

引文格式: 王照远, 高井祥, 李增科, 等. 一种融合 WiFi/地磁/PDR 的室内定位方法[J]. 测绘通报, 2020(6): 17-21. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2020.0173.

一种融合 WiFi/地磁/PDR 的室内定位方法

王照远^{1,2}, 高井祥^{1,2}, 李增科^{1,2}, 常梦阳^{1,2}

(1. 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学江苏省
资源环境信息工程重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 提出了一种改进的粒子滤波方法, 利用室内常见的 WiFi 信号、地磁源并结合智能手机廉价传感器进行室内定位。WiFi 室内定位错误匹配情况较少, 地磁指纹室内定位具有较强的抗干扰能力, 本文利用两者的优点并结合 PDR 提供连续的位置信息。与传统的粒子滤波相比, 采用 MD-DTW(多维动态时间规整算法)对粒子定权并提出分段粒子定权的方法对粒子序列长度进行约束, 能有效加快粒子滤波收敛速度。仿真试验表明利用改进的粒子滤波进行定位结果可达 1 m, 有较强的实用性。

关键词: 室内定位; 粒子滤波; 地磁; PDR; WiFi

中图分类号: P228

文献标识码: A

文章编号: 0494-0911(2020)06-0017-05

An indoor localization method combining WiFi, geomagnetism and PDR

WANG Zhaoyuan^{1,2}, GAO Jingxiang^{1,2}, LI Zengke^{1,2}, CHANG Mengyang^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Jiangsu
Key Laboratory of Resources and Environment Information Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: This paper proposes an improved particle filtering method that uses indoor WiFi signals, geomagnetic sources, and cheap smartphone sensors to perform indoor localization. WiFi indoor localization has fewer mismatches and geomagnetic fingerprint indoor localization has strong anti-interference ability, this paper uses the advantages of both and combines PDR to provide continuous location information. Compared with traditional particle filtering, MD-DTW (multi-dimensional dynamic time warping) is used to determine the weight of particles, and a segmented particle weighting method is proposed to constrain the length of the particle sequence, which can effectively accelerate the convergence speed of particle filtering. Simulation experiments show that the improved particle filter can achieve a positioning result of 1 m, which has strong practicability.

Key words: indoor localization; particle filtering; geomagnetism; PDR; WiFi

目前,虽然主流的全球卫星导航系统已经被大规模商业应用,在室外开阔环境下定位精度可以解决大部分定位需求,但该类信号无法覆盖室内,从而难以形成定位^[1]。

为了提供室内的位置服务,用于室内环境的无线定位技术已被广泛的研究,包括伪卫星、蓝牙、红外线、UWB 等。这些定位技术能够提供长时间的定位精度,但是需要布设专门的信号发射和接收装置,因此成本问题限制了无线定位技术在大范围区域内的应用^[2]。局域网定位技术中,基于 802.11 的 WiFi 室内定位技术研究较多。限制 WiFi 指纹定位得到大范围使用的主要原因是高效的指纹库建立方法和指纹库更新方法。地磁室内定位技术因为其不需要任何额外的信号发射装置并且较长时间内可以保持

稳定的优势^[3],成为最近研究的热点。

随着微机电系统的发展,传感器成本更加低廉,集成到智能手机上的传感器有加速度计、陀螺仪、磁强计等。目前这些传感器主要用于行人航迹推算(PDR),但由于 PDR 只能提供相对位置,因此需要与 WiFi 或者地磁等绝对定位融合才能有效抑制系统误差的传播^[4]。文献[5]利用 WiFi 与 PDR 定位结果约束地磁匹配范围,并采用扩展卡尔曼滤波(EKF)融合两者定位结果,定位精度在 3 m 左右。

当定位区域范围较大时,地磁测量值或 WiFi 测量值在指纹库中会对应着多个位置,从而会引起较大的定位误差。许多研究人员利用粒子滤波来解决这一问题,以提高定位的精度。文献[6]提出了利用粒子滤波融合 PDR 和地磁的室内定位方法,实现

收稿日期: 2019-10-21; 修回日期: 2019-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(41674008; 41874006)

