

目 录

| | |
|--|-----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 引言 | 1 |
| 1.2 桥梁结构安全监测的发展 | 2 |
| 1.3 桥梁结构安全监测的目标..... | 10 |
| 1.4 建立大跨桥梁结构安全监测系统的主要问题..... | 12 |
| 第 2 章 大跨桥梁病害与结构分析方法 | 15 |
| 2.1 悬索桥的结构特点..... | 15 |
| 2.2 斜拉桥的结构特点..... | 19 |
| 2.3 大跨桥梁损伤主要原因..... | 23 |
| 2.4 大跨缆索支承型桥梁主要病害..... | 25 |
| 2.5 基于安全监测的大跨桥梁结构分析..... | 31 |
| 第 3 章 大跨桥梁安全监测系统设计 | 39 |
| 3.1 系统一般构成与设计原则..... | 39 |
| 3.2 大跨桥梁结构安全监测系统的功能..... | 40 |
| 3.3 大跨桥梁安全监测策略..... | 41 |
| 3.4 数据采集与传输..... | 48 |
| 3.5 数据处理与控制..... | 53 |
| 第 4 章 桥梁安全监测中的测试技术 | 57 |
| 4.1 大跨桥梁结构日常周期检测内容..... | 57 |
| 4.2 大跨桥梁结构监测常用测试技术..... | 61 |
| 4.3 光纤传感器技术在大跨桥梁安全监测中的应用..... | 67 |
| 4.4 GPS 技术在桥梁安全监测中的应用 | 73 |
| 第 5 章 大跨桥梁基础安全监测异常状态识别与预测 | 82 |
| 5.1 引言..... | 82 |
| 5.2 基础安全监测模型的基本原理..... | 82 |
| 5.3 地基基础监测预测模型..... | 83 |
| 5.4 地基基础安全判别标准拟定方法..... | 91 |
| 5.5 基于回归统计分析的基础安全监控模型与预警..... | 93 |
| 5.6 基于加窗最小二乘平稳法的残差趋势预警指标..... | 97 |
| 5.7 监测异常值的成因分析..... | 98 |
| 第 6 章 大跨桥梁上部结构监测预警与损伤识别 | 105 |
| 6.1 引言 | 105 |
| 6.2 大跨桥梁上部结构预警与损伤识别机理概述 | 106 |

| | | |
|-------------|---------------------------------|------------|
| 6.3 | 监测系统数据分析预处理 | 108 |
| 6.4 | 基于实时监测数据的预警设置 | 112 |
| 6.5 | 基于结构动力特性的损伤识别理论与方法 | 113 |
| 6.6 | 基于结构静力特性的损伤识别方法 | 116 |
| 6.7 | 基于小波包能量谱的结构损伤预警方法 | 117 |
| 6.8 | 结构损伤识别的神经网络方法 | 122 |
| 6.9 | 基于统计分析的结构状态识别方法 | 128 |
| 第7章 | 大跨桥梁地基及基础安全监控的评估分析 | 134 |
| 7.1 | 引言 | 134 |
| 7.2 | 基础分析有限元模拟 | 136 |
| 7.3 | 岩土体力学参数对桥梁基础基底反力的敏感性分析 | 140 |
| 7.4 | 基坑岩土体力学参数的确定性反分析及随机反分析 | 142 |
| 7.5 | 基础位移反分析 | 145 |
| 7.6 | 大跨悬索桥锚碇基础抗滑稳定及抗倾覆稳定安全评估 | 153 |
| 第8章 | 大跨桥梁上部结构安全评估 | 155 |
| 8.1 | 结构有限元模型修正 | 155 |
| 8.2 | 结构整体安全综合评价 | 156 |
| 8.3 | 构件损伤对结构监测参数以及承载力影响 | 159 |
| 8.4 | 结构整体安全评定——变权层次评估 | 161 |
| 8.5 | 变权的层次分析法在润扬大桥悬索桥评估中的应用 | 166 |
| 8.6 | 结构可靠性评估 | 172 |
| 第9章 | 大跨桥梁安全监测与评估软件 | 184 |
| 9.1 | 润扬大桥监测系统设计与传感器布设 | 184 |
| 9.2 | 监测评估软件总体构成 | 188 |
| 9.3 | 上部结构监测子系统软件 | 189 |
| 9.4 | 结构预警子系统 | 192 |
| 9.5 | 评估子系统 | 194 |
| 9.6 | 原始指纹数据库 | 198 |
| 9.7 | 基础安全监测系统 | 205 |
| 9.8 | 基础安全监测辅助决策系统 | 209 |
| 9.9 | 苏通大桥安全监测系统设计与传感器布设 | 213 |
| 第10章 | 大跨桥梁基础安全监测与评估实例 | 219 |
| 10.1 | 江阴大桥南岸地基监测系统设计与数据分析 | 219 |
| 10.2 | 润扬大桥塔地基及锚碇基础安全监测 | 228 |
| 10.3 | 泰州大桥塔地基及锚碇基础安全监测系统设计 | 238 |
| | 参考文献 | 257 |

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

重大工程结构的使用期长达几十年、甚至上百年,在环境侵蚀、材料老化和荷载的长期效应、疲劳效应和突变效应等灾害因素的共同作用下,将不可避免地导致结构系统的损伤累积和抗力衰减,从而导致抵抗自然灾害、正常环境下的使用能力的下降,极端情况下易引发灾难性的突发事故,造成人民生命财产的重大损失,对公共安全造成巨大冲击以致产生恶劣社会影响。因此,为了保障结构的安全性、完整性、适用性与耐久性,对于重大工程结构和基础设施急需采用有效的技术手段监测和评定其安全状况,并及时修复和控制结构损伤,具有现实意义和广阔的应用前景。

20 世纪 80 年代以来,随着经济的高速发展和社会的进步,大型桥梁等基础设施在世界各国不断地兴建。尤其是近几年,随着我国经济实力的提高,已在大江大河上建设了一批特大型斜拉桥和悬索桥,如汕头海湾大桥(悬索桥、主跨 452m)、西陵长江大桥(悬索桥、主跨 900m)、虎门大桥(悬索桥、主跨 888m)、宜昌长江大桥(悬索桥、主跨 960m)、江阴长江大桥(悬索桥、主跨 1 385m)、香港青马大桥(悬索桥、主跨 1 377m)、润扬长江大桥(南汊悬索桥、主跨 1 490m)、西堠门跨海大桥(悬索桥、主跨 1 650m)、南京长江二桥(斜拉桥、主跨 628m)、南京长江三桥(斜拉桥、主跨 648m)、苏通长江大桥(斜拉桥、主跨 1 088m)。目前,我国正在建设南京长江四桥(悬索桥、主跨 1 418m)、马鞍山长江大桥(三塔两跨悬索桥、主跨 1 080m+1 080m)、泰州长江公路大桥(三塔两跨悬索桥、主跨 1 080m+1 080m)等更大跨径的特大型桥梁。

