

文章编号: 1001-1455(2009)04-0367-08

# 船体与设备一体化抗冲击分析\*

姚熊亮<sup>1</sup>, 戴绍仕<sup>1</sup>, 周其新<sup>1</sup>, 张阿漫<sup>1,2</sup>, 闻雪友<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

**摘要:** 从主从系统耦合振动理论出发, 基于数值实验手段, 分别以船用增压锅炉、齿轮箱为研究对象, 设计多种冲击输入对非一体化与一体化抗冲击分析例证进行数值计算, 并将计算结果进行对比。研究结果表明, 非一体化抗冲击分析方法割裂了设备与船体结构之间的耦合效应, 不能精确再现船用设备实船冲击环境, 中远场水下爆炸时非一体化抗冲击分析得到的设备响应结果偏大, 中近场时结果偏小。建议中近场水下爆炸时肋位跨度较大的船用大型设备抗冲击性能分析采用船体与设备一体化抗冲击分析方法, 若条件所限尚无法进行一体化分析, 则应对非一体化抗冲击分析结果进行修正。

**关键词:** 固体力学; 耦合效应; 一体化分析; 船用设备; 抗冲击

**中图分类号:** O342; U661.4

**国标学科代码:** 130 · 1565

**文献标志码:** A

舰船在其服役期内将会遭到水下兵器攻击, 接触爆炸造成船体损坏的同时殃及船用设备, 非接触爆炸一般并不击穿船体结构, 但会造成设备的大范围破坏, 因此设备抗冲击性能对舰船生命力具有重要意义。但船用设备(尤其船用大型设备)抗冲击性能评估以及抗冲击性能设计至今仍是亟待解决的一大难题, 目前主要采用冲击实验<sup>[1-2]</sup>、舰艇模型实验<sup>[3]</sup>、实船水下爆炸实验以及数值仿真手段<sup>[4-8]</sup>研究船用设备抗冲击性能。受冲击机和浮动冲击平台限制, 船用大型设备无法进行冲击实验, 舰艇模型实验结果尚无法由相似律推广到实船及船用设备上。水下爆炸实船实验成本十分昂贵, 且实验次数有限, 难以得到从概率统计学角度看来很有意义的实验结果, 因此数值实验手段为抗冲击性能研究提供了空间。有不考虑船用设备与船体结构之间的耦合效应, 应用相关规范仅对设备进行的抗冲击数值计算<sup>[4-8]</sup>。本文中基于主从系统耦合振动理论, 采用数值实验手段, 对某船用大型设备(增压锅炉、齿轮箱)进行非一体化以及船体与设备一体化抗冲击分析, 并对比分析结果, 以为船用设备抗冲击相关研究提供参考。

## 1 分析基础

任何一个复杂的多自由度系统总可以分解成两个或若干个子系统组成。通常, 将所关心的、要进行仔细分析的子系统称为主系统, 而另一个或若干个对主系统振动性质有影响的子系统称为从系统<sup>[9]</sup>。一般而言, 主从系统动力学性能互相耦合。船用设备与整船船体结构以及船用设备与部分船体结构(船用设备所在其中的舱段结构)都是复杂的多自由度系统。在研究设备冲击动力学性能时可将设备视为主系统, 将整船船体结构或舱段结构视为从系统, 主从系统之间通过基座、减振器等元件引起耦合。为说明问题, 将设备与船体结构(整船船体结构或舱段结构)简化为如图 1 所示的主从系统, 图中称  $m_1-k_1-c_1$  为主系统,  $m_2-k_2-c_2$  为从系统。其中  $m_1$  为船用设备等效质量,  $k_1$  为基座、减振器等元件提供的等效刚度,  $c_1$  为基座、减振器等元件提供的等效阻尼。对于整船船体结构来说,  $m_2$  为与设备相耦合的船体结构等效质量,  $k_2$  为弹性船体结构等效刚度与流体弹性等效刚度的总成,  $c_2$  为船体结构等效阻尼与流体等效阻尼的总成。对于舱段结构来说,  $m_2$  为与设备相耦合的舱段结构等效质量,  $k_2$  为舱段弹性边

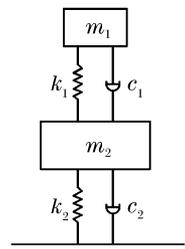


图 1 船体结构与设备主从系统  
Fig. 1 Master-slave system of ship hull and equipment

\* 收稿日期: 2008-02-25; 修回日期: 2009-01-20

基金项目: 国际科技合作项目(2007DFR80340); 国家自然科学基金项目(50779007);

国家自然科学基金青年科学基金项目(50809018); 中国博士后科学基金特别项目(200801104);

哈尔滨市科技创新专项基金项目(RC2008QN013001)

