
附 件

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 Bragg Grating sensors**

本标准条文说明

目 录

1 总则.....	4
3 基本规定.....	6
4 光纤光栅应变传感器性能检测和技术要求.....	8
5 光纤光栅应变分析仪技术要求.....	19
6 光纤光栅振动测试的施工、验收和维护.....	21
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.....	24
8 传感器网络采集、传输和控制.....	错误!未定义书签。
9 传感器网络组网和系统构建.....	错误!未定义书签。
本规程用词用语说明.....	错误!未定义书签。
引用标准名录.....	错误!未定义书签。
附录 A 传感器施工分项工程质量检验评定表.....	错误!未定义书签。

制定说明

本标准制定过程中，编制组进行了广泛深入的调查研究，总结了国内外成熟的光纤传感和结构健康监测技术和实践经验，同时参考了美国、日本、加拿大等发达国家的光纤传感技术及相关健康监测系统建设工程实例和应用指南，制定了本标准。

为便于广大设计、施工、科研等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，《光纤光栅振动测试及传感网络技术规程》编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，对条文规定的目的、依据及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与规程正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

1 总则

1.01 近年来，光纤光栅传感技术在交通工程中应用越来越多。由于现代交通朝着重载、高速化方向发展，频繁承载和超载，加上自然环境与自然灾害的侵袭，以及交通事故等人为环境的影响，交通基础设施的材料会逐渐老化，结构会发生损伤甚至可能破坏。且随着使用年限的增长，桥梁损伤会逐渐增多，其程度也将越来越严重，运营过程中面临的安全问题更加严峻。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 本规程适用于各类建筑结构以及桥梁、隧道等交通基础设施，既可以用于短期检测也可以用于长期监测。

1.04 因为交通基础设施所处野外环境恶劣（紫外线、冻融、雨淋、疲劳作用等），所以光纤光栅振动测试元器件及传感网络监测系统必须具备足够的耐久性、长期稳定性能和良好的可更换性。

2 术语和符号

本章仅将本标准出现的、比较生疏的术语列出。术语的解释，其中有部分是行业公认的，大部分是概括性的含义。术语的英文名称不是标准化名称，仅供引用时参考。

3 基本规定

3.1 基本要求

3.1.1 光纤光栅振动测试及传感网络的设计应坚持长远规划的原则，结合测试对象的具体特点和场地条件，要根据结构物所处的环境、地理位置和地质条件、使用功能及重要性、结构型式、受力特点来确定监测目的、监测内容、监测的频率和持续时间。应做到目的明确，有的放矢、安全可靠、方案可行、技术先进、经济合理和便于维护。

3.1.3 光纤光栅振动测试及传感网络的设计，各种传感器的性能指标（包括测量精度、线性范围、量程、使用环境及使用寿命）要与监测目的和监测要求相匹配，严禁采用性能达不到监测要求的产品，也不宜采用高于监测要求太多的产品，避免出现重要的监测数据质量不高或丢失的现象，具体传感器选择方法详见第 4 章内容。同时，为了避免长期测量过程中的飘逸，应定期对仪器设备进行校正和维护。

3.1.4 光纤光栅振动测试及传感网络的硬件应有适当的保护措施和可维护性，并能保证设计使用寿命。特别是传感器及传输线缆应有适当的保护措施以避免遭到人为或环境的破坏。除特殊位置的传感器外，大部分重要的传感器、所有的数据子站和数据总站宜考虑到后期维护的可行性，方便维护人员检查。监测系统的使用寿命应以能达到监测目的为标准。施工监测系统宜贯穿整个施工期间；长期监测系统应至少可使用十年以上，并且宜与施工监测系统（若有）有良好的过渡衔接。

3.1.5 根据不同外部荷载形式（静载测试、锤击激励测试、环境振动激励测试、移动荷载激励下测试等），选择数据采集的方式（静态监测、动态监测）及结构性能评价指标，具体测试方法详见第 6 章内容。

3.1.7 传感子系统：在制定传感器布置方案时，应根据监测目的对传感器进行优化布置，具体优化布设方法详见第 8、9 章内容；

数据采集及传输子系统：应根据监测目的、监测内容选择合适的采样频率，数据传输应结合现场条件选择有线或无线传输方式。

数据存储与管理子系统：数据库设计是系统正常运行的重要基础，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、标准性和经济性的基本原则。

数据处理与分析子系统：对采集软件所采集的数据进行降噪和滤波等预处理；对结构状态参数（荷载、挠度、模态、刚度等）进行识别，计算结构损伤识别指标，对结构进行损伤定位和损伤定量。

结构性能评估子系统：根据数据处理与分析子系统的输出结果（参数识别、损伤识别结果），对结构进行性能评估（阈值报警、承载力评估、寿命预测等）。

健康监测系统设计中，数据采集及传输子系统，这部分工作宜集成到数据采集软件中完成；数据处理与分析子系统、结构性能评估子系统这部分工作宜集成到结构健康分析软件来完成。

结构健康监测分析软件应是整个系统软件的核心部分，应满足交通工程结构健康监测智能化、实时化、自动化、网络化的要求。应提供如下功能：

- 1 对结构材料参数、几何参数、传感器参数进行配置并能显示传感器的布置图；

- 2 对采集软件所采集的数据进行降噪和滤波等预处理；

- 3 对结构状态参数（荷载、挠度、模态、刚度等）进行识别，计算结构损伤识别指标，对结构进行损伤定位和损伤定量。

- 4 根据结构参数识别结果和损伤识别结果对结构进行性能评估（阈值预警、承载力计算、寿命预测等）。

3.2 适用范围

3.2.1 本规程中使用的点式、长标距、分布式光纤光栅传感器是适用于工程结构在动力作用下的应变测试。监测系统硬件的布置宜有一定的冗余度，应采用标准成熟的产品。基于光纤传感的交通工程结构健康监测系统软件应与硬件相匹配，且具有兼容性、可扩展性、易维护性和良好的用户使用性能。

3.2.3 基于光纤传感的交通工程结构健康系统的总体目标是通过直接或间接监测结构的局部和整体参数，来综合评价结构的动态性能、状态参数及损伤状况。监测的目的和功能包括但不限于：

- 1 验证结构设计、分析、试验时的假定和所采用的参数；
- 2 提高结构在施工过程中的安全性并使施工后的结构尽可能符合设计要求；
- 3 为结构的日常保养和管理提供建议；
- 4 在结构状态存在安全隐患时及时提供预警；
- 5 当发生意外或灾害后，为结构状态评估和处理提供实际数据；
- 6 为新方法新技术的发展及应用提供建议。

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 光纤光栅应变传感器的测量范围包括测量上限和下限；正常测量过程中测量值一般都会在量程范围内，但也可能受到振动或其他偶然因素的影响，瞬时测量值可能超过量程，因而需要仪器能够有承受超过量程的能力。

4.1.2 光纤及光纤传感器重量轻，安装比较方便，但光纤一般比较脆弱，需要有良好的保护，特别是连接用光纤和信号传输用光纤尽量能采用铠装光缆以提高其安全可靠性能，同时安装后的光纤传感器应该有好的后期维护。对于长期结构健康监测的光纤传感系统，通常需要有优良的长期性能，可更换元件的寿命 5 年以上，重要的或难以更换的元件寿命 20 年以上；另外，可以根据用户的需求以及技术现状设计传感的寿命；交通基础设施通常在振动和疲劳的环境下工作，因而有必要对用于长期健康监测光纤传感器的抗疲劳性能进行规定，一般应不小于 2×10^6 次；交通工程设施一般处于野外，需要有良好的抗紫外线老化、抗冻融、抗湿热老化及特殊环境下的抗酸碱盐侵蚀等性能。对于短期的结构健康监测，传感元器件的寿命和耐久性可以根据实际需要和工况条件选择和设计。

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。对于多个传感器同时测量情况下，需考虑传感器输出的幅值，以不出现波长重叠为原则，进行布设。

4.2 点式传感器

4.2.1 点式传感器一般指常规的光纤光栅传感器、电阻应变片等传感器，标距长度一般小于 10mm，只能反映结构的局部应变变化。

1 根据光纤光栅的传感原理，光纤光栅传感器同时对应变和温度敏感，进行应变测量时需要对温度影响进行补偿。

2 光纤光栅传感器的测量精度比较高，经过刻蚀光栅后光纤的强度、抗冲击性、耐久性等会有不同程度的降低，因而需要对其进行封装保护，提高传感器的力学性能。通常采用的封装材料不仅需要对其进行力学性能方面的保护和升级，同时还需要提高其耐久性。必须采用成熟的封装设计，封装后的光纤光栅传感器的传感性能不低于封装前的光纤光栅传感器的传感性能。

3 封装保护。在交通工程结构上长期测量时，需对光纤光栅传感器进行封装，封装结构可以采用 FRP 复合材料封装，也可采用不锈钢以及其他一些高耐久封装结构形式，封装结构对光纤光栅的传感性能不产生负影响。

4 法兰连接比较方便，易于装拆，但光损比较大，所以用法兰连接时为保障有足够的光强；用热熔接时，连接比较麻烦且熔接处容易脆断，但光损比较小，同一根光纤上可以串联多个传感器，通常多于 10 个光纤光栅传感器。当多个光纤光栅传感器进行串联时，应先设计好各传感器的中心波长、测量范围及传感器的数量。

5 点式光纤光栅传感器适合检测均质结构，同时可以根据结构的应变分布，采用共轭梁等方法获得结构的挠度。

6 光纤光栅光纤传感器可以用一根光纤串联起来进行分布式测量，串联传感器的数量由传感器的测量范围、解调仪的波长范围以及连接损耗等因素决定。

7 由于光纤光栅的诸多优点，其在交通工程结构上得到了广泛的应用。

4.2.2 对于监测要求不高的新建结构，为了满足结构局部的测量要求，可采用点式传感器布设。对于均质材料构成的结构，为了满足结构整体性能相关的结

构状态参数的识别，可采用点准分布式布设。

4.2.4 光纤加速度计与通常加速度计的结构类似，内部用弹簧支撑一重物，当其有加速度时便会产生向心力，用光纤传感器测出重物不同位置的光纤波长或其他物理量变化，从而得到光纤的拉伸及压缩应变，从而得到其加速度值。

4.2.5 封装保护。由于交通基础设施多处于露天和恶劣环境下，因而对传感器及仪器设备的耐久性和稳定性要求高，需要对传感器进行严格的封装保护。

4.2.6 光纤光栅传感器的精度高，也便于长标距化和高性能化封装，因而适合交通基础设施工程中的各类结构，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，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 FBG 传感器的长标距化封装材料种类很多，如纤维复合材料（FRP）、不锈钢、树脂或橡胶等，最好采用屈服或断裂变形大且具有良好耐久性的 FRP 复合材料、高性能树脂或橡胶等材料。

2 通常情况下，封装后传感器的传感性能会得到一定程度的提高，特别是耐久性和长期稳定性会得到大幅的提升。

3 长标距化封装的另一个关键点是锚固端端应采取必要的措施防止滑动。

4 尽管将一般的传感器加延长杆，并将两端固定在结构上也可以临时起到长标距传感器的作用，但并非真正意义的长标距传感器；长标距传感器无论怎么安装都能在传感标距内形成稳定的均匀应变场，且具有长期的测量稳定性。

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；上述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位移等。

5 相邻两长标距 FBG 传感器之间应留有足够的熔接冗余长度，应该不小于 25cm，以便传感器的熔接。

4.3.2 长标距光纤光栅传感器

1 由于工况环境，因而对封装材料要求时具有高耐久性，而且封装后能在标距范围内形成均匀应变场，适宜的标距长度一般为 10cm-200cm 之内，标距太长会引起标距内光纤的下垂和振动；小于 10cm 则长标距效应不明显。

2 长标距化封装的关键是在标距范围内形成能反映结构真实受力状态的均匀应变场。

4.4 区域分布式传感器

4.4.1 一般规定

1 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测量。

2 由于大型结构的损伤有一定的随机性，即具体损伤部位存在较大的不确定性，但很容易通过解析确定损伤的出现范围。因而，确定了损伤区域后，在该区域全面粘贴长标距传感器，即为分布式区域传感，则结构出现的损伤能被区域分布的传感器准确识别。