大跨桥梁的生命周期包括设计、施工、运营、养护管理等阶段,在整个寿命期内桥梁结构面临着如何保证结构设计的合理与安全性、施工安全与质量保证、使用期间的安全性与耐久性、维护管理的经济性问题。因此,对于整个生命周期内的大跨桥梁结构状态进行监测与安全性评估,对于实现合理的养护维修计划、保证桥梁的正常运营以及结构的安全耐久性具有重要的意义。

从大跨桥梁的整个结构体系的结构特点看,桥梁的安全性主要体现在基础的安全性和上部结构的安全性。大型桥梁的跨度长、自重大,传递到地基上的作用力很大,一般需要设置大型或特大型桥梁基础。桥梁基础是桥梁的关键承载结构,一旦发生基础的异常变形与破坏,将导致整个桥梁的整体破坏,造成的经济损失将是十分巨大的,桥梁地基基础的安全性监测与分析是大型桥梁建设与使用过程中的一项重要工作。而上部结构在运营中受交通、环境等外界作用荷载的影响更直接,是大桥运营维护管理部门极为关注的。桥梁在长期的运营使用过程中,由于气候、环境等自然因素的作用和日益增加的交通量及重车、超重车过桥数量的增加,桥梁上部结构的安全性和使用功能也必然发生退化,难免会发生各种结构损伤。

自 1940 年美国塔科马(Tacoma)悬索桥发生风毁事故以后,桥梁结构安全监测的重要性就引起人们的注意。但是,由于受科技水平的限制和人们对自然认识的局限性,早期的监测手

段比较落后,在工程应用上一直没有得到很好的发展。20世纪60年代以来,在北美、欧洲和亚洲的一些国家和地区,相继发生了桥梁结构的突然性断裂事件。例如,1962年,美国 Kings 钢桥因疲劳而倒塌;1967年,美国俄亥俄河上的一座主要桥梁倒塌,造成46人丧生;1994年,韩国圣水(Sungsu)大桥中孔崩塌,造成32人死亡;1999年,我国重庆市綦江彩虹桥突然倒塌,死伤数十人;2000年8月,我国台湾高屏大桥倒塌;2001年11月,四川宜宾南门大桥桥面突然断裂;2004年6月,我国辽宁盘锦市境内辽河大桥中孔突然倒塌;2007年8月1日,美国明尼苏达州横跨 Mississippi 河的 I-35W 桥(全长581m、三个主跨、拱式钢桁架桥)在使用40年后突然倒塌。这些灾难性事故不仅引起了公众舆论的严重关注,也使各国政府和科研机构意识到,研究桥梁结构的健康状态监测与诊断问题已刻不容缓。

导致桥梁结构发生破坏和功能退化的原因是多方面的,有些桥梁的破坏是人为原因造成的(劣质工程,如四川綦江彩虹桥等),但大多数桥梁的破坏和功能退化是自然原因造成的。自然原因中,基础沉降变位、循环荷载作用下的裂纹失稳扩展是造成许多桥梁结构发生灾难性事故的主要原因。近年来,国内发生的几起大桥坍塌或局部破坏事故在很大程度上是由于构件疲劳和监测养护措施不足,从而严重影响构件的承重能力和结构的使用,进而发生事故。理论研究和经验都表明,加强建设期间和成桥后运营过程中的结构状态检测、损伤检测,加强结构的承载能力、运营状态分析与预警,适时维修,有助于从根本上消除隐患及避免灾难性事故的发生。

现代大跨桥梁设计方向是更长、更轻柔化、结构形式与功能日趋复杂化。为确保大跨桥梁的结构安全、实施经济合理的维修计划、实现安全经济的运行及查明不可接受的响应原因,通过安全监测系统发现桥梁早期的病害,能大大节约桥梁的维修费用,避免出现重大的经济损失。

1.2 桥梁结构安全监测的发展

工程结构安全监控开始于20世纪60年代初,最早是在大坝工程方面得到应用,如今在桥梁工程、高层建筑等领域都得到发展。自20世纪80年代,由于人们对于大型桥梁安全性与耐久性的认识的提高,对于原有桥梁与在建的大型桥梁进行安全监测控制逐渐发展起来。欧美一些国家明确提出了结构健康监测(Structure Health Monitoring,简称为 SHM)的新理念,并先后在许多重要的大跨度或结构体系新颖的桥梁上建立了健康监测系统。

从监测的部位而言,桥梁系统的安全监测可以分为桥梁上部结构的监测和桥梁地基与基础的监测。从监测的时机来看可以分为:在桥梁寿命初期进行的施工过程结构安全监测;成桥后的结构运营安全监测。施工期监测就是在桥梁建设施工阶段,监测结构的变形、应力等变量,及时了解结构的状况,从而保证施工安全和结构质量,同时可以进行施工的反馈设计,如丹麦就对法罗(Faroe)跨海大桥进行了施工阶段的安全监测,中国在江阴大桥、虎门大桥、徐浦大桥等桥梁上部结构与地基基础的施工阶段都进行了安全监测,通过监测结果来指导施工设计与进度。

结构安全监测就是在桥梁建设与使用阶段对桥梁的上部结构与地基基础实时测量某些点的位移、应变、应力、温度、加速度与倾斜角等,一方面了解结构所受荷载等情况以及在荷载状

况下的结构响应,判断结构是否安全,进一步通过一定的计算手段判断结构是否发生损伤以及损伤的位置。

1.2.1 大跨桥梁基础安全监测的发展

大跨度桥梁跨度长、自重大,传递到地基上的作用力和作用范围也较大,需要设置大型或特大型桥梁基础,涉及的岩土问题相应也较多。而且大跨桥梁工程设计与建设周期长、使用环境恶劣,易受自然环境的影响,且长期承受动荷载作用。锚碇、塔基础、地基等作为大跨桥梁的根基,如果发生稳定性破坏,将导致整个桥梁损毁。

如悬索桥的大部分荷载将由主缆承受,通过索股与锚碇架分散传到锚碇上,再由锚碇基础传递到地基。锚碇基础及地基一旦发生稳定性破坏,将导致整个桥梁的破坏,造成的经济损失将是十分巨大的。锚碇等地基基础的稳定安全是关系到整个大桥安全最重要的因素之一,大跨桥梁的塔基、锚碇等基础在施工期与运营期存在难以预测的地震、施工质量缺陷等因素,都会引起桥梁基础的不安全。因此,建设期和运营期的悬索桥锚碇等基础安全稳定性更成为各界的广泛关注的问题,是大型桥梁建设与运营过程中必须进行的一项重要工作。

目前,进行地基基础稳定性分析的理论方法主要有极限平衡法与干扰能量法等,但这些方法在非线形有限元求解等方面尚不成熟。随着研究工作的深入,人们逐渐认识到由于岩土材料的复杂性与随机性等因素,单纯利用数值计算模型难以对大型桥梁地基基础在施工与使用过程中的稳定性进行准确的预测与分析。于是人们逐渐将现场监测技术应用到大型桥梁地基基础的稳定性预测与控制中,通过理论计算模型与现场监测手段相结合,来进行大型桥梁基础设施、地基基础稳定性的分析、预测与控制。

