地下矿山安全智能管道油料垂直输送系统设计研究*

余洪伟[1,2,3],陈森[1,2,3],谭一帆[1,2,3],周建[1,2,3],夏浩宇[1,2,3]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012;
3.国家安全生产长沙矿山机电检测检验中心, 湖南 长沙 410012)

摘要:为研究地下矿山多中段管道油料垂直输送系统的安全性设计和智能化设计,建立了安装过程中最大推力和单根杆长的数值关系模型及不同截面尺寸、不同长度的垂直输油管道动态振动分析模型;构建了油料输送系统水锤效应和泄压输送数值模型,研究分析了不同输油流量和不同关阀时间条件下水锤压力动态响应特性。结果表明:单根管道长度在某一特定值时,安装推力随着管道直径增大而急剧增大;采用管道填砂方法可以减小主管因气泡激励引起的振动;减小输油流量或增大关阀时间可以有效降低水锤压力。同时提出了智能加油技术、智能调度技术、智能监测技术、智能消防和自动灭火技术等智能化设计方案,对深入研究管道油料垂直输送系统的安全智能设计具有重要作用。

关键词:地下矿山;管道油料输送;泄压输送;安全设计;智能化设计

中图分类号:TD52 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)06-0219-10

Research on the Design of an Safety Intelligent Vertical Pipeline Oil Transportation System for Underground Mine

YU Hongwei[1,2,3], *CHEN miao*[1,2,3], *TAN Yifan*[1,2,3], *ZHOU Jian*[1,2,3], *XIA Haoyu*[1,2,3]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.State Key laboratory of Metal Mine Safety Technology, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Changsha Mine Mechanical and Electrical Testing Center for National Safety Production, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: In order to study the safety design and intelligent design of multi-stage pipeline oil vertical transportation system in underground mines, the numerical relationship model between maximum thrust and single rod length in the installation process and the dynamic vibration analysis model of vertical oil pipeline with different section sizes and different lengths were established. The numerical model of water hammer effect and pressure relief transportation of oil transportation system was built, and the dynamic response characteristics of water hammer pressure under different oil flow and different valve closing time conditions were studied and analyzed. The results are as follows. Firstly, when the length of a single pipe is at a certain value, the installation thrust increases sharply with the increase of pipe diameter. Secondly, the pipe sand filling method can reduce the vibration of the main pipe caused by bubble excitation. Thirdly, reducing the oil flow or increasing the valve closing time can effectively reduce the water hammer pressure. At the same time, the intelligent design schemes of intelligent refueling technology, intelligent dispatching technology, intelligent monitoring technology, intelligent fire protection and fire automatic extinguishing technology are proposed, which plays an important role in the in-depth study of the safety intelligent design of pipeline oil vertical transportation system.

Key words: Underground mine, Pipeline fluid transportation, Pressure relief transportation, Safety design, Intelligent design

0 引言

井下油料输送是金属非金属地下矿山生产的一个重要环节[1-2],传统的无轨油料运输设备不仅车辆本身存在较大安全风险,而且在运输过程中还会产生大量尾气排放。尤其对深井矿山,油料运输占用斜坡道的时间长,井下加油调度困难,严重影响斜坡道的运输效率和运输能力。

* **收稿日期**:2025-03-21
基金项目:金属矿山安全技术国家重点实验室项目(WKZB2412BJ0402108)
作者简介:余洪伟(1985—),男,安徽安庆人,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为矿山机电装备安全和测试技术。E-mail:447918297@qq.com

矿山油料管道垂直输送系统是一种新型的矿山井下油料输送方式,运输效率高、安全性高、服役时间长,不仅可以彻底解决深井矿山油料运输效率低、加油时间长、安全隐患多等问题,还能实现智能油料输送、井下无人加油,大幅提高井下无轨车辆作业的安全生产水平[3-5]。目前广东凡口铅锌矿、安徽草楼铁矿、李楼铁矿、安庆铜矿等国内矿山已经建立井下油料管道垂直输送系统,向井下最大输送深度为680 m,金川集团龙首矿的井下油料管道垂直输送系统正在建设中,现设计输送深度约为515 m,后期设计输送深度约为750 m。国外谦比希铜矿最大油料管道垂直输送深度为980 m。

