Proceedings of the 12th International Forum of Automotive Traffic Safety, 2015, pp 167- 174
No. ATS.2015.S3A02

Bayesian Based Classifier for the Model Validation of Automotive Safety Simulation

Zhang Yufeng[1], Zhan Zhenfei[1], Yang Junqi[1], Fang Yudong[1], Zheng Kai [2], Hu Jie [2]
1College of Automotive Engineering, Chongqing University, Chongqing, China, 400044
2 School of Mechanical Engineering, Shang Hai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
Email: zhenfeizhan@cqu.edu.cn

Abstract: Simulation models based design has become the common practice in automotive product development. Before applying these models practice, model validation needs to be conducted to assess the validity of the models by comparing model predictions with experimental observations.When dealing with multivariate systems, comparisons between model predictions and test data with multiple responses would lead to conflicting decisions. In order to solve this problem, a Bayesian based classifier is proposed to consider the validation result of each response synthetically. With the help of Bayesian based classifier, an overall assessment for simulation model of the multivariable dynamic system can be made more easily.

Keywords: Model Validation, Classifier, Bayesian Decision Theory, Multivariate Dynamic Systems

贝叶斯分类器在汽车安全仿真模型确认的应用

张玉峰 1，詹振飞 1，杨俊祺 1，方宇东 1，胡洁 2，郑凯 2
1 重庆大学汽车工程学院，重庆，中国，400044
2 上海交通大学机械工程学院，上海，中国，200240
Email: zhenfeizhan@cqu.edu.cn

摘　要:基于仿真模型的设计常用于汽车产品开发，在应用这些模型之前,需要进行对模型有效性进行评估。针对多元动态系统的仿真模型确认中不同的响应的计算机仿真和实际物理实验的时间序列的吻合程度不同导致对仿真模型的有效性难以做出综合评判的问题，设计了一种基于贝叶斯决策理论的分类器来综合考虑不同的响应的模型确认结果，从而对多元动态系统的仿真模型的有效性做出综合的评估。

关键词:模型确认，分类器，贝叶斯决策理论，多元动态系统

1 引言

在汽车耐撞性、动力性和燃油经济性的研究中，计算机仿真具有缩短产品开发周期，节约成本等一系列优势，发挥着越来越重要的作用。为了对动态系统进行模拟，人们开发了各种不同的计算机程序和模型。在这些模型用于产品开发之前，必须对模型的有效性和预测能力做出定量的评价。模型确认就是为了评估仿真模型在某些预定的应用方面的有效性和预测能力而对仿真模型的输出和实际物理实验数据进行对比的一个过程。对于具有多输出的多元动态系统模型的评估，选择一个合理的模型确认指标是实现模型确认的关键。近年来，开发定量的模型确认方法引起了不少学者的关注。Sendur 等[1]提出了 AVASIM 方法，使用 L1 范数的算法来评估仿真模型的有效性和准确性。Pope 等[2]提出了基于互相关系数的 R-平方方法，采用互相关系数来表征试验与仿真的响应。Geers[3]提出了一种综合了幅度和相位误差的时间序列对比方法，但没有考虑形状误差。Donnelly 和 Morgan 等[4]提出了正归积分平方误差方法，同时考虑了相位、幅度和形状误差。Sarin 等[5, 6]提出了响应误差评估方法(Error Assessment of Response Time History, EARTH），詹振飞等[7-10]对其进行了改进，提出了 EEARTH(Enhanced Error Assessment of Response Time History, EEARTH)方法。然而上述模型确认的方法都只是对单个响应的计算机仿真的时间序列和实际物理实验的时间序列的对比，不能直接对多元动态系统仿真模型的

验证。在多元动态系统的模型确认中，需要综合考虑多个响应的验证结果，对模型的有效性做出合理的评价。本文针对上述问题，设计了一种基于贝叶斯决策理论的分类器来综合考虑不同的响应的模型确认结果，从而对多元动态系统的仿真模型的有效性做出综合理的评判。首先从幅度误差、相位误差和形状误差三个方面来量化仿真模型的误差，然后通过改进的响应误差评估方法将三种误差转化为 0~100%的评分，并根据专家知识综合为一个误差因子，作为分类器的分类依据。最后采用基于贝叶斯决策理论的分类器对模型的有效性做出综合评判。