桥梁地基基础的工程安全监测贯穿于工程设计、施工、结构运营等结构工程寿命内,对其实际情况的监测具有重要意义。通过对基础外部变形,基础结构内部变形、应力与应变等变量进行实时并且长期的监测,将这些信息反馈到专家系统与计算模型中,有利于提高对地基基础稳定性分析的准确程度。同时根据监测结果进行基础安全性分析,将分析结果作为依据对工程采取控制措施,做到“防患于未然”更显重要。不仅如此,地基基础的监测信息也可以用于验证桥梁基础的设计计算理论,对桥梁设计计算理论水平的提高发挥重要作用。

随着对大型桥梁结构的认识越来越深,人们不仅对上部结构监测技术进行深入研究,而且对大型桥梁地基变形、基础与地基相互作用等也日益重视,对于许多大型桥梁进行了地基基础安全监测。希腊科林斯海湾大桥地基处于80m厚的软土沉积层上,并跨越一个活动地质断层线,通过全球定位系统(GPS)监测地基基础的移动,三年的监测期间测量到的位移达52mm。日本明石大桥在锚碇的散索鞍设置了变位监测点,在锚碇体上设置了加速度监测点,用于锚碇地基基础的长期监测。江阴长江大桥在施工期为监控北锚碇及沉井基础的变位和稳定,在沉井顶面4个角点和鞍部顶面各布置了4个变位监测点,对锚碇变位进行监测,并将锚碇的监测信息用于主缆架设与主鞍位移的控制。润扬大桥在施工期间布置位移测点、测斜仪、钢筋计、土压力计、孔隙水压力计等近500个传感器对锚碇塔基础进行安全监测,其中部分位移监测点、钢筋计等用于运营期间的基础变位、压力的长期观测。

过去我国对桥梁的地基基础进行安全性分析,主要是依据地质调查、力学参数的室内试验来建立理论计算模型,通过这些理论计算模型进行桥梁地基基础的安全性分析与评估。随着

大型桥梁地基基础实时监测系统的应用,实现了对于桥梁地基基础变形、应力与应变等变量的实时测量分析,这些信息反馈到专家系统与理论计算模型中,大大提高了对地基基础安全性分析和预测的准确性。

1.2.2 上部结构安全监测的发展

国外桥梁结构安全监测系统的应用可以追溯到 20 世纪 80 年代。美国在 80 年代中后期,开始在多座桥梁上布设监测传感器,如佛罗里达州的 Sunshine Skyway 斜拉桥安装了 500 多个各类传感器,用来测量桥梁建设过程中和建成后桥梁的温度、应变及位移。英国在 80 年代后期,开始研制和安装大型桥梁的检测仪器和设备,研究和比较了多种长期监测系统的方案,并在爱尔兰 Foyle 钢箱梁桥安装了监测系统,该系统的主要监测项目包括主梁挠度、气象数据、温度、应变等,试图探索一套有效的、可广泛应用于类似结构的监测系统。丹麦曾对总长 1 726m 的 Faroe 跨海斜拉桥进行施工阶段及通车首年的监测;此外,在大带桥(Great Belt Bridge)的结构安全监测系统中,安装了近 200 个各类传感器对桥梁结构的温度分布、结构沉降、位移、振动等进行监测。另外,英国的 Flintshire 独塔斜拉桥、美国的 Benicia-Martinez 钢桁架桥、挪威的 Skarmsundet 斜拉桥、墨西哥的 Tampico 斜拉桥、加拿大的 Confederation 连续刚构桥等也安装了不同规模的结构安全监测系统(表 1-1 和表 1-2)。

国内外安装结构健康监测系统的桥梁

表 1-1

| 桥梁名称 | 结构类型 | 跨度 (m) | 国家或地区 |
|-------------------|------|-------------------|-------|
| Sunshine Skyway 桥 | 斜拉桥 | 164.7+366+164.7 | 美国 |
| Commodore Barry 桥 | 悬臂桥 | 274+548+274 | 美国 |
| Fred Hartman 桥 | 斜拉桥 | 160.6+416.6+160.6 | 美国 |
| Golden Gate 桥 | 悬索桥 | 343+1 280+343 | 美国 |
| Ironton-Russell 桥 | 悬臂桥 | 117+241+117 | 美国 |
| 明石桥 | 悬索桥 | 960+1 991+960 | 日本 |
| 南备赞濑户桥 | 悬索桥 | 274+1 100+274 | 日本 |
| 多多罗桥 | 斜拉桥 | 270+890+270 | 日本 |
| 白鸟大桥 | 悬索桥 | 330+720+330 | 日本 |
| 大鸣门桥 | 悬索桥 | 330+876+330 | 日本 |
| Flintshire 桥 | 斜拉桥 | 194+100 | 英国 |
| Foyle 桥 | 梁桥 | 144.3+233.6+144.3 | 英国 |
| Forth 公路桥 | 悬索桥 | 408+1 006+408 | 英国 |
| Namhae 桥 | 悬索桥 | 128+404+128 | 韩国 |
| Saohae 桥 | 斜拉桥 | 60+200+470+200+60 | 韩国 |
| Yeongjing 桥 | 悬索桥 | 125+300+125 | 韩国 |
| Banghwa 桥 | 系杆拱桥 | 540 | 韩国 |
| Gwangan 桥 | 悬索桥 | 200+500+200 | 韩国 |
| Confederation 桥 | 梁桥 | 45×250 | 加拿大 |

续上表

| 桥梁名称 | 结构类型 | 跨度 (m) | 国家或地区 |
|-------------------------|------|-------------------|-------|
| Taylor 桥 | 梁桥 | 5×33.0 | 加拿大 |
| Great Belt 桥 | 悬索桥 | 535+1 624+535 | 丹麦 |
| Pereria-Dos Quebradas 桥 | 斜拉桥 | 114.6+210.9+114.6 | 哥伦比亚 |
| Normandie 桥 | 斜拉桥 | 856 | 法国 |
| Skarsundet 桥 | 斜拉桥 | 240+530+240 | 挪威 |
| 青马桥 | 悬索桥 | 455+1 375+300 | 中国香港 |
| 汀九桥 | 斜拉桥 | 127+448+475+127 | 中国香港 |
| 汲水门桥 | 斜拉桥 | 160+430+160 | 中国香港 |
| 昂船洲桥 | 斜拉桥 | 1 018 | 中国香港 |
| 江阴大桥 | 悬索桥 | 1 385 | 中国 |
| 润扬大桥南汊桥 | 悬索桥 | 1 490 | 中国 |
| 润扬大桥北汊桥 | 斜拉桥 | 176+406+176 | 中国 |
| 苏通大桥 | 斜拉桥 | 主跨 1 088 | 中国 |
| 虎门大桥 | 悬索桥 | 888 | 中国 |
| 南京长江三桥 | 斜拉桥 | 主跨 648 | 中国 |

