

基于 Ansys Workbench 的航空机箱框架惯性加速度随机振动与冲击分析

王晓龙, 安 迪, 汪衍映

(西安环亚航宇电子有限公司, 陕西 西安 710089)

摘要: 以航空机箱框架为研究对象, 将机箱框架三维模型导入 Ansys Workbench 中, 建立其有限元模型, 通过模拟加载惯性加速度, 研究机箱框架的静强度是否满足设计要求; 通过模态分析, 研究其六阶固有频率和振型图, 评估机箱框架发生共振的风险; 通过模拟加载随机振动的功率谱密度和后峰锯齿波形, 研究在振动和冲击条件下, 机箱框架的动强度是否满足设计要求; 通过计算分析得出, 机箱框架的固有频率大于激励频率, 因此不会发生共振的风险; 其静动强度富裕能够满足设计要求。通过对机箱框架承受惯性加速度、固有频率、功率谱密度和冲击进行有限元仿真分析, 对其环境适应试验提供了理论依据。

关键词: Ansys Workbench; 机箱框架; 惯性加速度; 随机振动; 冲击

中图分类号: V243 **文献标志码:** A

1 引言

目前兵器、航空、航天等行业在产品研制阶段, 对产品的环境适应性提出了要求。一般在样机完成阶段, 需要进行环境适应性试验, 来验证其是否满足环境适应性的要求, 如果不满足要求, 则需要对其结构进行改进和优化, 这无疑增加了研制的时间和费用成本。近年, 李雷^[1]等对飞机弹射座椅的随机振动响应仿真和试验对比, 表明测试点仿真结果与试验结果一致; 张雨^[2]等对机载天线阵面系统的随机振动响应与疲劳进行了研究; 韩涛^[3]等对机载信号控制器设计及随机振动特性分析进行了研究, 通过物理试验与仿真结果比对, 表明仿真结

果与物理试验结果吻合较好; 许良柱^[4]等运用 Ansys 对航空机箱进行动力学仿真, 得出机箱满足设计要求, 并通过了试验验证; 赵斌^[5]等对大型风力机叶片进行了随机振动分析, 为其环境适应性提供了理论依据; 王盛业^[6]等对直升机救助模拟器支撑横梁随机振动进行了响应分析, 仿真求得的振动响应与试验测试的曲线吻合良好, 验证了该方法的正确性。

本文以机箱框架为研究对象, 运用 Ansys Workbench 有限元分析软件开展惯性加速度、随机振动和冲击的研究。通过对仿真结果进行分析, 验证了机箱框架设计的合理性, 为下一步环境适应性试验提供了理论依据。

2 航空机箱框架简介

航空机箱框架三维模型如图 1 所示，机箱框架四处安装孔用于与机体进行连接，框架的四处卡槽用于模块单元的安装，机箱框架的材料参数见表 1。

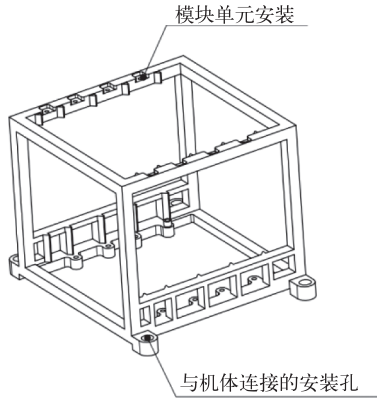


图 1 机箱框架三维模型

表 1 机箱框架材料参数

材料 牌号	密度 / (kg/ m ³)	弹性模量 / Pa	泊松比	屈服强 度 /MPa	抗拉强 度 /MPa
2A12	2.8×10^3	7.24×10^{10}	0.33	270	405

