

密级： 保密期限：

北京邮电大学

硕士学位论文



题目： 面向环境监测的感知数据
时空估计与展示方法

学号： 2012110643

姓名： 殷晓林

专业： 计算机科学与技术

导师： 马华东

学院： 计算机学院

2015 年 1 月 12 日

独创性（或创新性）声明

本人声明所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京邮电大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

本人签名：_____ 日期：_____

关于论文使用授权的说明

学位论文作者完全了解北京邮电大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属北京邮电大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。（保密的学位论文在解密后遵守此规定）

保密论文注释：本学位论文属于保密在年解密后适用本授权书。非保密论文注释：本学位论文不属于保密范围，适用本授权书。

本人签名：_____ 日期：_____

导师签名：_____ 日期：_____

面向环境监测的感知数据时空估计与展示方法

摘要

近年来，随着经济社会的快速发展，环境污染问题日益严重，人们对环境监测的需求更加强烈。在环境监测实际应用中，实时预测环境监测数据变化趋势，并实现感知数据的可视化展示，能够显著提高环境监测的直观性和时效性。

本文设计并实现一套面向环境监测的感知数据时空估计与展示系统，详细分析了系统功能需求和所需关键技术，给出了系统的详细设计实施方案以及具体功能模块划分和流程细节，并具体展示每个模块的运行效果。本文工作主要划分为感知数据的时空估计与系统展示两大部分。在时空估计算法研究部分，对水质监测中的标量数据采用自回归模型进行时间序列预测分析，并运用薄板样条函数方法对标量数据进行空间插值。在系统展示部分，使用多种展示方法进行综合展示，主要包括标量数据趋势折线图绘制，结合百度地图 API 实时展示节点状态及网络传输拓扑等信息。

系统最终运行结果表明，本文设计的面向环境监测的感知数据时空估计与展示系统能够从时间和空间两个维度综合展示多种环境数据，改善环境监测工作的直观性和时效性，同时，系统能够长时间稳定运行。

关键词：环境监测 时间序列预测 空间插值 展示系统

SPATIO-TEMPORAL ESTIMATION AND VISUALIZATION METHOD OF SENSORY DATA FOR ENVIRONMENTAL MONITORING

ABSTRACT

Recently, with the rapid development of economy and society, the environmental pollution is increasingly serious, resulting in the stronger demand for environmental monitoring. In the practical environmental monitoring application, the real-time prediction of the variation trend of the environmental monitoring data and the visualization of sensory data could offer a better intuition and timeliness.

In this thesis, we design and implement a spatio-temporal estimation and visualization system for the sensory data of environmental monitoring. Then we analyze the functional requirements and key technology of the environmental monitoring system, and generate the detailed design of implement scheme and specific module partition. Finally, we display the operation effect of each module. The study can be divided into two parts: spatio-temporal estimation of the sensory data and the visualization of the system. For the spatio-temporal estimation, the system makes time series prediction analysis with autoregressive model on the scalar data of the water quality monitoring, and uses thin plate spline function method to implement spatial interpolation of the scalar data. For the visualization, the system uses comprehensive methods including drawing scalar data trend line chart and displaying real-time node status and network topology with Baidu Map API.

The results show that the spatio-temporal estimation and visualization system for the sensory data of the environmental monitoring

in this thesis could synthetically display real-time environmental data from both time and space dimensions. The system can improve the intuition and timeliness of the environmental monitoring, and run stably for a long time.

KEY WORDS: environmental monitoring, time series prediction, spatial interpolation, display system

目录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外研究发展及现状.....	2
1.3 研究意义及目标.....	3
1.4 主要工作及内容组织.....	4
第二章 相关技术介绍.....	5
2.1 标量数据时空估计方法.....	5
2.1.1 时间序列预测.....	5
2.1.2 空间插值算法.....	7
2.2 感知数据可视化展示工具.....	10
2.2.1 Qt 绘图类 QCustomPlot	10
2.2.2 百度地图 API	10
2.3 本章小结.....	12
第三章 感知数据时空估计与展示系统设计.....	13
3.1 系统设计.....	13
3.1.1 系统总体设计.....	13
3.1.2 系统功能设计.....	14
3.2 时间序列预测分析.....	16
3.2.1 方法基本原理.....	16
3.2.2 模型阶数选择.....	16
3.2.3 AR 模型参数估计.....	17
3.2.4 环境监测标量数据时间预测.....	17
3.3 空间插值.....	17
3.3.1 方法基本原理.....	18
3.3.2 参数确定	18
3.3.3 水质监测标量数据空间插值.....	19
3.4 本章小结.....	19
第四章 感知数据时空估计与展示系统实现.....	20
4.1 系统开发环境 Qt Creator	20
4.1.1 环境搭建	20
4.1.2 Qt 核心通信机制.....	20
4.1.3 QtWebKit 模块	20
4.1.4 Qt 关键数据结构.....	21
4.1.5 Qt 定时器	21
4.2 标量数据采集模块实现.....	22
4.2.1 标量数据接收及确认	22
4.2.2 标量数据解析.....	23
4.2.3 动态图表绘制.....	24
4.3 网络状态采集模块实现.....	25

4.3.1 实时 GPS 信息采集.....	25
4.3.2 实时节点状态采集.....	26
4.3.3 网络传输拓扑采集.....	27
4.4 标量数据时空预测模块实现.....	30
4.4.1 标量数据时间序列预测.....	30
4.4.2 标量数据空间插值.....	31
4.5 地图平台展示模块实现.....	32
4.5.1 本地 Qt 与地图 API 数据交换.....	32
4.5.2 节点定位.....	34
4.5.3 拓扑绘制.....	35
4.5.4 融合标量.....	37
4.5.5 历史查询.....	38
4.6 本章小结.....	40
第五章 系统功能展示.....	41
5.1 模拟实验环境.....	41
5.2 系统主界面展示.....	41
5.3 系统各模块功能展示.....	42
5.3.1 标量数据采集模块.....	42
5.3.2 网络状态采集模块.....	44
5.3.3 标量数据时空估计模块.....	47
5.3.4 地图平台展示模块.....	48
5.4 本章小结.....	51
第六章 总结与展望.....	53
6.1 总结.....	53
6.2 展望及改进建议.....	53
参考文献.....	55
致谢.....	58
作者攻读学位期间发表的学术论文目录.....	59

第一章 绪论

1.1 研究背景

随着现代社会的不断进步,经济、科技等领域得到了高速发展,但各种环境问题也随之爆发。生态环境污染日益严重,社会经济生产活动造成的突发性环境污染事件频繁发生,导致水质污染、水土流失、土地荒漠化等一系列严重后果,直接威胁人民群众的生命财产安全,制约了社会的可持续发展。因此,大力发展环境监测势在必行。环境监测是通过对环境中相关物质的含量进行监测来跟踪环境质量的变化,确定环境质量的水平^[1],为接下来进一步开展环境管理、污染治理等各项工作提供依据和支持。

随着环境问题的日益严峻、国家对环境监测的要求逐年提高,越来越多的行业开始重视环境监测,比如水质、古建筑环境保护等等。以我国目前整体水质环境来讲,在中国人均水资源拥有量仅为世界平均人均水平四分之一的前提下,仍有半成水资源质量不达标。工业污染造成的多种重金属超标排放,水质富营养化问题突出,城市酸雨现象频繁出现。水污染现象会降低水体使用功能,加剧水资源短缺,严重影响社会生产生活的安全。因此,现实的需求迫使我们加快研究步伐,及时运用最新技术开展环境监测,并且通过对监测数据的综合分析为环境治理提供可靠的数据支持和决策依据,坚持科学的发展观,开展环境保护工作,提高环境保护效率。

近年来,随着物联网技术^[2,3]的发展,与传统互联网相比,各种感知技术得到更加广泛的运用。利用不断发展和日益成熟的网络技术及传感器技术,在环境监测区域规模部署各种类型感知数据采集节点,实时采集环境监测所需要的各项数据指标,再经由各种有线和无线网络与互联网融合,实现实时环境数据可靠传输,从而进行下一步的数据分析处理^[4,5]。相比传统环境监测手段大多需要依靠大型专用设备、难以做到定位定点且比较依赖人工操作,围绕物联网感知数据进行环境监测的应用探索在自动性、安全性、实时性、准确性和规模等各个方面具有明显的特点和优势,具备广阔的发展前景。

本文针对环境监测中采集到的标量数据、节点状态数据,通过时空估计算法从时间和空间两个维度上对数据进行预测,分析数据走势,并对数据监测指标的变化趋势进行预判,从而对环境的监管及防治提供有效的科学依据。同时,通过多种图形、图表展示手段,结合网络地图平台,从时间、空间、数值角度对环境

数据进行综合展示，使复杂的数据简单直观化，有效提高环境监测工作的效率。

1.2 国内外研究发展及现状

环境信息科学涉及一些特定的环境问题，并与计算机科学和工程技术紧密相关。环境信息科学的迅速发展和广泛应用使得环境监测和管理的效率得到显著提升。20 世纪 80 年代，研究人员先后设计了以采集、处理、交换数据信息为主要功能的管理信息系统（MIS）和环境信息系统（EIS）。此后，多种技术进步加速了自动数据采集装置的发展，进而促成了遥感系统（RS）、地理信息系统（GIS）、全球定位系统（GPS）的产生。进入 21 世纪以来，自动数据采集技术如射频识别技术（RFID）和感知技术被引入到决策支持系统（DSSs）和集成环境信息系统（IEISs）中^[6]，为环境监测带来新的发展。1991 年，美国麻省理工学院（MIT）的 Kevin Ashton 教授首次提出物联网（IoT）的概念^[7]。在最近十几年里，物联网这一概念不断发展，使互联网与任何物品可以相连接，全面渗透到人们的日常生活，并以此带动环境监测的发展，为保护环境实现科学可持续发展提供可靠支持和保证。

我国环境监测虽然发展起步较晚，但是目前也已取得较为显著的成果，在信息集成、信息共享、数据存储、信息可视化、资源环境建模、建立模拟研究环境等方面均有了较大发展。以水质监测工作为例，目前我国水利系统已经建成四级水质监测体系，包括水利部、流域、省（市）级水环境监测中心和分中心，水质监测站点已基本覆盖全国主要水域^[8]，但目前仍然面临诸多问题，如监测站点数量不足，监测覆盖范围较小、监测频率低、自动采样测报能力不足以及实时监测效率低下等^[9]。

环境监测中通过实时采集获取到的标量数据是按时间顺序有序变化的数据集合，以相等时间间隔进行度量。在统计分析理论中，常用的时间序列预测方法主要有时间序列递增（TSI）、自回归（Auto Regressive, AR）模型及指数平滑法（Exponential Smoothing, ES）等。时间序列递增算法其基本思想是利用过去一段时间内的历史测量值计算均值和标准差，然后对最近时刻测量值进行标准化作为下一时刻预测值，该方法适合波动趋势平稳的数据，但难以捕捉算法周期性。英国统计学家尤尔（George Udny Yule）创立的平稳线性自回归模型，开辟了时间序列时域分析的现代发展^[10]。自回归 AR 模型算法用自身因素做回归变量，用前期若干时刻的实际测量值进行线性组合，挖掘序列自相关性，构造线性回归模型以预测未来某时刻数据值，该方法仅通过时间序列自身的历史数据对未知预测值产生影响，可以避免普通类型回归预测方法中经常遇到的如多重共线性等问题。指数平滑法最早由布朗（Robert Goodell Brown）在 1956 年提出^[11]，后经研

究人员不断对其进行研究发展。该方法认为时序数据的历史特征可以被合理地顺势推延,但在保留过去远期数据的同时,为较近时期的数据赋予较大的权重,该方法对数据历史资料完备性要求较高,且对随季节波动较为明显的时序数据适用性较低。

空间插值算法通常利用已知的离散点的位置和测量数据,将其转换为连续的数据曲面,进而推测某一未知点的数据。目前较为常用的空间插值算法有反距离加权平均插值法(Inverse Distance Weighted, IDW)、薄板样条插值(Thin Plate Spline, TPS)、克里格(Kriging)等。反距离加权平均法对距离待插值点越近的样本点赋予较大的权重,对距离待插值点越远的样本点赋予较小的权重,该方法适用于样本点均匀分布且密集程度能够反映局部差异的情况,但缺点是无法估计误差,精度不够。薄板样条插值法通过模拟薄板在各个样本点处受到压力发生形变而产生曲面,来近似模拟空间插值中各样本点对待插值点产生的影响作用,该方法通常应用于平滑和连续的表面,如水平面等。克里格插值法最早在 1951 年由南非地质学家克里格提出,该方法充分考虑已知样本点与插值点的相对位置,同时同样重视各样本点相互之间的相对位置关系,以变异函数理论为基础,对给定点的变量进行无偏最优估计^[12],该方法能够较为精细的分析误差问题,但是模型复杂,计算量大,函数普适性较低。

在环境信息的可视化表达方面,早期的传统环境制图主要通过动态符号、底色扩张或不同时期的一组静态地图来进行可视化模拟。随着信息可视化技术的发展,现在的环境信息系统多采用动态动画的方式,结合云图、环境地图线状要素如等值线、等高线及直方图等多种形式对数据进行全面探索。目前随着在线地图技术的发展,在环境监测系统的数据可视化阶段可以引入定制化的地图方案,植入地图功能,在环境监测数据与地理信息之间建立紧密关联。

1.3 研究意义及目标

环境质量的好坏不仅关系到人们的身心健康,更是对国民经济能否可持续发展起到了决定性的作用。以水质环境安全为例,一个安全稳定的水体环境不仅是人民生产生活的重要资源保障,也是社会、经济与环境和谐发展的重要目标。从实际应用角度来看,人们对于水质监测系统的功能也有了更高的要求。人们想要的不再仅仅是一张图、一个表等某种单一的数据表现形式,以及费时费力的进行人工操作数据采样,而是一个高效自动实时的可靠系统,可以让使用者快速把握全局状态,进行决策分析。因此,建立一个面向环境监测的实时监测系统,利用采集到的实时可靠数据进行相应的分析预测,并以可视化形式对环境数据进行综合展示,能够为环境监测和治理工作提供有效科学的引导,提高工作效率,节省

人力物力资源。

结合实际生产生活中对环境监测的客观需求,本文希望研究并实现一个面向环境监测的感知数据时空估计与展示系统,提出完整的软件设计与实现方案。

以实时采集到的水质数据为中心,要求系统可以通过网络通信接收各采集节点发来的实时标量数据、网络状态数据,对数据进行解析处理,建立相关数据库进行存储。同时,判断各采集节点网络传输状态,结合地图 API 呈现各采集节点的地理位置、状态、网络传输路径、水质指标监测值及其变化趋势。并且,基于采集到的大量水质数据进行时间和空间两个维度的预测,对水质监测及管理工作提供科学引导。

1.4 主要工作及内容组织

本文的目标是设计并实现一个稳定、可靠的面向环境监测的感知数据时空估计与展示系统,要求该系统围绕环境监测中的感知数据实现感知数据时空估计,标量数据、GPS 数据、网络状态信息的接收处理,并结合百度地图 API 在地图平台上实现以上各种类型数据的综合实时展示。本文主要包含六个章节的内容,将对课题的研究背景、研究内容、研究过程和研究结果进行详细的介绍。

论文结构安排如下:

第一章绪论。绪论部分介绍了课题的研究背景以及相关课题的国内外研究现状并且根据实际应用背景,从现实实用性角度出发,探讨了该课题的研究意义及目标,同时对最终要设计并实现的系统原型有一个大体的功能规划与描述。

第二章相关技术介绍与环境搭建。本章将依照系统的两个主要功能,即标量数据的时空估计方法、感知数据的可视化展示,从这两个角度出发,分别介绍相关技术与开发环境的搭建。其中,可视化展示工具主要涉及到百度地图 API 以及 QT Creator 开发平台。

第三章感知数据时空估计与展示系统设计。本章主要介绍结合水质监测标量数据自身特点,采用的具体时间预测及空间插值算法原理及模型,以及最终要实现的展示系统的总体设计和功能规划。

第四章感知数据展示系统设计与实现。本章主要介绍展示系统设计与实现的详细具体过程。主要分为标量数据采集模块、网络状态采集模块、标量数据时刻预测以及地图平台展示模块等四个方面。

第五章系统功能展示。介绍系统环境,对系统主要功能运行结果进行展示。

第六章总结与展望。对整个课题的研究过程做出总结,提出系统优化的方向。

第二章 相关技术介绍

2.1 标量数据时空估计方法

2.1.1 时间序列预测

时序数据是按时间顺序取得的一系列观测值，一般以相等时间间隔进行度量。时间序列数据分析处理的主要目的即在于从海量的数据中挖掘出其潜在的变化发展趋势及规律。时间序列数据广泛存在于社会学、经济学、数学、工程技术及统计学等诸多领域，通过对时序数据中所包含的历史信息进行系统而充分地挖掘，以建立一个能够较为准确地反映系统发展变化规律的数学模型，从而对该数据对象的未来发展变化趋势做出较为可靠的科学预测，并为人们正确认识事物的发展规律、做出正确的决策提供科学的依据。

时间序列的变化倾向通常可以分为趋势变化、循环变化、季节变化及随机变化等^[13]。趋势变化是指相关数据发生在较长时间间隔上的变化趋势，反映的是一般变化方向；循环变化是指在一个较长时期内时序数据呈现一种摆动变化迹象；季节变化则是指相同或相似的模式在每年的一定时间重复出现，出现季节性波动；随机变化反映的是由随机或偶然事件引起的变化^[14]。通过对以上四种变化进行综合分析，再结合具体算法模式提出有针对性的数学模型，可以进行比较合理的预测，为正确决策提供科学的指引，从而实现时间序列预测的最终目的。

