

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.06.008

# 智慧水务背景下德国排水系统研究进展

乔永祥<sup>1</sup>, 江源<sup>2</sup>

(1. 德国 IKT 地下空间研究院, 德国; 2. 德国柏林水务, 德国)

**摘要:** 德国的排水系统历史悠久,在防洪、排水系统修复方面处于世界领先水平。为了对排水系统不断优化,减少因强降雨天气形成的洪涝灾害,截至2020年德国水、污水和废弃物协会(DWA)对德国的排水系统进行了8次调查,调查内容涉及分流制和合流制排水系统、管龄、管道材料、排水管网监测评价机制、管道安全级别评估、管网修复趋势、管网修复关键技术、管网损害根源和雨水池等情况。详细介绍了德国DWA于2018年进行的第8次排水系统调查结果,以期通过对德国排水系统研究进展的了解,为中国排水系统的优化提供参考。

**关键词:** 排水系统; 分流制; 合流制; 管网修复; 管网监测; 雨水池

**中图分类号:** TU992.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)06-0039-07

## Research Progress of German Drainage System in the Context of Smart Water

QIAO Yong-xiang<sup>1</sup>, JIANG Yuan<sup>2</sup>

(1. IKT - Institute for Underground Infrastructure, Germany; 2. Berliner Wasserbetriebe, Germany)

**Abstract:** Germany has a long history of drainage system and is at the world's leading level in flood control and drainage system repair. In order to continuously optimize the drainage system and reduce flooding caused by heavy rainfall, the German Association for Water, Wastewater and Waste (DWA) has conducted 8 surveys on the drainage status in Germany until 2020. The content of the investigation involves the diversion system and the combined system, pipe age, pipe materials, drainage pipe network monitoring and evaluation mechanism, pipe safety level assessment, pipe network repair trends, key technologies for pipe network repair, root causes of pipe network damage and rainwater ponds. This paper provides a detailed introduction to the 8th drainage system survey conducted by DWA in Germany in 2018, aiming to provide reference for the optimization of China's drainage system by understanding the research progress on drainage systems in Germany.

**Key words:** drainage system; diversion system; combined system; pipeline network repair; pipe network monitoring; rainwater pond

德国水、污水、废弃物协会(DWA)自1984年起对德国排水状况进行了8次调查和统计,旨在为后续排水系统的统筹规划和优化管理提供依据,以确保排水系统以最经济、安全、高效的方式进行维护和运行。DWA的第8次调查于2018年进行,调查了423座城镇的排水系统,涉及人口占总人口的

34.7%,管道长度约126 161 km,调查结果充分揭示了德国排水系统的发展趋势和存在的问题<sup>[1]</sup>。因此,以此次调查结果为主展开分析,以期为中国排水系统的优化提供参考。

文中部分数据来自于德国国家统计局2016年的统计结果。

## 1 德国排水管道长度调查结果

目前,德国国土面积为357 600 km<sup>2</sup>,截至2016年德国人口为8 235万人,公共排水管网总长为594 334 km,人均公共管道长度约7.2 m<sup>[2]</sup>。2016年德国合流制管道总长246 699 km,污水管道总长214 280 km,雨水管道总长133 355 km,其中德国污水纳管率总体为97.1%。参与调研的排水管网及德国所有管网按城市人口量划分五个城市等级:一级(<1万人),二级(1~5万人),三级(5~10万人),四级(10~25万人),五级(>25万人),其中四级和五级城市为大城市。

此次调查中德国不同年份的管网长度情况<sup>[1]</sup>如图1所示。1995年—2016年德国排水管道总长度增长约195 132 km,平均每年增长约9 200 km。其中合流管增加33 208 km,污水管增加104 908 km,雨水管增加57 016 km。1995年—2016年德国分流制管道占比由49%增长至59%,并呈持续增加趋势。因近年来合流制管道问题凸显,新建管道倾向采用分流制。1995年—2016年随着人口的增加和城市的发展,对下水道的需求相应增大,各城市依据《德国城市综合排水系统指导方针》和《德国建筑物外排水系统 下水道管理》,结合管网模拟软件如SWMM进行管网运行测试,以减少因管网超负荷运行而造成的内涝现象发生。此外,建设分流制排水系统,不但能对雨水进行再利用,达到水资源的良性循环,还在一定程度上减少了合流管道的排水压力。