作者简介: 姚熊亮(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。

界以及弹性舱段结构提供的等效刚度与流体弹性等效刚度的总成,  $c_2$  为舱段边界以及舱段结构提供的等效阻尼与流体等效阻尼的总成。本文中探讨整船船体结构与设备构成的主从系统动力学性能, 且由于考虑的是系统冲击动力学问题, 故不计系统等效阻尼的影响<sup>[10]</sup>。

根据主从系统耦合振动理论<sup>[9-10]</sup>, 对于诸如增压锅炉、齿轮箱等大型船用设备来说, 其动力学行为与船体结构动力学行为互相耦合, 故在进行设备动力学分析时须考虑二者之间耦合效应。基于此, 分别以船用增压锅炉、齿轮箱为例, 提出进行设备抗冲击分析时采用船体与设备组装成整体进行分析的方法以计及二者之间的耦合效应, 称之为船体与设备一体化抗冲击分析。而将基于相关规范对设备单独进行抗冲击分析的方法称为非一体化抗冲击分析。

## 2 非一体化抗冲击分析例证

### 2.1 非一体化抗冲击数值实验

考虑到水下爆炸作用下舰船冲击响应以垂向为主, 沿垂向的冲击对船用设备的破坏最严重<sup>[11]</sup>, 首先采用传统的非一体化抗冲击分析方法对增压锅炉进行垂向冲击计算。根据工程经验假定 1 组增压锅炉设计冲击谱, 基于德军标 BV0430-85<sup>[12]</sup>转换为等效双三角形加速度时历曲线, 得到 1 组冲击输入, 进行非一体化抗冲击数值实验。等效双三角形加速度时历曲线如图 2 所示, 由正负 2 个脉冲组成, 正脉冲加速度峰值大, 持续时间短, 负脉冲加速度峰值小, 持续时间长。正负脉冲面积相等, 致使基础最终速度为零。  $a_2$ 、 $t_2$  分别为正脉冲加速度峰值和峰值出现时刻,  $t_3$  为正脉冲脉宽,  $a_4$ 、 $t_4$  分别为负脉冲加速度峰值和峰值出现时刻,  $t_5 - t_3$  为负脉冲脉宽。对于质量大于 5 t 的设备设计冲击谱加速度和速度值需进行折减。双三角形加速度时历曲线经验公式参见文献<sup>[12]</sup>。非一体化抗冲击分析时将冲击载荷加载于增压锅炉底座, 并且材料模型中考虑冲击作用下应变率效应, 冲击输入参数见表 1。

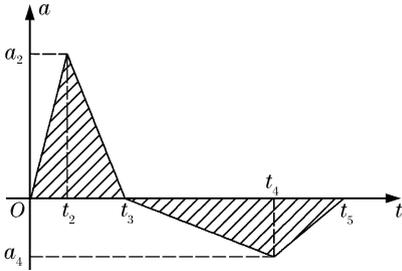


图 2 设计冲击谱等效加速度时历曲线

Fig. 2 Equivalent acceleration time domain curve of design shock spectrum

表 1 增压锅炉非一体化抗冲击分析冲击输入参数  
Table 1 Shock input parameters for non-integrated analysis of shock resistance of a supercharged boiler

工况	$a_2/g$	$t_2/ms$	$t_3/ms$	$a_4/g$	$t_4/ms$	$(t_5 - t_3)/ms$
1	68.0	4.8	12.1	-17.1	41.0	48.1
2	97.4	3.2	8.0	-16.5	36.3	47.2
3	76.6	3.6	9.1	-15.0	37.0	46.5
4	64.0	4.0	10.0	-13.0	39.5	49.2
5	83.0	2.7	6.7	-14.0	30.5	39.7
6	62.2	2.6	6.5	-9.6	31.8	42.1

### 2.2 非一体化抗冲击分析冲击响应

#### 2.2.1 设备冲击响应

限于篇幅, 仅以工况 4 为例对非一体化抗冲击分析时增压锅炉典型位置处的响应进行分析。增压锅炉外壳典型位置处垂向加速度响应见图 3 (a), 由于在时域内很难确定加速度响应频率成分, 对增压锅炉典型位置处加速度响应进行 Fourier 变换得到其 Fourier 谱以确定其主要频率成分, 对应的垂向加速度响应的 Fourier 谱见图 3(b)。由图可知非一体化抗冲击分析得到的增压锅炉加速度响应呈中低频特性。对不同冲击输入条件下非一体化抗冲击分析所得加速度响应均作 Fourier 谱分析, 发现非一体化抗冲击分析所得增压锅炉加速度响应均呈中低频特性。

