

四、桥梁检测技术及健康监测

第一部分 桥梁检测技术

- 1、桥梁检测技术综述
- 2、检测类型和频率
- 3、常规检测的主要内容
- 4、检测设备和方法

2.1 检测的必要性

20世纪在桥梁工程领域是一个令人兴奋的世纪，预应力技术的引入和钢桥技术的日臻成熟，桥梁分析理论、施工技术、材料性能的迅速发展，使得桥梁工程取得了突破性的成就。

桥梁工程的发展带来了一个突出的问题就是，如何确保桥梁的安全性和耐久性。对于桥梁等土木工程结构，一旦建成投入使用后，除了材料自身性能会不断退化、老化外，还会受到车辆、风、地震、疲劳、超载、地震、人为因素等作用，从而导致结构或构件有不同程度的自然损伤累积和突然损伤。

- 在美国，至少每两年要对约575000座桥梁进行一次检测，据FHA(Federal Highway Administration)统计结果约40%的桥梁存在或多或少的结构缺陷；
- 英国运输部曾在1990年抽样调查过两百座混凝土公路桥，结果表明大约30%的桥梁的运营条件不良；
- 在印度，大约10%的公路桥梁需要替换，另有10%的桥梁有损伤迹象；在前南斯拉夫，大约有19%的桥梁的运营状况不良。
- 我国的桥梁健康状况也不容乐观。截至到2002年底，全国公路桥梁总数达29.9万座，计1161.2万延米。其中全国有公路危桥数量为3402座，计14.5575万延米。

2.1 检测类型

初始检测：桥梁建成后的首次检测

常规检测：桥梁外观的定期检查，频率一般不超过两年

损害检测：不定期检测，针对环境和人为损害的紧急检测

深入检测：根据常规检测结果确定是否必要，荷载试验

特殊检测：针对特定病害的专项检测

2.2 特殊检测——水下检测

检测目的：基础冲刷状况、水下构件的安全性、河床演变

分类：常规水下检测
深度水下检测



2.2 特殊检测——疲劳敏感构件检测

检测目的：承受循环应力的构件是否发生疲劳损害

疲劳敏感构件分类：从E9类到A类，敏感度逐步降低

检测内容：焊接端点和焊接缺陷，连接部位



2.2 特殊检测——断裂危险构件检测

FCM构件：处于受拉状态的关键部位钢构件

主要检测内容：受拉区域是否有裂纹和缺陷

重点关注部位：

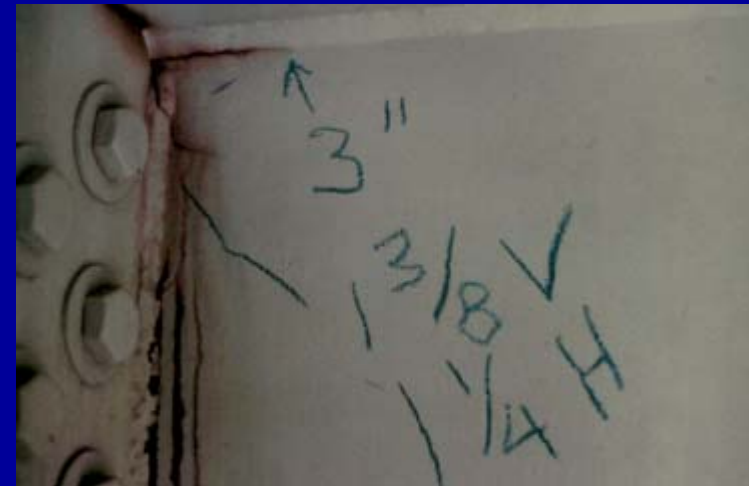
- 单桁或双桁系统，包括有焊接的箱形截面；
- 有两个环孔的悬索系统；
- 钢桥墩帽和横梁；
- 双桁架系统；
- 有双桁梁的桥跨；
- 焊接系杆拱；
- 双桁或三桁系统上的连接部位

