

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.18.022

# 大型排水暗涵清淤作业智慧管控系统研发与应用

胡茂锋<sup>1,2</sup>, 刘 军<sup>1,2</sup>, 吴志炎<sup>1,2</sup>, 邹 静<sup>1,2</sup>, 秦 雄<sup>1,2</sup>, 冯泽建<sup>1,2</sup>,  
陶坤星<sup>1,2</sup>, 石稳民<sup>1,2</sup>, 王 辉<sup>1,2</sup>

(1. 中建三局绿色产业投资有限公司, 湖北 武汉 430056; 2. 中建三局水务环保有限公司, 湖北 武汉 430014)

**摘 要:** 为解决大型排水暗涵清淤作业安全风险高、作业人员伤亡多等问题,在暗涵清淤过程中,通过研究有毒易燃易爆气体释放机理、封堵失效规律、人员管控要点及应急救援需求,构建了基于“感知层-传输层-处理层-应用层”的大型排水暗涵清淤安全管控通用化系统,包括分级通风、水位响应、人员管控、覆盖监控及辅助施救等功能模块,在2020年8月应用于黄孝河机场河流域综合治理一期项目,实现了29.4 km大型排水暗涵清淤超危作业零伤亡目标,切实有效降低了大型排水暗涵清淤作业安全风险。

**关键词:** 排水暗涵; 有限空间; 气体通风; 安全管控

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)18-0133-08

## Development and Application of Intelligent Control System for Large Drainage Culvert Based on Internet of Things

HU Mao-feng<sup>1,2</sup>, LIU Jun<sup>1,2</sup>, WU Zhi-yan<sup>1,2</sup>, ZOU Jing<sup>1,2</sup>, QIN Xiong<sup>1,2</sup>,  
FENG Ze-jian<sup>1,2</sup>, TAO Kun-xing<sup>1,2</sup>, SHI Wen-min<sup>1,2</sup>, WANG Hui<sup>1,2</sup>

(1. China Construction Third Bureau Green Industry Investment Co. Ltd., Wuhan 430056, China;  
2. China Construction Third Bureau Water Environmental Protection Co. Ltd., Wuhan 430014, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of high safety risk and many casualties in the dredging operation of large drainage culvert, a general safety control system for dredging of large-scale drainage culvert based on the architecture of perception layer, transmission layer, processing layer and application layer is constructed through the research on the release mechanism of toxic, flammable and explosive gases, the rule of blocking failure, the key points of personnel control and the requirements of emergency rescue. The system includes functional modules such as hierarchical ventilation, water level response, personnel control, coverage monitoring and auxiliary rescue. It was applied in the phase I comprehensive management project of Huangxiao-Jichang River basin in August 2020, achieving the goal of zero casualties in dangerously dredging 29.4 km of large-scale drainage culvert, and effectively reducing the safety risk of dredging operation of large-scale drainage culvert.

**Key words:** drainage culvert; limited space; gas ventilation; safety control

通信作者: 吴志炎 E-mail: 913189730@qq.com

城市主干排水暗涵是城市重要的基础设施,随着我国经济发展,城市容量不断扩大,生活污水不断增加,暗涵污水转输大动脉功能日益突显。多数城市暗涵建设年代较早,多采用合流制排水体制,即在旱季转输生活污水,在雨季充当行洪通道,然而管涵内的淤泥淤积将影响其输水能力,当污水从大坡度的排水支管进入小坡度区域排水主干箱涵或箱涵断面面积增加时流速降低,其挟带的大量推移质泥沙和大颗粒悬移质淤泥沉积在箱涵底部。随着时间推移,沉积物发生物理化学反应后会出现固化、板结现象,致使过流断面进一步减小,如遭遇极端降雨,极易引发城市内涝,同时暗涵内淤积污泥不断发酵,易产生腐蚀性气体,不断腐蚀箱涵,造成暗涵结构寿命缩短,无法达到设计使用年限;加之周期性清淤有助于开展箱涵结构缺陷评估检测,便于及时修复,提质增效,延长排水箱涵使用寿命,因此针对暗涵进行周期性清淤势在必行<sup>[1-2]</sup>。

当前暗涵清淤技术主要分为断流清淤和不断流清淤两类,不断流清淤多通过开设进出通道,下放清淤机器人进行清淤,现阶段机器人清淤技术尚未普及,清淤效果较差、成本较高,清淤完成后无法进行检测评估,尚未大规模推广。现今主流清淤技术仍为断流清淤,首先对拟清淤段进行截断导流,然后派遣施工作业人员下井操作机械设备完成清淤工作<sup>[3]</sup>。

