

文章编号: 1000-4750(2014)05-0172-08

# 基于遗传算法和有限混合分布的 应力谱多模态建模

傅大宝<sup>1,2</sup>, 叶肖伟<sup>1,3</sup>, 倪一清<sup>1</sup>, 黄启远<sup>4</sup>, 姜绍飞<sup>2</sup>

(1. 香港理工大学深圳研究院, 深圳 518057; 2. 福州大学土木工程学院, 福州 350108;

3. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058; 4. 香港特别行政区政府路政署, 香港)

**摘 要:** 该文提出了一种基于遗传算法(genetic algorithm, GA)的有限混合分布参数估计方法, 应用该方法对青马大桥典型焊接节点的应力谱进行多模态建模。首先, 采用小波变换消除原始应变监测数据中的温度影响, 利用雨流计数法将应变时程曲线转化为日应力谱, 考虑到交通荷载(包括汽车荷载和火车荷载)和台风的影响, 建立标准日应力谱。然后, 采用三种不同的有限混合分布函数(有限混合正态分布函数、有限混合对数正态分布函数和有限混合威布尔分布函数)以及基于遗传算法的混合参数估计方法对应力幅进行多模态建模, 根据赤池信息准则(Akaike's information criterion, AIC)确定最佳的有限混合模型。最后, 采用双变量有限混合分布和基于遗传算法的混合参数估计方法建立了应力幅和平均应力二维随机变量联合概率密度函数。结果表明, 该文提出的基于遗传算法的有限混合分布参数估计方法可以有效应用于二维随机变量的概率建模。

**关键词:** 结构健康监测; 疲劳; 应力谱; 有限混合分布; 遗传算法

中图分类号: TU12 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.12.0949

## MULTI-MODAL MODELING OF STRESS SPECTRUM USING GENETIC ALGORITHM AND FINITE MIXTURE DISTRIBUTIONS

FU Da-bao<sup>1,2</sup>, YE Xiao-wei<sup>1,3</sup>, NI Yi-qing<sup>1</sup>, WONG Kai-yuen<sup>4</sup>, JIANG Shao-fei<sup>2</sup>

(1. The Hong Kong Polytechnic University Shenzhen Research Institute, Shenzhen 518057, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

4. Highways Department, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, Hong Kong, China)

**Abstract:** In this study, a genetic algorithm-based (GA-based) method for the estimation of the parameters in the finite mixture distributions is proposed and applied to the multi-modal modeling of the stress spectrum of a typical welded joint of Tsing Ma Bridge. Firstly, the temperature effect on the original strain monitoring data is eliminated by wavelet transform. The rainflow counting algorithm is employed to transfer the strain stress histories into daily stress spectra. A standard daily stress spectrum accounting for highway traffic, railway traffic, and typhoon effects is derived. Then, the multi-modal modeling of the stress range is conducted by use of three types of finite mixture distributions (normal, lognormal, and Weibull) in conjunction with the GA-based mixture parameter estimation method. The optimal finite mixed model is determined by the Akaike's information criterion

收稿日期: 2012-12-13; 修改日期: 2013-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308493); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金课题项目(20130101120080); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013QNA4023)

通讯作者: 叶肖伟(1980—), 男, 浙江人, 副教授, 博士, 从事桥梁健康监测与疲劳可靠度评估方面的研究(E-mail: cexwye@zju.edu.cn).

作者简介: 傅大宝(1988—), 男, 福建人, 助理工程师, 硕士, 从事钢桥疲劳与结构可靠度方面的研究(E-mail: fzufdb@163.com);

倪一清(1964—), 男, 香港人, 教授, 博士, 从事结构健康监测与安全评估方面的研究(E-mail: ceyqni@polyu.edu.hk);

黄启远(1953—), 男, 香港人, 高工, 博士, 从事桥梁健康监测与安全评估方面的研究(E-mail: kyw.washms@gmail.com);

姜绍飞(1969—), 男, 山东人, 教授, 博士, 从事结构健康监测与安全评估方面的研究(E-mail: cejsf@163.com).

(AIC). Finally, the joint probability density function (PDF) of the stress range and the mean stress is obtained using the bivariate finite mixture distributions and the GA-based mixture parameter estimation method. The results show that the proposed GA-based mixture parameter estimation method is adequate in the probabilistic modeling of two random variables.

