

学校代号 10532

学 号 S160100040

分 类 号 TU375.4

密 级 公 开



湖南大学  
HUNAN UNIVERSITY

## 硕士学位论文

# 基于动态转角测量技术的框架结构 参数识别与广义模态柔度理论

学位申请人姓名 曾雅丽思

培 养 单 位 土木工程学院

导师姓名及职称 周云教授

学 科 专 业 结构工程

研 究 方 向 结构健康监测

论文提交日期 2019年6月14日

学校代号：10532

学 号：S160100040

密 级：公开

湖南大学硕士学位论文

# 基于动态转角测量技术的框架结构 参数识别与广义模态柔度理论

国家自然科学基金(51878264)

长沙市科技计划项目(kq1801010)

学位申请人姓名：曾雅丽思

导师姓名及职称：周云教授

培 养 单 位：土木工程学院

专 业 名 称：结构工程

论文提交日期：2019年6月14日

论文答辩日期：2019年6月19日

答辩委员会主席：易伟建教授

Parameter Identification and Generalized Modal Flexibility Theory of  
Frame Structure based on Dynamic Rotational Angle Measurement  
Technology

by

ZENG Yalisi

B.E. (Xiangtan University) 2016

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Structural Engineering

in the

Graduate School

of

Hunan University

Supervisor

Professor ZHOU Yun

June, 2019



# 湖南大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：

日期： 年 月 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

1、保密 ，在\_\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

2、不保密 。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

## 摘 要

针对结构识别算法应用于实际工程时,结构的转动信息难于准确测量及转角自由度通常容易被忽略的问题,本文研究了使用陀螺仪转角传感器测量动态信号的方法,基于动转角测量技术识别了结构的物理参数和模态柔度。具体研究内容如下:

(1) 针对结构转动响应信息测量困难这一问题,提出采用商业级的微机电(MEMS)陀螺仪传感器测量角度和角速度响应,对市场上现有的 MEMS 陀螺仪传感器进行了调研,介绍了 HWT901B 陀螺仪传感器的基本工作原理。通过数值模拟和试验研究,依据由平动响应信息拟合转动响应的原理,以门式钢框架结构的柱构件为试验对象,验证了 MEMS 陀螺仪传感器的静态精度和动态精度,为后续的静载试验和模态试验提供支持。

(2) 对响应信息不完备条件下的结构物理参数识别的时域方法进行理论公式推导。对一座 4 层框架结构进行算例分析,设置通过广义逆方法重构转角和采用转角真实值两种工况,在已知输入信息条件下,基于最小二乘递推算法进行了结构物理参数识别,验证了理论推导的正确性。同时物理参数识别的结果表明采用广义逆方法重构转角响应时物理参数识别的效果不够理想。然后,通过一个 3 层 2 跨的钢框架模型的动力试验验证了采用 MEMS 陀螺仪传感器直接测量转动响应相比于由广义逆方法重构转动响应对弯剪型结构进行刚度参数时域识别的效果更好。在此基础上,使用最小二乘法进一步对该钢框架进行了损伤识别,准确诊断了损伤范围。

(3) 基于考虑节点转动的多跨平面框架结构模型和不同模态测试信息,使用灵敏度方法对钢框架模型进行层间抗弯刚度参数识别和损伤识别,结果表明转角振型测试信息的补充,提高了使用灵敏度方法识别的结构物理参数的精度,较好的指示了框架结构的损伤位置。将最小二乘递推算法和灵敏度方法的损伤诊断结果进行比较,结果表明相对而言灵敏度方法损伤识别结果更为准确。

(4) 将转角信息引入模态柔度中,提出广义的模态柔度概念。根据基于频响函数截距提取模态柔度的方法,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。研究结果表明位移模态柔度比转角模态柔度的精度高,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。

**关键词:** 参数识别; 框架结构; 模态柔度; 陀螺仪; 动转角;

## Abstract

When the structure identification algorithm was applied to practical engineering, the structure rotational angle information was difficult to accurately measure and the degree of freedom of rotation was often neglected. The method of measuring dynamic signals with gyroscope sensor and the identification of structural physical parameters and modal flexibility under the dynamic rotational angle measurement information were studied in this paper. This paper mainly studies the following aspects:

(1) To solve the problem of difficult measurement of structural rotational angle response information, a commercial Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) gyroscope sensor was proposed to measure the angular velocity and angle responses, the existing MEMS gyroscope sensors in the market were investigated, and the basic working principle of HWT901B gyroscope sensor was introduced. Through numerical simulation and experimental research, based on the principle of fitting rotational response from translational response information, the static accuracy and dynamic accuracy of MEMS gyroscope sensors were verified by taking column members of portal steel frame structure as test objects, which provides support for subsequent static load tests and modal tests.

(2) Under the condition of incomplete output information, the theoretical formulas of structural physical parameters identification method based on the least square recursive method were deduced. Taking a four-story frame construction as an example for analysis, two working conditions that the rotational angle reconstructed by the generalized inverse method and the adoption of the true value of rotational angle were set up, and the physical parameters was identified, it verified the correctness of the theoretical derivation. The results of physical parameters identified under two working conditions were compared, which reflected that the effects of physical parameter identification was not very ideal when the rotational angle response was reconstructed. The measured dynamic test data and analysis results of a three-story and two-span steel frame model verified that using Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) gyroscope sensor to directly measure the rotational response was better than using reconstructed rotational response for the time domain identification of the stiffness parameters of the bending-shear structure. On this basis, the damage of the steel frame was further identified by the least square method, and the damage range was accurately diagnosed.

(3) Based on the multi-span plane frame structure model considering node rotation and different modal test information, the sensitivity method was used to identify the interlayer bending stiffness parameters and damage of the steel frame model. The results show that the angular shape test information was supplemented. The accuracy of the structural physical parameters identified by the sensitivity method was improved, and the damage position of the frame structure was better indicated. Comparing the damage diagnosis results of the least squares recursive algorithm and the sensitivity method, the results show that the damage identification results of the sensitivity method were relatively more accurate

(4) The concept of generalized modal flexibility was proposed by introducing angular information into modal flexibility. According to the method of extracting modal flexibility based on frequency response function intercept, the accuracy of modal flexibility algorithm was verified by comparing the displacement (Angle of rotation) of the structure under static load with the displacement (Angle of rotation) calculated by modal flexibility through static load test and modal test study on the steel frame model. The results show that the displacement modal flexibility was more accurate than the angular modal flexibility, and the main error was due to the insufficient participation of the modal order, and the contribution of the first three order displacement modes to the overall displacement modal flexibility was greater than that of the first three order angular modes to the overall angular modal flexibility.

**Key Words:** Parameter identification; Frame structure; Modal flexibility; Gyroscope; Angle of rotation

## 目 录

学位论文原创性声明 .....	I
学位论文授权使用授权书 .....	I
摘 要 .....	II
ABSTRACT .....	III
第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 选题背景及意义 .....	1
1.2 角度测量技术的发展及现状 .....	2
1.2.1 机械式测角技术 .....	2
1.2.2 电磁式测角技术 .....	3
1.2.3 光学测角技术 .....	3
1.2.4 陀螺仪测角技术 .....	4
1.2.5 土木工程结构中的动态转角测量及应用研究 .....	8
1.3 结构的物理参数识别方法 .....	9
1.3.1 结构物理参数识别的时域方法 .....	10
1.3.2 结构物理参数识别的频域方法 .....	11
1.4 结构参数识别的关键问题 .....	12
1.4.1 输入信息未知下的参数识别 .....	12
1.4.2 输出信息未知下的参数识别 .....	13
1.5 本文研究内容 .....	13
第 2 章 转角拟合原理与角度测量精度校验方法 .....	15
2.1 引言 .....	15
2.2 MEMS 陀螺仪传感器简介 .....	15
2.2.1 MEMS 陀螺仪传感器的选择 .....	15
2.2.2 HWT901B 陀螺仪传感器的工作原理 .....	16
2.3 基于平动测量数据的转角拟合原理与数值模拟 .....	18
2.3.1 转动曲线拟合方法 .....	18
2.3.2 数值模拟 .....	19
2.4 MEMS 陀螺仪传感器的角度测量精度验证试验 .....	29
2.4.1 传感器的静态角度测量精度验证试验 .....	29
2.4.2 传感器的动态角度测量精度验证试验 .....	32