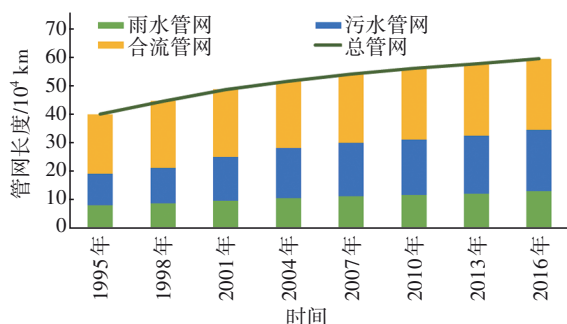


图1 德国排水管道发展趋势

Fig.1 Trends of drainage pipelines in Germany

德国不同规模城市的排水管网长度情况<sup>[2]</sup>见图2。可知,五级城市所铺设的排水管道约占德国排水管道总长度的9.1%,而实际参与调查的数据中五级城市管道长度占比约81.2%。因此,参与调查

占比较高的五级城市排水管道对此次调查结果产生了一定影响<sup>[1]</sup>。

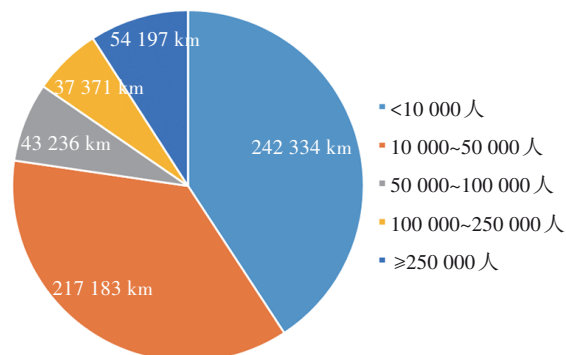


图2 德国不同规模城市的排水管网长度情况

Fig.2 Length of drainage pipeline network in different scale cities in Germany

## 2 管龄分布情况

表1展示了德国排水管网管龄大致分布情况。德国排水管网管龄平均为36.9年,而参与调查的管网平均管龄为45.3年,其中一、二、三级小城市排水管网趋于“年轻化”<sup>[1]</sup>。调研发现,在德国诸多城市中100多年前管道的档案和规划图纸仍然保存完好,是管网修复的重要参考资料。100多年前的管道多采用砖砌墙材料,上宽下窄,至今运行良好,无需修复。

表1 德国排水管网管龄统计结果

Tab.1 Statistical results of pipe age of drainage pipeline network in Germany

管龄/a	0~25	26~50	51~75	76~100	>100	未知
占全国的比例/%	32	34	15	3	2	14
占调查数据的比例/%	27	31	18	7	8	9

## 3 管材分布情况

管材统计结果(见图3)表明,德国排水管网管材以陶土管和混凝土管为主,近年来HDPE等管材在管径较小的管道中应用较多;一、二、三级小城市塑料管材所占比例均高于四、五级城市,一级城市采用塑料管材的比例最高,约为22.6%。原因可能在于一级城市排水管道趋于“年轻化”,且在过去几十年城市人口较少,人口密集程度相对较低,排水管径相对较小。

德国在新建小管径(内径<500 mm)的管道管材选择上,主要采用HDPE(高密度聚乙烯)管道。这种选择有其合理性:首先,HDPE管材具有耐磨性,

能够抵御外界因素的侵蚀,保障管道的长期使用;其次,HDPE管道的建造和安装不受极端天气影响,且具备较高的机械化程度和操作性,提高了施工效率;此外,在管道的接口处,HDPE管道相较于水泥管道具有更高的严密性,能够在一定程度上防止树根侵入管道,降低管道堵塞的风险<sup>[3]</sup>。