3 航空机箱框架的建模与分析

机箱框架在飞机上的坐标如图 2 所示，其中 X 为飞机的航向， Y 为飞机的侧向， Z 为飞机的垂向。

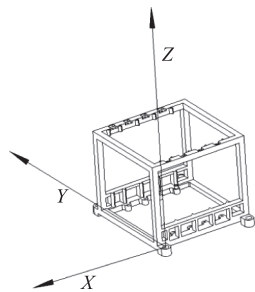


图 2 机箱框架在飞机上的坐标

3.1 航空机箱框架的有限元模型

将机箱框架的三维模型导入 Ansys Workbench 中，添加表 1 的材料参数，采用自动网格划分法对其进行网格划分，划分完成后，对与机体连接的四个安装孔处的网格进行细化，机箱框架的单元共 11 151 个，节点共 22 189 个。建立有限元模型如图 3 所示。

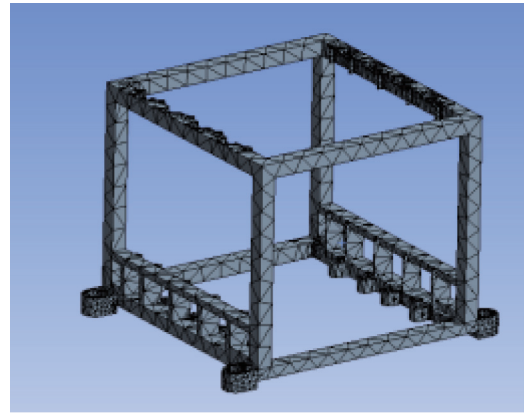


图 3 机箱框架有限元模型

3.2 惯性载荷分析

依据 GJB 150.15A—2009^[8] 得出坠撞安全加速度见表 2，考核机箱框架在严酷的加速度下，机箱框架的静强度能否满足设计要求。

添加图 1 中与机体连接的 4 个安装孔为固定约束，添加表 2 的加速度量值，计算得出各个轴向的等效应力云图见表 3。

表 2 坠撞安全加速度的方向及量值

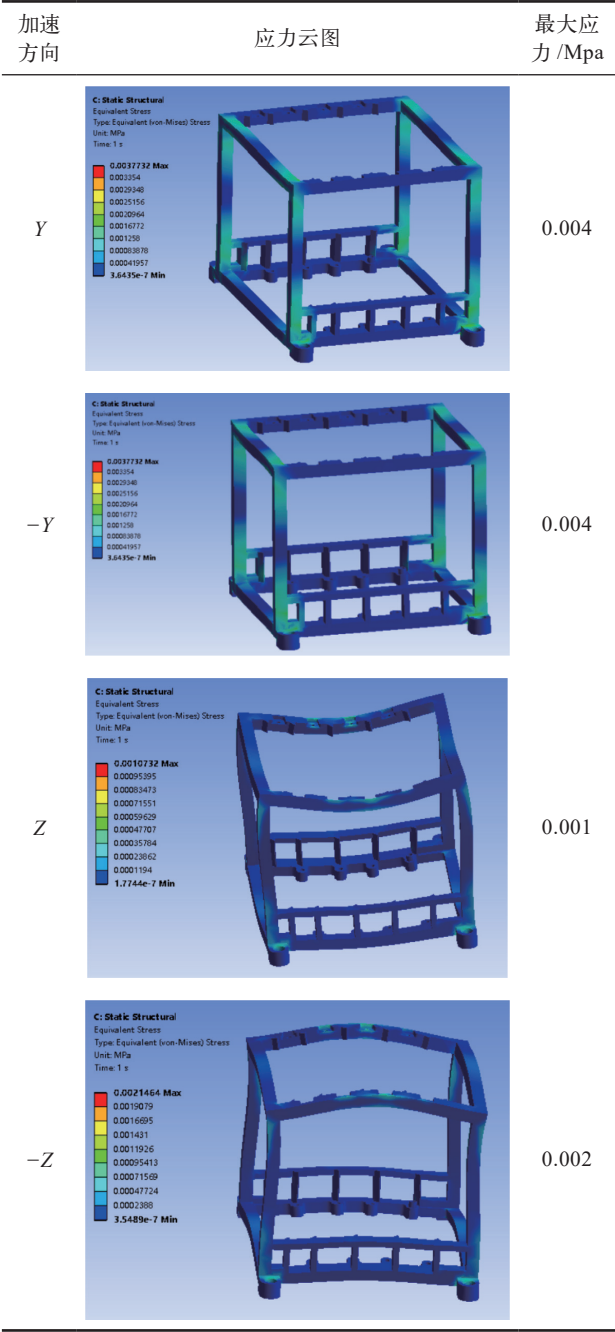
加速度方向	X	$-X$	Y	$-Y$	Z	$-Z$
加速度量值 /g	40	20	14	14	10	20