时间序列预测^[15]方法主要包括传统线性预测和非线性预测两大方法体系。其中线性预测方法主要包括时间序列递增、自回归模型等一系列统计学经典模型方法，而非线性预测方法则主要包括人工神经网络、支持向量机等时间序列预测方法等。

(1) 时间序列递增

时间序列递增^[16]算法是一种比较简单的预测算法。其主要思想是对前 N 个时刻的测量值计算均值并在此基础上计算此 N 个值的标准差，基于计算到的均值和标准差对第 N 个时刻的测量值进行标准化，以此标准化结果作为下一时刻的预测值，并与下一时刻的测量值进行比较，所得结果为预测残差，与事先设定的阈值进行比较，判断预测结果是否异常。阈值的设定可通过多次试验计算准确率不断进行调整得出。

记当前时刻的预测值为 $Z^*(t)$ ，前一时刻的标准化后的实际测量值为

$Z(t-1)$ ， $x(t)$ 为 t 时刻数据实际测量值， N 为选定的预测样本时间长度。预测值计算方法如下：

$$Z^*(t) = Z(t-1) = \frac{x(t-1) - \bar{X}}{\sigma} \quad (2-1)$$

(2) 自回归模型

若某一因素变量的时序数据变化形式不确定，且无法使用时间的确定函数对其进行描述，则可以尝试用概率统计学的相关理论方法寻找一个能够近似反映其变化规律的随机模型，前提是该自变量隐含时间因素。

自回归 (Autoregressive, AR) 模型的预测过程是用自身做回归变量，所以称作自回归，利用前期若干时刻的实际测量值进行线性组合以描述未来某时刻的随机变量预测值，构造线性回归模型，其模型是在一元线性回归和多元线性回归的基础上发展而来，又称时间序列模型。自回归 (AR) 模型用自身因素对自己产生影响^[17]，因此可能产生误差，与之相关的还有向量自回归 (VAR) 模型、滑动平均 (MA) 模型、自回归滑动平均混合 (ARMA) 模型和差分自回归滑动平均模型 (ARIMA) 模型。AR 模型是一种线性预测，可在已知 N 个数据的基础上，利用模型进行推导得出第 N 点前后的数据，在本质上类似于插值方法，都以增加有效数据为目的，其不同之处在于 AR 模型利用 N 个点进行推导而插值是由数量较少的点去推导多个点，因此从这个角度出发，AR 模型最终预测的效果要比普通插值方法更好。自回归 AR 模型目前已广泛应用^[18]于经济学、信息学、自然科学等多个学科领域的预测上。

AR 模型其基本思想是将需要进行预测的时序数据，除去个别偶然出现的异常值外，视作一个依赖于时间的随机序列。挖掘这组随机序列中的自相关性并通过相应的数学模型进行描述，进而利用数学模型在已有数据基础上预测未来数据，自回归方法的关键之处就在于数学模型的构造和模型参数^[19]的估计。

AR 模型形式如下：

$$x(t) = \alpha_1 x_{t-1} + \alpha_2 x_{t-2} + \dots + \alpha_p x_{t-p} + e(t) \quad (2-2)$$

其中 p 是模型的阶数， $x(t)$ 为当前时刻 t 预测值， x_{t-1} 、 x_{t-2} 、 \dots 、 x_{t-p} 是同一平稳时序数据序列的过去 p 个时刻测量值， α_1 、 α_2 、 \dots 、 α_p 是该 AR 模型的自回归系数，表示权重即 $x(t)$ 依赖于过去的程度，通过计算得出。 $e(t)$ 是随机干扰误差项，由均值为零方差为 δ^2 的独立白噪声序列构成。在该模型中，假设 $x(t)$ 的变化主要与历史数据有关，而与其他因素无关， $e(t)$ 不同时刻互不相关且与 $x(t)$ 的历史数据不相关。

(3) 指数平滑法

指数平滑法 (Exponential Smoothing, ES) 最早是由布朗所提出，后来经由

统计学家进行进一步的深入研究和推广，该方法得到了广泛的应用。指数平滑法认为，时序数据其稳定性及规则性在一定程度上可以合理推延，即过去时刻所呈现的状态在未来短时间内会有一定的延续，所以最近时刻的数据可以被赋予较大的权重系数。

在时间序列分析预测的各种类型方法中，简单全期平均法是对现有的时序数据序列赋予相等的权重，将所有过去数据以同样的地位进行同等利用；移动平均法则将重点放在近期数据上，不考虑远期数据对未来数据预测的影响；而指数平滑法是在移动平均法的基础上进行发展变化，兼具简单全期平均和移动平均的优势，在保留过去远期数据的同时，为较近时期的数据赋予较大的权重，即随时序数据的远离，权重系数逐渐收敛为零。指数平滑法是在一定的时间序列预测模型基础上对未来时刻的时序数据进行预测，根据平滑次数的不同，一般可以分为一次指数平滑法、二次指数平滑法和三次指数平滑法^[20]等。

指数平滑法的基本公式是：

$$S_t = \alpha \cdot y_t + (1 - \alpha) \cdot S_{t-1} \quad (2-3)$$

其中， S_t 表示时刻 t 的平滑值， y_t 表示时刻 t 的实际值， α 表示平滑常数， $\alpha \in [0, 1]$ 。

综上，时间序列递增方法在数据平稳波动的情况下跟踪预测效果良好，但是算法不具有周期性，应对突发情况时误差较大；自回归 AR 模型仅通过时间序列自身的历史数据对未知预测值产生影响，可以避免普通类型回归预测方法中经常遇到的如多重共线性等问题；指数平滑法对数据历史资料完备性、季节影响较为敏感，可能产生较大误差。结合水质监测中所采集的标量数据自身特征，一般情况下从时间角度和空间范围上均会呈现一个较为平稳的变化趋势，因此本文将采用自回归 AR 模型进行水质数据的预测，以高效的计算速度应用于实时在线监测。

2.1.2 空间插值算法

空间插值技术是通过一组已知的空间数据作为样本求解未知空间数据的方法^[21]。样本数据可以呈离散点或分区数据的形式，分析样本数据并结合其地理位置关系从中找出一个函数关系，使得该函数能够尽可能地模拟逼近样本数据，从而依据该函数预测空间内其他任意点的数据值^[22]。空间插值法依照是否具有确定性可分为两类：一类是确定性方法，如反距离加权平均法、样条函数法等，利用已知样本数据创建一个拟合曲面；另一类是地质统计学方法，如克里格插值法，利用已知样本数据的统计规律在待求的未知预测点周围构建样本点空间结构模型。

目前较为常用的空间差值方法主要有反距离加权平均值法（IDW）、薄板样

条插值 (TPS)、克里格 (Kriging) 插值法等等^[23,24]。

(1) 反距离加权平均值法

反距离加权平均法是空间插值几何方法中最简单的一类，基于“地理学第一定律”的基本假设^[25]：空间距离越近，其所具有的特征相似的可能性越大，反之则可能性则越小。反距离加权平均法综合空间插值技术中自然邻近法和多元回归渐变法的优点，插值时综合考虑待预测点邻近区域内的所有已知点的距离加权平均值并根据需要考虑方向权重。该方法模型简单，具有普适性，是最早用于计算机的空间内插方法，至今仍广为使用。权重系数与预测点到所有已知点的距离的 p 次幂成反比，且所有已知点的权重系数之和为 1。幂指数的选择会对插值的结果造成很大的影响，当幂指数越大时，越远距离的点对插值结果影响越小，反之影响越大。反距离加权平均法算法数学公式如下：

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2-4)$$

其中， $Z(x_0)$ 为插值点估计值， $Z(x_i)$ 为样本点 i 的实际值， n 为样本个数， λ 为样本点 x_i 的对应权重系数，权重系数计算公式如下：

$$\lambda_i = \frac{1}{(D_i)^p} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{(D_i)^p} \quad (2-5)$$

上述公式中， D_i 为待插值点 x_0 与其余已知样本点 x_i 的距离， p 是距离的幂， p 值越大，插值效果越平滑。

(2) 薄板样条插值

薄板样条函数方法^[26]是使用函数实现空间插值的一种常用方法，通过建立一个通过样本点的曲面，使得该曲面所有点的坡度变化最小。样条一词最初来源于工程术语，指的是具有弹性的较细的木条或者钢条。样条函数所拟合的曲面相当于薄板在各个样本点处受到压力发生形变而产生的曲面，压力的大小与各个样本点的属性值大小成比例关系。该方法所采用的函数通常是具有连续的一阶导数和二阶导数的分段多项式，将数学函数与已知样本点进行拟合，构造平滑的插值曲面。在某些情况下，利用薄板样条函数进行空间插值的过程中可能会出现噪声，此时可以通过正则化进行处理，即不一定要通过所有样本点进行拟合，具体由正则化参数进行控制。

样条插值法的一般公式如下：

$$Z(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y + \sum_{i=1}^p w_i \cdot U(|[c_{i1}c_{i2}] - [xy]|) \quad (2-6)$$

$$U(r) = \begin{cases} r^2 \cdot \log r (r > 0) \\ 0 (r = 0) \end{cases} \quad (2-7)$$

其中, (x,y) 为待插值点位置, p 为已知样本点个数, w_i 为通过求解线性方程组确定的权重系数, r 为两点之间距离。

(3) 克里格

克里格插值法最早在 1951 年由南非地质学家克里格提出, 之后经由多位学者对其进行不断的完善, 得到了进一步的推广, 又称地质统计法。该方法基于地理统计的基本思想, 以变异函数理论为基础, 对有限范围内的区域化变量^[27]进行无偏最优估计, 其中区域化变量指的是呈空间分布的变量。在充分考虑已知样本点与插值点的相对位置基础上, 同样重视各样本点相互之间的相对位置关系。克里格插值主要包含两个阶段, 即揭示数据的空间相关性规则和依照规则作出预测。揭示规则阶段依据数学模型或空间模型生成变异函数, 并计算描述区域化变量相互之间差异的协方差函数^[28], 以估算空间相关性。克里格函数法种类较多, 常用的包括普通克里格法和泛克里格法。

克里格方法的一般数学公式如下:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2-8)$$

其中, $Z(x_0)$ 为插值点估计值, $Z(x_i)$ 为样本点 i 的实际值, n 为样本个数, 为样本点 x_i 的对应权重系数, 权重系数计算公式如下:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i, x_j) - \mu = r(x_i, x_0) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (2-9)$$

方程组中, $\gamma(x_i, x_j)$ 表示有效样本点之间的变异函数, $r(x_j, x_0)$ 为待插值点与样本点的协方差, μ 为拉格朗日常数。

综上, 反距离加权平均法是一种全局插值法, 适用于样本点均匀分布且密集程度能够反映局部差异的情况, 该方法计算简单, 但缺点是无法估计误差, 精度不够; 薄板样条插值函数通常应用于平滑和连续的表面, 如水平面等, 函数方法计算较为简单, 能够呈现出较好的运行效果; 克里格函数法能够较为精细的分析误差问题, 但是模型复杂, 计算量大, 导致函数普适性较低, 应用范围较窄。结合水质监测中标量数据自身特点, 其监测点分布较为均匀, 分布表面平滑, 考虑监测系统本身对运算速度的要求, 本文将采用薄板样条函数进行插值。

2.2 感知数据可视化展示工具

本文所研究系统的开发工作主要分为两大部分：一是需要设计并实现一个图形界面系统，用于接收部署在监测环境中的采集节点发回的各项采集信息以及相关位置信息和网络状态信息，并对有效信息进行存储处理展示；二是联合百度地图 API 开发平台，将采集到的各种类型数据状态信息与实时地理位置相结合，以实时动态的方式展示在地图界面上。

2.2.1 Qt 绘图类 QCustomPlot

(1) QCustomPlot 介绍

QCustomPlot 是一个用于制作图形和图表的 Qt C++ 控件，提供实时可视化应用程序。该绘图类可以绘制曲线图、趋势图、坐标图、柱状图等。在工程目录下添加该绘图类的相关文档，并将文档引入工程，由于图表绘制使用到打印相关，因此还需在项目文件 pro 中为窗体添加打印支持 printsupport。在 UI 界面设计时，绘图所使用的窗体需要将普通 widget 进行提升 “promote to”，提升类名设为 QCustomPlot，而后即可使用控件进行图表绘制。

(2) 图表绘制

利用 QCustomPlot 类所提供的各项功能函数设置绘制过程中涉及到的画笔样式、曲线样式及名称、坐标轴样式及名称、坐标轴刻度显示及范围等。常用相关函数说明如表 2-1 所示。

表 2-1 绘图类常用函数说明

函数名	功能
addGraph()	在绘图控件窗口内创建一个图表
setPen(QPen & pen)	设置画笔式样
setName(QString& name)	设置曲线名称
setLineStyle(LineStyle ls)	设置线条式样
setScatterStyle(QCPScatterStyle& style)	设置线条中每个点的式样
setData(QVector& key, QVector& value)	设置二维坐标点的横纵坐标
setLabel(QString& str)	设置坐标轴名称

2.2.2 百度地图 API

(1) 百度地图 API 介绍

目前市场上常见的地图 API 有百度地图、谷歌地图、高德地图等多家产品。就文档而言，百度地图提供的文档相对来说较为完备，且语言功能描述详尽简洁，

并为开发者提供了很多学习示例且示例与代码紧密结合,非常适合没有经验或经验尚浅的初学者进行入门级的开发、学习。并且百度地图 API 还具备以下各项优势:色彩柔和、高易用性、地理位置精确度达到小数点后六位且浏览器兼容性较好,支持各类目前常见的国内外市场主流浏览器。

百度地图 API 是一套基于百度地图服务的应用接口,由百度为开发者免费提供,包括多种服务接口,如 JavaScript API、Web 服务 API 等。百度地图 API 提供与地图相关的多种功能实现,如基本地图展现、搜索、定位、路线规划等功能,支持 Web、Android、IOS 等多种平台,适用于服务器、PC 端、移动端等多种设备,以开放性平台的定位支持用户进行地图定制应用开发。

本文工作中使用百度地图 JavaScript API,由 JavaScript 语言编写。利用该应用程序接口通过二次开发以及调用 API 提供的数量丰富功能强大的 JavaScript 类,可以实现对基本地图实例的任意可行操作。同时,可在 Qt 程序中定义一个对象 QObject,通过此对象实现 JavaScript 与 Qt 程序的交互,具体方法是在 js 调用该对象之前调用以下函数,进而以 JavaScript 为桥梁实现地图与 Qt 程序的交互:

```
voidQWebFrame::addToJavaScriptWindowObject ( const QString &name,QObject *object )
```

(2) 常用 JS 类及方法

百度地图 API 使用 BMap 作为命名空间,API 中使用的所有类均在该命名空间之下。在地图开发中经常使用到的主要 javascript 类主要有如下几种:

表 2-2 百度地图 API 常用 javascript 类

类名	内容
Map	地图 API 核心类,用于构造一个地图实例
Point	表示一个地理坐标点,构造函数中两个参数分别用于指定经度和纬度
Control	地图 API 中所有控件的基类,用以实现自定义控件
Overlay	地图上所有覆盖物的抽象基类,如图标、信息窗口、折线及图层等
Icon	标注覆盖物所使用的图标类,构造函数定图像地址和大小
Marker	标注类,在参数 Point 指定的地理位置创建一个图像标注
Polyline	折线类,绘制折线的地图叠 layers,指定构造折线的点的序列及折线参数

(3) 添加自选图片资源

本课题使用百度地图 API 平台进行开发并实现相关数据信息的展示,在地图平台的界面上会涉及到多种类型图片图标的使用以作强调和区分,图片资源需要经由 Qt 平台进行获取。在地图平台使用图片资源之前,在 Qt 工程项目中以 qrc 为后缀名添加资源文件,然后在资源文件中逐一添加图片、文档等资源并保

存。在地图开发部分的 **JavaScript** 代码中，即可为变量指定所要使用的图片资源的路径。

2.3 本章小结

本章首先概述了时空估计算法，并有针对性地分别介绍了几种常用的时间序列预测分析和空间插值技术。时间序列预测分析方法主要简述了时间序列递增、自回归模型和指数平滑法等，而空间插值方法则主要介绍了反距离加权平均值法、薄板样条插值法和克里格法等。同时在本章的最后还简要介绍了系统中所使用的感知数据可视化展示工具如 Qt 绘图类 **QCustomPlot** 和百度地图 **API**，以及常用的数据结构及技术方法等，为系统的设计与实现建立基础。

第三章 感知数据时空估计与展示系统设计

3.1 系统设计

本节主要描述面向环境监测的感知数据展示系统的总体设计,介绍系统框架和主要功能划分,并详细介绍其设计思路。

3.1.1 系统总体设计

本文所研究的感知数据时空估计与展示系统,其设计思路主要是将系统运行于服务器端,通过调用数据库、百度地图 API 等,实现接收、存储、展示各远端采集节点发回的环境测量数据、采集节点 GPS 位置信息、网络传输拓扑信息等多种功能。该系统功能模块框图如图 3-1 所示。