**Key words:** structural health monitoring; fatigue; stress spectrum; finite mixture distributions; genetic algorithm

评估结构疲劳寿命的一个关键问题是将应变实测数据或模拟的应变时程历史转换为应力谱。雨流计数法由于在计算原理上与材料的应力-应变滞回曲线一致,已被广泛应用于应力谱的编制<sup>[1]</sup>。一个典型的应力谱通常包括:应力幅、平均应力以及相应的循环次数。当采集或模拟的应变时程历史足够长时,获得的应力谱能够真实地反映结构的荷载信息。而当应变时程历史较短时,一些出现频率较低的应力可能无法反映在应力谱中,造成疲劳寿命评估结果不准确。因此,有必要采用一个连续的概率密度函数(probability density function, PDF)拟合应力谱以充分挖掘一些频率出现较低的应力<sup>[2]</sup>。此外,当采用疲劳损伤累积 Miner 准则的连续概率解析表达式进行结构疲劳可靠度评估时,对应力谱分布函数的建模是分析结构疲劳可靠度的基础<sup>[3-6]</sup>。

应力谱的建模实质上是拟合应力谱的分布函数。桥梁结构一般受到多种不同类型荷载的作用,如汽车荷载、火车荷载、风荷载等,每类荷载引起的结构响应都具有不同的统计特性。由于桥梁结构荷载形式的复杂性和多样性,采用单一的分布形式无法充分描述应力谱的多模态统计特性<sup>[7]</sup>。有限混合分布函数能够模拟由不同统计特性组成的分布函数,因此已被广泛应用于随机变量的多模态建模<sup>[8-13]</sup>。

有限混合分布函数由一系列具有不同统计特性的分布函数加权叠加组成。通过估计有限混合分布函数中的未知分布参数得到随机变量的概率模型。近年来,许多学者提出了各种用于有限混合分布函数参数估计的方法,其中期望最大化(expectation maximum, EM)算法通过引入隐藏变量并经过迭代计算获得参数估计值,具有思路清晰、计算简单、收敛速度快等特点<sup>[14]</sup>。当结构疲劳寿命评估需要考虑平均应力的影响时,应力谱包含了应力幅和平均应力两个随机变量。应力谱的建模需要建立包含应力幅和平均应力的二维随机变量联合分布函数。在此情况下,发展用于多维随机变量分布函数的混合参数估计方法是建立应力谱多模态

有限混合分布函数的关键。

有限混合分布函数的参数估计可以认为是一个未知参数的优化问题。遗传算法是近几十年来发展起来的一种有效的优化工具,具有搜索速度快、避免陷入局部最优等优点<sup>[15]</sup>。遗传算法通过建立适当的适应度函数得到良好的搜索结果。本文提出了一种基于遗传算法的有限混合分布参数估计方法。以青马大桥长期应变监测数据为基础,应用该方法对其典型焊接节点的应力谱进行多模态建模,验证了该方法的有效性。

## 1 有限混合分布

### 1.1 有限混合分布概率模型

假设混合总体的样本来自具有不同统计特性的分布函数,那么其概率密度函数可表示为<sup>[8]</sup>:

$$f(x|c, w, \theta) = \sum_{l=1}^c w_l f_l(x|\theta_l) \quad (1)$$

其中:  $f(x|c, w, \theta)$  为目标混合概率密度函数;  $f_l(x|\theta_l)$  为第  $l$  组分概率密度函数;  $c$  为组分个数;  $\theta$  为组分参数集合,  $w = \{w_l, l=1, \dots, c\}$ ;  $w_l$  为第  $l$  组分混合权重, 满足:

$$\sum_{l=1}^c w_l = 1, \quad w_l \geq 0 \quad (2)$$

### 1.2 基于遗传算法的混合参数估计方法

有限混合分布的参数估计可视为一个未知分布参数的优化问题<sup>[3]</sup>。采用遗传算法进行分布参数优化的核心问题在于建立适应度函数,本文基于大数定理建立遗传算法的适应度函数。

假设观测数据  $x = [x_1, \dots, x_d]^T$ ,  $d$  为数据维数。取一个区间,其下限比最小数据稍小,其上限比最大数据稍大,将这一区间分为  $V$  个小区间  $R_v$ ,  $R_v$  的区间尺寸为  $Z_v = [z_{1v}, \dots, z_{dv}]^T$ 。当  $f(x|c, w, \theta)$  在区间  $R_v$  的变化不大的情况下,数据  $x$  落入区间  $R_v$  的频率可近似表示为:

$$\int_{R_v} f(x|c, w, \theta) \approx f(x_v|c, w, \theta) \xi_v, \quad v=1, \dots, V \quad (3)$$

其中:  $x_v$  为区间  $R_v$  的中心点;  $\xi_v$  为  $d$  维空间体积,

即:

$$\xi_v = \prod_{j=1}^d z_{jv} \quad (4)$$

当样本容量较大时, 样本落入区间  $R_v$  的频率  $p_v$  可表示为:

$$p_v = \frac{N_v}{N} \approx f(x_v | c, w, \theta) \xi \quad (5)$$

其中:  $N_v$  为落入区间  $R_v$  的样本数量;  $N$  为样本容量。

令分布参数  $\theta$  和  $w$  为遗传算法的设计变量, 那么适应度函数可表示为:

$$T = \frac{1}{\sum_{v=1}^V \left( \frac{p_v - f(x_v | c, w, \theta) \xi_v}{p_v} \right)^2} \quad (6)$$

