

$$H_1 = \frac{G_{XF}}{G_{XX}} \quad (5.8)$$

(2) H_2 估计

其假设输入有噪声、输出无噪声，计算公式为：

$$H_1 = \frac{G_{XX}}{G_{FX}} \quad (5.9)$$

(3) H_v 估计

其假设输入、输出都有噪声。设：

$$[GFFX_p(\omega)] = \begin{bmatrix} [GFF_p(\omega)] & [GXF_p(\omega)]^H \\ [GXF_p(\omega)] & [GXX_p(\omega)] \end{bmatrix}_{(Ni+1) \times (Ni+1)} \quad (5.10)$$

对 $[GFFX_p(\omega)]$ 在每个频率点 ω 处进行特征值分解：

$$[GFFX_p(\omega)] = [V_p(\omega)][\Lambda_p(\omega)][V_p(\omega)]^H \quad (5.11)$$

如下式所示，取最小特征值对应的特征向量，进行归一化处理，可得频响函数：

$$\{V_p(\omega)\}_{\lambda_{\min}} = \begin{Bmatrix} H_{p1}(\omega) \\ H_{p2}(\omega) \\ \vdots \\ H_{pNi}(\omega) \\ -1 \end{Bmatrix} \quad (p=1,2,\dots,N_0) \quad (5.12)$$

5.2.2 模态柔度

1984 年，Maxwell 提出了“位移影响系数”，并逐渐被演化为柔度的概念。1975 年，Clough 和 Penzien 提出模态柔度的概念，通过多参考点脉冲锤击测试方法，可获得结构的频响函数，从而可以提取结构的模态柔度矩阵。当参与计算的模态阶数足够多，即可无限逼近柔度的精确解。

在对中小型结构进行动力测试时，一般采集的是力锤的力脉冲信号和结构的加速度响应，我们可以将这种基于位移、速度或加速度响应信号获得的模态柔度称为力-位移模态柔度，但是广义力和广义位移还应包括力矩和角位移。将输入的力矩和输出的转动响应信息引入模态柔度的概念中，我们可以扩展传统的模态柔度的概念，得到广义模态柔度。广义模态柔度对脉冲激励的方式和输出的响应不再局限，只要测试的物理量符合需求，都可以称为广义模态柔度^[127]。

对于空间内的任意测点，其含有 x 、 y 、 z 三个方向的位移和分别绕 x 、 y 、 z 的三个转角，共六个自由度。以单个节点的广义模态柔度矩阵为例：

$$f = \begin{bmatrix} f_{XF} & f_{XM} \\ f_{\theta F} & f_{\theta M} \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

其中，下标 X 、 θ 分别对应该节点的位移自由度和转角自由度响应， F 、 M 分别代表施加在节点的力与力矩激励。因此，上述广义模态柔度矩阵可分成四块，每块为 3 阶的方阵。目前，一般只进行 F 的激励和 X 的测量，仅仅能得到 f_{XF} ，即整个广义模态柔度矩阵四分之一的信息。假如在试验中可以施加力矩激励或拾取转角响应，将完善节点的模态柔度信息。

根据输入脉冲和输出响应的信息不同，可将提取的模态柔度划分如表 5.1 所示的力-位移、力-转角、力矩-位移、力矩-转角四类模态柔度。其中，位移类响应是指位移、速度或加速度时程响应，转角类响应是角位移、角速度或角加速度时程响应。由于测量平动自由度的传感器技术已经非常成熟，因此，力-位移模态柔度已有大量学者进行研究，本文基于动转角测量技术，将提出通过 MEMS 陀螺仪传感器精确测量转动自由度的振动响应，然后通过模态分析提取力-转角模态柔度，以下简称为转角模态柔度。

表 5.1 模态柔度的分类

信息	模态柔度			
	力-位移	力-转角	力矩-位移	力矩-转角
输入脉冲	力	力	力矩	力矩
输出响应	位移类	转角类	位移类	转角类
单位	mm-N	⁰ -N	mm-N•mm	⁰ - N•mm

5.2.3 模态柔度的推导方法

模态柔度的计算依赖于多参考点脉冲锤击法试验获取的动力模态参数，有两种方法可以计算模态柔度：(1) 方法一：基于圆频率和质量归一化振型计算模态柔度；(2) 方法二：基于频率响应函数拟合曲线的截距之和提取模态柔度。

5.2.3.1 方法一：基于圆频率和质量归一化振型的模态柔度计算方法

把自然频率和模态振型变换为单位载荷下的柔度矩阵用以下的公式来表达，

$$f = \Phi \Omega \Phi^T \quad (5.14)$$

$$\begin{bmatrix} f_{1,1} & \cdots & f_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{n,1} & \cdots & f_{n,n} \end{bmatrix}_{n \times n} = \begin{bmatrix} \varphi^1(1) & \cdots & \varphi^m(1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi^1(n) & \cdots & \varphi^m(n) \end{bmatrix}_{n \times m} \times \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_1^2} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{1}{\omega_m^2} \end{bmatrix}_{m \times m} \times \begin{bmatrix} \varphi^1(1) & \cdots & \varphi^m(1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi^1(n) & \cdots & \varphi^m(n) \end{bmatrix}_{m \times n}^T \quad (5.15)$$

其中，

$$f_{ij} = \sum_{k=1}^m \frac{\varphi^k(i)\varphi^k(j)}{\omega_k^2} \quad (5.16)$$

式中, $[f]_{n \times n}$ 为 $n \times n$ 阶的柔度矩阵; 下标 n 代表结构的自由度数, 下标 m 代表模态阶数; Φ 为质量归一的振型矩阵; 而 Ω 为模态圆频率平方的倒数按照降序排列的对角矩阵; $\varphi^m(n)$ 为振型矩阵中第 m 阶模态第 n 点的振型模态分量; $f_{i,j}$ 为柔度矩阵中第 i 行第 j 列的模态柔度系数, $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, n$; ω_k 第 k 阶模态的圆频率, $k=1, 2, \dots, m$ 。

在实践中对于复杂的结构很难获得较为精确的质量矩阵, 因此难以获得质量归一的振型, 从而限制了该方法的应用。

5.2.3.2 方法二: 基于频率响应函数的截距计算模态柔度

模态柔度的推导基于对结构的固有频率、阻尼比、模态振型、模态质量系数等动力模态参数的识别。通常我们采用多参考点脉冲锤击法对结构进行模态测试, 利用输入输出的数据估算频响函数矩阵。频响函数可根据输出响应的不同划分为三种表达形式, 位移、速度、加速度输出响应分别对应位移、速度、加速度导纳频响函数。提取位移导纳频响函数 y 轴的截距可以获得模态柔度系数。但是通常不会直接测试位移响应, 为获得模态柔度系数, 需对速度、加速度导纳频响函数在频域内分别除以 $j\omega$ 和 $(j\omega)^2$, 将其转化为位移导纳频响函数, 然后提取模态柔度系数。该方法存在一个问题, 当频率 ω 趋近于 0Hz 时, $j\omega$ 和 $(j\omega)^2$ 也将趋近于 0, 使得速度或加速度导纳频响函数除以 $j\omega$ 和 $(j\omega)^2$ 后趋于无穷大, 这显然是病态的。为解决上述问题, 可使用频率响应函数拟合方法对多自由度体系的频率响应函数进行拟合, 分别提取每个单自由度体系的拟合曲线在 0Hz 处的截距, 对其进行叠加, 从而获得多自由度体系的模态柔度。部分分式 (5.17) 所示的频率响应函数可用来拟合试验频率响应函数^[128]:

$$H_{pq}(\omega) = \sum_{r=1}^N \left[\frac{A_{pqr}}{(j\omega - \lambda_r)} + \frac{A_{pqr}^*}{(j\omega - \lambda_r^*)} \right] \quad (5.17)$$

$$\lambda_r = \sigma_r + j\omega_r, \lambda_r^* = \sigma_r - j\omega_r \quad (5.18)$$

式中, $H_{pq}(\omega)$ 为在 q 点敲击 p 点拾振的频率响应函数, j 为虚数符号, ω 为频率, λ_r 表示系统的第 r 阶极点, σ_r 和 ω_r 分别为第 r 阶模态的阻尼和频率。 A_{pqr} 表示 q 点敲击 p 点拾振时第 r 阶模态的留数, $A_{pqr} = Q_r \psi_{pr} \psi_{qr}$, 其中 Q_r 为第 r 阶模态的模态比例因子, ψ_{pr} 和 ψ_{qr} 分别为 p 点和 q 点第 r 阶模态的模态振型系数, * 表示复数共轭。

将式 (5.18) 代入式 (5.17), 利用复模态指示函数的模态参数估计法^[129], 在 $\omega=0$ 处, 计算 p 和 q 点的频响函数, 可得:

$$H_{pq}(\omega) = \sum_{r=1}^m \left[\frac{\psi_{pr}\psi_{qr}}{M_{Ar}(-\lambda_r)} + \frac{\psi_{pr}^*\psi_{qr}^*}{M_{Ar}^*(-\lambda_r^*)} \right] \quad (5.19)$$

M_{Ar} 为第 r 阶模态的质量比例系数，可直接从多参考点脉冲锤击法模态测试的频响函数中提取出来， $M_{Ar} = 1/Q_r$ 。

最终的模态柔度矩阵表达式如下：

$$f = \begin{bmatrix} f_{11} = H_{11}(\omega=0) & \cdots & f_{1q} = H_{1q}(\omega=0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{p1} = H_{p1}(\omega=0) & \cdots & f_{pq} = H_{pq}(\omega=0) \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

上述方法被称为基于频响函数的截距提取模态柔度，其结果近似于结构的真实模态柔度，且低阶模态对模态柔度贡献更大，当模态识别的阶数越多，模态柔度越趋近于真实值。该方法无需获得结构的精确质量矩阵，适用于模态测试。

5.2.4 试验模态分析

试验模态分析主要是通过综合运用线性振动理论、动力测试技术、数字信号处理方法和参数识别等手段，进行系统识别的过程，重点是识别结构的模态参数。本文主要采用复模态指示函数法（Complex Mode Indicator Function, CMIF）进行试验模态分析，其流程图如下：