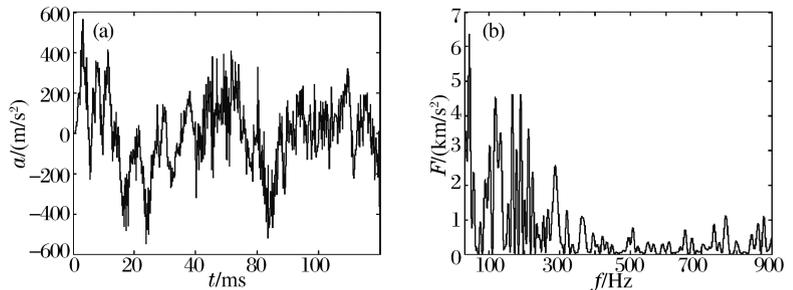


图 3 增压锅炉垂向加速度响应及 Fourier 谱

Fig. 3 Vertical acceleration response and Fourier spectrum of a supercharged boiler for non-integrated analysis

### 2.2.2 冲击响应统计分析

仅对结构某些典型部位处加速度、应力响应进行分析无法表征结构整体冲击响应。为描述冲击作用下设备整体冲击响应,将不同时刻设备加速度、Von Mises 应力响应视为场(加速度场、应力场),采用统计方法进行分析。将增压锅炉有限元模型所有节点加速度(Von Mises 应力)冲击响应看作母体,对其随机抽样,得到 1 个样本,其中样本容量  $N \geq 200$ ,由大数定律中频率近似概率的原理,通过做出样本直方图对总体分布进行非参数推断。限于篇幅,仅给出工况 4 不同时刻样本加速度、Von Mises 应力直方图以及概率密度拟合曲线,见图 4~5。

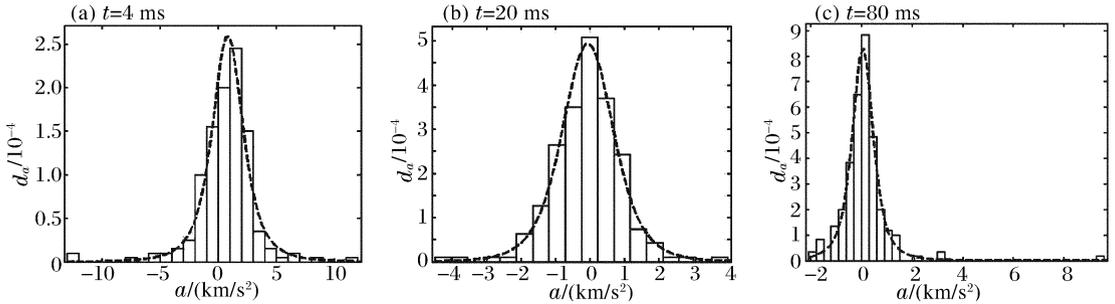


图 4 非一体化抗冲击分析加速度分布

Fig. 4 Acceleration distribution of non-integrated analysis

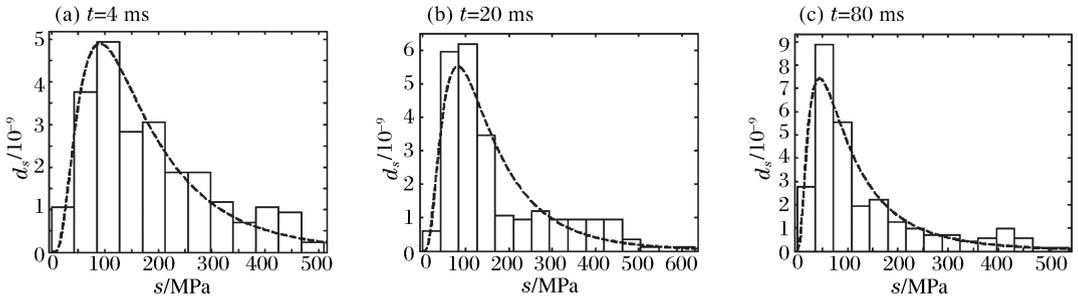


图 5 非一体化抗冲击分析应力分布

Fig. 5 Stress distribution of non-integrated analysis

由图 4 可知,冲击作用下船用增压锅炉加速度响应概率密度函数不随时间变化而变化,不同时刻加速度响应均服从  $t$  分布。由图 5 可知,Von Mises 应力响应概率密度函数也不随时间变化而变化,不同时刻 Von Mises 应力响应均服从对数正态分布。对不同冲击输入条件下非一体化抗冲击分析结果均作统计分析发现,冲击作用下不同时刻增压锅炉加速度响应服从  $t$  分布,Von Mises 应力响应服从对数正态分布。

采用同样方法对某船用齿轮箱进行非一体化抗冲击数值实验(齿轮箱结构由箱体、轴系、外挂设备、联接螺栓、销钉等构成)。得到的结论与增压锅炉非一体化抗冲击数值实验分析所得结论一样,即齿轮箱非一体化抗冲击分析所得加速度响应均呈中低频特性,且冲击作用下不同时刻齿轮箱加速度响应服从  $t$  分布,Von Mises 应力响应服从对数正态分布。

