

目 录

简略语.....	6
术语.....	6
符号说明.....	6
第 1 章 概述.....	1
第 2 章 桥梁安全的现状.....	2
2.1 桥梁安全现状.....	2
2.2 典型桥梁垮塌事故及原因分析.....	3
2.2.1 超载为主要原因.....	3
2.2.2 设计、建造为主要原因.....	4
2.2.3 洪水冲击及桥墩冲刷为主要原因.....	4
2.2.4 旧桥承载力不足为主要原因.....	6
2.2.5 荷载偏心为主要原因.....	6
2.2.6 其他.....	7
2.2.7 趋势及原因分析.....	8
2.3 预应力混凝土桥梁的特点、安全现状及破坏模式.....	9
2.3.1 预应力混凝土桥梁的特点.....	9
2.3.2 预应力混凝土桥梁的安全现状.....	10
2.3.3 预应力混凝土桥梁的破坏模式.....	11
第 3 章 预应力混凝土桥梁快速检测技术的基本概念.....	13
3.1 桥梁检测技术的发展现状.....	13
3.2 预应力混凝土桥梁损伤的表现和特点.....	15
3.2.1 预应力损失.....	15
3.2.2 混凝土材质的劣化.....	16
3.2.3 预应力混凝土桥梁劣化的宏观表现.....	17
3.3 预应力混凝土桥梁快速评价方法的基本原理.....	18
3.3.1 测试内容.....	18
3.3.2 各参数的测试意义和方法.....	19
3.4 预应力混凝土桥梁快速评价方法的关键技术.....	20
3.4.1 测试区域及工况的选定.....	20
3.4.2 桥梁承载力的推算.....	20
3.5 验证.....	22
3.5.1 弹性模量的验证.....	22
3.5.2 桥梁承载力试验（安徽高速、2013.07）.....	25
3.5.3 桥梁弹性模量测试（四川成都、2014.07）.....	27
3.5.4 桥梁弹性模量～荷载关系测试（贵州望安高速、2015.05）.....	28
3.6 预应力混凝土桥梁快速评价方法的特点.....	31
第 4 章 预应力混凝土桥梁健康监测系统.....	33
4.1 桥梁健康监测技术的发展现状.....	33
4.1.1 桥梁健康监测的目的和功能.....	33
4.1.2 桥梁健康监测系统的现状概况.....	33

4.2	本监测系统的概述.....	35
4.2.1	监测对象及主要监测内容.....	36
4.2.2	监测系统的构成和功能特点.....	37
4.3	构成子系统.....	39
4.3.1	数据采集及传输子系统.....	39
4.3.2	数据分析及储存、检索子系统.....	41
4.3.3	超载识别子系统.....	42
4.3.4	标定（桥梁刚性测试）子系统.....	43
4.3.5	安全评估及运营管理子系统.....	44
4.3.6	电源模块及其他.....	45
第 5 章	健康监测系统与快速检测技术的有机结合.....	46
5.1	现有健康监测系统的问题点.....	46
5.2	本系统的特色.....	46
5.2.1	技术长处概述.....	47
5.2.2	基于“物联网”技术的监测体系.....	47
5.2.3	以动力响应为主、静力响应为辅的监测体系.....	47
5.2.4	自补偿测试体系.....	49
5.2.5	分级数据处理体系.....	50
5.2.6	多重、多方位的桥梁安全性评价系统.....	51
5.2.7	系统的拓展性、安全性和兼容性.....	51
5.3	与人工检测工作的结合.....	52
5.3.1	监测体系与人工检测的分工与协作.....	52
5.3.2	我公司开发的预应力混凝土桥梁无损检测设备.....	53
5.3.3	检测数据库管理机能.....	54
5.4	本系统的社会意义与经济意义.....	56
5.4.1	社会意义.....	56
5.4.2	经济意义.....	56
5.5	系统的适用范围.....	58
第 6 章	模型试验及示范工程.....	59
6.1	模型试验.....	59
6.1.1	木质桥梁模型.....	59
6.1.2	PVC 桥梁模型.....	59
6.2	现场示范工程（山西东柳林桥）.....	60
6.2.2	国道 208 线东柳林桥工程概述.....	60
6.2.3	国道 208 线东柳林桥健康监测系统组成.....	61
6.2.4	桥梁结构危险性分析及监测断面选择.....	62
6.2.5	国道 208 线东柳林桥健康监测内容.....	63
6.2.6	东柳林桥健康监测子系统.....	64
6.2.7	东柳林桥超载监测子系统.....	64
6.2.8	东柳林桥动挠度、振型监测及评估子系统.....	65
	结语.....	67
	参考文献.....	2
	版本修订说明.....	3
	技术支持.....	4

简略语

FFT: Fast Fourier Transform, 快速傅立叶变换

术语

弹性波: 是在固体材料中传播的物质粒子的微小振动传播形成的波, 也曾被称为“机械波”、“应力波”、“地震波”等。由于变形微小, 物体处于弹性状态, 因此被称为弹性波;

冲击弹性波: 通过人工锤击、电磁激振等物理方式激发的弹性波;

符号说明

E_c = 混凝土弹性模量, 单位一般取 GPa;

S_c = 混凝土抗压强度, 单位一般取 MPa;

D_c = 混凝土结构的损伤指数或损伤变量

第 1 章 概述

桥梁是国家重要的基础设施，是确保交通畅通的咽喉。一旦出现安全事故，不但对人民的生命和财产安全造成重大损失，还可能导致部分交通网络瘫痪，造成巨大社会影响，特别是生命线工程，影响尤为巨大。

由于气候、环境等自然因素的作用和日益增加的交通流量及重车、超重车过桥数量的不断增加，桥梁结构随着桥龄的不断增长，结构的安全性和使用性能必然发生退化。根据全国公路普查资料，近几年来我国的危桥数量呈快速增长趋势，桥梁垮塌事故频发。2011 年七月，9 天内就有 4 座桥梁垮塌 1 座桥梁倾斜。如此密集的桥梁事故，引起的社会各界的高度关注。



图 1-1 美丽的桥梁

为了保证桥梁的安全，除了提高施工质量、改善维护保养以外，加强检测、以及实时健康监测是非常有益的：

- 1) 有助于实时把握桥梁的健康和运行状况；
- 2) 有利于治理超载；
- 3) 有助于减灾救援。在地震等突发灾害发生后，可以快速判断桥梁的健康状况，对保证救援物资的运送、避免次生灾害等非常必要。

然而，除了部分特大桥梁（而且主要是斜拉桥、悬索桥等）以外，占绝大多数的预应力混凝土桥梁均没有任何安全监测系统。同时，检测方法（主要为载荷试验和人工目视）也存在诸多问题。

本公司在长期研发和引进国内外先进技术的基础上，开发了一整套针对预应力混凝土桥梁的广域监测系统和配套的快速检测、评价技术体系，具有成本低、可靠性好、针对性强、配套性好等特点。

我公司具有该系统的完全知识产权，并申请多项国家发明专利。

第 2 章 桥梁安全的现状

2.1 桥梁安全现状

目前,我国有公路桥梁约 70 余万座(不算铁路桥梁)。从跨径来看,大跨径桥梁(单跨跨径在 50 米以上,占桥梁总数的 6.3%),中跨径(单跨跨径在 20~50 米,占桥梁总数的 22%)、小跨径桥梁(单跨跨径在 5~20 米,占桥梁总数的 71%)。可见,中、小跨径桥梁占据了绝大多数,其中,又以预应力混凝土桥梁最为普遍。

从使用年限来看,我国到 2005 年的 15 年期间,我国修建公路 91 万公里(含高速公路 4.1 万公里),占 2005 年底全国总公路里程的 44%,修建的桥梁数及桥梁合计总里程分别占相应总量的 47%,66%。而到 2010 年底,我国高速公发展到 7.4 万公里,五年新增 3.3 万公里(增 80%),居世界第二位。已经建成公路桥梁 65 万座、计 210 万延米,已经超过美国成为世界上公路桥梁最多的国家。由此可见,大约有 60~70%的桥梁是在近 20 年间修建的,但也有 30~40%的桥梁使用年限在 20 年以上。

依据国外经验,设计平均寿命为 75 年的桥梁实际使用寿命平均为 40 年左右。例如,

- 1) 美国:桥梁 58 万座,调查 51.4 万座,其中 40%以上有不同程度的损伤,9.8 万座桥梁结构强度降低,应停止使用或限载,占总数的 19%;
- 2) 日本:1956 年以前按旧标准设计施工的桥梁,其承载力明显不足。据统计,这类桥梁约有 5500 座,其中混凝土桥梁约有 4500 座;
- 3) 德国某州:约 1500 座混凝土桥梁,有将近一半的桥梁上部构造至少有一处较严重的损伤,其中 2/3 至少有一处一般性损伤。

另一方面,我国桥梁设计标准较低,我国桥梁的设计承载能力仅为美英的 68%和 60%,桥梁需承受活荷载效应规范设计值比美英规范设计值低 40%和 59%。更为严峻的是,由于施工质量常常得不到保证,以及超载现象的一般化,使得我国桥梁的损伤和老化速度非常迅速。可以预见,从现在开始,我国必将迎来大范围的桥梁老化现象,如不加控制,大部分桥梁将提前达到使用寿命。

据不完全统计,目前有 1/3 的桥梁存在各类缺陷,危桥已超过 1 万座。

2.2 典型桥梁垮塌事故及原因分析

2.2.1 超载为主要原因

1) 内田庄台大桥（2004）

2004年6月10日早晨7时许，辽宁省盘锦市境内田庄台大桥突然发生垮塌。大桥从中间断裂27米，大约有三辆汽车落水。

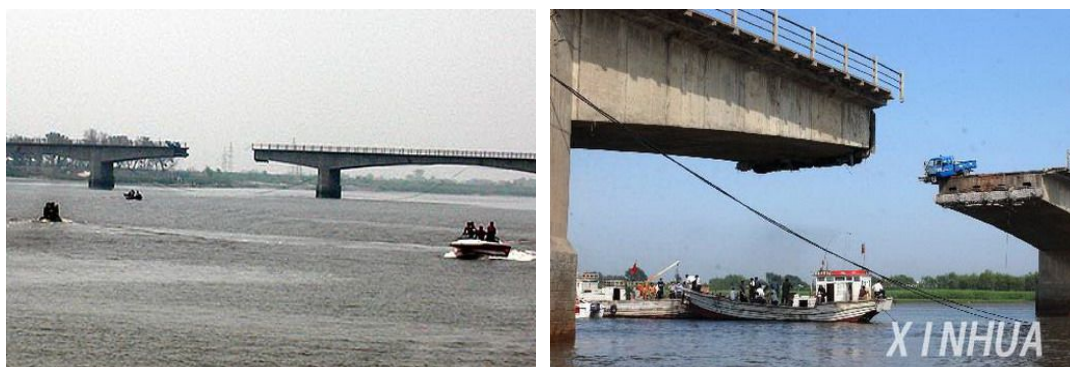


图 2-2-1 内田庄台大桥

专家组认定，该桥在超限车辆长期作用下，结构严重受损。事故发生前，大连顺达运输公司一辆自重30吨的大货挂车，载着80吨的水泥，在严重超载情况下通过该桥（该桥在2000年7月被确定通行车辆限重15吨、限速20公里/小时），重载冲击力使大桥第9孔中间挂梁断裂，致使桥面坍塌。

2) 宝山寺大桥（2011）

2011年7月19日零时40分，一辆载重超过160吨的严重超载6轴货车通过北京怀柔宝山寺白河桥，当驶过该桥的第一孔桥洞时，该桥发生坍塌，随后4孔桥洞全部坍塌，垮塌的大桥呈W形波浪状。



图 2-2-2 宝山寺大桥

2.2.2 设计、建造为主要原因

1) 彩虹桥（1999）

重庆綦江彩虹桥始建于 1994 年 11 月 5 日，竣工于 1996 年 2 月 16 日，垮塌于 1999 年 1 月 4 日，建设工期 1 年零 102 天，使用寿命仅两年零 222 天。这次因工程质量导致的重大责任事故，共造成 40 人死亡。



图 2-2-3 彩虹桥垮塌前后

2) 钱江三桥引桥（2011）

2011 年 7 月 15 日凌晨 1 时 55 分，钱江三桥引桥北向南离滨江转盘不到 800 米处右侧车道部分桥面突然塌落，一辆大货车从桥面坠落，又将下匝道砸塌。

塌陷原因主要有预应力灌浆质量差，预应力损失较大，板与板之间的铰缝构造较弱。在超载车得日积月累不断作用下，铰缝、整体化层、铺装层从产生裂缝到开裂、断裂，最后超载半挂货车行驶在该处边部，为避开了裂缝与边护栏相碰，其冲击力导致边部空心板翻转而塌陷。



图 2-2-4 钱江三桥引桥

2.2.3 洪水冲击及桥墩冲刷为主要原因

1) 宝成线广汉段石亭江桥梁（2010）

2010年8月19日下午3时10分,从绵竹什邡顺石亭江而下的洪水在冲毁广汉段石亭江宝成线大桥东南侧的河堤后,大桥中段两根桥墩相继倾斜、倒塌。正在跨桥的西安至昆明 K165 次列车陡然脱轨,15、16 号车厢猛地下沉并成“V”字形,最终沉入江中。



图 2-2-5 石亭江大桥

2) 伊河汤营大桥（2010）

伊河汤营大桥位于河南省栾川县潭头镇汤营村,全长 233.7 米,桥面净宽 7.0 米,设计结构类型为空腹式石拱桥,1987 年底竣工通车。因遭遇特大暴雨袭击,2010 年 7 月 24 日,潭头镇汤营村伊河汤营大桥整体垮塌,事故造成至少 50 人遇难。



图 2-2-6 伊河汤营大桥

3) 江油市青莲镇盘江大桥（2013）

2013 年 7 月 9 日 11 时 30 分左右,四川省江油市青莲镇盘江大桥(青莲老桥)垮塌。该桥建成于 1969 年,全长 160 余米,宽 8 米,为空腹式混凝土双曲拱桥,双向车

道。“5·12”地震之后，该桥进行了维修加固。2013年6月加固完成。

据绵阳市政府新闻办通报，认为桥梁垮塌是由洪水冲刷桥梁基础引起的。由于连续强降雨，事发时河段洪水流量大，含泥沙量大，流速快，不断冲击桥墩基础，造成桥墩基础脱空，致使桥梁垮塌。



图 2-2-7 江油市青莲镇盘江大桥

2.2.4 旧桥承载力不足为主要原因

1) 冷水大桥（2006）

安康市冷水大桥结构型式为1—80m+1—20m箱肋单波拱，桥梁全长122米，设计标准为原汽—13，挂—80，建成时间为1985年6月。该桥于2006年11月25日凌晨4时30分许垮塌。垮塌原因是由于多次遭受洪水浸泡，加之大桥结构建设标准低，钢筋用量较小，横向联系较弱，加之近年交通流量及超限超载车辆的剧增等原因造成的。

2) 八一大桥（2011）

林芝地区八一大桥因受大水持续冲刷，于2011年9月7日凌晨3点15分大桥西段52米的桥面发生垮塌。大桥全长473米，始建于上世纪1971年，距今已近40年历史。



图 2-2-8 冷水大桥（左）、八一大桥（右）

2.2.5 荷载偏心为主要原因

1) 包头市立交桥倾覆（2007）

2007 年 10 月 24 日，110 国道包头段立交桥坍塌。其原因在于货车偏右行驶导致的偏心过大，以及桥梁支座抗倾覆能力差等。

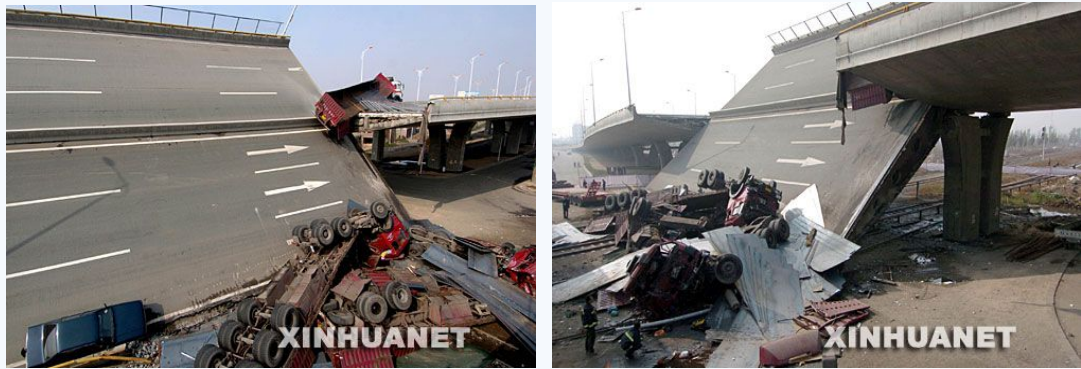


图 2-2-9 包头大桥

2) 哈尔滨市阳明滩大桥倾覆（2012）

2012 年 8 月，哈尔滨市阳明滩大桥引桥坍塌。其原因在于货车严重超载以及偏右行驶导致的偏心过大。关于是否存在质量问题，网上有不少争议。

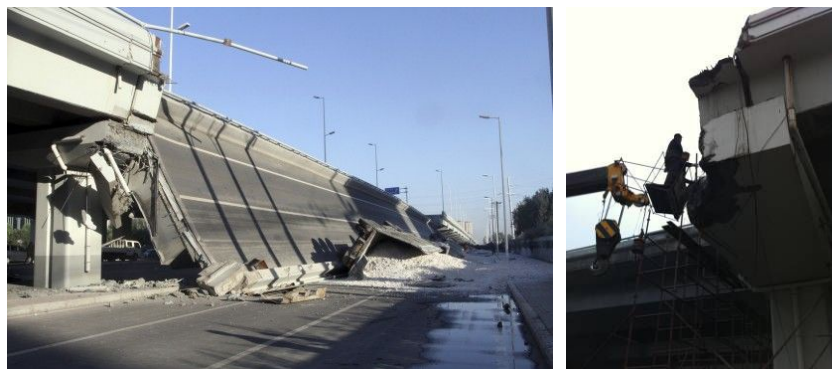


图 2-2-10 哈尔滨阳明滩大桥及本公司人员现场检测

2.2.6 其他

1) 通榆河桥（2011）

2011 年 7 月 11 日凌晨 2 时 10 分左右，江苏盐城境内 328 省道通榆河桥发生垮塌。



图 2-2-10 通榆河桥

2) 川藏公路通麦大桥（2013）

2013 年 8 月 3 日 1 时 50 分, 川藏公路 318 国道通麦大桥铆索脱落, 致部分桥面垮塌。一辆货车坠入山沟。通麦大桥是川藏公路 318 国道的咽喉工程, 大桥设计为双塔双跨悬索桥, 全长 258 米, 主跨为 210 米, 高 31.5 米。

现在通麦大桥驻有部队, 大桥两头都有全副武装的士兵看守, 每次只限一部车过桥梁, 车辆过桥时, 可以明显感觉铁索桥在颤抖。



图 2-2-11 通麦大桥

2.2.7 趋势及原因分析

我国的桥梁坍塌事故前些年并不多, 近几年却频频发生, 呈快速增加之势。去年 7 月份的一个月之内, 全国可公开查询到的大桥垮塌事故就有 5 起之多。这表明在经济建设高速发展阶段, 一些工程决策和施工质量上存在的安全隐患, 在经过一段时间的沉淀后, 开始逐步暴露。