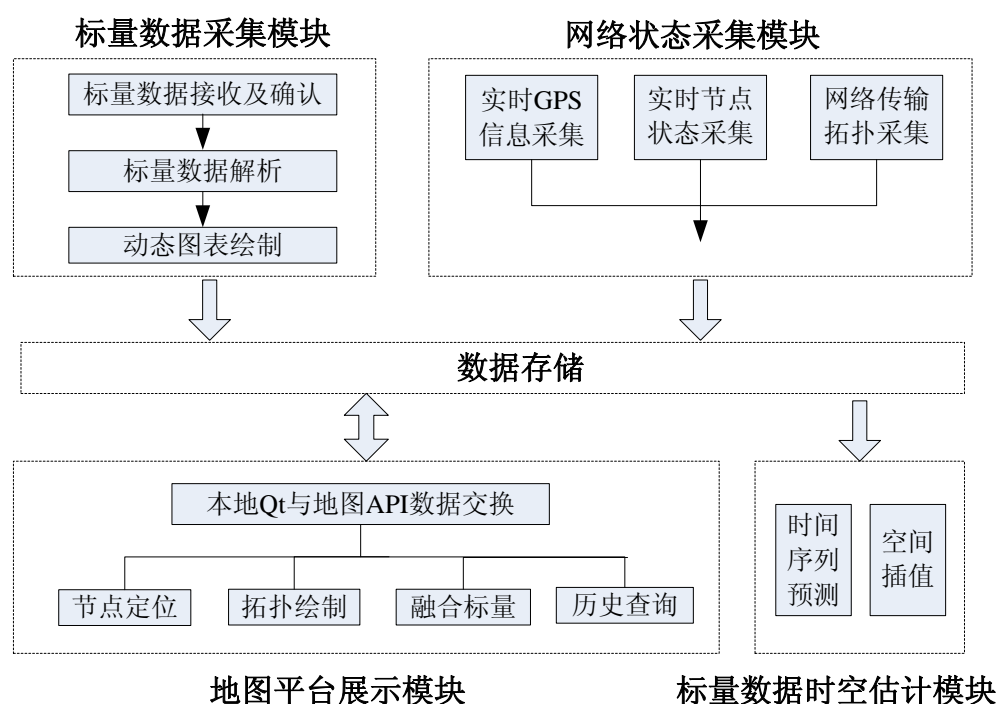


图 3-1 感知数据时空估计与展示系统功能模块框图

系统主要分为以下四个功能模块:标量数据采集模块、网络状态采集模块、标量数据时空估计和地图平台综合展示模块。部署在实际监测环境中的各类采集节点将采集到的多种类型数据通过网络发回至服务器进行存储、处理并展示。系统与各采集节点之间通过 3G、卫星等多种网络方式进行通信。系统收到采集节

点发回的数据报文后立即回复发出确认消息，然后对报文进行解析，得到有效数据信息后经过处理并综合利用多种工具进行联合显示，同时存储到数据库。对数据库中存储的标量数据可以按需要进行时空预测。

标量数据采集模块中，系统与采集节点保持通信，接收实时标量数据信息并即时发送回执，解析数据报文并进行相应存储，基于收到的标量数据，进行历史查询状态下或实时状态下的标量数据变化趋势折线图表的绘制。

网络状态采集模块中，系统与各 GPS 模块、网关节点保持通信，接收节点实时地理位置、节点状态及传输拓扑等信息并即时发送回执，解析数据报文并进行相应存储，推导出当前网络实时传输拓扑序列。

标量数据时空估计模块中，系统利用数据库中已存储的环境监测标量历史数据及节点位置信息等，对标量数据进行时间预测和空间插值，从理论上对数据走势进行合理预测。

地图平台综合展示模块中，系统根据当前各节点实时 GPS 位置信息在地图上予以标注，绘制节点状态及实时网络拓扑走向，同时将标量数据与节点地理位置信息相关联，最终实现在地图平台上对节点网络状态及标量数据监测情况的综合展示。

3.1.2 系统功能设计

(1) 标量数据采集功能

本模块的主要设计思路如下：在 Qt 开发平台及 MySQL 数据库的支持下，服务器与标量数据采集节点之间以 UDP 方式进行通信，预先约定端口进行标量数据 UDP 报文的收发。若接收到采集节点发回的报文，系统将立即发送确认报文。同时系统按照报文编解码规则进行解析处理，得到报文中的有效数据信息等。解析后的具体数据还需要存储至数据库中，以备后续查用。并且对于实时的标量数据流，系统将提供实时图表以显示当前数据变化趋势，方便用户进行观察。该功能可详细划分为 3 个模块部分，包括标量数据接收及确认、标量数据解析和动态图表绘制。

标量数据接收及确认阶段，系统保持监听状态，有信号到来时，接收报文并即时发送回执。标量数据解析阶段，在判断报文格式正确后，按照规则解析报文，得出所携带的标量数据采集时间、采集指标及采集值，并存储到数据库。动态图表绘制阶段，基于 Qt 信号和槽机制、绘图类 QCustomPlot，从数据库中及时读取最新数据，即时刷新绘图。

(2) 网络状态采集功能

本模块的主要设计思路如下：综合利用 Qt 开发环境提供的各种方法，采集

多方状态信息为地图平台的综合显示做前期准备。对地图平台进行展示所需要涉及到的如采集节点实时 GPS 地理位置、采集节点当前实时状态（活跃或超时）、节点与服务器之间信息传输实时拓扑信息等分别进行采集并处理，并将有关信息存储至数据库，最终提供给地图平台展示模块进行使用。该功能可详细划分为 3 个模块部分，包括实时 GPS 信息采集、实时节点状态采集和网络传输拓扑采集。

实时 GPS 信息采集阶段，系统保持监听状态，接收报文并即时发送回执，根据消息内容更新节点位置信息。实时节点状态采集阶段，设置定时器更新维护节点状态生命数组，据此区分节点的超时、活跃状态。网络传输拓扑采集阶段，接收报文并解析得出节点下一跳信息，同时设置定时器更新维护传输路径时效性，然后综合分析节点状态、传输路径和路径时效，提取出网络传输拓扑。

（3） 标量数据时空预测功能

本模块的主要设计思路如下：从 MySQL 数据库筛选符合条件的历史标量数据若干项，利用时间预测中的自回归 AR 模型方法，预测下一时刻水质标量数据走势。使用薄板样条函数法，利用已知监测样本点的地理位置信息和监测数据值，结合同一区域内未知点的地理位置，预测未知点的监测数据水平。该功能可详细划分为 2 个模块部分，包括标量数据时间序列预测和标量数据空间插值。

标量数据时间序列预测阶段，从数据库中提取历史时序数据若干项存入向量中，首先确定自回归模型阶次 p ，然后将历史数据通过组合变形生产矩阵，运用最小二乘估计法求取公式中的系数向量。标量数据空间插值阶段，获取包含经纬度及监测值的样本数据后，构造 3 维点集，通过对样本数据进行组合，构造出公式原型中所需各类矩阵，利用原地 LU 分解法求解得出参数向量。

（4） 地图平台展示功能

本模块主要设计思路如下：利用 Qt 平台中提供的 QWebKit 类的函数接口，将百度地图 API 的 web 页面嵌入到 Qt 应用程序中，实现在系统界面上加载百度地图 API。定义一个对象 info 以帮助实现本地系统和地图 API 之间的通信。通过节点 GPS 模块传回的经纬度位置信息和传输路径数组，在地图界面上进行节点原始位置定位和拓扑路径的绘制，同时在地图上实现节点标注与标量数据的相关联。另外，系统根据不断接收到的最新消息，实现地图平台的动态更新和维护，实现实时状态的准确呈现。该功能可详细划分为 5 个模块部分，包括本地 Qt 与地图 API 数据交换、节点定位、拓扑绘制、融合标量和历史查询。

本地 Qt 与地图 API 数据交换阶段，通过添加 JavaScript 对象实现系统与 Web 环境之间的通信，在本地与地图 API 之间实现数据信息的交互。节点定位阶段，从 Qt 本地获取节点状态经纬度信息，通过 API 实现坐标转换以及图标资源的添加，绘制节点标注。拓扑绘制阶段，确定当前实时有效拓扑序列后利用 JavaScript

对象进行传递，利用地图 API 折线类绘制拓扑，同时利用重绘实现动态效果。融合标量阶段，通过设置地图节点点击事件，关联自定义窗口类，在弹出窗口显示当前节点相关实时信息及图表。历史查询阶段，系统与用户进行交互确定回放时间段，从数据库中完成筛选后，利用 JavaScript 对象进行传递，在地图 API 中完成回放展示。

3.2 时间序列预测分析

时间序列预测分析主要通过对时序数据中所包含的历史信息进行系统充分地挖掘，建立一个能够较为准确地反映数据发展变化规律的数学模型，从而对该数据对象的未来发展变化趋势做出较为可靠的科学预测，并为人们正确认识事物的发展规律、做出正确的决策提供科学的依据。

本系统采用自回归 AR 模型进行时间序列预测。自回归（AR）模型的预测过程是用自身做回归变量，所以称作自回归，利用前期若干时刻的实际测量值进行线性组合以描述未来某时刻的随机变量预测值，构造线性回归模型。

3.2.1 方法基本原理

AR 模型基本数学公式如第二章中公式（2-2）所示：

$$x(t) = \alpha_1 x_{t-1} + \alpha_2 x_{t-2} + \dots + \alpha_p x_{t-p} + e(t)$$

其中 p 为模型的阶数， $x(t)$ 为时刻 t 预测值， x_{t-1} 、 x_{t-2} 、 \dots 、 x_{t-p} 是过去 p 个时刻测量值， α_1 、 α_2 、 \dots 、 α_p 是该 AR 模型的自回归系数， $e(t)$ 服从正态分布。

3.2.2 模型阶数选择

AR 模型中，阶数 p 的取值会对预测效果产生直接影响，当阶数 p 小于最优阶数时，预测结果的平滑效果会造成某些信号无法辨别，而阶数 p 大于最优阶数时，预测结果误差会明显增大导致过拟合问题。因此日本统计学家赤池弘次提出贝叶斯信息准则(Bayesian Information Criterion, BIC)，用于确定模型阶数 p 。BIC 基本公式如下：

$$BIC(p) = N \log \sigma_p^2 + p \log N \quad (3-1)$$

式中， p 表示模型阶数， N 为样本训练集大小， σ_p^2 为不同阶数对应的预测方差。由于工程技术中常见线性模型一般不超过 4 阶，因此对给定的时间序列，可以从低阶 AR 模型开始带入，再根据 BIC 公式选择一个较合适的阶次来平衡阶数对预测可能产生的影响。

3.2.3 AR 模型参数估计

AR 模型其基本思想是将需要进行预测的时序数据，视作一个依赖于时间的随机序列。挖掘这组随机序列中的自相关性并通过相应的数学模型进行描述，进而利用数学模型在已有数据基础上预测未来数据，这种方法的关键之一就在于模型参数的估计。AR 模型的参数估计方法一般可分为两类，直接估计和递推估计，常用的典型方法有最小二乘估计法、解 Yule-Walker 方程估计法和 Levinson-Dubin 法等。本文研究中将采用最小二乘法进行参数估计。

AR 模型基本数学公式可用矩阵形式表示如下：

$$Y = XA + E \quad (3-2)$$

其中，

$$X = \begin{bmatrix} x_p & x_{p-1} & \cdots & x_1 \\ x_{p+1} & x_p & \vdots & x_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{N-1} & x_{N-2} & \cdots & x_{N-p} \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

$$Y = \begin{bmatrix} x_{p+1} \\ x_{p+2} \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_p \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_p \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

根据最小二乘法，参数矩阵 A 计算公式如下：

$$A = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (3-5)$$

上式等价求解方程 $(X^T X) \cdot A = X^T Y$ ，利用高斯消去方法^[29]求解即可得出系数向量 A。将 A 和 $e(t)$ 带入 AR 模型基本数学公式，即可求出 t 时刻的预测值。

3.2.4 环境监测标量数据时间预测

结合自回归 AR 模型算法原型，将其应用到环境监测感知数据时空估计与展示系统中，以环境监测中的空气质量指数、水质 PH 值等为例，验证算法预测效果。设计思路如下：选取过去 N 个时刻历史监测值的记录作为样本，依据 BIC 公式求取最合适的阶数 p ，利用最小二乘法求解模型自回归系数，带入公式原型，即可得到下一时刻 t 的预测值。

3.3 空间插值

空间插值技术，通过一组已知的空间数据作为样本求解未知空间数据。样本数据可以呈离散点或分区数据的形式，分析样本数据并结合其地理位置关系从中

找出一个函数关系,使得该函数能够尽可能地模拟逼近样本数据^[30],从而依据该函数预测空间内其他任意点的数据值。

本系统采用薄板样条函数方法进行空间插值。样条函数所拟合的曲面相当于薄板在各个样本点处受到压力发生形变而产生的曲面,压力的大小与各个样本点的属性值大小成比例关系。该方法采用具有连续的一阶导数和二阶导数的分段多项式作为函数模型,将数学函数与已知样本点进行拟合,构造平滑的插值曲面。

3.3.1 方法基本原理

薄板样条函数插值 (TPS),通过确定一个能够通过所有已知点的最小弯曲的平滑曲面进行空间插值。当已知点个数为 3 时,确定的是一个平面;当已知点个数超过 3 时,确定的是一个曲面;而当个数小于 3 时,无法得出满足该函数要求的曲面。设已知点集合为 C ,每个点由 3 维坐标确定,集合大小为 p ,则集合 C 可看做是 p 行 3 列的矩阵。并且对于任意一个点 C_i , (x_i, y_i) 表示该点的位置坐标, z_i 表示该点的数据值。

样条插值法的一般公式如公式 (2-6) 和 (2-7) 所示:

$$Z(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y + \sum_{i=1}^p w_i \cdot U(|[c_{i1} c_{i2}] - [xy]|)$$

$$U(r) = \begin{cases} r^2 \cdot \log r (r > 0) \\ 0 (r = 0) \end{cases}$$

其中, (x, y) 为待插值点位置, p 为已知样本点个数, w_i 为通过求解线性方程组确定的权重系数,函数 U 的参数为两点之间距离。

3.3.2 参数确定

样条插值法中,求解权重系数向量 w 的方程组如下:

$$\begin{bmatrix} K & P \\ P^T & O \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{w} \\ \vec{a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{v} \\ \vec{o} \end{bmatrix} \equiv L_{(p+3) \times (p+3)} \cdot \vec{x}_{(p+3) \times 1} = \vec{b}_{(p+3) \times 1} \quad (3-6)$$

其中, w , a , o , v 是列向量,各部分公式如下:

$$K_{ij} = U(|[c_{i1} c_{i2}] - [c_{j1} c_{j2}]|) + I_{ij} \cdot \alpha^2 \cdot \lambda \|i, j \in [1 \dots p] \wedge \lambda \geq 0 \quad (3-7)$$

$$\alpha = \frac{1}{p^2} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p |[c_{i1} c_{j1}] - [c_{j1} c_{j2}]| \quad (3-8)$$

$$P_{p \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & C_{11} & C_{12} \\ 1 & \ddots & C_{22} \\ 1 & C_{p1} & C_{p2} \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

$$\vec{v}_{p \times 1} = \begin{bmatrix} c_{13} \\ c_{23} \\ \vdots \\ c_{p3} \end{bmatrix}, \vec{o}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \vec{w}_{p \times 1} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_p \end{bmatrix}, \vec{\alpha}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

基于上述公式最终可以求出权重系数向量 w 和参数向量 α ，带入基本公式，即可求得任意一点 (x,y) 的预测值。其中，矩阵 L 和其子矩阵 K 是对称矩阵，因此在计算时可以只考虑上三角部分，然后将对应位置的值赋值到下三角，以简化计算，提高计算效率。并且， α 表示所有 p 个已知点两两之间的距离之和的平均值，仅在矩阵 K 的对角线位置上对矩阵 K 产生影响， I 为单位矩阵。

3.3.3 水质监测标量数据空间插值

结合薄板样条函数原型，将其应用到本系统实际环境中，以水质标量数据采集集中的水质 PH 值为例，验证算法预测效果。设计思路如下：选取 p 个已知地理位置和该点 PH 值的监测点作为样本，利用样本点的经纬度及数据值构成集合 C ，带入公式求取权重系数向量 w 和参数向量 α ，再将未知待插值点的经纬度作为原型公式中的参数 (x, y) 进行带入，可以求得该未知点的预测 PH 值。

3.4 本章小结

本章简单阐述了水质监测环境下感知数据展示系统的总体设计和具体功能描述及模块划分等，同时具体介绍了时间序列预测自回归 AR 模型方法和空间插值中的薄板样条函数方法的基本原理、公式原型及相关参数的确定及计算方法，为下文系统实现做好基础准备工作。

第四章 感知数据时空估计与展示系统实现

本章将详细描述感知数据展示系统的实现过程,包括各个模块功能的具体实现、程序的流程、实现的细节和涉及到的数据结构、函数方法等。

4.1 系统开发环境 Qt Creator

4.1.1 环境搭建

Qt Creator 是 1991 年由奇趣科技开发的一个跨平台集成开发环境,支持 C++、JavaScript 和 QML,是 Qt 图形用户界面应用开发框架的重要组成部分。它包括一个可视化的编辑器和一个集成的 GUI 布局和窗体设计器,提供丰富的模块化 C++ 类库,支持多种操作系统,如 Windows、Linux、Mac、Symbian 等,支持“一次编写,随处编译”。

