

光纤光栅传感在大跨度空间结构健康监测中的应用



深圳市简测科技有限公司

二〇一四年九月

由于空间网架结构能使人们获得更大的使用空间，而且具有丰富多彩的外形和多变美观的造型，使它成为世界上近二三十年来发展最快的结构形式。随着空间结构的跨度增加，它的复杂性也随之增加。在非地震区，风是大跨度空间网架结构的主要设计荷载。国际上对这类超大型的空间网架结构的风作用机理和特点还缺乏较深入的研究，因此依据的抗风设计方法离实际还有一定的距离。由于强风作用下网架结构的三种主要破坏形态——“杆体压屈、杆件焊缝拉裂及球节点破坏”不易及时发现，这就会造成结构抗风能力的下降，给结构的安全性带来了极大的隐患。为了避免由此而引起的工程灾害的发生，确保人民生命和财产的安全，延长工程结构的使用寿命，就要求能及时地了解结构的工作状态，及时地发现结构未知的损伤。为此，建立能实现对结构工作状态和结构损伤自动报警和自动诊断的智能结构系统就十分必要。

项目背景

深圳市市民中心位于深圳市福田区，是深圳市新的政治文化中心和标志性建筑物之一，总建筑面积为 21 万余平方米，总高度约 80m，分中区塔楼和东西两翼。中区塔楼有两座：一座为直径 36 m 的 12 层圆形塔楼及一座 36m×45m 的 15 层矩形塔楼。

深圳市民中心大屋顶网架结构，两边以树状钢柱为支撑，中部有一个圆塔和一个方塔从下而上穿出屋面，同时也作为大屋顶网架的支点。整个大屋顶网架结构展翅在市民中心综合建筑群之上，是市民中心建筑中最精彩的设计，大屋顶网架面积达 6.3 万平方米、总重量约 9000 吨，长 486m，宽度由两端 154m 向中间缩小至 120m，其厚度由 2.25m 变至 9.00m。屋盖上下表面均为曲面。目前，世界建筑史上尚无类似工程的实例，其鸟瞰图如图 8.1 所示，正视图如图 8.2 所示。



图 8.1 深圳市民中心鸟瞰图



图 8.2 深圳市民中心正视图

深圳地处多台风地带，大屋顶网架结构常年完全暴露、日晒雨淋，加上台风作用，其工作环境比较恶劣，其上的风场复杂，又是较柔结构体系，因此该结构为风敏感结构体系。为保证大屋顶网架结构的安全使用，深圳市政府特提出了研究设计“深圳市市民中心大屋顶网架结构健康智能监测系统”的项目，该项目由武汉理工大学瞿伟廉教授主持，目前相关研究、现场安装设计、机房布设及其系统集成均已完成，且运行良好。

