

SYSTEM IDENTIFICATION
METHODS FOR
CIVIL ENGINEERING STRUCTURES

土木工程结构的 系统辨识技术

张欣 著



科学出版社



土木工程结构的系统辨识技术

**System Identification Methods for
Civil Engineering Structures**

张 欣 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书重点介绍土木工程结构的系统辨识技术。书中分别针对单纯结构系统和流-固耦合系统进行阐述。第一章介绍结构工程领域的系统辨识问题,第二章介绍模态分析及信号处理的基础知识,第三章介绍单纯结构系统的动力学模型及辨识方法,第四章介绍有限元模型修正的相关内容,第五章介绍桥梁结构瞬态气弹系统的辨识问题,第六章介绍桥梁结构尾流激振气弹系统的辨识问题。

本书可供结构工程领域的科研工作者和工程技术人员参考,也可作为高等院校土木、交通、水利和机械等专业高年级本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程结构的系统辨识技术/张欣著. —北京:科学出版社,2014
ISBN 978-7-03-042762-5

I. ①土… II. ①张… III. ①土木工程-工程结构-系统辨识 IV.
①TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 291882 号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉 / 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>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 12 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014 年 12 月第一次印刷 印张:13

字数:250 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新科〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

结构工程设计理论的核心思想不是对结构的具体、真实工作状态做精确的预测,而是要确保结构的各种工作状态均处于以某种标准和方式划定的安全边界范围之内。基于这种思想,工程技术人员利用具有统计学意义的荷载特征值、材料参数值和工艺指标值进行结构设计,所得到的依然是具有统计学意义的被设计结构的“名义”特性。换言之,如果按照特定的规范,设计若干个“相同”的工程结构,那么无论具体情况如何,这些结构在理论上都会全部“相同”。然而,这种“相同”只是统计学意义上的相同,只能用于群体判断,而不能用于个体判断。

在工程实践中,个体判断与群体判断同样重要。如工程结构的监测、检测和施工监控等过程均是针对具体结构的特性来进行的,目的就是要发掘当前结构的“实际状态”与统计学意义上的“抽象状态”之间的差异。本书将此类过程称为工程结构理论的“实验”,即实际验证之意。

系统辨识技术就是一类实验方法的总称。该技术有以下几个特点。首先,它主要针对动力系统。任何工程结构都有动力学特性,但是由于具体结构形制的不同,动力学特性的体现也有所不同。系统辨识技术比较适合于结构动力学意义上特性比较鲜明的结构。其次,它以结构的动力响应信号为出发点,结构的设计前置条件,如荷载特征值、材料参数值和工艺指标值为终点,反向分析。这一点决定了系统辨识技术的思维方式将与工程结构设计的思维方式有很大的不同。再次,它承认某些“非标准”现象的正当性,因为这些“非标准”现象可能正是结构个体特殊性的具体体现,所以对非标准现象要以工程经验和理论分析为基础,进行严密的判定,而不能简单地肯定或否定。另外,它必须在外界干扰因素和其他不可控制因素的影响下进行,因此辨识误差在所难免。这就要求系统辨识技术必须有容错能力,同时实验者也不能对实验结论做过度的解读。最后,任何实验过程都有精度极限,即不能期望实验技术能够获得一切待定信息,必须注意待定信息在时间、空间的存在尺度和数值变动的最小可辨值,否则,将会得到毫无物理意义的实验结论。

目前,系统辨识技术日益广泛地渗透到结构工程研究和实践的各个方面。在结构设计层面,系统辨识技术为复杂结构的精细化设计提供了不可或缺的实测参数,使得设计的精细化过程有了坚实的物理基础;在结构振动控制方面,系统辨识技术作为先导技术,是让控制过程“认清”结构真实状况的基本工具,是控制过程不“跑偏”的重要保障;在原型结构监测与检测方面,系统辨识技术是能够回答整体结构的现状如何,是否偏离原设计状态这一问题的主力技术。这样的应用不一而足。

然而,对于绝大多数从事结构工程研究和设计的专业人士而言,系统辨识技术仍然是一种比较陌生的“外来技术”。事实上,系统辨识技术的来源也确实十分广泛,它来自于许多不同的学科领域,汇集成河,已然成为一门庞大的而且独立的专门学科,涉及的文献浩如烟海。但无论繁杂与否,系统辨识只是一种技术手段,必须与待辨识的对象紧密结合才能充分发挥它应有的作用。而对于土木工程结构而言,只有结构工程领域的专家才可能有深入的理解,进而进行有效的系统辨识。因此,向以结构工程为主要背景的专业人士介绍这一技术,具有重要意义。