目前国内外对大落差垂直油料管道的设计实施方案和操作管理经验都较少[6-8],各矿山设计的管道油料垂直输送系统形式多样,技术参数参差不齐,智能化程度不高,管道油料垂直输送系统的安全性设计和智能化设计还没有系统性的设计依据。本文以地下矿山多中段管道油料垂直输送系统为研究对象,提出管道油料垂直输送系统的安全可靠性、智能化的设计理论和关键技术设计方案,旨在为地下矿山管道油料垂直输送系统安全智能设计提供技术支撑,促进管道油料垂直输送系统在金属非金属地下矿山的推广使用。

1 地下矿山管道油料垂直输送系统

油料管道垂直输送系统的主要组成部分包括地表撬装油站、输油管道、井下储油罐、井下加油站、控制阀(减压阀、调节阀、截止阀等)、流量计、监测系统和控制系统等。图1为一种封闭型地下矿山管道油料垂直输送系统,在输油管道外安装有防护套管,套管采用水泥浇筑方式固定于井筒中,通过输油管道可向井下输送柴油、液压油和润滑油。

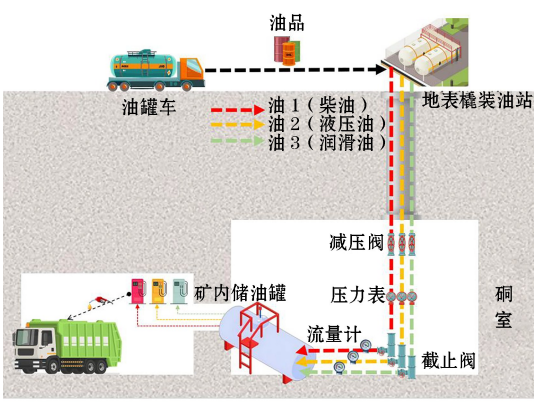


图1 地下矿山封闭型管道油料垂直输送系统

Fig.1 Closed vertical pipeline oil transportation system for underground mine

对于大中型矿山,往往一个中段难以满足井下无轨车辆的加油需求,因此在各中段设置井下储油罐和加油站,同时向多中段输送不同油品。地下矿山多中段管道油料垂直输送系统如图2所示。



图2 地下矿山多中段管道油料垂直输送系统

Fig.2 Vertical pipelines oil transportation system for multi section in underground mines

2 安全性设计

2.1 输油管道设计

依据《石油天然气工业 管线输送系统用钢管》(GB/T 9711—2023)的要求,输油管道选型时要综合考虑:管道壁厚应满足输油稳态压力和瞬态冲击的力学需求,壁厚不应小于5 mm;较长输油管道的壁厚选择要考虑整体刚度,避免在制作、转移、安装过程中发生局部破损;采用焊接接头连接时,管道外径、壁厚应与相应压力等级的接头匹配,以便于保证焊接质量,输油管道的稳定性与输油管道在套管中的布置、连接和固定方式密切相关。为了减少输油管道总长度,优先选择管道垂直布置方式。

2.1.1 输油管道的安装、连接和固定

井筒与套管外壁应保证足够的间隙余量,建议设计单边间隙不小于10 mm,以保障保护套管逐段焊接下放的顺利实施。保护套管端部外边缘倒坡口、下放时逐段对焊,套管下放完成后,外壁与井筒内壁间应注浆固化以稳定套管。输油管道的连接方式采用对焊或“螺纹连接+焊接”的形式,逐段下放连接。以双管道固定连接方式为例,管道整体采用钢圈进行固定于套管内,管道之间采用木块或其他方式进行隔离,如图3所示。

输油管道与保护套管之间的设计间隙不宜过大,以便能够形成断续自然贴合约束以稳定内管。当内管与保护套管之间间隙过大时,应考虑采用填砂方式以稳定内管,可以很大程度上减小外力激励产生的振动,如图4所示。