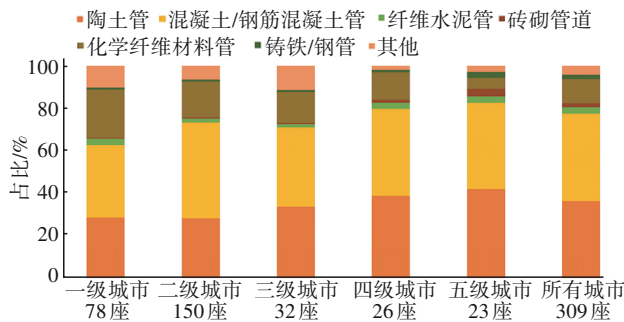


图3 德国排水管道材料情况

Fig.3 Status of drainage pipeline materials in Germany

#### 4 管网监测评价机制

德国《水平衡管理法》第61条“管网监测法规”要求,排水装置使用者依法对其设备进行定期监测和检修。根据“管网监测法规”,城市内所有管道每年都需要业主进行监测,监测方法可由业主进行选择,如对检查井的堵塞排查,可初步了解管道的堵塞情况。与此同时,业主也可结合所在城市的实际情况,按照需要每两年对管网进行一次冲刷;每15年对整个管网完成一次CCTV检测分析并由注册管网修复工程师进行评估和决策。因此,德国的管网通常不存在大幅度淤积问题。此外,德国大部分采用分流制排水系统,且路面相对清洁,进水算堵塞现象不明显,因强降雨天气进入下水道的雨水所含泥沙量不足以造成淤塞。

德国排水管道缺陷评估机制通常按以下几种标准规范进行:ATV—M 143—2 (1999年版本);DIN EN 13508—2 (2003年版本)结合DWA—M 149—2 (2006年版本);DIN EN 13508—2 (2011年版本)结合DWA—M 149—2 (2013年版本);ISYBAU (1991/1996年版本)和ISYBAU (2001年版本)等。德国最早根据ATV—M 143—2 (1999年版本)规范对管道缺陷进行描述,该规范使用损害名称的首字母进行缩写。然而,随着研究的深入,发现这种方法存在诸多问题,如管道缺陷种类繁多,单一缩写无法满足需求,或者多种缺陷共享相同的缩写等。因此,随后推出了多种更加完善的管道缺陷描述规范,以

应对这些问题。目前,大部分城市主要使用第二、三种规范对管道缺陷进行描述,并通过累积得分估算管网损坏状况,同时进行评估、预测和评级。

德国约1/3的管网由排水部门自行评估,而2/3的管网则外包给注册管网修复工程师的公司。如果采用不恰当的修复方案,可能导致公司较大的经济损失。

#### 5 管网损害情况

此次调查中管网损坏涉及三方面:排水管道结构性损坏、功能性损坏和检查井损坏情况,调查结果见图4。由图4可知,排水管道结构损坏包括管体裂缝、表层损坏、接口损坏、接头不密封、形变、土壤空洞及维修不专业等,其中管体裂缝、接头不密封、接口损坏和腐蚀(表层损坏)占比较高。管体裂缝危害比较严重,如不及时处理将导致管体破裂或塌陷。