结合课题需求,本文选择在 Windows7 环境下进行系统开发,因此需使用 Windows 系统版本的 Qt 4.8.4 和 Qt Creator 2.7.0。

4.1.2 Qt 核心通信机制

Qt 开发过程中,对象之间的通信功能依赖 Qt 的信号和槽机制进行实现,这是 Qt 不同于其他开发框架的最突出核心特征。具体过程如下:在一个对象类中定义一个信号,在希望与之通信的该类或其他类中定义对应的槽,当某一个特殊的事件发生时,便触发此信号,而槽函数可立即捕捉到此信号,并且被即时调用以进行响应,从而实现对象间的通信。信号和槽之间关联的方式可以是自动的,也可以手动设置。信号和槽机制具有十分明显的优越性,使用方式高度灵活,可靠安全且耦合程度低,且参数的类型和数目均无任何硬性要求和规定。

4.1.3 QtWebKit 模块

本系统需要与网络地图 API 平台进行联合开发,过程中需要使用到 Qt 提供的 QtWebKit 模块,此模块基于开源浏览器引擎 WebKit,包含一组相关类用以实现本地系统加载网页的功能。QtWebKit 提供的 Web 引擎,既可以将万维网的内容方便地嵌入本地 Qt 程序,同时也支持本地程序对网页内容进行控制。Qt 本地对象和 Web 环境之间通过添加 JavaScript 对象实现通信。通过使用 QtWebKit 模块的 QWebView 窗口部件,利用该类提供的函数下载显示站点内容,具体到

本系统即为百度地图 API (<http://api.map.baidu.com/>)。如此即可以在系统界面上加载百度地图 API, 同时将系统本地数据上传至 API, 再利用 API 提供的各类接口函数实现监测地的地图二次开发。

4.1.4 Qt 关键数据结构

Qt 系统为用户提供了一组通用的基于模板的容器类, 与 C++ 标准模板库中的容器类相比, Qt 所提供的容器类在使用上更加安全简便更轻量^[31]。Qt 中的容器类主要有顺序容器和关联容器。顺序容器中的数据是一个接一个线性存储的, 如 QList、QVector 等, 而关联容器则以<键, 值>对的形式进行存储, 表明数据之间的关联关系, 如 QMap、QSet 及 QHash 等。本系统中常用的容器类主要有如下几种。

表 4-1 Qt 常用容器类

类	简介
QList<T>	QList 是当前最常用的容器类, 可以通过索引进行快速访问, 内部通过数组进行实现, 相比于数组, 最大的优势就是可以不用事先确定数据结构的大小, 可以通过自带的函数 append()、prepend() 和 insert() 在列表的两端及中间任意指定位置实现快速插值。
QVector<T>	QVector 是 Qt 对所有数组的封装, 可以事先不对数组进行大小预定义。可以通过 count 函数获知数组元素个数, 使用 append 函数添加元素, 或使用 insert 函数进行插入。
QMap<Key, T>	QMap 提供了一个字典, 可以认为是一种关联数组。可以实现任意一种数据类型与另一种数据类型的对应关系, 其中 Key 为索引类型, T 为数据类型, 将 Key 类型的键值映射到 T 类型的数据, 一般一个键值关联一个单一的 T 类型的数据值

4.1.5 Qt 定时器

在本系统的设计与实现过程中, 在多个地方均使用到了定时器, 帮助系统定时自动调用一些函数完成有关功能。在本系统中最重要也是最基本的一个定时器功能就是控制系统主界面地图图层的定时自动刷新, 使得系统地图页面能够实时反映实际网络状态。

在 Qt 中可以有两种方法实现定时器功能, 方法之一是使用 QObject 类的定时器, 另一种则是使用 QTimer 类。其中, QTimer 类的使用是建立在信号和槽机制的基础之上, 通过定时器到期信号触发超时事件。本系统中所有定时器均选择 QTimer 类的方式进行实现。

定时器设置相关代码流程如下。

```

#include <QTimer>
//需要使用定时器的窗口类中添加槽函数声明
private slots:
    void timerUpSlot();

//创建定时器
QTimer *timer = new QTimer(this);
//关联定时器溢出信号和相应的槽函数
connect(timer, SIGNAL(timeout()), this, SLOT(timerUpSlot ()));
//启动定时器，时间单位为毫秒
timer->start(1000);
.....
//定时器停止运行
timer->stop();

```

4.2 标量数据采集模块实现

4.2.1 标量数据接收及确认

本文中所设计的系统采用 UDP 用户数据报协议进行网络通信。在 Qt 环境下 QUdpSocket 类可以实现接收和发送 UDP 数据报的完整功能。UDP 利用套接字，即用一个 IP 地址加一个 port 端口号分别指定网络中的一台主机和该主机上的一个网络程序，可以实现网络中两个应用程序之间的通信。系统标量数据接收流程如图 4-1 所示。

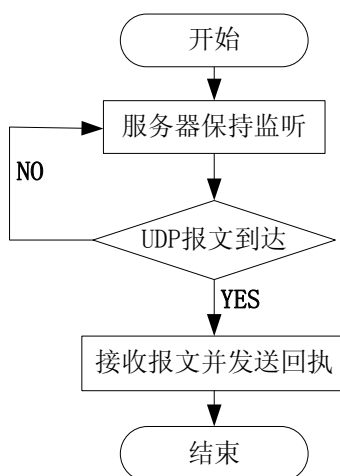


图 4-1 标量数据接收流程图

服务器与采集端事先对标量数据采集的报文格式、编码规则、接收端口等进行协议。在接收标量数据报文阶段，采集端为发送端，服务器为接收端在指定端口开启监听程序，保持监听状态，一旦收到采集端发来的信号，则立即接收数据报文。成功接收标量数据报文后，服务器和采集端角色互换，服务器变为发送端，采集端变为接收端，服务器向采集端发送成功接收的确认消息，消息中包含对前述报文的接收确认、收到时间及其他相关信息。

4.2.2 标量数据解析

系统在上一步收到的标量数据报文为字符串格式，具体示例如“##0226ST=32;CN=2011;PW=123456;MN=88888800000001;CP=1&&DataTime=20141223211751;001-Rtd=5.7,001-Flag=D;003-Rtd=22.807,003-Flag=D;015-Rtd=6.76,015-Flag=D;020-Rtd=4.026,020-Flag=N;027-Rtd=3.837,027-Flag=N&&EDC1”。对该字符串进行处理，从中可以提取出采集时间、采集节点编号、采集标量指标编号及对应测量值，解析之后的标量数据值将存至数据库中。其中，标量数据解析流程如图 4-2 所示。

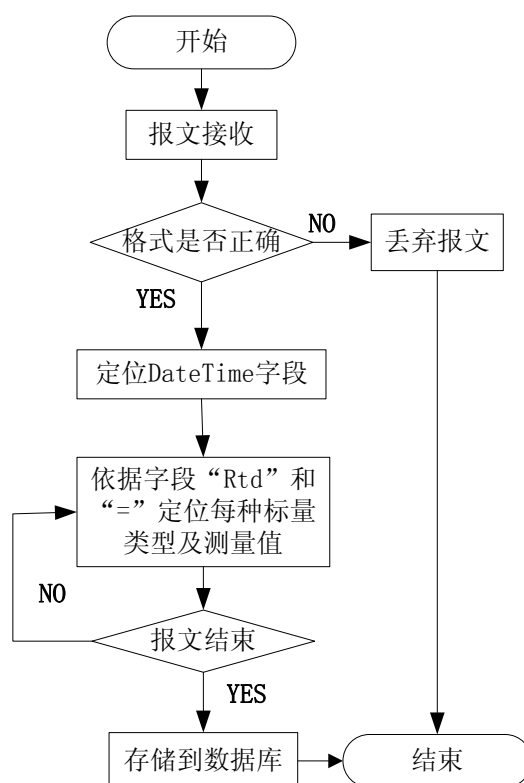


图 4-2 标量数据解析流程图

存储标量数据信息的数据表中相关字段含义及说明如下表 4-2 所示。

表 4-2 标量数据表字段说明

字段名称	字段类型	字段含义
code	varchar(6)	所测标量指标类型编号
name	varchar(20)	所测标量指标名称
node	int	对应采集节点编号
time	datetime	采集时间
value	double	测量值
id	int(AUTO_INCREMENT)	系统自增列，数据项编号

4.2.3 动态图表绘制

对于接收到的标量数据，系统可以利用图表工具对其进行趋势绘制，并且支持两种模式，一种实时模式绘制动态变化曲线，另一种为历史模式从数据库中查询历史数据进行折线图绘制。进行图表绘制时使用到的相关工具是 Qt 绘图类 QCustomPlot。

(1) 添加绘图类

在工程目录下添加该绘图类的相关文档，并将文档引入工程，在项目文件 pro 中为窗体添加打印支持 printsupport。在 UI 界面设计时，将绘图窗体 widget 进行提升“promote to”，提升类名设为 QCustomPlot，而后即可使用控件进行图表绘制。

(2) 图表绘制

本系统根据实际需要选择折线图图表样式。利用 QCustomPlot 类所提供的函数设置绘制过程中画笔、画线的样式等。同时，从标量数据库中按照目标节点、目标标量、目标时间段等相关条件筛选所要绘制的数据样本，将样本数据以 Qt 向量形式传递至绘图函数内。本系统以时间轴为横坐标，测量值为纵坐标绘制折线图。此为一般状态下从数据库中按需筛选进行历史模式的图表绘制。

当数据正在进行传输时，系统还可以支持实时动态折线图表绘制。实时绘制主要依靠系统的快速解析能力，将标量数据从报文中解析提取后快速存入数据库，再利用程序控制绘制函数自动查询数据库最新数据。此处主要运用了 Qt 的信号和槽机制，当系统收到报文时即触发信号，提示新数据到来，实时绘制函数捕捉到信号后即自动调用，查询最新数据进行更新绘制，从而以不断刷新显示在视觉效果上形成折线沿时间轴向前推动的动态效果。

4.3 网络状态采集模块实现

4.3.1 实时 GPS 信息采集

由于需要在地图平台上实时显示监测节点的地理位置，因此每一个节点的 GPS 模块定时地将自己的位置信息发回至服务器端。服务器与 GPS 传感器节点间通信采用 UDP 方式进行。系统为所有节点设置两个位置数组以保存每个节点的最新地理位置，一个数组保存经度信息，另一个保存纬度信息，数组下标表示节点编号。服务器接收到包含 GPS 信息的 UDP 报文后立即发送确认消息，同时进行解析，得到节点编号、经纬度信息，并据此对节点位置数组进行更新维护。

当收到节点 GPS 新消息时，需要判断当前是否为第一次进行通信的新增节点。若是新增节点，则在相关数据结构中增加节点个数，否则只进行原有数据结构的更新维护。本部分中涉及到的数据结构如表 4-3 所示，具体采集流程如图 4-3 所示。

表 4-3 GPS 信息采集相关数据结构说明

数据结构名称	含义
double lats[MAX_NODE_NUM]	存储节点纬度信息
double lons[MAX_NODE_NUM]	存储节点经度信息

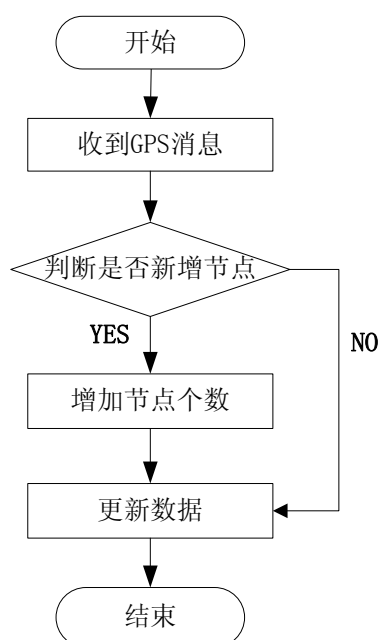


图 4-3 实时 GPS 信息采集流程图

(1) 接收 GPS 报文，确认并解析

服务器与 GPS 模块事先对报文格式、编码规则、接收端口等进行协议。服务器收到报文后，向 GPS 发送端发送成功接收的确认消息，消息中包含对前述

报文的接收确认、收到时间及其他相关信息。随后系统按照已知规则进行解析处理，得到报文中所包含的有效信息，如节点编号、经度数值、纬度数值及其他状态信息等。

(2) 维护经纬度数组 `lats[]`和 `lons[]`

根据最新解析出的报文中所含节点编号，根据标记数组判断此节点是否为第一次与系统建立通信的新增节点。若是新增节点，修改其在标记数组中的状态，同时将其经纬度填入数组中，否则只进行 `lats[]`和 `lons[]`的更新维护。

4.3.2 实时节点状态采集

实际情境下系统运行过程中，可能会因为网络时延或故障、设备故障等多种原因出现某个节点超时未发送数据的现象，此时对节点状态的实时维护可以帮助系统使用者有效缩小故障排查范围，尽快锁定目标，节省人力物力资源。

为节点设置生命数组 `marks[MAX_NODE_NUM]`，数组下标表示节点编号，数组变量表示当前节点生命值，初始化时节点生命值为 0，收到节点发来的数据后将该节点对应变量为最大生命值。生命变量随时间流逝而逐渐减小直至为 0 即为超时，期间若收到节点发来的消息则激活该节点将其生命变量重新设置为最大值。节点的活跃和超时两种状态将在地图平台上以不同标注区别显示，方便系统用户快速清晰掌握节点最新状态。本小节涉及到的数据结构说明如表 4-4 所示。

表 4-4 节点状态采集相关数据结构说明

数据结构名称	含义
<code>int marks[MAX_NODE_NUM]</code>	节点生命状态标记数组，数组下标表示节点编号，数组变量表示节点剩余生命时间

如流程图 4-4 所示，对节点生命数组的维护过程是一个动态循环的过程，在此循环过程中，若节点已经超时即生命变量已经减小至 0，则在等待收到新消息的过程中，该节点生命变量保持为 0 不变，不再减小。

(1) 接收节点报文更新状态

服务器收到节点发来的包含任何信息的数据报文时，即可认为此节点在当前的网络状态中可以正常通信，处于活跃状态。系统维护节点生命数组 `marks[]`，对收到消息的来源节点进行生命状态再激活，将其生命状态设为最大值。

(2) 维护节点生命数组 `marks[]`

系统设置定时器 `timer`，自动维护当前所有节点的生命数组 `marks[]`，依照定时器的设置，每隔固定时间间隔即将数组 `marks[]`中所有非 0 项减 1，直至减到 0

为止,为 0 表明系统已长时间未收到该节点的任何消息,该节点已处于超时状态。超时状态的节点在系统重新收到该节点的通信消息时会被重新激活,恢复生命状态。

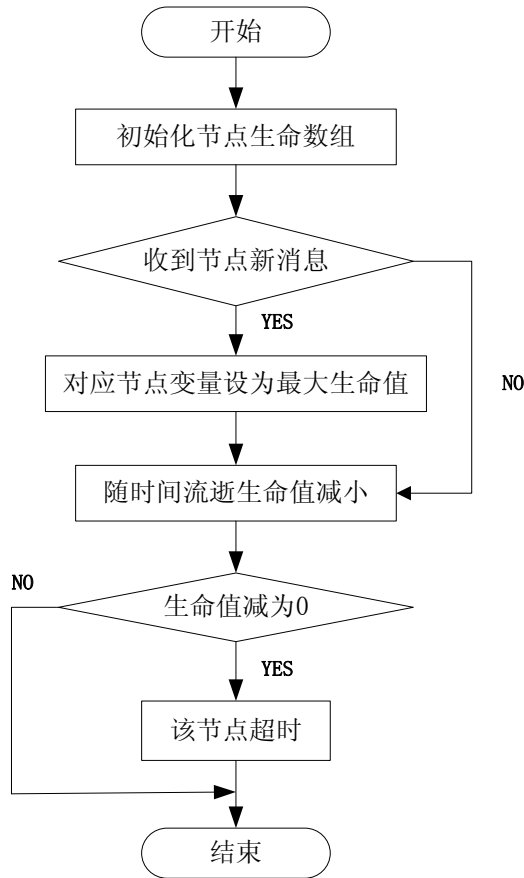


图 4-4 实时节点状态采集流程图

4.3.3 网络传输拓扑采集

在本小节所涉及的功能模块中,系统与网关节点之间利用 UDP 方式进行网络通信。系统收到某个网关节点发来的包含有传输拓扑信息的数据报文后,立即回复携带接收时间及其他信息的确认消息。网关节点利用 UDP 报文定时将表示数据网络传输的下一跳位置上报给服务器。

因此需要构造一个数组记录服务器当前已掌握的所有节点的下一跳位置信息,数组下标表示起始节点,对应数组变量表示下一跳节点,记此数组为 int 类型 `edges[MAX_NODE_NUM]`。通过该数组的每个变量和下标组合,表示一条传输路径。同时为记录每一条传输路径的时效性,还需要再设置一个数组,记此数组为 int 类型 `edgeBeat[MAX_NODE_NUM]`。

联系节点状态数组、传输路径数组和传输路径时效数组,确定当前网络传输拓扑,对其进行整理存储并在地图平台上进行显示。序列最终可以字符串形式保存到数据库中,同时存储该序列所发生的时刻,以备后续查用。