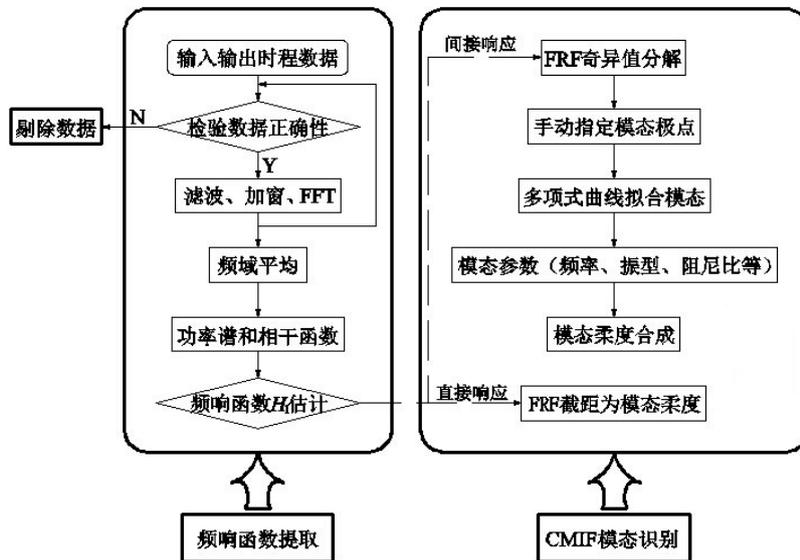


图 5.1 CMIF 法实验模态分析流程图

在获得动力测试的响应信号后，首先要对数据进行预处理，剔除掉明显错误的响应信号，接着使用低通滤波器滤除高频噪声信号，并对信号进行加窗处理。加窗主要是为了减少原始信号进行截断后所引起的误差。一般对脉冲信号加矩形窗，响应信号加指数窗。然后对信号进行快速傅里叶变换（FFT）和频域平均，将信号从时域转换到频域，通过增加每个测点的锤击次数来实现频域平均，以减

少随机噪声对测试信号产生的干扰。接着对提取的频响函数进行估计，最后利用 CMIF 方法进行模态识别。

CMIF 方法是对频响函数进行奇异值分解确定频响函数中观察到的所有模态。在对频响函数矩阵进行奇异值分解时，奇异值曲线在固有频率处的奇异值会有峰值点，因此，频响函数的奇异值图可以帮助识别系统极点。CMIF 计算主要分为两个步骤，首先是对频响函数进行奇异值分解，然后是对求得的奇异值求极值。每个参考点都存在一条奇异值权，对所有奇异值分别求极大值、第二极大值，直到第 N 极大值， N 为参考点数。最后得到的各条奇异值曲线就是 CMIF 曲线，其条数与参考点的数目相等。

为获得精确的模态参数，通过多项式曲线进行模态拟合，可以得到每阶模态的极点和留数信息，而极点包含频率、阻尼信息，留数与振型直接相关。因此，我们可以得到频率、阻尼和振型这些模态参数，还能利用识别的极点获取结构的模态质量比例系数，从而合成模态柔度。上述试验模态分析步骤均在软件中编程完成。

5.3 钢框架模型试验

采用 3.2.5.1 节的钢框架结构模型进行静动力试验研究，使用识别得到的结构位移柔度矩阵和转角柔度矩阵，预测结构在静力荷载作用下的位移和转角，并与静载试验的位移和转角测量值进行对比，以验证 5.2 节的模态柔度识别方法。



图 5.2 钢框架模型的传感器布置测点

如图 5.2 所示，该框架结构完全对称，可将框架左侧 1#、2#、3#测点分别与右侧对应的 7#、8#、9#测点的转动响应视为相等，仅在一侧布置 MEMS 陀螺仪传感器。梁与柱的轴向变形和剪切变形较之转动变形可以忽略，因此假设框架同一层内的各梁柱连接节点的水平位移均相等。为验证上述假定，如图 5.2 所示，

在 3#和 9#测点分别布置了两个 MEMS 陀螺仪传感器，3#、6#、9#测点分别布置了三个加速度传感器。用力锤敲击 9#测点，采集到的角速度响应如图 5.3(a)所示，加速度响应如图 5.3(b)所示。对称的测点的角速度响应基本一致、同一层测点的加速度响应也基本一致，因此可以仅在钢框架的中间和左（右）侧柱布置 MEMS 陀螺仪传感器、钢框架的左（右）侧柱布置加速度传感器，就可以获得所有梁柱连接节点的水平位移和转角。

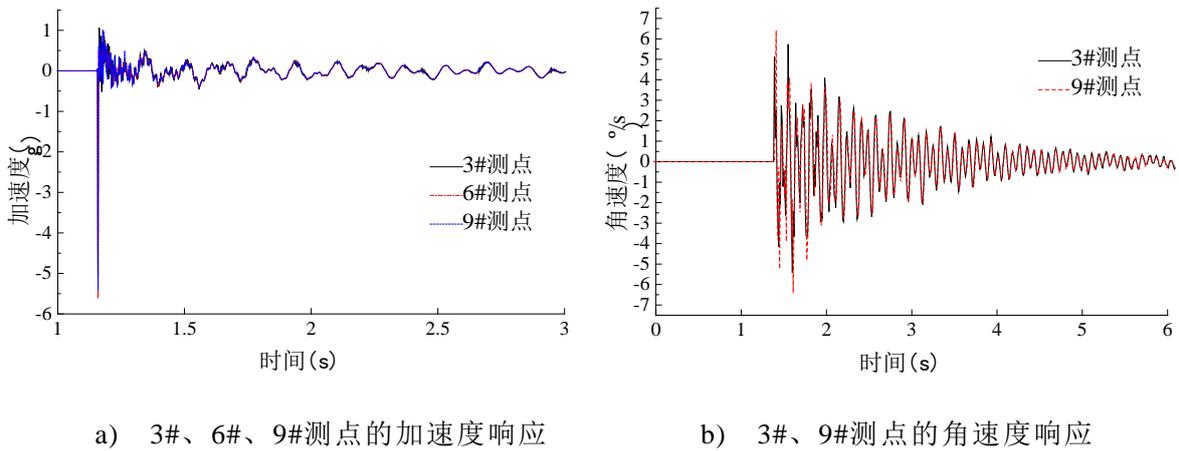


图 5.3 钢框架模型的输出响应信号

5.3.1 静载试验



图 5.4 钢框架模型静载试验测点布置



图 5.5 钢框架模型静载试验

静载试验主要测试钢框架模型在线弹性范围内的侧向变形得到荷载位移曲线。如图 5.4 所示，使用 S 型拉压式力传感器顶住墙体来获得反作用力，并通过调节螺杆的长度控制力的大小。图 5.5 为静载试验的测点布置，3 个位移计分别用来测量 1~3 层的侧向变形，6 个 MEMS 陀螺仪传感器分别用来测量 1~3 层梁柱连接节点的转角。试验使用日本基恩士 IL300+IL1000 激光位移计，其量程为 280mm，精度为 0.7mm；维特智能 HWT901B 陀螺仪传感器，其在结构初位移为 100mm 以

内，可以基本保证静态角度测量的精度为 0.05° ；宇航科技实业有限公司的 BLR-SQA 拉压式传感器量程为 300N，精度为满量程的 0.05%。力传感器、激光位移计的数据由 LMS Cadax - 8 动态信号分析仪进行采集。角度信号通过 TTL 电平串口与 PC 机连接，由 PC 端的上位机采集。

5.3.2 静载试验结果

分别对钢框架的 1~3 层进行加载，每层的加载过程分为 4 次，4 次加载对应的最大荷载分别为 25N、50N、75N 和 100N。钢筋框架第 3 层加载时的层侧移和节点转角均为最大。图 5.6 为第 1~3 层加载时，钢框架各层的荷载位移曲线。图 5.7 为第 1~3 层加载时，钢框架各层梁柱连接节点的荷载转角曲线。