作者简介: 王照远(1995-)男,硕士,研究方向为室内定位。E-mail: cumtzzy1995@163.com

通信作者: 高井祥。E-mail: jxgao@cumt.edu.cn

Copyright © 2020 China Academic Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

了 2 m 左右的定位精度。

本文基于智能手机平台收集 WiFi 无线信号、地磁值及 PDR 相关数据,利用 Matlab 软件构建基准图,并测试改进的粒子滤波算法的定位效果。

1 指纹图构建

传统的指纹库构建方式是首先建立自定义坐标系,然后根据定位区域范围的大小,选择合适密度的参考点,在每个参考点上收集 RSS、地磁值^[7]。这种单点的指纹库构建方式虽然精确,但花费的时间成本与人力成本比较高,因此在定位区域较大时,单点采集的方式是不实用的。

本文采用连续采集的方式构建指纹库。假设起始坐标为 pos_1 ,时间戳为 t_1 ;终点坐标为 pos_2 ,时间戳为 t_2 。在起始坐标和终点坐标之间匀速采集数据,则在 t_i 时刻对应的位置为

$$\text{pos}_i = \text{pos}_1 + (\text{pos}_2 - \text{pos}_1) \times \frac{t_i - t_1}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

从式(1)可以看出,传感器采集的每个 RSS 与地磁值都对应对应着坐标值。

智能手机上磁强计三轴测量值为 (m_x, m_y, m_z) ,地磁室内定位最常用的测量值为地磁模值,即

$$m = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2} \quad (2)$$

由于地磁模值是常量,定位阶段会出现一个地磁值对应着多个参考点,因此定位误差较大^[8]。

本文采用文献[9]提出的方法,提取地磁模值的垂直分量和水平分量作为观测值构建 HV 指纹。

垂直地磁分量表示为

$$m_v = -\sin \theta \cdot m_x + \sin \varphi \cos \theta \cdot m_y + \cos \varphi \cos \theta \cdot m_z \quad (3)$$

水平地磁分量表示为

$$m_H = \sqrt{m^2 - m_v^2} \quad (4)$$

式中 θ 、 φ 分别为俯仰角、滚转角,可以根据加速度计的测量值得到。

HV 指纹与地磁模值指纹相比,唯一性更高,可以加速粒子滤波的收敛,但是它容易受到手机姿态的影响,在转弯处可能会定位失败;而地磁模值指纹与手机方向无关。因此本文采用融合指纹 $m_{\text{Hybrid}} = (m, m_v, m_H)$ 作为观测值。

2 行人航迹推算

通常认为行人在短时间内做直线运动,因此若已知起始位置、步长、航向角就可以推出下一时刻的位置。

假设初始坐标为 (x_0, y_0) ,下一时刻坐标为 (x_1, y_1) ,步长为 s_{01} ,航向角为 θ ,则

$$\begin{cases} x_1 = x_0 + s_{01} \cos \theta \\ y_1 = y_0 + s_{01} \sin \theta \end{cases} \quad (5)$$

行人航迹推算(PDR)关键步骤包括步点检测、步长估计、航向估计。

2.1 步点检测

常用的波峰检测计步算法是基于人在行走时加速度出现周期性的正弦波,利用设定的阈值判断是否为波峰波谷,如果连续检测到一个波峰和一个波谷即记为一步。但手机传感器的硬件设备精度不高并且人运动具有多样性,因此造成的伪波峰和伪波谷会导致计步错误^[10]。

本文提出一种利用磁强计来辅助加速度计的动态阈值步点检测方法,通过对加速度进行以下约束实现准确步点检测的目的。

(1) 规定加速度曲线的连续上升次数,并且波峰波谷的差值需要大于设置阈值,由于用户运动的多样性,波峰波谷的阈值需要动态设置。

(2) 利用局部室内地磁场的差异特性来辅助步点检测。当用户从 t_0 时刻开始行走时,开始收集地磁数据, t_i 时刻采集当前地磁数据 m_i ,然后利用 DTW^[11](动态时间规整算法)计算 $m_{t_0:t_i}$ 与 $m_{t_0:t_{i-1}}$ 之间序列距离 d ,若 $d < T_{\text{阈值}}$,则认为用户处于静止状态。