部分国内外桥梁监测系统中使用的传感器

表 1-2

| 传感器 | 青马桥 | 汀九桥 | 汲水门桥 | 明石桥 | 南京二桥 | 润扬大桥 | 江阴大桥 |
|--------|-----|-----|------|-----|------|-------|------|
| 风速仪 | 6 | 7 | 2 | 9 | 4 | 2 | |
| 温度计 | 115 | 75 | 224 | | | 28+16 | |
| 动态地秤 | 6 | 6 | 6 | | | | |
| 加速度计 | 17 | 67 | 3 | 10 | 27 | 85+15 | 72 |
| 位移传感器 | 2 | 2 | 2 | 7 | 6 | 4 | |
| 沉降传感器 | 9 | | 5 | | | √ | |
| 应变传感器 | 118 | 128 | 46 | 8 | | 40+20 | |
| 光纤传感器 | | | | | | 8+32 | |
| 水平仪 | 9 | 0 | 5 | | | | |
| 电子测距仪 | | | | | 1/16 | | 1/16 |
| 磁弹性测力仪 | | | | | | | 24 |
| 剪力销 | | | | | | | 12 |
| 速度计 | | | | 12 | | | |
| GPS | √ | | | | | √ | |
| 测斜仪 | | | | | | 6 | |

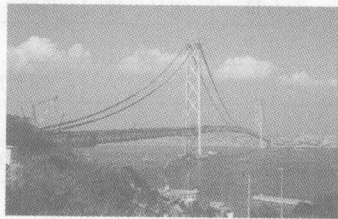
(1)加拿大 Confederation 桥,1997 年建成。全长 12.9km,是世界上最长的建于海水中的预应力混凝土箱梁桥。主跨 45×250m,设计寿命为 100 年。因为当时世界上还没有一种规范或标准能涵盖该桥的设计标准,于是在该桥上实施一套综合监测计划,以便对桥梁在冰荷载作用下的性能、桥梁的短期和长期变形、温度应力、车辆荷载及荷载组合、在风和地震荷载下的动

力响应以及环境对桥梁的侵蚀进行研究。监测系统所用的加速度计、应变计、倾斜计、水荷载传感器以及热电偶等各种传感器 740 个。

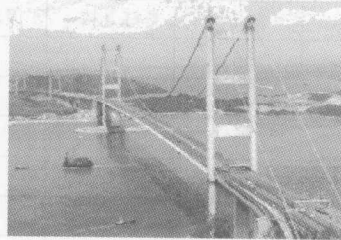
(2)日本明石海峡(Akashi-Kaikyo)大桥,如图 1-1a)所示,1998 年建成。主跨 1 991m,是目前世界上最长的悬索桥。为了证实**在强风和地震时的设计假定和有关参数的取值**,另外为确定桥梁在温度变化和受其他条件影响的变形特性,在该桥上安装了包括地震仪、风速计、加速度计、速度计、全球卫星定位系统(GPS)、测量主梁边缘位移的位移计、测量调频质量阻尼器(TMD)的位移计及温度计等传感器的监测系统。

(3)韩国 Seohae 桥和 Youngjong 桥。Seohae 桥为主跨为 400m 的双塔斜拉桥;Youngjong 桥为自锚式悬索桥,跨度布置为 125m+300m+125m,2000 年建成。建成后分别安装了结构健康监测**系统,监测内容包括结构的静动态性能和环境荷载**,其中 Seohae 桥安装了各种类型传感器 120 个,Youngjong 桥安装了各种类型传感器 380 个。

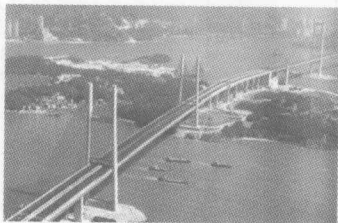
(4)香港青马(Tsing Ma)大桥、汲水门(Kap Shui Mun)桥和汀九(Ting Kau)桥,如图 1-1b)~1-1d)所示。其中,青马桥是主跨 1 377m 的悬索桥(图 1-2);汲水门桥为主跨 430m 的斜拉桥(图 1-3);汀九桥为 3 塔单索面斜拉桥,两个主跨分别为 448m 和 475m,1997 年建成。由于索支承桥对风比较敏感,香港路政署在这些桥上安装了保证桥梁运营阶段安全的监测系统,称之为“风和结构健康监测系统”(WASHMS)。该系统的监测项目包括作用于桥梁上的外部作用(包括环境因素及车辆荷载等)与桥梁的响应,共安装了 GPS、风速风向仪、加速度计、位移计、应变计、地震仪、温度计、动态地磅等各类传感器 774 个。



a) 明石海峡大桥



b) 青马大桥



c) 汲水门桥



d) 汀九桥

图 1-1 建立安全监测系统的大跨度桥梁

(5)上海徐浦大桥,1997 年建成。双塔双索面斜拉桥,主跨 590m,主梁采用钢梁和钢筋混凝土桥面板组成的组合梁,边跨为预应力混凝土连续梁。为了探索大跨度桥梁健康监测的经验,在该桥上安装了一个带研究性质的结构健康监测系统。该监测系统包括如下监测内容:车辆荷载、主跨主梁的标高、主跨主梁跨中断面的温度及应变、主跨主梁的自振特性以及斜拉索的索力及斜拉索的振动水平。整个监测系统共用各类传感器 74 个。

