

## Research and application of life force evaluation of ship power system

Liu Liang

Ocean University of China, Qingdao

**Abstract:** A survivability simulation assessment model of the power system was established with a fictitious ship as an example. It is a computer-based stochastic simulation model for the power system attacked by various weapons and multi-damage factors as well. The model was proved to be reasonable and so it can be used to find the deficiencies in the design of the ship power system, offer the improving approaches and analysis results, which is of importance to improving the survivability of the ship power system. The model can be also applied to the survivability assessment of other systems.

**Key words:** multiple at tacking; power system; survivability

Received: 2019-08-24; Accepted: 2019-09-07; Published: 2019-09-21

# 舰船动力系统生命力评估研究及应用

刘 良

中国海洋大学，青岛

邮箱: cliu08488@sina.com

**摘 要:** 以某假想船动力系统为例，建立了多种武器攻击多次命中，多种损伤因素综合作用情况下，基于计算机随机模拟舰艇动力系统生命力评估模型，并验证了其合理性。运用该模型能找出舰艇动力系统的设计薄弱环节，提出改进措施，并可以对改进效果进行分析，这对提高舰艇动力系统的生命力将有重要的意义，也适用于其他系统的生命力评估。

**关键词:** 多次命中；动力系统；生命力

收稿日期：2019-08-24；录用日期：2019-09-07；发表日期：2019-09-21

---

Copyright © 2019 by author(s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



在现代海战中,攻击武器的威力越来越大,命中精度也越来越高,舰艇动力系统遭受多种武器多次攻击的可能性也越来越大。所以,如何在设计中对动力装置的生命力进行良好的设计,对其设计效果进行评估,针对其薄弱环节提出改进措施,并对改进措施的效果进行评价,这些对优化舰艇动力系统生命

力设计、提高舰艇动力系统的生命力乃至全舰生命力以及保障舰艇战斗力的充分发挥将有重要的意义。当前,对动力系统生命力评估常用方法有破损半径法、逻辑代数法,它们各有优缺点,如破损半径法对单次命中较适合,对多次命中则会出现较难处理的相容事件;逻辑代数法在数学运算和逻辑方面是严密的,但对复杂系统运算量较大,比较繁琐。针对在武器多次命中情况下,上述舰艇动力系统生命力评估方法的不足,文中建立了基于随机模拟的多种武器攻击、多次命中情况下,舰艇动力的系统生命力评估模型,并进行了示例验证。

## 1 动力系统生命力仿真评估模型

### 1.1 设备损伤因素、设备损伤域值及设备状态确定

#### 1.1.1 设备损伤因素及设备损伤域值

动力系统损伤因素主要有:直接破坏、浸水破坏和冲击破坏。直接破坏包括破片、超压与火球破坏,武器直接命中时,爆破作用占主导地位,可认为在武器破坏半径范围内设备均已损坏。武器破坏半径  $R_b$  可以根据炸药或装药密度的不同、装药的爆热不同,由能量相似原理确定 [1]。推进主机存在浸水破坏模式,易损区间长为  $L_0 = L_1 + 2R_b$ 。

式中:  $L_1$  为主机舱长。冲击破坏主要以设备所能承受的冲击加速度、冲击速度或变形来衡量其是否损坏,其损伤阈值可参照相关标准与动力系统设计要求确定。当某种武器命中舰艇所造成的冲击环境大于系统设备所能承受的冲击阈值,则认为设备损伤。

