[智能监测]

电力电缆工井作业安全实时智能预警装置的研发

文/洪旺松
上海地铁维护保障有限公司供电分公司

随着城市轨道交通的不断发展，在密闭空间内的作业也日益增多，作业安全是一个极为重要的问题，传统的工作模式难以满足现实需求。研制了一套应用于有限空间内集照明、防爆气体实时监测及通风一体化便携式装置。实现了照明续航能力的持续化、有毒有害气体监测的实时化、鼓风机调速的自动化及声光报警系统的同时化，能有效保障有限空间内作业人员的生命安全。通过在现场实际应用，证明了该装置的可靠性和实时监测的准确性。

在地铁供电系统中，普遍存在电缆夹层、电缆沟及电缆井等区域，此类区域往往进出口较为狭窄，空间全封闭或者部分封闭，导致密闭空间内可能存在大量有毒有害、易燃易爆等气体，严重威胁了作业人员的生命安全。由于有限空间内光线弱，需要携带照明器具工作才能保障作业人员的安全。

传统作业流程为：作业人员井下作业时，需携带照明灯具，通风系统应保持常开，作业1 h后，重新测定井下气体是否合格，合格后方可继续进行作业。存在的问题有：

1）作业人员携带的头挂式照明灯具由于电池容量有限，长时间作业时续航能力弱，造成照明的亮度有时无法满足安全规程要求；

2）井下有毒有害和易燃易爆气体含量上升时，无法进行实时检测，一旦井下气体不满足安全作业要求，则作业人员的生命安全受到严重威胁。尤其是作业点附近有垃圾站、燃气管道等危险源时，井下有毒有害、易燃易爆气体含量很有可能短时升高。

3）规程规定井下作业时风机需要保持常开，但由于鼓风机一般使用不可调速的交流电动机，井下有毒有害气体突然超标时，风机无法快速将有毒有害气体排出，作业人员生命安全无法得到保障。

为了解决传统作业中存在的安全隐患，本文中开发一套电力电缆工井实时智能监控安全预警装置，该套装置实现了照明系统的高亮度长时间续航，井下有毒有害和易燃易爆气体的实时智能监测，井上井下数据的实时传输，风机的自动智能调速等功能，最大程度地保障了井下作业人员的安全。

装置系统架构设计

该装置使用效果图如图1所示。①在开启工井井盖后，鼓风机正常起动，对井内吹风，将井外新鲜空气与井内有毒有害气体进行交换；②将LED灯和气体检测装置放入到工井中进行气体检测，检查井内有毒有害气体是否超标；③若井内气体含量正常，则将井下检测数据通过无线模块实时传输到井上接收系统，便于监护人员的查看，风机保持正常转速；④若井内有毒有害气体超标，则将井下检测数据通过无线模块实时传输到井上接收系统，井内井上同时声光报警，工作负责人通过井上显示装置可快速组织井下作业人员、监护人员注意快速撤离，此时风机接收到气体含量超标信号，增加转

速，将井下有毒有害气体快速排出；⑤井下进行接头制作时，若温湿度传感器检测到井下湿度含量超标，无法满足接头制作要求时，则增加转速，加快井下空气流通，降低湿度含量。

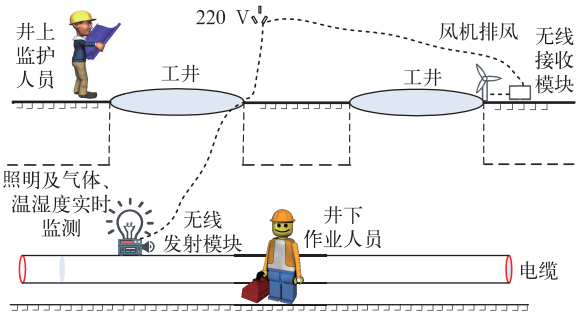

图1　系统功能效果图

该装置的系统逻辑流程图如图2所示，可实现多种工况下的调速功能。有毒有害气体、温度及湿度的实时检测，保证了作业人员的生命安全，同时也为环境条件是否满足作业要求提供了数据支撑。

