引文格式：彭恒,范城城,李天思. 基于北斗导航的智能供水管理系统设计与应用[J]. 地理空间信息, 2024, 22(10): 100-103. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2024.10.024

基于北斗导航的智能供水管理系统设计与应用

彭　恒[1]，范城城[2,3*]，李天思[4]
（1. 中国矿业大学 （北京），北京 100032；2. 中国科学院微小卫星创新研究院，上海 201210；3. 上海微小卫星工程中心，上海 201210；4. 北京航天长城卫星导航科技有限公司，北京 100032）

摘　要：为解决我国大面积耕地供水管网漏损率偏高、巡检效率低下的问题，对漏水或爆管等现象迅速察觉并及时处理，同时提供最优巡检路径，设计了一套基于北斗时空技术(定位、授时、短报文)的智能供水管理系统，介绍了系统的功能、构成及工作原理。结合实际应用，管理人员可以在智能供水管理系统中实时查看供水管网关键监测节点处的时间、位置、压力、流量等信息。同时，系统通过可视化方式告警，将相关告警信息及时发送给管理人员，对于管线巡检，系统会自动生成最优巡检路径，提高巡检效率，助力智能供水管理系统的建设。

关键词：北斗导航；智能系统；漏损率；管线巡检；路径规划
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）10-0100-04

Design and Application of Intelligent Water Supply Management System Based on Beidou Navigation Satellite System

PENG Heng[1], FAN Chengcheng[2,3], LI Tiansi[4]
(1. China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100032, China;
2. Innovation Academy for Microsatellites of CAS, Shanghai 201210, China;
3. Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 201210, China;
4. Great Wall Navigation Technology Co., Ltd., Beijing 100032, China)

Abstract: In order to solve the problems of high leakage rate and low patrol efficiency of water supply network for large area of cultivated land in China, quickly detect and timely deal with water leakage or pipe burst, and provide the optimal patrol path, we designed an intelligent water supply management system based on Beidou spatio-temporal technology (positioning, timing, short message), and introduced the functions, composition and working principle of system. Combined with practical applications, managers can view the time, location, pressure, flow and other information at the key monitoring nodes of water supply network in real time. At the same time, the system sends relevant alarm information to managers in a timely manner through visual alarm. For pipeline patrol, the system will automatically generate the optimal patrol path, improve the patrol efficiency, and help the construction of intelligent water supply management system.

Key words: Beidou navigation satellite system, intelligent system, leakage percentage, pipeline inspection, path planning

供水管网作为智慧农业不可或缺的重要基础设施，用以保障农作物各个生长阶段的用水需求。然而，在现代化农业发展初期，由于技术不够成熟，并且缺乏有效管理手段，随着时代的发展，造成大部分耕地中灌溉水管道漏损率均超过《供水管网漏损控制及评定标准》CJJ92-2016 中规定的 12%漏损率的标准。同时，对于农业供水管网中突出的漏水和爆管现象，如若不能够及时处理，将直接影响耕地用水水资源的使用安全，还会造成巨大的经济损失[1-3]。因此，无论是出于社会安全考虑或者是经济考虑，及时发现供水管网故障，并且高效率的完成管网巡检，都将是一件非常有意义的事情。

传统的供水管线巡检的方案制定以管理人员的工作经验为主，具体实施则以工作人员的工作习惯为主，这将导致供水管线的巡检效率低下，无法及时准确的解决问题[4]。智能供水管理系统针对上述情况，以关键监测节点的监测信息为基础，智能制定最优供水管线的巡检路径，并结合北斗高精度测量终端与高精度位置服务数据，为巡检工作人员提供厘米级的导航定位，同时能够实时获得工作人员位置信息，北斗高

收稿日期：2023-07-28。
项目来源：国家重点研发计划资助项目（2022YFE0204600）。
第一作者简介：彭恒（1989—），博士研究生，主要研究方向为GNSS导航系统应用，E-mail：javalive@163.com。
通信作者：范城城（ 1986—），博士，副研究员，主要研究方向为信号与信息处理，E-mail：fancc@microsate.com。

精度位置服务的引入将大大提高供水管网的巡检效率。

以智慧农业安全风险综合监测预警平台建设为背景，针对农业灌溉管网漏损率偏高、巡检效率低下等问题，本文将以北斗导航系统为基础，利用北斗高精度位置服务与授时，研发一套基于北斗时空的智能供水管理系统，旨在实时监测供水管网关键节点的流量、压力等信息；并智能规划最优巡检路线，结合北斗高精度测量终端，提高供水管网线路巡检效率。

