

基于贝叶斯推理的乘员约束系统参数识别^{*}

卿宏军^{1,2†}, 谢宝娣³, 张连怡³

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 常州湖南大学 机械装备研究院, 江苏 常州 213000; 3. 北京仿真中心航天系统仿真重点实验室, 北京 100854)

摘要:为了克服测量响应的不确定性给乘员约束系统参数识别带来的困难,利用马尔科夫链蒙特卡罗(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)采样和近似模型构造技术,提出一种基于贝叶斯推理的乘员约束系统不确定性参数识别方法.该方法结合约束系统参数的先验分布和测量响应,通过马尔科夫链在未知参数联合概率密度空间进行抽样,从而获得了织带刚度缩放系数和质量流率缩放系数的后验边缘概率密度函数.识别结果表明,相比于传统确定性识别方法,基于贝叶斯推理的不确定性参数识别方法不仅能有效给出乘员约束系统参数的概率分布,而且能够保证参数寻优的全局收敛性.

关键词:贝叶斯方法;参数识别;约束系统;MCMC;代理模型

中图分类号:TH122

文献标志码:A

Parameters Identification for Occupant Restraint System Based on Bayesian Inference

QING Hongjun^{1,2†}, XIE Baotici³, ZHANG Lianyi³

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Changzhou Institute of Machinery and Equipment of Hunan University, Changzhou 213000, China;
3. Key Laboratory of Aerospace System Simulation of Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China)

Abstract: In order to overcome the difficulty for the parameters identification of occupant restraint system caused by the measured uncertainty, this paper proposed an uncertain identification method for the parameters of occupant restraint system based on Bayesian inference, which combined Markov Chain Monte Carlo (MCMC) sample and surrogate model. This method firstly obtains the prior distributions of identified parameters and measured responses, and then the MCMC sampling is applied to the joint probability density of unknown parameter. Then, the marginal posterior probability distributions of scale factor of webbing and rate of flow can be calculated. Compared with the traditional method of determined identification, the identified results show that the Bayes inference method for uncertain parameter identification not only obtains the probability distributions effectively, but also ensures the global convergence of identified parameter.

* 收稿日期:2017-07-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11572115), National Natural Science Foundation of China (11572115);江苏省前瞻性联合研究项目(BY2014055), Prospective Joint Research Project in Jiangsu (BY2014055);国家重点研发计划项目(2017YFC0820100), National Key Research and Development Plan Project (2017YFC0820100);常州市应用基础研究计划项目(CJ20179009), Applied Basic Research Project in Changzhou (CJ20179009)

作者简介:卿宏军(1971-),男,湖南长沙人,湖南大学博士研究生,高级工程师

† 通讯联系人, E-mail: qinghongjun@hnu.edu.cn

Key words: Bayesian method; parameter identification; restraint system; MCMC; surrogate model

汽车乘员约束系统是在汽车发生碰撞事故时,为保护乘员及减轻乘员损伤的安全装置,主要由安全带、安全气囊、安全座椅、前后围板等组成。影响约束系统性能的参数众多,而某些参数难以通过直接测量的方式获得,因此利用测量响应对未知参数进行识别对于研究约束系统,提高车辆安全性是非常必要的^[1-3]。然而在实际中,由于试验条件的复杂性或测试设备精度的局限性等因素,测量响应往往具有一定的不确定性。传统的参数识别类方法,不管是基于梯度的最速下降法、高斯-牛顿法等,还是智能优化算法的遗传算法、差分进化算法等,都忽略了不确定性的影响^[4-7]。但是当测量响应的不确定性对系统参数的识别具有重要影响而不可忽略时,采用传统确定性识别方法将难以提供可靠的结果。