从表 1 可以看出本文提出的算法很大程度上降低了手机位置及行人运动状态对计步结果的影响。

表 1 步点检测试验结果

手机位置	运动状态	真实步数	波峰检测法	本文算法
口袋	正常行走	100	110	97
手中	正常行走	100	96	99
手中	使用手机	100	108	102
位置变化	空闲	0	10	0

2.2 步长估计

本文采用文献[12]所述的步频模型作为通用的计步模型,即

$$l = a \cdot f + b \quad (6)$$

式中, f 为行人步频; a 、 b 为模型系数。

估计步频模型的系数时,在室外利用 GPS 测量值估计步长,试验人员在正常行走的过程中,同时测量步行频率。通过采集大量的数据分析步长与步频的关系,同时计算模型的系数 a 、 b 。

2.3 航向估计

采用文献[13]提出的 Madgwick 算法,基于梯

度下降法,融合加速度计、陀螺仪、磁强计数据进行姿态估计。在实际的计算过程中,还需要对磁场干扰和陀螺仪进行补偿,并结合地图约束信息。

3 改进的粒子滤波算法

在动态系统的分析中,粒子滤波器需要两个模型:一个用来描述状态随时间的变化(系统模型),另一个用来描述每个状态下观测到的杂讯(观测模型)。

行人每运动一步,粒子通过 PDR 更新状态

$$\begin{bmatrix} x_i^{t+1} \\ y_i^{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i^t \\ y_i^t \end{bmatrix} + l_i \times \begin{bmatrix} \cos(\theta_i^t) \\ \sin(\theta_i^t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 (x_i^t, y_i^t) 、 (x_i^{t+1}, y_i^{t+1}) 分别为第 i 次迭代,第 t 时刻和第 $t+1$ 时刻的粒子状态; l_i 、 θ_i^t 分别为步长和航向角。

观测模型在状态 s 时的观测值 m 的概率密度函数可以利用高斯分布近似表示为^[14]

$$P(m|s) = \frac{1}{2\pi^{n/2} R^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2} [m-f(s)]^T R^{-1} [m-f(s)]\right\} \quad (8)$$

式中 n 为 m 的维度; R 为传感器测量方差; $f(s)$ 为根据状态 s 从地磁指纹库获取的地磁值。利用 WiFi 定位结果确定的粒子范围和 NN(临近算法)可以快速找到状态 s 对应的地磁值。

传统的粒子滤波利用 $\omega_i^{t+1} = P(m^{t+1}|s_i^{t+1})$ 对粒子进行定权。本文采用序列粒子定权方法 $\omega_i^{t+1} = P(m^{1:t+1}|s_i^{1:t+1})$,通过增加地磁测量值的长度减少误匹配,从而提高粒子滤波器的收敛速率。

对不同长度的一维时间序列进行匹配时常用 DTW 算法,但本文的融合指纹为多维时间序列,因此采用 MD-DTW 算法进行序列匹配^[15]。随着粒子序列长度的增加,计算量增大,因此本文提出分段更新粒子权重的方法来提高粒子滤波器的收敛速度。即假设步长缓冲序列长度为 L ,当计数器检测到已经走了 L 步后,对于粒子序列和测量序列,将最新一步的地磁值入列,序列的第一步地磁值出列,以保证步长序列的长度为 L 。

改进的粒子滤波定位过程如图 1 所示,利用手机上的加速度计、陀螺仪、磁强计并结合地图信息估计步长和航向角,并构建 WiFi 与地磁指纹库。在初始位置以 WiFi 定位结果 $(x_{\text{WiFi}}, y_{\text{WiFi}})$ 为圆心, σ_{WiFi} 为半径采样初始粒子,粒子状态更新由 PDR 完成。本文采用序列粒子定权代替重采样,最后粒子加权平均得到定位结果。