人员下井进入箱涵内清淤属于典型的有限空间作业,排水箱涵内存在大量的有毒易燃易爆气体,在清淤过程中,底泥中大量有毒易燃易爆气体受扰动迅速释放,浓度急剧上升,极易造成作业人员的群死群伤<sup>[4-7]</sup>。2021年1月—9月,全国已发生有限空间事故21起,伤亡79人,其中清淤作业过程中伤亡40人,占比50.6%。此外,当清淤人员在箱涵内晕厥后,施救人员由于不清楚箱涵内部情况,盲目进入施救,从而衍生了二次伤亡事故,2021年1月—9月盲目施救造成的人员伤亡占有限空间伤亡人数的24.1%。

“十三五”以来,生态文明建设被提到了新高度,针对合流制管网体制,为实现污水全收集全处理,多通过原有管道末端截流后,将污水转输至新建污水厂进行处理,然而截流的方式大多会壅高合流制暗涵水位,清淤时封堵导流失效风险进一步加大。

针对箱涵清淤时伤亡事故频发的问题,目前多按照有限空间安全作业的相关技术措施开展安全保障工作,如“先通风、再检测、后作业”,井外人员通过对讲机与井内人员进行高频沟通以了解井下人员健康状况,井下操作人员携带实时气体检测仪,清淤作业过程持续通风等。

但是上述措施均要求专门配备高素质专业人员,未能充分考虑现场作业人员专业素养参差不齐,同时一旦人员在井内失事,井外无法得知井内情况,盲目施救,徒增伤亡。随着我国大多数排水管网进入运营阶段,主干排水箱涵清淤修复项目日趋增多,为确保箱涵清淤作业安全进行,保障下井工作人员的人身安全,设计一种适用于城镇主干排水箱涵清淤安全作业的系统迫在眉睫。

## 1 总体设计

城市主干排水箱涵清淤有限空间智慧管控系统设计包括系统架构及系统功能设计。

### 1.1 系统架构

箱涵清淤有限空间安全作业智慧管控系统设计采用物联网通用架构,主要包括感知层、传输层、数据处理层及应用层<sup>[8]</sup>,如图1所示。

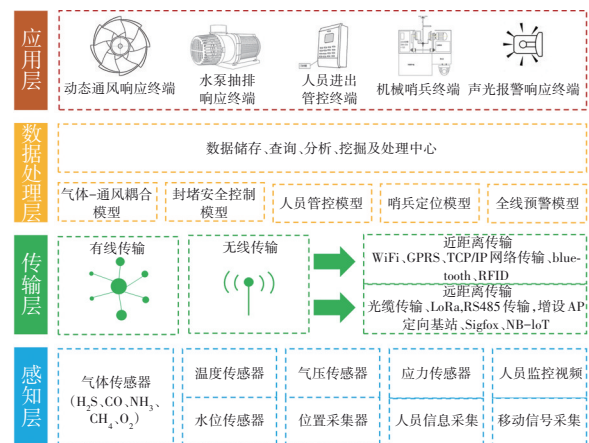


图1 平台组织架构

Fig.1 Platform organization structure

感知层主要由部署在指定区域或设备上的多源传感器组成,是系统的触角和神经末梢,负责感知和采集传感器周边环境的目标信息,具体包括作业面周边的硫化氢、一氧化碳、甲烷、氨气及氧气等关键性气体浓度指标,温度,气压,暗涵封堵板应变监测,暗涵作业人员作业实时画面,封堵段上下游水位,人员在暗涵内的实时位置,下井人员信息及机械哨兵移动输入信号。

传输层将感知层采集的信息传输至后台数据处理层,但由于箱涵内属于长距离线性有限空间,单次施工距离可达200 m以上,监测信息传输距离远,种类多,采集频率高,传输时延要求低,一旦网络出现丢包严重的现象,往往会造成不可预见的后果。因此,在近距离固定监测点(临近移动中控室的水位监测点、应力应变监测点、人员信息采集点等)多采用有线通信方式,而远距离固定监测点及移动监测点采用低能耗、传输可靠、传输距离远的LoRa无线通信方式,并在弯道区域局部加设基站,实现长距离信息稳定传输。

数据处理层以接收到的信息为中心,对信息进行储存、查询、分析、挖掘、处理等操作,并将处理结果输出至应用层。根据不同处理目标,数据处理层主要分为气体-通风耦合模型、封堵安全预警与控制模型、人员进出管控模型、机械哨兵定位模型、全线预警模型。