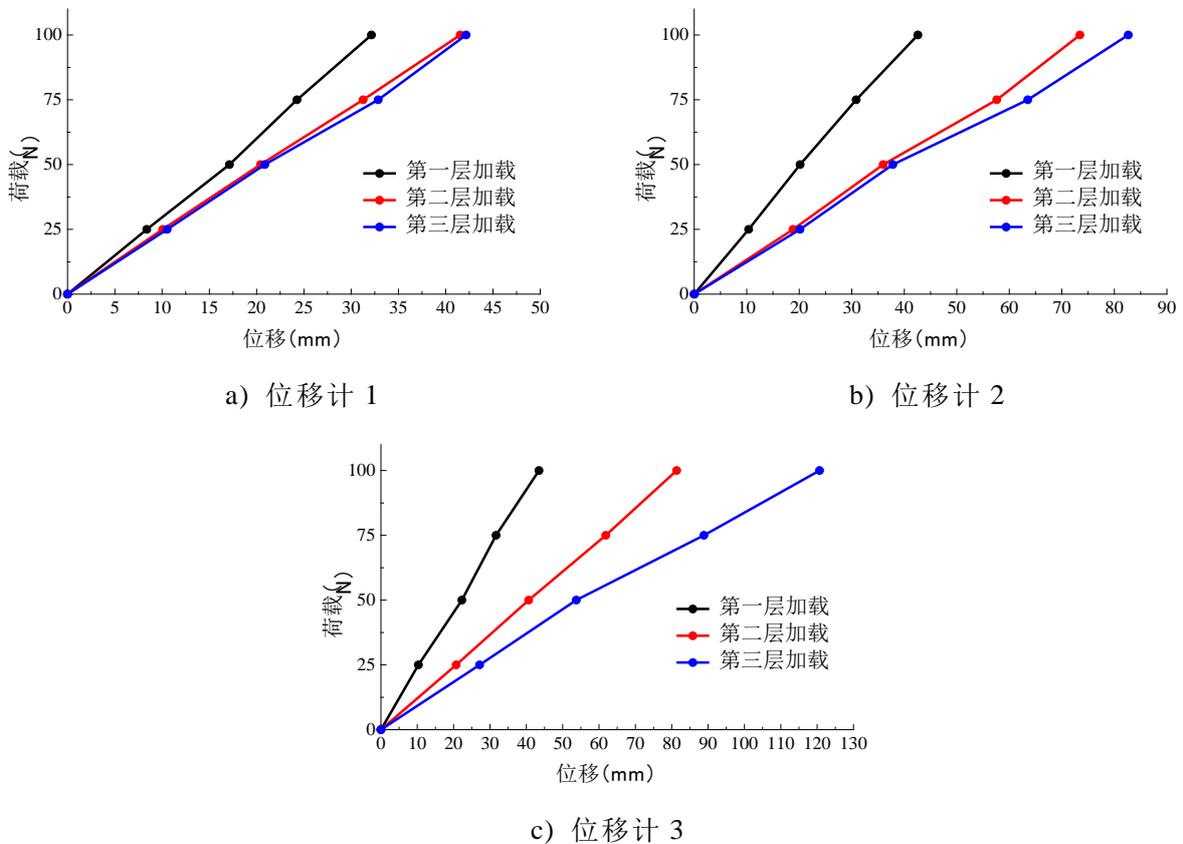


图 5.6 钢框架结构各层加载的侧移

表 5.2 钢框架静载试验获得的静力位移柔度系数

静力位移 柔度系数	位移 (mm)			测点
	0.3215	0.4259	0.4349	7
力 (N)	0.4154	0.7344	0.8136	8
	0.4216	0.8264	1.2067	9

静载试验获得的静力位移柔度系数见表 5.2，静力转角柔度系数见表 5.3。其中测点的位置如图 5.8 所示。

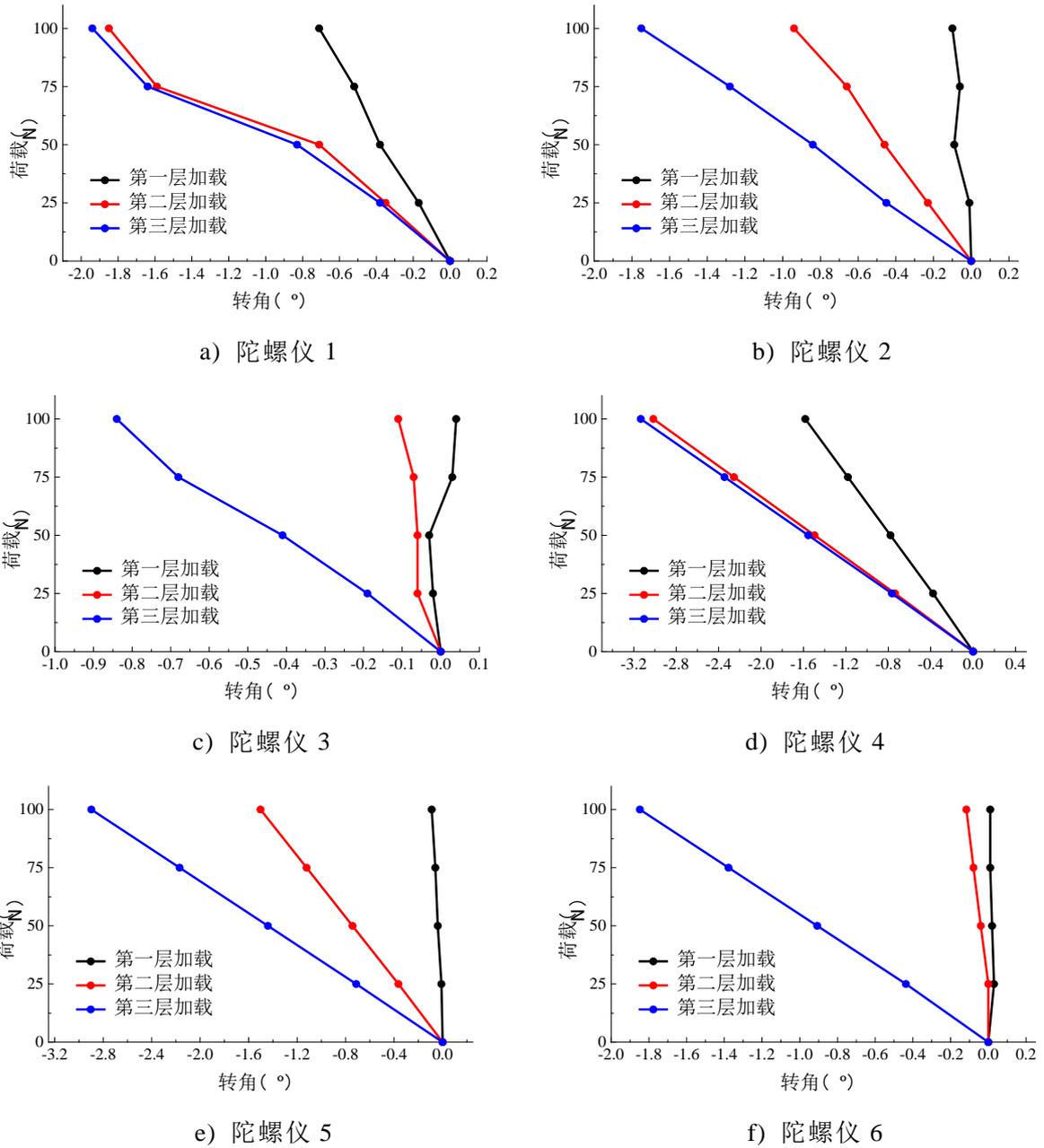


图 5.7 钢框架结构各层加载的转角

表 5.3 钢框架静载试验获得的静力转角柔度系数

静力转角 柔度系数	转角 (°)	测点
-7.10E-03	-1.00E-03	4
-1.85E-02	-9.40E-03	5
-1.94E-02	-1.75E-02	6
-1.43E-02	-8.00E-04	7
-2.98E-02	-1.31E-02	8
-2.95E-02	-2.57E-02	9

5.3.3 模态试验



图 5.8 钢框架模型模态试验测点



图 5.9 钢框架模型模态试验

表 5.4 钢框架模型模态试验测试工况

测试工况	响应点信息	锤击点
工况 1	7#、8#、9#加速度， 4#、5#、6#、7#、8#、9#角速度	9#
工况 2	7#、8#、9#加速度， 4#、5#、6#、7#、8#、9#角速度	8#
工况 3	7#、8#、9#加速度， 4#、5#、6#、7#、8#、9#角速度	7#

多参考点脉冲锤击法模态试验的传感器测点布设如图 5.8 所示。为保证框架结构质量对称，在每根梁上未布置 MEMS 陀螺仪传感器的一侧，均放置了 100g 的配重磁铁用于模拟 MEMS 陀螺仪传感器的质量。力锤使用 PCB 公司的模态力锤与力传感器 208A03，锤头选择频响范围较小的橡胶锤头。加速度信号由 PCB 系列压电式加速度传感器 333B40 采集，角速度信号由维特智能 HWT901B 陀螺仪传感器采集，使用 LMS Cadax - 8 动态信号分析仪进行试验数据结果的采集。采样频率设置为 100Hz，分别锤击 1~3 层的楼层测点，每个测点平均敲击 6 次，测试工况如表 5.4 所示。试验现场照片如图 5.9 所示。

5.3.4 模态试验结果

对钢框架模态试验采集得到的加速度、角速度响应数据，利用 5.2.4 节论述的试验模态分析方法进行位移模态分析和转角模态分析。位移模态分析使用加速度响应为分析参数，转角模态分析使用角速度响应信号，理论上，两种模态分析方法识别的频率和阻尼比应当一致，识别的位移模态振型和转角模态振型不同。

首先考虑到试验时由于环境干扰或操作不当，可能造成激励或响应信号出现问题，因此需先检查信号，进行筛选。然后，分别对力脉冲和响应信号添加矩形窗和指数窗抑制信号泄露，对加窗后的信号进行点数为 8192 的快速傅里叶变换。最后，对采集的 6 次信号进行频域平均，计算输入自谱、输出自谱和输入-输出互谱，进而对频响函数进行 H_1 估计，使用 CMIF 方法识别结构的模态参数。

5.3.4.1 位移模态分析

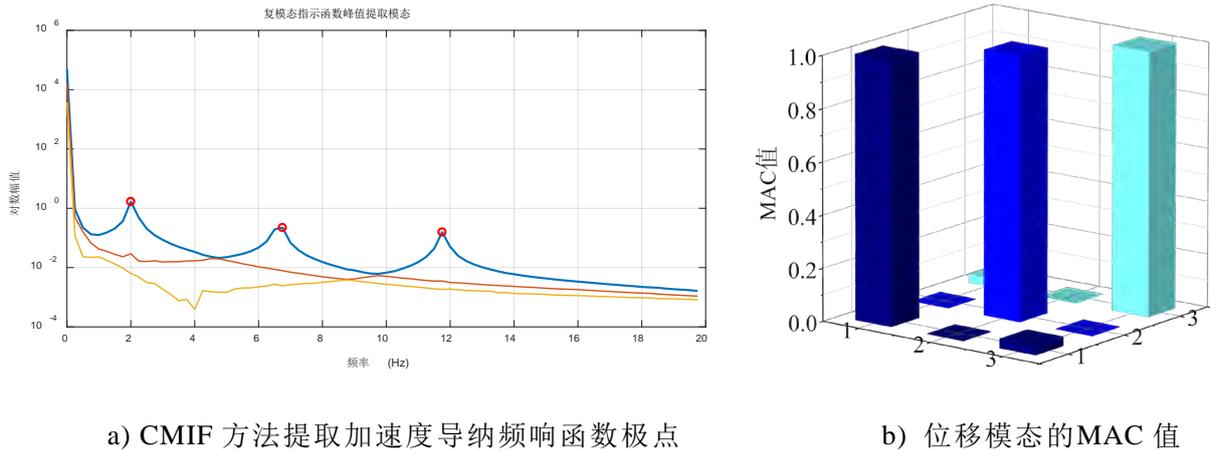


图 5.10 CMIF 方法提取钢框架前三阶位移模态

表 5.5 钢框架结构的位移模态参数

模态	频率 (Hz)	阻尼比 (%)	位移振型		
			节点 7	节点 8	节点 9
1 阶	2.00	1.07	-0.44	-0.56	-0.70
2 阶	6.75	1.26	-0.73	-0.16	0.66
3 阶	11.75	0.63	-0.54	0.69	-0.48