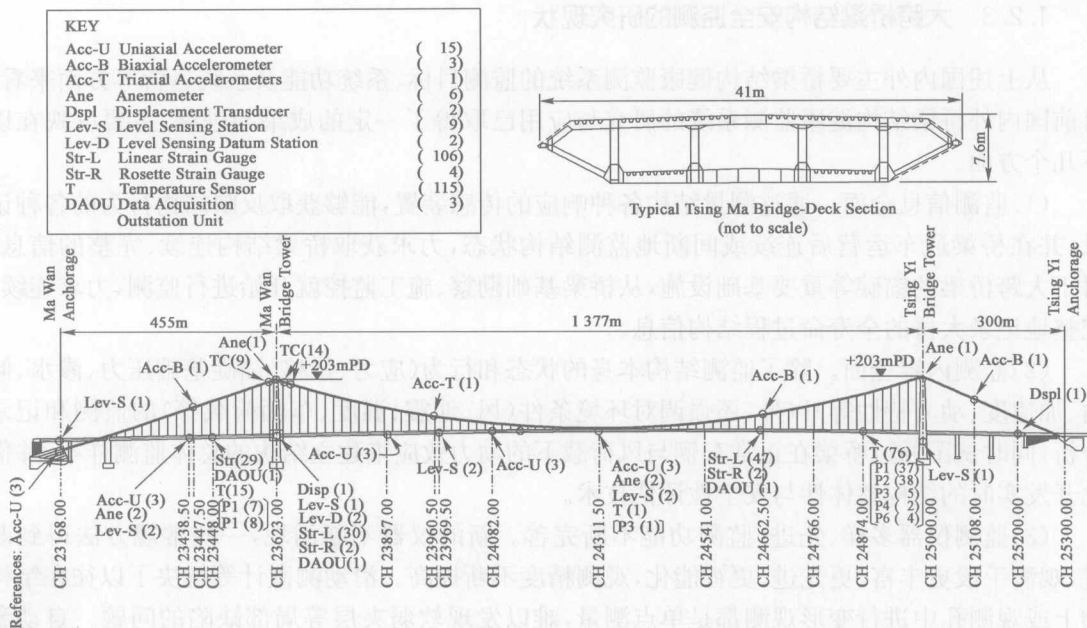


图 1-2 香港青马大桥上部结构健康监测传感器布置示意图

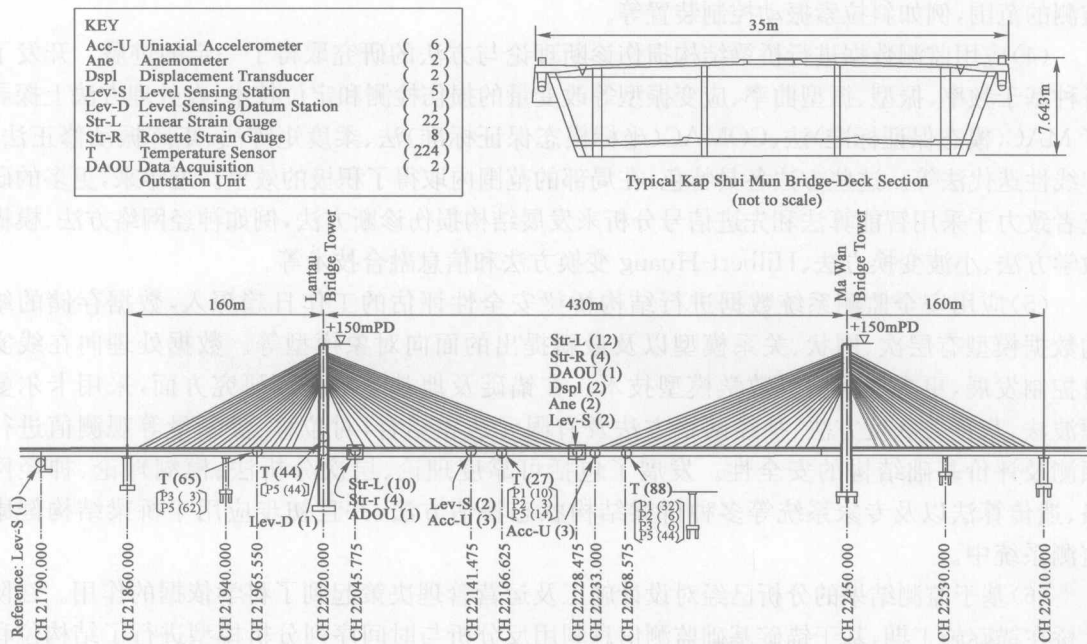


图 1-3 香港汲水门桥上部结构健康监测传感器布置示意图

1.2.3 大跨桥梁结构安全监测的研究现状

从上述国内外主要桥梁结构健康监测系统的监测目标、系统功能及系统运营等方面来看,目前国内外桥梁结构健康监测系统的研究与应用已取得了一定的成果与进展,主要反映在以下几个方面。

(1)监测信息全面。通过测量结构各种响应的传感装置,能够获取反映结构行为的各种记录,并在桥梁通车运营后连续或间断地监测结构状态,力求获取桥梁结构连续、完整的信息。对于大跨桥梁的锚碇等重要基础设施,从桥梁基础勘察、施工监控就开始进行监测,力求连续、完整地记录大桥的全寿命过程结构信息。

(2)监测内容全面。除了监测结构本身的状态和行为(应力、位移、锚碇基础压力、渗水、倾角、加速度、动力特性等)以外,还强调对环境条件(风、地震、温度、车辆荷载等)的监测和记录分析,同时试图通过桥梁在正常车辆与风荷载下的动力效应来建立结构的总体监测样本,并借此开发实时的结构整体性与安全性评估技术。

(3)监测仪器多样、先进,监测功能不断完善。新的仪器不断涌现,一些常规方法得到改进,观测手段更丰富、更先进、更智能化,观测精度不断提高。滑动测微计等解决了以往在结构物上或观测孔中进行变形观测都是单点测量,难以发现软弱夹层等局部缺陷的问题。自动激光准直系统大大地提高了变形观测的效率。伺服加速度传感器的使用,大大提高了测斜仪的精度与观测深度。变磁阻感应式遥测垂线坐标仪、深层基岩多点变位计、附壁位移计、结构CT技术、光纤传感等新型观测装置和技术得到了更多应用。监测系统具有快速大容量的信息采集、通信与处理能力,并实现网络共享。另外,一些重要辅助设施的工作状态也纳入长期监测的范围,例如斜拉索振动控制装置等。

(4)应用监测数据进行桥梁结构损伤诊断理论与方法的研究取得了一定的进展。开发了各种基于频率、振型、振型曲率、应变振型等改变量的损伤检测和定位技术,在处理方法上探寻了MAC(模态保证标准)法、COMAC(坐标模态保证标准)法、柔度矩阵法、矩阵振动修正法、非线性迭代法等。这些方法各具特色,在局部的范围内取得了积极的效果。近年来,更多的研究者致力于采用智能算法和先进信号分析来发展结构损伤诊断方法,例如神经网络方法、模糊数学方法、小波变换方法、Hilbert-Huang变换方法和信息融合技术等。

(5)应用安全监测系统数据进行结构桥梁安全性评估的工作日趋深入,数据存储的结构数据模型有层次、网状、关系模型以及最新提出的面向对象模型等。数据处理向在线实时控制发展,更多地采用了数学模型技术。在锚碇及地基基础监测研究方面,采用卡尔曼滤波法、灰色关联度方法、神经网络方法及有限元法相结合,对位移、渗漏量等观测值进行预测及评价基础结构的安全性。发展了包括可靠度理论、层次分析法、模糊理论、神经网络、遗传算法以及专家系统等多种桥梁结构状态评估方法,并且初步应用于桥梁结构健康监测系统中。

(6)基于监测结果的分析已经对设计施工及运营管理决策起到了科学依据的作用。江阴大桥在锚碇施工期,基于锚碇基础监测信息利用反分析与时间序列分析模型进行了结构位移预测分析,指出锚碇的水平位移过大并会导致上部结构的不安全,并及时更改了设计。润扬大桥则采用基于时间窗口的神经网络多步滚动预测技术,根据地下连续墙的变形监测数据对润

扬大桥南汉北锚碇地连墙的施工变形进行了预测,指导施工。

需要指出,上述关于桥梁结构损伤诊断、结构安全评估方面的研究进展还理论探索阶段,距离建立桥梁结构安全监测系统的理想目标尚有一定的差距。这主要是由于:①桥梁结构的不确定性因素和复杂的工作环境对结构响应的灵敏性造成了不利的影响,导致了目前桥梁状态监测结果分析判断的困难;②对桥梁结构在寿命周期内工作特性的变化缺乏全面深入的研究,难以建立客观统一的桥梁状态评估标准。

