

4.1.19 基于界限阈值的多模型甄选

国外多模型结构识别研究主要采用相同的模型碎片而改变碎片参数来构建多模型，并基于主成分分析、K 值聚类、决策树方法、特征选择和支持向量基等数据挖掘技术^[33-36]，进行多模型的分类和甄选。本文在考虑前述的结构识别不确定性的基础上，定量分析各类误差对结构识别的影响，提出基于误差界限阈值的多模型甄选策略，这是多模型结构识别中最为关键的决策部分。误差界限阈值来源于试验误差和有限元分析误差两部分，试验误差包括传感器精度、采集仪分辨率、传感器安装和测量可重复性；有限元分析误差包括模型单元选择、网格划分精度、几何尺寸以及其他简化假定。通过比较响应试验值与 Strand7 预测值，接受落在误差阈值内的候选模型，排除落在误差界限范围外的模型。

本节基于钢筋混凝土连续梁静载试验获得的 13 个位移进行多模型筛选。对于静力数据而言，误差界限阈值主要考虑传感器精度误差和有限元分析误差，一个 6% 的阈值^[37]来统一考虑上述两种误差的综合影响。表 4.8 为钢筋混凝土连续梁参考状态的静力位移，本节将以此作为模型筛选的参照。图 4.17 为 13 个钢筋混凝土连续梁测点位移的模型散点分布。

表 4.8 钢筋混凝土连续梁的测点位移试验值

测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
位移/mm	0.01	0.06	0.16	0.31	0.37	0.38	0.34	0.26	0.21	0.29	0.22	0.19	0.09

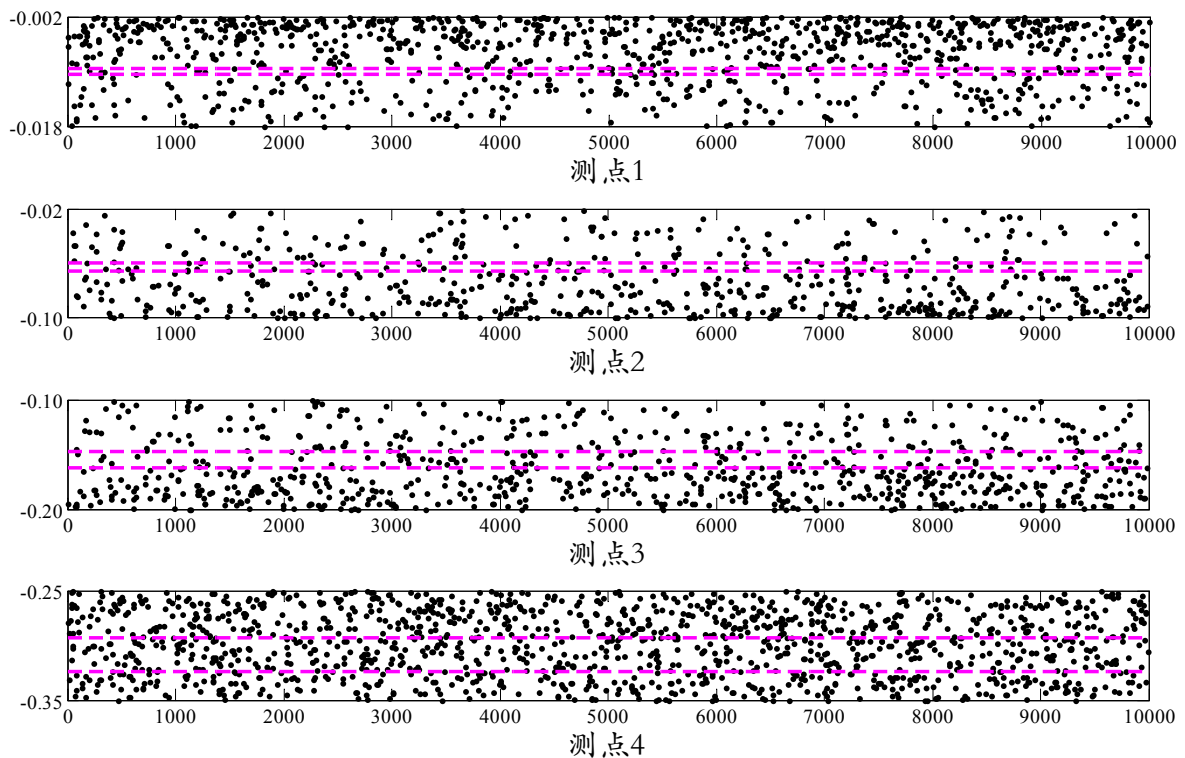
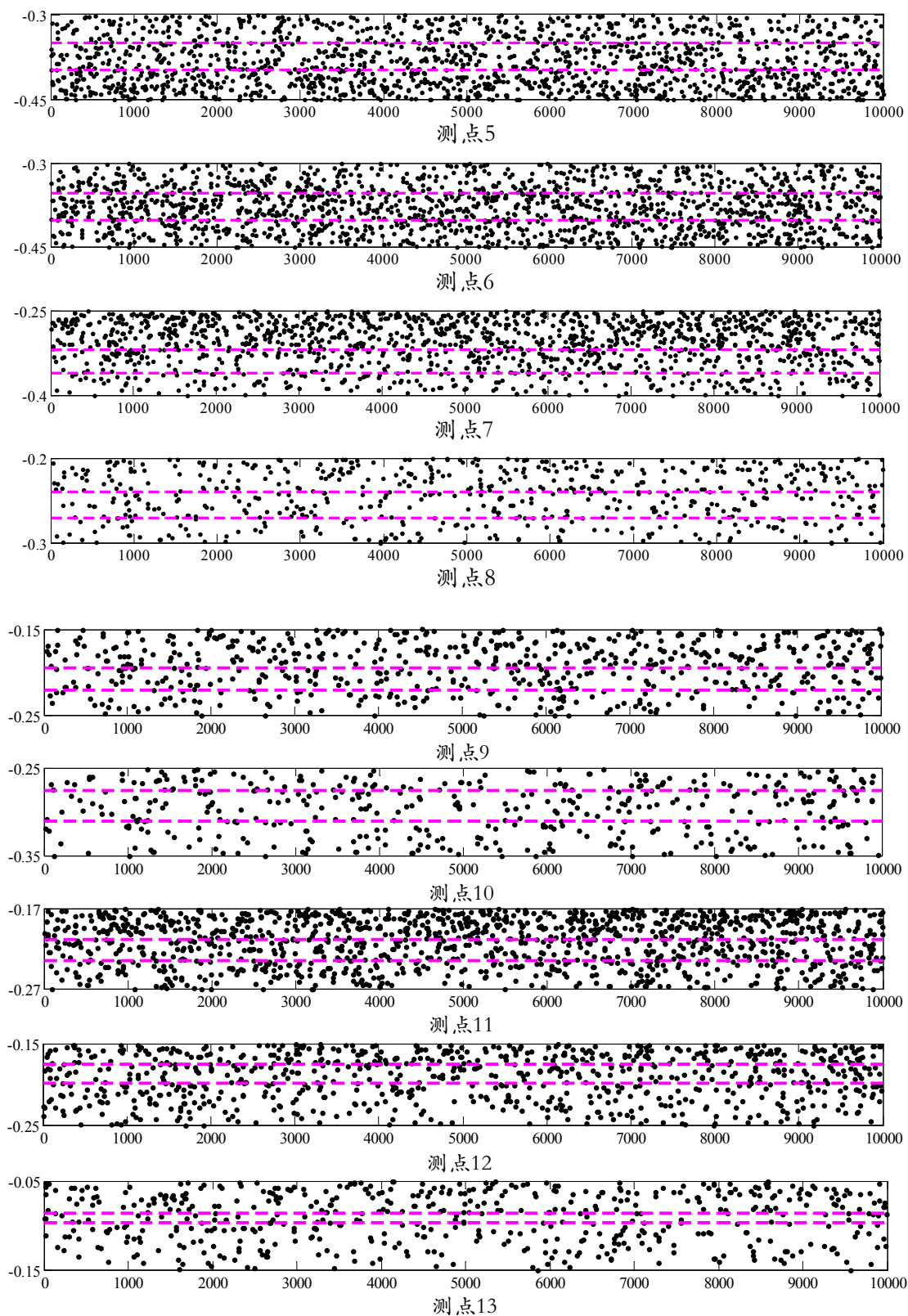


图 4.17 基于静力位移的模型散点分布



续图 4.17 基于静力位移的模型散点分布

多模型筛选的目标是获得同时匹配 13 个测点位移的模型,但实际结果却往往不尽人意。上图表明落在单个测点的界限阈值内模型个数较多,但满足所有测点的公共模型却没有,这可能是误差阈值太过严格,于是把界限阈值从 6%调大至 10%,却还是没有能同时满足所有测点的公共模型。为此上一节的测点熵值排序

可作为本节模型筛选的优先次序，即先满足熵值大的测点，再去满足其他测点。这样多模型筛选将变得更加合理。

鉴于运用静力位移的模型筛选结果较差，本文基于模态参数进行多模型筛选。由于模态分析结果存在刚体模态和扭转模态，基于 MAC 值的模态匹配可能会出错，需要人工干预去校验模态匹配的正确性，为此将动力模态分析的模型减少至 1000 个以正确判定模态匹配的精度。模型筛选的误差阈值^[88]见表 4.9，测试误差主要考虑传感器精度、测量噪声和测量可重复性，传感器精度为加速度传感器的测量误差，测量噪声取平均噪声水平与加速度响应最大值的比值，测量可重复性为 6 次模态测试频率的标准差与平均值的比值的 3 倍。一个 5% 的综合值用来考虑各种有限元分析的误差影响。由于试验分析模态不可能一一与有限元模态匹配，本文基于钢筋混凝土连续梁模态试验得到第 1、4、7 和 8 阶频率进行模型筛选。图 4.18 为基于 4 阶模态频率的模型散点分布。

表 4.9 误差界限阈值的不确定性来源

误差类型	偏差	模态阶数			
		1	4	7	8
传感器精度	—	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%
测量噪声	—	0.12%	0.12%	0.12%	0.12%
测量可重复性	$\pm 3\sigma$	0.60%	0.84%	0.72%	0.42%
有限元分析	—	5%	5%	5%	5%
误差阈值	—	5.72%	5.96%	5.84%	5.54%

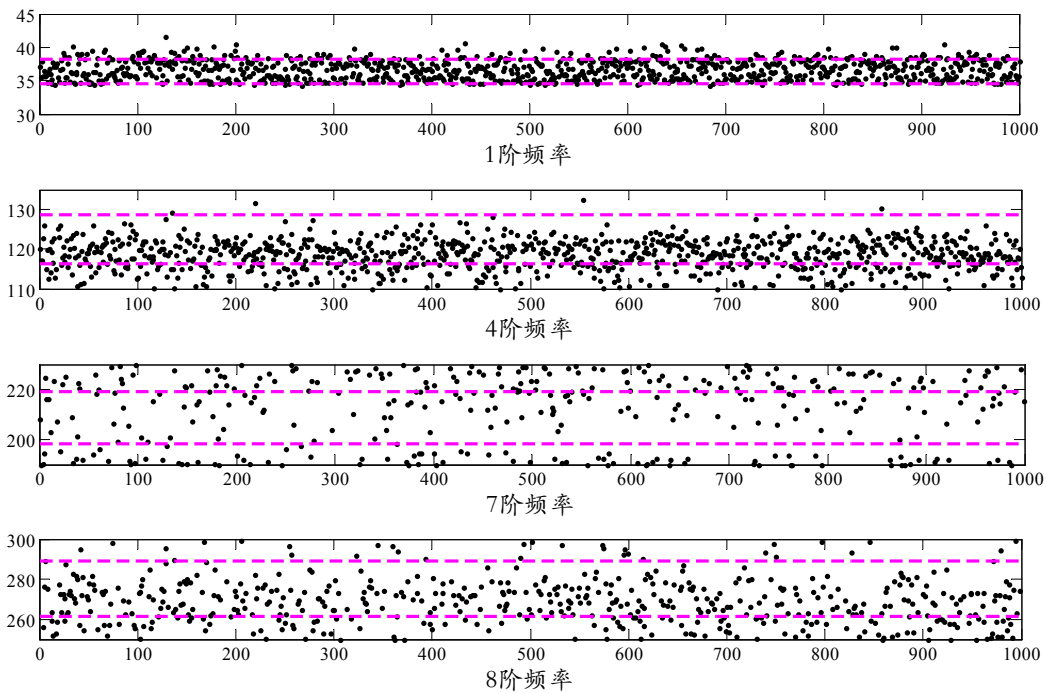


图 4.18 基于模态频率的模型散点分布

图中数据显示第 7、8 阶模态的辨识度高，1000 个模型中同时满足 4 阶模态的

公共模型有 33 个，人工筛选并剔除不合理模型后还剩下 11 个模型，图 4.19 为 11 个候选模型预测连续梁的静力位移，对应模型碎片的参数值见表 4.10。