1　基于北斗导航的智能供水管理系统

1.1　原理与方法

本文研发的基于北斗导航的智能供水管理系统可对供水管网关键节点的压力、流量等参数进行实时监测，对故障进行预警，并通过人工智能算法为工作人员提供最优的巡检路径。

1.1.1　信息获取

在供水管网关键监测节点处部署北斗授时终端、流量计以及压力传感器等，北斗授时终端利用北斗卫星导航系统的时间信息对各节点传感器进行授时；监测节点处的传感器用于监测供水管网监测节点处的流量和压力，并将参数发送给北斗授时终端，然后通过移动通信网络将监测节点处的位置、时间、流量、压力等信息发送给监控管理平台。其中，时间信息用于判断这些监测节点的时间是否同步，其原理如下[6-7]：

1）计算时间最优加权平均值 Y 。各节点 n 的时间信息的加权平均值 $\bar{X}$ ，其计算公式如式（1）：

$$\bar{X}=\sum_{n=1}^{m}W_nX_n \tag{1}$$

式中， X_n 为各监测节点的时间信息； m 为监测节点的数量； W_n 为节点 n 的加权因子，满足：

$$\bar{X}=\sum_{n=1}^{m}W_n=1,\ 0\le W_n\le 1 \tag{2}$$

认为各监测节点的时间信息 X_n 相对独立，并且是 X_n 序列的无偏估计，则总均方差 θ^2 为：

$$\theta^2=E\left[\left(X-\bar{X}\right)^2\right]=E\left[\sum_{n=1}^{m}W_n^2\left(X-\bar{X}\right)\right]=\sum_{n=1}^{m}W_n^2X_n^2 \tag{3}$$

当总均方差最小时，所对应的加权因子为：

$$W_n=\frac{1}{\frac{1}{\theta_n^2}\sum_{n=1}^{m}\frac{1}{\theta_n^2}},\ n=1,2,\ldots,m \tag{4}$$

则最小均方差为：

$$\theta_{\min}^2=\frac{1}{\sum_{n=1}^{m}\frac{1}{\theta_n^2}} \tag{5}$$

进而得到最优 Y 的值为：

$$Y=\frac{\sum_{n=1}^{m}\frac{X_n}{\theta_n^2}}{\sum_{n=1}^{m}\frac{1}{\theta_n^2}} \tag{6}$$

2）将各节点 n 的时间信息 X_n 与 Y 对比，若20%的误差在阈值范围内，则使用剩余满足条件的监测节点进行时间同步；若有大于20%的误差超出阈值范围则，则所有节点重新进行时间同步。

1.1.2　监控平台

1）参数监控。监控管理平台中的供水管网监测节点的参数监控主要分为两大类：①监测节点的基本信息，包括节点的位置、唯一编号、传感器类型等；②监测的参数信息，包括节点处的流量、压力、数据时间信息等。

2）数据查看。上述信息数据以不同格式存储于不同的数据库中，用户可以根据需求，对一段时间的历史数据以图形、表格等形式进行查看，进而掌握观测节点参数的整体变化趋势，有助于后续供水管网的使用与维护。

3）状态预警。监测参数预警的关键在于设定合理的参数阈值，在供水管网监测节点出现故障前发出预警。利用人工智能算法将供水管网关键节点处压力、流量等状态信息评估转化为机器学习算法中的分类问题[8]。将监测参数的历史数据作为算法的特征变量，变化状态作为标签，对监测数据集进行统计和分析，确定合理的监测参数阈值，并参数发展状态进行预测，输出相应的监测参数状态，管理人员可以根据监测参数状态制定后续工作计划。

4）路径规划。当状态预警显示多个供水管网监测节点参数异常，需要进行供水管网巡检时，传统的巡检方式以工作人员的经验为主，无法保证工作人员采用最优巡检路径方案，以最短时间完成对供水管网的巡检工作。针对上述问题，路径规划模块通过数学建模的方式将最优路径规划问题抽象为对应的数学问题，编写相应的算法解决该数据问题，为巡检人员制定最优的巡检路径，进而以最短的时间完成巡检工作。数学模型的建立过程如下：①数学模型建立[9-10]。路径规划数学模型建立的2个key值分别为：供水管网巡检节点的起始位置以及起始位置与中间各个节点之间的距离，通过图论对实际问题场景进行建模，以图论中的无向带 权图对路径问题进行建模，记为 $P(M,N)$ ，其中 M 表示需要巡检的所有节点； N 表