应用层是依据数据处理层处理后的决策矩阵自动响应终端群,针对中毒窒息爆炸、封堵失效、人员管控、后期救援等,设置了5大核心终端,具体包括动态通风响应终端、水泵抽排响应终端、声光报警响应终端、人员进出管控终端、机械哨兵移动终端。

## 1.2 功能设计

系统功能如图2所示。

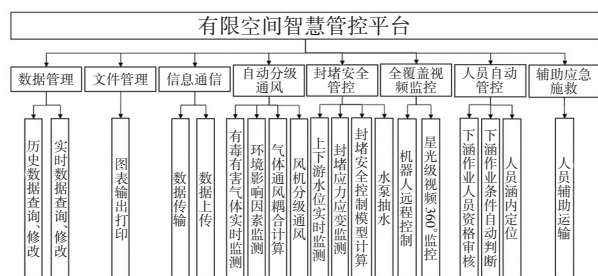


图2 有限空间智慧管控平台功能

Fig.2 Intelligent control platform for safe operation in limited space

针对箱涵清淤中有害气体浓度变化大、封堵失效后果严重、监护人员盲目施救及作业人员位置不清等风险,除了数据管理、文件管理及信息通信外,平台还针对性开发了以下功能:

① 自动分级通风。实时监测移动作业面的目标气体浓度,浓度正常时,自动控制风机持续通风,满足正常工作需求;当人员所在作业面的气体

浓度异常时,全线声光报警,风机切换至高频强通风状态,全线高频通风,直至降至稳定值,避免出现人员窒息、中毒或箱涵爆炸等情况。

② 封堵自动管控。当封堵应力出现异常时全线声光报警,待确认箱涵内人员全部撤离后,自动启动水泵,平衡两侧水位,减缓变形,避免封堵墙发生倒塌后,来水瞬时激增危及作业人员安全。

③ 全覆盖监控。机械哨兵可根据远程操作指令跟随作业面移动,实现人员作业全时段全方位监控,一方面可用于日常作业的远程监督,另一方面当人员失事后,可全面掌握暗涵内人员情况,减少盲目施救的风险。

④ 辅助应急施救。当人员出现晕厥、中毒等情况而难以自行移动时,可在箱涵内辅助吊运人员移动,将失去意识或无法移动的人员运输至出口处。

⑤ 人员自动管控。作业人员进涵作业时自动核实人员是否具备下涵作业资格,同时自动识别箱涵内是否具备下涵作业条件,当不具备时,禁止人员进入;人员在暗涵内作业时,自动定位人员位置;对人员作业时间进行监控,当同一班组的持续作业时间超过设定值时,警示人员撤离上涵休息。

## 2 监测点布设

信息监测点布设是否合理决定了采集的数据是否能够有效表征箱涵内危险源实时变化情况。大型排水箱涵清淤时,环境影响因素复杂,监测种类众多,监测点布设时应根据监测目标自身的特性进行靶向监测,务求及时准确采集最危险区域内的敏感信息。

### 2.1 布设原则

清淤过程中,有害气体在箱涵清淤作业面附近浓度最高,因此,对作业面敏感的指标监测点位需采用移动式,跟随作业面移动。而对作业面敏感性不强的指标监测点位采用固定式。

监测点布设如图3所示。

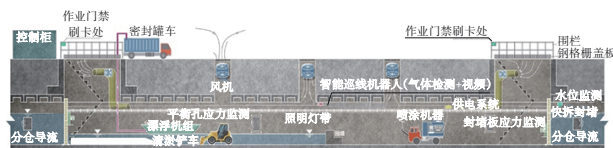


图3 监测点布设

Fig.3 Location of monitoring points



## 2.2 移动式监测点位

移动式监测点位主要包括气体监测点、视频监控点及人员在暗涵内的实时位置采集点。

在污水箱涵气体实际检测中,将甲烷、硫化氢、一氧化碳、氨气作为现场检测主要内容,另外考虑到氧气对爆炸和窒息有直接的影响,所以将氧气作为检测辅助内容。箱涵内常见的有毒易燃易爆气体摩尔质量(一氧化碳为28 g/mol,甲烷为16 g/mol,氨气为17 g/mol)均比空气摩尔质量小(空气为29 g/mol),因此箱涵上部是有毒气体浓度富集区域,氧气(摩尔质量为32 g/mol)比空气摩尔质量大,说明顶部氧气含量较少,同时为避免清淤过程中底泥飞溅污染传感器,移动式监测点应随动式部署在箱涵上方,为视频监控点提供较大的广角,最大限度实现无死角覆盖。综上所述,气体监测点、视频监控点集成至可跟随作业面移动的机械哨兵上方。

