

中国工程建设协会标准

光纤光栅振动测试及传感网络技术规程

**Specification for technologies of vibration measurement
and sensing network based on fiber grating sensors**

(征求意见稿)

前言

本规程是根据中国工程建设标准化协会《关于印发《2014年第一批工程建设协会标准制订、修订计划》的通知》（建标协字[2014]127号）的要求而制订，在编制过程中，编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考国内外有关标准，并广泛征求意见，最后经审查定稿。

光纤光栅传感器因其动态测试精度高、稳定性好等优点而备受科研界和工程界的关注，尤其是近十多年来在点式以及点分布光纤传感技术基础上发展的长标距以及区域分布光纤传感技术具有充分反映结构微宏观特性，结构损伤区域全覆盖能力，从而适用于结构状态参数、损伤及荷载全面识别。同时，基于结构区域分布应变的长标距（宏观）应变模态分析既能精确捕捉结构早期局部损伤，又能精确反映结构整体特性，突破了加速度模态分析体系很难反映结构局部特性的瓶颈。这些技术在土木工程的振动测试中已取得大量应用，然而至今仍缺乏一个光纤光栅振动测试及相应的传感网络技术的规程，希望通过本规程的制订，规范用于振动测试的光纤光栅传感器、解调仪、结构状态参数与损伤识别及相应的传感网络。规程的主要特点在于：（一）针对点式、长标距和区域分布的新型光纤传感技术；（二）系统性强，涵盖传感器、解调仪、动力方法、传感网络。

本规程主要技术内容是：总则、术语和符号、基本规定、光纤光栅应变传感器性能检测和技术要求、光纤光栅应变分析仪技术要求、光纤光栅振动测试的施工、验收和维护、基于光纤光栅振动测试数据的结构状态参数计算及损伤识别、传感器网络采集、传输和控制、传感器网络组网和系统构建。

根据原国家计委标〔1986〕1649号文《关于请中国工程建设标准化委员会负责组织推荐性工程建设标准试点工作的通知》的要求，现推荐给工程建设、设计、施工等使用单位及工程技术人员采用。

本规程由中国工程建设标准化协会归口管理，由东南大学（南京市四牌楼2号逸夫建筑馆711，邮政编码：210096）负责具体技术内容的解释。在执行过程中如发现需要修改和补充之处，请将意见和资料邮寄解释单位，以供今后修订时参考。

本规程主编单位：东南大学

本规程参编单位：哈尔滨工业大学、大连理工大学、江苏交通科学研究院、北京特希达科技有限公司、智信科技南通有限公司、江苏绿材谷新材料科技发展有限公司

主编：吴智深

副主编：李惠、徐赵东

主要起草人员（按姓氏笔画排序）：万春风、方达、孙安、李惠、吴智深、张宇峰、张建、杨才千、杨书仁、周智、洪万、徐赵东、唐永圣、黄璜、谢朝晖

目 次

1 总则

2 术语和符号

2.1 术语

2.2 符号

3 基本规定

3.1 基本要求

3.2 适用范围

4 光纤光栅应变传感器性能检测和技术要求

4.1 一般规定

4.2 点式传感器

4.3 长标距传感器

4.4 区域分布式传感技术

4.5 标志、包装、运输与存放

5 光纤光栅应变分析仪技术要求

5.1 一般规定

5.2 技术要求

5.3 使用和维护

6 光纤光栅振动测试的施工、验收和维护

6.1 一般规定

6.2 进场验收

6.3 施工安装要求

6.4 施工检验和质量验收

6.5 使用和维护

7 基于光纤光栅振动测试数据的结构状态参数计算及损伤识别

7.1 一般规定

7.2 自振频率

7.3 阻尼

7.4 振型（应变型、位移型）

7.5 挠度和变形

7.6 倾角

7.7 损伤（裂缝等）

8 传感器网络采集、传输和控制

8.1 一般规定

8.2 数据同步采集和控制

8.3 数据存储、处理和显示

9 传感器网络组网和系统构建

9.1 一般规定

9.2 数据结构和格式

9.3 数据通信测试方法

9.4 应用管理

本规程用词用语说明

引用标准名录

附：条文说明

1 总 则

1.01为了规范光纤光栅传感技术在基础设施健康监测系统中的应用，提高其使用效率及关于光纤光栅的结构健康监测系统设计、施工和维护管理水平，特制定本规程。

1.02本规程适用于各类土木结构的光纤光栅振动测试（点式、长标距、区域传感）及与光纤光栅振动测试技术相对应的传感网络构建，内容涵盖传感器、解调仪、动力参数与损伤识别及相应的传感网络。

1.03光纤光栅振动测试及传感网络监测系统应满足用户及功能需求、安全可靠、技术先进、经济合理、维护便利。

1.04各种形式的光纤光栅传感器、解调系统及传感网络系统应有良好的保护措施、可维护性和可更换性，并根据实际需要保证其设计使用寿命和足够的耐久性。

1.05光纤光栅振动方面的测试、施工、安装、维护、参数分析及传感网络构建，除应符合本规程要求外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 光纤光栅传感技术 Fiber Bragg Grating Sensing Technique

是以光纤光栅作为敏感元件,通过外场作用下光纤光栅中心波长变化来获取或转换环境信息的一类光学传感技术,包括光纤光栅传感器及其解调设备。

2.1.2 结构健康监测系统 Structural Health Monitoring System

一种集传感、数据采集与传输、结构参数与损伤识别、性能评估与预测技术为一体的自动化、信息化监测系统,主要由传感器及采集仪等硬件系统和数据分析及结构分析等软件系统构成,通过对结构进行连续性(包括实时或各频度)测试,实现对结构当前及未来服役状况及潜在风险进行分析和评估。

2.1.3 光纤 Fiber Optic

即光导纤维,由玻璃或塑料制成,其典型结构是一种细长多层同轴圆柱形实体复合纤维,优良的光传导载体。

2.1.4 标距长度 Gauge Length

指传感器能够进行有效测量部分的长度。

2.1.5 点式传感器 Point Sensor

测量结果只能反映被测体局部某点被测物理量的短标距传感器。

2.1.6 长标距传感器 Long Gauge Sensor

测量结果能够反映被测体一定特征区域被测物理量的长测量标距传感器。

2.1.7 分布式传感 Distributed Sensor

能够测量被测体被测物理量沿空间分布的传感技术,根据被测物理量在空间的分布情况可以分为准分布式光纤传感、分布式光纤传感和区域分布式光纤传感。

2.1.8 传感器优化布置 Sensor Placement Optimization

利用尽可能少的传感器,将其布置在结构的适当位置,使其能够达到某一特定的监测目标。

2.1.9 点式准分布 Point Quasi Distribution

为达到某一特定测量目标, 将点式传感器按照特定的密度分布布设在结构的适当位置。

2.1.10 长标距准分布 Long Gauge Quasi Distribution

为达到某一特定测量目标, 将长标距传感器按照特定密度分布布设在结构的适当位置。

2.1.11 区域分布式传感 Areas Sensing Technique

为实现大型工程结构的早期损伤和全面技术状况监测, 在对结构进行易损性分析的基础上将结构分为若干关键区域, 并在所划分的关键区域内采用长标距传感器串联进行连续分布监测的一种传感技术。