## 3 一体化抗冲击分析例证

### 3.1 一体化抗冲击数值实验

基于主从系统耦合振动理论,分析船用设备抗冲击性能时计及船体、设备之间耦合效应,采用船体与设备一体化抗冲击分析方法,对船体、设备及流场分别进行实体建模,利用建模技术将 3 者装配在一起,基于声固耦合法模拟舰船水下爆炸<sup>[13]</sup>。以增压锅炉为例进行分析,增压锅炉位于艏部,与船体之间为螺栓刚性联接。

为了使一体化抗冲击分析时设备冲击输入与非一体化抗冲击分析时的相当,对应非一体化抗冲击分析各冲击输入选取多种壳板冲击因子(简称冲击因子)反复试算,对一体化与非一体化分析时设备冲击输入进行比较,直至使一体化分析工况下通过舰船对设备的冲击输入与非一体化工况下对设备的直接输入接近为止,此处冲击输入主要以加速度峰值以及脉宽等参量为依据。其中冲击因子定义为

$$c = \sqrt{W}/R \tag{1}$$

式中: $W$  为 TNT 炸药当量,kg; $R$  为爆距,m。

最终得到非一体化冲击输入工况 1~6 对应的一体化冲击因子分别为 1.05、0.79、0.63、0.53、0.45 和 0.40。

### 3.2 一体化抗冲击分析冲击响应

#### 3.2.1 设备冲击响应

限于篇幅,仅以冲击因子  $c=0.53$  为例对一体化抗冲击分析时增压锅炉典型位置处响应进行分析。关注船用设备抗冲击性能,给出船体与设备一体化抗冲击分析时增压锅炉外壳典型位置处垂向加速度响应如图 6(a) 所示,对应 Fourier 谱见图 6(b)。由图可知,一体化抗冲击分析得到的设备加速度响应呈中高频特性。对不同冲击因子一体化抗冲击分析所得加速度响应均作 Fourier 谱分析,发现一体化抗冲击分析所得增压锅炉冲击加速度响应均呈中高频特性。

#### 3.2.2 冲击响应统计分析

对一体化抗冲击分析加速度、应力响应进行统计分析。限于篇幅,仅给出冲击因子  $c=0.53$  下不同时刻样本加速度、Von Mises 应力直方图以及概率密度拟合曲线,见图 7~8。由图 7 可知,船用增压锅炉加速度响应概率密度函数不随时间变化而变化,不同时刻加速度响应服从  $t$  分布。由图 8 可知,Von Mises 应力响应概率密度函数也不随时间变化而变化,不同时刻 Von Mises 应力响应服从对数正态分布。

同样,对某船用齿轮箱进行一体化抗冲击数值实验,齿轮箱位于艏部,与船体之间为减振器弹性联接。对齿轮箱一体化抗冲击数值实验结果进行分析,得到的结论与增压锅炉一体化抗冲击数值实验分析所得结论一样,即齿轮箱一体化抗冲击分析所得加速度响应均呈中高频特性,且冲击作用下不同时刻齿轮箱加速度响应服从  $t$  分布,Von Mises 应力响应服从对数正态分布。

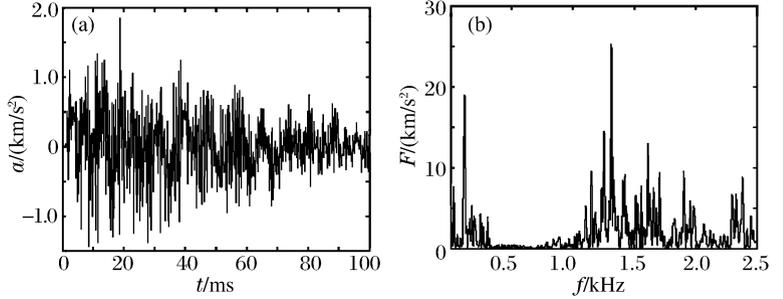


图 6 增压锅炉垂向加速度响应及 Fourier 谱

Fig. 6 Vertical acceleration response and Fourier spectrum of a supercharged boiler for integrated analysis