当  $p_v$  越接近  $f(x_v | c, w, \theta) \xi_v$  时,  $T$  值则越大; 反之, 则越小。

### 1.3 拟合判断准则

采用赤池信息准则 (Akaike's information criterion, AIC) 确定最佳组分个数和概率密度函数<sup>[16]</sup>。AIC 值可表示为:

$$AIC = 2M - 2\ln(L) \quad (7)$$

其中:  $M$  为概率密度函数中未知参数的个数;  $\ln(L)$  为极大对数似然函数值。选择 AIC 的最小值对应的分布模型为最优模型。

## 2 青马大桥典型焊接节点应力谱多模态建模

青马大桥是目前世界上最长的公铁两用悬索桥, 主跨 1377m。自从 1997 年通车以来, 香港特区政府路政署在该桥安装了一套完备的长期结构健康监测系统<sup>[17]</sup>, 共计安装各种类型传感器 283 个, 其中包括 110 个应变传感器。本文以安装于桥面板细部构造 H 上的火车轨道梁底部的应变传感器 SSLTS13 为研究对象(如图 1 所示), 以该应变传感器在 2011 年监测的应变数据为基础, 采用有限混合分布和基于遗传算法的参数估计方法进行应力谱多模态建模。图 2 为应变传感器 SSTLS13 实测的两个典型的日应变时程曲线。

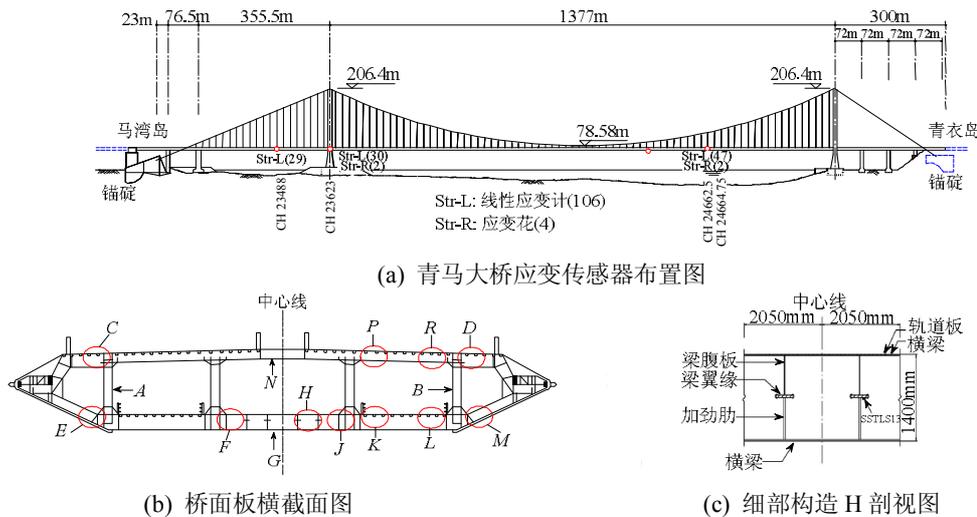


图 1 青马大桥及应变传感器位置图

Fig.1 Tsing Ma Bridge and deployed strain gauges

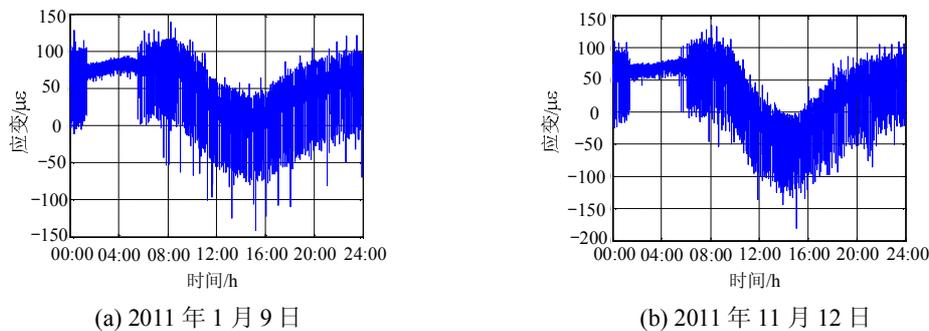


图 2 实测日应变时程曲线

Fig.2 Measured daily strain time histories

### 2.1 应变数据预处理

青马大桥端部设有伸缩缝, 因此桥梁在纵向能够自由伸缩, 温度引起的应力能够在端部被释放。如图 2 所示, 由温度引起的应变时程曲线的整体漂移, 虽然不会影响应力幅的大小, 但对平均应力的计算有显著影响。因此, 需对原始应变监测数据进行预处理以消除温度对平均应力的影响。

Xia<sup>[7]</sup>提出了基于小波变换的应变监测数据预处理方法, 并应用于青马大桥应变监测数据的处理。本文采用基于小波变换的预处理方法消除应变监测数据中的温度影响。首先采用 db3 小波将原始应变时程曲线分解为低频部分和高频部分, 保留高频部分并进一步分解低频部分, 共进行 12 层分解。采用硬阈值过滤第 12 层的低频部分, 而后进行小波重构得到消除温度影响的应变时程曲线。图 3 为两个典型的消除温度影响的应变时程曲线。