本书并不致力于全面、系统和精细地阐述那些纷繁复杂的系统辨识方法,因为有关系统辨识技术的专著并不少见,作者无意锦上添花。本书的写作意图主要是面向结构工程领域的科研工作者介绍系统辨识技术的基本概貌,并且希望能够通过本书向读者传达那些在将系统辨识技术应用于土木工程结构特性辨识的过程中所必须的主要概念和概念之间的主干关系。因此,既要除去过多的技术细节,保留该技术的核心主干,又要突显结构工程的学科特色,实现系统辨识技术的土木工程化,使结构工程的学者和工程师能够通过该技术获得物理意义明晰的实验结果,也只有这样才能达到预期的推广效果。然而笔者能力有限,知识和经验均显不足,自知不能完成这一任务,但求抛砖引玉,为这一系统辨识技术土木工程化的过程尽一份绵力。

作 者

2014年8月

于郑州大学

目 录

前言

第一章 结构工程领域的系统辨识问题	1
1.1 结构工程与系统辨识技术	1
1.2 结构工程系统辨识的定义	4
1.3 结构工程的系统辨识问题	5
1.3.1 单纯结构系统的辨识问题	6
1.3.2 流-固耦合体系的辨识问题	15
参考文献	28
第二章 工程结构模态分析及信号处理方法	30
2.1 工程结构的实验模态分析	30
2.1.1 多自由度结构体系的频响函数矩阵	30
2.1.2 多自由度结构体系频响函数的几点讨论	34
2.1.3 平稳随机荷载激励下的结构振动	38
2.1.4 随机荷载激励下频响函数的估计	41
2.2 实验信号处理方法	47
2.2.1 框架	48
2.2.2 傅里叶变换	50
2.2.3 时变系统的信号处理方法	53
2.2.4 Wigner-Ville 分布	58
参考文献	60
第三章 土木工程结构的动力学特性辨识	61
3.1 常用的结构动力学实验模型	61
3.1.1 模态模型	61
3.1.2 状态空间模型	62
3.1.3 ARMA 模型	67
3.2 常用的结构动力学系统辨识方法	70
3.2.1 全局性有理分式多项式方法	70
3.2.2 子空间类辨识法	75
3.3 桥梁结构的动力学特性辨识实例	79
3.3.1 实验环境	79

3.3.2	实验荷载的简化处理	79
3.3.3	运行模态实验及结果	81
3.3.4	桥梁行车激励特性辨识	84
参考文献		90
第四章	工程结构有限元模型修正	92
4.1	有限元模型修正的基本概念	92
4.2	有限元模型修正的基本方法	93
4.3	关于有限元模型修正的几点讨论	95
4.3.1	关于实验模态与理论模态的讨论	95
4.3.2	关于模态参数灵敏度计算的讨论	97
4.3.3	关于修正量求解过程的讨论	100
4.3.4	基于 SVD 关于修正量求解过程的讨论	102
4.4	有限元模型修正的其他方法	104
4.4.1	响应面法	104
4.4.2	Generic 单元法和子结构法	111
4.4.3	多分辨率刚度函数修正方法	118
参考文献		131
第五章	桥梁节段瞬态气弹系统的辨识	134
5.1	桥梁风致振动的经典耦合模型	134
5.1.1	经典耦合模型——气动导数模型	135
5.1.2	气动导数的常规辨识方法	137
5.1.3	经典模型的误差模型	140
5.1.4	关于经典耦合模型的实验讨论	142
5.2	桥梁风致振动的非线性耦合模型	148
5.2.1	模型分析	148
5.2.2	模型建立	151
5.3	非线性耦合模型的辨识方法	154
5.3.1	Hilbert-Huang 变换及 EMD 方法	154
5.3.2	FM-EMD 方法	156
5.3.3	FM-EMD 方法的特性讨论	159
5.3.4	FM-EMD 方法的数值验证	161
5.4	非线性耦合模型辨识实例	163
5.4.1	FM-EMD 性能的提升	164
5.4.2	非线性耦合模型的辨识过程	164
5.4.3	辨识结果及讨论	165

