

BOTDR 应变监测技术应用在大型基础工程健康诊断中的可行性研究*

施 斌 徐洪钟 张 丹 丁 勇 崔何亮 陈 斌 高俊启

(南京大学地球科学系地球环境计算工程研究所 南京 210093)

摘要 基础工程如地下隧道、高架桥、跨江大桥、江河堤防等构筑物具有规模大、工程环境差异性大、实时动态监控和监测精度要求高等特点,因此常规的一些点式监测手段已不能满足大型基础工程健康诊断的监测要求。布里渊散射光时域反射测量技术(BOTDR)是一项新型光电监测技术,它利用布里渊散射光的光谱技术和光时域测量技术,可对沿光纤的轴向应变进行分布式监测。由于 BOTDR 这一独特功能,它已开始被应用于一些基础工程如隧道、堤防和滑坡工程等的监测。根据作者的实验研究和实际工程的应用,对这一技术应用于大型基础工程健康诊断中的可行性进行了系统分析;并运用已有的研究成果,详细阐述这一技术在实际应用中的相关课题,包括光纤铺设方法、光纤保护、距离分解度、温度和湿度影响、光纤疲劳效应、变形计算和智能监控系统等。研究成果表明, BOTDR 技术十分适用于大型基础工程的健康诊断。

关键词 岩土工程, 工程健康诊断, BOTDR, 大型基础工程, 分布式监控

分类号 TU 433

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)03-0493-07

FEASIBILITY STUDY ON APPLICATION OF BOTDR TO HEALTH MONITORING FOR LARGE INFRASTRUCTURE ENGINEERING

Shi Bin, Xu Hongzhong, Zhang Dan, Ding Yong, Cui Heliang, Chen Bin, Gao Junqi

(ACEI, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093 China)

Abstract The characters of large infrastructure engineering and its requirements for the health monitoring are large scale, such as tens or hundreds of kilometers of tunnels and dikes, big diversity of engineering environment, such as oil pipes sometimes transiting the various geographic areas and time domain with quite complex engineering environment, high requirements of real-time and long-distance monitoring for some engineerings, such as dike monitoring during the flood, and high accuracy of monitoring, such as large-span gymnasium buildings and underground facilities requiring the order of micron or millimeter measuring accuracy. Hence the conventional measurement and monitoring methods and techniques are more and more not to meet the monitoring demands of health monitoring for large infrastructure engineering.

The Brillouin optical time domain reflectometer (BOTDR) is a newly developed innovative measuring technique, which utilizes Brillouin spectroscopy and optical time domain reflectometry to measure strain generated in optical fibers as distributed in the longitudinal direction. Because of the BOTDR's distinctive characters, it has been paid more and more attention to and begun to be applied to monitoring system of various infrastructure engineerings, such as tunnels, river embankments and landslide prediction. In this paper, the operation principle and merits of BOTDR are introduced. Its application feasibility to the health monitoring for

2003 年 4 月 10 日收到初稿, 2003 年 6 月 10 日收到修改稿。

* 国家杰出青年科学基金(40225006)和国家教育部重点项目资助项目(01086)。

作者 施 斌 简介: 男, 1961 年生, 现任教授, 长期从事工程地质和环境岩土工程的研究。E-mail: shibin@nju.edu.cn。

large infrastructure engineering are analysed based on authors' research achievements and application cases. The relative topics about application of BOTDR are discussed in detail, which include installation methods of optic fiber, distance resolution impact for measuring results, temperature and humidity impact, fatigue effect of optic fiber, deformation conversion from strain and establishment of intelligent monitoring system. The research results show that the BOTDR is quite applicable to the health monitoring for large infrastructure engineering.