3.1 钢桥检测——钢梁和钢箱梁

腐蚀状况检测：截面损失、构件表面点蚀

裂缝检测：疲劳裂纹，FCM构件裂纹

变形检测：腹板和连接板是否平面外弯曲



3.1 钢桥检测——钢桁梁

腐蚀状况：各杆件是否腐蚀

弦杆构件：是否偏位，垂直度如何

受压杆件：是否发生屈曲或弯曲

桁梁门架：是否被撞击



3.1 钢桥检测——连接构件和表面涂装

连接形式：铆钉、螺栓、焊接、销接等

重点检查：高强度螺栓是否完全张紧——小锤敲击

连接件油漆是否破损，是否锈蚀

焊接部位是否发生裂纹

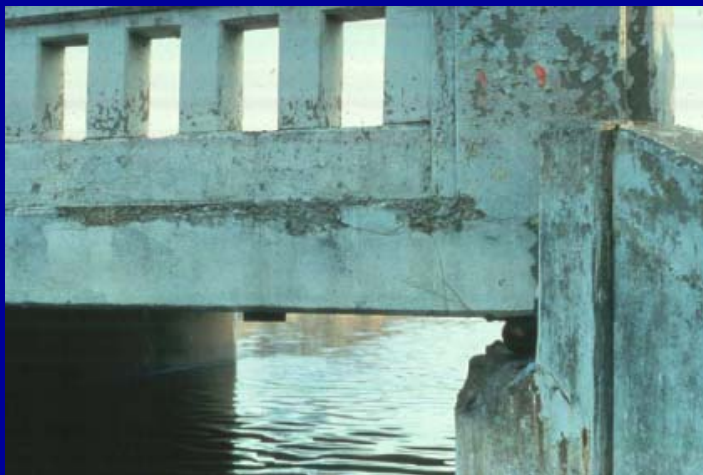
销钉剪切破坏



表面涂装：油漆层有无裂纹、点蚀、粉化、龟裂或锈斑

3.2 混凝土梁桥检测

主要检查：裂缝、混凝土破损、钢筋锈蚀、预应力束腐蚀



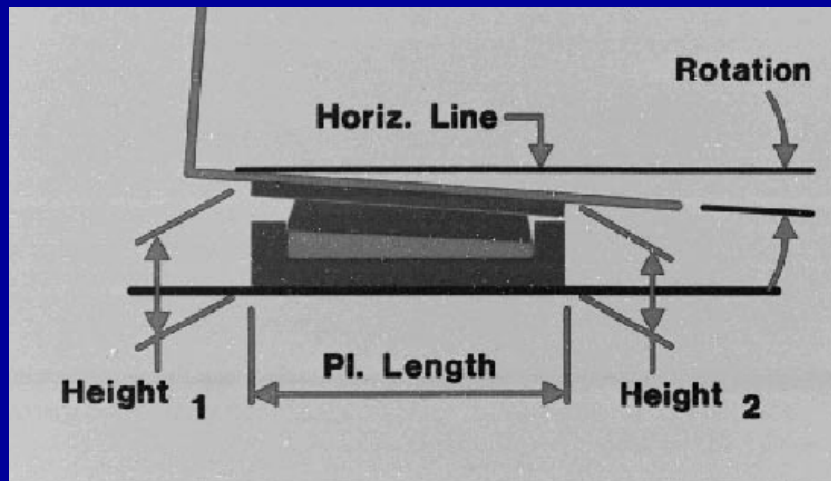
3.3 悬索桥和斜拉桥检测

主要检查：缆索体系



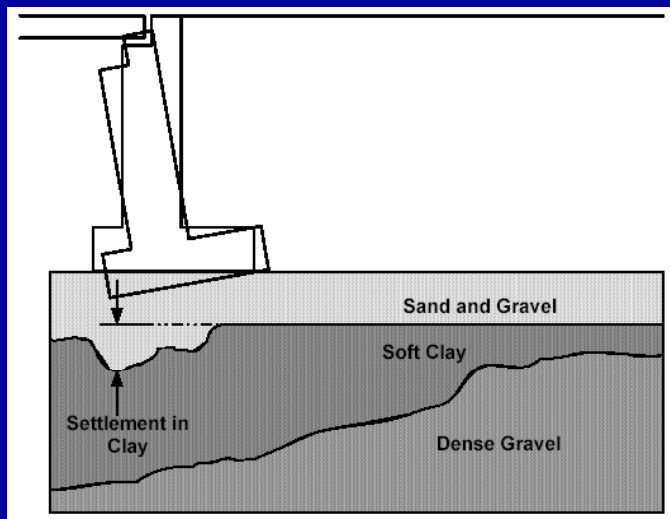
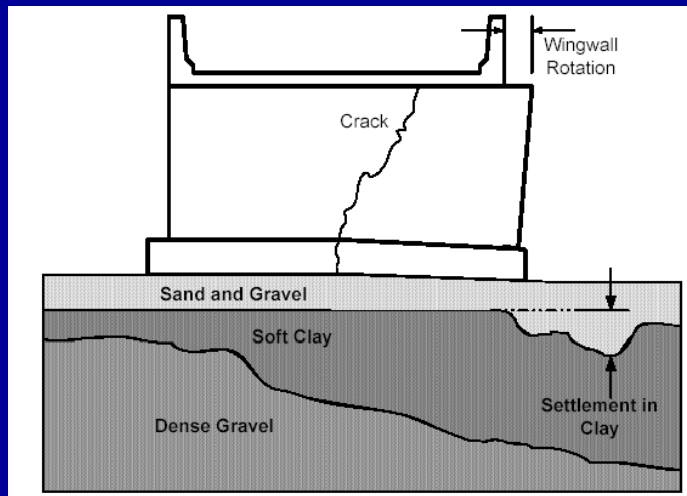
3.4 支座检测

主要检查：变形、腐蚀、裂缝等



3.5 下部结构检测——桥台

主要检查：桥台沉降、变位



3.5 下部结构检测——桥墩

主要检查：基础冲刷、材料破损、裂缝



4.1 人工检测——检测工具

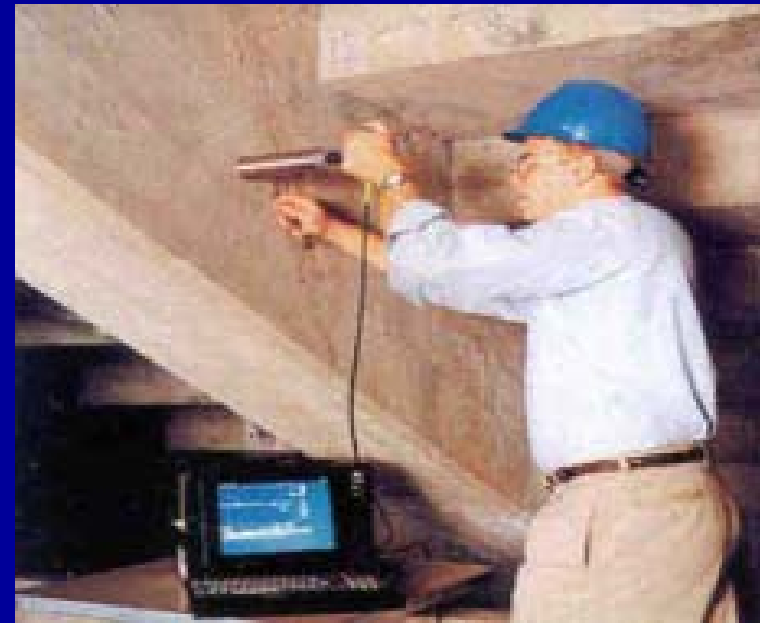
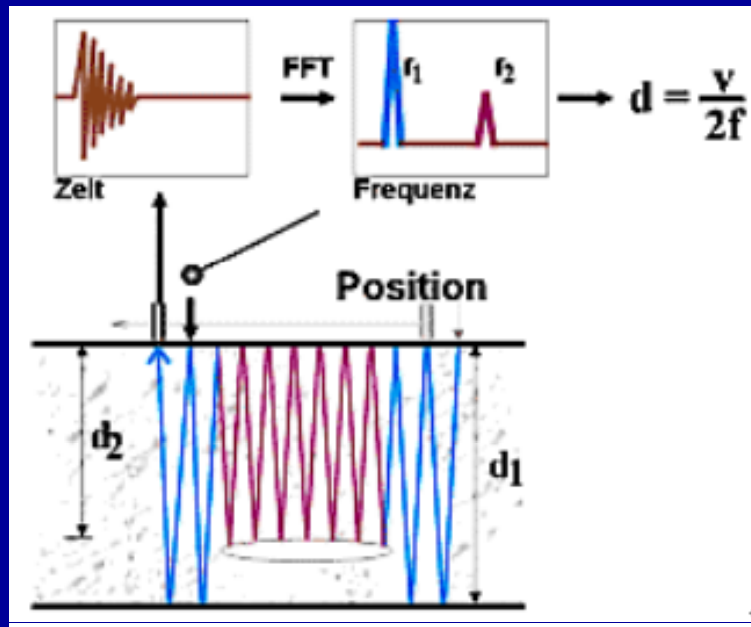