表 3 机箱框架等效应力云图

加速 方向	应力云图	最大应 力 /MPa
X		0.009
$-X$		0.005



(续)



由强度裕度计算公式

$$MS = \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_e} - 1 \tag{1}$$

式中， MS 为强度裕度； $\sigma_{0.2}$ 为屈服强度， σ_e 为等效应力，得出 6 个方向的强度裕度见表 4。

由表 4 的强度裕度可得机箱框架的静强度远满足机箱框架在惯性加速度下的强度要求。

表 4 6 个方向的强度裕度

加速度方向	强度裕度
X	29 999
-X	53 999
Y	67 499
-Y	67 499
Z	269 999
-Z	135 000

3.3 模态分析

1) 模态分析的理论。模态分析是研究结构动力学响应的一种方法，在已知激励频率的条件下，通过模态分析法可获取结构的固有频率和模态振型，可以很好地预测发生共振的风险。无阻尼模态理论控制方程

$$[M]\{\ddot{u}\} + [M]\{\mu\} = \{0\} \tag{2}$$

假设结构的自由振动为简谐运动，令

$$\{\mu\} = \{\varphi\}_i \sin(\omega_i t + \theta_i) \tag{3}$$

$$\{\ddot{u}\} = -\omega^2 \{\varphi\}_i \sin(\omega_i t + \theta_i) \tag{4}$$

将式 (3) 和式 (4) 代入式 (2) 得

$$([K] - \omega_i^2 [M])\{\varphi_i\} = \{0\} \tag{5}$$

求解出 n 个方程的根 ($\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2$)，每一个根对应一个特征向量 ($\{\varphi\}_1, \{\varphi\}_2, \dots, \{\varphi\}_n$)。