Key words geo-engineering, engineering health monitoring, BOTDR, infrastructure engineering, distributed monitoring

1 引言

布里渊散射光时域反射测量技术(简称 BOTDR)是目前国际上近几年才发展成熟的一项尖端技术。与常规的监测技术原理不同,它具有分布式、长距离、实时性、精度高和耐久性长等特点,能做到对大型基础设施的每一个部位像人的神经系统一样进行感知和远程监测和监控,因而这一技术已成为一些发达国家如日本、加拿大、瑞士、法国和美国等国家竞相研发的课题。相关的课题除了研发将这一技术应用于通讯光纤的应变监测外,还在各类大型基础设施应变检测和监控上,开展了一系列的研究工作,取得了许多技术发明和重要进展,并在许多重大基础工程的应变监测和健康诊断中得到成功应用^[1~8],可以说,这一技术的应用和研发,将对现有的传统监测技术产生重要影响,对我国各类重大基础工程建设,如长江大桥、地下铁路和隧道、高速公路、西气东输管道、地下停车场、长江堤防等安全监测和健康诊断具有重大的现实意义。

南京大学地球环境计算工程研究所在南京大学 985 工程项目的支持下,建成了我国第一个针对大型基础工程的 BOTDR 分布式光纤应变监测实验室,引进了相关的 BOTDR 监测仪器和设备,并在国家教育部重点项目和国家杰出青年科学基金的资助下,开展了一系列的实验研究,成功地将这一技术应用到了地下隧道的实际监测中,取得了一批重要成果,为将这一技术全面应用于我国各类大型基础工程的质量监测和健康诊断提供了坚实基础。本文主要对这一技术的基本原理、研究要点、应用可行性和相关课题分别进行了介绍。

2 BOTDR 监测的基本原理

BOTDR 是布里渊散射光时域反射测量计(Brillouin optic time-domain reflectometer)的缩写,其基本原理是利用光纤中的自然布里渊散射光的频移

变化量与光纤所受的轴向应变之间的线性关系,得到光纤的轴向应变(见图 1)^[9~12]。

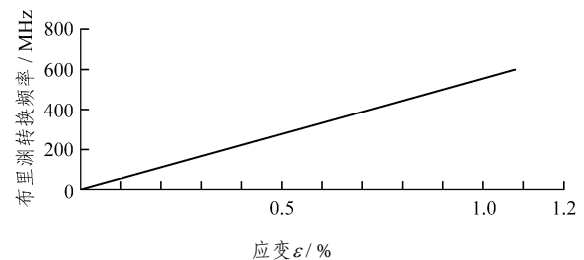


图 1 布里渊散射光频率漂移与应变量的关系

Fig.1 Relationship between strain and Brillouin frequency shift

光纤的轴向应变与布里渊散射光频率的漂移量可用下式表示:

$$v_B(\varepsilon) = v_B(0) + \frac{dv_B(\varepsilon)}{d\varepsilon} \varepsilon \quad (1)$$

式中: $v_B(\varepsilon)$ 为光纤发生应变时布里渊散射光频率的漂移量; $v_B(0)$ 为光纤无应变时布里渊散射光频率的漂移量; $dv_B(\varepsilon)/d\varepsilon$ 为比例系数,约为 0.5 GHz/%; ε 为光纤的轴向应变。

布里渊散射光与其他散射光相比的另一个突出优点是它的频移变化量与温度相关性比应变的相关性要小得多(0.002%/°C),因此,当测量与应变相关的布里渊频移时,如果温差小于 5 °C 时,常忽略温度对布里渊频移的影响。

BOTDR 正是利用布里渊散射光的这一性质来监测光纤应变的。由于光纤中的布里渊散射光要比瑞利散射光弱两个数量级,长期以来一直无法用常规的技术检测到它,这也成了许多研究者所面对的难题。国际上一些研究机构如日本 NTT 光纤研究所、加拿大 ISIS 研究所、瑞士 SMARTTECH 研究所等经过多年的研发,运用了 OTDR 技术和布里渊分光技术,使得探测高灵敏光纤中的布里渊散射光成为可能,并应用光频转换技术和 Coherent 检波技术成功地研制了 BOTDR 光纤应变分析仪。应用 BOTDR 分析仪,不断增加入射光的频率,就能获

得光纤最大的布里渊光强度值，通过对光纤在发生应变前后处的布里渊散射光最大强度值所对应的频率漂移量，就能换算出光纤的应变值。BOTDR 应变检测三维示意图见图 2。

