

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2024.05.005

国内外地铁挡水技术和装置综述

程泽农^{1,2}, 杨新征¹, 柏 赟², 冯旭杰¹

(1. 交通运输部科学研究院城市交通与轨道交通研究中心, 北京 100029;

2. 北京交通大学交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 为提高地铁内涝应急处置能力, 对国内外地铁挡水技术和装置进行研究。针对地铁车站出入口、风亭风井、正线、车辆基地等地铁内涝风险点, 系统梳理国内外地铁挡水技术和挡水装置, 分析地铁挡水装备的适用场景以及优缺点; 探讨地铁挡水装置在成本经济性、智能化与自动化以及可持续性等问题上面临的挑战, 提出结构优化与材料改进、多功能挡水装置、智能化与自动化控制、绿色技术与可持续发展等方面的建议。研究结果表明: 不同挡水装置应用场景不同, 应针对不同风险点位以及涝水特点正确选择挡水装置; 地铁常规挡水装置应用广泛, 技术相对成熟; 新型技术在自动化方面有所突破, 可以节省人力, 提高应急可靠度。研究成果旨在为地铁挡水装置的设计、安装和应用提供参考, 为保障地铁系统的安全运行和有效应对地铁内涝提供技术支撑。

关键词: 轨道交通; 地铁内涝; 挡水技术; 挡水装置; 挑战与展望

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)05-0029-07

A Global Survey of Subway Water Barrier Technologies and Devices

CHENG Zenong^{1,2}, YANG Xinzheng¹, BAI Yun², FENG Xujie¹

(1. Center of Urban Transportation and Rail Transit, China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100029;

2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: To enhance the emergency response capability of subway waterlogging, this study investigated water-barrier technologies and devices for subways, both domestically and internationally. A systematic review of conventional and innovative subway water-barrier technologies and devices was conducted, focusing on subway waterlogging risk points such as station entrances/exits, vent shafts, main tracks, and vehicle depots. The advantages and disadvantages of various subway water barrier technologies and devices were analyzed. This study discusses the challenges faced by subway water barrier technologies and devices in terms of cost economy, intelligence, automation, and sustainability. Recommendations are provided for structural optimization, material improvement, multifunctional water barrier devices, intelligent and automated control, green technology, and sustainable development. The results indicate that different water-barrier devices are suited to various application scenarios. Water barrier devices should be selected based on risk points and flood characteristics. Conventional subway water barrier devices are widely used and are technologically mature. Compared with these technologies, new technologies have advantages in terms of automation, resource-saving, and improved emergency reliability. This study aims to serve as a reference for the design, installation, and application of subway water-barrier devices, providing technical support for ensuring the safe operation of subway systems and essentially responding to subway waterlogging.

Keywords: urban rail; subway waterlogging; water barrier techniques; water barrier devices; challenges and prospects

收稿日期: 2024-01-03 修回日期: 2024-01-24

第一作者: 程泽农, 男, 博士, 助理研究员, 从事城市轨道交通运营管理相关研究, chzn777@163.com

通信作者: 杨新征, 男, 硕士, 研究员, 从事城市轨道交通运营管理相关研究, 1583552819@qq.com

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(20234810)

引用格式: 程泽农, 杨新征, 柏赟, 等. 国内外地铁挡水技术和装置综述[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(5): 29–35.

CHENG Zenong, YANG Xinzheng, BAI Yun, et al. A global survey of subway water barrier technologies and devices[J].

Urban rapid rail transit, 2024, 37(5): 29–35.

地铁系统作为现代城市交通的重要组成部分,承载着大量人员的运输任务。然而近年来,极端天气给城市轨道交通运营安全带来重大威胁,特别是极端强降雨引发的地铁内涝是当前运营安全领域面临的重大挑战^[1-3],如2021年7月,河南郑州“7·20”特大暴雨灾害导致地铁5号线遭洪水灌入,造成重大人员伤亡和财产损失^[4]。由于地下轨道交通的封闭性,对其内涝灾害研究和防治带来极大挑战,不论是相关技术还是装备尚需不断探索。因此,开展地铁挡水技术和装置的研究对地铁内涝防治具有重要意义。