4.1 人工检测——到达构件的方法



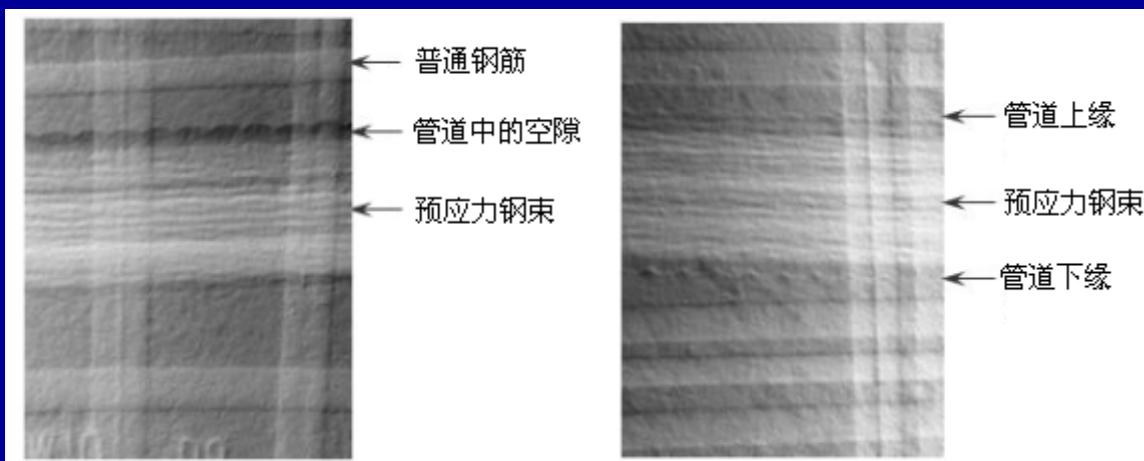
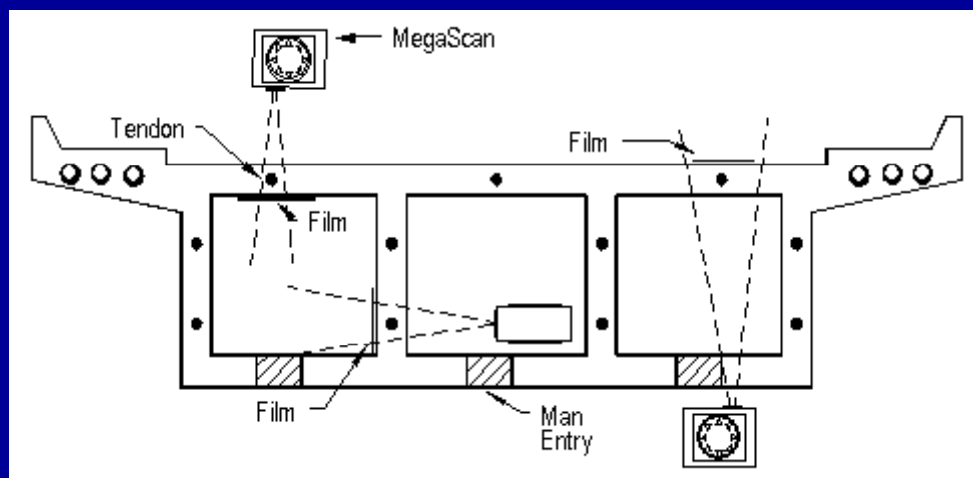
4.2 无损检测——冲击回波法

原理：机械冲击激发应力波，内部缺陷检测



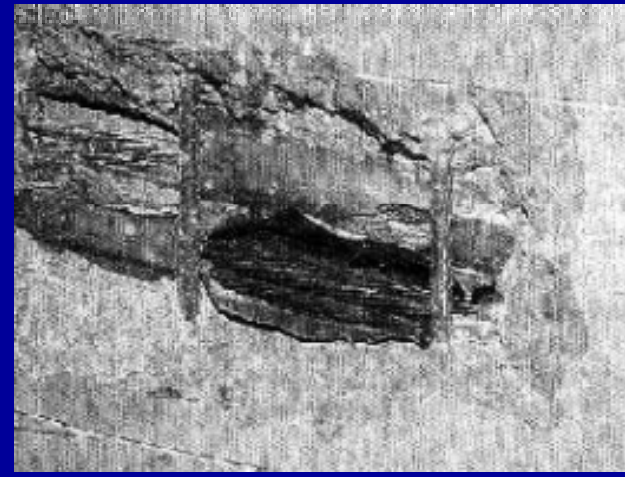
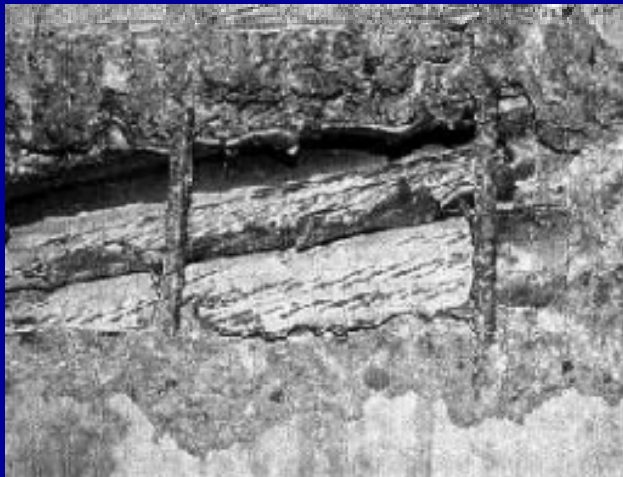
4.2 无损检测——射线检测法