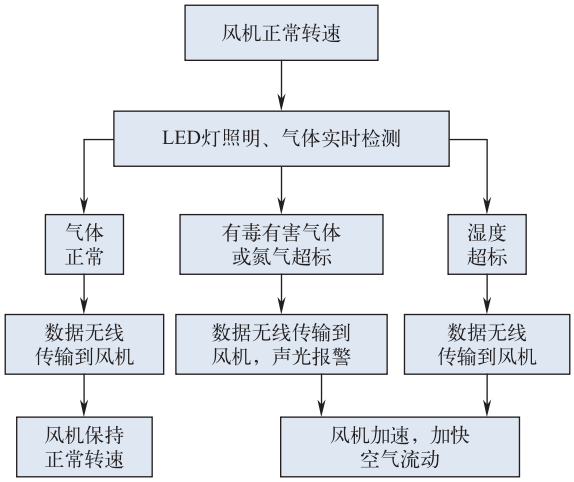

图2 系统逻辑流程图

装置各模块设计分析

1. 照明系统的设计

下井作业时，由于并未安装照明系统，需携带足够的照明工具。鉴于电缆工井为特殊的工作地点，安全规定对使用的照明灯具也做出了详细的要求：电压等级为12 V，照明为冷光源，要满足相应的防潮防爆要求。

此次选择的照明灯具为BFC8183-12 V LED免维护防爆灯，适用于廊道、隧道等场所安全照明要求，用于各种室内室外工作场所，具有优良的防爆性能、使用寿命长达100 000 h及能耗低等特点。

由于规程规定室内照明亮度一般不得低于10 lx，选用LED灯功率为15 W，通光亮约为1 300 lm，根据公式平均照度（Eav）=总通光亮×利用系数CU×维护系数MF/区域面积。

其中，室内利用系数一般取0.4；维护系数一般取0.7～0.8；区域面积取工井大小12 m×2.5 m；因此，平均照度为13.87 lx。满足规程规定的照明亮度要求。

2. 气体检测系统的设计

电缆井作业属密闭场所的作业，进口和出口比较小，空气不能正常的循环，作业空间也较小，通风不良，容易导致安全事故。由于井下积水中存在一些有机物，这些有机物会发生分解反应，导致有毒有害气体不断产生，其中危害最大的是CO、H_2S及CH_4等，可能导致作业人员中毒和缺氧窒息。

O_2、H_2S、CO及CH_4四种气体密度不一样，静态下按照密度大小分布，有毒有害气体有所分层，因此考虑重新进行气体传感器的优化布局，便于快速检测到不同密度大小的气体。因此，可以将传感器设计成可拉伸式，传感器按照气体密度高低分布。

实际情况下，井下工作时风机保持常开，井内气体处于流通状态，有毒有害气体不再按照密度大小分层分布，而是均匀分布，因此，气体传感器可以直接进行气体监测，传感器位置可不用高低分布。监测模块技术指标见表1。

表1　气体及温湿度检测指标

	O_2	H_2S	CO	CH_4	温湿度
检测精度	4% FS	10% FS	10% FS	±3% FS	±0.4 ℃ ±3% RH
响应时间	<15 s	<15 s	<15 s	<10 s	7 ms 17 ms

单片机作为整个系统的核心运算器件，其性能决定了运算的速度和准确度，此次选择STM32单片机。显示模块通过总线接口显示各个气体模块和温湿度的数值，选择KTM043AL01，显示更加快速可靠。