地铁内涝主要是由于突发强降雨,地铁口部较周边地势低,缺少有效挡水装置以及人员处置不及时等原因造成的。针对地铁系统特点与需求,为提高地铁内涝应急处置能力,国内外学者进行了地铁挡水技术与装置的研究和开发工作。毛宇丰等^[5]系统分析了防淹门的设置原则、工艺技术要求,以及与相关专业系统的接口和功能要求;王琨等^[6]从联锁子系统的防淹门防护功能需求和信号系统与防淹门系统的硬件接口设计的角度,实现列车控制与防淹门控制的联动功能,并保证各系统接口的安全可靠,为地铁防淹门的设计提供重要参考;田利勇等^[7]分析了目前城市地下空间挡水设防研究现状及存在问题,提出城市地下空间挡水体系概念、地下空间安全设防高程、基本挡水高程适用对象及计算方法,并在上海市区得到良好的应用。东京地铁设计人员为应对暴雨灾害,开发了一系列的防水门以及适用于隧道的高承压的反压滑动门^[8];之后国内学者又研发了无需电力驱动、无需人员值守的水浮力自动启闭挡水装置^[9];美国研究人员不断攻克适用于地铁隧道阻断洪水的胶囊型弹性隧道塞^[10-11]。此外,还有大量学者不断地进行地铁水灾风险分析^[12]、水灾中人员疏散规律研究^[13-14]以及水灾中排水设置的探讨^[15]等,为挡水装置的设置提供了技术支持。

国内外研究人员积极探索适应国情和地域特点的地铁挡水装置设计方案,并取得了一定的研究成果,但不同类型装置的适用性仍缺少系统分析。本文对国内外地铁挡水技术和装置进行了综合分析和总结,系统梳理了地铁出入口、风亭风井、正线等不同防汛重点部位的地铁挡水装置,从适用场景、装置优缺点等方面,对地铁挡水装置进行了对比分析;探讨未来地铁挡水装置研究的发展方向,为地铁挡水装置的设计、实施、应用等方面提供全面的理论和实践参考,以促进地铁挡水技术和装置的发展应用,为确保地铁系统

的安全运行和应对地铁内涝提供技术支撑。

1 地铁内涝薄弱部位及常规挡水装置分析

1.1 地铁内涝薄弱部位分析

2016年以来国内发生多起地铁内涝事件,如表1所示。通过系统梳理地铁内涝案例、相关规范^[16]中对地下结构防淹设计的有关规定以及对行业经验丰富的专家和运营单位主要负责人的问卷调查,对地铁内涝风险进行了系统的研究,总结出地铁内涝的薄弱部位主要有:车站出入口、无障碍电梯井、风亭和风井、U型槽、车辆段出入段线、市政管网连接通道、正线等。

表1 国内地铁内涝事件汇总

Table 1 Summary of domestic subway flooding incidents

序号	时间	事件
1	2023年9月8日	香港地铁黄大仙站雨水倒灌事件
2	2023年9月7日	深圳市轨道交通极端特大暴雨车站及区间淹水倒灌事件
3	2023年6月18日	贵阳地铁喷水池站淹水倒灌事件
4	2023年5月29日	洛阳地铁1号线上海市场站淹水倒灌事件
5	2023年2月9日	上海地铁11号线区间积水事件
6	2022年6月29日	南昌地铁4号线丁公路北站淹水倒灌事件
7	2021年7月30日	广州地铁21号线神舟路站淹水倒灌事件
8	2021年7月20日	郑州地铁5号线淹水倒灌重大人员伤亡事件 ^[17]
9	2021年7月18日	北京地铁S1线金安桥站淹水倒灌事件
10	2020年7月22日	青岛地铁13号线淹水倒灌事件
11	2020年5月22日	广州地铁13号线淹水倒灌事件
12	2018年6月28日	成都地铁1号线广福站淹水倒灌事件 ^[18]
13	2016年7月6日	武汉地铁2、4号线3站淹水倒灌事件
14	2016年7月7日	南京地铁1、3号线淹水倒灌事件
15	2016年6月3日	南宁地铁1号线百花岭站淹水倒灌事件
16	2016年5月10日	广州地铁6号线长湴站淹水倒灌事件 ^[19]