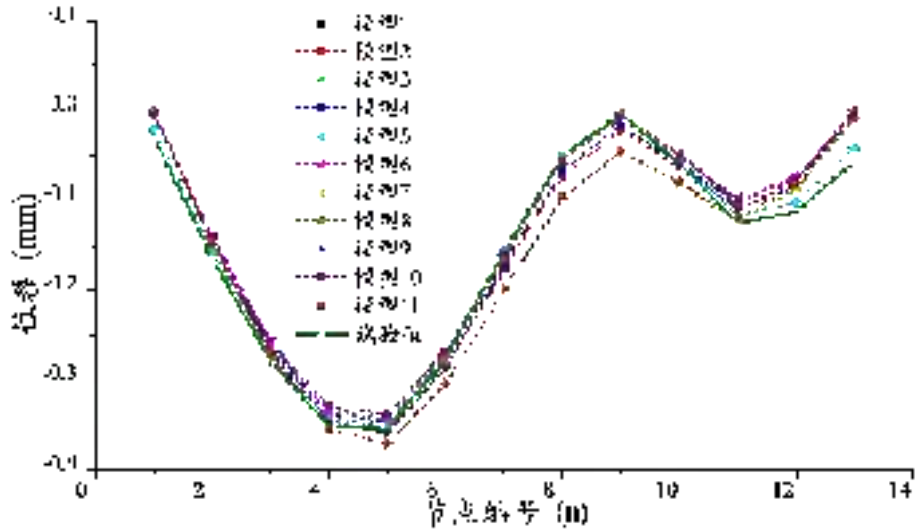


图 4.19 11 个候选模型预测的静力位移

表 4.10 11 个候选模型的物理参数

模型	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$E(10^4\text{MPa})$	3.82	3.76	3.79	3.77	3.74	3.85	3.60	3.69	3.84	3.74	3.77
$\rho(10^3\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2.42	2.36	2.45	2.40	2.39	2.32	2.33	2.36	2.43	2.35	2.38
$K_1(10^6\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	2.58	1.98	1.80	8.26	3.11	0.75	1.55	0.77	0.94	5.12	1.20
$K_2(10^6\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	1.18	0.92	2.74	1.15	3.98	0.44	5.30	1.19	2.29	0.58	0.72

1.21 本章小结

本章主要基于多模型方法对钢筋混凝土连续梁进行结构识别研究。首先介绍了结构识别过程中的误差理论，并阐述了结构识别可靠性的概念。由于测量误差和模型误差的相互补偿抵消，传统单模型结构识别显示出较大的局限性，本章以此提出 5 步骤的多模型结构识别方法。其次对一根钢筋混凝土连续梁进行静动力试验研究，获得了连续梁分级加载的位移和应变结果，并对参考状态和 4 个损伤工况的试验梁进行多参考点脉冲锤击法模态试验，对比 CMIF 方法和 PolyMAX 方法提取的前 8 阶模态参数。最后以钢筋混凝土连续梁的静动力结果为依据，选取混凝土的弹性模量和密度、中间支座刚度及端部支座刚度 4 个模型碎片建立连续梁有限元模型，并进行模型碎片的灵敏度分析，基于 Matlab 和 Strand7 交互访问生成 10000 个有限元模型，基于静力数据研究最大熵原理的传感器最优布设，给出了连续梁的 13 个测点位移最优排序，最后分别运用静力数据和模态数据进行基于误差阈值的多模型甄选研究，结果表明基于模态数据的结构模型筛选更为准确，候选模型能够进一步用来预测未来的结构性能。

第 5 章 地基上 RC 框架的静动力试验研究

1.22 引言

前 2 章分别研究了钢筋混凝土简支梁和连续梁的损伤识别，本章将拟对一个坐落于地基上钢筋混凝土框架模型进行结构识别。相对梁类构件而言，空间框架已经上升到结构体系层面，更多的不确定性因素影响结构识别的可靠性。周云^[65]等研究了地基对框架结构模态的影响，基于土-结构的动力相互作用的弯剪型模型进行框架模型修正。以往研究结果表明填充墙会增大钢筋混凝土框架的侧向刚度，并影响框架结构的抗震性能^[89-91]。目前国内结构设计中将填充墙当作线荷载考虑，最后用周期折减系数进行折减处理，这种简化计算方法只粗略考虑了填充墙的附加质量和附加刚度的影响，并没有在直观上研究填充墙的质量和刚度对结构模态参数的影响。因此本章设计一组分离填充墙的附加质量和附加刚度的对比试验，来分别研究填充墙的质量和刚度对框架模态参数的影响。

1.23 钢筋混凝土框架模型试验

一个地基土上 4 层 1 跨 2 开间的钢筋混凝土空间框架被用来进行静动力试验研究。该框架是在 2005 年 11 月至 2006 年 4 月期间分层浇注完成的，设计模型的相似比为 1:3，总尺寸 $L \times B \times H = 2.8\text{m} \times 1.8\text{m} \times 4.333\text{m}$ ，底层层高 1.333m，2~4 层高 1m，跨度 1.8m，开间 1.4m，混凝土强度的设计等级为 C25，框架梁、柱和楼板的受力钢筋均为 HPB235，楼板厚度为 30mm，图 5.1 为钢筋混凝土框架梁、柱和楼板的配筋图。框架柱下为 60mm 厚的独立板式基础，图 5.2 给出了框架基础板的配筋图，地基土的动力特性指标测试^[92]获得了土的动力剪切模量和动力弹性模量分别为 $4.84 \times 10^7 \text{N/m}^2$ 和 $1.25 \times 10^8 \text{N/m}^2$ 。表 5.1 统计了钢筋混凝土框架所有构件的截面尺寸和配筋。

表 5.1 框架构件的截面尺寸和配筋

构件名称	截面尺寸	受力钢筋	箍筋
框架梁 KL1	$B \times H = 67\text{mm} \times 167\text{mm}$	2 ϕ 8, 3 ϕ 8	ϕ 3@15/30
框架梁 KL2	$B \times H = 83\text{mm} \times 133\text{mm}$	2 ϕ 8, 2 ϕ 8	ϕ 3@15/30
框架柱 KZ1	$L \times B = 133\text{mm} \times 133\text{mm}$	4 ϕ 8	ϕ 3@30
楼板	$L \times B = 1.8\text{m} \times 2.8\text{m}$	ϕ 3@60, ϕ 3@60	—
基础板	$L \times B = 600\text{mm} \times 600\text{mm}$	ϕ 8@60, ϕ 8@60	—

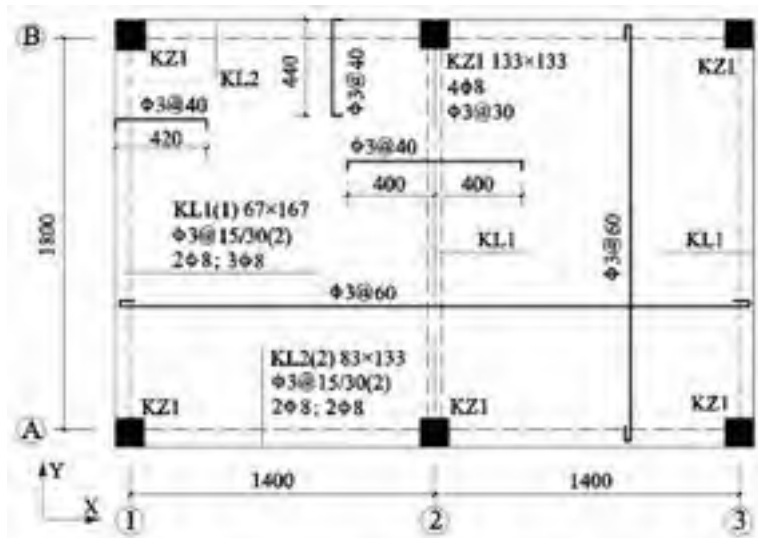


图 5.1 框架梁、柱和楼板配筋图

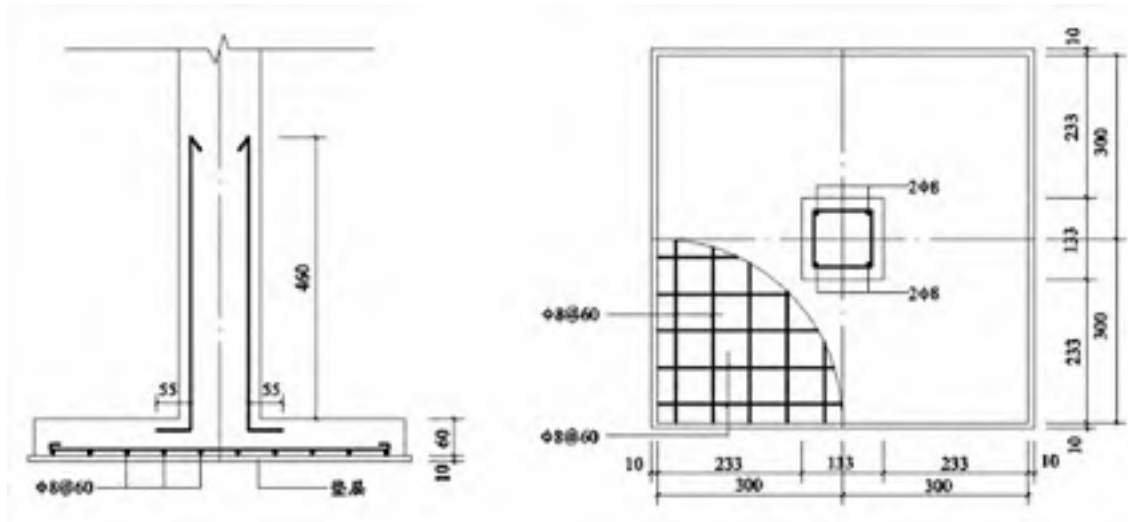


图 5.2 框架结构基础板配筋图

5.1.1 模态试验

为了研究填充墙对钢筋混凝土框架的模态参数的影响，并设法从中分离填充墙的附加质量和附加刚度对空间框架模态的影响比例，设计了以下一组对比试验。图 5.3a)~5.3c)为钢筋混凝土空间框架的三种模型，模型 1 为钢筋混凝土空框架；模型 2 为粘土砖框架，模型 3 为填充墙框架。粘土砖与填充墙砌筑在框架第二层轴线①、②、③的三片横墙上，粘土砖与两侧框架柱和顶部框架梁均不接触，用来近似模拟填充墙的附加质量。这三种设计形式的框架正好巧妙地将填充墙的附加质量和附加刚度区分开来。

对钢筋混凝土空间框架进行多参考点脉冲锤击法模态试验，其加速度传感器的测点布设如图 5.3d)所示，1#~10#为水平 X 方向，11#~25#为水平 Y 方向，26#~35#为竖直方向。采用频响范围较小的软橡胶锤头力锤敲击，这对于框架来说已经足够。力脉冲和加速度响应信号由 DP730 采集，采样频率设置为 256Hz，定义 0.05s

的提前触发采样。由于框架柱底测点的脉冲信号干扰大，因此只锤击第 1~4 层的楼层测点，每个测点平均敲击 5 次。模态试验由于 DP730 通道数目的限制分成 3 组测试，测点分组信息见表 5.2。



a) 模型 1: 空框架



b) 模型 2: 粘土砖框架



c) 模型 3: 填充墙框架



d) 加速度传感器布设测点

图 5.3 钢筋混凝土框架模型及模态试验测点

表 5.2 框架结构试验的测点分组

测试分组	响应点	锤击点	测试平面
测试 1	1~10、26~29	1~4、6~9	X 平面
测试 2	11~20、30~33	11~14、16~19、21~24	Y 平面
测试 3	16~25、32~35		

5.1.2 静载试验

静载试验主要测试钢筋混凝土空框架模型 1 和填充墙框架模型 3 线弹性范围内的侧向变形和应变变化。图 5.4a)为钢筋混凝土填充墙框架的静载试验照片，通过一根木梁顶住一幢多层建筑墙体来获取反作用力，并利用机械千斤顶加载，加载控制点和位移及应变响应点均位于钢筋混凝土框架的 Y 平面内 1~4 层中柱上。由于这种加载方式的限制，施加的最大荷载值仅为 12kN，钢筋混凝土框架截面均未开裂，可以判定框架处于线弹性阶段。图 5.4b)为静载试验的测点布置，5 个应变式位移计被用来测量楼层侧向变形，18 个应变片用来测量框架楼层上下柱端截面和基础板的混凝土应变，力传感器、应变片和位移计数据由 TDS-530 采集。

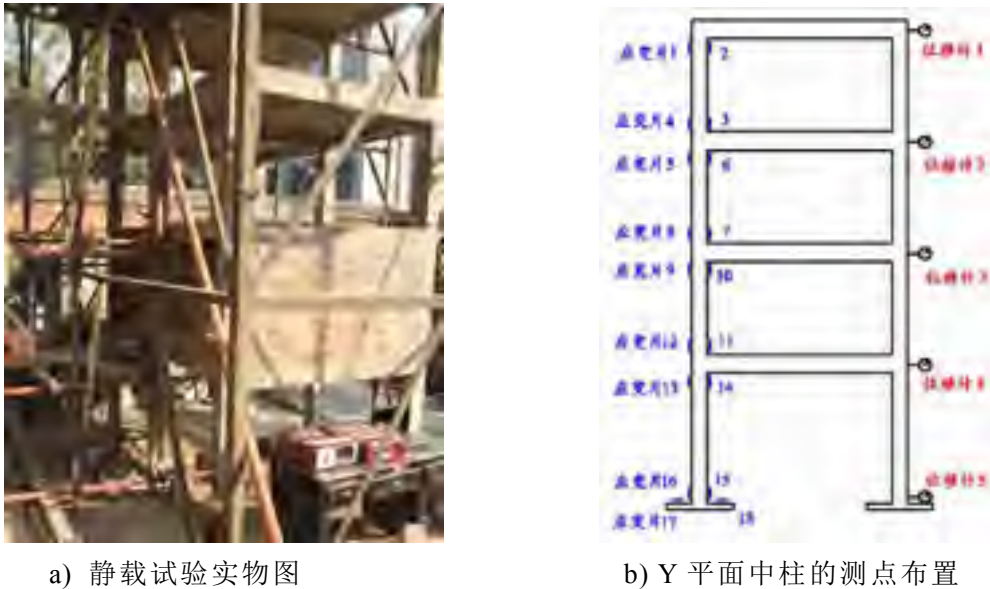


图 5.4 钢筋混凝土空间框架的静载试验

5.1.3 回弹法测试框架混凝土的弹性模量

鉴于钢筋混凝土框架是逐层浇注的，且无现存的混凝土试块可以测试抗压强度，故采用回弹法测定框架混凝土的弹性模量。由于空间框架分四次浇注，认为每一层构件的弹性模量取值相同。回弹法测试中框架的每一层共 13 个构件，每个构件 3 个测区，依据《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ/T 23-2011，每一测区均匀分布 16 个测点，取中间 10 个回弹值的平均值作为该测区的平均回弹值，并修正回弹非水平方向的影响，构件的碳化深度用酚酞酒精溶液测量，根据测区回弹值和碳化深度查测区混凝土强度换算表，得到混凝土抗压强度值，相应的数据统计分析见式(5.1)-(5.3)。

$$m_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{cu,i}^c \quad (5.1)$$

$$S_f = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{cu,i}^c)^2 - n(m_{f_{cu}}^c)^2}{(n-1)}} \quad (5.2)$$

$$f_{cu,e} = m_f - 1.645S_f \quad (5.3)$$

式中 m_f 和 S_f 为构件测区混凝土强度换算值的平均值和标准差, $f_{cu,e}$ 为构件的混凝土强度推定值, 混凝土强度推定值按公式(4.8)换算的弹性模量见表 5.3。