根据对最近 5 年全国 17 座大桥垮塌事故的分析, 主要原因可以归结如下:

1) 超载

在 17 起大桥垮塌事故中, 已公布的事故原因, 有 5 起提到了车辆严重超载, 所占

比例近 3 成。

中国工程院外籍院士、著名桥梁建设专家邓文中指出，车辆超载对桥梁安全的危害，首先是如果超载过度，使桥上的应力超过设计的安全系数，桥梁可能立即坍塌。其次是，即使超载未能压垮桥梁，但其引起的应力也仍然对大桥的寿命影响很大。若车辆超载 100%，应力幅就大了一倍。那 100 年的桥梁设计寿命就减少到 12.5 年了。

2) 养护不到位

由于资金、技术等各方面的原因，“重建设、轻养护”的现象普遍存在。

3) 建设质量差

中国工程院院士、土木工程结构和防护工程专家陈肇元日前公开表示，我国桥梁建设存在赶工期，以及设计、施工规范或标准要求过低带来的工程质量差等问题。同时，违规转包也留下严重的质量隐患。

在垮塌的 17 座大桥中，有近 6 成的大桥寿命不到 20 年，其中有两座桥尚未建成就“夭折”。

2.3 预应力混凝土桥梁的特点、安全现状及破坏模式

将预应力的概念用于混凝土结构是美国工程师 P. H. 杰克孙于 1886 年首先提出的，1928 年法国工程师 E. 弗雷西内提出必须采用高强钢材和高强混凝土以减少混凝土收缩与徐变（蠕变）所造成的预应力损失，使混凝土构件长期保持预压应力之后，预应力混凝土才开始进入实用阶段。

预应力混凝土的大量采用是在 1945 年第二次世界大战结束之后，当时西欧面临大量战后恢复工作。由于钢材奇缺，一些传统上采用钢结构的工程以预应力混凝土代替。开始用于公路桥梁和工业厂房，逐步扩大到公共建筑和其他工程领域。在我国，20 世纪 80 年代以来，预应力混凝土大量应用于大型公共建筑、高层及超高层建筑、大跨度桥梁和多层工业厂房等现代工程。

2.3.1 预应力混凝土桥梁的特点

预应力混凝土桥梁以其卓越的经济性及力学性能的，从而得到了极其广泛的应用。目前，单跨跨度在 100 米以下的各类桥梁，预应力混凝土桥为首选桥型，占全部桥梁的 90%以上。其除了具有钢筋混凝土梁桥的所有优点外，它的主要特点是：

(1) 预应力混凝土结构，由于能够充分利用高强度材料（高强度混凝土、高强度

钢筋), 所以构件截面小, 自重弯矩占总弯矩的比例大大下降, 桥梁的跨越能力得到提高。与钢筋混凝土梁桥相比, 一般可以节省钢材 30~40%, 跨径愈大, 节省愈多。

- (2) 全预应力混凝土梁在使用荷载下不出现裂缝, 即使部分预应力混凝土梁在常遇荷载下也无裂缝, 鉴于全截面参加工作, 梁的刚度就比通常开裂的钢筋混凝土梁要大。因此, 预应力梁可显著减少建筑高度, 使大跨径桥梁做得轻柔美观。由于能消除裂缝, 这就扩大了对多种桥型的适应性, 并提高了结构的耐久性。
- (3) 预应力技术的采用, 不但使钢桥采用的一些施工方法, 如: 悬臂拼装、顶推法(由钢桥的纵向拖拉施工方法演化而成)和旋转施工法在预应力混凝土梁桥中得到新的发展与应用, 而且为现代预制装配式结构提供了最有效的接合和拼装手段。根据需要可在结构纵、横和竖向任意分段, 施加预应力, 即可集成理想的整体。

目前, 预应力混凝土简支梁的跨径已达 50~70m, 最大跨径的连续刚构已达 301m。

2.3.2 预应力混凝土桥梁的安全现状

另一方面, 由于预应力混凝土桥梁的特性, 其长期安全性十分堪忧。影响其安全性的因素除了前述的各项以外, 由于孔道灌浆不密实造成的钢绞线锈蚀以及预应力损失, 是非常严重的安全隐患。

建于 1953 年的英国 Ynys-Gwas 桥梁于 1985 年突然倒塌, 建于 1957 年的美国康涅狄格州的 Bissell 大桥于 1992 年炸毁重建。其原因均在于预应力钢筋锈蚀导致桥的安全度下降。钱江三桥引桥的事故结论中, 这被认为是首要原因。

预应力损失是随着桥梁使用年限的增加而累计的, 可以预见, 其危害将越来越大。



照片 2- 1-1 某桥梁拆除时的情景



照片 2- 1-2 灌浆不密实或未灌浆，钢筋锈蚀严重

【说明】 我公司开发的“锚索（杆）灌浆密实度检测仪（SBA-HTF）”测试设备及方法可很好地对此进行无损检测，并获得公路学会 2011 年度科技进步奖。

例如，安徽省境内淮河上第一座特大公路桥梁，五河淮河大桥于 1977 年建成通车，全长 1031.3 米，主桥为预应力混凝土 T 型钢构，桥面行车道宽 9 米，两侧人行道各宽 1.5 米。尽管曾两次维修，仍于 2013 年 8 月全面封桥。



照片 2- 1-3 被评为危桥的安徽五河淮河大桥

2.3.3 预应力混凝土桥梁的破坏模式

预应力混凝土桥梁的破坏模式主要有：

1) 桥墩的失稳引起的垮塌（桥墩失稳）：

由于洪水对桥墩基础的冲刷，使得桥墩基础失稳。如 2010 年宝成线石亭江大桥，就是因为洪水冲毁桥墩而造成的垮塌。

2) 桥梁、桥板的断裂

由于载重车辆的重量，沿桥轴向压垮了桥梁。具体又可以分为

- (1) 载重货车在行驶中垮塌（动载垮塌）；
- (2) 由于交通拥堵，载重车辆拥挤在桥上压垮桥梁（静载垮塌）；

从初始断裂位置和受力状况来看，大致又可以分为：

- (1) 跨的中部；以受弯破坏为主；
- (2) 跨的端部；以剪切破坏为主；



照片 2- 3-1 剪切破坏模式

3) 桥板的翻转

由于载重车辆超载、驶离车线等原因，使得桥板翻转（2007 年包头桥梁垮塌）。

表 2- 3-1 各种破坏模式在桥梁参数中的反映

破坏模式		静态参数		动态参数	
		挠度/位移	倾角	加速度	动挠度
桥墩失稳		(梁) ▲ (墩) △	(墩) ○	(墩) ○	(墩) △
静载破坏	受弯	○	○	-	-
	受剪	△	○	-	-
动载破坏	受弯	-	-	○	○
	受剪	-	-	○	△
桥板翻转			○	△	○

▲：在事故发生前，难以给出预警；

△：在事故发生前，能够给出一定的预警，但灵敏度不高；

○：在事故发生前，能够较好地给出预警。

第 3 章 预应力混凝土桥梁快速检测技术的基本概念

3.1 桥梁检测技术的发展现状

桥梁通行的安全与否，是关系国计民生的大问题。桥梁的损坏甚至垮塌，不仅给交通运输带来极大损失，而且会给人民的生命财产造成巨大的灾难。为了保证桥梁的安全，实施桥梁检查是必须的。

桥梁检查分经常性检查、定期检查和特殊检查。其中，经常性检查（每月至少一次）和定期检查（每 1~5 年一次）主要以直接目测为主，配合简单工具量测。而特殊检查（承载能力检测评定）系指采用仪器、设备等特殊手段和科学方法分析桥梁病害的确切原因和程度，确定桥梁的技术状态，以采取相应的加固、改造措施。

根据检测方法，大致可以分为以下 3 类：

1) 目视检测

当混凝土桥梁出现老化时，一般会出现裂缝、表面脱落等各类损伤现象。因此，在一般检查和定期检查中，目视检测是最主要的手段。

2) 专项检测

根据“公路桥梁承载能力检测评定规程（JTG/T J21-2011）”，对于预应力混凝土桥梁主要有：

- （1）桥梁结构构件的材质强度、氯离子含量、电阻率、碳化状况等的检测与评定；
- （2）混凝土中钢筋分布、锈蚀电位的检测；
- （3）桥梁结构固有模态参数的测定；

3) 载荷试验

载荷试验就是给桥梁施加一定的荷载，通常是用载重汽车排列在桥梁上（单向、双向等各个工况），通过测量在荷载下桥梁的挠度、频率、应力应变等指标，并与设计值进行对比进而判定桥梁的承载力。对于预制梁场的预制梁，也常常采用荷载+挠度测试的方法检测预制梁的质量。

上述检测手段中，目视检查作为一种简便、快速的检测手段，应用最为广泛。然而，该方法一般缺乏定量手段，加上桥梁裂缝往往非常微细，远处无法识别，因而漏检现象十分普遍。



照片 3- 1-1 静载试验的情景



照片 3- 1-2 桥梁检测的情景

对于载荷试验，其测试精度高，可以较为综合地反映桥梁的承载力，适用于桥梁的精密检测。但该方法测试也有相当多的问题：

- (1) 成本高、对交通影响大：需要对桥梁施加较大的荷载，并需要安装沉降、振动、应力应变等各类传感器。不仅费时费力，而且常常需要限行，对交通影响大。
- (2) 对桥梁有一定损伤：当桥梁承载力较低时，试验本身施加的荷载还会造成一定的塑性变形，从而对桥梁产生一定的损伤；
- (3) 挠度测试的局限：若采用外置千分表的测试方法，虽然精度很高，但需要支架，极其费时费力。而采用水准仪等测量方法，则精度有所降低。更重要的是，在桥墩附近的高剪力区域，由于挠度小，难以正确评估。而这个部位恰恰是梁式结构中最为重要的部位，结构概念中的“强剪弱弯”既是这个道理；
- (4) 应力应变测试的局限：尽管通过测试应力应变可以弥补挠度测试的不足，但在混凝土上应变片的安装一般非常困难，精度也难以保证。特别是应力的计算用要用到的基本参数（弹性模量）目前难以在现场测得，只得采用估算的方法，从而影响了测试的精度。此外，当测试位置附近有裂缝时，会造成局部应力释放，使得测试结果偏低，反而会造成危险的误判；
- (5) 难以对桥墩、盖梁等进行检测：特别是桥墩，由于水流冲刷等的影响，下部结构被弱化的情形很多。在 2013 年四川西部的大洪水中，许多桥梁都是因为桥墩被冲刷而造成了垮塌。而下部结构正是静载试验的盲区。

因此，载荷试验仅适用于极少数桥梁。

而局部详细检查中，存在以下问题：

- (1) 精度问题：如超声回弹法对在役结构混凝土的强度推定精度较低；
- (2) 有破损（如锈蚀电位、氯离子含量检测），代表性差；



照片 3-1-3 （左：某桥在载荷试验时垮塌，右：高桥墩）

此外，对于模态参数（频率、阻尼）的测定，作为一种可以测试整体构件的方法得到了广泛的瞩目。但该类方法也存在明显的不足：

- （1） 需要准确的设计值，当缺乏动力设计资料时，该方法难以使用；
- （2） 测试的自振频率受交通荷载和周围噪声的影响；
- （3） 一些位置的损伤及其组合，对结构的某些频率的改变不大，甚至没影响。

因此，在桥梁检测中，缺乏一种既简便快捷，又能够定量测试、评价混凝土桥梁承载力的手段。

3.2 预应力混凝土桥梁损伤的表现和特点

预应力混凝土桥梁的损伤有很多方面，就梁体宏观而言，体现在下挠量增加、承载力（强度）降低上，这两个方面相辅相成。从微观而言，则体现在：

- （1） 预应力损失：由于钢绞线的锈蚀、松弛等原因，使得有效预应力降低；
- （2） 混凝土材质的劣化：在疲劳荷载、外界环境的作用下，混凝土的刚性和强度出现降低；
- （3） 钢筋的锈蚀

其中，预应力损失是预应力混凝土桥梁有别于钢筋混凝土桥梁的重要特点。

3.2.1 预应力损失

预应力是预应力混凝土桥梁承载力的组成部分，同时也保证了梁的有效截面积。

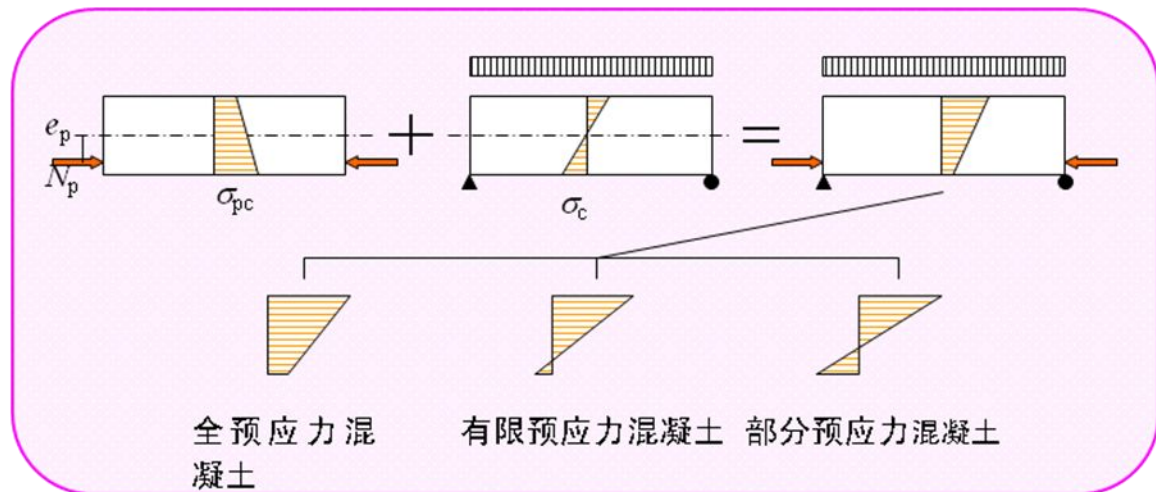


图 3-2-1 预应力梁的正截面应力分布

对于目前的桥梁而言，大多为一级结构，要求梁在运行过程中保持全预应力的状态，即在梁的全截面混凝土不出现拉应力和裂缝。随着预应力损失的增加，一般可以分为以下几个阶段：

- (1) 当预应力不能抵抗由于弯矩产生的拉应力时，在混凝土中就会产生一定的拉应力。如果该拉应力低于混凝土的抗拉强度，在混凝土中不会产生裂缝，梁的有效截面积也不会出现明显的变化；
- (2) 当预应力损失进一步发展，在混凝土中即会产生裂缝，使得梁的有效截面减少，混凝土的应力状态出现明显的恶化；
- (3) 随着预应力的继续损失，混凝土的受拉区进一步增加，裂缝深度也随之扩展，使得梁的有效截面继续减少，混凝土的应力状态更加恶化，最终导致受压区的混凝土的压应力超过其抗压强度使得梁出现破坏。

3.2.2 混凝土材质的劣化

由于桥梁承受较大的循环荷载，在此重复荷载以及环境荷载的作用下，混凝土材质会出现劣化现象，即所谓的“疲劳”。

混凝土材料是一种非均匀的多相介质，在施工期由于水化热和质量不均匀等原因，内部产生大量的微裂缝和微空隙等。这些缺陷即为混凝土的初始损伤，这些初始裂纹的数量和位置与水泥的种类、骨料的矿物性质及几何特性、水灰比、养护条件等有关。存在微裂纹的混凝土结构在受到循环荷载作用后，微裂纹将发生改变、扩展、连接并依据荷载的大小情况而稳定在一定的开裂水平上或者最终破坏。当循环荷载很小时，微裂纹将仅仅发生一些小的变形与扩展，此时可以认为混凝土处于弹性工作阶段；当循环荷载超过某一水平时，将会导致结构内部一些微裂纹周围的应力梯度增大，从而失稳扩展，

并有可能与临近的裂纹连接贯通，形成尺度稍大的裂纹。

同时，由于结构内部应力水平的提高，也会导致一些粘结薄弱区域的粘结微破坏，产生新的微裂纹。当微裂纹相互连接、贯通到一定程度时，就形成了宏观裂纹。此时，如果循环荷载继续作用下去，新的微裂纹继续出现、发展，形成新的宏观裂纹，同时已形成的宏观裂纹继续扩展。当循环次数增大至某一数值，宏观裂纹扩展速率加快，进入不稳定阶段，导致混凝土迅速破坏。因此，整个疲劳过程是一个损伤逐步累积的过程。

根据 Lemaitre 的经典损伤公式：

$$E_c = (1 - D_c)E_{c0} \quad (3-2-1)$$

其中， E_c 为某一损伤（疲劳）状态下混凝土的弹性模量；

E_{c0} 为混凝土的初始弹性模量（无损伤状态）；

D_c 为损伤指数或损伤变量。根据李洪泉（1996）等人的研究结果，混凝土的疲劳剩余强度 S_c 也可以用损伤指数来表示：

$$S_c = (1 - D_c)S_{c0} \quad (3-2-2)$$

此外，钢筋的锈蚀一方面会使得混凝土受力状态的恶化，另一方面由于钢筋的膨胀会使得混凝土中产生环状裂缝，进而降低混凝土的弹性模量。

3.2.3 预应力混凝土桥梁劣化的宏观表现

桥梁劣化（承载力降低）表现在多个方面，例如下挠增大、振动加大、出现裂缝等。而这些现象归根结底，反映了桥梁刚度的降低。根据结构力学，桥梁（简支梁）的挠度 δ 为：

$$\delta = \frac{5}{384EI} qL^4 \quad (3-2-3)$$

EI 则为截面抗弯刚度，钢筋混凝土结构中用 B 表示，又可以用梁的设计动弯矩、静弯矩、以及混凝土的弹性模量 E_c 、有效截面惯性矩 I 等来表示。因此，刚度的降低可以产生于两个方面，即：

- （1）混凝土弹性模量的降低；

- (2) 由于裂缝面的产生使得桥梁有效截面惯性矩的减少 ($I = \frac{1}{12}bh_0^3$, 其中, h_0 为有效高度, 受裂缝影响大)。

3.3 预应力混凝土桥梁快速评价方法的基本原理

如前所述, 如果能够测试出混凝土材料的弹性模量, 以及裂缝面的变化状况, 即可对桥梁刚度以及损伤状况进行推算和评价。

3.3.1 测试内容

冲击弹性波测试方法的发展则为上述的测试提供了理论和技术基础。根据弹性波的理论, 波速与材料的动切线弹性模量之间有明确的联系, 同时, 由于受到裂缝面的遮断, 弹性波波速、衰减与裂缝之间也有密切的相关关系。因此, 通过测试冲击弹性波的波速和衰减, 从理论上讲, 可以推算出混凝土的弹性模量和结构裂缝状态。具体包括:

- (1) 基于冲击弹性波 P 波波速的混凝土弹性模量的测试
- (2) 基于冲击弹性波 P 波波速变化的混凝土裂缝有无的测试
- (3) 基于冲击弹性波的混凝土裂缝深度的测试