人员定位采用RSSI信号强度定位方案,在施工人员安全帽的帽檐嵌入RFID卡,并在入口处安装1台全向感应器,之后每间隔200 m左右、在距离地面2.0 m左右高度处安装1台RFID定向监测感应接收器。

## 2.3 固定式监测点位

固定式监测点位包括封堵应力应变监测点、水位监测点、下涵人员信息采集点及机械哨兵移动控制指令采集点。封堵应力应变监测点部署在上下封堵墙应力最集中或应变最大的区域,主要部署在封堵墙中部底层及墙体厚度明显变化的位置。水位监测点主要用于监测封堵段内及封堵段上下游的水位,其中封堵段内的水位监测点布置在已清淤侧,封堵上下游水位部署在封堵墙外。下涵人员信息采集点主要用于采集下涵人员信息及记录人员进出箱涵时间,部署在箱涵进出口处。哨兵移动控制指令采集点采集哨兵输入信号,用以控制哨兵移动,部署在控制室内。

## 3 模型开发

根据系统总体设计的要求,处理层核心模型共包括气体-通风耦合模型 $F$ 、封堵安全控制模型 $Y$ 、人员进出管控模型 $G$ 等。

### 3.1 气体-通风耦合模型 $F$

气体-通风耦合模型 $F$ 由有毒气体通风耦合子模型 $f_1$ 、易燃易爆气体通风耦合子模型 $f_2$ 及氧气通

风耦合子模型 $f_3$ 组成。

#### 3.1.1 有毒气体通风耦合子模型 $f_1$

污水箱涵内主要的有毒气体包括硫化氢、一氧化碳及氨气,上述三种气体可通过气体置换保持在低浓度进行控制,一是控制有毒气体浓度不超过浓度安全上限,二是限制有毒气体浓度在固定时间内的增长速度不超过通风置换的次数。

假设 $t_1$ 时 $g$ 种实测气体体积浓度为 $n_{1,t_1,g}$ , $g$ 种气体体积浓度值安全上限为 $N_{1,g}$ ,则有:

$$N_{1,g} = \frac{22.4}{M} \times N_{2,g} \times \frac{(273 + T)}{273} \times \frac{101325}{p} \quad (1)$$

式中: $g$ 分别为硫化氢、一氧化碳及氨气; $N_{2,g}$ 为测定的 $g$ 种气体体积浓度值安全上限,mg/m<sup>3</sup>;  $M$ 为气体分子质量; $T$ 为实测温度,K; $p$ 为实测压力,Pa。

气体类型评判值( $N_{2,g}$ )见表1。

表1 气体类型评判值

Tab.1 Gas threshold mg·m<sup>-3</sup>

气体类型	评判值
硫化氢	10
一氧化碳	30
氨	30

① 控制有毒气体浓度不超过安全上限:

当 $n_{1,t_1,g} \geq N_{1,g}$ 时,输出决策值: $f_1 = 3$ 。

② 限制有毒气体浓度在固定时间内增长速度,当气体浓度持续增长时,应根据气体浓度增长趋势,对应增加通风量:

当 $n_{1,t_1,g} < N_{1,g}$ 时:

$$f_1 = \begin{cases} 1 & \frac{n_{1,t_1+\Delta T,g} - n_{1,t_1,g}}{n_{1,t_1,g}} \leq 0 \\ 2 & 0 < \frac{n_{1,t_1+\Delta T,g} - n_{1,t_1,g}}{n_{1,t_1,g}} \leq 0.5 \\ 3 & \frac{n_{1,t_1+\Delta T,g} - n_{1,t_1,g}}{n_{1,t_1,g}} > 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $n_{1,t_1+\Delta T,g}$ 为 $t_1 + \Delta T$ 时 $g$ 种气体实测浓度,mg/m<sup>3</sup>。

#### 3.1.2 易燃易爆气体通风耦合模型 $f_2$

污水箱涵内易燃易爆气体主要是甲烷,甲烷浓度超过爆炸极限下限是发生爆炸的直接原因。气体流动速度越高,则甲烷爆炸下限越高,爆炸上限越低,当气体流动速度约等于0.85 m/s时,甲烷爆炸

下限和爆炸上限重合,任何大于此速度的甲烷-空气混合气体在同等条件下都不可能发生爆炸,因此清淤作业过程中,控制风速为 0.85 m/s,重点控制气体增长速度在可控范围内。