示各个节点之间距离合集。因此，需要解决的数学问题为从起点出发，遍历所有节点，寻找距离最小的路径。②数学模型求解[11]。LPA*是一种增量启发式搜索算法，用来处理动态环境下从给定起始点到给定目标点的最短路径问题，适应图形中的变化而无需重新计算整个图形的情形。首先，确定需要巡检的所有节点以及起始节点，并计算任意2个节点之间的距离；然后，将上述信息作为2个key值传递给LPA*算法进行动态路径规划，其基本方程下：

$$\mathrm{rhs}(s)=\begin{cases}0 & \text{if } s=s_{\mathrm{start}}\\ \min_{s'\in \mathrm{pred}(s)}\left(g(s')+c(s',s)\right) & \text{othe rwise}\end{cases} \tag{7}$$

式中，$\mathrm{rhs}(s)$ 为距离最短函数；s 为监测节点合集；s' 为集合 s 中的任意节点；$\mathrm{pred}(s)$ 节点 s 的前代节点；$g(s')$ 节点 s 到起始点的预计最短距离；$c(s',s)$ 两个节点之间的代价函数。

1.1.3 管网巡检

根据供水管网监测节点的巡检需求，监控管理平台利用LPA*算法制定最优巡检路径，然后将巡检路径发送到工作人员北斗高精度测量终端。同时，北斗高精度测量终端接收北斗导航信号以及高精度位置服务数据，利用网络RTK定位算法，获取厘米级导航定位信息[3,12]，并将位置信息实时反馈给监控管理平台。利用北斗高精度导航服务，工作人员将高效的完成供水管网巡检工作，并且管理人员可以实时掌握供水管网巡检的进度，为后续工作的决策提供判断基础。

1.2 系统设计

随着现代化农业的发展及退林还耕试点不断扩大，新建耕地用水需要经过既往地块供水管网，造成既往地块供水管网负担过重，供用水不均衡；并且既往地块的供水管网年龄较久，进而导致漏损率较高。管网漏损不但对水资源造成严重的浪费，也增加了供水成本；传统的耕地供水管网的运行以认为经验为主，缺乏科学手段；漏损排查主要依靠人工听漏解决，造成漏损排查效率低，缺乏实时在线数据监测系统[5]。

针对上述问题，本文设计了一套基于北斗导航的智能供水管理系统，主要具备以下功能：①信息实时采集：以北斗授时服务为基础，采用流量计、压力计等传感器采集供水管网关键节点处的流量、压力等参数；②信息实时传输：利用移动通信网络，将实时采集流量、压力等参数发送至智能监控预警平台系统；③信息实时监控：监控管理平台对接收的参数信息进行实时显示，并在设备出现故障前发出 预警；④智能巡检：针对需要进行巡检的节点，智能规划出最优的路径，并结合北斗高精度位置服务完成供水管网巡检任务。

1.3 总体架构

根据上述系统功能设计，基于北斗导航的智能供水管理系统的逻辑架构可以划分为5个层次：硬件支撑层、基础支撑层、软件支撑层、业务层和应用层。系统逻辑架构如图1所示。

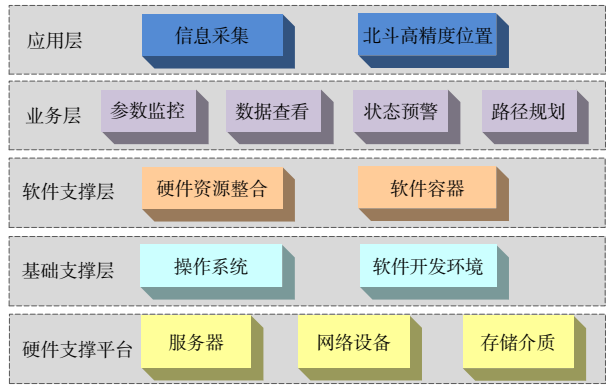


图1 系统逻辑架构

①硬件支撑平台：是整个系统运行的硬件基础，包括服务器及外设资源、网络设备和存储介质；②基础支撑层：运行在硬件支撑平台之上，是上层软件运行的基础。基础支撑层包括操作系统、软件开发环境等；③软件支撑层：是运行在基础软件层之上，为业务软件提供支撑服务，是整个逻辑结构中的一个重要环节，在进行硬件资源整合的同时为业务软件提供了运行环境；④业务层：是系统业务处理软件，主要包括参数监控、数据查看、状态预警以及路径规划等功能模块；⑤应用层：以北斗时间为基础，利用传感器采集供水管网关键节点的参数信息；利用北斗高精度测量终端和高精度位置服务数据，为供水管网线路巡检提供高精度位置信息。