2) 机箱框架模态分析。添加图 1 中的与机体连接的 4 个安装孔为固定约束，提取前 6 阶振型图，见表 5。

激励频率公式

$$f_0 = \frac{n}{60} \tag{6}$$

式中， n 为转速， f_0 为激励频率。

已知螺旋桨的转速为 1 000rad/min，由公式 (6) 得

$$f_0 = \frac{1\,000}{60} = 16.67\text{ Hz}$$

由表 5 可知机箱框架的一阶频率为 506.69Hz，大于激励频率 16.67Hz，因此螺旋桨产生的激励不会引起机箱框架发生共振的风险。

3.4 随机振动分析

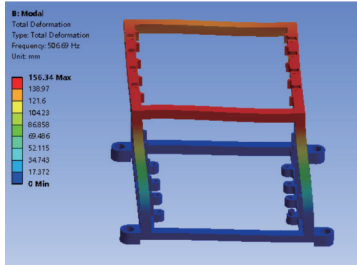
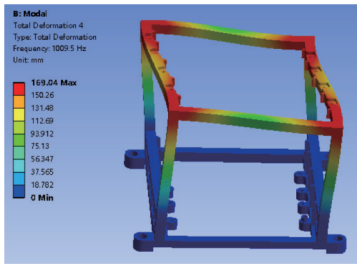
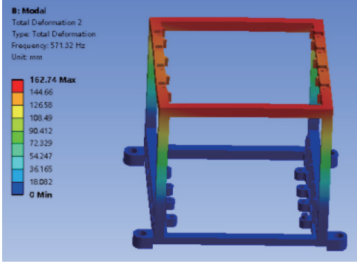
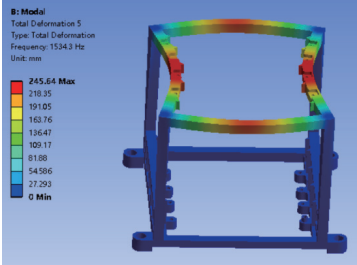
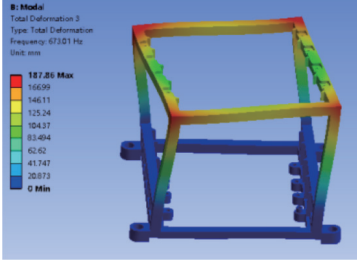
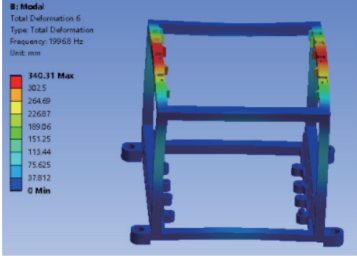
1) 随机振动的原理。随机振动分析即功率谱密度分析，是一种基于概率的功率谱密度作用过程的统计规律。功率谱密度函数是其自相关函数的傅里叶变换^[7]

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \tag{7}$$

式中， $R(\tau)$ 为激励信号的相关函数。

2) 机箱框架的随机振动计算。依据 GJB150.16A-2009^[9] 螺旋桨飞机的功率谱密度, 窄带带宽为中心频率 $\pm 5\%$, 如图 4 所示。

表 5 前 6 阶振型图

阶次	振型图	固有频率 /Hz	阶次	振型图	固有频率 /Hz
1 阶		506.69	4 阶		1 009.5
2 阶		571.32	5 阶		1 534.3
3 阶		673.01	6 阶		1 996.8

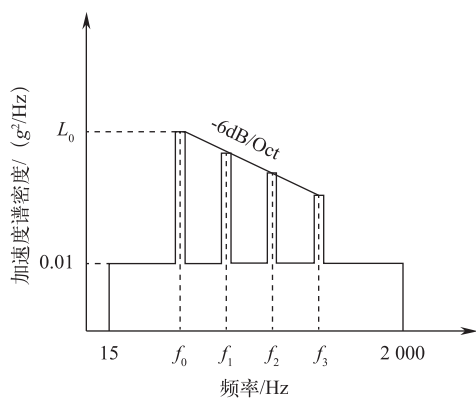


图 4 随机振动功率谱密度

已知螺旋桨共 3 个叶片, 螺旋桨的转速为 1 000rad/min, 由 GJB 150.16A—2009 得出

$$f_1 = \frac{100 \times 3}{60} = 50\text{Hz} \quad (8)$$

$$f_1 = 2f_0 \quad (9)$$

$$f_2 = 3f_0 \quad (10)$$

$$f_{23} = 4f_0 \quad (11)$$

将公式 (8) 分别代入公式 (9)、(10) 和 (11) 得出

$$f_1 = 100\text{ Hz}$$

$$f_2 = 150\text{ Hz}$$

$$f_3 = 200\text{ Hz}$$

图 4 中 Oct 是二倍频, 其计算方法为

$$1\text{Oct} = \log_2 \left(\frac{f_{i+1}}{f_i} \right) \quad (12)$$

dB 表示分贝, 其计算过程为

$$1\text{dB} = 10 \lg \frac{A_{i+1}}{A_i} \quad (13)$$

由式 (11) 和式 (12) 得出载荷谱斜率



$$m_i = \frac{10 \lg \frac{A_{i+1}}{A_i}}{\log_2 \left(\frac{f_{i+1}}{f_i} \right)} \tag{14}$$

由公式 (13) 导出公式 (14)

$$A_{i+1} = A_i \times 10^{0.1 m_i \log_2 \left(\frac{f_{i+1}}{f_i} \right)} \tag{15}$$