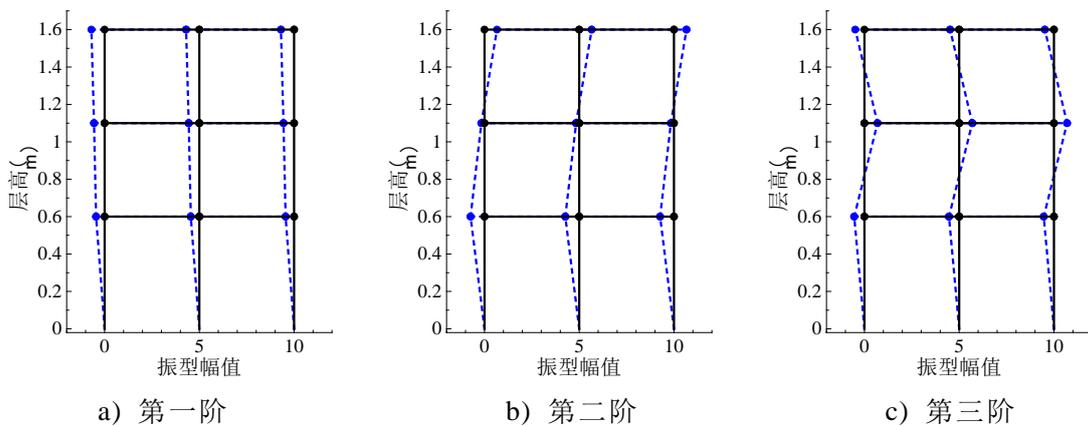
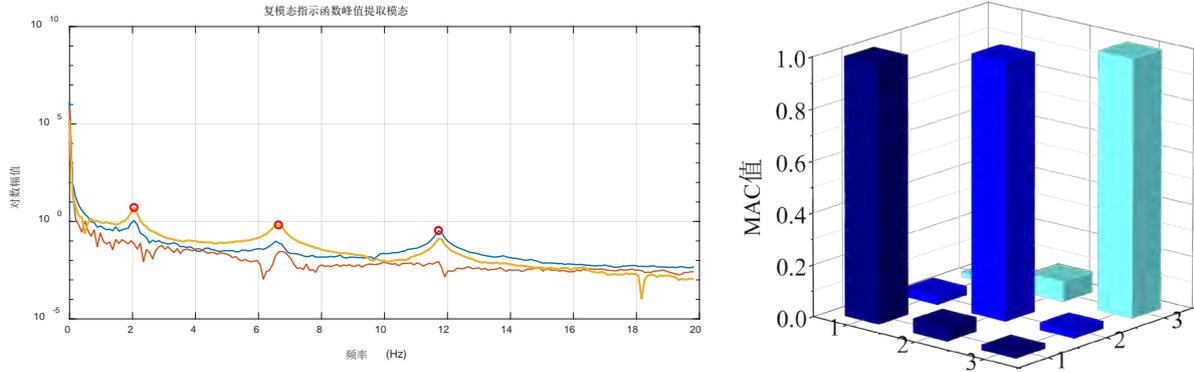


图 5.11 钢框架结构的前三阶位移模态振型

通过模态测试获得钢框架的脉冲力和加速度时程响应，进行位移模态分析。图 5.10 为提取的钢框架的前三阶位移模态，包括极点和 MAC 值。图 5.10(a)中第一条奇异值曲线（蓝色曲线）在 3 个峰值处的红圈为结构的 3 阶模态，由于力锤

脉冲激励下的结构加速度响应信噪比较大，因此加速度导纳频响函数的峰值非常清晰。图 5.10(b)中对角线上的振型 MAC 值均接近于 1，验证了识别的 3 个模态的正确性。表 5.5 为利用加速度导纳频响函数识别的钢框架的前三阶位移自振频率、位移振型和阻尼比。图 5.11 为钢框架的前三阶位移模态振型。

5.3.4.2 转角模态分析



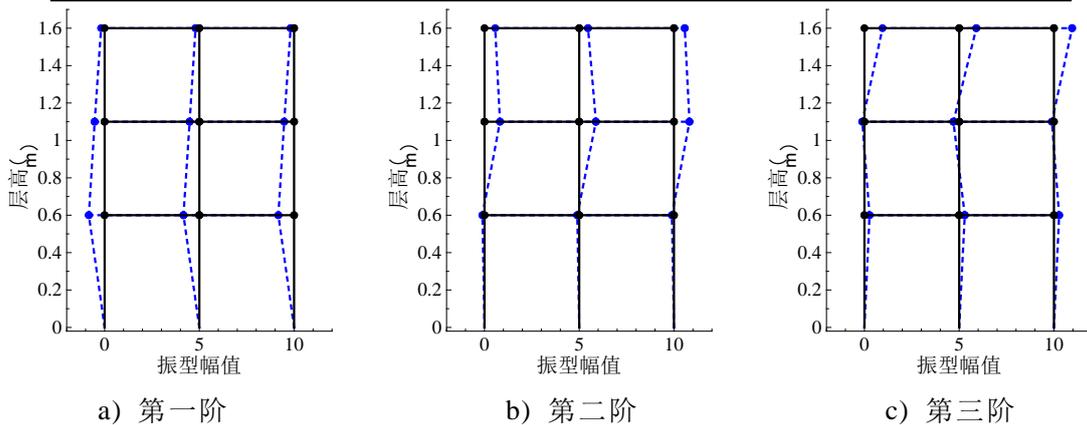
a) CMIF 方法提取角速度导纳频响函数极点

b) 转角模态的MAC 值

图 5.12 CMIF 方法提取钢框架前三阶转角模态

表 5.6 钢框架结构的转角模态参数

模态	频率 (Hz)	阻尼比 (%)	转角振型					
			节点 4	节点 5	节点 6	节点 7	节点 8	节点 9
1 阶	2.05	1.23	-0.83	-0.51	-0.20	-0.83	-0.52	-0.18
2 阶	6.54	1.54	-0.10	0.88	0.46	-0.11	0.82	0.57
3 阶	11.72	0.72	0.29	-0.31	0.91	0.27	-0.11	0.96



a) 第一阶

b) 第二阶

c) 第三阶

图 5.12 钢框架结构的前三阶转角模态振型

通过模态测试获得的钢框架的脉冲力和角速度的时程响应，进行转角模态分析。图 5.12 为提取的钢框架的前三阶转角模态。由图 5.12(a)可看出角速度响应的信噪比没有加速度响应大。图 5.12(b)中对角线上的振型 MAC 值均接近于 1，验证了识别的 3 个模态的正确性。表 5.6 为角速度导纳频响函数识别的钢框架的前

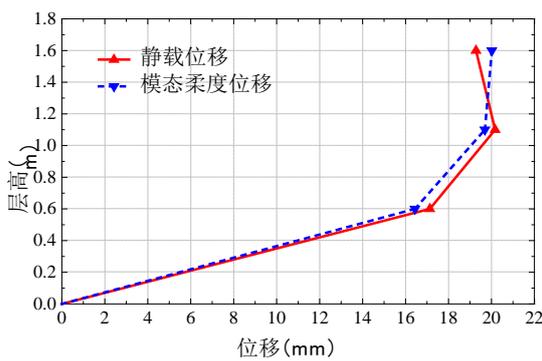
三阶转动固有频率和阻尼比。对比表 4.3 的结果，可以看出两者识别的前三阶固有频域和阻尼比非常接近。图 5.13 为钢框架的前三阶转角模态振型。

5.4 静载位移与模态柔度位移

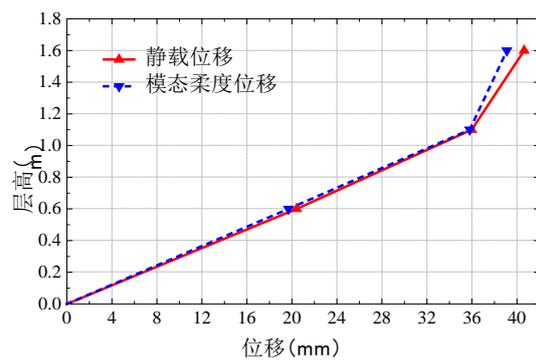
根据 5.2.3.2 节的方法计算钢框架结构的位移模态柔度如表 5.7 所示，为检验其准确性，利用模态分析得到的位移模态柔度来计算结构在集中荷载作用下的位移，与静载试验实测值对比如图 5.14 所示。（篇幅所限，仅展示第 1~3 层加载 50N 的对比结果图）

表 5.7 基于频率响应函数的截距计算的位移模态柔度系数

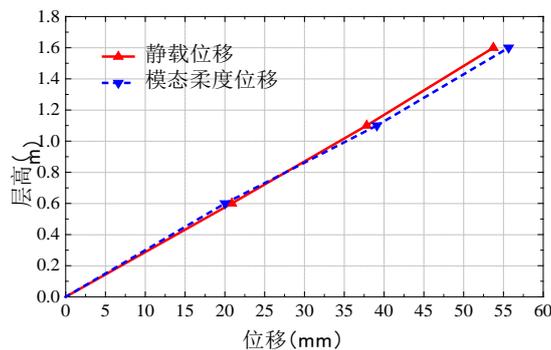
位移模态 柔度系数	位移 (mm)			测点
	0.3288	0.3939	0.4004	7
力 (N)	0.3939	0.7160	0.7820	8
	0.4004	0.7820	1.1130	9



a) 第 1 层加载 50N



b) 第 2 层加载 50N



c) 第 3 层加载 50N

图 5.14 钢框架结构的静载位移与模态柔度位移

表 5.8 为钢框架的静载位移与模态柔度位移的误差。由图表可知，静载位移与模态柔度位移非常接近，平均误差为 3.51%，最大误差为 8.62%。该结果验证

了位移模态柔度识别方法的有效性，说明利用识别的位移模态柔度矩阵可以预测结构在某个节点的静载作用下的位移。

分析静载位移与模态柔度位移的误差产生的原因，主要来自以下两个方面：
 (1) 由于试验测量只能得到有限阶的模态，而且为低阶模态，不能得到结构的所有模态，因此存在模态截断。在试验测量时，只获得了钢框架的前三阶模态，因此合成的位移模态柔度存在误差。(2) 多项式曲线拟合模态及测量过程中受到噪声影响都会带来误差。

