

水工结构

工作模态辨识理论与应用

张建伟 ◎ 著



科学出版社

水工结构工作模态辨识 理论与应用

张建伟 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书根据环境激励的特点,探索研究以泄流激励为系统输入、结构振动响应为输出的水工结构工作模态参数辨识理论,从数模与理论、模型试验、原型观测三方面研究大型水工结构的实时工作模态,分析结构动力特性参数,探究结构安全运行敏感性指标,建立水工结构泄洪振动的状态监测系统,为高坝结构的安全运行提供理论依据和技术,在试验数据和工程实例的基础上,取得了具有实用价值的创新性研究成果。

本书除可用作水利水电工程设计人员、技术人员、管理人员的参考用书外,还可作为相关专业的研究生以及教师的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水工结构工作模态辨识理论与应用 / 张建伟著. —北京: 科学出版社, 2016.3

ISBN 978-7-03-047277-9

I. ①水… II. ①张… III. ①水工结构—排水系统—研究 IV. ①TV3
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 027971 号

责任编辑: 耿建业 陈构洪 赵微微 / 责任校对: 胡小洁
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2016 年 3 月第一次印刷 印张: 13 1/4

字数: 255 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

我国水能资源居世界首位，开发的重点在西南的金沙江、澜沧江、雅砻江、大渡河等干支流以及西北的黄河上游，这些河流具有高水头、狭窄河谷、大流量、地质条件复杂等特点。在该地区修建高坝大库，其单宽河床的泄洪功率往往很大，达到国外同类工程的几倍甚至十几倍，因此，大型水利工程结构泄洪安全问题十分突出，是我国水利水电工程建设中需要解决的关键技术难题之一，且国外没有成功的经验可以直接借鉴。为加强该方面的研究，国家已将“重大灾害监测和防御”、“重大生产事故预警与救援”列入国家中长期科技发展规划的“公共安全”重点领域及其优先主题。因此，如何通过一定的技术手段对结构的健康状况作出合理科学的评估和监控，并采取相应的措施以保证病害结构的安全运行，已成为一个亟待解决的问题。

提高大型水工结构泄洪安全主要有以下两种途径：一是通过优化泄水建筑物的设计，提高其安全储备；二是实施有效的安全监控、检测和科学诊断，避免灾难性的事故发生。目前，第一种途径所采用的理论基础比较成熟，工程应用较多；第二种途径所采用的理论涉及多个学科领域，具有一定的学科交叉和融合特征，是水利工程学科研究中的重点和难点之一。

模态参数的准确辨识是对结构进行在线损伤诊断和状态监测的难点和核心之一。高坝等水工结构泄洪过程是水流—结构复杂的耦联动力体系，常规的静态监测手段缺乏能对其实施在线无损动态检测和损伤诊断的理论方法和关键技术。鉴于传统的动力测试方法难以在大型水工结构原型上实现，本书根据环境激励的特点，探索研究以泄洪激励为系统输入、结构振动响应为输出的水工结构工作模态参数辨识理论，从数模与理论、模型试验、原型观测三方面研究大型水工结构的实时工作模态，分析结构动力特性参数，探究结构安全运行敏感性指标，建立水工结构泄洪振动的状态监测系统，为高坝结构的安全运行提供理论依据和技术。

本书共9章。第1章总体介绍水工结构模态参数辨识方面的研究成果及发展方向；第2章介绍水工结构泄洪振动响应的信号处理方法，以提取结构振动的有效特征信息；第3章介绍振动测试传感器的优化布置方法，使得结构振动有效信息最大化；第4~8章分别介绍作者近年来关于泄洪结构模态参数辨识方面的最新研究成果；第9章对研究成果进行总结与展望。其中，第2章和第3章是后面几个章节的研究基础，性能优越的降噪技术和合理的传感器布置措施为正确分析结构振动特征提供保障，其目的是为结构安全评价及防灾减灾对策提供理论依据