基于上述结论,假设  $t_1$  时甲烷气体体积浓度为  $C_{t_1}$  (单位:%),  $t_1 + \Delta T$  时甲烷气体体积浓度为  $C_{t_1 + \Delta T}$ ,则  $f_2$  模型如下式所示:

$$f_2 = \begin{cases} 0 & \frac{C_{t_1 + \Delta T} - C_{t_1}}{\Delta T} \leq 0 \text{ 且 } C_{t_1 + \Delta T} < 10 \\ 2 & 0 < \frac{C_{t_1 + \Delta T} - C_{t_1}}{\Delta T} \leq 0.5 \text{ 且 } C_{t_1 + \Delta T} < 10 \\ 3 & \frac{C_{t_1 + \Delta T} - C_{t_1}}{\Delta T} > 0.5 \text{ 且 } C_{t_1 + \Delta T} \geq 10 \end{cases} \quad (3)$$

### 3.1.3 氧气通风耦合模型 $f_3$

根据《有限空间作业指导书》要求,氧气浓度应控制在  $[19.5\%, 23.5\%]$ ,在浓度低于 19.5% 时,将导致作业人员头部、肺部和循环系统问题,浓度下降至 16% 以下时,将严重危及人体健康,当氧气浓度大于 23.5% 时,有限空间内为富氧环境,在实际箱涵清淤作业过程中,基本不存在氧气浓度超过 23.5% 的诱因,因此,在氧气通风耦合模型中,重点以控制氧气的浓度不低于下限要求及控制氧气浓度变化趋势为主、以控制氧气浓度上限要求为辅。

基于上述原则,假设  $t_1$  时甲烷气体体积浓度为  $O_{t_1}$  (单位:%),  $t_1 + \Delta T$  时甲烷气体体积浓度为  $O_{t_1 + \Delta T}$ ,则氧气通风耦合模型  $f_3$  如下式所示:

$$f_3 = \begin{cases} 0 & 19.5 \leq O_{t_1} \leq 23.5 \text{ 且 } |O_{t_1 + \Delta T} - O_{t_1}| < 0.5 \\ 2 & 19.5 \leq O_{t_1} \leq 23.5 \text{ 且 } 0.5 \leq |O_{t_1 + \Delta T} - O_{t_1}| \leq 2 \\ 3 & O_{t_1} > 23.5 \text{ 或 } O_{t_1} < 19.5 \text{ 或 } |O_{t_1 + \Delta T} - O_{t_1}| > 2 \end{cases} \quad (4)$$

### 3.1.4 气体通风耦合模型 $F$

气体通风耦合模型  $F$  见下式:

$$F = \begin{cases} A \cdot V_{\text{低}} & \max(f_1, f_2, f_3) = 0 \\ 1.5 A \cdot V_{\text{低}} & \max(f_1, f_2, f_3) = 2 \\ 2.0 A \cdot V_{\text{低}} & \max(f_1, f_2, f_3) = 3 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $A$  为箱涵断面面积,  $\text{m}^2$ ;  $V_{\text{低}}$  为低风量时设计风速,取 0.85 m/s。

## 3.2 封堵安全控制模型 $Y$

封堵安全控制模型  $Y$ ,主要包括水位溢流预警模型  $y_1$  和封堵-水位耦合模型  $y_2$ 。

### 3.2.1 水位溢流预警模型 $y_1$

水位溢流预警模型  $y_1$  见下式:

$$y_1 = \begin{cases} 0 & \frac{H_{\max} - H_{t_1 + \Delta t}}{\alpha \cdot \frac{s}{v}} > \frac{H_{t_1 + \Delta t} - H_{t_1}}{\Delta t} \\ 1 & \frac{H_{\max} - H_{t_1 + \Delta t}}{\alpha \cdot \frac{s}{v}} \leq \frac{H_{t_1 + \Delta t} - H_{t_1}}{\Delta t} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $H_{\max}$  为预警水位;  $\alpha$  为安全系数,取值为 2.0~3.0;  $v$  为人员撤离速度,取 0.6 m/s;  $s$  为人员距离出口位置;  $H_{t_1 + \Delta t}$  为  $t_1 + \Delta t$  时水位;  $H_{t_1}$  为  $t_1$  时水位。