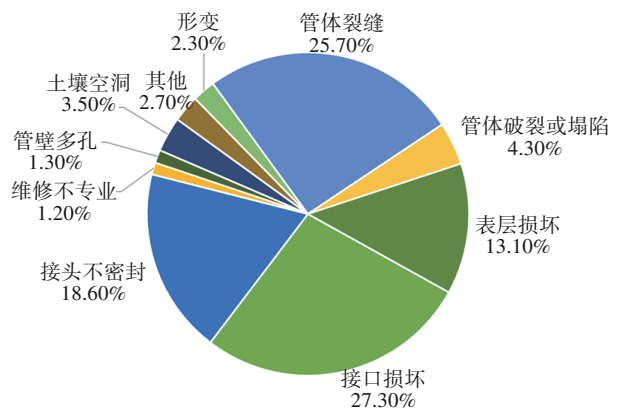


图4 排水管道结构性损坏情况

Fig.4 Status of structural damage of drainage pipeline

排水管道功能性损坏主要体现在植物根部生长、地下水内渗和管道堵塞等方面(见图5),其中植物根部“长进”管道的约占1/3,因此在今后管网规划中应尽量将管网铺设在离树木较远的位置,并采用密实材料保护管道。

图6则展示了德国管网常见损坏情况。由于管道的各种缺陷如漏水、破裂或堵塞等,使得污水处理厂接收到的水源中含有大量无法确定来源的水,对德国雷根斯堡市的调查表明,污水厂进水中的不明水占比约为19%~40%<sup>[4]</sup>。排水管网“带病”运行,一方面使管道内污水通过损坏的管网污染土壤和地下水;另一方面地下水进入下水道,不仅浪费水资源,还增大了污水处理厂的处理量。

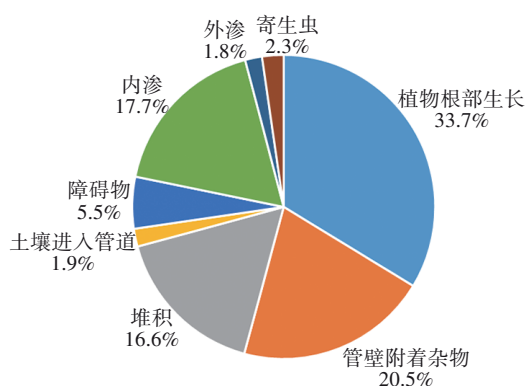


图5 管道功能性损坏情况

Fig.5 Status of pipeline functional damage

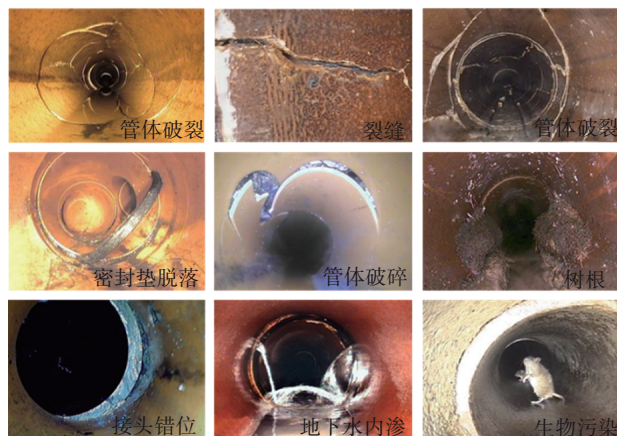


图6 德国排水管道常见损坏情况

Fig.6 Common damages to drainage pipeline in Germany

此次调查表明,部分检查井也存在严重的损坏情况,如图7所示。

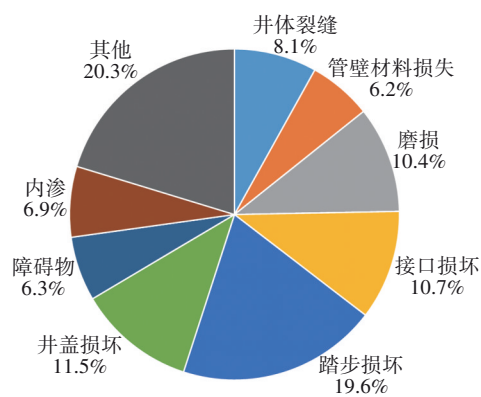


图7 检查井损坏情况

Fig.7 Status of inspection well damage

德国排水检查井通常位于污水管道系统中的关键位置,用于检查、清理和维修污水管道。在污水管道系统中,检查井被设计为一个具有井盖的开口,可使工作人员入内进行检查和维修。这种设计

