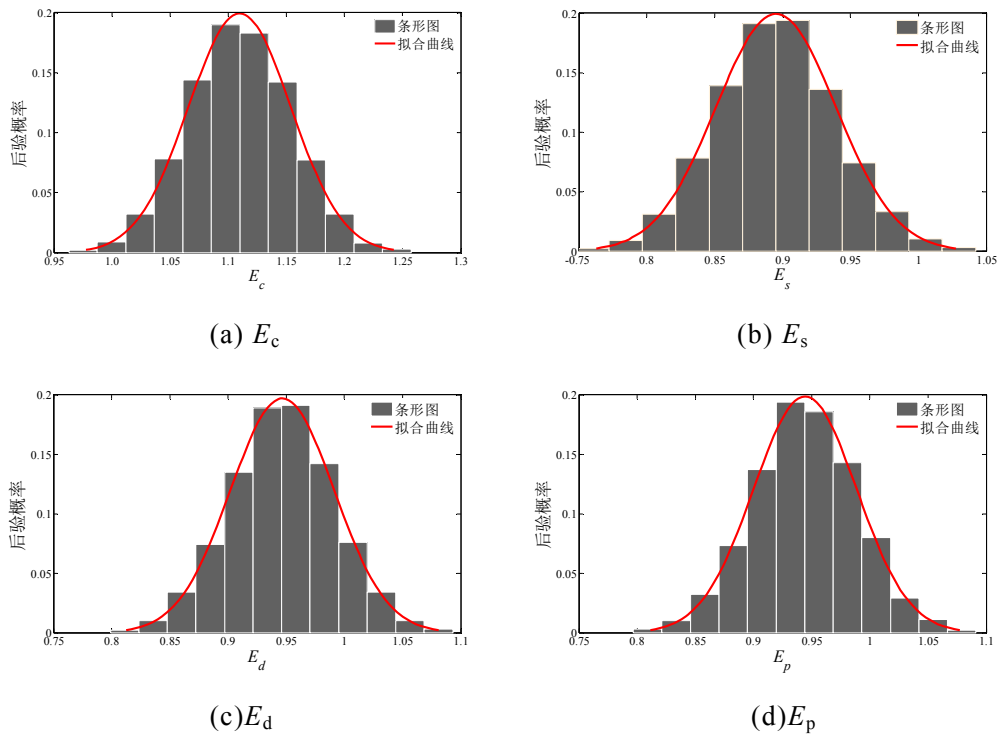
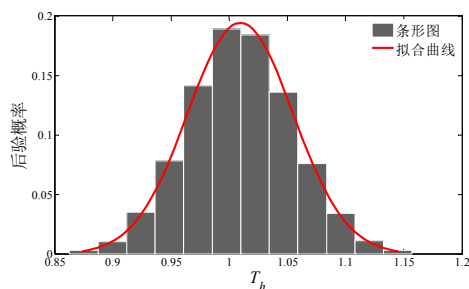


图 4.9 来华大桥模型关键参数的有限元模型库

我们将各关键参数（“模型碎片”）的后验概率分布绘于图 4.10。直方图表示后验概率的分布结果，实粗曲线为通过正态拟合(Matlab 中的 Histfit)后的后验概率。五个关键参数的基于 LHS 方法的识别结果（最大后验估计值）如表 4.4 所示。





(e) T_h

图 4.10 来华大桥模型关键参数后验分布结果

4.3.5 误差阈值法

本节基于来华大桥桥梁主跨 1/4 位置布置 5 台载重卡车加载^[84]（每台载重卡车荷载约为 300 kN，如图 4.11）的工况时的静动力实验进行误差阈值法的多模型筛选。静力测试位置为大桥桥面板的 1#~9#测点，如图 4.3 所示。对于静力数据来说，误差阈值主要考虑了传感器精度误差、卡车荷载、有限元分析的误差，用一个 5%的阈值来统一考虑上述三种误差的综合影响。对于动力数据来说，误差阈值主要考虑了有限元分析、传感器精度、测量噪声和测量可重复性的误差影响，经过计算，一个 6%的综合值用来考虑各种有限元分析的误差影响（模型筛选的误差阈值不确定来源列表见表 4.2，其它的影响忽略不计）



图 4.11 载重卡车加载试验照片（主跨 1/4 位置加载 5 台卡车）

表 4.2 误差误差阈值的 uncertainty 来源

误差类型	评价值	静力阈值	动力阈值
传感器精度	0.01%（约 0.1mm）	√	√
测量环境噪声	0.12%	—	√
测量可重复性	0.60%（ 3σ ）	—	√
卡车荷载	1.5%	√	—
有限元分析	5%	√	√
求和	—	6.51%（定为 7%）	5.73%（定为 6%）

最终，从 1000 个有限元模型中优选出了符合静动力所有阈值条件的 10 个模型建立了有限元模型库进行模型识别与响应预测（见表 4.3，表 4.4）。图 4.12、4.13 分别为基于静力位移（除两端 1#，9#支撑端点为 0 外）和动力频率的散点筛选分布。其中，上下细虚线表示正负阈值（静动力阈值分别为 7%，6%），它们之间的散点为相应测点（或阶数）满足误差阈值的诸多有限元模型；中间黑色粗实线表示实际工程静动力试验的测试值。