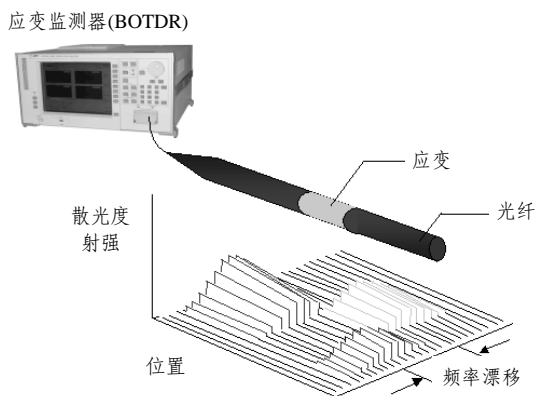


图 2 BOTDR 应变检测三维示意图

Fig.2 3D strain measurement based on BOTDR

从以上原理可以看出，应用 BOTDR 技术对构筑物的变形监测是属于分布式、连续监测，光纤既是传导介质，又是传感介质，将其植入构筑物好象植入了“神经系统”，使构筑物“活”起来了，变得有“知觉”了。

目前，应用这一技术可以监测最长 80 km 光纤沿线的应变，应变测量范围为 $(-1.5\sim+1.5)\%$ ，距离分辨率可达 1 m，应变的测量精度达 $\pm 0.003\%$ ，完全能满足一般大型基础工程的监测要求。

3 BOTDR 技术的应用

大型基础工程如地下隧道、高架桥、跨江大桥、江河堤防和水利枢纽等构筑物，在各种荷载和外部环境作用下，会发生不同程度的变形，其表现形式与一般的构筑物一样有以下两种：一种是大范围或整体的均匀和不均匀变形如一些构筑物的沉降变形，这种变形在开始阶段一般用肉眼不易观察到；二是以各种裂隙为主的局部变形，裂隙的宽度从小于几微米到数厘米，且分布不均匀，应变量常常只有 $10^{-5}\sim 10^{-7}$ 数量级，主要集中在结构物的应力集中区。对于以上不同的变形特点，在工程上需要采取相应的方法和手段进行监测。此外，对于大型基础工程的变形监测，还有以下一些特点：

(1) 规模大。一些工程属于线状工程，如隧道、堤防等，长达几公里到数十、数百乃至上千公里，

而目前国内常用的一些监测仪器，多为点状分布的，如电阻式和振弦式应变计等。这种点式测量方法，布点常带有随意性，最危险的地方有可能被漏检；增加监测点数，虽然提高了结果的可靠性，但工作量大为增加，同时无法满足长距离工程的监测要求，因而十分需要一种分布式的监测方法。

(2) 工程环境差异性大。大型的基础工程往往穿越许多不同的环境时空域，如输油输气管道、地下隧道、高速公路等，工程条件常常比较复杂，有时环境十分恶劣，一般的监测人员无法经常到现场进行监测，传统的应变片等检测技术常因应变片受潮生锈而失效，因此十分需要一种对环境因素影响小、耐久性好的远程监测技术。

(3) 实时动态性监控要求高。大型的基础工程往往需要实时动态监测，如洪水期间的堤防和大桥安危等，这一点传统的监测技术更是无法满足其要求。

(4) 监测精度要求高。随着我国各类重要的基础工程的不断兴建，建设质量要求尤其变形精度要求越来越高，如一些重要的体育场馆、地下工程和重要的水利枢纽，要求的变形精度有时达到微米级，因此这对分布式监测技术是一个挑战。

针对以上大型基础工程变形监测的特点，显然，传统的监测技术和方法已不能完全满足其监测要求，需要不断研发出新的监测技术和方法与之适应。BOTDR 正是这样的技术，它的分布式、长距离、远程实时监控以及光纤耐久性好的特点正好弥补了传统监测技术的不足，因此，研究和开发 BOTDR 技术对大型基础工程变形监测的应用技术具有重要意义。

我们目前采用的 BOTDR 监测设备是由日本 NTT 公司最新研制开发的新一代 BOTDR 光纤应变/损失分析仪。对于如隧道这样的大型基础工程的监测，所用的光纤是十分普通的通讯光纤，而对于大坝和堤防等，则采用特制的光缆。在实施 BOTDR 监测时，首先要根据工程的实际情况，进行光纤的铺设方案设计，然后根据相应的光纤铺设工艺，将光纤固定在构筑物上，确保光纤与构筑物的同步变形；对于在建的工程，也可将光纤埋设在构筑物中；然后将光纤引入到附近的监测站或管理室，用光纤应变/损失分析仪对构筑物进行远程分布式实时监测和监控，获得光纤沿线构筑物在某一时间的应变值。图 3 为 BOTDR 分布式光纤应变监测系统流程示意图。

