

# 基于支持向量机的舰艇抗冲击生命力分析\*

蒋丰<sup>1</sup> 冯奇<sup>1</sup> 汪玉<sup>2</sup>

(1. 同济大学固体力学教育部重点实验室, 上海 200092)

(2. 海军装备论证中心, 北京 100037)

**摘要** 针对以往舰艇生命力分析中的一些不足之处提出了一种新的分析方法, 该方法将舰艇抗冲击生命力的评估问题作为一个分类问题进行处理. 它采用支持向量机技术, 根据有限的学习样本建立了预测舰艇在冲击荷载作用下生命力的计算模型. 计算实例表明, 该方法准确率较高, 具有广泛的应用前景.

**关键词** 舰艇, 冲击, 生命力, 支持向量机

## 引言

舰艇抗冲击生命力是指舰艇在巡航导弹、自导鱼雷爆炸等冲击荷载作用下所具有的生存能力. 正确评估在各种冲击条件下舰艇抗冲击生命力是舰艇抗冲击生命力设计、管理、优化的前提.

目前, 舰艇系统生命力评估的常用方法是基于故障树理论的损伤树分析方法结合模糊集理论. 由于从总体上说损伤树分析方法工作量比较大, 既不经济又费时间<sup>[1]</sup>; 同时舰艇上的结构系统一般是超静定的, 与机电系统不同的是其失效模式很多, 完整地列出这些模式十分困难, 且各失效模式之间既不完全相关, 又不相互独立, 无法借助于逻辑推理生成损伤树<sup>[2]</sup>, 故损伤树分析方法存在局限性.

一般情况下舰艇系统处于各损伤等级的损伤概率与组成该系统的各单元的损伤概率之间关系很复杂, 具有高度的非线性, 传统方法难以准确反映它们之间的这种非线性映射. 故将目前在人工智能领域中正蓬勃兴起的计算智能理论与模式识别新技术引入舰艇生命力研究是适宜的, 它为船舶生命力理论提供了一种新的研究手段.

当爆炸荷载的类型数目比较有限时, 支持向量机(SVM)技术是反映舰艇系统的损伤概率与组成该系统的各个设备、结构、元件的损伤概率之间复杂关系的有效手段.

## 1 支持向量机(SVM)技术

近年来, 一种新的模式识别方法——支持向量

机(SVM)在解决小样本、非线性及高维模式识别问题中已表现出许多特有的优势, 在许多领域中得到了广泛的应用<sup>[3]</sup>. 与现有的模式识别方法相比, 它有准确率高等优点, 特别是能克服人工神经网络等其它识别方法存在的“过拟合”现象. SVM具有完备的数学理论基础, 是一种在高维空间表示复杂的函数依赖关系的高效通用手段, 其基本思想是: 通过事先选择的非线性映射将输入向量变换到一个高维特征空间, 在该空间中构造最优决策函数; 在构造最优决策函数时, 利用了结构风险最小化原则, 同时引入了分类间隙的概念; 而且巧妙地利用了原空间的核函数取代了高维特征空间中的点积运算, 避免了算法的复杂性<sup>[4]</sup>.

本文以我国某型号舰艇主动力系统生命力评估问题为例, 说明舰艇抗冲击生命力的评估方法.

## 2 对舰艇抗冲击生命力分级的SVM算法

舰艇生命力评估中舰艇损伤等级一般划分为4类, 目前舰艇抗冲击生命力评估就是分析舰艇在各种预定武器爆炸产生的冲击源作用下处于这4个等级的概率.