某一假想舰艇动力系统布置与后机舱主机浸水破坏易损区间长如图1所示。

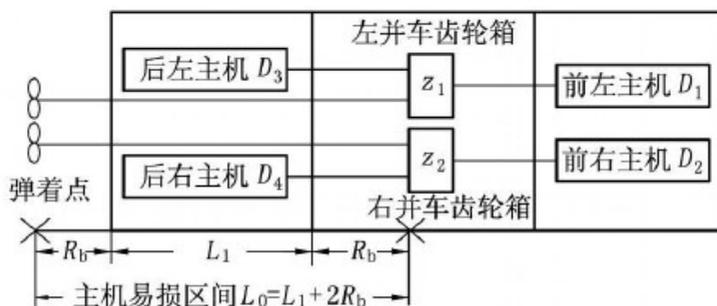


图1 动力系统布置与浸水破坏易损区间长

### 1.1.2 设备状态确定

系统设备数据库的建立包括设备长、中心位置坐标、舱壁边界位置坐标。设备如果具有某种损伤模式，则令该损伤模式属性值为真，否则为假。

### 1.1.3 设备损伤判断

设备状态完好与否的状态值  $Equ.value$  可根据式(2)确定。

$$Equ.value = \begin{cases} 0, & \text{设备状态完好;} \\ 1, & \text{设备状态损伤} \end{cases}$$

武器命中后，设备在武器破坏半径范围内，造成直接损伤，  
 武器命中后，设备处在易损区间范围内，设备存在浸水损伤模式，  
 武系统设备数据库的建立包括设备长、中心位置坐标、舱壁边界位置坐标。设备如果具有某种损伤模式，则令该损伤模式属性值为真，否则为假。

## 1.2 损伤等级定义

根据图1所示，假想船动力系统的布置为四机双桨，前后主机舱同舷的两台主机共用一个并车齿轮箱，可实现单机运行、双机运行、三机或四机并车运行等多种运行工况。根据系统在武器攻击命中后所损失的功率数，定义动力系统损伤等级，并根据损伤等级严重程度与专家意见确定权重因素集(见表1)。

损伤等级	损伤等级权重因素	等级描述	损伤情况
A	0.4	系统完全失效, 4台主机全部发不出功率。	两台轴系均损伤, 或左右并车齿轮箱均损伤, 或4台主机均损伤。
B	0.3	系统严重损伤, 3台主机发不出功率。	4台主机任意损失3台; 左右并车齿轮箱损伤一个, 对侧主机损失一台; 轴系损失一条, 且对侧主机损失一台。
C	0.2	系统严重损伤, 2台主机发不出功率。	4台主机任意损失2台, 或左右并车齿轮箱损伤一个, 或左右轴系损失一条。
D	0.1	系统局部损伤, 1台主机发不出功率, 或局部轻微损伤。	4台主机任意损失1台, 或局部轻微损伤, 可降功率使用。

### 1.3 攻击武器及权重确定

根据现代海战中舰艇可能遭受的主要威胁武器的种类、命中舰艇的分布特点、武器的相对重要程度, 命中假想船的武器种类、概率密度分布函数和权重可如表2所示。

表2: 武器命中舰艇概率密度分布函数及武器权重

武器种类	武器命中舰艇概率密度分布函数	武器权重
导弹	$p_1(x) = \frac{1}{41\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-7)^2}{2 * 35.16^2}\right)$	$R_1 = 0.4664$
炸弹	$p_2(x) = \frac{1}{45\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2 * 43^2}\right)$	$R_2 = 0.2248$
鱼雷	$p_3(x) = \frac{1}{31.45\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-1)^2}{2 * 31.25^2}\right)$	$R_3 = 0.0673$
水雷	$p_4(x) = \frac{1}{31.55\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x+40)^2}{2 * 31.25^2}\right)$	$R_4 = 0.2415$

### 1.4 随机产生单次或多次命中弹着点

对单次命中而言, 动力系统生命力评估, 根据表2命中假想船动力系统武器种类、概率密度分布函数, 随机生成导弹、炸弹、鱼雷、水雷的命中的弹着点, 如果模拟1万次攻击, 则对应导弹、炸弹、鱼雷、水雷分别生成1万个命中假想船的弹着点。