参考文献	170
第六章 桥梁节段尾流激振系统的辨识	172
6.1 桥梁节段尾流激振的周期模型	172
6.1.1 周期尾流激振的常规辨识方法	172
6.1.2 涡振力的折算频响函数模型	175
6.2 桥梁节段的尾流激振随机周期模型	184
6.2.1 随机周期尾流激振的常规辨识方法	184
6.2.2 随机周期尾流激振过程非平稳性的辨识方法	188
6.2.3 随机周期尾流激振非平稳过程的辨识	195
参考文献	199

第一章 结构工程领域的系统辨识问题

1.1 结构工程与系统辨识技术

新型建筑材料、新的施工工艺的广泛应用,同时伴随着计算机辅助设计技术的普及,大量的、具有现代感的土木工程结构不断涌现。这些新型结构逐渐摆脱了传统土木工程结构的某些特质,具有更加复杂的结构形式,更加轻型化的结构构件,因此也就具有更大的跨越能力和更加精美的外观形态。与此同时,这些轻而美的新型结构的某些弱点也逐渐暴露出来。轻质、高强与低阻尼材料的大量应用,“放大”了结构动力响应的幅值。原本以“稳重”著称的土木工程结构,正在变得“活泼好动”起来。长久以来,结构工程师已经习惯于以静力学指标作为结构设计的控制指标,对结构的动力响应则并不是特别关心。然而,新型结构体系的“多动症”却在不断敲响警钟,提醒结构设计者应该更多地关注结构的动力学特性。

著名的伦敦千禧桥就是一个举世瞩目的实例。该桥是泰晤士河上百年来第一座人行桥,由 Arup 公司设计,结构新颖,外观优美。桥梁为三跨悬索结构,跨径为 81m(北跨)+144m(主跨)+108m(南跨);主跨钢缆矢高 2.3m,矢跨比仅为正常悬索桥的 1/6。两侧钢缆通过钢横梁连接,横梁间距 8m,其上支撑人行桥面。钢缆的大部分位于桥面板以下,这样可以将最为广阔的视野留给在桥上步行的游客。伦敦千禧桥于 2000 年 6 月 10 日开放,引来众多游客参观。但是由于设计缺陷,桥身在人群荷载的作用下,出现较大幅度的横桥向摇摆,引发社会对桥梁结构安全性能的关注。在开放仅三天后,伦敦当局关闭了该桥。经过细致的研究,采取振动控制措施,两年后该桥才得以重新向游客开放。

该桥在人群荷载的作用下,横桥向摇摆主要发生在南跨和主跨。南跨振动频率为 0.8Hz,与南跨横桥向振动基频吻合;主跨振动有两阶频率,分别为 0.5Hz 和 0.9Hz,分别对应于主跨的前两阶横桥向振动的固有频率。北跨振动则较少发生,发生时为 1Hz 振动,与北跨一阶横桥向基频吻合。南跨与主跨的最大摆动加速度为 $0.2 \sim 0.25g$ ^[1]。

千禧桥在关闭之后,有关单位对它进行了一系列的结构动力学实验,使用了实验模态分析技术(系统辨识技术的分支技术)。这可以被看成是利用该项技术解决具体土木工程结构问题的一个示例。千禧桥实验需要回答以下一系列问题:

(1) 在设计阶段,设计者并没有预料到人群荷载会引起如此大的结构振动,这

是否是由于设计阶段所建立并使用的结构分析有限元模型不精确所致?

(2) 设计过程中采用规范规定的人群荷载,是否与实际发生的人群荷载有差异。如果存在差异,实际人群荷载的特性是什么?

(3) 需要采取振动控制手段减小或者消除人群引起的结构振动,选用什么形式的控制手段比较有效?制振参数如何选取?

(4) 需要限制桥梁上人群交通量以减小结构再次发生人群激振的概率,人群交通量标准如何制定?

(5) 如何评估以上振动控制手段的实际效果?