2.5	本章小结 .....	35
<b>第 3 章</b>	<b>基于动转角测量技术的结构物理参数时域识别 .....</b>	<b>37</b>
3.1	引言 .....	37
3.2	基于最小二乘递推算法的结构物理参数识别 .....	37
3.2.1	结构计算模型的选取 .....	37
3.2.2	最小二乘递推算法 .....	38
3.2.3	基于最小二乘递推算法的结构物理参数时域识别 .....	41
3.2.4	算例分析 .....	45
3.2.5	实验室的试验研究 .....	47
3.3	钢框架结构的结构损伤识别试验研究 .....	56
3.3.1	钢框架损伤试验 .....	56
3.3.2	损伤工况下的参数识别 .....	57
3.4	本章小结 .....	58
<b>第 4 章</b>	<b>基于动转角测量技术的结构物理参数频域识别 .....</b>	<b>59</b>
4.1	灵敏度分析方法 .....	60
4.2	基于灵敏度方法的结构物理参数识别 .....	62
4.3	基于灵敏度方法的钢框架结构损伤工况下的参数识别 .....	64
4.4	本章小结 .....	65
<b>第 5 章</b>	<b>基于动态转角测量的广义模态柔度识别 .....</b>	<b>66</b>
5.1	引言 .....	66
5.2	模态分析的基本理论 .....	66
5.2.1	频响函数 .....	66
5.2.2	模态柔度 .....	68
5.2.3	模态柔度的推导方法 .....	69
5.2.4	试验模态分析 .....	71
5.3	钢框架模型试验 .....	72
5.3.1	静载试验 .....	73
5.3.2	静载试验结果 .....	74
5.3.3	模态试验 .....	76
5.3.4	模态试验结果 .....	76
5.4	静载位移与模态柔度位移 .....	79
5.5	静载转角与模态柔度转角 .....	80
5.6	本章小结 .....	83

结论与展望 .....	84
参考文献 .....	86
致 谢 .....	94
附录 A 攻读学位期间发表的学术论文 .....	95



# 第1章 绪 论

## 1.1 选题背景及意义

我国的经济自改革开放以来，一直保持着高速增长的速度，由于城镇化和工业化的发展，兴建了大量基础设施。目前，在桥梁建设方面，我国的公路桥梁总数接近 80 万座，铁路桥梁总数已超过 20 万座。在建筑结构方面，每年大约 20 亿平方米的建筑总量，几乎为全球年建筑总量的一半。150 米以上的超高层建筑截至 2015 年中国有约 470 座。此外，铁路、公路、隧道、港口等工程建设也发展迅猛。工程结构的设计使用年限长达数十年或上百年，服役周期内，受到建筑材料老化、环境侵蚀、荷载作用、疲劳效应或极端恶劣天气、自然灾害（泥石流、台风、海啸、地震等）等多方面影响，将使得结构损伤累积或达不到预期服役年限、严重者甚至会发生倒塌事故，造成生命与财产的双重损失。



a) 香港青马大桥



b) 上海中心大厦



c) 国家体育场“鸟巢”



d) 三峡工程

图 1.1 健康监测经典案例

为使结构在设计使用年限内安全服役，必须定期对其进行有效的检测、维护和保养，充分掌握结构的工作状态，确保结构的安全。在此背景下，产生了土木工程学科发展的一个重要领域——结构健康监测。结构健康监测是对结构的安全性、可靠性和耐久性进行监测的一种方法。其通过记录各种结构响应(包括环境激

励), 识别结构特征参数, 检测损伤并评估结构状态, 最后为结构的维修、管理决策提供充分的依据。

结构识别为结构健康监测的重要组成部分, 其通过对监测到的输入激励与输出响应信息进行分析, 识别得到结构的各项状态参数, 从而对结构的性能进行评估。图 1.1 为国内地标性建筑进行结构识别的四个经典案例, Chan 等<sup>[1]</sup>使用光纤光栅传感系统监测了列车在香港青马大桥上通过时引起的桥梁动应变响应; Su 等<sup>[2]</sup>对上海中心大厦进行了为期一年的施工阶段的结构性能监测, 以了解其在静载、强风、地震和温度下的结构性能。监测数据包括竖向沉降、水平度、水平位移和应变等。罗尧治等<sup>[3]</sup>应用结构温度与应力测试系统对国家体育场“鸟巢”钢结构部位的温度与应力进行了长期监测, 研究了均匀与非均匀温度场作用对结构的应力变化的影响。蔡德所等<sup>[4]</sup>应用光纤传感技术研究开发了一套混凝土裂缝监测系统和混凝土温度场监测系统, 应用于三峡工程某泄洪坝段上游面的温度场和裂缝的监测, 有利于大坝的健康诊断和安全运行。

## 1.2 角度测量技术的发展及现状

角度测量作为几何量计量的重要组成部分, 广泛应用于科研、工业制造和国防军事领域中。我国法定计量单位制中规定的角度计量单位为秒(″)分(′)度(°)和弧度(rad)两种。其中,  $1^\circ=60'=3600''$ ,  $1\text{rad}=180^\circ/\pi$ 。角度测量技术按测量方式分为静态角度测量和动态角度测量两类, 由于静态角度测量是动态角度测量的基础, 大部分的动态角度测量都可以实现静态角度测量。目前测量角度的方法按照测量原理主要分为以下四种类型: 机械式测角技术, 电磁式测角技术, 光学测角技术和陀螺仪测角技术<sup>[5]</sup>。

### 1.2.1 机械式测角技术

机械式测量技术作为最早的测量技术, 目前应用较少, 且仅适用于静态测量, 这类技术以多齿分度盘为代表。20 世纪 30 年代, 美国 A.A.Gage 公司研制了一种测角仪器, 该仪器基于多齿分度技术和机械分度定位原理来测量角度, 分度精度达到  $\pm 0.25''$ 。多齿分度盘由上齿盘和下齿盘组成, 下齿盘固定不动, 通过上齿盘抬离啮合后, 绕主轴旋转; 再次啮合, 即可根据转过的齿数进行精确分度, 如图 1.2 所示。多齿分度盘具有使用寿命长、制造成本低、结构简单、使用便捷等优点, 但由于其齿数不能无限增加, 因此精度受到限制, 应用范围有限, 一般用于自动化设备中作为机床附件<sup>[6]</sup>。

## 1.2.2 电磁式测角技术

电磁式测角技术主要利用电磁感应原理进行分度测角，相比于机械式测角技术，其测量范围和精度分辨率都得到了提升。电磁式测角技术以圆磁栅和圆感应同步器为代表。圆磁栅测角技术通过圆磁栅与被测物体一起旋转，利用磁栅与磁头之间的磁信号记录处理得到角度。圆感应同步器由定盘和转盘组成，转盘相对定盘转动，在绕组中将产生感应电势，正余弦绕组分别产生  $\sin$  和  $\cos$  信号，经电路处理转换为角度信号。电磁式测角技术工艺简单、工作稳定，也可以测量动态角度，但其使用时寿命较短，容易退磁且测量精度有限<sup>[7]</sup>。

## 1.2.3 光学测角技术

光学测角技术的优点较多，其非接触性使得其不受安装位置的限制，而且具有较高的准确度和灵敏度，具有良好的发展前景。激光光源的稳定性的改进推动了光学测量角度技术的发展，目前，常用的光学测角方法包括：光学分度头法、多面棱体法、衍射法<sup>[8,9]</sup>、光电编码法<sup>[10]</sup>、自准直法<sup>[11,12]</sup>、圆光栅法<sup>[13,14]</sup>、激光干涉法<sup>[15,16]</sup>和环形激光法<sup>[17,18]</sup>等，都成功应用于小角度的精密测量中<sup>[19]</sup>。

自准直法利用光学自准直原理，将被测物体上反射镜旋转的角度变换成自身接收器上的线位移变化，即可间接计算得到被测物体旋转的角度。光学自准直法测角的原理如图 1.3 所示。其中，美国 Newport 公司的 LDS-Vector 型激光自准直仪的分辨率可以达到  $0.02''$ ，但工作距离只有  $20\text{m}$ <sup>[20]</sup>。激光自准直法可实现非接触测量和静态、动态情况下的角度测量，但其工作距离有限，且光学系统畸变和人肉眼读数产生的误差，使得其精度难以提升。

