

基于 GIS 的桥梁结构健康监测与管理信息系统

程朋根¹, 史文中², 高赞明²

(1. 东华理工学院测量系, 江西 抚州 344000; 2. 香港理工大学建设及地政学院, 香港 九龙)

摘要: 桥梁结构健康监测对桥梁管理与维护非常重要, 监测信息的采集、管理、可视化是系统必须解决的问题。以香港青马大桥的监测数据为例, 研究开发了基于 GIS 的桥梁结构健康监测与管理信息系统, 并从系统总体设计、技术方案、数据库结构设计、系统功能及系统实现等方面进行阐述。

关键词: 地理信息系统; 桥梁; 结构健康监测; 管理; 信息系统

结构健康监测工作为评估结构的耐久性和可靠性提供有价值的信息, 监测系统采集的原始数据和分析结果对桥梁的管理、维护和验证桥梁设计参数来讲是十分重要的信息。为了监测青马大桥、汲水门大桥和汀九大桥的结构健康, 并对其结构评估, 香港路政署设计和安装了一套桥梁结构健康监测系统(WASHMS)。它由传感器系统、信息采集系统、信息处理和分析系统、系统操作与控制系统以及电缆网络五个子系统组成。整个系统有1 200个传感器, 其中青马大桥有400个, 所采集的数据量是海量的。如果采用传统的数据文件格式来保存这些海量数据, 在数据的存贮和访问方面显得非常困难。除了存贮来自传感器的采集信息外, 系统的其它信息, 如桥址地形信息、传感器在桥上的位置信息、桥梁主要构件的健康信息、传感器信息等等, 都应在系统中进行有效的管理。由于采集数据的海量特征和采样点(传感器位置)的空间分布特征, 使得传统的基于文件和单机形式的关系数据库的管理方法制约了系统管理空间信息的效率。为进一步研究提高该系统在存储、访问和分发海量监测数据能力的可行性, 研究开发了基于地理信息系统(GIS)的桥梁结构健康监测与管理信息系统(GIS-BSH2MS)原型。它是一个集成大型商用数据库、GIS和网络技术的可运行在局域网或因特网上的系统。本文主要从系统总体设计、技术方案、数据库结构设计、系统功能以及系统实现等方面来阐述基于GIS的桥梁结构健康监测与管理信息系统。

1 系统总体设计

桥梁结构健康监测信息系统中, 需要管理各种各样的数据, 有静态和动态数据、图形和非图形数据、

常规与海量数据, 如表1所示。系统研究的目的是建立一个能够对数据进行管理、处理与分析以及可视化的系统。其特征为: ①集成GIS软件与大型关系数据库技术; ②能在局域网或因特网上运行, 即具有客户/服务器体系结构; ③能够自动地建立和更新中央数据库; ④能够方便地访问任意传感器任意时间段所采集的数据, 并能对得到的数据进行分析 and 可视化。

表1 数据特征表

数据特征 数据名称	动态	静态	图形	非图形	海量
桥址地形图		✓	✓	✓	
桥梁信息		✓	✓	✓	
传感器信息		✓	✓	✓	
监测采样数据	✓			✓	✓
统计与分析结果	✓			✓	

大型关系数据库系统是信息管理的有力工具, 如SQL Server、Oracle。基于客户/服务器体系结构的数据库系统为年信息的管理和共享提供了更为有效的手段, 因此可以利用它们来管理自传感器采集来的海量数据。

GIS是采集、存贮、管理、集成和分析与地理分布有关的各种类型数据的有效工具。它是空间信息系统, 能同时管理空间信息和属性数据。在桥梁结构健康监测系统中大多数信息与空间位置有关, 如桥梁的地理位置、一个桥梁连接点在桥的何处并连接那些桥梁构件、传感器在桥梁中的位置分布情况等, 这些与位置有关的信息和关系属空间信息。如果桥梁结构健