表 5.3 回弹法测定的混凝土弹性模量

楼层	构件名称	测区混凝土强度换算值/MPa		混凝土强度推定值/MPa	混凝土弹性模量/MPa	楼层弹性模量/MPa
		平均值	标准差			
1 层	框架柱	37.38	4.17	30.52	3.00×10^4	3.04×10^4
	框架梁	43.69	6.45	33.08	3.08×10^4	
2 层	框架柱	37.51	1.45	35.12	3.14×10^4	2.93×10^4
	框架梁	29.10	3.24	23.77	2.73×10^4	
3 层	框架柱	42.18	4.66	34.51	3.12×10^4	2.98×10^4
	框架梁	36.51	6.25	26.23	2.84×10^4	
4 层	框架柱	32.49	0.68	31.37	3.03×10^4	3.03×10^4
	框架梁	34.19	1.70	31.39	3.03×10^4	

5.1.4 砂浆抗压强度试验

砌筑填充墙时浇注了 3 个边长为 70.7mm 的砂浆立方体试块, 用以测定砂浆的抗压强度。为了尽早使填充墙达到足够的刚度, 砌筑砂浆中掺入了一定量的早强剂。砂浆养护 7 天后在试验压力机测定抗压强度值。依据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》JGJ/T 70-2009, 试件的承压面应与成型时的顶面垂直, 试件中心应与试验机垫板对中, 控制均匀加载速率为 0.25-1.5kN/s, 相当于 0.05-0.3MPa/s。当试件开始迅速变形临近破坏时, 停止调整试验机油门, 并记录其破坏荷载 N_u 。砂浆的立方体抗压强度 $f_{m,cu}$ 按下式计算,

$$f_{m,cu} = K \frac{N_u}{A} \quad (5.4)$$

式中 K 表示换算系数, 考虑了钢模吸水率和吸水速度引起砂浆强度的降低, 其取值为 1.35。表 5.4 为砂浆抗压强度试验结果, 测试的砂浆抗压强度为 35.1MPa, 已达到砂浆等级 M30 的抗压强度值。

表 5.4 砂浆的抗压强度试验结果

砂浆编号	受压面积 A/mm^2	破坏荷载 N_u/MPa	抗压强度 $f_{m,cu}/\text{MPa}$
CM-1	70.7×70.7	123.9	33.4
CM-2	70.7×70.7	130.9	35.3
CM-3	70.7×70.7	135.6	36.6
平均值	70.7×70.7	130.1	35.1

1.24 静载试验结果

5.1.5 荷载-位移曲线

钢筋混凝土框架静载试验施加的最大荷载仅为 12kN，此时框架截面均未开裂，框架结构处于线弹性阶段。钢筋混凝土空间框架第 4 层加载时侧移大，图 5.5 为第 4 层加载的钢筋混凝土空框架和填充墙框架的荷载-位移曲线比较，位移计 1~4 分别为空间框架 Y 平面中柱的 1~4 层的位移。

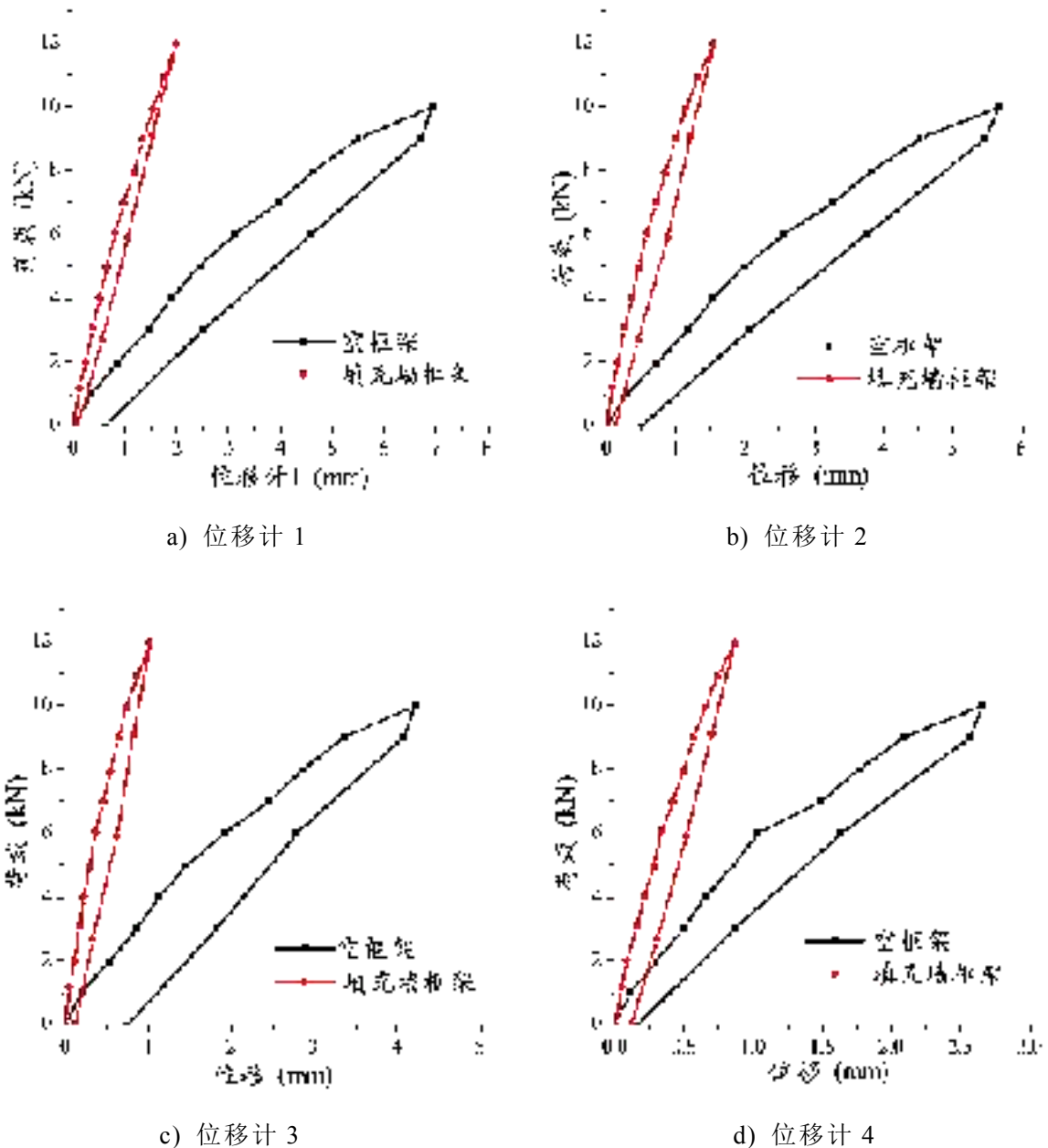


图 5.5 钢筋混凝土框架第 4 层加载的侧移

图 5.5 显示出同一荷载作用下填充墙框架的侧移比钢筋混凝土空框架明显减小，表明填充墙的附加刚度显著增大了钢筋混凝土空间框架的整体抗变形性能。若以顶点位移的峰值割线斜率作为弹性刚度粗略估算，填充墙使钢筋混凝土空间

框架 Y 轴侧向刚度增大将近 3.3 倍。

5.1.6 荷载-应变曲线

静力加载测试获得钢筋混凝土空框架和填充墙框架中柱沿高度变化的应变结果。图 5.6 为钢筋混凝土框架第 4 层加载获得的顶层 4 个应变数据，图中数据显示出框架柱内侧混凝土受拉，框架柱外侧混凝土受压，且拉应变与压应变大小相差不大；钢筋混凝土空间框架应变随高度方向变小，这与实际的应变分布相一致。研究结果表明填充墙限制了钢筋混凝土空间框架的侧向变形，其应变也比钢筋混凝土空框架小。

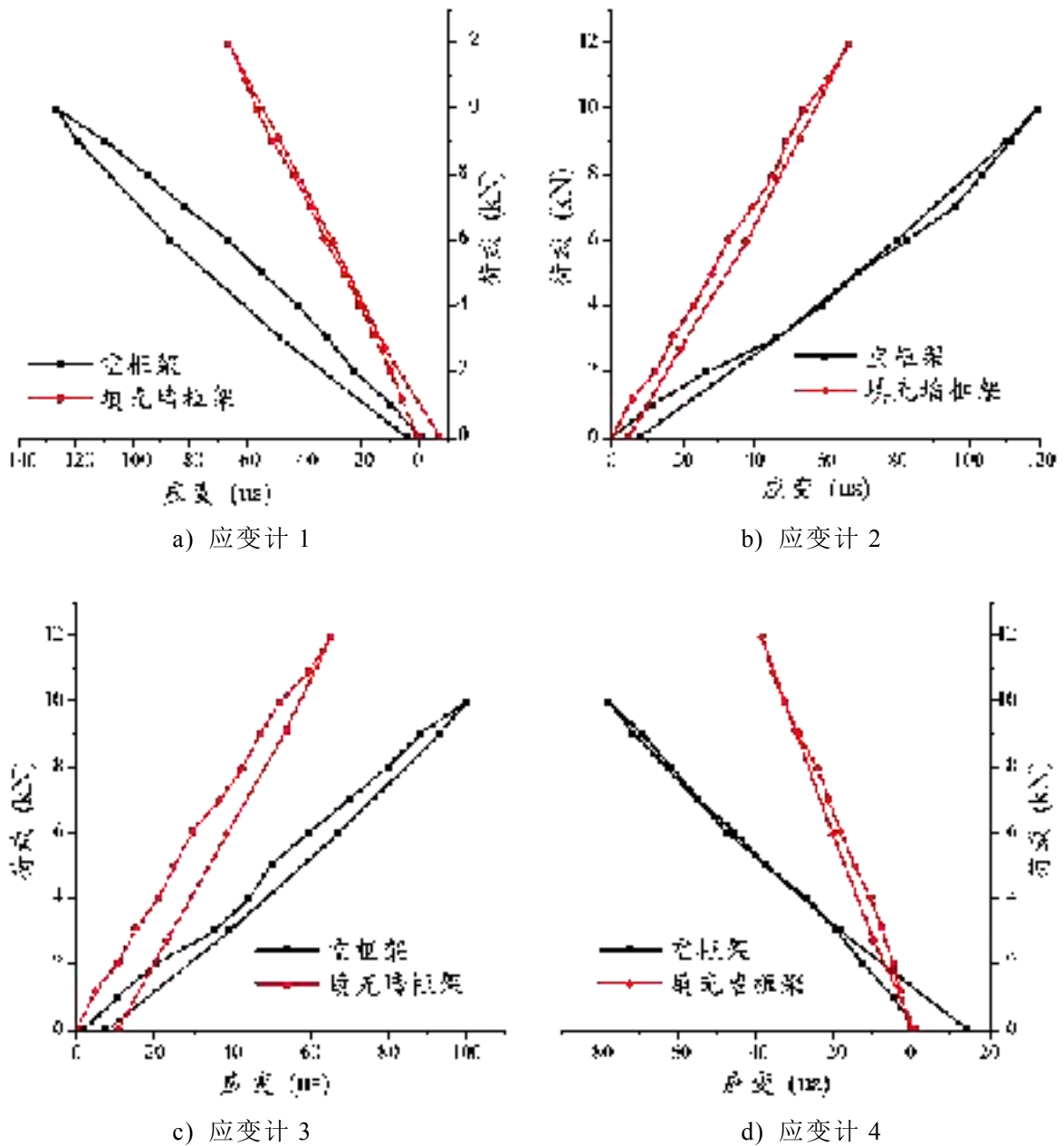


图 5.6 钢筋混凝土框架第 4 层加载的应变

1.25 模态试验结果

5.1.7 模态分析与参数识别

5.1.7.1 钢筋混凝土空框架

基于 MRIT 测试的加速度时程数据，采用 CMIF 方法进行模态参数识别。图 5.7 为钢筋混凝土空框架的前 4 阶模态，其中包括 X 平面和 Y 平面的 CMIF 提取模态极点及振型 MAC 值。由于测点偏心，钢筋混凝土空间框架的扭转模态也被激发出来。图中显示的 8 个模态极点分别为 4 阶平动模态和 4 阶扭转模态。对角线上振型 MAC 值超过 90%，极大表明了 8 个识别模态的正确性。