### 3.2.2 封堵-水位耦合模型 $y_2$

封堵-水位耦合模型  $y_2$  见下式:

$$y_2 = \begin{cases} 0 & \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{t_1 + \Delta t}}{\alpha \cdot \frac{s}{v}} > \frac{\sigma_{t_1 + \Delta t} - \sigma_{t_1}}{\Delta t} \\ 2 & \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{t_1 + \Delta t}}{\alpha \cdot \frac{s}{v}} \leq \frac{\sigma_{t_1 + \Delta t} - \sigma_{t_1}}{\Delta t} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\sigma_{\max}$  为预警应力值;  $\sigma_{t_1 + \Delta t}$  为  $t_1 + \Delta t$  时应力;  $\sigma_{t_1}$  为  $t_1$  时应力。

$$Y = y_1 + y_2 \quad (8)$$

当  $Y=0$  时,表明情况正常;当  $Y=1$  时,表明水位上升速度过快或超过预警水位,启动声光报警,人员开始撤离;当  $Y \geq 2$  时,警告人员撤离,且涵内人员数量  $N=0$ ,启动水泵向封堵段内抽水。

## 3.3 人员管控模型 $G$

人员管控模型  $G$  包括准入管控  $g_1$ 、定位  $g_2$  及驱离  $g_3$  等子模型。

### 3.3.1 准入管控 $g_1$

首先提前输入具备有限空间作业资格的人员信息,搭建有限空间人员资格库,并发放人员 ID 卡,当人员进入刷卡时,通过识别 ID 号码,输出判断结果  $a$ ,其中,  $a=0$  表明人员在数据库内,  $a=1$  表明人员不在数据库内。之后,令:

$$g_1 = \max(F, Y, a) \quad (9)$$

当  $g_1=0$  时,人员刷卡方可进入,当  $g_1>0$  时,进入门禁无法开启。

当人员进入时人数计数  $N$ ,当人员离开时进行扣减,确保进入箱涵内的人数  $N$  与实际对应。同时记录不同人员的进入时间  $I_{m, \text{in}}$ ,如第  $m$  个人在 09:00 进入,则  $I_{m, \text{in}}=09:00$ 。

### 3.3.2 定位 $g_2$

箱涵的断面尺寸相较于路由长度而言,可近似地认为箱涵内人员呈一维直线型分布在以洞口为原点的线轴上,箱涵内的人员定位算法简化为直线距离计算。同时考虑到定位响应速度要求高,算法复杂度需尽量简化,因此优先考虑当前使用最为广泛的RSSI信号强度定位算法。其工作原理:用安装在现场的阅读器采集到的反向散射射频信号功率强度,对比发射出去的调制信号功率强度,根据信号的衰减程度来判断目标节点和阅读器之间的距离。

$$PR = \frac{PT}{r^n} \quad (10)$$

式中:PR为接收功率;PT为发射功率,是预定义的已知量; $r$ 为收发单元之间的距离; $n$ 为传播因子的次方。

为后续计算方便,两边取对数,得:

$$\lg r = \frac{\lg PT - \lg PR}{n} \quad (11)$$

式中:PT和 $n$ 等参数在定位环境下经过测试进行明确,其中PT按照 $r=1$ 时进行取值。

首先,将人员定位的RFID感应卡嵌入安全帽的帽檐位置,当人员佩戴装有RFID感应卡的安全帽进入隧道口时,洞口设置的感应接收器立即将读取到的信息发送至后台,服务器启动建档,并且位置信息为初始值0.01 m,之后每隔距离 $x$ 设置一个感应接收器,距离依次为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 。当人位于 $x_i, x_{i+1}$ 基站之间时,由于辐射信号随距离增加逐渐减弱,超过200 m后,误差超过5%,因此,仅考虑 $x_{i-1}, x_i, x_{i+1}, x_{i+2}$ 等接收器反应的数据,算出的距离数据分别为 $r_{i-1}, r_i, r_{i+1}, r_{i+2}$ 。

人员距离计算公式如下:

$$S = [0.2 \times (x_{i-1} + r_{i-1} + x_{i+2} + r_{i+2}) + 0.8 \times (x_i + r_i + x_{i+1} + r_{i+1})] / 4 \quad (12)$$

### 3.3.3 驱离 $g_3$

驱离 $g_3$ 判别条件有进入时间超过设定时间DT及出现异常情况。假设实时时间为AT,则当 $AT - I_{m, in} > DT (m=1, 2, \dots, N)$ 或当 $F > 0$ 或 $Y > 0$ 时, $g_3=1$ ,其余情况 $g_3=0$ 。当 $g_3=1$ 时驱动声光报警装置。