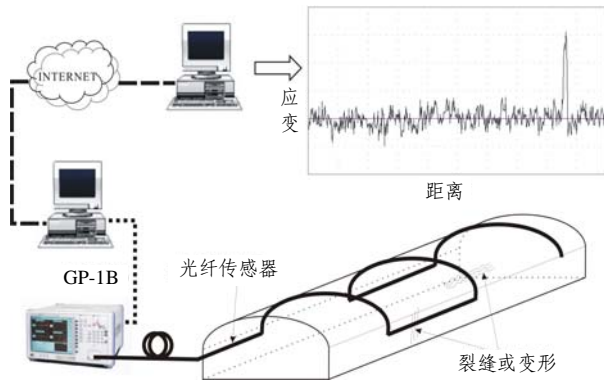


图3 BOTDR 分布式光纤应变监测系统流程示意图
Fig.3 Distributed strain monitoring system using BOTDR

4 相关技术课题

目前课题组已将该项技术成功地应用到南京市的隧道工程健康诊断和监控中,取得了明显的成效,相关的应用成果将另有专文发表,这里仅就这一技术在应用过程中的相关课题作一分析和介绍。

4.1 光纤铺设方法

为了使光纤准确反映被测构筑物的应变状态,必须使光纤与构筑物同步变形。为了确保这一点,光纤铺设的方法目前主要有两种:一种是用专用或特制的粘结剂将光纤粘贴在被测构筑物上,这种方法主要用于已建构筑物的监测;另一种是将光纤植入构筑物中如钢筋混凝土中,这种方法主要用于在建构筑物及其竣工后的安全质量监测。不论何种方法,在光纤的铺设过程中,一定要文明施工,对施工队伍要进行专门的技术培训,协调好与其他工程施工单位的工作,加强光纤铺设后的管理,以确保光纤不被损坏,尤其要减少植入构筑物中光纤的断点,因为在这种情况下,光纤断点不易修复,从而影响整个监测系统。从已测工程的监测结果看,只要光纤严格按照要求进行铺设,可确保光纤与构筑物同步变形。

光纤铺设的另外一个方面是采用何种方式进行铺设。根据构筑物整体和局部变形等特点以及监测仪器的距离分解度,可采用不同的铺设方式,这里介绍2种:

(1) 全面接着铺设:是将光纤拉直后,用粘结剂将光纤完全贴附在结构物上。拉直的光纤,由于它与结构物紧密相联,因此可以确保它的应变与构筑物保持同步,这种方法主要用于构筑物整体变形的监测(见图4)。

(2) 定点接着铺设:是将光纤拉直、微微受力绷紧后,按一定的间隔定点粘着在构筑物上。一旦

构筑物沿光纤方向拉伸或收缩,两点之间的光纤即发生变形,从而测得构筑物在两点间的变形情况。由于监测仪器距离分解度的存在,因此此种铺设方式主要用于构筑物局部变形的监测(见图4)。

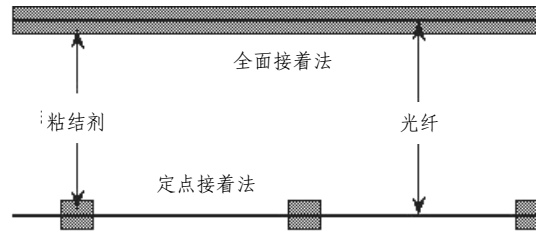


图4 光纤全面接着与定点接着示意图
Fig.4 The overall adhesive method and the fix-point adhesive method