表 5.8 钢框架结构静载位移与模态柔度位移的误差

荷载 (N)	加载 位置	第 1 层位移			第 2 层位移			第 3 层位移		
		模态 柔度 位移 (mm)	静载 位移 (mm)	误差	模态 柔度 位移 (mm)	静载 位移 (mm)	误差	模态 柔度 位移 (mm)	静载 位移 (mm)	误差
25	第 1 层	8.22	8.38	1.92%	9.85	10.37	5.04%	10.01	10.32	3.01%
	第 2 层	9.85	10.07	2.21%	17.90	18.83	4.94%	19.55	20.69	5.51%
	第 3 层	10.01	10.54	5.04%	19.55	20.15	2.97%	27.82	27.15	-2.48%
50	第 1 层	16.44	17.13	4.04%	19.69	20.17	2.36%	20.02	19.28	-3.83%
	第 2 层	19.69	20.42	3.56%	35.80	35.98	0.50%	39.10	40.64	3.78%
	第 3 层	20.02	20.87	4.08%	39.10	37.82	-3.39%	55.65	53.73	-3.57%
75	第 1 层	24.66	24.27	-1.59%	29.54	30.84	4.21%	30.03	31.67	5.19%
	第 2 层	29.54	31.27	5.53%	53.70	57.62	6.80%	58.65	61.85	5.17%
	第 3 层	30.03	32.86	8.62%	58.65	63.53	7.68%	83.47	88.87	6.07%
100	第 1 层	32.88	32.15	-2.26%	39.39	42.59	7.52%	40.04	43.49	7.94%
	第 2 层	39.39	41.54	5.18%	71.60	73.44	2.51%	78.20	81.36	3.88%
	第 3 层	40.04	42.16	5.04%	78.20	82.64	5.37%	111.3	120.7	7.77%

注：误差=（模态柔度位移-静载位移）/静载位移×100%。

5.5 静载转角与模态柔度转角

同 5.4 节，可根据 5.2.3.2 节的方法计算钢框架结构的转角模态柔度，其结果如表 5.9 所示。为检验其准确性，利用模态分析得到的转角模态柔度去计算结构在集中荷载作用下的转角，与静载试验实测值对比如图 5.15 所示。（篇幅所限，仅展示第 1~3 层加载 100N 的对比结果图）可以从图中看出静载转角与模态柔度转角较为吻合。表 5.10 和表 5.11 为钢框架的静载转角与模态柔度转角的误差。

表 5.9 基于频率响应函数的截距计算的转角模态柔度系数

转角模态 柔度系数	转角 (°)			测点
力 (N)	-8.74E-03	-1.71E-03	-1.15E-05	4
	-1.74E-02	-1.05E-02	-1.53E-03	5
	-1.88E-02	-1.98E-02	-9.39E-03	6
	-1.58E-02	-9.00E-04	1.00E-04	7
	-3.01E-02	-1.50E-02	-1.16E-03	8
	-3.13E-02	-2.90E-02	-1.85E-02	9

表 5.10 钢框架结构右侧 7#、8#、9#测点的静载转角与模态柔度转角的误差

荷载 (N)	加载 位置	第 1 层转角			第 2 层转角			第 3 层转角		
		模态 柔度 转角 (°)	静载 转角 (°)	误差	模态 柔度 转角 (°)	静载 转角 (°)	误差	模态 柔度 转角 (°)	静载 转角 (°)	误差
25	第 1 层	-0.38	-0.37	-2.05%	-0.01	0.01	200.00%	0.03	0.05	40.00%
	第 2 层	-0.74	-0.61	-20.60%	-1.50	-1.31	-14.63%	0.00	0.01	100.00%
	第 3 层	-0.77	-0.65	-17.76%	-2.90	-2.57	-12.74%	-0.44	-0.52	16.04%
50	第 1 层	-0.78	-0.66	-18.06%	-0.04	-0.01	-300.00%	0.02	-0.01	300.00%
	第 2 层	-1.50	-1.31	-14.15%	-0.74	-0.58	-28.12%	-0.04	-0.03	-33.33%
	第 3 层	-1.55	-1.41	-10.24%	-1.44	-1.04	-38.56%	-0.91	-1.03	11.94%
75	第 1 层	-1.18	-1.04	-13.54%	-0.06	-0.05	-20.00%	0.01	-0.01	200.00%
	第 2 层	-2.26	-1.92	-17.46%	-1.12	-0.96	-16.92%	-0.08	-0.05	-56.99%
	第 3 层	-2.34	-2.71	13.51%	-2.17	-1.89	-14.77%	-1.38	-1.42	3.00%
100	第 1 层	-1.58	-1.43	-10.66%	-0.09	-0.08	-12.50%	0.01	0.02	50.00%
	第 2 层	-3.01	-2.98	-1.17%	-1.50	-1.31	-14.63%	-0.12	-0.09	-29.23%
	第 3 层	-3.13	-2.95	-6.22%	-2.90	-2.57	-12.74%	-1.85	-1.99	7.15%

注：误差=（模态柔度转角-静载转角）/静载转角×100%。

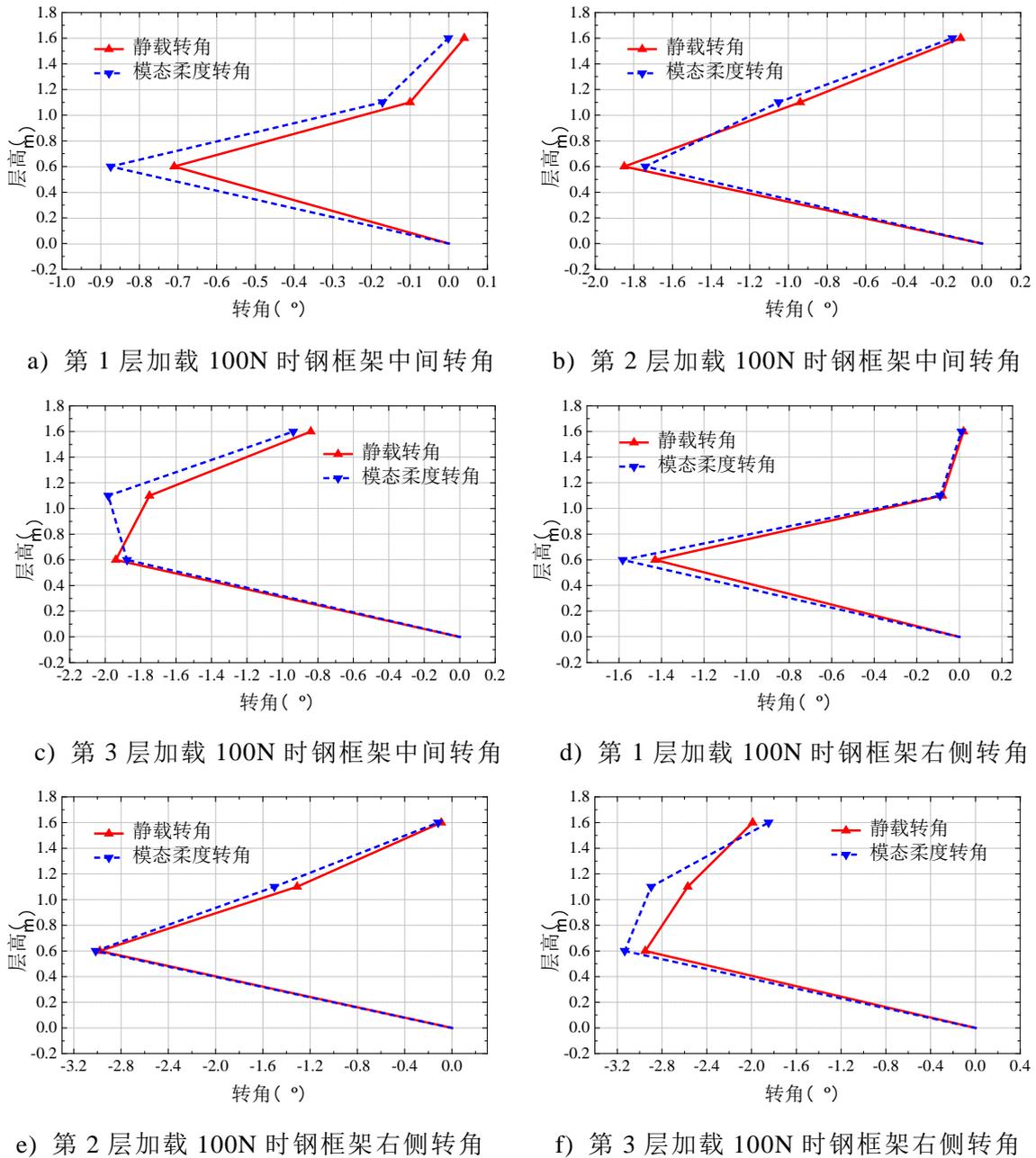


图 5.15 钢框架结构的静载转角与模态柔度转角

整体来说，转角模态柔度不如位移模态柔度准确，除受到模态截断、模态拟合和噪声的影响，还有以下几个方面的误差来源。首先，MEMS 陀螺仪传感器的精度有限，在试验时，静止状态下也会有零漂产生，上下浮动 0.01° 左右属于正常的现象。所以静载试验时，节点转角非常小时误差会非常大。然后，由于受传感器固定位置的影响，测得的转角是近似替代节点的转角。误差较大的主要原因是因为模态阶数参与不足，而受到传感器采样频率的限制，难以获得高阶转角模态。前三阶位移模态对整体位移模态柔度的贡献大于前三阶转角模态对整体转角模态柔度的贡献。