和技术支持。

本书由华北水利水电大学张建伟撰写，是在作者承担的国家自然科学基金(NO.51009066):高坝泄流激励工作模态参数时域辨识理论与方法研究,天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室开放基金(NO.HESS-1312):基于泄流激励的高拱坝耦联动力系统损伤诊断研究的基础上完成的。为本书付出辛苦劳动的还有江琦、暴振磊、朱良欢、曹克磊、刘轩然、刘晓亮、王涛等。感谢天津大学练继建教授的鼓励和指导,是练老师给我指明了研究方向;感谢华北水利水电大学赵瑜教授、南昌大学李火坤教授、天津大学马斌教授、王海军教授、广东省水利水电科学研究院黄锦林教授级高工、中国水利水电科学研究院李松辉博士的无私帮助。

由于作者的学识和水平有限,书中难免存在疏漏、不妥之处,恳请读者与专家指正。

张建伟

2015年12月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水工结构反问题的提出	3
1.1.1 反问题的定义	3
1.1.2 流激振动动力学反问题的提出	4
1.1.3 流激振动动力学反问题的分类	5
1.1.4 流激振动动力学正、反问题的关系	6
1.2 水工结构模态参数辨识方法及现状	6
1.2.1 传统的模态参数辨识方法	7
1.2.2 基于环境激励的模态参数辨识方法	8
1.2.3 基于环境激励的模态参数辨识研究进展	12
1.3 本书章节框架	16
参考文献	17
第 2 章 水工结构泄流振动响应信号处理方法	22
2.1 振动信号处理的基本概念	22
2.1.1 振动过程描述及分类	22
2.1.2 随机振动的特点	23
2.2 随机振动信号处理方法	23
2.2.1 消除多项式趋势项	23
2.2.2 采样数据的平滑处理	25
2.3 随机振动信号的统计方法	27
2.3.1 概率分布函数和概率密度函数	27
2.3.2 均值、均方值及方差	27
2.3.3 相关函数	28
2.4 经典振动信号滤波方法	29
2.4.1 数字滤波	30
2.4.2 卡尔曼滤波	34
2.4.3 小波滤波	36

2.4.4	奇异值分解滤波	41
2.5	基于二次滤波技术的泄流结构振动响应信号处理	42
2.5.1	经验模态分解	43
2.5.2	小波阈值与 EMD 联合滤波原理	44
2.5.3	小波阈值与 EMD 联合滤波流程图	45
2.5.4	仿真分析	48
2.5.5	工程实例——拉西瓦拱坝水弹性模型特征参数提取	53
2.6	随机振动信号的积分和微分变换	61
2.7	随机振动信号的频谱分析	63
2.8	本章小结	67
	参考文献	68
第 3 章	振动测试传感器优化布置方法	70
3.1	概述	70
3.2	传感器优化布置方法	71
3.2.1	传统有效独立法原理	71
3.2.2	距离系数 - 有效独立法原理	72
3.2.3	有效独立 - 总位移法	74
3.2.4	平均加速度幅值 - 变形比法	75
3.3	有限元仿真实理论与方法	77
3.3.1	有限元仿真实理论	79
3.3.2	有限元模拟方法	80
3.4	算例分析与效果评价	81
3.4.1	建立模型及模态分析	81
3.4.2	四种传感器优化布置方案	82
3.4.3	方案评价	83
3.5	本章小结	87
	参考文献	88
第 4 章	基于带通滤波的模态参数综合辨识	90
4.1	传统模态参数时域辨识方法	90
4.1.1	随机减量法	90
4.1.2	自然激励技术	94
4.1.3	ITD 法	96
4.1.4	STD 法	99