其中, 根据桥型 (如 T 梁、箱梁、组合梁等), 测试方向还可以分为纵向测试和横向测试, 以进一步提高测试的精度和范围。同时, 还可以对混凝土盖梁、桥墩等进行测试。

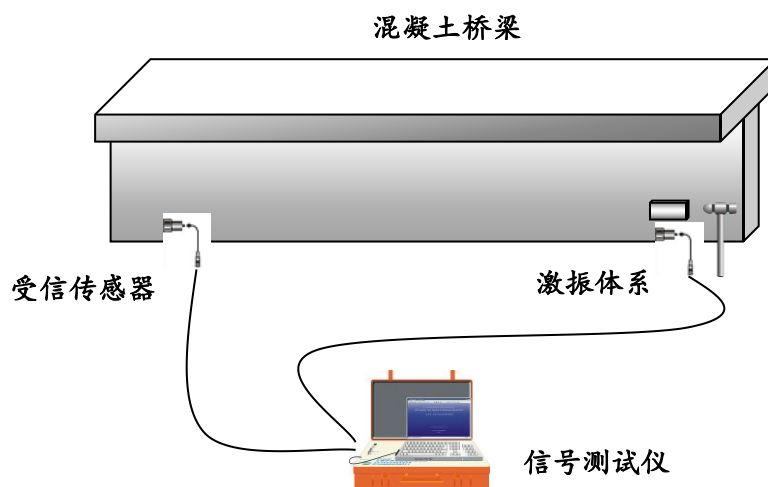


图 3-3-1 预应力梁快速测试的概念 (纵向测试)

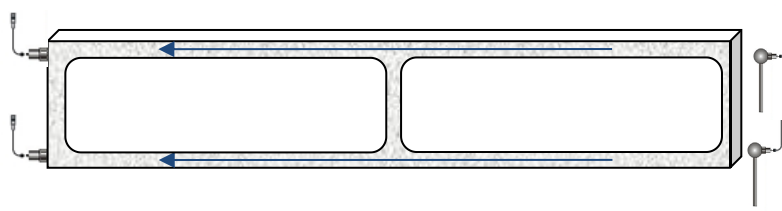


图 3-3-2 预应力梁快速测试的概念（横向、盖梁）

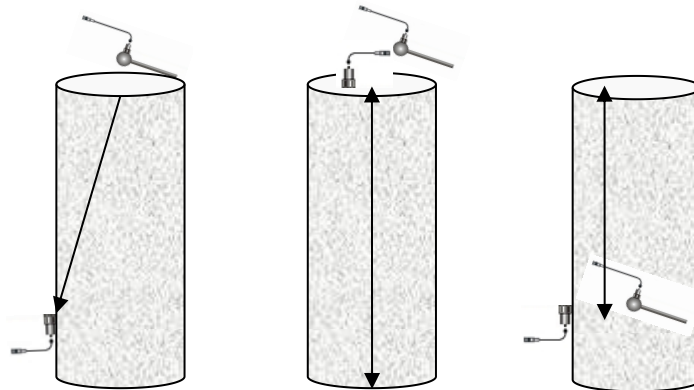


图 3-3-3 桥墩快速测试的概念（透过、顶部反射、侧壁反射）

另一方面，在实际的测试、评价中会遇到诸多问题。例如钢筋、应力水平的影响，评价基准、环境噪声对测试精度的影响，测试位置、激振与受信方法的选择等问题。而这些问题正是本公司通过长年的技术开发和积累而解决和力图解决的。

3.3.2 各参数的测试意义和方法

（1）混凝土弹性模量的测试

混凝土的弹性模量不仅可以反映材质的好坏和损伤状况，而且可以反映混凝土的应力水平。其测试方法则是基于冲击弹性波 P 波波速，并进行相应的钢筋、形状修正。

（2）混凝土裂缝有无的测试

弹性波在传播过程中，当遇到裂缝面时会受到遮挡。因此，弹性波在穿过裂缝区域时，其传播波速会降低。由于裂缝面的压缩模量一般要远大于其拉伸模量，因此裂缝面对压缩弹性波的阻碍要少于对拉伸弹性波的妨碍，使得拉伸弹性波的波速一般要低于压缩弹性波的波速。另一方面，无裂缝时，两种弹性波波速是相同的。据此，根据拉伸和压缩弹性波波速变化的分析，即可推断出裂缝面有无和程度。

（3）混凝土裂缝深度的测试

裂缝深度的合理把握，对判断结构的损伤程度、计算截面惯性矩、承载力等方面有

着非常重要的意义。

上述各个项目均可通过弹性波的传播特性加以无损检测，详细参见本公司提供的“SCIT-1-TEC-02-2011-混凝土质量综合检测技术体系”。

3.4 预应力混凝土桥梁快速评价方法的关键技术

作为一种崭新的混凝土桥梁检测方法，其关键技术在于：

3.4.1 测试区域及工况的选定

对于混凝土桥梁，根据混凝土的应力状况一般可以分为：

- 1) 压缩区：主要承担压应力；
- 2) 中性区：承担的应力较少；
- 3) 拉伸区：与钢筋共同承担拉应力（该区域常常出现裂缝）

对于普通混凝土桥梁，上述3个区域均存在。其中，中性区位于梁高的中间（中性轴附近）。对于预应力混凝土桥梁，在正常工况下且预应力体系正常作用时，整个梁的混凝土处于压缩状态。当预应力损失较大或超载时，则受拉区的混凝土可能出现拉应力，同时在梁中出现中性区。

因此，针对混凝土桥梁，应当测试梁的上、中、下部位。

此外，利用不同荷载进行测试，可以进一步提高测试精度。可取

- 1) 仅桥梁自重荷载
- 2) 自重+正常交通荷载（如列车通过，或典型交通状况）

下进行测试。

3.4.2 桥梁承载力的推算

- 1) 混凝土弹性模量的推算
- 2) 混凝土强度的推算

参见“SCIT-1-TEC-02-2011-混凝土质量综合检测技术体系”。

- 3) 混凝土应力水平的推算

无侧限（或正截面受弯）条件下，混凝土受压的压力应变关系可以规定如下：

$$\sigma = f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^n \right] \quad (3-4-1)$$

式中, σ 、 ε 为混凝土的应力和应变, f_c 可以认为是混凝土的抗压强度, ε_0 为对应于混凝土压应力达到 f_c 时的应变。 n 为形状系数, 可按式取值:

$f_c \leq 50MPa$ 时, $n = 2$;

$f_c > 50MPa$ 时, $n = 2 - \frac{f_c - 50}{60}$;

将上式的左右分别对 ε 求导, 经整理可得:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = n \frac{f_c}{\varepsilon_0} \left(1 - \frac{\sigma}{f_c} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (3-4-2)$$

也可以改写成

$$\begin{aligned} E_{ct} &= nE_0 \left(1 - S_L \right)^{\frac{n-1}{n}} \\ &= E_i \left(1 - S_L \right)^{\frac{n-1}{n}} \end{aligned} \quad (3-4-3)$$

其中, E_{ct} 为在某一 σ 、 ε 下的混凝土切线弹性模量, 可通过弹性波波速得到;

E_0 为对应于混凝土压应力达到 f_c 时的割线弹性模量;

E_i 为混凝土初始切线弹性模量, 也就是混凝土弹性模量 E_c ;

S_L 为 σ/f_c , 为在某一应力 (σ 、 ε) 条件下的混凝土应力水平。

当无法得到混凝土弹性模量 E_c 或为了提高推算精度, 可以利用不同应力条件下的结果回归 E_c 和 S_L 。其方法如下:

(1) 仅自重作用下的测试

此时的混凝土切线弹性模量可以表示为:

$$E_{ct_z} = E_i \left(1 - S_{LZ} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (3-4-4)$$

(2) 自重+交通荷载作用下的测试

根据交通荷载的大小，可以推算出应力水平的增量 ΔS_L ，此时的切线弹性模量为：

$$E_{ct_{-z+\Delta}} = E_i (1 - S_{LZ} - \Delta S_L)^{\frac{n-1}{n}} \quad (3-4-5)$$

根据式--11 和式--12，可以联立求得 E_i （即 E_c ）和 S_L 。

4) 桥梁承载力状况的推算

由于桥梁的承载力不仅与混凝土材料状况有关，而且与梁板的几何尺寸、钢筋、预应力等有密切的关系。因此，本发明中，主要根据测得的混凝土的应力水平和裂缝状况，推算桥梁承载力状况与设计值的差别。

- (1) 根据设计资料，明确在不同工况下桥梁各部位（上、中、下）的应力水平和弹性模量；
- (2) 将设计值与相应位置的测试值进行比较，明确其间的差异；
- (3) 推算现有承载力状况与设计状况之间的差异。

3.5 验证

3.5.1 弹性模量的验证

1) 金属材料的验证

对于钢材等金属材料，其材质均匀，动、静弹性模量之间基本一致（低碳钢的弹性模量在 200~210GPa 之间，平均为 206GPa）。因此，利用对金属材料弹性模量的测定，可以验证我们开发的测试方法和设备。

下面的图表表示了我们利用不同方法对钢筋弹性模量的测试的结果。

表 3-5-1 钢筋弹性模量测试结果（单位：GPa）

钢筋长度(m)	单面反射法		双面透过法(打击)		双面透过法(冲击)	
	测试值	相对误差	测试值	相对误差	测试值	相对误差
0.5	206.6	0.29%	174.4	-15.34%	180.9	-12.18%
1.0	209.1	1.50%	206	0.00%	208.3	1.12%
2.1	207.8	0.87%	207.8	0.87%	206.7	0.34%
3.5	206.5	0.24%	206.1	0.05%	205.8	-0.10%
5.5	205.5	-0.24%	205.2	-0.39%	208.7	1.31%

可以看出，当钢筋长度较短（如小于 1m），由于波的到达时刻的读取误差，使得用

透过法测得的误差较大，建议采用单面反射法测试。对于钢筋长度大于 1m 时，各种测试方法均能够很好的测试，充分说明了本技术测试的可靠性和精度。

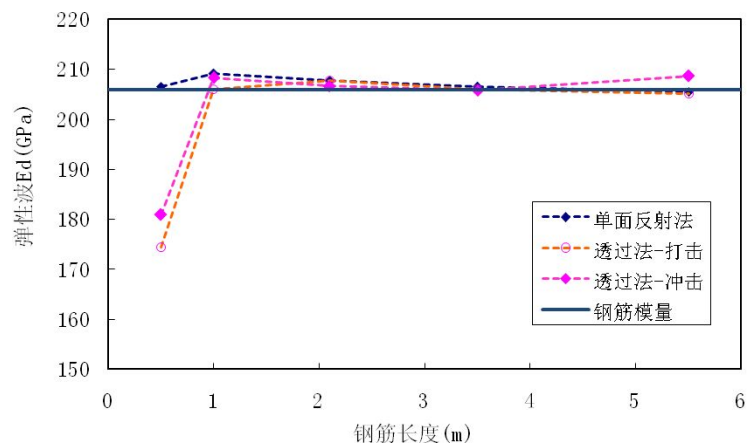


图 3-5-1 钢筋弹性模量测试结果图

此外，我们也对钢柱及钢绞线进行了验证试验。

表 3- 5-1C 金属验证测试结果一览

测试对象	钢柱	钢绞线
直径/长度	D140、厚 4mm/1.5~2.5m	D7、3~60m
模量/密度	200~210GPa、7800kg/m ³	196GPa、7800kg/m ³
理论波速 (km/s)	5.06~5.19	5.01
实测波速 (km/s)	5.18 (±1%)	5.00 (±1%)

2) 混凝土动弹性模量的验证

根据中国水科院吕小彬等人^[4]的验证结果，利用本设备测试得到的混凝土的动弹性模量 E_d 与共振法得到的动弹性模量 E_d 结果一致。

表 3- 3-1D 棱形试件与共振法的对比

预应力混凝土桥梁快速检测及健康监测 技术方案

Table 7
Dynamic E_d obtained from two methods at 28 days for group L prisms.

Mix	Impact-echo method						Transverse resonant frequency method					Diff. between two E_d
	f (Hz)	V_{PI} by Eq. (4) (m/s)	E_d by Eq. (2) (GPa)	Avg. E_d (GPa)	Stdev (GPa)	Cov	f (Hz)	E_d by Eq. (1) (GPa)	Avg. E_d (GPa)	Stdev (GPa)	Cov	
L-JZ4520	1	5494	4395	47.23	47.0	0.31	2372	46.73	46.4	0.28	0.60%	1.3%
	2	5463	4370	46.69			2363	46.37				
	3	5494	4395	47.23			2358	46.18				
L-JZ5020	1	5494	4395	47.21	46.4	1.10	2364	46.39	46.3	0.06	0.12%	0.1%
	2	5371	4297	45.13			2361	46.28				
	3	5470	4376	46.80			2362	46.32				
L-JZ5520	1	5371	4297	45.09	45.1	1.03	2341	45.46	44.9	0.96	2.13%	0.3%
	2	5310	4248	44.07			2299	43.84				
	3	5433	4346	46.12			2343	45.54				
L-Q4520	1	5433	4346	44.80	45.1	0.59	2332	43.82	43.8	0.25	0.56%	3.0%
	2	5494	4395	45.82			2339	44.08				
	3	5433	4346	44.80			2326	43.59				
L-Q5020	1	5310	4248	42.77	43.1	0.57	2266	41.34	42.3	0.88	2.07%	1.9%
	2	5371	4297	43.76			2313	43.07				
	3	5310	4248	42.77			2296	42.44				
L-Q5520	1	5188	4150	41.01	41.3	0.56	2246	40.80	40.6	0.66	1.62%	1.8%
	2	5249	4199	41.98			2255	41.13				
	3	5188	4150	41.01			2220	39.86				

3) 混凝土弹性模量的验证

我们在国内外不同单位也进行了弹性模量验证试验。试验条件如下：

表 3- 3-1E 混凝土梁弹性模量验证测试条件一览

测试单位	测试对象	本系统检测方法	验证方法
(株) セントラル技研.	大型试块 圆柱体试件	单面传播法	静载+应变片
中铁二局祁东梁厂	棱形试件	单面重复反射法	静载+位移计
清华大学水利系	棱形试件	单面重复反射法	共振法试验



照片 3- 5-1 混凝土梁弹性模量验证测试

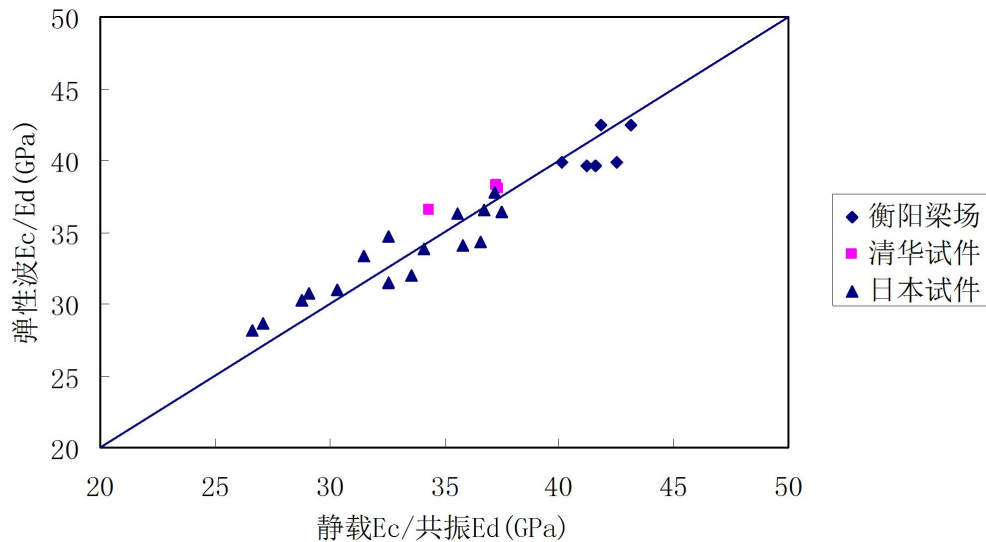


图 3- 5-2 混凝土弹性模量验证结果图

从图中可以看出：

- 1) 测试精度高：本系统测出的 E_c/E_d 与现行方法测出的值的之间的标准偏差小于 5%；
- 2) 适用范围广：不仅适合于试件（棱形、圆柱），还可以适合于现场结构。

3.5.2 桥梁承载力试验（安徽高速、2013.07）

结合预应力梁的过火试验和载荷试验，我们同时测试了构件的整体和局部弹性模量的变化。弹模测试位置在顶板、底板和腹板，纵长全长测试。



照片 3-5-2 载荷试验及弹模测试场景

试验结果如下：

- 1) 不同荷载条件下过火前后弹性模量的变化

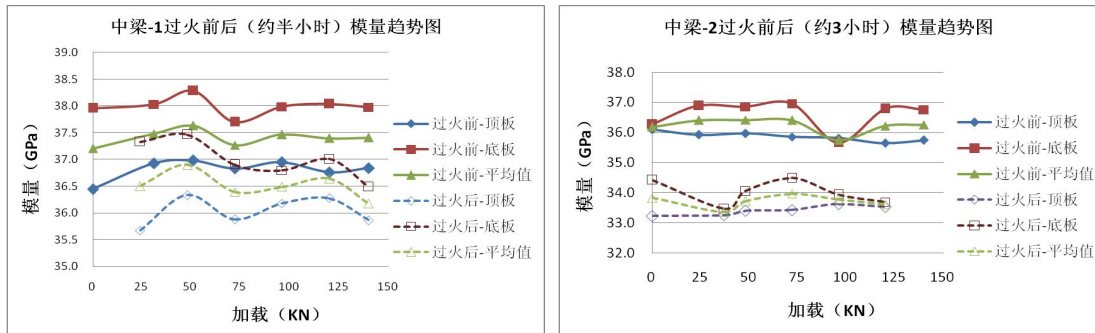


图 3-5- 3 中梁-1/2 过火前后模量趋势图

- (1) 经过过火实验半小时及 3 小时后，空心板中-1 与中-2 整体弹性模量的变化率在过火前后分别平均降低了 2.49%和 7.17%。但是，在过火附近位置的弹性模量则降低了 30%以上。
 - (2) 加载等级与测试弹性模量相关性不大，说明加载仍在结构的弹性范围之内；
- 2) 不同荷载条件下过火前后跨中挠度的变化

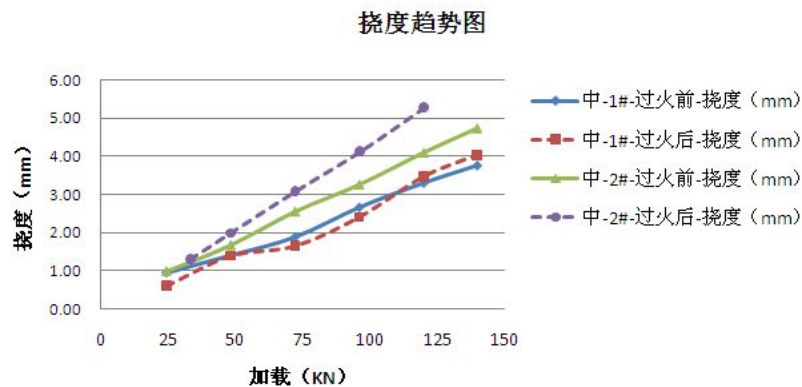


图 3-5- 4 中梁-1/2 过火前后挠度趋势图

- (1) 过火后中-1 的挠度变化不明显，而中-2 的挠度增加量约 25%，与弹性模量测试结果趋势一致，但离散更大；
- (2) 中-1 和中-2 的挠度~加载曲线基本为一直线，说明结构处于弹性范围内，与弹性模量测试结果一致。