圆光栅作为角度测量的常用器件，可通过平均读数原理减少误差，因此准确度高，且工作稳定。目前我国的国家线角度基准采用 64800 线/周的圆光栅系统，分辨率为  $0.001''$ （静态）。但在动态测量下，转速为  $10\text{ rad/s}$  时，分辨率最高只有  $1''$ <sup>[19]</sup>。

基于激光干涉技术的测角基本原理如图 1.4 所示，经直角棱镜反射的一路光束，其光程会随着旋转角度变化而变化，最终在光电探测器上的干涉条纹也会相应移动，测量干涉条纹的位移值即可计算被测物体的旋转角度。激光干涉测角技术已非常成熟，其在小角度的测量范围内准确度极高，美国、日本、德国、俄罗斯等国家已将激光干涉小角度测量技术作为小角度测量的国家基准<sup>[21]</sup>。使用双频激光外差干涉测量法测量平面角的灵敏度可以达到  $0.002''$ <sup>[22]</sup>。

环形激光测角法基于光的 sagnac 效应，如图 1.5 所示，在被测量具与环形激光器相对静止的光电自准直仪同步转动过程中，瞄准轴与量具的棱面法线重合时接口装置在光电自准直仪的光电流触发至停止脉冲的时间间隔内读取环形激光脉冲的读数即为被测角度。该测角技术是转速测量准确度最高的方法，但是它

的制造成本较高，且对测量环境要求严格，更适用于作为实验室内的标定设备，不适用于工程实践<sup>[18]</sup>。

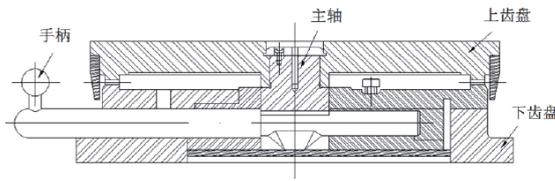


图 1.2 多齿分度盘工作原理<sup>[6]</sup>

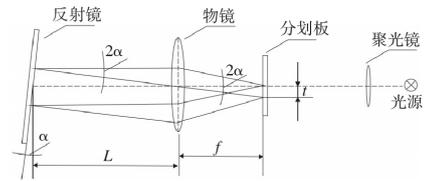


图 1.3 光学自准直原理图<sup>[20]</sup>

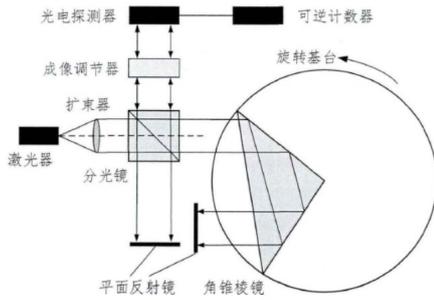


图 1.4 激光干涉测角原理<sup>[15]</sup>

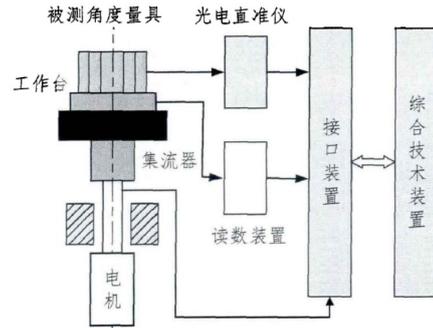


图 1.5 环形激光测角原理<sup>[18]</sup>

### 1.2.4 陀螺仪测角技术

陀螺仪是一种可以用来测量被测物体相对于惯性空间的角速度和角位移的惯性器件<sup>[23]</sup>。其基本的工作原理为：高速旋转刚体的旋转轴在不受外力影响时，其所指方向不改变。陀螺仪的整体发展历程如下：

1852年，法国物理学家莱昂·傅科首次提出了陀螺仪的定义、原理及应用设想，并发明了最早的傅科陀螺仪<sup>[24]</sup>。1908年，德国科学家安休茨发明了陀螺罗经。1909年，美国斯佩里也研制出了陀螺罗经并应用于航海导航，陀螺罗经的出现标志着陀螺仪技术的形成和现代应用的开端<sup>[25]</sup>。从20世纪20到30年代，陀螺转弯仪、陀螺地平仪和陀螺方向仪作为自主式仪表先后在飞机上使用<sup>[24]</sup>。20世纪50年代到70年代发展了液浮陀螺仪、气浮陀螺仪和动力调谐陀螺仪（又称挠性陀螺仪DTG），20世纪80年代到90年代，相继出现环形激光陀螺仪（RLG）、光纤陀螺仪（FOG）和振动陀螺仪。21世纪目前研究报导较多的是微机械电子系统陀螺仪（简称微机电陀螺仪MEMSG）。

陀螺仪在载体姿态测量方面具有稳定性好、精度高，对环境的适应能力极强等诸多优点，被广泛应用于航空飞行器姿态测量、军事轨迹测量、车辆驾驶控制、数码产品如相机防抖、手机体感操作功能等领域。在土木工程领域主要安装应用于塔式起重机、盾构机、架桥机和剪叉式高空作业平台等工程机械设备上<sup>[26]</sup>。

陀螺仪种类多样，按陀螺转子主轴所具有的进动自由度数目可分为二自由度陀螺仪和单自由度陀螺仪；按支承系统可分为滚珠轴承支承陀螺、液浮、气浮与

磁浮陀螺、挠性陀螺和静电陀螺；按物理原理分为利用高速旋转体物理特性工作的转子式陀螺和利用其他物理原理工作的半球谐振陀螺、微机电陀螺、环形激光陀螺和光纤陀螺等。评价陀螺仪性能的主要指标包括：标度因子精度、漂移稳定性、随机游走和成本等，根据上述指标可将陀螺仪划分为4类：战略级、惯导级、战术级和商业级，如表1.1所示。

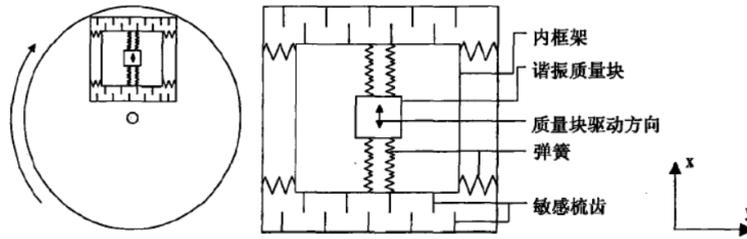
表 1.1 陀螺仪的性能指标及级别划分<sup>[27]</sup>

性能指标	战略级	惯导级	战术级	商业级
种类	静电陀螺仪、 磁浮陀螺仪、 液浮陀螺仪	激光陀螺仪、 光纤陀螺仪、 气浮陀螺仪	动力协调 陀螺仪	微机电陀螺仪
量程( $^{\circ}/s$ )	>500	>500	>400	50~1000
标度因子的精度(%FS)	<0.0001	0.001~0.0001	0.01~0.1	0.1~1
漂移稳定性( $^{\circ}/h$ )	<0.01	0.01~0.15	0.15~15	>15
随机游走( $^{\circ}/\sqrt{h}$ )	<0.01	0.01~0.05	0.05~0.5	>0.5
成本(\$)	20000	10000	1000	500
主要应用范围	战略导弹、 火箭、潜艇、 宇航飞行器	舰载、舰载、 机载导弹等	光电稳定 平台、鱼雷等	汽车导航、机器人 控制、无人机、相 机防抖、手机体感 操作功能等

注：“FS”是指满量程。

由表1.1可知，陀螺仪的使用应根据它的精度、价格、性能和具体使用环境等多方面综合考虑。目前最高精度的陀螺仪是静电陀螺仪，中高精度陀螺仪主要为光学陀螺仪，虽然他们的精度较高，但一方面他们的成本过高，不适合大量推广应用于民用领域。另一方面，体积相对较大，限制了其应用范围。MEMS陀螺仪虽然精度相对其他类型陀螺仪较低，但其具有体积小、质量轻、成本低、集成度高和易于数字化等优点，其应用前景良好<sup>[28]</sup>。