在安全监测系统建设方面,目前国内外已经建立的大跨桥梁结构健康监测系统大部分仅限于数据采集、保存,而在对监测数据进行科学管理方面、科学合理的桥梁评估指标的建立、结构健康状态诊断体系的建立、应用监测数据对桥梁健康状况进行系统评估等方面的研究与应用明显不足。系统的可靠性、长期稳定性、维修性等方面也存在问题。综合国内外已建的桥梁健康监测系统,主要有以下几方面需要完善:

(1)建立科学合理的桥梁健康状态和结构安全性评估系统,是整个结构安全监测系统的核心。目前国内大跨桥梁结构安全监测系统仅限于数据采集、保存,对于数据的处理与利用依然落后,在应用监测信息对桥梁结构健康状况进行状态评估方面尚未完善。目前还没有一个真正意义上的专家智能系统可以进行准确的损伤判断,几乎所有的系统都没有实现利用已有信息进行计算模型的修正,也没有提供结构受到损伤后的剩余承载力判断的能力。

(2)在进行桥梁监测系统设计与信息处理时,往往是上部结构与地基基础分开处理,在大跨桥梁的桩土耦合作用以及对于结构安全性影响方面的研究比较少。但是实际建设、运营中上部结构与锚碇地基基础等是一个相互影响的整体,应该建立统一的监测系统与分析评估系统。

(3)关于应用监测系统信息反馈于设计的方面研究较少。在基础方面,利用力学参数反演理论进行理论计算模型的修正与结构响应的预测等方面的研究,依然存在求解不稳定、反演结果可信性低等问题。而在上部结构,利用结构安全监测系统提取的运营状态结构特征反馈大跨桥梁结构构造设计方面的研究几乎是空白。

(4)结构健康评估系统要具有较好的开放性、兼容性。目前的大跨桥梁安全监测系统基本是一个自成体系的独立系统,而仅仅依靠监测系统的数据库还很难对于结构运营状态进行准确的评估。对于大跨桥梁结构状态评估要将结构安全监测系统与大桥的日常检测养护管理结合起来。

(5)监测项目的选择、测点布置、监测模式有待完善。在监测系统的布置上,经验的成分多,理论指导少,往往是根据设计者自己的经验,提出监测的项目和测点的布置,缺乏系统的理论指导。测点的布置要充分考虑结构安全评估的需要,还应充分考虑结构的设计思路、运营管理的要求。

(6)在监测手段方法上应有所突破。目前传感器存在的主要问题是耐久性与分布式监测能力差。传感器的选择除了要满足测量的要求外,还要满足数据通信的要求。应采用光纤传感器、GPS等现代测量技术,保证数据采集、传输和系统通信的可靠性。

(7)数据库的结构模式要充分考虑到结构评估、检索、管理、通信等方面的需要。系统的界面要形象地反映结构响应、桥梁结构工作的状况。

成桥后的结构状态识别是桥梁结构安全监测的核心问题,桥梁运营过程中的损伤检测、预警及适时维修主要涉及两个问题:一是如何对结构状态及参数进行识别,包括对结构系统中已经出现的损伤进行有效的识别、定位和评价;二是如何对有损结构的功能退化状况和使用风险进行定量评估。近年来,科学技术的发展已经给动态试验技术、大型复杂结构的在线监测、数值模拟和结构识别技术带来了很大进步,这些技术在航空航天和汽车工业等领域已经广为应用。但是这些技术手段在大型桥梁结构中的综合应用还不多见,这主要是由于桥梁等工程结构与航天航空工程、机械工程等结构有明显的差别,尺寸和质量大,具有较低的自振频率和振动水平,而且结构的动力响应极容易受到环境因素以及非结构构件因素的影响,实际结构的不确定性因素非常多。另外,桥梁结构试验在技术和经费方面难度也较大,因而很少进行整体结构的试验和测试。

随着科学技术的发展,目前在适用于结构健康监测的测量和通信技术方面也已经有了长足的发展,如光纤光栅传感技术、全球卫星定位系统(GPS)、现场总线控制技术和利用 Internet 的数据通信方法等。这些技术的成功发展使得在桥梁健康监测系统中方便地获取大量精确的测量信息成为可能。另一方面,在监测系统硬件发展的同时,健康监测的相关基础理论研究也在深入开展,其中大量的研究集中于结构完整性评估与结构损伤识别理论和方法。由于基于结构振动响应的健康诊断技术在航天、机械等领域的深入研究和较为成功的应用,这类技术被视为土木结构中除无损检测技术以外的最重要的损伤诊断方法并得到广泛的研究(当然,基于振动的诊断技术本身也可归为无损检测技术)。除了损伤识别方法研究以外,结构健康监测理论的研究还涉及测点优化布置、振动模态识别、结构特性变异性、海量数据流的处理等。

我国自 20 世纪 90 年代中期开始桥梁健康监测方向的研究,在工程实践方面,我国先后开发了江阴长江大桥、南京长江二桥、上海徐浦大桥、广东虎门大桥、润扬长江大桥、苏通大桥、西堠门大桥等特大桥梁结构健康监测系统,在监测系统的设计与布设以及监测系统的运营维护 and 数据分析与应用等方面积累了经验。

近年来,我国的桥梁建设取得了举世瞩目的成就。经济的迅速发展,对于交通能力的要求也在不断提高,不少桥梁的老化和功能退化已呈现加速趋势。为了确保大型桥梁结构的安全性和耐久性,减少和避免重大损失,进行大型桥梁结构工作状态和结构特性参数的监测和评估工作已迫在眉睫,开展大跨桥梁结构健康监测的研究与应用具有非常重要的意义。

1.3 桥梁结构安全监测的目标

现代大跨桥梁设计方向是更长、更轻柔化、结构形式与功能的日趋复杂化。虽然在设计阶段已经进行了大量的勘测、结构动力性能模拟试验等科研工作,然而由于大型桥梁的力学和结构特点以及所处的特定地质条件和气候环境,在大桥设计阶段完全掌握和预测结构在各种复杂环境和施工运营条件下的结构力学特性和行为是非常困难的。这主要是由于结构理论分析是基于设计图纸的理想化的有限元计算分析,并且分析时常以很多假定条件为前提。在有限元模型过程中通常存在:①材料本构关系的近似。尤其是岩土材料的力学参数往往是难以测准,只有通过室内或室外试验近似取值。②几何尺寸与形态的近似,其主要表现在结构分析

时,在一定的计算范围内对结构简化,再通过约束条件反映边界效应;地基的地质模型也是在概化基础上的一个近似模型等。③荷载与地应力的近似,由于荷载与地应力的不确定性,所以在确定性分析模型中的计算荷载也只是一种对实际荷载的近似。

因此,为确保特大跨桥梁的施工过程和运营期间的结构安全、实施经济合理的维修计划、实现安全经济的运行及查明异常结构响应原因,建立大跨桥梁安全监测系统是非常必要的。大跨桥梁安全监测系统是桥梁施工控制、结构养护决策系统的支撑条件之一(图 1-4)。