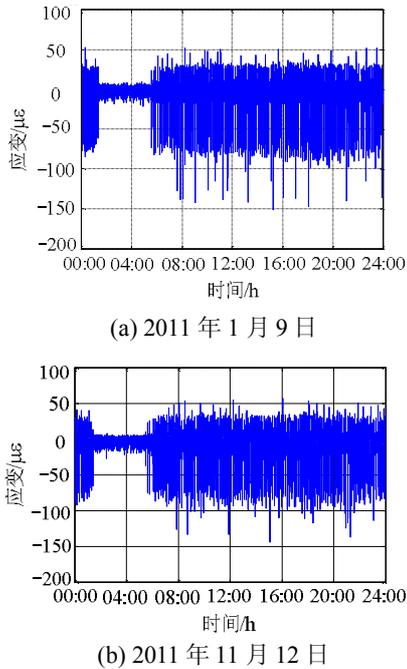


图 3 消除温度影响后的日应变时程曲线

Fig.3 Strain time histories after eliminating temperature effect

### 2.2 标准日应力谱

将消除温度影响后的应变时程数据乘以钢材的弹性模量即可获得应力时程曲线, 利用雨流计数法得到焊接节点每个应力循环对应的应力幅、平均应力以及循环次数。图 4 为两个典型的日应力谱直方图。应力幅的区间划分长度为 1MPa。由于应变传感器的有效量程下限值为 10με, 因此舍弃小于 2MPa 的应力幅。

由于在正常的交通荷载和风荷载作用下, 日应

力谱具有高度的相似性, 因此, 通过统计分析一定数量的日应力谱数据可以获得一个标准日应力谱。注意到台风天气下的应力谱特性与正常交通荷载和风荷载作用下有所不同, 在构建标准日应力谱数据样本时, 需要考虑台风天气的影响<sup>[4]</sup>。根据香港天文台的统计数据可知, 2011 年香港共有 9 天处于台风天气下。此外, 对应变传感器 SSTLS13 的应变监测数据统计分析可知, 2011 年共有 234 天有效完整的日应变监测数据(包含 5 天台风天气下的监测数据)。因此, 选取 203 天应变数据用以建立标准日应力谱, 其中包括 5 天台风天气下的监测数据。图 5 为采用 203 天应变监测数据计算所得的应力幅和平均应力散点图。

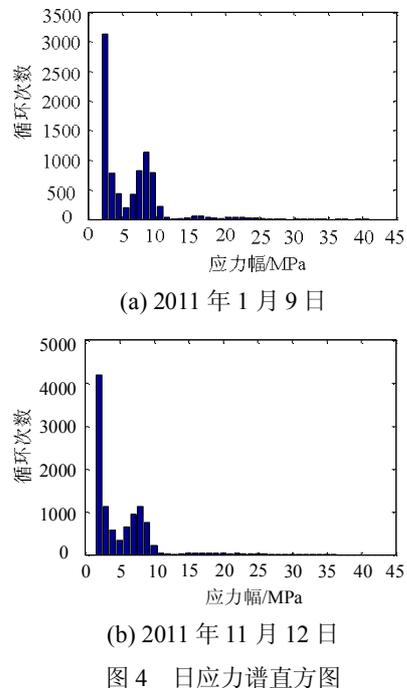


图 4 日应力谱直方图

Fig.4 Histograms of daily stress spectra

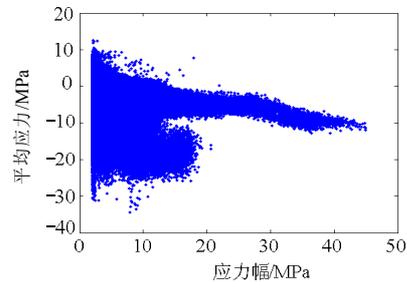


图 5 应力幅和平均应力散点图

Fig.5 Scatter graph of stress range and mean stress

### 2.3 应力幅单变量多模态建模

#### 2.3.1 基于遗传算法的应力幅建模

经统计分析, 203 天应变数据对应的应力幅总数为 1633926, 其中大于 30MPa 的应力幅数目为

1735, 占 0.106%。本文提取 2MPa~30MPa 区间内的应力幅数据, 分别采用三种不同的有限混合分布函数(有限混合正态分布函数、有限混合对数正态分布函数以及有限混合威布尔分布函数)对其进行概率建模。采用遗传算法估计其分布参数, 区间间隔为 0.1MPa, 种群规模为 400, 最大进化代数为 8000, 共进行 10 次试验, 取适应度值最大的搜索结果作为最终参数估计值。根据 AIC 值选择最佳的拟合模型。图 6 为采用基于 GA 的混合参数估计方法所得的应力幅有限混合概率密度函数 AIC 值。从图中可以看出, 当组分个数大于 7 时, AIC 值无明显变化。此外, 从图中还可以看出, 采用有限混合对数正态分布所得的 AIC 值最小。因此, 选用 7 组分的有限混合对数正态分布函数作为应力幅的分布函数。图 7 和图 8 为采用基于 GA 的混合参数估计方法所得的应力幅有限混合概率密度函数和累积分布函数。(cumulative distribution function, CDF)。表 1 为应力幅概率密度函数有限混合参数估计值。