2.1.12 区域长标距分布布设 Zone Long Gauge Distribution

为达到某一特定测量目标, 将长标距传感器在结构的某些区域进行完全分布的布设方式。

2.1.13 全域长标距分布布设 Whole Zone Long Gauge Distribution

为达到某一特定测量目标, 将长标距传感器在结构上进行完全分布的一种布设方式。

2.1.14 振动测试 Vibration Measurement

通过传感器测量结构的振动反应 (如位移、速度、加速度、应变、内力、转角等)。

2.1.15 动力特性 Dynamic Characteristics

结构的固有振动特性, 如固有频率、阻尼比和振型 (模态)。

2.1.16 结构状态参数 Structural State Parameters

反映结构状态的静力参数 (曲率、挠度、转角、刚度) 和动力参数 (频率、振型、阻尼)。

2.1.17 损伤识别 Damage Identification

利用结构的响应数据来分析结构物理参数的变化, 进而识别结构损伤的过程。

2.1.18 参数识别 Parameters Identification

指根据所测到的结构应变、位移或其他参量建立模型推算结构状态参数的过程。

2.1.19 荷载识别 Load Identification

指根据所测到的结构应变、位移或其他参量建立模型推算结构荷载的过程。

2.1.20 模型修正 Model Upgrading

指依据相关测试结果，利用有效手段修正结构有限元模型参数，使所建立模型能反映结构真实状态。

2.1.21 累积疲劳损伤 Fatigue Damage Accumulation

结构在动力荷载作用下，由于疲劳而产生的损伤，且损伤程度会随着动力荷载作用次数的增加而逐渐累积增加。

2.1.22 结构可靠度 Structural Reliability

在规定的条件和条件下，工程结构完成预定功能的概率。

2.1.23 施工监测 Construction Monitoring

体现结构设计思路、保证施工过程的安全且为施工控制提供数据的一种手段。

2.1.24 运营监测 Operation Monitoring

为保障被监测对象在运营期间的安全，对其进行监测和提供数据的一种手段。

2.1.25 连续监测 Continuous Monitoring

以连续或触发控制方式进行的监测。

2.1.26 长期监测 Long-term Monitoring

在一段较长的时间或在被监测对象整个剩余寿命期间进行的监测。

2.1.27 在线监测 Online Monitoring

通过安装在工程结构上的传感系统对被监测对象的状态进行连续自动监测、数据处理并上传至用户端的一种监测方式。

2.1.28 监测频度 Monitoring Frequency

指单位周期内对被监测对象测试的次数。

2.1.29 性能评估 Performance Assessment

根据结构监（检）测数据和书面材料，对结构的性能状态水平进行分析和评价的活动。

2.1.30 使用性能 Serviceability

结构能够完成预期功能但不使人们产生不愉快的特性。

2.1.31 安全性能 Safety Performance

在施工和运营阶段结构本身的安全特性。

2.1.32 安全评估 Safety Assessment

通过各种可能的测试手段，分析结构当前的工作状态，并与其临界失效状态进行比较，评价其安全等级。

2.1.33 预警 Early-Warning

在危险发生前，根据结构监测、损伤诊断和安全评定结果，向相关部门发出紧急（警告）信号的过程。

2.1.34 维护 Maintenance

为保持工程结构应有的性能而进行的例行检查和修复活动。

2.1.35 耐久性 Durability

结构抵抗自身和自然环境双重因素长期破坏作用的能力，即保证其经久耐用的能力。

2.1.36 寿命预测 Life Prediction

通过模型和所测数据对工程结构的安全存在期限的评估和预测。

2.1.37 数据库 Database

长期储存在计算机内的、有组织的、可共享的数据集合。

2.1.38 集中采集 Centralized Data Collection

数据采集设备集中且数据采集统一的一种数据采集方式。

2.1.39 分散采集 Discrete Data Collection

数据采集设备分散且数据采集不统一的一种数据采集方式。

2.1.40 混合采集 Hybrid Data Collection

数据采集设备包含集中式和分散式的一种数据采集方式。

2.1.41 传感网络 Sensing Network

由传感系统、传输系统及数据存储管理与分析系统组成的网络。

2.1.42 组网 Network Construction

由若干个散在的传感系统通过接入网形成传感网络。

2.1.43 有线传输 Wire Transmission

在两个通信设备之间通过物理连接，将信号从一方传输到另一方的技术。

2.1.44 无线传输 Wireless Transmission

在两个通信设备之间不使用任何物理连接，而是通过空间传输的一种技术。

2.1.45 同步传输 Synchronous Transmission

发送方和接收方的时钟是统一的、字符与字符间的传输是同步无间隔的数据传输方式。

2.1.46 异步传输 Asynchronous Transmission

不要求发送方和接收方的时钟完全一样, 字符与字符间的传输是异步的数据传输方式。

2.1.47 结构群 Structure Group

为实现某项功能, 由多个相对独立的结构组成的结构集合, 这些结构可以为同一类型的结构, 也可分属不同类型的结构。

2.1.48 连续结构群 Continuous Structure Group

由同一大型基础设施上多个相对独立且在空间上连续分布的结构集合。

2.1.49 分散结构群 Distributed Structure Group

由空间上分散且相对独立的结构组成的结构集合。

2.2 符号

GF ——传感器灵敏度系数；

OF ——Optic fiber；

SF ——单模光纤；

MF ——多模光纤；

FBG ——光纤布拉格光栅；

SNR ——信噪比；

MAC ——模态保证准则矩阵的第 (i, j) 个元素；

T ——矩阵的转置；

S ——模态矩阵的奇异值比；

$1s$ ——模态矩阵的最大奇异值；

ms ——模态矩阵的最小奇异值；

ϕ ——曲率；

ε ——应变；

γ ——光频率；

λ ——波长；

θ ——倾角；

ψ ——振型（模态）；

ζ ——阻尼比

ω_n ——固有频率

K ——刚度

D_m ——监测值

P_{D_m} ——监测值的合理值

I_m ——基准时点的监测值

I_c ——基准时点的状态计算值；

n ——应力循环次数

N ——疲劳寿命

MMSV——长标距应变模态向量

β_i ——损伤识别指标

F_{ii}^ε ——损伤识别向量

$\bar{\delta}_{ir}$ ——质量归一化第*i*单元的*r*阶模态应变

N——结构内力

P——合理值

[*I*]——阈值

I_m——基准时点监测值

I_c——基准时点状态计算值

D_m——监测值

D_{mb}——之前监测值

D_{cb}——之前状态对应计算值

M——损伤度

3 基本规定

3.1 基本要求

3.1.1 基于光纤光栅传感的基础设施结构健康监测系统设计应根据监测目的、监测对象及监测项目的特点、设计要求、精度要求、场地条件和当地工程经验等综合确定，并应经济合理、维护方便。

3.1.2 光纤光栅传感器的应变测试要考虑温度补偿，封装和粘贴要保证光纤光栅传感器性能稳定可靠、抗干扰能力强、耐久性好。

3.1.3 光纤光栅传感器、应变分析仪和组网元器件应满足精度、量程和耐久性要求，并应稳定、可靠，监测过程中应定期进行监测仪器及设备的维护、保养和校准。

3.1.4 光纤光栅振动测试及传感网络的硬件应具有可维护性、可更换性，软件应具有兼容性、可扩展性、易维护性，且监测系统软件应与硬件相匹配。

3.1.5 在制定光纤光栅传感器布设方案时，应根据监测目的、结构受力形式、经济造价对传感器进行优化布设。

3.1.6 监测系统在实施前应结合业主、设计方和施工方的意见确定实施方案，且不能对交通基础设施造成破坏。

3.1.7 传感网络构建时应根据监测目的和监测内容合理设计，数据传输应结合现场条件选择有线或无线传输方式。

3.1.8 传感网络数据库设计应遵循数据库系统的可靠性、先进性、开放性、可扩展性、标准化和经济性的基本原则。

3.2 适用范围

3.2.1 点式、长标距、区域分布式光纤光栅传感技术可用于各类建筑结构和桥梁结构在动力作用下的应变测试。

3.2.2 本规程所规定的传感网络的构建及组网是针对于点式、长标距、区域分布式光纤光栅传感测试数据。

3.2.3 对光纤光栅传感器及分析仪所采集的数据进行降噪和滤波等预处理后，可对结构状态参数（动力特性、荷载、变形、潜在损伤等）进行识别，本规程的识别的方法主要针对于光纤光栅传感器的测试数据。

4 光纤光栅应变传感器性能检测和技术要求

4.1 一般规定

4.1.1 测量范围：本章规定的光纤光栅应变传感器的选择应满足正常使用、量程及使用精度要求。光纤光栅应变传感器应具有承受测量范围上限值 1.2 倍的形变能力。承受测量范围应根据现行国家标准《传感器主要静态性能指标计算方法》GB/T18459 确定。

4.1.2 精度及稳定性：光纤光栅应变传感器及其采集装置应有良好的测量稳定性和重复性。当变形恢复至小于满量程形变后，其外观及主要性能应符合本标准 4.2 和 4.3 的规定。对于长期测量或健康监测，传感器需要有优良的长期耐久和传感稳定性。传感器及其部件的使用寿命要求应符合本标准 4.1.5 的规定。

4.1.3 分辨率：指传感器可测量的输入信号最小变化量，传感器的分辨率应满足被测物理量的最小变化值。分辨率应根据现行国家标准《传感器主要静态性能指标计算方法》GB/T18459 确定。

4.1.4 模数和带宽：在满足测量和信号传输的条件下，优先选用低模数的光纤，降低光纤的损耗，提高光纤的传感稳定性。根据测量需求，选择有一定的带宽、适宜材料的光纤及模数尽量降低色散。

4.1.5 耐久性：1) 对于长期监测系统，所选传感元器件应具有足够的寿命及耐久性，符合国家相关规定；可更换元件寿命宜 5 年以上，重要、难以更换的元件寿命宜 20 年以上；如有特殊需求的，根据需求和技术水平设计。2) 用于长期健康监测时光纤传感器应具备优良的疲劳寿命，宜不小于 2×10^6 次。3) 具备优良的抗紫外线老化、抗冻融、抗湿热老化及特殊环境下的抗酸碱盐侵蚀等性能。4) 对于短期监测系统，应根据实际需求，选择和设计传感元器件的寿命及耐久性能。

4.2 点式传感器

4.2.1 点式光纤光栅应变传感器，相对于被测结构或反映结构被测物理量的特征尺度可视为“点”，标距长度一般小于 10mm，如图 4-1 (a) 所示。点式光纤光栅应变传感器，只能反映被测结构局部或某点的应变、温度、或加速度等物理量变化。

4.2.2 点式准分布，为了达到某一特定监测目标，将点式传感器按照特定的密度分布布设在结构的适当位置，并用一根或一组光纤串联，如图 4-1 (b) 所示。

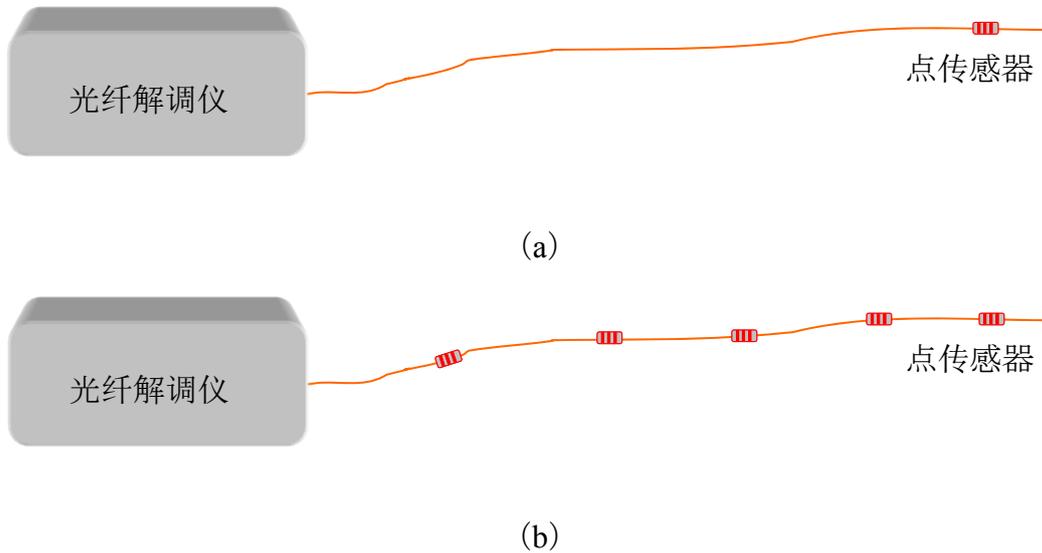


图 4-1 点式光纤传感器及点式传感器准分布布设

4.2.3 应变及温度传感。应变、温度与中心波长的变化应按式 (4-1) 计算。其中， λ_b 为中心波长， n 为纤芯有效折射率， Λ 为折射率调制周期， $\Delta\lambda_b$ 为反射光中心波长变化量， $\Delta\varepsilon$ 、 ΔT 为应变，温度变化量， P_ε 、 α_f 、 ξ 分别为光纤的有效弹光系数，热膨胀系数和热光系数。

$$\Delta\lambda_b = (1 - P_\varepsilon) \cdot \Delta\varepsilon \cdot \lambda_b + (\alpha_f + \xi) \cdot \Delta T \quad (4-1)$$