已知 f_0 、 f_1 、 f_2 、 f_3 和 $L_0=0.1g^2/Hz$ ，由公式 (15) 求得窄带中心频率出的振动量值见表 6。

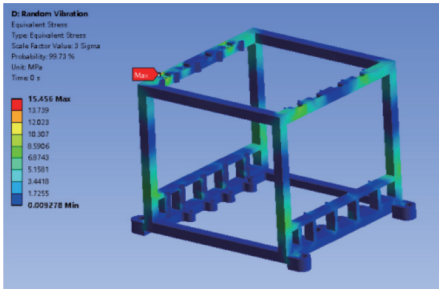
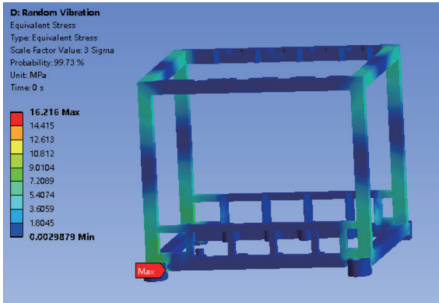
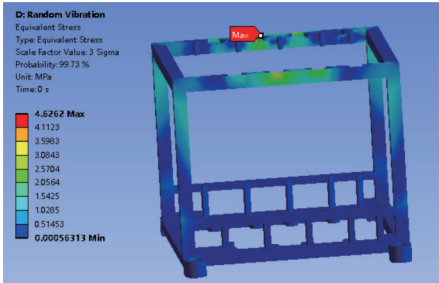
在模态分析的基础上，在 Workbench random vibration 模块中添加模态分析的约束，添加图 4 随机振动功率谱

密度，分别选择 X、Y 和 Z 方向为振动方向，求解得出等效应力云图见表 7。

表 6 窄带中心频率振动量值

名称	频率 /Hz	振动量值 / (g^2/Hz)
f_0	50	0.1
f_1	100	0.025
f_2	150	0.006
f_3	200	0.002

表 7 随机振动等效应力云图

振动方向	等效应力云图	最大应力 /MPa	最大应力所处位置
X		15.46	模块单元安装卡槽
Y		16.22	与机体接触安装孔的下缘的棱角处
Z		4.63	模块单元安装卡槽

由公式 (1) 计算的三个方向的强度裕度见表 8。

由表 8 可知强度裕度都大于 0，说明机箱框架在随机振动情况下，能够满足强度要求。

3.5 机箱框架冲击分析

依据 GJB 150.18A—2009^[10] 采用后峰锯齿波对机箱框架的三个方向进行冲击，波形如图 5 所示。运用 Ansys

Workbench Transient structural 模块添加与机体连接的 4 个安装孔为固定约束，加载如图 5 所示的载荷谱，进行求解得出表 9 的等效应力云图。

表 8 3 个方向的强度裕度

振动方向	强度裕度
X	16.26
Y	15.64
Z	57.31

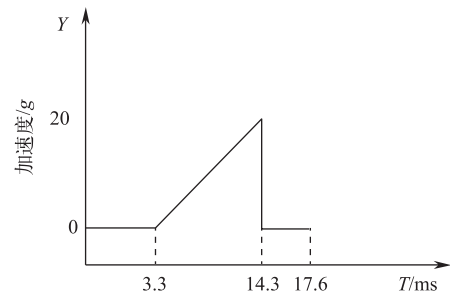
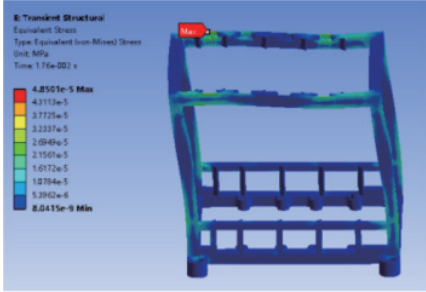
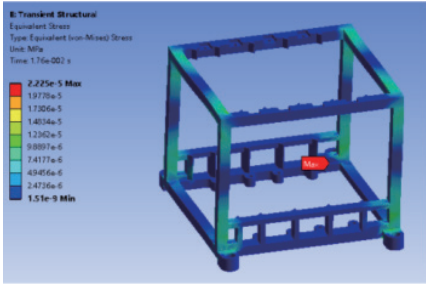
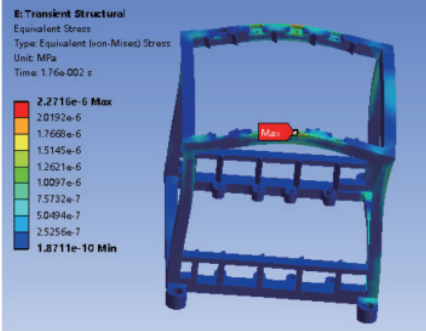