大屋顶网架结构监测系统总体框架

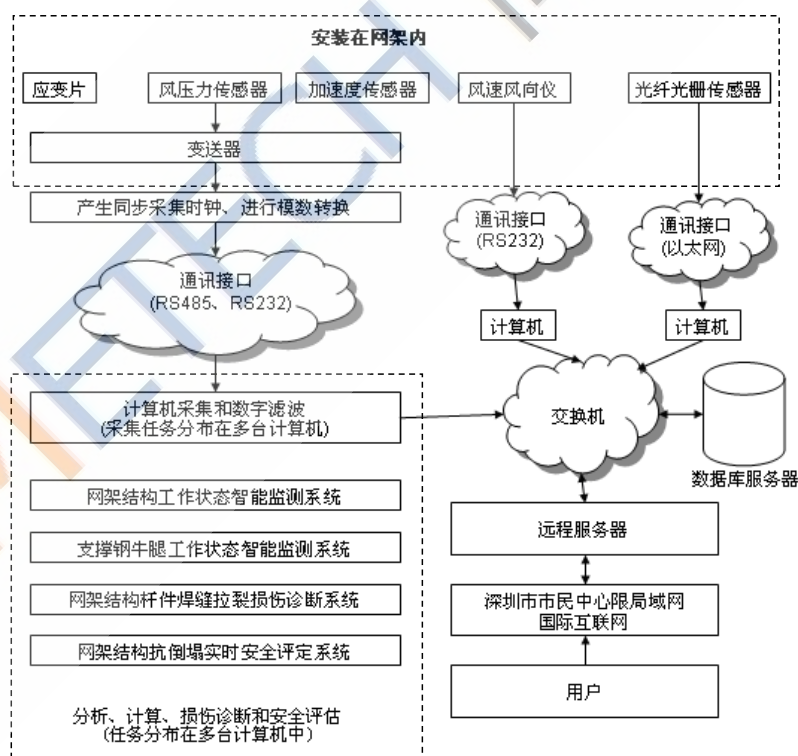


图 8.3 大屋顶网架监测系统总体框架

“深圳市市民中心大屋顶网架结构健康智能监测系统”(以下简称大屋顶网架监测系统)主要由传感系统、分布式通信接口、数据采集和分析处理系统、数据库管理系统、网架结构工作

状态智能监测系统、支承钢牛腿工作状态智能监测系统、网架结构杆件焊缝拉裂损伤诊断系统、网架结构抗倒塌实时安全评定系统组成，系统结构如图 8.3 所示。

(1)传感系统:传感系统由光纤光栅传感和电致传感两个子系统组成，其主要作用是获取大屋顶网架结构工作状态智能监测和结构损伤自动诊断所需的荷载及响应信息，包括传感器、信号调理器和数据采集等几个部分。系统安装的传感器的类型包括应变片、风压力传感器、加速度传感器、风速风向仪、光纤光栅传感器等；

(2)分布式通信接口:其主要功能是完成各种各样的数据采集仪和计算机之间通信，另外是实现计算机与计算机之间的通信。该系统中用到的通信接口有 RS232, RS485 和 Ethernet 网络通信接口；

(3)数据库管理系统:其主要功能包括存储数据采集系统获得的数据信息，以及整个智能监测系统各模块之间数据的传递、存贮和管理，以保证整个系统的正常运行；

(4)网架结构工作状态智能监测系统:它在通过传感器获取有限点结构响应信息的基础上，实现对网架结构所有构件所处工作状态的实时评定；

(5)支承钢牛腿工作状态智能监测系统:它在通过传感器获取牛腿有限点响应信息的基础上，实现对支承网架结构的整个钢牛腿所处的工作状态进行实时评定；

(6)网架结构杆件焊缝拉裂损伤诊断系统:它在通过传感器获取结构有限节点响应信息的基础上，完成强风作用下网架结构主要的损伤——杆件与球节点焊缝拉裂发生位置(区域)和时间的自动诊断，并实现报警；

(7)网架结构抗倒塌实时安全评定系统:它在判定支承钢牛腿有破坏时完成对网架结构杆件的破坏状态及网架结构整体安全状况的评定。

从该系统实现的功能来看，它真正实现了利用有限传感器的测量信息，对整个网架结构的工作状态进行实时健康监测。该系统可以在最经济的条件下实现对整个网架结构的全面健康监测。深圳市民中心屋顶网架结构智能健康监测系统是在世界上体型最大和最复杂的网架结构上实现的世界第一个大跨度网架结构的健康监测系统，它为网架结构的健康监测作了初步的探索和实践。

传感系统

可靠、低噪声、精度高的采集数据是保证高性能监测系统的前提条件，为了确保得到高性能的大屋顶网架监测系统，在安装了电致传感系统的情况下，同时安装了光纤光栅传感系统。

深圳市民中心大屋顶网架结构测点分布、传感器数量和功能说明如表 8.1 所示。

表 8.1 大屋顶网架结构的传感器测点分布

监测项目	传感器	测点布置
风速、风向监测	风速风向仪 Model26700	广场和方塔楼上各布置一个测点
风压力监测	风压力传感器	网架结构上下表面各 20 个测点
关键杆件应力监测	光纤光栅传感器	每个关键杆件布置 1 个测点
树状支撑应变监测	光纤光栅传感器	每组树状支撑选择 1 个测点
牛腿应变监测	应变传感器	每个被监测牛腿选择 4 个关键点
	光纤光栅传感器	25、26 号牛腿选择 2 个关键点

根据理论分析，网架结构支撑体系中的薄弱环节在于方塔楼处的支撑牛腿处，方塔楼处的支撑节点相对较少，各牛腿的应力水平较高，故在监测系统中将方塔楼处的四个牛腿列为重点监测对象。如图 8.4 所示的位置即 22，23，25，26，27 和 28 号位置为健康监测系统重点监测的 6 个牛腿，重点监测支承钢牛腿所承受的荷载和荷载位移。图 8.5 和图 8.6 所表示的是要识别风振响应峰因子的关键杆件和树状支撑。(图 8.5 仅用支撑、下弦杆和下腹杆表示网架结构)