1.2 常规地铁挡水装置分析

针对地铁内涝薄弱部位,对国内外常规地铁挡水技术和装置的研究进展进行探讨,从适用场景、装置优缺点等方面,对地铁挡水装置进行了对比分析。

1.2.1 车站出入口

车站出入口处常采用的挡水装置有:防汛沙袋、防水挡板、挡水门3种。

1.2.1.1 防汛沙袋

防汛沙袋作为防汛常备物资,一般分为传统防汛沙袋与吸水膨胀沙袋,有40 cm×50 cm、30 cm×80 cm、25 cm×70 cm和40 cm×60 cm 4种规格可供选择,通过层层堆叠阻挡洪水的侵入。在车站出入口所用的防汛

沙袋如图 1 所示。



图 1 防汛沙袋
Figure 1 Flood control sandbags

防汛沙袋的防汛高度一般为 60 cm，适用于暴雨等情况下车站出入口等不同地形下水位上涨时的临时性防护，一个沙袋价格约 20 元。

防汛沙袋的特点是造价较低，吸水自膨胀沙袋较轻巧易搬运，可以快速完成防水部署，储存方便，充分干燥后即可反复使用。但传统沙袋较重，在数量较多时人工堆积劳动强度大，且挡水密封效果与高度调节有限。

1.2.1.2 防水挡板

传统防水挡板一般分为单片式与组合式 2 种，由两端卡槽、单片或多片挡水板以及中间立柱组成，如图 2 所示。单片式防水挡板可根据要求进行单片高低、长短定制，以满足不同出入口的挡水需求；而组合式防水挡板的每片高度一般为 20 cm，可逐层叠加，以达到所需的挡水高度，挡水板的宽度一般与出入口的宽度相当。

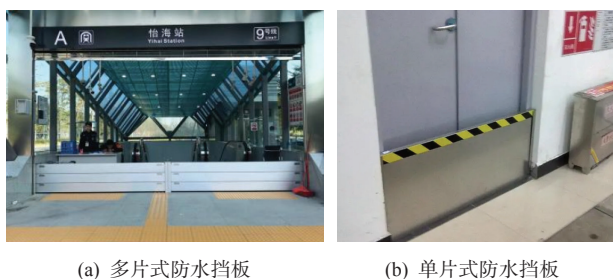


图 2 防水挡板
Figure 2 Waterproof barriers

防水挡板的挡水高度一般为 80 cm 以下，适用于地铁出入口、设备间等两侧有框体结构的场景，是一种可移动的临时性防护措施，挡水板造价一般约 1 500 元/m²。

传统防水挡板结构简单，密闭性好，造价低，安装简便，1~2 人在 5~10 min 即可完成安装或拆卸，组合式挡板可以根据挡水高度逐层叠加，具有一定的

灵活性和可调性。但挡水板挡水高度固定，不能临时增加高度，只能安放在已安装挡水板卡槽的指定位置，具有一定局限性；且缺乏通用性，尤其是挡板宽度，需根据出入口宽度定制。

1.2.1.3 挡水门

挡水门在洪涝灾害发生时，通过关闭门体提供防水屏障，有效地阻止水流进入特定区域，如图 3 所示。挡水门具有良好的密封性能，能够有效抵御水压和水流冲击，开启可手动、半自动或自动，响应快速。但其成本较高，其设计、制造和安装较为复杂，需定期维护和检修。



图 3 挡水门
Figure 3 Water stop door

挡水门可以直接封闭整个出入口，适用于地势较低或者重点防汛的地铁出入口、下沉广场连接通道等场景，是一种永久性防护措施，造价一般在 1 500 元/m²。

1.2.2 站厅站台

站厅、站台除了常用的防汛沙袋、防汛挡板外，还有一种便捷 L 型防水挡板。L 型防水挡板通常由橡胶、塑料或金属等耐水材料制成，具有良好的弹性和耐久性，并且受力巧妙，靠涝水自重产生压力保持挡水板与地面的贴合，有效抵御水流冲击和水压，如图 4 所示。

