

浅谈机载电子设备的抗振设计

张飞鹏¹ 杨霞¹ 李杰² 孙立荣³

(1 四川长虹电源有限责任公司 四川 绵阳 621000; 2 中国人民解放军 93147 部队 四川 绵阳 621000; 3 沈阳飞机设计研究所 辽宁 沈阳 110035)

摘要: 本文介绍了机载电子设备振动的来源、振动的危害, 提出了抗振设计的方法、重点介绍了抗振设计中的减振设计原理以及减振器的常用类型等, 对某应急电源进行了减振设计和随机振动摸底试验数据采集, 验证了减振设计的有效性。

关键词: 机载电子设备; 振源; 危害; 抗振; 去谐; 去耦; 减振

0 引言

机载设备是现代飞机的重要组成部分, 在现代飞机中所占份额高达 30% ~ 40%, 电子战飞机甚至达到 50%。在航空、航天领域存在大量的有害振动, 能够导致机载设备的性能较低和使用寿命缩短, 甚至机毁人亡, 造成重大事故。刘世卿提出: 据统计, 在引起机载(弹载)电子设备失效的环境因素中, 振动因素约占 27%。抗振设计是机载电子设备设计时必须充分考虑的重要技术指标, 电子设备的抗振性能也是机载设备环境适应性实验、可靠性实验中必不可少的考核项。在进行机载电子设备的结构设计中, 抗振设计显得尤为重要。

1 振动对机载电子设备造成的危害

低频情况下: 电子设备在某一激振频率下发生振幅很大的共振, 最终因振动加速度超过设备所能承受的极限加速度而直接破坏。

高频情况下: 电子设备长期处于较大的应力循环中, 每一次的振动都会使结构或者元器件产生疲劳损伤, 当损伤累积达到某一期望值时, 就会造成设备破坏。

2 常用的抗振设计方法

在进行机载电子设备机箱箱体的动力学设计时, 除了进行静强度、刚度分析外, 还应考虑它的物理特性对其内部组件、器件的影响, 关键在于合理运用避免共振设计、去耦设计来加强机箱抗振抗冲击能力以及合理运用附加阻尼来降低传递系数。

2.1 去谐设计

去谐设计就是使机箱和内部 PCB 模块的固有频率分离, 避免设备内部的局部共振现象。假设机箱的基本固有频率为 f_1 , PCB 模块的基本固有频率为 f_2 , 机箱的非共振响应为 q_1 , PCB 模块的非共振响应为 q_2 , PCB

模块的谐振响应为 Q_2 , 动态谐振比 $R=Q_2/q_1$ 。当频率比 $f_2/f_1 > 2.0$ 时, R 值会急剧降低。 W_2 和 W_1 比值越大, 其共振出现时的频率比 f_2/f_1 越小, 其关系如图 1 所示。因此, 在设计机箱和 PCB 模块时, 需要尽量提高 PCB 模块的固有频率。

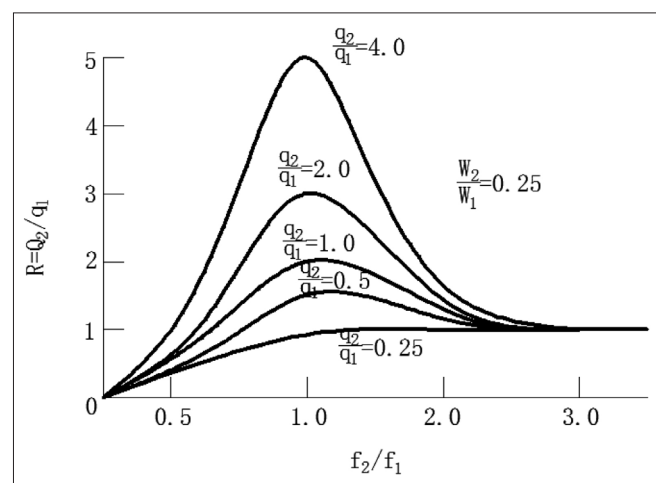


图 1 PCB 模块和机箱之间的动态谐振效应图

2.2 去耦设计

去耦就是消除多自由度系统的各振型的相关耦合。减少系统中谐振系统的数量, 从而减少共振峰数量并抑制共振峰值。

去除耦合的方法有:

- (1) 减小设备高度, 降低设备重心;
- (2) 在机箱顶部增加固定点, 通常使用在垂直高度较高的机柜安装上;
- (3) 简化能量传递路径, 使振动能量更好的传递到固定点;
- (4) 安装位置对称设计。

