

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.14.017

# 深层隧道排水系统的机械化清淤技术研究与应用

黄清强, 饶虹

(广州市城市排水有限公司, 广东 广州 510700)

**摘要:** 深层隧道排水系统在国内逐渐得到推广应用,但该系统深埋地下,导致清淤难度较大,国内外相关报道也较少。广州东濠涌深层隧道排水工程已运行1年有余,为实现机械化清淤目标,针对该系统高纵深的复杂环境,从国内外相关案例、清淤技术手段、清淤重点难点等方面进行剖析,研发了“清淤机器人+高扬程吸污车”的成套清淤技术。工程实践证明,该清淤技术具有施工简单、安全、高效、智能等优势,极具市场应用推广价值。

**关键词:** 深层隧道; 排水系统; 机械化清淤; 清淤机器人; 高扬程吸污车

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)14-0101-06

## Research and Application of Mechanized Dredging Technology for Deep Tunnel Drainage System

HUANG Qing-qiang, RAO Hong

(Guangzhou Urban Drainage Co. Ltd., Guangzhou 510700, China)

**Abstract:** Deep tunnel drainage system has been widely used in China, but the system is deeply buried underground, which makes dredging difficult, and there are few reports on the dredging technology at home and abroad. The deep tunnel drainage project in Donghao River, Guangzhou has been in operation for more than one year. In order to achieve the goal of mechanized dredging, a complete set of dredging technology of “dredging robot and high lift suction truck” for the complex environment of the system with high depth was developed, through analysis from the relevant cases at home and abroad, dredging technology means, dredging key points and etc. It is proved by the engineering practice that the dredging technology has the advantages of simple construction, safety, high efficiency, intelligence, and etc., which has great market application and promotion value.

**Key words:** deep tunnel; drainage system; mechanical dredging; dredging robot; high lift suction truck

深层隧道排水系统(简称深隧)指埋设在深层地下空间,用于调蓄、输送雨水或合流污水的隧道,主要用于城市的旱季污水收集、雨季污染控制及排涝安全保障等。深隧由竖井、主体隧道、调压水槽、排水泵站等构筑物组成,按使用功能分为污水输送隧道、雨洪排放隧道、合流调蓄隧道和复合功能隧道。

深隧通过末端枢纽泵站和主体隧道实现了区域排水一体化控制,能够有效缓解区域内涝和减少区域溢流污染。由于深隧需要避开城市现有地下设施,实际应用过程中大多枢纽泵站最低位置都超过了地下30 m<sup>[1]</sup>。因此,深隧的清淤便成为泵站维护的难点之一,更是保障深隧正常运行的重点工作<sup>[2]</sup>。

基金项目: 广州市水务科技协同创新中心资助项目

以深埋于地下约40 m处的广州东濠涌深隧系统为研究对象,分析了清淤工作的重点和难点,并将国内外几种深隧清淤技术进行了对比<sup>[3]</sup>,基于已有的清淤机器人研究基础<sup>[4]</sup>,进一步研发了利用清淤机器人和高扬程吸污车进行接力提升淤泥的成套清淤技术,简单、安全、高效,具有一定推广应用价值。

