

基于互联网+的智能化地铁隧道 结构安全监测解决方案



深圳市简测科技有限公司

二〇一五年九月

1、引言

随着城市地铁的大规模建设，地铁隧道工程的运营期结构状况的评估、运营现状以及工程服务寿命的预测已成为隧道工程建设需要解决的重大课题，同时也是隧道运营业主关心的一个重要议题。

深圳地铁隧道建设工程在运营过程中，不可避免地遭到地质恶化、环境荷载、腐蚀、疲劳等因素的影响，会导致隧道主体结构的损坏和劣化。若不及时检测和维修，将会导致很大的破坏和坍塌，带来的损失也是非常巨大的。所以对运营期隧道进行全天候 24 小时的实时监测，及时高效地保证隧道主体结构的安全是必要的。

隧道健康监测系统建立的目的是通过对隧道结构状况以及其他工作状况的监测，为运营期结构状况的评估、运营现状以及工程服务寿命的预测提供大量监测数据。

2、建设任务

深圳市地铁隧道结构安全监测的主要内容包括四大部分：结构信息采集监控系统、通信网络系统、数据中心、软件信息系统。

1. 结构信息采集系统

1) 隧道主体信息采集系统

通过建设一定规模的结构数据传感网络，为防灾减灾提供及时、准确的基础信息资料。本次拟新建 6 条线路近两万多个信号采集传感节点、120 台采集信号解调工作站、一个数据中心，实现多条地铁线路的隧道结构数据自动采集。

2) 视频监控系統

在隧道重要地段、地质结构复杂的地点建设视频监视系统，为实时、直观监视城市地铁安全状况提供可靠的途径。

2. 通信网络系统

1) 光纤环网建设：充分利用现有、在建及待建的的网络资源，建成一个自动化配套网络形成环路，对已有光纤的连接部分进行光纤铺设。同时需要购置搭建光纤环网需要的网络设备，构建 1 个中心、6 个分中心的光纤网络环境；

2) 地铁隧道安全监控中心网络设备建设：对原有网络设备进行升级改造；

3) IP 地址规划：对接入本项目网络设备的所有智能化设备进行 IP 地址规划，按不同的网络体系和网络路由进行规划；

4) 网络管理软件购置，按实际需要进行购置，实现对环网内网络设备的可视化管理；

5) OTDR 光纤测试仪购置。

3. 数据中心

数据中心包括以下几个组成部分：

- 硬件平台：包括核心数据库服务器、存储设备、备份设备等。
- 基础软件平台：包括操作系统、数据库管理系统、GIS 基础软件平台、备份软件等。
- 数据库群：补充完善水务基础数据库、水务空间基础数据库、水雨情数据库等 12 个水务基础数据库，以及与水务综合应用相关的政务综合应用和业务综合应用主题数据库等。
- IT 管理：包括数据中心高效运行所必需的管理体系和制度保障。
- 数据中心机房：主要包括数据中心机房的建设。
- 数据分中心：按照线路新建数据分中心。

4. 应用系统

利用已有基础资料，对已有数据库进行完善，在应用层对地铁隧道信息管理系统进行重新开发，实现管理业务的各种资料的一张图显示，在电子地图上实现安全基础信息、实时结构信息、工情信息、业务辅助信息的显示、查询、统计；

3、建设原则

结合历年来深圳市安防工作的发展积累和新形势下的要求，力求统筹规划、强化资源整合，促进信息共享，完善机制体制，使项目建设达到投资少、见效快，既实用、科学又具有先进性、前瞻性，满足防灾减灾的各项需求，其建设过程应遵循以下原则：

1、整体规划与分步实施相统一

深圳市深圳市地铁隧道结构安全监测建设必须与三防工作的重点一致，逐步提高水务工作水平。建设一套完整的优化调度、优化配置的管理体系，建设任务繁重，因此，必须统筹规划，分步实施。由于工作量大、任务重、投入不大、效能显著，为了边建设边发挥效益，

应制定分期建设目标与任务，分期分步实施。深圳市地铁隧道结构安全监测系统工程建成后，应能达到隧道结构应变、温度、挠度、地质沉降、裂缝等重要结构信息的全面实时自动采集、传输、处理。

2、先进性与实用性相统一

深圳市的经济社会发展水平较高，地质灾害对社会经济造成的损失越来越大。深圳市地铁隧道结构安全监测系统建设既要采用当今世界先进的技术，高起点、高标准，又要注重实用性，要在充分考虑实用性的基础上，力求技术的先进性。在技术先进与实用性统一的基础上，处理好投入与产出的关系，做到边建设边发挥效益。