以上是2种比较成熟的铺设方式,而针对具体的构筑物的变形,还应设计出更多其他的铺设方式,以满足不同工程变形监测的要求。

无论是全面接着,还是定点接着,都必须用粘结剂将之接着在构筑物上,采用何种粘结剂和添加剂,应根据不同的情况,通过实验室和现场试验而定。

4.2 距离分解度

BOTDR 技术是一种分布式的监测技术,可以检测出光纤上各点的轴向应变,但值得注意的是,这里所指的距离为Z处的一点,实际上是一段 $dZ = W \times V_g / 2$ 的光纤长度(W 为入射脉冲光的宽度, V_g 为光波在光纤中沿轴向传播的速度)。因为仅当 $dZ = W \times V_g / 2$ 时, dZ 段内所有背向散射光在同一时刻 t 到达光纤始端,而处于 dZ 外的背向散射光在不同 t 的另一时刻到达光纤始端。因此, $W \times V_g / 2$ 为光时域反射技术理论上可分辨的最小光纤长度,称为距离分解度^[12]。

若取 $W = 10 \text{ ns}$, $V_g = 0.2 \times 10^9 \text{ m/s}$, 则 $dZ = 1 \text{ m}$, 在此情况下所得到的采样点的应变值,其实是对该点前方 1 m 范围内应变情况的综合反映。距离分解度越小,检测结果越精确,由于 V_g 固定,因而距离分解度的大小主要取决于脉冲光宽度 W 。目前使用的 BOTDR 光纤应变分析仪, W 最小值为 10 ns, 其距离分解度可达 1 m, 这一精度基本上能够满足工程应用的需求。

在实际的监测工作中,应当充分考虑到距离分解度对结果的影响,防止漏检、错检的发生。根据作者的经验,有以下一些问题值得进一步的研究和探讨:

(1) 由于距离分解度的存在, 因此对不同的监测对象, 光纤的铺设方法应当各有特点, 例如对裂缝的监测就不能采用全面粘着的光纤铺埋方式, 而应采取环绕型的铺埋方式。

(2) 在某些精度要求较高的监测点, 或是在有其他特殊需求的监测区域, 应当考虑采用较为复杂的光纤网或特殊的光纤铺设工艺, 以提高距离上的分辨率。

(3) 仪器显示采样点的频谱, 其实是一段光纤的频谱, 通过对这个频谱的曲线线形、波高、半值波幅宽度等特征的分析, 可以推测出一段光纤的总体应变状态, 在对频谱深入分析后, 采用适当的谱分析方法, 可获得小于距离分解度的应变变量, 从而提高应变检测率。

(4) 目前仪器生产厂商正在研制更窄频的脉冲光设备, 以期获得更小的距离分解度。待新仪器投入应用时, 光纤应变监测的距离分辨率将会更高, 检测精度亦更准确。

4.3 温度和湿度影响

当光纤产生应变或温度发生变化时, 光纤中的背向布里渊散射光的频移量都将要发生相应的变化^[10, 13, 14]。因此, 有必要研究温度变化对光纤应变结果的影响。

试验研究表明: 温度对布里渊散射光频率的影响要远远小于应变对其的影响, 如果温度变化不超过 5 °C, 故温度的影响可以忽略不计, 布里渊散射光的这一特性使得 BOTDR 更具优越性。

对于较短的隧道工程, 洞口与中部的温差较小(常不超过 3 °C), 对一次的监测结果而言, 温度的影响可以忽略不计。

当气温变化非常剧烈时, 不同期次的温差大于 5 °C, 这时可以取某次的监测结果作为参考应变曲线, 然后对不同温度下的应变按下式加以修正, 以去除环境温度变化对应变结果的影响:

$$\varepsilon_{\text{ref}} = \varepsilon_{\text{deg}} + \alpha \Delta d \quad (2)$$

式中: ε_{deg} 为某一温度下光纤的应变; ε_{ref} 为修正后的光纤应变; α 为比例系数, 单位为 $\mu\varepsilon/^\circ\text{C}$, 它与光纤材料和仪器设置等有关, 本次研究中将 α 取为 $30 \mu\varepsilon/^\circ\text{C}$; Δd 为某次监测时的温度与参考应变曲线对应的温度之差。

对于较长的隧道工程, 特别是在环境温度很不均匀情况下, 温度的修正就变得较复杂, 应根据光纤各段的实际环境温度, 分别进行修正, 目前进一步的研究正在进行中。

紧套型光纤由纤芯、包层、涂敷层和护套组成, 因此本身耐腐蚀性强, 防水性能好, 有利于长期检测。实验发现, 湿度对紧套型光纤的应变监测没有实质影响, 但对缺少护套的裸纤有一定影响。因此, 在潮湿的环境里应尽量使用紧套型光纤。