4.1.5 复指数法	101
4.1.6 ARMA 模型时间序列法	102
4.2 工程实例	105
4.3 本章小结	109
参考文献	109
第 5 章 基于系统状态空间的模态参数辨识	110
5.1 系统的可辨识性	110
5.1.1 系统的状态空间方程描述	110
5.1.2 系统的可控性与可观性	113
5.1.3 系统最小实现	115
5.2 基于 ERA 算法的模态参数辨识	115
5.3 基于 SSI 算法的模态参数辨识	117
5.3.1 随机子空间算法	118
5.3.2 模态参数提取	120
5.4 基于奇异熵增量的系统定阶	120
5.4.1 奇异熵增量	121
5.4.2 系统阶次的选取准则	122
5.5 噪声模态的剔除及算法流程	123
5.5.1 ERA 算法噪声模态剔除及算法流程	123
5.5.2 SSI 算法噪声模态剔除及算法流程	124
5.5.3 仿真实例	125
5.6 ERA 算法与 SSI 算法的异同	126
5.7 高坝泄流结构的水流荷载特点	127
5.7.1 高拱坝泄流脉动荷载特点	127
5.7.2 溢流坝泄流脉动荷载特点	129
5.8 工程实例 1——拉西瓦拱坝水弹性模型模态参数辨识	131
5.8.1 基于 ERA 算法的拱坝模态参数辨识	131
5.8.2 基于 SSI 算法的拱坝模态参数辨识	133
5.8.3 辨识结果分析	136
5.9 工程实例 2——三峡溢流坝及左导墙工作模态参数辨识	136
5.9.1 三峡溢流坝及左导墙振动测试	137
5.9.2 溢流坝及左导墙工作模态参数辨识	139
5.9.3 对比分析与验证	141

5.10	高坝泄洪振动的状态监测系统实现	148
5.11	本章小结	148
	参考文献	149
第 6 章	基于 HHT 变换的模态参数辨识	151
6.1	HHT 变换基本理论	151
6.1.1	EMD 算法	151
6.1.2	Hilbert 变换	152
6.1.3	Hilbert 谱	153
6.2	HHT 模态参数辨识原理	153
6.3	HHT 法的优越性	155
6.4	仿真实例	156
6.5	工程实例	161
6.5.1	三峡重力坝	161
6.5.2	景电工程渡槽	163
6.6	本章小结	170
	参考文献	171
第 7 章	基于独立分量分析的模态参数辨识	172
7.1	独立分量基本理论	172
7.1.1	独立分量的问题描述	173
7.1.2	独立分量的基本假设	173
7.1.3	独立分量的预处理	173
7.1.4	独立分量的独立性判据	175
7.1.5	一种重要的 ICA 算法 -FASTICA 算法	177
7.2	独立分量技术辨识模态参数	177
7.3	模型试验	178
7.3.1	试验概况	178
7.3.2	独立分量技术辨识模态参数	179
7.4	本章小结	183
	参考文献	183
第 8 章	基于频域法的工作模态参数辨识	185
8.1	频域分解法的基本原理	185
8.1.1	结构泄流激励响应间的互功率谱函数理论	185
8.1.2	辨识算法	186

8.1.3 功率谱密度函数的模态频率置信区间 (MCF) 的确定	187
8.1.4 阻尼比的计算	188
8.2 数值模型验证	189
8.3 泄流激励下高拱坝模态参数频域法辨识与验证	193
8.3.1 高拱坝模态参数频域法辨识	193
8.3.2 对比分析与验证	197
8.4 本章小结	199
参考文献	200
第 9 章 结论与展望	201

第 1 章 绪 论

我国水能资源居世界首位,开发的重点在西南的金沙江、澜沧江、雅砻江、大渡河等干支流以及西北的黄河上游,这些河流具有高水头、狭窄河谷、大流量、地质条件复杂等特点,在该地区修建高坝大库,其单宽河床的泄洪功率往往很大,达到国外同类工程的几倍甚至十几倍,因此,大型水利工程结构泄流安全问题十分突出,是我国水利水电工程建设中需要解决的关键技术难题之一^[1, 2],且国外没有成功的经验可以直接借鉴。为加强该方面的研究,国家已将“重大灾害监测和防御”、“重大生产事故预警与救援”列入国家中长期科技发展规划的“公共安全”重点领域及其优先主题。

