# 空间遥感仪器电箱结构设计与分析

赵 越 张 达\* 刘衍峰 高志良 孙振亚

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘 要:空间遥感仪器电箱为了适应复杂的空间环境,需要具备优良的力学稳定性、导热散热能力和电磁屏蔽 性能。针对力学稳定性、导热散热能力和电磁屏蔽性能要求,设计了一种空间遥感仪器电箱结构。通过三维建模软件 建立实体模型,并利用有限元分析软件分别了进行模态分析、线性静力学和热力学分析。结果显示电箱的一阶基频 为578Hz,远高于120Hz的指标要求;在加速度载荷及10℃温度场工况下,最大变形为49μm,最大应力为60.3Mpa, 均在安全阈值范围内。证明了结构设计的合理性,为后续进一步实验验证提供了理论指导和依据。

关键词:遥感仪器;结构设计;有限元;动力学仿真

中图分类号:TH12,V241.03 文献标识码:A

空间遥感仪器在航天科技中发挥着举足轻重的作 用,而空间遥感仪器的电箱是遥感仪器的电子大脑,具 备信号的控制处理、数据传输及设备供电等功能,其性 能的好坏直接影响着遥感器性能的好坏,这就要求空间 遥感器要能适应复杂的空间环境<sup>[1-2]</sup>。空间遥感器电箱结 构首要任务是能为电子学提供稳固的结构支撑和固定, 其次要能够承受住发射阶段的振动和冲击,同时具备合 理的导热设计和电磁兼容设计要求<sup>[3-4]</sup>。因此,需要空间 遥感仪器电箱结构具备足够的力学稳定性、合理的导热 散热能力和优异的电磁兼容性能。

本文以一种空间遥感仪器电箱结构设计为例,采用 三维建模软件建立电箱三维实体模型,使用有限元软件 和有限元理论对电箱结构进行有限元仿真分析。根据分 析结果验证设计的合理性,并为后续进一步实验验证提 供了理论指导和依据。

#### 1 电箱结构设计

#### 1.1 电路板布局

常用的电箱的电路板布局形式有背板式布局和串 接式布局。该电箱的电路板数量较多,且板间通讯线路 多,从电子学更容易实现的角度考虑,采用背板式布局 形式。电子学按照不同的功能进行模块化设计,每片电 路板独立实现一种功能,通过连接器插接在底台板上, 文章编号:2096-4390(2022)17-0032-04

利用底台板实现板间通讯<sup>19</sup>。电路板的详细布局形式如图1所示。



图1 电路板布局示意图

1.2 电箱结构设计

电箱的结构不仅要对电路板起到稳定支撑的作用, 而且还需要电箱要具有良好的导热散热能力和电磁屏 蔽性能,这就对电箱材料提出了很高的要求。

常见的空间遥感器电箱材料有钛合金、铝合金和镁 合金,三种材料的详细参数如表1所示。综合三种材料 的性能,镁合金密度最小,具有较高比刚度,导热性能和

作者简介:赵越(1991-),男,汉族,内蒙古赤峰人,硕士研究生,助理研究员,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,研究方向:空间遥感器光机结构设计。

通讯作者:张达(1981-),男,汉族,辽宁铁岭人,研究员,博士生导师,中国科学院长春光学精密机械与物理研究 所,研究方向:空间遥感仪器及科学载荷研制。

材料名称	弹性模量 E (Gpa)	密度 p (g/cm³)	导热系数 λ (W/mK)	线胀系数α (10 <sup>-6</sup> /K)	泊松比 μ	比刚度 E/ p (kNm/g)	热稳定性 λ/α (10 <sup>6</sup> W/m)
钛合金	114	4.4	7.4	9.1	0.34	25.9	0.8
铝合金	68	2.7	167	22.5	0.33	25.2	7.4
镁合金	44	1.8	201	20.9	0.35	24.5	9.6

表1 常见空间遥感器电箱材料参数表



图 2 电箱结构示意图

热稳定性更好,镁合金还具有优良的导电性能和电磁屏 蔽性能<sup>60</sup>,本例中的电箱及电路板框也采用镁合金材料。

根据电路板的布局进行电箱的结构设计,电箱的整体结构采用箱板拼接式设计,如图2所示。拼接式箱体结构由底台板框、左右箱板、前箱板、后箱板和上箱板组成。底台板安装固定在底台板框上,左右板框内壁设置有导槽。电箱内部其他电路板具有独立的板框支撑,为了保证部分电路板对电磁屏蔽的更高要求,所有电路板均设置了板框盖板。对于大功耗的元器件板框相应位置也设置了导热面<sup>m</sup>。板框侧壁设置导轨,与左右板框内壁上的导槽相配合。考虑到整个电箱的电磁屏蔽性能,所有最外层箱板均保证了最小3mm的厚度。六块箱板通过