不确定性的度量方式有很多种,概率度量是最为常用的一种方法,其采用概率密度函数(Probability Density Function, PDF)来描述不确定性^[8]。基于概率度量来进行不确定性参数识别已经取得了一些成果。该方法一般可分为两大类,贝叶斯推理^[9]和基于优化的不确定性反求方法^[10]。Fonseca 等^[11]提出通过最大似然估计与摄动法或 MCS 相结合的方法处理不确定性参数识别,其中优化方法被采用来解决似然函数,但是该方法存在一个前提假设,即分布形式已知,因此难以处理分布形式未知的问题。为了解决分布未知的不确定性识别问题,刘杰等^[12]提出了一种基于衍生的 λ -PDF 和一次二阶矩的不确定计算反求方法并将其应用在车辆-行人碰撞事故的不确定性重建中。该方法用含有四参数的二次衍生 λ -PDF 对待识别参量的 PDF 进行建模,能够识别一大类单峰的 PDF。贝叶斯推理作为另一种基于概率的不确定性分析方法,同样能够获得参数在整个定义域上的概率分布。Moore 等^[13]通过贝叶斯方法对裂纹参数进行了有效识别。Nasrellah 等^[14]将贝叶斯方法应用到动态系统的参数识别中。贝叶斯推理需要反复调用模型来获得参数的后验概率分布,所以计算效率较低。但是数值模拟技术和代理模型技术的发展^[9,15,16],使得基于贝叶斯推理的参数识别得到了广泛的应用,包括在工程结构、热传导等参数识别领域。

目前,基于贝叶斯推理方法在车辆系统参数识别中的应用还很少,为此本文以乘员约束系统模型

为例,研究基于贝叶斯推理的不确定性参数识别方法,在对乘员约束系统的参数进行敏感性分析的基础上建立其代理模型,然后结合测量的不确定性响应和蒙特卡洛马尔科夫链采样方法,对织带刚度缩放系数和质量流率缩放系数的后验边缘概率密度函数进行估计,从而有效评价了不确定性因素对约束系统参数识别结果的影响。

1 约束系统不确定性识别问题描述

汽车乘员约束系统是在汽车发生碰撞时,用来减少或者避免二次碰撞的安全装置,是汽车安全设计的重要环节。采用 MADYMO 建立的某微车驾驶员侧约束系统模型如图 1 所示,该模型主要由安全带、安全座椅及安全气囊等组成。影响约束系统安全性能的参数众多,其中一些参数难以通过直接测量的方式获得,如座椅与假人的摩擦因数、安全带织物刚度缩放系数和气体质量流率缩放系数等,因此有必要利用测量响应对这类参数进行识别。

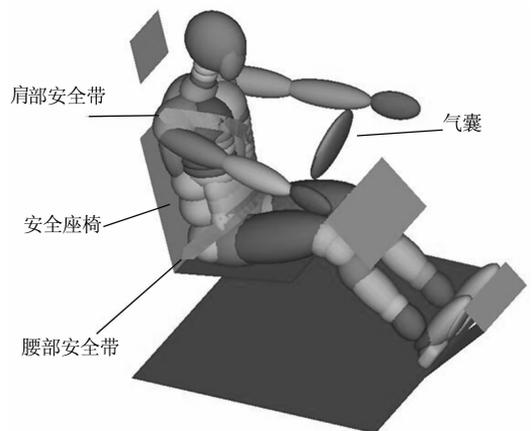


图 1 乘员约束系统模型

Fig. 1 Occupant restraint system model

加权伤害准则 (Weighted Injury Criterion, WIC)^[17]能够较全面地评价乘员损伤程度,本文将其作为测量响应来识别约束系统的未知参数,其表达式如下:

$$WIC = 0.6 \left(\frac{HIC}{1\ 000} \right) + 0.35 \left(\frac{C_{3\ ms}}{60} \right) + 0.05 (F_L + F_R) / 20.0 \quad (1)$$

式中: HIC 为头部综合性能指标; $C_{3\ ms}$ 为胸部 3 ms 加速度值; F_L 和 F_R 分别为左右大腿所受轴向力。

在实际工程中,由于试验条件的复杂性和测试设备精度的局限性等因素,测量 WIC 值往往具有一定的不确定性.传统的参数识别方法往往忽略了不确定性的影响,但是当测量响应的不确定性对系统参数的识别具有重要影响而不可忽略时,采用传统确定性识别方法将难以提供可靠的结果.因此,为了更加有效地评价 WIC 值的不确定性对待识别参数的影响,基于概率度量对约束系统模型参量识别问题可描述为已知损伤指标 WIC 的 PDF,求约束系统不确定性参数的 PDF,即

$$\mathbf{g}: \text{PDF}(\text{WIC}) \rightarrow \text{PDF}(\mathbf{X}) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 为 n 维约束系统待识别参量; $\mathbf{g} = (g_1, g_2, \dots, g_m)$ 为 m 种不同工况系统模型向量; $\text{WIC} = (\text{WIC}_1, \text{WIC}_2, \dots, \text{WIC}_m)$ 为不同工况下的响应向量.本文研究了不确定性乘员约束系统的参量识别问题,通过给定 m 种工况下 WIC 的 PDF 和系统模型向量 $\mathbf{g} = (g_1, g_2, \dots, g_m)$, 识别 n 维约束系统待识别参量 \mathbf{X} 的 PDF.