整体测试结果表明：

- (1) 静载试验与弹性模量测试两者的结果基本一致，弹性模量更能反映结构材质的变化；
- (2) 平均而言，挠度的变化量大于整体弹性模量的变化量，这是因为挠度还受到有效截面积减小的影响。

3.5.3 桥梁弹性模量测试（四川成都、2014.07）

此次对成都交通职业技术学院内一片 25m 预制 T 型梁进行了检测，分别采用透过法和表面 P 波进行了测试。测距为 25m。



照片 3-5-3 测试对象

1) 测试方法概述

对于桥梁整体的弹性模量的测试，在端部激振、接收信号的精度是最高的（透过法）。然而，对于在役桥梁，由于测试条件限制，只能在侧壁进行测试波速（单面传播法）。为了比较测试精度，本次对两种测试方法的结果进行了比较。

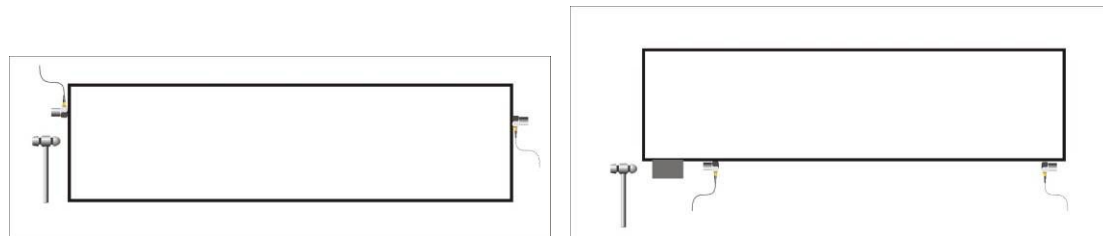


图 3-5-5 P 波测试示意图（左：透过法，右：表面传播法）

2) 测试代表波形

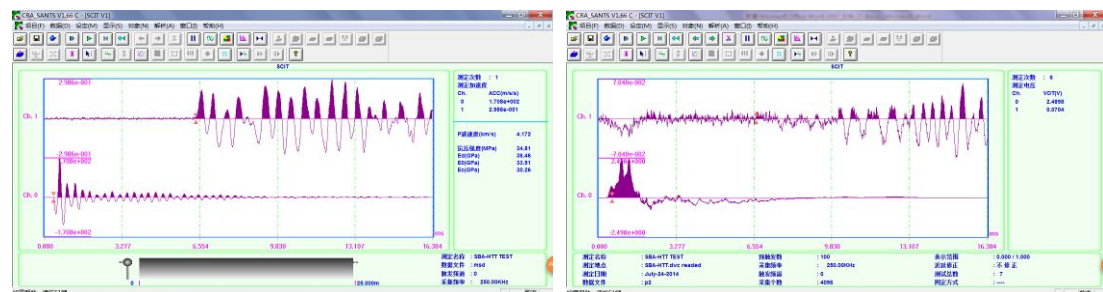


图 3-5-6 P 波测试波形（左：透过法，右：表面传播法）

可以看出，表面传播法的测试信号的质量要远低于透过法。

3) 测试结果

对于表面传播法，由于信噪比低，需要采用 EMD 等方法进行降噪处理。

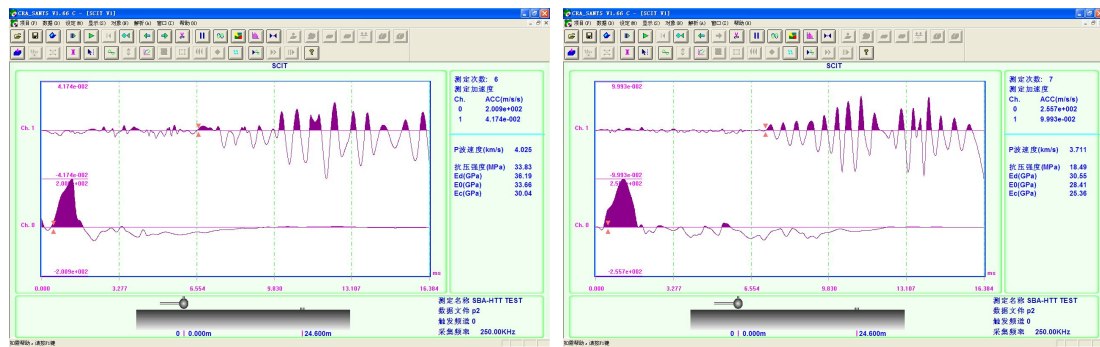


图 3-5-7 表面 P 波测试 EMD 处理结果（消除阶数：5 阶）

表 3-5-1 测试结果比较

方法	波速 (km/s)	E _c (GPa)	备注
透过法	4.172	30.26	按 3 维计算
单面传播法	4.060	30.55	按 2 维计算

测试结果表明：

- （1）用单面传播法能够准确地测出梁的弹性模量，但需要 EMD 等处理；
- （2）单面传播法需要按 2 维弹性波计算；
- （3）激振方式还需改良，以便能够测试更长的梁体。

3.5.4 桥梁弹性模量～荷载关系测试（贵州望安高速、2015.05）

此次对贵州望安高速的 40m 预制 T 梁腹板的弹性模量～荷载关系进行了比较测试。



照片 3-5-3 测试对象及测点位置

1) 概述

对该 40m 预制 T 梁采用钢绞线加载，共 5 级（荷载分别为：0、136.94、273.76、408.94 和 507.16KN）。在加载过程中对腹板的弹性波 P 波波速（弹性模量）进行了比较测试。

在加载到 500KN 后，对梁体进行了观察，未发现裂缝及其它异常。

2) 测试结果

(1) 测试结果一览

表 3-5-2 测试结果一览

测点序号	加载等级	弹性波波速 (KM/S)	弹性模量 (GPa)	测点序号	加载	弹性波波速 (KM/S)	弹性模量 (GPa)
1	第 1 级	4.476	35.0	2	第 1 级	4.480	35.1
	第 2 级	4.556	36.3		第 2 级	4.558	36.3
	第 3 级	4.566	36.5		第 3 级	4.555	36.3
	第 4 级	4.564	36.4		第 4 级	4.565	36.5
	第 5 级	4.555	36.3		第 5 级	4.545	36.1
3	第 1 级	4.507	35.5	4	第 1 级	4.501	35.4
	第 2 级	4.532	35.9		第 2 级	4.570	36.5
	第 3 级	4.532	35.9		第 3 级	4.568	36.5
	第 4 级	4.544	36.1		第 4 级	4.566	36.5
	第 5 级	4.550	36.2		第 5 级	4.583	36.8
5	第 1 级	4.555	36.3	6	第 1 级	4.534	35.9
	第 2 级	4.605	37.1		第 2 级	4.574	36.6
	第 3 级	4.595	36.9		第 3 级	4.573	36.6
	第 4 级	4.578	36.7		第 4 级	4.566	36.5
	第 5 级	4.584	36.8		第 5 级	4.551	36.2
7	第 1 级	4.542	36.1	梁体平均弹性模量	第 1 级	4.514	35.6
	第 2 级	4.538	36.0		第 2 级	4.562	36.4
	第 3 级	4.553	36.3		第 3 级	4.563	36.4
	第 4 级	4.560	36.4		第 4 级	4.563	36.4
	第 5 级	4.570	36.5		第 5 级	4.563	36.4

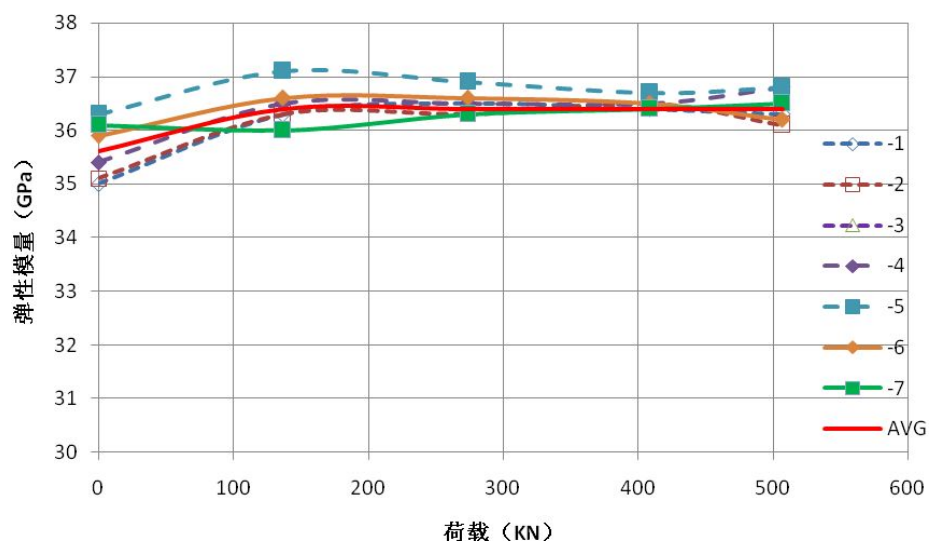


图 3-5-8 测试弹模~荷载关系

(2) 弹模变化率;

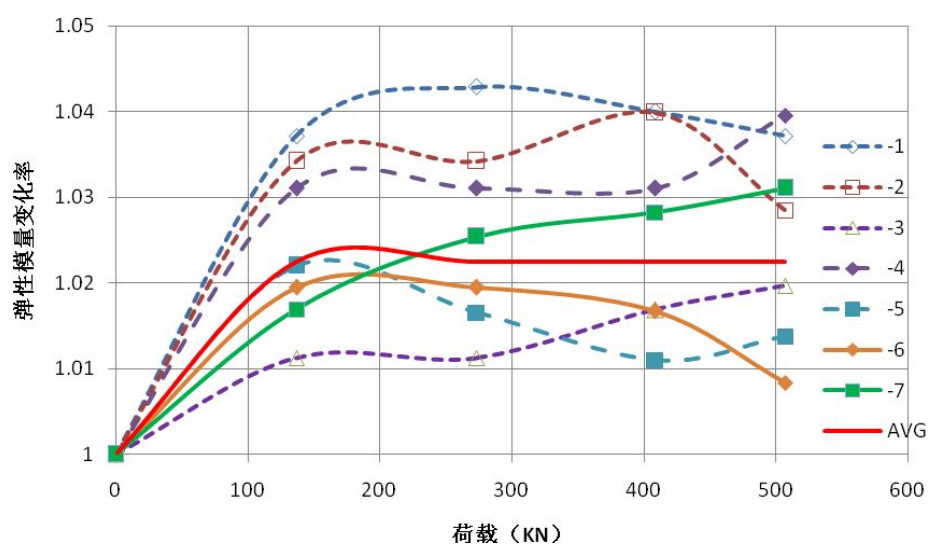


图 3-5-8 测试弹模变化率~荷载关系

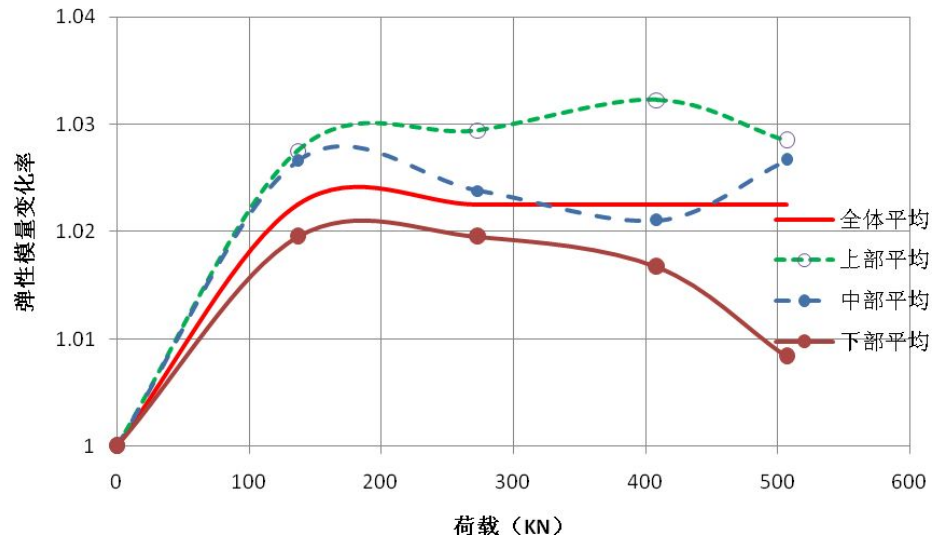


图 3-5-9 不同区域测试弹模变化率~荷载关系

3) 测试结果分析

- (1) 各测线的弹性模量均在 35~37GPa，并未出现上低下高的趋势，表明混凝土较为均匀；
- (2) 各测线的弹性模量均未出现明显下降，说明混凝土结构仍处于弹性范畴，应具有较高的承载力冗余。根据对现场梁体的观察，各部位均未出现裂缝和其他损伤，与推算结果相符；
- (3) 在第一级加载后，各测线的弹性模量均有所提高，平均提高约 2.2%。其原因在于加载后，混凝土由单向受力变为双向受力，应力状态有所改善，相应地其弹模、强度有所提高；
- (4) 第二级加载后，平均弹模几乎没有变化，说明梁体整体处于理想的弹性状态；
- (5) 第三级加载后，上、中部位置弹模的变化很小，表明其应力水平相对较低。但下部位置弹模开始出现降低的趋势，表明其应力水平开始恶化；
- (6) 本次加载试验结果进一步证明了我们提出的基于弹性模量快速检测桥梁状态理论的合理性。

3.6 预应力混凝土桥梁快速评价方法的特点

- 1) 测试方便、成本低：测试距离从数米到上百米可变，无需专门施加荷载，测试方便、效率高，测试成本低，可不中断交通。
- 2) 精度高、客观性强：基于一系列的独创技术，对弹性模量的测试相对误差可以

控制在 1%以下，为评价体系的可靠性提供了坚实的基础。同时，可以对梁的全体进行测试，有效地防止局部检测带来的遗漏问题；

- 3) 对桥梁无损伤：无需专门压载，对桥梁无损伤；
- 4) 便于长期检测：通过定点检测的方法，可以敏感地反映桥梁劣化的进行状况；
- 5) 可为桥梁健康监测系统提供标定：在长期监测系统中，最大的问题之一在于传感器的耐久性。在长期使用过程中，传感器的指标通常会发生一定的变化。由于监测用传感器无法简单更换，其特征指标往往难以标定，为监测数据的可靠性带来很大的影响。而采用本检测技术，可以为监测提供有效的标定手段。

第 4 章 预应力混凝土桥梁健康监测系统

4.1 桥梁健康监测技术的发展现状

4.1.1 桥梁健康监测的目的和功能

1) 目的:

- (1) 验证设计;
- (2) 支持养护管理决策;

2) 功能:

- (3) 自动实时监测环境条件和桥梁响应并直观显示结果 (及时);
- (4) 识别结构损伤并对结构异常紧急预警 (自动预警);
- (5) 记录结构状态及长期变化趋势 (长期连续)

4.1.2 桥梁健康监测系统的现状概况

目前,我国的桥梁健康监测系统主要针对大跨径桥梁,已有 140 余座大桥安装桥梁健康监测系统。其一般特点为:

- (1) 全部针对超大跨径桥梁 (单跨跨径大于 100 米);
- (2) 绝大多数是针对斜拉桥和悬索桥,针对预应力连续梁桥的极少;
- (3) 一般来说,一个大跨度桥梁的健康监测系统由少则 50、多则 300 个以上的传感器测点组成,其费用约占到桥梁总造价的 0.5~2.0%;
- (4) 监测系统的设计理念越来越侧重于为桥梁的养护管理提供支撑,测试数据处理和评价的设计方案越来越受到重视;
- (5) 健康监测系统的耐久性受到重视,要求传感器和其他硬件具有可更换性,并且更换时不能影响到数据采集的连续性;

表 4-1-1 部分监测系统汇总

编号	（健康监测系统安装年份） 建成年份	桥梁工程		健康监测传感器																
		名称	（跨径m） 桥型。	环境							应变	位移				振动		总计		
				风速仪	温度传感器	雨量计	湿度计	气压计	温度计	动态地秤	摄像机	应变传感器	位移传感器	水平仪	倾斜仪	GPS	伸长仪		加速度传感器	地震检波器
1	1968(u.k.)	南京大桥	T(160)	√	√					√		√	√					√	√	n.a.
2	1992(2005)	大渡河大桥	A																	n.a.
3	1995(2002)	铜陵大桥	C(432)	26	26									30	12			116		210
4	1997(1999)	徐浦大桥	C(590)		20					√		8		√				20		>48
5	1997(1997)	汲水门桥	C(430)	2	224					6		46	6	5		2		2		293
6	1997(1997)	青马大桥	S(1377)	6	115					6	√	118	2	9		14		17		>287
7	1998(1998)	汀九桥	C(475)	7	83					6		88	2			5		45		236
8	1998(1998)	虎门大桥	S(888)									√		√	√	√				n.a.
9	1999(1999)	江阴大桥	S(1385)	√	√							√	√			√		√		n.a.
10	2000(2002)	芜湖大桥	C(312)		√							√	√	√				√		n.a.
11	2000(2000)	呼兰大桥	CRF(40)		√							√								n.a.
12	2001(2001)	招宝山大桥	C(258)	√	√							√	√			√		√		n.a.
13	2001(2003)	大佛寺大桥	C(450)		√							√	√	√				√		n.a.
14	2002(2001)	南京二桥	C(268)	√	√		√			√		√						√	√	n.a.
15	2002(2004)	湛江海湾大桥	C(480)	√	√		√					√	√		√	√		√	√	n.a.
16	2002(2002)	牛头山大桥	CRF(42)		√							√								n.a.
17	2003(2003)	卢浦大桥	A(550)		100							32	√					16		>148
18	2004(2004)	滨州大桥	C(300)	√	√							√				√		√		n.a.
19	2004(2004)	松花江大桥	C(365)	√	√							√				√		√		n.a.
20	2004(2004)	钱江四桥	A(190)	√	√							√						√		n.a.
21			CB (50-160)																	
22	2005(2005)	东海大桥	C(420)	√	√		√					√			√	√	√	√		>300.
23			C(332)																	
24	2005(2005)	南京三桥	C(648)									√	√							n.a.
25	2005(2005)	东营大桥	CRF(220)		√							√								n.a.
26	2005(2004)	润扬(南)大桥	S(1490)	√	√							√				√		√		n.a.
27		润扬(北)大桥	C(406)																	n.a.
28	u.c.2007	苏通大桥	C(1088)	√	√				√	√	√	√	√		√	√		√		n.a.
29	u.c.2008	昂船州桥	C(1018)	√	√		√	√	√	√	√	√	√		√	√		√		n.a.
30	u.c.	茅草街大桥	A(368)	√	√							√						√		n.a.
31	u.c.	广阳岛大桥	CRF(200)		√							√								n.a.
32			C(260)																	
33	u.c	青岛海湾桥	A	5	2							√	√		√	13		150		>170.
34			S(260)																	
35	u.c.	上海长江大桥	C(730)	5	54							107	√			16		14		>196.
36	u.c.	深圳西部通道	C(210)	√	√		√		√	√	√	√	√		√		√			n.a.