3 对于某些重要交通工程结构，且在结构上出现损伤的概率差别不大，则需要用长标距的传感器进行全面粘贴。

4.4.2 区域分布传感技术

1 传感器的布设需要考虑一个优化问题，优化本身是一个综合问题，需要考虑多种因素，主要体现在对传感系统的要求上，如准确性需要多高、稳定性需要多高，耐久性又需要多高，经济性是否可行等等，在优化设计的时候，需要根据实际的需求，进行合理优化，确定传感器的分布、种类、数量等。

2 本条文说明了传感器优化布设还需要考虑实际的现场条件，一个合适的布设方案必须要能满足现场布设条件和结构的一些其他规定。如有的结构不允许挖孔、开槽等行为，则传感器布设和布线的时候就不能再考虑开槽埋设、挖孔穿线等方式，即使这些微破损的布设方法被许可，在布设时应及时将破损处修补完好。

3 桥梁结构传感器布设：本小节说明了桥梁结构的监测需要充分结合桥梁结构自身的结构特点，在荷载下的响应特性以及易损性、失效模式等，根据不同的监测目的进行传感器布设方案设计并优化。本条文说明了传感器的优化布置应根据具体监测目的来确定，以下通过简支梁桥和连续梁桥来说明传感器优化布置方法，本示例考虑两类监测目的：（1）对桥梁进行损伤识别；（2）监测桥梁的整体特性（如挠度、结构动力特性等）。对于以损伤识别为监测目的的桥梁，宜通过在桥梁模型上施加车道荷载来确定结构的关键区域（即易损区域，一般选取内

力较大区域)并在此关键区域布设,虽然损伤发生是随机的且预先不知道损伤具体发生在哪个位置,但是通过结构分析和力学知识,损伤发生在具体的哪个区域一般可以预先通过计算分析获取,例如对于简支梁结构,损伤一般发生在跨中区域,对于连续梁结构,损伤一般发生在支座附近和跨中区域,所以只要在这些关键区域实现光纤应变传感器的分布式布置,不管损伤发生在这些关键区域的哪个点上,都能被所对应的传感器所覆盖,进而进行损伤识别;对于以获得结构整体特性为监测目的的桥梁,传感器宜间隔布置,以减少成本,在条件许可的情况下,也可采用区域或全域的分布式布设;对于上述两种监测目的都需要考虑的桥梁,则宜根据损伤识别和获得结构整体特性的要求分别确定传感器布置方式,然后进行合并。图 4-1 和图 4-2 分别为简支梁和连续梁的传感器优化布置流程。

1) 简支梁工况:

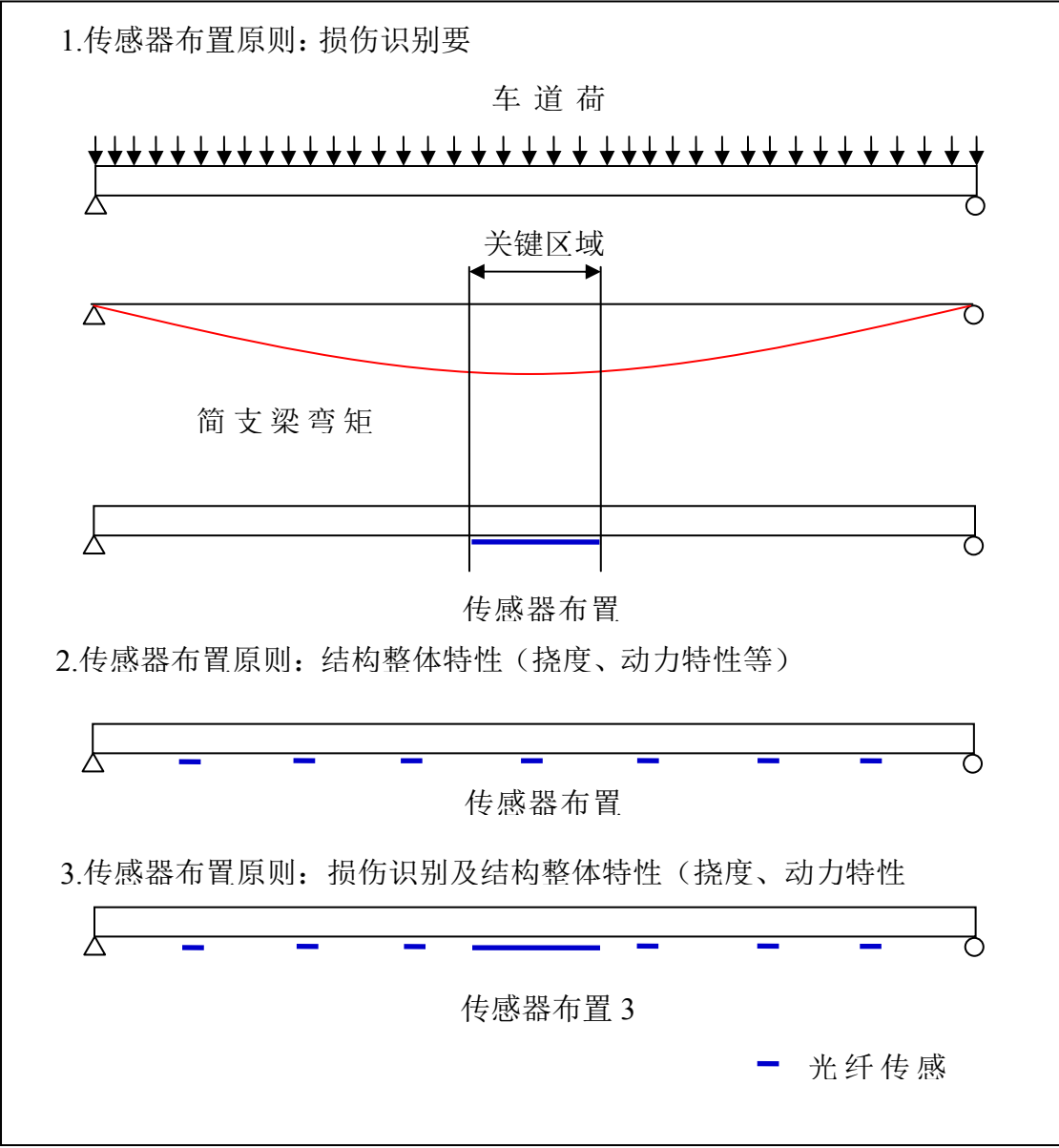


图 4-1 简支梁桥传感器布置方法

2) 连续梁工况：

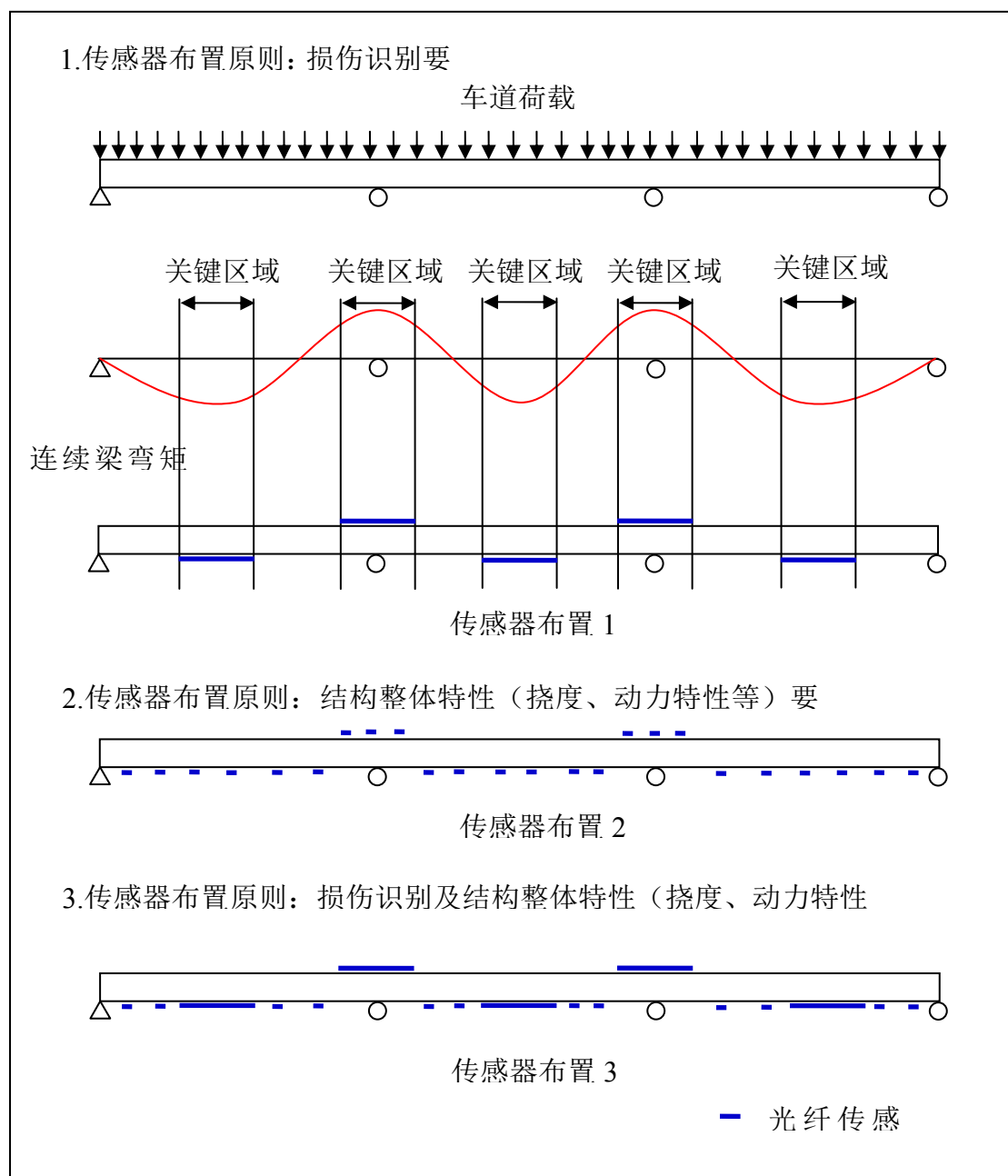


图 4-2 连续梁桥传感器布置方法

4 隧道结构传感器布设

1) 隧道的结构形式不同，对检测/监测的要求也不同。例如，混凝土现浇衬砌会出现混凝土开裂的病害，需要选择适合裂缝监测的传感器；而盾构隧道的变形主要集中在接缝处，因此需要选择适合接缝监测的传感器。

2) 一般中等长度的隧道可以达到 1 公里长度，同时相比桥梁，隧道结构是一种薄弱环节不明显的结构，换句话说，隧道结构每个部位都是潜在监测区域。在实际中，显然无法对所有断面和整个长度区间实施全面监测。因此，通过调查

各种水文、地质条件，结合设计参数，对隧道结构实施分析，选择最脆弱的断面和区间进行布设监测系统，使监测系统能够真正有效保护结构安全运营。

3) 利用监测应变计算横向变形，原则上需要整个隧道环的闭合应变。但是，在隧道中有时无法监测整个环向的应变，传感器需要进行优化布设，其原则就是应变变化大的区域优先布设传感器。利用监测应变计算横向变形时，采用的计算模型实质上是梁模型。在梁模型内，需要知道各单元曲率分布，然后才能计算挠度/沉降分布。由于隧道结构纵向模型与简化的梁模型存在差异，因此，为了保证变形计算精度，最佳方案就是在隧道纵向应变变化最大的上下顶面各布设一条传感线路。当然，在传感器数量有限的情况下，需要进一步实施优化布设，应将传感器布设在应变相对较大的区域，如盾构隧道的管片接缝处。此外，应变计算变形的模型中，需要知道边界条件，因此，应选择两端边界沉降能够获得的区域作为监测区域，以提高监测精度。在盾构隧道中，接缝处的变形较大，如果传感器标距太小，量程将不能满足要求；但如果传感器标距太大，变形监测精度将不能满足要求。根据试验数据及经验，传感器应采用长标距光纤传感器，标距宜在 0.5m~1m 范围内，可以保证足够的精度和量程。