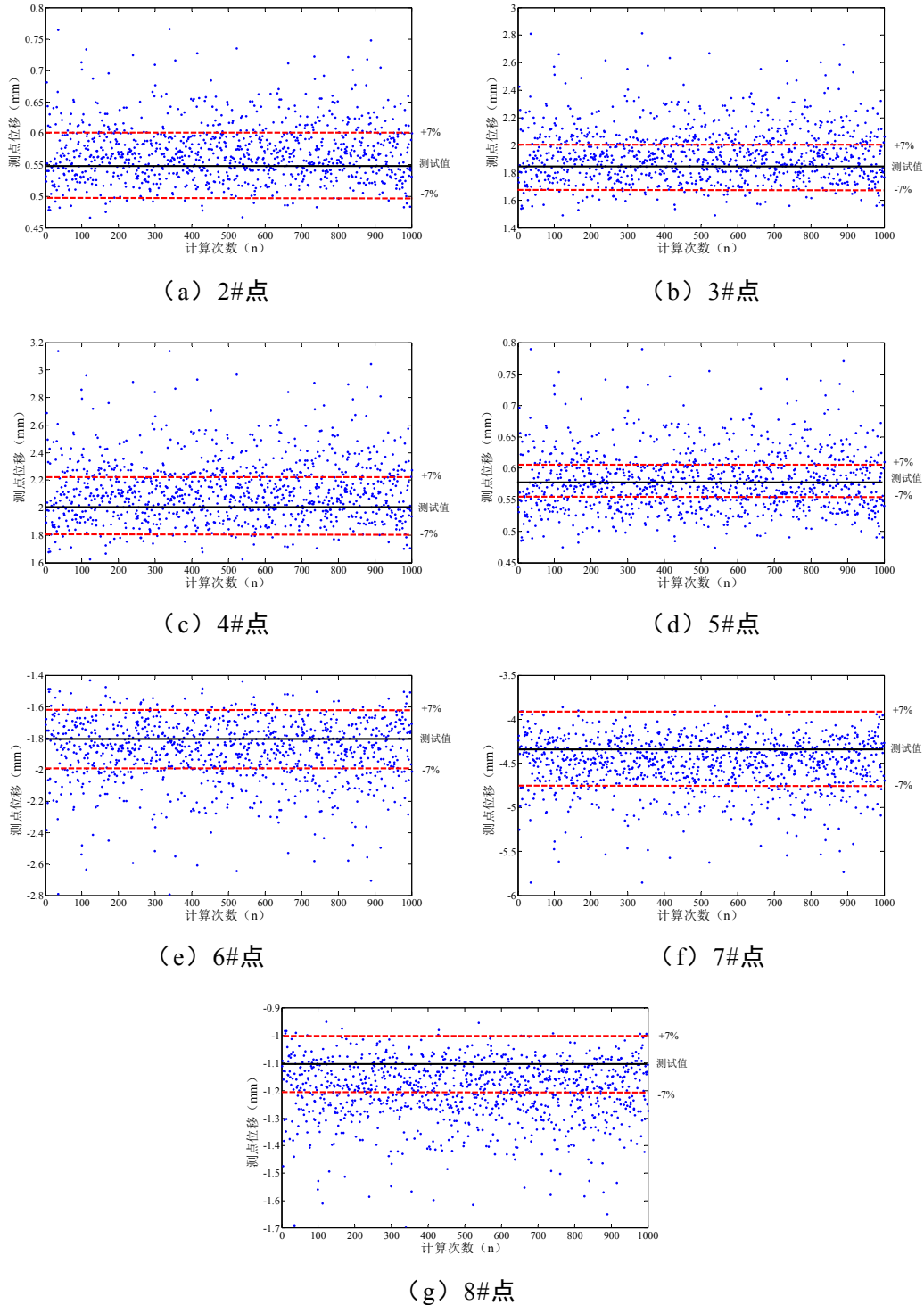


图 4.12 基于静力位移的模型散点分布与筛选

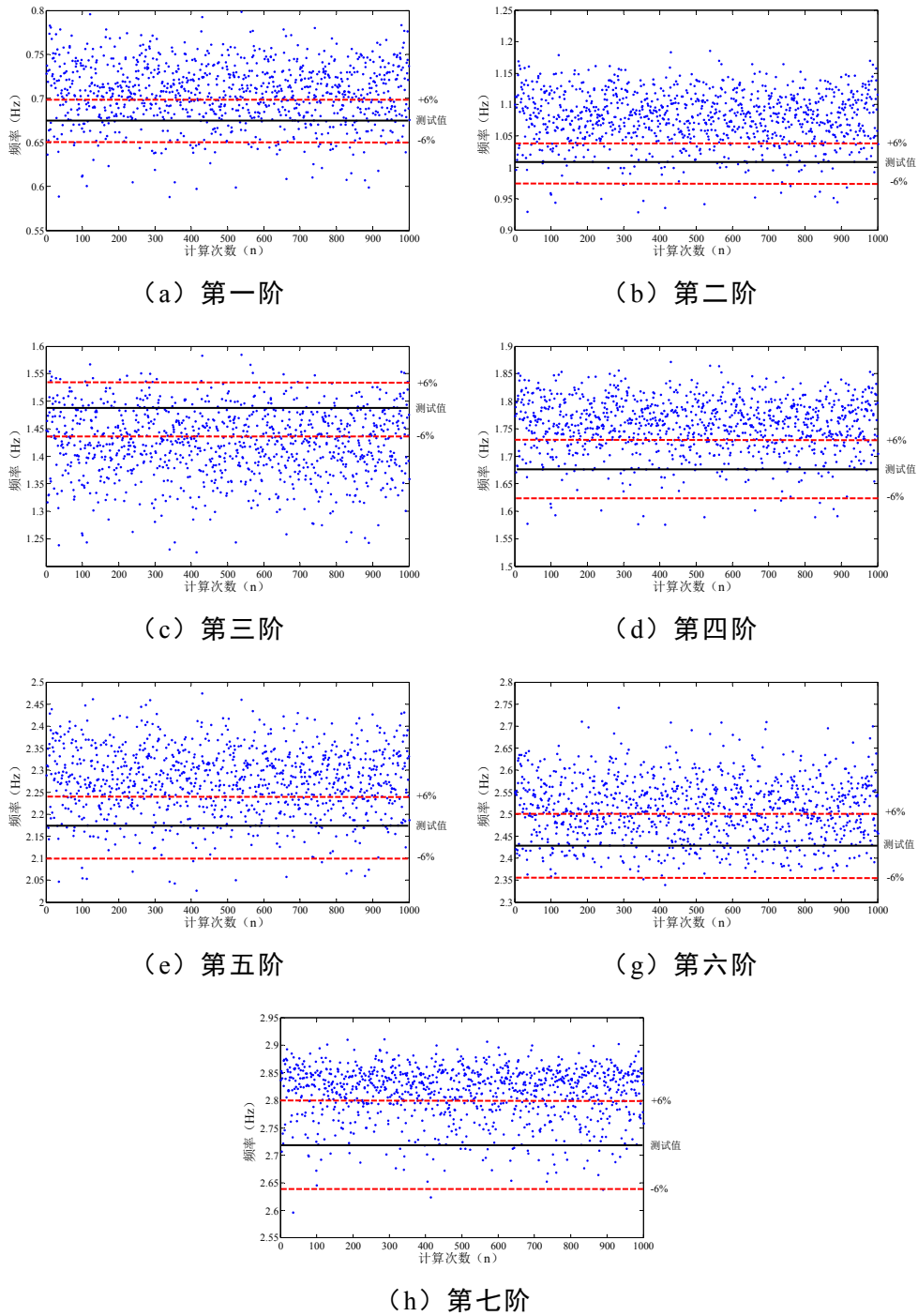


图 4.13 基于动力频率的模型散点分布与筛选

表 4.3 来华大桥有限元模型库

模型编号	E_c	E_s	E_d	E_p	T_h
1#	1.01	0.96	1.01	1.07	0.99
2#	0.99	0.97	1.00	1.03	1.01
3#	0.98	0.96	0.95	0.94	1.02
4#	0.98	0.97	0.96	0.95	1.00
5#	0.99	0.93	1.03	0.93	1.03

(续表)

6#	0.99	0.94	0.93	0.91	0.98
7#	0.99	0.94	1.00	1.06	1.00
8#	0.99	0.97	0.99	0.90	0.93
9#	0.98	0.90	0.96	1.06	1.03
10#	0.98	1.03	0.92	1.00	1.07

4.3.6 遗传算法 (GA) 验证

使用 GA 算法对来华大桥有限元模型进行单模型识别与参数修正。GA 算法中除代沟为 0.7, 繁殖代数为 40 外, 其余的编码方式与简支梁数值算例的编码方式相同, 识别结果见于图 4.14 和表 4.4。