螺钉紧固连接,箱板连接处设置止口,可以形成稳固的 电箱结构,内部的七个电路板板框通过导轨插入左右板 框对应位置的导槽内,电路板和板框也加强了整个电箱 的结构强度与刚度。

#### 2 模态分析

模态分析的目的是考察电箱结构动力学响应特性, 是为了求解系统的固有频率及模态振型,检验电箱能否 经受整个发射过程的振动考验,也是产品加工前的重要 仿真复核过程。

为提高计算效率,在保证数值仿真计算精度的前提 下,对电箱零部件进行结构简化处理。模型中对箱板和 板框进行了详细网格划分,将电路板、电子元器件等设 置为质量点。外部箱板斜筋较多形状复杂,采用4面体 网格划分;内部板框形状规则,采用六面体网格划分;螺 钉连接处用 RBE2 单元建立连接。电箱有限元模型如图 3 所示。

利用 MSC.Nastran 软件,基于 Lanczos 法进行模态分 析求解电箱 0~1000Hz 的模态,根据仿真分析结果显示: 电箱整体模态的第一阶固有频率为 578Hz,振型主要表 现为电箱沿 Z 轴方向的振动,图 4 为一阶整体模态振 型。



图 4 一阶整体模态振型

继续考察模态分析的结果,当频率在 299Hz~577Hz 之间,出现多个低阶的局部模态,这些低阶模态大都表 现为板框盖板的局部单方向振动,而处于此范围的低阶 模态时,板框及箱体主体结构并未产生明显振型。如图 5



图 3 电箱有限元模型



#### 图 5 在 299Hz 处的低阶局部模态振型

所示,以 299Hz频率处的低阶局部模态为例进行说明, 该模态下的振型表现为第 1、2、3 块电路板板框盖板沿 Y 轴局部振动,在该低阶局部模态下不会造成电箱主体结 构的明显变形。

综合模态分析的结果可以看出,电箱的一阶整体模态固有频率为578Hz,对于一般的遥感载荷,一阶固有频率大于120Hz就能够有效避开发射阶段易共振的频率段,电箱结构和电子学元器件就能够承受发射阶段的振动,证明了本次电箱结构设计具有较高的刚度裕度。

#### 3 线性静力学分析

线性静力学分析的目的是为了检验系统的力学稳 定性,求解线性静力学载荷下的的响应。由于空间遥感 仪器工作环境的特殊性,在随火箭发射阶段要承受加速 度载荷的力学环境。因此,对于空间遥感仪器的线性静 力学分析,主要是分析结构在过载情况下的响应情况。

本文根据力学指标要求,在 MSC.Nastran 软件中对 电箱沿 X、Y、Z 三个方向分别施加不同大小的加速度载 荷,仿真分析电箱在各载荷状态下的力学响应,求解电 箱最大变形位移和最大应力。电箱工况及分析结果如表 2 所示。

表 2 加速	度载荷	下的分	·析结果
--------	-----	-----	------

载荷方向	载荷大小 (g)	最大位移 (µm)	最大应力 (Mpa)
Х	6	5.4	2.6
Y	6	28.5	3.22
Ζ	15	22.6	8.13

表 2 的分析结果表明,当沿 Y 轴方向施加 6g 加速 度载荷时,电箱变形位移最大为 28.5μ m,此时最大应力 为 3.22Mpa,因为沿 Y 轴方向是垂直于电路板的方向,所 以沿 Y 轴方向电路板和电路板板框强度和刚度最弱,该 工况下变形位移量最大。而当沿 Z 轴方向施加 15g 加速 度载荷时,电箱的最大应力出现最大值 8.13Mpa,此时的 最大位移为 22.6µm,因为在该工况下加速度载荷最大, 所以应力值较大。此外,沿 Z轴的电箱强度和刚度要优 于 Y轴方向,所以即使 Z轴方向加速度载荷增大,但最 大位移并没有超过 Y轴方向施加载荷的情况。三种工况 下的最大应力均小于镁合金的材料屈服应力 215Mpa,变 形位移量也都较小,不会对电路板组件产生破坏。