3、单一性与综合性相统一

深圳市地铁隧道结构安全监测系统涉及应变、温度、挠度、地质沉降、裂缝等多种信息资源的采集、传输、存储，必须考虑综合功能，统筹解决信息的采集、传输。尤其是关系全局性的基础设施和重点业务应用系统，要统一设计、统一建设，避免重复，造成浪费。

4、全局性与地区性相统一

地铁隧道结构安全监测系统工程分布在深圳市各区，建设时必须考虑互连互通，充分发挥作用，全面推进市级三防信息资源共享服务体系建设和，解决好全局性与地区性相统一的问题。

5、整合资源、讲求实效

为提升深圳安防工作现代化、决策高效化的整体实力，为实现政府资源最大限度公用化，政府专网必须统一建设、管理，各部门共享使用。要打破行业界限，对现有的基础网络资源要加以整合，统一管理公共资源，根据各部门需求进行调整，避免重复建设。要特别重视系统建设的实用和实效，避免资金和资源的浪费。

6、信息互通、安全保密、运行稳定

只有实现信息互通才能发挥地铁隧道结构安全监测系统建设的整体优势。同时，要严格按照国家有关安全保密的法律、法规，建立必要的规章制度，采取有效的技术措施，同步规划建设保密设施，保障网络的安全保密性，确保国家秘密安全。

系统将满足可靠性要求，能够长时间不间断运行。对关键的数据、接口和设备采取冗余设计，具有故障检测、故障服务、系统自愈合、系统恢复以及系统健康状态检查等功能；系统使用用户身份认证以及访问控制技术等多种技术对用户的各种操作和涉密文件的存取实行认证和限制，以保证系统的安全。以光纤方式接入的摄像机可以采取前端视频分配的方式，接入指挥调度中心视频矩阵并采用网络视频编码技术“按需”接入信息网，同时将分配

出来的视频信号经视频编码接入视频监控报警服务平台，确保自建的视频监控信号既能与信息网实现联通，又能实现视频信息的充分共享。

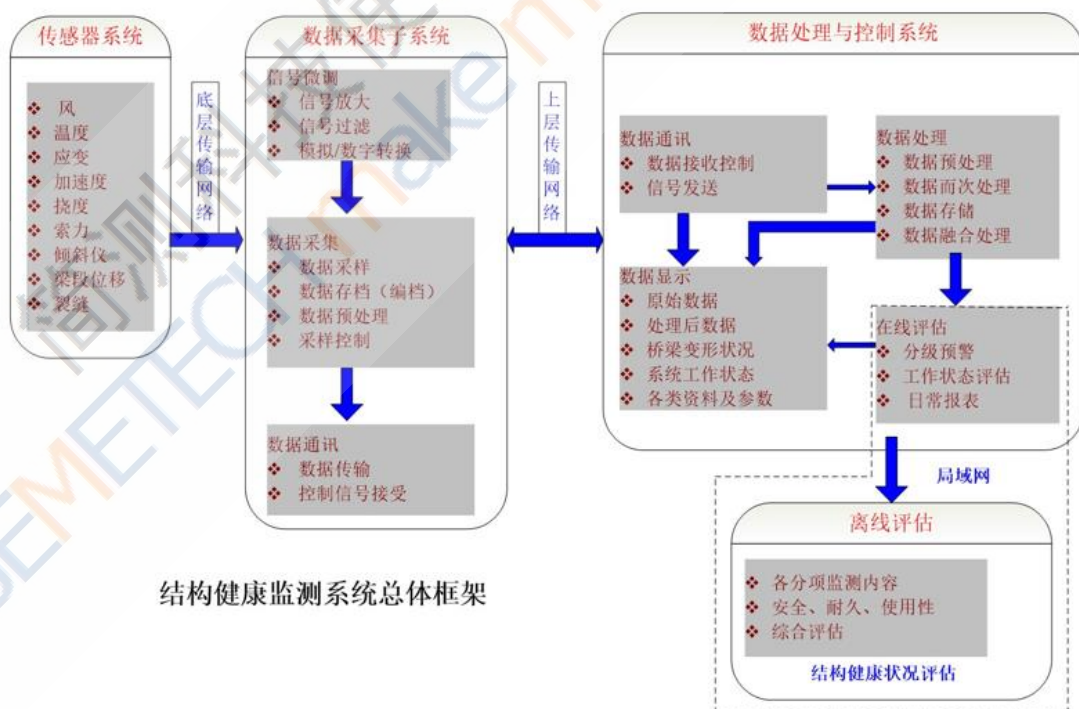
7、加强管理，突出实效

地铁隧道结构安全监测系统系统将为深圳市三防工作者实现快速反应、协同办公提供技术支撑。利用这个系统，三防工作者可以形成自动采集、快速查询、高效分析、准确决策和服务社会的一体化网络体系，进而提高深圳市三防工作者在第一时间获取“情报信息（应变、温度、挠度、地质沉降、裂缝）”、第一时间采取防范措施、第一时间有效控制局势、第一时间实现精确决策调度的能力。