表 5.11 钢框架结构中间 4#、5#、6#测点的静载转角与模态柔度转角的误差

荷载 (N)	加载 位置	第 1 层转角			第 2 层转角			第 3 层转角		
		模态 柔度 转角 (°)	静载 转角 (°)	误差	模态 柔度 转角 (°)	静载 转角 (°)	误差	模态 柔度 转角 (°)	静载 转角 (°)	误差
25	第 1 层	-0.22	-0.17	-28.75%	-0.04	-0.01	-329.72%	0.00	-0.02	98.92%
	第 2 层	-0.44	-0.35	-24.41%	-0.26	-0.23	-14.34%	-0.08	-0.06	-27.96%
	第 3 层	-0.47	-0.38	-23.49%	-0.50	-0.45	-10.14%	-0.47	-0.41	-14.45%
50	第 1 层	-0.44	-0.38	-15.04%	-0.09	-0.09	5.14%	0.00	-0.03	98.57%
	第 2 层	-0.87	-0.71	-22.58%	-0.53	-0.46	-14.34%	-0.08	-0.06	-27.96%
	第 3 层	-0.94	-0.83	-13.00%	-0.99	-0.84	-18.00%	-0.47	-0.41	-14.45%
75	第 1 层	-0.66	-0.52	-26.16%	-0.13	-0.06	-113.90%	0.00	0.03	101.91%
	第 2 层	-1.31	-1.59	17.88%	-0.79	-0.66	-19.54%	-0.12	-0.07	-64.52%
	第 3 层	-1.41	-1.64	14.20%	-1.49	-1.28	-16.16%	-0.70	-0.68	-3.55%
100	第 1 层	-0.87	-0.71	-23.15%	-0.17	-0.10	-71.31%	0.00	0.04	102.86%
	第 2 层	-1.74	-1.85	5.88%	-1.05	-0.94	-11.91%	-0.15	-0.11	-39.07%
	第 3 层	-1.88	-1.94	3.28%	-1.98	-1.75	-13.28%	-0.94	-0.84	-11.79%

注：误差=（模态柔度转角-静载转角）/静载转角×100%。

5.6本章小结

本章在以往结构识别研究仅基于结构的位移响应的基础上，提出将转角信息引入模态柔度中，从而获得广义的模态柔度概念。首先，介绍了一种基于频响函数截距提取模态柔度的方法，该方法基于多参考点脉冲锤击法拾取结构的位移或转角响应时程，获得的频响函数截距即为模态柔度系数。然后通过对钢框架模型进行静载试验和模态试验研究，将结构受静载作用下的位移（转角）与模态柔度计算所得的位移（转角）进行比较，验证了模态柔度算法的准确性。研究结果显示位移模态柔度比转角模态柔度的精度高，分析其原因，除受到模态截断、模态拟合和噪声的影响外，主要误差来源于模态阶数参与不足，前三阶位移模态对整体位移模态柔度的贡献大于前三阶转角模态对整体转角模态柔度的贡献。

结论与展望

基于广义逆方法重构转角信息和采用挠曲线拟合的方式重构转角信息，本文提出采用商业级的 MEMS 陀螺仪传感器测量角度和角速度响应，改变了传统的仅测试位移类响应的方法，对响应信息进行了直观补充。理论方面，介绍了结构物理参数识别的时域法和频域法和模态柔度的计算方法。试验方面，通过对 3 层 2 跨的钢框架模型的静动力试验研究，基于最小二乘递推算法和灵敏度方法对该框架结构进行参数识别和损伤识别、基于频响函数的截距提取其力一位移模态柔度和力一转角模态柔度。研究的主要结论归纳如下：

(1) 基于挠曲线拟合方法对 MEMS 陀螺仪传感器的角度测量精度校验试验，主要用来验证动力试验条件下测量的角度是否准确。试验结果表明在结构初位移为 100mm 以内，可以基本保证 MEMS 陀螺仪传感器静态角度测量的精度为 0.05° ；在结构初位移为 10mm 以内，可以基本保证动态角度测量的精度为 0.1° 。

静载试验时，钢框架结构的位移基本控制在 100mm 以内，最大角位移为 2.98° ，精度误差约为 1.68%。模态试验时，钢框架结构的最大位移测试值为 4mm 左右，受到力锤激励后的最大角位移为 0.3° 左右，其动态角度精度约为 0.02° ，精度误差约为 6.67%，该传感器基本可以满足实验要求。

(2) 根据算例分析和试验研究发现基于广义逆理论重构转动信息的方法，由于需要使用位移、速度、加速度响应分别来重构角位移、角速度、角加速度响应。而我们通常做试验时只测试加速度响应，然后重构速度、位移响应的做法，会将所有在位移类响应中累积的误差带入转角类响应。而广义逆方法本身在重构过程中也存在误差，以上原因导致重构转角下的刚度参数识别效果不如直接测量转角理想。

(3) 采用 MEMS 陀螺仪传感器直接测量转动响应在实测框架中的刚度识别平均误差相比于由广义逆方法重构转动响应的平均误差减少了 5.94%。说明使用最小二乘递推算法对弯剪型结构进行刚度参数时域识别时，使用转角响应测量值的方法更好，而且与广义逆重构转动响应的方法相比，无需进行复杂计算也不受平动响应的影响。

(4) 使用灵敏度方法对考虑节点转动的钢框架模型进行层间抗弯刚度参数识别时，转角振型测试信息的补充使刚度参数识别平均误差减少了 1.29%，对结构物理参数的识别精度有一定提高。此外，损伤识别试验的结果表明灵敏度方法和最小二乘递推算法都能较好的指示框架结构的损伤位置，相对而言灵敏度方法损伤识别的结果更为准确。

(5) 通过对钢框架结构进行试验模态分析, 比较该结构受静载作用下的位移(转角)与模态柔度计算所得的位移(转角), 发现位移模态柔度比转角模态柔度的精度高, 分析其原因, 除受到模态截断、模态拟合和噪声的影响外, 主要误差来源于模态阶数参与不足, 前三阶位移模态对整体位移模态柔度的贡献大于前三阶转角模态对整体转角模态柔度的贡献。

基于动力学的结构识别研究在实际应用中, 由于实际结构形式复杂及受到测试过程中各种不确定性的影响, 涉及到多个学科的交叉。由于时间和学术水平有限, 本人的研究仍然存在以下不足与有待进一步研究的问题:

(1) 实际工程中的结构形式相比本文的试验模型更为复杂, 刚度也更大, 相应的转动响应的振幅更小, 因此对使用的传感器灵敏度要求更高, 花费也相对较高。部分位置如节点连接处的转角如何准确测量、如何采用信号处理算法及误差补偿技术提高 MEMS 陀螺仪的性能, 从而提高其精度仍是值得进一步研究的课题。

(2) 本文所使用的 MEMS 陀螺仪传感器的采样频率最高为 200Hz, 模态试验时仅能采集试验模型的前三阶自振频率。对于转角模态阶数不足的问题, 可考虑采取信息重构的方法扩充振型, 或通过构造目标函数, 使用优化算法搜索与结构测试信息最接近的结构参数值。如何获得高阶转角模态值得进一步深入研究。

(3) 本文的试验设计中, 是通过测量获得的加速度响应重构速度、位移响应, 由于存在趋势项和噪声, 会使得积分结果产生误差。如果考虑使用位移传感器直接测量位移响应, 参数识别的精度应该会有所提高。

(4) 在损伤识别试验设计时, 本文仅设置了结构的单元损伤工况, 没有考虑梁柱节点的损伤。节点连接处损伤后的单元刚度矩阵如何表示, 如何建立参数识别模型, 及如何拾取节点损伤后的转角响应将是研究的重点与难点。

参考文献

- [1] Chan T H T, Yu L, Tam H Y, et al. Fiber Bragg Grating Sensors for Structural Health Monitoring of Tsing Ma bridge: Background and Experimental Observation[J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(5): 648-659.
- [2] Su J Z, Xia Y, Zhao X, et al. Long-term Structural Performance Monitoring System for the Shanghai Tower[J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2013, 3(1): 49-61.
- [3] 罗尧治, 梅宇佳, 沈雁彬. 国家体育场钢结构温度与应力实测及分析[J]. *建筑结构学报*, 2013, 34(11): 24-32.
- [4] 戴会超, 蔡德所. 温度分布式及裂缝监测的光纤传感技术在三峡工程中的应用[J]. *水力发电*, 2003, 29(12): 59-61.
- [5] 陈秋霞. 高精度动态测角仪[J]. *红外*, 2006, 27(8): 33-38.
- [6] 刘彤, 周进. 多齿分度台原理分析[J]. *中国科技信息*, 2018, 592(20):16-66.
- [7] 侯新宇, 金龙旭. 感应同步器测角系统的实现[C]. 精密工程学术研讨会, 2004.
- [8] Jing F S, Lin Y C, Zhou Y F, et al. Angular Measurement by Means of Rotation of Linear Gratings[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1992, 41(1): 585-587.
- [9] Zhang G X, Wang C H, Li Z. Improving the Accuracy of Angle Measurement System with Optical Grating[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1994, 43(1): 457-460.
- [10] Masuda T, Kajitani M. An Automatic Calibration System for Angular Encoders[J]. *Precision Engineering*, 1989, 11(2): 95-100.
- [11] Machtovo I A. High-precision Real-time Measurement of Large Angular Displacements of Structures[J]. *Sov J Opt Technol*, 1993, 60(1): 73-74.
- [12] Lulu M A, Yan B, Naiguang L U. A Digital Optical Autocollimation Method for Measuring 2D Small Angle[J], 2008, 16(4): 93-102.
- [13] Torroba R, Tagliaferri A A. Precision Small Angle Measurements With a Digital Moiré Technique[J]. *Optics Communications*, 1998, 149(4-6): 213-216.
- [14] Shang H M, Toh S L, Fu Y, et al. Measurement of Angle of Rotation using Circular Optical Grating[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2001, 4317: 72-78.