4.4 光纤疲劳效应

在 BOTDR 监测中, 光纤既作为传导介质, 又作为传感介质, 因此它在各种工程环境和受力条件下的长期性能和稳定性就成为这一技术成功应用的关键。

目前应用于监测领域中的光纤主要有两类: 裸纤和紧套光纤。后者由于比前者多了一层护套, 因而可以抵抗较大的拉应力和压应力(见图 5)。

已进行了 30 d 的实验表明: 裸纤和紧套型光纤在恒定拉应力作用下, 在受力拉伸后的 1 d 时间里, 应变值迅速增加, 随后增幅明显趋缓, 并逐渐稳定在一个恒定的范围内。这表明两种光纤的应变都有延迟现象, 但增幅不大, 并在短期内迅速趋于稳定。光纤在长期受力条件下的特性实验目前还在进行中, 相关成果将另文发表。

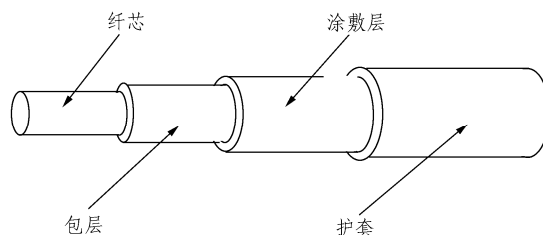


图 5 光纤结构示意图

Fig.5 Structure of optical fiber

4.5 变形计算

应用 BOTDR 技术对大型基础工程的监测结果主要体现在光纤沿线的应变分布, 如何获得沿线构筑物的变形分布, 这也是一个值得研究的课题。

由于引起构筑物变形的原因比较复杂, 有温度造成的构筑物热胀冷缩的整体变形, 也有不同方向裂缝开裂和错动引起的局部变形, 因此, 将 BOTDR 所测到的构筑物的应变转换到变形, 有时比较困难。比较可行的解决方法: 一是要合理地布置光纤监测网, 分别监测构筑物的整体应变和局部应变及其方向, 再结合变形特点, 计算出构筑物的整体变形与局部变形; 二是要采用相应的计算方法, 将光纤的应变换算为构筑物的变形。

例如, 对于均匀应变, 可以由下式计算变形:

$$\delta = \varepsilon d \quad (3)$$

式中： ε 为应变， d 为应变段长度， δ 为变形。

对于不均匀变形，可以采用按一定间距定点接着的方式铺设光纤，两个粘结点间的应变近似地认为是均匀应变，按上式同样可以得到光纤沿线的不均匀变形。

如果线形构筑物如隧道等发生整体的不均匀沉降，可以按照挠度的计算方法近似计算它的沉降变形量为

$$y = \iint \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{d} dx dx \quad (4)$$

式中： ε_1 和 ε_2 分别为铺设在构筑物顶部和底部的两条光纤的应变， d 为两条光纤的间距。

此外，结合数值模拟技术也可以实现变形的计算。可以将光纤的应变作为数值计算的边界条件或者已知条件，通过有限元或有限差分等计算方法，得到构筑物不同部位的各种变形。

总之，从构筑物的应变转换到变形的计算往往比较复杂，但是只要合理地布置光纤监测网，采用正确的计算方法，对构筑物变形的计算还是可以得到令人满意的结果。

4.6 智能监控系统

应用 BOTDR 技术对大型基础设施工程进行分布式实时变形监控，另外一项重要的课题就是研发该技术的智能监控系统。分布式光纤智能监控系统应由传感系统、数据采集、存储与传输、数据处理、健康诊断与安全评估、报告输出等部分组成^[15, 16]。