据国际和中国大坝委员会统计^[3, 4],在坝高为 60m 以上的大坝中,混凝土坝约占 58%~73%,并随着坝体高度的增加,混凝土坝所占的比例加大,目前我国正在兴建的混凝土坝的高度、数量及规模均居世界首位。通常,高坝长期承受着高速水流、温度、冰冻等多种环境荷载的影响,甚至还会受到地震荷载的冲击,这样复杂的工作条件常常导致高坝由于疲劳和腐蚀而发生开裂损伤,这些损伤又往往位于结构的水下部位,不易直接被发现,在高速水流的激振作用下,其破坏范围会迅速扩展,甚至可能导致整个结构功能的失效。而且由于高速水流、水流—结构相互耦合作用的复杂性和巨大的作用力所引起的泄水建筑物破坏的事例屡见不鲜。例如,法国的 Malpasset 坝垮坝,美国德克萨尔卡那坝 (Trxarkana)、纳佛角坝 (Navajo) 和我国万安水电站导墙的流激振动破坏,巴基斯坦的沙迪·科尔大坝、意大利的瓦依昂拱坝失事,以及奥地利柯恩布莱拱坝、苏联萨扬舒申斯克重力拱坝出现严重裂缝,我国的板桥、石漫滩大坝失事等^[5-8],这些坝体的失事均造成了非常严重的灾害。因此,开展大型水工结构的流激振动研究非常有必要,“5.12”汶川大地震的发生,使得开展诸如堤坝等重大水工结构的动力灾变机理和健康检测研究显得尤为迫切和重要。

我国对水利工程的安全问题一向十分重视,为了全面检查和评价水电站大坝的安全状况,水利部和国家电力公司(原电力部)对所属大坝的安全状况进行定期检查^[9, 10],定检结果如下:至 1999 年年底,我国已建水利堤坝(即以防洪、灌溉和供水为主并由水利部门管理的大坝)中,有 30413 座为病险坝,其中大型坝 145 座,中型坝 1118 座,小型坝 29150 座,从 1999~2002 年垮坝达 245 座;电力部门管理的以发电为主的 130 多座水电站大坝中有 9 座为病险大坝。检查发现,大坝的主要重大缺陷和隐患是洪水、坝基及库岸地质、施工质量、工程设计

和运行管理等方面的问题引起的，其中高混凝土坝存在裂缝、溶蚀、冻融、温度疲劳和日照碳化等病害，尤其以裂缝问题最为严重。电力部门第一轮定期检查 96 座水电站大坝的结果如表 1-1 所示^[3]。

表 1-1 96 座大中型水电站大坝病患和病险统计

序号	隐患或病险	数量 / 座	比例 / %
1	防洪标准低，不满足现行规范的规定，有的大坝在运行中曾发生洪水漫顶事故，造成巨大损失	38	39.6
2	坝基存在重大隐患，断层、破碎带和软弱夹层未作处理或处理效果差，有的在运行中局部发生性状恶化，使大坝的抗滑安全明显降低	14	14.6
3	坝体稳定安全系数偏低、不满足现行规范的规定	5	5.2
4	坝体裂缝破坏大坝的整体性和耐久性，有的裂缝贯穿上下游，渗漏严重，有的裂缝规模大且所在部位重要，已影响到大坝的强度和稳定	70	72.9
5	结构强度不满足要求，坝基、坝体在设计荷载组合下出现超过允许的拉、压应力	10	10.4
6	坝基扬压力或坝体浸润线偏高，坝基或坝体渗漏量偏大	32	33.3
7	泄洪建筑物磨损、气蚀损坏严重，有的大坝的坝后冲刷坑已影响到坝体的稳定	23	24
8	混凝土遭受冻融破坏严重，表层混凝土剥蚀或碳化较深，有的大坝在泄洪时溢流面发生大面积混凝土被冲毁事故	10	10.4
9	近坝区上下游边坡不稳定，有的曾发生较大规模的滑坡	10	10.4
10	水库淤积严重	10	10.4
11	水工闸门和启闭设备存在重大缺陷，有的已不能正常挡水和启闭运行，影响安全度汛	27	28.1
12	大坝安全监测设施陈旧、损坏严重，测量精度低，可靠性差，部分大坝缺少必要的监测项目和设施	—	≥ 80