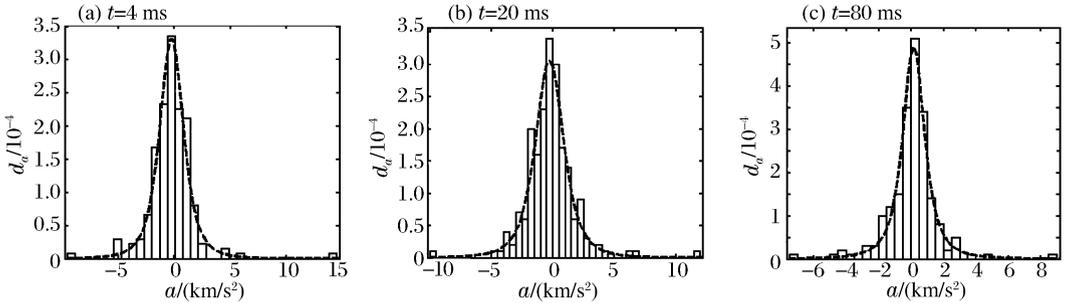


图 7 一体化抗冲击分析加速度分布

Fig. 7 Acceleration distribution of integrated analysis

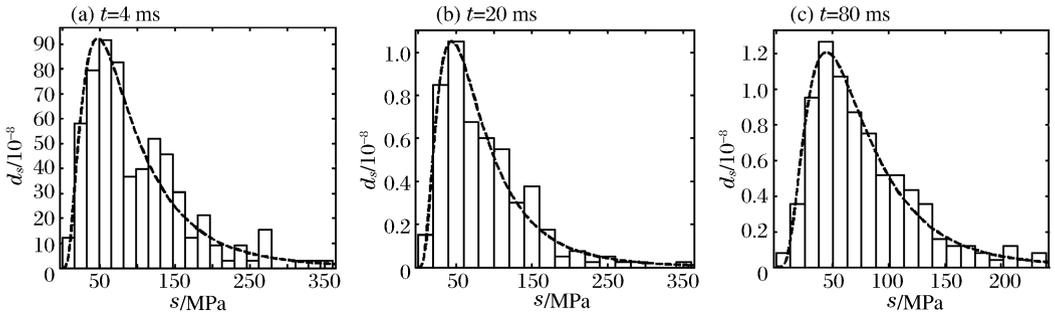


图 8 一体化抗冲击分析应力分布

Fig. 8 Stress distribution of integrated analysis

借助统计分析方法,综合大量算例计算结果,认为冲击作用下不同时刻设备加速度场服从 t 分布,Von Mises 应力场服从对数正态分布。

### 4 对比分析

由统计分析方法可知,一体化抗冲击分析与非一体化抗冲击分析得到的设备加速度场不同时刻均服从 t 分布,应力场不同时刻均服从对数正态分布,故从加速度场、应力场概率密度函数角度来说,一体化分析与非一体化分析具有相同的形式。但对比图 3 与图 6,一体化分析加速度响应峰值比非一体化分析的大,且一体化分析加速度响应呈中高频特性,而非一体化分析加速度响应呈中低频特性。并且一体化分析应力响应峰值比非一体化分析的大。可见,一体化抗冲击分析方法与非一体化抗冲击分析方法得到的加速度响应幅值、频率特性以及应力响应幅值均有差别。以增压锅炉、齿轮箱为对比分析对象,从加速度幅值、冲击谱值以及应力幅值角度出发,以一体化抗冲击分析结果作为基准,对比一体化抗冲击分析与非一体化抗冲击分析结果。为表征设备整体冲击响应,采用统计分析方法,将设备有限元模型所有节点冲击响应值(加速度幅值、冲击谱值或应力幅值)看作母体,进行抽样分析。并将一体化抗冲击分析与非一体化抗冲击分析所得某一物理量数值的比值视为以冲击因子为参变量的随机函数。

#### 4.1 加速度响应对比

记一体化抗冲击分析样本中个体加速度响应峰值为 A,非一体化抗冲击分析样本中个体加速度响应峰值为 A',加速度响应峰值之比为  $\bar{A}$ ,将  $\bar{A}$  视为以冲击因子为参变量的随机函数,即

$$\bar{A}(c) = A/A' \tag{2}$$

对所取样本,由随机函数数学期望定义比值  $\bar{A}(c)$  数学期望

$$E[\bar{A}(c)] = \int \bar{A} f(\bar{A}) d\bar{A} \tag{3}$$

式中:  $f(\bar{A})$  为随机函数  $\bar{A}$  的概率密度。  $E[\bar{A}(c)]$  随冲击因子  $c$  变化曲线如图 9(a) 所示。

由图 9(a) 可以看出,当  $c \leq 0.45$  时非一体化抗冲击分析结果比一体化抗冲击分析结果大,当  $c > 0.45$  时非一体化抗冲击分析结果比一体化抗冲击分析结果小。当  $c < 0.79$  时非一体化抗冲击分析加速度响应结果与一体化抗冲击分析较为接近,误差在 20% 以内。

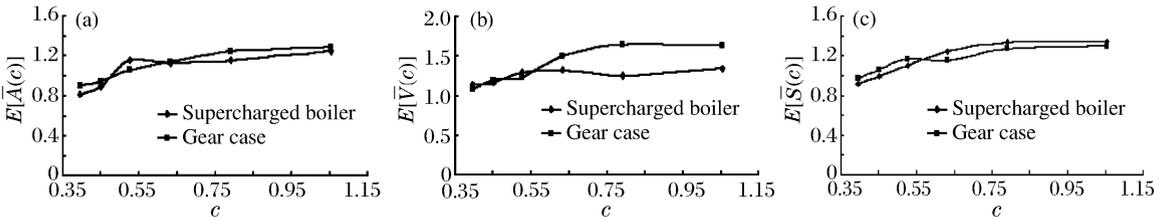


图 9 加速度比值、谱速度比值和应力比值的数学期望随冲击因子变化曲线

Fig. 9 Expectations of acceleration ratio, velocity spectrum ratio and stress ratio varied with shock factors