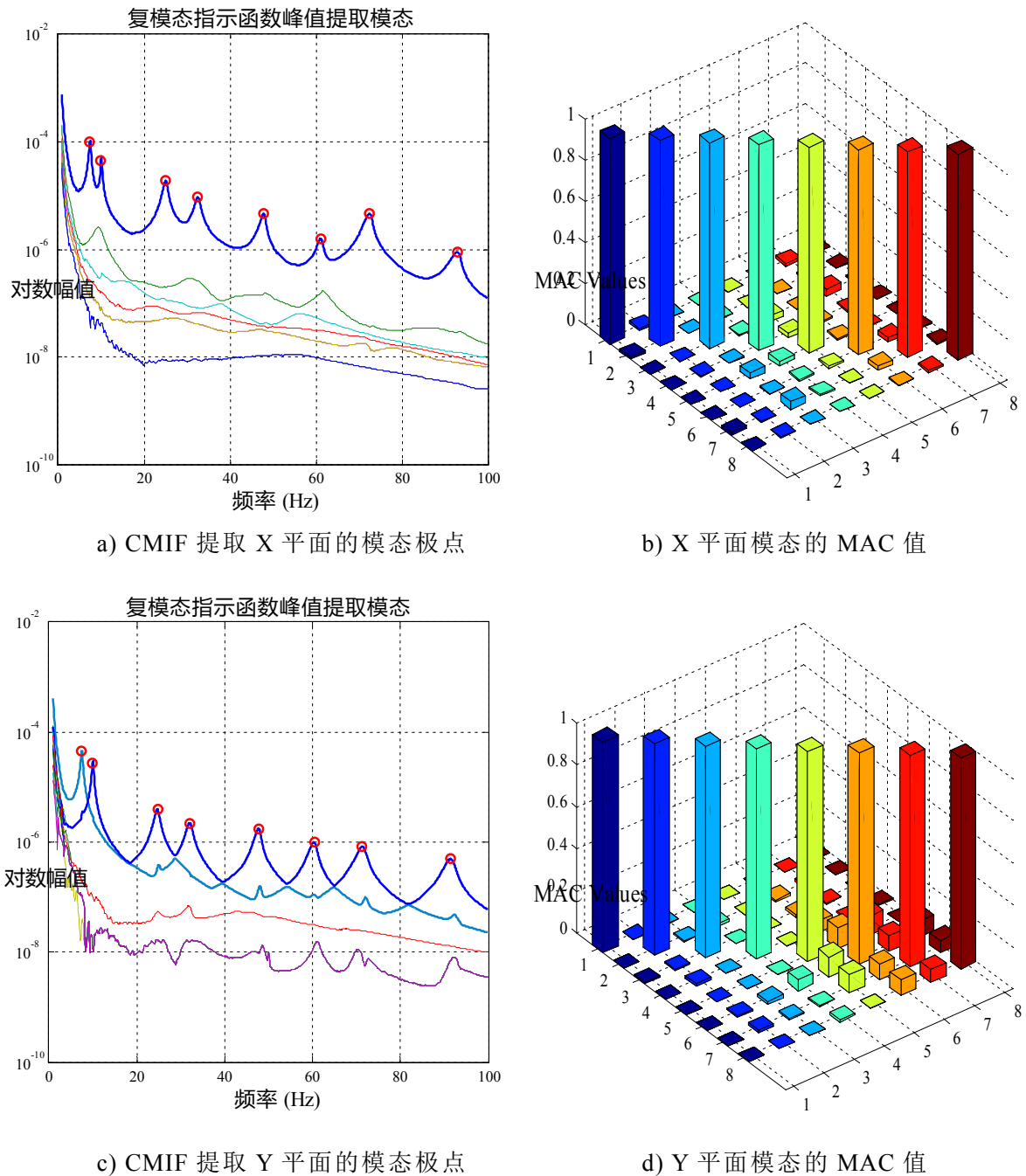


图 5.7 CMIF 方法提取钢筋混凝土空框架前 4 阶模态

5.1.7.2 钢筋混凝土粘土砖框架

图 5.8 为 CMIF 方法提取钢筋混凝土粘土砖框架的前 4 阶模态。与钢筋混凝土空框架一致的是，粘土砖框架 X 平面和 Y 平面也识别了 8 个清晰的模态极点，分别为 4 阶平动模态和 4 阶扭转模态。对角线上振型 MAC 值超过 90%，极大表明了 8 个识别模态的正确性。但是粘土砖框架受到附加质量的影响，其模态极点对应的自振频率比钢筋混凝土空框架要小，这与粘土砖对模态参数的影响是一致的。

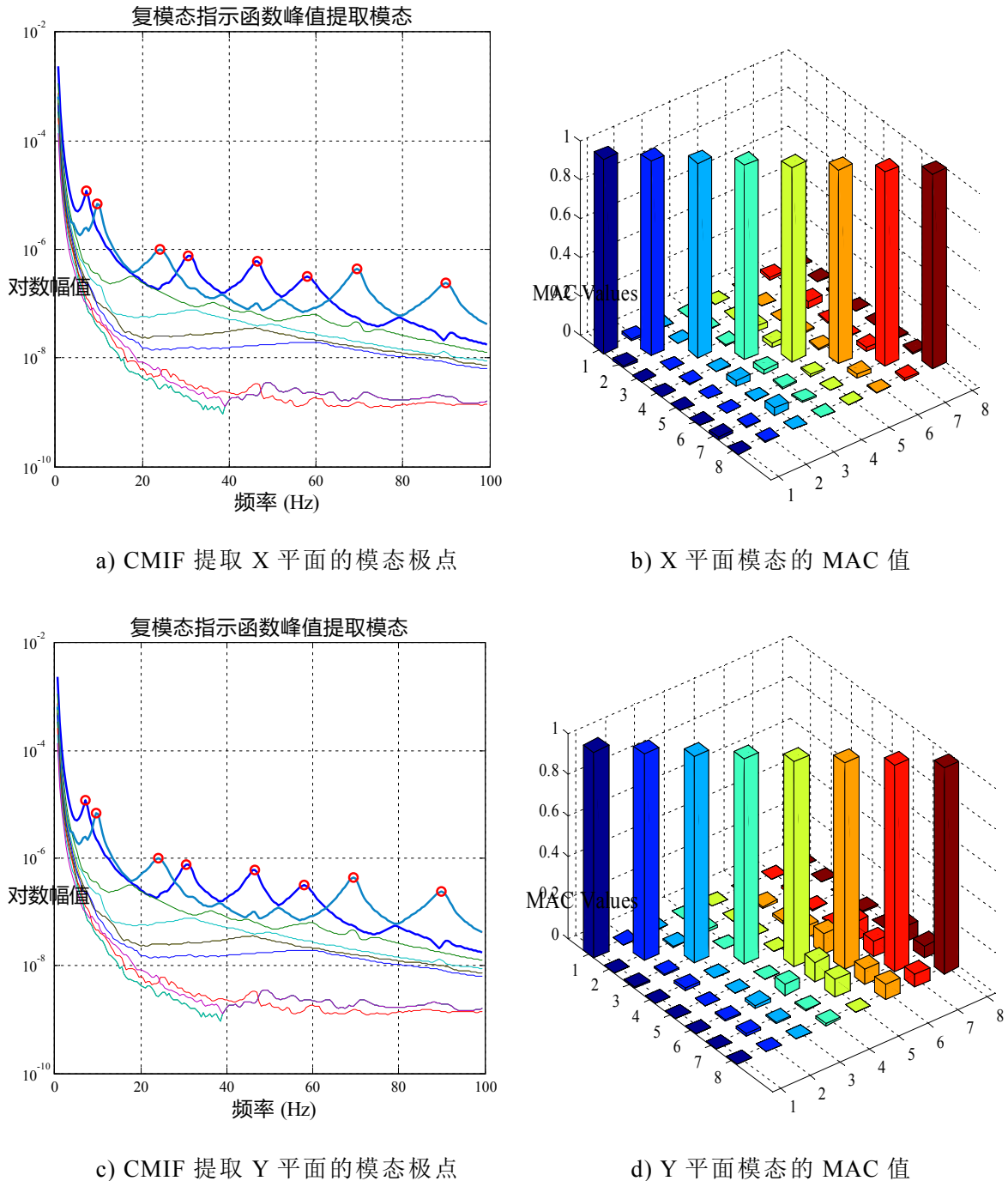


图 5.8 CMIF 方法提取粘土砖框架前 4 阶模态

5.1.7.3 钢筋混凝土填充墙框架

图 5.9 为利用 CMIF 方法提取钢筋混凝土填充墙框架的模态极点。从图中可以看到框架 X 平面和 Y 平面均只有 6 个模态极点。与钢筋混凝土空框架的模态极点比较发现，X 平面 4 阶平动模态均存在，消失的模态为 3、4 阶扭转；Y 平面为前 3 阶模态，4 阶 Y 平动和扭转模态均消失。这表明填充墙对 X 平动模态影响不太，但对 Y 平动和扭转模态影响显著，这与填充墙沿 Y 轴布设直接相关。填充墙使钢筋混凝土空间框架的 Y 平面刚度显著增大，可以近似认为 Y 平面框架由 4 个自由度变为 3 个自由度，实际上为平动与扭转相互耦合的模态。

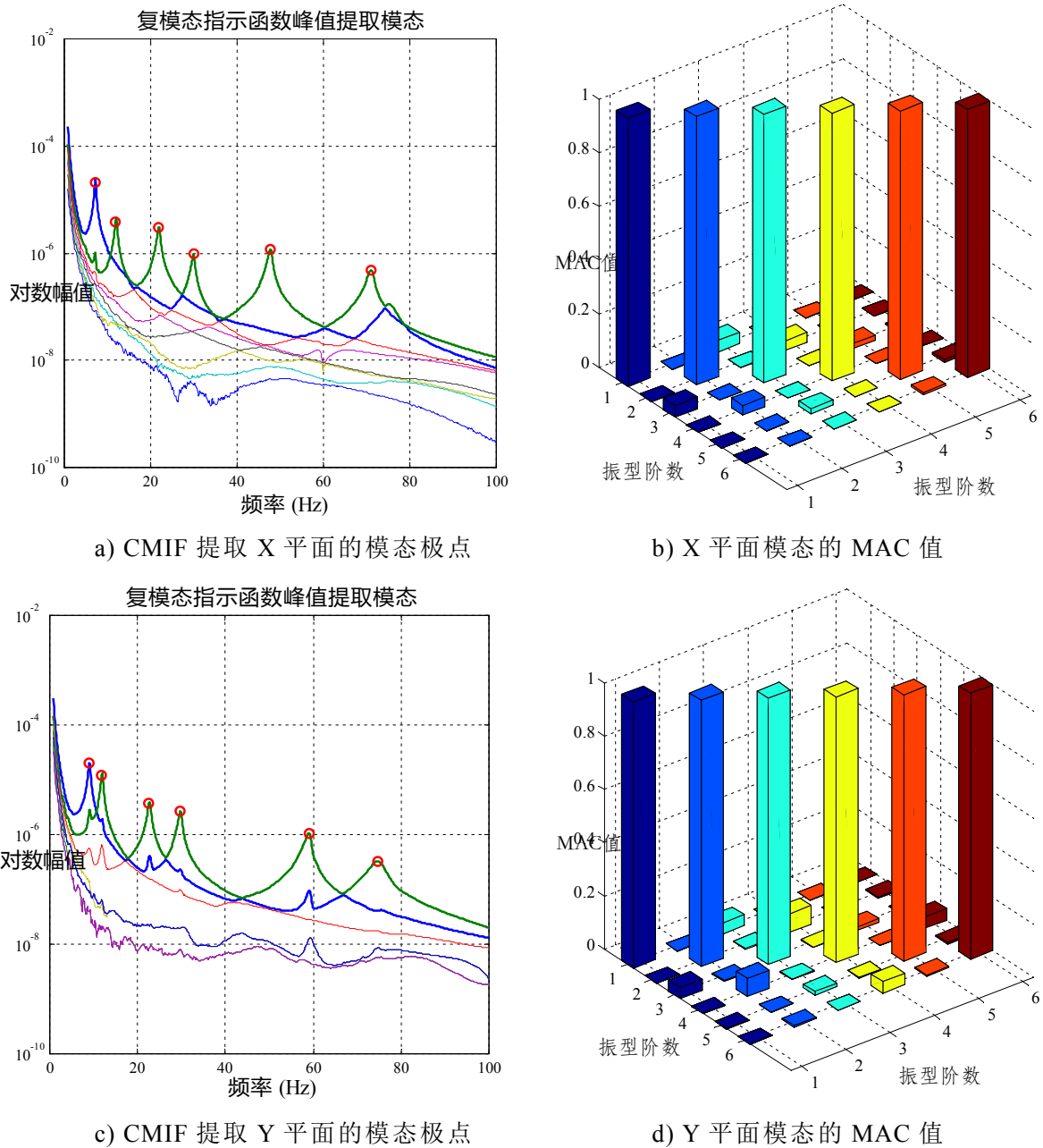


图 5.9 CMIF 方法提取填充墙框架的模态

5.1.8 频率和阻尼比

基于 CMIF 方法提取模态参数信息，获得 3 种钢筋混凝土空间框架模型 X 平面和 Y 平面的 8 个模态。这 8 个模态实际上是钢筋混凝土空间框架的前 4 阶模态，其中每 1 阶模态包括 X 平动、Y 平动和扭转三种形式，且 X 平面和 Y 平面的扭转模态其实为同一模态。表 5.5 为 CMIF 方法识别的钢筋混凝土框架 3 种模型的频率、变化率和阻尼比，其中扭转模态的频率为 X 平面和 Y 平面的平均值，粘土砖框架和填充墙框架的频率变化率均是相对于钢筋混凝土空框架。