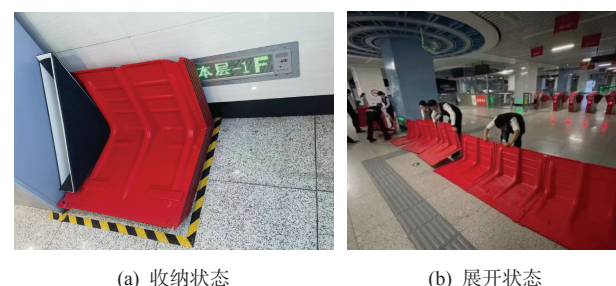


图 4 L 型防水挡板
Figure 4 L-shaped water stop barrier

L 型挡水板挡水高度一般在 50 cm 左右，适用于地铁站厅、站台等场景，是一种可移动的临时性防护设备，单片造价约 1 000 元。

L 型挡水板的模块化设计可快速拼装, 具有良好的密封性能, 收纳时可直接叠放在一起, 节省空间, 且成本相对较低。但其防水高度有一定限制, 无法应对特别高水位的情况。

1.2.3 风井

感应式风井防水挡板是目前日本采用的一种可感应外部雨水或洪涝变化而自动开启或关闭的风井挡水装置, 如图 5 所示。通常包含挡板结构、感应器、控制系统等。挡板结构为一种平面或弯曲的板状结构, 用于覆盖风井口, 以阻止外部水体进入, 具有良好的密封性。感应器用于感知外部水位的变化, 并将信号传递给控制系统。控制系统用于处理感应器传输的信号, 并控制挡板的开闭状态。当感应器检测到水位超过设定阈值时, 控制系统会自动关闭挡板, 防止水体进入风井; 相反, 当外部水位降低到安全水平以下时, 控制系统会自动开启挡板, 保持风井的通风功能。

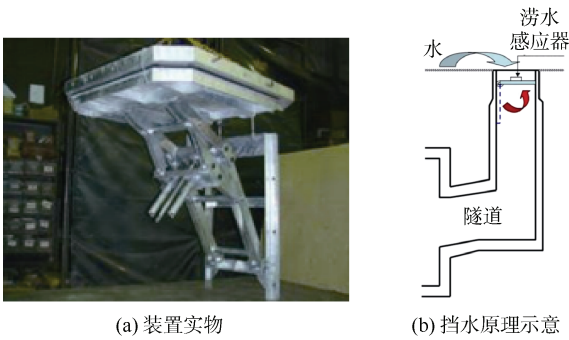


图 5 感应式风井防水挡板

Figure 5 Induction-type wind shaft water stop barrier

感应式风井防水挡板可对风井进行完全封堵, 适用于涝水汇集涌入风井的场景, 需要电力驱动。

感应式风井挡水装置的优点是能够自动感知外部环境变化, 智能且快速地控制挡板的开闭, 节省人力成本, 且具备应急功能。然而, 该装置依赖电力驱动, 感应器和控制系统存在设备故障的风险, 因此其维护成本较高, 且初期投资较大。

1.2.4 正线

防淹门^[20-21]作为防灾设备, 主要应用于隧道内部, 尤其是地下线路穿越河流或湖泊等水域的情况。防淹门主要由机械系统和控制系统两部分组成, 在控制室可对区间水位进行自动监测、报警。防淹门的优点是能够对涌入隧道的洪水进行拦截, 具有极高的可靠性与安全性。但防淹门整体设计较为复杂, 工程量较大, 造价高昂, 且在平时状态下极少使用。不同种类防淹

门如图 6 所示。

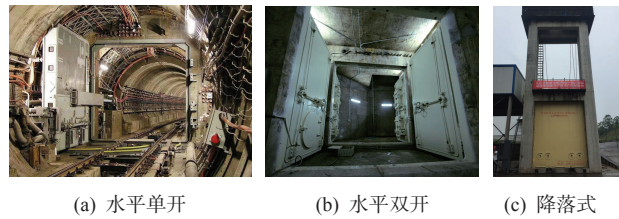


图 6 防淹门

Figure 6 Flood control gate

防淹门适用于隧道正线, 可以对整个隧道完全封闭, 阻止涝水进入。但其闭合需要时间较长, 且需要断开接触网, 对轨行区具有破坏性。防淹门造价一般较高, 约 37 万元/樘。