4、信息采集系统建设方案

1、总体框架

本项目采用分布式云数据中心端到端解决方案，将传统的分散、异构、分级的传感数据采集业务架构整合替换为物理分散、逻辑集中的分布式云数据中心架构，将不同地点、不同时期、不同规模的传感数据采集点整合为一个统一的信号“逻辑资源池”，实现统一分析、统一管理、统一监测、统一呈现。工作架构图如下：



结构健康监测系统总体框架

重大工程结构(如隧道、桥梁和水坝等)的安全监测一直是国内外工程领域广泛关注的重要研究课题。其常规监测技术多以点式电测方式为主,而用于应变测量的传感元件主要为电阻应变片和钢弦计,但电阻应变片发生的零点漂移会使其长期测试结果产生严重的失真;钢弦计的灵敏度较好,但因钢弦丝长期处于张紧状态,蠕变对其影响较大。此外,常规的电类传感器普遍存在寿命短、测量易受环境影响、易受电磁干扰、不能进行实时在线监测和不能实现分布测量等缺点。但工程结构的渐变性决定监测系统不仅应具备高精度和长期稳定性,而且要求实时监测数据的准确性以及恶劣条件下测读数据的可靠性。由此可见,常规的电类传感器已逐渐不能满足对重大工程结构安全的长期监测要求。

光纤传感技术是继电测技术之后的新型传感技术。以光波为载体,光纤为媒质,具有抗电磁干扰、动态响应快、灵敏度和测试精度高、耐久性强及可实现远距离实时监测等优点,一些技术还可对结构进行分布式测量。这些优点决定其在工程结构安全监测方面具有很强的竞争力,并在航空航天、船舶、电力、桥梁、堤坝、边坡和隧道等工程结构及岩土工程的监测与诊断中获得广泛研究与应用。

2、光纤监测技术

国内外工程结构监测领域主要的光纤传感器主要包括光纤光栅传感器 (FBG)、光时域反射计 (BOTDR)、Fabry-Pérot 空腔传感器 (FPI) 及 SOFO 点式光纤传感器等。FPI 和 SOFO 分辨率高, 但受信号传输和解调技术的限制, 布点数量有限, 还不能从根本上突破点式测量的局限, 比较适用于结构重点部位的监测。分布式的 BOTDR 可对结构进行大范围监测, 但分辨率较低, 测得应变是所在位置后面一定距离 (空间分解率) 的平均应变值。而 FBG 不仅分辨率高, 所测的应变位置明确易定, 且能使用波分复用技术在一根光纤中串接多个传感器, 实现真正意义上的多点线式分布测量。因此, FBG 在很大程度上弥补以上几种传感器的不足, 并成为光电传感领域的研究热点。美国、德国、加拿大和英国等都在致力于 FBG 及解调系统的研究。我国对其的研究相对晚一些, 但是也有较大进展, 但还鲜见 FBG 在隧道监测中的应用实例。本文拟采用 FBG 传感技术对昆明白泥井 3# 隧道二次衬砌进行应变监测, 从而了解隧道当前的应力状态和长期使用的可靠性及安全程度及检验二次衬砌设计的合理性, 并为隧道在运营期间提供监测数据

3、隧道监测实例

3.1 工程概况

XX 省白泥井 3# 隧道位于功山至二级公路 10# 合同腰店子段 K83+580~K84+555 处, 隧道全长为 975.0 m, 为单洞双车道对向行车隧道。隧道设计净宽为 11.5m, 设计净高为 7.465 m, 已于 2003 年 12 月建成通车。进口 K83+580~K83+625 段地层为二叠系栖霞组

(P1q)灰岩夹白云层；K83+625~K84+555 为寒武系筇竹寺组(E1q)页岩夹泥质粉砂岩，两者的接触关系为断层接触，接触带较破碎，易产生塌方。出口端围岩属软质岩层，岩体力学性质较差，围岩较不稳定，易产生拱部坍塌和侧壁位移变形，且K84+500~K84+555 段位于滑坡体上，隧道易产生整体变形。受区域构造影响，隧道区域内次级构造发育，围岩破碎，节理裂隙发育，风化严重，强风化层最厚处达70 m。由于隧道的稳定性和安全性是建设单位十分重视的问题，为此需对此隧道的变形稳定和安全状况进行监测。