我国某型号舰艇主动力系统由推进柴油机、燃气轮机、齿轮箱、联轴节、轴系(含螺旋桨)、机电控制室以及辅助设备组成. 系统中各设备的冲击响应计算是分析其抗冲击生命力的前提. 轴系的力学模型取为多跨连续梁, 用有限元计算方法计算其动力特性参数, 轴系的响应通过模态叠加求解; 燃气轮机和柴油机的力学模型取为多层多机组隔振系统, 根据

多刚体系统动力学原理分析其响应,采用速度冲击的方法,通过模态叠加求解设备重心处及设备任意点的绝对冲击加速度和相对位移响应。

根据主动力系统的主要单元——轴系、燃气轮机、柴油机、齿轮箱(以上设备均有相同的两套)的设备损伤判别值、设备完好判别值和冲击响应值,并通过设备处于完好和毁坏两种极端状态的上、下边界的模糊化处理,可得舰艇主动力系统中轴系、燃气轮机、柴油机、齿轮箱的损伤概率。

基于 SVM 的舰艇抗冲击生命力分析问题可作为一种模式识别中的一种多类分类问题进行处理。近年来国内外已经提出关于 SVM 的多类分类问题的多种方法<sup>[5]</sup>,其中标准算法是 1-a-r 方法(1-against-rest):对于  $N$  类问题构造  $N$  个二类分类器,第  $i$  个 SVM 用第  $i$  类中的训练样本作为正的训练样本,将其它样本作为负的训练样本。对舰艇抗冲击生命力等级分类方法如下:

1)根据系统中轴系、燃气轮机、柴油机、齿轮箱在  $I$  种冲击环境下的损伤概率采用损伤树方法计算出主动力系统处于损伤等级 A, B, C, D 级的概率,建立学习样本  $(x_i, y_i)$ ,  $(i=1, 2, \dots, I)$ 。样本中  $x_i$  为 8 维向量,分别代表轴系 1、轴系 2、燃气轮机 1、燃气轮机 2、柴油机 1、柴油机 2、齿轮箱 1、齿轮箱 2 的损伤概率;样本中  $y_i$  为  $J$  维向量(主动力系统处于损伤等级 A, B, C, D 级的概率区间均从 0 到 1 均划分为  $J$  个区间),其中每一个分量对应相应的概率区间,各分量的值为 1 或 -1。舰艇主动力系统处于损伤等级 A, B, C, D 级的概率识别方法相同,下面以识别系统处于损伤等级为 A 级时损伤概率所在的概率区间为例来说明决策的方法。

2)重复  $J$  次以下步骤,可得主动力系统处于损伤等级为 A 级时损伤概率所在的相应概率区间的分类函数:

① 若其损伤概率属于第  $j$  个概率区间( $j=1, 2, \dots, J$ ),则  $y_{ij}=1$ ,反之  $y_{ij}=-1$ ;

② 选择适当的核函数和惩罚因子  $C$ ,根据学习样本  $(x_i, y_{ij})$ ,  $(i=1, 2, \dots, I)$  求解如下的二次规划(对偶规划)问题,可得分类函数  $f_j(x)$  中的系数  $\alpha_i$  及对应的支持向量  $(x_i, y_{ij})$ ,  $(i=1, 2, \dots, M, M$  为支持向量的个数):

$$\begin{cases} \max Q(\alpha) = \sum_{i=1}^I \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^I \alpha_i \alpha_k y_{ij} y_{kj} K(x_i, x_k) \\ \text{s. t. } 0 \leq \alpha_i \leq C, i = 1, 2, \dots, I \\ \sum_{i=1}^I \alpha_i y_{ij} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中,  $\alpha_i, \alpha_k$  为拉格朗日乘子,  $K(x_i, x_k)$  为核函数。若求出的最优解为  $\alpha_i^*$ ,再由式(2)可求得最优分类面的权系数向量  $w^*$ 。

$$w^* = \sum_{i=1}^I \alpha_i^* y_{ij} x_i \quad (2)$$

用已求出的任何一个支持向量样本连同  $w^*$  代入式(3),可求得分类阈值  $b$ 。

$$y_{ij}(w \cdot x_i + b) - 1 = 0 \quad (3)$$

③ 根据  $\alpha_i^*$ ,  $b$  和支持向量  $(x_i, y_{ij})$ ,可得主动力系统处于损伤等级为 A 级时损伤概率属于第  $j$  个概率区间的分类函数  $f_j(x)$  为

$$f_j(x) = \text{sign} \left\{ \sum_{i=1}^M \alpha_i^* y_{ij} K(x, x_i) + b \right\} \quad (4)$$