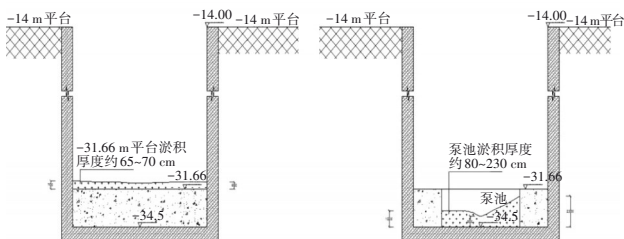
## 1 工程概况

### 1.1 工程基本信息

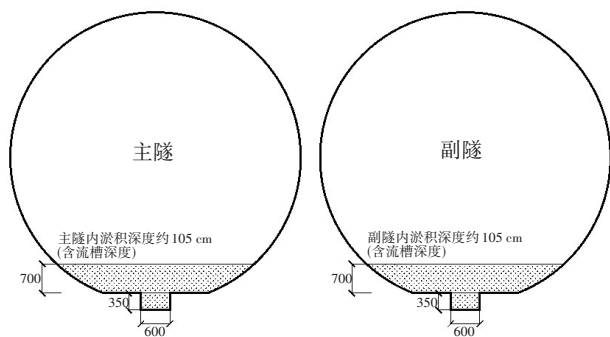
东濠涌深隧作为全国首条集溢流污染削减、雨洪排涝为一体的多功能深层排水隧道,对解决广州市中心城区雨季频繁出现的污水溢流和内涝问题,保护东濠涌流域的水环境质量具有重要作用<sup>[4]</sup>。该深隧由外径6 m的深层主隧(长约1.77 km),外径3 m的新河涌涌副隧(长约1.4 km),东风路竖井、中山三路竖井、玉带濠竖井、沿江路竖井等4座竖井,百子涌进水井,以及尾端排水泵站等组成,服务面积12.47 km<sup>2</sup>,调蓄规模约 $6.3 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,排涝能力48 m<sup>3</sup>/s。该深隧建在地下40 m处,地铁1号线和6号线贯穿其上部,这样高纵深的复杂排水隧道系统的日常运营维护,特别是隧道内积淤处理问题亟需解决<sup>[5-6]</sup>。

### 1.2 积淤情况

东濠涌深层排水隧道沿线共有4座入流竖井,浮渣、塑料袋、泥砂等来源广且数量多,此外,隧道内顶部防腐块状材料脱落也会成为积淤成分之一。主隧淤积物极少,从东风路往南一直到江湾加油站平均淤积厚度只有2 cm,主要原因是隧道内坡度为0.3%,急速的水流将淤积物推送到隧道下游尾端附近;淤积物主要分布在主隧沟槽及主隧下游,如尾端泵站泵池(深43.2 m)、泵池北侧-14 m的大平台(深23.4 m)以及副隧沿江路竖井与主隧尾端泵站连接处(约80 m),淤积厚度平均约0.7 m,淤积物量约382 m<sup>3</sup>。图1展示了-31.66 m平台和泵池,以及主隧和副隧通道的积淤情况。



a. -31.66 m平台和泵池淤积



b. 主隧和副隧通道泥砂淤积

图1 -31.66 m平台和泵池,主隧和副隧通道积淤示意

Fig.1 Sediment accumulation of -31.66 m platform and pump tank, main tunnel and sub-tunnel channel

淤积物在隧道终点排水泵站入口处、排水泵站圆井、泵池汇集,形成主要积淤(砂)地,积淤如不及时清理,可能损坏深隧泵站的排空泵,甚至造成深隧停运,严重影响行洪排涝工作。

### 1.3 清淤重难点分析

深隧清淤和浅层排水系统的疏通维护类似,存在垃圾残渣、漂浮物、腐蚀、臭气等问题<sup>[7-8]</sup>。而深层大管径隧道的清淤难度更大,主要涉及以下三大技术难点:

#### ① 污水不能完全排空

深隧污水是依靠尾端泵站排空泵抽吸外排到浅层排水系统,由于排空泵存在积淤,不能将积水完全外排,因此深隧清淤存在0.5~0.8 m积水情况下的施工难题。

#### ② 有限空间的作业安全

深隧内空间密闭且有限,因污水可能释放硫化氢或沼气等有害气体,且隧道深度较大,释放量较多,如需人员长时间停留在隧洞中作业,中毒的风险较大,且有限空间中人工清淤的质量一般较差。

#### ③ 隧道深,无合适的装备

大部分隧道都比浅层排水管道埋设更深,用于疏通维护浅层系统的工具大多不适用于深层隧道,例如普通清淤设备由于扬程不足,无法满足超30 m的泵送高度,且多数通信工具(如无线电)在隧道内不能正常工作,清淤作业难度较大。

## 2 清淤技术研究

### 2.1 国内外深隧工程清淤措施调研

国外大城市如美国芝加哥、新加坡、伦敦、东京等,以及中国香港地区都投资建设了深层排水隧道,投入使用较久<sup>[9-10]</sup>。对于深层隧道的维护管理,

一是预处理系统,建设时在浅层入流口或者深层隧道末端设置机械格栅、沉砂井/池等,对进入隧道或泵池的垃圾淤泥进行拦截。二是后期维护方面,大部分深隧系统依赖潜水员下井检查,通过泵送、抓