3.2 FBG 铺设方案

本次 FBG 监测系统覆盖 K84+310~K84+531 的隧道一段。共选取 10 个断面按“Ω 型”布置，进行绕拱变形监测。监测线路采用全面接着方法，即把光纤绷紧后完全黏附在隧道二次衬砌的表面，可近似认为传感器与黏着处结构的变形保持同步，从而反映隧道断面的整体变形情况。经过对 FBG 的定位、熔接和黏贴，把光纤引入远方的监测中心，并进行光损耗测量和断点检测后，成功完成对隧道的传感布控。图 2, 3 分别为 FBG 隧道监测系统的纵向和横向剖面布置图。图 4 所示为顶表面 FBG 传感器的串联及黏贴方式；图 5 所示为拱左、右两侧(拱肩和拱腰)FBG 传感器的串联及黏贴方式。除拱顶倾斜设置的温度补偿光栅外，另外两支互相垂直的测量光栅分别监测隧道的轴向方向和隧道横断面 方向上的应变。

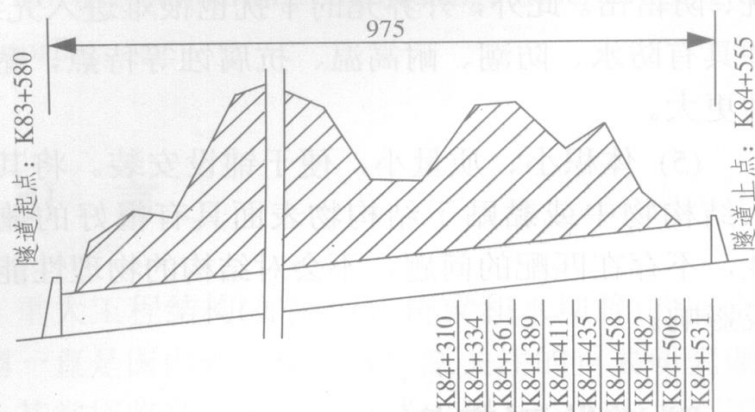


图2 FBG隧道监测系统纵向剖面布置图(单位: m)

Fig.2 Longitudinal cross-section of tunnel FBG measurement system(unit: m)

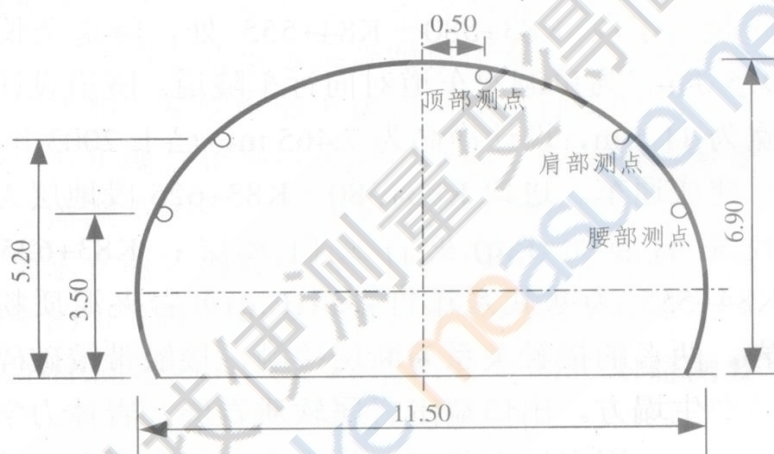


图3 FBG隧道监测系统横向剖面布置图(单位: m)

Fig.3 Transverse cross-section of tunnel FBG measurement system(unit: m)

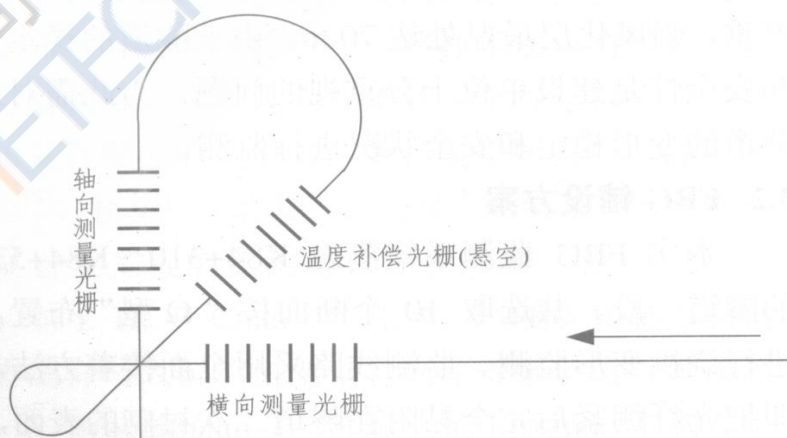


图4 FBG传感器在隧道拱顶的串联和黏贴示意图

Fig.4 Schematic diagram of FBG sensor adhesive method at crown of tunnel

本次工作所采用的 FBG 表面应变传感器的主要技术指标为：分辨率 $\leq 0.1\%$ FS；测试精度 $< 2\%$ FS；温度范围为 $-20^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ ；应变测量范围为 $-1\,000 \sim +1\,000\ \mu\varepsilon$ 。JEME-iFBG-S04 型光纤光栅解调仪的主要技术指标为：通道数为 4 个；波长范围 80nm；分辨率为 1pm；扫描频率为 5Hz；工作温度为 $0^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 。