1.2.5 车辆段出入段线与 U 型槽

车辆段出入段线或 U 型槽处, 需谨防涝水灌入, 洞口需布置防汛沙袋、防水挡板或防淹门等防水设施, 如图 7 所示。

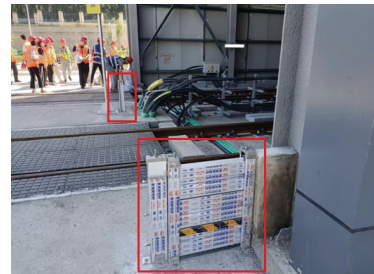


图 7 车辆段防水挡板

Figure 7 Waterproof barrier for metro depot

2 新型地铁挡水装置分析

防汛沙袋、防水挡板等常规挡水装置在地铁内涝中应用较成熟, 但大多依靠人力, 容易产生疏漏, 难以有效应对突发汛情。因此在传统挡水装置基础上, 国内外近年来不断创新, 研发新型挡水装置, 以提高地铁内涝应急能力。

2.1 车站出入口

水动力全自动防水挡板是国内研发的新型挡水装置, 主要由固定在地面上的底座, 一端铰结在底座上、另一端可转动的挡水面板和连接两侧墙端部的止水橡胶软板组成, 如图 8 所示。无水时, 挡水面板盖合在底座上, 行人可正常通行; 当涝水来临时, 由于挡水面板的比重轻于水, 储水腔进水后, 基于浮力原理, 挡水面板会慢慢地翻起, 翻起的角度随着内涝水位高低自动调整直到 90°; 当涝水减退时, 挡水面板随着

水位的下降逐渐闭合，直到贴合在地面底座上。水动力全自动防水挡板改变了原有相对单一的应急防汛工作模式，建立了一套自动化防汛装置，全过程无需人工干预，满足地下及低洼建筑出入口全自动挡水防倒灌的需求。



图8 水动力全自动防水挡板

Figure 8 Hydrodynamic, fully automatic waterproof barriers

防水挡板的防汛高度可分为 60、90、120 cm 3 种规格，适用于地铁车站入口、连接通道、下沉广场等场景，是一种永久性防护措施，造价约 3 万元/m²。

同时，国外也研发了水动力全自动竖向挡板，如图 9 所示。挡水原理类似，涝水汇集后，挡板在浮力作用下，竖向抬升，达到挡水效果，可用于地铁出入口、河堤等场景，是一种永久性防护措施。

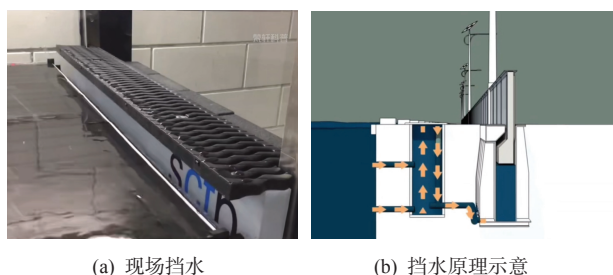


图9 水动力全自动竖向防水挡板

Figure 9 Hydrodynamic, fully automatic vertical waterproof barriers

2.2 风井

浮力式风井挡水装置是一种新型在研的防水装置，主要应用于风亭风井处。它的主要原理是利用浮力原理和重力作用，通过挡水板的浮沉运动来实现防水效果。该装置由围挡、浮力结构组成，在正常情况下，挡水装置处于下降状态，与地面或墙壁紧密贴合，形成有效的封闭；当涝水液面升高，受浮力作用，挡水装置上升，增加挡水高度，防止水流进入风井。

浮力式风井挡水装置挡水高度一般为 50~100 cm，

可根据风井高度调整，适用于地势低洼或有涝水倒灌风险的风井，无需电力驱动。

浮力式风井挡水装置可自动响应，根据水位变化自动调节挡水高度，无需人工干预，节能环保，如图 10 所示；然而对于大水位差或强水流情况，挡水高度可能存在不足情况，需定期清洁维护，以确保装置的稳定性和持久性。