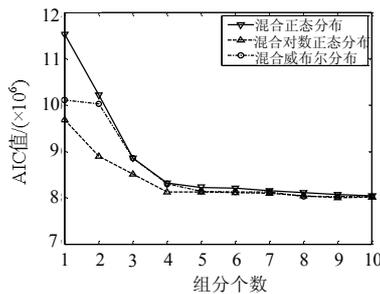


图 6 应力幅有限混合概率密度函数 AIC 值 (基于 GA 的混合参数估计方法)

Fig.6 AIC values of finite mixed PDFs of stress range (GA-based mixture parameter estimation method)

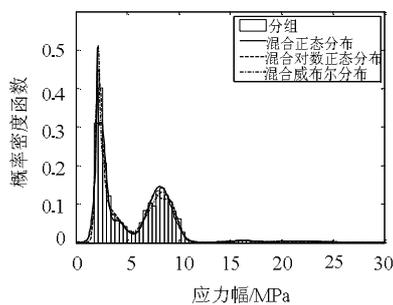


图 7 应力幅有限混合概率密度函数 (基于 GA 的混合参数估计方法)

Fig.7 Finite mixed PDFs of stress range (GA-based mixture parameter estimation method)

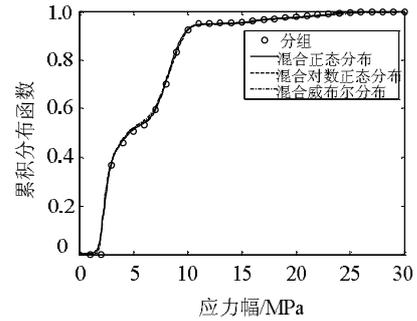


图 8 应力幅有限混合累积分布函数 (基于 GA 的混合参数估计方法)

Fig.8 Finite mixed CDFs of stress range (GA-based mixture parameter estimation method)

表 1 应力幅概率密度函数混合参数估计值

Table 1 Estimated mixture parameters of PDFs of stress range

	基于 GA 的混合参数估计			基于 EM 算法的混合参数估计		
	权重	均值	标准差	权重	均值	标准差
正态分布	0.3780	2.4026	0.4911	0.3046	3.0311	1.2434
	0.4189	8.1875	1.1466	0.4170	8.2085	1.1884
	0.0331	19.3616	4.6619	0.0200	15.9413	1.7797
	0.1141	4.1112	0.8110	0.0270	21.8703	2.7122
	0.0086	22.3572	1.6409	0.1323	2.4585	0.2693
	0.0377	2.0952	0.0598	0.0954	2.1213	0.1044
	0.0094	16.0935	1.0958	0.0037	27.6393	9.1031
对数正态分布	0.0310	13.7269	0.9973	0.1515	0.9774	0.1100
	0.0101	16.4472	16.8343	0.1678	1.3524	0.2367
	0.1589	3.8402	4.3009	0.0867	0.7190	0.0247
	0.1978	2.6435	6.6086	0.0491	2.9469	0.2029
	0.0302	22.0494	7.1719	0.1245	2.2196	0.0765
	0.1557	2.1989	13.4791	0.1263	0.8142	0.0550
	0.4164	8.6448	7.2461	0.2941	2.0534	0.1339
	—	尺度参数	形状参数	—	尺度参数	形状参数
威布尔分布	0.2411	1.2281	0.3344	0.1354	2.1461	27.2645
	0.3014	0.8093	0.1379	0.1493	9.4165	14.6926
	0.0314	2.1993	0.8735	0.1445	6.6693	3.6922
	0.2902	2.0625	0.1244	0.1516	2.5152	13.8777
	0.0164	2.7902	0.0831	0.1489	8.0784	12.7719
	0.0960	2.2387	0.0625	0.1502	3.3330	6.4859
	0.0235	3.0937	0.1071	0.1200	13.6218	1.8297

2.3.2 算法比较

图 9 为采用基于 EM 算法混合参数估计方法所得的应力幅有限混合概率密度函数 AIC 值。从图 6 和图 9 可以看出, 两种混合参数估计方法所得的 AIC 值相当。图 10 和图 11 为采用基于 EM 算法的混合参数估计方法所得的应力幅有限混合概率密度函数和累积分布函数。通过比较分析可知, 基于 GA 和 EM 算法的混合参数估计方法均能有效实现一维随机变量的多模态建模。