- [15] Ikram M, Hussain G. Michelson Interferometer for Precision Angle Measurement[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(1): 113-20.
- [16] Zhao S W H, Li Y. Laser Heterodyne Interferometer for the Simultaneous Measurement of Displacement and Angle using a Single Reference Retroreflector[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(8): 84-112.
- [17] Privalov V E, Filatov Y V. Use of a Ring Laser for Angle Measurements[J]. *Measurement Techniques*, 1977, 20(2): 198-203.
- [18] Filatov Y V, Loukianov D P, Probst R. Dynamic Angle Measurement by Means of a Ring Laser[J]. *Metrologia*, 1997, 34(4):343-351.
- [19] 浦昭邦, 陶卫, 张琢. 角度测量的光学方法[J]. *光学技术*, 2002, 28(2): 168-171.
- [20] 殷延鹤, 乔彦峰, 蔡盛, et al. 大型结构角度变形测量中的光学方法[J]. *光电技术应用*, 2014, 29(4): 69-75.
- [21] Jabconaki R. Processing of the International Symposium on Metrology for Quality Control in Production Tokyo[C]. Angle interference measurement, 1984.
- [22] Shi P, Stijns E. Improving the Linearity of the Michelson Interferometric Angular Measurement by a Parameter Compensation Method[J]. *Appl Opt*, 1993, 32(1): 44-51.
- [23] Maluf N. An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering[J]. *Measurement Science & Technology*, 2013, 13(13): 229.
- [24] 付梦印. 神奇的惯性世界[M]. 北京理工大学出版社, 2015.
- [25] 翟羽婧, 杨开勇, 潘瑶, et al. 陀螺仪的历史、现状与展望[J]. *飞航导弹*, 2018, 408(12):92-96.
- [26] 无锡北微传感科技有限公司: 惯性姿态测量建筑施工解决方案[EB/OL]. /2013-04-11. <http://www.bewis.com.cn/jzsg>.
- [27] 杨业飞, 申文涛. 惯性稳定平台中陀螺技术的发展现状和应用研究[J]. *飞航导弹*, 2011, (2): 72-79.
- [28] Tang W C. MEMS Program at DARPA[M]. *Nanotribology*, Springer US, 2003.
- [29] 王喆垚. 微系统设计与制造[M]. 清华大学出版社, 2008.
- [30] Armenise M N. MEMS Gyroscopes[M]. *Advances in Gyroscope Technologies*, Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [31] 申双琴. 基于陀螺的坦克炮塔转角动态高精度测量[D]. 西安工业大学, 2013.
- [32] 李杨. 具有位置瞬时识别功能的炮塔转角测量系统[D]. 南京理工大学, 2014.
- [33] Guo Z, Cheng F, Li B, et al. Research Development of Silicon MEMS Gyroscopes: a Review[J]. *Microsystem Technologies*, 2015, 21(10): 2053-2066.

- [34] 谷庆红. 微机械陀螺仪的研制现状[J]. 中国惯性技术学报, 2003, 11(5): 67-72.
- [35] 陈宝毅. MEMS 惯性器件的数据采集与误差分析技术研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2009.
- [36] Greiff B B P. A Vibratory Micromechanical Gyroscope[C]. AIAA Guidance and Control Conference, Minneapolis, MN, USA, 1988: 1033-1040.
- [37] Bernstein J C S, King A. A Micromachined Comdrive Tuning Fork Rate Gyroscope[C]. Micro Electro Mechanical Systems, Proceedings an Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems IEEE. 1993: 143-148.
- [38] Greiff P A B, Campbell J, Petrovich A. Vibrating Wheel Micromechanical Gyro: Position location and navigation symposium[C]. IEEE. 1996: 31-37.
- [39] CiteSeerX. Surface Micromachined Z-Axis Vibratory Rate Gyroscope[C]. Tech Dig Solid-state Sensor & Actuator Workshop, 1996.
- [40] Mochida Y, Tamura M, Ohwada K. A Micromachined Vibrating Rate Gyroscope with Independent Beams for the Drive and Detection Modes[J]. Sensors & Actuators, 2000, 80(2): 170-178.
- [41] Geen J A. Progress in integrated gyroscopes[C]. Position Location & Navigation Symposium, 2004.
- [42] Lapadatu D B B, Holm R, Et Al. SAR500 - A High-Precision High-Stability Butterfly Gyroscope with North Seeking Capability[J]. Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 2010 IEEE/ION. IEEE, 2010: 6-13.
- [43] 权海洋, 陈效真. 高端 MEMS 固体波动陀螺的发展与应用[J]. 导航与控制, 2017, 6: 76-85.
- [44] Chen L X, Song Z. A Micromachined Gyroscope with Piezoresistance for Both High Performance Coriolis-effect Detection and Torsional Vibration Monitoring[C]. International Conference on Solid-state Sensors, IEEE, 2005.
- [45] Liu J, Chen D, Wang J. Regulating Parameters of Electromagnetic Micromachined Vibrating Ring Gyroscope by Feedback Control[J]. Micro & Nano Letters Iet, 2012, 7(12): 1234-1236.
- [46] Dimsdale, JerryS. System Identification of Structures with Joint Rotation[M]. Univ. of Calif, 1983.
- [47] Ewins D J, Sainsbury M G. Mobility measurements for the vibration analysis of connected structures[J]. Shock and Vibration Bulletin, 1972, 44: 105-122
- [48] Mottershead J E, Kyprianou A, Ouyang H. Estimation of Rotational Frequency Responses[J]. Key Engineering Materials, 2003, 157-166.

- [49] Ratcliffe M J, Lieven N. Measuring Rotational Degrees of Freedom Using a Laser Doppler Vibrometer[J]. Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME, 1997, 122(1): 12-20.
- [50] Junhua S, Jie Z, Zhen L, et al. High-dynamic Angle Measurement based on Laser Displacement Sensors[J]. Applied Optics, 2013, 52(23): 5676-5685.
- [51] Lee J J, Ho H N, Lee J H. A Vision-Based Dynamic Rotational Angle Measurement System for Large Civil Structures[J]. Sensors, 2012, 12(6): 7326-7336.
- [52] Yong X, Peng Z, Ni Y Q, et al. Deformation Monitoring of a Super-tall Structure using Real-time Strain Data[J]. Engineering Structures, 2014, 67(10): 29-38.
- [53] Hou S, Zhang H B, Ou J P. Monitoring Interstory Drift in Buildings under Seismic Loading using MEMS Inclinometers[J]. Construction and Building Materials, 2018, 185: 453-467.
- [54] Teisseyre R. Rotation and Strain Seismology[J]. Journal of Seismology, 2012, 16(4): 683-694.
- [55] William H. K, Lee. Rotational Seismology[M]. U.S. Geological Survey, 2013.
- [56] Nigbor R L, Hutt C R. Laboratory and Field Testing of Commercial Rotational Seismometers[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(28): 1215-1227.
- [57] Jun Z. Review of the Application of Rotational Motions in Seismology[J]. 中国地震研究:英文版, 2018, 4: 456-469. .
- [58] 梁枢果, 张亮亮. 矩形高层建筑扭转动力风荷载解析模型[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(2).
- [59] 徐培福, 韦承基. 高层建筑结构在地震作用下的扭转振动效应[J]. 建筑科学, 2000, 16(1).
- [60] 孙伟, 梁书亭. 基于 DICM 的钢管混凝土框架梁柱连接的转角测量与分析研究[J]. 工程力学, 2008, 8: 169-174.
- [61] 杨学山, 廖振鹏. 桥梁挠度测量的一种新方法[J]. 土木工程学报, 2002, 35(2): 92-96.
- [62] 徐良. 用 GPS 和随机减量技术对悬索桥实时监测[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42(6): 822-824.
- [63] 王祥建. 弯剪型结构物理参数时域识别及地震动反演研究[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34: 193-201.
- [64] C. H G, P. Y J T. System identification in structural dynamics[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1977, 103(6): 1089-1104.

- [65] 李国强, 李杰. 工程结构动力检测理论与应用[J]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [66] Ling X, Haldar A. Element Level System Identification with Unknown Input with Rayleigh Damping[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(8): 877-885.
- [67] Jun L J C. A Statistical Average Algorithm for the Dynamic Compound Inverse Problem[J]. Computational Mechanics, 2003, 30(2): 88-95.
- [68] H. J A. Stochastic Processes and Filtering Theory[C]. New York: Academic Press, 1970.
- [69] Hoshiya M S E. Structural identification by extended kalman filter[J]. Journal of Mechanics, ASCE, 1984, 110(12): 1757-1772.
- [70] 宝志雯, 史文月. 基于推广卡尔曼滤波算法的结构模型的参数识别[J]. 振动与冲击, 1990, (1): 11-21.
- [71] 尚久铨. 卡尔曼滤波法在结构动态参数估计中的应用[J]. 地震工程与工程振动, 1991, (2): 62-72.
- [72] 李杰. 基于微分算子变换的广义卡尔曼估计方法[J]. 计算结构力学及其应用, 1995, 12(4): 394-400.
- [73] 赵昕, 李杰. 一类加权全局迭代参数卡尔曼滤波算法[J]. 计算力学学报, 2002, 19(4): 403-408.
- [74] Yang J S, Huang H. An Adaptive Extended Kalman Filter for Structural Damage Identification[J]. Structural Control & Health Monitoring, 2010, 13(4): 849-867.
- [75] Sen S, Bhattacharya B. Online Structural Damage Identification Technique using Constrained Dual Extended Kalman Filter[C]. Structural Control and Health Monitoring, 2016.
- [76] 谢献忠. 结构动力学系统时域辨识理论与试验研究[D]. 湖南大学, 2005.
- [77] Berman A. Improvement of a Large Analytical Model using Test Data[J]. AIAA Journal, 1983, 21(8): 1168-1173.
- [78] Stetson K E. Inversion of First-order Perturbation Theory and its Application to Structural Design[J]. AIAA Journal, 1976, 14(4): 454-460.
- [79] Denoyer K. Method for Structural Model Update Using Dynamically Measured Static Flexibility Matrices[J]. AIAA Journal, 1997, 35(2): 362-368.
- [80] 周云. 地基板与混凝土框架结构参数识别的实验与研究[D]. 湖南大学, 2008.
- [81] Newmark N M. 地震工程学原理[M]. 中国建筑工业出版社, 1986.
- [82] 周传荣. 机械振动参数识别及其应用[M]. 科学出版社, 1989.