2 动态系统仿真模型的误差量化

模型确认就是为评估仿真模型能否以一定的精度代表实物系统的过程。图 1 是本文提出的多元动态系统模型确认的技术流程图。仿真数据和实验数据是不同时间刻度下不同的响应的观测值。为了简化计算，对仿真数据和实验数据进行归一化处理。从幅度误差、相位误差和形状误差三个方面来量化各响应的误差。然后采用 EEARTH 方法对每一个响应的三种误差进行评分，转化为无量纲的评分，并根据专家经验确定 3 种误差的权值大小得到个响应的 EEARTH 评分，最后通过设计基于贝叶斯决策理论的分类器来综合考虑各相应的验证结果从而对多元动态系统仿真模型的有效性做出合理的评估。当模型能有效反应实际的动态系统时，那么该仿真模型就可以用于产品的开发。反之，则需要仿真模型的参数进行调整，从而提升模型。

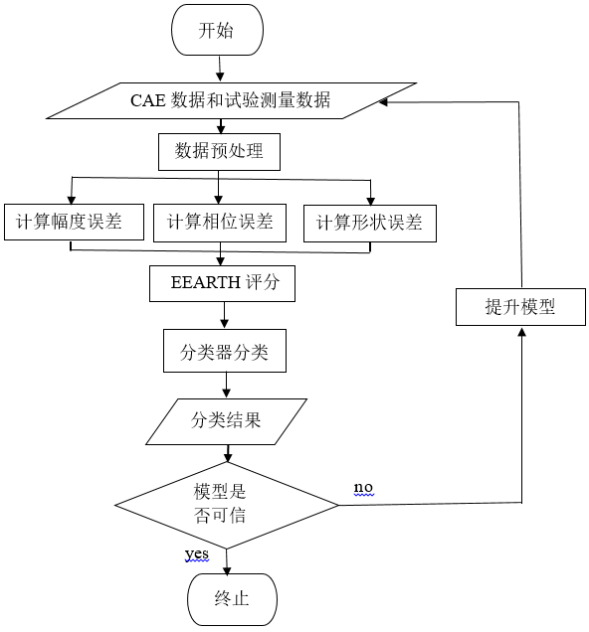

Figure 1.Flowchart of the classification validation

图 1. 模型确认分类器设计流程图

2.1 误差分析

采用互相关系数处理和分析两个时间序列的之间的相位误差，试验数据和模型仿真结果的互相关系数为

1）基金项目：汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室开放基金课题项目(NVHSKL-201412)，国家自然科学基金(51405041)， 机械系统与振动国家重点实验室开放课题资助项目(MSV-2015-11)。

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{n}(p_i - \bar{p})(s_i - \bar{s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(p_i - \bar{p})^2 \sum_{i=1}^{n}(s_i - \bar{s})^2}} \quad (1)$$

式中：$p_i, s_i (i = 1,2,3,...,n)$ 分别为试验和仿真模型曲线上第 i 点数据；p，s 分别为相应的数据均值；n 为数据点数量。移动时间序列，直到互相关系数达到最大，用移动的步数 n_{ph} 来表示相位误差，即 $e_{ph} = n_{ph}$。

为了避免相位误差对计算幅度误差和形状误差的影响，采用时移序列代替原序列，时移后的试验和仿真的时间序列为 P_{ts} 和 S_{ts}。计算幅度误差时，为消除形状误差用动态时间规整技术来使两时间序列对齐。

动态时间规整(Dynamic Time Warping, DTW)是把时间规整和距离测度计算结合起来的一种非线性规整技术。动态时间规整技术可以使 CAE 数据时间序列和试验数据序列的波峰波谷尽量对齐，从而尽可能的减少形状误差对计算幅度误差的影响。消除相位误差和形状误差后，幅度误差为

$$e_{ma} = \frac{\left\| P_{ts+w} - S_{ts+w} \right\|_2}{\left\| P_{ts+w} \right\|_2} \quad (2)$$

式中：P_{ts+w} 和 S_{ts+w} 分别表示经过时移和动态时间规整后的试验数据和仿真数据。

采用斜率来量化形状误差，可以自动消除幅度误差的影响，为了消除局部相位误差的影响同样采用动态时间规整技术来处理数列，形状误差为

$$e_{sh} = \frac{\left\| P_{ts+d+w} - S_{ts+d+w} \right\|_2}{\left\| P_{ts+d+w} \right\|_2} \quad (3)$$