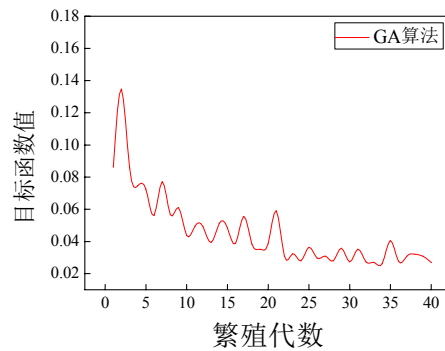


图 4.14 GA 算法的收敛图像

表 4.4 来华大桥关键参数识别结果对比

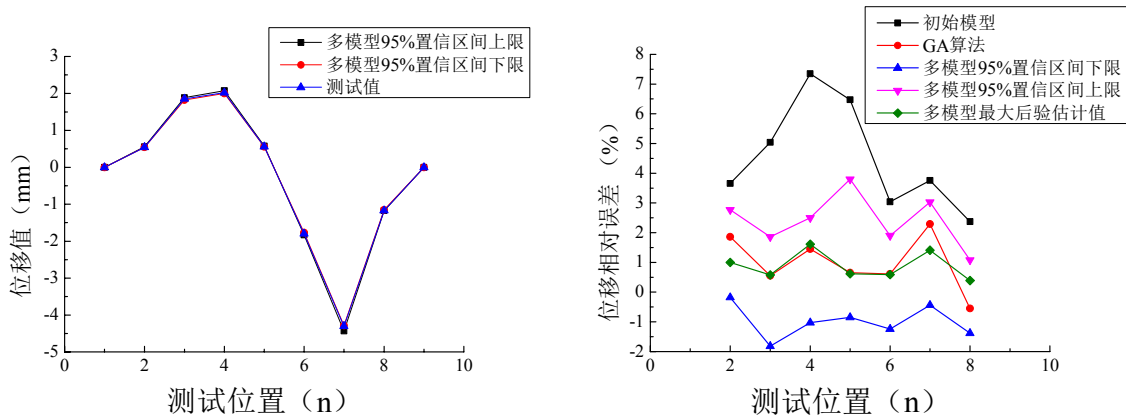
标准化关键参数	改进的 MH 算法	TMCMC 算法	LHS 算法	误差阈值法	GA 算法
E_c	1.09	1.07	1.09	1.11	1.09
E_s	0.92	0.94	0.92	0.95	0.97
E_d	0.97	0.93	0.96	0.98	0.95
E_p	0.90	0.93	0.94	0.95	1.07
T_h	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

由表 4.4 可见, 多种多模型方法和单模型方法的识别效果除了人行道板弹性模量差距 E_p 较大, 其余的识别效果均较好; 同时地, 多模型方法的识别效果比较趋近, 差值不超过 4%, 体现了多模型方法识别具有一致性和先进性。单模型方法识别结果是单一最优模型的识别值, 而多模型识别方法建立在全面分析结构的模型误差和测量误差的基础上, 利用概率统计方法挑选出的最符合结构真实反应特性的模型库进行识别, 其识别结果是具有统计规律的最大后验估计值, 进而体