由此可见，我国水工结构运行的健康状况不容乐观，存在着各种病害与隐患。特别是修建于 20 世纪五六十年代的水工建筑物，由于设计、施工质量和管理等多方面的原因，许多都存在着不同程度的破损，且随着时间的推移，将有大量建筑物达到或超过其设计基准周期。倘若这些结构的缺陷和隐患得不到及时的诊断评价和整治处理，任其恶化下去，轻则影响结构设计功能的正常发挥，重则可能造成坝溃厂毁，殃及下游，给人民的生命财产、国民经济建设乃至生态环境和社会稳定都带来极大的灾难。

同时，从国际水利工程学科的发展来看，受到社会、经济发展水平的影响，

发达国家的水利水电开发程度已经达到很高的水平,如日本、瑞士、法国、西班牙、挪威、意大利、美国、加拿大等发达国家的水电开发程度均超过 70%,法国、瑞士更达到 95% 以上。因此,大规模的水利水电建设已不是今后水电事业发展的主流,研究重点将会逐渐转移到水工结构的损伤诊断与寿命预测、水利水电工程与环境、生态的协调、溃坝的风险预测与评估等领域,同时有关水电专家预计^[11-13],21 世纪将是老坝加固、病坝除险的高峰期。

综上所述,针对我国基础设施建设中存在的诸多安全质量问题;如何通过一定的技术手段对结构的健康状况作出合理科学的评估和监控,并采取相应的措施以保证病害结构的安全运行,已成为一个亟待解决的问题。而对水工结构的工作性态进行诊断与监测,及时发现结构的损伤,对可能出现的灾害进行预测,评估其安全性已成为未来工程的必然要求,也是水利工程学科发展的一个重要领域。

1.1 水工结构反问题的提出

反问题是相对于正问题而言的,反问题首先由丹麦著名物理学家 Lorentz 于 1910 年提出,我国在 20 世纪 80 年代初由冯康先生首倡^[14, 15]。众所周知,世界的事物或现象之间往往存在着一定的自然顺序,如时间顺序、空间顺序、因果顺序等,所谓正问题一般是按着这种自然顺序来研究事物的演化过程或分布形态,起着由因推果的作用;而反问题则是根据事物的演化结果,由可观测的现象来探求事物的内部规律或所受的外部影响,由表及里,索隐探秘,起着由果求因的作用。例如,夏天人们挑西瓜时把瓜放在耳边拍一拍,有经验的人就知道瓜熟不熟,不需切开来看,不致破坏西瓜的完整;又如,通过泄流激励下的水工结构振动响应(速度、位移、加速度、应变等),利用数学和力学等手段将水工结构的结构信息(模态参数、外激励等)提取出来,然后就可以对该结构的工作性态作出科学的判断。

1.1.1 反问题的定义

反问题(inverse problems 或 backward problems)一词,在自然科学、社会科学和工程中已被广为使用。一般定义由原因到结果的顺方向问题为正问题或直接问题(forward problems, direct problems),而反问题与其相反,指由结果来推测原因,或由系统的输出来求输入的问题。正问题的处理方法称为正分析(direct analysis),反问题的处理方法称为反分析(inverse analysis)^[16-19]。

