Bin, GUAN Yibing, *et al.* Planetary plasma measurement technology[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2021, **52**(5): 459-472 (孔令高, 苏斌, 关毅炳, 等. 行星等离子体探测技术[J]. *地球与行星物理评论*, 2021, **52**(5): 459-472)
- [4] WILSON G R, MALDONADO C A, ENLOE C L, *et al.* The integrated miniaturized electrostatic analyzer: a space plasma environment sensor[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, **91**(12): 123302
- [5] KONG Linggao, ZHANG Aibing, WANG Shijin, *et al.* Numerical simulation analysis of space plasma detector based on SIMION[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2012, **32**(4): 71-76 (孔令高, 张爱兵, 王世金, 等. 基于SIMION软件的空间等离子体探测器的数值仿真[J]. *中国空间科学技术*, 2012, **32**(4): 71-76)
- [6] GAO Tianfeng, KONG Linggao, SU Bin, *et al.* Design and simulation of the detector for outer heliosphere pickup ions[J/OL]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*: 1-17[2022-03-02]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0243>
- [7] GAO Yuling, TANG Cheng, CHEN Xingquan, *et al.* Centrifugal acceleration test deviation analysis of a certain type of warhead sample[J]. *Environmental Technology*, 2018(S1): 153-156 (高玉玲, 唐成, 陈兴泉, 等. 某型战斗部样品离心加速度试验误差分析[J]. *环境技术*, 2018(S1): 153-156)
- [8] SUN Jieming, YANG Jingjing, MA Haitao. Sinusoidal vibration test parameters and mathematical description[J]. *Laboratory Science*, 2020, **23**(2): 65-68 (孙杰明, 杨静静, 马海涛. 正弦振动试验参数及其数学描述[J]. *实验室科学*, 2020, **23**(2): 65-68)
- [9] LIU Yang, XIONG Wang'e, SHEN Weina, *et al.* Random vibration analysis on swing mirror system of space optical based on ANSYS[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2010(4): 18-20 (刘阳, 熊望娥, 申维娜, 等. 基于ANSYS的某航天光学指向摆镜系统的随机振动分析[J]. *机械设计与制造*, 2010(4): 18-20)
- [10] SHI Meng, PENG Yanglin, LIU Hongying, *et al.* Development of shock response spectrum test research[J]. *Environmental Technology*, 2021, **39**(5): 47-51,61 (石蒙, 彭扬林, 刘洪英, 等. 冲击响应谱试验技术研究进展[J]. *环境技术*, 2021, **39**(5): 47-51,61)
- [11] MEDELLIN-CASTILLO H I, ZARAGOZA-SIQUEIROS J. Design and manufacturing strategies for fused deposition modelling in additive manufacturing: a review[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2019, **32**(1): 53
- [12] LIU Jingbo, LIU Shifeng, YANG Xin, *et al.* Progress in lightweight application research of additive manufacturing technology[J]. *Materials China*, 2020, **39**(2): 163-168 (刘景博, 刘世锋, 杨鑫, 等. 金属增材制造技术轻量化应用研究进展[J]. *中国材料进展*, 2020, **39**(2): 163-168)
- [13] HYER H, ZHOU L, BENSON G, *et al.* Additive manufacturing of dense WE43 Mg alloy by laser powder bed fusion[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, **33**: 101123
- [14] HE Xianding, WU Ling, AN Zhiguo. Research on support structure for AlSi10 Mg aluminum alloy parts by selective laser melting[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2020, **45**(9): 113-117,136 (何先定, 吴凌, 安治国. 选区激光熔化成形AlSi10 Mg铝合金零件支撑结构的研究[J]. *锻压技术*, 2020, **45**(9): 113-117,136)
- [15] GU Dongdong, ZHANG Hongmei, CHEN Hongyu, *et al.* Laser Additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, **47**(5): 0500002 (顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. *中国激光*, 2020, **47**(5): 0500002)
- [16] MA Yufei, TENG Qiang. Research on the stable bearing capacity of reinforced spherical shell[J]. *Ship Science and Technology*, 2018, **40**(17): 62-67 (马玉斐, 滕强. 加筋球面壳稳定承载能力研究[J]. *舰船科学技术*, 2018, **40**(17): 62-67)