4.2.4 加速度传感。加速度测量系统，包括加速度传感器，光纤解调系统以及数据动态分析系统，通过傅里叶变化等手段获得系统的加速度。种类划分，常用于结构加速度监测的光纤加速度计有光弹效应加速度计、光波导加速度计、光干涉

型加速度计；其中，最适宜用于交通工程结构加速度监测的为 FBG 光传感系统。安装方法，用结构胶将光纤加速度传感器牢固粘贴在结构上，同时采用螺栓锚固的方式牢固固定。性能需求，温度范围-20-50℃，测量频率不小于 100Hz，测量范围 $\pm 20\text{m/s}^2$ ，分辨率 0.01% F.S.。

4.2.5 封装保护。在交通基础设施上长期测量时，需对 FBG 传感器进行封装，封装锚固段的长度应大于有效粘结滑移长度，封装结构宜采用 FRP 复合材料、不锈钢或其他一些高耐久封装结构形式。

4.2.6 适宜测试对象。交通基础设施工程结构中均质构件，如钢桁架桥梁的钢构件、悬索桥中的钢悬索、斜拉桥的钢拉索等；或者混凝土的局部应变以及钢筋混凝土结构中的钢筋应力应变、索力、土压力、腐蚀与结构挠度等。

4.3 长标距传感器

4.3.1 一般规定

- 1 标距长度应大于 10cm，相对于被测结构被测特征物理量的尺度范围不能视为“点”，如图 4-2 所示。
- 2 应反映被测结构一定区域或特征尺度范围内的物理量变化，适宜大型交通基础设施工程结构，特别是混凝土工程结构。
- 3 能准确有效反映被测结构特征区域的物理量，应在任何安装形式下均能形成标距段均匀应变场和长标距传感特性。
- 4 长标距准分布，为实现大型结构全面监测，应将长标距传感器按照特定密度分布布设在结构的适当位置，如图 4-2 (b)；适宜测量对象，各类交通基础设施的长距离大范围动静态监测与检测，特别是大跨混凝土结构。

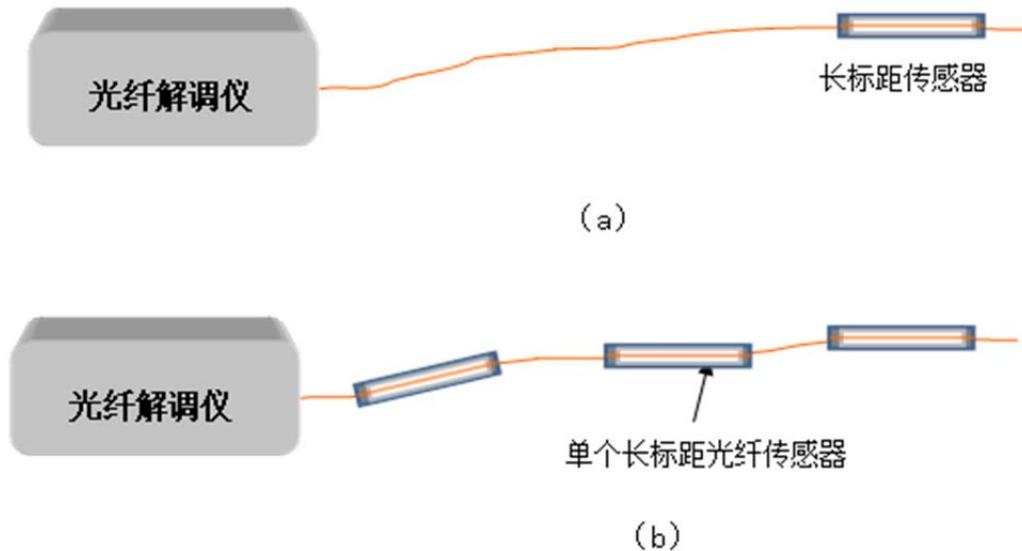


图 4-2 长标距传感器及长标距准分布布

4.3.2 长标距 FBG 传感器

- 1) 长标距封装。应采用高耐久性的材料对 FBG 传感器进行长标距化封装，封装后在标距范围内形成均匀的应变场，如图 4-3 所示；根据工况条件，

标距长度应在 10cm-200cm 范围内选定。

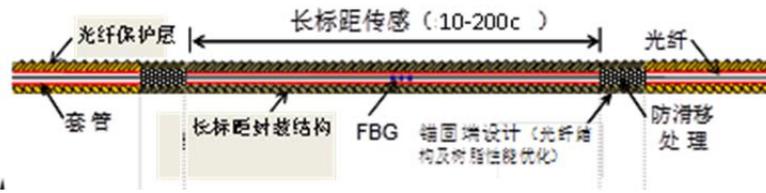


图 4-3 长标距 FBG 光纤传感器设计

2) 长标距封装原则。

- a) 标距长度应根据所需要测量的工况条件而定，所测量对象为非均质材料时标距长度宜大于所测量对象为均质材料时标距长度；
- b) 封装后长标距 FBG 传感器的线性度、精度及灵敏度应不低于封装前的相应传感性能；
- c) 长标距 FBG 传感器在标距长度范围内形成均匀应变场，标距范围内应变不均匀度小于 1.0%；
- d) 封装材料采用高耐久的纤维复合材料、不锈钢等材料封装，封装后传感器的耐久性和长期检测的稳定性应大幅提升，传感器的使用寿命应不低于 5 年，长期测量稳定（误差 $<0.8\%$ ）；
- e) 长标距封装后传感器应结实可靠，适合交通基础设施工程使用。

3) 多点准分布测量。

- a) 将两个长标距 FBG 传感器首尾进行熔接或通过法兰连接，连接后光强度衰减应小于 20dB；
- b) 应根据所测量物理量变化范围，设计好每个所串联 FBG 传感器的中心波长范围，避免测量过程中不同 FBG 传感器波长的重叠；
- c) 熔接时，严格控制接头处的光强损失，且对熔接端进行保护，避免熔接处弯折；
- d) 相邻两 FBG 传感器之间应留有足够的熔接冗余长度，宜不小于 25cm。

4) 长标距封装后性能要求。

a) 在长标距范围内形成稳定的应变场，测量数据稳定、可靠；

b) 抗噪音干扰能力强；

c) 通过长标距封装后，传感器的耐久性宜不低于 5 年，长期监测稳定性方面要求误差宜 $< 0.8\%F.S.$ 。

4.3.3 适宜检测对象。适合监（检）测交通基础设施中非均质构件或大尺度构件，如混凝土桥梁的混凝土梁、桥墩、混凝土的开裂及其裂缝发展，以及交通基础设施工程结构的平均应变、加速度、挠度、地基与基础的变形及滑移等。

4.4 区域分布式传感技术

4.4.1 一般规定

- 1) 传感标距长度应满足工况条件对标距长度的要求；
- 2) 多个长标距光纤传感器（段）应用光纤连接起来实现区域分布式传感，应降低接续损耗；
- 3) 区域分布式传感器分两种方式，长标距区域布设（图 4-4 (a)）和长标距全域布设（图 4-4 (b)）；
- 4) 适合长距离大范围的工程结构的在线监测和定期检测，特别是大型混凝土交通基础设施。

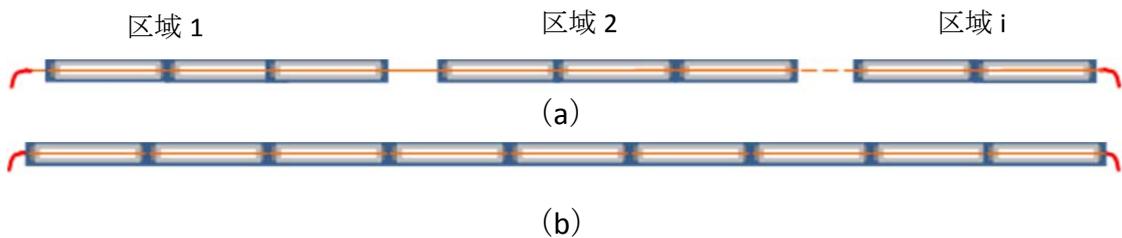


图 4-4 区域分布式布设

4.4.2 区域分布式传感技术

- 1) 标距长度。根据工况条件，标距长度应在 10cm-200cm 范围内选定。
- 2) 应变测量精度。长标距 FBG 传感技术的应变测量精度应满足本规程 4.2 的要求。
- 3) 测量速度。长标距 FBG 光纤传感技术宜进行动态或静态测量，长标距布里渊光纤传感器宜进行静态测量。
- 4) 分布方式。应在对结构采用易损性分析的基础上，确定关键区域，根据测量需要，选择长标距区域布设或长标距全域布设两种方式进行布设。由于交通工程结构的体量大、覆盖范围广，通常需要监测的部位比较长，对于关键区