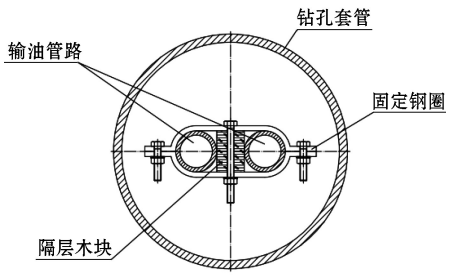


图 3 双管道固定方式

Fig.3 The fixing method of dual pipelines

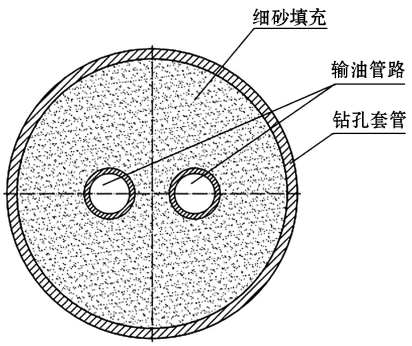


图 4 管道填砂约束方式

Fig.4 Constrained method of sand filling in pipelines

输油管道首尾两端的定位约束采用一端刚性固定、另一端挠性约束(悬臂支撑、弹簧支撑等),挠性约束可以补偿长期使用过程中因环境温度变化、振动等原因造成的管道变形,如图 5 所示。

2.1.2 安装稳定性分析

整个输油管道由大量单根管道逐段拼接而成,在安装过程受到摩擦阻力影响,在安装过程中某根管道的向下推力接近于静摩擦力时,该根管道处于受压状态,对于细长的管道,容易造成管道失稳或变形,为确保管道安装过程的稳定性,应对单根输油管道安装推力进行分析。

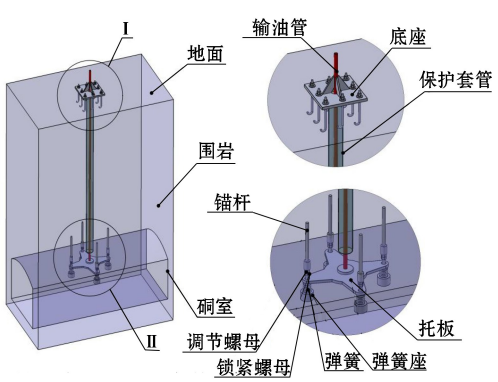


图 5 管道两端定位约束

Fig.5 Positioning constraints at both ends of the pipeline

基于压杆稳定理论,假设细长的输油管道为大柔度压杆,管道的临界应力 F_{cr}:

$$F_{cr}=\sigma_{cr}\cdot A \tag{1}$$

$$\sigma_{cr}=\frac{\pi^2 Ei^2}{(\mu l)^2} \tag{2}$$

$$i=\sqrt{\frac{I}{A}} \tag{3}$$

式中:σ_{cr}为临界屈服强度;A 为管道的截面面积;E 为杨氏模量;l 为杆长;I 为管道横截面的惯性矩;i 为横截面的惯性半径;n_{st}为安全系数;μ 为长度因数。

对于圆形管道,管道横截面的惯性矩 I 可按式(4)计算。

$$I=\frac{\pi}{64}(D^4-d^4) \tag{4}$$

管道临界应力应满足式(5)。

$$\frac{F_{cr}}{F_s}\geqslant n_{st} \tag{5}$$

管道受压平衡时,最大推力 F 等于最大静摩擦力 F_s,在避免安装过程中失稳的前提条件下,根据式(1)至式(5),可推导出最大推力和单根杆长的关系:

$$F\leqslant\frac{\pi^2\cdot E\cdot I}{\mu^2\cdot n_{st}\cdot l^2} \tag{6}$$

分别以内径 25 mm、38 mm、60 mm 3 种输油管道为例,最大推力和单根杆长的计算结果如图 6 所示。结果表明,最大安装推力与单段管道长度成反比关系,与管道内径成正比关系,在单根管长约小于 7 m 时,安装最大推力随着管道直径增大而急剧增大。因此,在选择管道规格和单根管长时应根据实际情况进行设计,在保证正常施工的前提下尽量减小安装推力,避免安装时管道失稳或者造成其他后果。