原理：X射线或伽马射线穿透构件成像



4.2 无损检测——内窥镜检测法

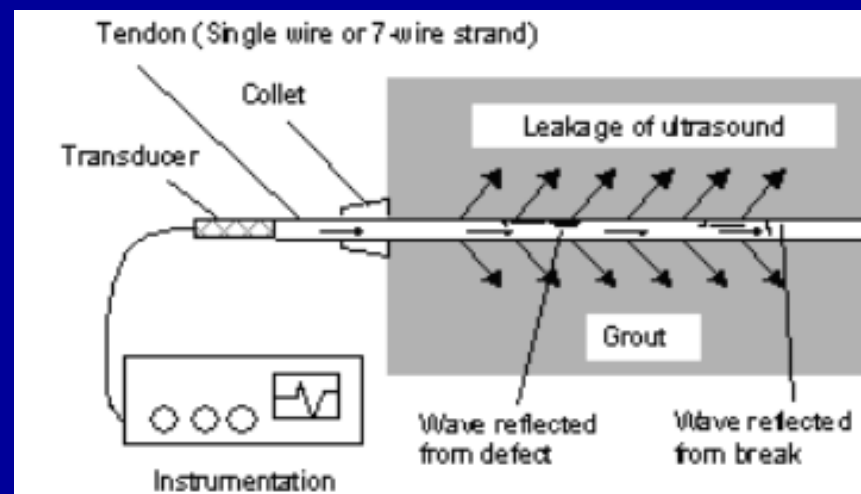
原理：构件部分破坏，采用内窥镜检测



4.2 无损检测——定向超声波检测法

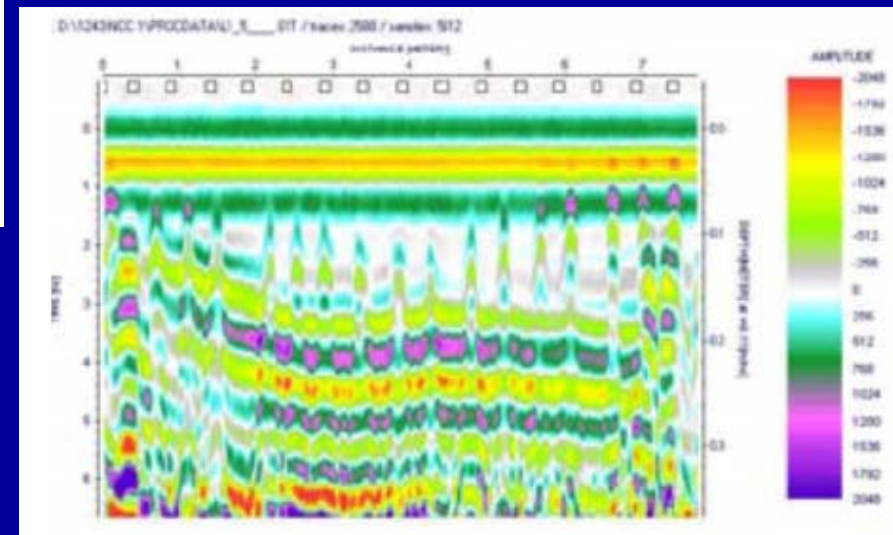
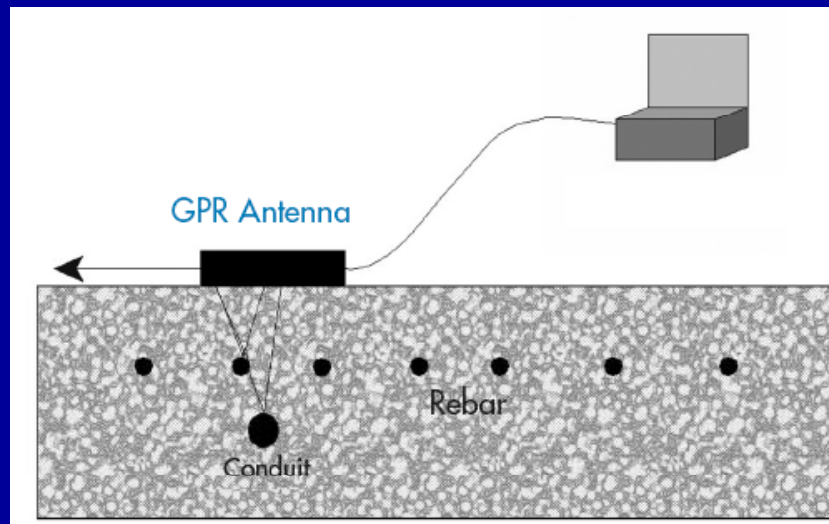