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技术是基于半导体制造技术发展而来，一般以半导体硅为材料，使用光刻、腐蚀、沉积薄膜等工艺技术制作<sup>[29]</sup>。微机电谐振陀螺仪即MEMS陀螺仪，其使用微纳技术将机械装置和电子线路集成于微小的硅芯片上，通过使用谐振质量元件，基于哥氏加速度效应来测量角速度<sup>[30]</sup>，MEMS陀螺仪的机械结构如图1.6所示。当MEMS陀螺仪被驱动时，中心位置的谐振质量块沿x轴方向振动。当转台以角速度 $\omega$ 旋转时，由于哥氏效应产生了与角速度 $\omega$ 成正比的哥氏力，将使得质量块沿y方向运动。通过上下电容板测量谐振元件及其框架由于哥氏效应产生的位移，然后进一步计算可以得到输入角速度的大小和方向<sup>[31]</sup>。

图1.6 MEMS陀螺仪的微机械结构<sup>[31]</sup>

#### 1.2.4.1 国外 MEMS 陀螺仪的发展现状

20 世纪 60 年代，美国 GE（General Electric Inc.）公司利用压电石英晶体换能器制造出压电振动式陀螺仪，随后美国沃尔森公司推出利用石英晶体为振动体，金属电极激励和检测的石英陀螺仪<sup>[32]</sup>。由于制造工艺较为落后，当时的石英陀螺仪尺寸较大。20 世纪 80 年代以来，美国 BEI（贝）公司、美国 Honeywell（霍尼韦尔）公司、美国的 Draper（德雷珀）实验室、Litton（利顿）实验室、Jet Propulsion Laboratory（JPL）实验室、麻省理工学院、英国的 BAE 公司、德国的 LITEF 公司、法国的 SAGEM 公司、俄国的 Vector 公司以及加拿大、瑞典、韩国、日本的芯片制造公司和高等院校等都在开展 MEMS 陀螺仪的研究<sup>[27,33-35]</sup>。

1985 年，在美国军方的补贴政策下，Draper 实验室开始了 MEMS 陀螺仪的研究，并于 1988 年首次发表了关于 MEMS 陀螺仪的研究成果<sup>[36]</sup>，如图 1.7 所示的框架振动陀螺仪。该陀螺仪工作时，外框架由驱动电极的静电力驱动，内框架在陀螺力矩作用下绕内挠性轴振动，受科里奥利力影响，内框架还会产生与驱动频率相等的振动。在实际应用中，由于内框架的这两种振动频率一致，难以彻底消除，因此这种陀螺的噪声信号很大。

1993 年，该实验室在框架振动陀螺仪的基础上，研制出第二代 MEMS 陀螺仪：音叉式线振动陀螺仪<sup>[37]</sup>，它的尺寸小于 1 毫米。音叉式线振动陀螺仪的照片如图 1.8 所示，在封装环境下压力为 100mTorr 时，角度随机游走为  $0.72^\circ/\sqrt{h}$ ，漂移稳定性为  $0.2^\circ/s$ ，带宽为 60Hz 下的分辨率为  $0.1^\circ/s$ 。

1996 年，Draper 实验室开发了振动轮式陀螺仪<sup>[38]</sup>。该陀螺仪使用与音叉式线振动陀螺仪中使用的相同的溶解晶片工艺制造。与音叉式线振动陀螺仪相比，它在旋转运动中使用梳状驱动机构驱动。这种驱动方式极大地提高了陀螺的精度。实验结果表明，该传感器的速度传感性能优于  $0.1^\circ/s$ 。

除了 Draper 实验室，加州大学伯克利分校在 MEMS 陀螺仪的发展上也取得了巨大的进步。1996 年，该大学发明了 Z 轴振动 MEMS 陀螺仪<sup>[39]</sup>采用梳状驱动器和电容传感器实现了角速度的测量。

1999年,横滨技术中心的 Mochida 和 Tamura 研究了 MEMS 陀螺仪驱动模态与检测模态之间的交叉耦合,并设计制作了独立的支承梁结构来减小耦合<sup>[40]</sup>。该陀螺仪的交叉耦合度只有 1%,带宽为 10Hz 下的分辨率为  $0.07^\circ/\text{s}$ 。

2004年,美国 ADI 公司研发的 ADXRS 系列 MEMS 陀螺仪,封装尺寸为  $7 \times 7 \times 3 \text{mm}^3$ ,功耗仅有 25mw,芯片内部集传感器敏感头与集成电路(包括:调理电路、ADC、控制)于一体,集成度高、耐冲击性好、功耗低,代表了 MEMS 陀螺系统集成技术的飞跃<sup>[41]</sup>。

2010年,挪威 Sensoror 公司发布了型号为 SAR500 的超高精度数字 MEMS 陀螺仪,该陀螺仪零偏稳定性达到  $0.05^\circ/\text{h}$ ,角速率随机游走  $0.002^\circ/\sqrt{\text{h}}$ ,具备自动寻北能力<sup>[42]</sup>。

2017年,一直从事 MEMS 谐振环陀螺研制的日本硅传感系统公司(Silicon Sensing Systems),发布的最新产品的零偏稳定性优于  $0.06^\circ/\text{h}$ ,角度随机游走优于  $0.01^\circ/\sqrt{\text{h}}$ ,是谐振环陀螺的最高水平。美国在国防部高级研究计划局的导航级集成微陀螺仪(DARPA NGIMG)项目支持下,多环谐振盘陀螺仪的研究取得了突破性进展,基于 8mm 直径硅材料的多环谐振盘陀螺仪实现了零偏稳定性优于  $0.01^\circ/\text{h}$ ,角度随机游走优于  $0.002^\circ/\sqrt{\text{h}}$ <sup>[43]</sup>。

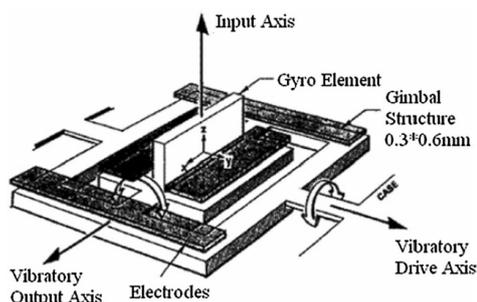


图 1.7 微机电双框架陀螺仪<sup>[33]</sup>

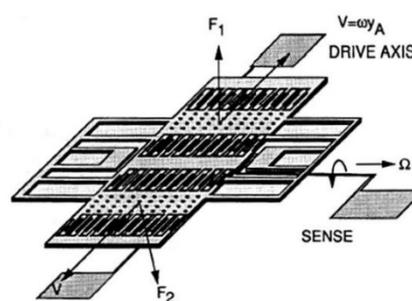


图 1.8 音叉式线振动陀螺仪<sup>[33]</sup>

#### 1.2.4.2 国内 MEMS 陀螺仪的发展现状

我国对 MEMS 陀螺仪的研究起步相对较晚,从 1995 年末开始,国防科工委投入 6000 万元以上的经费主要用于惯性器件的基础性研究,并将硅微机电陀螺技术纳入 863 计划中<sup>[34]</sup>。目前,在该领域研究较多的单位有清华大学、北京大学、东南大学、中北大学、西北工业大学、上海微系统研究所、航天时代电子公司、无锡北微传感科技有限公司等。

清华大学于 1996 年开始研制 MEMS 陀螺仪并于两年后开发出第一个音叉式陀螺仪样机,其漂移为  $3^\circ/\text{s}$ <sup>[35]</sup>。2005 年,上海微系统研究所报道了一种静电驱动的压阻检测式 MEMS 陀螺仪,该传感器的谐振频率为 989Hz,分辨率为  $0.33^\circ/\text{s}$ <sup>[44]</sup>。2012 年,中国科学院传感器技术国家重点实验室研制的新型 MEMS 振动环形陀

螺仪，实现分辨率约为  $0.05^\circ/\text{s}$ <sup>[45]</sup>。目前，清华大学导航与控制教研组已掌握了高精度静电陀螺仪的成熟技术，姿态漂移仅为每小时万分之五<sup>[34]</sup>。