式中：P_{ts+d+w} 和 S_{ts+d+w} 为试验和模型仿真曲线规整后的时间序列。

2.2 误差评分

计算出某一响应的幅度误差、相位误差、形状误差后，为了统一三种误差的量纲参考文献[4,5]中的 EEARTH 评分方法得到三种误差的 0~100%的无量纲的评分。三种误差的 0~100%无量纲评分的计算公式为：

幅度误差

$$E_{\mathrm{ma}} = \begin{cases} 0, & e_{ma} \geq e_{ma}^* \\ 100\% & e_{ma} = 0 \\ (e_{ma}^* - e_{ma}) / e_{ma}^* & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

相位误差

$$E_{\mathrm{ph}} = \begin{cases} 0, & e_{ph} \geq e_{ph}^* \\ 100\% & e_{ph} = 0 \\ (e_{ph}^* - e_{ph}) / e_{ph}^* & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

形状误差

$$E_{\mathrm{sh}} = \begin{cases} 0, & e_{sh} \geq e_{sh}^* \\ 100\% & e_{sh} = 0 \\ (e_{sh}^* - e_{sh}) / e_{sh}^* & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中，e_{ma}^{*} 为可接受的幅度误差上限，e_{ph}^{*} 为可接受的相位误差上限，e_{sh}^{*} 为可接受的形状误差上限。

2.3 误差综合

在将 3 种误差综合为一个误差评分时，对仿真模型的相位误差、幅度误差和形状误差要求不同，所以根据专家经验确定 3 种误差的权值大小，ω_{ph}、ω_{ma} 和 ω_{sh}，总误差评分为

$$E=\omega_{ph}E_{ph}+\omega_{ma}E_{ma}+\omega_{sh}E_{sh} \quad (7)$$

3 分类器设计

分类是数据挖掘的一种非常重要的方法。分类的概念是在已有数据的基础上学会一个分类函数或构造出一个分类模型。最小错误率的贝叶斯决策是通过计算后验概率，以平均错误率最小作准则的决策方法[6]。后验概率的计算公式为：

$$p(\omega_i\mid\mathbf{X})=\frac{p(\mathbf{x}\mid\omega_i)P(\omega_i)}{\sum_{j=1}^{c}P(\omega_j)p(\mathbf{x}\mid\omega_j)} \quad (8)$$

在用于多元动态系统的模型确认中，该贝叶斯分类器属于二分类器，即正类（仿真模型能有效反应实际多元动态系统）反类（仿真模型不能有效反应实际多元动态系统）。式中：$\sum_{j=1}^{c}P(\omega_j)p(x\mid\omega_j)$ 是随机向量 $\mathbf{X}$ 的联合概率密度函数，对二类问题其表达式为

$$\sum_{j=1}^{c}P(\omega_j)p(x\mid\omega_j)=p(x\mid\omega_1)p(\omega_1)+p(x\mid\omega_2)p(\omega_2) \quad (9)$$

与 ω_i 无关，它对决策没有影响，可以略去。

分类器设计的核心是判别函数的选择，基于最小错误率的二类贝叶斯决策规则为：如果 $P(\omega_1\mid\mathbf{x})>P(\omega_2\mid\mathbf{x})$，则把 $\mathbf{X}$ 归类于正类 ω_1，反之则归为 ω_2。略去分母后决策规则变为：

若 $p(x\mid\omega_1)P(\omega_1)>p(x\mid\omega_2)P(\omega_2)$，则 $\mathbf{X}\in\omega_1$ (10)

若 $p(x\mid\omega_1)P(\omega_1)<p(x\mid\omega_2)P(\omega_2)$，则 $\mathbf{X}\in\omega_2$ (11)

式中，$P(\omega_1)$ 和 $P(\omega_2)$ 为先验概率，当缺少先验知识时，根据最大熵原理可以取 $p(\omega_1)=p(\omega_2)=0.5$。考虑到正态分布是工程中常用的概率分布类型，因此假设分类器正类和反类的类条件概率密度 $p(\mathbf{x}\mid\omega_1)$ 和 $p(\mathbf{x}\mid\omega_2)$ 服从正态分布。由于 $\mathbf{x}$ 为一个向量，所以类条件概率密度函数服从多元正态分布，其计算公式为

$$P(\mathbf{x}\mid\boldsymbol{\mu},\boldsymbol{\Sigma})=\frac{1}{(2\pi)^{d/2}\mid\boldsymbol{\Sigma}\mid^{1/2}}\exp\{-\frac{1}{2}(x-\ )^{T}\ ^{-1}(x-\ )\} \quad (12)$$