* T=桁架结构桥; A=拱桥; C=斜拉桥; S=悬索桥; CRF=连续刚构桥; CB=连续梁桥.

u.k.=未知; u.c.=在建; n.a.=not available.

4.2 本监测系统的概述

我们开发的监测系统以为数众多的预应力混凝土桥梁为监测对象，通过对系统的有效性、可靠性、经济性以及维护、耐久性等性能指标的最优化，并结合多本公司专有技术以及与人工检测的有机结合，从而具有很高的实用价值。

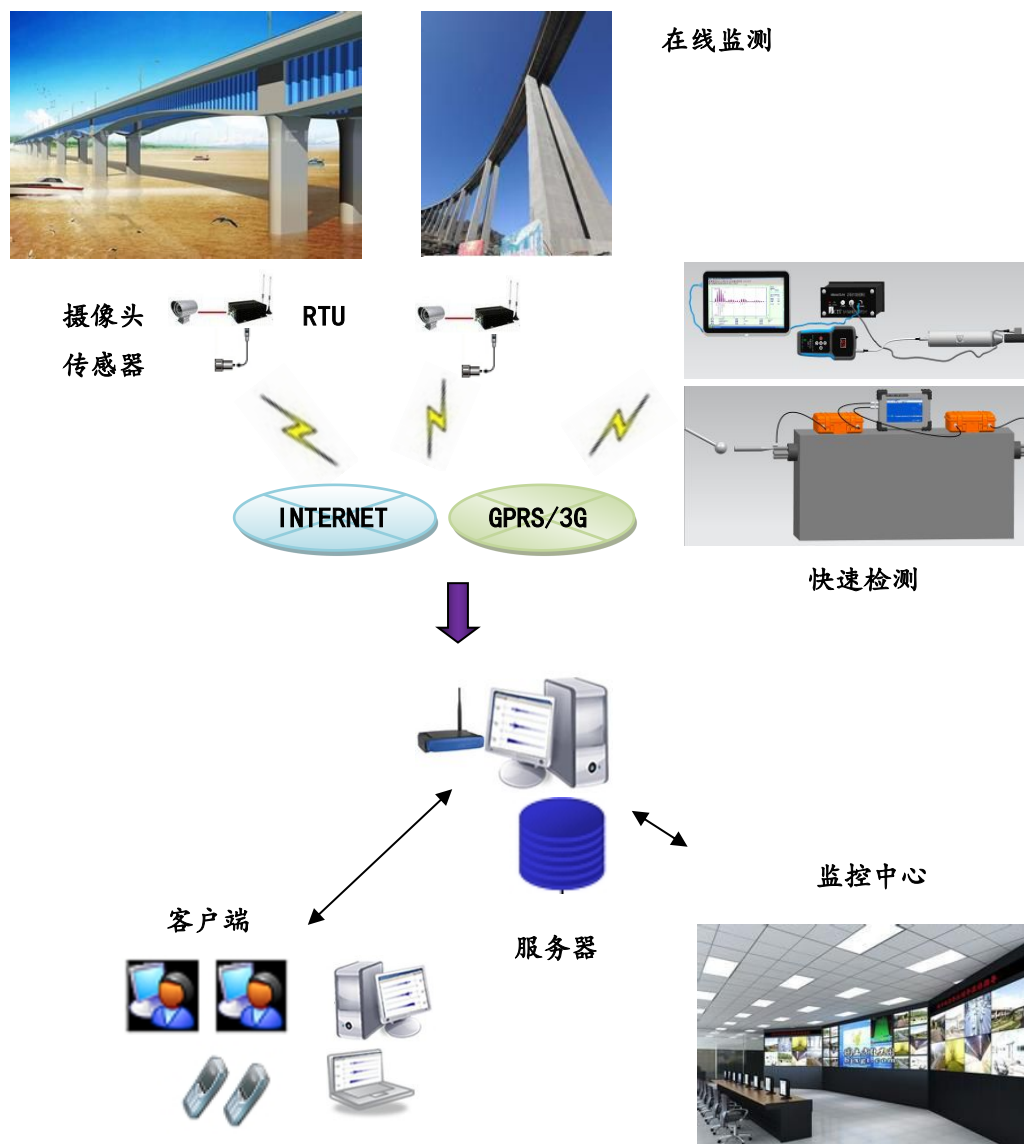


图 4-2-1 系统概念

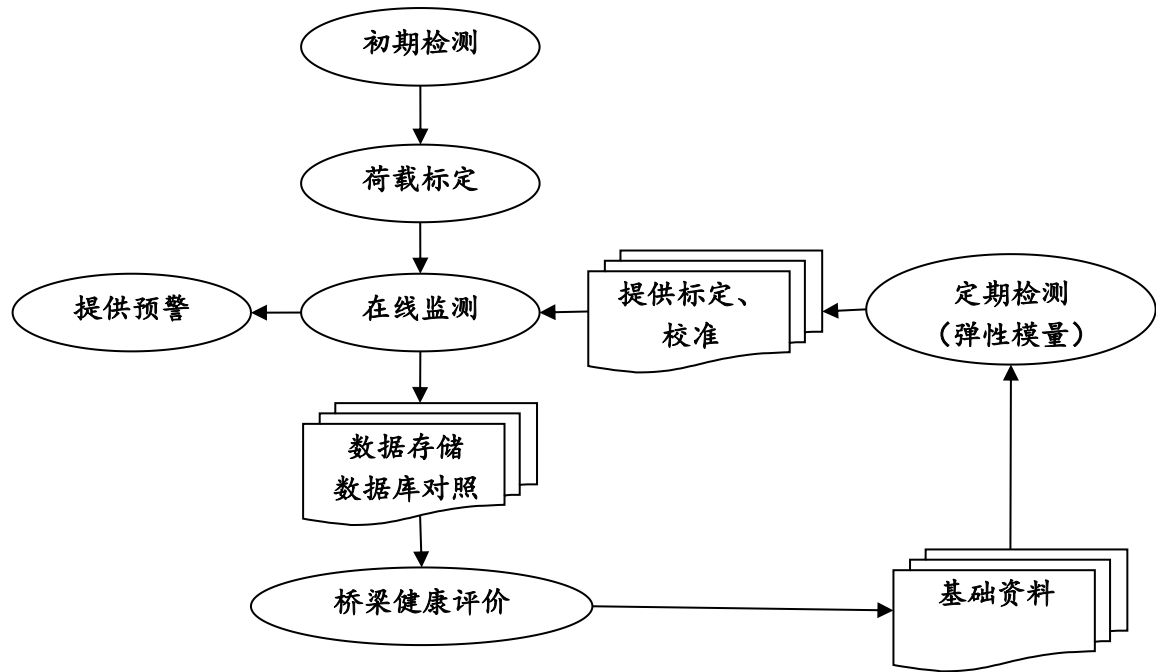


图 4-2-2 桥梁监测/检测的闭环模式

4.2.1 监测对象及主要监测内容

本系统以预应力混凝土桥梁为监测对象。此类桥梁具有如下特点：

- 1) 数目庞大：目前修建的交通、市政、铁路桥梁的 99%以上为此类桥梁；
- 2) 造价较低：在主流桥型中，造价最低；
- 3) 跨径不大：大部分跨径在 30~50 米，部分连续梁桥跨径可达 150 米左右；
- 4) 力学性能平衡性好：抗风、承载、变形等方面达到很好的平衡；
- 5) 其中，预应力体系的健全直接影响到桥梁的安全

主要监测内容为：

- 1) 桥梁的振动特性：以监测的加速度信号为基础、分析得出桥梁的自振频率；
- 2) 桥墩的振动特性：以监测的加速度信号为基础、采用独自的分析方法得出桥墩的自振频率；
- 3) 桥梁的温度；
- 4) 数字视频；

根据情况，辅以监测桥梁的倾斜。

5) 结合定期测试预应力梁、板、墩的弹性模量

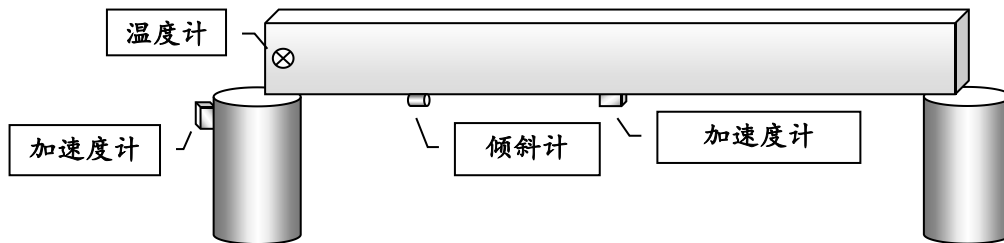


图 4-2-3 监测对象示意

表 4- 2-1 各传感器的作用

对象	传感器种类	测试参数	监测对象及作用
桥梁	加速度计	动挠度	梁的承载力（不含自重）、超载
		振动模态、频率	梁的刚性状况、损伤状况
	倾角计	静挠度	梁的承载力（含自重）
		横向稳定性	桥板的翻转
	温度传感器	混凝土内温度	对温度效应进行补偿、修正
桥墩	加速度计	振动模态、频率	桥墩的约束状况（基础冲刷等）
交通	数字摄像机	视频	桥梁的整体状态、交通状态

4.2.2 监测系统的构成和功能特点

本系统以物联网技术、以振动监测为核心，结合定期测试梁、板的弹性模量，包括：

- 1) 数据采集及现场预处理；
- 2) 基于公共无线网络的数据传输；
- 3) 基于动、静力响应和数据库技术的结构安全评估；
- 4) 基于动力响应和标定的动荷载（载重荷载）测试；
- 5) 相近类型、地质、结构条件桥梁的对比、搜索和采点评价；
- 6) 视频监测系统（与振动监测等联动）
- 7) 基于 BS 和 CS 的双模系统，并可构筑基于 Internet 构架的移动式的浏览、管

理体系；

- 8) 桥梁刚性的定期检测（混凝土桥梁的顶板、腹板的弹性模量）。

等机能。利用本系统，可以：

- 1) 对分布在各地的众多桥梁进行统一监测、管理；
- 2) 自动实时监测环境条件和桥梁响应并直观显示结果；
- 3) 识别结构损伤并对结构异常紧急预警；
- 4) 识别超载状况并与相关部门的系统联动；
- 5) 记录结构状态及长期变化趋势，为定期检测提供基础数据；
- 6) 通过测试混凝土梁、板的弹性模量，不仅可以为监测系统提供标定，而且本身可以作为桥梁刚性（健康）的重要参数

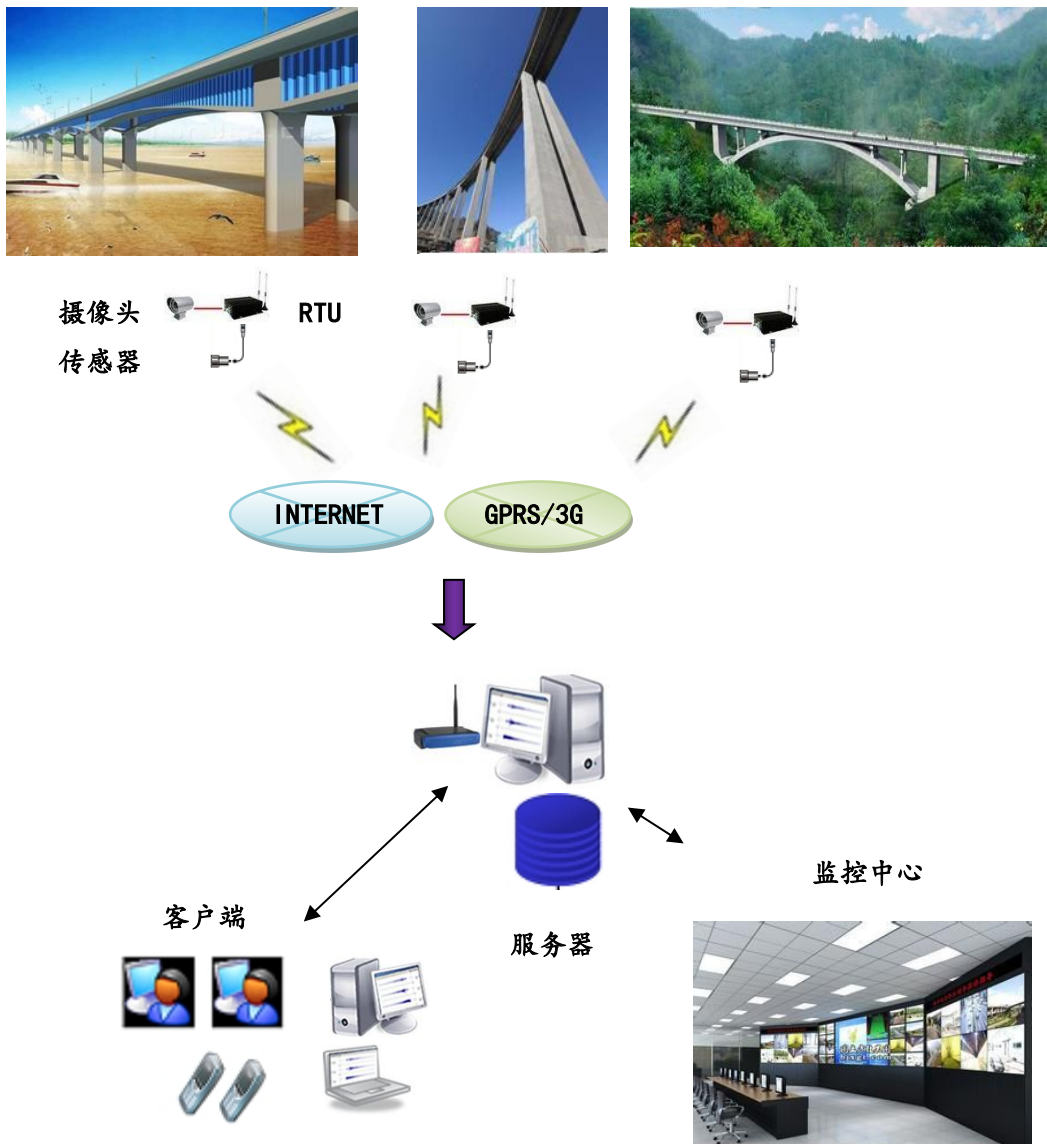


图 4-2-4 广域多桥系统构成

4.3 构成子系统

4.3.1 数据采集及传输子系统

1) 传感器及设置位置

本系统所选用的传感器突出耐久性特点，各传感器均设于梁的下端或桥墩的上端。

对于桥梁健康监测而言，加速度传感器设置在动挠度最大处，倾角传感器设置在静挠度斜率最大处，而温度传感器则设置在支座附近。

表 4-3-1 传感器设置位置

桥型	加速度传感器	倾角传感器	温度传感器
简支梁桥	跨中	1/4 跨径附近	支座附近
连续梁桥	1/4 跨径附近	1/6 跨径附近	支座附近
桥墩	桥墩上端	桥墩上端	—

2) 数据采集

数据采集按照以下流程进行：

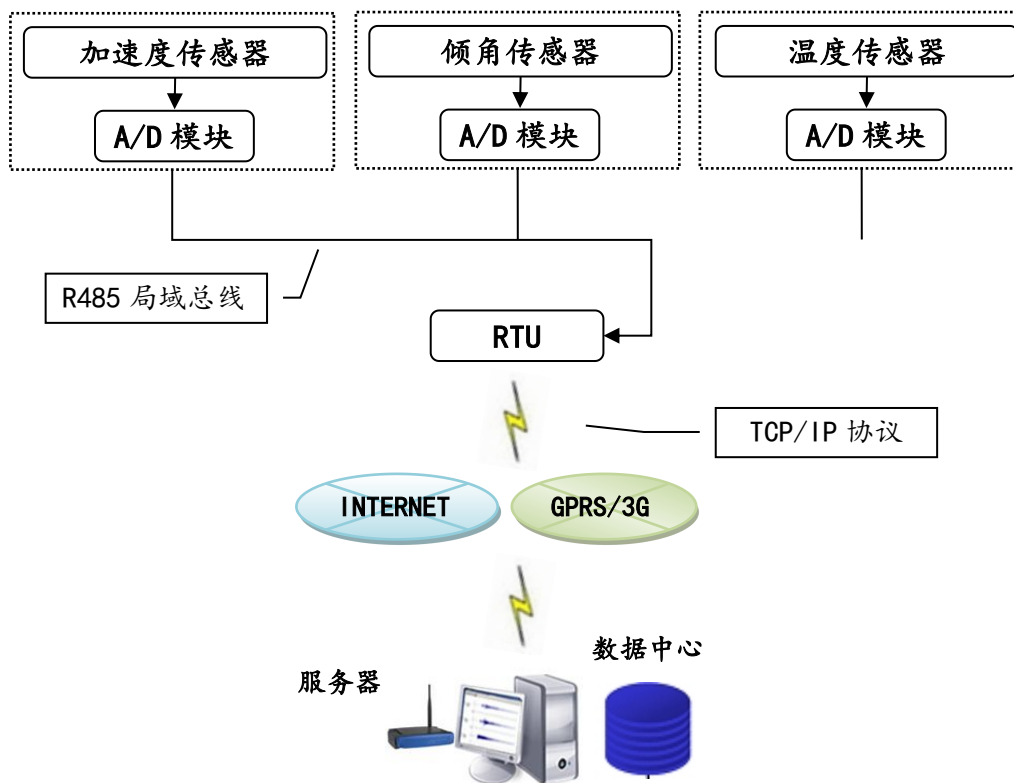


图 4-3-1 数据的采集和传输

主要技术参数为：

- (1) A/D (模数转换)：传感器端前置，直接输出数字信号。

表 4-3-2 A/D 模块的性能参数

位数	16 位	采样频率	10Kbps，可调
工作温度范围	-25℃+85℃	最小采样间隔	100us，可调

- (2) R485 总线：

采用具有较高噪声抑制、相对高传输速率、半双工异步通讯方式的 RS485 总线，简

化通讯线路结构。

3) 数据远程传输

- (1) 传输模式：可采用双模模式，即无线网路传输：GPRS/3G 或有线网路传输：光纤等 Internet；
- (2) 传输数据内容：可传输测试原始数据（考虑到通信费用的关系，一般仅在有线网路传输时传输），也可仅传输参数统计值及异常信号；
- (3) 数据下载：当测试信号出现异常时，根据服务器的指令，上传相关的监测原始数据。同时，每天可把交通流量大和交通流量小的两个典型时段的监测原始数据上传。

4) 远程控制节点（RTU）

在每座桥上，或一定的范围内，设置一台智能节点。该节点可以起到如下作用：

- (1) 对不同传感器所传来的数据进行同步；
- (2) 对大量的测试数据（振动信号的数据量要远大于静态数据）进行预处理和储存；
- (3) 定时上传桥梁的参数：如振幅、频率、频率、倾斜的平均值、最大值、离散等；
- (4) 及时识别桥梁的异常（如过载、碰撞、地震等）并向服务器发出信息；
- (5) 定时或根据指令上传测试原始数据（如典型数据、异常数据等）；