- [83] Farhat C H. Updating Finite Element Dynamic Models Using an Element—by—Element Sensitivity Methodology[J]. AIAA Journal, 1993, 31(9): 1702—1711.
- [84] Torkamani M. Stiffness identification of two - and three - dimensional frames[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010, 16(8): 1157-1176.
- [85] Chen J. Analytical Model Improvement Using Modal Test Results[J]. AIAA Journal, 1980, 18(6): 684-690.
- [86] Messina A, Contursi T Structural Damage Detection By a Sensitivity and Statistical-Based Method[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 216(5): 791-808.
- [87] Z.R. Lu. Features of Dynamic Response Sensitivity and Its Application in Damage Detection[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 303(1-2): 305-329.
- [88] Castillo E, Bertha, Fontenla-Romero O. A Very Fast Learning Method for Neural Networks Based on Sensitivity Analysis[J]. Journal of Machine Learning Research, 2006, 7(3): 1159-1182.
- [89] Zhang W, Chang C. Finite-element model updating for the Kap Shui Mun cable-stayed bridge.[J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE 2001, 6(4): 285-293.
- [90] 易伟建. 混凝土板的裂缝诊断[J]. 振动工程学报, 2002, 15(2): 224-227.
- [91] 易伟建, 郭国会. 连续梁桥弹性支承识别研究[J]. 中国公路学报, 2002, 15(4): 28-31.
- [92] 谢献忠, 王修勇. 基于虚拟响应信号的结构参数时域辨识研究[J]. 计算力学学报, 2007, 24(6): 859-864.
- [93] N.E. Huang Z S, S.R. Long. The Empirical Mode Decomposition and Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1998, 454: 903-995.
- [94] P C. Independent Component Analysis: A new concept[J]. Signal Processing, 1994, 36(3): 287-314.
- [95] 谢献忠, 王修勇. 结构损伤诊断与系统时域辨识研究综述[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(6): 110-115.
- [96] Kozin F. Estimation of Parameter for System Driven by White Noise Excitation[C]. Proc. of IUTAM Symp. on random vibration and Reliability, Frankfurt loder, Germany, Henning Klaus, Ed, 1985: 163-173.

- [97] Toki K, Sato T. Identification of Structural Parameter and Input Ground Motion from Response Time History[J]. Journal of Structure Engineering, 1989, 6(2): 413-421.
- [98] D. Wang A H. Element-level System Identification with Unknown Input[J]. ASCE, Journal of Engineering Mechanics, 1994, 120(1): 159-176.
- [99] 陈隽. 部分输入未知条件下的结构系统识别研究[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(4).
- [100] 李杰. 结构参数未知条件下的地震动反演研究[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 3: 27-35.
- [101] 李杰. 未知输入条件下的结构物理参数识别研究[J]. 计算力学学报, 1999, 16(1): 32-40.
- [102] 赵昕. 工程结构时域系统识别研究[D]. 同济大学, 2003.
- [103] Hoshiya M S E. Structural identification by extended Kalman filter [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1984, 110(12): 1757-1770.
- [104] Li J, Roberts J B. Stochastic Structural System Identification[J]. Computational Mechanics, 1999, 24(3): 211-215.
- [105] 陈隽. 高层建筑损伤检测中的复合反演理论与试验研究[D]. 同济大学, 1999.
- [106] 赵昕, 李杰. 转角信息未知条件下的结构参数识别方法研究[J]. 工程力学, 2003, 20(4): 55-59.
- [107] 亚德诺半导体技术有限公司(ADI): ADXRS401: mems 陀螺仪: 亚德诺(ADI) 半 导 体 [EB/OL]. /2012-12-10. <https://www.analog.com/cn/products/adxrs646.html>.
- [108] 亚德诺半导体技术有限公司(ADI): ADXRS646: mems 陀螺仪: 亚德诺(ADI) 半 导 体 [EB/OL]. / 2004-04-07. <https://www.analog.com/cn/products/adxrs401.html#product-overview>.
- [109] 罗伯特·博世有限公司: 博世传感器产品 BMI160[EB/OL]. /2018-10-16. https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all_products/bmi160[J],
- [110] 应美盛公司 (Invensense): InvenSense 在线商店的 MPU6050[EB/OL]. /2013-08-19. <https://store.invensense.com/search/?keyword=mpu6050>.
- [111] 应美盛公司 (Invensense): InvenSense 在线商店的 MPU9250[EB/OL]. /2016-06-20. <https://store.invensense.com/search/?keyword=mpu9250>.
- [112] 无锡迈凯传感科技有限公司: 惯导系统 ML7100 三轴陀螺转角仪数字输出型 [EB/OL]./2018-06-10. http://www.msensor.com.cn/products_search_result/keyword=ML7100&method=submit&searchType=1.html.

- [113] 深圳市瑞芬科技有限公司: MEMS 微机械数字型陀螺仪 TG632D[EB/OL]. /2017-08-18. http://www.rion-tech.net/download_detail/downloadsId=167.html.
- [114] 无锡北微传感科技有限公司: BW-IMU500 惯性测量单元 [EB/OL]. / 2013-07-07. <http://www.bewis.com.cn/product/276486140>.
- [115] 深圳维特智能科技有限公司: HWT901B 姿态传感器[EB/OL]. / 2017-09-18. http://www.wit-motion.com/index.php?m=goods&a=details&content_id=159.
- [116] 吉训生, 王寿荣, 许宜申. 自适应 Kalman 滤波在 MEMS 陀螺仪信号处理中的应用[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(9): 79-81.
- [117] 张琳. 一种基于 MEMS 运动姿态传感器的研究与设计[J]. 现代计算机: 上下旬, 2017, 4: 12-13.
- [118] Xu B, Chen G, Wu Z S. Parametric Identification for a Truss Structure Using Axial Strain[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2010, 22(3): 210-222.
- [119] Serdar S. Instantaneous damage detection of bridge structures and experimental verification[J]. Journal of Structural Control and Health Monitoring, 2008, 15(7): 958-973.
- [120] 朱伯龙, 许哲明. 工程结构抗震设计原理[M]. 上海科学技术出版社, 1982.
- [121] Zadeh L A. From Circuit Theory to System Theory[J]. Proceedings of the Ire, 1962, 50(5): 856-865.
- [122] 刘金琨, 沈晓蓉, 赵龙. 系统辨识理论及 Matlab 仿真[M]. 电子工业出版社, 2013.
- [123] 陈隽. 高层建筑损伤检测中的复合反演理论与试验研究[D]. 同济大学, 1999.
- [124] 陈为真, 胡晓娅. 基于时域积分的加速度信号处理[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 1: 1-4.
- [125] Yushu L. Introduction to Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings[C]. Progress in Steel Building Structures, 2002.
- [126] 陈塑寰. 结构动态设计的矩阵摄动理论[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [127] 谢利民. 基于模态柔度的钢筋混凝土结构损伤识别理论与试验研究[D]. 湖南大学, 2014.
- [128] Catbas F N, Aktan A E. Use of Modal Flexibility for Damage Detection and Condition Assessment: Case Studies and Demonstrations on Large Structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(11): 1699-1712.
- [129] Allemang R. A Unified Matrix Polynomial Approach to Modal Identification.[J]. Journal of sound and vibration, 1998, 211(3): 301-322.

致 谢

本文的研究在导师周云教授的殷切关怀和悉心指导下完成，三年来导师对我学习和生活上给予了无微不至的关怀。从课题的选择，到理论上的准备，直到最后的实验室试验和论文的撰写，在整个论文的进度和质量上周老师都进行了把控，期间给予了我耐心的指导以及多方面的支持，论文中的每一处都凝聚着他对我的付出和关心，周老师对学术严谨的态度和精益求精的工作风格，带给我深刻的影响，让我受益匪浅，终身难忘。在学习之外，也要感谢恩师在这几年里给予了我一个团结活泼、开放包容、张弛有度的团队氛围和环境，让我以及团队的每一位成员都能够充分发挥自己的特点，完成学业的同时合理规划自己的生活 and 未来，在此谨向老师致以衷心的感谢和崇高的敬意。

这三年感谢湖南大学提供的资源与平台。感谢实验室的罗宏老师、电气与信息工程学院的易威、苏杭同学对我在单片机研究方面的指导和帮助；感谢邓百川同学对我在参数识别方面的指导和帮助；感谢同济大学的赵一鸣、美国密西西比大学的曾创硕，两位博士对我课题研究提供的帮助；感谢课题组方亮、陈松柏、贾凡丁、周祎、刘蒙、胡翔、陈太平、奚树杭、张琴、李紫玮、王振生、彭涵钰、程依婷、周赛、裴熠麟、阳建波、赵瑜、胡健鑫的陪伴与帮助。

最后，谢谢我的父母一直以来的理解和关心，为我提供的一切。谢谢李超的鼓励和支持。

衷心感谢所有的评委老师抽出宝贵的时间参与本次评审和的答辩，祝各位老师身体健康，工作顺心！

曾雅丽思

2019年6月12日

附录 A 攻读学位期间发表的学术论文

- [1] 李林瑾, 周云, 曾雅丽思, 张军凯. 中国、美国和欧洲高校土木工程教学课程设置对比分析. 高等建筑教育, 2018, 27(2):41-47
- [2] 谈忠坤, 马克俭, 曾雅丽思. 正交斜放空间钢网格盒式结构动力特性试验研究及参数分析. 空间结构 (已录用)
- [3] 周云, 曾雅丽思, 赵瑜, 易伟建. 基于陀螺仪转角传感器的动态信号测量及物理参数时域识别. 湖南大学学报 (已录用)