基于以上任务,设计方委托南安普顿大学和帝国学院等单位进行了相关的模型实验和原型实验。通过辨识桥梁的模式信息,确认了桥梁结构的设计计算模型是精确的,设计阶段没有能够遇见结构的非正常振动是由于现行规范对人群荷载的动力效应考虑不当所致。经实验辨识,得知人群荷载的竖向动力效应与结构振动状态的相关性极低,但是人群荷载的横桥向水平动力效应与结构横桥向振动的相关度极高,人群的动载效应与结构的水平振动速度呈线性关系,表现为附加阻尼效应。该附加阻尼效应与人群数量成正比,当结构的横桥向水平振动幅度达到一定幅值时,人群效应表现出如漩涡脱落锁定现象一样的效果,使得人-桥耦合系统的等效阻尼减至很小的数值,甚至可能为零或负值,引发结构在横桥向出现持续的大幅振动。实验还确定了横桥向人群动荷载效应的附加阻尼系数^[2,3]。

根据以上实验结果,设计方决定采用安装黏滞阻尼器的被动控制手段来增加结构系统的总体阻尼,以抵抗人群荷载的附加阻尼效应。依据实验确定的人群附加阻尼系数确定了防止人-桥耦合系统零阻尼出现所需阻尼器的最低阻尼参数,并确定了阻尼器的合理安装位置。还根据实验中获得的人群数量与人群附加阻尼的关系以及结构阻尼值,被动控制系统阻尼值等要素,进一步确定了行人交通量的控制标准。

在桥梁改造完成之后,通过类似的实验,检验了以上振动控制手段的有效性。

从以上的例子可以看出,通过系统辨识技术,设计者验证了桥梁结构计算模型的可靠性,发现了很难从理论推导得出的人群荷载阻尼效应,还进一步确定了人群荷载的等效阻尼系数。这些工作唯有通过实验才能够完成。在以上实验的基础上,也才能够有的放矢地进行结构设计的修改以及桥梁的运行管理标准的制定。可见,系统辨识技术是连接设计理论框架与现实世界的强有力的纽带,它使我们的假设成为经过实验的理论。

在结构工程领域,实验技术不可或缺,首先是因为在很多时候我们不得不面对极其复杂的物理现象的缘故。除了前面讲的人群荷载效应的例子之外,大跨柔性结构的抗风设计是工程意义和社会意义都更加显著的工程技术课题。钝体绕流问题是如此之复杂,在可预见的将来,结构工程师还没有可能完全通过理论分析和数

值计算手段来准确分析大跨结构的风致效应^[4]。在这方面,实验是相对可靠的技术手段。无论是风洞模型实验还是结构原型实验,都需要系统辨识技术的支撑。

在结构工程领域,实验技术不可或缺,也是因为结构的建造过程往往极具复杂性的缘故。以斜拉桥的建造为例。斜拉桥的建造过程本质上就是在随着施工阶段而不断变化的多次超静定结构上多次张拉预应力的过程。每一次实际索力偏离目标索力,都会在结构体系中留下非预期的次内力。经过多次偏差累积之后,整体结构的内力状态可能已经严重偏离当初的设计状态。在这种情况下,桥梁建造完成后,虽然结构线形控制能够达到理想状态,但结构内力却可能长期处在非理想状态,这可能会造成结构构件的提前损伤与破坏,留下安全隐患^[5]。因此,在此类复杂结构的建造过程中,必须进行周密的监控,对结构的现实状态有明确的掌握,提早采取“纠偏”措施,才是防微杜渐的“百年大计”。在此过程中,系统辨识技术可以扮演重要角色。

在结构工程领域,实验技术不可或缺,还是因为建筑材料的特性具有极大的不确定性的缘故。水泥混凝土是土木工程结构中最常使用的建筑材料。混凝土的材料特性以离散性大而著称。以旧桥检测为例:如果定义桥梁主梁在实验荷载下实测变形与理论计算变形数值的比值为桥梁的校验系数,那么在实际工程中,质量合格桥梁的校验系数分布范围是 $0.4 \sim 1.0$ ^[6]。也就是说,具体结构混凝土材料的实际静弹性模量可能达到设计规范选用值的两倍以上。相同工艺、不同批次制作的材料以及不同工艺制作的材料在具体材料性能指标上可能相去甚远。事实上,即使是同一块混凝土材料,在结构服役期内相当长的时间内,也一直处在不断发展变化之中,其性能指标也会随时间的增长而不断变化。由此带来的结果是,具体结构的实际动力特性可能与设计预期相去甚远。当结构的实际动力特性成为设计人员比较关心的课题时,这种差别则可能是十分令人头痛的问题。此时,只有通过实验的方法才可能获得结构的真实特性。