如果是两次命中, 则一次生成两个随机命中点, 这两个点作为一组, 可生成1万组两次命中弹着点, 作为假想船动力系统生命力评估的样本空间。同样,

可进行更多次的武器攻击下的系统生命力评估。

## 1.5 系统设备损伤判断及不同损伤等级损伤概率计算

在系统初始状态时，所有系统设备的状态值在数据库中，均设为完好，即令其  $Equ.value=0$ ，根据 1.1 节及武器命中点，判断系统设备状态是否完好；当在某次攻击时，设备在综合损伤因素作用下，如果损伤，则令该设备的  $Equ.value=1$ ；如果是多次攻击，则在该组攻击点作用下，凡是损伤的设备令其  $Equ.value=1$ 。在模拟武器某次或某组攻击结束时，可由计算程序统计所有的损伤设备。

## 1.6 系统损伤概率加权评估

1) 根据某次或某组命中点模拟攻击结束时，由计算程序统计出的所有的损伤设备以及表 1 定义的动力系统损伤等级及描述，确定隶属于 A 级、B 级、C 级、D 级损伤设备的最小割集。进而可以确定某次或某组命中点在模拟攻击结束时，系统损伤所处的损伤等级。

2) 设某种武器模拟攻击总次数为  $N$ ，隶属于 A 级、B 级、C 级、D 级损伤的次数分别为  $n_A, n_B, n_C, n_D$ 。则当  $N$  足够大时，可以根据统计试验法求出该种武器命中的不同损伤等级的损伤概率  $P_A, P_B, P_C, P_D$ ；

$$P_A = \frac{n_A}{N}; P_B = \frac{n_B}{N}; P_C = \frac{n_C}{N}; P_D = 1 - P_A - P_B - P_C$$

3) 根据式 (3)，求出在导弹、炸弹、鱼雷、水雷攻击下，动力系统发生不同等级损伤概率  $P_{Ai}, P_{Bi}, P_{Ci}, P_{Di}$  以矩阵  $Q$  表示，表达式为

$$Q = \begin{bmatrix} P_{A1} & P_{B1} & P_{C1} & P_{D1} \\ P_{A2} & P_{B2} & P_{C2} & P_{D2} \\ P_{A3} & P_{B3} & P_{C3} & P_{D3} \\ P_{A4} & P_{B4} & P_{C4} & P_{D4} \end{bmatrix}$$

以  $R = [R_1, R_2, R_3, R_4] = (0.4664, 0.2248, 0.0673, 0.2415)$  来表示表 2 中的对应不同武器的权重，进行加权评估可以求出不同武器综合作用下，动力系统发生不同等级损伤概率：

$$S_{\text{损}} = [A, B, C, D] = R \cdot Q。$$

4) 根据上面的方法计算出假想船在不同武器综合作用下动力系统发生不同损伤等级的概率, 根据武器的使用频率和威胁程度, 由专家给出各损伤等级权重:

$$R_{\text{损}} = (0.4000, 0.3000, 0.2000, 0.1000),$$

则动力系统的综合损伤概率为

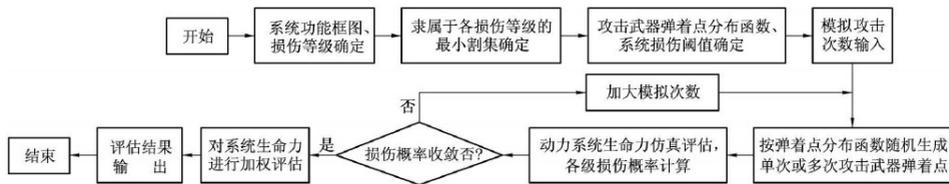
$$P_{\text{综}} = S_{\text{损}} \cdot R_{\text{损}}^T;$$