反问题由于涉及的领域很广,各自的含义也有很大的差异,有时是通过系统的输出信息来推理输入信号,有时是通过测量的信息(变形、应变、频率、振型等)来辨识结构缺陷的位置和程度,有时是利用微分方程的解和部分定解条件来推定尚缺(未知)的剩余定解条件等。因此,要给定反问题的具体定义尚有一定难度,而从正问题的相反角度来界定反问题可能是合适的。正问题是由原因推理结果的过程,所以反问题可定义为正问题之外的任何推理过程,或是由结果推定原因的过程。这里并不一定要求事件的所有原因均未知,可能是部分原因未知,其反问题则是通过已知结果来反推这部分未知原因。

1.1.2 流激振动动力学反问题的提出

对于水工结构流激振动问题的研究,不少学者已经开展了广泛的研究^[20-31],其通常的研究方法有理论分析、模型试验、数学模型等。在这些研究方法中,都必须已知下列条件:①被研究对象的区域范围、边界形状及位置;②支配方程;③边界条件及初始条件;④作用于对象系统的荷载;⑤构成系统材料的物理力学特性及分布特性等,这些条件缺一不可。

在正问题研究中,鉴于水流动力荷载及水流结构相互作用的复杂性,水弹性模型仍是研究流激振动问题的重要手段。其中,天津大学的崔广涛、练继建等^[24-31]曾对二滩、小湾、沟皮滩、溪洛渡、拉西瓦、三峡左导墙等进行了全水弹性试验模拟,即“水流动力荷载—结构—水体—基础”四位一体的耦合动力系统的模拟,对大型水工结构在随机脉动水压力作用下的结构响应及坝体泄流安全问题等方面进行了深入细致的研究。

同时,文献[25]认为在水弹性模型的模拟中,存在一些不相似因素,主要包括以下几个方面:①模型材料阻尼比、泊松比的影响。在采用水弹性模型来模拟水流脉动荷载作用下水工结构的动力响应系统时,按模型律的要求,结构模型材料应满足容重比尺 $\lambda_\rho=1$,弹性模量比尺 $\lambda_E=\lambda_l$ (λ_l 为几何比尺),阻尼比比尺 $\lambda_\zeta=1$,泊松比比尺 $\lambda_\mu=1$ 。由于水弹性模型材料采用加重橡胶,其阻尼比和泊松比都偏大,各阶模态阻尼比一般在5%~10%,平均约6.77%,泊松比为0.35~0.40,而实际的水工结构(如东江、泉水双曲拱坝等)的阻尼比为2%左右,混凝土材料的泊松比为0.167。②模型基础模拟范围的影响。③高频荷载的相似性差。即“动力荷载”输入系统相似是按重力相似律设计,水动力荷载中的部分高频荷载难以满足重力律相似的要求。而在理论分析及数值方法(如有限元)研究中,初始条件、边界条件以及材料参数等也同样需要事先给定,而现实情况是要完全正确给出这些条件和参数是有一定困难的,这就导致试验或计算结果与实际动力系统的输出有所出入。

鉴于此,在水工模型试验中,需要通过有限的测点响应,来反分析模型结构

的结构参数或物理参数,以便不断修正水工模型,使得水弹性模型趋于实际的结构动力系统。同样,在原型观测中,如需要对已建或在建工程的观测资料作出解释,并推算建筑物材料物理参数的变化,反馈前期设计计算中采用的各种假设和模型,从而判断结构的运行状况,预测今后的变化趋势等,也需要通过反分析来实现。而更为重要的是在模型动力实验中,实测动力响应的测点总是有限的(在原型观测中有时更少),难以全面反映水工结构的动力响应特征,尤其是动应力响应,而最大动应力部位又常位于水下,难以直接进行测量。因此要对水工结构的动力响应进行正确评估,就非常有必要通过有限的实测结构响应特征,回归出整个动位移场和动应力场,以便得到最大动力响应值,这恰恰说明要对水工结构进行反分析的必要性和迫切性。