4.3.2 数据分析及储存、检索子系统

1) 数据分析

数据在前、后端分别进行相应的分析。

- (1) 前端分析（智能节点端）：包括参数计算、统计分析（每天的最大、最小、平均值等）统计数据、异常报警（各参数超出阈值时，向服务器端发出异常报警）；
- (2) 后端分析（服务器端）：包括不同桥梁间的对比分析、本桥的监测数据的变化历史、结合 ANA_SYS、MIDAS 等数值分析软件进行反分析。

2) 数据存储

数据存储也是按 2 级进行。

- (1) 前端存储（远程控制节点端）：存储若干天的监测原始数据；

(2) 后端存储（服务器端）：存储各桥梁监测的典型的原始数据及监测参数；
为了增加数据的安全性，可对监测数据进行镜像备份。

3) 数据检索

根据以下参数，可将监测对象的预应力混凝土桥梁进行分类：

- (1) 桥型：简支、2跨连续、3跨连续；
- (2) 单跨跨径；
- (3) 线性：直线、曲线；
- (4) 车道数；
- (5) 梁的类型：T型、箱形、其他；
- (6) 桥墩类型：简支、悬臂等；
- (7) 桥墩是否过水；

等。在不同类别的桥梁中可优化检索。

4.3.3 超载识别子系统

本系统中的超载识别子系统是从桥梁安全角度出发，在不改变桥面结构、不影响交通的前提下，对恶性超载进行识别。超载识别子系统的构成与桥梁健康监测系统的构成相同。但是需要适当地增加传感器的数量，并结合视频监测系统。

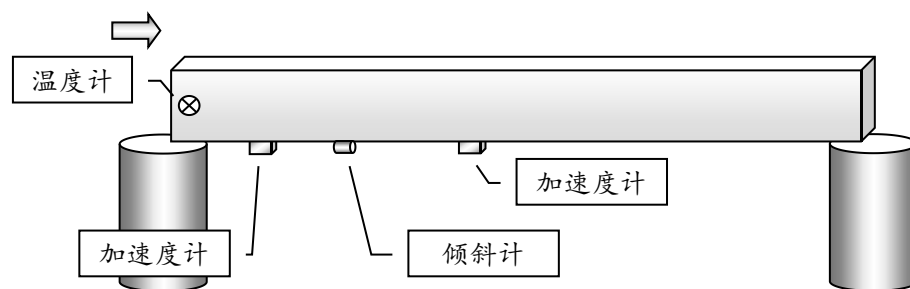


图 4-3-2 超载监测系统示意（仅设置在引桥）

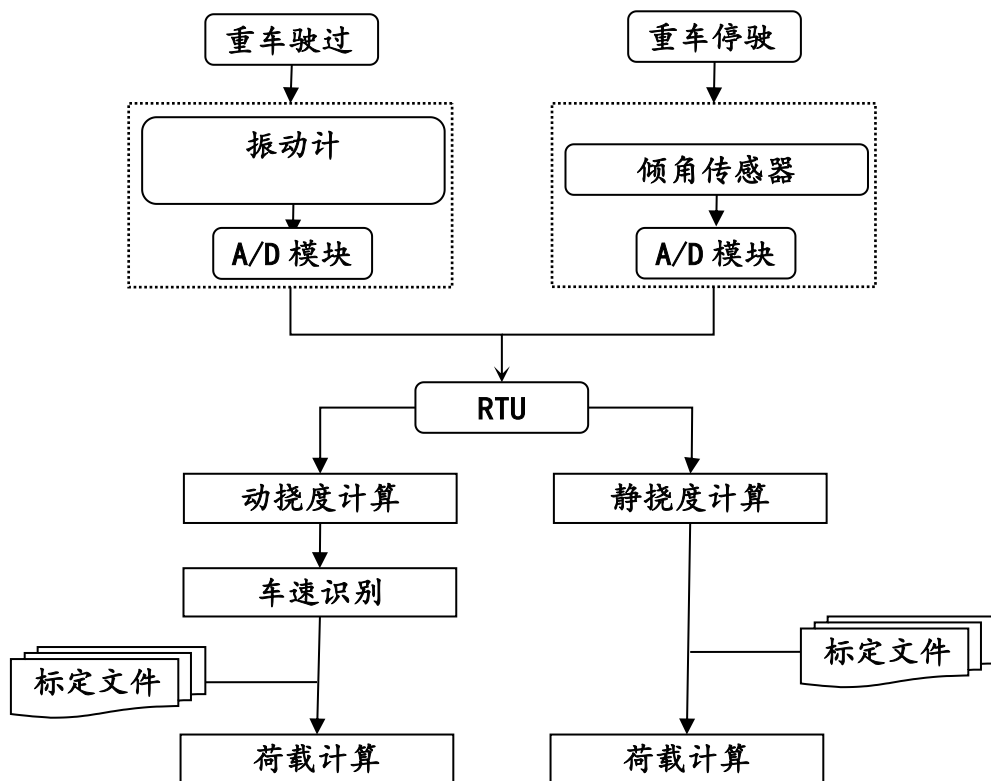


图 4-3-3 超载监测分析流程

通过研究，我们发现动挠度的大小与桥梁载重之间存在着较好的相关关系，但同时，动挠度的大小也受车辆速度、车辆距离、车辆类型、车道等条件的影响，如何修正这些因素对分析结果的影响，就是超载识别技术中最关键的内容。主要包括：

- 1) 动挠度的取得：动挠度利用加速度传感器取得加速度信号，积分得来。但由于加速度传感器存在基线误差，在积分成挠度过程中，会产生很大的漂移现象。为此，我们开发了一整套关于动挠度的测试、分析方法，具有较大的进展；
- 2) 车速的推定：项目中用加速度信号的模态和相位差来推定车速。然而，对向车、轴距变化的影响不容忽视；
- 3) 标定曲线的变化：在使用过程中，由于桥梁的老化和损伤，标定得到的最大挠度～车速曲线会发生相应的变化。因此，如何结合桥梁的检测，把握其变化状况也是必要的。

4.3.4 标定（桥梁刚性测试）子系统

在桥梁监测系统中，最苦恼的问题之一在于传感器的漂移。即在各种因素的作用下，传感器出现老化现象使得其基本参数发生变化。因此，在一般的试验、检测中往往要求

定期对传感器或检测系统进行标定或校验。而作为安装在桥梁上的传感器，则无法简单地对其标定或校验，因此其测得的指标的可靠性往往难以保证，为合理评估桥梁的健康状态造成了很大的困难。

而在第 3 章所介绍的快速检测系统不仅可以对桥梁的安全、承载力状况进行评估，还可以对健康监测系统进行相应的标定。

4.3.5 安全评估及运营管理子系统

安全评估系统中包括状态安全评估和实时安全评估，同时，为桥梁的定期检测提供必要的基础数据。

1) 状态安全评估：根据测试的参数，并依据设计资料、历史资料和类似桥梁的对比，从而综合地评估桥梁的安全状态；

(1) 与设计资料的响应允许值对比（主要是梁的动挠度、自振频率等）；

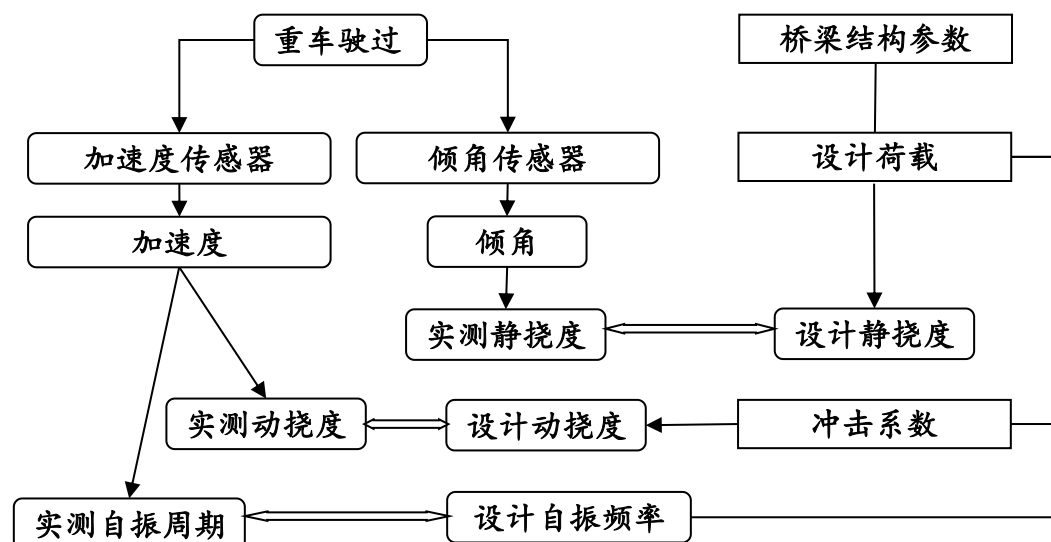


图 4-3-4 安全评估方案（与设计值的对比）

(2) 与设计资料的桥梁刚度对比（主要是梁的动、静挠度等）；

(3) 本桥的监测数据的变化历史：卓越频率的变化（特别是桥墩）、加速度、动挠度的平均值、最大值变化等

(4) 类似桥梁的对比：预应力混凝土梁的桥型相对比较简单，如前所述，可以根据其桥型、单跨跨径、线性、车道数、梁的类型、桥墩类型以及桥墩是否过水等将其分类。在同类中，根据桥梁的响应即可对桥梁的健康状况进行排序，而处于顺序下位的桥梁就应该引起足够的重视；

- 2) 实时安全评估：在突发性事件（如严重超载车辆的驶过、碰撞、地震）发生后，桥梁健康状况、损伤状况的快速评估。

安全评估系统支持在线评估和离线评估。

而运营管理子系统则包括：

- 1) 桥梁信息管理：桥梁位置、结构、设计资料等；
- 2) 桥梁检测信息管理：包括人工巡检、专项检测结果
- 3) 监测信息综合管理；
- 4) 应急预案
- 5) 其他：如视频监控等

4.3.6 电源模块及其他

1) 电源模块

本系统的耗电主要集中在 RTU 上，前端耗电约为 20~30W，电源模块采用双模方式：

- (1) 普通交流电源供电模式，配备 UPS 供电；
- (2) 太阳能电池板+蓄电池的独立电源模式

系统具备以下能力：

- (3) 电源的远程管理，根据需求对电源进行开断路等操作；
- (4) 防雷措施

2) 辅助模块

辅助支持系统为系统中所有硬件设备及设施提供运行所需的基本条件，如：场地、电源、电缆、防护措施等。系统内若干采集设备及现场数据处理设备，均位于桥上。确保这些设备在恶劣环境下长期、稳定的运行是非常重要的问题。

为此，本系统考虑了各个模块的防水、防尘性能，并具有可更换性。

第 5 章 健康监测系统与快速检测技术的有机结合

5.1 现有健康监测系统的问题点

桥梁健康监测自引入我国，已有近 20 年的历史，用于测试超载的动态称重仪（动态地称）的出现也在 10 余年以前。然而，无论是健康监测技术，还是超载监测技术，都没有得到广泛的普及和应用。目前只在部分大型、特大型桥梁（约 100 余座）的建立了监测系统，而其余的 99.9% 以上的桥梁处于监测的空白。特别是占桥梁绝大多数的预应力混凝土桥梁，几乎难以见到成功的监测实例。其原因在于：

1) 成本高，仅适用于大型、特大型桥梁：

目前，由于技术、经济等方面的原因，单座桥梁健康监测系统的成本都在数百万元以上，部分特大桥达到了数千万元甚至数亿（如香港金马大桥）。同时，由于系统复杂，其维护、运营成本也十分高昂，使得现有的监测系统无法适用于广大的中（占桥梁总数的 22%）、小跨径桥梁（占桥梁总数的 71%），甚至在大跨径桥梁（占桥梁总数的 6.3%）中也鲜有实例。而恰恰是这部分桥梁，占据了全部桥梁的 99.8% 以上，并占据了跨桥事故的几乎全部。

2) 系统复杂、可靠性差：

由于监测系统追求大而全，使得系统过于复杂。一个典型的桥梁监测系统常包括数十个子系统，使用数十种甚至上百种传感器。面面俱到的同时，不仅增加了系统成本，而且还严重地降低了系统的可靠性。

3) 缺乏标定手段、耐久性差

由于种种原因，使得传感器不仅寿命较短，而且在使用过程中会出现漂移等问题，严重影响了监测系统的耐久性。特别是缺乏对监测系统的标定手段，使得这一问题一直得不到有效的解决。

因此，这些原因使得桥梁健康监测技术尽管具有诸多优点，但在实际应用中难以得到普及和推广。特别是缺乏针对预应力混凝土桥梁的健康监测系统。

5.2 本系统的特色

经过多年的潜心研究，并在关键技术方面（如基于混凝土弹性模量的桥梁快速检测技术等）取得突破的基础上，同时，结合我公司开发的一系列有关预应力混凝土桥梁的无损检测技术，使得我们可以有机地结合在线监测和人工检测两个体系，更全面、更合

理地保证桥梁的安全。该体系无论在可靠性、成本以及实用性方面均较现有的技术有明显的优势。

5.2.1 技术长处概述

本技术体系及系统方案的主要特点有：

1) 针对性强、成本大幅降低

针对预应力混凝土桥梁这一桥型，采用先进的理念和技术，使得系统的构筑成本和运营成本均大幅降低。目前，对跨径在 50 米以下的桥梁，单跨的硬件成本可以控制在 2~3 万元（根据桥宽）以下。同时，数据传输等成本也可大幅降低。

同时，该系统完全采用远程监测，桥梁越多，单桥成本越低。

2) 系统简单、可靠性好：

监测系统摒弃了现有监测系统的大而全的设计思想，而专注于结构的振动特性和倾斜，从而使得监测系统的构筑大为简化，进而提高了可靠性。其中，最关键的振动传感器采用压电式，无可动构件，固有耐久性好。

此外，所选取的频率参数是所有振动参数中测试精度最高的参数，进一步提高了系统的可靠性。

3) 精度及信赖性高、整体解决能力强

本监测系统可对梁板的整体健全性进行监测，但对缺陷的位置、形态、程度的分辨力则相对较低。但这个弱点可通过巡检子系统加以弥补，而这正是本方案最大的长处。通过与基于弹性模量、裂缝的快速检测技术相结合，不仅可以对监测系统进行标定，还可以进行相应的人工检测。从而达到了成本、可靠性、精度的最佳匹配。

5.2.2 基于“物联网”技术的监测体系

本系统的数据传送、数据分析均基于“物联网”技术体系，特别适合于桥梁众多，分布区域广的情形。而且，随着监测桥梁的增加，系统的构建成本和维护成本呈单边下降的趋势。

5.2.3 以动力响应为主、静力响应为辅的监测体系

桥梁垮塌的型式有多种多样，对于预应力混凝土桥梁，已在 2.3.2 中加以阐述。

针对上述垮塌形式，本系统采用了以动力响应为主、静力响应为辅的监测体系。

该体系以振动传感器和倾角传感器为核心，辅以温度修正，既简单高效，又可以覆盖桥梁的各种失稳、垮塌模式。

需要强调的是，在本技术体系中，以动力监测为一大特点。与单纯的静态监测相比，具有如下特长：

- 1) 适合于既有桥梁的监测：对既有桥梁，绝大多数没有既往的监测数据。因此，基于静态的参数无法反映历史积累，从而影响其在既有桥梁检测中的应用。而动力参数对历史数据的依存较小，较静态参数相比有明显的优点。
- 2) 适合对桥墩失稳的监测：由于桥墩属于受压构造，其失稳具有脆性，从而更加危险。桥墩的失稳常常是由于以下原因引起：
 - (1) 桥墩基础受洪水（2010 石亭江大桥），挖沙（1998 陇海线霸河桥）的影响，使得基础周围的约束降低；
 - (2) 桥墩本身因为施工质量、混凝土老化、偏心荷载等原因而劣化。

基础周围约束的降低，在桥墩的位移等方面一般不会马上引起明显的变化，但对桥墩，乃至桥梁的振动模态（如频率）有较大的影响。例如，2010 年石亭江大桥上行驶的 K165 次列车的司机，就是感觉到车辆的振动与平日不同，从而果断刹车，在千钧一发之际挽救了千百人的生命。

- 3) 符合规范的要求：在中华人民共和国行业标准：公路桥梁承载能力检测评定规程（JTG/T J21-2011）中，明确将自振频率作为桥梁承载力评定的指标之一。

此外，连续监测分析有助于提高对桥梁自振频率的识别精度。由于桥梁上有汽车等载重荷载，其对测试得到的自振频率也有一定的影响。根据山西省交科院韩之江等人的研究成果，当采样时间达到一定长度后，通过分级平均的方法即可较好地消除外荷载的影响。

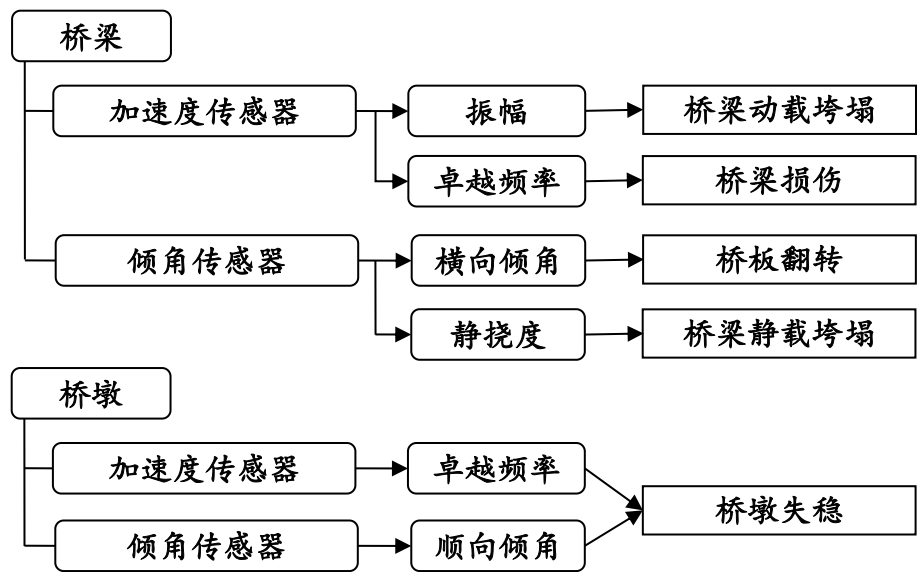


图 4-2-1 以动力响应为主、静力响应为辅的监测体系

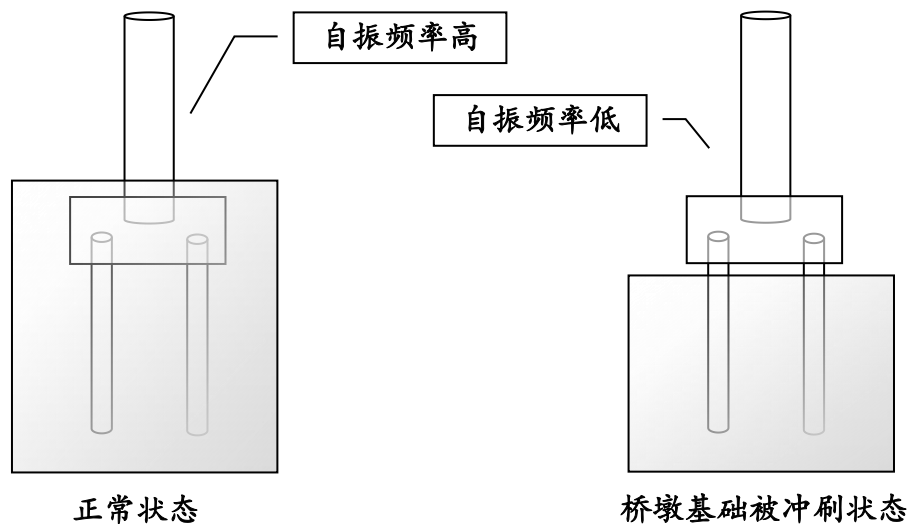


图 4-2-2 桥墩的状态及其自振模态的变化

- 1) 对损伤更为敏感：当桥梁在遇到超载、钢绞线断裂、外部撞击、地震等偶然事件时，动态参数的反映显然更为敏感。为此，我们开发了基于 HHT 和 Wavelet 的异常信号识别技术，可以灵敏地对