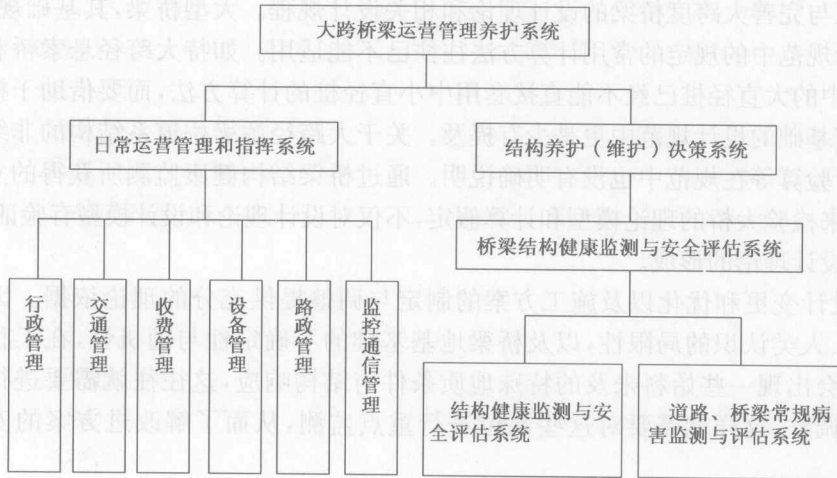


图 1-4 大跨桥梁运营管理与结构健康监测系统的关系

从建立大跨桥梁结构安全监测的目标与功能分析,现代桥梁安全监测不只是传统的桥梁检测加结构评价新技术,而是被赋予了结构安全监控与评价、施工方案优化、设计验证、管理与维护支持、研究发展等多个方面的意义(图 1-5)。具体包括:



图 1-5 大跨桥梁安全监测系统的目标

(1) 监测施工期与运营期大桥地基基础安全和结构工作状态, 评估结构的安全性和健康状态, 为大桥的科学施工、正常使用提供必要且可靠的信息。即监测系统通过对大桥地基基础的一些关键部位(如散索鞍、塔基、锚碇地基以及锚前引桥基础等)结构响应量(变形、应变与应力等)的实时测量, 及时了解这些关键部位的状态, 同时结合这些状态量的时空分析评估地基基础的局部与整体稳定性。通过对桥梁结构在正常环境与交通条件下运营的物理与力学状态监测、重要构件和附属设施的工作状态监测、结构工程所处环境条件监测等, 评估桥梁结构的健康状态。

(2) 验证与完善大跨度桥梁的设计理论和相关设计规程。大型桥梁, 其基础规模庞大, 结构复杂, 设计规范中的规定的常用计算方法往往已不能适用。如特大跨径悬索桥和斜拉桥的主塔桩基础中的大直径桩已经不能直接套用中小直径桩的计算方法, 而要借助于桩的静载试验, 锚碇及其基础的设计规范中更是少有提及。关于大跨径桥梁桥道系结构的非线性分析方法、结构疲劳验算等在规范中也没有明确说明。通过桥梁结构健康监测所获得的实际结构的静动力行为来检验大桥的理论模型和计算假定, 不仅对设计理论和设计模型有验证作用, 而且有益于新的设计理论的形成。

(3) 为设计变更和优化以及施工方案的制定与调整提供充分的理论依据。因为地质条件的复杂性、人类认识的局限性, 以及桥梁地基基础的不确定性与随机性, 在工程实际施工过程中常常会出现一些始料未及的特殊地质条件与结构响应, 这往往就需要进行设计变更与施工方案调整, 这样就需要对这些部位进行重点监测, 从而了解改进方案的安全性与其有效性。

(4) 审查强风气候、地震和船舶撞击等极限荷载作用对结构的影响。对结构工程在特殊气候、交通条件下或运营状况严重异常时发出预警信号, 为桥梁运营期间的维护、维修与管理决策提供依据和指导。

(5) 监视结构疲劳、应力分布和沉降情况, 以及对结构安全性的影响。对结构工作状态下的安全度和预计使用寿命作出评估。

(6) 桥梁健康监测带来的将不仅是监测系统和某种特定桥梁设计的反思, 它还可能并成为桥梁研究的现场实验室。运营中获得的关于结构及环境等信息既是理论研究和实验室调查的补充, 也是结构行为与环境规律的最真实的信息。

(7) 进一步发展工程监测的理论与技术。从这个角度而言, 就是在监测仪器选取、监测技术选择、监测信启、传输与数据处理等方面, 有意识地开展一些对比研究, 或者为验证一些新的监测技术、新的信息、传输与处理方法, 有意识地采用一些新技术、新方法。

1.4 建立大跨桥梁结构安全监测系统的主要问题

桥梁结构健康监测系统基本功能之一是通过各种传感器实时采集大桥在运营状态下的各种数据。但是, 如何根据系统采集的实时信息, 反演出大桥的结构工作状态和健康状况, 识别出可能的结构损伤的程度及其部位, 并在此基础上进行大桥的安全状态评估, 真正为大桥的运营维护管理提供指引, 是结构健康监测系统要解决的最主要问题。实际上, 科学合理的桥梁结构安全评估系统, 是桥梁结构健康监测系统的核心。如果不能很好地解决这一问题, 那么在大

桥上设置结构健康监测系统的主要目的也就不能达到。

要充分发挥桥梁结构健康监测系统的作用,关键在于桥梁结构健康监测系统和安全评估系统要能够一体化。具体而言,就是在建立监测系统时从评估的需要出发设计传感器系统、监测信息采集和传输系统,在建立安全评估系统时要充分利用监测系统输出的全部信息和其他综合信息,监测系统和评估系统在研究、设计和建立过程中要不断反馈、相互伺服。根据大跨缆索支承型桥梁的结构特点和大跨桥梁,建立大跨桥梁结构健康监测与安全评估系统,主要需要解决以下几个关键问题:

(1)大跨桥梁结构健康监测的策略。根据不同大跨桥梁的结构特点和大桥所处的自然环境特点,从保证工程质量要求、结构状态安全评估的需要和运营养护管理需求出发,确定监测项目、传感器优化布置和选型,保证测点布置和数据采集的科学性、真实性和最大有效性。

(2)结构状态识别和结构安全评估模型的确定。在大跨桥梁结构安全监测和状态评估过程中,准确的数学物理模型是不可缺少的前提。在大跨桥梁结构安全监测系统的实现过程中,桥梁结构的数学物理模拟应针对不同时期、不同的分析层次与分析目标采取相应的策略。

(3)大跨桥梁结构损伤识别技术和方法。目前关于结构损伤识别的理论比较多,但是由于大跨桥梁结构非常复杂、环境影响因素多,迄今为止还没有一种成熟的方法能够直接应用于大跨桥梁结构的损伤识别。这就要求我们对各种损伤识别方法进行深入的研究与优选,最终建立一个与实际桥梁结构健康监测系统适配的结构状态识别系统,能根据结构监测系统采集的数据与信号,应用结构识别理论和状态评估方法反演大桥的工作状态,或者识别出可能的结构损伤,评估其损伤程度。