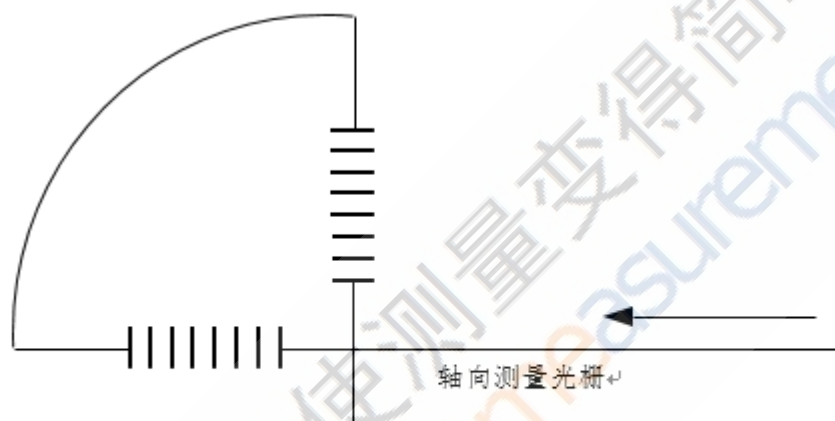


图5 FBG 传感器在隧道拱肩和拱腰
的串联和黏贴示意图 Fig.5

3.3 温度补偿技术

根据 FBG 的传感原理及式(2)可知，由于光纤光栅对应变与温度同时敏感，使得通过测量光纤光栅耦合波长移动无法对应变与温度加以区分，所以用其作为应变传感元件时，应消除温度所带来的影响，在应用中必须对 FBG 传感器采取消除温度敏感的措施以补偿。具体做法是：在一根光纤上同时串联应变测量光栅和温度补偿光栅(如

图 4 所示)。测量光栅受应变和温度同时作用,温度补偿光栅由于悬空仅受温度影响,而不受结构的作用。二者处于同一温度场中,它们对环境温度的变化具有相同的响应,即温度变化引起二者波长变化量相同,在测量光栅的波长漂移中扣除温度变化引起的波长漂移,便得到应变单独作用引起的波长漂移,从而达到温度补偿的目的,即

$$\varepsilon = \frac{\Delta \lambda_{\text{total}} - \Delta \lambda_T}{K_\varepsilon} \quad (3)$$

$$K_\varepsilon = 1 - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [P_{12} - \nu (P_{11} + P_{12})] \quad (4)$$

式中: ε 为轴向应变, $\Delta \lambda_{\text{total}}$ 为应变和温度引起测量光栅的波长漂移量, $\Delta \lambda_T$ 为温度补偿光栅的波长漂移量, K_ε 为 FBG 的应变灵敏度系数。

3.4 隧道内温差对 Bragg 波长变化的影响

对于较长隧道,其内部温度分布相对复杂,隧道内同一位置在不同时期的温度也不相同。由于环境温度的变化对 Bragg 波长漂移有一定的影响,从而直接影响应变监测结果的精确性。为检测隧道内温差对 Bragg 波长变化的影响程度并验证 FBG 监测系统的稳定性和可靠性,于 2004 年 4 月 16 日 17:00~4 月 17 日 17:00 进行 24 h 连续监测(时间间隔为 1~2 h)。监测数据按此原则进行处理:以第 1 次测量的波长值作为监测系统的基准值,此后所有监测数据均要扣除该基准值,从而显示隧道各断面中温度传感系统的 Bragg 波长随测量次数的变化规律。同时监测隧道外界环境温度和隧道内温度的变

化情况，测量结果表明，隧道外界环境实际温度的变化 ($0^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$) 所导致的隧道监测段内温度变化的相应温度为 $0^{\circ}\text{C} \sim 2^{\circ}\text{C}$ 。图 6, 7 给出 8 个断面的温度传感系统的 Bragg 波长随测量次数变化曲线。