* 收稿日期: 2002-08-17

* 基金项目: 香港理工大学发展基金资助(1, 31, 37, 87A5)

康监测系统中采用 GIS 技术, 各种与桥梁有关的大到台风小到传感器等各种信息可以集成在一个系统中

进行管理。此外 GIS 为系统不同类型数据和分析结果提供了有效的可视化手段。

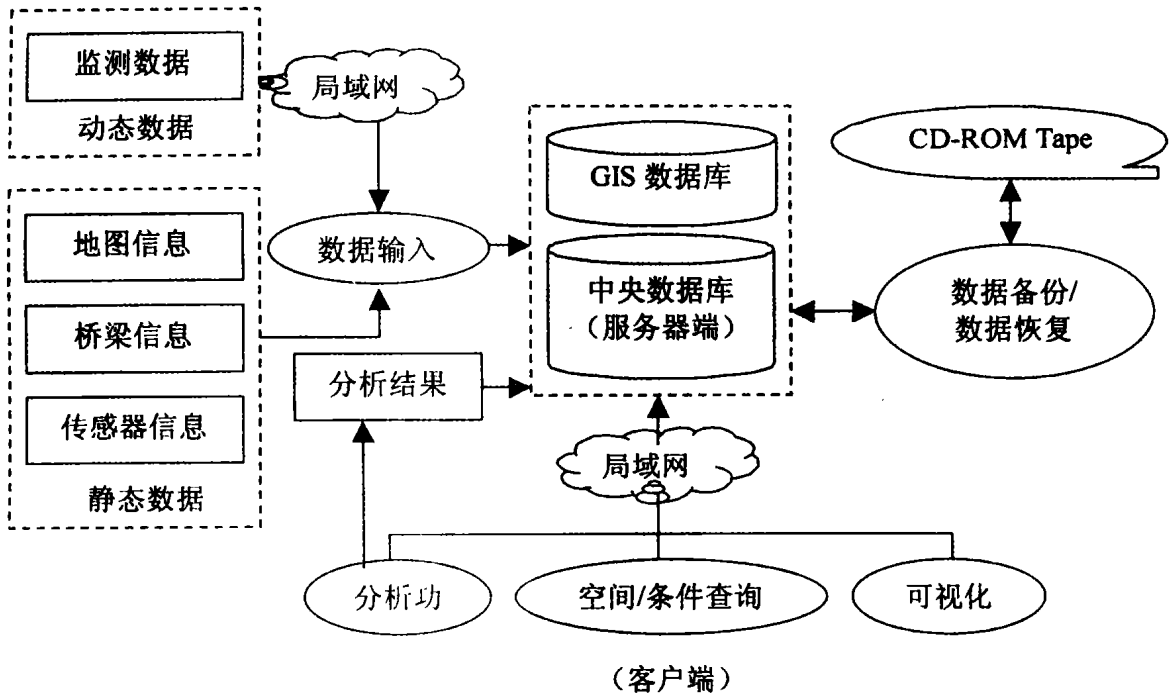


图 1 系统框架示意

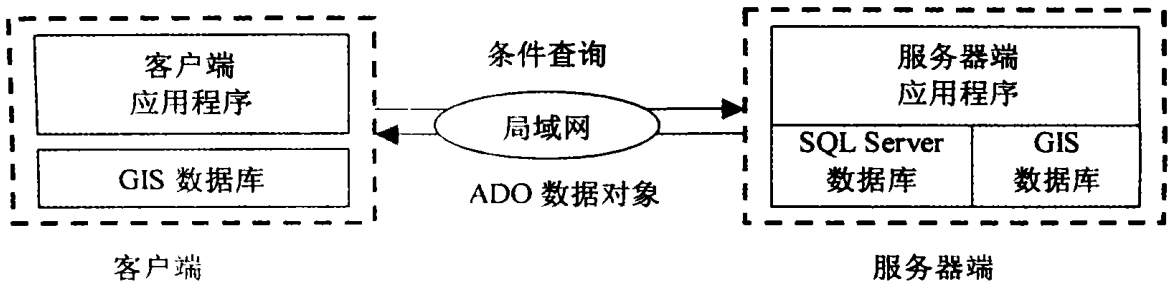


图 2 基于 ADO 技术方案示意

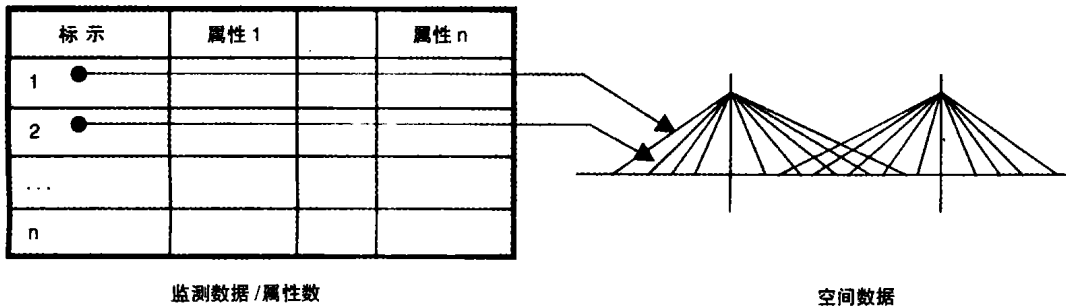


图 3 GIS 与 SQL 数据库连接示意

在基于 GIS 的桥梁结构健康监测与管理信息系统中, 大型数据库管理系统用来管理从传感器采集来的海量数据、桥梁与传感器的文档和各种分析结果;

GIS 则是系统的核心, 它实现空间信息和非空间信息的集成, 即用于存贮、显示、查询、分析和表示各种与结构健康相关联的信息。系统概念框架设计图如图

1所示。

在服务器端, 通过采用数据输入与数据库维护模块, 将来自监测系统的原始监测数据和分析结果被定期地输入到动态变化的动态数据库中并定期进行备份。对于那些不变或很少变化的诸如桥址地形图、桥梁图形信息、传感器信息等数据, 可以利用GIS软件建立一个静态数据库来存贮。利用系统的数据分析功能, 对传输来的数据进行诸如数据分类、过滤等预处理, 再按传感器或通道标识进行组织, 并输入中央数据库中。中央数据库是一个可以定期备份和更新的动态数据库。动态数据库可以被不同目的用户所共享, 例如载荷响应监测、结构健康监测、损伤探测、疲劳分析等等。