式中，$\mathbf{x}=[x_1,x_2,x_3,...,x_d]^T$ 是 d 维列向量；$\boldsymbol{\mu}=[\mu_1,\mu_2,\mu_3,...,\mu_d]^T$ 是 d 维均值向量；$\boldsymbol{\Sigma}$ 是 $d\times d$ 维协方差矩阵，$\boldsymbol{\Sigma}^{-1}$ 是 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的逆矩阵，$|\boldsymbol{\Sigma}|$ 是 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的行列式。

将其代入 $p(\mathbf{x}\mid\omega_i)P(\omega_i)$ 得

$$\frac{P(\omega_i)}{(2\pi)^{d/2}\left|\boldsymbol{\Sigma}\right|^{1/2}}\exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu})^{T}\ ^{-1}(\ -\ )\right\} \quad (13)$$

取对数，并舍去常数项后得判别函数为

$$g_i(x)=-\frac{1}{2}(\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu})^{T}\boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\ -\ )+\ln(P(\omega_i))-\frac{1}{2}\ln|\ _{i}| \quad (14)$$

式中，均值向量 $\boldsymbol{\mu}_i$ 和协方差矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}$ 是未知的。为确定 $\boldsymbol{\mu}_i$ 和 $\boldsymbol{\Sigma}$，根据对仿真模型的要求生成训练数据对分类器进行训练，确定 $\boldsymbol{\mu}_i$ 和 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的值。

4 案例分析

将本文提出的方法用在一个汽车后排座椅三岁儿童的假人模型的约束系统，如图 2 所示，来验证本文提出的方法。通过改变约束条件，共有 6 组数据，其中每组数据都含有 9 个响应的传感器测量得到的数据和 CAE 模型的预测数据，响应具体名称如表 4.1 所示。在本文中取 6 组数据其的一组进行分析，来评价该多元动态系统的仿真模型的有效性。其中，多元动态系统 9 个响应的 CAE 仿真时间曲线与实际物理试验的时间曲线的如图 3 所示。

Figure 2.Rear seat child restraint system

图 2. 后排儿童座椅约束系统

Table 1.The 9 responses of the system

表 1. 系统的 9 个响应量

响应量	描述
y1	X 方向的头部加速度
y2	Z 方向的头部加速度
y3	臀部合成加速度
y4	X 方向胸部加速度
y5	Z 方向胸部加速度
y6	颈部上侧剪应力
y7	颈部上侧拉力
y8	颈部上侧扭矩
y9	胸部位移