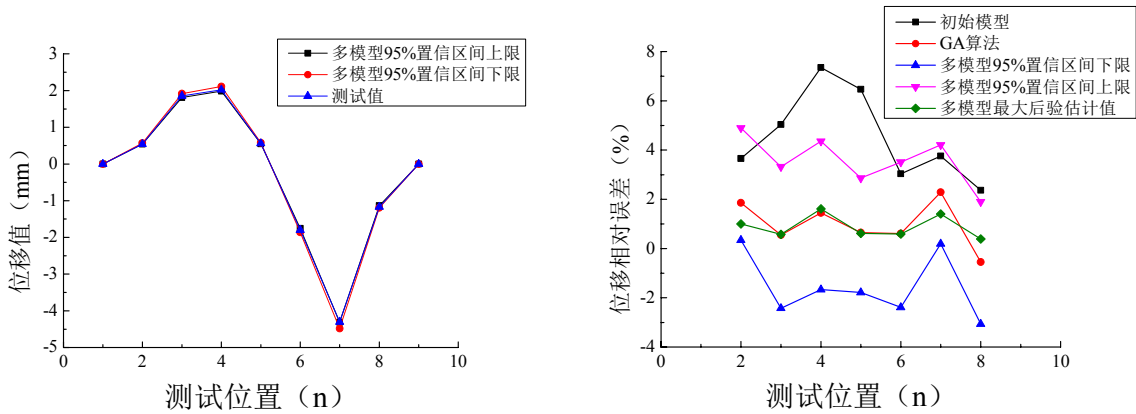
现了相对于单模型识别方法的优越性。

4.4 位移响应评估与对比

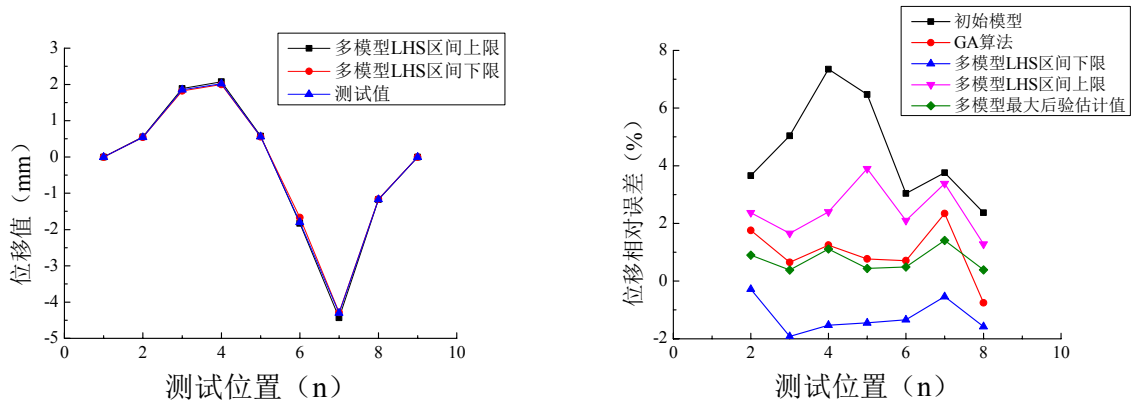
为了验证该多模型识别方法响应评估在实际复杂应用中的有效性，在来华大桥桥梁主跨 1/4 位置布置 5 台载重卡车加载（每台载重卡车荷载约为 300 kN）的工况下，将上文各多模型方法的关键参数的模型库数据与 GA 算法识别结果代入原模型静载计算获取大桥各个测点的位移响应预测结果。多模型结构识别的位移预测结果区间如图 4.15 左列所示，多模型识别与单模型识别方法的各测点的位移响应与测试值的相对误差如图 4.15 右列所示。测试位置为大桥桥面板的 1#~9#测点，如图 4.3 所示（1#，9#测点为桥面板两端点，误差为零，不予以考虑）。



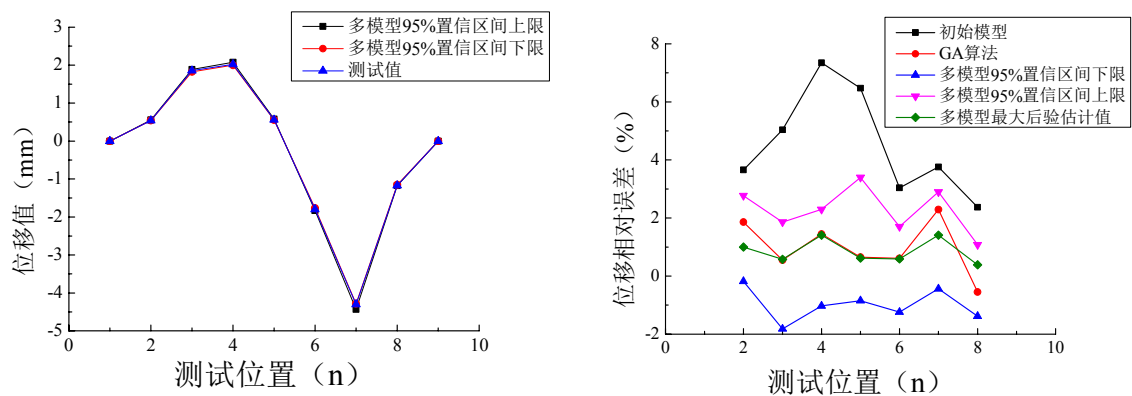
(a) 改进的 MH 方法



(b) TMCMC 方法



(c) LHS 方法



(d) 误差阈值法

图 4.15 来华大桥 1/4 跨静载位移响应结果

注释：左列各图表示多模型识别 1/4 跨静载位移与测试值；

右列各图初始模型与两算法修正模型的 1/4 跨静载位移与测试值的相对误差

依据图 4.15 结果显示，大桥在 1/4 跨加载工况下各多模型识别预测的各测点的位移相对误差均小于 1.5%，位移实际测试值也都落在了各多模型识别预测的的置信区间范围内。相比遗传算法（GA）预测位移值 3% 以上的相对误差，有一定的优势。在实际运用中，单模型识别在有噪声干扰的情况下，单模型识别响应预测普遍出现较大误差；而多模型识别方法可以反映预测误差区间的情况，并且抗噪性能良好，体现了相比于单模型识别的优越性。