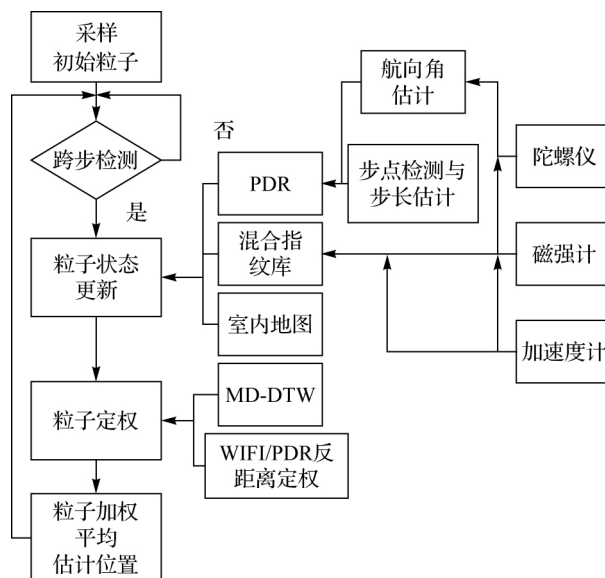


图 1 改进的粒子滤波定位过程

4 试验与结果

试验选择在中国矿业大学环境与测绘学院 4 楼进行,楼层平面图如图 2 所示。其中横向走廊长度为 46.8 m,纵向走廊为 10 m,走廊宽度为 2.4 m。定位试验之前,利用快速采集的方法构建指纹库,并采用克里金插值进行数据内插,插值分辨率为 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ 。克里金插值结果如图 3 所示,从上到下分别为地磁模值指纹、地磁垂直分量、地磁水平分量。

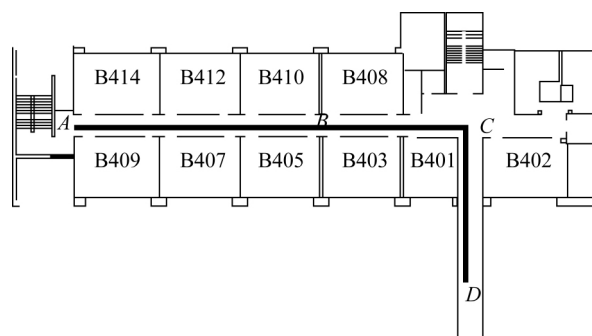


图 2 试验区域平面图

定位试验中,为了验证本文提出的混合地磁指纹的稳健性,试验人员手持手机,从图 2 中 B 点行走 30 步到达拐角 C 点,继续行走 18 步到达 D 点,并采集测量数据。不同类型地磁指纹定位误差如图 4 所示。由于 HV 指纹维度比地磁模值指纹高,因此 HV 指纹收敛得更快;但是 HV 指纹与手机的姿态有关,不如地磁模值指纹稳定,在粒子滤波收敛之后 HV 指纹的精度比地磁模值指纹低,并且在转弯处 HV 指纹的定位误差明显变大。相比之下,地