图 5 后峰锯齿波

表 9 等效应力云图

振动方向	等效应力云图	最大应力 /MPa	最大应力所处位置
X		4.9×10^{-5}	模块单元安装卡槽
Y		2.2×10^{-5}	与机体接触安装孔的下缘的棱角处
Z		2×10^{-6}	模块单元安装卡槽

由表 9 可知等效应力远小于材料许用应力，表明机箱框架在 X、Y 和 Z 方向冲击下，其强度满足要求。

4 结论

本文以机箱框架为研究对象，首先，运用有限元分

析软件 Ansys Workbench 对机箱框架承受惯性加速度进行仿真计算，结果表明其静强度富裕满足设计要求；其次，对机箱框架进行模态仿真分析得出前 6 阶固有频率和振型图，通过与激励频率进行比对，得出激励频率不会引起机箱框架发生共振的风险，对机箱框架承受随机振动

(功率谱密度)载荷下进行仿真计算,结果表明其动强度富裕满足设计要求;最后,对机箱框架承受冲击载荷进行仿真计算,结果表明其动强度富裕满足设计要求。由以上结论得出机箱框架的静动强度富裕能满足设计要求,对下一步进行环境适应性试验提供了理论依据。

参考文献

- [1] 李雷,白雅洁,何新党,等.飞机弹射座椅的随机振动响应仿真与试验对比分析[J].兵器装备工程学报,2019,40(3):227-231.
- [2] 张雨,董好志,任海林.机载天线阵面系统的随机振动响应与疲劳分析[J].机械,2022,49(8):12-17.
- [3] 韩涛,聂小华,段世慧.机载信号控制器设计及随机振动特性分析[J].工程与试验,2019,59(3):102-104.
- [4] 许良柱,张伟,陈科羽,等.ANSYS动力学仿真在航空机箱设计上的应用[J].电子产品可靠性与环境试验,2019,37(4):54-59.
- [5] 赵斌,李宇霆,王晶宇.大型风力机叶片的随机振动分析[J].甘肃科学学报,2019,31(2):64-69.
- [6] 王盛业,王海涛,熊伟,等.直升机救助模拟器支撑横梁随机振动响应分析[J].机床与液压,2022,50(12):125-130.
- [7] 李杰,陈建兵.随机振动理论与应用新进展[M].上海:同济大学出版社,2009.
- [8] 中国人民解放军总装备部.军用装备实验室环境试验方法第15部分:加速度试验:GJB150.15A—2009[S].北京:总装备部军标出版发行部,2009.
- [9] 中国人民解放军总装备部.军用装备实验室环境试验方法第16部分:振动试验:GJB150.16A—2009[S].北京:总装备部军标出版发行部,2009.
- [10] 中国人民解放军总装备部.军用装备实验室环境试验方法第18部分:冲击试验:GJB150.18A—2009[S].北京:总装备部军标出版发行部,2009.

收稿日期:2024-11-01

公 示

根据国家新闻出版署《新闻记者证管理办法》等法规有关要求,我单位《智能制造》杂志已对申领记者证人员的资格进行严格审核,现将我单位拟领取新闻记者证人员名单进行公示,公示期2025年4月17日—4月27日。举报电话为010-88379714。

拟领取新闻记者证人员名单:

沈滨汎

《智能制造》编辑部