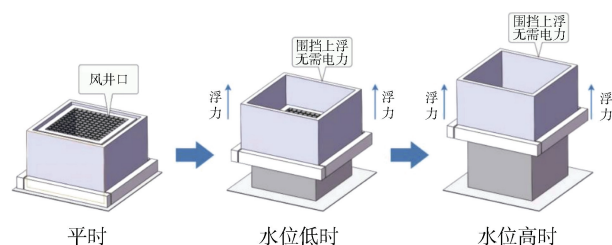


图10 浮力式风井挡水装置的自动响应原理

Figure 10 Buoyancy-type wind shaft water stop device

2.3 正线

弹性隧道塞^[10]是一种国外在研的新型隧道挡水装置，由多层高强度的纤维织物组成主体结构，并附带一个充气装置，如图 11 所示。当涝水袭来，可远程开启充气装置，纤维织物迅速膨胀，堵满整个隧道，用于洪涝灾害时正线的封堵。

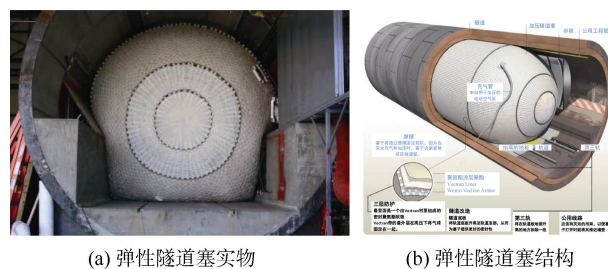


图11 弹性隧道塞

Figure 11 Elastic tunnel plug

弹性隧道塞具有高弹性、高密性、高抗压性，能够适应隧道的不规则形状，并且可以远程开启。其通常采用耐磨、耐腐蚀的高品质材料制成，具有较长的使用寿命。但弹性隧道塞需要电力驱动，造价昂贵。

综上，针对上述挡水装置，按照不同的内涝风险点、适用条件及经济性进行归纳总结，结果如表 2 所示。

3 挡水技术和装置研究的挑战与展望

目前国内外地铁挡水技术与装置都得到了大力的发展，但同时也存在着诸多挑战。展望未来，挡水装置将向智能化、高效化、绿色环保的方向发展。

表2 挡水装置适用场景与造价

Table 2 Application scenarios and cost of water barriers

风险点	序号	挡水装备	适用条件	优点	缺点	造价
车站出入口	1	防汛沙袋	无需电力	造价较低、储存方便，可反复使用	传统沙袋较重，人工堆积劳动强度大，密封效果与高度调节有限	约20元/个
	2	多片式防水挡板	无需电力	结构简单，安装或拆卸便捷，抗水流冲击力强，密闭性好，造价低	挡水高度固定，安装位置不可变，且定制性强	约1500元/m ²
	3	水力式防水挡板	无需电力	可根据外界液面高度，自动上升和下降，无需人工干预，节能环保	造价高，对于大水位差或强水流情况的适用性有待验证；设计、安装和维护较为复杂	约3万元/m ²
	4	升降式防水挡板	无需电力	可根据外界液面高度，自动上升和下降，无需人工干预，节能环保	造价高，对于大水位差或强水流情况的适用性有待验证；设计、安装和维护较为复杂	国外
	5	挡水门	无需电力	密封性好，响应快速，可抵抗大水流冲击	设计、制造和安装较为复杂，需进行定期的维护和检修	约1500元/m ²
站厅站台	6	可移动式L型防水挡板	无需电力	安装方便，可快速拼装，收纳简单、节省空间，且成本相对较低	防水高度有一定限制，无法应对特别高水位的情况	约1000元/个
风井	7	带传感器的止水挡板	需电力	自动感知外部环境变化，快速响应，智能控制挡板的开闭，节省人力成本	依赖电力驱动，存在设备故障的风险，维护成本较高，初期投资较大	国外
	8	浮力式风井挡水装置	无需电力	自动响应，根据水位变化自动调节挡水高度，无需人工干预，节能环保	对于大水位差或强水流情况的适用性有待验证，维护较为复杂	在研
正线	9	防淹门	需电力	密闭性好，可靠性与安全性高	成本高，启闭耗时长，需破坏接触网	约37万元/樘
	10	弹性隧道塞	需电力	密闭性好，可远程快速启动，使用寿命长，可适应不同隧道断面	成本高	在研
车辆基地	11	防淹门、挡水门、防汛沙袋等	—	—	—	—