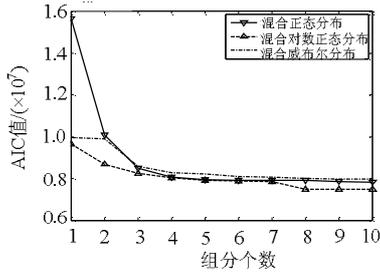


图9 应力幅有限混合概率密度函数 AIC 值  
(基于 EM 算法的混合参数估计方法)

Fig.9 AIC values of finite mixed PDFs of stress range  
(EM algorithm-based mixture parameter estimation method)

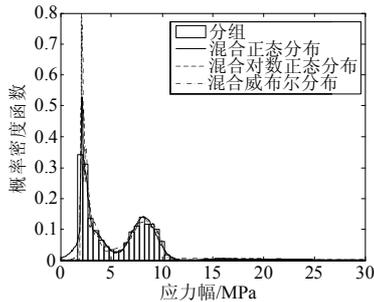


图10 应力幅有限混合概率密度函数  
(基于 EM 算法的混合参数估计方法)

Fig.10 Finite mixed PDFs of stress range  
(EM algorithm-based mixture parameter estimation method)

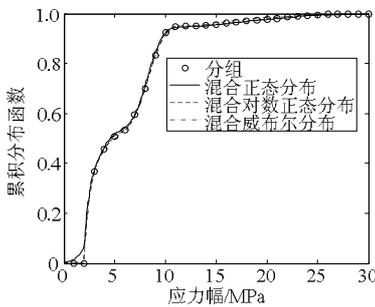


图11 应力幅有限混合累积分布函数  
(基于 EM 算法的混合参数估计方法)

Fig.11 Finite mixed CDFs of stress range  
(EM algorithm-based mixture parameter estimation method)

### 2.4 应力幅和平均应力二维随机变量分布函数建模

从有限混合分布的概念出发, 应力幅和平均应力的联合概率密度函数  $f(s)$  可表示为各组分联合概率密度函数的加权和, 即:

$$f(s) = \sum_{l=1}^c w_l f_l(s) \quad (8)$$

其中,  $s=[s_r, s_m]^T$ ,  $s_r$  和  $s_m$  分别表示应力幅和平均应力。

假设有限混合分布每个组分中的应力幅和平均应力为相互独立的随机变量, 那么  $f_l(s)$  可表示为:

$$f_l(s) = f_l(s_r) f_l(s_m) \quad (9)$$

由于平均应力含有负值, 因此假设  $f_l(s_m)$  服从正态分布。同时, 假设  $f_l(s_r)$  可能服从正态分布、对数正态分布和威布尔分布三种分布类型。

采用基于遗传算法的混合参数估计方法估计应力幅和平均应力的联合概率密度函数, 根据 AIC 值选择最佳的拟合模型。平均应力小于 -20MPa 和大于 10MPa 的数目为 3666, 占总数的 0.224%, 因此仅提取平均应力在 -20MPa~10MPa 区间内且应力幅在 2MPa~30MPa 区间内所对应的数据。图 12 为应力幅和平均应力二维随机变量联合概率密度函数的 AIC 值随组分个数的变化曲线。从图中可以看出, AIC 值总体呈下降趋势, 当组分个数超过 15 时, AIC 值逐渐趋于稳定。此外, 采用有限混合对数正态-正态分布所得的 AIC 值最小, 因此, 选用 15 组分的有限混合对数正态-正态分布作为应力幅和平均应力二维随机变量联合概率密度函数。图 13 为应力幅和平均应力直方图。图 14 为不同分布类型所得的应力幅和平均应力二维随机变量联合概率密度函数和累积分布函数, 表 2 为应力幅和平均应力联合概率密度函数混合参数估计值。可见, 采用遗传算法能够有效地估计二维随机变量联合概率密度函数的分布参数。

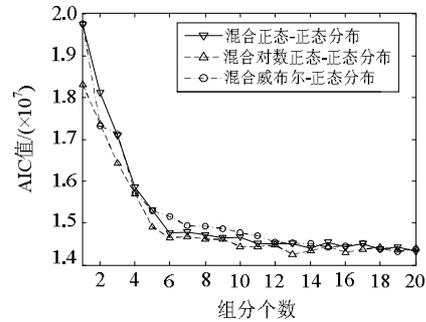


图12 应力幅和平均应力联合概率密度函数 AIC 值  
Fig.12 AIC values of joint PDF of stress range and mean stress