原理：锚头部位发射定向超声波，检测预应力束状况



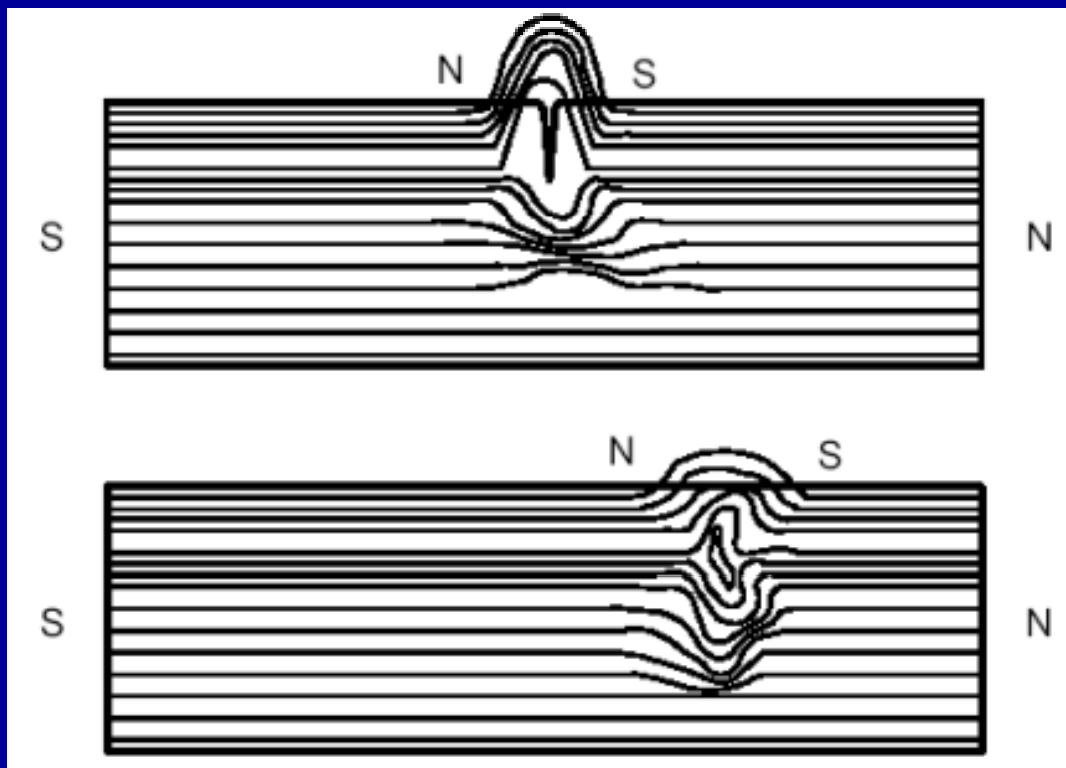
4.2 无损检测——电磁波雷达检测法

原理：以电磁波为探测媒介，适用于非金属材料检测



4.2 无损检测——磁粒子检测法

原理：通过磁力线检测表面裂缝

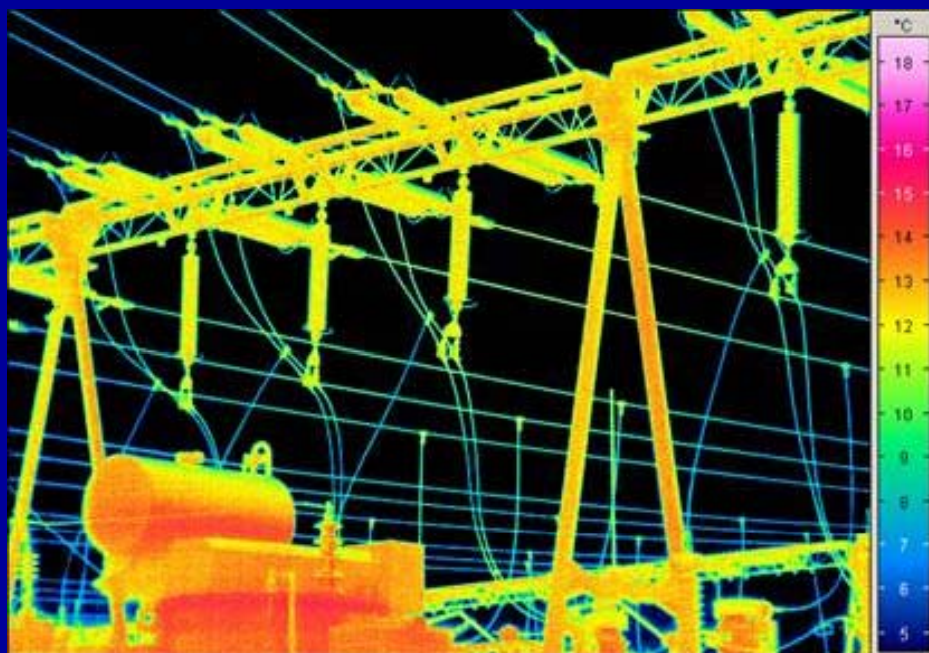


4.2 无损检测——红外热像法

●红外热像仪

功能与特点：检测温度及温度场分布，通过材料表面的热传导过程分析, 得出不均匀性和结构缺陷的资料。

温度测量范围从 $-40\sim 2000^{\circ}\text{C}$ 、热灵敏度高达 0.03° 。



第二部分 桥梁健康监测

大型桥梁健康监测的目的和意义

大跨桥梁的生命过程一般包括总体规划、设计施工以及运营管理及维修拆除等阶段。以往受技术和经济条件的限制，主要精力都集中在设计与施工阶段，随着经济的发展特别是全国性的交通网络的迅速发展，总体规划的工作已越来越受到人们的重视。随着大跨桥梁的大量建造，以及它们的巨大投资及在国民经济中的重要作用，大跨桥梁的运营管理、养护维修也越来越受到重视。

对大型桥梁结构进行健康监测是指通过对桥梁结构状态的监控与评估，为大桥在特殊气候、交通条件下或桥梁运营状况严重异常时触发预警信号，为桥梁维护、维修与管理决策提供依据和指导。

- 验证设计假设和设计参数，有助于改进和完善当前桥梁设计规范；
- 及时地发现异常结构荷载和响应，尽早地识别出结构可能存在的损伤和性能退化；

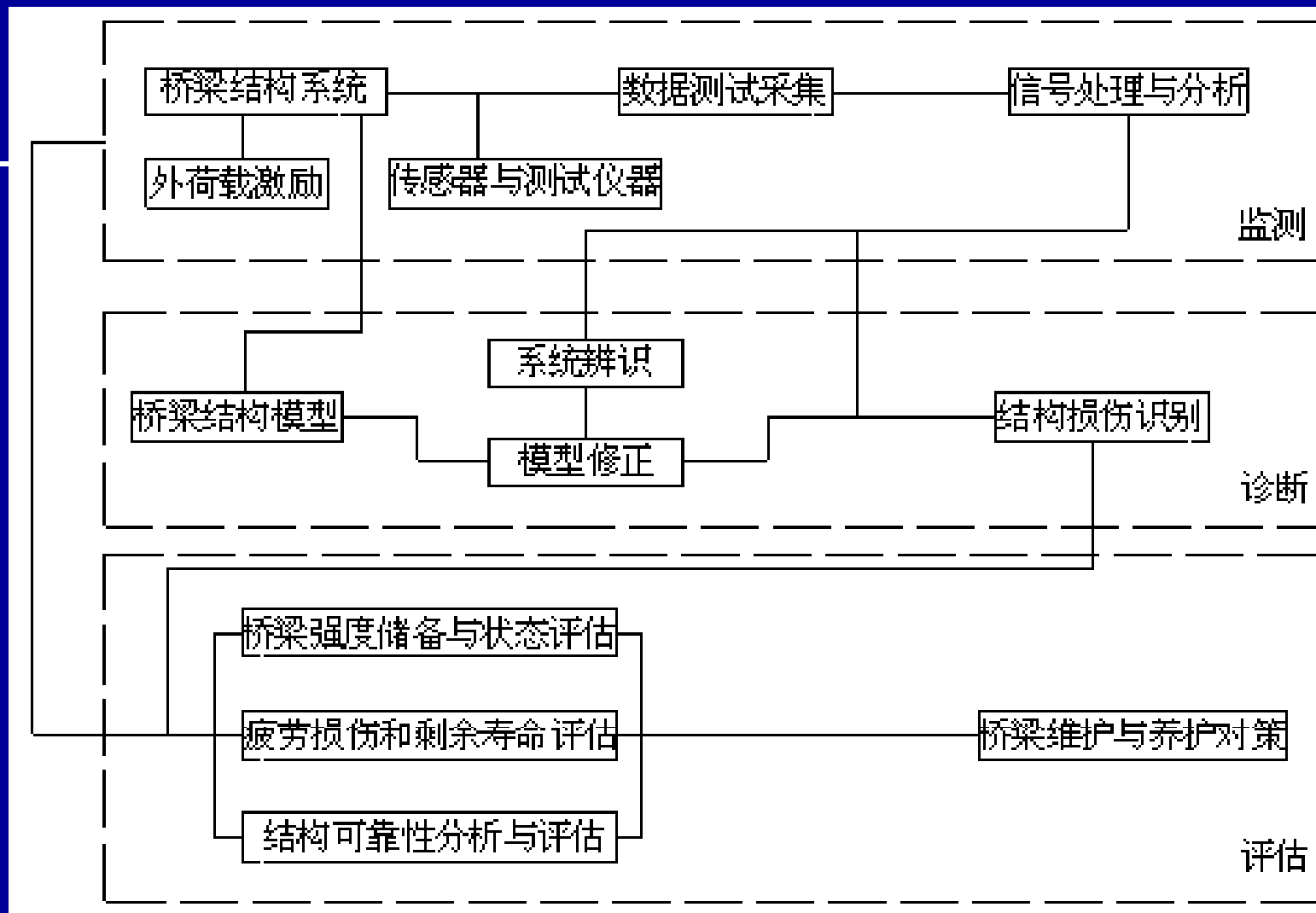
- 在灾后和异常事件后及时地对结构安全性评估提供数据；
为桥梁的日常检测、维护、加固和维修提供依据和指导；
- 监测各类维护、加固和维修措施的作用和效果；
- 为桥梁研究提供大量的原始数据。