本小节中，涉及网络传输拓扑采集过程的相关数据结构及其说明如表 4-5 所示：

表 4-5 网络传输拓扑采集相关数据结构说明

数据结构	表示内容
<pre>struct { int index; int next; int method; }route_state_t;</pre>	网关节点报文消息存储体,包含起始节点、下一跳节点、网络方式（3G 或卫星）等。
intedges[MAX_NODE_NUM]	数组下标表示起始节点，对应数组变量表示下一跳节点，变量和下标组合表示一条传输路径
int edgeBeat[MAX_NODE_NUM]	数组下标表示节点编号,对应数组变量表示从该节点出发的拓扑边剩余生命时间，反映传输路径的时效性
QList<int> order	网络传输拓扑节点序列
QList<int> endNode	同时满足节点状态有效、传输路径有效且下一跳节点是服务器的全部终节点
int marks[MAX_NODE_NUM]	数组下标表示节点编号,对应数组变量表示该节点剩余生命值，为 0 表示该节点超时。

（1）接收网关节点报文并解析

服务器与网关节点事先对携带网络传输拓扑信息的报文格式、编码规则、接收端口等进行协议。服务器收到报文后，即按照已知规则进行解析处理，得到报文中所包含的有效信息，如起始节点、下一跳节点、网络方式（3G 或卫星）等，存储到定义的结构体内。

定义的结构体如下：

```
typedef struct {
    int index;
    int next;
    int method;
}route_state_t;
```

（2）维护下一跳信息数组 edges[] 和传输时效数组 edgeBeat[]

数组 edges[] 初始化时所有项设为-1，与所有节点以示区分。数组 edgeBeat[] 初始化时所有项设为 0，当某条拓扑路径更新时，将对应下标的该数组项设为最大生命值，否则即按设置的时间间隔将所有 edgeBeat[] 数组项进行自减，若某一项 edgeBeat[i] 已经减小为 0，则表明该条路径已经超时失效。根据报文中解析得出的有效数据更新维护包含网络传输拓扑信息的数组 edges[]，该组下标表

示起始节点，对应数组变量表示下一跳节点目的地。当有数组项进行更新时，同步维护对应该节点的表示拓扑时效性的数组项 `edgeBeat[]`。

(3) 提取网络传输拓扑

提取网络传输拓扑阶段需要综合分析节点状态数组、传输路径数组和传输路径时效数组。因为最近一次分别对上述数组进行更新维护的时间一般不同步，所以可能会造成某些节点或路径已经失效的情况。因而系统只会认定凡所涉及到的节点及路径均处于活跃状态的网络拓扑有效。设置数据结构 `QList<int> order` 表示网络传输拓扑路径，`QList` 是 `Qt` 的一种表示链表的模板类，是 `Qt` 的一种泛型容器类，提供快速插入和删除等操作。

网络传输拓扑采集流程具体如图 4-5 所示。

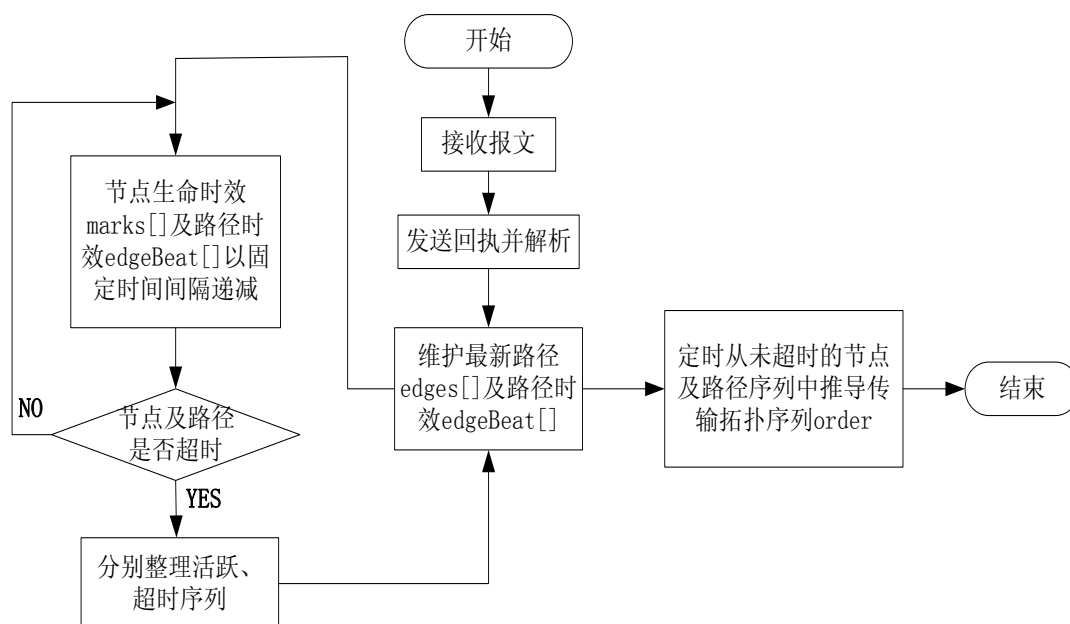


图 4-5 网络传输拓扑采集流程图

当每次更新链表 `order` 时，首先将原有数据清空以存储最新有效拓扑序列。同时创建一个新的链表结构 `QList<int> endNode` 存储所有节点序列中能够同时满足节点状态有效、传输路径有效且下一跳节点是服务器的全部终节点，服务器默认编号 0，判定条件为 $(edges[i] == 0 \& \& edgeBeat[i] > 0 \& \& marks[i] > 0)$ 。每个终结点代表一条可能的拓扑序列。分别以每个终结点作为起始点，依据数组 `edges[i]` = 下一跳编号，倒序查找前一跳节点 `i`，循环查找直至节点 `i` 状态无效。将所有查找到的节点依次插入 `order` 链表中，至此 `order` 中所存储的即为当前实时有效的网络传输拓扑序列，可与当前时间一起存入数据库。

其中，更新链表 `order`，依据节点状态、传输路径状态等各项条件判定当前

最新有效拓扑序列的代码流程如下：

```
//建立拓扑序列
for( i from 0 to 节点总个数)
{
    if 节点状态有效&&传输路径有效&&下一跳节点是服务器
    添加至终结点链表
}
for( i from 0 to 终结点总个数) //确定多条拓扑序列
{
    while( 节点编号 i 有效)
    {
        逆序查找当前的上一跳节点 n;
        将 n 逆序插入 order 序列;
        记当前节点为 n;
    }
}
```

4.4 标量数据时空预测模块实现

4.4.1 标量数据时间序列预测

利用系统采集到的大量水质监测标量历史数据，结合时间序列预测分析算法，对下一时刻标量数据走势进行合理预测，从而对用户的科学预判提供可靠参考依据，对于实际环境监测保护工作具有重大而现实的意义。本系统采用自回归 AR 模型算法对标量数据进行时序预测，其中涉及到的相关数据结构及其说明如表 4-6 所示。

表 4-6 标量数据时间预测相关数据结构说明

相关变量及数据结构	含义
double *inputseries;	数组，存储标量数据历史记录样本
int length;	样本容量 N
int degree;	模型阶数 p
double *coefficients;	数组，存储自回归系数向量 α
double **mat;	二维数组，存储矩阵 $X^T X$

从数据库中筛选出某一节点的某一项标量指标最近时期的历史数据 N 项，结合贝叶斯信息准则公式求取阶次 p ，然后带入矩阵运用最小二乘估计法求取参

数向量 A ，联系矩阵 A 及过去 p 个历史数据带入求取 t 时刻预测值。程序流程如下图 4-6。

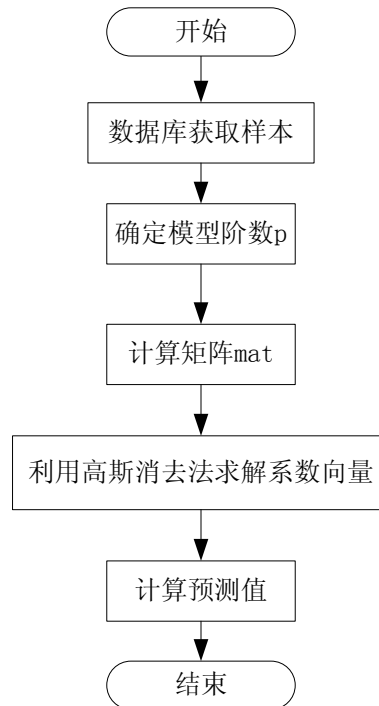


图 4-6 标量数据时间预测流程图

4.4.2 标量数据空间插值

本系统在多个位置部署了若干采集节点，利用这些采集节点的地理位置信息和采集数据指标，结合空间插值技术，对区域内未部署节点的位置进行数据指标预测，能够从一定程度上反映整个区域的数据指标随地理位置变化的相应变化趋势，对于现实生活中的实际环境监测保护工作同样具有重要意义。本系统采用薄板样条插值方法对标量数据进行空间插值，所涉及的相关数据结构如表 4-7 所示。

表 4-7 标量数据空间插值相关数据结构说明

相关变量及数据结构	含义
<pre>struct{ double x; double y; double z; } Vec;</pre>	定义结构体表示点 C ，其中 x 、 y 表示经纬度， z 表示该点数据值
<code>vector<Vec> points;</code>	样本点集合
<code>int p;</code>	样本点容量
<code>matrix<double> mtx_l(p+3, p+3);</code>	矩阵 L
<code>matrix<double> mtx_v(p+3, 1);</code>	列向量 v 、 o 拼接构成列向量
<code>matrix<double> mtx_orig_k(p, p);</code>	矩阵 K

选取系统中已知的 p 个样本点，读取最近更新的 `lats[]` 和 `lons[]` 数组，得到这 p 个节点的经纬度信息，同时针对某一项标量指标如水质监测中的 PH 值，从数据库中筛选出这 p 个节点最近时刻监测记录，分别作为 (x, y, z) 坐标构成样本点集合，利用第三章介绍的方法原理进行矩阵求解，得出权重系数矩阵 w 和向量 α ，再将待插值点的经纬度坐标带入公式，即可求得待插值点插值结果。具体流程如下图 4-7 所示。

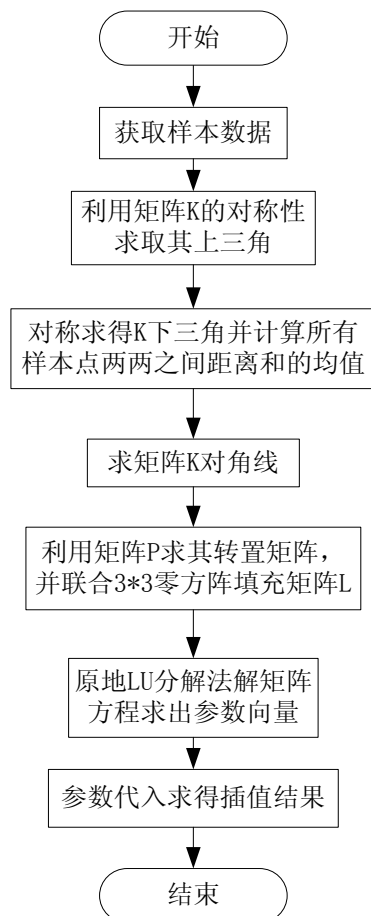


图 4-7 标量数据空间插值流程图

4.5 地图平台展示模块实现

4.5.1 本地 Qt 与地图 API 数据交换

Qt 中提供了基于 WebKit 的 QtWebKit 模块，可以将 web 页面嵌入到 Qt 应用程序中。QtWebKit 使用 JavaScript 脚本语言，在 JavaScript 执行环节和 Qt 对象模型间搭建桥梁，实现利用 WebKit 的 JavaScript 环境访问本地对象。通过使用 QtWebKit 模块的 QWebView 窗口部件，下载显示百度地图 API。同时利用对象 `info` 将系统本地数据上传至 API，再利用 API 提供的各类接口函数实现监测地的地图二次开发。

(1) 本地 Qt 和 Web 环境之间建立通信实现数据交换

本地 Qt 系统通过添加 JavaScript 对象与 Web 环境实现通信。在系统界面窗口初始化阶段, 用于下载显示站点内容 QWebView 窗口部件利用 Qt 本身自带的方法添加已定义好的 JavaScript 对象 info 类, info 类中定义了本地 Qt 和 Web 环境之间交互所需使用到的数据结构及函数方法, 二者通过 info 作为桥梁实现信息传递。其中, 添加 info 的具体方法如下:

```
ui->webView->page()->mainFrame()->addToJavaScriptWindowObject(const QString & name,
QObject * object );
```

用于本地 Qt 和 Web 环境之间进行通信的 info 类中主要函数方法有:

表 4-8 info 类主要函数方法说明

函数名	函数功能
setPos(int index, double lon, double lat)	设置编号 index 节点经纬度
setEdge(int src, int dst)	设置传输路径, 起点为 src, 终点为 dst
setOrder()	设置网络传输拓扑路径 order
setNodeIn()	筛选当前活跃节点
setNodeOut()	筛选当前超时节点
setPosNow(intscale,double lng, double lat)	读取当前显示的地图中心点经纬度及地图比例尺返回至本地 Qt
getMarks(int index)	获取编号 index 节点剩余生命值
getOrder(int i)	获取 order 序列中第 i 个节点编号
getLat(int i)	获取编号 i 节点纬度
getLon(int i)	获取编号 i 节点经度
getNo()	获取 order 序列长度
getNextNo(int i)	获取 order 序列第 i 个节点
getScaleNow()	获取当前地图比例尺
getLatNow()	获取当前地图纬度
getLngNow()	获取当前地图经度
showInfoDlg(int index)	定义地图节点标注点击事件, 关联地图与标量数据
nodeTimeOut()	节点生命值随时间递减
edgeTimeOut()	传输路径生命值随时间递减

(2) 加载网页并创建对地图二次开发的编程环境

QWebView 作为显示地图的窗口部件使用 load() 函数下载和显示站点内容, 函数参数为 url, 可以直接加载网页地址, 也可以加载 Qt 资源文件 qrc。在本系统中, 由于需要对地图 API 进行基于 javascript 的二次开发, 因此将开发的代码

部分保存为 html 文件后以资源文件的形式添加至工程项目内，并以 load()函数加载。对地图部分的重新开发代码以及和本地 Qt 之间的通信编程代码都保存在此 html 文件中，此部分以 javascript 语言为基础进行代码编写。

4.5.2 节点定位

本小节的主要设计思路如下。将节点 GPS 模块传回的经纬度位置信息，通过定义的对象 info 传入百度地图 API 后，利用 API 提供的坐标转换函数，将原始经纬度坐标转化为百度坐标，并通过提供的接口函数在地图界面上加以标注显示，进行节点原始位置定位。同时，随着对节点位置及状态信息的不断更新维护，地图上显示的节点也会做出相应变化，如位置的变动，活跃、超时状态的区分等，以保证地图的实时状态准确性。节点定位流程如图 4-8 所示。

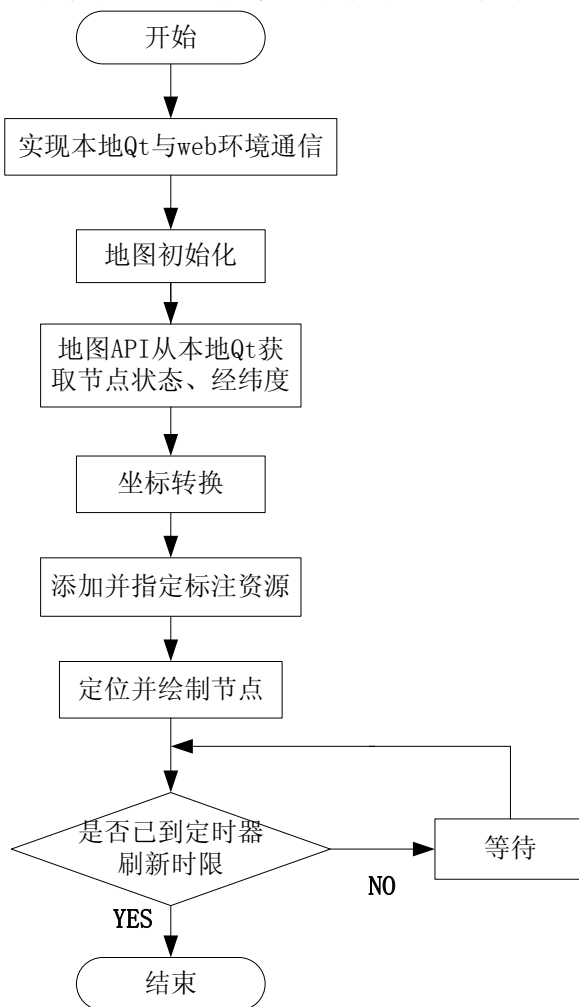


图 4-8 节点定位流程图

(1) 从 Qt 本地获取节点状态经纬度信息

在 Qt 资源文件 map.html 文档中，首先创建地图实例，并对地图进行初始化，设置中心点及比例尺等基本参数，显示基本地图图层。然后利用 info 对象的方法

调用函数获取当前所有节点的个数及活跃节点数组、超时节点数组，针对每个节点，利用 `getLat()` 和 `getLon()` 获取其实时经纬度信息。

(2) 经纬度坐标转换

通过 `info` 对象获取的节点经纬度坐标是由 GPS 模块传回的 GPS 原始坐标，与百度坐标依然存在微小的偏差，因此需要通过 API 提供的接口函数进行两种坐标之间的转换。

(3) 添加图片资源

节点状态有活跃、超时的不同区分，且节点可以分为普通采集节点及服务器等多种类型。因此，从展示的角度考虑，需要对不同类型的节点用不同的标注加以区分，以便给用户提供较高的辨识度。本系统节点标注设为 3 种类型，服务器、活跃节点和超时节点，分布以 3 种图标作为标注物。所用到的图标可以是 png 格式的图片，以资源文件的形式添加至工程中。待使用时，在 `map.html` 文档中指定即可。