3.1 挑战

1) 成本和经济性挑战。挡水装置的设计、制造和安装成本较高，需要考虑如何降低成本并提高装置的经济性。同时，经济评估和成本效益分析的研究也是必要的，以帮助决策者做出理性的投资决策。

2) 智能化与自动化挑战。实现挡水装置的智能化和自动化是当前面临的一个重要挑战。要探索实现装置的自动监测、智能控制和实时反馈，以提高其响应速度和准确性。然而，在追求智能化的同时，也必须充分考虑网络安全和电力供用等问题，确保智能化系统的可靠性和安全性，以保障挡水装置在关键时刻的可靠运行。

3) 可持续性与环保挑战。挡水装置的设计和使用面临着可持续性和环保方面的挑战，如何利用可再生材料、环保工艺，以及加强装置的使用寿命，是研究人员不断探索的方向。

3.2 展望

1) 结构优化和材料改进。改进挡水装置的结构设计和材料性能，以提高其强度、稳定性和耐久性。要探索新型材料的应用，如高强度合金、复合材料等，通过计算模拟和实验研究，优化挡水装置的结构，使其在面对不同水位和水流条件时具有更好的性能和稳定性。

2) 多功能挡水装置。研究挡水装置与其他设备、技术的集成，实现综合性的解决方案。例如探索防淹门、人防门等设备的集成，以减少隧道区间的构筑物；同时在挡水装置中集成传感器，实现实时监测水位、水压和水流速度等。

3) 智能化和自动化控制。探索更高级的智能化和自动化控制。利用人工智能、大数据分析和自动控制算法，搭建先进的传感器技术，实现挡水装置的智能监测、预测和调控，使挡水装置能够根据实时的水情和灾害预警信息做出智能决策，实现快速响应和自动化调整。

4) 绿色技术。在挡水装置的设计和使用过程中，应注重绿色技术和可持续发展，探索使用可再生能源和低能耗技术，减少挡水装置的能源消耗和环境影响。

4 结论

地铁系统作为城市交通的重要组成部分，近年来受到极端天气的影响，尤其是由极端强降雨引发的地铁内涝问题。本文综合分析了国内外常规与新型地铁挡水装置的研究进展，从不同防汛薄弱部位的地铁挡水装置应急处置方案出发，对挡水装置的适用场景、优缺点等进行对比分析，为地铁系统防内涝提供了有益的经验和技术支持。结合地铁挡水装置研究面临的挑战，提出了未来的研究方向，包括结构优化与材料