虽然我国的 MEMS 陀螺仪技术在近年内发展很快，但由于起步较晚，且受国内微电子加工技术和集成电路技术发展的限制，目前国内的 MEMS 陀螺仪大多为实验室样品，还处于实验阶段。与国外发达国家相比，在性价比、质量和商品化等方面仍有较大差距。

### 1.2.5 土木工程结构中的动态转角测量及应用研究

目前土木工程领域关于动态旋转角度的测量研究不多，主要是因为转动响应的最大振幅通常在毫弧度范围以内，所以要求仪器必须非常灵敏，而且需对测量的运动以外的其他运动非常不敏感<sup>[46]</sup>。通过文献调研发现，Ewins D J等<sup>[47]</sup>在文献中对动转角间接测量方法进行了详细的分类介绍。包括采用附加T模块法<sup>[48]</sup>，激光多普勒测振仪<sup>[49]</sup>，激光位移计<sup>[50]</sup>等测量转角，但这些测量方法和设备过于复杂，难以运用于自由度较多的情况。Lee等<sup>[51]</sup>采用商用相机和低成本的帧捕获器，利用事先标定参数的图像处理技术，测量了五层试验塔在激振器下的角度响应。然而，摄像机的方法需要额外的计算图像处理，如像素扫描、目标识别和轮廓定义，实际应用并不方便。也有学者尝试采用应变推算转角，Xia等<sup>[52]</sup>通过在广州塔上安装振动应变仪，利用实时监测的应变数据计算弯曲梁型结构顶部的倾斜角度；Dimsdale等<sup>[46]</sup>采用在杆件两端粘贴应变片的方式间接计算杆件两端的弯曲转角，该方法的应用前提是与其它杆件的连接方式不影响杆件的相对转动。测量转角自由度的传感器技术远不如测量位移自由度的传感器成熟，目前采用较多的是倾角仪和陀螺仪，Hou等<sup>[53]</sup>利用MEMS倾角仪监测钢筋混凝土柱在地震荷载作用下的结构旋转角，该传感器对被测物体的振动频率非常敏感，仅适用于1Hz以内的外激励频率。倾角仪适合低频的振动，而陀螺仪在高频振动下的性能更为稳定，是测量动转角的理想传感器。

以上主要对转动响应的测量的方法进行了总结，以下将对结构的转动研究及获得转角后的应用进行介绍：

旋转地震学是研究地震、爆炸和环境振动等引起的地面旋转运动，其为地震学研究中的新兴领域。Teisseyre等<sup>[54]</sup>提出旋转运动不在经典弹性理论的涵盖范围内，讨论了耦合应变和旋转波的传播。Lee等<sup>[55]</sup>对旋转运动做了大量研究与分析工作。Nigbor等<sup>[56]</sup>利用美国Kinematics公司的FBA-23型三分向加速度计、BEI公司的QRS11-00010-200角速度传感器（由三个单轴向陀螺仪组成）和Kinematics公司的SSR-1型数字记录器，研发了一套6自由度的地面运动测量系统，并成功运用于1000吨药量的爆破振动测量。Zhang等<sup>[57]</sup>对旋转运动在地震学中的应用进行了总结，并介绍了旋转地震学研究存在的问题。

对高层建筑的扭转振动,梁枢果等<sup>[58]</sup>推导了其扭转风振力公式,通过建立扭转动力风荷载解析模型,建立了高层建筑扭转动力响应频域的计算方法。徐培福等<sup>[59]</sup>对地震作用下高层建筑的扭转振动进行了研究,讨论了《高层建筑混凝土结构技术规程》中控制结构地震扭转效应的主要方法,并提出了高层建筑结构在抗震设计中应考虑扭振效应偶然性及动力增大作用的建议。

此外,孙伟等<sup>[60]</sup>使用数字图像相关方法(DICM)测试了钢管混凝土框架梁柱连接节点的弯矩—转角关系,将梁柱连接节点加强前后的刚度进行对比,结论表明DCIM方法可成功实现对钢管混凝土框架节点转角承受荷载后的性能进行判断。但该方法仅适用于小的静态转角测试。杨学山等<sup>[61]</sup>使用QY型倾角仪测得桥梁各个测点的倾角,并通过软件计算得到桥梁各截面的挠度,该测量挠度的方法已在多座桥梁中得到实际应用。徐良等<sup>[62]</sup>结合GPS技术和随机减量方法成功实现对大跨悬索桥梁的扭角进行在线实时监测,并通过对虎门悬索桥的模式识别结果和有限元计算结果比较,证明了该方法的实用性。该方法是通过GPS位移测试系统测得的对称点的位移计算桥梁的扭转角度,属于间接测量转角,其对比的有限元计算和位移测试结果的自振频率无法直接验证转角测量的精度。王祥建等<sup>[63]</sup>使用转角重构公式获得转角的时程响应,在输入未知的情况下,基于SVDmLM法和复合反演算法,对弯剪型结构进行了参数识别和地震动反演。转角响应的引入,减少了结构识别方程的不适定性,并有效提高了识别和反演的精度。

上述研究表明,目前的转角测量技术整体不如位移测量技术成熟,土木工程结构中,各国学者尝试了多种直接或间接获得结构转角响应的方法,相对而言,陀螺仪传感器测量动转角响应的效果较为理想。关于获得转角后的应用,大多数研究集中于地震作用下的结构转动研究。对获得动转角信息下的结构识别研究较少,主要是进行理论分析,很少通过试验进一步验证。

### 1.3 结构的物理参数识别方法

系统识别方法始于上世纪70年代,引入土木工程领域已有近50余年的发展历史<sup>[64]</sup>。基于系统识别理论,按照系统输入、系统输出和所研究的系统可以将系统识别的反问题分为参数识别和荷载反演两类,第一类反问题参数识别是根据系统的输入和输出的响应数据确定系统数学模型中的具体参数。第二类反问题荷载反演是依据系统的输出和系统的数学模型求取系统的输入。系统识别方法是工程结构损伤诊断和状态评估的重要手段,它可以从建筑物动力响应中识别出结构的当前状态。结构的性态通常用结构模态参数(主要为自振频率和振型)和结构物理参数(主要为刚度参数)来描述。结构物理参数的变化相比模态参数的变化,更为直观的反映了结构状态的改变<sup>[65]</sup>。结构物理参数识别方法根据识别所需响应信号的形式可划分为两类,结构物理参数识别的时域方法和频域方法。

### 1.3.1 结构物理参数识别的时域方法

时域方法直接利用结构动力响应的时程测量数据识别结构的物理参数。其中最经典的两类算法为最小二乘类算法和卡尔曼滤波算法。前者适用于线性参数系统的识别，后者既可用于线性亦可用于非线性参数系统识别。

最小二乘类算法是根据系统的输入、输出信息和参数所建立的结构动力学线性方程，通过扩展采样区间从而扩充方程数目，进而建立结构参数的超定方程，基于最小二乘准则识别结构参数<sup>[65]</sup>。该算法通过计算待识别参数的最优估计来使得响应信息的实际测量值与理论模型所计算的响应值之间的误差的累计平方和最小，计算过程简单。研究证明当观测序列长度趋于无穷大时，参数的估计值将依概率收敛于真实值<sup>[65]</sup>。即只要观测时刻和获得的测量数据足够多，就可以应用最小二乘方法进行参数识别。仅使用最小二乘估计法很难一步求得最优解，为提高计算精度，提出了最小二乘递推算法，其通过迭代方式，由前一刻的参数估计值加修正项不断优化得到最优解。最小二乘递推算法将在论文的 3.2.2 节中进行详细论述。此外，在经典最小二乘法的基础上，为解决矩阵求逆过程中会出现矩阵奇异情况、对复杂结构求解效率低等问题，进一步发展了加权最小二乘算法、遗忘因子算法、广义最小二乘、多级最小二乘、限定记忆法等多种修正算法。文献<sup>[65]</sup>对最小二乘类算法做了概述。此外，近年来新提出的识别算法本质也属于最小二乘类识别算法，如 Haldar 等<sup>[66]</sup>提出的输入未知下基于有限元的时域系统识别方法、李杰等<sup>[67]</sup>提出的统计平均算法等。