取或人工作业等传统方式进行清淤,可借鉴的智能机械化清淤工艺较少。

国内外部分深层隧道排水工程的积淤处理调查见表 1<sup>[1]</sup>。

表 1 国内外部分深隧积淤处理调查

Tab.1 Investigation on deposition treatment of some deep tunnels at home and abroad

项目	深度/m	隧道直径/m	总长度/km	坡度/%	预处理积淤措施	隧道终端清淤处理措施
香港净化海港计划深隧系统	70~160	1.2~3.5	44		利用原污水处理厂设置的格栅、沉淀池等初级处理构筑物去除较大的固体及砂砾	利用自身隧道流量冲洗
美国芝加哥深隧系统	45~107	3~10.6	176		入流点无预处理,隧道终端泵房入口处设置格栅及沉淀设施	定期积淤清洗,但未落实
美国克利夫兰净湖工程	30~60	5.2~7.3	33.8	0.1~0.2	各入流口设置格栅、沉砂池等预处理构筑物	计划每年进行一次清洗维护,但未落实
新加坡深隧系统	20~55	6	48		设置格栅、沉砂池等预处理构筑物	无
英国伦敦泰晤士河深隧工程	35~75	7.22	22		设置格栅、沉砂池等预处理构筑物,利用暴雨期水流自冲洗	起吊专用车辆进行清淤,人工清淤周期不长于 10 年
中国广州东濠涌深隧系统	30~40	6	1.77	0.30	设置格栅、沉砂池等预处理构筑物,吸污车吸泥砂	计划每年进行一次清洗维护,但未落实

我国内陆地区近年来才开始积极探索应用深层排水隧道,主要包括广州、武汉、深圳、上海等大城市,但使用年限较短,且武汉大东湖深隧为免维护型,因此东濠涌深隧在维护管理方面的经验欠缺,可借鉴思路少。为较好地解决清淤问题,对国内外相关成品清淤设备进行了充分的市场调查,但均无成品清淤设备能够满足东濠涌深隧超高深度的清淤需求,需要结合东濠涌深隧进行个性化定制,花费的时间和费用较高。因此深隧运行管理单位开始自主研发简单、实用的清淤设备。

2.2 深隧终端清淤技术对比分析

目前国内外对积淤采取的预处理措施主要为格栅+沉砂池;对深隧终端的清淤维护方式则集中在人工清淤、清淤车清淤等传统技术上。

① 人工清淤技术

人工清淤技术,是指抽干深隧污水后,施工人员进入深隧内部,利用抽砂泵将淤积物抽送到地面,或者利用铁铲清淤,再装入布袋后吊装到地面。这种方法简单直接,但清淤区域属于有限空间作业,作业区域聚集城市管网中雨水、污水,可能存在有毒、有害气体,施工人员容易发生中毒、窒息等危险。

② 清淤车清淤技术

清淤车清淤技术是将清淤车通过起重设备吊

装进入深隧内部,由驾驶员操作清淤车对整个隧道清淤。在深隧运行中发现,国内外既无满足该超高深度隧道清淤需求的清淤车,也面临驾驶员下井作业的安全风险,以及需要抽干深隧污水后再作业等难题。

③ 机器人清淤技术

机器人清淤技术是指通过高压泵喷射水枪将板结沉积物打散后形成泥(砂)水混合物,吸砂泵将泥(砂)水混合物抽送到沉淀池,泥(砂)留存沉淀后转运到指定地方处置,清水则回流到原处的方式。目前机器人清淤技术在有限空间如箱涵、泵站泵池等清淤作业中已得到较好的应用<sup>[4]</sup>。