传感系统主要由光纤传感器组成，根据监测的实际需要也可以增加一些温度、应力、应变或位移传感器等作为对比。数据采集应具有远程化、网络化和自动化的特点，并与数据库技术相结合，实现数据的存储、查找与提取等功能。借助 INTERNET 及接口技术实现数据的远程传输。数据处理的核心内容是要实现特征信息的提取，就大型基础设施工程监测而言，其特征信息就是结构的变形与损伤。充分利用高阶谱分析、时-频分析、小波分析、神经网络、数据挖掘以及进化计算等现代数据处理方法，对传感器传输来的信息进行智能处理，通过数据融合合理理论表征结构变形与损伤等特征信息，便于对结构进行健康诊断和安全评估^[17~20]，其中包括数据的前处理过程，如信号的降噪处理、温度补偿等。健康诊断与安全评估包括应变异常的智能辨识、损伤的评定与定位、体系可靠度分析、结构建模和模型修正、参数识别等内容，需要数理统计、数值分析、专家系统、粗集理论、可拓工程理论、动力指纹法

等传统方法与现代方法相结合，对构筑物的健康状况作出全面的、可靠的评价，如果构筑物的变形超出安全范围或出现损伤，系统能够及时预警，给出变形或损伤的位置及当前状态信息^[21~29]。最后，系统还应具有自动生成图文并茂的健康诊断报告的功能。

系统中还可以引入地理信息系统，将光纤的应变信息与结构的地理信息相对应，实现信息的快速查找、对比与替换等功能。还可以借助虚拟仪器技术，用软件替代部分硬件功能，实现不同子系统或不同模块间接口功能，加快系统的开发速度和可扩展性。

图 6 为开发中的 BOTDR 智能监控系统的结构框图。

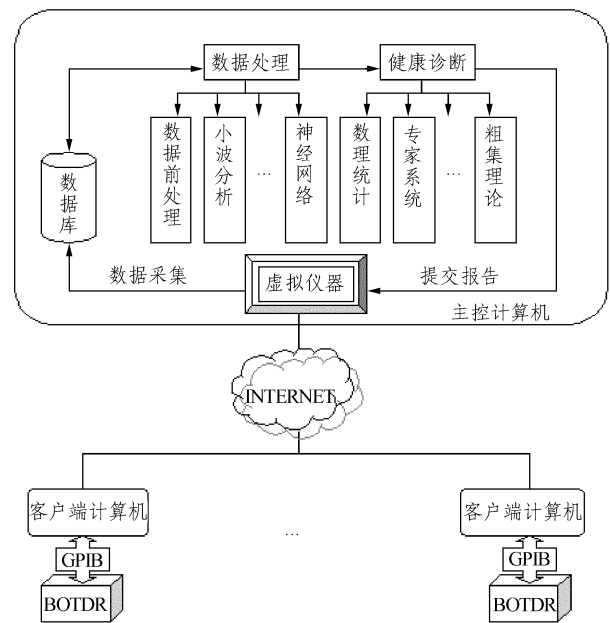


图 6 BOTDR 智能监控系统的结构框图

Fig.6 The structure of intelligent monitoring system based on BOTDR

5 结 语

大型基础工程健康诊断的分布式实时监控是国际上的一大发展趋势，也是一项需要不断攻关的高新技术课题。本文仅对布里渊散射光时域反射测量技术进行了剖析，分析了它对大型基础工程健康诊断监控的适用性，并根据已有的研究成果，介绍了相关的研究课题。有关这一技术在实际工程中的应用成果，将另文发表。可以相信，随着这一技术的不断研发和成熟，越来越多的大型基础工程将采用这一技术进行分布式监控和健康诊断，应用前景十

分广阔。

致谢 特别感谢日本茨城大学吴智深教授在南京大学 BOTDR 实验室的建设过程中和第一作者在日本茨城大学开展 BOTDR 研究工作期间的无私支持和帮助, 使得本文中的研究工作顺利进行。