(4)建立针对桥梁结构健康状态评估体系、结构安全性评价系统和安全预警系统。根据不同桥梁的结构受力特点和结构的易损性分析、桥梁结构疲劳损伤累积过程的分析,建立结构安全评估指标和结构可靠性评估系统和预警系统,为大桥的管理维护提供指引。

(5)数据采集与通信网络系统的设计。数据采集与通信系统的设计必须以保证数据采集和远程数据传输的稳定性、可靠性和准确性为目标。

(6)科学的系统软件设计原则和流程图。应根据监测与评估的需求进行数据采集与信号传输软件、数据分析软件、结构状态评估软件等软件的设计。

(7)建立科学完善的结构原始指纹数据库、结构安全在线监测数据库和阶段运营评估资料库。大跨桥梁在其始于设计、基础施工的整个生命过程中有一系列突出的技术问题需要解决,在整个大桥的勘测、设计、放样、施工监控等过程产生大量的测量数据,只有建立了资料完备的结构原始指纹数据库和结构工况档案资料库,才能准确地对大桥运营过程中的结构状态进行判断和评估,见图 1-6。

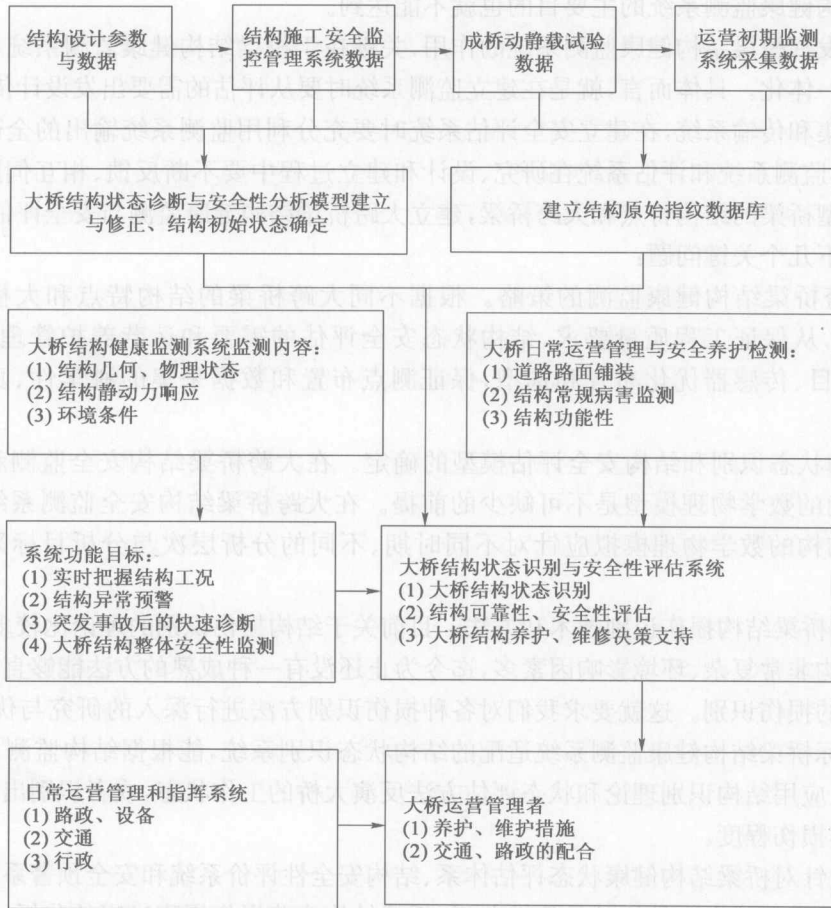


图 1-6 建立桥梁健康监测系统流程及与其他系统的关系图

第 2 章 大跨桥梁病害与结构分析方法

随着现代经济的发展,现代桥梁设计方向是更长、更轻柔化、功能日趋复杂化。缆索承重体系桥梁以其大跨度的跨越能力而著称,是现代大跨桥梁主要结构形式,主要有斜拉桥和悬索桥两种桥型。其结构体系可分为四个主要部分,分别为包括桥面结构在内的加劲梁、缆索系统、索塔以及锚固系统。由于跨度比较大,所以加劲梁一般采用钢结构。

2.1 悬索桥的结构特点

悬索桥是以悬索为主要承重结构的桥梁。大跨悬索桥是一种几何非线性受力的柔性结构,具有非凡的跨越能力。经过几个世纪的发展,悬索桥的跨度不断增大,结构形式也更加轻盈美观,目前世界上已建成的跨度超过 1 000m 的桥梁基本上都是悬索桥。

我国建成现代悬索桥约 70 余座。公认的国内第一座大跨径现代悬索桥是 1995 年建成的汕头海湾大桥,采用三跨预应力混凝土箱梁,跨度为 154m+452m+154m,目前仍是同类悬索桥的世界第一。1996 年,主跨 900m 首次实现一跨过江的湖北西陵长江大桥是我国自主设计施工的第一座全焊钢箱梁悬索桥。1997 年,主跨 888m 的虎门大桥,是我国自主建造的第一座现代化六车道高速公路钢箱梁。1998 年建成,主跨 1 377m 的香港青马大桥,是一座跨径超过千米的公铁两用悬索桥。1999 年建成的主跨 1 385m 江阴长江大桥是内地首座跨度超千米的特大桥。同年建成的主桥跨径为 230m+648m+230m 的厦门海沧大桥,是国内首座三跨连续飘浮体系悬索桥,位居同类悬索桥的世界第二。2005 年建成的主跨 1 490m 润扬长江大桥南汊悬索桥,其跨度是当时国内第一,世界第三。2009 年建成的主跨 1 650m 的西堠门大桥,其跨度世界第一(表 2-1)。

我国已建的部分大跨悬索桥

表 2-1

| 桥名 | 桥址 | 桥型 | 主跨 (m) | 建成年份 |
|---------|----|---------------|--------|------|
| 达孜桥 | 西藏 | 单跨钢桁架悬索桥 | 500 | 1984 |
| 汕头海湾大桥 | 广东 | 三跨预应力混凝土箱梁悬索桥 | 452 | 1995 |
| 西陵长江大桥 | 湖北 | 单跨钢箱梁悬索桥 | 900 | 1996 |
| 丰都长江大桥 | 重庆 | 单跨钢桁架悬索桥 | 450 | 1997 |
| 青马大桥 | 香港 | 双跨钢桁架悬索桥 | 1 377 | 1997 |
| 虎门珠江大桥 | 广东 | 单跨钢箱梁悬索桥 | 888 | 1997 |
| 江阴长江大桥 | 江苏 | 单跨钢箱梁悬索桥 | 1 385 | 1999 |
| 厦门海沧大桥 | 福建 | 三跨连续钢箱梁悬索桥 | 648 | 1999 |
| 鹅公岩长江大桥 | 重庆 | 三跨连续钢箱梁悬索桥 | 600 | 2000 |
| 忠县长江大桥 | 重庆 | 单跨钢桁架悬索桥 | 560 | 2001 |
| 宜昌长江大桥 | 湖北 | 单跨钢箱梁悬索桥 | 960 | 2001 |