桥梁健康监测研究现状

结构健康监测是集结构监测、系统辨识和结构评估于一体的综合监测系统。其监测内容包括

- 结构响应监测
- 环境荷载监测
- 重点病害监测



桥梁结构健康监测示意图

- 英国 80 年代后期开始研制和安装大型桥梁的监测仪器和设备，并调查比较了多种长期监测系统的方案。
- 丹麦在Great Belt East悬索桥已开始尝试把极端与正常记录分开处理的技术
- 在我国国内的桥梁健康监测的起步较晚但发展速度较快，上海同济大学、哈尔滨工业大学、大连理工大学、清华大学、福州大学等已对混凝土结构监测进行了理论和实用的研究，并已应用到了公路桥梁上，取得了较好的效果。



明石海峡大桥



Jindo斜拉桥



Banghwa拱桥



Namhae悬索桥

Figure 3 Kap Shui Mun Bridge



汲水门大桥

Figure 4 Ting Kau Bridge



汀九大桥

青马大桥

Figure 2 Tsing Ma Bridge

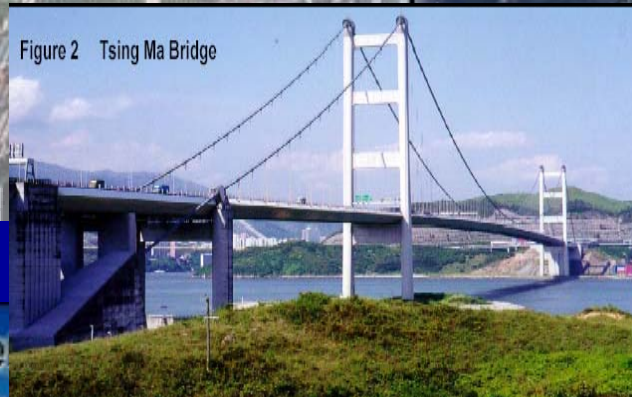


Figure 4 Shenzhen
(Artist Impression)



深圳西部通道（香港）大桥

Stonecutters Bridge
(Artist Impression)



昂船洲大桥

健康监测系统设计

概念设计

“概念设计”是根据事物的本质特征，按一定的目的要求，运用人的思维和判断，正确决定设计中的基本原则，制定方案和实施措施。就桥梁健康监测系统而言，“概念设计”就是对桥梁的受力特性以及主要的结构病害进行分析，联合桥梁所处的环境、地质条件、桥梁的结构、内部应力的分布情况以及便于观测等因素确定观测内容，合理选择仪器和安排测点，构思出高水平的、理想的监测方案，达到技术先进、经济合理、安全适用的目的。

健康监测系统概念设计

概念设计的标准

- “简洁、实用、性能可靠、经济合理”的设计原则；
- 首先满足大桥养护管理和运营的需要，同时兼顾考虑科学试验与设计验证等方面因素；
- 在确定监测方法方面，充分考虑地形、地质条件及监测环境，选择相适应的监测方法，人工直接监测和自动监测相结合；
- 在监测仪器选择方面，不要片面追求高、精、尖、多、全。监测仪器一般应满足精度、可靠度、牢固可靠三项要求，统筹安排；

健康监测系统设计

- 在测点布设方面，根据连续刚构桥梁病害分析结果，选择结构易损、重点部位及日常养护无法检查或检查非常困难的部位进行监测；测点的布设不宜过多，但要保证观测质量。
- 采用实时监测和定期监测、人工检测相结合的方法；
- 监测系统必须遵循功能要求和效益-成本分析两大准则。根据功能要求和成本-效益分析可以将监测项目和测点数设计到所需的范围，可最优地选择并安装系统硬件设施。

健康监测系统概念设计

监测系统的构成和监测内容的确定

综合以上监测系统结构设计的构思，一般对桥梁进行健康监测，其主要工作有：

- 桥梁工作环境的监测；
- 桥梁整体性能的监测；
- 结构的动力分析及损伤识别研究；

由此可以确定健康监测系统的监测内容，从而确定了健康监测系统的构成。

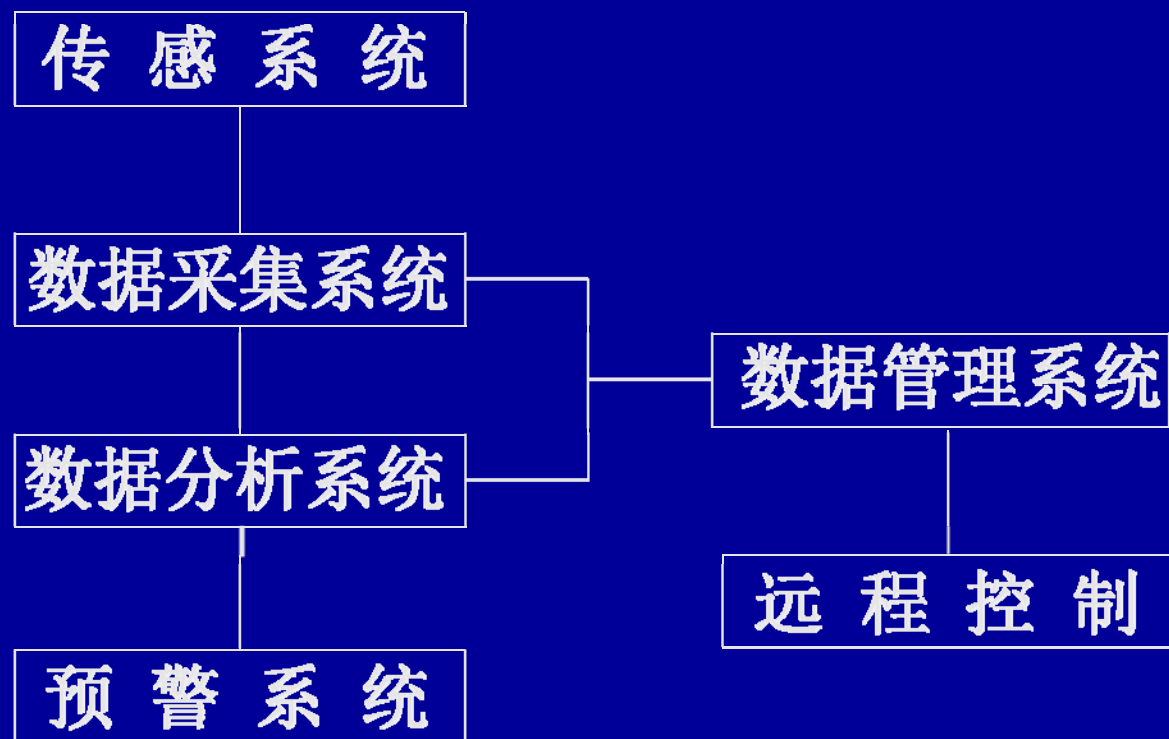
健康监测系统设计

一、监测的主要内容

- 大桥处的环境温度和桥梁结构温度分布状况的监测
- 振动与动位移监测
- 大桥线形监测

健康监测系统概念设计

二、监测系统的构成



健康监测系统概念设计

传感器及仪器选择

一、桥梁健康监测传感器

对于桥梁健康监测的所有监测项目，几乎都有相应的测量传感器或测量仪器可以利用。而且，随着科学技术的进步，新的更加可靠、精确和便宜适用的传感器被开发出来。下面主要是在概要介绍各种监测项目所用传感器的基础上讨论了传感器的选择标准。