有助于确保污水管道系统的顺畅运行,同时也方便管道系统的维护和管理。德国检查井常见损坏情况有井体裂缝、腐蚀、接口损坏和踏步损坏等,其中踏步损坏占比约20%,由此会部分引发地下水内渗<sup>[1]</sup>。据统计,约16%的踏步无法提供稳定的支撑力<sup>[5]</sup>。因此在安装踏步后,需持续对踏步进行安全性检测。

## 6 排水管网修复评级情况

管网评级的目的是使排水部门掌握其管网运营状态,进而制定未来管网修复方案,如人力结构和财政预算。尽管德国各排水部门对管网修复不断加大投入,但中短期需进行修复的管网比例仍在增加。DWA—M 149—3对排水管道缺陷的严重程度进行了分类和评级,具体见表2。

表2 管道缺陷等级及严重程度情况

Tab.2 Class and severity of pipeline defects

缺陷等级	严重程度情况
0级	非常严重,须立即修复
1级	严重,须立即修复
2级	比较严重,须尽快修复
3级	严重程度一般,不必立刻修复
4级	轻微,可以但不必修复
5级	无损,无需修复

德国排水管网评估等级情况见图8。

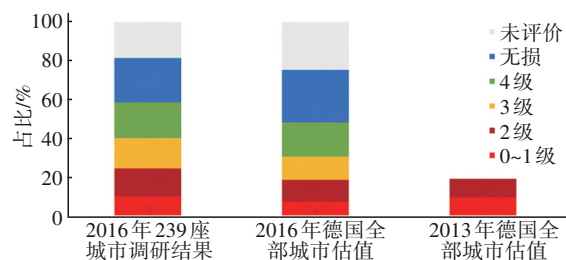


图8 德国排水管网评估等级情况

Fig.8 Drainage pipeline network assessment rating situation in Germany

根据第8次排水管网调查,239座城市中0~2级的排水管网占比约为24.7%。据此初步推测,2016年德国全部城市中处于0~2级的排水管网比例约为18.7%。与此同时,2013年的调查显示,德国全部城市中0~2级的排水管网比例约为19.4%。2013年—2016年,0~2级排水管网的比例仅从19.4%下降到约18.7%。这种下降缓慢的原因主要是所有城市都一直在积极修复存在缺陷的管道。然而,由于管龄增加,管网损坏速度不断加快,因

此,越来越多的排水部门表示将增大管网修复投入。

## 7 管网修复技术

排水管网修复的目的是对潜在问题管网及时修复,防止土壤塌陷等重大事故发生;保证管道良好的水力条件,减缓因强降雨天气内涝的产生。此外,尽早发现问题管网并修复,是最高效经济的模式。欧盟 DIN EN 752 对管道修复进行了如下建议:①在破损位置进行修复;②在旧管道基础上进行套管修复;③重新铺管。

在智慧水务背景下,污水处理厂的运营得到了优化。同时,非开挖排水管网修复技术也在不断发展,对进入污水处理厂的污水进行了提质增效。此外,随着管网修复技术的发展,不但实现了管网损坏评级的可视化管理,还达到了由机器修复管道的阶段。以管网修复机器人为例,德国机器人的研究处于较成熟阶段,已经实现了管道内行走、检测和修复一体化。不同公司的机器人功能侧重点不同,如有些机器人定点填补以修复破损管道,有些机器人则可修补支管与干管交叉部分等<sup>[6]</sup>。