1960 年，R.E.Kalman 第一次提出卡尔曼滤波方法，其为一种递推最小方差估计，最开始也无法处理非线性问题。1970 年，Jazwinski 等<sup>[68]</sup>提出扩展卡尔曼滤波算法，该算法对滤波估计值附近做线性化处理，即在给定时间间隔内用增量线性方程替代原系统方程，解决了非线性参数系统识别问题。扩展卡尔曼滤波算法的基本思想是将系统参数作为增广状态向量，利用其关于时间的导数为零的特征，代入卡尔曼滤波器的状态方程和测量方程中，通过对系统的动态测量信息滤波、估计，计算出系统参数的估计值<sup>[65]</sup>。1984 年，Hoshiya 等<sup>[69]</sup>提出将扩展卡尔曼滤波与带目标函数的全局加权迭代过程相结合的一种算法，使得扩展卡尔曼滤波算法的识别结果快速收敛于稳定值，并将其应用到地震作用下的多自由度体系的参数识别过程中。1990 年，宝志雯等<sup>[70]</sup>提出基于扩展卡尔曼滤波算法的剪切型结构参数识别的方法，并识别了四层剪切型框架结构的刚度和阻尼参数。1991 年，尚久铨等<sup>[71]</sup>提出缩减变量型扩展卡尔曼滤波算法，其减少了待识别参数数量，降低了矩阵阶数，提升了算法的精度和效率。1995 年，李杰等<sup>[72]</sup>提出基于微分变换的参数卡尔曼滤波算法，避免了系统状态变量与增广状态变量之间的非线性耦合。2002 年，赵昕等<sup>[73]</sup>提出了加权全局迭代参数卡尔曼滤波算法，通过对每次迭代的

误差协方差矩阵加权提高算法的识别精度。2010年, Yang等<sup>[74]</sup>提出一种基于扩展卡尔曼滤波方法的自适应跟踪技术, 通过跟踪系统参数的变化, 实现了对结构进行损伤诊断。2016年, Subhamoy等<sup>[75]</sup>提出了一种基于约束双扩展卡尔曼滤波算法, 即两个并行的扩展卡尔曼滤波器同时滤波测量响应(作为状态)和估计状态转换矩阵的元素(作为参数)。在估计增益矩阵时, 对刚度和阻尼参数进行约束, 以确保它们保持在实际范围内, 并成功实现对剪切型框架和三维空间桁架的损伤识别。

### 1.3.2 结构物理参数识别的频域方法

频域方法需要先将时域内的响应数据转化至频域内, 求得结构固有频率、振型、频响函数等模态参数, 再通过模型修正或对特征值反问题进行求解来识别计算模型中的物理参数, 其基本思想是使模型计算得到的结构模态与实测模态一致。模型修正技术涉及到模型自由度匹配、模型相关准则、灵敏度分析、系统可控与可观性、摄动原理、线性方程组求解条件以及非线性优化等诸多理论问题<sup>[76]</sup>。

结构物理参数识别的频域方法根据识别的物理参数类型可划分为两类, 第一类为识别结构物理特征矩阵(如质量、阻尼、刚度矩阵), 第二类为识别结构特征参数(如弹性模量、层间阻尼、层间刚度等)。

#### (1) 矩阵型识别方法

矩阵型识别法可划分为矩阵型直接识别法和矩阵型修正识别法。前者直接使用结构的模态信息, 后者先通过理论分析得到特征矩阵, 然后以实测模态信息为标准修正并识别该特征矩阵。矩阵型直接识别法包括由完整模态识别结构的刚度矩阵方法、Jacobi 矩阵特征值反问题方法等。矩阵型修正识别方法包括最小修正量法<sup>[77]</sup>、摄动法<sup>[78]</sup>等。为解决模态测试不足带来的截断误差, 在矩阵型直接识别法的基础上发展了识别结构柔度矩阵<sup>[79]</sup>的方法。由于动力测试中一般获得的是低阶频率, 结构的柔度矩阵与固有频率的平方成反比, 而刚度矩阵与其成正比。因此, 柔度矩阵的识别误差比刚度矩阵的识别误差低。矩阵型识别方法的缺点是容易在修正过程中使质量、刚度矩阵失去带状特性<sup>[80]</sup>。

#### (2) 参数型识别方法

参数型识别方法可分为参数型直接识别法和参数型迭代识别法。前者求解的是线性参数方程, 后者通过迭代求解非线性参数方程。参数型直接识别法包括Newmark法<sup>[81]</sup>、Ibrahim法<sup>[82]</sup>等。参数型迭代识别法包括灵敏度方法<sup>[83]</sup>、雅可比迭代识别法<sup>[84]</sup>、摄动迭代法<sup>[85]</sup>等。

灵敏度方法是参数迭代识别法中的常用方法, 其首先通过模态试验的实测模态参数, 计算灵敏度矩阵。然后建立最小化目标函数, 最后通过迭代运算, 求取使目标函数最小的待识别参数。灵敏度方法常用于对结构进行损伤识别的研究,

Messina<sup>[86]</sup>基于灵敏度特征值分析，提出了损伤定位保证准则和多损伤定位保证准则。Lu 等<sup>[87]</sup>将损伤识别问题转换

为使得结构实测响应与计算响应之间差的平方和最小的目标优化问题，提出了使用灵敏度识别结构单元层次上的损伤的方法。Castillo 等<sup>[88]</sup>在文献中介绍了一种基于灵敏度分析的神经网络快速学习方法。Zhang 等<sup>[89]</sup>通过对 Kap Shui Mun 大桥安装加速度、位移、应变、温度、风力传感器，建立健康监测的系统，然后用改进的灵敏度方法进行了参数识别。易伟建等<sup>[90,91]</sup>基于灵敏度分析方法对钢筋混凝土板及桥梁结构的损伤诊断进行了研究。灵敏度方法目前已经得到了广泛的研究和应用，其可以识别出结构单元的损伤程度，但对于大型的复杂结构，计算量过大。

## 1.4 结构参数识别的关键问题

近五十年来，国内外学者对结构参数识别开展了大量研究，并积累了丰富的研究成果。结构参数识别的关键问题包括：测量噪声、反问题的不适应性（病态）和信息不完备问题<sup>[76]</sup>。

在结构动力测试过程中，测量噪声是不可避免的。常用的信号去噪方法为频域内的滤波方法和时域内的平均方法。基于小波变换<sup>[92]</sup>、基于经验模态分解的 Hilbert-Huang 变换<sup>[93]</sup>、盲源分离/独立成分分析等算法<sup>[94]</sup>都对测量噪声进行了有效去除，提高了结构参数识别算法的识别精度。

结构参数识别属于典型的数学物理反问题，反问题具有不适应性。正则化法、投影法、递推法等方法为解决不适宜问题的常用解算方法，文献<sup>[95]</sup>做了详细介绍。

若假定结构识别研究时，输入（激励）和输出（响应）均已知为信息完备，则实际工程中的大多数参数识别问题都属于信息不完备下的参数识别问题。通常我们对建筑物的动力测试采用环境激励，如地脉动、风荷载等。这些激励的作用位置和大小通常难以准确测量。同时，由于受到传感器数量和安装位置的限制，我们不可能获得结构所有自由度的响应信息。

### 1.4.1 输入信息未知下的参数识别

对于输入信息未知下的参数识别问题，通常有以下两种思路：

#### （1）假定输入性质

假定系统的激励属于平稳的随机信号，可利用随机减量法获得满足工程要求的自由振动响应，进而通过采用 ITD 法(The Ibrahim Time Domain Technique)识别结构参数。ITD 法在机械、航天等工程领域应用广泛<sup>[82]</sup>。文献<sup>[96]</sup>假定环境激励

为白噪声，基于最大似然法利用白噪声的统计特性识别结构参数。文献[97]假定对于地震作用的情况，结构响应尾部为自由衰减振动，并以此来识别结构参数。

## (2) 激励为一般荷载

1997年，Wang等<sup>[98]</sup>提出一种利用结构响应直接识别结构参数的算法，其假定计算区间起始处的前2个（4个）时刻处的结构作用力为零，并以此为初始条件迭代计算，该算法的局限性在于假定初始段结构的输入力为零。2000年，李杰、陈隽等首次提出了动力复合反演的概念，并相继提出了全量补偿法<sup>[99]</sup>、统计平均法<sup>[100]</sup>、分组归一化统计平均法<sup>[101]</sup>等多种复合反演算法。以上算法对不同的激励类型根据其物理、力学性质进行辅助和修正，再迭代求解结构物理参数，具有较高的参数识别精度。