(4) 节点标注绘制

为保证地图的实时状态准确性，节点位置及状态信息会持续进行更新维护，由系统设置定时器自动完成。此处需要使用 Qt 中的 `QTimer` 类，关联刷新地图槽函数，到达设置时间间隔后，自动发射信号触发槽函数，实现对地图的刷新。利用 API 提供的函数接口，根据不同节点类型选择不同标注图片，依照转换后的百度坐标，在地图上对节点进行定位标注。

4.5.3 拓扑绘制

本小节的主要设计思路是利用 `info` 对象的函数方法确定实时有效拓扑序列后，再通过 `info` 对象将此序列传给地图 API，利用 API 的 `javascript` 方法进行拓扑路径的绘制，同时实现标注物沿拓扑路径由起点向终点移动的动态过程绘制。

(1) 确定实时有效拓扑序列

调用 `info` 类的函数方法 `setOrder()`，联系当前实时最近更新的节点生命数组 `marks[]`、传输路径数组 `edges[]` 和传输路径生命数组 `edgeBeat[]`，依据判定条件 (`edges[i]==0&&edgeBeat[i]>0&&marks[i]>0`) 确定当前实时有效的网络传输拓扑序列 `order`。在 `map.html` 文档中，利用 `info` 类将序列 `order` 传入。由于 `order` 中可能存储多条拓扑路径，依据 `order` 序列中的分段标记，将多条路径划分开来，存储到二维数组 `path[][]` 中，其中 `path[i]` 存储第 `i` 条拓扑路径节点序列。

(2) 地图折线类绘制拓扑路径

利用百度地图 API 提供的 `Polyline` 折线类可以在地图上绘制折线的地图叠加层。百度地图 `Point` 类型数组 `points[]` 存储各节点经纬度，数组 `markpts[]` 存储每

条拓扑路径起点和终点节点在 `order` 序列中的位置。每个 `path[i]` 中存储的拓扑序列所有点构成一条折线中的所有折点，调用地图折线类 `Polyline` 构造函数，以 `path[i]` 为参数，同时设置折线的颜色、线型、粗细等特征，实现添加折线覆盖物。

(3) 标注物沿拓扑路径移动动态效果实现

设置双层循环，针对每一条拓扑路径序列 `path[i]`，将 `path[i]` 按照包含的全部节点 `path[i][0...j]` 划分为 `j` 段，这 `j` 段直线首尾相连构成表示网络传输拓扑的折线 `path[i]`。对这 `j` 段直线中的每一段做四等分，求出其 3 个四等分点连同其首尾两个端点存储至数组 `rPoints[]` 中，利用 javascript 的回调函数不断重绘，按拓扑路径的顺序在每个节点及其四等分点上瞬时绘制标注物，实现动点沿拓扑路径移动的动画效果。

网络拓扑绘制流程如下图 4-9 所示。

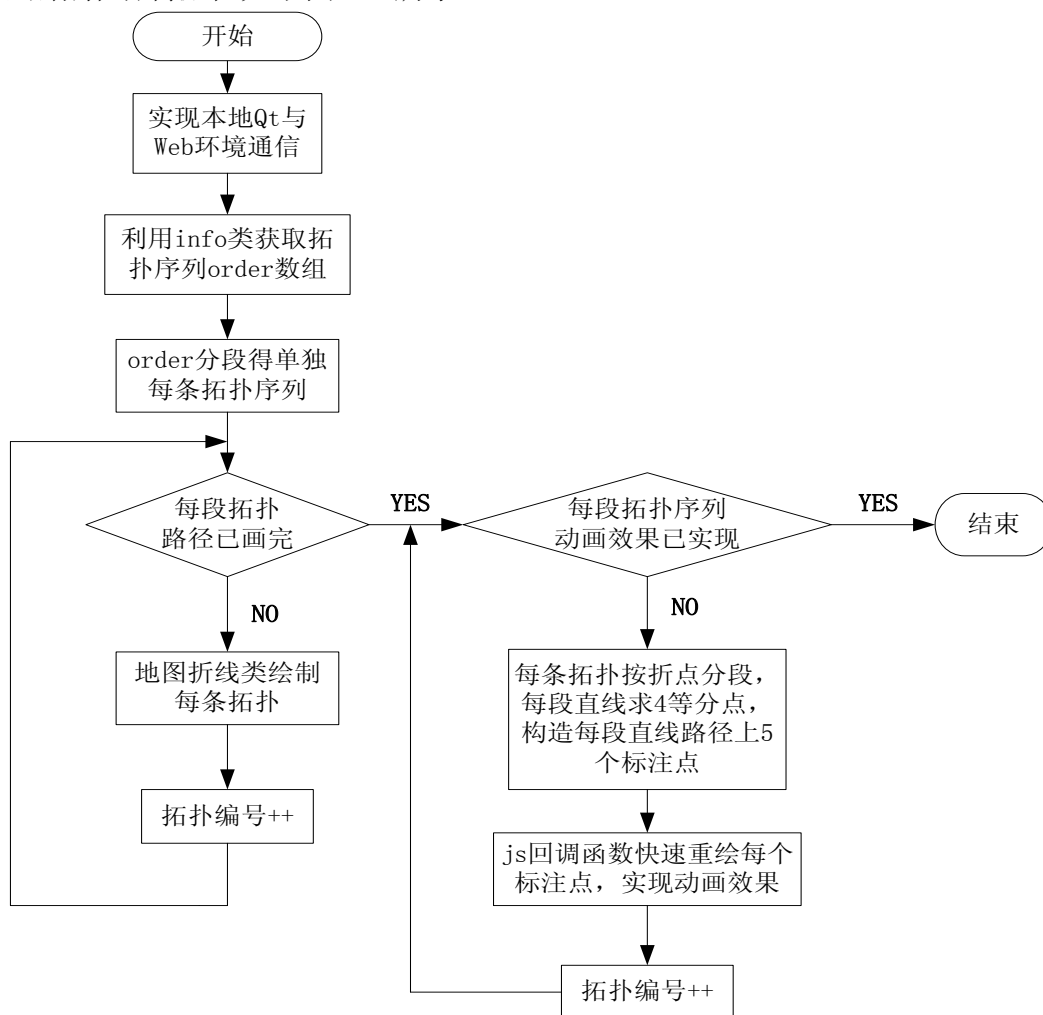


图 4-9 网络拓扑绘制流程图

本节涉及数据结构定义及说明如下表 4-9。

表 4-9 拓扑绘制数据结构含义说明

数据结构	表示含义
points[]	存储各节点经纬度
markpts[]	存储每条拓扑路径起点和终点节点在 order 序列中的位置
path[][]	二维数组存储多条拓扑序列, 其中 path[i]存储第 i 条拓扑路径节点序列
polyline[]	折线数组, 每条折线表示一条拓扑路径
rPoints[]	折线路径中每段直线首尾两个端点连同 3 个四等分点, 表示动点移动路径

4.5.4 融合标量

以上章节所介绍的都是系统地图平台与网络状态信息进行交互之后有关信息的展示过程。本小节将详细介绍如何将标量数据结合地图平台进行直观展示。本小节的具体设计思路如下, 利用地图 API 提供的函数为每个节点标注添加点击事件, 点击标注后, 可弹出窗口显示当前节点收到的最新监测数据值并完成近期标量数据图表绘制, 所以数据都是通过对数据库进行查询而得到。

(1) 自定义 Qt 窗口类

在 Qt 环境下, QWidget 类被称为基础窗口部件, 是所有用户界面对象的基类, 为了创建符合当前特定功能需求的窗口界面, 可以在 Qt 项目下新建一个 Qt 设计师界面类, 以 QWidget 为基类, 继承 QWidget 类特性, 同时增加一些个性特征以更好地适应项目需求。在本系统中, 新建 Qt 设计师界面类 InfoDialog, 在界面上拖入一个普通 widget, 右键点击对其进行提升 “promote to”, 提升类名设为 QCustomPlot, 如此即可以在 InfoDialog 窗口类上利用 Qt 绘图类 QCustomPlot 进行图表绘制。

(2) 添加地图节点标注点击事件

在百度地图 API 中, 可以利用 API 提供的函数方法添加地图监听事件, 当某个事件被触发之后就会去调用执行指定的某个函数 function。在本系统中, 地图部分及时通过 javascript 的 event 事件机制实现此部分功能。具体实现方法是在 map.html 文档中, 当根据 info 对象传递的每个节点 GPS 位置实现地图层上的节点定位并添加标注物 marker 时, 同时为该 marker 添加监听事件, 监听 click 信号, 当捕捉到节点被点击的信号时, 即通过 info 对象执行函数创建 InfoDialog 窗口, 在窗口上显示相关标量数据信息。

设置地图点击事件的代码主体如下:

```

marker.addEventListener("click", function(){
    //设置地图中心为当前点击位置
    map.setCenter(point);
    //创建 InfoDialog 窗口，参数为当前节点编号
    info.showInfoDlg(index);
});

```

(3) 数据查询及图表绘制

在 InfoDialog 窗口内，会展示该节点收到的最新监测信息，包括各种具体监测指标项、标量数据采集位置、最近采集时间等。InfoDialog 类的构造函数中包含一个参数 index 用于传递节点编号，在地图监听事件触发调用 info 对象创建 InfoDialog 窗口时，已经将此参数进行了传递。因此在 InfoDialog 类的具体实现中，可以利用此参数对数据库进行条件查询，得到该节点的标量数据指标。利用 MySQL 的 select 语句对标量数据进行条件查询时，要查询最近时间的测量值所用到的关键字为 order by time desc，即按时间降序排列。筛选后符合条件的各个标量数据项可以用 Line Edit 控件进行填写并展示于窗口之上。其中涉及到 Qt 汉字显示的部分，只需要在 Qt 工程的主函数里添加设置即可，具体设置方式如下：

```

QTextCodec::setCodecForTr(QTextCodec::codecForName("utf-8"));
QTextCodec::setCodecForCStrings(QTextCodec::codecForLocale());

```

在对当前节点的标量数据近期变化趋势进行折线图表绘制时，所选数据默认为距离当前查询时刻最近的 NUM 项数据，利用 MySQL 的 select 语句进行条件查询时，所用到的关键字为 order by time desc limit NUM。为每一种标量类型单独设置折线的画笔颜色、线性、粗细等特征，可在一个图表内同时显示多条不同折线，用以区分显示多种标量数据类型。多种类型标量数据趋势变化线同时显示可以帮助用户从整体角度把握水质变化趋势特征，避免了单独某项数据偶然出现波动影响判断准确性。

4.5.5 历史查询

在地图页面每次刷新时，会将当前实时确定的网络拓扑序列，通过定义的对象 info 传入百度地图 API，利用 API 提供的添加折线功能和已有的节点标注位置，将各个节点标注通过折线按照规定序列连接起来，同时，另设一个移动标注，沿着节点间的拓扑路径方向按序移动，实现动态拓扑效果。系统支持此种状态下的

实时拓扑动画效果演示，同时还能够支持历史拓扑回放模式进行动画展示，历史消息是在以往的拓扑序列及相应时间存入数据库后，通过数据库按条件查询并再次绘制。历史拓扑绘制流程如图 4-10 所示。

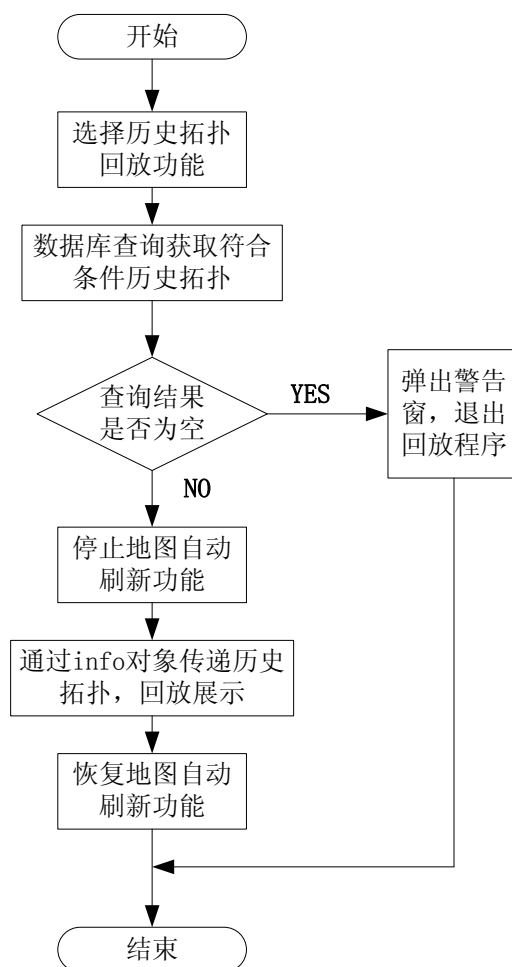


图 4-10 历史拓扑绘制流程图

(1) 选择回放时间段

回放历史拓扑首先即是要确定回放的时间段，确定起始时间时刻 1 和结束时间时刻 2。时刻 1 和时刻 2 通过界面上的 Date/Time Edit 控件与用户进行交互来获取，将获取到的表示时刻的文本内容转换成形如“yyyy-MM-dd hh:mm:ss”的标准时间格式。

(2) 获取历史拓扑

由于之前实时展示拓扑路径时已经将路径以字符串的形式连同其对应时刻存入数据库中，因此现在只需要通过对数据库进行按时间段的条件查询即可得到该时间段内所存储的所有历史拓扑，当前利用 MySQL 的 select 语句进行条件查询时，所用到的关键字为 select...where time between 时刻 1 and 时刻 2。将

查询得到的所有历史拓扑存入数据结构 `QList<QString> routes` 内，若当前查询结果为空，系统发出警告，同时回放程序返回退出。

(3) 历史拓扑回放

对检索得出的每一条历史拓扑进行动态回放。首先要将系统地图平台的自动刷新定时器设置暂停，同时创建回放定时器，当前一条历史拓扑回放完成后，自动开始播放下一条，若所有历史拓扑已经回放完毕，则恢复系统地图平台的自动刷新定时器，系统重新进入定时自动刷新地图图层状态。

回放阶段，函数调用 `info` 对象 `setMapReplay(QString route)` 函数，首先将原有 `order` 序列清空，然后将历史拓扑序列字符串进行处理转换存入 `order`，利用 `info` 对象将 `order` 传至地图 API 中，启动地图刷新程序，此时地图程序运行结果即为历史拓扑动画效果。

4.6 本章小结

本章详细阐述了水质监测感知数据展示系统的设计与实现过程。其中，重点描述了系统四大功能模块的详细设计过程，即标量数据采集模块、网络状态采集模块、地图平台展示模块和标量数据时空预测模块。本章详细介绍了各个模块的具体功能、实现细节、涉及到的主要数据结构及函数方法以及流程安排等主要内容，整章内容是实现该套展示系统的基础，为后文系统具体功能展示提供了重要支持和平台支撑。

第五章 系统功能展示

系统功能展示主要包括两个部分，一是展示系统中各模块的运行结果，二是对系统最终的运行效果进行展示。

5.1 模拟实验环境

论文中所研究的面向环境监测的感知数据时空估计与展示系统，在实际实验过程中，将以水质监测环境中采集到的水质标量数据、节点状态数据为具体实例，同时由于受到实验环境的限制，系统中涉及到的部分标量时序数据以及相关空间信息等将由计算机模拟生成。

5.2 系统主界面展示

水质监测数据展示与分析系统主界面如图 5-1 所示。



图 5-1 系统主界面效果图

系统以 tab 标签方式提供两个主体显示窗口可以切换，分别是数据地图窗口和监测数据窗口。其中，数据地图窗口主要展示系统的地图功能，包括节点位置、状态、拓扑等信息；监测数据窗口则主要负责提供与标量数据相关的功能模块的

展示，如标量监测数据库、趋势折线等。

5.3 系统各模块功能展示

本节将分别介绍系统各个功能模块的过程及运行效果展示，主要包括标量数据采集模块、网络状态采集模块、标量数据时空预测模块及地图平台展示模块。各部分详细介绍如下。

5.3.1 标量数据采集模块

在标量数据采集模块中，服务器与标量数据采集节点之间通过预先约定端口并依靠 UDP 报文的收发进行通信。接收到采集节点的消息时，服务器会立即发送确认报文。UDP 中的报文是经过编码处理的，因此服务器还需要按照报文编解码规则进行解析处理，得到报文中的有效数据信息等。解析后的具体数据还需要存储至数据库中，以备后续查用。并且对于实时的标量数据流，系统将提供实时图表以显示当前数据变化趋势，方便用户进行观察。其各部分运行效果图如下：

(1) 标量数据接收及确认

服务器与采集节点在 Qt 环境下利用 QUdpSocket 类实现接收和发送 UDP 数据报的完整功能，即用一个 IP 地址加一个 port 端口号指定系统或采集端的接收程序，实现网络中两个应用程序之间的通信。服务器在接收标量数据报文阶段，在指定端口开启监听程序，保持监听状态，一旦收到采集端发来的信号，则立即接收数据报文。成功接收标量数据报文后，服务器读取当前主机系统时间，以此作为收到时间向采集端发送确认。该部分运行效果图如图 5-2 所示。

```
QHostAddress( "10.103.240.120" ) 57078
"##0226ST=32;CN=2011;PW=123456;MN=88888800000001;CP=&&DataTime=20141228215147;001-
Rtd=4.425,001-Flag=D;003-Rtd=6.669,003-Flag=D;015-Rtd=6.95,015-Flag=D;020-
Rtd=2.783,020-Flag=N;027-Rtd=3.837,027-Flag=N;latitude=0.123;longitude=5.678&&EDC1"
now receive: "2014-12-28 21:51:47"
7777: node= 3
```