2 敏感性分析

在约束系统参数识别前,需对损伤指标 WIC 关于待识别参数之间的敏感性进行分析,筛选出对 WIC 值影响较大的参量.假设约束系统有了 4 个与安全带模型和气囊模型相关的未知参量,分别为座椅与假人的摩擦因数、安全带织物刚度缩放系数、气体质量流率缩放系数以及气囊透气率常数.首先采用正交试验设计方法来进行仿真试验,参量的 3 种不同水平表如表 1 所示.考虑如表 2 所示 4 种工况下的碰撞,分别为 35 km/h 正面碰撞和 40 km/h 的 40% 前端侧角碰撞,乘员模型分别为第 50 百分位男性假人和第 5 百分位女性假人.

表 1 参量及水平
Tab. 1 Parameters and levels

参量	水平 1	水平 2	水平 3
座椅摩擦因数	0.1	0.25	0.4
刚度缩放系数	0.5	1	2
流率缩放系数	0.8	1	1.5
透气率常数	0.8	1	1.2

表 2 4 种工况
Tab. 2 Four conditions

碰撞类型	男性假人(50 th)	女性假人(5 th)
35 km/h 正面碰撞	工况 1	工况 2
40 km/h 前端侧角碰撞	工况 3	工况 4

求取表 2 中的 4 种工况下的 WIC 值,并利用方差分析鉴别各个模型参量对试验结果的影响.构造统计量 F 来检验,用 P 值来比较各个因素对结果影响的显著性,其中 P 值越小代表该因素对试验结果的影响越显著,分析结果如表 3 所示.

表 3 试验结果的方差分析
Tab. 3 Variance analysis of test results

参量	F				P			
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
座椅摩擦因数	0.753	2.639	0.248	4.501	0.543	0.218	0.795	0.125
刚度缩放系数	11.896	7.603	9.653	53.879	0.038	0.067	0.050	0.005
流率缩放系数	22.961	6.448	6.533	33.277	0.015	0.082	0.081	0.009
透气率常数	0.296	1.702	0.538	1.398	0.763	0.321	0.631	0.540

从表 3 可以看出,织带刚度缩放系数和流率缩放系数在所有工况下对 WIC 值都有显著影响,而座椅摩擦系数、透气率常数对所有工况的 WIC 值的影响都不显著,尤其是工况 1 和工况 3.究其原因不难发现,安全带与安全气囊是保证人体最重要的部位即胸部与头部在发生意外时避免损伤最为关键的约束件,通常安全带与安全气囊的质量好坏对整个约束系统的保护效果具有直接的影响,而座椅为辅.同时,织带刚度缩放系数和气体质量流率缩放系数又是安全带与安全气囊质量的决定因素所在,这就造成了 WIC 值对安全带织物刚度缩放系数与气体质量流率缩放系数的变化比较敏感.由敏感性分析结果可知,表 2 中所示工况适于对织带刚度缩放系数和流率缩放系数进行识别,且在识别过程中可将座椅摩擦因数、透气率常数假设为一固定值.

3 基于贝叶斯推理的约束系统参数识别方法

基于贝叶斯方法的参数识别需要大量地调用仿真模型,为了提高计算效率,对选定待识别参量织带刚度缩放系数和流率缩放系数进行全因子试验设计

采样,利用试验中获取的样本点等信息,计算出涉及到全部试验因素的各水平响应值,最终建立系统的高近似度二阶响应面模型,如式(3)所示.式(3)中, X_1 为织带刚度缩放系数, X_2 为质量流率缩放系数, WIC_1 和 WIC_2 分别为工况1和工况2下的损伤指标.

$$\begin{cases} WIC_1 = -0.006784X_1^2 - 0.033122X_1X_2 + \\ \quad 0.097156X_1 + 0.192342X_2^2 - \\ \quad 0.537529X_2 + 0.781575 \\ WIC_2 = -0.009534X_1^2 - 0.041110X_1X_2 + \\ \quad 0.073442X_1 + 0.394187X_2^2 - \\ \quad 0.868337X_2 + 0.859776 \end{cases} \quad (3)$$