## 4 响应模块设计

### 4.1 机械哨兵终端

机器哨兵集成了远程控制移动终端、有毒易燃

易爆气体检测终端、视频监控终端、定位终端及应急救援辅助功能,如图4所示。

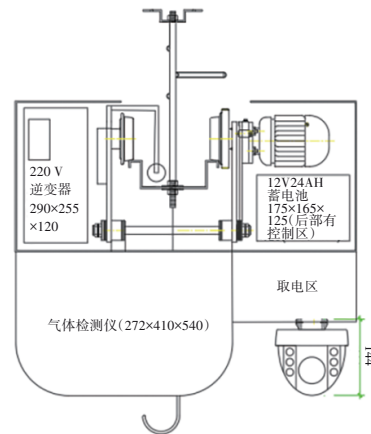


图4 机器哨兵示意

Fig.4 Machine sentry

远程控制移动终端主要是控制哨兵整体运动,同时考虑到后续载重要求(按照120 kg设计),借鉴电动葫芦的移动方式,将移动电机的正转和反转与控制器相连,通过控制器接收来自处理层的移动和后退信号。五合一气体检测终端将检测数据通过无线控制器发送至处理层。视频监控终端采用星光级视频监控,以满足暗涵低光度环境现状,同时可实现360°水平旋转和多角度放大缩小,可覆盖暗涵内顶板以下任一角落。应急救援辅助功能是在电动葫芦下方预留吊运人员的挂环,当人员失去意识时,可将人员装入提升网兜,将网兜与挂环连接,并通过远程控制移动出井,减少救援人员暴露在暗涵的救援时间以及因盲目施救造成的人员危险。

在定位终端中,将人员定位的RFID感应卡嵌入安全帽的帽檐位置,当人员佩戴装有RFID感应卡的安全帽进入隧道口时,洞口设置的感应接收器立即将读取到的信息发送至后台,服务器启动建档,并且位置信息为初始值0.01 m,之后每隔距离 $x$ 设置一个感应接收器,供电模块按照满足单次8 h(1台班)运行需求进行设计,优选大容量锂电池,用于终端供电。

上述各终端集成至一体后形成机械哨兵。哨兵放置于特制多功能轨道上方。厚度为5 mm,两侧滑道用于哨兵移动,中间放置风机及其他用电电缆,每隔0.5 m安装一个滑环,方便电缆安装和移动,通过吊杆固定在顶板下方0.5 m处,并在其上部安装12 V以下的灯带,方便平时照明。



## 4.2 动态通风响应终端

动态通风响应终端如图5所示,由多孔圆格栅井盖+轴流式风机+反喇叭口导流器组成。当处理层发出指令时,主要通过弱电控制强电实现风机的变频切换。控制柜安装在控制室,箱涵内安装供电电缆与风机相连。

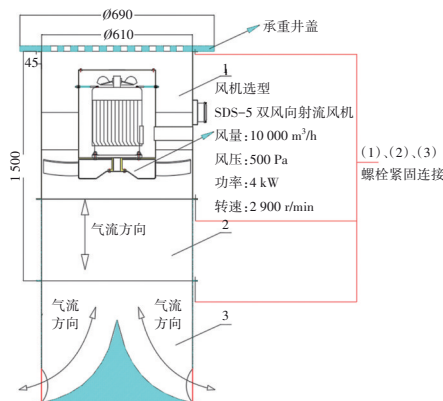


图5 动态通风响应终端

Fig.5 Dynamic ventilation response terminal

根据城市规划,排水箱涵内检查井分布距离多数为40~60 m,且大型排水箱涵多位于城市主干道路下方,多点占道打围,将影响城市交通运行,因此,采用轴流式大流量特制风机,将原有检查井盖更换为多孔圆格栅井盖,由于通风时的竖向风向转变为横向扩散,考虑到流态问题和减少风阻,在检查井底部安装了反喇叭口导流器。