参 考 文 献

- 1 Horiguchi T, Kurashima T, Tateda M. Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1989, 1(5): 107~108
- 2 Ohno H, Naruse H, Kihara M, et al. Industrial applications of the BOTDR optical fiber strain sensor[J]. Optical Fiber Technology, 2001, 7(1): 45~64
- 3 Wu Z S, Takahashi T, Kino H, et al. Crack measurement of concrete structures with optic fiber sensing[J]. Proceedings of the Japan Concrete Institute, 2000, 22(1): 409~414
- 4 Wu Z S, Takahashi T, Sudo K. An experimental investigation on continuous strain and crack monitoring with fiber optic sensors[J]. Concrete Research and Technology, 2002, 13(2): 139~148
- 5 Li C, Zhang Y M, Liu T G, et al. Distributed optical fiber bi-directional strain sensor for gas trunk pipelines[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2001, 36(1): 41~47
- 6 Naruse H, Uchiyama Y, Kurashima T, et al. River levee change detection using distributed fiber optic strain sensor[J]. IEICE Trans. Electron., 2000, E83-C(3): 462~467
- 7 Ohno H, Naruse H, Kurashima T, et al. Application of Brillouin scattering-based distributed optical fiber strain sensor to actual concrete piles[J]. IEICE Trans. Electron., 2002, E85-C(4): 945~951
- 8 Yasue N, Naruse H, Masuda J I, et al. Concrete pipe strain measurement using optical fiber sensor[J]. IEICE Trans. Electron., 2000, E83C(3): 468~474
- 9 Uchiyama H, Sakairi Y, Nozaki T. An optical fiber strain distribution measurement instrument using the new detection method[J]. ANDO Technical Bulletin, 2002, 10: 52~60
- 10 黄民双, 陈伟民, 黄尚廉. 基于 Brillouin 散射的分布式光纤拉伸应变传感器的理论分析[J]. 光电工程, 1995, 22(4): 11~36
- 11 Brown A, DeMerchant M, Bao X, et al. Spatial resolution enhancement of a Brillouin-distributed sensor using a novel signal processing method[J]. J. Lightwave Technol., 1999, 17(7): 1179~1183
- 12 Bao X, DeMerchant M, Brown A, et al. Tensile and compressive strain measurement in the lab and field with the distributed Brillouin scattering sensor[J]. J. Lightwave Technol., 2001, 19(11): 1698~1704
- 13 王惠文, 江先进, 赵长明等. 光纤传感技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001
- 14 Ohno H, Uchiyama Y, Kurashima T. Reduction of the effect of temperature in a fiber optic distributed sensor used for strain measurements in civil structures[R]. SPIE Proc. 3670, 1999, 486~496
- 15 周 智, 欧进萍. 土木工程智能健康监测与诊断系统[J]. 传感器技术, 2001, 20(11): 1~4
- 16 Akira Mita. Emerging needs in Japan for health monitoring technologies in civil and building structures[A]. In: Proc. of 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring[C]. Stanford: Technomic Publishing Co. INC, 1999, 35~41
- 17 胡昌华, 张军波, 夏 军等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计—小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999
- 18 李人厚. 智能控制理论和方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999
- 19 王永庆. 人工智能原理与方法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998
- 20 杨叔子, 郑晓军. 人工智能与诊断专家系统[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990
- 21 阎平凡, 张长水. 神经网络与模拟进化计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000
- 22 王东生, 曹 磊. 混沌、分形及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术出版社, 1995
- 23 冯夏庭, 张治强, 杨成祥等. 位移反分析的进化神经网络方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 529~533
- 24 赵占明, 刘浩吾, 蔡德所. 光纤传感无损检测混凝土结构研究述评[J]. 力学进展, 1995, 25(2): 223~231
- 25 Ansari F. Real-time monitoring of concrete structures by embedded optical fibers[A]. In: Proceedings of the ASCE[C]. San Antonio: [s. n.], 1992, 49~59
- 26 Bodeux J B, Golinval J C. Application of ARMAV models to the identification and damage detection of mechanical and civil engineering structures[J]. Smart Materials and Structures, 2001, 10(3): 479~489
- 27 Chou J H, Ghaboussi J. Structural damage detection and identification using genetic algorithm[J]. Intelligent Engineering System through Artificial Neural Networks, ASME, 1997, 7: 395~400
- 28 Zhao J, Ivan J N. Structural damage detection using artificial neural networks[J]. J. of Infrastructure Systems, ASCE, 1998, 4(3): 93~101
- 29 Demarchi D, Pereira E V, Lopes J A. Non-destructive evaluation tool for monitoring and detection of structural damage by using neural network[A]. In: Proc. of SPIE[C]. New York: The Int. Society for Optical Engineering, 2000, 1584~1589