表 5.5 钢筋混凝土框架模型的频率和阻尼比

模态参数	模型 1 (空框架)		模型 2 (粘土砖框架)			模型 3 (填充墙框架)			
	频率 (Hz)	阻尼比 (%)	频率 (Hz)	变化率 (%)	阻尼比 (%)	频率 (Hz)	变化率 (%)	阻尼比 (%)	
1 阶	X 平动	7.43	2.33	6.99	-5.92	5.59	7.19	-3.18	2.17
	Y 平动	7.41	2.70	7.07	-4.61	5.72	9.01	21.55	2.62
	扭转	10.00	1.94	9.72	-2.79	4.14	11.97	19.69	1.96
2 阶	X 平动	24.98	1.77	23.71	-5.08	4.52	21.86	-12.46	1.50
	Y 平动	24.62	2.40	24.09	-2.14	7.24	22.70	-7.92	1.74
	扭转	32.24	2.12	30.63	-4.98	5.41	29.76	-0.77	1.39
3 阶	X 平动	47.67	1.18	45.53	-4.48	3.32	47.58	-0.17	0.99
	Y 平动	47.64	1.56	45.98	-3.49	2.76	58.71	23.20	0.96
	扭转	60.52	1.15	59.99	-0.87	3.57	74.55	23.20	2.18
4 阶	X 平动	72.25	1.04	70.28	-2.72	2.69	70.92	-1.85	0.98
	Y 平动	71.06	1.17	69.29	-2.49	3.91	—	—	—
	扭转	92.09	1.08	89.93	-2.35	3.35	—	—	—

表 5.5 中数据显示：相对钢筋混凝土空框架而言，粘土砖框架的各阶模态频率均降低，阻尼比增大，这与粘土砖的附加质量对钢筋混凝土框架模态参数的影响相一致。附加质量使第 1 阶 X 平动频率降低幅度最大，达到 5.92%。填充墙附加刚度对模态参数的最显著影响是使框架第 4 阶 Y 平动和扭转模态均消失；如果不考虑填充墙和粘土砖的质量差别，填充墙附加刚度引起的频率变化为表 5.4 中工况 3 和工况 2 的变化率差值。相比 X 平动模态，附加刚度引起的 Y 平动或扭转模态的频率变化要大得多，其中 1 阶 X 平动频率提高 2.74%，1 阶 Y 平动频率提高 26.16%，3 阶扭转频率上升 22.48%。这与填充墙的砌筑位置有很大程度的关联，3 道填充墙沿跨度方法布置，明显增大空间框架 Y 平面刚度，对 X 平面刚度的影响相对较小。

5.1.9 模态振型

鉴于 MRIT 模态测试的测点布置和激励位置，空间框架的扭转模态也被激发出来，这可以从反映框架振动的各点相对幅值变化的模态振型图中得到验证。图 5.10~5.13 为钢筋混凝土空框架的前 4 阶模态振型，由于对框架 X 平面和 Y 平面分开进行模态试验，扭转模态分为 X 平面和 Y 平面两个振型。X 平面振型对应图 5.3d) 中 1#~10# 加速度传感器，Y 平面振型对应 11#~25# 加速度传感器。

