

航天机箱类仪器的新型结构设计

董永进 朱光武

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)



摘要: 提出了一种具有创新性的适用于航天机箱类仪器结构设计方案。与常见机箱结构相比, 新的结构设计在大幅提高机箱强度刚度的同时有效地降低了机箱的重量, 也兼顾了电磁兼容方面的需求, 内部电路的调试也非常方便, 因此非常适用于各种航天机箱类仪器。

关键词: 航天仪器; 机箱类仪器; 结构设计

A New Mechanical Design of the Cube-shaped Aerospace Instruments

Dong Yongjin Zhu Guangwu

(Center for Space Science and Applied Research of Chinese Science Academy, Beijing 100190)

Abstract: In this paper, the new mechanical design for the cube-shaped aerospace instruments were proposed. The new designed instruments have a lower weight, a promoted rigidity. They have a good performance in electromagnetic compatibility. It is also more convenient for the handling of the PCBs.

Key words: aerospace instruments; cube-shaped instruments; mechanical design

1 引言

目前, 在航天仪器中, 机箱类仪器的数量占较大比重, 一般形状较为规则(多为立方体形状), 为其其他功能系统(如数据管理系统、电子支撑系统等)提供基础服务。

一般来说, 机箱结构部分的重量, 至少占到仪器总体重量的 20% 左右, 占用了相当大部分的发射资源。由于在航天发射中, 每一克发射重量所耗费用都颇为不菲, 因此, 在机箱类载荷中, 提高箱体的强度和刚度, 同时有效减轻箱体重量, 对减轻整体发射重量、节约发射费用以及提高仪器本身的力学性能等方面都有着极为重要的意义。

2 常见的机箱结构形式

目前, 机箱的结构设计方案一般有以下几种, 具有各自的优缺点。

2.1 板拼式

机箱由 6 块板组成, 各个单板通过螺钉装配成整体。

这种机箱结构的优点: 结构简单, 容易加工, 节约材料和加工费用; 在拆卸时可以根据需要拆卸任意一块板, 在内部电路调试和更换等方面具有优势。

缺点: 由于多板通过螺钉连接, 因此整体的刚度和强度较差, 一阶谐振频率低; 单板的厚度至少 2mm 以上, 因此整体重量较大; 由于采用了大量的螺钉等紧固件, 整体装配比较费时; 如果不考虑专门电磁兼容方面的设计, 那么机箱的电磁屏蔽性能比较差。

2.2 整体式

机箱的主要结构部分为整体式, 即通过整块金属材料经过去除局部材料的方法得到合乎要求的机箱主体部分。

这种机箱的优点: 具有良好的强度和刚度, 一阶谐振频率较板拼式机箱要高; 结构的非主要承力零部件可以降低壁厚, 因此能有效降低机箱的重量, 同时保持较好的力学性能; 整体式的构型在电磁屏蔽方面有着良好的性能。

缺点：可拆卸性较差，因此只适用于内部传感器和电路部分相对简单的仪器；由于采用整块金属材料铣削加工而成，因此加工成本较高。

2.3 层叠式（笼屉式）

机箱由各个分体单元层层组合而成，层与层之间依靠螺钉或者连接杆等方式连接。

这种机箱的优点：每层机箱与其配套的电路板可独立成小整体，易于调试和安装；单板的易更换性和可维修性好；由于也是整体式的结构，因此电磁屏蔽性能较好。

缺点：组件整体式加工，加工成本高；在层数较多的情况下会导致整体散热性能变差，距离散热面较远的单元可能会出现热量集中的问题；层层分别固连的方式会将安装面传来的振动放大，距离安装面最远的组成单元可能会有恶劣的振动条件，有导致其中元器件损坏的可能。