当然，如桥梁上拥堵，大量重载车辆堵塞在桥梁上时，动态参数无法反映，就需要结合静态参数来监测。

5.2.4 自补偿测试体系

桥梁的监测系统需要应用数十年，在应用期间，设备（如传感器、电缆、智能节点

等)难免出现故障,同时标定的各类参数也会随着桥梁的老化、环境条件的变化而改变。为此,要求本技术体系需要具备以下两个基本要求:

1) 可更换性

对于出现问题的部分,可以方便地加以更换,同时,更换后的设备测试的数据与原有数据之间具有连续性。而这恰恰是本技术方案的优点之一:所用的加速度、倾角传感器均可以方便地进行安装,相比埋入式的传感器要简便、快捷得多。

2) 具有自补偿/校准机能

在本系统中,超载监测系统、动、静挠度测试系统中,均有多项参数需要标定。在系统安装时,虽然均进行了参数标定,但随着时间的推移,这些参数均可能发生一定程度的变化,严重时会造成测试结果的不稳定(如漂移),从而影响监测系统的可靠性和信赖性。为此,系统具有自补偿或校准是十分有意义的。

为此,本系统中包含的基于弹性模量的快速检测设备可以精确地测试出构件的刚性变化,可以为监测系统提供有效的校准手段。

5.2.5 分级数据处理体系

为了适应大范围、广域桥梁监测的需要,在保证实时监测的同时,降低运营成本,我们开发了分级数据处理体系。即在桥梁端由智能节点分析(1次分析),在服务器端进行2次分析和检索。

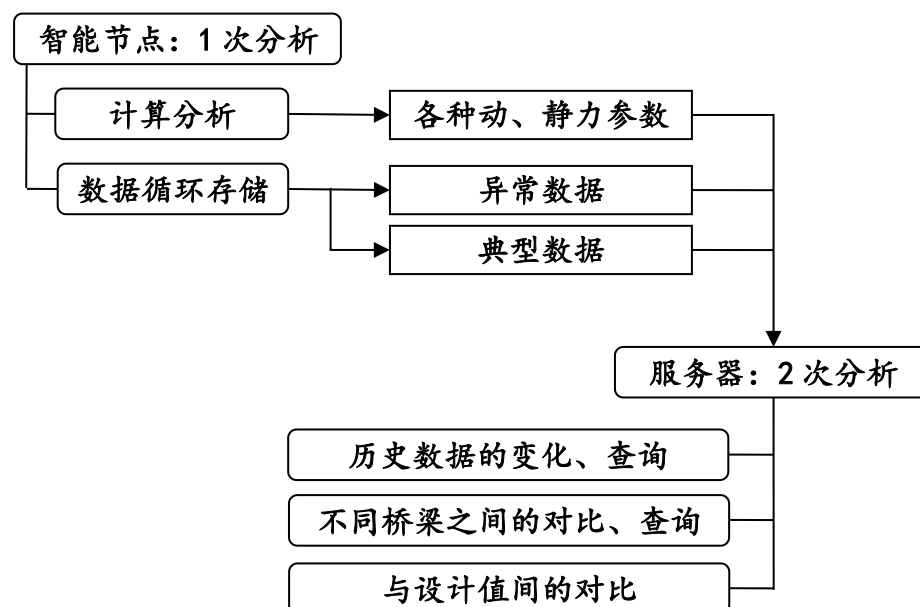


图 4-2-5 分级处理体系

其优点在于;

- (1) 由于只传送极少部分的原始数据，传送数据量大幅减小。这点对于减少通信量，降低运营成本（特别是无线传输时）非常有用；
- (2) 不因数据量的减少而降低监测水平：由于在智能节点上已对数据进行处理，并且对计算参数、典型及异常数据实时上传或下载，不会遗漏所需的监测参数。

5.2.6 多重、多方位的桥梁安全性评价系统

本监测系统的主要目的之一即为对预应力混凝土桥梁的安全性进行评价。为了更加可靠、有效地进行评价，本技术体系中包含了多重、多方位的安全性评价体系：

1) 基于设计值的评价体系

当桥梁设计资料较为完善时，可以采取以下评价体系：

- (1) 设计最大动挠度：以设计最大动挠度为阈值，将实测最大动挠度与比较；
- (2) 设计结构刚性：在荷载既知（如已通过引桥上的超载监测系统测出荷载）的前提下，通过动荷载/动挠度间的比值，并结合冲击系数，从而推算结构的刚性并与设计值对比；
- (3) 荷载引起的静挠度变化量：在安装倾角传感器时，桥梁的自重荷载产生的静挠度已经完成。此时，监测的挠度主要包括两部分，即荷载产生荷载和由于蠕变、预应力损失而产生的后续挠度。

2) 基于振动响应的结构损伤评价体系

在监测过程中，由于预应力钢绞线断裂、超载或桥头跳车产生的过载、碰撞、地震等偶遇荷载会对桥梁产生损伤。及时识别损伤的有无、类型并且合理地评价损伤的状况具有极大的现实意义。

3) 基于监测历史数据的状态评价体系

在监测过程中，各参数的变化累积量、变化率可以反映桥梁状况的变化。

4) 基于同型桥梁之间的相对评价体系

按照前述的桥型、跨径等对预应力混凝土桥梁进行分类后，在每一类中的桥梁应当具有相似的响应。因此，根据监测的数据，可将每座桥在同型桥梁中进行排序比较。对于排序靠后的桥梁，其安全性则显然更差。

5.2.7 系统的拓展性、安全性和兼容性

由于本体系采用开放式结构体系，其中的智能节点（RTU）具有较强的处理机能和

大量的外接端口，可以比较方便地与其他系统，如视频、电子地称、警报器等进行兼容。同时，也很容易增加监测点和监测桥梁，而无需对系统进行大的改动。

此外，桥梁直接关系到公共基础，在很多地方还有战备要求。因此，广域桥梁安全监测系统的安全性就需要得到充分的保障。为此，我们除了在数据传输的过程中采用加密方式以外，整个系统采用 BS 构架和 Unix 操作系统，将 Linux 和 JAVA 等开源语言作为编程语言，避免了通常的 Window 操作系统存在的后门等安全隐患。

5.3 与人工检测工作的结合

远程监测和人工检测（专项检测及人工巡检）各有所长，都是保证桥梁安全的重要组成部分。如能将两部分有机地结合起来，不仅有利于保障桥梁安全，而且有助于桥梁维护、加固方案的最优化，从而使得社会效益和经济效益的最大化。

5.3.1 监测体系与人工检测的分工与协作

本监测平台（SPB-HOMS）与人工检测（包括人工巡检和专项检测）的项目比较如下表所示。可以看出，他们之间有很好的互补关系。

表 5- 3-1 监测与人工检测的比较

测试方法	优点	缺点
远程监测	1、实时监测 2、可以反映结构的整体性能	1、难以反映结构的局部损伤
人工巡检	1、可以反映结构的局部损伤	1、对内部损伤难以反映
专项检测	1、检测内容全面 2、精度高	1、费用高、检测周期长

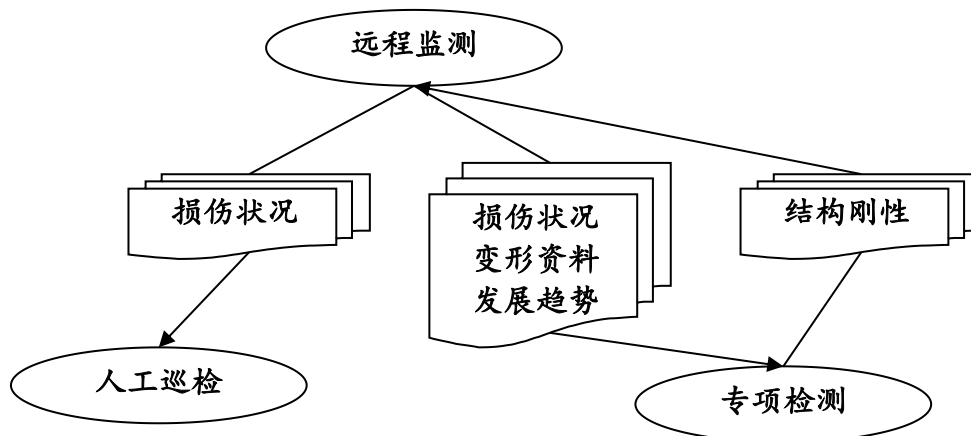


图 5-3-1 监测、检测的结合

5.3.2 我公司开发的预应力混凝土桥梁无损检测设备

我公司致力于为预应力混凝土桥梁提供全面的监测、检测技术方案，并且开发了一系列基于冲击弹性波的无损检测设备，有：

- 1) 预应力混凝土梁多功能检测仪（SPC-MATS）
- 2) 混凝土多功能检测仪（SCE-MATS）
- 3) 锚索（杆）灌浆密实度检测仪（SBA-HTF）
- 4) 混凝土裂缝深度测试仪（SCE-CDT）
- 5) 预应力锚索（杆）张力检测仪（SBA-PTT）

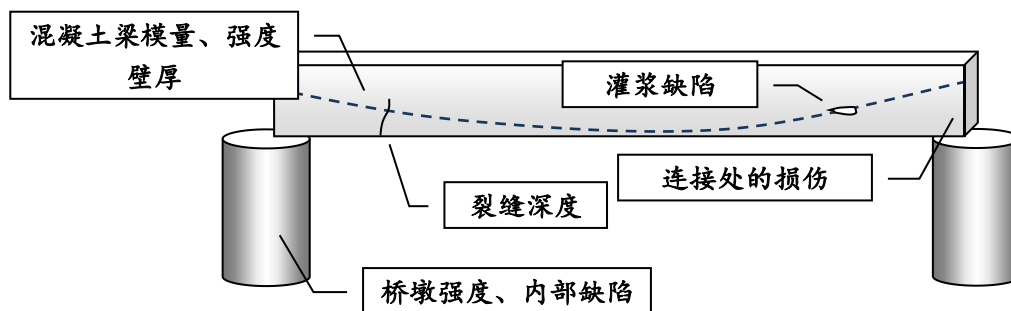


图 4-3-3 针对预应力混凝土桥梁的检测内容



图 5-3-2 本公司开发的锚索（杆）灌浆密实度检测仪（SBA-HTF）



图 5-3-3 本公司开发的混凝土多功能检测仪（SCE-MATS）B 型

5.3.3 检测数据库管理机能

为了更有效地对检测信息加以管理，也对检测工作加以监督，我们开发了升拓检测数据库系统 CI-DBS (Central Inspection Data Base System)。该系统具有如下机能：

1) GPS 机能

系统装备有 GPS 模块，可以实时记录测试地点的位置信息，并能够在 Google Earth 中得到再现和浏览。

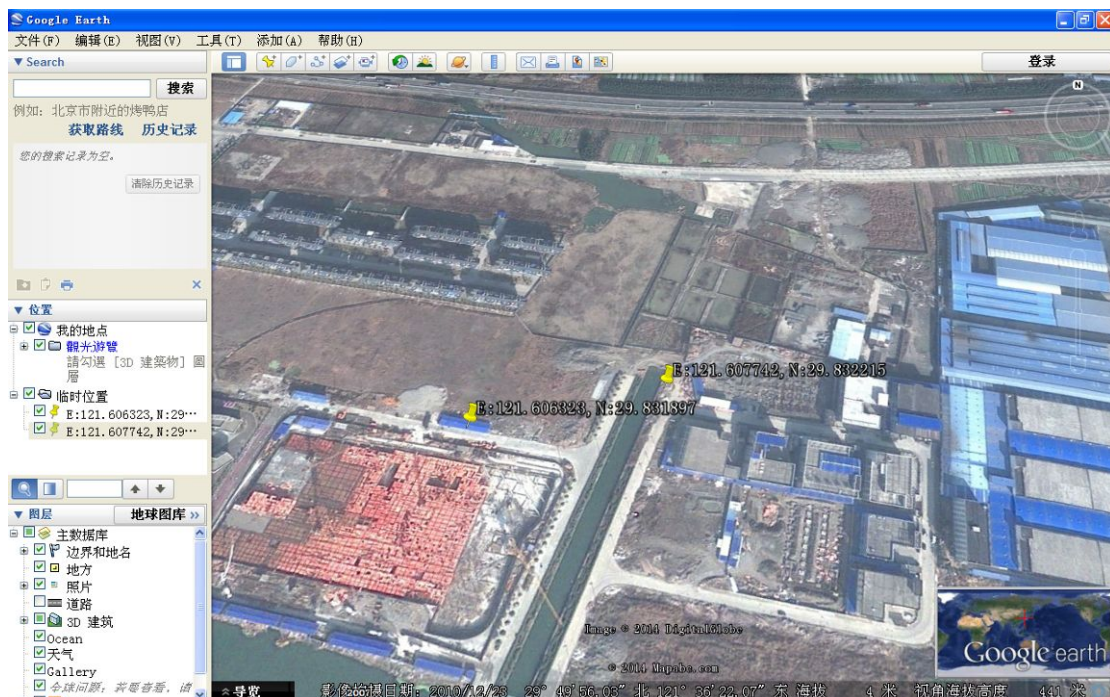


图 5-3- 4 测试位置及周围情形

2) 远程无线传送

系统装备有无线数据传输模块，可将现场的地理位置信息、测试数据、工程信息等

一道传送至管理数据库中。而采集数据的工作人员也无需手动发送邮件，在对数据进行解析后点击保存按钮时系统会自动发送邮件。

整个过程中，工作人员只需进行数据采集，然后终端人员只需点击更新数据库按钮，即可完成上述工作，整个过程简单，方便、可靠。

3) 数据库机能

利用该机能，不仅可以记录不同时期、不同地点的检测信息（包括位置信息、工程信息、原始测试数据、报告等），而且可以更方便地加以储存、检索，有助于职能部门对检测工作的监督和管理。

数据库网站网址：www.scitdbc.com



工程名称	标段	构件名称	检测内容	检测日期	检测人员	施工单位	监理单位	检测单位	检测位置	
广元绕城高速灌浆检测	1标	11-1	灌浆密实度（纵向定位）	2014-10-28	罗拔明	\	\	四川省交通勘察设计研究院道桥所	空管-n5	↓
广元绕城高速灌浆检测	1标	11-1	灌浆密实度（纵向定位）	2014-10-28	罗拔明	\	\	四川省交通勘察设计研究院道桥所	空管-n4	↓
广元绕城高速灌浆检测	1标	11-1	灌浆密实度（纵向定位）	2014-10-28	罗拔明	\	\	四川省交通勘察设计研究院道桥所	空管-n3	↓
广元绕城高速灌浆检测	1标	11-1	灌浆密实度（纵向定位）	2014-10-28	罗拔明	\	\	四川省交通勘察设计研究院道桥所	空管-n2	↓
广元绕城高速灌浆检测	1标	11-1	灌浆密实度（纵向定位）	2014-10-28	罗拔明	\	\	四川省交通勘察设计研究院道桥所	空管-n1	↓
广元绕城高速灌浆检测	1标	11-1	灌浆密实度（纵向定位）	2014-10-28	罗拔明	\	\	四川省交通勘察设计研究院道桥所	bd-n3	↓
广元绕城高速灌浆检测	1标	11-1	灌浆密实度（纵向定位）	2014-10-28	罗拔明	\	\	四川省交通勘察设计研究院道桥所	bd-n2	↓

接收时间:
2014-10-28
文件名:
kg-n3
定位信息:
无定位信息
仪器编号:
孔道灌浆密实度质量
检测仪器
备注信息:
无

图 5-3- 5 数据库

此外，本公司开发的可支持本公司开发的各类检测设备，并可与桥梁健康远程监测系统相连接。



图 5-3- 6 数据库管理系统概念

5.3 本系统的社会意义与经济意义

5.3.2 社会意义

桥梁为极其重要的社会、经济基础。对广域桥梁进行超载/健康监测无疑具有很高的社会意义，具体体现在：

- 1) 预警机能：通过及时地在桥梁发生危险之前提供预警，从而能够避免桥梁垮塌这样的恶性事故，保护人民群众的生命安全；
- 2) 减灾机能：当地震、洪水等自然灾害来临之际，可以快速地对桥梁的整体安全性作出评价，为通车等提供基础依据，从而保障救灾的顺利进行；
- 3) 战备机能：战备时往往需要通行重载车队（如运载坦克的车辆编队通行），此时，桥梁的荷载往往接近乃至超过设计承载力，因此，实时监控桥梁的安全无疑具有非常重要的意义。

5.3.3 经济意义

尽管系统构筑、运营等需要一定的费用，然而，其经济意义也十分明显：

- 1) 为最优化加固提供基础数据。通过在最适合的时期进行桥梁加固，可以使得其综合成本最低，即 LCC (Life Cost Cycle) 最小化概念。

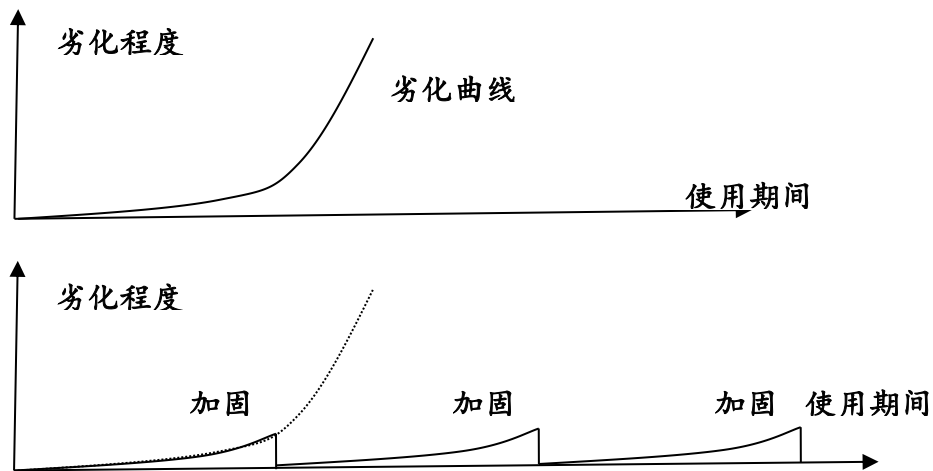


图 4-3-3 最适加固曲线

- 2) 避免桥梁垮塌造成的直接、间接经济损失
- 3) 系统中大量运用物联网及微电子技术，对提升产业结构、促进数字化城市的发展有积极的意义。

特别需要指出的是，在独创技术体系的基础上，由于本公司掌握从传感器选型→系统集成→检测设备的较为完整的产业链，并形成模块化的系统集成方式，使得本远程监测平台（SBH-HOMS）具有很高的性价比。