4) 分布式光纤传感器是一条线路串联许多测量传感器，可以大大简化传统电式传感“一个传感器一条线路”的繁杂系统，但是也带来新的潜在危险。线路上只要出现问题，就将影响“下游”传感器甚至整个监测系统的正常工作。因此，光纤传感传感器布设时应保证有一定的冗余度，应尽量在关键传感器的位置附近多布设一个传感器，确保在关键区域能有监测数据。

4.5 标志、包装、运输与存放

4.5.1 所有传感器须带有标识，其标识内容应带有检定确认的内容。传感器的标识即为其管理编号或出厂编号，一个单位内的管理编号不能重复。统一标识是永久性标识，可按下列方式进行编号标识：

1 对于大规模监测体系的传感器标识，可采用电子文档的形式，利用英文字母和数字结合的方式，对传感区域和各区域内传感器分别进行记录，其中用英文字母编号对传感区域进行区分，用数字编号对区域内传感器进行区分；

2 对于小规模监测体系的传感器标识,可采用直接记录或电子文档的形式,利用英文字母或数字的方式,对使用的传感器进行记录;

3 对于已经布设完成的传感器或传感区域,可采用吊牌的形式,按照同样的传感器标识方法进行标识。

4 初始波长应为安装完成后无荷载条件下记录的初始波长。

5 光纤光栅应变分析仪技术要求

5.2 技术要求

5.2.2 本条文规定了光纤光栅应变分析仪应满足的要求。

1 检测项目负责人应对测量设备的校准、检测结果进行分析，以确定测量设备符合预期使用要求。

2 自制的、改装的测量设备若没有规定校准或检测规程，可自行或委托测量设备检测单位制定校准或检测方法，按规定的周期进行校准或检测。

3 建设工程检测专用测量设备宜由本行业的服务机构进行校准或检测。

5.3 使用和维护

5.3.1 对于大型的、复杂的、精密的测量项目，应编制操作规程。每项检测的主要测量设备应做好使用记录，测量设备使用记录应包括以下内容：

- 1 测量设备的名称、管理编号；
- 2 测试名称、编号、目的、内容；
- 3 每组测试的操作开始时间和结束时间（精确到分钟）；
- 4 测试操作过程中测量设备的异常情况及处理措施；
- 5 操作人签名。

5.3.2 应制订测试设备的维护保养、周期检查制度和测试期间核查计划，确保测量设备符合使用要求，并做好相应记录。测试仪器期间核查工作计划应包括期间核查对象、期间核查时间间隔、方法和结果判断等内容。当测试仪器出现下列情况之一时应进行校准或检测：

-
- 1 可能对检测结果有影响的改装、移动和维修后；
 - 2 停用后再次投入使用前；
 - 3 测量设备出现不正常工作情况。

5.3.5 下列测试仪器应定期进行期间核查：

- 1 修复后的测试仪器；
- 2 使用频繁的和经常携带运输到现场检测的测试仪器；
- 3 在恶劣环境下使用的测试仪器。

6 光纤光栅振动测试的施工、验收和维护

6.1 一般规定

结构振动测试所布设的光纤传感器种类繁多，测试系统将获取海量数据，采用信息融合技术，对测试信号的特征进行提取、分离、压缩和和分析处理获得结构状态参数，是实现结构振动测试的重要手段。关于获得结构状态参数的计算，参照本规程第 7 章内容。

本章条文说明了结构振动测试前，根据不同的监测目的进行传感器布设安装所需要的条件。

6.2 进场验收

6.2.2 应建立测量设备档案，记录和保存测量设备的以下信息：

- 1 设备的名称、型号、出厂编号、制造商名称和管理编号；
- 2 制造商的使用说明书和出厂合格证；
- 3 接收日期和启用日期，接收时的状态，领用人签名；
- 4 操作规程（如果有）；
- 5 校准规程（如果有）；
- 6 所有的校准或检测报告；
- 7 对校准、检测结果的判断；
- 8 每次安装、调试或维护的记录；
- 9 损坏、故障、改装或维修的记录；

10 使用的记录（如果有）；

11 负责信息记录人员的签名。

对于现场测试的羡慕，记录信息可以适当减少。

6.3 施工安装要求

1 施工安装前，现场应具备下列条件：

1) 传感器安装面的准备已基本结束，即具备安装条件，传感器布设方案已基本完成；

2) 施工用的照明、电源及表面清洁设备及材料已备齐；

3) 安装用的起重运输设备或施工平台的搭设，已具备使用条件；

4) 备有传感器零部件，锚固配件及安装工具等的储存设施；

5) 备有必要的可替换的传感器备品，以及熔接设备。

2 安装的施工人员应具备足够传感器使用以及熔接设备的使用能力，并有专业技术人员在现场指导。

3 当现场安装中，根据现场条件对传感器布设进行修改时，应在传感器布设图上明确标识，以使可追溯到相关的记录。

6.4 施工检验和质量验收

6.4.4 当测试仪器出现下列情况不得继续使用：

1 当测试仪器的显示示值的指示装置出现损坏、数据丢失或其他影响测量精度的问题时；

2 当测试仪器的通道出现显示缺损、或不能正常工作等故障时

6.5 使用和维护

6.5.2 测试仪器周期测试的核查，可采用下列方法：

- 1 选用高一准确度等级的测试方法进行核查；
- 2 采用同准确度等级的测试方法进行比对；
- 3 选用稳定性好的测试在不同时期进行重复测量，并对测量结果进行评估。

用于现场检测的测试仪器，应建立领用和归还记录，记录测试仪器的领用人、用途、领用和归还日期、归还后对测试仪器的检查情况等信息。

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

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，主要体现在质量、刚度和阻尼等在计算的当前时刻是满足线性叠加原理的。

7.2 自振频率

结构自然频率识别一般采用傅里叶变换的方法获取，应变时程中尽量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，如果靠近激励频率，测试的应变反应更多包含激励频率的成分。

7.3 阻尼

1. 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，因为测试的应变反应属于局部振动反应，有时会显示结构的局部动力特性。

2. 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，一般会发生较大的突增。在求解如果区域传感器反演的阻尼比相互误差超过 20%，应不考虑该区域传感器的反演结果。

7.4 振型（模态）

结合条文 7.4.2，结构应变模态振型识别分为三个步骤，具体说明如下：

第 1 步：选择参考传感器。分布式传感网络的 n 个传感器分为两大类，一类

是参考传感器，另一类是普通传感器。确保参考传感器安装在损伤发生概率最小的位置，如所受内力不大，远离结构薄弱部位且服役环境好的构件或区段。原则上至少选择一个参考传感器，最好考虑若干个，可防止某个参考传感器因所在位置发生损伤而无法提供“参考”的不利情况。

第 2 步：采集并初步处理数据，获得应变模态向量 Ψ 。假设被监测结构上安装的分布式传感网络包括 n 个传感器，则基于上述硬件系统， n 条长标距应变时程的原始数据被记录。根据测量数据处理的一般原则，初步判断数据的有效性，分析异常数据产生的原因。结合对动态激励形式的确定，按照试验模态分析求取特征向量的方法，构建分布式长标距应变模态向量。

第 3 步：参数的实时图形再现及目标特征的确定。假设考虑 M 个参考传感器，则普通传感器有 $(n-M)$ 个。设计一图形用户界面 (GUI)，该界面可以直接或者经切换显示 $((n-M) * M)$ 个坐标图，其中坐标图以某个参考传感器的模态向量分量为 x 轴，某个普通传感器的模态向量分量为 y 轴。每进行一次测量，所有坐标图上都显示一个对应点。以其中一个坐标图为例，在一个时间段内重复多次测量后，多个点被记录。考虑测量噪音的影响时，对这些测量点进行线性拟合，所得直线的斜率记为该时间段的目标特征，也即应变模态振型指标；将这些指标汇成向量就是带有统计特征的模态向量 Ψ 。

曲率与应变之间存在直接的简单关系，结构曲率振型模态亦可采用下列方法获得：

$$\Phi = \{\Phi_1^r, \Phi_2^r, \dots, \Phi_i^r, \dots, \Phi_n^r\}^T = \left\{ \frac{\phi_1^r}{\phi_R^r}, \frac{\phi_2^r}{\phi_R^r}, \dots, \frac{\phi_i^r}{\phi_R^r}, \dots, \frac{\phi_n^r}{\phi_R^r} \right\}^T \quad (7-2)$$

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，

$$\phi_i^r = \frac{\varepsilon_i^r}{y_i} \quad (7-3)$$

式中， y_i ——第 i 个单元的中和轴高度

7.5 挠度和变形识别

1. 结合条文 7.5.1, 获得曲率的方法主要有两种: 第一、直接测量法, 就是在单元截面不同高度上分别布设应变传感器, 利用应变比例关系或应变-高度坐标点可直接求解中和轴位置, 即应变为零的位置, 再依据应变和对应的中和轴高度计算曲率; 第二、结构解析法, 在工程实际中往往只在梁底布设应变传感器, 也就是说只能获得一个应变-高度坐标点, 无法直接获得截面的中和轴位置, 通过建立单元/截面的纤维模型, 将监测应变输入到模型里, 可以解析出中和轴位置, 然后再计算曲率。

具体几种情况如下:

1) 对于单元截面高度上只布设一只传感器的情况, 可采用以下方法: 1) 建立单元的纤维模型; 2) 将监测应变输入纤维模型, 计算单元的中和轴高度; 3) 通过公式 7-4 计算曲率。

$$\phi = \frac{\varepsilon}{y} \quad (7-4)$$

式中, ϕ 是曲率; ε 是监测应变; y 是传感器距离中和轴的高度。

2) 对于单元截面高度上布设两只传感器的情况, 宜先通过应变计算单元的中和轴位置, 公式如下:

$$y_1 = \frac{|\varepsilon_1|}{|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|} d \quad (7-5)$$

式中, ε_1 是传感器 1 的监测应变; ε_2 是传感器 2 的监测应变; y_1 是传感器 1 距离中和轴的高度; d 是传感器 1 和传感器 2 之间的距离。将获得的中和轴高度带入公式 7-5 计算曲率。

3) 对于单元截面高度上布设多只传感器的情况, 宜以每只传感器所处的截面高度坐标作为纵坐标, 应变作为横坐标, 在坐标平面图上描点, 并对这些点实施线性拟合, 在纵坐标轴上的截距就是中和轴的位置, 再用公式 7-5 计算曲率。

纤维模型的基本原理如下:

将纤维模型用于受弯结构的分析, 其基本概念是将结构的截面划分成若干纤

纤维层，如图 7-1 所示，在已知结构材料特性和几何形状的情况下，并假定某纤维条带的应变，再根据平截面假定，可计算各纤维条带的应变及其应力，而弯曲断面内应满足所有作用力合力为零的静力平衡条件，即 $\Sigma N=0$ 。也就是说，知道某纤维单元的应变，就可以计算整个截面的受力特性。因此，通过各单元的实测应变根据纤维模型演算各断面的弯矩、曲率、转角以及结构位移、荷载等参数。