域需要多个传感器分布布设，构成单个传感区域。对于确定了传感区域，在该区域全面粘贴长标距传感器，则结构出现的损伤能被区域分布的传感器准确识别，即为长标距区域布设。特殊情况下，对于某些重要或者复杂的交通工程结构，且在结构上出现损伤的概率差别不大，需根据监测目的对结构全域进行传感器布设，即采用长标距全域布设。

- 5) 适宜测量对象。交通基础设施的长距离大范围动静态监测与检测，特别是大跨混凝土结构。

4.5 标志、包装、运输与存放

4.5.1 传感器标志

- 1) 传感器型号及规格必须符合设计要求并有生产厂家的合格证；所有使用的传感器应配合传感器布设图进行标识；对于点式传感器布设方式的标识应包含布设位置的标识；对于区域分布式传感器的布设图应包含按传感器布设区域的标识，以及各个区域内传感器的布设标识并填写 4-1 光纤传感器现场标识表。

表 4-1 光纤传感器现场标识表

区域 编号	传感器 编号	参数记录				检验 员	备注
		初始波长	应变系数	温度系数	标距长度		

- 2) 传感器的引出光纤及其与主干光缆直接连接部位需进行醒目的标识，其连接位置以及布设条件，需在传感器布设图上标识并填写 4-2 光纤接头现场标识表。

表 4-2 光纤接头现场标识表

区域编号	接头数量	是否有现场标识	检验员	备注

- 3) 对于传感器安装过程中出现连接或熔接的情况，需在传感器布设图上标识，定期对该部位进行光损情况的抽检和调查。
- 4) 抽检和确认各传感器的传感性能，每个传感器都应有标定系数，抽取不少于 5%的传感器进行传感性能校核，如果抽检不合格则在同批次的产品中双倍加抽检验，如果双倍加抽检验仍不合格则做退货处理。

4.5.2 传感器包装应符合下列规定：

- 1) 包装层应包括硬质或半硬质的外壳、松散或软质充填材料和防潮层。
- 2) 包装层应采用不燃或难燃材料，其材质、规格及厚度等应符合设计要求。
- 3) 硬质或半硬质的外壳的粘贴应牢固、铺设应平整，且捆扎、粘贴应紧密，无滑动、松弛及断裂现象。
- 4) 硬质或半硬质外壳的拼接缝隙不应大于 5mm，并用粘结材料勾缝填满；纵缝应错开，外层的水平接缝应设在侧下方。
- 5) 松散或软质充填材料应按规定的密度压缩其体积，疏密应均匀。
- 6) 防潮层应紧密粘贴在松散或软质充填材料上，封闭良好，不得有虚粘、气泡、皱褶、裂缝等缺陷。
- 7) 防潮层的立管应由包装层的低端向高端敷设，环向搭接缝应朝向低端；纵向搭接缝应位于包装层的侧面，并顺水。
- 8) 传感器连接处及法兰部位的包装层结构应严密，且能单独拆卸并不得影响其操作功能。
- 9) 传感器的引出光纤及其与主干光缆直接连接部位需进行保护。
- 10) 传感器之间的光纤熔接接头需放置在传感器保护罩内或穿管保护。

- 11) 传感器串接链不用的尾端必须放置在传感器保护罩内，保持美观整洁。
- 12) 传感器引出的光纤尾纤的最小弯曲半径不得小于 5cm。
- 13) 光纤连接处必须进行可靠固定，保证光纤传输线路的长期稳定性。

4.5.3 传感器运输应符合 JB/T 9329-1999 的相关规定。

4.5.4 传感器的验收

- 1) 检查传感器的标识及包装是否完整；
- 2) 检查传感器的数量和传感性能是否符合出厂标准和设计要求；
- 3) 填写 4-3 光纤传感器进场验收表；

表 4-3 光纤传感器进场验收表

生产日期	型号/规格	数量/抽检数	检验记录		结论	检验员	备注
			外观	传感性能（灵敏度系数及稳定性等）			

4.5.5 传感器存放应符合下列规定：

- 1) 根据传感器数量等确定现场贮存位置和面积，不同类型传感器应分开放置，做好防火、防潮、防晒、防雨等保护措施；
- 2) 传感器贮存前，相关人员应清理现场并做好准备工作；
- 3) 传感器贮存后，相关人员应根据技术资料和传感器购买凭证做好记录工作；
- 4) 相关人员应对现场传感器有效标识，并注意保护标识；
- 5) 相关人员应定期对现场传感器进行检查，发现问题及时处理。

5 光纤光栅应变分析仪技术要求

5.1 一般规定

5.1.1 光纤光栅应变分析仪应满足下列要求：

- 1) 应满足第 4 章传感器测量要求的规定；
- 2) 生产企业通过质量管理体系认证，或产品获得由有资质的检测机构出具的检验报告；
- 3) 清楚地标明制造者名称、型号和系列，并在外壳上标明唯一编号；
- 4) 配有与光纤光栅应变分析仪型号和系列相符的使用说明书；
- 5) 要有与光纤光栅应变分析仪型号和系列相符，包括本章规定的产品的技术要求。

5.2 技术要求

5.2.1 光纤光栅应变分析仪的技术要求，应包括以下各项：

- 1) 外形尺寸。
- 2) 质量(在工作条件下)。
- 3) 电源类型。
- 4) 法兰接头型号。
- 5) 电池工作时间(新电池要在最大功耗情况下测量)。
- 6) 按照技术要求工作时，温度和电压[交流电和(或)电池]的范围，如需预热，应规定预热时间。
- 7) 当电池电压过低使光纤光栅应变分析仪性能超出技术要求时的指示方式。

- 8) 采样频率的档位和(或)可设置范围。
- 9) 各通道可检出的传感器中心波长和(或)允许的波长变化范围。
- 10) 提供信号监测的输出方式, 即有(或无)方式输出, 和(或)比例输出, 如有可能, 提供输出响应时间、线性、比例输出的最大输出能力和稳定性。有(或无)闸门阈值的准确度和回差及开关输出的保持时间。
- 11) 本地保存数据时, 提供所需的最大存储容量, 和当存储容量过低时的指示方式。

5.2.2 振动测试用的光纤光栅应变分析仪的性能, 宜符合如表 5-1 的要求

表 5-1 光纤光栅解调仪性能指标

光学指标			
光学通道数	1-128	波长变化范围	≥40nm
稳定性	5pm	重复性	2pm
应变精度	±(1.0-5.0)με	温度精度	±(0.5-1.5)°C
动态范围	25dB	扫描频率	(1-2000)Hz
光学接头	FC/APC		
电器特性			
电源供应	7-36VDC (含 100-240VAC)		
数据传输接口	以太网		
功率	(35-50) W		
机械特性			
工作温度	-20°C -50°C	工作湿度	< 80% (无凝结)
储存温度	-20°C -60°C	储存湿度	< 95% (无凝结)

5.3 使用和维护

5.3.1 将光纤传感器通过法兰接头接入光纤光栅应变分析仪的通道，把已安装分析操作系统的电脑连接到光纤光栅应变分析仪。

注：连接操作电脑前，宜检查光纤光栅应变分析仪的驱动是否正常安装，检查方法应满足制造者技术规范给出的规定。

5.3.2 运行光纤光栅应变分析仪，检查各通道内的传感器是否全部正确识别。对于实时数据的中心波长、变化幅度、采样时间、温度漂移的最大值重复进行检测，应满足本规程 5.2 和 6.2 的相关规定。

5.3.3 正式开始测试前，应预先测量 10 分钟以上的数据，检查保存的数据格式是否正确，检查是否有断点和数据丢失。

5.3.4 设定文件保存路径和文件名，设置前应检查磁盘存储空间是否足够，检查方法满足本规程 5.2 的相关规定。

5.3.5 光纤光栅应变分析仪应定期送到具有资质的计量检定机构检定，检定合格并在计量有效期内使用，一般每年至少检定一次。

6 光纤光栅振动测试的施工、验收和维护

6.1 一般规定

6.1.1 传感器安装工程施工质量控制应符合下列规定:

- 1) 光纤光栅应变传感器安装前应按本规范进行传感器进场验收,可按附录 A 表 A 记录。
- 2) 光纤光栅应变传感器安装的各分项工程应按企业标准进行质量控制,每个分项工程应有自检记录。

6.1.2 传感器安装工程质量验收应符合下列规定:

- 1) 参加安装工程施工和质量验收人员应具备相应的资格。
- 2) 承担有关安全性能检测的单位,必须具有相应资质。仪器设备应满足精度要求,并应在检定有效期内。
- 3) 分项工程质量验收均应在传感器安装单位自检合格的基础上进行。
- 4) 分项工程质量应分别按主控项目和一般项目检查验收。
- 5) 传感器包装工程应在传感器安装单位检查合格后,于包装前通知有关单位检查验收,并形成验收文件。

6.1.3 传感器使用和维护应符合下列规定:

- 1) 具有完善的验收标准、安装工艺及使用操作规程。
- 2) 具有健全的维护过程控制制度。

6.2 进场验收

主控项目

6.2.1 进场验收文件，必须包括下列资料：

- 1)传感器布设图；
- 2)传感器产品出厂合格证；
- 3)光缆导线、法兰连接头及 FBG 分析仪验收合格证书。

一般项目

6.2.2 进场验收文件，还应包括下列资料：

- 1)安装配件清单；
- 2)安装、使用维护说明书；
- 3)光纤传感器熔接和法兰连接说明书。

6.2.3 安装配件应与安装配件清单内容相符，应配备适当长度的光缆导线。

6.2.4 传感器外观不应存在明显的损坏。

6.3 施工安装要求

6.3.1 传感器安装工程应按照经审查合格的设计文件和经设计院审查批准的施工方案施工。

6.3.2 传感器连接工程施工前，对于各个布设点应采用相同材料和连接工艺，经有关各方确认后方可进行施工。对于周期性的数据采集应采用相同的数据格式进行记录。

6.3.3 传感器安装工程的施工作业环境和条件，应满足相关标准和施工工艺的要求。传感器安装和包装工程不宜在雨雪天气中露天施工。

6.4 施工检验和质量验收

6.4.1 外观检查

传感器安装是否平整，传感器连接处引线有无破坏等。

6.4.2 光路检查

将传感器某一通道的接头与激光笔连接，打开激光笔，观察该通道的尾端是否有亮光，有则光路通，无则仔细查找断路位置，然后进行光纤连接。

6.4.3 信号检测

将所有通道的接头与解调仪连接，查看各传感器的信号是否正常，如不正常，确定不正常传感器的位置，然后进行更换。

6.4.4 验收记录

填写验收记录附录表 A。

6.5 使用和维护

6.5.1 一般规定

- 1) 编制光纤传感系统的使用及维护计划
- 2) 定期对传感器的外观进行观察，每隔半年至一年对光纤传感器进行校准；
- 3) 光纤出现衰减严重或光路不同的情况，需对光纤及传感器进行修复或更换；
- 4) 光纤传感器的修复及更换以不影响其他传感器的正常监测为基础。

6.5.2 在使用传感器时，应根据监测目的进行具体布设，当存在多个监测目的时候，需能同时满足多个监测目标的需要。

- 1) 光纤传感器对于以损伤识别为监测目标的布置原则：宜在结构的关键杆件、关键区域进行区域分布式布设；
- 2) 光纤传感器对于以裂缝为监测目标的布置原则：对判断结构是否会开裂时，

传感器的布置原则同以损伤识别为监测目标的布置原则，对跟踪既有裂缝的发展时，传感器的布置原则应在已经开裂的部位跨越裂缝布置传感器；

- 3) 光纤传感器对于以变形为监测目标的布置原则：对于以变形为监测目标的布置原则应沿着结构长度方向以一定的间隔长度布置或全域分布式布设，同时在结构的关键截面的受拉区、受压区同时布置传感器，以获得关键截面的中和轴高度；
- 4) 光纤传感器对于以结构模态参数为监测目标的布置原则：根据所需考虑结构模态的阶数，恰当地确定测点位置和数量，应避免将测点布在模态节点位置。

6.5.3 在使用阶段振动测试宜采用实时监测方式，从正在使用的结构中实时获取应变数据并计算相关的结构状态参数。评估结构的工作状态和性能，识别可能发生的损伤和结构性能退化。对结构状态参数的计算方法，可参照本规程第 7 章的相关规定。

6.5.4 断裂光纤的修复

- 1) 确定光损严重或断裂破坏位置；
- 2) 将断裂处的两个端部的树脂涂料层剥除；
- 3) 选择光纤连接方式熔接或机械连接；
- 4) 光线切割和连接（参考上述）；
- 5) 对连接处进行封装和保护；
- 6) 对修复和更换做好记录和备案。

7 基于光纤光栅振动测试数据的结构状态参数计算及损伤识别

7.1 一般规定

7.1.1 结构状态参数计算及损伤识别均是基于光纤光栅的应变测试数据。

7.1.2 在反演结构状态参数及损伤识别的过程中,认为结构的当前状态是一种线性、时不变的稳定系统。

7.1.3 对于钢结构等均质结构,可采用基于点传感或长标距光纤传感器测试数据进行结构状态参数计算及损伤识别;对于混凝土结构等非均质的结构,宜采用长标距光纤传感器测试数据进行结构状态参数计算及损伤识别。

7.2 自振频率

7.2.1 结构的自振频率识别宜采用对光纤光栅应变时程数据的傅里叶变换的方法,即对光纤光栅应变时程数据进行傅里叶变换后得到动应变频谱,动应变频谱不同峰值处所对应的频率即为自振频率。

7.2.2 为避免反演的自振频率与结构的局部自振频率相混淆,宜采用 5 处以上的光纤光栅应变时程数据相对应的频域傅里叶谱,综合分析得到相对应的自振频率。

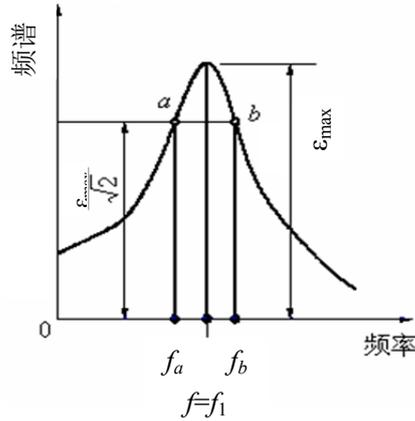
7.2.3 采用光纤光栅应变时程数据时应避开车辆荷载激励附近段的时程,避免反演的自振频率与激励自振频率相互干扰。

7.2.4 对于采用风荷载等随机激励获取自振频率时,应采用多次测量取均值,提高识别精度。

7.2.5 采用区域分布式光纤传感器反演自振频率时,需要考虑某些区域因损伤或裂缝导致该区域传感器的应变时程数据发生大的变化,从而导致反演的自振频率发生较大变化,如果区域传感器反演的自振频率相互误差超过 20%,应不考虑该区域传感器的反演结果。

7.3 阻尼

7.3.1 结构阻尼的识别可采用带宽法,即对光纤光栅应变时程数据进行傅里叶变换后得到动应变频谱,如下图,然后对动应变频谱图采取带宽法(式(7-1))计算阻尼比。



$$\zeta = \frac{f_b - f_a}{2f_1} \quad (7-1)$$

7.3.2 结构阻尼的识别也可采用自由振动衰减法,由光纤光栅应变时程数据测出结构的自由振动衰减曲线,按衰减曲线的应变振幅衰减快慢由(7-2)式计算出阻尼比。

$$\zeta \approx (\ln \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{n+m}}) / 2\pi m \quad (7-2)$$

式中, ε_n 为第 n 个应变振幅, ε_{n+m} 为经历 m 圈周期循环后的应变振幅。

7.3.3 为避免反演的阻尼比与结构的局部阻尼比相混淆,宜采用 5 处以上的光纤光栅应变时程数据计算出的阻尼比,综合分析得到相对应的阻尼比。

7.3.4 对于采用风荷载等随机激励获取阻尼比时,应采用多次测量取均值,提高识别精度。

7.3.5 采用区域分布式光纤传感器反演阻尼比时,需要考虑某些区域因损伤或裂缝导致该区域传感器的应变时程数据发生大的变化,从而导致反演的阻尼比发生较大变化,如果区域传感器反演的阻尼比相互误差超过 20%,应不考虑该区域传

传感器的反演结果。

7.4 振型（模态）

7.4.1 结构的应变振型（模态）识别宜通过对各监测单元应变时程实施傅里叶变换后，某一阶自振频率下不同位置处的幅值之间的比例关系即为结构的该阶应变模态振型。

7.4.2 结构曲率振型（模态）识别应基于曲率与应变之间存在的关系，即通过式（7-3）获得

$$\Phi = \{\Phi_1^r, \Phi_2^r, \dots, \Phi_i^r, \dots, \Phi_n^r\}^T = \left\{ \frac{\phi_1^r}{\phi_R^r}, \frac{\phi_2^r}{\phi_R^r}, \dots, \frac{\phi_i^r}{\phi_R^r}, \dots, \frac{\phi_n^r}{\phi_R^r} \right\}^T \quad (7-3)$$

式中， ϕ_i^r ——第 i 个单元的曲率在第 r 阶模态下的幅值， ϕ_R^r ——参考单元的曲率在第 r 阶模态下的幅值，其中， $\phi_i^r = \frac{\varepsilon_i^r}{y_i}$ 式中， y_i ——第 i 个单元的中和轴高度。

7.4.3 结构位移振型识别宜根据位移与应变之间存在的直接关系，可通过下述两种方式获得：

1) 采用积分法 $D^r = \iint_L \frac{\varepsilon^r}{y} dx dx$ 由应变计算第 r 阶位移振型。

2) 采用共轭梁法由应变计算第 r 阶位移振型。

7.4.4 采用区域分布式光纤传感器反演振型时，需要考虑某些区域因损伤或裂缝导致该区域传感器的应变时程数据发生大的变化，从而导致反演的振型在该区域发生较大变化，此时要根据实际情况进行振型平滑处理。

7.4.5 点应变反演的振型、长标距应变反演的振型和位移振型相互间存在转换关系，从精确性方面考虑，宜采用长标距应变反演的振型反推其他两种振型。

7.5 挠度和变形识别

7.5.1 曲率识别宜针对传感器的布设情况采用相应的方法：对于单元截面高度上

只布设一只传感器的情况，可采用纤维模型解析曲率；对于单元截面高度上布设两只或多只传感器的情况，宜通过应变直接计算曲率。

7.5.2 挠度识别宜采用下列方法：共轭梁法，将实梁的曲率分布作为等效荷载施加在虚梁上计算虚梁的弯矩分布，将其等效为实梁的挠度分布，共轭梁方法可参考附录 A；纤维模型有限元法，利用纤维模型解析结构的弯矩分布，将弯矩施加到有限元模型上可计算挠度。挠度识别还可采用二次积分等方法。