用户通过系统的分析模块控制界面选择特定的分析模块调用中央数据库中的数据, 对分析结果可以图形或报表的形式进行输出。有些分析结果, 尤其是统计分析结果需要存贮以便长期使用, 因而需要建立静态数据库。静态数据库包含两种形式的数据, 一是系统运行过程中逐渐生成的数据, 如对监测数据的统计分析结果; 二是静态数据, 如桥梁结构信息和传感器描述信息。整个动态数据库、静态数据库和分析结果数据库存贮在服务器端构成中央数据库。基于中央数据库, 用户可以进行数据输入、基于图形的查询、基于条件的查询、各种分析及可视化。

在客户端, 通过查询手段, 用户不仅可以从服务器端得到不同传感器任意时间段的采集数据, 而且可以对得到的数据进行图形化显示或作进一步的分析处理。利用系统可视化功能, 对原始数据、分析结果和图形信息以图形界面的形式展示给用户的功能。如监测数据的历史曲线、统计分析直方图、受载荷和风力影响的桥梁动态位移图、桥梁结构健康信息可视化, 以及桥梁、传感器位置分布图等等。

2 技术方案

2.1 系统开发环境

为更好地实现系统的功能, 集成不同的商业软件来开发系统是非常重要的。根据总体设计方案, 系统开发时集成的软件主要包括: 大型数据库系统 (SQL Server)、地理信息系统软件 (Maptitude)、高级程序设计语言 (VB6.0)、网页制作软件 (InterDev), 网络软件、Windows2000等。