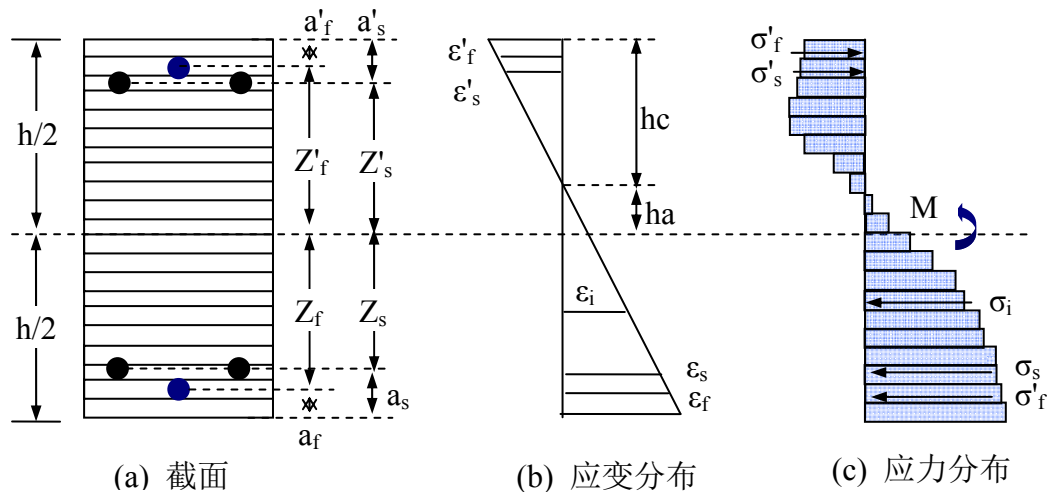


图 7-1 截面的纤维模型

利用纤维模型进行结构解析计算的基本步骤如图 7-2 所示：假定某初始中和轴高度 h_0 ，结合平截面假定和已测量的某纤维层的应变计算截面的应变分布，根据材料特性计算截面的应力分布，计算截面的合力 ΣN ，判断 ΣN 是否为零，如果 ΣN 是零，则表示中和轴为真实中和轴，如果 ΣN 不等于零，则需要重新假定中和轴高度，重复上述计算过程，至到满足 $\Sigma N=0$ ；利用中和轴和截面应变计算截面曲率和转角，利用应力分布计算截面弯矩和荷载；利用曲率分布计算结构的位移。

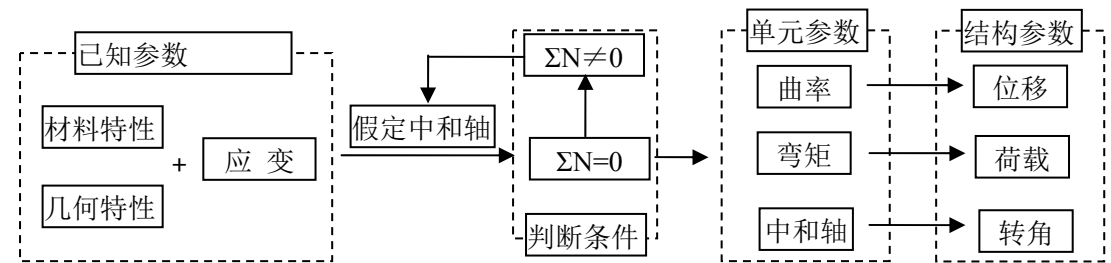


图 7-2 基于纤维模型反演结构参数的流程

2. 结合条文 7.5.2，挠度识别可采用下列方法：

由应变计算挠度可采用共轭梁法，该方法的基本步骤为：1) 提出原始梁的共轭梁模型；2) 求解共轭梁的等效荷载，即原梁的曲率分布；3) 计算共轭梁的弯矩分布；4) 将弯矩分布等值变换成挠度值。计算中应满足以下要求：1) 获得沿结构的应变全分布，可分为两种情况：第一，采用长标距光纤传感器全面覆盖监测结构，直接测量结构所有单元的应变；第二，采用长标距光纤传感器全面覆盖监测结构的关键区域，其他区域的应变应采用应变重构技术，对于静态应变宜采用线插的方法，而动态应变宜采用应变模态和位移模态之间的关系进行重构。

由应变计算挠度可采用纤维模型有限元法，该方法的基本步骤为：1) 利用纤维模型建立受弯梁/柱的有限元模型；2) 将监测应变输入纤维模型，计算结构的弯矩分布；3) 将弯矩施加到有限元模型上，计算结构的挠度。

7.6 倾角

结合条文 7.6.1，倾角识别可采用下列方法：

1. 倾角识别可采用直接测量计算法。柱式结构的倾角分为弯曲转角和刚体位移产生的转角，见图 7-3，计算公式如 7-6。

$$\theta = \theta^1 + \theta^2 \quad (7-6)$$

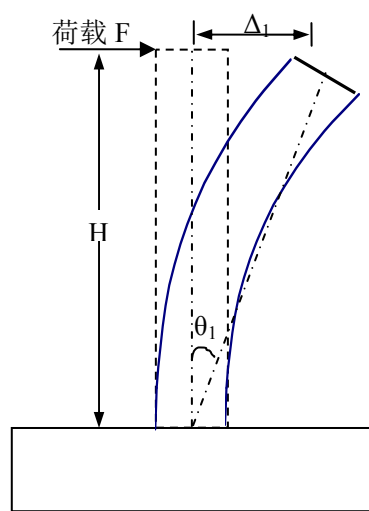
式中， θ 是结构倾角； θ^1 是结构的弯曲倾角； θ^2 是结构的刚体位移倾角。

$$\theta^1 = \sum_{i=1}^n \theta_i = \sum_{i=1}^n \phi_i L_i \quad (7-7)$$

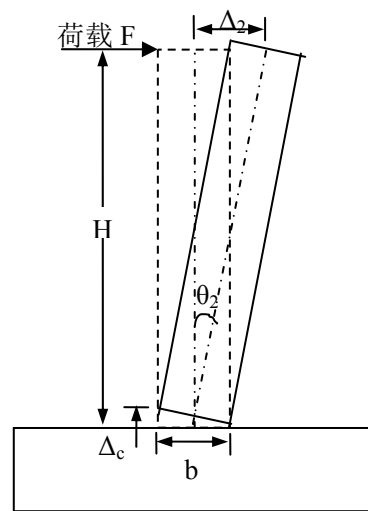
式中， θ_i 是第 i 个监测单元的相对转角； ϕ_i 是第 i 个监测单元的曲率； L_i 是第 i 个监测单元的长度。

$$\theta^2 = \frac{\Delta_c}{b} \quad (7-8)$$

式中， Δ_c 是柱角裂缝宽度； b 是柱截面宽度。对于裂缝较小的情况，可忽略刚体位移的影响，只计入 θ^1 。



(a) 弯曲变形



(b) 刚体位移

图 7-3 结构倾角的类型

2. 倾角识别可采用共轭梁法，该方法的基本步骤为：

- 1) 提出原始梁的共轭梁模型；
- 2) 求解共轭梁的等效荷载，即原梁的曲率分布；
- 3) 计算共轭梁的剪力分布；
- 4) 将剪力分布等值变换成倾角。

7.7 损伤（裂缝等）

1. 结合 7.7.1 条文中的静力间接法基本步骤为：

- 1) 选取合适的参考传感器，要求该位置结构发生损伤的概率比较小；
- 2) 在结构初始状态下，采用统计学的方法，建立结构各位置或单元的应变初始比值关系；
- 3) 在正常荷载作用下，统计、比较各位置或单元的应变比值关系，如果数值变化（增大）显著（如超过 5%），则对应位置或单元发生损伤。

2. 结合 7.7.2 采用基于长标距应变模态向量统计数据方法进行结构的损伤识别，其具体步骤为：

- 1) 选择参考传感器，要求参考传感器安装在损伤发生概率最小的位置，可选择 1~3 个参考传感器；
- 2) 采集并初步处理数据，获得某一次的规一化长标距模态应变信息；
- 3) 多次测量，通过统计分析获得描述目标特征的长标距应变模态向量；
- 4) 基于特征向量，实施结构损伤识别。

曲率模态法，与应变模态方法步骤类似，在损伤识别过程中直接输入曲率。

应变模态能量法，该方法的基本步骤是：

- 1) 从测量的动应变提取结构的模态应变；
- 2) 对模态应变实施质量的规一化处理；
- 3) 将规一的模态应变带入公式（7-10）计算各单元（ i 单元）的损伤识别指标 β_i ；
- 4) 根据指标的变化识别结构损伤情况，如果 $\beta_i > 0$ ，则有明显损伤发生。

$$\beta_i = \frac{\sum_{r=1}^m (\bar{\delta}_{ir}^d)^2 L_i / \sum_{i=1}^n (\bar{\delta}_{ir}^d)^2 L_i}{\sum_{r=1}^m (\bar{\delta}_{ir})^2 L_i / \sum_{i=1}^n (\bar{\delta}_{ir})^2 L_i} - 1 \quad (7-10)$$

其中， $\bar{\delta}_{ir}$ 和 $\bar{\delta}_{ir}^d$ 分别是损伤前后规一化的第 i 单元的第 r 阶模态应变， n 是目标单元的数量， m 是测量的模态总阶数， L_i 是第 i 单元的长度。

应变模态柔度法，该方法的基本步骤：

- 1) 从测量的动应变提取结构的模态应变；
- 2) 对模态应变实施质量的规一化处理；
- 3) 将规一的模态应变带入公式 (7-11) 计算结构的模态柔度矩阵 F^ε ；
- 4) 将矩阵对角主元素取出，构建损伤识别向量 F_{ii}^ε ，如公式 (7-11)；
- 5) 比较损伤识别向量的前后相对变化，如公式 (7-12)，向量元素变化超过 5% 的则对应位置发生显著损伤。

$$F^\varepsilon = \sum_{r=1}^m \frac{1}{\omega_r^2} \left\{ \bar{\delta}_{1r} \cdots \bar{\delta}_{ir} \cdots \bar{\delta}_{nr} \right\}^T \left\{ \bar{\delta}_{1r} \cdots \bar{\delta}_{ir} \cdots \bar{\delta}_{nr} \right\} \quad (7-11)$$

$$F_{ii}^\varepsilon = \left\{ F_{i1}^\varepsilon \cdots F_{ii}^\varepsilon \cdots F_{in}^\varepsilon \right\}^T \quad (7-11)$$

$$\Delta F_{ii}^\varepsilon = \frac{F_{ii}^{\varepsilon d} - F_{ii}^{\varepsilon u}}{F_{ii}^{\varepsilon u}} \quad (7-12)$$

其中， $\bar{\delta}_{ir}$ 是质量规一化的第 i 单元的第 r 阶模态应变， ω_r 是结构 r 阶频率， n 是目标单元的数量， m 是测量的模态总阶数，符号 d 和 u 分别表示损伤发生后和损伤发生前。

3. 结合 7.7.4 条例中疲劳裂缝/裂纹识别可采用以下方法，基本步骤为：1) 依据材料试验、设计资料或经验，建立目标钢结构的应力-寿命曲线；2) 基于监测的应变，统计各幅值区间的应力及相应的出现次数，绘制应力谱；3) 结合应力-寿命曲线和累计损伤理论，识别结构的疲劳损伤。

4. 结合 7.7.5 钢筋锈蚀识别方法的具体步骤：

纤维模型解析法的基本步骤如下：

- 1) 根据设计资料，选择合适的材料模型，建立结构的纤维模型；
- 2) 将截面不同位置的应变输入模型中，以钢筋的面积为变量参数，进行迭代计算，直至截面平衡方程满足；

3) 比较原始钢筋面积和计算钢筋面积, 分析钢筋的腐蚀程度。

应力差法的基本步骤如下:

1) 基于平截面假定, 利用结构表面混凝土的应变计算钢筋位置的混凝土应变;

2) 比较钢筋实测应变和计算的混凝土应变, 利用差值识别钢筋的锈蚀损伤。

5. 结合 7.7.7 支座老化/失效识别采用的方法:

1) 利用静载试验, 比较结构刚度(荷载-挠度、支座转动刚度)的变化, 识别支座失效。

2) 利用动态方法(固有频率差值法、应变模态法、曲率模态法、应变模态能量法和应变模态柔度法), 识别支座失效。

3) 将固有频率或其他模态参数输入有限元模型中, 以支座为未知参量进行模型修正, 识别支座损伤。

8. 传感器网络数据采集、控制与处理

8.1 一般规定

8.1.1 光纤振动传感器网络将获取海量数据，采用信息融合技术，对监测信号的特征进行提取、分离、压缩和和分析处理，是实现结构健康监测的重要手段，其数据采集和传输子系统包括了数据采集、数据预处理、数据传输（通信）。其中数据采集系统就是根据监测系统的功能需求，设计形成一个或多个数据采集终端，分别布置在待测结构上。按照控制中心站等终端的要求，在光纤传感器的配合下，采集结构的各类信号，进而将这些信号数据传输到监测中心，继而可实现远程监控中心访问下载及统一管理。

8.2 数据采集与控制

8.2.1 采集设备的分布方式为

集中采集：传感器系统空间分布较集中时宜采用此方法，即仅设置单一的中心采集站（仪），根据实际情况，中心采集站（仪）可安置于结构外，也可以安置于桥隧结构内达到安置条件的区域