7.6 倾角

7.6.1 倾角识别可采用下列方法：直接测量计算法，利用长标距应变计算单元的相对倾角，将各单元的相对倾角求和即可计算倾角；共轭梁法，将实梁曲率分布作为等效荷载施加在虚梁上计算虚梁剪力分布，将其等效为实梁的倾角分布。

7.7 损伤（裂缝、腐蚀、支座退化等）

7.7.1 结构的裂缝或损伤可采用静力直接法，通过对比相关的阈值规定，比较实测的应变/曲率/挠度，判断损伤是否发生。裂缝的宽度可利用长标距光纤光栅传感器的应变测量值直接计算。

7.7.2 结构的裂缝或损伤可采用静力间接法，通过比较特定荷载形式下各单元的长标距光纤光栅传感器的应变比值，若比值发生显著变化，则对应位置或单元发生损伤。

7.7.3 结构的裂缝或损伤可采用动力指纹法，动力指纹主要有频率基指纹、应变模态、曲率模态、应变基能量、应变模态柔度法等，在这些方法中动力指纹均可采用基于光纤传感应变数据求得，应变模态损伤识别的方法可参考附录 B。

7.7.4 对于点式光纤传感器，宜采用频率基指纹、应变模态、应变模态柔度法等动力损伤识别方法。对于区域光纤传感器，宜采用应变基能量、应变模态、曲率模态、应变模态柔度法等动力损伤识别方法。

7.7.5 疲劳裂缝或损伤识别可采用统计应力谱法，结合材料的应力-寿命曲线和累计损伤机理进行损伤识别。

7.7.6 钢筋锈蚀识别可采用以下方法：纤维模型解析法，应变输入纤维模型计算

钢筋面积，分析钢筋的腐蚀程度；应力差法，比较钢筋和周围混凝土之间的应变差值，识别钢筋锈蚀。

7.7.7 支座老化/失效可通过动力参数（如结构固有频率、应变模态等）变化进行识别，动力参数可由光纤光栅应变数据求得。

7.7.8 支座的不均匀沉降可通过结构中不同位置处区域光纤传感器所测试的应变时程的变化（沉降前后）进行相关动力分析后确定。

7.8 荷载识别

7.8.1 荷载识别可采用下列方法：弯矩法，利用纤维模型法可计算单元的弯矩分布，利用弯矩和荷载之间的关系反算荷载；影响线面积法，将移动荷载通过结构时的应变时程面积与单位荷载下的影响线面积之间的比值就是移动荷载的大小。

8. 传感器网络数据采集、处理

8.1 一般规定

8.1.1 光纤传感器网络系统包括数据的采集、处理与传输的硬件设备与软件等，应按下表的内容及要求设计、开发和安装。

表 8-1 数据采集、处理与传输系统内容和要求

内容 子类目（系统）	应进行设计、开发和安装的内容		
	硬件（设备）	软件	工作机制
1、数据的采集	1) 设计与选型应保证及时获得高质量的数 据； 2) 硬件的耐久性和技术指标应满足国家相关规范、标准的要求。		包括：1) 采集模式；2) 采集频率； 3) 频次；4) 触发阈值；5) 分布关系
2、数据的处理			应能纠正或剔除异常数据，提高数据质量
3、数据通信与传输			应能高质量的传输数据，应具备传输质量 校验机制
4、数据存储管理	应具备标准化的读取、存储接口，应能保证监测数据的结构化、安全性、可靠性、共享性以及与应用软件的友好性等		

8.2 数据采集与控制

8.2.1 数据采集设备的分布应根据结构的特征、监测需求、传感器布设位置和数量、硬件设备条件等设计数据采集硬件（设备）和传感器之间的拓扑结构，选择采用集中采集，分散（分布式）采集，混合采集等分布方式。数据采集设备分布方式宜按下表设计采集设备的分布方式：

表 8-2 数据采集与传输子系统内容和要求

情形	情形一	情形二	备注
采集硬件分布	设备分散、测点多、传输距离远（一般 $>10\text{km}$ ）	设备集中、测点少、传输距离近（一般 $\leq 10\text{km}$ ）	★：表示一般宜采用
(1) 总体集中采集	按需/指定	★	中小单体结构整体、大跨径桥梁的特定部位和区域监测常用

(2) 总体分散采集	★	按需/指定	结构群、大跨径桥梁全区域监测常用
(3) 混合	★	按需/指定	
总体分散采集			
局部集中采集			

8.2.2 采集设备按照其采集的时间频度、频次和时间间隔等内容，应分为全时采集、定时采集、触发采集和混合采集四种模式，应依据监测系统需求和结构特点进行选择。

8.2.3 数据采集频率应能够反映被监测结构的行为和状态，并满足监测数据的应用条件。针对设置在被测结构的不同区域的传感器，宜视具体情况选择相同或不同数据采集频率。对于动态信号，数据的采集频率应在被测物理量预估最高频率的 2 倍以上。

8.2.4 数据采集的时间同步性包括：(1) 严格的同步采集、(2) 伪同步采集和 (3) 异步采集。数据采集应保证在任何采集模式下均进行足够时间长度的连续采集以符合监测需求。

表 8-3 数据采集时间同步性和时间长度的说明

时间的同步性		同步采集		(3) 异步采集	
		(1) 严格同步采集			(2) 伪同步采集
		各级采集设备的要求	数据分析的要求		
时间同步误差应满足	同结构同类型待测量	$\leq 0.1\text{ms}$		应满足监测需求	
	同结构不同类型待测量	$\leq 1\text{ms}$			
时间长度	任何采集模式都应保证符合监测需求的连续采集时间长度				
时间参考点说明	数据采集应选取共同的时间参考点。当测点较多而传感器数目不足时，可分批采集，但每批采集时应至少保留一个共同的时间参考点				
时间码体系	建议同时输出以“公元 1 年 1 月 1 日 1 分 1 秒”为“1”，以每隔一秒增量为“1”的时间码体系；如有必要采用更高精度，时间码精度应同时提高				

8.2.5 数据采集设备应与光纤传感器的性能相匹配，应满足监测系统对数据采集系统的性能、功能要求，应按下表所示针对采集的不同信号类型进行选型。

表 8-4 数据采集设备的性能和功能要求

信号类型	宜选用的设备种类	性能设计										可靠性设计				环境适应性设计						
		主要考察指标、规格（★为必要选项）										使用寿命	数据校准功能设计	抗电磁干扰设计（屏蔽、接地）	工作温度	防护功能（防护等级）	安全					
		接口标准	输入范围	采样频率	通道状况	数据容量	分辨率	精度	重复性	传输率	传输距离	在线模式	符合监测系统	自校准	定期外校准	串模干扰抑制	共模干扰抑制	符合监测系统	高低温保护	抗冲击和振动	防潮湿和盐雾	必要安全防护
光纤传感器光信号	光纤光栅解调仪		★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	系统具体要求	优先采用	按需采用	制	制	系统具体要求				

8.2.6 采集设备的安置场所应满足硬件的位置、安全、环境、电力和通讯的要求

8.2.7 采集设备安置场所的选择方案应包括：新设专用场所、利用已有场所和设置临时场所。应根据实际需求，按最有利于达到采集目标的原则（高效、高质量、可靠）设置采集设备安置场所。某些监测需求下，可临时设置采集设备场所。

8.2.8 采集硬件（设备）的防护应针对各类安置场所，进行相应的防护设计。对采集设备应进行符合国家标准的相应设计，并采取防护措施。

8.2.9 数据采集与控制软件的功能、设计、开发和安装应按下表的基本要求进行：

表 8-5 数据采集软件的设计内容

设计类目		基本要求	说明
(1) 连接和通信		应能连接到各级采集硬件	开启/关闭采集硬件，各级间可互相传送数据
		应能连接到各级传感器网络	正确收集传感器信号信息
		应能连接到本地/远程的数据分析软件和监测中心	正确传送采集数据和指令
(2) 电源管理		宜可开关上下级采集硬件的电源	当远程的采集硬件（设备）和上位机电源不支持软件开关时，可对远程的供电或配电系统设置软件控制开关
		宜可开关上下级数据分析终端和监测中心终端的电源	
		宜可开关上下级上位机的电源	
		宜可开关自带光电转换功能和发射功能的光纤传感器的电源	
(3) 质量检查	时间状态和同步	应可进行时钟校验	保证各级采集硬件数据同步性要求，能保证数据实时性
	网络状态	应可进行传输质量校验	保证各级硬件间通信准确和可靠
	传感器状态	应可检查传感器生存状态和校验数据状态	保证光纤传感网络正常工作
	各级采集设备状态	应可进行上下级本地/远程的各采集设备进行状态检查	保证采集硬件正常工作
	上位机状态	应可进行上下级本地/远程的上位机工作状态检查	保证软硬件环境的正常工作