4.5 本章小结

通过一座大型复杂系杆拱桥结构来华大桥实例，测试获取其桥面板的前十阶模态频率和振型数据，分别使用上文所提出的基于改进的 MH 抽样、TMCMC 抽样，LHS 方法和误差阈值法的多模型识别方法进行了模型参数识别和响应预测评估。结果表明各种多模型识别方法在复杂大型实际桥梁结构中识别结果有效，除

了人行道板弹性模量 E_p 差距较大外，其余各参数结果均趋近相同；以其 1/4 跨卡车桥面板静力加载工况为例，说明其响应预测分布合理，预测位移值相对误差均小于 1.5%，抗干扰性能良好，相较于单模型识别方法具有一定的优势，在实际应用中可以规避一些测量模型误差。

结论与展望

本文首先介绍了结构识别的研究现状，基于前人研究的基础，鉴于单模型识别的种种缺陷，继续深入研究了多模型结构识别（MM St-Id）的方法。笔者具体阐述了结构识别多模型的方法与优势，基于多种准确高效的抽样与筛选方法对多模型识别问题进行了研究，分别利用了笔者利用 Matlab-Strand7 的交互访问技术（Application Programming Interface, API）对一个简支梁的数值算例验证了基于贝叶斯理论的多模型识别方法（改进的 MH 抽样、TMCMC 抽样、拉丁超立方抽样）的有效性，对一块钢-混凝土组合板验证了多种多模型方法的可靠性并进行模型筛选，对一座大型钢管混凝土系杆拱桥进行了多模型识别方法在大型复杂有限元模型适用性的研究，表明各个多模型识别方法具有较好的可行性和有效性，体现了多模型识别方法相较于单模型的优势所在。本文研究的主要结论如下：

1. 多模型识别方法摒弃了单模型方法中寻找一个最佳的有限元模型的策略，而是通过综合分析结构的认知误差和随机误差，由各“模型碎片”组合成模型样本，通过比较测试结果和有限元模型的预测结果，在复杂的模型样本中选出最符合结构性能特点的模型库，进而利用模型库获取结构响应预测的概率分布并完成性能评估，相比单模型的结构识别理论，结果具有概率统计意义且更为科学准确。

2. 本文介绍了传统的马尔科夫链-蒙特卡洛模拟（MCMC）抽样方法，进而提出了三种衍生优化的 MCMC 抽样方法：一种改进的 MH 抽样方法，TMCMC 抽样方法和加入拉丁超立方抽样（LHS）的 MH 算法，并使用 Matlab-Strand7 交互访问技术（API）自动完成计算分析、迭代修正和模型筛选，能够克服传统的 MCMC 方法在模型复杂、参数维度较高时难以收敛与计算效率低下等问题，利用上述相关优化改进的衍生的 MCMC 抽样方法可以较好地实现结构的多模型识别。

3. 通过一个简支梁有限元模型算例，对其中非对称的两单元加以损伤并施加噪声干扰，分别利用三种衍生的 MCMC 抽样方法（一种改进的 MH 方法、TMCMC 抽样方法、LHS 方法）建立了有限元模型库并进行多结构识别与位移响应预测评估，结果表明多模型方法无论在有无噪声时的模型识别与位移预测的相对误差均在可接受范围内，特别是其抗噪的能力较单模型识别方法具有先进性。在两点集中力加载工况下进行了对跨中位移响应的预测评估，相对误差均小于 0.5%，体现了相对于单模型识别（特别是噪声干扰下）时的优势。

4. 为了与各基于 MCMC 抽样方法的多模型识别进行对比分析，笔者引入并介绍了一种传统可靠的多模型识别方法---误差阈值法。接下来用上述各种多模型识别方法对一块钢-混凝土组合板模型（三种母模型建模单元）进行了多模型识别和对比。发现其多模型识别结果相近，相对差值均不超过 6%，特别是 LHS 方法

的识别效果更佳；在均布砝码加载工况下进行了响应预测评估，各个加载测点的位移预测结果准确合理，测点位移相对误差均小于 8%；通过模型筛选对比确定壳-实体母模型相比于其它两种母模型更能切实反映组合板结构的真实静动力性能并模拟实际结构。

5.通过一座大型复杂桥梁（来华大桥）结构实例，分别基于一种改进的 MH 抽样、TMCMC 抽样、LHS 方法和误差阈值法建立有限元模型库并进行了多模型识别，结果表明各个多模型识别方法在复杂大型桥梁结构中识别结果准确有效；在其桥面板 1/4 跨加载卡车的工况下进行了测点的位移响应预测与评估，测点实测值均落在了对应的响应预测分布区间范围内，位移预测的相对误差均小于 1.5%，相较于单模型识别方法误差较小，具有一定的优势。

6.经过多方面多角度的对比，说明多模型方法虽然耗时长，运算量大，但是可以较好地解决大型复杂结构的识别问题，识别结果与响应预测结果更加可靠准确，抗噪声干扰的能力强，相比单模型识别具有较大的优势。更重要的是它可以建立有效而丰富的有限元模型库，进行响应预测和性能评估，进而为可靠度分析与风险预测提供非常有用的信息库资源。其中，基于 MCMC 方法及其衍生方法的抽样方法更加高效准确，特别是 LHS 方法理论误差较小；而传统的误差阈值法的抽样效率相对较低，人工操作量大。

进一步的工作

本文所采用的方法虽然初步实现了对复杂结构高维参数的损伤识别分析，但仍有许多缺陷，要应用到实际的工程问题中，需要进一步的研究：

（1）建立多模型的模型库需要大量计算。各多模型识别方法虽然利用了 Matlab-Strand7 交互访问技术（API）减少了计算时间，提高了抽样效率；但是对于大型复杂结构模型，所需的时间依然太长。因此可以考虑采用替代模型（例如响应面法），提高抽样效率，使得整个计算过程都可以在 Matlab 程序下完成。