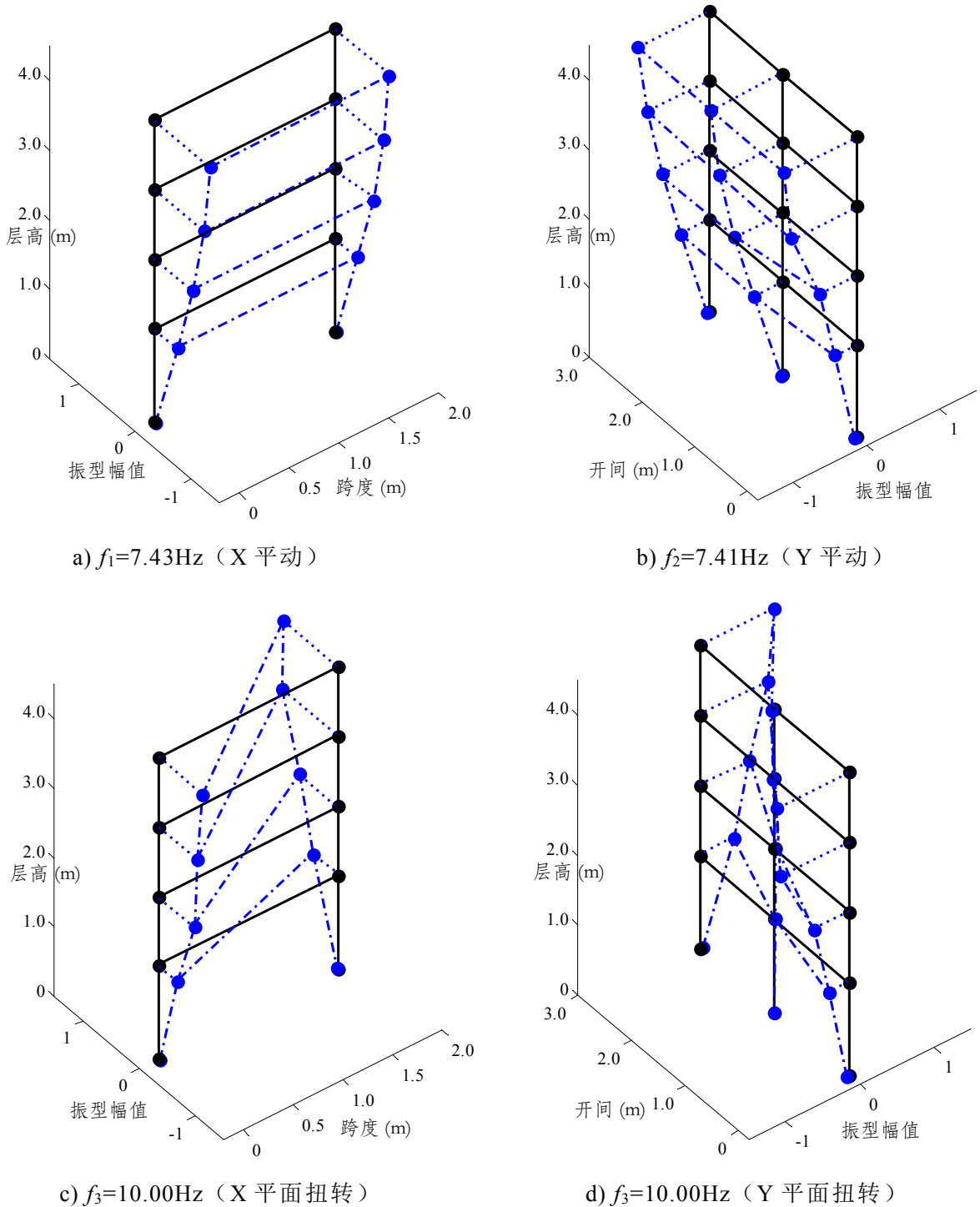


图 5.10 钢筋混凝土空框架的第 1 阶模态

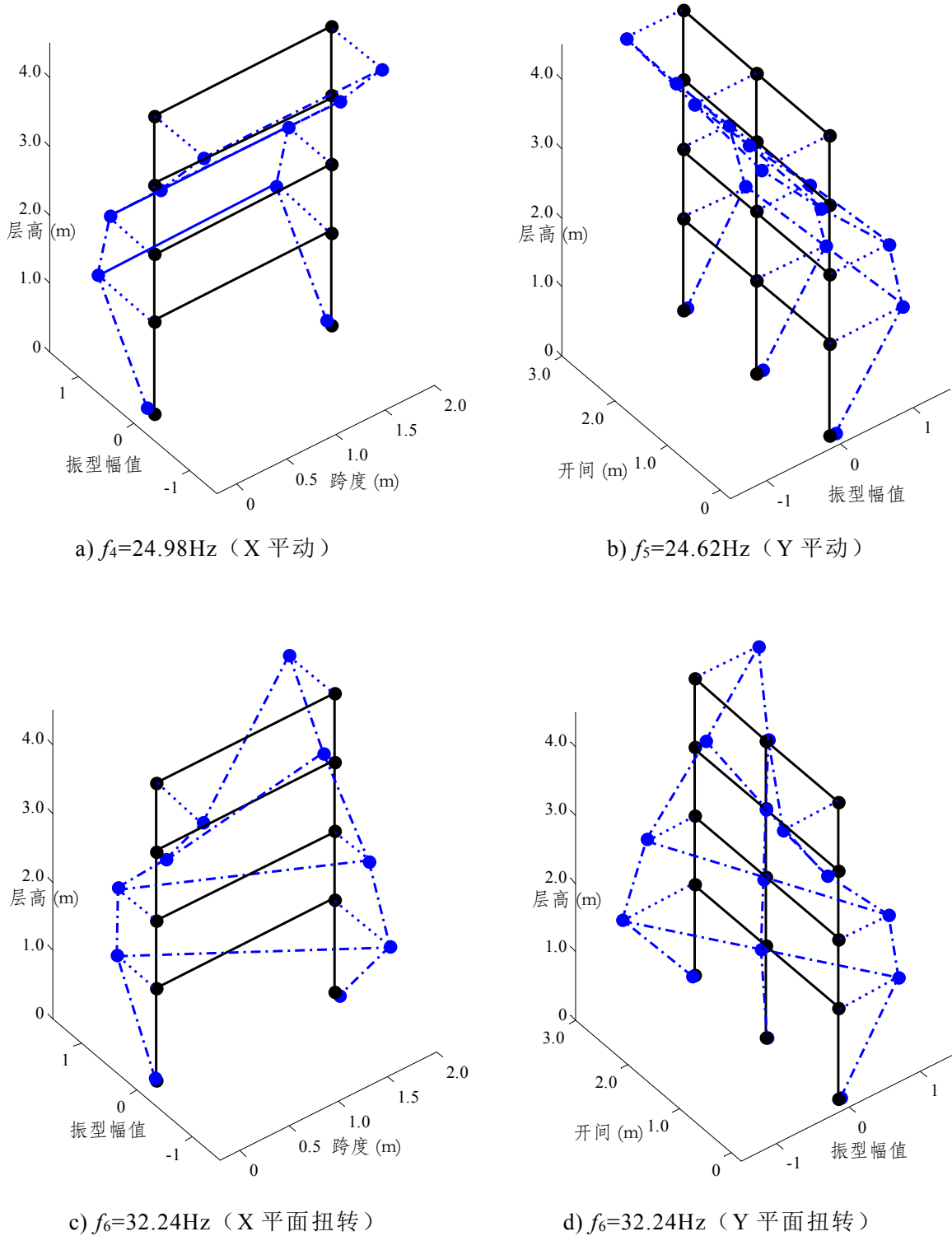


图 5.11 钢筋混凝土空框架的第 2 阶模态

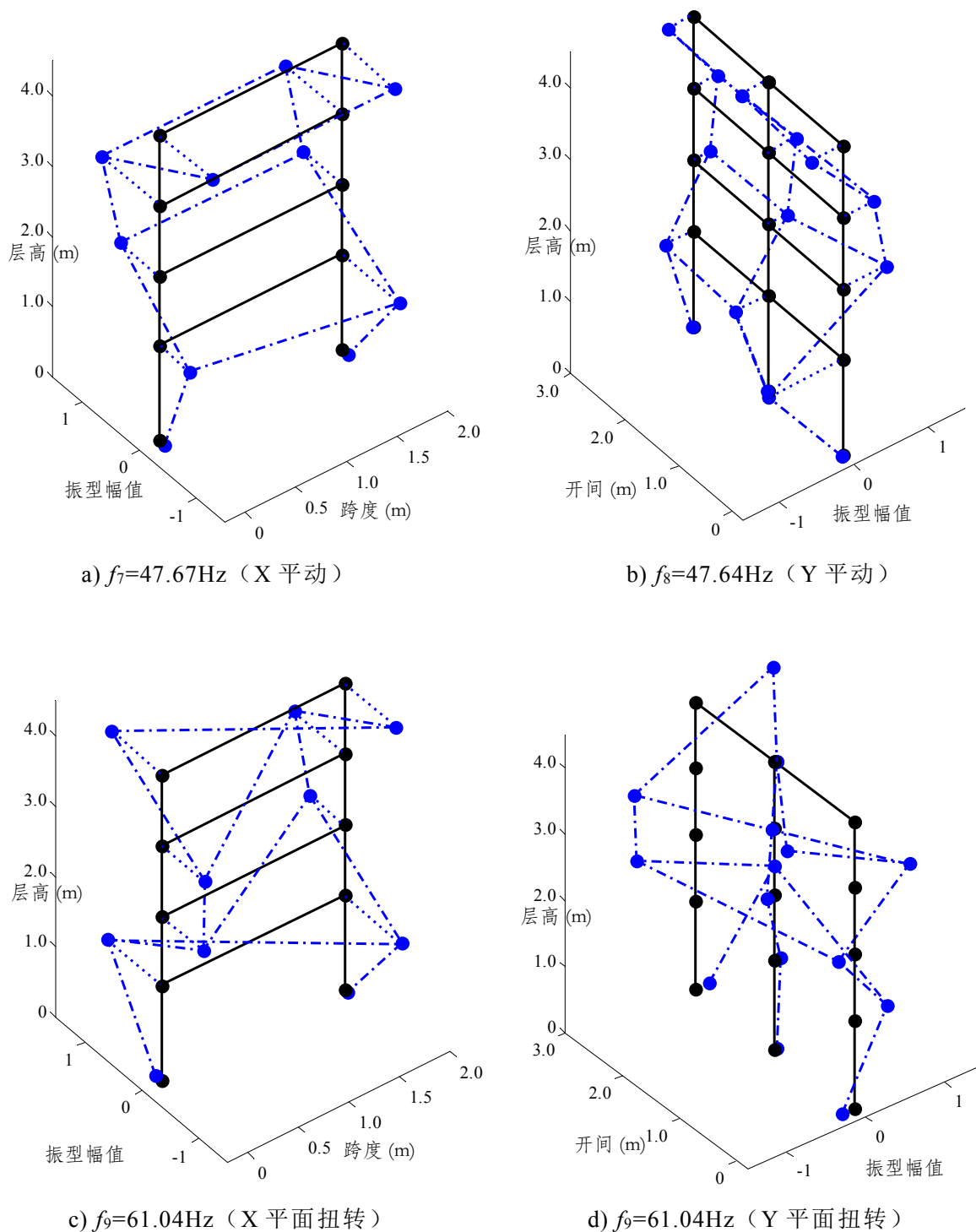


图 5.12 钢筋混凝土空框架的第 3 阶模态

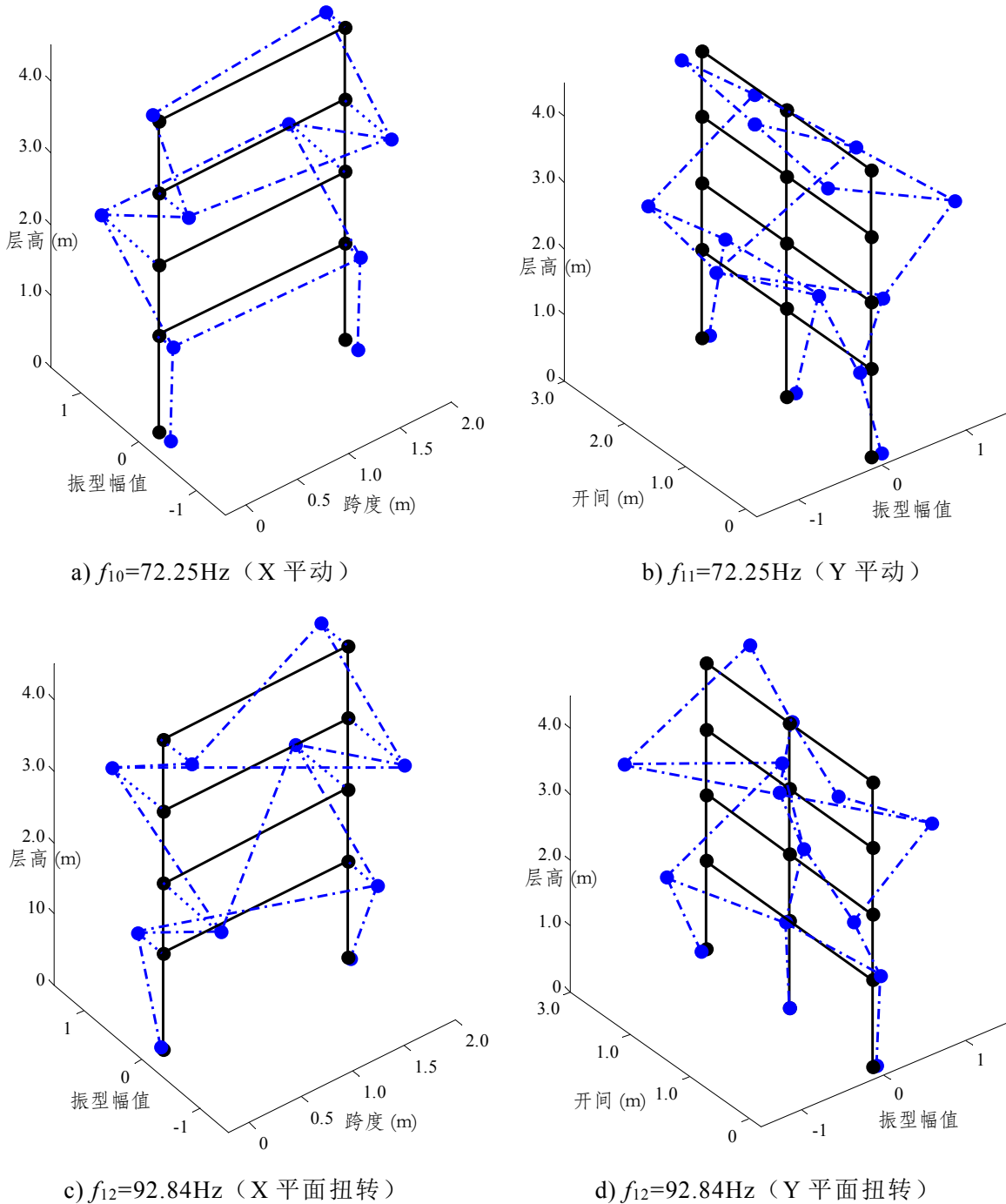


图 5.13 钢筋混凝土空框架的第 4 阶模态

图 5.10~5.13 所示的钢筋混凝土空框架模态振型与理论上的空间框架平动和扭转振型非常相符，这极大证实模态试验分析结果的正确性。粘土砖框架的前 4 阶模态振型与钢筋混凝土空框架差别不大，振型幅值相对钢筋混凝土空框架有微小的变化，表 5.6 为粘土砖框架与空框架的振型 MAC 值，所有振型 MAC 值都在 85% 以上，这表明粘土砖框架与空框架的模态振型是一致的。

由于受到填充墙侧向刚度的影响，钢筋混凝土填充墙框架的模态振型显示出很大的差异性。图 5.14 为填充墙框架第 2、3 阶 Y 平动振型，与钢筋混凝土空框架不同的是，填充墙框架同一楼层的各柱振型相对幅值差别较大，已不是单纯意

表 5.6 粘土砖框架与空框架的振型 MAC 值

模态	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
X 平动	1.00	1.00	1.00	0.97
Y 平动	0.99	0.98	0.88	0.87
X 平面扭转	0.98	0.96	0.95	0.97
Y 平面扭转	0.98	0.99	0.89	0.94

义上的平动振型，而是平动与扭转模式的耦合振型。表 5.7 为填充墙框架与钢筋混凝土空框架的振型 MAC 值，可以看出第 3 阶 Y 平动和扭转模式的 MAC 值都较小，表明填充墙框架的这两个模式振型与空框架振型发生了显著变化。

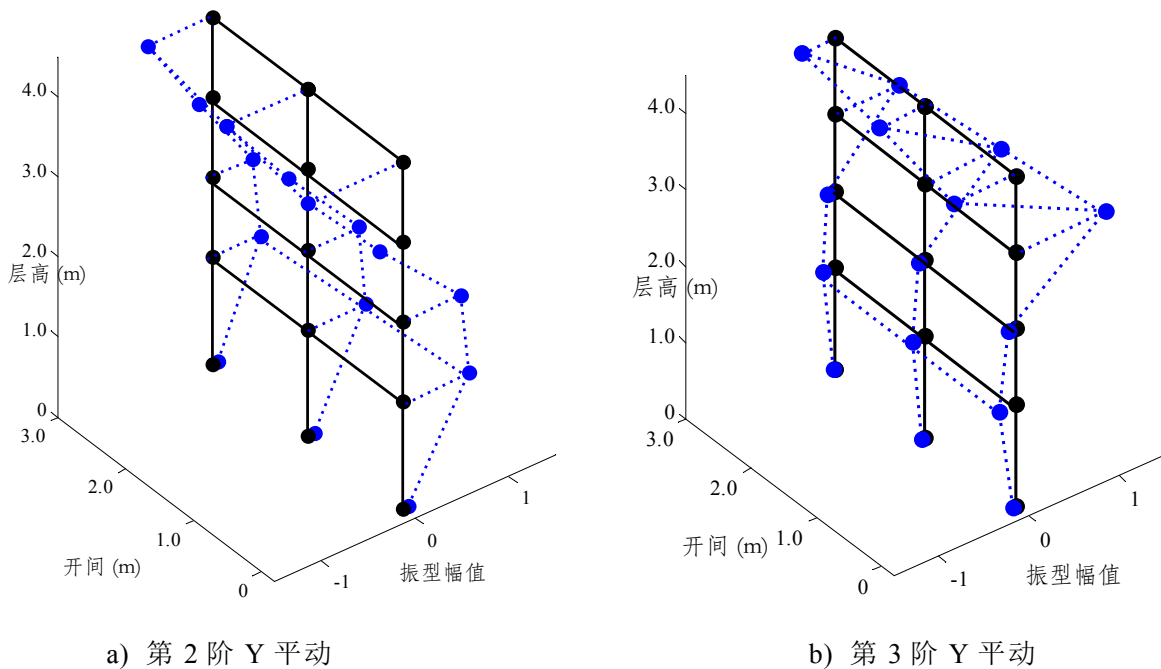


图 5.14 填充墙框架的模态振型

表 5.7 填充墙框架与空框架的振型 MAC 值

模态	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
X 平动	1.00	0.96	0.98	0.99
Y 平动	0.98	0.95	0.38	—
X 平面扭转	0.97	0.94	—	—
Y 平面扭转	0.97	0.92	0.69	—

1.26 静载位移和模态柔度位移

静载试验测定钢筋混凝土空间框架弹性范围内的侧移变形，而动力模态测试提取的模态柔度也能获得框架的位移。图 5.15a)~5.15d)分别为在钢筋混凝土空框

架 Y 平面中柱的第 1~4 层加载 10kN 获得的静载位移和模态柔度位移，图中反映出静载位移与模态柔度位移大体上吻合良好。表 5.8 为空框架的静载位移与模态柔度位移的误差，第 1 层位移相比其他 3 层位移要小，因而误差较大。

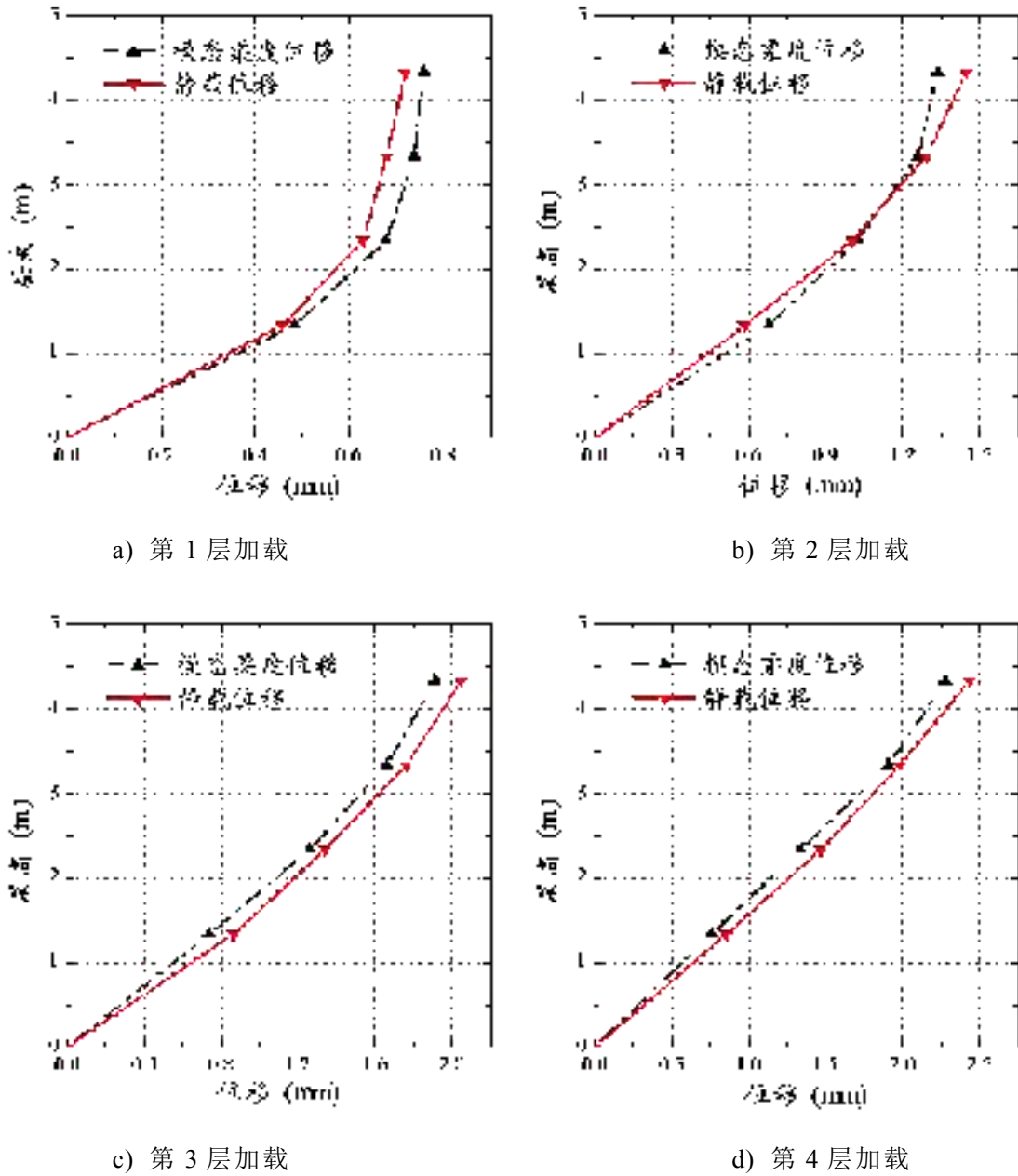


图 5.15 钢筋混凝土空框架的静载位移与模态柔度位移

表 5.8 空框架静载位移与模态柔度位移的误差

加载位置	第 1 层位移	第 2 层位移	第 3 层位移	第 4 层位移
第 1 层	5.48%	7.71%	8.60%	5.36%
第 2 层	15.79%	2.06%	2.54%	7.74%
第 3 层	14.82%	5.95%	5.72%	6.63%
第 4 层	11.48%	9.00%	3.57%	6.37%