2.3 减振设计

在一些对抗振性能要求比较高的飞机或者飞机上振

动比较剧烈的部位（例如发动机附近），通过去谐设计、去耦设计无法满足机载设备机械环境要求，可以通过减振设计来提高设备的抗振性能。

减振设计就是在振源与设备之间采取一定措施，安放若干具有一定弹性和阻尼性能的减振装置（减振器），将振源与设备之间的刚性连接改成柔性连接，以减弱振动能量的传递。减振设计中对基本元件—减振器的要求是尽可能多的把振动能力转为热能耗散。

假设设备为单自由度系统，则设备的振动传递方程可用公式（1）表示，其关系曲线如图 2 所示。

$$\eta = \sqrt{\frac{1 + (2\xi\gamma)^2}{(1 - \gamma^2)^2 + (2\xi\gamma)^2}}$$

(1)

式中： η —振源与设备之间振动传递系数；
 ξ —振源与设备之间阻尼比；
 γ —振源与设备之间频率比。

由式（1）与图 2 可以得出：振动传递系数 η 与阻尼比 ξ 、频率比 γ 存在如下关系：

- (1) 当频率比 $\gamma=1$ 时，振动传递系数 η 值最大，表明系统发生共振，此时增加系统的阻尼有利于降低系统的共振峰值，但是阻尼增加会降低减振效率。
- (2) 当频率比 $\gamma>\sqrt{2}$ 时，减小隔振系统的阻尼对降低振动传递系数 η 是有利的，但是为了使系统能够安全通过共振区，应适当选择阻尼。
- (3) 当频率比 $\gamma>\sqrt{2}$ 时，无论阻尼比 ξ 为多大，振动传递系数 η 都等于 1，即所有曲线都相交于 $(\sqrt{2}, 1)$ 点，振动量值在该频率不放大也不衰减。
- (4) 无论阻尼比 ξ 为多大，只有当频率比 $\gamma>\sqrt{2}$ 时，振动传递率 η 才小于 1，表明振源传递到设备上的振动才得到削弱。因此，要达到减振的目的，减振

器的一阶频率必须满足 $\gamma>\sqrt{2}$ 的条件。
(5) 当频率比 γ 趋于无穷大时，振动传递率 η 趋于 0，表明振源的振动传递到设备上的振动得到有效的隔离。

3 常见减振器分类

3.1 金属减振器

原理：由金属丝网、弹簧等零件的变形提供刚度和减振所需的阻尼。
特点：工作过程中兼顾减振和缓冲作用，可以消除一般金属隔振器所存在的高频驻波问题；环境适应力强，耐酸、海水、油，耐燃、耐老化，温度范围宽（-73 ~ 260℃）。

3.2 橡胶减振器

原理：由橡胶的变形提供刚度和减振所需的阻尼。
特点：刚度与阻尼均可调节；安装空间需求小、安装多变；频率范围宽、可调节性好，产品一致性优异；可三向等刚度设计，重量轻、体积小。

4 某机载应急电源的减振设计与效果

某机载应急电源原来安装于某喷气式飞机的机身区域，与飞机之间通过前后共四个 M5 螺钉孔进行连接。应急电源主要由结构件、供电电池、逻辑控制模块、滤波组件和少量离散元器件组成。因飞机改型需要，将应急电源的安装位置改到了发动机区域，振动量值发生巨大变化。

通过计算可得，更改安装位置后应急电源原振动耐久试验加速度功率谱密度 RMS 约为 25g。新环境下的振动量值很大，现有设计可能无法保证应急电源与飞机连接的安装孔、供电电池的矩形连接器、PCB 模块、

圆形连接器等薄弱位置的可靠性。利用有限元仿真软件 ANSYS 对应急电源在新的振动耐久试验量值下的受力情况进行仿真。得到其应力图解、加速度图解如图 3 所示。

由图 3 可以得出：应急电源与飞机连接的安装孔最大应力 300.1MPa，超过铝合金底板的屈服强度（275MPa）；应急电源的整体加速度响应较大，其圆形连接器处加速度