在结构工程领域,实验技术不可或缺,还因为基础设施的服役期很长的缘故。作为基础设施的一部分,土木工程结构的服役期长,且不易被替换、重建。经过长期服役,如前所述,结构的材料性能可能已经发生明显变化,结构的服役荷载也发生了较大的改变,甚至结构的边界条件也可能已经发生变化。在经过这些变化之后,结构是否还能够安全地服务社会?还能在多长的时间内安全地服务社会?这是任何一个经过大规模基本建设之后的社会都要面临的实际问题^[7]。由此,工程结构的健康监测技术应运而生。自20世纪70年代后期以来,首先是在基础设施建设方面实行以管代建政策的发达国家,其后是经历基建大跃进之后工程结构以超快速度老化的发展中的国家,都面临着工程结构健康监测的难题。在这一领域,系统辨识技术是核心的主流技术。

凡此种种,系统辨识技术在结构工程中的应用不一而足。

1.2 结构工程系统辨识的定义

所谓系统,是指由某些要素构成的功能体,它具有稳定的内在规律,可以由适当的数学模型来表达;它的存在状态可以由状态参数来加以描述,一旦状态参数被确定,那么系统的状态也随之被确定;它接受外界输入激励,并产生可以测量的输出响应,而这种响应又是系统内部状态参数的某种反映。

如果系统的内在规律完全已知,可以建立完善的关于系统状态的数学解析表达式,则此时系统的数学模型称为“白箱”模型;如果系统的内在规律完全未知,只能单纯地从系统的输入、输出关系来考察系统的特性,则此时系统的数学模型称为“黑箱”模型;如果系统的内在规律部分已知,部分未知,则此时建立的数学模型为“灰箱”模型^[8]。

这三种模型中,“黑箱”模型的正确辨识难度最大,该模型的辨识过程完全没有既有理论知识框架的约束,无法进行“纠偏”,所以辨识结果的可靠性最低。事实上,结构工程问题以工程力学、材料科学、工程规范等知识为背景,一般情况下不存在所谓的“黑箱”问题。然而这并不是说“黑箱”模型在结构工程研究中完全不存在。只不过我们应该尽量避免使用“黑箱”模型。在结构工程实验中,很多情况下输入激励不可控制,有时甚至不可测量,而只能假设输入激励为理想白噪声,单纯依靠输出响应来辨识待定的结构系统。此时就更应该避免使用“黑箱”模型。因此,尽量选用物理意义明确的模型是选择待辨识模型的第一个原则。

在工程结构分析中,虽然对于某些结构可能还会直接使用数理方程建立模型,但使用结构有限元模型在计算机辅助分析手段十分发达的今天已经成为最为普遍的选择。不过,有限元模型虽然在结构设计、分析中扮演着不可替代的角色,但事实上,在很多时候它并不是十分适合工程结构的系统辨识工作,至少不适合被用来“直接拟合”实测响应的时间序列。这其中最主要的原因是结构有限元模型往往过于庞大,在矩阵运算过程中会产生不可克服的数值计算稳定性问题。避免使用参数过多、矩阵维数过大的模型,而优先选用结构简单、系统维数少的模型是选择待辨识模型的第二个原则。

然而,有限单元法似乎已经成为结构工程研究人员的一种思维方式,如果待辨识模型很难,甚至无法与有限元模型建立起明确的联系,恐怕也不易为结构工程领域的从业人员所接受。事实上,在结构工程系统辨识领域,有限元模型是经常被采用的,而有限元模型修正问题正是本领域最重要的研究课题之一。

一般来讲,非线性模型的辨识难度大于线性模型的辨识难度,所以除非有必要,应首选线性模型作为待辨识模型。当采用非线性模型时,往往可以将其在一定范围内线性化,以降低辨识难度。

总之,待辨识模型的选择需要遵循一定的原则,将问题简化而不是复杂化。

结构工程系统辨识的过程是:在以上待辨识结构系统模型的基础上,通过调整系统模型的某些方面,使得模型能够在实测输入激励的作用下拟合实验中测量得到的输出响应。

系统模型的调整有以下两个层次:

首先是模型结构层面上的调整。广义上讲,模型结构的调整就意味着更换待辨识模型。为此,应该事先选定一组待辨识模型,组成待辨识模型集合,通过辨识过程,在待辨识模型集合中挑选最适合的模型用于系统辨识。如状态空间模型在实验条件下不一定与 ARMA 模型等价,因此两种模型对实测数据的拟合程度可能存在差异,可以通过选择适当的模型,来获得对实验数据的较好拟合。在结构力学层面,计算模型均为实际结构的简化模型,因此可能存在建模误差。简化方式不同,如力学方程的简化策略不同,结构边界条件的简化策略不同,次要构件的取舍策略不同等都可能使得简化模型的偏差程度与偏差方式有所不同。也就是说,对于特定的待辨识结构,可能存在不同的简化模型。模型结构层面的调整还应该包含不同简化模型之间的选择。以上模型的简化过程往往需要实验者具有较强的工程力学背景和工程经验,也是结构工程系统辨识的主要难点。

其次是模型参数层面上的调整。当模型的结构确定之后,通过调整待辨识模型中的参数,使模型对实测输入-输出关系的拟合达到最优。这一过程通常被称为模型参数识别。

以上所谓的拟合是在一定的系统等价准则,也就是误差评判准则的基础上进行的。如果系统等价准则选取不同,系统辨识的结果也可能不同。在结构工程中,我们可能并不需要对实测数据进行“全面”拟合,而只是需要在特定的频段对实测数据进行拟合,或者只是希望结构的数学模型能够仿真实测数据的某些统计指标,如根方差、平均值、最大值、最小值等。当选择不同的等价准则时,系统辨识的结果、辨识过程的难度、辨识模型的选取均可能不同。土木工程结构的原型实验工作环境较为恶劣,不可控、不可知的因素比较多,加之土木工程结构往往体量巨大,激励困难,实验的可操作性和可选择性较低,因而实验误差较大,实验数据的可靠性不一定很高。因此,选择适当的系统评价准则,突出问题的主要方面,忽略问题的次要方面,从而简化辨识过程,是十分重要的实验指导思想。

1.3 结构工程的系统辨识问题

本书所讨论的工程结构大致分为两类:一类是单纯结构系统;另一类是流-固耦合系统。前者只考虑结构系统本身的特性,后者则还需要考虑结构周围流体的力学效应。一般来讲,单纯结构系统的建模比较规范统一,模型结构层面的辨识任

务并不是十分繁重,主要是模型参数的辨识。但是如果我们力求建立简化模型,以便减小对系统辨识方法的压力,那么模型结构层面的辨识任务就会显现出来。而在流-固耦合系统中,流体的行为极其复杂,只能通过简化模型来进行辨识,所以模型结构层面的辨识任务与模型参数层面的辨识任务同样重要。

通常情况下,结构工程领域的分析模型是建立在力学原理之上的,必然能够在一定程度上反映实际工程的状态。事实上,如果工程结构的分析模型能够准确反映结构的真实状况,那么我们就不会有使用系统辨识技术的必要。但是,待分析的结构不但有形式简单,可以精确仿真的结构,还有形式复杂,不易精确计算的结构;不但有新建的比较健康且模型容易确定的结构,还有已经服役若干年的,模型偏差在所难免的老旧结构。因此,结构计算模型的分析结果与结构的实际状态之间往往存在着这样或者那样的偏差,而且这种“预测”与“现实”之间的差距通常又具有明确的物理意义和实用价值,这才使得系统辨识技术的应用成为必然。

结构分析模型的偏差可能有许多来源,但总结起来可以分为结构层面、材料层面和荷载层面三个误差源。结构层面的问题可能来自局部,如构件节点性能的改变,结构的局部损伤等;也可能来自整体,如确定某些边界条件时的偏差,如对复杂结构进行模型简化,建立简化模型所带来的偏差等。材料层面的偏差往往具有全局性的作用,如混凝土材料的实际性能与设计选用值之间的偏差,往往会“均匀地”影响整个结构体系,但是由于局部材料的劣化造成重大问题的例子也并不罕见。荷载估计偏差对结构系统分析结果的影响既可能是全局性的,也可能是局部性的,这要视荷载的性质和结构的特点而定,如风荷载的预估偏差可能会造成结构整体振动分析的偏差,也可能会造成结构局部的意外破坏。