2.2 开发技术路线

系统开发的技术路线有两种模式, 即基于ADO技术模式, 基于ASP技术模式。对于第一种模式,

程序分别存贮在服务器端和客户端, 数据存贮在服务器端, 在客户端, 用户通过局域网到服务器端得到所需的数据, 通过客户端的应用程序对访问的数据进行可视化输出。在这种模式中, 数据通过ADO技术进行传输。就第二种方案而言, 数据和程序都存贮在服务器端, 用户通过局域网采用ASP技术访问数据, 这种方案存在的主要问题是动态显示所采集的历史数据。由于通过ASP技术时生成动态图形比较困难, 因此在局域网环境下采用ADO技术方案, 而在因特网上则采用ASP技术。图2为基于ADO技术方案示意图。

2.3 GIS与SQL数据库的连接

由于空间数据采用GIS软件进行管理, 所采集的监测数据采用SQL Server数据库进行, 为实现GIS与SQL数据库之间的交互, 需要采用一个连接标识符作为图形与属性数据之间的连接值, 系统实现时可采用传感器标识、通道标识、桥梁对象标识等做连接值, 如图3所示。基于图形的查询时, 在图形界面上点击目标, 通过GIS功能得到图形对象标识, 根据图形对象标识到相应的属性数据库中结合查询条件, 就可提取图形对象的属性值。

2.4 GIS系统中空间信息的管理

系统中地图信息、桥梁图形数据直接利用GIS软件的空间数据管理功能进行分层管理。空间信息的输入可以通过数据交换模块将桥梁设计图件综合后转换为GIS能管理的图形模式, 也可利用地图数字化软件对地图进行数字化录入。

3 数据库设计

3.1 数据源分析

系统中需要管理的信息有: 传感器数据、通道数据、传感器位置信息、桥梁文档、桥址及其所在区域地形图、采集的原始监测数据 (包括历史数据、频谱数据及其各种分析结果) 等等。正如表1所提及的那样, 这些数据可以划分成图形与属性、动态与静态、常规与海量等不同特征。不同特征的数据应采用不同的数据管理模式, 它们的数据库结构和存贮环境也不尽相同。

3.2 数据库组织设计

为方便数据库的管理、存贮和恢复, 可以设计不同形式的数据库, 如公共数据库、日数据库。公共数据库主要存贮静态的、变化较小的、需要更长时间保存的信息, 如桥梁信息、传感器信息、通道信息、分析结果等。由于所采集的监测为海量数据, 建立数据

库的目的是为了提高对监测数据的访问效率，因此采用了每天建立一个数据库的方法来组织监测系统所采集的动态数据。公共数据库的命名规则是桥梁名称的缩写，例如，青马大桥 (Ting Kua Bridge) 的公共数据库名为 TKBridgeDB。为了便于数据库的备份和恢复，日数据库的命名方法是公共数据库名加日期字段。如青马大桥 2001 年 9 月 12 日的日数据库名是 TKBridgeDB01sep12。

考虑到计算机硬盘容量的限制，数据库只能存贮一定时间段内的数据，一定时期以前的数据需要备份在光盘 (阵列) 中。为了便于管理备份信息，在公共数据库中设计了一个备份信息管理表 (BTable)，当需要访问的数据已经不在当前数据库中时，可以通过查询条件中的日期信息从 Btable 中找到日数据库的备份光盘的存放位置，然后对数据库进行恢复，之后就可以访问到所需的数据。对于图形数据，主要采用 GIS 软件进行管理；与图形信息相关联的属性数据可以设计相应的表并存在放在公共数据库中或直接利用 GIS 的属性管理功能实现。