磁融合指纹稳健性较高,不仅收敛得较快,而且在转弯处的定位精度也比较高。

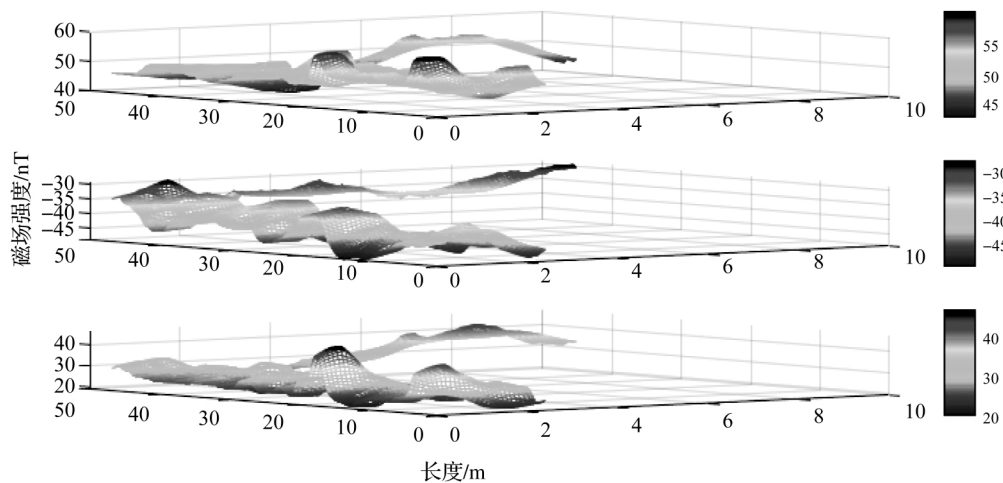


图3 克里金插值结果

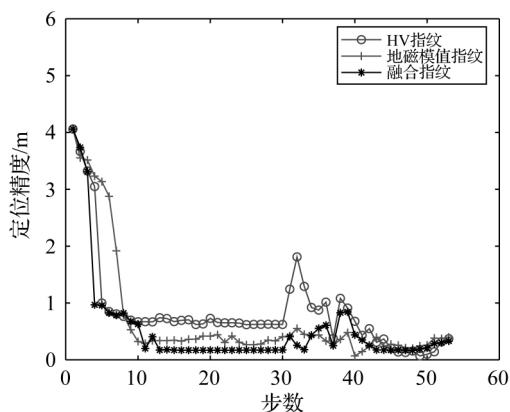


图4 粒子滤波定位误差

3种不同类型指纹的误差累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)如图5所示,从中可以看出,利用融合指纹进行粒子滤波效果最好,最快收敛到100%,1.5 m以内的定位误差达到96%,达到实际定位的需求。

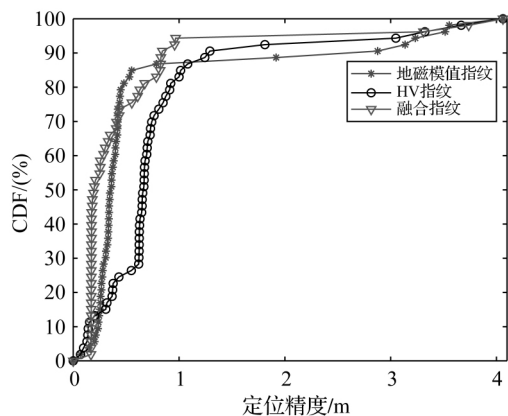


图5 误差累积分布函数

PDR定位精度随着时间的推移由于误差累积而变差。为了测试本文提出的粒子滤波较长时间连续定位的效果,试验人员手持手机,以图2中A点为起点,行走111步到达C点,转弯之后到达D点,定位轨迹图如图6所示。PDR尽管以真实值为起点,整体轨迹仍发生了较大偏移;而粒子滤波在定位开始时由于粒子未收敛,定位精度较差,但随着粒子序列的增长,逐渐收敛到真实轨迹附近,因此可以进一步说明粒子滤波的连续定位效果较好。

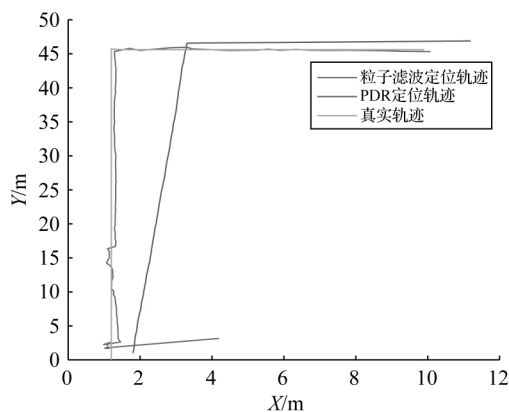


图6 定位轨迹图

5 结 语

本文提出了一种改进的粒子滤波算法,该算法利用序列粒子定权的方法,有效改善了传统粒子滤波时粒子退化问题,然后进一步提出分段更新粒子权重的方法来减小计算量,以加快粒子收敛速度。

试验表明,改进的粒子滤波算法在室内走廊环境中,定位精度可达1 m,因此有较强的实用价值。

参考文献:

- [1] 陈锐志,陈亮.基于智能手机的室内定位技术的发展现状和挑战[J].测绘学报,2017,46(10):1316-1326.
- [2] KUANG J, NIU X J, ZHANG P, et al. Indoor positioning based on pedestrian dead reckoning and magnetic field matching for smartphones[J]. Sensors, 2018, 18(12): 4142-4163.
- [3] LI B H, GALLAGHER T, DEMPSTER A G, et al. How feasible is the use of magnetic field alone for indoor positioning? [C] // Proceedings of 2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Sydney: IEEE, 2012.
- [4] GUSENBAUER D, ISERT C, KRÖSCHE J. Self-contained indoor positioning on off-the-shelf mobile devices [C] // Proceedings of 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Zurich: IEEE, 2010.
- [5] LI Y, ZHUANG Y, ZHANG P, et al. An improved inertial/wifi/magnetic fusion structure for indoor navigation [J]. Information Fusion, 2017, 34: 101-119.
- [6] 李思民,蔡成林,王亚娜,等.基于地磁指纹和 PDR 融合的手机室内定位系统[J].传感技术学报,2018,31(1):36-42.
- [7] CHENG J T, YANG L, LI Y, et al. Seamless outdoor/indoor navigation with WIFI/GPS aided low cost Inertial Navigation System[J]. Physical Communication, 2014, 13: 31-43.
- [8] XIE H W, GU T, TAO X P, et al. MaLoc: a practical magnetic fingerprinting approach to indoor localization using smartphones [C] // Proceedings of 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing. Seattle: ACM, 2014.
- [9] LI Y, ZHUANG Y, LAN H Y, et al. WiFi-aided magnetic matching for indoor navigation with consumer portable devices [J]. Micromachines, 2015, 6(6): 747-764.
- [10] 陈国良,张言哲,杨洲.一种基于手机传感器自相关分析的计步器实现方法[J].中国惯性技术学报,2014,22(6):794-798.
- [11] 周家鹏,汪云甲,李昕,等.地磁室内定位技术研究[J].测绘通报,2019(1):18-22.
- [12] LI F, ZHAO C S, DING G Z, et al. A reliable and accurate indoor localization method using phone inertial sensors [C] // Proceedings of 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing. New York: ACM, 2012.
- [13] MADGWICK S O H, HARRISON A J L, VAIDYANATHAN R. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm [C] // Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics. Zurich: IEEE, 2011.
- [14] BILKE A, SIECK J. Using the magnetic field for indoor localisation on a mobile phone [M]. Berlin: Springer, 2013.
- [15] LI Y, ZHUANG Y, LAN H Y, et al. Self-contained indoor pedestrian navigation using smartphone sensors and magnetic features [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(19): 7173-7182.

(责任编辑:郭新新)

守护城市地下“生命线” 助力城市发展

【本刊讯】当前,全国各地正在坚定不移地开展城市防涝和黑臭水体治理工作。精准治污、科学治污、依法治污,加强排水防涝管理是全国当前开展的重点工作。建立智慧排水综合管控平台是实现智慧排水防涝管理的基础,同时也是实现生态环境保护和智慧城市建设的重要组成部分。

广东绘宇智能勘测科技有限公司(以下简称广东绘宇)秉持智慧先行的排水管理理念,采取治污治涝一河一策,通过控源截污、清淤清障、管网修复、水岸同治等技术手段,实现城市海绵、碧水长流的治水管水目标。

基于“物联感知、信息共享、科学决策、精细管理”的设计理念,以物联网、大数据、GIS、移动互联网技术为基础,广东绘宇研发形成了集排水设施安全运行监管、水力模型分析、智能化运维管理、排水设施普查、排水管网检测、清淤、修复于一体的智慧排水综合管控平台和管理体系,全面支撑城镇排水与防涝的设施普查、规划建设、业务审批、养护管理、在线监控、应急调度、水力分析的全生命周期管理。目前,该服务平台已在广东惠州市、贵州贵阳经开区、云南昆明市等地得到应用及运营,效果显著。

以地理信息技术实现排水设施的可视化管理,以物联网技术实现排水设施运行状态实时监测,以移动互联网技术实现排水设施养护的移动巡查管理,真正意义上实现了城市排水管理的规范化、精细化、智慧化,为提高城市基础设施智能化水平、加快城市智慧化进程、促进社会经济的发展作出了重要贡献。