式(4)中  $\text{sign}(\ )$  为符号函数。

3)根据以上步骤获得的  $J$  个分类函数可对系统处于损伤等级为 A 级时损伤概率所在的概率区间进行分类。将预测样本代入分类函数,若分类函数的输出值为 1,表明系统处于损伤等级为 A 级时损伤概率在该概率区间内;若输出值为 -1,表明损伤概率不在该概率区间内。

### 3 数值实验

SVM 的学习过程是求解一个正定二次规划,在理论上目前已有许多求解二次规划的方法。数值实验程序采用 Matlab6.5 语言编写。训练集包含 60 个样本,测试集包含 9 个样本。在 SVM 模型中,核函数和惩罚因子  $C$  需人为确定。测试样本如表 1 所示。为了将 SVM 的决策结果与损伤树方法进行比较,表 1 中还列出了损伤树方法的分析结果。

#### 3.1 惩罚因子 $C$ 对决策结果的影响

数值实验中  $C$  分别为 100, 1000, 核函数取为如式(5)所示的多项式核函数(其中系数  $q=2$ ),概率区间划分数为 16,决策结果如表 2 所示。

$$K(x, x_i) = [(x \cdot x_i) + 1]^q \quad (5)$$

由表 2 可见,惩罚因子  $C=1000$  时, SVM 的分类结果与损伤树方法基本符合,这说明 SVM 方法可用于舰艇生命力等级判别;而当惩罚因子  $C=100$  时,测试错误率比  $C=1000$  时明显增大,说明惩罚

因子的正确选择对降低决策错误率十分重要。

表1 由舰艇主动力系统主要设备损伤概率组成的测试样本及损伤树方法的分析结果

Table 1 Test samples composed of damage probabilities of major equipments in the vessel's main power system and damage probabilities of main power system calculated by damage tree analysis

test samples	shafting		gas turbine		diesel engine		gearbox		damage probabilities of main power system calculated by Damage Tree Analysis			
	no. 1	no. 2	no. 1	no. 2	no. 1	no. 2	no. 1	no. 2	A	B	C	D
1	0	0	1	1	0	0	0.09358	0	0	0.09358	0.90642	0
2	1	1	0.99864	0.93602	0	0	1	1	1	0	0	0
3	1	0.8825	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
4	0	0	0.1061	0.05889	0	0	0.07540	0	0	0.07540	0.14677	0.77783
5	1	1	1	1	0.00477	0	1	1	1	0	0	0
6	0.02228	0	0.70983	0.55604	0	0	1	0.73078	0.73078	0.26922	0	0
7	0	0	0.00161	0	0	0	0	0	0	0	0.001614	0.99839
8	0	0	0.00093	0	0	0	0	0	0	0	0.00093	0.99907
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0

### 3.2 核函数对决策结果的影响

分别取核函数为多项式核函数(系数 $q=2$ )、多项式核函数(系数 $q=3$ )、如式(6)所示的高斯核函数(系数 $\sigma=2$ )，惩罚因子 $C$ 为1000，概率区间划分数为16，计算后发现主动力系统损伤概率的所在区间完全相同，说明在本算例中核函数的选择对决策结果不敏感。

$$K(x, x_i) = \exp\left\{-\frac{\|x - x_i\|^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (6)$$

### 3.3 概率区间划分数对决策结果的影响

核函数为多项式核函数(系数 $q=2$ )，惩罚因子 $C$ 为1000，概率区间划分数分别取为11和16时，计算后发现测试错误率基本相同。但在样本数许可的情况下，增加概率区间划分数可使损伤概率的区间减小，有利于损伤概率的确定。