动力系统不发生损伤综合完好概率为

$$S_{\text{整}} = 1 - P_{\text{综}}。$$

## 1.7 生命力仿真评估程序流程

动力系统生命力仿真评估程序流程如图2所示。



## 2 示例验算

根据上述模型对某船在多种武器攻击多次命中情况下的动力系统生命力进行了仿真评估, 一次及二次命中动力系统损伤概率分别如表3和表4所示。

表3 一次命中动力系统损伤概率

攻击武器	动力系统损伤等级概率			
	A级	B级	C级	D级
导弹	0	0.099 8	0.291 9	0.608 3
炸弹	0	0.097 4	0.286 9	0.615 7
鱼雷	0	0	0.389 2	0.610 8
水雷	0	0	0.261 9	0.738 1
综合作用	0	0.068 4	0.290 1	0.641 5

由表3可得: 加权评估系统综合损伤概率为0.1427, 动力系统的综合完好概率为0.8573。

表 4 两次命中动力系统损伤概率

攻击武器	动力系统损伤等级概率			
	A 级	B 级	C 级	D 级
导弹	0.014 9	0.231 1	0.321 1	0.432 9
炸弹	0.013 5	0.225 1	0.315 2	0.446 2
鱼雷	0.012 1	0.145 3	0.421 1	0.421 5
水雷	0.001 0	0.023 0	0.352 5	0.623 5
综合作用	0.011 0	0.173 7	0.334 1	0.481 2

由表 4 计算得：加权评估系统综合损伤概率为 0.171 5，动力系统的综合完好概率为 0.828 5。采用减震措施后，减震效果为 75% 时，两次命中动力系统全系统损伤概率如表 5 所示。

表 5 减震后两次命中动力系统损伤概率

攻击武器	动力系统损伤等级概率			
	A 级	B 级	C 级	D 级
导弹	0.008 5	0.129 1	0.421 5	0.440 9
炸弹	0.007 4	0.105 3	0.416 8	0.470 5
鱼雷	0.001 5	0.065 4	0.351 1	0.582 0
水雷	0	0	0.457 5	0.542 5
综合作用	0.005 7	0.088 3	0.424 4	0.481 6

由表 5 得：加权评估系统综合损伤概率为 0.161 8，动力系统的综合完好概率为 0.8382。

### 3 结论

通过表 3-5 的数据分析，可以得出：

1) 该船动力系统独立组采用分舱配置。齿轮箱舱作为中间隔舱将前后机舱隔开，提高了假想船动力系统独立组的独立性与生命力，一次命中时，装置 A、B 级损伤概率为 0，假想船动力系统的综合损伤概率为 0.142 7，假想船动力系统的综合完好概率为 0.857 3，生命力指标较好。

2) 两次命中时，该假想船动力系统出现 A、B 级损伤，在两次命中分别击中前后机舱时即可出现 A 级损伤，损伤比单次命中严重，说明仿真评估模型及程序的合理性。当采用减震措施后，A、B 级损伤概率明显下降，综合损伤概率

由 0.171 5 下降到 0.161 8, 该船动力系统的综合完好概率由 0.828 5 上升到 0.838 2, 说明采用减震措施能有效地提高系统生命力。

3) 所建的多重武器攻击、多次命中、多种损伤因素综合作用情况下, 基于计算机随机模拟的假想船动力系统生命力仿真评估模型, 成功解决了逻辑代数法在多次命中计算损伤概率时, 系统相容性事件化简运算公式复杂的难题。通过示例评估, 验证了其合理性。如果运用该模型进行舰艇生命力评估, 能找出舰艇动力系统的设计薄弱环节, 提出改进措施, 并可以对改进效果进行分析, 对提高舰艇动力系统的生命力将有重要的意义, 该方法也适用于其他系统的生命力评估。

## 参考文献

- [1] 刘云生, 陈华清, 张宁, 等. 舰船动力系统综合评估指标体系[J]. 船舶工程, 2008, 30(4): 32-35.
- [2] 胡锦涛, 胡大斌, 何其伟. 舰船动力系统模块化建模方法[J]. 舰船科学技术, 2014(10): 59-63.
- [3] 张磊, 卢文忠, 冀海燕. 基于超导技术的舰船动力系统[J]. 造船技术(4): 12-13+19.