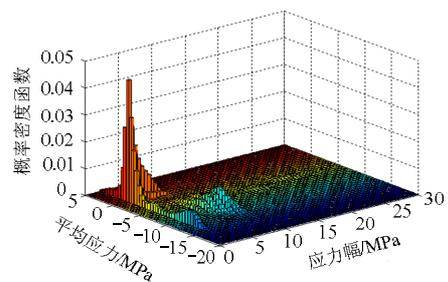
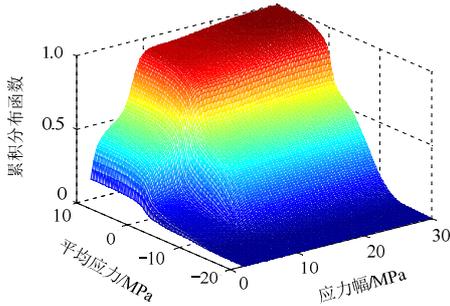
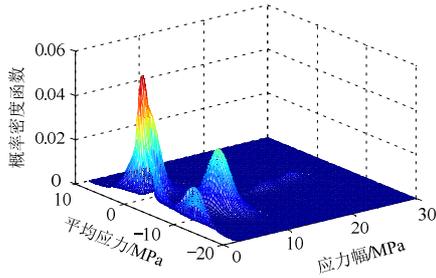
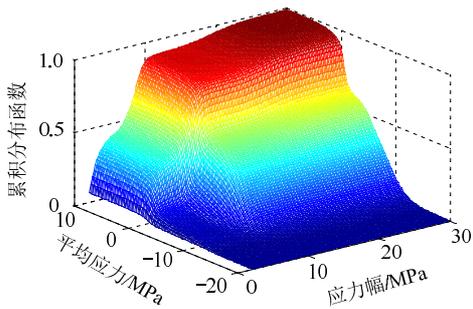
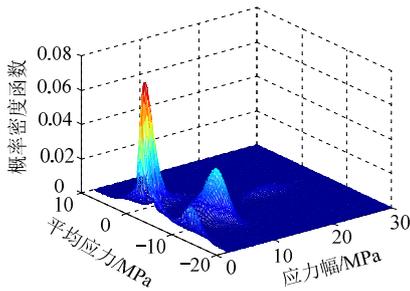


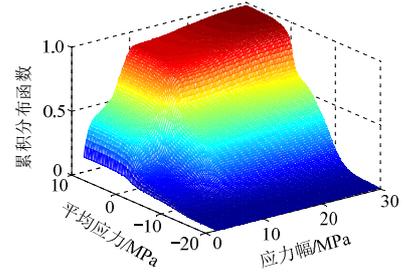
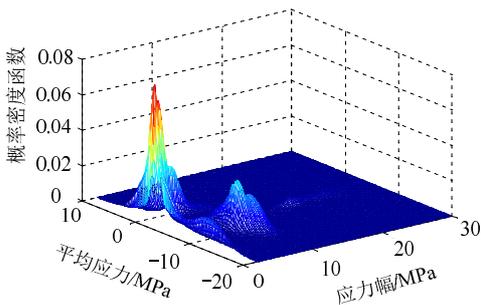
图13 应力幅和平均应力直方图  
Fig.13 Histogram of stress range and mean stress



(a) 混合正态-正态分布



(b) 混合对数正态-正态分布



(c) 混合威布尔-正态分布

图 14 应力幅和平均应力联合概率密度函数和累积分布函数

Fig.14 Joint PDFs and CDFs of stress range and mean stress

表 2 应力幅和平均应力联合概率密度函数混合参数估计值

Table 2 Estimated mixture parameters of joint PDFs of stress range and mean stress

	应力幅			平均应力	
	权重	均值	标准差	均值	标准差
正态分布	0.0174	22.2330	-5.7624	3.1980	0.8524
	0.0834	7.3836	-0.0828	2.2879	3.0888
	0.0167	9.6149	-12.6703	0.7670	1.2310
	0.0058	15.6848	-4.2224	1.7026	1.5002
	0.0145	2.0799	-9.9105	0.7449	4.9919
	0.0096	24.9898	-2.0205	4.9997	4.9991
	0.3515	8.2708	-8.3016	0.9915	2.1185
	0.0011	14.6223	-18.6838	1.1091	1.7914
	0.0146	17.0545	-5.9234	1.3413	0.5935
	0.0504	2.2056	-11.1534	0.2225	2.0768
	0.0102	21.7990	-5.0887	1.2229	0.4045
	0.0104	9.5323	-16.8037	4.8676	4.9865
	0.0038	19.3772	-4.2011	1.0101	0.4824
	0.2034	3.3413	-0.5490	1.5097	0.5379
	0.2071	2.2863	-0.9336	0.4693	2.7572
	0.0470	2.2081	-0.9141	0.7999	3.6952
	0.1280	1.9752	-7.9272	0.0939	2.2607
	0.0099	2.6104	-18.8812	0.3730	3.6814
	0.0664	2.9711	-5.3971	0.1409	0.7959
	0.2775	2.1769	-8.6068	0.0815	2.2487
0.0067	2.3091	-13.1728	0.0631	0.9670	
对数正态分布	0.0052	0.7525	-1.4006	0.0023	2.6762
	0.2597	1.2085	-0.6232	0.3753	0.5534
	0.1281	0.8982	-1.3395	0.1740	2.8134
	0.0022	3.1287	-6.4620	0.1872	0.4187
	0.0203	2.1460	-0.0004	0.1394	0.9646
	0.0379	0.8057	-11.8343	0.1059	1.7953
	0.0060	1.0388	-16.3058	0.7764	4.5919
	0.0029	0.7538	-10.4824	0.0101	2.9192
	0.0023	3.4431	-6.2207	0.1210	1.6545
	威布尔分布	尺度参数	形状参数		
0.0686		20.1350	-1.9471	0.7650	4.3254
0.0208		21.7107	-18.9429	1.4853	3.5272
0.0113		10.1285	-12.0160	10.1404	1.8538
	0.0732	6.7477	-0.2099	2.8209	1.0404