表2 惩罚因子不同情况下主动力系统损伤概率所在区间

Table 2 Intervals of damage probabilities of main power system versus penalty factor  $C$

test samples	intervals of damage probabilities( $C=100$ )				intervals of damage probabilities( $C=1000$ )			
	A	B	C	D	A	B	C	D
1	[0,0.0333)	[0.3,0.3667)	[0.9667,1.0]	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0.9667,1.0]	[0,0.0333)
2	[0.9667,1.0]	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0.9667,1.0]	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0,0.0333)
3	[0.9667,1.0]	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0.9667,1.0]	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0,0.0333)
4	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0.1,0.1667)	[0.8333,0.9)	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0.1,0.1667)	[0.8333,0.9)
5	[0.9667,1.0]	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0.9667,1.0]	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0,0.0333)
6	[0.7,0.7667]	[0.3,0.3667)	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0.7,0.7667]	[0.2333,0.3)	[0,0.0333)	[0,0.0333)
7	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0.9667,1.0]	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0.9667,1.0]
8	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0.9667,1.0]	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0.9667,1.0]
9	[0.9667,1.0]	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0.9667,1.0]	[0,0.0333)	[0,0.0333)	[0,0.0333)

## 4 结论

1)在有关参数合理选择的情况下，从工程应用的角度来看，采用SVM技术建立的舰艇抗冲击生命

力模型识别预测样本有较高的准确性。在舰艇抗冲击生命力研究中，舰艇总系统的生命力、各级子系统的生命力、每个设备、结构、元件的生命力之间关系相当复杂，SVM技术有可能成为较好反映这些复杂

关系的有效工具;

2)SVM 有比较坚实的数学理论基础,但其模型中还有某些参数如惩罚因子等需人为确定,这些参数选择对决策结果有较大的影响. 如何使选择的参数为最优值还有待于进一步的研究;

3)从系统的角度出发,采用计算智能技术分析舰艇生命力是一种全新的尝试. 本文建立预测模型时所用样本中的参数是用模糊集理论得到的设备损伤概率,训练样本通过损伤树方法获得,目的是将新方法的决策结果与传统的损伤树方法进行比较以验证新方法的可行性. 事实上,SVM 是一种广泛适用的分类决策方法,只要具有一定数量的训练样本,就有可能用能表征舰艇各单元生命力信息的任何参数来决策舰艇各级系统生命力等级,故其在舰艇生命力研究中有广泛的应用前景.

### 参 考 文 献

- 1 高社生,张玲霞. 可靠性理论与工程应用. 北京:国防工业出版社, 2002 (Gao Shesheng, Zhang Lingxia. Reliability theory and engineering application. Beijing: National Defence Industry Press, 2002 (in Chinese))
- 2 董聪. 现代结构系统可靠性理论及其应用. 北京:科学出版社, 2001 (Dong Cong. Modern structural system reliability theory and application. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese))
- 3 赵洪波,冯夏庭,尹顺德. 基于支持向量机的岩体工程分级. 岩土力学, 2002, 23(6): 698~701 (Zhao Hongbo, Feng Xiating, Yin Shunde. Classification of engineering rock based on support vector machine. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(6): 698~701 (in Chinese))
- 4 边肇祺,张学工. 模式识别(第2版). 北京:清华大学出版社, 2000 (Bian Zhaoqi, Zhang Xuegong. Pattern recognition (Second edition). Beijing: Tsinghua University Press, 2000 (in Chinese))
- 5 刘江华,程君实,陈佳品. 支持向量机训练算法综述. 信息与控制, 2002, 31(1): 45~50 (Liu Jianghua, Cheng Junshi, Chen Jiapin. Support vector machine training algorithm: a review. *Information and Control*, 2002, 31(1): 45~50 (in Chinese))

## ANALYSIS OF ANTI-IMPACTED VITAL FORCE OF WARSHIPS BASED ON SVM

Jiang Feng<sup>1</sup> Feng Qi<sup>1</sup> Wang Yu<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Solid Mechanics of the Ministry, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(2. Naval Research Center, Beijing 100037, China)

**Abstract** In order to overcome some shortcomings of the former analysis methods, this paper proposed a new method to analyse warships' vital force, which regarded the problem of warships' vital force evaluation as the classification problem. The technique of Support Vector Machine was applied in this method, and the calculation model predicting the vital force of the impacted warships was established. As an illustrative instance, the vital force of a warship's subsystem was calculated, which showed that the method was highly efficient and it could be applied extensively.

**Key words** warship, impulse, vital force, support vector machine (SVM)