1.1.3 流激振动动力学反问题的分类

一般而言,一个完备的力学系统由以下因素构成:作用(对于动力情形又称为激励或输入,对于静力情形称为荷载);作用效应或响应;结构(作用对象)的系统力学特性,包括结构刚度、强度、几何约束、固有频率等。在水工结构动力系统中,流激振动分析中涉及以下四类结构动力学问题。

第一类:已知泄流激励作用和结构系统动力特性,求解结构的动力响应。这类问题是水工结构工程中最基本和最常见的问题,其主要任务在于验算结构、构件在工作时的效应是否满足预定的安全要求(安全性)和其他给定指标(如耐久性指标、适用性指标)。这类问题可称为力学正问题。

第二类:已知泄流激励作用和作用效应或响应,求解结构的系统特性。可以称这类问题为系统辨识。所谓求系统特性,主要是指构造系统的模型或确定已知模型的某些参数。通常,利用监测数据构造模型,称为辨识;而利用实测数据来确定已知模型的某些参数,则称为参数辨识,有时也称为参数估计。系统辨识属于第Ⅰ类力学反问题。

第三类:已知结构的系统特性和作用效应(响应),求解荷载作用。这类问题可以称为环境预测。有时为了保障结构在服役时不发生破坏,需要通过监测系统记录结构的作用效应或响应,来估计结构工作在怎样一种物理环境中,以及结构工作时加在结构上是怎样的一种作用,这样才能有根据地得出结构安全方面的结论,才能有根据地进行结构制定和设计可靠的安全措施。当以求得作用在结构上的荷载、不均匀沉降为主要目的时,可称为荷载辨识。这类问题又称为第Ⅱ类力学反问题。

第四类:除了前述的力学正问题及两类力学反问题之外的其他力学问题,都可以归结为第Ⅲ类力学反问题。例如,通过泄流激励下的水工建筑物的振动响应(如速度、位移、加速度、应变等)信号,检测结构是否存在损伤,以及判定结

构损伤的位置及程度,即属于此类问题。

1.1.4 流激振动动力学正、反问题的关系

以往人们大多侧重工程的规划设计和施工建设,对施工中或建成后的原型监测与反演反馈分析重视不够,这不仅影响建筑物的安全运行,而且不能形成反馈通道。实际上规划设计—施工建设—运行监测与反演反馈本身应该构成一个完整的“闭路系统”,在这个系统中,既有正分析,又有反分析。正分析是在系统结构及环境因素已知的情况下,对系统的变化进行计算或模拟分析,进而评价系统的实际运行性态,各类水工结构的安全监测正分析模型即属于此类;反分析是通过对系统监测资料或测试数据的计算分析,反推系统结构或其环境影响因素中的未知量,通过实测变位或模态信息辨识系统参数、荷载以及边界条件等属于此类。观测资料或测试数据的正反分析是相辅相成的,二者密不可分。通过反分析可以确定正分析过程中所需的某些未知因素,而利用得到的反分析值进行正分析计算,又可以验证反分析的可靠性。正反分析现已成为解决实际工程问题的有力工具^[32-35]。

本书结合工程实例,对泄流激励下的典型水工结构开展工作模态参数研究,为水工结构损伤诊断与安全检测及监测提供基础。

1.2 水工结构模态参数辨识方法及现状

在研究重大结构灾变行为和健康监测时,首先遇到的关键问题之一就是正确地辨识或监测结构工作时的特性。结构的模态参数辨识属于第Ⅰ类力学反问题,它是后两类反问题的研究基础。结构模态辨识是指通过试验获得结构振动的输入、输出数据,并利用所得的试验数据确定结构模态参数,其中包括结构的固有频率、模态阻尼比、模态质量、模态刚度和振型等。