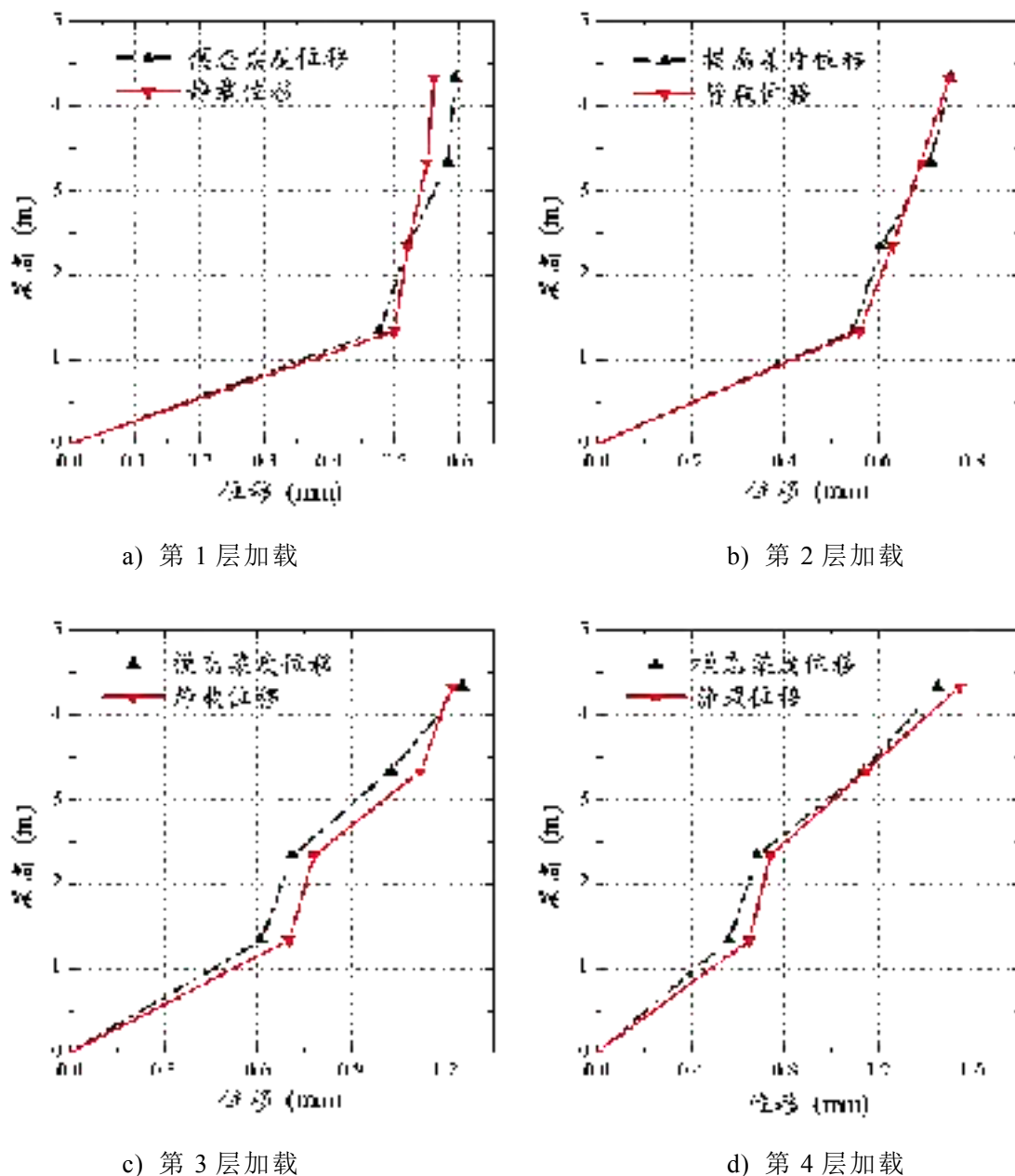


图 5.16 钢筋混凝土填充墙框架的静载位移和模态柔度位移

表 5.9 填充墙框架静载位移与模态柔度位移的误差

加载位置	第 1 层位移	第 2 层位移	第 3 层位移	第 4 层位移
第 1 层	4.71%	0.05%	5.77%	5.93%
第 2 层	2.46%	4.02%	3.11%	0.52%
第 3 层	12.74%	8.79%	8.38%	2.92%
第 4 层	13.21%	7.73%	0.69%	5.96%

图 5.16 为钢筋混凝土填充墙框架的静载位移和模态柔度位移比较。相比钢筋混凝土空框架而言，填充墙框架的侧移变形明显变小，这与填充墙增大框架 Y 平面刚度直接相关。表 5.9 中填充墙框架的静载位移与模态柔度位移误差较小，这进一步验证了线弹性范围内模态柔度与静力柔度的一致性。

1.27 本章小结

本章对一个地基上钢筋混凝土空间框架进行静动力试验研究，设计了一组空框架、粘土砖框架和填充墙框架的对比试验，以此来研究填充墙的附加质量和附加刚度对钢筋混凝土框架模态参数的影响。对一个4层钢筋混凝土空框架进行多参考点脉冲锤击试验，获得了钢筋混凝土空框架的前4阶X平动、Y平动和扭转模态；粘土砖框架被用来近似模拟填充墙的附加质量，模态分析结果显示粘土砖质量引起空间框架各阶自振频率一定幅度的降低，其中最典型的第1阶X平动、Y平动和扭转模态的频率下降了5.92%、4.61%和2.79%；填充墙对钢筋混凝土框架模态参数的影响非常大，第1阶X平动的模态频率提高了2.74%，第1阶Y平动和扭转模态的频率提高20%以上，最关键的是第2、3阶Y平动与扭转相互耦合和第4阶Y平动模态的缺失，而X平动模态却没有发生显著变化，这与填充墙沿Y方向布置直接相关。最后比较了钢筋混凝土空框架和填充墙框架线弹性范围内的静载位移和模态柔度位移，相对误差在可接受范围以内。

结论与展望

本文从理论和试验两方面进行钢筋混凝土结构损伤识别研究。理论上拓展模态柔度概念和基于频响函数截距的模态柔度算法，提出 5 步骤的多模型结构识别方法，并进行钢筋混凝土简支梁、连续梁和地基上空间框架模型的静动力试验。得到的结论归纳如下：

(1) 转角模态柔度的精度比位移模态柔度要低，这是由于转角振型比位移振型的质量参与系数小，表明合成转角模态柔度需要更高阶的模态振型。随着参与合成的振型阶数增加，转角模态柔度与其静力柔度的误差越来越小。相比而言，基于转角导纳频响函数截距提取的转角模态柔度精度最高。

(2) 钢筋混凝土简支梁参考状态和损伤工况的模态分析结果表明，自振频率随着损伤程度的加深逐渐降低，阻尼比增加，且应变振型比位移振型更能敏感地识别损伤位置，模态柔度能够综合全面地反映钢筋混凝土简支梁结构的损伤位置和损伤程度。钢筋混凝土简支梁前三个分析工况的模态柔度位移和静载位移的误差在 6% 以内，后三个损伤工况的静动力变形的误差超过 30%，这是混凝土非线性导致两者处于不同的受力状态。

(3) 边界条件对钢筋混凝土简支梁的模态参数影响大，三种不同边界条件的对比研究表明弹簧-阻尼边界的简支梁模型与实测结果吻合良好，并作为钢筋混凝土简支梁参考状态的基准模型。定义与弯矩成比例的节点损伤函数，并基于 Strand7 API-Matlab 交互访问修正不同损伤工况简支梁的物理参数，获得简支梁刚度梯形退化曲线，结果表明开裂时刚度下降 12%，最大损伤工况的刚度下降为 52%。

(4) 由于结构识别中同时存在测量误差和模型误差，传统单模型修正没有体现出结构识别的可靠性，本文进行了 5 步骤的多模型结构识别研究。以钢筋混凝土连续梁的静动力测试结果为依据，选取混凝土的弹性模量和密度、中间支座刚度及端部支座刚度 4 个模型碎片建立连续梁有限元模型，并进行模型碎片的灵敏度分析，基于 Matlab 和 Strand7 交互访问生成 10000 个模型，基于静力数据研究最大熵原理的传感器最优布设，给出了连续梁的 13 个测点位移最优排序，最后分别运用静力数据和模态数据进行基于误差阈值的多模型甄选研究，结果表明基于模态数据的结构模型筛选更为准确，候选模型能够进一步用来预测结构的未来性能。

(5) 填充墙对钢筋混凝土空间框架模态参数的影响显著。设计一组空框架、粘土砖框架和填充墙框架的对比试验，以此来研究填充墙的附加质量和附加刚度对钢筋混凝土框架模态参数的影响。粘土砖质量引起空间框架一阶 X 平动、Y 平动和扭转模态的频率下降率为 5.92%、4.61% 和 2.79%；填充墙的附加刚度使钢筋混

凝土框架第 1 阶 X 平动的模态频率提高了 2.74%，第 1 阶 Y 平动和扭转模态的频率上升率超过 20%，最关键的是第 2、3 阶 Y 平动与扭转相互耦合和第 4 阶 Y 平动模态的缺失，而 X 平动模态和前 2 个钢筋混凝土框架工况一致，这与填充墙的布置位置直接相关。

本文侧重钢筋混凝土结构构件的试验研究，鉴于本人时间精力和学术能力有限，难免存在一些不足之处，研究方法和理论分析尚需进一步深入，未来的研究方向应从如下方面着手：

(1) 模态柔度研究仅限于理论分析与仿真验证，未进行相关的试验研究是一个不足之处，真实试验研究将极大验证建议方法的可行性。力-位移模态柔度的精度已满足工程实际要求，未来方向应侧重转角模态柔度的试验研究。对于测量结构的转角响应，要准确了解传感器的频响范围并设计合理的试验构件，以获得较高信噪比的响应信号。模态试验中如何施加力矩激励及拾取转角响应将是研究的关键与难点。

(2) 由于钢筋混凝土简支梁结构的整体结构刚度大，模态测试获得的动位移响应信噪比小，试验模态分析获得的频率响应函数的清晰频带宽度较窄，故仅识别前 2 阶模态参数，且位移计安装正确与否直接限制了试验数据的准确性。对模态柔度位移和静力位移的误差分析还有待进一步深入研究。

(3) 本文仅对钢筋混凝土连续梁进行多模型结构识别的初步研究，多模型方法的理论体系和建模方法还不是很完善，多模型甄选策略有待进一步深入。连续梁的两侧支座处位移数据的误差相对较大，故基于静力位移的多模型筛选不是太理想。模态参数比位移数据的识别精度要高，但众多模型的模态匹配是多模型甄选的难点。

(4) 地基和填充墙等不确定性因素对钢筋混凝土框架模态参数影响大，地基和填充墙对框架模态参数的影响应该在有限元模型中以何种方式进行考虑。本文未进行钢筋混凝土空间框架的有限元建模研究，未来的研究方向应侧重空间框架的模型修正。

参考文献

- [1] 杨顺武,伍冠玲.我国房屋安全管理的现状与对策.建筑安全,2007,11:20-22
- [2] 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),2010,43:495-498
- [3] 王柏生,倪清,高赞明.青马大桥桥板结构损伤位置识别的数值模拟.土木工程学报,2001,34(3):67-73
- [4] 顾明,黄鹏,周暄毅等.广州新电视塔模型测力风洞试验及风致响应研究 I :风洞试验土木工程学报,2009,42(7):8-13
- [5] 周暄毅,顾明,朱乐东等.广州新电视塔模型测力风洞试验及风致响应研究 II :风洞试验土木工程学报,2009,42(7):14-20
- [6] 过镇海,时旭东.钢筋混凝土原理和分析.北京:清华大学出版社,2003,1-270
- [7] Hart G.C. and Yao J.T.P.System identification in structural dynamics.Journal of the Engineering Mechanics Division,1977,103(6):1089-1104
- [8] Liu S.C. and Yao J.T.P.Structural identification concept.Journal of Structural Division,1978,104(10):1845-1858
- [9] 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
- [10] Montalvao D. Maia N.M.M. and Riberio A.M.R.A review of vibration-based structural health monitoring with special emphasis on composite materials.The Shock and Vibration Digest,2006,38(4):295-324
- [11] Rytter A.Vibration based inspection of civil engineering structures:[Dissertation]. Denmark:Aalborg University,1993
- [12] Doebling S.W., Farrar C.R., Prime M.B. et al.Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics:A literature review.Los Alamos National Laboratory,LA-13070-MS, www.lanl.com,1996,1-121
- [13] Sohn H., Farrar C.R., Hemez F.M. et al.A review of structural health monitoring literature: 1996-2001. Los Alamos National Laboratory, LA-13976-MS, www.lanl.com,2001,1-290
- [14] Aktan A.E., Farhey D.N., Helmicki A.J. et al.Structural identification for condition assessment: Experimental arts. Journal of Structural Engineering,1997,

123(2):1674-1684

- [15] Catbas F.N., Kijewski-Correa T. and Aktan A.E. Structural identification (St-Id) of constructed facilities: Approaches, methods and technologies for effective practice of St-Id. A State-of-the-Art Report by ASCE SEI Committee on Structural Identification of Constructed Systems, 2011
- [16] Dubbs N.C. Development, validation, and Assessment of a multiple model structural identification method: [dissertation]. Philadelphia: Drexel University, 2012, 1-300
- [17] Kenley R.M. and Dodds C.J. West sole WE platform: Detection of damage by structural response measurements. 12th Annual Offshore Technology Conference, 1980, 111-118
- [18] 李德葆, 郑兆昌, 何可. 海洋平台结构损伤检测的传递函数法, 第四届全国振动理论及应用学术大会论文集(下), 1990, 166-176
- [19] 袁向荣. 梁的破损对频率振型及振型曲率的影响. 振动测试与诊断, 1994, 14(2): 40-45
- [20] 郭国会, 易伟建. 基于神经网络的结构边界条件识别和损伤诊断. 湖南大学学报, 1998, 25(1): 71-76
- [21] Hou Z., Noori M. and Amand R. St. Wavelet-based approach for structural damage detection. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(7): 677-683
- [22] 易伟建, 刘霞. 基于遗传算法的结构损伤诊断研究. 工程力学, 2001, 18(2): 64-71
- [23] Yang J.N., Lei Y., Lin S. et al. Hilbert-Huang based approach for structural damage detection. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(1): 85-95
- [24] Ren W.X. and De Roeck. Structural damage identification using modal data. I : Simulation verification. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(1): 87-95
- [25] Xia P.Q. and Brownjohn J.M.W. Bridge structural condition assessment using systematically validated finite-element model. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(5): 418-423
- [26] Zanardo G., Hao H., Xia Y. et al. Stiffness assessment through modal analysis of an RC slab bridge before and after strengthening. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11(5): 590-601
- [27] Unger J.F., Teughels A. and Roeck G.D. System identification and damage detection of a prestressed concrete beam. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(11): 1691-1698
- [28] Esfandiari A., Bakhtiari-Nejad F., Sanayei M. et al. Structural finite element model updating using transfer function. Computers and Structures, 2010, 88: 54-64