(续表)

	应力幅			平均应力	
	权重	均值	标准差	均值	标准差
		尺度参数	形状参数		
	0.1065	2.8346	-0.4025	4.8851	0.5855
	0.2049	9.2401	-9.2417	11.1806	2.0916
	0.0129	17.6405	-5.9115	17.0489	0.5161
	0.0836	7.7469	-8.6833	15.4306	1.2376
威布尔	0.0652	2.2184	-0.4687	18.4107	2.5668
分布	0.0915	2.2570	-10.4626	6.2978	2.8377
	0.0432	22.3417	-5.2703	7.0306	0.9395
	0.0471	7.6341	-5.7486	9.8002	1.3711
	0.0738	4.6354	-0.6479	3.9806	0.3924
	0.0186	9.3854	-5.2367	17.2900	2.8720
	0.0789	2.7100	-1.1327	5.1169	2.7512

### 3 结论

该文提出了一种基于遗传算法的有限混合分布参数估计方法。该方法根据大数定理建立遗传算法的适应度函数，可以应用于随机变量有限混合分布函数的概率建模。基于青马大桥长期应变监测数据，对其典型焊接节点的应力谱进行多模态建模并验证了该方法的有效性。研究表明：

(1) 根据实测应变数据获得的应力幅概率密度函数可以采用有限混合对数正态分布进行建模；

(2) 采用该文提出的基于遗传算法的混合参数估计方法能够有效地建立应力幅和平均应力二维随机变量的联合概率密度函数，并可以推广至多维随机变量有限混合分布函数的参数估计。

#### 参考文献：

- [1] Downing S D, Socie D F. Simple rainflow counting algorithms [J]. *International Journal of Fatigue*, 1982, 4(1): 31-40.
- [2] Ebeling C E. An introduction to reliability and maintainability engineering [M]. New York: McGraw Hill, 1997: 1-12.
- [3] Ni Y Q, Ye X W, Ko J M. Modeling of stress spectrum using long-term monitoring data and finite mixture distributions [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 2012, 138(2): 175-183.
- [4] Ye X W, Ni Y Q, Wong K Y, et al. Statistical analysis of stress spectra for fatigue life assessment of steel bridges with structural health monitoring data [J]. *Engineering Structures*, 2012, 45: 166-176.
- [5] Ni Y Q, Ye X W, Ko J M. Monitoring-based fatigue reliability assessment of steel bridges: analytical model and application [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2010, 136(12): 1563-1573.
- [6] Ye X W, Ni Y Q, Ko J M. Experimental evaluation of stress concentration factor of welded steel bridge T-joints [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 70: 78-85.
- [7] Xia H W. SHM-based condition assessment of in-service bridge structures using strain measurement [D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2011.
- [8] McLachlan G, Peel D. Finite mixture models [M]. New York: Wiley, 2004: 1-39.
- [9] Bouveyron C, Girard S, Schmid C. High-dimensional data clustering [J]. *Computational Statistics and Data Analysis*, 2007, 52(1): 502-519.
- [10] Vardi Y, Shepp L A, Kaufman L. A statistical model for positron emission tomography [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1985, 80(389): 8-20.
- [11] Li J, Zha H Y. Two-way Poisson mixture models for simultaneous document classification and word clustering [J]. *Computational Statistics and Data Analysis*, 2006, 50(1): 163-180.
- [12] Andrews J L, McNicholas P D, Subedi S. Model-based classification via mixtures of multivariate  $t$ -distributions [J]. *Computational Statistics and Data Analysis*, 2011, 55(1): 520-529.
- [13] Melnykov V, Maitra R. Finite mixture models and model-based clustering [J]. *Statistics Surveys*, 2010, 4: 80-116.
- [14] Dempster A, Laird N, Rubin D. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm [J]. *Journal of the Royal Statistical Society Series B*, 1977, 39(1): 1-38.
- [15] Holland J H. Adaptation in natural and artificial system [M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975: 20-31.
- [16] Akaike, H. A new look at the statistical model identification [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1974, 19(6): 716-723.
- [17] Wong K Y. Instrumentation and health monitoring of cable-supported bridges [J]. *Structural Control Health Monitoring*, 2004, 11(2): 91-124.