根据“管网监测法规”要求,业主需对排水管道进行及时检测及修复。德国排水管网修复技术应用情况<sup>[1]</sup>见图9。

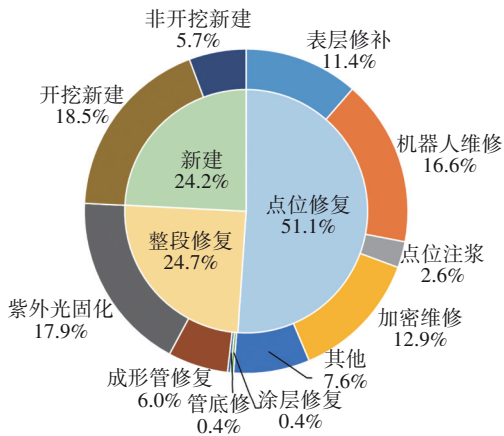


图9 德国排水管网修复技术应用情况

Fig.9 Application of different rehabilitation technologies of drainage pipeline network in Germany

2014年—2018年德国所修复的排水管道中约1/4采用了新建方式;1/4采用整段修复方式,如紫外光固化修复;1/2采用了点位修复方式,如短管内衬。

德国近20年来排水管网新建比例从53%下降到24.2%,并将继续下降。整段修复比例从17.0%

缓慢增加至24.7%,并将进一步增加。而得到显著发展的是成本最低的点位修复技术,增加了2倍多。德国排水管网修复应用趋势如图10所示。

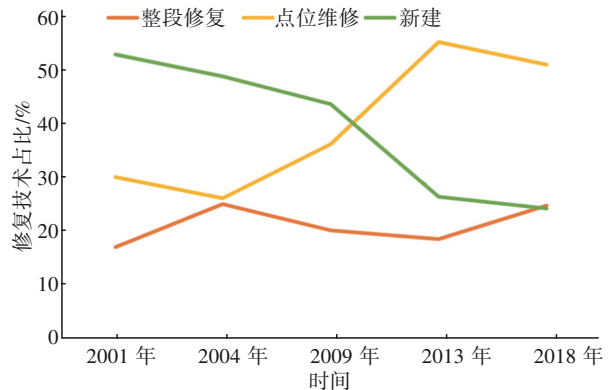


图10 德国不同类型排水管网修复技术的应用趋势

Fig.10 Trends in the application of different types of drainage pipeline network rehabilitation in Germany

## 8 私有排水系统情况

德国 DIN 1986—30 标准针对各地新铺设的居民私有排水管提出了具体要求:居民需在30年内提供其管道严密性检测证明;从第30年起,此证明需每20年提供一次。管道严密性检测按照 DIN EN 1610、DIN 1986—30 及 ATV—M 143—6 标准进行,并由管网修复公司进行测试和出具证明。据了解,这些公司未来将会被要求通过资质考核后才可为私人出具管道严密性证明。因为管道漏水一方面会污染地下水、土壤以及改变支撑下水管的土力结构,逐步造成空穴和路面坍塌;另一方面泥沙渗入管道,会造成市政排水管网淤塞,排水能力大幅下降,导致在强降雨天气出现溢流和内涝现象。调查显示,私有排水系统仅有1/3状态良好,剩余2/3均存在问题,其中合流制系统的问题管网占比最大<sup>[1]</sup>。

## 9 雨水池情况

自20世纪90年代以来,德国除了加强分流制系统的建设外,还加强了雨水池的建设,以减少强降雨天气尤其是合流制系统过载情况造成的水体污染。通过分流制系统,雨水可直接排入湖泊或河流,减轻污水处理厂的负担<sup>[7-8]</sup>。截至2016年,德国拥有雨水池74 454座,总容积达 $6\,079 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,人均 $0.74 \text{ m}^3$ 。

## 10 结语

综上所述,目前中国排水系统或许可结合现状借鉴以下几点建议:

① 排水管渠检测与评估标准有待完善和修订。德国的排水管网立法及规范具有一定借鉴意义,如DIN EN 1610、DIN 1986—30、DWA各项规范等,还可参考德国《水平衡管理法》第61条“德国管网监测法规”,逐步要求排水装置使用者定期对其设备进行监测和检修。以此对排水管道冲洗频率、检查井检查频率、泵站设备检修频率、修复技术规范 and 材质等加以规范。我国排水管渠检测与评估的行业标准包括:《城镇排水管渠与泵站运行、维护及安全技术规程》(CJJ 68—2016)、《城市地下管线探测技术规程》(CJJ 61—2017)、《城镇排水管道检测与评估技术规程》(CJJ 181—2012),还有待进一步完善。