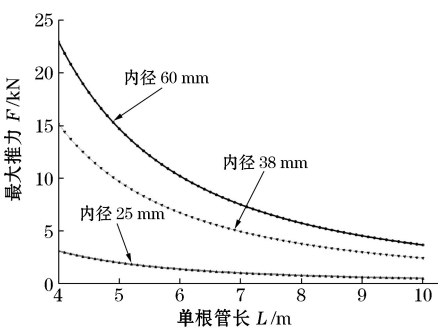


图 6 最大推力和单根杆长的计算结果

Fig.6 Calculation results of maximum thrust and single rod length

2.1.3 主管动态稳定性分析

长距离的输油管道,由于外界的随机激励或管道内部不稳定的二相流冲击管壁、管道内部气泡破

裂等原因,会造成管道振动。采用填砂方式的输油主管可以不考虑外界的随机激励因素,管内也无二相流冲击,本文主要考虑管道内部气泡破裂对管道稳定性的影响。

根据气泡内外压强差计算公式,可推导出气泡内外压力差 ΔP 的计算式,见式(7)。

$$\Delta P=\frac{2\gamma}{r} \tag{7}$$

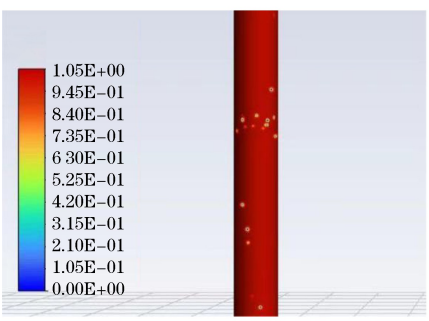
式中:γ 为柴油的表面张力系数;r 为气泡半径。

气泡在受到水锤压力影响时,气泡外部压力快速上升导致气泡炸裂,其释放能量 ΔE 的计算见式(8)。

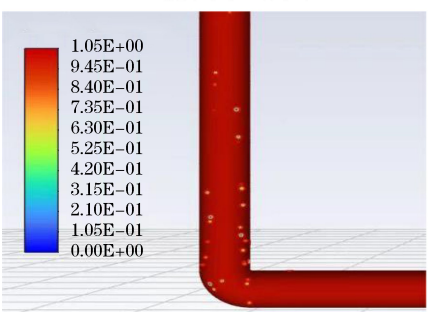
$$\Delta E=(\Delta P_2-\Delta P_1)\cdot V \tag{8}$$

式中:ΔP_2、ΔP_1 为气泡破裂前、后压力差;V 为气泡体积变化量。

当输油主管内压力发生突变时,气泡外部压力快速上升导致气泡炸裂,且气泡破裂具有随机性,给输油主管带来随机振动激励,造成管道产生随机振动。通过气泡在主管中部、底部集中破裂引发主管振动这两种极端情况,对 3 种不同截面尺寸、两种不同长度的垂直主管结构稳定性建立了输油管道气泡振动仿真计算模型,如图 7 所示。



(a) 气泡集中于主管中部



(b) 气泡集中于主管底部

图 7 输油管道气泡振动分析模型

Fig.7 Analysis model of bubble vibration in oil pipeline

在输油主管中随机产生 1~4 mm 气泡,所有气泡在主管中部和底部 5 s 时间内随机破裂,分别对 310 m 和 750 m 垂直主管进行主管振动应力仿真计算。数值仿真结果见表 1 和表 2。

表 1 310 m 主管振动应力仿真结果

Table 1 Simulation results of vibration stress of 310 m main pipe

主管内径/mm	中部振动最大应力/MPa	底部振动最大应力/MPa
25	15.65	16.40
38	17.43	18.63
60	18.93	22.92

表 2 750 m 主管振动应力仿真结果

Table 2 Simulation results of vibration stress of 750 m main pipe

主管内径/mm	中部振动最大应力/MPa	底部振动最大应力/MPa
25	41.46	42.25
38	43.12	43.17
60	45.01	45.48

综合表 1 和表 2 计算结果可知:对于同种长度的垂直管道,不同内径管道的最大振动应力随管径增大依次有所增大,但变化非常小;管径越大,随着垂直主管长度的增加,管道受到的最大振动应力将大幅提高,中部与底部振动激励的情况基本一致。