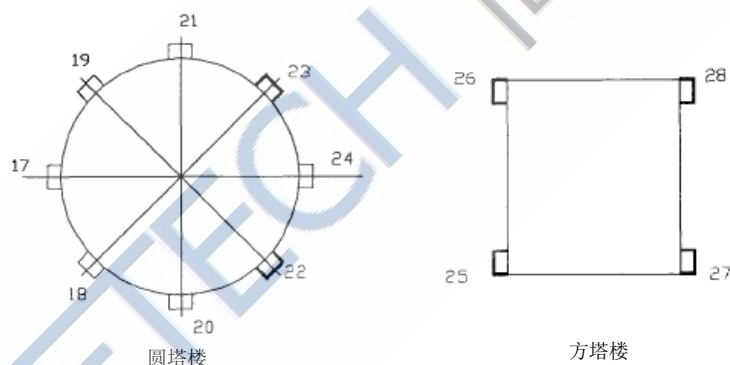


图 8.4 结构牛腿处传感器布设

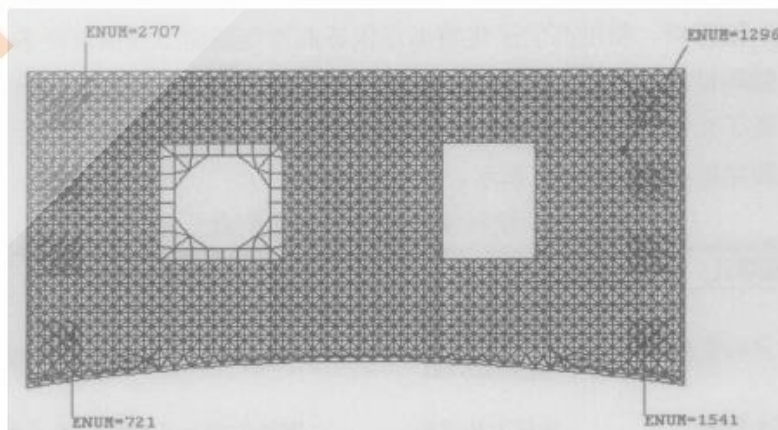


图 8.5 所监测的关键杆件分布

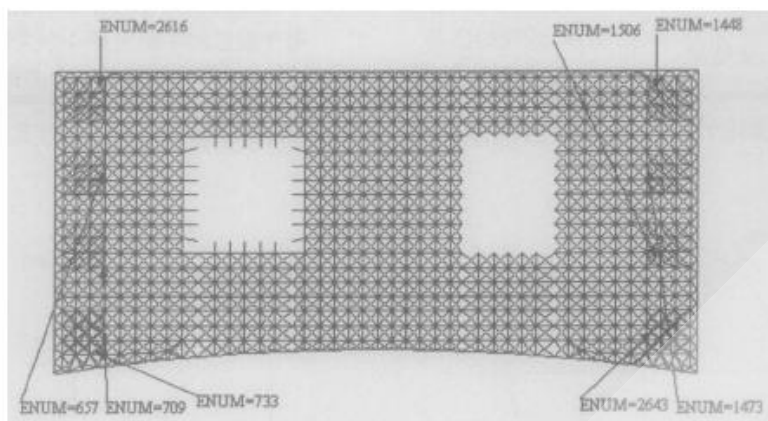


图 8.6 所监测的树状支撑分布

大屋顶网架光纤光栅传感系统

1. 光纤光栅传感系统结构

深圳大屋顶网架结构监测系统中由于安装的光纤光栅传感器不是很多，所以该光纤光栅传感系统在实验室研究的光纤光栅传感系统原型的基础上不需要光开关的扩展。深圳大屋顶网架结构监测系统中，在网架、树状支撑和牛腿的关键点处分别安装了光纤光栅传感器，通过对采集数据的分析，光纤光栅传感器所采集到的数据明显优于电致传感器所采集到的数据。该系统的结构框图如图 8.7 所示。