3 深隧机械化清淤技术

基于上述分析结果可知,对深隧的清淤养护并非单一方法可以实现,需要结合日常运行维护,将入流口的预处理措施和深隧终端的清淤维护统筹考虑。

3.1 总体思路

通过对比,预防沉积物进入深隧是清淤养护重要的手段之一,故结合运行实际,采用入流口减量,终端定期清淤方式进行深隧清淤。根据深隧系统中不同站点设施结构特性、重点积淤位置情况、现有设备情况,以“源头及时削减、主隧定期监测、尾端重点清淤”为总体思路(见图 2),因材施教,采用



多种方法开展清淤作业,形成深隧智能机械化清淤系统工艺。

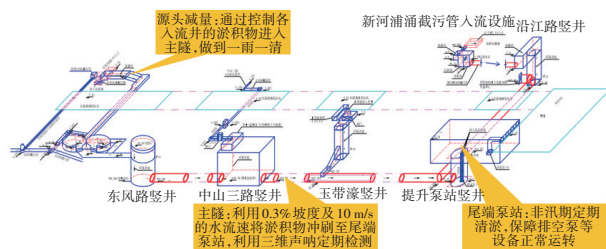


图2 深隧清淤总体思路

Fig.2 General idea of deep tunnel dredging

### 3.2 入流口机械化清淤

当降雨期打开深隧入流闸时,需同步进行入流口机械化清淤。入流设施中的重点淤积位置主要在格栅前后、进水闸前和沉淀池。由于淤积成分和设施结构等不同,需采取不同的清淤方法。

① 格栅前缠绕性物质及固体垃圾清淤。格栅将大部分缠绕物质(如麻袋、塑料袋、碎布等)和固体垃圾(如木方、钣金、塑料瓶、树叶等)阻挡在格栅前。针对这种淤积成分,通过地面控制平台或深隧自动控制系统控制现有的格栅机启停运作,人工辅助清理,可达到较好的清淤效果。

② 格栅前后、进水闸前淤泥砂砾清淤。格栅前后有泥砂堆积,格栅机只能带走少部分泥砂,绝大多数会堆积在格栅前后。针对这种淤积,利用吸污车进行机械化清淤,通过拖动吸污头在格栅前后淤积位置进行抽吸,最后由吸污车清运处理。

③ 沉淀池砂水分离器中的淤泥砂砾清淤。由于砂水分离器吸力不足等因素,未能正常吸取池中泥砂,造成沉淀池中砂水分离器淤积严重。砂水分离器一般在地面以下12~14 m,在其失效的情况下,利用吸污车接入原有的抽砂管吸取泥砂,达到清理砂水分离器淤积的目的。

### 3.3 主隧淤积处理

隧道内坡度为0.3%,隧道内水流速度最大可达到10 m/s,而合流排水渠在满流时最小设计流速为0.75 m/s,主隧的最大流速远大于最小设计流速,具有较强的冲击力,可用于水力清淤。因此采用三维声呐定期监测主隧道内淤积情况,若发生淤积,则利用急速的水流将淤积物推送到隧道下游尾端附近。