结构的模态辨识可以分为两大类^[36]:一是传统的结构模态辨识方法,这类辨识方法依靠结构振动的输入和输出数据去辨识结构的模态参数,分析方式主要是单输入和单输出频域分析方法,或者多输入和多输出的频域分析方法;由于水工结构模型是按一定比尺缩小而成的模型,结构刚度小,人工激励简单易行,且该方法的测试精度较高,因此,在水工结构模型试验方面尤其是水弹性模型模态试验领域得到广泛应用。二是基于环境激励的结构模态参数辨识方法,该方法利用环境激励作为结构的输入,通过结构输出数据和部分输入数据,或仅利用输出数据来辨识结构的模态参数,此类方法适用于研究对象通常是处于工作状态的大型工程结构。仅利用高坝在工作状态下(如泄流状态)的

结构响应数据辨识结构模态参数的技术方法, 也即高坝在工作动力下响应信号的结构参数辨识方法, 或称为工作模态参数辨识时域辨识方法, 正是本书所要研究的内容。

1.2.1 传统的模态参数辨识方法

传统水工结构模型的模态试验主要采用冲击锤激振方法, 称为试验模态分析 (experimental modal analysis, EMA), 该方法操作简单、易于实施, 并且能保证较高的精度, 试验时激振点固定 (single input), 拾振点移动 (multiple output)。实验测试系统如图 1-1 所示, 测试仪器主要有: 高灵敏度加速度传感器、冲击力锤、电荷放大器、交直流电源、程控放大器、抗混滤波器、A/D 及 D/A 转换器、信号发生器、微型计算机、打印机等具有动态数据采集和显示的仪器。

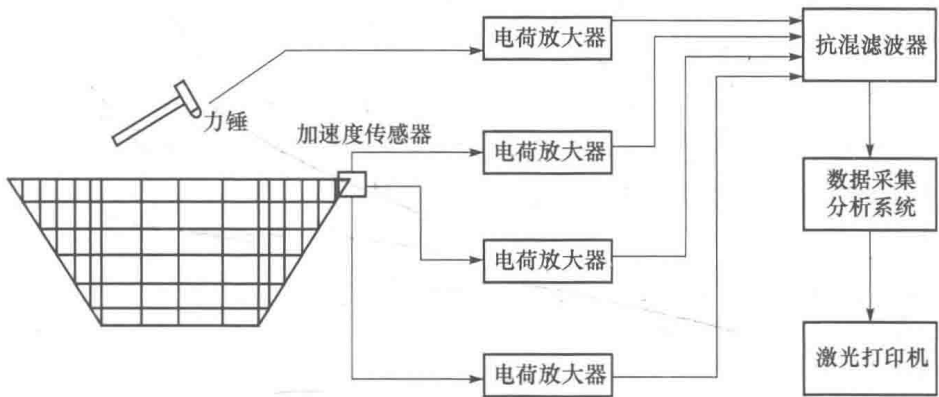


图 1-1 结构模态测试系统配置图

该方法以测量结构的传递函数为基础。传递函数是通过对结构的激励和响应信号在频域内进行同步分析和处理得到的。根据线性振动理论, 结构的动力响应主要由该结构的各模态的响应组合得到, 故结构的动态特性可以用各阶模态参数来表达。假定 $x(t)$ 代表输入的激振力, $y(t)$ 代表输出的响应, $G_{xx}(f)$ 、 $G_{yy}(f)$ 为相应的自谱, $G_{xy}(f)$ 为输入与输出的互谱, 则传递函数 (或频率响应函数) 可表示为

$$H(f) = \frac{G_{xy}(f)}{G_{xx}(f)} \quad (1-1)$$

传递函数 $H(f)$ 一般为复函数, 可表示为: $H(f) = |H(f)|e^{-j\psi(f)}$, 其模称为系统的增益因子, 即输出幅值与输入幅值之比, 是表征系统的幅频特征; 相角 $\psi(f)$ 为系统的相位因子, 即输入与输出的相位差, 是表征系统的相频特性。因