② 保持道路清洁。随着城市的快速发展,排水系统以及排水设施管理发展不足。此外,城市街道若得不到及时清理,则落叶和垃圾将进一步堵塞进水管使其排水不畅。若管网冲刷检修不及时,将在一定程度上堵塞下水道,尤其在强降雨天气会加速内涝现象发生。德国的排水管网通常不存在大幅度淤塞问题,一是其路面较清洁,二是大部分区域采用分流制排水系统,强降雨天气下进入下水管的雨水径流所含泥沙量不足以造成淤塞。因此,保持道路清洁对减少排水管网堵塞具有一定意义。

③ 未来新建排水管网尽量采用分流制。由于中国城市老城区合流制改为分流制较难实施,可适当延后处理。但从德国的调查结果看,随着管网的进一步老化,合流制系统的问题日益凸显,问题管网中85%为合流制管网。而城市发展越快,合流制改为分流制成本越高。因此,后续管网建设中应结合当地地形、降雨量、排水系统运行状况、老城区构筑物以及道路等特点,尽量采用分流制排水系统。此外,分流制排水系统还可减轻污水处理厂的运行负担。

④ 对排水管网进行检测、评估分析,并及时优化和修复。排水管网和检查井可结合GIS、SWMM等模型进行数据储存,以保证全部管网迅速得到排查、监测及维修。对于问题管道,首先应查阅对应管道深度、长度、管径、建造时间、建造材料、接入口以及维修记录等信息。然后,应用CCTV技术进行可视化管理,通过对整体管网现状的评价分析,制订最优修复方案,使管网得到及时优化和修复。

在管网优化更新方面,主要目标是寻找管网全

生命周期的成本最低值。管网全生命周期总成本包括维修、修复与新修三部分。管网投入运行之后,随着管网的持续老化,破损率会越来越高,若得不到及时整治,管网年均维修成本就会越来越高;但是工程实践发现某些损坏无需过早修复,以免造成年均修复成本升高。因此,在生命周期上存在一个最低值,优化更新的目标即是寻找该值。其中的核心问题是管网破损率随管网老化的变化规律,也即管网破损预测问题。因此,管网优化更新可视为管网破损预测的自然延伸。

⑤ 建立城市管网运营平台。我国的城市管网种类主要包含燃气、热力、供水、排水、电力、通信等,而城建、电力、广电、电信等多个部门相互独立。由于各种管线下穿相互交错,各部门信息交流耗时长,导致排水管网维护开挖时,获取目标管道信息的时间和经济成本较高。因此有必要建立城市管网运营平台,使分散的各权属管网单位能够共享管网信息资料,由专职管理职能部门统一协调不同部门之间的管理维护工作,最大程度地满足各管网资源的共建共享,依据管线分布的档案资料,避免错挖和破坏其他线路。

⑥ 排水管网修复技术。排水管网修复技术多种多样,选择适用的技术取决于管道的材质、直径、深度、损坏程度和地理位置等因素。此外,在应用非开挖修复技术前,需对管道缺陷成因有清晰的认识,分析缺陷机理,从根本上消除缺陷。借鉴国内外先进的管网非开挖修复技术,如管道机器人、紫外光固化技术等,促进中国排水领域的进一步发展。

⑦ 对私有制排水管网进行监测及修复。根据调查,德国私有排水管网中仅1/3无需修复,剩余2/3皆存在管体泄漏现象。为此,通过私有排水管网进入公共管网的不明水将进一步增大,造成地下水浪费和地下水污染;进一步可能造成管网周边土壤被冲刷,导致土力结构不足以支撑道路负重,出现坍塌。因此,应制定私有排水管网相关法规,对其严密性进行定期监测。