### 3.4 深隧终端清淤

深隧终端结构如图3所示。清淤主要针对隧道

内部和尾端泵站的专项清淤,由于深隧深度达到地下40 m,清淤难度极大。经过调研现有清淤设备和清淤技术,最终采用水下清淤机器人+高扬程吸污车的方式。

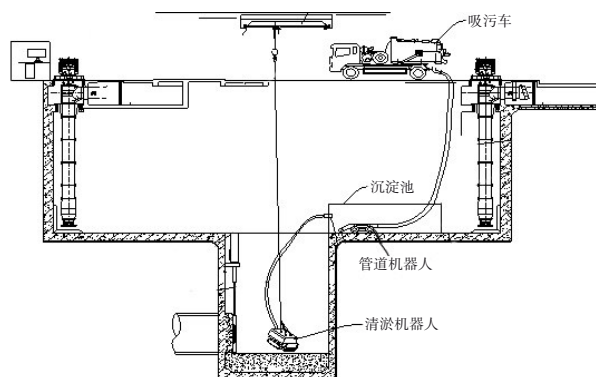


图3 深隧终端清淤工艺

Fig.3 Deep tunnel terminal dredging process

#### 3.4.1 主要清淤设备

##### ① 清淤机器人

清淤设备如图4所示。



图4 清淤设备

Fig.4 Dredging equipment

清淤机器人由广州市城市排水公司自主研发,主要由履带底盘、前铲、渣浆泵、液压系统、水下控制系统、探测声呐等部件组成。产品采用声呐系统、三维姿态、工作状态及液压状态监测,利用人机交互界面,可实现“人不下井,水不断流,泥不落地”的新高度、新标准、智能化清淤工作流程。主要参数:主机外观尺寸(长×宽×高)为1 800 mm×1 200 mm×1 200 mm,质量1 000 kg;清淤距离不小于100 m;行走速度3 m/min;清淤量100 m³/h;扬程250 kPa;可转输固体直径5 cm。

##### ② 高扬程吸污车

容积9 m³,扬程400 kPa,长×宽×高为7 880 mm×2 520 mm×3 460 mm,采用二级三叶湿式罗茨真空泵,使整个系统的负压达到96 kPa,保证了吸污车超强的输送能力和吸引效率。

#### 3.4.2 深隧终端清淤工艺

##### ① 清淤施工工艺流程

清淤施工现场作业如图5所示。工艺流程:施工前准备→施工作业现场安全围蔽→在竖井内用轴流风机进行通风换气,用多功能气体检测仪检测井内气体并做记录→深隧系统摸查→-31.66 m平台清淤→竖井泵池内清淤→深隧系统主副隧洞清淤→-14 m平台(简称-14层)淤积物清理→施工完毕。



a. -14层沉淀池 b. 高扬程吸污车吸污作业

图5 清淤施工现场作业

Fig.5 Desilting construction site operation

## ② 尾端泵站-14层积淤清理

尾端泵站-14层是楼层结构,离地约22 m,其地面会形成具有一定厚度的积淤,可利用吸污车,辅以人工拖动吸污头在不同的地方进行抽吸,完成-14层的积淤清理。

## ③ 尾端泵站圆井和主隧道末端泵池入口积淤清理

圆井底部距地面约40 m,空间较大,可用智能清淤机器人进行清淤;主隧道末端泵池入口附近,距地面约39~40 m,有足够的空间让清淤机器人清理入口附近约30 m的隧道。圆井底部和隧道距地面的超高深度仅利用吸污车无法完成积淤清理,因此考虑智能清淤机器人+吸污车接力的方式,以-14层为中转站,智能清淤机器人将-40 m深处的积淤抽吸至-14层中转站,吸污车在地面抽吸-14层淤泥砂砾,最终完成圆井底部和主隧末端附近约30 m的积淤清理。

## 3.4.3 实施效果

### ① 简单、高效

与传统人工清淤相比,“清淤机器人+高扬程吸污车”方法具有简单直接,无需封堵、下井控制水位、毒气检测等优点,清淤效率提高2~3倍。机器人可以24 h连续施工,极大缩短了深隧清淤的施工工期(每1 km深隧清淤施工,缩短施工工期7天)。

### ② 超深清淤

充分利用尾端泵站-14 m平台(深23.4 m)搭建

沉淀池,通过接力提升的方式解决超深环境下的清淤设备扬程不足问题,采用排水公司自主研发的水下智能机器人对尾端泵站、主隧、副隧进行清淤,将淤积物抽到-14 m的沉淀池进行泥水分离,再用高扬程吸污车将-14层的淤积物抽吸到吸污车后外运。

### ③ 智能安全

自主研发的智能机器人实现污水浑浊恶劣环境下定位、导航、避障以及清淤,可视化操作等智能化作业,安全可靠,最大限度减少了人工下井作业带来的安全风险。

### ④ 清淤结果

通过对广州东濠涌深隧各入流井预处理设施进行日常清淤,以及对终端20 d的集中清淤,全年共清淤约380 m<sup>3</sup>,清淤后深隧系统运转良好,达到了运营要求和预期目标。

## 4 结论

基于广州东濠涌深层隧道结构,充分结合淤积摸查情况,在国内外无现成经验、无现成清淤设备可借鉴的情况下,实现了安全、高效、智能化的清淤,成功探索出一套适用于深层排水隧道的全新的、机械化清淤工艺方法,形成格栅+抓斗+吸污车的日常机械化预处理设施清淤、“清淤机器人+高扬程吸污车”的集中机械化清淤处理的运营维护模式,为深层隧道排水系统的清淤、运营提供了一条可借鉴、可推广的方案。