综合电箱线性静力学分析的结果,在设计空间遥感 仪器电箱结构时,要充分考虑结构力学性能在不同方向 下的差异性,力学性能薄弱的方向应该尽量避开最大加 速度载荷方向,从而提高电箱力学适应性。而本例中电 箱力学性能薄弱的Y轴方向避开了最大加速度载荷方 向,且三种工况下最大位移和最大应力均在合理范围 内,证明了电箱结构设计的合理性。

#### 4 10℃温度场工况分析

载荷在空间中处于变化的温度环境中,需要考察电 箱均匀温变载荷的承受能力,根据指标要求,分析电箱 在10℃温度场工况下的热应力和热变形。

10℃温度场工况的环境初始温度为 20℃,均匀升温 至 30℃。在 MSC.Nastran 软件中设置温度场,并仿真求解



图 6 电箱在 10℃温度场工况下的热变形和热应力云图

该工况下电箱的最大变形量和最大热应力。图 6 为电箱 在 10℃温度场工况下的热变形和热应力云图。

通过图 6 所示,在 10℃温度场工况下,最大变形为 49µ m,出现在上箱板边缘位置,量级较小;最大热应力 为 60.3Mpa,出现在右侧箱板与底台板框一处螺孔连接 位置,该应力值没有超过镁合金的屈服应力 215Mpa,不 会对电箱结构造成破坏。综合热应力和热变形结果,最 大热应力和热变形均出现在箱板结构位置,对电路板内 部的影响较小,但是空间载荷依然要充分考虑温度载荷 的影响,考虑必要的温控措施。

## 5 结论

电箱是空间载荷的重要组件,电箱的性能直接影响 载荷是否能正常工作,所以在设计阶段,通过有限元分 析的方法对电箱进行仿真分析,并根据仿真结构进行迭 代优化具有重要意义,是生产前的重要理论保证。通过 对电箱的模态分析、线性静力学分析和 10℃温度场工况 的仿真分析。结果表明,电箱的一阶固有频率为 578Hz, 远高于指标规定的 120Hz;在给定的加速度载荷下,最大 变形位移为 28.5,最大应力为 8.13,不会对电路板组件产 生破坏;在 10℃温度场工况下,最大热变形为 49µ m,最 大热应力为 60.3Mpa,也不会对电箱结构造成破坏。证明 了设计的合理性,电箱结构具有足够的力学稳定性和热 尺寸稳定性,为后续进一步实验验证提供了理论指导和 依据。

#### 参考文献

[1]刘晓丰,何欣,崔永鹏,张凯.某空间光学遥感器的电控 箱结构设计与分析[J].红外,2017,38(05):8-11.

[2]李延春,董吉洪,李威,郭权锋,王克军,罗志涛,王海萍.空间遥感器圆柱体电控箱的设计与分析 [J]. 光机电信息, 2010,27(11):115-120.

[3]张新洁,董得义.空间相机电箱结构设计[J].机械设计与制造,2016,(09):240-243+246.

[4]关英俊,辛宏伟.空间相机 CCD 电箱结构设计与分析 [J].机械设计与制造,2011,(07):35-37.

[5]王克军,董吉洪,宣明,郭权锋,李延春.空间遥感器电控 箱结构设计[J].长春理工大学学报(自然科学版),2015,38 (02):13-17.

[6]王凤丽,李威,王延风,徐抒岩,董吉洪.空间光学遥感器 电控箱结构设计与分析[J].机械设计与制造,2008(03):23-25.

[7]陈治洲,曹开钦,缪斌,柴孟阳,刘书锋,孙德新,刘银年.空间相机电控箱热设计[J].红外技术,2017,39(10):880-883.

# Strucure Design and Analysis of Electric Cabinet for Space Remote Sensor

## Zhao Yue Zhang Da\* Liu Yanfeng Gao Zhiliang Sun Zhenya

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to adapt to the complex space environment, the space remote sensor electric cabinet needs to have excellent mechanical stability, thermal conductivity and electromagnetic shielding performance. According to the requirements of mechanical stability, thermal conductivity and electromagnetic shielding, the electric cabinet structure of a space remote sensor is designed. The solid model is established by 3d modeling software, and the modal analysis, linear statics analysis and thermodynamics analysis are carried out by finite element analysis software. The results show that the fundamental frequency of the electric cabinet is 578Hz, higher than the requirement of 120Hz. Under the condition of acceleration load and 10  $^{\circ}$ C temperature field, the maximum deformation is 49µm and the maximum stress is 60.3Mpa, which are within the range of safety threshold. The rationality of the structure design is proved, which provides theoretical guidance and basis for further experimental verification.

Key words: Remote sensor; Structural design; FEM; Dynamic simulation