采用基于贝叶斯推理的方法识别织带刚度系数和流率缩放系数,考虑了它们的先验信息,这在一定程度上有助于提高识别迭代过程的收敛速度和结果的计算精度.基于贝叶斯公式约束系统参量识别表述形式为:

$$p(\mathbf{X} | WIC) = kp(WIC | \mathbf{X})p(\mathbf{X}) \quad (4)$$

式中: $p(\mathbf{X})$ 为织带刚度系数和流率缩放系数的先验概率分布; $p(WIC | \mathbf{X})$ 为似然函数,表示在参量为 \mathbf{X} 时,对应工况下损伤指标 WIC 的似然度; k 为正规化常数; $p(\mathbf{X} | WIC)$ 表示待识别参数的后验概率分布,即问题的解.

假设测量响应 $WIC_i = \overline{WIC}_i + \epsilon_i$, $WIC_i \in WIC$, \overline{WIC}_i 是无噪声响应, ϵ_i 是服从均值为0、方差为 σ^2 的独立正态分布随机噪声.此时,各种工况下损伤指标对应待识别参数的似然函数可以表示为:

$$p(WIC_i | \mathbf{X}) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{m/2}} \times \quad (5)$$

$$\exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^m [g_i(\mathbf{X}) - WIC_i]^2\right\}$$

式中: $g_i(\mathbf{X})$ 为仿真模型计算所得到的响应值.

对于织带刚度系数和流率缩放系数的先验信息,工程上一般采用均匀分布来表示,分布的下上界 $[\mathbf{X}_L, \mathbf{X}_U]$ 可通过经验来获得, L 表示下界, U 表示上界.

因此 $p(\mathbf{X}) = 1/(\mathbf{X}_U - \mathbf{X}_L)$,则式(4)可以简写为:

$$p(\mathbf{X} | WIC) = K \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^m [g_i(\mathbf{X}) - WIC_i]^2\right\} \quad (6)$$

式中: K 为常数.

通过上述方法可获得织带刚度系数和流率缩放系数的分布形式,且后验概率分布中的概率最大值所对应的参数为参数识别中的最佳结果.对于式(4)一般采用数值积分方法进行求解,MCMC是一种常用的处理复杂问题的高维数值积分方法,而且其可以避免对式(4)中的正规化常数的求解.该方法主要是通过马尔科夫链利用抽样点之间的相关性产生有用样本点,只要样本足够多,那么统计样本得到的结果就越接近织带刚度系数和流率缩放系数的后验PDF. Metropolis-Hastings (M-H) 算法^[18]是常用的一种构造马尔科夫链的方法,该方法能够保证更多的样本点落在最重要的区域,以至于产生能够模拟真实未知参数联合后验PDF的足够多的样本点,从而提高计算效率.针对织带刚度系数和流率缩放系数,该方法生成各自马氏链 $\{X_i^0, X_i^1, X_i^2, \dots\}$ ($i = 1, 2$)的具体过程如下:

- 1) 随机产生织带刚度系数和流率缩放系数的初始样本 X_i^0 ;
- 2) 构造待识别参数的建议分布 $p(X_i^* | X_i)$;
- 3) 当前样本 X_i^j 及提议分布 $p(X_i^* | X_i)$ 产生待识别参数的候选样本 X_i^j ;
- 4) 从 $[0, 1]$ 均匀分布随机产生 u ;
- 5) 求解 $v = \frac{p(X_i^* | WIC)p(X_i^* | X_i^j)}{p(X_i^j | WIC)p(X_i^j | X_i^*)}$,若 $u \leq v$,则接受 $X_i^{j+1} = X_i^*$,进行步骤6);否则 $X_i^{j+1} = X_i^j$ 并重复过程3)。
- 6) 在马氏链达到平稳状态或满足链长条件时,输出识别的织带刚度系数和流率缩放系数的PDF.

4 识别结果与分析

假定损伤指标 WIC_1 值和 WIC_2 值分别服从正态分布 $N_1(0.52, 0.01)$ 和 $N_2(0.40, 0.01)$,迭代的初始点为 $[10, 10]$.进行了10 000次迭代,识别的织带刚度缩放系数和质量流率缩放系数的二维随机游过程如图2所示.从图2可以看出,只经过较少次数的迭代,该马尔科夫链就得到收敛.由识别结果可得织带刚度缩放系数和质量流率缩放系数的边缘概率密度如图3所示,均值和标准差如表4所示.