图 5-2 标量数据接收及确认后台运行过程示意图

图为系统后台显示接收到的标量数据采集信息。首先显示的是系统接收程序读取出的发送端 IP 地址“10.103.240.120”及发送端口号 57078。随后输出的显示程序为接收到的未经解析的原样报文，并读取系统当前时间“2014-12-28 21:51:47”，并将此时间写入确认报文，按照之前读取的采集节点 IP 地址及端口号发送消息确认。

(2) 标量数据解析

系统对上一步收到的字符串格式标量数据报文进行处理，从中可以提取出采集时间、采集节点编号、采集标量指标编号及对应采集值，并将解析之后的标量

数据值将存至数据库中。该部分运行效果如图 5-3 所示。

```
QHostAddress( "10.103.240.120" ) 57078
"##0226ST=32;CN=2011;PW=123456;MN=88888800000001;CP=&&DataTime=20141228215147;001-
Rtd=4.425,001-Flag=D;003-Rtd=6.669,003-Flag=D;015-Rtd=6.95,015-Flag=D;020-
Rtd=2.783,020-Flag=N;027-Rtd=3.837,027-Flag=N;latitude=0.123;longitude=5.678&&EDC1"
now receive: "2014-12-28 21:51:47"
7777: node= 3
latitude: 0.123
longitude: 5.678
采集节点发送最新标里数据 code: 001 name: 温度 dimension: 1 Rtd: 4.425 Flag: D
采集节点发送最新标里数据 code: 003 name: ph值 dimension: mg/l Rtd: 6.669 Flag: D
采集节点发送最新标里数据 code: 015 name: 悬浮物 dimension: mg/l Rtd: 6.95 Flag: D
采集节点发送最新标里数据 code: 020 name: 总有机碳 dimension: mg/l Rtd: 2.783 Flag: N
采集节点发送最新标里数据 code: 027 name: 总氮 dimension: mg/l Rtd: 3.837 Flag: N
```

图 5-3 标量数据解析后台运行过程示意图

图为系统后台显示的对标量数据采集信息进行解析处理的过程。系统接收端口号为 7777，对报文进行解析后得到采集节点编号 node 为 3，该报文中包含 5 种标量指标分别是编号为 001 的温度，编号为 003 的 ph 值，编号为 015 的悬浮物，编号为 020 的总有机碳，编号为 027 的总氮及其对应的实时监测值 Rtd。

(3) 数据库存储

标量数据报文解析的同时，会将解析出的有效数据进行存储，系统同时提供对数据库的条件查询及结果显示功能，该部分运行效果如图 5-4 所示。



图 5-4 标量数据数据库存储查询示意图

图中显示内容为按条件“采集节点编号为 1 且采集时间为 2014 年 12 月 28 日的全部污染元种类的采集数据”进行查询后的数据库显示结果。

(4) 动态图表绘制

当标量数据正在进行传输时，系统还可以支持实时动态折线图表绘制。实时绘制主要依靠系统的快速解析能力，联系运用 Qt 的信号和槽机制，当系统收到报文时即触发信号，提示新数据到来，实时绘制函数捕捉到信号后即自动调用，查询最新数据进行更新绘制，并以不断刷新显示在视觉效果上造成折线沿时间轴向前推动的动态效果。该部分运行效果如图 5-5 所示。

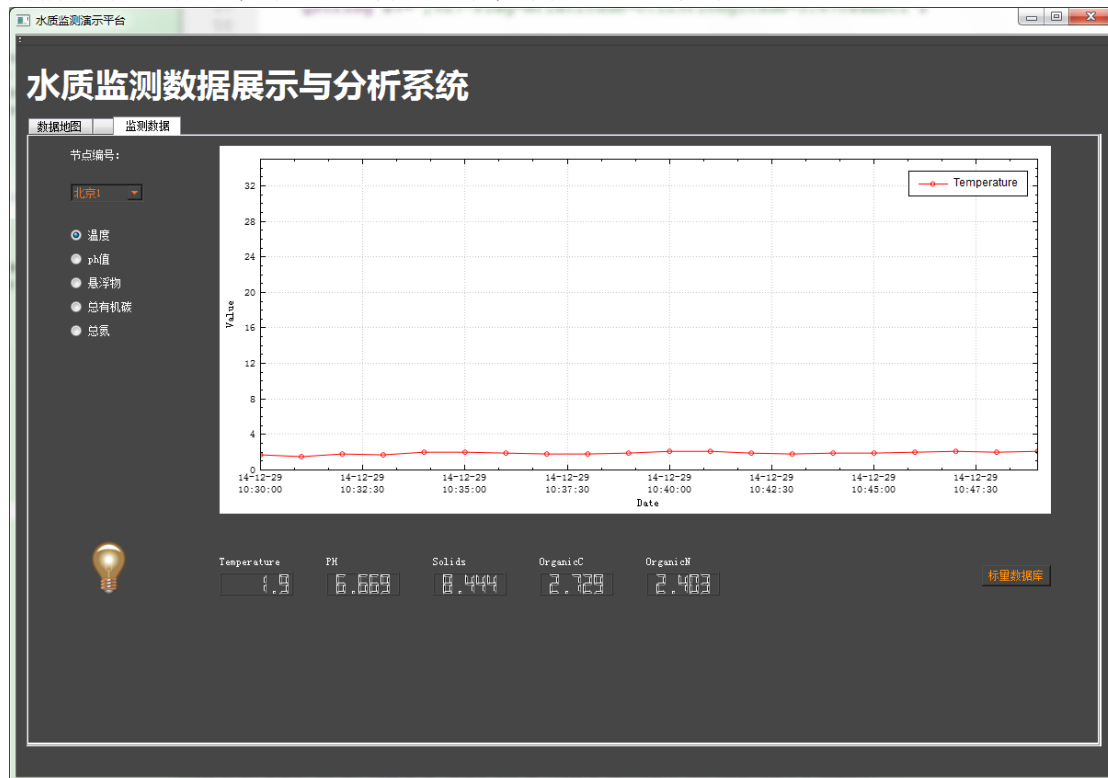


图 5-5 标量数据接动态折线图绘制示意图

图中显示系统利用 `QCustomPlot` 类所提供的功能函数设置绘制的画笔颜色为红色，选择以折线连接各个数据点，并设置了以时间轴为横坐标，测量值为纵坐标，选定了坐标轴的刻度范围及刻度大小。并且在系统界面左侧提供了下拉框选择菜单供拥护选择节点，菜单下方设置 `radioButton` 以选择标量指标类型，用这两个菜单可以确定图表中的数据对象。图表右上角方框内红色字体显示当前折线对应的标量名称，图表下方 5 个 LED 框内实时显示当前接收的标量数据报文中所含 5 类指标测量值。系统左下角的灯泡对应代表此部分的信号和槽机制，当新数据到来时，此灯泡图标变亮以表明系统已发出信号触发自动绘图程序对图表进行刷新。随后灯泡图标会变暗以表明系统进入等待状态，等待下次数据到来。

5.3.2 网络状态采集模块

在网络状态采集模块中，对系统展示所需要涉及到的如采集节点实时 GPS 地理位置、采集节点当前实时状态（活跃或超时）、节点与服务器之间信息传输

实时拓扑信息等分别进行采集并处理，并将有关信息存储至数据库，最终提供给地图平台展示模块进行使用。本模块中各部分运行效果图如下：

（1）实时 GPS 信息采集

服务器与 GPS 传感器节点间利用 UDP 方式进行通信。系统为所有节点设置两个位置数组以保存每个节点的最新地理位置，一个数组 `lons[]` 保存经度信息，另一个数组 `lats[]` 保存纬度信息，数组下标表示节点编号。服务器接收到包含 GPS 信息的 UDP 报文后立即发送确认消息，同时进行解析，得到节点编号、经纬度信息，并据此对节点位置数组进行更新维护。该部分运行效果如图 5-6 所示。

```
now receive3: "2014-12-28 22:18:36"
1*39.95665*116.35481
1 1 39.9567 116.355
index: 1 lon: 116.355
index: 1 lat: 39.9567
addToGraph: index: 1 lon: 116.355 lat: 39.9567
marks[ 0 ]= 4
marks[ 1 ]= 4
marks[ 2 ]= 3
marks[ 3 ]= 2
marks[ 4 ]= 2
marks[ 5 ]= 2
marks[ 6 ]= 2
now receive3: "2014-12-28 22:18:51"
2*39.95612*116.35350
1 2 39.9561 116.353
index: 2 lon: 116.353
index: 2 lat: 39.9561
addToGraph: index: 2 lon: 116.353 lat: 39.9561
marks[ 0 ]= 4
marks[ 1 ]= 3
marks[ 2 ]= 4
marks[ 3 ]= 1
marks[ 4 ]= 1
marks[ 5 ]= 1
marks[ 6 ]= 1
```

图 5-6 GPS 信息采集后台运行过程示意图

图中所显示的内容是系统后台对 GPS 报文的处理过程输出。首先显示的是系统接收到 GPS 报文后立即读取的当前系统时间“2014-12-28”，然后将此信息写入确认报文，向发送端发送确认消息。同时，系统对 GPS 报文消息进行解析，得出该条报文的有效信息，即当前收到节点 1 的经纬度位置为(116.355, 39.9567)，利用该信息对系统 `lons[]` 和 `lats[]` 数组利用函数 `addToGraph()` 进行更新维护，之后又收到节点 2 的经纬度位置为(116.353, 39.9561)，同样对系统 `lons[]` 和 `lats[]` 数组利用函数 `addToGraph()` 进行更新维护。

（2）实时节点状态采集

对节点状态的实时维护，其目的在于帮助系统使用者尽快确定网络时延或故

障、设备故障等多种问题的发生地点，有效缩小故障排查范围，节省人力物力资源。实现对节点状态的实时维护，主要依靠维护节点生命数组 `marks[]`，数组下标表示节点编号，数组变量表示当前节点生命值，初始化时节点生命值为 0，收到节点发来的数据后将该节点对应变量设置为最大生命值。生命变量随时间流逝而逐渐减小直至为 0 即为超时，期间若收到节点发来的消息则激活该节点将其生命变量重新设置为最大值。其中表示服务器的 0 号节点时刻保持最大生命值，以保证其在网络中的有效性。该部分运行效果如上一小节图 5-6 所示。

图中收到节点 GPS 位置信息时，即视作该节点仍处于活跃状态，可以重新赋予其最大生命值，其余节点随时间流逝生命值不断减小。具体如收到节点 1 消息时，设置 `marks[1]` 为最大生命值，同时重置 `marks[0]` 为最大生命值，收到节点 2 消息时，设置 `marks[2]` 为最大生命值，同时重置 `marks[0]` 为最大生命值，并且，其余节点 1、3、4、5、6 在上一次 `marks[]` 生命变量基础上，自动减 1。

(3) 网络传输拓扑采集

网关节点利用 UDP 报文将表示数据网络传输的下一跳位置上报给服务器。利用 `edges[]` 数组记录服务器当前已掌握的所有节点的下一跳位置信息，数组下标表示起始节点，对应数组变量表示下一跳节点，通过该数组的每个变量和下标组合，表示一条传输路径。同时利用数组 `edgeBeat[]` 表示传输路径时效，数组下标表示路径起始节点，对应数组变量表示该起点的传输路径剩余生命时间。综合利用节点状态数组、传输路径数组和传输路径时效数组，得出当前网络传输拓扑，以字符串形式保存到数据库中，同时存储该序列所发生的时刻。该部分运行效果如图 5-7 所示。

```
now receive2: "2014-12-28 22:41:04"
temp: 3 1 3 010
size: 16
temp: 1 2 2 00
size: 16
temp: 2 -62256 3 000
size: 16
```

图 5-7 网络传输拓扑接收及确认后台运行过程示意图

图 5-8 中所显示的是系统后台对传输拓扑报文的处理过程。首先，系统接收到报文时读取当前系统时间写入确认报文，向发送端发送确认消息。然后处理该条报文，报文所表示的含义为节点 3 下一跳为节点 1，节点 1 下一跳为节点 2，节点 2 经由卫星方式进行通信直接到达服务器节点 0。

系统收到上一个图中所表示的拓扑传输信息后，对 `edges[]` 数组进行维护，利用函数 `setEdge()` 设置 `edges[3]=1`，且更新 `edgeBeat[3]` 为最大生命变量，由后台运行结果显示可以看出，随时间流逝，在无节点状态机拓扑传输路径状态激活的情况下，`marks[]` 及 `edgeBeat[]` 数组随时间流逝自动减小，直至为 0，期间保持

等待激活事件。

```
edgeBeat[ 3 ]= 4
marks[ 0 ]= 4
marks[ 1 ]= 3
marks[ 2 ]= 3
marks[ 3 ]= 3
marks[ 4 ]= 3
marks[ 5 ]= 3
marks[ 6 ]= 3
edgeBeat[ 3 ]= 3
marks[ 0 ]= 4
marks[ 1 ]= 2
marks[ 2 ]= 2
marks[ 3 ]= 2
marks[ 4 ]= 2
marks[ 5 ]= 2
marks[ 6 ]= 2
```

图 5-8 网络传输拓扑处理后台运行过程示意图

5.3.3 标量数据时空估计模块

结合第三章、第四章中相应章节对时空预测算法的介绍，本系统支持从数据库中查询相应历史数据进行标量数据的时间预测和空间插值。该部分运行效果如图 5-9 和 5-10 所示。

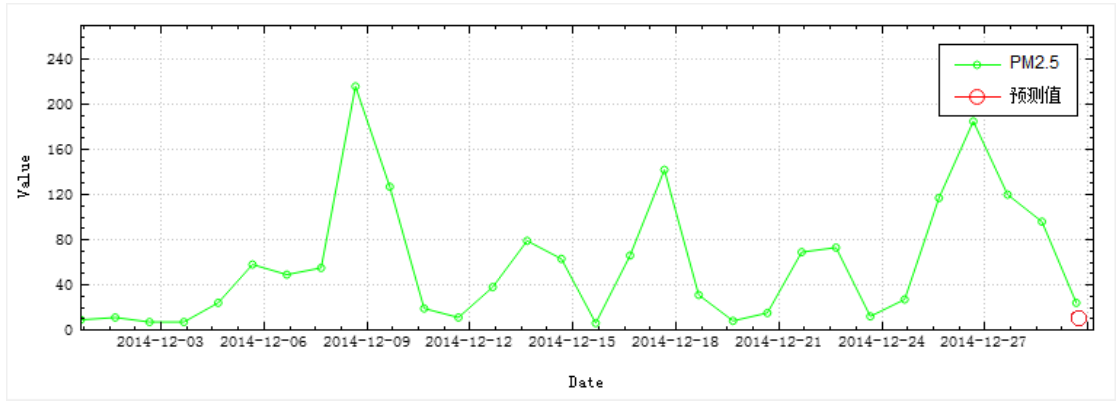


图 5-9 标量数据时间预测效果图

图 5-9 所示为 PM2.5 指数预测效果图，以数据库中的一个半月内历史数据为样本，图中小圆点图标曲线为历史数据变化趋势，大圆圈图标为基于历史数据进行预测后得到的预测值，可以看出预测误差较小。

图 5-10 所示为标量数据空间插值结果示意图，以水质 PH 值为例进行实验。利用已知的七个样本点的位置信息和数据值结合插值点的地理位置预测插值点的数据值。其中，不同的地理位置标注符号分别代表已知样本点和待插值点。左侧和下方坐标轴分别表示样本点和插值点的经纬度地理位置，右侧坐标轴则表示

PH 值。图表中具体元素含义详见右上方图例说明。

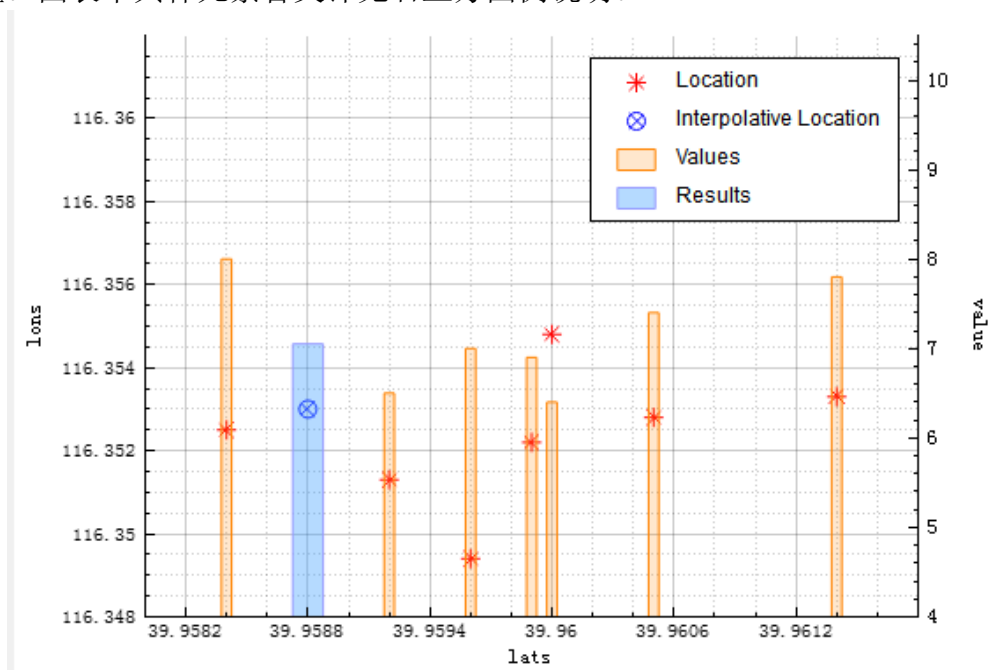


图 5-10 标量数据空间插值效果图

5.3.4 地图平台展示模块

在地图平台展示模块中，系统利用 Qt 平台中提供的 QWebKit 类的函数接口，将百度地图 API 的 web 页面嵌入到 Qt 应用程序中，实现在系统界面上加载百度地图 API。再定义一个对象 info 以帮助实现本地系统和地图 API 之间的通信。通过节点 GPS 模块传回的经纬度位置信息和传输路径数组，在地图界面上进行节点原始位置定位和拓扑路径的绘制，同时地图上实现节点标注与标量数据的相关联。本模块中各部分运行效果图如下：