分散采集：传感器系统空间分布较分散时，或集中采集方案传感器和采集站（仪）的连接距离超过传感器信号衰减传输性能所允许的最远距离时，宜考虑设置多个子采集站（仪），各子采集站（仪）与中心采集站（仪）相连，其中需注意子采集站（仪）必须置于具备设备安置条件的区域，传感器与采集站（仪），子采集站（仪）与中心采集站（仪）的连接须可靠、稳定。

混合采集：指的是集中采集和分布式采集混合使用的方式。在同一结构的监测中，在传感器空间分布较为分散时，总体上可以设置多个子采集站（仪）进行分布式采集，而在特定局部可以另光纤传感网络直接连接中心采集站（仪）而采用集中采集。

8.2.2 应依照不同被测结构的类型特点和被测物理量对采集数据的具体需求，选

择合适的采集模式。

表各采集模式说明

采集模式		模式说明
(1) 全时（实时）采集		采集设备进行全时（实时）连续的采集
(2) 定时采集	周期性连续采集	采集设备进行非全时工作，仅在指定某时间内全时（实时）连续采集，既可以是周期性，也可以是非周期性的
	定期/不定期巡查	
(3) 触发采集		采集数据触发预设阈值时采集设备进行全时（实时）连续采集
(4) 混合采集		采集数据未触发预设阈值时采用定时采集，触发阈值时采用触发采集

8.2.3 当同时监测多个待测量时，应变（应力）的最低采集频率应符合多个待测量中对频率要求最高的待测量的监测要求

8.2.4 所谓同步，就是要求通信的收发双方在时间基准上要保持一致。数据采集的时间同步性包括时间同步采集和时间异步采集，同步采集又可依据时间同步误差较小的（一般 $\leq 1\text{ms}$ ）的认为是严格的同步采集，以及时间同步误差虽较大但却能达到或接近严格同步采集的同等效果的伪同步采集。伪同步采集模式，也称为模拟同步采样模式或分组采集模式，适合应用在对某组采集的组内时差要求尽量小，但组和组之间的时间间隔较大的监测场合。比如某监测需求是采集结构的四个不同区域传感器数据某 1 秒内的最大值，假设采集频率是 10hz，传感器按四个区域分别连接到采集设备的四个通道。由于仅采集最大值，采集设备既可采用严格的同步采集模式，即每 0.1 秒内都严格的以 $\leq 1\text{ms}$ 的时间同步误差同时采集四个通道的数据，然后求最大值；也可以采用伪同步采集模式，即根据信号通道开关的能力，每 0.1 秒内轮流对四个通道进行分别采集（每通道先单独采集 0.025s，再进行下一通道的采集），然后求最大值，如此时间同步误差虽然远大于严格同步采集模式的误差，但在实际监测中也能达到监测需求。伪同步采集和异步采集在满足监测需求的前提下，可大幅降低监测系统对采集硬件的性能要求。

8.2.5 采集硬件（设备）进行性能、功能设计时，应依据监测系统总体设计和业主对采集子系统的具体性能和功能来进行针对性的设计和选型，可以将采集硬件

根据技术水平和实现监测目标的能力，分成若干技术层级，下表中给出了各技术层级的典型性能指标和功能：

表 8-4 数据采集设备的性能和功能要求

信号类型			电信号			光信号			通信光信号					
			模拟电压信号		外场采集数字信号	光纤传感器输出光信号								
			集中式的基于PCI、PXI、USB等接口的采集板卡		CAN、Lonworks、PCMCIA、IEEE等总线设备	专用光纤光栅解调仪（模块）								
符合国家通信相关标准的通信设备														
技术层级			甲	乙		丙	甲	乙		丙				
性能设计	主要考察指标、规格	接口标准					光：全兼容：数：RJ45、RS232、USB、CAN等至少3种			光：指定：数：RJ45、RS232等至少2种				
		输入范围					波长范围≥75nm			波长范围≥40nm		波长范围≥40nm		
		动态范围	≥90db	≥70db		≥50db	40db		25db		最低需求			
		采样频率					动态0-1khz；静态			动态0-500hz；静态		最低需求		
		通道状况	各通道独立、同步、无道间干扰				通道数不限；各通道独立、同步；可智能配置			通道数：0-8；各通道独立、同步；无智能配置			最低需求	
		数据容量	采用非易失CMOS、SRAM、SSD做介质				传感器数≥40时，在线实时≥365天			传感器数≥40时，在线实时≥90天		传感器数≥40时，在线实时≥1天		
		分辨率	A/D分辨率≥16位				波长：≤0.2pm；A/D：≥16位			≤0.5pm；A/D：≥16位		最低需求		
		精度	转换16位，同步μs级	转换16位，同步ms		最低需求	0.5pm级		2pm级		最低需求			
		重复性					2pm		2pm		最低需求			
		传输率	≥250Mbps	≥100Mbps		最低需求	≥250Mbps		≥100Mbps		最低需求			
		传输距离	全域无中继	需中继		最低需求								
		通信方式	甲级	有线、全速无线，支持无线设备										
			乙级	有线、低速无线或预留无线设备端口										
			丙级	有线										
		扩展能力	甲级	成套标准化扩展卡										
			乙级	预留接口，需专门开发										
			丙级	不具备										
		触发方式	甲级	可智能自动触发										
乙级	手工、程序、阈值触发													
丙级	手工触发													
在线模式	甲级	硬件层支持全时在线、远程硬件指令												
	乙级	至少分时在线，远程由上位机软件层实现												
	丙级	不在线、远程由上位机远程桌面实现												
信号调理能力	智能高、低、带通硬件滤波，智能放大	人工、软件滤波和放大		最低需求	智能自调理	需人工配置	最低要求							
可靠性设计	校准功能	自校准	智能实时自校准											
		乙级	分时自校准											
		外校准	定时外校准											
抗电磁干扰	串模干扰抑制													
	共模干扰抑制													
	符合监测系统具体要求													
人性化设计	便携性	甲级	支持手持操作或配套手持模块											
		乙级	预留手持操作接口											
		丙级	现场采集最低需求											
	采集报警	甲级	设备状态、采集阈值											
		乙级	设备状态											
		丙级	无报警											
	数据分析辅助	甲级	自带部分数据处理分析功能											
		乙级	可扩展实现数据分析前处理											
		丙级	无辅助功能											
环境适应性设计	防护功能	高低温保护												
		抗冲击和振动												
		防潮湿和盐雾												
	工作温度	符合监测系统具体要求												
安全	必要安全防护：防火、防雷、防辐射、防侵入、防对人员伤害													

信号类型			电信号			光信号			通信光信号					
			模拟电压信号		外场采集数字信号	光纤传感器输出光信号								
			集中式的基于PCI、PXI、USB等接口的采集板卡		CAN、Lonworks、PCMCIA、IEEE等总线设备	专用光纤光栅解调仪（模块）								
符合国家通信相关标准的通信设备														
技术层级			甲	乙		丙	甲	乙		丙				
性能设计	主要考察指标、规格	接口标准					光：全兼容：数：RJ45、RS232、USB、CAN等至少3种			光：指定：数：RJ45、RS232等至少2种				
		输入范围					波长范围≥75nm			波长范围≥40nm		波长范围≥40nm		
		动态范围	≥90db	≥70db		≥50db	40db		25db		最低需求			
		采样频率					动态0-1khz；静态			动态0-500hz；静态		最低需求		
		通道状况	各通道独立、同步、无道间干扰				通道数不限；各通道独立、同步；可智能配置			通道数：0-8；各通道独立、同步；无智能配置			最低需求	
		数据容量	采用非易失CMOS、SRAM、SSD做介质				传感器数≥40时，在线实时≥365天			传感器数≥40时，在线实时≥90天		传感器数≥40时，在线实时≥1天		
		分辨率	A/D分辨率≥16位				波长：≤0.2pm；A/D：≥16位			≤0.5pm；A/D：≥16位		最低需求		
		精度	转换16位，同步μs级	转换16位，同步ms		最低需求	0.5pm级		2pm级		最低需求			
		重复性					2pm		2pm		最低需求			
		传输率	≥250Mbps	≥100Mbps		最低需求	≥250Mbps		≥100Mbps		最低需求			
		传输距离	全域无中继	需中继		最低需求								
		通信方式	甲级	有线、全速无线，支持无线设备										
			乙级	有线、低速无线或预留无线设备端口										
			丙级	有线										
		扩展能力	甲级	成套标准化扩展卡										
			乙级	预留接口，需专门开发										
			丙级	不具备										
		触发方式	甲级	可智能自动触发										
乙级	手工、程序、阈值触发													
丙级	手工触发													
在线模式	甲级	硬件层支持全时在线、远程硬件指令												
	乙级	至少分时在线，远程由上位机软件层实现												
	丙级	不在线、远程由上位机远程桌面实现												
信号调理能力	智能高、低、带通硬件滤波，智能放大	人工、软件滤波和放大		最低需求	智能自调理	需人工配置	最低要求							
可靠性设计	校准功能	自校准	智能实时自校准											
		乙级	分时自校准											
		外校准	定时外校准											
抗电磁干扰	串模干扰抑制													
	共模干扰抑制													
	符合监测系统具体要求													
人性化设计	使用寿命													
	便携性	甲级	支持手持操作或配套手持模块											
		乙级	预留手持操作接口											
		丙级	现场采集最低需求											
	采集报警	甲级	设备状态、采集阈值											
		乙级	设备状态											
		丙级	无报警											
数据分析辅助	甲级	自带部分数据处理分析功能												
	乙级	可扩展实现数据分析前处理												
	丙级	无辅助功能												
环境适应性设计	防护功能	高低温保护												
		抗冲击和振动												
		防潮湿和盐雾												
	工作温度	符合监测系统具体要求												
安全	必要安全防护：防火、防雷、防辐射、防侵入、防对人员伤害													

8.2.6 采集设备安置场所的基本要求为

表 8-5 采集设备安置场所基本要求

条件类目		场所要求
位置	地理位置	应具体明确、相对固定、便利到达、易管理和维护
	空间容量	应满足采集设备正常运行和管养人员运维操作的空间需求，并应留有足够扩展空间
安全	防火	应具备必要措施保障人员和设备安全
	防雷	
	防辐射源	应远离辐射源，无法远离时设备和人员应具备相应防护等级
	防侵入	应符合国家相关规定的防侵入措施
	防泄密	应符合国家相关保密法律法规规定的保密措施
环境	湿度	应保持干燥，难以保证干燥时设备应具备相应防护等级
	温度	应安装空调等设备保证匹配采集设备的工作温度要求
电力	不间断电源	应尽可能提供；对实时在线监测系统必须提供
	电压	应稳定、可靠
	电磁干扰	应无干扰或低干扰，应匹配采集设备电磁兼容特性
通讯	有线/无线方式	应提供满足监测系统设计需求的传输方式
	通讯质量	应保证高质量、可控、稳定可靠的通信质量
	通讯路径	应保证通讯线路的专用和专管
	互联网条件	(1)符合监测系统要求；(2)符合国家网络安全相关标准；(3)符合保密法规
采集站（仪）配套的上位机宜采用稳定的工控机		

8.2.7 采集设备的已有安置场所包括类似健康监测系统已设场所，计算机、网络、监控设备安置场所，消防、电力、通信设备安置场所等

8.2.8 采集硬件（设备）的外壳防护等级，应与安置的场所相适应，应符合《外壳防护等级（IP 代码）》（GB4208-2008）、《低压成套开关设备和控制设备》（GB

7251.1-2013)、《高压开关设备和控制设备标准》(GB/T11022-2011)和国际电工委员会(IEC)529号《外壳防护型式的分级》或其他等效标准的规定。

8.2.9 监测系统长期采集的数据或在高频方式下采集的监测数据容量巨大。数据容量大小合适与否,直接影响到监测系统识别和分析结构特征。长期存储海量的采集数据,既增加系统硬件设备的压力,也增加用户抽取数据进行结构分析时的工作量。因此在采集软件设计时,建议采取如下办法来解决海量数据的问题:设置采集阈值来进行触发采集或存储。即桥隧如应变等被测量波动较小接近噪声时,软件可以设置不采集或不存储、不发送;设置分时和定时触发采集的机制。即根据桥隧结构特点和监测需求,不进行连续性全时的采集和存储,而是采取分时段来确定采集、存储和发送的策略;应保证存储设备的安全性和保密性,对设备的操作应形成历史记录备查。