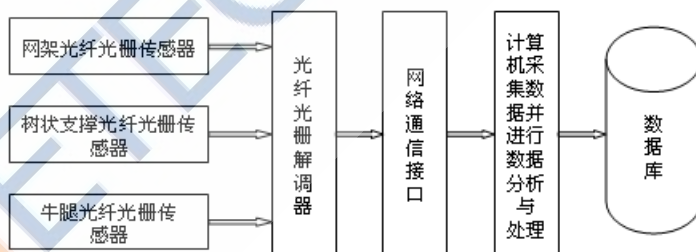


图 8.7 大屋顶网架结构光纤光栅传感系统结构

该项目中的光纤光栅传感器经标定试验证明其中心波长与应力的线性关系好，精度高。接头采用通用的光纤 FC/APC 跳线接头。在大屋顶网架监测系统中共安装此类光纤光栅传感器 20 个，分为 4 路接入光纤光栅解调器，其接入的方式如图 8.8 所示。由于不同的光纤光栅传感器可具有不同的工作波长，因此可以利用波分复用技术，将一根光纤级联多个光纤光栅传感器作分布式测量，这样可以根据光纤光栅解调器对每个通道的最大解调能力，在每个通道上串接多个光纤光栅传感器，从而大大降低了现场的布线工作。

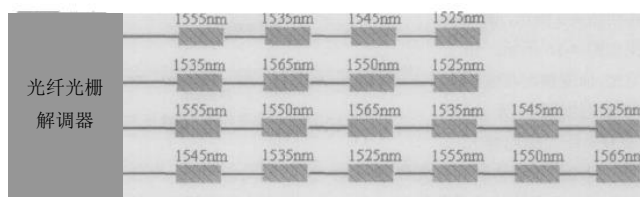


图 8.8 大屋顶网架结构光纤光栅传感器波长分布

光纤光栅解调仪的主要功能是将光纤光栅的中心波长解调出来。光纤光栅解调仪具有测量精度高，灵敏度好，可靠性高，测量点多，测量范围大，光纤光栅传感器传感头结构简单、尺寸小，适于各种应用场合，抗电磁干扰强，耐腐蚀，能在比较恶劣的化学环境下工作等特点。光纤光栅解调器的机理有多种，主流采用基于 F-P 滤波器的解调原理。当外界条件发生变化时，如力或温度，会改变光栅的中心波长，光栅的中心波长变化就反映了外界条件的变化。

2. 光纤光栅传感系统的硬件连接和二次开发

光纤光栅解调仪只提供了将各路传感器感应信息的波长解调为数字信号，其数据存储在解调器中，如果需要获取工程结构对象的数据就只能通过使用磁盘复制，而且对采集数据的存储也必须通过人工操作，仅仅存储一段时间的数据，不能进行连续的数据存储，因而不可能给系统提供实时的分析数据。但是，实际工程应用的目的主要是对光纤光栅解调器采集的大量传感器数据进行数据处理和分析，从而推理出工程结构对象的实时工作状态并对其进行评估，这就要求将解调器的数据实时传送到分析用的计算机中，由计算机对传输来的数据进行分解、转换成程序需要的格式，并将其存储到数据库服务器中。因而必须根据实际需要自行配置项目所需的硬件环境和开发相关应用程序。

根据网架结构监测系统的实际需要，对传感系统进行了二次开发。

(1) 硬件连接

二次开发的主要工作在软件上，但是在进行软件开发之前必须构建硬件工作环境。设计了 USB 和 Ethernet 两种通信接口方式，USB 通信方式主要是用来做数据备份用的，Ethernet 用来进行数据通信，因而只需把该仪器加入局域网就行，其硬件连接如图 8.9 所示，但是在应用的过程中，发现这种连接通常会由于网络阻塞引起光纤光栅传感系统采集暂停。为了解决这一问题，采用了在数据库服务器中添加一块网卡，将解调仪的 Ethernet 接口直接连接到数据库服务器中，这样光纤光栅传感器数据不经过交换机，也不需安排另外的数据采集计算机来收集数据，同时也缓解了局域网上的信息流量，不过这样增加了数据库服务器的负担，由于采集利用了专门的网卡，所以对数据库服务器的影响不大。采用这种方式后，系统运行一直良好。