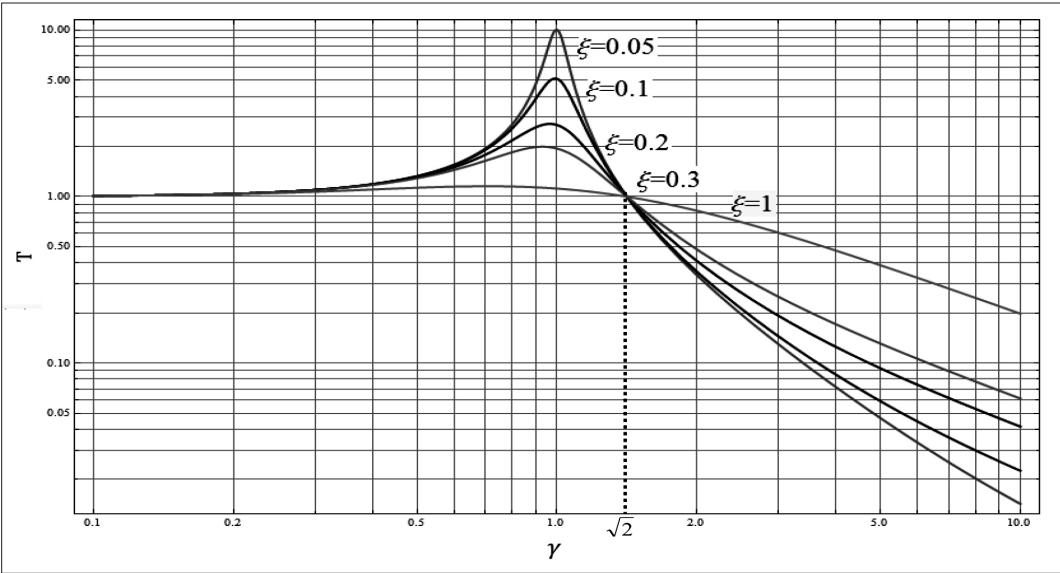


图 2 阻尼比、频率比与传递系数的关系曲线

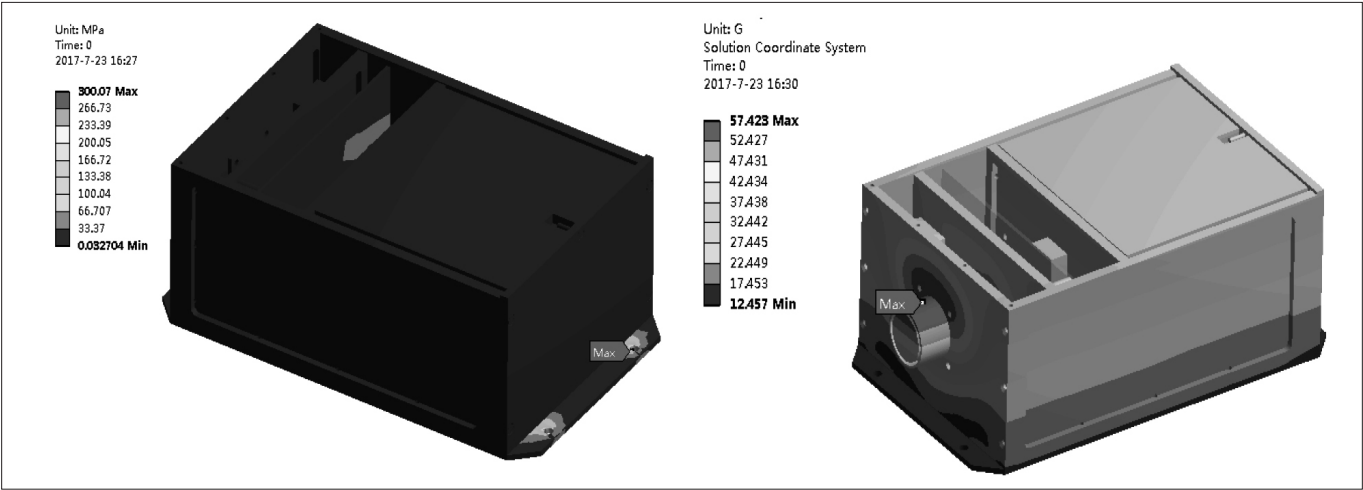


图 3 应急电源应力、加速度图解

已达到 57.4g，超过圆形连接器耐振动加速度极限值（50g）。因此，必须对应急电源进行减振设计。

现将应急电源更改为减振器安装，根据振动环境图谱可知：应急电源在频率低于 f_a 的区域内，其振动量值很低，按 f_a 点处频率为该类型振动图谱减振器的设计应小于 $f_a/\sqrt{2}$ ，才能有效隔离掉中高频区域的振动。点 f_a 对应的功率谱密度为 $W_a=0.025\text{g}^2/\text{Hz}$ ，设 300Hz 处频率为 f_b ，功率谱密度为 W_b ，则 $f_b=300\text{Hz}$ ， $W_b=0.3\text{g}^2/\text{Hz}$ ，通过公式计算可得： $f_a=46.23\text{Hz}$ 。则选用的减振器固有频率应 $<32.69\text{Hz}$ 。在此，选取了一款金属丝网三向等刚度减振器进行改装，其固有频率约为 28Hz。