8.3 数据处理

8.3.1 数据预处理应进行滤波降噪。方法一般包含:低通滤波、带通滤波、高通滤波、数据平均处理等。实际监测中,数据采集系统和数据分析处理系统有多种组合形式,比如有的监测系统将数据采集设备、数据处理(预处理、后处理)设备、数据分析设备进行上下级布置,各级间通过网络传输连接;而有的监测系统会将数据采集、处理到分析都集中在本地同一个终端中。同样的,在滤波器的设计和配置上,有的监测系统会分别对数据采集设备、数据处理设备、数据分析设备都有单独的滤波器设计和配置;而有的监测系统会将数据采集、处理到分析设备进行统一的综合设计和配置。因此应根据监测具体需求来对滤波器进行设计和选用,其原则是应遵循最大限度滤除噪声和最大限度保留有用信号。采集数据中的噪声多属于高频信号时,此类信号宜在数据预处理阶段就采用低通或带通类型的数字滤波器进行滤波;对于振动模态分析的监测场合,应在数据的分析处理阶段对结构的振动信号进行分析,应对其结构静态成分(趋势项)利用处理软件的频谱分析滤波功能进行消除。

8.3.2 在对光纤传感器进行采集时,采集站(仪)主要获取光纤传感器的中心波长(DUT peak),以及在中心波长基础上进行演算后的其他物理量,此外还应对

光纤中光信号的能级进行关注，应保证信号的能级处于采集站（仪）的解调能力范围以内，必要时应增加光纤信号增益器来放大光信号，或应使用光纤信号衰减器来衰减光信号。设置噪声阈值的目的是隔离光纤传感器的强边模反射，或由于光纤法兰头或光纤末端引起的反射，使中心波长的探测值更准确。采集中往往能同时采集到光纤传感器中的中心波长信号和噪声信号，而噪声信号的能级往往低于传感器中心波长信号的能级，因此采集系统应可以设置某信号强度阈值，阈值以下的可认定是噪声进行隔离，在阈值之上进行中心波长信号的采集，强度阈值的具体数值，应依据光纤传感器和采集硬件的特性及标定数值进行确定。

8.3.3 针对动态监测，宜使用 EMD（empirical mode decomposition）经验模态分解法，对信号进行消除趋势项处理。EMD 方法的特点是能够对非线性、非平稳过程的数据进行线性化、平稳化处理，而且在分解的过程中保留了数据本身的特性。EMD 方法的思路是，对采集数据进行绘图，对波形的上、下包络的平均值确定“瞬时平衡位置”，把复杂信号的函数分解为有限的 IMF 函数（intrinsic mode）之和。在结构振动信号消噪，模态参数识别中，EMD 方法被广泛应用，在各级设备终端、上位机中基于 EMD 方法的数字滤波器的实现应采用模拟滤波器和数字滤波器相结合对噪声进行抑制。其中模拟滤波器主要是硬件层面的，通过设计和选用带有硬件滤波功能的设备（可嵌入各级采集设备、数据处理设备的终端硬件中，或额外扩展专门的滤波设备）来实现；而数字滤波器多以各级设备终端、上位机中的软件预置来实现。在软件设置中可通过改变数字滤波器的滤波流程和相应的参数，即可实现不同的滤波效果。

数字滤波器可包括但不限于：平均值滤波器，中值滤波器，低通数字滤波器，高通数字滤波器，带通数字滤波器等，还可将典型的模拟滤波器的原理进行数字化处理，集成到软件中供用户选择。可集成的典型滤波器包括但不限于：巴特沃斯（Butterworth）滤波器、切比雪夫（Chebyshev）滤波器、贝塞尔（Bessel）滤波器、椭圆（Ellipse）滤波器等。应根据监测系统对数据处理的具体需求来进行滤波器设计。应针对被测结构不同的监测目的和不同被测物理量的特性，采用不同的滤波方法：

- 1 对高频噪声信息，应选用低通或带通类型的滤波器去除高频噪声；

2 在需进行桥隧等结构的模态提取时，应消除趋势项和噪声信号，仅保留结构的振动响应信号；

3 在利用应变影响线理论进行结构性能评估时，应消除桥梁结构振动信号和噪声信号，仅保留结构的应变趋势项成分。其中应变趋势项的提取或去除主要有两个方法：一是利用三种信号的频谱特征（趋势项的频率成分接近 0，振动信号频率成分属于低频特征，噪声信号频率成分属于高频特征）进行滤波分析；二是采用 HHT（黄-希尔伯特变换）原理进行动静态分离，其核心方法即经验模态分解（EMD），能使复杂信号分解为有限个固有模态函数（IMF），相对于其他滤波方法而言，其最大的优势是便于处理非平稳信号；三是根据具体应用范围，综合应用上述两种方法和近年来发展起来的各类小波分析方法进行滤波。

9 传感网络组网和系统构建

9.1 一般性规定

数据通信与传输按照功能分，可以分为内场（传感器现场）传输和外场（远程）传输。数据通信与传输应按硬件、软件、和工作机制的内容进行设计和实施。应坚持“因地制宜”的原则，尽量利用现有的网络条件搭建传输线路，数据应在内外场的整个传输网络间实现传输和共享，应匹配各设备终端的数据接口，传输宜采用成熟的数据接口和协议如 TCP/IP 协议，数据传输故障时还应有告警和修复机制，传输的同步应匹配时间基准和数据传输速度的需求，满足实时性要求。传输硬件应注意各级设备间的软硬件兼容匹配，应考虑对传输硬件提供足够防护，尽量选用户外型的工业级的设备和线缆，优先采用有线形式的电缆和光纤/光缆连接，条件允许时可建立专人专管的线路和结构健康数据监控中心，不允许时可利用现有的如桥隧维护管养部门的各类监控中心，当传输距离较远布线困难时，可采用无线通信的传输形式。

9.2 传感网络组网

9.2.1 传感网络各系统之间连接如下图所示。

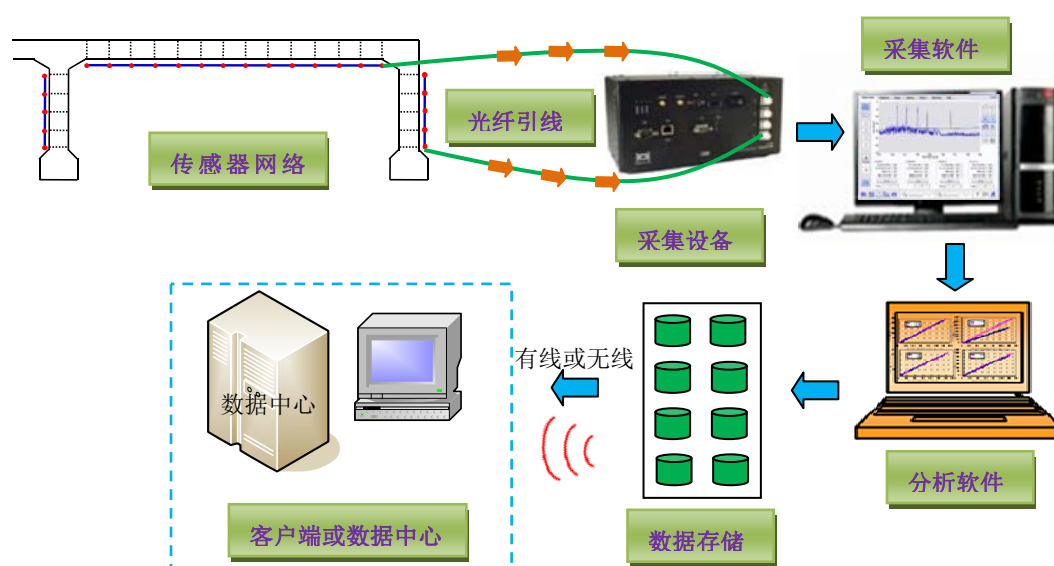


图 9-1 传感网络系统框架图

9.2.2 传输网的拓补结构选择依据表

表 9-1 传输网的拓补结构选择

传输距离 节点类型 拓补形式			连接节点类型						
			结构群→结构群		单体结构→单体结构		单体结构内各节点（设备终端）间		
									距离近
环型结构			★★★★						
总线结构	星型结构	树型结构	★★	★	★★	★	★★★★		★★
网状结构		全网连通	★★★★		★★		测点少	测点多	★★
							★	★★	
混合采用各类拓补结构			按需/被指定						
“★”：代表建议程度：★★★★条件允许时应优先采用；★★建议采用；★可选用；距离近/远的判断依据，应以传输硬件的性能及传感器传输衰减性能综合确定，宜定为10km-15km									
条件允许时应采用有线连接，采用光纤/光缆传输和组网									

9.2.3 针对单体结构，连续结构群以及离散结构群的传感网络设计图

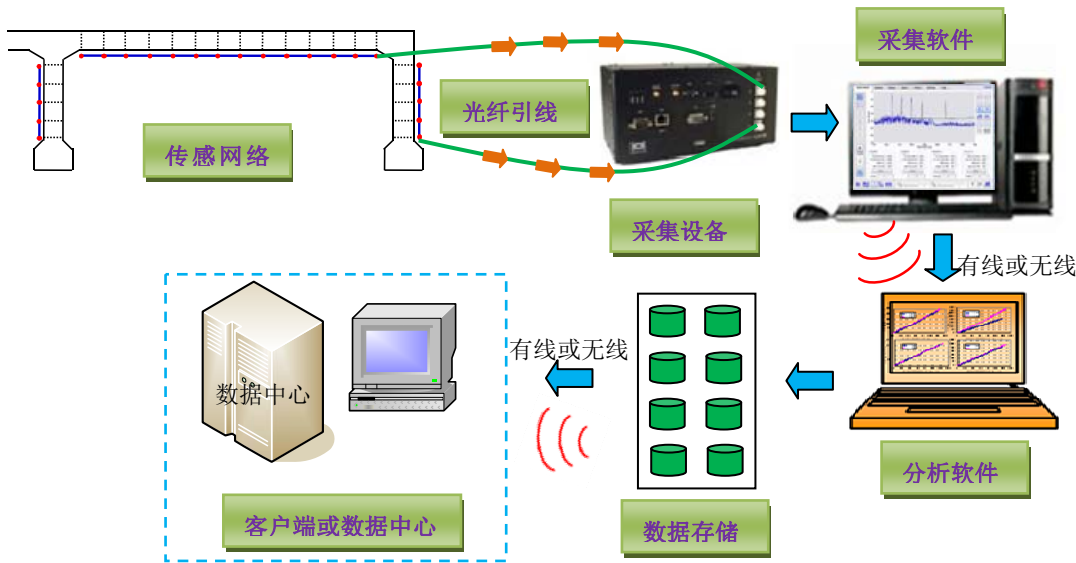


图 9-2 单体结构传感网络设计图

注 1：数据采集在现场或附近采集站完成，数据解析、数据存储在监控中心完成；
注 2：图 9-2 适用条件：①现场有采集箱或附近（一般不超过 2km）有采集站的情形；②现场采集箱或附近采集站内工作条件一般；③设立专门的监控中心。