- [29] Raphael B. and Smith I. Finding the right model for bridge diagnosis. *Artificial Intelligence in Structural Engineering in Computer Science*, Springer, Heidelberg, 1998, 308-319
- [30] Raphael B. and Smith I. F. C. A direct stochastic algorithm for global search. *Applied Mathematics and Computation*, 2003, 146: 729-758
- [31] Saitta S., Raphael B. and Smith I. F. C. Data mining techniques for improving the reliability of system identification. *Advanced Engineering Informatics*, 2005, 19: 289-298
- [32] Robert-Nicoud Y., Raphael B. and Smith I. F. C. Configuration of measurement systems using Shannon's entropy function. *Computers and Structures*, 2005, 83: 599-612
- [33] Robert-Nicoud Y., Raphael B. and Smith I. F. C. System identification through model composition and stochastic search. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2005, 19(3): 239-247
- [34] Saitta S. Raphael B. and Smith I. F. C. Combining two data mining methods for system identification. *Intelligent Computing in Engineering and Architecture*, Springer-Verlag, Berlin, 2006: 606-614
- [35] Smith I. F. C. and Saitta S. Improving knowledge of structural system behavior through multiple models. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(4): 553-561
- [36] Saitta S., Kripakaran P., Raphael B. et al. Improving system identification using clustering. *Journal of Computer Civil Engineering*, 2008, 22(5): 292-302
- [37] Goulet J. A., Kripakaran P. and Smith I. F. C. Multimodel structural performance monitoring. *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136(10): 1309-1318
- [38] Saitta S., Kripakaran P., Raphael B. et al. Feature selection using stochastic search: An application of system identification. *Journal of Computing Civil Engineering*, 2010, 24(1): 3-10
- [39] 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: 2137-2159
- [40] 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
- [41] Catbas N., Gokce H. B. and 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

- [42] Liang R.Y., Hu J. and Choy F. Theoretical study of crack-induced eigenfrequency changes on beam structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 1992, 118(2):384-396
- [43] Chowdhury M.R. and Ramirez M. A comparison of the modal responses for defective versus nondefective concrete test beams. *The 10th International Modal Analysis Conference*, 1992, 508-515
- [44] Slastan J., and Pietrzko S. Changes of RC beam modal parameters due to cracks. *The 11th International Modal Analysis Conference*, 1993, 70-76
- [45] Casas J.R. and Aparicio A.C. Structural damage identification from dynamic-test data. *Journal of Structural Engineering*, 1994, 120(8):2437-2450
- [46] kisa M., Bradon J. and Topcu M. Free vibration analysis of cracked beams by a combination of finite elements and component mode synthesis methods. *Computers and Structures*, 1990, 67:215-223
- [47] Maeck J., Wahab M.A., Peeters B. et al. Damage identification in reinforced concrete structures by dynamic stiffness determination. *Engineering Structures*, 2000, 22:1339-1349
- [48] Ren W.X. and De Roeck. Structural damage identification using modal data. II : Test verification. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(1):96-104
- [49] 易伟建,周云,曹冰. 无粘结预应力钢筋混凝土梁的静动力实验研究及刚度识别. *振动与冲击*, 2008, 27(1):71-75
- [50] Ren W.X. and Chen H.B. Finite element updating in structural dynamics by using the response surface method. *Engineering structures*, 2010, 32:2455-2465
- [51] Goldfeld Y. and Klar A. Damage identification in reinforced concrete beams using spatially distributed strain measurements. *Journal of structural Engineering*, 2013, 139:1-11
- [52] Alampalli S., Fu G. and Dillon E.W. Signal versus noise in damage detection by experimental modal analysis. *Journal of Structural Engineering*, 1997, 123(2):237-245
- [53] 郭国会,易伟建. 基于模态参数进行连续梁损伤诊断的数值研究. *振动与冲击*, 2001, 20(1):72-75
- [54] Brownjohn J.M.W., Moyo P., Omenzetter P. et al. Assessment of highway upgrading by dynamic testing and finite-element model updating. *Journal of Bridge Engineering*, 2003, 8(3):162-172
- [55] 宗周红,赖苍林,林友勤等. 大跨度预应力混凝土连续梁钢构桥的动力特性分析, *地震工程与工程振动*, 2004, 24(3):98-104

- [56] Unger J.F., Teughels A. and Roeck G.D. Damage detection of a prestressed concrete beam using modal strains. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(9):1456-1463
- [57] 阳洋,周锡元,金国芳等.连续梁结构损伤识别的改进直接刚度方法. *工程力学*, 2010,27(7):82-91
- [58] Xu Z.D., Liu M., Wu Z.S. et al. Energy Damage detection strategy based on strain responses for long-span bridge structures. *Journal of Bridge Engineering*, 2011, 16(5):664-652
- [59] Zhou Y., Prader J., Weidner J. et al. Structural identification of a deteriorated reinforced concrete bridge. *Journal of Bridge Engineering*, 2012, 17(5):774-787
- [60] Yao G.C., Chang K.C. and Lee G.C. Damage diagnosis of steel frames using vibrational signature analysis. *Journal of Engineering Mechanics*, 1992, 118(9):1949-1961
- [61] Friswell M.I., Penny J.E.T. and Wilson D.A.L. Using vibration data and statistical measures to locate damage in structures. *Modal Analysis: The International Journal of Analytic and Experimental Modal Analysis*, 1994, 9(4):239-254
- [62] 周先雁,沈蒲生.用应变模态对混凝土结构进行损伤识别的研究. *湖南大学学报*, 1997,24(5):69-74
- [63] 周先雁,沈蒲生,程翔云.用振动参数识别技术对混凝土框架进行破损评估. *土木工程学报*, 1998,31(2):39-45
- [64] Han T. and Billington S.L. Seismic analysis of reinforced concrete frame buildings using interface modeling. *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130(8):1157-1168
- [65] 周云,易伟建.考虑土-结构动力相互作用的框架结构的参数识别研究. *土木工程学报*, 2007,40(6):14-19
- [66] Yi W.J., Zhou Y., Kunnath S. et al. Identification of localized frame parameters using higher natural modes. *Engineering Structures*, 2008,30:3082-3094
- [67] 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
- [68] Moaveni B., Stavridis A., Lombaert G. et al. Finite-element model updating for assessment of progressive damage in a 3-story infilled RC frame. *Journal of Structural Engineering*, 2013,139(10):1665-1674
- [69] Clough R.W. and Penzien J. *Dynamics of Structures*. 1st Edition. McGraw-Hill Companies, 1975
- [70] Raghavendrachar M. and Aktan A.E. Flexibility by multireference impact testing

- for bridge diagnostics. *Journal of Structural Engineering*, 1992, 118(8): 2186-2203
- [71] Pandey A.K. and Biswas M. Damage detection in structures using changes in flexibility. *Journal of Sound and Vibration*, 1994, 169(1): 3-17
- [72] Doebling W.S., Farrar R.C. and Prime B.M. A summary review of vibration-based damage identification methods. *The Shock and Vibration Digest*, 1998, 30(2): 91-105
- [73] Zhao J. and Dewolf T.J. Sensitivity study for vibration parameters used in damage detection. *Journal of Structural Engineering*, 1999, 125(4): 410-416
- [74] 孙国, 顾元宪. 连续梁结构损伤识别的改进柔度矩阵方法. *工程力学*, 2003, 20(4): 50-54
- [75] Catbas F.N., Brown D.L. and Aktan A.E. Use of modal flexibility for damage detection and condition assessment: Case studies and demonstrations on large structures. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(11): 1699-1712
- [76] 李永梅, 周锡元, 高向宇. 基于柔度差曲率矩阵的结构损伤识别方法. *工程力学*, 2009, 26(2): 188-195
- [77] Allemang R.J. and Brown D.L. A unified matrix polynomial approach to modal identification. *Journal of Sound and Vibration*, 1998, 211(3): 301-322
- [78] Han S.M., Benaroya H. and Wei T. Dynamics of transversely vibration beams using four engineering theories. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 225(5): 935-988
- [79] 李德葆, 陆秋海. 实验模态分析及其应用. 北京: 科学出版社, 2001, 1-238
- [80] Catbas F.N., Brown D.L. and Aktan A.E. Parameter estimation for multiple-input multiple-output modal analysis of large structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(8): 921-930
- [81] Ewins D.J. *Modal testing: theory, practice and application*, England: Research Studied Press, 2000, 260-264
- [82] Allbright K., Parekh K., Miller R. et al. Modal verification of a destructive test of a damaged prestressed concrete beam. *Experimental Mechanics*, 1994, 34(4): 389-396
- [83] Strand7-Finite Element Analysis Software. <http://www.strand7.com>
- [84] Friswell M.I. and Mottershead J.E. *Finite element model updating in structural dynamics*. Kluwer, New York, 1995
- [85] 易伟建, 刘霞. 混凝土梁板构件边界条件识别与研究. *湖南大学学报*, 2000, 27(4): 81-87
- [86] Yi Wei-jian and Zhou Yun. Discussion of "System identification and damage detection of a prestressed concrete beam". *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134: 1679-1680
- [87] Kleer J.D., Williams B.C. *Diagnosing multiple faults*. Philadelphia. Artificial

Intelligence,1987

- [88] Weidner J.S. Structural identification of a complex structure using both conventional and multiple model approaches:[dissertation]. Philadelphia: Drexel University, 2012, 205-393
- [89] 唐兴荣, 刘利花, 周铁轶等. 带竖缝砌体填充墙钢筋混凝土框架结构抗震性能试验研究. 建筑结构学报, 2012, 33(10): 84-93
- [90] 刘玉妹, 李国强. 带填充墙钢框架结构抗侧力性能试验及理论研究. 建筑结构学报, 2005, 26(3): 78-84
- [91] 黄群贤, 郭子雄, 朱雁茹等. 混凝土空心砌块填充墙RC框架抗震性能试验研究. 建筑结构学报, 2012, 33(2): 110-118
- [92] 周云. 地基板和钢筋混凝土框架结构参数的实验与研究:[湖南大学博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2008, 66-84

致 谢

从第一次踏入湖大校园至今，转眼间三年的研究生学习生涯已临近结束，过往学习与生活的场景仍历历在目。宁静优美的校舍过道，历史悠久的岳麓书院以及独具风格的历史建筑，湖大的每一处景致都让我不由自主地驻足欣赏。湖大见证我的成长与成熟，这里记载我美好的青春时光。在即将离别的时刻，心中不免产生些许的不舍与留恋，但更多的是感激与祝福。

首先我要表达对易伟建教授的由衷谢意，感谢他在生活中的默默关心和学习上的谆谆教导。易伟建导师全局上把握和指导本人的研究进展，并制定逐步的试验方案，逐步加深我对结构损伤识别的理解，并多次与我讨论相关的研究内容。易老师严谨务实的学术精神，温文尔雅的气度和宽广开阔的眼界，让我受益终生。

其次我要感谢周云老师的悉心指导。周老师倾注大量的时间和精力与我探讨试验研究方案的设计，传授试验软件仪器的使用技巧和指导论文章节的写作，正是周老师精益求精的学术精神让我不断提高和进步。

然后我要感谢同门龙小波、邓清、蒋曲翀、王昱、许铭、水淼、沈慧玲等，感谢蒋运忠、米斯特、邹品增、张锐、陈晖、黄斌、张军凯等师弟师妹，感谢湖大本科实验班的同学和实验室的工人师傅们，衷心感谢他们帮我做试验的善意。同时还要感谢霍兵勇、刘力维、赵德博、夏玲琼师兄及室友李龙飞、苏凯峰、郭佳三年来的关心与支持。

最后我要表达对父母和亲人的爱意，感念于他们无私的关注、支持与包容。真心感谢帮助过我的人、令我心动的事物和给予慰藉的音乐，你们的存在让我发觉世界竟是如此美好。

谢利民

2014年5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,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,2014(已录用)
- [2]周云,易伟建,蒋运忠,谢利民,米斯特.多参考点脉冲锤击法识别桥梁柔度的理论与实践.中国公路学报,2014(复审中)
- [3]蒋运忠,周云,谢利民.基于应用程序交互访问技术的桥梁有限元模型修正研究.工程力学,2014(已投稿)
- [4]周云,米斯特,易伟建,谢利民,蒋运忠.环境激励下高层建筑结构动力测试与有限元建模分析.土木工程学报,2014(已投稿)
- [5]Zhou Yun, Tan D.X., Xie L.M., et al.Ambient vibration analysis for structural identification of high-rise buildings. In: Proceedings of the 5th International Symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering. Harbin,2013
- [6]Zhou Yun, Xie Limin, Jiang Yunzhong and Yi Weijian.Multiple model identification of the structure for rational model selection method. In: The 13th International Symposium on Structural Engineering.Hefei,2014(submitted)
- [7]周云,蒋运忠,谢利民.一种用于桥面板动力检测的自由落锤反弹控制装置.实用新型专利.ZL 2013 2 0264953.X,2013-11-27
- [8]周云,蒋运忠,谢利民.一种用于桥面板动力检测的自由落锤装置.实用新型专利.ZL 2013 2 0264413.1,2013-11-27
- [9]周云,蒋运忠,谢利民.一种用于桥面板动力检测的声学传感器系统.实用新型专利.ZL 2013 2 0264569.X,2013-11-27
- [10]周云,蒋运忠,谢利民.一种用于桥面板动力检测的轮载牵引式落锤集成装置.实用新型专利.ZL 2013 2 0264998.7,2013-11-27