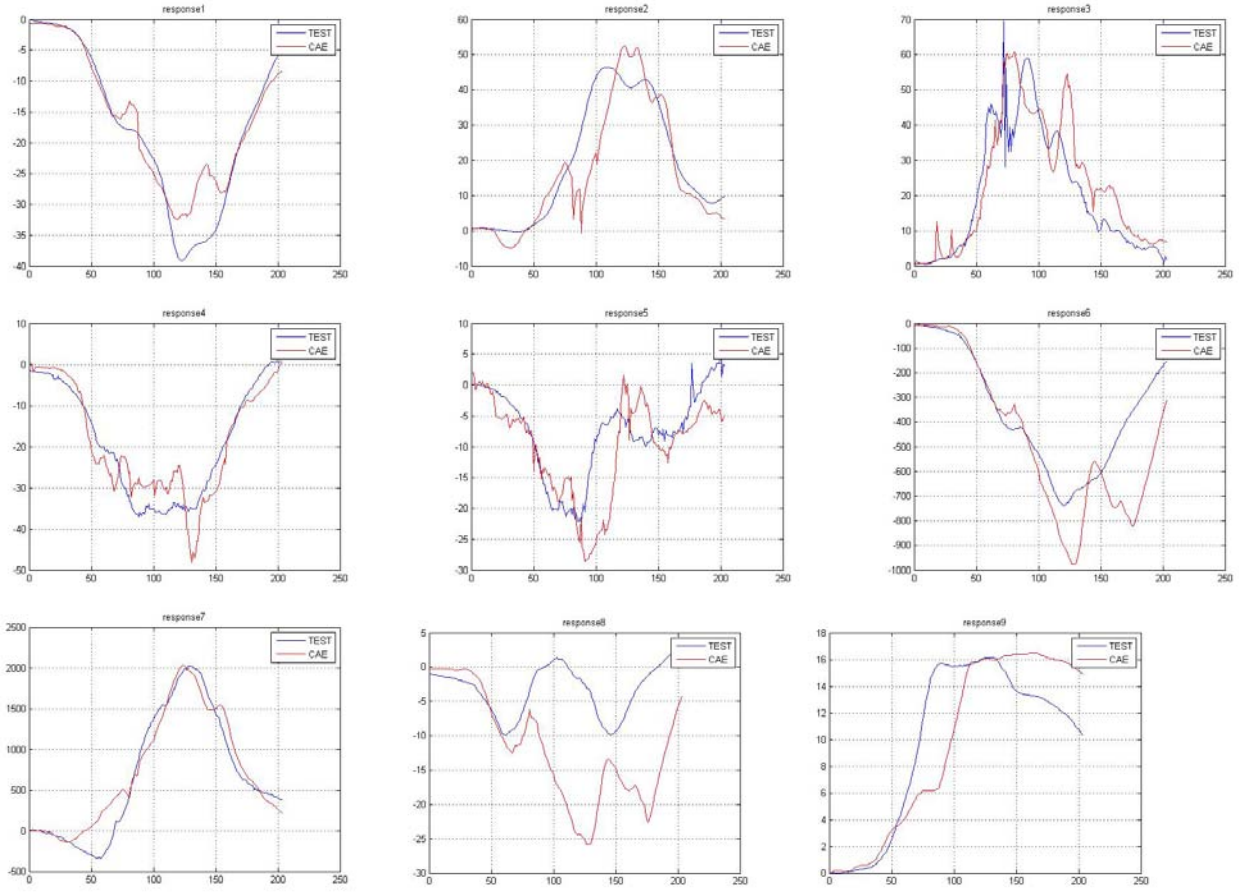

Figure 3.Time series plots for data set with nine responses

图 3. 九组响应的时间曲线

由图 3 可以看出约束系统的某些响应的计算机仿真得到的时间曲线与真实实验得到的时间曲线吻合得较好，倾向于接受模型，而有些则吻合得较差，倾向于拒绝模型。通过直接观察这些图形或者通过计算得到每个相应的模型确认的结果的情况下对模型的有效性做出直接的评估是不可能的。

从幅度误差、相位误差和形状误差三个方面来量化仿真模型的误差。成员约束系统仿真模型的各响应的三种误差如表 2 所示。

Table 2. The error of the system responses

表 2. 各响应的三种误差

响应	幅度误差	相位误差	形状误差
1	0.10	0	1.22
2	0.11	8	1.68
3	0.14	7	1.67
4	0.10	3	1.82
5	0.24	16	1.98
6	0.27	9	1.57
7	0.06	0	0.73
8	1.95	39	2.13
9	0.13	3	0.82

在得到各响应的幅度误差、幅度误差、幅度误差后，依据公式 (4) (5) (6)计算三种误差的 0~100%的无量纲评分，结合专家提供的三种误差的权重系数计算每个响应的误差综合评分。各响应的三种误差的无量纲评分及各响应的综合评分如表 3 所示。

Table 3. The EEARTH score of the system responses

表 3. 三种误差的无量纲评分及各响应的综合评分

响应	幅度误差评分	相位误差评分	形状误差评分	综合评分
1	0.93	1	0.51	0.87
2	0.93	0.76	0.33	0.76
3	0.91	0.79	0.33	0.76
4	0.94	0.91	0.27	0.80
5	0.85	0.53	0.21	0.62
6	0.83	0.73	0.37	0.71
7	0.96	1	0.71	0.92
8	0	0	0.15	0.03
9	0.92	0.91	0.67	0.87

结合图 3、表 2、表 3 可以看出某些响应（如响应 7）的计算机仿真得到的时间曲线与真实实验得到的时间曲线吻合得较好，因而对应的幅度误差、相位误差和形状误差较小，三种误差的无量纲评分和综合评分高。某些响应(如响应 8)的计算机仿真得到的时间曲线与真实实验得到的时间曲线吻合较差，因而对应的幅度误差、相位误差和形状误差较大，三种误差的无量纲评分和综合评分低。说明文中所用的误差评估方法能对仿真模型的输出做出客观的评估。

根据专家经验设置分类器的正类和反类的均值和方差，通过正态随机分布生成训练数据，，用训练数据训练分类器，将仿真模型的各响应的综合评分载入到训练好的分类器中,从而判断该组数据所属的类别，即可判断模型的有效性。根据专家知识，正类和反类的方差都设置为 0.12。正类和反类的均值及分类器的分类结果如表 4 所示。