(4) 软件性能	硬件数据接口适应性	宜可对上下级本地/远程的设备的硬件层应设计指令控制模式	应满足监测系统对采集设备自动化、批处理等层次的要求
		应对上下级本地/远程的设备数据接口进行匹配自适应	应开发针对各级设备的数据接口的自适应能力
	参数配置	应可对上下级本地/远程的各采集设备进行采集模式、阈值、频率等参数的设置	应符合监测系统对采集数据的具体要求
		各级采集硬件应可通过配置文件、配置信息数据库实现传感器和设备参数设置的共同配置	参数配置信息应可在各级设备间共享或同步配置，可方便的导入和导出
		参数设置应包括采集设备运行、关闭、以及阈值、定时等触发方式的设置	应能适应非全时采集方式的需求
		应可针对传感器进行适应性的传感器参数配置	应保证匹配传感器自身特征和布设特征并可进行适应性修改
		采集的传感器信号按参数配置进行 A/D 转换后其输出应符合监测系统要求	传感器配置应包括如类别、位置、标距、标定系数等
		采集的频率、分辨率、精度、范围等应符合要求	应符合监测系统对采集数据的具体要求
	实时绘图	应能绘制各传感器信号的实时曲线	应至少能绘制各传感器信号的时域曲线
	信号调理和预处理	应可对信号进行符合监测要求的调理、预处理	宜设置阈值法、平均值法以及其他滤波算法
(5) 存储管理	缓存管理	应设计合理的缓存机制，保证数据采集、预处理和传输的正常	应预留足够的容量和冗余度，并及时清理
	数据库管理	应对采集数据建立可共享数据库，本地/远程的各级上位机应可对数据进行存储、备份、导出、打印和管理等操作	
		应建立历史数据库，记录传感器设置、采集参数配置、信号数据、传感器状态、	

		设备状态、上位机状态、操作记录和报警记录等	
(6) 告警管理	传感器异常状态告警	应根据监测系统需求和评估, 预设合理的告警模式	可采用告警阈值法, 阈值应按系监测需求和评估设立, 并可根据实际情况进行调整, 同时应保证告警能送达用户
	信号数据异常告警		
	设备、上位机异常状态告警		
(7) 安全管理	权限管理	应对各项配置和操作进行权限设置, 应对本地/远程的各级访问进行鉴权	应防止越权操作造成监测系统的安全隐患
(8) 易用性	人机交互设计	应设计简便高效的人机交互方式, 且应对用户的操作有适当的提醒和容错机制	建议针对不同用户设计多版本的终端软件
	数据分析前处理功能	宜具备部分后端数据分析处理系统的功能, 或留出便利的数据接口	建议集成数据分析系统的如前处理、除错、粗略判断等功能
(9) 兼容性	硬件兼容性	应匹配监测系统所采用上位机的硬件条件	应按照对上位机配置要求最低化的原则设计
	软件兼容性	应匹配监测系统所采用上位机的软件环境	应保证与监测系统中的操作系统和应用软件匹配

8.3 数据处理

8.3.1 数据处理包括数据的预处理和后处理。信号采集之前应对含噪信号进行降噪滤波以及放大, 提高信噪比。进行动态监测所采集的数据, 应通过在数据采集设备自身硬件中、数据采集终端或数据分析处理终端的软硬件中加入滤波器的方式对信号进行滤波降噪处理, 滤波器的设置可以依据监测系统的现实条件而确定。进行数据处理应既有效过滤噪声, 减轻数据存储的负担, 又保留监测需要的信号数据。数据处理过程中应正确区分并处理粗差、系统误差、偶然误差等, 应正确判断异常数据是由真实信号还是监测系统自身异常引起, 剔除系统自身产生的异

常数据。

8.3.2 数据的处理应根据所布设的光纤传感器的种类、数量、信号特征及系统对信号处理的要求等具体条件，设计、开发或选用合适的信号处理设备，并应保持和后续的数据传输和存储管理等接口兼容。

表 8-6 数据采集的信号处理

处理要求 信号类型		信号隔离、消除			信号滤波、 降噪	信号放 大、衰减	信号通 道设置
电 信 号	解调仪光电 探测信号	自然干 扰	人为 干扰	不明 脉冲 干扰	应采用针 对性的滤 波器	放大器、 功率放 大器调 理	设置多 路通道 开关，实 现多路 巡回采 集
光 信 号	光纤传感器 输出光信号	设置噪声阈值 (Noise threshold)				光强放 大（增 益）器、 衰减器 调理	
	通信传输光 信号	信号强度量 级异常	不明的异 常趋势项 信号				

8.3.3 数据预处理和后处理设计应按照下表内容进行设计：

表 8-7 数据处理的设计内容

工作机制	处理方法	数据预处理										数据后处理				
		粗差、异常点	误差		滤波降噪					去趋势项	截取(断)	应根据数据类型进行专项处理				
			偶然误差	系统误差	平均值法	低通滤波	高通滤波	带通滤波	其他滤波			频谱分析	时域分析		频域分析	
													应根据数据时间先后进行时			
应判断异常点产生原因,剔除系统自身的粗差	宜用平均值法消除	宜修正仪器	静态监测	宜采用数据求平均值处理方法					应截选离散非时限信号的有限时长内的数据样本进行处理	应选择合适的窗函数、算法	宜利用自相关函数检验数据相关性,并检验随机噪声中的周期信号	宜利用互相关函数检验信号源的位置,并检验通道噪声干扰中的周期信号				
动态监测	应在各级硬件设备终端、上位机软件中设置数字滤波器					截断应不影响频谱分析的谱分析精度	对非平稳信号	宜采用时域、频域分析处理方法								
										对平稳信号	宜采用离散傅立叶变换的频谱分析方法					
硬件设计	应尽量设计和选用自带硬件层模拟滤波器的设备															
	集成数字滤波器	各级设备、终端及上位机的软件中应集成各类数字滤波器供选用														
	自动化设计	自动调用处理							手工操作处理							
	数据处理软件(子模块)应具备数据备份、清除、故障恢复等功能															
软件功能设计	告警功能	告警类型	告警说明	告警阈值设置原则			告警应对措施			补充说明						
		数据异常告警	应设计数据处理中的异常数	人工计算评估预设	软件(子模块)自动计算评估预设	历史数据预设,即检验数据保持和历史数据差值在一定范围	检查传感器状态	检查设备状态	检查传输系统	检查期间应尽量保证系统正常工作						
	系统运行异常告警	宜对系统自身状态														
	存储管理	应设计存储准则机制	应针对不同数据分析目的,设置各类分析阈值,对经过处理的数据还应加以存储准则判断,宜仅存储满足监测要求、具备分析价值的数													

9 传感网络组网和系统构建

9.1 一般性规定

9.1.1 传感网络系统包括传感网络组网，数据通信与传输系统，以及数据存储管理系统。

9.2 传感网络组网

9.2.1 传感网络应包含结构群间、各单体结构间、各级采集站（仪）间、采集站（仪）与数据处理终端间、各级处理终端与监测中心间、各网络通信设备间连接。

9.2.2 传感网络拓扑结构应结合结构群特点、距离远近、测点多少，按照通信领域的国际和国家标准进行网络设计和布设。针对单体结构、散在结构群以及连续结构群，传感网络宜结合监测需求以及现场条件选择采用环形结构、总线结构、星型结构、树型结构、网状结构或混合结构等网络拓扑结构。

9.2.3 针对单体结构的健康监测系统，宜采用局域网组网，对结构群等传输距离远、测点多的场合，宜采用城域网或广域网结合各个单体结构的局域网进行组网

9.2.4 网络传输系统的设计应坚持因地制宜的原则，并综合考虑数据传输距离、工程各阶段特征及工程现场地形条件、网络覆盖状况、已有的通信设施等因素，灵活选取合适的数据传输连接方式，包括有线传输和无线传输，在条件允许时应优先采用有线连接。当工程现场不具备有线传输条件，宜采用无线传输。

9.3 数据传输与通信

9.3.1 数据通信与传输的硬件应能保证监测系统各（级）组成部分间的物理连接，应提供足够的带宽和数据冗余度，保证传输的安全、可靠、高质量和便于维护，硬件物理连接按形式分为有线连接和无线连接。有线传输和无线传输的方案设计选择依据为：

表 9-1 传输方式设计与选择依据

考虑因素 情形		传输距离	传感器距离 衰减性能	运维便利性	工程现场实际情况			网络条件	
					工程进度	各阶段特征	现场地形条件	网络覆盖情况	已有通信设施
有条件时优先	有线连接	条件具备时应优先采用光纤/光缆进行有线连接★							
特别（1）		按需/被指定			强电磁 场条件	有无线 发射源 干扰	按需/ 被指定		
	有线连接 无线连接	应有足够屏蔽条件							
特别（2）	无线连接	按需/被指定	管养不便、交通不便、地形复杂、物理布线困难			按需/被指定			
特别（3）	无线连接	需临时组建传输网，仅临时使用							
混合使用有线/无线		★							
		按需/被指定							

★：代表建议采用，应按“因地制宜”原则综合考虑各现实条件进行有线/无线连接的选择

9.3.2 传输硬件的性能规格与指标、安置和防护、线路布设拓补设计时应满足监测系统具体需求，同时应符合以下国际和国家相关标准的规定。

表 9-2 传输硬件的指标、安置、防护和拓补的要求

类目		应满足监测需求	应符合相关标准
硬件性能（规格、指标）	设备（仪器）	应满足各级终端对数据传输的基本要求	应符合国际和国家相关标准。如：《国际综合布线标准》（EIA/TIA568）、《综合布线系统电气特性通用测试方法》（YD/T 1013-1999）、《数据中心的电信基础设施标准》（TIA-942）、《C·TEAM 数据中心布线系统的设计与施工技术白皮书》等
	线缆		
安置和防护	设备（仪器）	传输设备安置防护应符合本标准 7.2.1.4 场所和防护有关要求	
	线缆	线路的保护应满足相关国际和国家规范	
线路组网拓补		应满足监测系统各部分的拓补结构和数据传输要求	