## 4.3 水泵抽排响应终端

水泵抽排响应终端采用2台水泵,一台水泵部署为从上/下游向暗涵内抽水,另一台水泵部署为从暗涵内向上/下游抽水,水泵的启停通过安装在终端的控制器进行控制。

## 4.4 声光报警响应终端

声光报警每隔50 m安装一处,采用有线连接,当接收到声光报警信号后,进行紧急报警。

## 4.5 人员管控终端

人员进出管控终端安装在箱涵入口处,通过门禁识别进入,人员出箱涵时无需识别,方便突发情况时人员迅速撤离。

# 5 系统应用

## 5.1 工程概况

该系统在湖北省武汉市黄孝河机场河流域综合治理一期项目得到推广应用。该项目主要进行

城市主干排水管道、箱涵清淤修复,其中管道清淤修复35.2 km,箱涵清淤修复29.0 km,该系统主要用于箱涵清淤修复阶段。

## 5.2 监测点部署

箱涵清淤修复时施工流水线单位约为500 m,部分现场监测点及平面部署如图6所示。

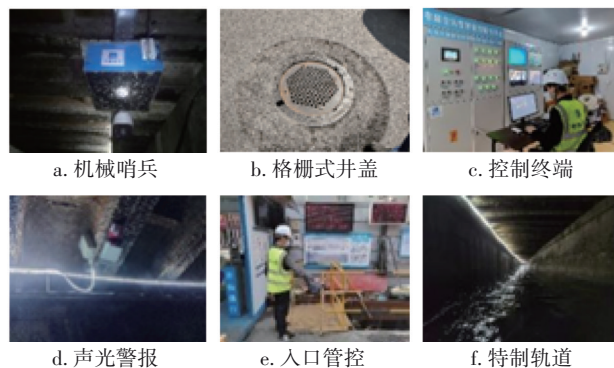


图6 现场监测点实景

Fig.6 Picture of field monitoring points

## 5.3 应用效果分析

2020年8月—2022月1月,该系统应用于29.4 km箱涵清淤有限空间作业安全管控,覆盖了有限空间作业人员4.6万余人次,运行时长达 $6.13 \times 10^4$  h,紧急报警196次,其中,气体报警自动响应184次,水位报警12次,封堵报警0次,未发生人员伤亡事故,实现人员0伤亡。在人员应急演练过程中,当人员在箱涵内出现昏迷晕厥后,仅需1人下井便能完成施救,相较于传统多人下井施救方式,有效减少了下井人员数量、缩短了井下救援时间。

## 6 结论与展望

从总体设计、监测点布设、模型开发、终端及系统应用等5个方面详细阐述了大型排水箱涵有限空间安全作业智慧管控系统的开发流程和应用过程,介绍了系统的开发思路,通过系统架构设计和功能设计,建立了适用于大型排水暗涵清淤安全作业的通用型管控系统。在29.4 km大型管涵清淤作业的应用实践表明,该系统有效降低了大型管涵清淤作业风险,减少了盲目施救风险。因小型排水管涵清淤作业单位清淤作业时间短,流动性大,本系统实用性不强,下阶段将进一步考虑车载式移动系统,同时进一步改进机械哨兵,探索无人机替代解决方案,避免井下安装吊轨作业。

## 参考文献:

- [1] 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 management of an urban river[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(10): 115-118 (in Chinese).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] 刘艳,杨春丽. 有限空间作业事故特征及其原因分析[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(3): 141-146.  
LIU Yan, YANG Chunli. Characteristics and causes of accident in confined space [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(3): 141-146 (in Chinese).
- [5] 王山,傅贵,秦妍,等. 有限空间作业事故原因及预防方法研究 [J]. 工业安全与环保, 2012, 38(10): 57-59.  
WANG Shan, FU Gui, QIN Yan, *et al.* Study on causes and preventions for confined space accidents [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2012, 38(10): 57-59 (in Chinese).
- [6] 黄郑华,李建华,边成,等. 有限空间作业危险因素分析与安全措施[J]. 中国公共安全(学术版), 2009(4): 61-65.  
HUANG Zhenghua, LI Jianhua, BIAN Cheng, *et al.* Analysis of risk factors and safe measures in limited space operations [J]. China Public Security (Academy Edition), 2009(4): 61-65 (in Chinese).
- [7] 许小冰,王怡,王社平,等. 城市排水管道中有害气体控制的国内外研究现状[J]. 中国给水排水, 2012, 28(14): 9-12.  
XU Xiaobing, WANG Yi, WANG Sheping, *et al.* Research status of harmful gas control in urban drainage pipeline at home and abroad [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(14): 9-12 (in Chinese).
- [8] 孙其博,刘杰,黎彝,等. 物联网:概念、架构与关键技术研究综述[J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(3): 1-9.  
SUN Qibo, LIU Jie, LI Shan, *et al.* Internet of things: summarize on concepts, architecture and key technology problem [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010, 33(3): 1-9 (in Chinese).

作者简介:胡茂锋(1987-),男,湖北宜昌人,本科,工程师,主要从事水环境综合治理、市政污水处理工程设计与施工管理工作。

E-mail: 895110830@qq.com

收稿日期: 2022-03-01

修回日期: 2022-05-16

(编辑:衣春敏)

落实绿色发展理念,全面推行河长制