以内径为 60 mm、立管长度为 750 m 的填砂管道为例,进行振动仿真计算,给定持续 5 s 的气泡模拟振动激励,仿真结果如图 8 所示。

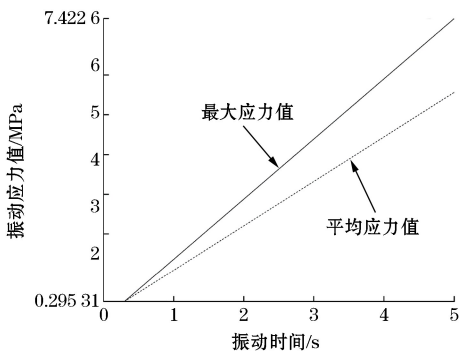


图 8 填砂输油主管振动应力仿真结果

Fig.8 Simulation results of vibration stress in sand filled oil pipeline

管道最大振动应力只与气泡振动时释放的振动激励大小有关,与管道的尺寸关系不明显,由于有细砂的缓冲吸能,管道受到的应力相比于不填砂主管大幅度减低。因此,采用填砂方法对管道进行约束可以有效减小主管因气泡等外源激励引起的振动。

2.2 水锤效应抑制技术

对于深井垂直管道油料垂直输送系统,在阀门关闭过程中,阀前会产生正水锤效应。阀门前正压水锤主要是由于阀门突然关闭,流体在阀门前由于惯性压缩引起。这种水锤效应会导致噪声和振动,造成输油管道系统破坏。

根据流体连续性方程,并考虑水体和管壁的弹性模量后,可计算出水锤波的传播速度 a(见式(9))。

$$a=1/[\rho/(gK)+D\rho/(gE\delta)]^{1/2} \tag{9}$$

式中:ρ 为水的密度;g 为重力加速度;K 为水的体积弹性系数;E 为管道的弹性模量;D 为管道的直径;δ 为管道的壁厚。

依据朱可夫斯基(Joukowsky)理论,在快速打开或关阀门时,某一给定时刻的压差计算见式(10)。

$$H-H_0=a(V-V_0)/g \tag{10}$$

式中:H_0 为稳定流动状态时的水头;V_0 为稳定流动状态下的流速;H 为阀门操作后某一给定时刻的水头;V 为阀门操作后某一给定时刻的流速。

当阀门全部关闭时,$V=0$,则 $H-H_0=aV_0/g$,即水锤引起的最大压差。

在阀门慢开或慢关的情况下,阀门引起的水锤现象,可以简易计算为式(11)。

$$H-H_0=1+n[n\pm(n^2+4)^{1/2}]/2 \tag{11}$$

式中,n 为阀门的有效开口面积。

假设从最初反射波返回到阀门处开始,直到阀门完全关闭为止的这段时间内压力保持不变,且阀门的有效开口面积呈直线性变化,阀门的有效开口面积 n 可表示为式(12)。

$$n=LV_0/(TgH_0) \tag{12}$$

式中:L 为管道长度;T 为阀门关闭或打开的时间。

依据以上理论分析,通过降低流速、延长关阀时间可以降低正压水锤。在控制阀前处加装一可控调节阀 J6,通过改变调节阀的开度,可控制通过管道油料的流速。建立加装调节阀的输油管道模型(见图 9)。

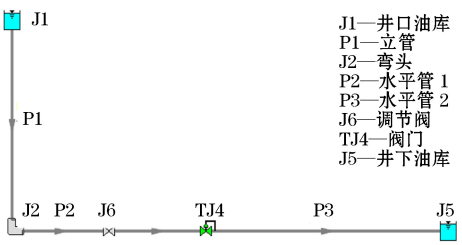
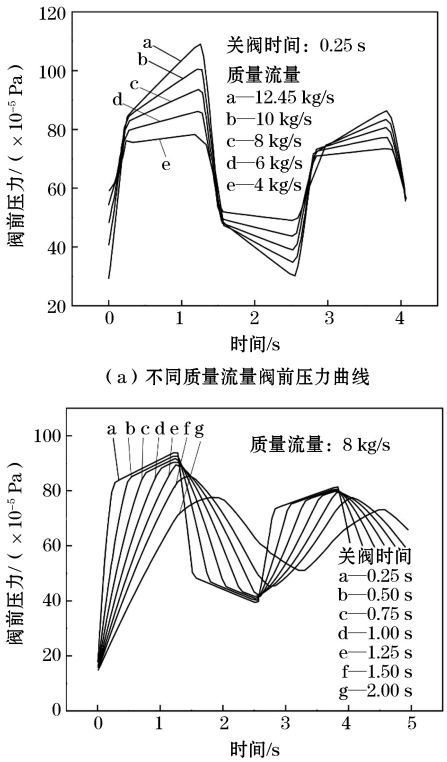