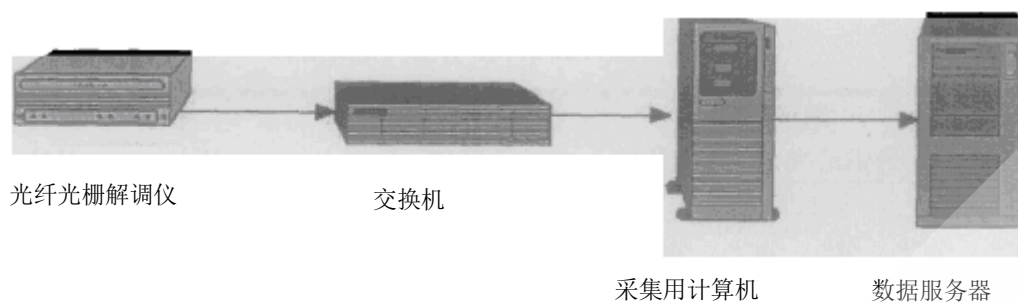


图 8.9 传感系统硬件连接

(2)软件开发

对光纤光栅解调仪进行二次开发的主要目的是将解调仪采集到各个传感器的数字信息经过 Ethernet 通信方式传输到数据库服务器中，使大屋顶网架监测系统能够实时获取光纤光栅传感器的数据。为了提高计算机的工作效率和数据获取的实时性，采用了多线程技术来获取解调器中的数据。软件的关键部分流程图如图 8.10 所示，软件设计中采用了多种防错处理，保证系统能自动连续运行。

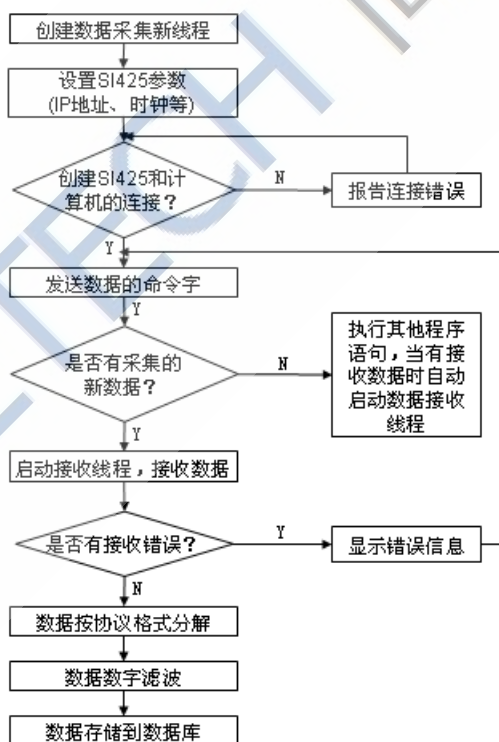


图 8.10 Si425 二次开发软件流程

光纤光栅传感系统和电致传感系统的比较

通过对大屋顶网架监测系统中布设的光纤光栅传感系统和电致传感系统应用，总结出两个

系统之间在如下几个方面存在不同之处。

(1)传感器布线：电致传感器由于采用电信号进行传输，所以对于每个传感器至少需要两根电缆进行信号传输，另外由于有些传感器感应后的信号不是标准的可进行长距离传输的信号，所以必须增加变送器或信号调理器以便于传输到控制中心的信号是有效的信号，需要增加变送器或信号调理器的电源线，另外还需要一条屏蔽线，因此每个测量点就有五根线，这样在每个点到机房之间的连线比较多，布线工作量很大。光纤光栅传感系统由于利用光信号传输和波域分布技术，一根光纤可级联多个光纤光栅传感器，因此现场的布线工作量明显减少。

(2)传输性能：电致传感器是将物理参数转换成电信号进行传输和识别的，受环境影响大，精度低，稳定性差，不适合长期对结构进行监测和在恶劣环境下对结构进行监测。光纤光栅传感器对外界条件的变化是通过光信号的波长反应的，光信号在光纤中的传输损耗小，传输距离长。

(3)维护：使用电致传感器必须有上位机、下位机以及对应开发的程序和布线，这是一套复杂的系统，使用和维护的要求和费用较高，而且维护麻烦。光纤光栅传感系统由于进入到解调器的通道只有 4 个，整个系统由传感器和解调器组成，所以维护方便。

(4)传感器性能：电致传感器由于感应后的信号是电信号，所以对其工作环境有一定的要求。光纤光栅传感器传感头具有结构简单、尺寸小，适于各种应用场合，抗电磁干扰强，耐腐蚀，能在比较恶劣的化学环境下工作等特点。