3 机箱结构的创新设计

通过对以上几种机箱的特点的分析，本文提出了一种新的机箱设计方案，特点是：

a. 采用灵活的板拼式机箱结构，便于拆卸以及电路板的调试和更换；

b. 组成机箱的单板采用全新的构型方式，利用 6mm 厚度的铝板整体铣削而成，正反面交错加强筋设计，同时具有 6mm 厚度铝板的强度和等同于 1.5mm 厚度铝板的重量，力学性能极佳，重量也相对较小；

c. 板板连接处采用迷宫搭接方式，增加固定螺钉的数量，有效提高电磁屏蔽性能，同时增加机箱的强度和刚度；

d. 板与板连接处增加接触面积，从而提高仪器的散热能力，同时可以改善单板连接处的力学环境，避免局部失效。

3.1 结构设计

首先，完成机箱某个单板的设计。选择 6mm 厚度的铝板，然后，在该单板的一个大侧面上（称之为正面），设计出如图 1 左侧所示的凹槽，深度 5.35mm。

在该单板的另外一个侧面（称之为反面），也设计出深度为 5.35mm 的凹槽，如图 1 右侧所示。需要注意的是，在此侧面需要选择对应侧面上没有凹槽的部位进行^[1, 2]，否则，单板将会镂空。

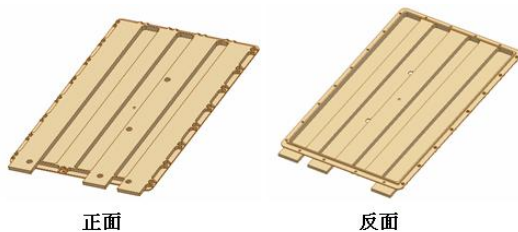


图 1 单板双面凹槽设计

同时，分别为单板的正面和反面设计如图 2 所示的加强筋，用于在增加很少重量的前提下，大幅增强单板强度。这样，单板的等效截面轮廓将等同于图 3 所示。

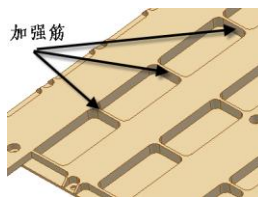


图 2 加强筋设计

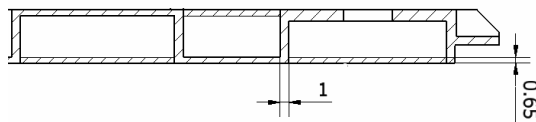


图 3 单板等效截面轮廓

综上所述，虽然单板整体采用了 6mm 厚度的铝板做为坯料，但是经过双面铣槽设计，使其等效截面轮廓呈笼形，重量大为减轻的同时，强度也得到了有效保证。经过计算，采用该设计方案的单板重量为 102g，等同于相同长度（205mm）和宽度（128mm）且厚度为 1.5mm 铝板的重量^[3]。