图 9 加装调节阀的输油管道示意

Fig.9 Schematic diagram of oil pipeline with added regulating valve

以输油管内径 60 mm、立管 P1 长度为 750 m、水平管 P3 长度为 600 m 为例,分别针对不同质量流量和不同关阀时间两种情况下,采用 AFT Impulse 软件对输油管道水锤效应进行仿真计算。仿真参数设定:柴油密度取 8.36 g/cm^3,体积模量 1 330 MPa,动力黏度取 0.004 54 Pa·s,饱和蒸汽压力取 79.5 kPa,仿真计算结果如图 10 所示。



(a) 不同质量流量阀前压力曲线

(b) 不同关阀时间阀前压力曲线

图 10 加装调节阀的输油管道压力仿真结果

Fig.10 Simulation results of pressure in oil pipeline with added regulating valve

图 10(a)是在不同质量流量条件下阀前压力随时间的变化曲线。从图 10(a)可以看出,随着输油流量的降低,阀门前的最大压力逐渐降低。流量降低对第一阶段压力升高影响较小,但对第二阶段压力升高影响较大,随着流量降低,第二阶段压力升高速度明显降低。图 10(b)是在不同关阀时间条件下阀前压力随时间的变化曲线。由图 10(b)可知,随着关阀时间的增长,压力升高第一阶段的斜率逐渐降低,压力升高的速度变小。阀门关闭时间应该根据压力波在阀前的传播时间选择,阀门关闭时间尽可能大于阀前压力波的传播时间,这样可有效降低水锤的最大压力。

2.3 泄压输送技术

油料在输送过程中,输油管道压力集中发生在关阀过程中,对于深井垂直输油管道,关阀时间的长短直接决定阀前和阀后的压力值。因此,有必要对输油管道在关阀过程中的压力控制进行研究。输油管道泄压输送示意如图 11 所示。采用加装减压阀 J7 和流量调节阀 J6,对关阀过程中压力和流量进行控制。

采用 AFT Impulse 软件对输油管道进行压力控制仿真计算,水平管 P3 的长度为 600 m,立管 P1

的长度为 750 m,输油管道内径为 60 mm,下油库前 2 m 处设置截止阀 J4、截止阀前 300 mm 处设置减压阀 J7、减压阀前 700 mm 设置流量控制阀,其他仿真参数同 2.2 节,仿真结果如图 12 所示。

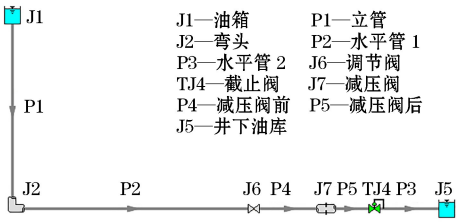


图 11　输油管道泄压输送示意

Fig.11　Schematic diagram of depressurization and transportation of oil pipelines

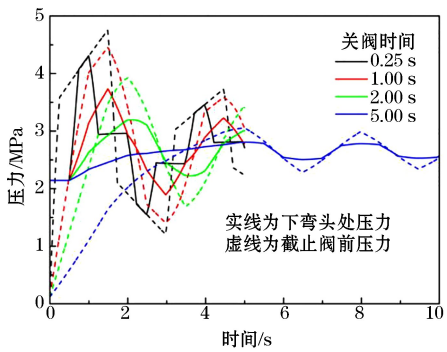


图 12　不同关阀时间泄压输送仿真结果

Fig.12　Simulation results of pressure relief and delivery under different valve closing time

图 12 为弯头出口和截止阀前在不同关阀时间的压力随时间变化的曲线。由图 12 可知,随关阀时间的增长,水锤压力峰值会逐渐降低,当关阀时间为 5 s 时,水锤压力波的峰值基本与立管重力水头相同,这时的水锤效应基本可以忽略。同时可以看到,弯头出口的水锤压力峰值均小于截止阀前。