9.3.3 数据通信与传输的软件设计、开发和安装应符合下表的基本要求：

表 9-3 通信与传输软件的基本要求

设计类目	基本要求	说明	
(1) 质量检查	传输帧、包校验和应答		
(2) 传输帧、包校验和应答	数据传输时应在发射端和接收端双边均进行数据校验	CRC 校验	应建立传输数据的帧、包结构体系, 数据按包发送, 包内含标识位、控制指令等信息, 软件应有校验-重发-补发机制
		奇偶校验	
(3) 软件性能	应可进行数据同步性检查 应符合传输工作机制指定的数据同步形式的要求		
(5) 缓存管理	应设计合理的缓存机制, 保证数据采集、预处理和传输的正常	对被传输数据应做寄存备份	最低寄存数据容量应保证传输故障发生时系统有足够清障时间
(6) 通信传输异常	能够识别判断通信传输异常, 可通过人工或自动方式排除传输异常		
(7) 安全管理	应根据监测系统需求和评估, 预设合理的告警模式	可自动清障、并补发寄存备份的数据, 并可按系统要求恢成非告警状态	
(9) 兼容性	能够与传感网络其它系统相兼容, 确保整个系统正常运行		

9.3.4 传感网络系统在结构群和各子结构间、同结构的各级通信与传输设备间、同级各子设备终端间的传输, 按传输同步的基准, 可分为基于信号的同步和基于时间的同步, 应依据监测系统需求和结构特点进行选择。

表 9-4 不同结构的传输同步方式选择依据

传输同步方式	结构群、特大、大跨径桥梁全区域等大范围监测	中小单体结构全区域, 或特大、大跨径桥梁的特定部位和区域等小范围监测
(1) 基于信号技术同步	按需/被指定	★
(2) 基于时间的同步	★	按需/被指定
(3) 两种同步结合使用	按需/被指定	
★: 表示一般宜采用		

注: 特大(跨径)桥、大(跨径)桥、中(跨径)桥、小(跨径)桥的分类标准详见《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60-2004)。

9.3.5 传输同步的速度宜根据各级设备、监测系统以及数据分析的要求选择。要

求高速传输的场合，宜采用严格同步传输，要求低速传输的场合，宜采用伪同步传输或异步传输。传输同步的速度选择依据如下表

表 9-5 高低速传输的时间同步性

时间的同步性	同步传输		(2) 伪同步传输	(3) 异步传输
	(1) 严格同步传输			
	各级设备的要求	数据分析的要求		
传输速度	高速传输		低速传输	

9.3.6 传输质量的控制应根据数据采集系统前端光纤传感器单位时间采集的数据量大小，结合设计的传输实际通信能力，对数据进行分包处理，以包、帧为单位实施传输。开发的相应数据传输软件在设计中应采用应答模式，并引入检校-重发-补发机制进行误码控制。

(1) 数据包设计宜按下列格式要求：

- ① 数据包应加入开始位及结束位；
- ② 在每组数据的开头和结束位置，应加入控制参数信息，定义请求发送包和文件结束包；
- ③ 在每个数据段前应加入标识信息；
- ④ 传输数据应进行校验，可采用奇偶校验或 CRC 校验（循环冗余校验），并将校验码加入数据段后的校验位；

(2) 应设计校验机制，在传送和接收两方都对数据进行确认；

(3) 当数据通道发生故障而中断，在故障排除后，数据传输系统应具有补发功能，将中断时间段内所有数据发送到接收端；

(4) 对于数据传输系统的应答、重发和补发模块应设置时限，避免因应答等待、重发及补发影响正常数据发送，宜利用数据通道空闲时段完成补发数据传输。

(5) 数据传输系统设计时应根据实际情况制定应对特殊突发情况的应急预案。

9.3.7 数据通信与传输系统设计时宜具备下列基本资料：

- (1) 数据传输系统工程施工场地的现状平面图，包括交通设施、高压架空线、

地下管线和地下构筑物的分布；

(2) 数据传输系统工程布设拓补图，包括结构群间、单体结构间、数据采集和传输硬件间的各拓补结构图，以及各级采集和传输设备（终端）的规格型号说明和线缆说明；

(3) 电力及有关传输设备的供应条件；

(4) 周围各建筑物的振动、噪声源等信息资料

；

(5) 数据传输系统工程总平面布置图，包括选用电气设备的确切布置位置、安装方法和线缆线路连接详情等；

(6) 传输系统工程基础平面图和剖面图；

9.4 数据存储与管理

9.4.1 数据库存储、管理和操作的对象是海量的数据，进行系统数据库设计时需要根据传感器数量、采样频率、监测时间等因素估计数据库的容量，保证数据有效的存储和使用，从整体上应考虑系统设计的合理性；

9.4.2 数据库系统在使用时能支持在线实时数据处理分析、离线数据处理分析以及两种工作方式的混合模式。

9.4.3 数据库数据装载应包括数据的筛选、输入、校验、转换和综合等主要步骤；

9.4.4 在对数据库系统进行选型时，宜考虑下列因素：1) 系统支持对海量数据的高效管理机制；2) 异常情况下的容错功能；3) 系统恢复功能；4) 系统应支持分布式数据管理功能，包括分布式数据存储、复制、数据透明访问等。

9.4.5 数据库应由软件、数据库和管理员组成。其软件应主要包括操作系统、应用程序以及数据库管理系统。

9.4.6 数据库管理功能应包括监测设备管理、监测信息管理、结构模型信息管理、评估分析信息管理、数据转储管理以及用户管理。

9.4.7 数据库的组成架构应与数据库的功能相对应，宜划分为监测设备数据库、监测信息数据库、结构模型信息数据库、评估分析信息数据库和用户数据库等。

9.4.8 数据库应建立在清晰、简明、标准化的数据元上，保证用户方便、快速、准确地检索到所需的信息。数据元是最小的不可再分的信息单位，是一类数据的

总称, 是对数据对象的抽象。

9.4.9 数据库数据的管理系统应处于安全的物理环境。对数据库管理系统资源的处理应限定在一些可控制的访问设备内, 防止未授权的访问。系统硬件和软件应受到保护以免未授权用户的物理修改。

9.4.10 在应用程序调试完成后, 应对数据库进行试运行操作, 在此期间应做好数据库的备份和恢复工作。数据库试运行包括功能测试和性能测试。

9.4.11 数据库运行一段时间后, 由于数据记录的不断增、删、改, 会使数据库的物理存储质量下降, 从而降低数据库存储空间的利用率和数据的存取效率, 使数据库性能下降; 数据库管理系统应可选自动或管理员人工方式对数据库进行重组, 或部分重组。同样, 随着数据库的应用环境的变化, 可能会导致实体或对象发生变化, 从而不得不适当调整数据库的模式, 数据库管理软件应具备自动或手工对数据库进行重新构造的功能。

附录 A 传感器施工分项工程质量检验评定表

分项工程名称：传感器安装与施工分项工程				所属监测系统名称：				所属（建设）项目：										
工程部位：						施工单位：				监理单位								
实 测 项 目	项次	检查项目	规定值或允许偏差	实测值或实测偏差值									质量评定					
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合格率 (%)	权 值	得 分
	1	传感器安装轴线偏差	≤5 度															
	2	光纤弯曲半径	≥5cm															
	3	光纤连接损耗	≤0.05dB/个															
	4	传感器与结构粘结	可靠粘结															
	5	光纤连接接头	钢管灌胶保护															
	6	结构表面	打磨、酒精清理															
	7	传感器引线	一定的冗余度															
	8	传感器引线 与结构固定	可靠规定															
	9	传感器施工后外观	美观整洁															
	10	解调仪读数	数据正常															
	合计																	
监 理 方 评 定 意 见																		
质 量 等 级 评 定	评分：质量等级：																	
检 验 单 位：			负责人：		检 测：		记 录：		复 核：		日期：							

本规程用词用语说明

- 1 为便于在执行本标准条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:
 - 1) 表示很严格,非这样做不可的用词:
正面词采用“必须”;
 - 2) 表示严格,在正常情况下均应这样做的用词:
正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”;
 - 3) 表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的用词:
正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;
 - 4) 表示有选择,在一定条件下可以这样做的用词,采用“可”。
- 2 本标准条文中指明应按其他有关标准、规范执行的写法为:“应符合……的规定”。

引用标准名录

- 1 《土木工程用光纤光栅应变传感器》 JG/T 422-2013
- 2 《土木工程用光纤光栅温度传感器》 JG/T 421-2013
- 3 《光纤传感器.总规范》 BS EN 61757-1-2012
- 4 《混凝土结构设计规范》 GB 50010-2010
- 5 《城市桥梁抗震设计规范》 CJJ 166-2011
- 6 《传感器主要静态性能指标计算方法》 GB/T18459
- 7 《工程测量规范》 GB 50026
- 8 《城市轨道交通工程测量规范》 GB 50308
- 9 《结构健康监测系统设计标准》 CECS 333:2012
- 10 《建筑基坑工程监测技术规范》 GB 50497
- 11 《国家一、二等水准测量规范》 GB/T 12897
- 12 《建筑变形测量规范》 JGJ 8
- 13 《建筑与桥梁结构监测技术规范》 GB 50982-2014
- 14 《综合布线系统工程设计规范》 GB 50311-2007
- 15 《工业自动化系统和集成产品数据表达与交换》 GB/T 16656-1998
- 16 《光缆总规范》 GB/T 7424-2008
- 17 《建筑与建筑群综合布线系统工程验收规范》 GB/T 50312-2000
- 18 《铁路轨道工程施工质量验收标准》 TB10413
- 19 《公路桥梁承载力检测评定规程》 JTC/T J21-2011
- 20 《天津市桥梁结构健康监测系统技术规程》 DB/T29-208-2011
- 21 《振动测试规程》 YBJ 21-1991