3. 无线传输系统的设计

该模块型号E50-TTL-500是一款170 MHz直插型无线串口模块（UART），如图3所示，半双工，收发一体，透明传输方式，发射功率500 MW，工

作在148~173.5 MHz 频段（默认170 MHz），TTL电平输出，兼容3.3 V与5 V的IO口电压，具有空中唤醒功能（超低功耗）。

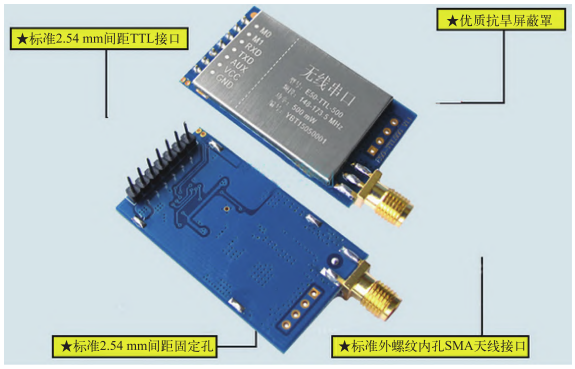

图3　E50-TTL-500无线模块

模块具有软件FEC前向纠错算法，其编码效率较高，纠错能力强，在突发干扰的情况下，能主动纠正被干扰的数据包，大大提高可靠性和传输距离。在没有FEC的情况下，这种数据包只能被丢弃。

模块具有数据加密和压缩功能。模块在空中传输的数据具有随机性，通过严密的加解密算法，使得数据截获失去意义。而数据压缩功能有概率缩短传输时间，减小受干扰的概率，提高可靠性和传输效率。

鉴于应用于工井内无线数据传输，因此选择FSK数字调频技术较为合适，满足传输距离要求，数据传输可靠，经济性较好。

4. 通风系统的设计

风机在开起井盖后需对井内进行持续送风，一旦井内有毒有害气体超标，需要加快转速，在最短的时间内将有毒有害气体清除；在制作电缆接头时，若井下湿度超过安全规定，会对电缆接头的可靠性产生一定的影响，此种情况下同时也需要加速吹风，降低井下湿度，保证接头制作的环境要求达标。本项目选择风机为低噪声轴流风机，其详细参数见表2。

表2　风机技术参数

低噪音轴流风机			
型号	SF3.5-4	电压/V	220
机号	3.5 A	频率/Hz	50
功率/kW	0.25	流量/（m^3/h）	4 000
转速/（r/min）	1 450	全压/Pa	100

低噪声轴流风机如图4所示。该风机适用于工矿企业、民用建筑的壁挂排气、岗位送风及管道通风。也应用于化工、轻工、食品、医药、冶金、电站和交通等工作场所及仓储的通风空调系统。

图4　低噪声轴流风机

调速器选择DFL-HJ02型变频器，电源电压220 V，频率50 Hz，额定功率1.5 kW，调频范围为0.01～400 Hz，采用空间电压矢量SVPWM控制方式，可实现任意V/F控制。控制COM和FWD端口的接通和关断可实现风机的起动和停止；将FV和ACM端口外接单片机控制DA模块给出的模拟电压，可实现V/F控制和风机的调速，变频器如图5所示。

图5　变频器

系统软硬件设计

该设备通过S1选择开关选择该设备的工作状态，包括主发送方和从发送发。

检测端模块如图6所示，主发送方在上电开机后，STM32读取Flash中的报警门限，面板显示报警门限3 s，并将报警门限通过串口发送到无线发射模块。STM32每隔1 s分别向CH_4检测模块和温湿度检测模块发送查询命令。STM32接收到新的检测值后更新内部检测变量。STM32循环检测对检测模块、H_2S检测模块及CO检测模块进行数据采样，根据采样结果查询对照表，更新内部检测参数。当内部检测参数发生变化时，STM32通过数据总线更新LCD面板显示，并通过串口将最新的检测数据发送到无线发射模块。当检测参数高于报警门限时，进行声音和警示报警。