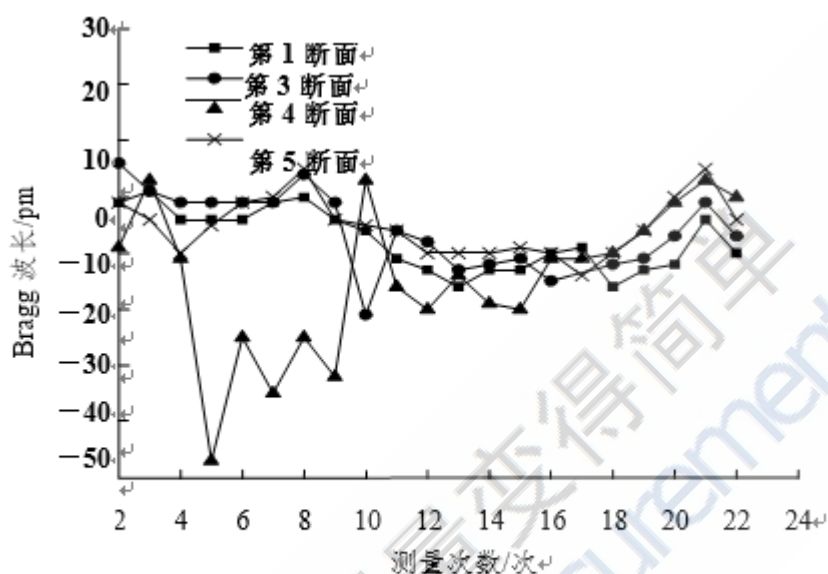


图 6 第 1, 3, 4, 5 断面中温度传感系统的 Bragg 波长随测量次数变化曲线

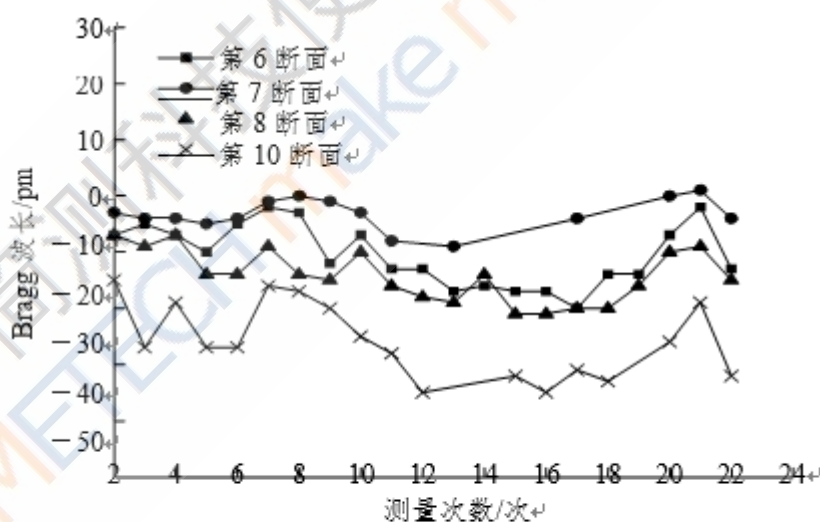


图 7 第 6, 7, 8, 10 断面中温度传感系统的 Bragg 波长随测量次数变化曲线

由图 6, 7 可知，隧道虽然经历外界 24h 内的温度极低和极高环境，但其内部一天当中的温度变化对温度传感系统的 Bragg 波长变

化影响不大，波长变化范围主要集中在 $-40\sim 10\text{pm}$ 。除第 4 断面以外，其余断面的变化曲线的波型及变化趋势基本一致，可能是由于第 4 断面附近温度波动较大，而其余断面附近温度分布相对稳定所致。从整体上看，温度越低，波长变化值下降；温度越高，波长变化值随之回升。此外，对 8 个断面上温度传感系统所取得的 Bragg 波长值进行可靠性的估计。标准误差越小，可靠性则越大，计算结果见表 1。由表 1 可知，标准误差可控制在 14 pm 以内。在全天监测过程中，隧道附近的施工爆破及隧道内通车引起的振动对光纤及传感器的正常工作均无影响，传感线路良好，系统工作稳定。由此可见，光纤 Bragg 光栅应变传感器的可靠性和稳定性是有保证的。