### 1.4.2 输出信息未知下的参数识别

结构响应信息不完备是制约参数识别应用于实际工程中的一个主要原因，通常时域方程中主要使用位移类信息，转角类信息很难测试得到，往往只能测量结构的一个状态量，加速度、速度或位移响应的一种，而且转角信息难以准确测量。如何在测量信息有限的情况下识别参数以及如何进行信息不完备情况下的识别问题是研究重点之一<sup>[102]</sup>。

为了解决这些问题，众多学者展开了相关研究。扩展卡尔曼滤波<sup>[103]</sup>方法可以求解响应信息不完备下的结构参数识别问题，但结构参数的识别精度低，甚至会出现参数发散现象。传统方法主要通过重构技术解决时域识别时测量信息的不完备问题。结构的平动信息不完备的处理方法如下：李杰等<sup>[104]</sup>在获得系统的位移响应后，通过采用微分算子变换方法求得速度与加速度响应，完成系统的参数识别。李国强等<sup>[65]</sup>采用积分算子变换方法，实现了在无需初速度信息的情况下，由加速度响应重建位移，速度响应。结构转动信息的计算问题主要采用静力凝聚法<sup>[65]</sup>和广义逆方法<sup>[105]</sup>通过水平位移测量值重构转动信息，前者需要预先知道结构的参数信息，而后者无需，但是两种方法计算效果近似，因此广义逆方法更具适用性。此外，赵昕等<sup>[106]</sup>采用一组正交基函数对梁式构件的平动反应曲线进行拟合，从而获得梁的转角响应信息。

上述研究表明，结构识别经过近50年的发展，在参数识别的理论和方法上有较大进展，但应用于结构工程实践中，仍有很多问题值得进一步研究。在响应信息不完备方面，转角自由度的忽略对参数识别带来的影响及转角重构方法在实际结构中应用的表现如何有待于深入研究。

## 1.5 本文研究内容

在对MEMS陀螺仪传感器的静态和动态转角测量精度进行验证的基础上，本

文研究了在获得转动测量信息的前提下，基于最小二乘递推算法和灵敏度方法对弯剪型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力一位移模态柔度和力一转角模态柔度。本文的具体研究内容如下：

(1) 使用商业级的微机电 (MEMS) 陀螺仪传感器测量角度和角速度响应，对市场上现有的 MEMS 陀螺仪传感器进行了调研，介绍了 HWT901B 陀螺仪传感器的基本工作原理，依据由平动响应信息拟合转动响应的原理，对 MEMS 陀螺仪传感器的静态精度和动态精度进行验证。

(2) 对响应信息不完备条件下的结构物理参数识别的时域方法进行理论公式推导。以一座 4 层框架结构为算例进行分析，设置通过广义逆方法重构转角和采用转角真实值两种工况，在已知输入信息条件下，基于最小二乘递推算法对结构物理参数识别，验证理论推导的正确性。然后，通过一个 3 层 2 跨的钢框架模型的动力试验比较采用 MEMS 陀螺仪传感器直接测量转动响应与由广义逆方法重构转动响应对弯剪型结构进行刚度参数时域识别的效果。在此基础上，使用最小二乘法进一步对该钢框架进行损伤识别。

(3) 基于考虑节点转动的多跨平面框架结构模型和不同模态测试信息，使用灵敏度方法对钢框架模型进行层间抗弯刚度参数识别和损伤识别，对不同组合的模态测试信息引起的结构物理参数的变化进行分析，并比较最小二乘法和灵敏度方法的参数识别结果和损伤诊断结果。

(4) 结构的模态柔度矩阵可以为结构系统的振动特性分析和损伤诊断提供依据。将转角信息引入模态柔度中，提出广义的模态柔度概念。根据基于频响函数截距提取模态柔度的方法，通过对钢框架模型进行静载试验和模态试验研究，比较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)。

## 第2章 转角拟合原理与角度测量精度校验方法

### 2.1 引言

本文的研究选用的是商业级的 MEMS 陀螺仪传感器, MEMS 陀螺仪传感器体积小, 内部含有多个运动单元, 因此传感器性能对工作环境变化较为敏感。测量过程中的外界冲击振动, 敏感环境干扰和自身漂移率都会影响陀螺仪的精度。考虑到动力试验时, 结构将产生高频的往复振动, 有必要对 MEMS 陀螺仪传感器在受到外界冲击振动下的动态精度进行校验, 一般采用高精度测试转台来检验和评定陀螺仪性能, 转台为精密测试设备, 一般土木工程应用很少, 考虑购买转台或对陀螺仪的精度进行检测的送检价格都过高, 受实验条件所限制, 所以先依据由平动响应信息拟合转动响应的原理, 进行了数值模拟, 验证角度拟合方法<sup>[106]</sup>的可行性; 然后通过试验验证了 MEMS 陀螺仪传感器的静态精度和动态精度。

### 2.2 MEMS 陀螺仪传感器简介

#### 2.2.1 MEMS 陀螺仪传感器的选择

为获得适用于后文钢框架试验的陀螺仪传感器, 本文对国内市场上售卖的商业级 MEMS 陀螺仪传感器做了调研, 主要分为两种类型, 一种为 MEMS 陀螺仪传感器模块, 需要后期进行二次开发处理。一种为已经封装的成品, 可以直接使用。市场调研的结果如下:



图 2.1 MEMS 陀螺仪传感器模块图

表 2.1 MEMS 陀螺仪传感器模块参数

名称	轴数	测量范围 (°/s)	灵敏度	噪声密度
ADXRS401 <sup>[107]</sup>	单轴	±75	15mv/°/s	3mv(rms)
ADXRS646 <sup>[108]</sup>	单轴	±300	9mv/°/s	0.01°/s/√Hz
BMI160 <sup>[109]</sup>	六轴	±2000	16.4LSB/°/s	0.007°/s/√Hz
MPU6050 <sup>[110]</sup>	六轴	±2000	16.4LSB/°/s	0.005°/s/√Hz
MPU9250 <sup>[111]</sup>	九轴	±2000	16.4LSB/°/s	0.01°/s/√Hz



图 2.2 MEMS 陀螺仪传感器图

表 2.2 MEMS 陀螺仪传感器参数

名称	测量范围 ( $^{\circ}/s$ )	采样频率 (Hz)	分辨率 ( $^{\circ}/s$ )	接口
ML7100 <sup>[112]</sup>	$\pm 300$	50	0.1	RS232/RS485/RS422/TTL
TG632D <sup>[113]</sup>	$\pm 300$	50	0.1	RS232/RS485/RS422/TTL/SPI
BW-IMU500 <sup>[114]</sup>	$\pm 300$	100	0.01	RS232/RS485/TTL/CAN
HWT901B <sup>[115]</sup>	$\pm 2000$	200	0.01	RS232/TTL

MEMS 陀螺仪传感器模块多见于 IMU (Inertial measurement unit 惯性测量单元) 和 AHRS (Attitude and heading reference system 航姿参考系统) 中, AHRS 由加速度计, 磁力计和陀螺仪构成。IMU 包含陀螺仪和加速度计。表 2.1 中的九轴代表的是三轴加速度计、三轴陀螺仪和三轴磁力计, 六轴代表的是三轴加速度计和三轴陀螺仪。其中 ADXRS 系列的两款产品测的是 Z 轴的角速度。由表 2.1 可知, MPU9250 是比较理想的 MEMS 陀螺仪传感器模块, 其测量范围较大, 轴数相较而言更多, 九轴传感器融合了多种传感器的数据, 弥补了单个传感器在计算准确的位置和方向时的不足, 从而可以实现更高的精度。由表 2.2 可知, HWT901B 这款传感器在分辨率、采样频率、测量范围上都胜于其他的三款产品。