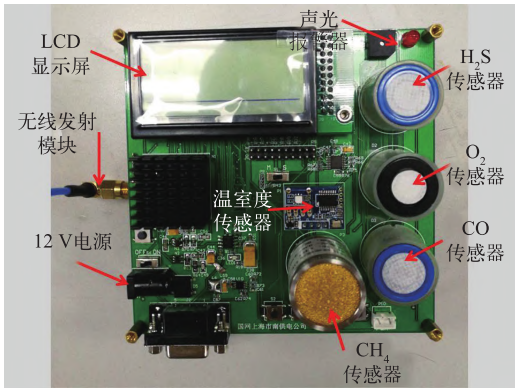

图6　检测端模块

接收端模块如图7所示，接收方上电开机后，STM32通过无线模块接收主发送方命令。通过对主发送方命令的解析，更新各检测参数和报警门限。当接收到的检测参数高于报警门限时，进行声音和警示报警，并输出控制风控的电压。该软件的逻辑流程图如图8所示。

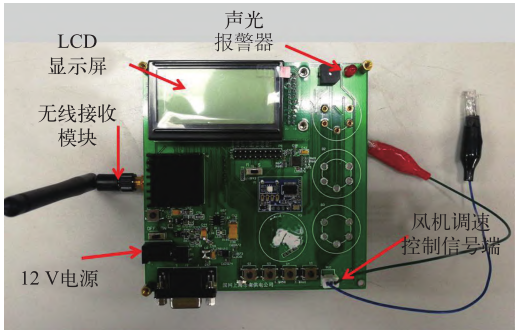

图7　接收端模块

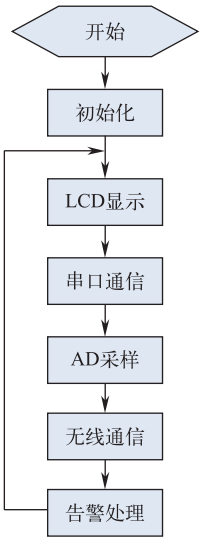

图8　软件流程图

应用效果

电力电缆工井实时智能监控安全预警装置经现场使用效果良好，照明系统亮度及防爆等级满足安全规定要求；有毒有害气体及温湿度检测数据准确，可实现对井下气体、温湿度的实时智能监测；声光报警系统良好，可同时实现井上、井下报警，提醒井上和井下人员注意采取安全措施；无线数据传输良好，可将井下数据实时、快速及准确传输到井上接收装置，便于井上人员实时查看；通风系统可实现灵活、自动调速，在井下气体含量超标时，接收装置收到井下告警信号，可进行转速的快速调节，最短时间内将有毒有害气体排除。

在电缆化率日益增高的今天，井下作业越来越多，应用于工井内集照明、有毒有害气体实时监测及通风一体化便携式装置的研发，可最大程度保证井下作业人员的生命安全，也为井下接头制作环境是否满足安全要求提供判断的依据。该装置的研发，推动了电缆运维的智能化发展，具有广阔深远的应用前景，适用于变电站防火、天然气管道气体监测等，可在行业内及其他行业推广。

结束语

本文开发了一套电力电缆工井实时智能监控安全预警装置，实现了工井下照明、有毒有害气体的实时智能监测以及通风一体化的设计。采用直流12 V电压供电，保证了照明的持续性和亮度要求；实现了井下有毒有害气体的实时智能监测，同时将监测的数据实时发送到地面，便于工作负责人的查看与监护，数据传输准确；通风系统的一体化设计，实现了鼓风机的自动智能调速，可最短时间内完成有毒有害气体的排除，并且通过调节风量使工井内湿度符合接头要求，保证作业人员的安全以及接头的可靠。EA

（收稿日期：2022-02-24）

参考文献

[1] 孙暄，周年荣，唐立军．基于无线传感器的防触电预警模型设计[J]．电气应用，2020，39(3)：88-91．

[2] 李红明，谭其勇，陈战，等．基于激光光声光谱技术的变压器绝缘油故障气体在线监测系统研究[J]．电气应用，2020，39(4)：67-70，96．