健康监测系统设计

●几何监测仪器（传感器）

桥梁轴线和不见的位置及位移测量是桥梁试验及长期监测的重要监测内容。对于不同的结构形式及规模（跨径）的桥梁，其位置及位移测量的设备有所不同。

①全站仪

②全球定位系统（GPS）

●应变测量传感器

应变是某一构件长度变化量与原来长度的比值，是一个无量纲。

① 电阻应变计

② 振弦式应变计

③ 光纤应变

传感器

健康监测系统设计

● 振动测量传感器

振动测量传感器是一种换能装置，它将振动信号转换成便于传输、放大和记录的电信号。根据电信号所反映的振动信号的种类，又可以将振动传感器细分为加速度传感器、速度传感器和位移传感器。

① 压电式加速度计

② 压阻式加速度计

③ 电容式加速度计

④ 力平衡式加速度计

健康监测系统概念设计

●温度测量传感器

用于温度测量的传统传感器有热电偶、热电阻、温度变送器、半导体温度传感器等，这些传统设备都需要事先标定和信号转换，精度低、耐久性差，测量系统复杂等。现代温度传感器具有精度高、自标定与误差修正、耐久性好、可靠性高等特点。

①光纤温度传感器

②数字温度传感器

健康监测系统设计

二、仪器（传感器）选择

健康监测传感器是桥梁健康监测的基础。随着科学技术的进步，能用于健康监测的传感器种类繁多、型号各异，而且不断有新的更加可靠、精确和便宜的传感器被开发出来。因为目前健康监测多以在线振动监测为主，而大型桥梁等复杂结构基频很低，要求传感器需有良好的低频响应以及较宽的动态响应范围。因此在进行传感器选择时要考虑以下几个方面。

健康监测系统概念设计

●传感器的一般技术特性

- ① 量程：能够测量被测量量的范围。
- ② 灵敏度：能够测量被测量量的最小变化率。
- ③ 精度：测量值与真值之间复合程度。
- ④ 频率响应范围：是测振传感器的重要指标，传感器的频响范围要能覆盖感兴趣的被测结构物的频率。
- ⑤ 对工作环境的要求：主要是工作的温度范围，环境相应湿度等。

健康监测系统设计

- 传感器的稳定性、可靠性及对工作环境的鲁棒性

长期监测一般十几年、几十年甚至更长的时间。在这漫长的时间里，传感器的工作环境可能会发生意料不到的变化（如激烈的振动很高的温度、很高的相对湿度等）。虽然不能要求纤巧、精密的传感器的寿命都与被测的土木结构物有一样长的寿命，并能经受不测的环境变化，但是在选择传感器时这两方面的特性还是应该予以特别的考虑。

健康监测系统概念设计

- 传感器与数据采集、通信设备的相容性

由于传感器输出信号一般都比较弱，要经过信号调理器的解调放大后才能被显示或纪录。通常对于某一种传感器都有与之匹配的调理器。不同的调理器其信号输出的方式也不一样，有的直接在调理器上显示数字量，有的提供模拟量输出端口，有的提供数字量输出端口以及通信软件可以将输出数据直接输入计算机。因此在选择传感器时就要考虑对应这种传感器的解调器的数据输出方式是否与后续的数据采集设备及通信设备相容。

健康监测系统设计

监测点的确定

测点的布设在健康监测系统中起着相当重要的作用，观测点布设的优劣、科学与否，直接影响到观测数据能否正确反映桥梁的实际状态及变形量的大小。布设监测测点时，应遵循必要、适量、最能反映结构的实际状态和方便观测的基本原则，并做到以下几点：

- 在满足监测目的前提下，监测数量和布置必须是充分的、足够的；同时测点宜少不宜多，不能盲目设置测点。这样，不仅可以节省仪器设备、避免人力浪费，而且还可以使监测工作重点突出。任何一测点的布设都应该是有目的的，它服从于分析、判断的需要。

健康监测系统设计

- 测点的位置必须具有代表性，以便于分析和计算。如主要测点的布设应能反映结构的最大应力（应变）和最大挠度（或位移）等。
- 测点的布置对观测工作应该是方便的、安全的。不便于观测读数的测点往往不能提供可靠的结果，对于危险的部位，要妥善考虑安全措施或者选择布置特殊的测量方法和仪器。
- 观测点应布置在点位稳定并能长期保存的地方，同时要求观测点与桥梁牢固地结合在一起，这样观测的变形量，才代表了桥梁的变形。

采用的评估方法及结论

采用基于不确定型层次分析法、考虑专家评判水平的群判断理论、加权集值统计原理、重心决策理论、变权原理的常规综合评估。

日常天气下安全性评估综合得分为95.507，对应状态为良好。各指标层项目得分均在90以上。

“韦帕”台风天气下安全性评估的综合得分为95.466，略小于日常天气下的95.507，状态良好。

实例一 润扬长江大桥

工程简介：

润扬长江大桥即镇江-扬州长江公路大桥。润扬长江大桥于2000年10月20日开工建设，全长35.66公里，主线采用双向6车道高速公路标准，设计时速100公里，工程总投资约53亿元，工期5年，2005年10月1日前建成通车。主要由南汊悬索桥和北汊斜拉桥组成，南汊桥主桥是钢箱梁悬索桥，索塔高209.9m，两根主缆直径为0.868m，跨径布置为470m+1490m+470m；北汊桥是主双塔双索面钢箱梁斜拉桥，跨径布置为175.4m+406m+175.4m，倒Y型索塔高146.9m，钢绞线斜拉索，钢箱梁桥面宽。该桥主跨径1385m比江阴长江大桥长105m。





实例一 润扬长江大桥

主梁线形的测量:

关于主梁线形(竖向、横向、纵向的位移)的监测,目前常用的方法是光电测距(EDM)和GPS方法.润扬大桥所处的江面较宽,时常出现大风、大雾和雨雪等天气,这些因素会严重影响测量,而采用GPS 技术进行主梁线形的监测可以避免以上问题。对于润扬长江大桥南汊桥在主跨中间和四分点处的两侧共设6 个测点,GPS 接收机用特制的密封盒固定在箱梁外侧底板边缘处.斜拉桥亦采用GPS 技术进行线形测量,在斜拉桥上分别设8 个测点(主跨跨中和四分点处共6 个测点,索塔各一个测点)。

实例一 润扬长江大桥

大桥钢索索力的监测

大桥钢索索力状态(悬索桥主缆、吊索、斜拉索等)是衡量大桥是否处于正常运行状态的一个重要标志.目前,可采用光纤传感器、电阻应变仪、钢丝振弦应变仪、磁致弹性测力仪、振动方法等进行缆索拉力的测量或监测.