表 1 Bragg 波长值的计算结果

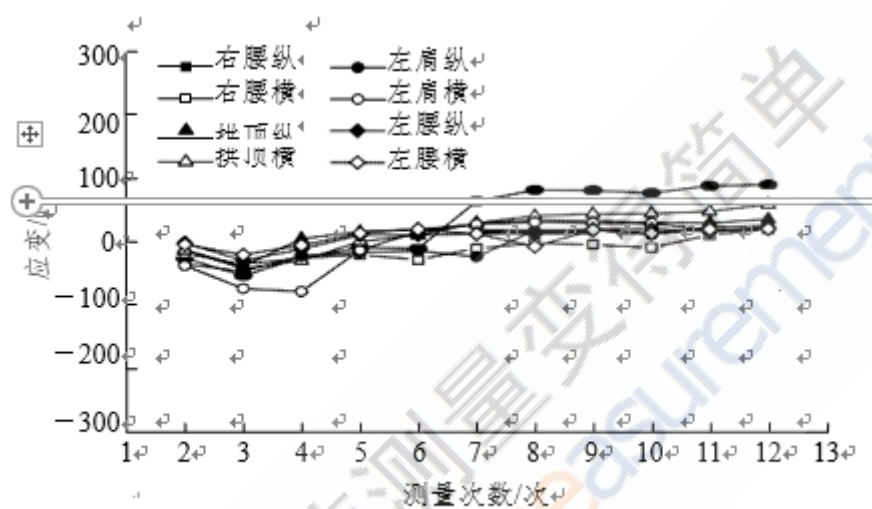
Table 1 Calculation results of Bragg wavelengths

隧道断面(桩号)	标准误差/pm
第 1 断面(K84+310)	6.6
第 3 断面(K84+361)	6.9
第 4 断面(K84+389)	13.4
第 5 断面(K84+411)	5.1
第 6 断面(K84+435)	5.8
第 7 断面(K84+458)	2.8
第 8 断面(K84+482)	5.4
第 10 断面(K84+531)	8.8

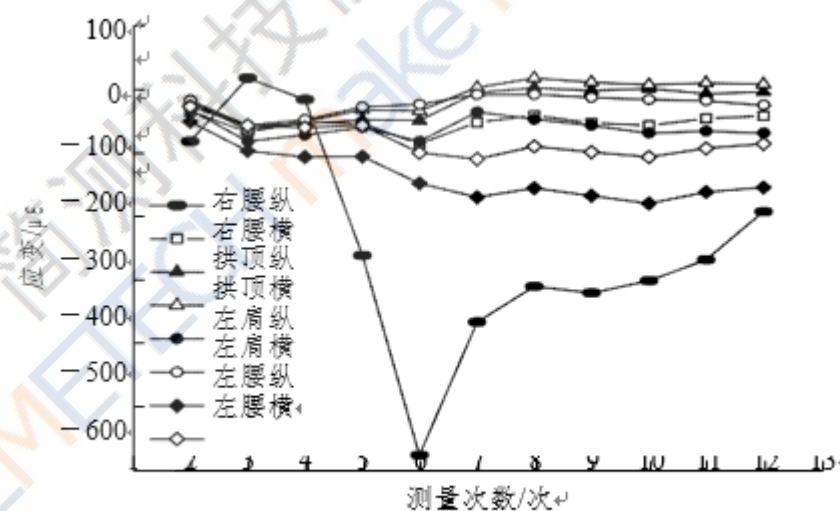
3.5 隧道应变监测结果分析

为了考察隧道衬砌在不同时期变形情况，于 2004 年 2 月 19 日~10 月 20 日对其进行应变监测，以便了解隧道的健康状态并及时

采取补救措施。其中 2~3 月为干季，测量频度为 4 周 1 次；4~8 月为雨季，测量频度为 3 周 1 次；此后又改为 4 周 1 次，共进行 12 次测量。同样以第 1 次的应变监测数据为基准，后 11 次的监测数据均扣除该基准值，从而反映隧道 2 月 19 日以后的应变变化。本文给出第 1，4，5，10 断面中的光纤 Bragg 光栅应变随时间的变化曲线。