#### 4.2 冲击谱对比

通过 Duhamel 积分计算冲击载荷作用下设备加速度时间历程响应的冲击谱,并对谱速度值进行对比。样本个体冲击谱如图 10 所示,可见一体化抗冲击分析与非一体化抗冲击分析得到的冲击谱在 10~400 Hz 的中频段是冲击能量密集频段,该频段冲击速度高于其他频段,且等速度段平而宽,在中高频段有较密集的振动频率。另外,一体化抗冲击分析得到的谱速度最大值比非一体化抗冲击分析所得结果大。

记一体化抗冲击分析样本中个体谱速度峰值为 V,非一体化抗冲击分析样本中个体谱速度峰值为 V',谱速度峰值之比为  $\bar{V}$ ,将  $\bar{V}$  视为以冲击因子为参变量的随机函数,即

$$\bar{V}(c) = V/V' \tag{4}$$

对所取样本,得数学期望

$$E[\bar{V}(c)] = \int \bar{V} f(\bar{V}) d\bar{V} \tag{5}$$

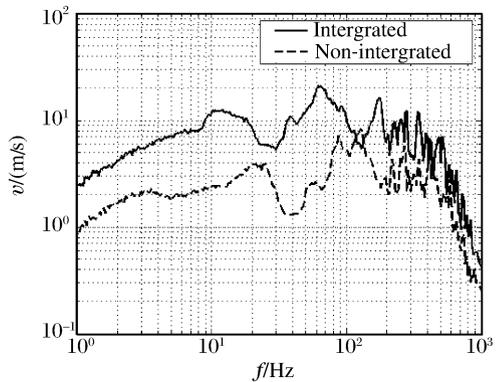


图 10 样本个体冲击谱

Fig. 10 Shock spectrum of sample point

式中:  $f(\bar{V})$  为随机函数  $\bar{V}$  的概率密度。  $E[\bar{V}(c)]$  随冲击因子  $c$  变化曲线如图 9(b) 所示。

图 9(b) 表明非一体化抗冲击分析得到的谱速度值比一体化抗冲击分析结果小。当冲击因子  $c \leq 0.45$  时, 非一体化抗冲击分析与一体化抗冲击分析谱速度值结果接近, 误差在 20% 以内。

### 4.3 Von Mises 应力响应对比

记一体化抗冲击分析样本中个体 Von Mises 应力响应峰值为  $S$ , 非一体化抗冲击分析样本中个体 Von Mises 应力响应峰值为  $S'$ , Von Mises 应力响应峰值之比为  $\bar{S}$ , 将  $\bar{S}$  视为以冲击因子为参变量的随机函数, 即

$$\bar{S}(c) = S/S' \quad (6)$$

对所取样本, 得数学期望

$$E[\bar{S}(c)] = \int \bar{S} f(\bar{S}) d\bar{S} \quad (7)$$

式中:  $f(\bar{S})$  为随机函数  $\bar{S}$  的概率密度。  $E[\bar{S}(c)]$  随冲击因子  $c$  变化曲线如图 9(c) 所示。

由图 9(c) 可以看出, 当  $c < 0.45$  时, 非一体化抗冲击分析得到的 Von Mises 应力响应结果比一体化抗冲击分析结果大, 当  $c \geq 0.45$  时, 非一体化抗冲击分析得到的 Von Mises 应力响应结果比一体化抗冲击分析结果小。当  $c \leq 0.53$  时, 非一体化抗冲击分析与一体化抗冲击分析得到的 Von Mises 应力响应结果较为接近, 误差在 20% 以内。

由以上对比分析结果可知, 当冲击因子  $c < 0.45$  时(中远场水下爆炸), 非一体化抗冲击分析所得加速度响应、应力响应值偏大, 但误差在 20% 以内。即中远场水下爆炸时, 工程上可用非一体化抗冲击分析方法进行设备抗冲击性能评估。但当冲击因子  $c \geq 0.45$  时(中近场水下爆炸), 采用非一体化抗冲击分析方法进行设备冲击分析时结果将偏小, 故可能会导致设备虽在进行冲击试验时合格但安装到实船上后由于实船局部恶劣冲击环境致使其破坏的情况。所以在中近场水下爆炸时应采用一体化抗冲击分析方法对设备进行抗冲击性能评估, 若条件所限尚无法开展一体化抗冲击分析, 则应对非一体化抗冲击分析结果进行修正。即记非一体化抗冲击分析结果为  $\eta$ , 记修正之后的结果为  $\eta'$ , 则

$$\eta' = \alpha \eta \quad (8)$$

式中:  $\alpha$  为修正因数, 且  $\alpha > 1$ 。对计算结果进行分析, 结合图 9, 可得到加速度、谱速度和 Von Mises 应力的修正因数  $\alpha$  值分别为 1.31、1.66 和 1.39。