从图3和表4可以看出,织带刚度缩放系数和质量流率缩放系数的识别结果都为类正态分布,测量响应的不确定性对质量流率缩放系数的影响较大,而对织带刚度缩放系数的影响较小.通过获得的织带刚度缩放系数和质量流率缩放系数的边缘概率

密度曲线有效地评价测量响应的不确定性对待识别参数结果的影响,相比于传统的确定性识别方法,本文方法识别的参数结果为一类正态分布而非一确定值,且结合参数敏感性分析可判断参数对 WIC 值的影响程度,这对汽车乘员约束系统的安全性设计具有更佳的指导意义。

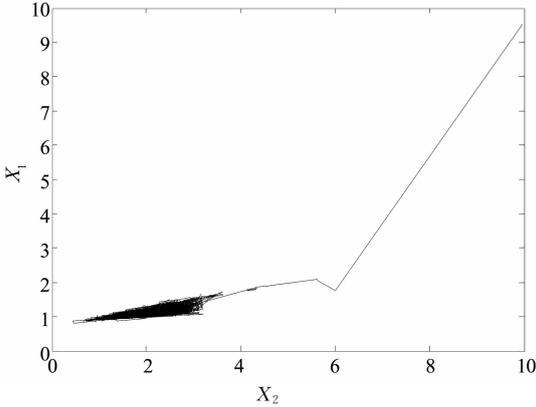
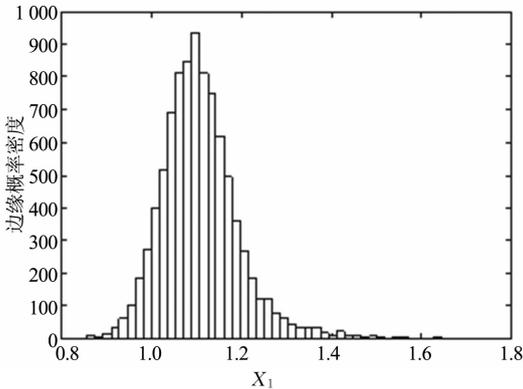
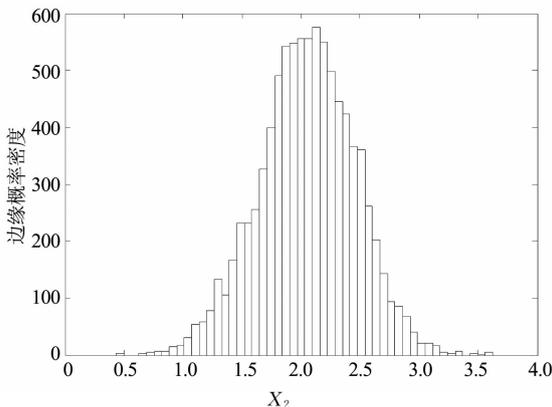


图2 二维随机游走过程

Fig. 2 Two-dimensional random walk process



(a) 织带刚度缩放系数



(b) 质量流率缩放系数

图3 识别的边缘概率密度

Fig. 3 Edge probability density of identification

表4 识别的约束系统参数

Tab. 4 The identified parameters of restraint system

参数	均值	标准差
刚度缩放系数	1.108 4	0.082 2
流率缩放系数	2.057 2	0.382 2

5 结论

为了有效评价测量响应的不确定性对汽车乘员约束系统中待识别参数的影响,本文发展了一种基于贝叶斯推理的乘员约束系统参数识别方法.该方法首先充分考虑了测量响应的不确定性,通过敏感性分析筛选出了约束系统中对 WIC 值影响较大的且难以通过直接测量得到的系统参数.其次基于近似模型构造技术对待识别参量进行全因子试验设计.利用试验中获得的涉及到全部试验因素的各水平响应值,建立系统的二阶响应面模型.最后利用基于贝叶斯推理的不确定性参数识别方法,有效地搜索乘员约束系统中待识别参数的后验分布,以此获得乘员约束系统参数最终识别结果.结果表明,相比于传统确定性识别方法,本文方法不仅能够保证参数寻优的全局收敛性,而且能有效地给出乘员约束系统中待识别参数的概率分布,可为汽车乘员约束系统的安全性设计提供更为全面的参考。