Table 4. The EEARTH score of the system responses

表 4. 分类器参数设置及其分类结果

Res	正类均值	反类均值	Res	RESULT
1	0.85	0.8	1	
2	0.75	0.7	2	
3	0.8	0.7	3	
4	0.85	0.7	4	
5	0.7	0.55	5	
6	0.8	0.6	6	Accept
7	0.96	0.85	7	
8	0.12	0.01	8	Error Rate
9	0.92	0.8	9	=19.47%

通过训练好的分类器对仿真模型进行分类，最终模型被归为正类，即该约束条件下仿真模型能以足够的精度代表实际系统。分类器的错误率为 19.47%，即在模型不可接受的情况下认定模型可以接受和在模型可以接受的情况下反而拒绝接受该模型的错误率，反映了分类器的错误率只是反映分类器的识别能力。

5 总结

本文基于最小错误率的贝叶斯决策理论，设计了一个应用于汽车被动安全模型确认的分类器，贝叶斯决策采用分类器中最重要的指标——错误率作为产生判别函数和决策面的依据.在确定了分类器的决策策略为最小错误率的贝叶斯决策理论之后，根据对模型精度的要求和专家经验，生成训练数据对分类器进行训练。应用时，首先将 CAE 数据和试验数据进行预处理，然后提取出模型确认的评价指标：幅度误差、相位误差和形状误差。通过该分类器综合考虑仿真模型不同相应量的误差评估结果，最终对模型是否可以接受做出决策。通过在对汽车后排座椅约束系统的实例研究表明，该方法能综合考虑多元动态系统仿真模型各响应的验证结果，对多元动态系统仿真模型的有效性做出合理的评判。

参考文献 (References)

[1] P. Sendur, J. L. Stein, H. Peng, and L. S. Louca, "A model accuracy and validation algorithm," in ASME 2002 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2002, 2002, pp. 573-583.

[2] N. D. Pope and C. G. Bailey, "Quantitative comparison of FDS and parametric fire curves with post-flashover compartment fire test data," Fire Safety Journal, vol. 41, pp. 99-110, Mar 2006.

[3] T. L. Geers, "OBJECTIVE ERROR MEASURE FOR THE COMPARISON OF CALCULATED AND MEASURED TRANSIENT RESPONSE HISTORIES," in 54th Symposium on Shock and Vibration., Pasadena, CA, USA, 1984, pp. 99-107.

[4] X. Jiang, R.-J. Yang, S. Barbat, and P. Weerappuli, "Bayesian probabilistic PCA approach for model validation of dynamic systems," SAE International Journal of Materials and Manufacturing, vol. 2, pp. 555-563, 2009.Yao, J.F., J.K. Yang, and D. Otte, Investigation of head injuries by reconstructions of real-world vehicle-versus-adult-pedestrian accidents. Safety Science, 2007. 46(7): p. 1103-1114.

[5] H. Sarin, M. Kokkolaras, G. Hulbert, P. Papalambros, S. Barbat, and R. J. Yang, "A comprehensive metric for comparing time histories in validation of simulation models with emphasis on vehicle safety applications," in 2008 ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, DETC 2008, August 3, 2008 - August 6, 2008, New York City, NY, United states, 2009, pp. 1275-1286.

[6] H. Sarin, M. Kokkolaras, G. Hulbert, P. Papalambros, S. Barbat, and R. J. Yang, "Comparing time histories for validation of simulation models: Error measures and metrics," Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME, vol. 132, 2010.

[7] 詹振飞, "面向汽车安全的不确定性多元动态系统模型验证理论和应用研究," 博士, 上海交通大学, 2011.

[8] 郑凯, 胡洁, 詹振飞, 戚进, and 彭颖红, "动态系统模型验证的多元响应分析," 上海交通大学学报, pp. 191-195, 2015.

[9] Z.-F. Zhan, J. Hu, Y. Fu, R.-J. Yang, Y.-H. Peng, and J. Qi, "Multivariate error assessment of response time histories method for dynamic systems," Journal of Zhejiang University: Science A, vol. 13, pp. 121-131, 2012.

[10] J. Yang, Z. Zhan, C. Chen, Y. Shu, L. Zheng, R.-J. Yang, et al., "Development of a Comprehensive Validation Method for Dynamic Systems and Its Application on Vehicle Design," SAE International Journal of Materials and Manufacturing, vol. 8, 2015.