3.3 表设计

系统中涉及的表格比较多，如传感器信息表、通道信息表、频谱数据表、监测数据统计表、数据库备份信息表、监测原始数据表等等。限于篇幅，本文只列举几个数据表的设计。

3.3.1 传感器信息表

传感器信息表包含的字段有：传感器标识、传感器类型、维特征、采样频率、位置编码、传感器图片信息、传感器历史记录等。

3.3.2 数据库备份信息表

备份信息表的特点是结构固定，动态变化但每天增加一条记录，增长速度慢，因此可以将该表放在公共数据库中，该表的记录字段包括：备份标识、桥梁名、数据库名、数据库备份日期、备份文件名、备份光盘当前状态、备份者、备份使用历史记录等。

3.3.3 监测采样数据表

采样数据具有数据量大、动态性和非图形的特点。例如，加速计 15 个通道 1h 采集的文本数据为 21 M，一天 500 M，这样具有 67 个通道加速计传感器的青马大桥一天的数据就达 2 G。采样数据建表的原则是，一个通道一天的数据应该存放在一个表中，相同类型的传感器采集的数据放在一个表中或多个表中，但它们存放的表名以及在表中的顺序号必须预先设计并固定，这样会给数据的访问带来较大的方便。

为提高访问效率，一个表所含的通道数最好不超过 20。实验过程中，采用 5 个表存放青马大桥 67 个加速计的采样数据，1 个表存放风速计的采样数据。采样数据表的格式为：采样时间，通道 1 的数据，通道 2 的数据，……，通道 m 的数据。



图 4 服务器端系统操作界面示意

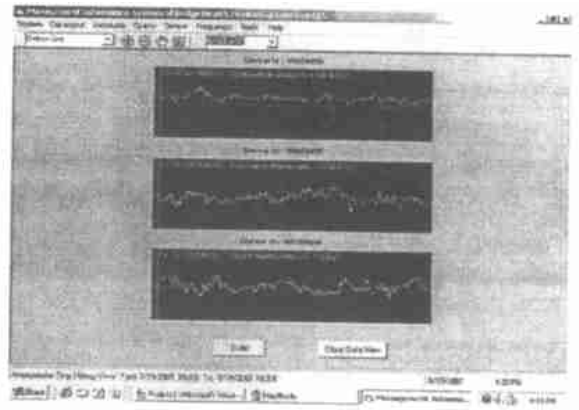


图 5 采样数据的历史记录可视化示意

4 系统功能

根据系统总体设计方案，系统应该具有如下功能：数据输入、数据管理、数据备份和恢复、数据分析与可视化。

4.1 数据输入

通过局域网的形式，接收来自信息采集站的数据并连续不断地输入到中央数据库中。对于地图、桥梁和传感器图形与位置信息可以直接利用 GIS 软件的数据输入功能实现。

4.2 数据管理

数据管理有两种方式，其一是采样数据与分析结果，它们可以采用 SQL Server 数据库进行管理。另一数据为地图和桥梁图形及其属性信息，则采用 GIS 软件进行管理。为使用户方便操作系统，两个系统应统一在一个图形界面下。

4.3 数据库备份与恢复

对于动态数据库中一定时期之前(如一个星期)的数据必须备份到光盘或磁带等数据备份介质上,并在备份信息表中随时增加相应的备份信息。

4.4 数据查询

数据查询有两种形式,即基于空间的查询和基于条件的查询。前者是基于位置的查询,它需要通过GIS提供的图形界面来实现。例如,在地形图上选中某桥梁可以得到该桥梁属性信息和桥梁图形,在此基础上点击传感器可以得到传感器的信息,结合有关对话框,可以得到该传感器某个通道从时间 t_1 到时间 t_2 的采样数据。后者是用户直接从查询条件输入对话框中输入条件信息后,系统自动地根据输入条件访问数据库,并将满足条件的信息提供给用户,如要获得某传感器所有通道从 t_1 时刻到 t_2 时刻时间段内的采样信息,则采用基于条件的查询比较方便。