### 4.4 原因分析

对比分析结果, 对于中远场水下爆炸, 非一体化抗冲击分析结果偏大, 中近场时非一体化抗冲击分析结果偏小。可以从 2 个方面来解释这一现象: (1) 对于水下爆炸中远场情况, 德军标 BV0430-85 将谱跌效应<sup>[6,14]</sup>考虑得偏小, 而在中近场情况将谱跌效应考虑得偏大(对于质量大于 5 t 的设备, 德军标 BV0430-85 通过对设计冲击谱加速度和速度值进行折减以考虑谱跌效应, 折减公式参见文献[12]); (2) 非一体化抗冲击分析与一体化抗冲击分析冲击输入特性不同。非一体化抗冲击分析是将设计冲击谱等效加速度历程曲线作为冲击载荷加载到设备上, 对设备来说这种冲击输入具有均匀性。但实际上对于船用设备的冲击输入, 尤其肋位跨度较多的船用大型设备冲击输入, 船体基座不同位置处各不相同。表 2 给出冲击因子为 0.53 时的设备冲击输入特性,  $A$  为加速度峰值,  $f$  为主要频率。

由表 2 可见, 设备不同位置处的加速度冲击输入最大值及主要频率成分均不相同, 说明设备的实船冲击环境具有非均匀性(对于肋位跨度较多的船用大型设备来说这种非均匀性非常明显)。因而非一体化抗冲击分析不能精确计及设备与船体结构之间交互耦合作用, 无法再现船用设备实船冲击环境。

## 5 结 论

从主从系统耦合振动理论出发, 基于数值实验手段, 采用船体与设备一体化抗冲击分析方法对船用增压锅炉、齿轮箱进行抗冲击时域分析, 将计算结果与非一体化抗冲击分析结果对比, 得到以下主要结论:

- (1) 对中远场水下爆炸, 非一体化抗冲击分析得到的设备响应结果偏大, 中近场时非一体化抗冲击分析结果偏小;
- (2) 对于中近场水下爆炸船用设备抗冲击性能分析, 建议采用船体与设备一体化抗冲击分析方法, 若条件所限尚无法进行一体化抗冲击分析, 则应对非一体化抗冲击分析结果进行修正;
- (3) 冲击作用下不同时刻设备加速度场服从  $t$  分布, Von Mises 应力场服从对数正态分布。

表 2 设备冲击输入特性

Table 2 Shock input characteristics of equipment

基座节点	$A/g$	$f/Hz$
1	45.7	111.5
2	86.2	267.8
3	91.5	472.1
4	54.3	128.0
5	81.7	348.4
6	47.9	156.2
7	103.6	413.8
8	33.3	110.3