系统辨识可以分别在以上三个层面进行,也可以在以上三个层面中某两个或全部三个层面同时进行,对待辨识模型进行修正,寻找能够拟合实验数据的模型参数与模型结构。

1.3.1 单纯结构系统的辨识问题

1.3.1.1 结构层面的模型偏差

1. 模型简化

对结构模型进行简化是设计分析过程中常用的手段。例如,在桥梁设计中,对实际断面如图 1.1 所示的桥梁结构简化为变截面实体连续梁,并在支座处设固定铰支和滚动边界,然后进行分析和计算是通常的做法。简化实体梁的截面参数由桥梁实际断面的截面参数计算而来。此种简化计算模型在结构静力分析中能够满足实际工程的精度要求,但在结构的模态实验过程中,就未必能够满足精确确定结

构的各阶活跃模态的要求。因为在静力设计工况下,结构变形的“波长”较长,梁假设可以较为精确地仿真结构行为,而在模态试验中,结构处在多模态振动工况,某些活跃振型的波长相对较短,对梁假设会产生一定的不利影响,而且很有可能这种影响对不同截面形式及对不同阶振型而言是不同的。因此,结构的模型简化在模态实验中的副作用可能是十分复杂的。忽略了这些影响,可能会给基于模态实验的结构状态判定,如模型修正等带来偏差。诸如此类的模型简化问题很多,在此不一一列举。

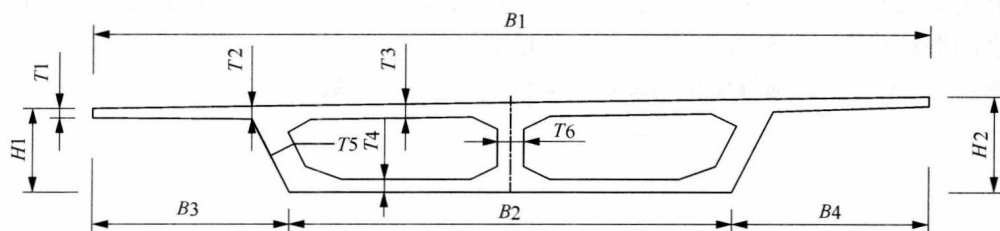


图 1.1 某桥梁截面形式

2. 结构边界条件的确定

在很多情况下,结构的边界条件并不一定十分明确,如同图 1.2 所示的桩柱。当需要对下部桩柱结构的实际状况进行评估时,可以通过横桥向桩柱振动的模态试验来进行。由于存在桩土耦合作用,桩柱的实际振动长度取决于桩柱自身的刚度与桩周土的等效弹簧刚度之间的关系。可以预见,桩柱各阶振动的刚度并不相同。当桩柱较高,桩柱的质量与主梁的质量相比不能忽略,因此,桩柱振动存在多阶振型时,桩柱的下端边界条件该如何确定将是影响实验结果解读的因素之一。以上仅是边界条件确定误差源的一个例子,其他例子还有很多,在此不再赘述。

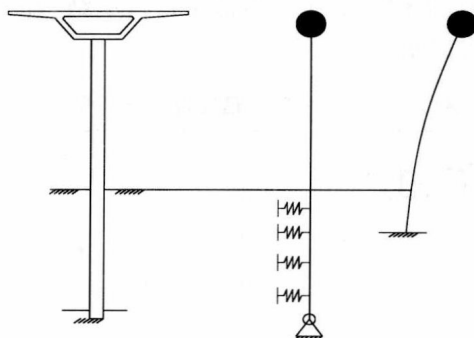


图 1.2 桩柱计算长度的确定

3. 结构损伤

结构的损伤对于混凝土结构而言,主要是指结构受力较大处的开裂或压碎。对钢结构而言,主要指应力集中区域如焊缝等处的开裂和局部的翘曲等因素引起的结构刚度损失。结构损伤识别是系统辨识技术在结构工程中最主要的应用之一。

结构损伤往往会造成结构构件力学性能原则性的改变,如图 1.3 所示的薄壁结构,左图为完好结构断面,右图为焊缝开裂后的断面。两者相比,力学特性将会有明显的差别。闭口结构表现为弯扭独立的振动状态,而开口结构表现为弯扭耦合的振动状态。这就要求用于仿真完好结构的待辨识模型也能够适用于损伤结构,否则无论怎么调整模型的参数,都将无法拟合实验数据。