4.5 数据分析

数据分析分简单分析和复杂分析。复杂分析包括对采样数据的频谱分析、损伤探测分析、基于神经元的各种分析等;而简单分析则指统计分析,图形与采样数据的压缩操作等等。

此外,利用GIS的空间分析功能可分析桥梁在地震、暴风等自然灾害破坏下,对交通影响的程度。

4.6 可视化

可视化内容包括对不同类型传感器采样的历史数据的以时程曲线显示、频谱分析结果的图形显示、桥梁结构健康信息不同纹理或颜色的表示、地图信息的表示以及桥梁图形的显示等等。

5 系统实现

实验结果表明,所采用的技术路线是可行的。系统实现分两部分:客户端程序和服务器端程序。客户端应用程序除功能受到一定的限制而比服务器端少外,它们的编程技巧和系统操作风格非常类似。VB6.0高级程序设计语言作为系统的主开发环境,通过ADO技术对SQL Server数据库进行操作,通过GIS软件Maptitude的GIS开发工具包GISDK实现GIS与用户程度之间的交互。程序实现了系统所设计的功能,利用这些功能用户可以注册登记使用该系统、向系统输入数据、对数据库进行备份和恢复、通过局域网访问数据库、对访问的信息提供多种可视化功能。限于篇幅,本文仅给出两个系统操作图形界面,图4为系统操作界面、图5为利用系统查询功能

所得到的某传感器三个通道的历史记录曲线(部分)。

6 结论

通过对本项目的研究,建立了系统的原型,并利用青马大桥的加速计传感器和风速计传感器的数据对系统进行了测试,各项功能达到设计要求。可以得出如下结论。

建立基于GIS的结构健康监测与管理信息系统从技术和方法上来讲是切实可行的;GIS的应用丰富了系统对桥梁和传感器的图形和属性数据进行存贮、管理、分析和可视化方面的能力;所采集的监测数据由于具有海量特征,利用GIS软件来管理比较困难,采用大型关系数据库进行管理可以克服这个问题;SQL Sever数据库具有管理海量数据的能力,以日数据库建立动态数据库、建立备份信息表的措施方便了对数据库的创建、备份和访问;通过图形的对象标识,GIS和大型关系数据库的能够进行有效的集成;桥梁和传感器的动态监测数据和静态信息可以在基于局域网和因特网的环境下进行管理,利用ADO技术实现数据共享。

当然,目前开发的系统是一个实验型系统,要使本系统能够发挥更好的作用还需要不断完善。如基于二维GIS向三维GIS括展、分析结果与桥梁构件之间的实时交互、桥梁健康状态的可视化方法研究等。

参 考 文 献

- [1] 张宁勇等. 基于GIS的桥梁管理系统分析与研究. 华东公路, 2001, 4.
- [2] C. K. Lau & K. Y. Wong, "Design, construction and monitoring of the three key cable-supported bridge", Structures in the new millennium, Lee (ed.), 105-115, Balkema, Rotterdam, 1997.
- [3] K. Bergmeister, U. Santa, "Global Monitoring Concepts for Bridge", In Nondestructive Evaluation of Highways, Utilities and Pipeline IV, A. Emin Aktan, Stephen R. Gosselin, SPIE Proceedings of Vol. 3995, 266-275, SPIE, Newport Beach, USA, 2000.
- [4] K. Y. Wong, C. K. Lau, A. R. Flint, "Planning and Implementation of the Structural Health Monitoring System for Cable-Supported Bridges in Hong Kong", In Nondestructive Evaluation of Highways, Utilities and Pipeline IV, A. Emin Aktan, Stephen R. Gosselin, Proceedings of SPIE Vol. 3995, 266-275, SPIE, Newport Beach, 2000.
- [5] T. H. She, "A Geographic Information System (GIS) - Based Bridge Management System", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 1999 (14), 417-427, 1999.