### 2.2.2 HWT901B 陀螺仪传感器的工作原理

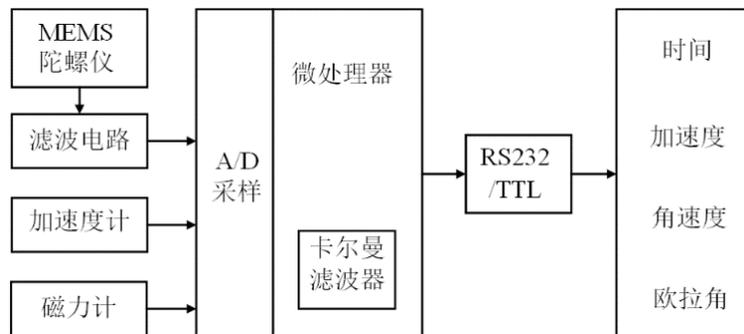


图 2.3 角度测量系统原理图

陀螺仪传感器直接采集的是角速度信号, 并通过对角速度积分得到的角位移。MEMS 陀螺仪本身容易受到噪声影响, 不能承受较大的震动, 同时由于温度变化、

不稳定力矩等因素，会产生漂移误差，并会随着时间的推移而累加变大，通过积分将使误差变得更大。因此，单独使用陀螺仪作为倾角传感器并不合适<sup>[116]</sup>。基于 MEMS 的角度测量系统一般由 MEMS 陀螺仪、加速度计、磁力计、微处理器、集成电路及相应的软件组成。角度测量系统的三轴陀螺仪提供角速度，三轴加速度计提供加速度，三轴磁力计提供磁场强度和方向，用高性能的微处理器对陀螺仪、滤波电路、磁力计和加速度计构成的传感器组进行高速 A/D 采集后，通过卡尔曼动态滤波算法对传感器采集的数据进行补偿和信息融合，经过四元数方法解算得到姿态角，又称欧拉角即分别围绕 X, Y, Z 轴旋转的俯仰角，偏航角和翻滚角<sup>[117]</sup>。角度测量系统的原理图如图 2.3 所示。

□表 2.3 HWT901B 陀螺仪传感器主要参数

参数	数值
电压	3.3V-5V
电流	<40mA
体积	55mm×36.8mm×24mm
量程	加速度：±16g，角速度：±2000°/s，角度：±180°
稳定性	加速度：0.01g，角速度：0.05°/s
测量误差	X, Y轴：0.05°，Z轴：1°
数据输出频率	0.1Hz-200Hz

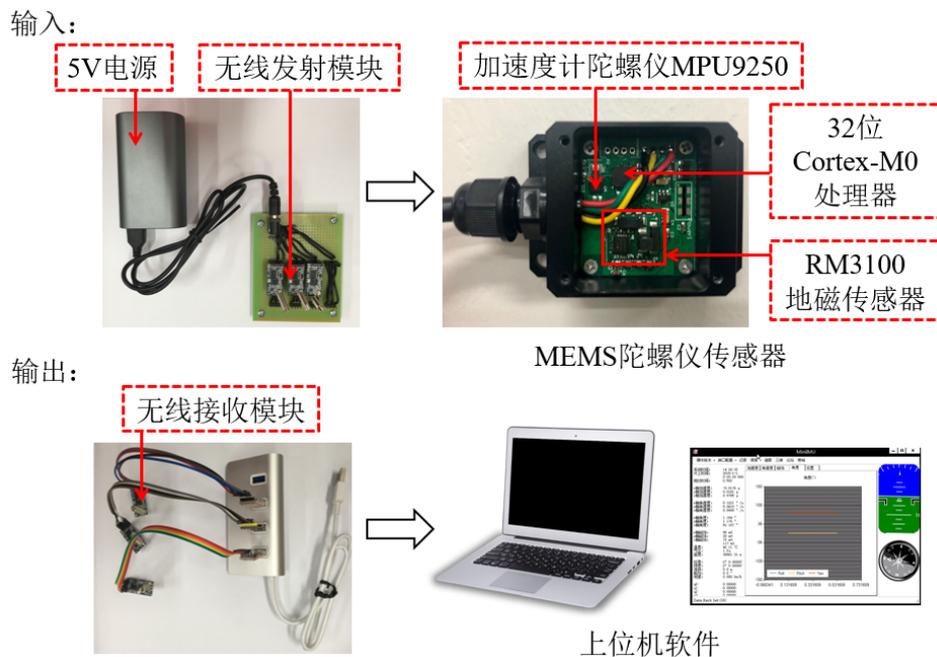


图 2.4 动态角度测量系统

本文的研究选用的是深圳维特智能科技的 HWT901B 姿态测量传感器，它集成了高精度的陀螺仪、加速度计、地磁场传感器等模块。HWT901B 陀螺仪传感器的性能参数如表 2.3 所示，其采集数据后，通过 TTL 电平串口将数据传输至上

位机，再由上位机将数据发送至 PC 机上。考虑到实际测量时距离较远，研究团队对其进行改造加入了 HC-12 无线收发传输串口通讯模块，整套动态角度测量系统的连接方法如图 2.4 所示。

## 2.3 基于平动测量数据的转角拟合原理与数值模拟

### 2.3.1 转动曲线拟合方法

如图 2.5(a)所示的等截面梁单元，其梁端位移列向量为：

$$\{d\}^e = [u_i \quad v_i \quad \theta_i \quad u_j \quad v_j \quad \theta_j]^T \quad (2.1)$$

梁端力的列向量为：

$$\{F\} = [U_i \quad V_i \quad M_i \quad U_j \quad V_j \quad M_j]^T \quad (2.2)$$

其中， $u$ 、 $v$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的线位移， $\theta$  为角位移。 $U$ 、 $V$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的力， $M$  为弯矩。

$$\theta = dv/dx \quad (2.3)$$

梁单元是承受横向力和弯矩的杆件，不考虑梁的轴向变形的影响，则梁单元在平面内有 4 个自由度，包括  $i$  节点、 $j$  节点在  $y$  方向上的 2 个平动自由度和 2 个转动自由度，如图 2.5(b)所示。

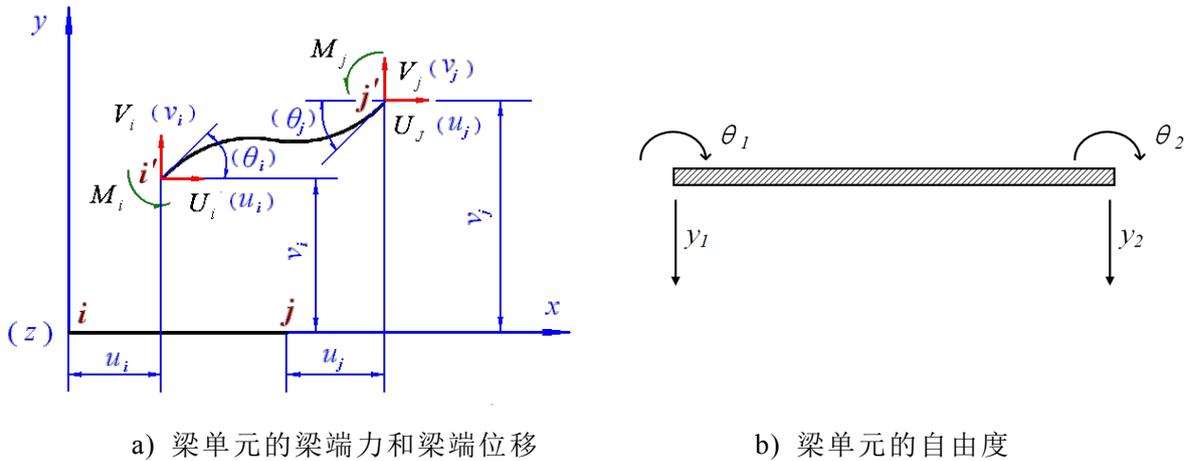


图 2.5 平面梁单元

设有跨度为  $L$  的欧拉-伯努利梁如图 2.6 所示，受到脉冲激励  $F$ ，挠度曲线上横坐标为  $x$  的任一点的纵坐标用  $y$  表示，已知  $t$  时刻该梁上  $n$  个测点的平动反应测量值为：

$$Y(i, x_j) = a_0(i) + a_1(i)x_j + a_2(i)x_j^2 + \dots + a_n(i)x_j^n \quad (j=1, \dots, n) \quad (2.4)$$

则该时刻  $n$  个测点上的转动变形为平动变形曲线对测点坐标的一阶导数<sup>[106]</sup>：