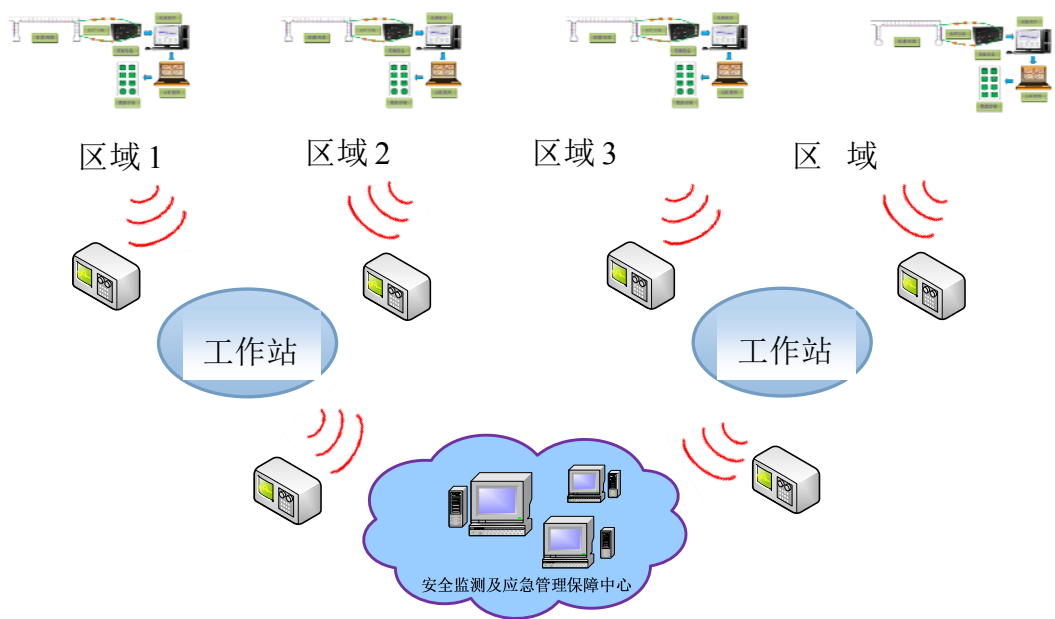


图 9-3 连续结构群传感网络设计图

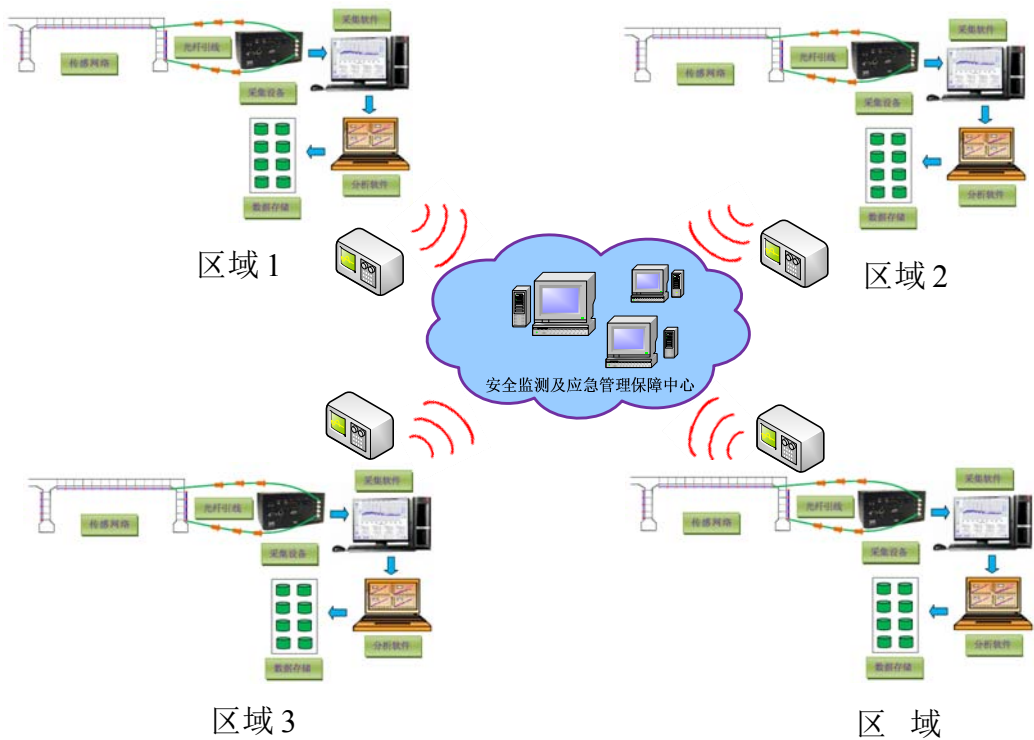


图 9-4 分散结构群传感网络设计图

9.2.4 有线传输和无线传输的选择

有线传输：是指两个通信设备之间使用物理连接，将信号从一方传到另一方。常用的介质有双绞线、同轴电缆和光缆等，常用的接口有 RS232、RS422、RS485 和 RJ45 等；

无线传输：是指两个通信设备之间不使用任何物理连接，将信号通过空间传输的一种技术。通常可分为无线广域通信网（无线公网）和无线局域通信网两种方式。无线广域通信网络可采用 GPRS 和 CDMA 等方式；无线局域通信网可采用如 TCP/IP、ZIGBEE、蓝牙等传输协议。

9.3 数据传输与通信

9.3.1 数据通信与传输的硬件物理连接介质和线路的设计应符合下表中的基本要求

表 9-2 数据传输与通信硬件物理连接的基本要求

连接形式	传输信号	协议		距离	连接介质	设备间物理连接路径	线路衰减	最低带宽	
		类型							
有线	电信号	传感器电输出	屏蔽电缆	传感器→信号 调理设备	信号调理设备→采集站（仪）		采集站（仪）→上级设备	应< 1db/ 30m	应满 足监 测的 传输 需求
				线长应≤2m	无中继/增益时 增加中继/增益	线长应≤150m 线长可>150m	应依据传输距离采用相应 传输协议		
		通信电信号	屏蔽 网线	1）宜优先采用数电传输； 2）数电信号电缆传输距离>10km时，宜采用RS-485协议； 3）数电信号电缆连接双方均要求主动发送数据时，宜采用RS-422协议； 4）通信电信号宜优先采用基于TCP/IP协议的工业以太网传输，应符合ISO 和国家有关标准				符合 国家 标准	
				光信号	光纤传感器输出	短距离（一般≤2km）时宜直接以光信号/模拟信号形式传输；长距离（>2km）时最大传输距离应根据传感器的信号衰减传输性能确定，必要时应 增加信号中继/增益			
		通信光信号	光缆						
	无线	电信号	无线电波 微波	红外线 激光	1）内场（设备场所内）覆盖范围宜>10m；2）外场（设备场所外）覆盖范围 宜>500m；3）远程传输距离宜>10km；应保持无线覆盖范围内足够开阔，传 输受阻时应增加中继/增益，传输质量无法保证时应改选有线传输形式				
光信号									
		线路方案（★代表建议使用，★越多代表被建议的程度越高）							
线路建议			利用 已有 线路	同类监测系统传输线路★★★					
	计算机/监控/网络线路★★								
	电力/消防控制线路★								
	新设 专用 线路		★★★						
			临时 线路	按需设计和选用					
	（1）宜利用已有传输线路，设计和选用与已有线路相匹配的数据接口								
（2）应采用中继/转发设备来匹配各级传输设备的不同数据接口，中继/转发设备应符合数 量最少化的原则									

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符合以下国际和国家相关标准的规定。

表 9-3 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	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
	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	数据中心布线系统的设计与施工技术白皮书》等

在满足监测系统需求的前提下，硬件性能指标设计宜预留一定的冗余度，硬件宜预留一定的可扩展空间，便于匹配可能提高的监测要求。

线路的布设拓扑应依据监测系统具体需求、传感器类型和其传输距离衰减性能、各级采集设备的传输能力、各场所和通信网络的现有条件以及施工现场条件等进行综合性的设计。传输线路的拓扑结构应符合国际和国家相关标准的要求。应考虑结构健康监测系统和各结构、电气、机电、通信、安全等多方面的协调，需按相关标准设计安全可靠、高效便利的传输子系统。

9.3.3 数据采集与传输软件在整个监测系统中十分关键，采集的数据为结构状态的分析提供直接依据，软件精确度、运行速度、传输质量、数据库设置、数据文件存取格式等都有严格的要求。此外为保证数据采集和传输的可靠性、实时性及同步性，软件也要采取大量的有效措施。数据通信与传输过程由于故障而中断，在故障排除后，数据传输系统应具有补发功能，宜利用数据通道空闲时段将中断时间段内所有数据发送到接收端，通过设置时限避免因应答等待、重发及补发影响正常数据发送。

9.3.4 同步就是要求通信的收发双方在时间基准上保持一致。

1 传输同步按基准分类：

(1) 基于信号的同步技术：采用基于时钟同步模块的时钟频率共享技术，各级终端设备中装有时钟同步模块，再用有线介质将各个设备相连，以其中之一作为主模块，其余的作为从模块。主模块内部的时钟信号通过电缆同步从模块内部的时钟信号。各级终端设备时间戳的同步应采用同一网络时间服务器；

(2) 基于时间的同步技术：系统各部分具有一个公共的时间基准作为参考，可以基于该基准时间生成事件、触发和时钟。对于长距离传输，可以利用包括 GPS、NTP、IEEE 1588 和 IRIG-B 等各种时间的参考基准，借助绝对定时，实现传输数据的关联与同步；

9.3.5 传输同步的速度要求

(1) 异步传输

异步传输是以字符为单位进行传输，传输字符之间的时间间隔可以是随机的、不同步的。但在传输一个字符的时段内，收发双方仍需依据比特流保持同步，所以也称为起-止式同步传输。异步传输方式实现简单，但需在每个字符的首尾附加起始位和停止位，因而它的额外开销大，传输效率低。这种方式主要用于低速传输的设备。

(2) 同步传输

同步传输是指在一组字符（数据包、帧）之前加入同步字符，同步字符之后可以连续发送任意多个字符。同步方式中，数据传输额外开销小，传输效率高。但是同步方式实现复杂，传输中的一个错误将影响整个字符组（而异步传输中的同样错误只影响一个字符的正确接收）。这种方式用于高速传输的设备

9.3.6 传输质量的控制

各级数据通道必须确保高效率无差错的传送。若将海量数据整体传输必然导致可靠性下降，且任何一种通信线路上都不可避免受到一定程度的干扰，尤其在恶劣的施工环境下。信道噪声所造成的后果是接收端接收的数据与发送端不一致，即造成传输差错。为避免传输差错，应采取数据传输质量控制机制。

通信设备之间任何实际应用信息总是伴随着一些控制信息的传递，他们按照既定的通信协议工作，将应用信息安全、可靠、高效地传送到目的地。

应根据系统前端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，以包为单位实施传输。在通信中，“包”（Packet）和

“帧”(Frame)的概念相同,均指通信中的一个数据块。串行通信的数据格式有面向字符型的数据格式,如单同步、双同步、外同步;以“包”、“帧”为单位传输的机制,每包根据需要可全部或部分采用以下六个部分组成,分别是标志区、地址区、控制区、信息区、帧校验区和标志区。采用“包”为单位传输机制后,为避免数据传输过程中因电源、信号中断或干扰造成的“包”丢失现象,相应的数据传输硬件/软件设计中应使用应答模式,即引入检校-重发-补发机制进行误码控制。校验方法有奇偶校验和循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check),接收端将计算得到的奇偶校验/循环冗余校验校验码与数据包包含的校验码进行比较,二者一致,接收端给发送端确认信息,继续发送下一数据包;若校验不合格,接收端发送相应信息,要求发送端重新发送该数据包。两种校验方法可根据结构健康监测系统进行监测项目的具体数据要求,进行选用:

(1)对传输数据质量要求不高或数据传输量较小的场合宜采用奇偶校验。奇偶校验是在传送字符的各位之外,再传送 1 位奇校验位或偶校验位,分别为奇校验方式或偶校验方式。奇偶校验不能纠错,但发现错误后可以要求重发;

(2)对数据质量要求较高或数据传输量较大的场合,宜采用循环冗余校验校验(Cyclic Redundancy Check),简称 CRC 校验,采用除法及余数的原理进行错误侦测。常用的循环冗余校验码位数有 8、16、32 位,大型结构健康监测系统的通信设计时,宜采用 16 位的循环冗余校验校验。校验过程可简单描述为:在发送端根据要传送的 k 位二进制码序列,以一定的规则产生一个校验用的 r 位监督码(CRC 码),附在原始信息后边,构成一个新的二进制码序列数共 $k+r$ 位,然后发送出去;在接收端,根据信息码和 CRC 码之间所遵循的规则进行检验,以确定传送中是否出错。