(1) 节点定位

利用节点 GPS 模块传回的经纬度位置信息，通过定义的对象 info 传入百度地图 API 后，利用 API 提供的坐标转换函数，将原始经纬度坐标转化为百度坐标，进行节点原始位置定位。同时，随着对节点位置及状态信息的不断更新维护，地图上显示的节点也会做出相应变化，如位置的变动，活跃、超时状态的区分等，以保证地图的实时状态准确性。该部分运行效果如图 5-11 所示。

图 5-11 中，服务器与节点以 3 种不同形式的图标加以标注，红旗图标代表服务器所在位置，黄色五角星代表当前处于活跃状态节点，红色五角星代表当前处于超时状态的节点。若节点位置发生变化或有新增节点出现，那么相应地，在地图图层进行刷新时，节点标注物所在位置会进行更新，以维护地图实时准确性。同时，若节点超时导致有效状态发生变化时，在地图下一次刷新时，节点图标也会发生相应变化，以保证地图状态的实时性。



图 5-11 地图节点定位效果图

(2) 实时拓扑

在上一部分已有的节点位置定位标注的基础上,利用 info 对象的函数方法确定实时有效拓扑序列后,再通过 info 对象将此序列传给地图 API,利用 API 的 javascript 方法进行拓扑路径的绘制。该部分的运行效果如图 5-12 所示。



图 5-12 实时拓扑绘制效果展示

图 5-12 所展示的阶段,是在 info 对象的 setOrder()方法在综合分析当前实时最近更新的节点生命数组 marks[]、传输路径数组 edges[]和传输路径生命数组 edgeBeat[]后,确定 order 序列{1,0}即当前有一条向服务器进行通信传输的拓扑路径。将路径在地图上以绿色折线进行连接,连接完成后,若由多段折线拼接,求取每一小段折线的四等分点,在此基础上,利用 js 回调函数完成动点沿拓扑路径运动的动画效果。图中所示红色圆点即为该动点,沿着这条路径从起点至终点服务器不断前移,呈现动画效果。

(3) 标量信息窗

创建 Qt 窗口类 InfoDialog,利用该信息窗口在地图图层上显示某节点收到的最新监测信息,包括各种具体监测指标项、标量数据采集位置、最近采集时间等。地图 API 利用监听事件监听图层表面鼠标单击事件,并根据此信号触发调用 info 对象创建 InfoDialog 窗口,InfoDialog 类与地图 API 之间通过一个参数 index 传递节点编号。该部分运行效果如图 5-13 所示。

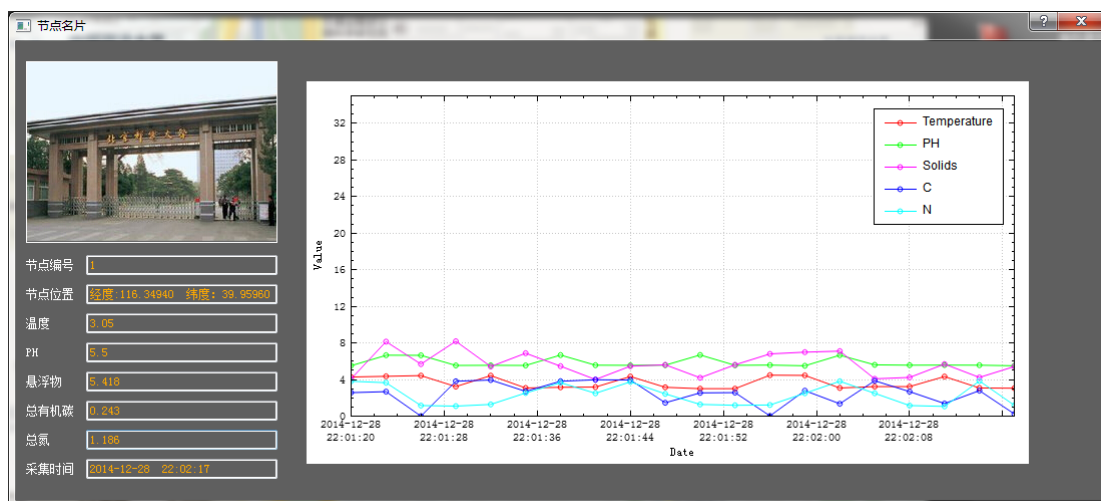


图 5-13 地图节点标注单击事件信息窗

如图 5-13 所示,是在地图图层上单击代表 1 号节点的五角星形标注物后,弹出的信息提示窗。该提示窗包含以下 3 部分内容,左上角是节点所在位置的图片,左下角为该节点相关信息包括节点编号、经纬度位置信息、该节点最近一次采集的各项标量数据值及最近采集时间等,提示窗右侧为该节点的最近 20 次监测值的折线趋势图,图片中以 5 种颜色分别绘制 5 种标量以示区分,折线图右上角提供标量名称与曲线线条颜色一一对应关系,折线图以时间轴为横坐标 Date,测量值为纵坐标 Value,坐标轴上有刻度显示。将多种标量数据的趋势折线集成在一张图表内,有助于用户把握整体水质变化趋势,避免单一种类的标量类型受到某种突发影响后造成较大误差,影响判断的准确性。

(4) 历史拓扑回放

本系统支持历史拓扑回放模式进行动画展示,从数据库中查询以往的拓扑序列历史记录及对应记录发生相应时间,调用曲线绘制函数绘制传输路径折线序列,然后绘制动点沿路径运动动画效果。该部分运行效果如图 5-14 所示。

图 5-14 中所显示的即为历史拓扑回放时系统运行显示效果。在系统界面右下角提供历史记录条件筛选框,与用户之间进行交互获取数据库查询所需限定条件,包含历史记录发生的日期及时间段,筛选完成后,将会暂停主界面的实时地图刷新功能,屏蔽控制该功能的定时器 **timer**,然后依次对查询得到的结果进行拓扑路径及动点的绘制。对于符合筛选条件的每一条历史记录,系统会设置回放定时器,依照时间及次序完成回放绘制,待所有记录回放完成后,系统会取消回放定时器,并同时再次激活系统主界面地图自动刷新定时器 **timer**。

最后历史拓扑回放功能运行效果如图所示,筛选条件如界面右下角选择框所示,筛选的是“2014 年 7 月 11 日下午 14 点至 15 点之间”的所有历史记录,左边地图图层上正在展示的是这段时间的第一条拓扑路径记录{1,3,0},图中红色动点正在沿着该路径向服务器端移动。该条记录回放完成后,会顺序回放下一条记录。



图 5-14 历史拓扑回放效果图

5.4 本章小结

本章主要对水质监测环境下的感知数据展示系统各模块功能运行效果做出

详细展示，主要包括标量数据采集模块、网络状态采集模块、标量数据时空预测模块和地图平台展示模块中的各个主要流程环节的运行效果及后台处理示意图。综合各模块运行效果，可以看出本文设计并实现的环境监测感知数据展示系统运行稳定，展示效果美观、直接，能够在一定程度上提高环境监测的效率，具有良好的应用价值。

第六章 总结与展望

6.1 总结

本文以环境监测中的若干问题为研究对象,以环境监测中的水质监测数据为例,对环境感知数据的时空估计与展示方法进行深入研究。利用不断发展和日益成熟的网络技术及传感器技术,设计并实现一个综合展示系统,对感知数据进行存储分析,通过时空估计算法从时间和空间两个维度上对数据进行预测,同时,通过多种图形、图表展示手段,结合网络地图平台,从时间、空间、数值角度对水质数据进行综合展示,有效提高环境监测工作的效率。

本文主要分为六个章节。在第一章中首先介绍了课题相关的研究背景、国内外研究现状,并简要探讨了本文研究工作的主要目标和意义。第二章主要从时间预测及空间插值两个方面介绍相关技术,以及开发工作中用到的可视化展示工具,为后文的深入研究做好基础准备工作。然后在第三章中给出了系统的总体设计与具体模块划分,概括性的描述了各个模块的功能,并具体介绍了关键技术的相关算法研究。第四章则依照前文的模块划分,分别详细阐述了各个模块的具体实现、关键技术的实现,其中还包含了主要部分的流程图和细节描述。最后在第五章中对系统运行的最终效果给出了详细的展示说明,包括各个模块的后台运行过程示意图以及相应的界面效果图等。在论文工作的整体研究过程中,确实也遇到过许多问题,例如地图 API 与本地服务器之间的通信问题、地图图层上各类型数据及状态的实时更新过程中产生的同步问题等,但最终都通过查阅大量资料,利用多种技术方法予以解决,最后成功完成整个系统的实现。

经过测试证明,本文中描述的面向环境监测的感知数据时空估计与展示系统能够稳定、正常的连续工作。系统对各项数据的实时综合展示效果也达到了令人较为满意的程度,简单直观,方便用户快速把握总体监测情况。总体来说,系统从时效性和直观性等角度较好地完成了论文工作提出的目标。

6.2 展望及改进建议

至此,论文研究工作已完成了最初的目标,实现了面向环境监测的感知数据时空估计与展示系统,但是系统还存在不足之处,仍有很大的改进空间。对于系统未来的改进方向提出以下建议:

系统管理方面，目前本系统的功能主要集中于接收信息并对其进行处理展示，缺乏对远端节点及设备的控制管理能力，因此未来可以针对此问题尝试添加一些网管指令，利用系统发出指令对各个设备和环节实现远程控制功能，以此增强系统的灵活性与可控性。

系统运行方面，虽然目前系统可以保持较长时间的稳定运行，但是当网络环境较差时仍会影响地图功能的表现，因此未来可以考虑尝试实现离线地图功能，并且进一步提高系统的容错性与健壮性。

系统显示方面，当前系统的展示工作主要集中于地图和图表两个方面，未来可以考虑进一步增添显示元素，引入视频等，并增添相关视频控制功能如摄像头的控制、传输效率的提高等。

参考文献

- [1] 环境监测 [EB/OL]. <http://baike.baidu.com/view/41560.htm>
- [2] 马华东,宋宇宁,于帅洋.物联网体系结构模型与互连机理[J].中国科学: 信息科学,2013, 43(10): 1183-1197.
- [3] Ma H D. Internet of things: Objectives and scientific challenges[J]. Journal of Computer science and Technology, 2011, 26(6): 919-924.
- [4] Chao Wang, Huadong Ma, Yuan He, et al. Adaptive Approximate Data Collection for Wireless Sensor Networks. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(6): 1004-1016.
- [5] Liang Liu, Wangyang Wei, Dong Zhao, et al. Urban Resolution: New Metric for Measuring the Quality of Urban Sensing. IEEE Transactions on Mobile Computing, online, 2015.
- [6] Shifeng Fang, Li Da Xu, Yunqiang Zhu, et al. An Integrated System for Regional Environmental Monitoring and Management Based on Internet of Things [A]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014.
- [7] 物联网 [EB/OL]. <http://baike.baidu.com/view/1136308.htm>
- [8] 李怡庭. 全国水质监测规划概述[J]. 中国水利,2003, 14.
- [9] 张龙.小型移动在线水质监测系统的研究[D].浙江大学,2012.
- [10] 聂淑媛.时间序列分析的历史发展[J].广西民族大学学报: 自然科学版,2012,18(1):24-28.
- [11] Brown, Robert G. . Exponential Smoothing for Predicting Demand. Cambridge, Massachusetts: Arthur D. Little Inc. 1956.
- [12] 朱求安,张万昌,余钧辉等.基于 GIS 的空间插值方法研究[J].江西师范大学学报(自然科学版),2004,28(2):183-188.
- [13] 王勇.时序数据挖掘技术及其在水质预测中的应用研究[D].广东工业大学,2005.
- [14] 朱琼瑶. 水质时序数据处理及预警系统数据库构建技术研究[D]. 浙江大学, 2012.
- [15] Box, G. E. P. ,G. M. Jenkins. Times series analysis: forecasting and control [M].

1970: 53-65.

[16] 何慧梅.基于多传感器数据融合的水质异常检测方法研究[D].浙江大学,2013.

[17] Autoregressive Model Wiki [EB/OL].

http://en.wikipedia.org/wiki/Autoregressive_model.

[18] 杨叔子, 雅吴, 轩建平. 时间序列分析的工程应用(上)[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2007: 176-189.

[19] Abbadeni N. Perceptual Meaning of the Estimated Parameters of the Autoregressive Model [A]. IEEE International Conference on Image Processing, Sept. 2005.

[20] Guo Feng, Liu Chen-yu, Zhou Bin, et al. Spares Consumption Combination Forecasting Based on Genetic Algorithm and Exponential Smoothing Method. The Fifth International Symposium on Computational Intelligence and Design, Oct. 2012.

[21] 高觅谛.基于 WebGIS 的地理信息支撑技术在水质安全预警系统中的应用研究[D].浙江大学,2012.

[22] 黄杏元, 马劲松, 汤勤. 地理信息系统概论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 93-103.

[23] Guoliang Zou, Kelei Xue, Dongmei Huang, et al. The Comparison and Study of Small Sample Data Spatial Interpolation Accuracy. 2010 Sixth International Conference on Natural Computation(ICNC), Aug. 2010.

[24] Deng, X.F., Lv, X.N., Zhang, M.H., et al. Spatial Distribution of Soil Organic Matter in Tillage Layers in a Southern China Basin Using Classifications and Spatial Interpolation Algorithms. 2013 Second International Conference on Agro-Geoinformatics, Aug. 2013.

[25] Bunge W. Theoretical Geography[M]. Lund: Lund Studies in Geography. 1966.

[26] Gianluca Donato, Serge Belongie. Approximate Thin Plate Spline Mappings. Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision, 2002.

[27] Matheron. G. Principles of geostatistics[J]. Economic Geology, 1963, 58: 1246-1266.

[28] van Beers W.C.M, Kleijnen J.P.C. Kriging Interpolation In Simulation: a Survey. Simulation Conference, Dec. 2004.

[29] Wang Ping-bo, Cai Zhi-ming. LS-EM Algorithm of Parameters Estimation for Gaussian Mixture Autoregressive Model. IMACS Multiconference on Computational

Engineering in Systems Applications, Oct. 2006.

[30] 朱会义,刘述林,贾绍凤等.自然地理要素空间插值的几个问题[J].地理研究,2004,23(4):425-432.

[31] 霍亚飞. Qt Creator 快速入门 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.

致谢

写到这里，本文已经接近尾声，为期两年半的硕士研究生学习生活也即将结束。在这两年半的学习生涯中，虽有些许遗憾，但我收获到的更多的是成长和成熟。在即将毕业之际，我要向母校北京邮电大学表示衷心的感谢，并向这段时间以来一直关心我、帮助我的老师和同学表达我最由衷的感激和敬意。

首先要感谢我的导师马华东教授。在为期两年半的研究生学习过程中，马老师渊博的学识、严谨的治学态度和认真敬业高度负责的人格魅力都让我受益匪浅。在论文工作过程中，马老师对我严格要求，悉心指导，给我提出了许多宝贵的意见，帮助我顺利完成研究生阶段的各项工作任务工作，在此表示由衷的感谢，并衷心祝愿他身体健康，工作顺利。

我还要感谢刘亮老师和段鹏瑞老师对我学习工作的关心。我的每一步成长、每一次进步都离不开刘老师和段老师的悉心指导和关怀。进入实验室以来，刘老师和段老师不仅在科研方面给予我很多指导和帮助，在生活中对我也十分亲切，让我倍感关怀。两位老师态度平易近人，方方面面都从学生的角度出发考虑，照顾周到，让我时刻感觉到来自集体的温暖。祝愿两位老师身体健康，再创佳绩。

我也要感谢实验室小组的成员，他们是胡金字、张新和徐盈盈。与他们的相处十分愉快，让我充分感受到了团队合作的力量和乐趣。感谢你们在工作和生活中都给予我无私的帮助和支持，推进项目成果日趋完善，帮助我顺利完成毕业论文。

感谢我的父母对我的培养和支持，养育之恩无以言报，衷心祝福你们平安健康。

最后，感谢评审老师在百忙之中给予批评和指导。

作者攻读学位期间发表的学术论文目录

- [1] 殷晓林, 段鹏瑞. 水质监测数据展示系统设计与实现. 中国科技论文在线. 2014 年 12 月. 论文编号 201412-458.