对改装后的应急电源进行振动耐久摸底试验并使用数据采集仪对其振动量值进行采集，以验证产品的可靠性和减振设计的有效性。图 4 中传感器位置位于前面板上圆形连接器旁边，用来采集响应数据；另将一传感器置于振动台台面，用来采集激励数据。测量结果如图 5 所示。

由图 5 可以得出：激励曲线与试验给定图谱基本一致，实测激励加速度均方根值为 24.15g，实测响应加速度均方根值为 5.02g，其峰值位于 29.3Hz，与减振器固有频率基本一致。减振效率 I 由公式（2）计算可得 $I=79.2\%$ ，具有良好的减振效果：

$$I = 100 \times \left(1 - \frac{G_{\text{rms 输出}}}{G_{\text{RMS 输入}}} \right) \% \quad (2)$$

通过对应急电源进行减 图 5 摸底试验和激励、响应图

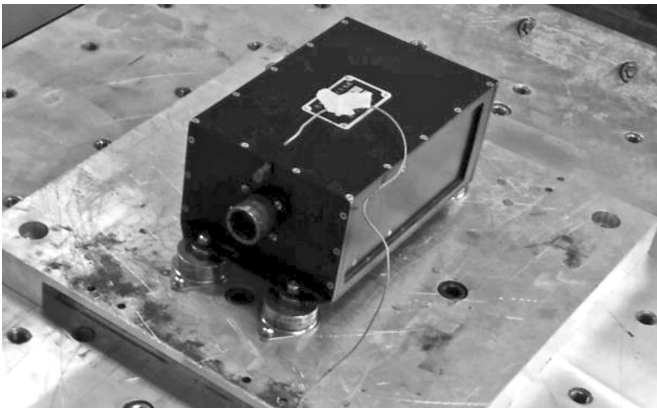
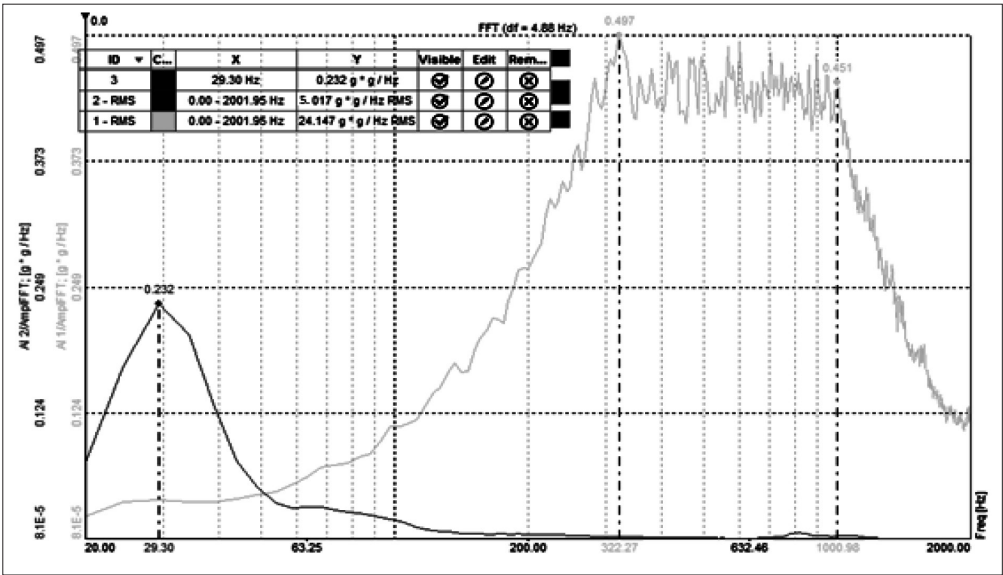