9.4 数据存储与管理

9.4.1 数据的存储管理子系统在整个监测系统中起着承前启后的作用。存储与管理子系统为种类繁多、复杂的采集、处理、分析的各类数据提供集中的存储手段,直接或间接的为结构评估系统的评估需求及结构管养部门的决策提供依据;同时子系统还存储反映结构各结构参数的“历史”演变记录,这些“历史”记录对于深入了解结构的质量演变规律,进而可验证结构的设计参数、改进设计和施工的方

法、提高设计和施工水平，因此数据库设计应满足：a) 可靠性；b) 先进性；c) 开放性；d) 可扩展性；e) 标准性；f) 经济性；g) 数据共享性；

9.4.2 在线实时数据处理分析包括对实时采集的数据进行处理和分析，用户处于在线工作状态。离线数据处理分析则主要是对某一时段以前的存档数据进行处理和分析；

9.4.3 数据库数据加载步骤

- 1) 筛选数据：原始数据可能存在于各个部分，首先应将需要入库的数据筛选出；
- 2) 输入数据：系统应提供输入界面，将原始数据输入到计算机中；
- 3) 校验数据：系统应采用多种检验技术，保证输入数据的正确性，防止非法的、不一致的错误数据进入数据库；
- 4) 转换数据：对于不符合数据库要求的数据，应进行数据格式转换；

9.4.4 数据库系统在异常情况下的容错功能可按下列内容进行评价：1) 有无操作系统故障、网络故障硬件的容错；2) 有无磁盘镜像处理功能软件的容错；3) 有无应用软件异常情况的容错功能。

9.4.5 数据库应由数据库管理系统统一管理：数据的导入、修改和检索均要通过数据库管理系统进行操作。管理员应负责创建、监控和维护整个数据库，使数据能被授权用户有效使用。应将采集系统所采集到的实时数据和历史数据，提供给数据处理系统进行处理，并供评估系统对数据进行分析，最终将处理及分析结果进行保存以便查询。

9.4.6 数据库功能应包括

- 1) 监测设备管理：监测设备应包括对环境信息、荷载信息、结构反应信息和结构形态信息进行监测的传感器以及采集子站和采集总站设备；监测设备管理应包括传感器及采集设备（包括采集子站和总站）的添加、更换、状态查询以及故障检测等功能。传感器设备宜按照监测信息内容和功能进行分类管理。故障检测包括定时轮询检测及报警，用户可根据实际设定检测及报警周期；
- 2) 监测信息管理：应包括监测信息的自动导入，即将采集的数据通过传输模块进行预处理后导入到数据库中，再以图形或文件形式导出数据、历史监测信息的查询。数据导出的目的是便于为专业分析软件工具进行进一步的数据分析，宜具备监测信息的可视化功能；

3) 结构模型信息管理：应提供结构的基本参数和评估分析所需要的计算机数值模型，结构模型信息描述了进行评估分析时所需要的模型。当分析模型有所改进时，系统应支持利用新的评估模型进行分析的机制；

4) 评估分析信息管理：应提供评估准则、保存评估结果并供查询统计。评估分析模块依据监测数据和结构模型对结构进行定量或定性的分析，并依据一定的准则评估结构的性能。评估准则本身应可以添加、修改或删除；

5) 数据转储管理：应支持海量数据的归档以及相应的元数据管理。归档的数据可以存储在大容量存储设备中并应支持使用时的可访问性。数据转储主要利用数据库管理系统自身提供的归档功能进行数据归档。归档使用的大容量存储设备应包括大容量磁盘、光盘、磁带等二级存储设备；

6) 用户管理：应支持用户权限的定义和分配功能。系统根据用户的权限来操作不同模块，提供基于角色的用户组管理、用户授权、注册账号和认证管理等。用户管理内容涉及：

a) 用户角色定义。用户角色用来将系统使用的各种用户按照一定的业务要求划分为不同的角色，系统操作权限可以按照角色进行操作授权，同一种角色可以包含多个用户。通过角色授权以简化系统对用户管理的复杂度；

b) 用户属性定义。数据库管理系统应给出每个用户与角色相关的属性，如用户标识、角色组等，并应保证每个用户在数据库管理系统和其他系统中信息一致；

c) 用户标识。数据库管理系统要能成功地标识每个用户，对注册到数据库管理系统中的用户进行标识。用户标识信息是公开信息，一般以用户名和用户 ID 实现。为了管理方便，可将用户分组，也可使用别名。无论用户名、用户 ID、用户组还是用户别名，都要遵守标识的唯一性原则；

d) 标识信息管理。应对用户标识信息进行管理、维护，确保其不被非授权地访问、修改或删除；

e) 用户鉴别。数据库管理系统要能成功地鉴别每个用户，对登录数据库管理系统的用户身份进行真实性鉴别。通过对用户所提供的鉴别信息进行验证，证明该用户确有所声称的某种身份，这些鉴别信息应是保密的，不可伪造的；

f) 鉴别失败处理。数据库管理系统应检测到与鉴别事件相关的不成功的鉴别尝试，当不成功鉴别尝试的次数达到或超过了定义的界限时，安全功能应终止会话

建立的进程；

g) 访问历史。在会话成功建立的基础上，数据库管理系统应显示用户上一次不成功会话尝试的日期、时间、方法、IP 地址等，以及从上一次成功会话建立以来的不成功尝试次数。

7) 系统安全管理：应提供系统运行环境的网络安全管理和安全保护、数据库的容灾备份机制、敏感信息标记以及用户使用日志审计等功能。数据库系统安全管理应有相应的硬件、软件和人员来支持。系统安全包含两层含义：第一层是指系统运行安全，系统运行通常受到的威胁包括一些网络不法分子通过网络入侵计算机系统使系统无法正常启动，或让系统超负荷运行以及其他损坏系统硬件设备的破坏性活动。第二层是指系统信息安全，系统信息通常受到的威胁包括黑客对数据库入侵，修改或窃取系统内的资料。因此系统安全既要考虑对数据库管理系统的安全保护，也要考虑对数据库管理系统中数据信息的保护（包括以库结构形式存储的用户数据信息和以其他形式存储的由数据库管理系统使用的数据信息）。所以系统安全保护的功能要求从系统安全运行和信息安全保护两方面综合进行考虑：

a) 网络安全管理与安全保护：主要指系统运行的外部安全环境，一般包括网络管理软件和安全保护系统。前者用于防止外部用户入侵系统所在的网络，后者则主要是各种防病毒软件；

b) 数据库容灾备份主要防止系统因一些不可抗因素导致硬件设备的损坏而采取的备份策略，建议有条件的地方建立异地容灾备份机制；

c) 敏感信息标记用于标识数据库系统中需要特别保护的数据或对象，依据使用方式的不同可以标识为公开、秘密、机密和绝密四个等级。敏感信息的安全设置一般由系统安全员进行设置。对于支持有效期的各种安全属性，数据库管理系统的安全功能应限制授权管理员规定有效期的能力。数据库管理系统的安全功能应支持授权管理员对有效期后所采取的活动做出规定；

d) 用户使用日志审计：一般由系统审计员进行审计，审计内容涉及一般信息与敏感信息操作使用的历史，以便追踪信息被破坏、泄漏的原因；

e) 数据库系统安全管理还应考虑硬件、软件和人员方面的要求。

应有足够大的内存来运行操作系统、数据库管理系统核心模块和应用程序及数据

缓冲区；

应有大容量的直接存储设备和用作数据备份的存储介质；

应有较高的数据传输能力，应尽量降低因安全策略（如加密传输、事务处理）的实施带来的附加开销，保证系统的可用性；

实现某些安全功能（如数据加密/解密）可能需要附加硬件及对附加硬件的管理。

在软件方面，操作系统及接口的安全应为数据库管理系统的安全提供支持；

人员管理方面，数据库管理系统应有专门的安全管理机构和人员设置。

8) 预警信息管理：应具备预警信息处理功能，并能将各种预警信息以电子邮件和短信等形式通知相关人员。预警信息处理包括监测信息预警机制以及相应处理措施的描述信息等；

此外，当突然停电、出现硬件故障、软件失效、病毒或严重错误操作时，系统应提供恢复数据库的功能，如定期转存、恢复备份、回滚等，使系统将数据库恢复到损坏以前的状态。

9.4.7 数据库各部分的组成内容主要包括：

- 1) 监测设备数据库的内容应包括设备标识、设备名称、所属子站、几何位置、设备功能、出厂参数、安装时间、采样频率、警戒值、运行状况、维修记录等；
- 2) 监测信息数据库应包括监测到的原始环境信息、荷载信息、结构反应信息、结构形态信息以及原始数据经简单处理后的附加信息。各种原始监测信息的记录应能满足监测目的；
- 3) 结构模型信息数据库的内容应包括结构设计图纸、基本设计参数、结构分析所需要的有限元模型等；
- 4) 评估分析信息数据库的内容应包括评估所采用的准则和方法，评估时的主体、时间、参数、对象、结果和报告。评估主体指评估人员或操作人员。评估结果以定期和以专题事件为单位的方式记录；定期记录指每个月、季度或年的分析评估结果；专题事件记录指突发事件（如地震、台风等）发生后的专题分析评估结果；
- 5) 用户数据库的内容应包括用户名、用户标识、用户组、个人信息等。

9.4.8 数据元应根据信息内容属性，将信息按一定的原则和方法进行区分和归类，并建立起一定的分类系统和排列顺序，以便管理和使用信息。信息编码是在信息分类的基础上，将信息对象赋予有一定规律的、易于计算机和用户识别与处理的

符号。传感器信息宜根据传感器的类型分类并根据所在空间位置或所属子站编码。比如某光纤应变传感器的一个通道的编码可按下表进行编码（子站信息宜根据子站所在空间位置编码）：

表 9-4 某光纤传感器在数据库内的通道编码

xxx（如 FBG）	xx	xx	xx	x
↓	↓	↓	↓	↓
光纤传感器类型	子站编号	监测点位置	传感器位置	传感器通道或方向
(三个字母或两位数字)	(两位数字)	(两位数字)	(两位数字)	(一位数字)

监测单位应遵照“国际标准、国家标准、行业标准和企业标准”来建立适合结构物实际情况的健康监测信息分类与编码标准，应做好名词俗语的标准化，确定信息分类与编码对象、编码原则和编码表标准。

9.4.9 应有一个或多个能胜任的授权用户来管理数据库管理系统和它所包含信息的安全。管理员应经过一定培训，以便能正确有效地建立和维护安全策略。被授权的管理员应严格遵从系统管理员文档的要求进行操作，不会蓄意破坏数据库管理系统，不会蓄意违反操作规程。授权用户具备必要的授权来访问由数据库管理系统管理的少量信息。数据库管理系统应在系统管理员的配置下应能正常运行，用户可通过网络远程访问和使用数据库管理系统。应对不同级别的授权用户提供对应其级别的适当服务。

9.4.10 数据库试运行包括功能测试和性能测试：

- 1) 功能测试：实际运行应用程序，执行各类数据库操作，检验各种功能是否正确无误，是否满足设计要求。
- 2) 性能测试：测量系统的性能指标，检验是否符合设计指标。
- 3) 在数据库试运行阶段，由于系统还不稳定，软硬件故障随时都可能发生，因此应做好数据库的备份和恢复工作。

9.4.11 数据库的维护应符合下列规定：

- 1) 数据库管理员应针对不同的应用要求制定不同的数据备份计划，定期对数据库和日志文件进行备份，以保证一旦发生故障，能利用数据库备份和日志文件备份，尽快将数据库恢复到某种一致性状态，并尽可能减少数据库的丢失。
- 2) 数据库管理员应根据用户的实际需要授予其不同的操作权限。在数据库运行

过程中,宜根据环境变化适当调整原有的安全性和完整性控制,以满足用户要求。

3) 数据库管理员应借助数据库管理系统的系统性能监测工具,来监督系统运行状态,判断当前系统是否处于最佳运行状态;否则,需要通过调整某些参数来进一步改进数据库性能。

4) 数据库管理员在必要时应借助数据库管理系统提供的实用程序对数据库进行重组织和重新构造。数据库管理系统应对重构数据库功能提供管理员人工设置或软件自动处理的选项。