（2）本文利用 MCMC 相关衍生的抽样方法实现了对高维问题的识别；但是随着未知参数的不断增加，所需的样本容量也随着指数型增大而运算效率不断下降；因此需要对抽样方法进一步地改进，譬如 MCMC 及其衍生算法本身的程序部分可以考虑用更有效的算法替换，本团队正在使用改进的响应面法进行研究。

（3）本文中由于多模型识别结果是相对复杂的，基于简单的 Matlab 中的正态拟合（Histfit）的相对粗糙的，加上笔者研究的重点是识别与预测结果。故本文主要关注了后验分布的最大后验估计值（识别结果），对其方差（标准差）还需要进一步的研究。多模型识别生成的模型库可以为可靠度分析提供信息支持，可靠度分析研究重点需要研究后验分布的方差（标准差），因此多模型识别的研究会更加完满。

参考文献

- [1] 吉伯海, 傅中秋. 近年国内桥梁倒塌事故原因分析. 土木工程学报(增刊),2010, S1(43):465-498
- [2] 叶梅新, 黄琼. 钢结构事故研究. 长沙铁道学院学报,2002,20(4):6-10
- [3] 徐洪涛, 郭国忠, 蒲焕玲等. 我国近年来桥梁事故发生的原因与教训. 中国安全科学学报,2007,17(11):90-95
- [4] 羊城晚报. 内地9天内发生4座桥梁垮塌1座桥梁倾斜 .http://news.ifeng.com/mainland/detail_2011_07/21/7845922_0.shtml,2011-07-21
- [5] Liu S C, Yao J T P. Structural Identification Concept. Journal of the Structural Division,1978,104(12): 1845-1858
- [6] Doebling S W, Farrar C R, Aktan A E, et al. The State of the Art in Structural Identification of Constructed Facilities. A draft report by the ASCE committee on structural identification of constructed facilities,2000
- [7] Aktan A E, Moon F L. ASCE-SEI Performance of Structures Track Technical Committee: Structural Identification of Constructed Systems. <http://www.di3.drexel.edu>,2005
- [8] 任伟新, 胡卫华, 林友勤.斜拉索模态试验参数研究.实验力学,2005,20(1):101-114
- [9] Hou Z, Noori M, Amand R S.Wavelet-based approach for structural damage detection.Journal of Engineering Mechanics,2000,126(7):677-683
- [10] Raphael B, Smith I F C. Fundamentals of computer-aided engineering, Wiley, New York,2003,11(6):279
- [11] Ren W X, De Roeck. Structural damage identification using modal data. I :Simulation verification.Journal of Structural Engineering,2002,128(1):87-95
- [12] Xia P Q, Brownjohn J M W.Bridge structural condition assessment using systematically validated finite-element model.Journal of Bridge Engineering,2004,9(5):418-423
- [13] Unger J F , Teughels A, Roeck G D. System identification and damage detection of a pre-stressed concrete beam.Journal of Structural Engineering,2006, 132(11):1691-1698
- [14] Esfandiari A, Bakhtiari-Nejad F, Sanayei M,et al.Structural finite element model updating using transfer function.Computers and Structures,2010,88:54-64
- [15] Daniell W, Macdonald J H G. Improved finite element modeling of a cable-stayed bridge through systematic manual tuning. Engineering Structures, 2007,

29(3):358–371

- [16] Holland J. Adaptation in Natural and Artificial Systems. MIT Press, 1992, 6 (2):126–137
- [17] Goldberg D. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning. Addison–Wesley, New York, 1989
- [18] Krishnamoorthy C S, Prasanna V, Sudarshan R. Object-oriented framework for genetic algorithms with application to space truss optimization. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2002, 16(1):66–75
- [19] Lingireddy S, Ormsbee L. Optimal Network Calibration Model Based on Genetic Algorithms. *Water Resources Planning & Management Conference*, 1999, 1999:1–8
- [20] Perera R, Torres R. Structural Damage Detection via Modal Data with Genetic Algorithms. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(9):1491–1501
- [21] Carlo G, Quaranta G, Monti G. Modified genetic algorithm for the dynamic identification of structural system using incomplete measurements. *Computer aided civil and infrastructure engineering*. 2011, 26(2):92–110
- [22] Chisari C, Bedon C, Amadio C. Dynamic and static identification of base-isolated bridges using genetic algorithms. *Engineering structures*, 2015, 102(11):80–92
- [23] Robert N Y, Raphael B, Smith I F C. Configuration of measurement systems using Shannon’s entropy function. *Computers and Structures*, 2005, 83(8): 599–612
- [24] Falkenhainer B, Forbus K D. Compositional modeling: Finding the right model for the job. *Artificial Intelligence*, 1991, 51(1–3):95–143
- [25] Raphael B, Smith I F C. A direct stochastic algorithm for global search. *Applied Mathematics and Computation*, 2003, 146(2–3):729–758
- [26] Saitta S, Raphael B, Smith I F C. Data mining techniques for improving the reliability of system identification. *Advances Engineering Information*, 2005, 19(4):289–298
- [27] Robert-Nicoud Y, Raphael B, Smith I F C. Configuration of measurement systems using Shannons entropy function. *Computers and Structures*, 2005, 83:599–612
- [28] Robert-Nicoud Y, Raphael B, Smith I F C. System identification through model composition and stochastic search. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2005, 19(3):239–247
- [29] Saitta S, Raphael B, Smith I F C. Combining two data mining methods for system identification. *Intelligent Computing in Engineering and Architecture*, Springer-Verlag, Berlin, 2006, 4200:606–614
- [30] Zapico-Valle J L, Alonso-Cambor R, Gonzalez-Martinez M P, et al. A new method for finite element model updating in structural dynamics. *Mechanical Systems and*