主缆采用磁致弹性测力仪的直接方法进行连续监测,同时采用振动方法进行间接检测,确保检测可靠性.监测点设在4个锚室内,分别在每个锚室的上端、下端、左侧、右侧、中间索股进行主缆内力监测.

桥梁结构的受损和安全性降低主要是由于桥梁主要构件和结构的疲劳损伤的累积结果,而桥梁结构疲劳损伤主要是由于动荷载作用下的交变应力作用的结果. 对于悬吊支承结构的桥梁,其悬吊体系(悬索桥的主缆和吊索、斜拉桥的斜拉索)不仅影响主梁结构的动力特性和受力特性,而且其本身在交变应力与环境腐蚀的相互作用下是导致疲劳和锈蚀损伤扩展的重要原因之一。 振动特性的监测可采用加速度传感器来实现,但是由于索塔、钢箱梁、主缆、吊索、斜拉索各自的固有振动特性不同,因此在选择传感器时要充分考虑传感器的技术性能(频率范围、灵敏度、采样特性等)。

主梁应力监测

实例一 润扬长江大桥

监测主梁应力的目的在于通过对主梁结构的控制部位和重点部位内力的监测,研究主梁结构的内力分布、局部结构及连结处在各种载荷下的响应,为结构损伤识别、疲劳损伤寿命评估和结构状态评估提供依据.同时,通过控制点上的应力和应变状态的变异,检查结构是否有损坏或潜在损坏的状态.

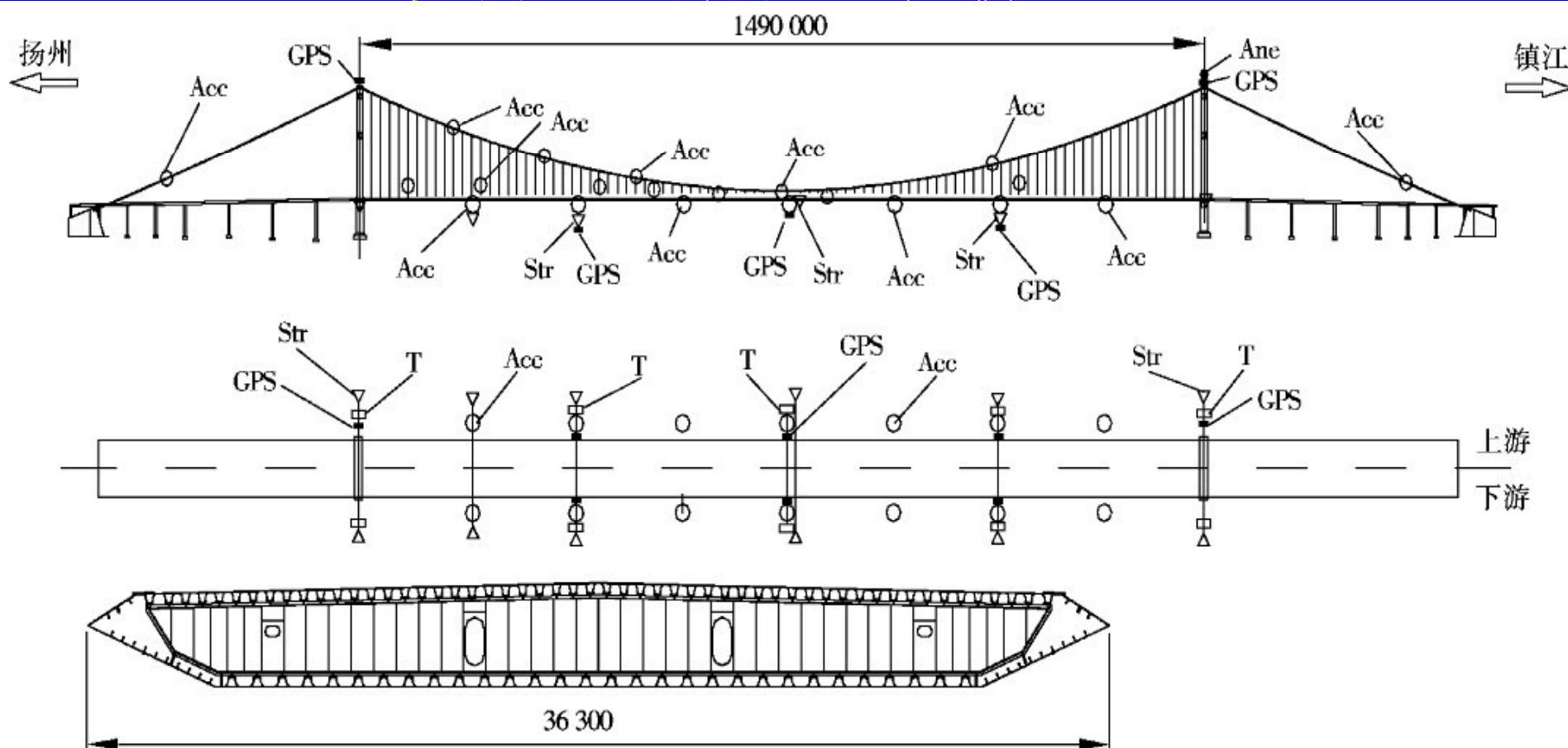
一般的应力应变监测采用电阻应变传感器,但电阻式应变仪的零漂、接触电阻变化以及温漂等给系统带来一定的误差.且电阻式应变传感器的寿命较短,故从长期监测和信号传输等方面考虑宜采用(或部分采用)适合长期监测用的光纤传感器.润扬长江大桥结构健康监测系统设计中采用了光纤传感器与电测方法相结合的应力应变监测方法.

实例一 润扬长江大桥

温度监测

通过对桥梁温度场分布状况的监测,可为桥梁设计中温度影响的计算分析提供原始依据. 对不同温度状态下桥梁的工作状态变化,如桥梁变形、应力变化等进行比较和定量分析,对于桥梁设计理论的验证和完善均有积极意义. 温度传感器在桥梁上沿主梁横断面布置. 在系统中采用数字式温度传感器,构成的单线多点温度测量系统进行桥梁结构温度分布状况的监测. 各温度传感器以并联方式与网络节点连接,通过网络总线实现与计算机进行通信、对温度的自动远程监测.

实例一 润扬长江大桥



典型的润扬大桥悬索桥截面

图3 润扬大桥悬索桥结构健康监测系统测点布置图 (单位:mm)

Acc—加速度传感器(93个); Str—应变传感器(72个); Ane—风速仪(1个); T—温度传感器(40个); GPS—GPS站点(8个)