改进、多功能挡水装置、智能化与自动化控制、绿色技术与可持续发展等方面的建议, 为确保地铁系统的安全运行和应对地铁内涝风险提供技术支撑。

参考文献

- [1] ZHOU Y F, LI Z H, MENG Y Y, et al. Analyzing spatio-temporal impacts of extreme rainfall events on metro ridership characteristics[J]. *Physica a statistical mechanics and its applications*, 2021, 577: 126053.
- [2] RUBINATO M, NICHOLS A, PENG Y, et al. Urban and river flooding: comparison of flood risk management approaches in the UK and China and an assessment of future knowledge needs[J]. *Water science and engineering*, 2019, 12(4): 274-283.
- [3] FORERO-ORTIZ E, MARTÍNEZ-GOMARIZ E, CAÑAS PORCUNA M, et al. Flood risk assessment in an underground railway system under the impact of climate change—a case study of the Barcelona metro[J]. *Sustainability*, 2020, 12(13): 5291.
- [4] YANG Y H, YIN J, WANG D D, et al. ABM-based emergency evacuation modelling during urban pluvial floods: a “7·20” pluvial flood event study in Zhengzhou, Henan Province[J]. *Science China earth sciences*, 2023, 66(2): 282-291.
- [5] 毛宇丰. 地铁防淹门系统的安全设计[J]. *城市轨道交通研究*, 2019, 22(3): 170-173.
MAO Yufeng. Safety design of subway waterproof door[J]. *Urban mass transit*, 2019, 22(3): 170-173.
- [6] 王鲲, 杨华昌, 徐意, 等. 地铁信号系统防淹门防护技术研究[J]. *铁道标准设计*, 2018, 62(8): 153-158.
WANG Kun, YANG Huachang, XU Yi, et al. Technical research on floodgate protection in metro signal system[J]. *Railway standard design*, 2018, 62(8): 153-158.
- [7] 田利勇, 陈峰, 卢伟华, 等. 城市地下空间出入口挡水设防标准探讨[C]//中国工程院土木、水利与建筑工程学部, 中国土木工程学会, 等. 2013 城市防洪国际论坛论文专集. 《中国市政工程》编辑部, 2013.
- [8] AOKI Y, YOSHIZAWA A, TAMINATO T. Anti-inundation measures for underground stations of Tokyo metro[J]. *Procedia engineering*, 2016, 165: 2-10.
- [9] 王佳, 张健, 范良凯, 等. 地铁车站水动力全自动防洪闸系统应用研究[J]. *现代城市轨道交通*, 2021(12): 46-49.
WANG Jia, ZHANG Jian, FAN Liangkai, et al. Application of hydrodynamic automatic flood barrier system in metro stations[J]. *Modern urban transit*, 2021(12): 46-49.
- [10] MARTINEZ X, DAVALOS J, BARBERO E, et al. Inflatable plug for threat mitigation in transportation tunnels[C]// *Proceedings of Society for the Advancement of material and process engineering (SAMPE) conference*, Baltimore, 2012.
- [11] SOSA E M, THOMPSON G J, BARBERO E J. Testing of full-scale inflatable plug for flood mitigation in tunnels[J]. *Transportation research record*, 2014, 24(7): 59-67.
- [12] 李浩然, 欧阳作林, 姜军, 等. 城市轨道交通灾害链演化网络模型及其风险分析: 以地铁水灾为例[J]. *铁道标准设计*, 2020, 64(2): 153-157.
LI Haoran, OUYANG Zuolin, JIANG Jun, et al. Urban rail transit disaster chain evolution network model and its risk analysis—taking subway flood as an example[J]. *Railway standard design*, 2020, 64(2): 153-157.
- [13] 周天忠, 钟有信, 林治宇, 等. 复杂地铁车站多工况洪水入侵规律与人员疏散路径分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(7): 27-35.
ZHOU Tianzhong, ZHONG Youxin, LIN Zhiyu, et al. Analysis of flood intrusion law and personnel evacuation route of complex metro station under multi-conditions[J]. *Water resources and hydropower engineering*, 2023, 54(7): 27-35.
- [14] DIAS C, RAHMAN N A, ZAITER A. Evacuation under flooded conditions: experimental investigation of the influence of water depth on walking behaviors[J]. *International journal of disaster risk reduction*, 2021, 58: 102192.
- [15] 杨彩玲. 地铁区间隧道应急排水设置研究[J]. *都市轨道交通*, 2021, 34(4): 128-131.
YANG Cailing. Emergency drainage of metro tunnels[J]. *Urban rapid rail transit*, 2021, 34(4): 128-131.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2013.
- [17] 刘家宏, 裴羽佳, 梅超, 等. 郑州“7·20”特大暴雨内涝成因及灾害防控[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2023, 44(2): 38-45.
LIU Jiahong, PEI Yujia, MEI Chao, et al. Waterlogging cause and disaster prevention and control of “7·20” torrential rain in Zhengzhou[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2023, 44(2): 38-45.
- [18] LYU H M, XU Y S, CHENG W C, et al. Flooding hazards across Southern China and prospective sustainability measures[J]. *Sustainability*, 2018, 10(5): 1682.
- [19] LYU H M, WANG G F, SHEN J, et al. Analysis and GIS mapping of flooding hazards on 10 may 2016, Guangzhou, China[J]. *Water*, 2016, 8(10): 447.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁隧道防淹门: CJ/T 453—2014[S]. 2014.
Ministry of Housing and Urban- Rural Development of the People’s Republic of China .Subway tunnel flood gate: CJ/T 453—2014[S]. 2014.
- [21] 卢昌仪. 地铁防淹门系统的设计[J]. *都市轨道交通*, 2005, 18(4): 116-120.
LU Changyi. The design of metro flood gate[J]. *Urban rapin rail transit*, 2005, 18(4): 116-120.

(编辑: 王艳菊)