Signal Processing,2010,24(7):2137–2159

- [31] Laory I , Ali N B H , Trinh T N, et al. Measurement system configuration for damage identification of continuously monitored structures. Journal of Bridge Engineering.2012, 17(6):857–866
- [32] Catbas N, Gokce H B , Dist D M F.Predictive analysis by incorporating uncertainty through a family of models calibrated with structural health-monitoring data.Journal of Engineering Mechanics,2013,139(6):712–723
- [33] Zheng W, Shen J L, Wang J G. Improved Computational Framework for Efficient Probabilistic Inference of Damage in Truss Structures Based on Vibration Measurements. In Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, 2014, 14–34
- [34] Pasquier R, Smith I F C. Iterative structural identification framework for evaluation of existing structures. Engineering structures, 2016,106:179–194
- [35] Pasquier R, Goulet J A, Smith I F C. Measurement system design for civil infrastructure using expected utility.Advanced Engineering Informatics. 2017,32:40–51
- [36] Beck J L, Katafygiotis L S. Updating models and their uncertainties I: Bayesian statistical framework. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(4):455–461
- [37] Anik M W, Beck J L, Au S K. Bayesian probabilistic approach to structural health monitoring. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(7):738–745
- [38] Sohn H, Law K H.Bayesian probabilistic damage detection of a reinforced-concrete bridge column. Earthquake Engineering&Structural Dynamics,2000,29(8), 1131–1152
- [39] Beck J L, Au S K. Bayesian updating of structural models and reliability using Markov chain Monte Carlo simulation. Journal of Engineering Mechanics,2002, 128(4): 380–391
- [40] Rebba R, Mahadevan S, Zhang R. Validation of uncertainty propagation models. Proceedings of the 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures.Norfolk:Structural Dynamics and Materials Conference,2003:4671–4678
- [41] Ching J, Beck J L. Bayesian analysis of the phase II IASC-ASCE structural health monitoring experimental benchmark data. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(10): 1233–1244
- [42] Ching J, Chen Y C. Transitional Markov chain Monte Carlo method for bayesian model updating, model class selection and model averaging. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(7):816–832
- [43] Yuen K V, Au S K, Beck J L.Two-stage structural health monitoring approach for phase I benchmark studies. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(1):16–33

- [44] Muto M, Beck J L. Bayesian updating of hysteretic structural models using stochastic simulation. *Journal of Vibration Control*, 2008, 14(1), 7–34
- [45] 易伟建,周云,李浩.基于贝叶斯统计推断的框架结构损伤诊断研究.*工程力学*,2009, 26(5):121–129
- [46] Cheung S H, Beck J L. Bayesian model updating using hybrid Monte Carlo simulation with application to structural dynamic models with many uncertain parameters. *Journal of Engineering Mechanics*, 2009, 135(4):243–255
- [47] Cheung S H, Beck J L. Calculation of posterior probabilities for Bayesian model class assessment and averaging from posterior samples based on dynamic system data, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2010, 25(5):304–321
- [48] Yuen K V, Kuok S C. Bayesian methods for updating dynamic models. *Applied Mechanics Reviews*, 2011, 64(1):11–18
- [49] J Zhang, J Prader, K A Grimmelman, et al. Experiment and analytical analysis of a long span suspension bridge for structural identification. *ASCE Journal of Engineering Mechanics Special Issue on Memory of Prof. Abdel-Ghaffar*. 2013, 139:748–759
- [50] Hao Sun, Aurélien M, Germán A P, et al. Bayesian characterization of buildings using seismic interferometry on ambient vibrations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 85:468–486
- [51] Simoen E, Moaveni B, Conte J P, et al. Uncertainty quantification in the assessment of progressive damage in a 7-story full-scale building slice. *Journal of Engineering Mechanics*, 2013, 139(12):1818–1830
- [52] Jian Zhang, Chunfeng Wang, Tadanobu S. Advanced Markov chain Monte Carlo approach for finite element calibration under uncertainty. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2013, 28(7):522–530
- [53] Zheng W, Shen J L, Wang J G. Improved Computational Framework for Efficient Probabilistic Inference of Damage in Truss Structures Based on Vibration Measurements. In *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*, 2014, 14–3462
- [54] Zheng Wei, Yu Wei. Probabilistic approach to assessing scoured bridge performance and associated uncertainties based on vibration measurement. *Journal of Bridge Engineering*, 2015, 20(6):04014089
- [55] Dubbs N C, Moon F. Comparison and implementation of multiple model structural identification methods. *Journal of structural engineering*, 2015, 141(11):1–13
- [56] Ayyub B M. *Uncertainty modeling and analysis in civil engineering*, CRC Press, USA, 1998, 198(9):1415-1415

- [57] Haimes Y Y. Risk modeling, assessment and management. *Journal of Food Quality*, 2004, 29 (2):315-316
- [58] Ang A H, Tang W H. *Probability concepts in Engineering: Emphasis on applications to Civil and Environmental Engineering*. 2008, 4 (5):413-414
- [59] Oberkampf W L. Uncertainty quantification using evidence theory. *Advanced simulation & Computing Workshop Error Estimation, Uncertainty Quantification, and Reliability in Numerical Simulations*, Stanford University, 2005:22–23
- [60] Raphael B, Smith I F C. *Fundamentals of computer-aided engineering*, Wiley, New York, 2003, 11(6):279
- [61] Robert N Y, Raphael B, Smith I F C. System identification through model composition and stochastic search. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2005, 19(3):239–247
- [62] Collins J D, Thomson W T. The eigenvalue problem for structural systems with statistical properties. *Aiaa Journal*, 2012(7):642-648
- [63] Larry Wasserman. *Bayesian Model Selection and Model Averaging*. *Journal of Mathematical Psychology*, 2000, 44(1):92
- [64] James L Beck. *Bayesian system identification based on probability logic*. *Structural Control & Health Monitoring*, 2010, 17:825–847
- [65] Smith I F C, Saitta S. Improving knowledge of structural system behavior through multiple modes. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(4):553–561
- [66] Katafygiotis L S, Papadimitriou C, Lam H F. A probabilistic approach to structural model updating. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1998, 17(7): 495–507
- [67] Anner M A, Wong W H. The calculation of posterior distributions by data augmentation. *Journal of the American statistical Association*, 1987, 82(398): 528–540
- [68] Metropolis N, Rosenbluth A W, Rosenbluth M N, et al. Equation of state calculations by fast computing machines. *The Journal of Chemical Physics*, 1953, 21(6): 1087–1092
- [69] Hastings W K. Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications. *Biometrika*, 1970, 57(1): 97–109
- [70] 李浩. 混凝土结构抗震性能的不确定性分析与研究.[博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2011, 47–55
- [71] Haario H, Laine M, Miria A, et al. DRAM: Efficient adaptive MCMC. *Statistics and Computing*, 2006, 16(4): 339–354
- [72] Marques J P. *模式识别: 原理、方法及应用*. 北京: 清华大学出版社, 2002, 87–101
- [73] Daniell W, Macdonald J H G. Improved finite element modeling of a cable-stayed bridge through systematic manual tuning. *Engineering Structures*, 2007, 29(3):