2 实验与应用

南疆作为我国最大的棉花生产基地，其种植区供水管网错综复杂，仅图木舒克市辖区范围内就划分为75 000个“区域计量”，如何高效完成管网的巡检工作将是一项极具挑战性的工作。本文以某市耕地供水管网为应用范例，并结合实际供水管网节点信息，以验证基于北斗导航的智能供水管理系统的功能。

2.1 实时监测

监控管理平台为供水管网管理人员与工作人员提供了统一的可视化平台，平台能够实时监测供水管网监测节点处的标识、位置、时间、流量、压力等信

息；并且，当监测节点处参数发生异常时，对相应的节点发出预警信息。实时信息监测功能的实现，避免由于信息不对称造成管理人员与工作人员沟通效率低下的问题；同时，供水管网监测节点预警信息的发布，为管理人员制定工作计划提供了依据，提高了供水管网的维护效率。

2.2　数据查询

监控管理平台为供水管网管理人员提供了历史数据查询功能，管理人员可以以图、表等形式查询某一段时间内单个或多个监测节点的流量、压力、预警等信息，如图2所示，还可以以Excel文件导出历史统计数据。数据查询功能实现，为供水管网管理人员提供监测节点处一段时间内的整体状态信息，管理人员可以以此为依据制定相应设备维护计划，提高管理工作效率，节省人力资源成本。

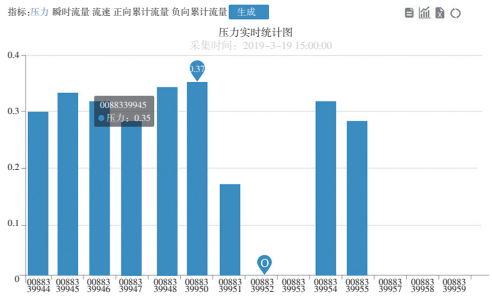


图2　监测节点压力数据查询

2.3　路径巡检

如图3所示，在地图上标出需要巡检的点和路径，智能系统可计算最优巡检路径，同时在最优路径上显示终端位置，进一步巡检人员可以基于LPA算法得到的路径进行精准导航与故障排查，提升巡检效率。



图3　路径巡检示意图

3　结　语

为解决耕地供水管网漏损率偏高、巡检效率低下的问题，对漏水或爆管等现象迅速察觉并及时处理，研发了一套基于北斗时空的智能供水管理系统，系统具备以下功能：①信息采集功能，以中国完全自主研发的北斗卫星导航系统授时服务为基础，利用北斗授时终端、流量计以及压力传感器等，完成监测节点的时间同步与参数采集；②监控管理功能，以实时参数监控为基础，实现供水管网监测节点巡检预警，并采用人工智能算法制定最优巡检路径；③管网巡检功能，利用北斗高精度位置服务，实现巡检路径的精准导航。通过某市供水管网为应用范例，验证了系统的功能，表明了系统具有良好的适用性，在日常维护过程中可以为管理人员及工作人员提供统一的监控信息显示平台；同时，状态预警及智能路径规划的应用有效保证了巡检决策的科学性，提高了供水管网巡检的效率。

参考文献

[1]　曹徐齐,阮辰皎. 全球主要城市供水管网漏损率调研结果汇编[J]. 净水技术,2017,36(4):6-14

[2]　唐晓霏,张士柱,孙小超,等. 基于北斗的高精度位置服务平台技术研究[J]. 地理空间信息,2023,21(4):75-77

[3]　中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统公开服务性能规范(3.0版): BDS-OS-PS-3.0[S].

[4]　盛东方,陈继平,周宇,等.城市供水管网信息化管理体系的构建及应用[J]. 给水排水,2021,47(1):96-102

[5]　阮久丽. 供水管网状态评估与风险预警浅析[J]. 净水技术,2020,39(增刊):107-110

[6]　张超. 无线传感器网络时间同步技术进展[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2019,36(6):88-94

[7]　刘闰豪. 基于物联网的供水管网监测系统的研究与设计[D]. 合肥:安徽建筑大学,2020:30-37

[8]　周文,潘良波,李倩楠,等. 供水管网安全运行智能化管理技术体系研究及应用[J]. 净水技术,2021,40(12):51-57

[9]　林韩熙,向丹,欧阳剑,等. 移动机器人路径规划算法的研究综述[J]. 计算机工程与应用,2021,57(18):38-48

[10]　乔慧芬. 机器人路径规划算法研究[D]. 太原:中北大学,2015

[11]　鲍帆,姜长生. 基于LPA＊算法的无人机三维航迹快速规划研究[J]. 电光与控制,2008,15(12):10-13

[12]　王涛,莱东健,周旺辉. 北斗地基增强系统框架下流动站定位精度分析[J]. 全球定位系统,2019,44(1):89-93