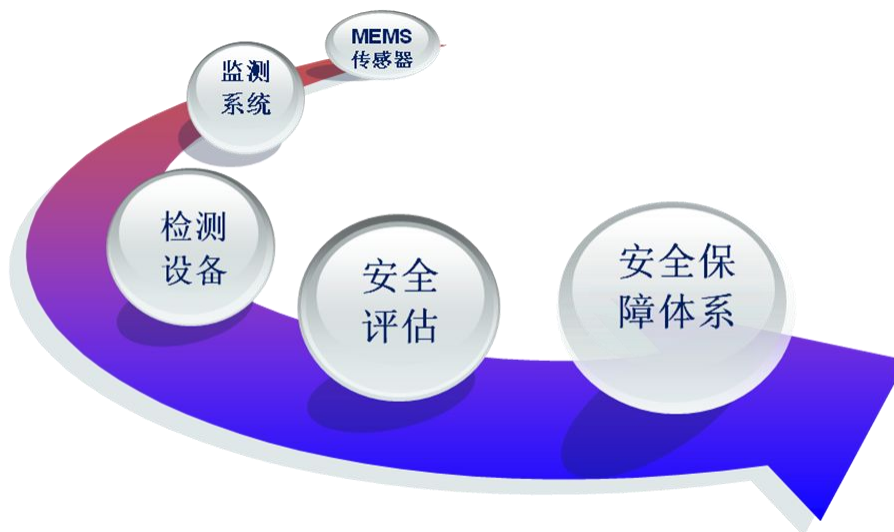


图 4-4-1 完整的技术体系

5.4 系统的适用范围

本远程监测平台（SBH-HOMS）适合于预应力混凝土桥梁，如：

- 1) 市政桥梁：如城市立交桥等；
- 2) 交通桥梁：高速公路、高等级公路桥梁；
- 3) 铁路桥梁

第 6 章 模型试验及示范工程

我们利用远程监测平台（SBH-HOMS），不仅进行了模型试验，而且还在多地构筑了示范工程。

6.1 模型试验

6.1.1 木质桥梁模型



图 5-1-1 木质桥梁模型

6.1.2 PVC 桥梁模型



图 5-1-2 PVC 制预应力桥梁模型（内含 U 型预应力孔道）

6.2 现场示范工程（山西东柳林桥）

为山西省公路局构筑了桥梁监测示范系统。



图 5-2-1 信息管理系统首页

6.2.2 国道 208 线东柳林桥工程概述

东柳林桥位于山西省太原市 208 国道太原小店区段，桥位于小店区东柳林村附近，为混凝土空心板梁桥。跨越地物类型是水渠，竣工日期 1997 年 10 月。主要技术标准为：

- 1) 交通量：13538，桥面宽度：净—12.5m（行车道）+0.5m（防撞护栏）。
- 2) 桥梁全长：39m 桥高：5.3m，主桥上部结构：空心板梁
- 3) 桥墩类型：多柱桩，桥墩基础类型：转孔灌注桩
- 4) 桥面铺装类型：沥青橡胶支座，伸缩缝类型：毛勒缝
- 5) 设计荷载：汽车-20 级/挂-100，设计洪水频率：1/100



图 5-2-2 桥梁位置

6.2.3 国道 208 线东柳林桥健康监测系统集成

1) MEMS 加速度传感器

国道 208 线东柳林桥系统主要对结构振动响应信号进行监测。采用的是美国 measurement MEMS 加速度传感器动态采集桥梁加速度信号。此类 MEMS 加速度传感器具有体积小、可靠性高、低能耗、使用寿命长等特点。该传感器的参数列表如下：

表 5-2-1 MEMS 加速度传感器参数

位置	传感器编号	零点电压	灵敏度	最小分辨率	频率响应范围
1	201-02-641	2.54v	1000mv/g	2mg	20~300hz
2	201-05-640	2.52v	398.2mv/g	5mg	20~300hz
3	201-02-644	2.55v	991.6mv/g	2mg	20~300hz
4	201-05-650	2.54v	401.7mv/g	5mg	20~300hz
5	201-05-649	2.52v	393.2mv/g	5mg	20~300hz
6	201-05-651	2.54v	400mv/g	5mg	20~300hz

2) 采集卡

采样频率可达到 8kbps、输入电压 0~5v、最小分辨力 2mv。采集卡上拨码开关可以设置采集卡卡号，能够对传感器进行锁定。上位机通过设定的命令可以实时访问任意一个传感器。

3) 总线

采用具有较高噪声抑制、相对高传输速率、半双工异步通讯方式的 RS485 总线，简化通讯线路结构。

4) 智能节点

智能前端节点内置了高稳定性的 linux 系统、sql 数据库。完成现场数据的实时处理，可以降低服务器的负担，减少无用数据的传输。

6.2.4 桥梁结构危险性分析及监测断面选择

本系统主要关注的是桥梁在已经过去 10 多年使用后的状态以及在以后使用中的状态变化，判断结构是否有损伤，是否偏离了健康状态以及损伤程度如何。同时，还能动态监测出从系统运行后通过桥梁的超载重车情况。

根据桥梁结构参数建立系统结构模型，通过计算得到监测位置如表 1 所示：



图 5-2-3A 监测位置（照片）

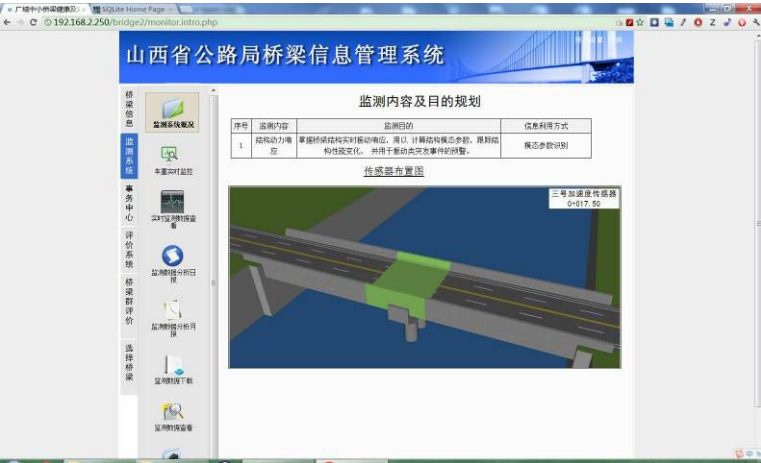


图 5-2-3 监测位置（3 维图片）

表 5-2-2 测试指标不利位置点

监测位置	桥梁结构位置	到 X=0 点距离
监测位置 1	空心板梁上	X=1.5m
监测位置 2	空心板梁上	X=10.5m
监测位置 3	空心板梁上	X=19.5m
监测位置 4	框架式桥台中部	X=19.5m
监测位置 5	空心板梁上	X=28.5m
监测位置 6	空心板梁上	X=37.5m

注：以太原方向桥头作为 X=0 点依次为监测位置 1、2、3、4、5、6，所有距离都是相对 0 点距离，X=19.5m 是桥跨中距离。

通过对监测位置的监测可以完全反映出桥梁的整体健康状况，达到采用最少的传感器完成桥梁健康监测的任务。

6.2.5 国道 208 线东柳林桥健康监测内容

该健康监测系统见框图监测内容包括两个方面：桥梁结构健康评估和桥梁动态超载系统。主要测试桥梁结构的振动信号，一方面，通过计算结构模态参数，跟踪结构性能变化，计算出固有频率和模态振型，根据固有频率和模态振型的变化，分析桥梁的健康状况；另一方面，通过对振动加速度信号，进行二次积分算出桥梁动扰度，并通过修正速度等参数，判定是否超载。东柳林桥健康监测系统的结构框图见下。

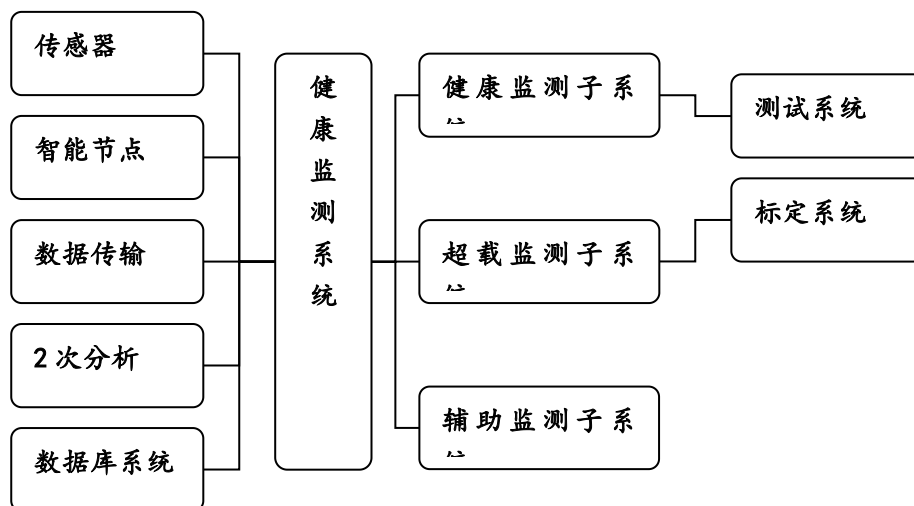


图 5-2-2 东柳林桥系统结构图

6.2.6 东柳林桥健康监测子系统

结构的振动频率可以看成是刚度和质量的函数。当结构中存在损伤时，往往是结构的刚度降低，而忽略由于损伤引起的质量减少，这样就导致了结构振动频率的降低，此即利用频率变化进行结构损伤识别的原理见图。

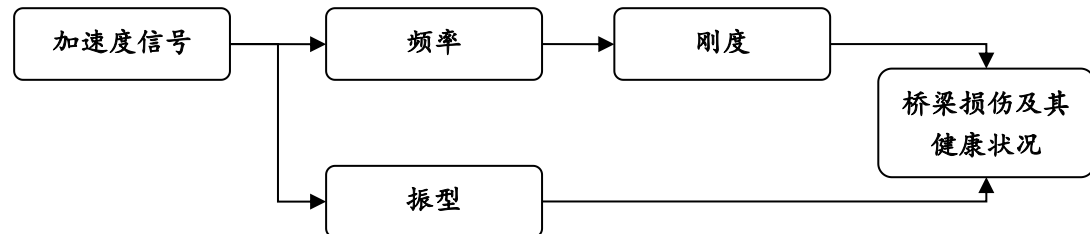


图 5-2-3 加速度判定桥梁健康状况框图

6.2.7 东柳林桥超载监测子系统

桥梁超载监测系统主要是通过判断桥梁动扰度，同时根据现场测试数据统计分析，从而判断是否有超载车辆通行。

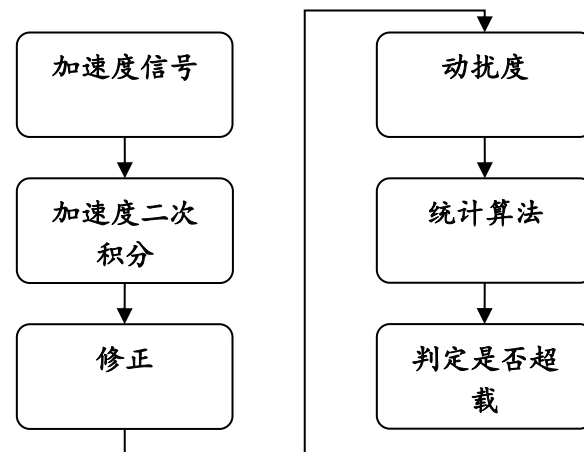


图 5-2-4 加速度判定超载系统框图

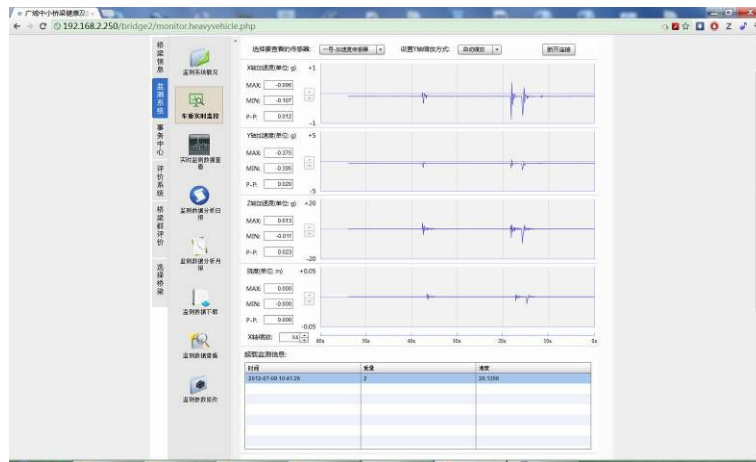


图 5-2-5 监测画面（超载）

6.2.8 东柳林桥动挠度、振型监测及评估子系统

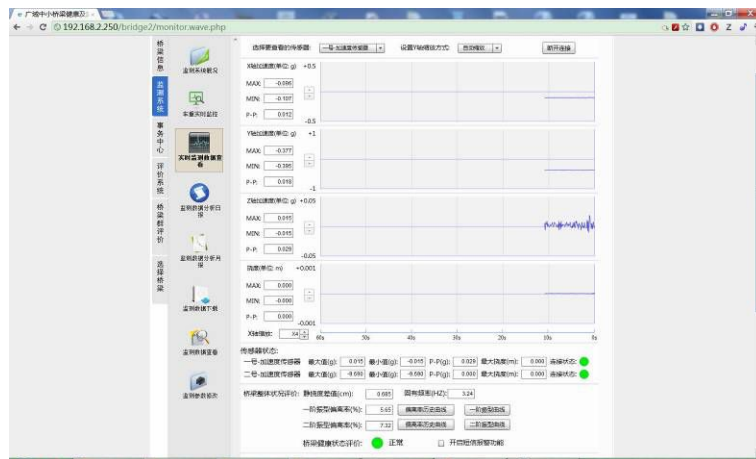


图 5-2-6 监测画面（振动数据）

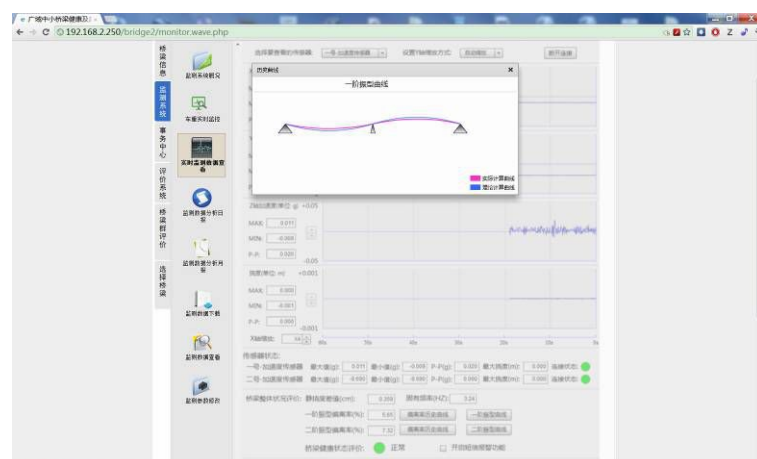


图 5-2-7 监测画面（振型数据）

预应力混凝土桥梁快速检测及健康监测 技术方案

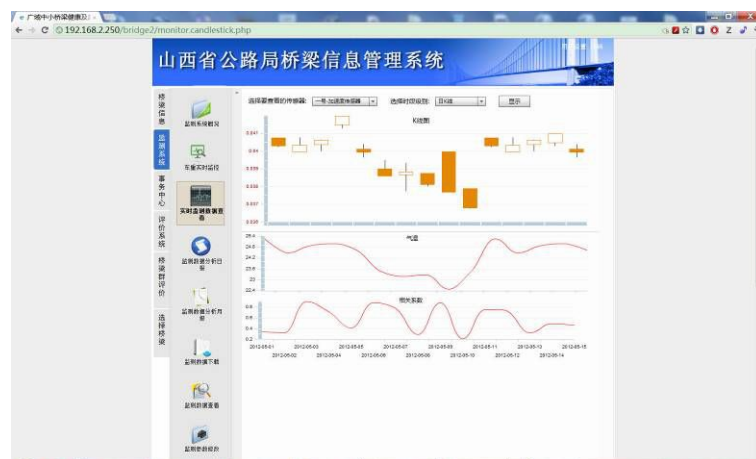


图 5-2-8 监测画面（历史数据）



图 5-2-9 评价画面

结语

我们潜心多年开发的广域预应力混凝土桥梁健康及超载远程监测平台（SPB-HOMS）具有结构体系简单、成本低、可靠性好、实用性强的特点，对保证预应力混凝土桥梁结构安全具有非常积极的意义。

在该平台中，包含了大量的独创性技术，如基于弹性模量的预应力桥梁承载力推算方法、钢筋修正方法等。这些方法均已申请了国家发明专利，保证了本平台技术的先进性。

在此，我们衷心期望这些技术、方法和设备能够为我国的桥梁安全贡献自己的力量，同时也期待着在实际应用中不断地完善和成熟。

最后，衷心向各位合作伙伴：

上海建筑科学研究院	贵州省交通质量监督站
杭州市交通质量监督局	山西省交通科学研究院
山西省公路局	甘肃省交通科学研究院
	四川省交通职业技术学院

以及关心、支持我们的各位朋友表示诚挚的谢意！

参考文献

- [1] 中华人民共和国行业标准:公路桥梁承载能力检测评定规程 (JTG/T J21-2011) [S]. 中华人民共和国交通部, 2011.
- [2] 交通部工程管理局:公路桥梁养护管理工作制度, 1991.
- [3] 中华人民共和国行业标准:公路桥涵养护规范 (JTG H11-2004) [S]. 中华人民共和国交通部, 2004.
- [4] Xiaobin Lu etc. Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method[J], Construction and Building Materials 47 (2013) 231 - 239.

版本修订说明

V1.00: 在原有的技术方案上整合而来;

V1.01: 修订了垮桥案例、弹性模量的测试概念,并对桥梁检测评定方法进行了修正;

V1.02: 增加了桥墩检测的内容;

V1.03: 增加了承载力试验验证内容;

V1.05: 增加了桥梁垮塌案例和弹性模量现场验证案例;

V1.06: 增加了混凝土弹性模量试验验证案例、桥梁健康评价方式;

增加了术语、略语和符号说明;

V1.07: 增加了数据库的相关说明,更新了一些图片;

V1.08: 增加了桥梁侧壁检测数据(3.5.3);

V1.09: 增加了桥梁弹性模量~荷载关系测试(3.5.4)