## 参考文献:

- [1] 李国华, 李玉节, 张效慈, 等. 舰船设备冲击环境的能源研究[J]. 船舶力学, 1998, 2(1): 37-54.  
LI Guo-hua, LI Yu-jie, ZHANG Xiao-ci, et al. Study of power source for shock environment of ship equipment [J]. Journal of Ship Mechanics, 1998, 2(1): 37-54.
- [2] 汪国和, 尹立国, 沈荣瀛, 等. 筏体和基础弹性对船舶设备冲击响应影响的试验分析[J]. 振动与冲击, 2006, 25(2): 109-112.  
WANG Guo-he, YIN Li-guo, SHEN Rong-ying, et al. Experimental study on non-linear shock response of ship-board equipment in consideration of elasticity of raft body and base[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(2): 109-122.
- [3] 李国华, 李玉节, 张效慈, 等. 气泡运动与舰船设备冲击振动关系的试验验证[J]. 船舶力学, 2005, 9(1): 98-105.  
LI Guo-hua, LI Yu-jie, ZHANG Xiao-ci, et al. Experimental verification of relationship between bubble motion and shock vibration of ship equipment[J]. Journal of Ship Mechanics, 2005, 9(1): 98-105.
- [4] Liang Cho-chung, Yang Min-fang, Tai Yuh-shiou. Prediction of shock response for a quadruped-mast using response spectrum analysis method[J]. Ocean Engineering, 2002, 29(8): 887-914.
- [5] 刘建湖. 舰船非接触水下爆炸动力学的理论与应用[D]. 无锡: 中国船舶科学研究中心, 2002.
- [6] 汪玉, 胡刚义, 华宏星, 等. 带限位器的船舶设备非线性冲击响应分析[J]. 中国造船, 2003, 44(2): 39-44.  
WANG Yu, HU Gang-yi, HUA Hong-xing, et al. Non-linear shock response analysis of shipboard equipment using shock isolator with displacement limit[J]. Shipbuilding of China, 2003, 44(2): 39-44.
- [7] 汪国和, 尹立国, 吴广明, 等. 筏体和基础弹性对设备冲击响应影响的有限元分析[J]. 噪声与振动控制, 2004, 6: 11-14.  
WANG Guo-he, YIN Li-guo, WU Guang-ming, et al. Effect on non-linear shock response of shipboard equipment caused by elasticity of raft body and base[J]. Noise and Vibration Control, 2004, 6: 11-14.
- [8] 陈晓洪, 崔鲁宁, 浦金云. 爆炸及冲击效应对舰船电力系统生命力的影响分析[J]. 船海工程, 2005, 6: 7-10.  
CHEN Xiao-hong, CUI Lu-ning, PU Jin-yun. The impact analysis of explosion and shock effect to the electric power system of ship[J]. Ship & Ocean Engineering, 2005, 6: 7-10.
- [9] 陆鑫森. 高等结构动力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992: 84-87.
- [10] 金咸定, 赵德有. 船体振动学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000: 27; 65-67.
- [11] 郭镇明, 唐嘉亨, 丛望. 非接触爆炸下舰船电力系统生命力的研究方法[J]. 船舶工程, 1996, 2: 31-35.  
GUO Zhen-ming, TANG Jia-heng, CONG Wang. A method for estimating survivability of warship power system in non-contact explosion[J]. Ship Engineering, 1996, 2: 31-35.
- [12] BV0430-85, 德国国防军舰建造规范-冲击安全性[S]. 科布伦茨: 联邦德国国防装备技术和采购局, 1987.
- [13] 姚熊亮, 张阿漫, 许维军. 声固耦合方法在舰船水下爆炸中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2005, 26(6): 707-712.  
YAO Xiong-liang, ZHANG A-man, XU Wei-jun. Application of coupled acoustic-structural analysis to warship underwater explosion[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2005, 26(6): 707-712.
- [14] 汪玉, 华宏星. 舰船现代冲击理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 69-74.

## Numerical experiment methods for ship hull and equipment integrated analysis on shock resistance of shipboard equipments

YAO Xiong-liang<sup>1\*</sup>, DAI Shao-shi<sup>1</sup>, ZHOU Qi-xin<sup>1</sup>,

ZHONG A-man<sup>1,2</sup>, WEN Xue-you<sup>2</sup>

(1. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University,

Harbin 150001, Heilongjiang China;

2. Harbin Marine Boiler and Turbine Research Institute,

Harbin 150036, Heilongjiang, China)

**Abstract:** Based on the theory for coupled vibrations of master-slave systems, numerical experiments were carried out to explore how to evaluate the shock resistance and how to design the shock protection for shipboard equipments, especially for large-scale shipboard equipments. By choosing shipboard supercharged boilers and gear cases as research objects, the non-integrated and integrated exemplification analyses were investigated numerically by devising a series of shock input data. The non-integrated analysis method for shock resistance does not take the coupling effects between the equipment and ship hull into account and cannot reproduce the real shock environments of shipboard equipments precisely. For the underwater explosions in the middle-far fields, the non-integrated analysis results are greater than the integrated analysis results, and for the underwater explosions in the middle-near fields, the non-integrated analysis results are smaller. The ship hull and equipment integrated analysis method can be used to evaluate the shock resistance of large-scale shipboard equipments subjected to underwater explosions in middle-near fields. If the existing situation can meet an integrated analysis, the non-integrated analysis results should be amended.

**Key words:** solid mechanics; coupling effect; integrated analysis; equipment; shock resistance

\* Corresponding author: YAO Xiong-liang

E-mail address: xiongliangyao@gmail.com

(责任编辑 丁峰)

## 本刊关于稿件、版权等声明

在投稿、稿件处理、发表等过程中,作者需注意如下问题:

1. 稿件是作者独立取得的原创性研究成果,无抄袭,无一稿多投,未在国内外公开发表过。
2. 稿件无政治错误,不涉及保密和拟申请专利的内容,已经过作者单位保密审查。
3. 作者署名和排序无异议,单位署名和排序无争议,且无知识产权纠纷。在稿件处理过程中,如有作者或单位署名变更,需有全体作者亲笔签名和全部单位盖章同意的书面声明。
4. 稿件由编辑部组织审稿。自收稿之日时,编辑部将在4个月内反馈处理结果。若超过4个月未答复的,作者有权另行处理稿件,但需事先通知编辑部。
5. 对录用的稿件,在尊重稿件内容的基础上,编辑部有权作必要的修改和删减,按规定进行标准化和规范化。
6. 稿件录用后,稿件的所有出版版权归编辑部。
7. 稿件发表后,编辑部赠送样刊,并一次性付给作者稿酬及版权转让费。

爆炸与冲击

2009年7月25日