(a) 第 1 断面



(b) 第 4 断面

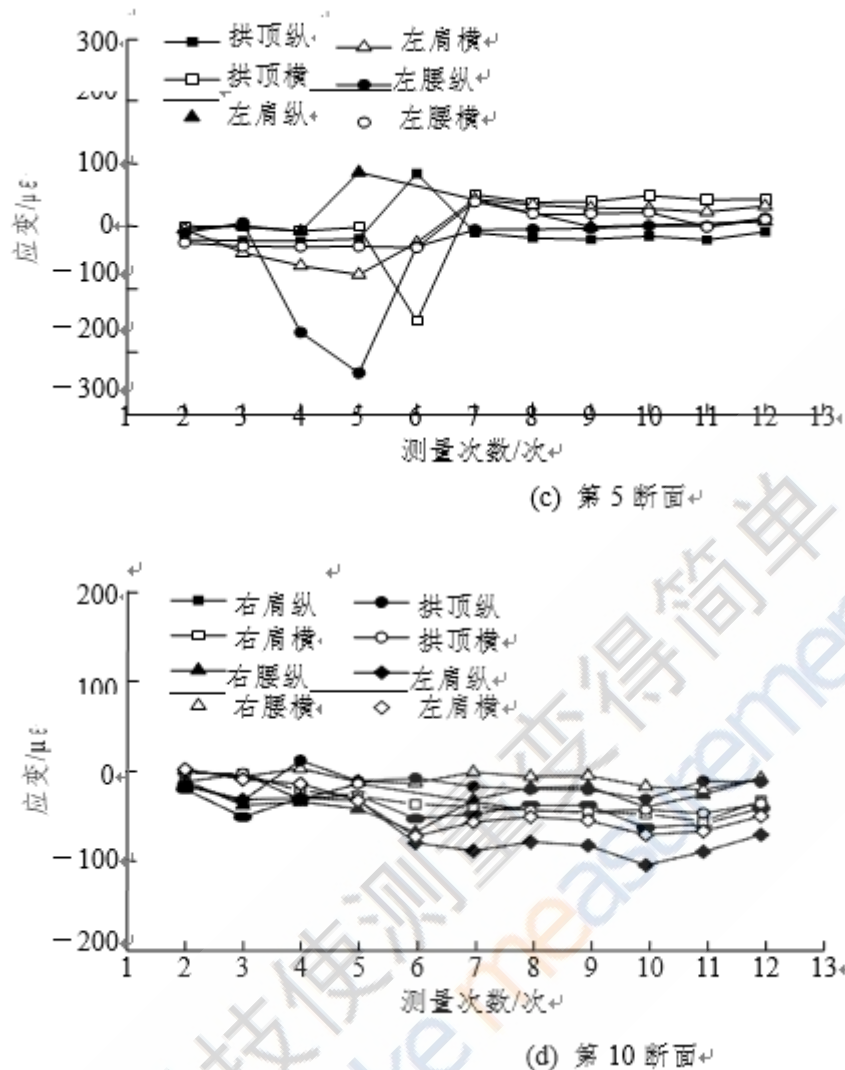


图 8 第 1, 4, 5, 10 断面中的 FBG 应变随时间的变化曲线

从图 8 中可看出，在前 7 次测量中，4 个断面的应变变化量均表现出不同程度的波动，说明进入雨季后，隧道应变明显加大，进而表明下雨对隧道结构的受力产生一定影响。这种现象在第 5 断面表现的最为突出，其拱部、肩部及腰部的应变变化为 $-250 \sim 100 \mu\epsilon$ ；在第 6 次测量中，第 4 断面右侧腰部纵向的应变变化最大，降至 $-600 \mu\epsilon$ ，需引起关注；而第 1, 10 断面各部位的应变波动幅度不大，分别分布在 $-80 \sim 20 \mu\epsilon$ 和 $-70 \sim 10 \mu\epsilon$ 。在后 5 次测量中，4 个断面各个监测部位的应变变化较小，曲线总体较平缓，说明隧道二次衬砌结构已

开始向稳定的趋势发展。从整体上看，第 1 和 5 断面的应变变化相对较稳定，变化量分别在 $-25 \sim 90 \mu \varepsilon$ 和 $25 \sim 50 \mu \varepsilon$ ；第 4 断面的关注部位的应变在前期的大幅波动后，也逐步回升，但仍需要在后期的监测中观察其走势，而该断面的其余监测部位处于良性发展阶段；第 10 断面在第 10 次监测中仍有小范围的波动，但此后也近于稳定。

4、结 论

(1) 为解决 FBG 的波长漂移对应变与温度的交叉敏感问题，提出相应的温度补偿技术，24h 连续监测表明，1 d 内的温度变化对温度传感系统的 Bragg 波长变化影响不大。

(2) 通过对隧道进行 8 个月的定期监测表明，雨季时隧道断面的应变变化波动相对较大，而干季时应变趋于平稳。其中第 4 断面右侧腰部纵向的应变变化不稳定，监测期间最大值近 $-600 \mu \varepsilon$ ，这一现象值得注意，并成为以后的监测重点，其余断面被监测部位的应变前期有小的波动，后期基本保持稳定，说明隧道二次衬砌结构逐渐稳定。

(3) 本文提出的隧道 FBG 传感器铺设方案是成功的，监测期间传感光纤线路良好，无断裂事故发生；传感器的存活率很高，工作正常；整个监测系统长期稳定性好。监测结果表明，FBG 传感技术可比较真实地得到隧道的应变分布，将其应用于隧道应变监测中是可行有效的。随着这项技术的不断成熟和发展，其在岩土工程监测领域将会有更为广阔的应用前景。