⑧ 制定洪涝灾害应急预案,采取防范技术。洪涝灾害应急技术涵盖了一系列用于预防、减轻和管理洪水及其引发的灾害的技术和方法。例如,使用气象、水文和地理信息系统监测降雨、河流水位等数据进行洪水预警,使当地政府和居民能够做好

准备;使用数学模型和计算机仿真技术进行洪水模拟,预测洪水的发生和发展趋势,帮助政府和救援机构做出及时决策。对洪涝灾害的潜在风险进行评估,确定受影响区域和人口,以便在灾害来临前做好应急准备;建立应急救援设备和人员培训系统以提高应对洪涝灾害的能力。

通过完善排水系统以及海绵城市的协同发展,可一定程度上减缓洪涝灾害。但洪水应急避险设施也应得到发展,如移动承重墙及其对应存储设施、井盖预警器、流量计及在必要节点建立泵站或调蓄池等。

⑨ 构建城市地下管网地理信息系统(GIS)。全面排查检测污水管网等设施功能状况,设市城市重点核查前期已完成排查检测污水管网结构性、功能性缺陷和错接混接等基本情况,查缺补漏,补齐部分老城区、城中村、城乡接合部及源头排水单元(居民小区、公共建筑和企事业单位、小街巷等)等污水管网的基本情况;对于县城,应系统排查检测城区污水管网、检查井、排水口的结构性、功能性缺陷和错接混接及用户接入情况。依托GIS,将城市污水管网位置、长度、管径、管材、埋深、建设时间等基本信息,以及管网检测发现的结构性、功能性、错接混接等缺陷信息,污水检查井位置、深度、材质等基本信息,污水接入状况等数据纳入城市生命线数据底座,构建排水管网“一张图”。

#### 参考文献:

- [1] BERGER C, FALK C, PINNEKAMP J, *et al.* Zustand der kanalisation in Deutschland [J]. Sonderdruck aus KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, 2020, 67(12): 939-953.

- [2] Land- und Forstwirtschaft. Fischerei Flächennutzung [EB/OL]. (2020-10-13)[2021-06-15]. [https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/_inhalt.html).
- [3] Der Kunststoffrohrverband e. V. Vor- und Nachteile der Heizwendel-Schweißen [EB/OL]. [2021-06-15]. <https://www.krv.de/wissen/vor-und-nachteile>.
- [4] BOLZ J. Fremdwasser-Rendsburg leitet Gegenmaßnahmen ein [EB/OL]. [2021-06-15]. <https://www.ikt.de/website/printversion.php?doc=209>.
- [5] GILLAR M. Sicherheit beim Einstieg in schachtbauwerke [EB/OL]. [2021-06-15]. <https://www.ikt.de/website/iktnewsneu.php?doc=843>.
- [6] MÜLLER G. Roboterverfahren-großes potenzial in der grabenlosen Kanalsanierung [EB/OL]. [2021-06-15]. [https://www.katec-kanaltechnik.de/wp-content/uploads/2017/03/Presse\\_bbr.pdf](https://www.katec-kanaltechnik.de/wp-content/uploads/2017/03/Presse_bbr.pdf).
- [7] NEUHAUS. Dichtheitsprüfung von Hausanschlüssen [EB/OL]. [2021-06-15]. <https://serviceportal.sendenhorst.de/dienstleistungen/-/egov-bis-detail/dienstleistung/534/show>.
- [8] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Anschluss der Bevölkerung an die Kanalisation: Statistik Abwasserentsorgung [S]. Deutschland: Statistische Bundesamt, 2017.

作者简介:乔永祥(1992-),男,河北衡水人,德国波鸿大学在读博士生,德国IKT地下空间研究院研究员,研究方向为排水系统和非开挖管网修复技术。

E-mail:yongxiangqiao@gmail.com

收稿日期:2022-02-02

修回日期:2022-05-27

(编辑:丁彩娟)

尊法学法守法用法,治水管水兴水护水