参考文献

- [1] 钟志华,张维刚,曹立波,等.汽车碰撞安全技术[M].北京:机械工业出版社,2003.
ZHONG Z H, ZHANG W G, CAO L B, *et al.* Automotive crash safety technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2003. (In Chinese)
- [2] 颜凌波,丁宗阳,曹立波,等.车车斜角碰撞工况下驾驶员损伤研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(4):59-66.
YAN L B, DING Z Y, CAO L B, *et al.* Study on the driver injury in vehicle to vehicle oblique crashes [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43 (4): 59 - 66. (In Chinese)
- [3] 李凡,曹迎春,粟思橙,等.后碰撞中乘员颈部肌肉有限元模型的建立与验证[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(8):45-51.
LI F, CAO Y C, SU S C, *et al.* Development and validation of a neck muscle FE model for rear impact study [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43 (8): 45 - 51. (In Chinese)

- [4] LIU J, XU C, HAN X, *et al.* Determination of the state parameters of explosive detonation products by computational inverse method[J]. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2016, 24(1): 22–41.
- [5] LIU J, HU Y F, XU C, *et al.* Probability assessments of identified parameters for stochastic structures using point estimation method[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, 156: 51–58.
- [6] 谢旭, 李吉隆, 赵俊亮, 等. 基于遗传算法的车辆参数识别方法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2010, 44(9): 1818–1824.
XIE X, LI J L, ZHAO J L, *et al.* Identification method of vehicle parameters based on genetic algorithms[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2010, 44(9): 1818–1824. (In Chinese)
- [7] CHEN R, HAN X, LIU J, *et al.* A computational inverse technique to determine the dynamic constitutive model parameters of concrete[J]. *Computers Materials & Continua*, 2011, 25(2): 135–157.
- [8] BABUSKA I, SILVA R S. Dealing with uncertainties in engineering problems using only available data [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2014, 270: 57–75.
- [9] CIVIDINI A, MAIER G, NAPPI A. Parameter estimation of a static geotechnical model using a Bayes' approach[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1983, 20(5): 215–226.
- [10] LEDESMA A, GENS A, ALONOS E E. Estimation of parameters in geotechnical backanalysis-I maximum likelihood approach[J]. *Computers and Geotechnics*, 1996, 18(1): 1–27.
- [11] FONSECA J R, FRISWELL M I, MOTTERSHEAD J E, *et al.* Uncertainty identification by the maximum likelihood method [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 288: 587–599.
- [12] 刘杰, 许灿, 李凡, 等. 基于 λ -PDF 和一次二阶矩的不确定性计算反求方法[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(20): 135–143.
LIU J, XU C, LI F, *et al.* The uncertainty calculation inverse method based on λ -PDF and first order second moments[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(20): 135–143. (In Chinese)
- [13] MOORE E Z, MURPHY K D, NICHOLLES J M. Crack identification in a freely vibrating plate using Bayesian parameter estimation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25: 2125–2134.
- [14] NASRELLAH H A, MANOHAR C S. Finite element method based Monte Carlo filters for structural system identification [J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2011, 26: 294–307.
- [15] 朱嵩, 毛根海, 程伟平, 等. 基于贝叶斯推理的水环境系统参数识别[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2007, 28(3): 237–240.
ZHU S, MAO G H, CHENG W P, *et al.* Parameters identification for water environmental system based on Bayesian inference[J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2007, 28(3): 237–240. (In Chinese)
- [16] 李小华, 谢礼立, 公茂盛. 结构物理参数识别的贝叶斯估计马尔可夫蒙特卡罗方法[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(4): 59–31.
LI X H, XIE L L, GONG M S. Structural physical parameter identification using Bayesian estimation with Markov Chain Monte Carlo method[J]. *Vibration and Shock*, 2010, 29(4): 59–31. (In Chinese)
- [17] VIANO D C, AREPALLY S. Assessing the safety performance of occupant restraint system[J]. *Society of Automotive Engineers Transactions*, 1990, 43(43): 1407–1413.
- [18] HASTINGS W K. Monte Carlo sampling methods using Markov Chains and their applications[J]. *Biometrika*, 1970, 57(1): 97–109.