对于机箱的其他几个单板，也采用类似的结构设计思路，整体完成设计的机箱如图 4 所示。

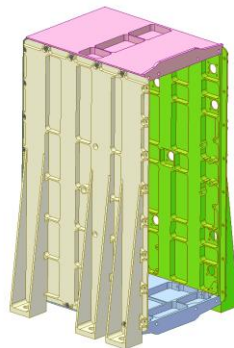


图 4 完成设计的机箱整体

3.2 结构强度的有限元分析验证

3.2.1 单板强度比较

此种设计的单板,与厚度为 1.5mm 的等重量铝平板在强度上有何区别?下面通过有限元计算的方法予以对比^[4]。

边界条件设定为:将单板长度方向上的两端固定,在板中心处施以 40N、与单板垂直方向的力。

采用本文中设计方案的单板,内部应力情况如图 5 所示。可以看出,最大等效应力约为 8.6MPa。

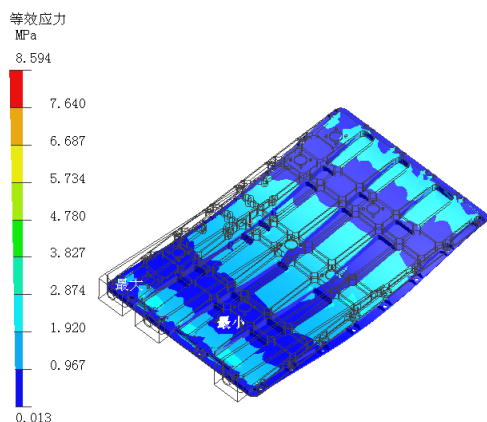


图 5 新设计单板的应力分析结果

与其相同长度和宽度、相同重量的 1.5mm 厚的铝板在相同的受力条件下,经仿真分析计算,该铝板内部最大应力约为 10.2MPa。

通过对比可知,本文中提出的单板设计方案,相比同样重量的平板方案,强度提高了大约 20%。

然后我们将采用此种新设计的机箱,与普通形式同等重量的机箱,即采用多个平板(厚度 1.5mm)拼装而成的等重量机箱进行分析并对比,以确定新设计的机箱是否在力学性能上有较大提升。

3.2.2 整机谐振频率比较

新设计的机箱与用普通形式机箱,即用 1.5mm 厚板材组成的机箱(二者重量相同)同时进行模态分析。

计算结果是,普通形式机箱的一阶基频在 390HZ 左右,而本文提出的全新结构设计的机箱一阶基频在 480HZ 左右。在不提高整体重量的前提下,新设计的机箱的一阶基频频率提高了 20%以上。

3.2.3 整机加速度受力比较

众所周知,在运载发射点火初期,由于火箭的飞行加速度的存在,导致单机受到因加速度而引起的外力 $f=ma$,下面我们分析在该加速度情况下两种不同设计机箱的内部应力情况。这里假定火箭的飞行加速

度为 10 倍地球重力加速度标准值,即 $98m/s^2$ 。

假定单机在发射时加速度方向和大小如图 6 所示(此方向为最恶劣工况)。

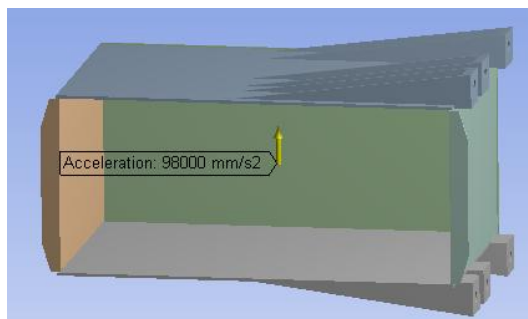


图 6 单机加速度方向和大小示意图

根据计算结果,在同等加速度情况下,新设计机箱的最大内应力为 3.5MPa 左右,普通形式机箱最大内应力为 7.7MPa 左右,新设计的机箱在抗力学性能方面得到很大的提高。

3.3 电磁兼容和热性能方面设计

采用全新设计的机箱,根据电磁屏蔽的基本原理,主要在板-板连接处,采用迷宫式的搭接结构,增加电磁波传播路径的长度和曲折程度,来达到降低电磁辐射干扰的目的^[5],如图 7 所示。

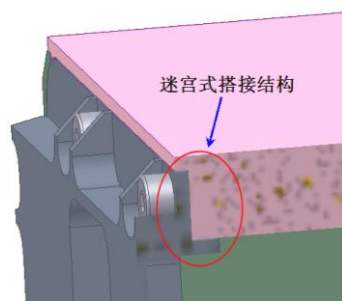


图 7 板间迷宫式搭接结构

同时,边缘处采用此种搭接设计,增加了板与板之间的接触面积,使得整机的导热性能得到进一步优化,电路板的热量能够更快地通过各个平板组成的通路传导到恒温结构处(如安装板),有利于整机更快达到热平衡状态。

为了进一步增加导热性能,适当增加了板与板之间固定螺钉的数量,使得板与板之间的接触更加良好,导热能力得到进一步提高,从而改善了整机的热性能。