## 参考文献:

- [1] 王广华,陈彦,周建华,等. 深层排水隧道技术的应用与发展趋势研究[J]. 中国给水排水, 2016, 32(22): 1-6, 13.  
WANG Guanghua, CHEN Yan, ZHOU Jianhua, et al. Discussion on application and development trend of deep tunnel drainage technology [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(22): 1-6, 13 (in Chinese).
- [2] 王广华,周建华,李文涛,等. 典型深隧排水系统运行与维护研究[J]. 给水排水, 2021, 47(5): 128-134.  
WANG Guanghua, ZHOU Jianhua, LI Wentao, et al. Operation and maintenance of typical deep tunnel drainage system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(5): 128-134 (in Chinese).
- [3] 汤霞,陈卫兵,李怀正. 城市排水系统沉积物特性及清淤方式研究进展[J]. 城市道桥与防洪, 2013(3):

- 106-110,216.
- TANG Xia, CHEN Weibing, LI Huaizheng. Study on characteristics of sediments in urban sewer system and its desilting mode [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2013(3):106-110,216(in Chinese).
- [4] 饶虹, 黄清强, 叶云. 浅谈机器人在箱涵清淤中的研究与应用[J]. 中国设备工程, 2021(19): 191-193.
- RAO Hong, HUANG Qingqiang, YE Yun. Introduction to the research and application of robot in box culvert dredging [J]. China Plant Engineering, 2021(19): 191-193(in Chinese).
- [5] 徐姝静. 深隧治水——广州市东濠涌深层隧道试验段排水系统技术研究与应用[J]. 国企管理, 2019(12): 60-61.
- XU Shujing. Deep tunnel for water management: research and application of drainage system technology in a deep tunnel test section in Donghao River, Guangzhou [J]. China State-owned Enterprise Management, 2019(12): 60-61(in Chinese).
- [6] 段腾腾, 耿震, 胡邦, 等. 城市河道综合治理中的暗涵整治[J]. 中国给水排水, 2019, 35(10): 115-118.
- DUAN Tengting, GENG Zhen, HU Bang, *et al.* Culvert regulation in the comprehensive treatment of an urban river [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(10): 115-118(in Chinese).
- [7] 王双, 项立新, 杨明轩, 等. 高密度建成区暗涵应急截污工程技术研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(24):115-119.
- WANG Shuang, XIANG Lixin, YANG Mingxuan, *et al.* Study on emergency interception engineering technology of culverts in high density built-up area [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(24): 115-119(in Chinese).
- [8] 周平, 蒋铁. 城市暗涵淤泥清理与水环境治理技术研究[J]. 水利规划与设计, 2020(6):100-103,112.
- ZHOU Ping, JIANG Tie. Study on techniques for dredging and water environment treatment in underground tunnels in cities [J]. Water Resources Planning and Design, 2020(6): 100-103, 112 (in Chinese).
- [9] 胡龙, 戴晓虎, 唐建国. 深层排水调蓄隧道系统关键技术问题分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(8): 17-21.
- HU Long, DAI Xiaohu, TANG Jianguo. Analysis of key technical problems of deep drainage tunnel system [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(8): 17-21 (in Chinese).
- [10] 谢小龙, 杨涛, 胡晓彬, 等. 深层隧道排水系统在武汉污水传输工程中的应用[J]. 给水排水, 2022, 48(1): 132-136.
- XIE Xiaolong, YANG Tao, HU Xiaobin, *et al.* Application of deep tunnel drainage system in the wastewater transmission engineering of Wuhan [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(1): 132-136 (in Chinese).
- 
- 作者简介:**黄清强(1973-),男,广东兴宁人,本科学历,研究方向为水下智能清淤机器人、城市污水排放系统以及智能化控制系统。
- E-mail:**373674657@qq.com
- 收稿日期:**2023-05-06
- 修回日期:**2023-06-01

(编辑:衣春敏)

**保障用水安全****例行高效节约**