图 4 改装后的应急电源

振设计，选取合适的减振器，使应急电源有效隔离掉由振源传递过来的中高频区域的高能振动能量，达到的预期的减振设计目的，使应急电源顺利通过了振动耐久试验。



5 结语

在军用航空领域,随着飞机性能的提升,电子设备越来越趋于轻量化、微型化、集成化,这对电子设备的结构是一个巨大的考验。在进行抗振设计时,需要合理运用去谐设计、去耦设计和减振设计,选取最优的设计方案,这样才能在轻量化设计的同时,保证设备的抗振性能,提高设备的可靠性。在进行减振设计时,选用减振器还应对设备的“三防”环境、使用寿命、安装位置和尺寸等方面综合考虑。

参考文献:

[1] 刘世卿. 航电设备结构的抗振性设计[J]. 机械工程师, 2014(5): 66-69.

[2] Dave S. Steinberg. Vibration analysis for electronic equipment[M]. Wiley-Interscience, 2000.

[3] 李朝旭. 电子设备的抗振动设计[J]. 电子机械工程, 2002, 18(1): 51-55.

作者简介: 张飞鹏(1987.10-), 男, 汉族, 四川绵阳人, 本科, 工程师, 研究方向: 机载设备结构设计; 杨霞(1987.01-), 女, 汉族, 四川绵阳人, 本科, 工程师, 研究方向: 机载设备可靠性设计; 李杰(1987.06-), 男, 汉族, 四川绵阳人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 航空产品质量安全; 孙立荣(1973.08-), 女, 汉族, 辽宁抚顺人, 研究生, 研究员, 研究方向: 电力系统。

(上接第5页)

覆盖, 不仅包含空冷, 还将包括水冷, 不仅包括一般工业应用领域产品, 还将包括风电等特殊应用领域产品。除此之外, 争取将改造设计应用于更多老产品的升级改造, 为用户延长设备的使用寿命, 提高投资回报率。

5.2 更快地安装设计

现提供的改造服务产品主要是标准改造设计方案, 即多部件预装及整体现场安装的方式, 另外少部分产品提供快速安装选项(集成式整体框架预装, 减少现场安装零部件数量)。将来针对更大范围的产品, 提供快速安装选项, 并在现有设计的基础上, 进一步完善和改进, 争取实现更快捷、更方便的一步到位的快速式安装模式, 方便服务工程师现场操作, 进一步减少现场安装时间, 为客户争取更短的停机时间。

5.3 更多及更有效地使用模拟软件进行设计验证

更多利用机械设计模拟软件, 实现热模拟、振动模拟、强度校核模拟等, 提高设计可靠性, 减少制作物理样机及进行相关型式试验的频次, 从而减少设计验证时间和验证成本, 实现全面真正的数字化验证。

5.4 学习制作和使用基于物联网的AR现场安装指导

全球进入物联网时代, AR技术已经开始在各行业得到应用, 在设备制造业的服务领域, 基于AR技术的现场服务安装指导已崭露头角, 开始得到更多的关注。借助于便携式AR设备, 服务工程师可以在现场得到非常直观的与实物完全对应的安装指导, 不再需要纸质或电

子指导书, 不再需要费时费力地去理解图纸, 图像方便直观地像拼装游戏一样完成现场安装服务工作, 降低工作难度, 提高工作效率。对于后端的机械设计工程师来说, 需要使用相关软件完成大量的基础三维及AR文档制作, 并将其有效应用于改造服务产品的现场安装工作中。

6 结语

“细节决定成败”, 对于现代化改造服务产品, 机械设计的每一个细节都影响着改造产品的最终成效。优秀的机械设计, 意味着改造服务产品的质量更加可靠、现场安装更加便捷, 意味着可以最大程度的节省客户停机时间和停机成本, 使客户设备获得最大投资回报率, 进而实现客户价值的最大化。

参考文献:

[1] 秦振兴, 陈铎, 祁红波. 热轧平整产线传动系统升级改造[J]. 中国设备工程, 2020(15): 122-123.

[2] 娄连英, 王献奎, 闫孟阳. 钣金结构的机柜设计[J]. 科技传播, 2014(04): 35-36.

[3] GB 7251.1-2013/IEC 60439-1:2011, 低压成套开关设备和控制设备第1部分: 总则[S].

[4] GB 7251.2-2006/IEC 60439-2:2000, 低压成套开关设备和控制设备第2部分: 对母线干线系统(母线槽)的特殊要求[S].