358–371

- [74] Zheng W, Chen Y T. Novel Probabilistic Approach to Damage Identification of Bridge Piers Post Vessel Collision Based on Vibration Measurements. In Transportation Research Board 92nd Annual Meeting, 2013, 13–32
- [75] Kay M D, Beckman R J, Conover W J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code: proceedings of the 37th conference on winter simulation. Technometrics, 2012, 42(1):202–208
- [76] Anders M, J Olsson, Goran E Sandberg. Latin hypercube sampling for stochastic finite element analysis. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(1): 121–125
- [77] A Olsson, G Sandberg, O Dahlblom. On Latin hypercube sampling for structural reliability analysis. Structural Safety, 25(2003):47–68
- [78] Goulet J A, Kripakaran P, Smith I F C. Multi-model structural performance monitoring. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(10):1309–1318
- [79] Pasquier R, Smith I F C. Iterative structural identification framework for evaluation of existing structures. Engineering structures, 2016, 106:179–194
- [80] 周云. 地震板与混凝土框架结构参数识别的实验与研究 [博士学位论文]. 长沙:湖南大学, 2008, 108–122
- [81] 蒋运忠. 基于子结构模态模态综合法识别桥面板柔度的理论和试验研究. [硕士学位论文]. 长沙:湖南大学, 2015, 61–93
- [82] 周云, 蒋运忠, 谢利民. 桥面板分片子结构模态柔度综合的理论与试验研究. 中国公路学报, 2015, 28(4):35–43, 51
- [83] 周云, 张军凯, 陈松柏等. 大跨度拱桥静动力试验与结构识别的实践. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 5(2):10–19
- [84] 张军凯. 大跨钢管混凝土拱桥的静动力实验及结构识别研究 [硕士学位论文]. 长沙:湖南大学, 2016, 14–45
- [85] 周云, 张军凯, 陈松柏. 基于静动力试验的大跨度拱桥结构识别和状态评估. 中国科技论文在线, 2015, <http://www.paper.edu.cn/html/releasepaper/2015/09/225/>
- [86] Yun Zhou, Junkai Zhang, Weijian Yi, et al. Structural identification of a concrete-filled steel tubular arch bridge via ambient vibration test data. Journal of Bridge Engineering (Accept)

致 谢

时光匆匆,硕士三载,湖湘学涯,白马过隙,衷心感谢父母、老师、恋人、同学、亲戚、朋友等的支持与鼓励。

本论文的工作是在周云副教授的亲切关怀和悉心指导下完成的。感谢周云副教授对我学习上的殷切教导和生活上的关怀。周老师为我付出了大量的心血,鄙人资质驽钝,不甚好学亦不求甚解,胸无点墨之才,手无缚鸡之力。而周老师始终鼓励我进步前进,手把手地给我教学,兢兢业业帮我分析问题,在我最困难的时候帮助我支持我。周老师博闻强识,博通古今,治学严谨,精益求精,孜孜不倦,高风亮节,是我一生学习膜拜的榜样,并且将会始终引领指导我的人生道路。从论文选题、试验模拟、数据分析、篇章撰写直至最终定稿,无不凝汇着周老师的无尽的精力心血,不禁深深地感染和鼓舞着我。

同时地,感谢其它湖南大学土木工程学院诸位老师们特别是易伟建教授对于本项目与鄙人的支持鼓励。感谢同门师兄弟(姊妹)与同学们三年以来的帮助与支持。附名单如下:方亮、谢利民、米斯特、蒋运忠、陈松柏、吴峥、周祎、陈太平、胡翔、奚树杭、刘蒙、曾雅丽思、张琴、王振生、李紫玮、彭涵钰;吴齐阳、彭占关、严涛、李开琼、卢进、龚江炜、丁仕进、倪倪、周鼎亮、周跃宽;李炎蓁、丘伟城、娄建民、周烽淼、谢林兵、廖佳洋、齐亮、朱升昕、黄德润、姚江、刘彪、邓国旗、邓颖婷、高炎鑫、胡耀耀、聂新民、彭真、鲜亚兰、吴松熊、屈夏霞、梁晓娟、钟琼、沈楠、翟松、谢林兵、王子然、俞青青、吴岳、罗梓涵等。

贾凡丁

2017年6月于湖南大学

附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文目录

- [1]周云,贾凡丁,奚树杭.基于贝叶斯理论的多模型结构识别理论与试验研究.
湖南大学学报(自然科学版) (已录用)
- [2]周云,蒋运忠,易伟建,谢利民,贾凡丁. 基于模态柔度理论的结构损伤诊断试验研究. 湖南大学学报(自然科学版), 2015,42(5):36-45
- [3]周云,谢利民,蒋运忠,贾凡丁,易伟建. 多模型结构识别方法及在混凝土连续梁的应用. 地震工程与工程振动,2015,35(4):130-138
- [4]周云,张军凯,陈太平,贾凡丁. 基于贝叶斯统计理论的桥梁多模型结构识别研究.
第六届全国结构抗振控制与健康监测学术会议, 2016, 9.23-25,中国,沈阳