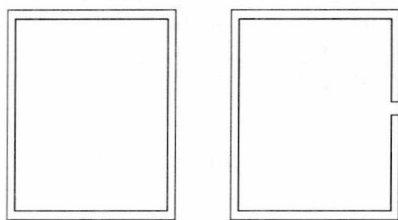
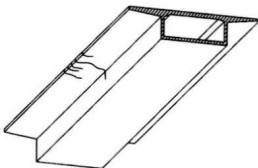
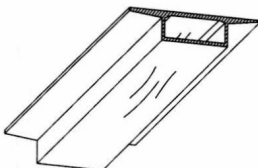


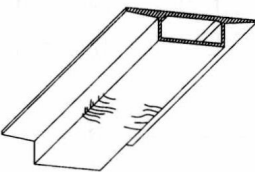
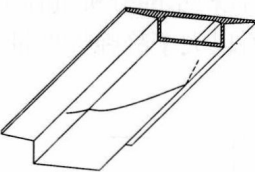
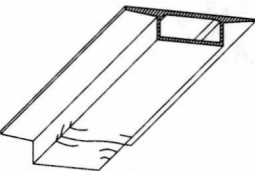
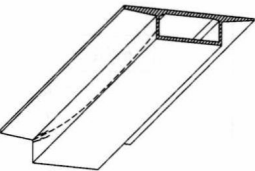
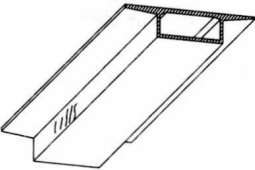
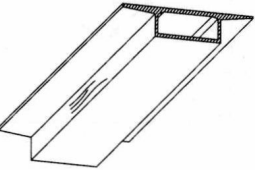
图 1.3 薄壁结构力学性能的变化

一般情况下,结构损伤识别工作的前提是:损伤信息不明,即损伤信息完全未知或不完全已知。结构损伤的信息包括损伤位置,损伤形式,损伤程度等。在实际工程中的许多结构,如混凝土结构经常会存在多处且每处数量较多、形状不规则、深度不同的裂缝或裂缝群,未知因素较多,辨识难度较大。但是,实际结构的损伤也往往带有某种“模式”,在系统辨识过程中,如果能充分利用这些模式的特点,将可能会达到事半功倍的效果。表 1.1 列出预应力混凝土单箱单室箱梁结构几种损伤模式。在桥梁工程中,类似的损伤极为常见。桥梁结构的损伤识别问题是目前比较引人注目的系统辨识问题之一。

表 1.1 常见预应力箱梁桥的损伤模式^[9]

	
墩顶顶板横向及腹板竖向裂缝	顶、底板纵向裂缝

续表

	
跨中底板横向及腹板下缘竖向裂缝	贯通腹板底板螺旋状裂缝
	
剪跨区、跨中底板横向贯通及腹板下缘竖向裂缝	预应力锚下发散裂缝
	
梁端及 1/4 跨腹板中部斜裂缝	腹板水平裂缝

1.3.1.2 材料层面的模型偏差

结构工程设计中所采用的材料性能指标均是统计学意义上的代表值。例如，我国相关规范规定，合格钢绞线的弹性模量为 $195 \pm 10 \text{ GPa}$ ，高强钢丝的弹性模量为 $205 \pm 10 \text{ GPa}$ ，而混凝土材料由于会受到配合比、养护条件、外加剂、骨料特性、施工质量等一系列因素的影响，材料性能的离散性要大得多。

因为在工程结构健康监测和桥梁工程施工监控中，材料的弹性模量是十分重要的评估指标，所以有必要就材料的弹性模量问题展开一点讨论。

混凝土的动弹性模量与静弹性模量不同。一般认为混凝土材料的动弹性模量高于静弹性模量，原因是动弹性模量是低应变情况下的切线模量而混凝土静弹性模量是在不超过 50% 抗压强度的应力下，加卸载 10 次循环后应力差与相应应变差的比值，为割线模量。但是实验表明^[10]，以上观点未必正确。

由图 1.4 可见，对于水泥砂浆材料，低静应变与高静应变两种工况下的静弹性模量有明显的差别，说明前述关于动、静弹性模量的分析过程能够得到实验数据的佐证，即小应变弹性模量大于规范静弹性模量。但是对于水泥混凝土材料而言，