3　智能化设计

3.1　智能加油技术

智能加油系统如图 13 所示,其核心运行机制基于自动化控制技术与智能计量加油技术,驾驶员通过 IC 加油卡射频识别和人脸生物特征识别完成系统身份认证与激活,柴油输送过程采用闭环压力补偿技术,储油罐内介质经油泵增压后,通过多级稳压装置进行压力修正,加压燃油流经油气分离阀时,系统通过压差传感器实时监测气液两相流状态,经比例阀控制实现气液分离,净化后的柴油经智能加油枪的防滴漏喷嘴完成车辆加注作业,智能加油系统工作流程如图 14 所示。

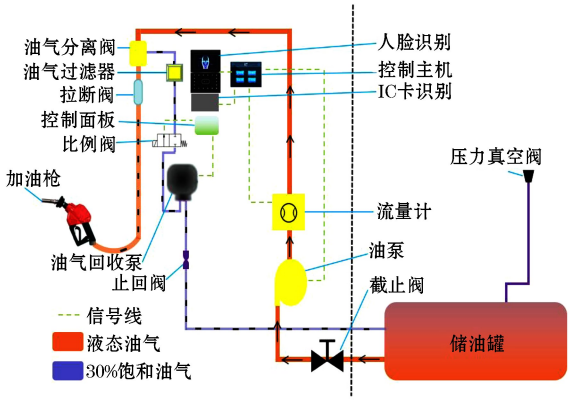


图 13　井下智能加油系统

Fig.13　Underground intelligent refueling system

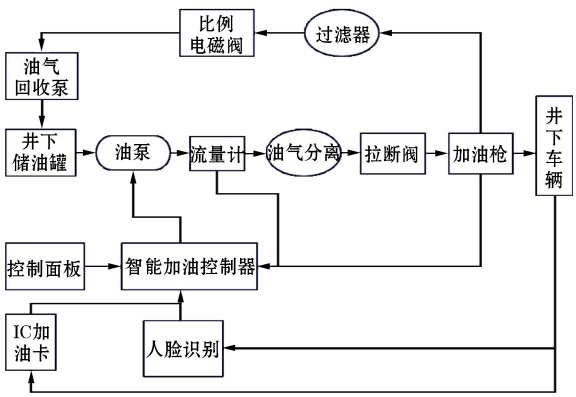


图 14　井下智能加油系统工作流程

Fig.14　Workflow diagram of underground intelligent refueling system

3.2　智能调度技术

井下加油站的智能调度系统结构组成如图 15 所示。

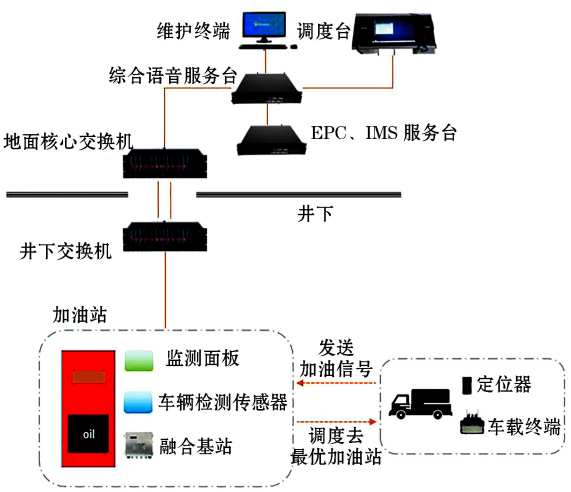


图 15　智能调度系统结构示意

Fig.15　Structure diagram of intelligent scheduling system

井下无轨设备搭载有集成终端和定位系统,实现油箱液位的实时采集、设备定位和驾驶室通讯,可自动或驾驶员手动发送加油信号。地面服务器采用集群运行多目标优化算法,识别各中段加油站的实时状态和车辆排队情况,对集中加油时间段井下车辆设备群进行实时调度,调度算法可实现车辆最优加油站选择,保证车辆加油的安全和高效。智能调度系统的算法流程如图 16 所示。

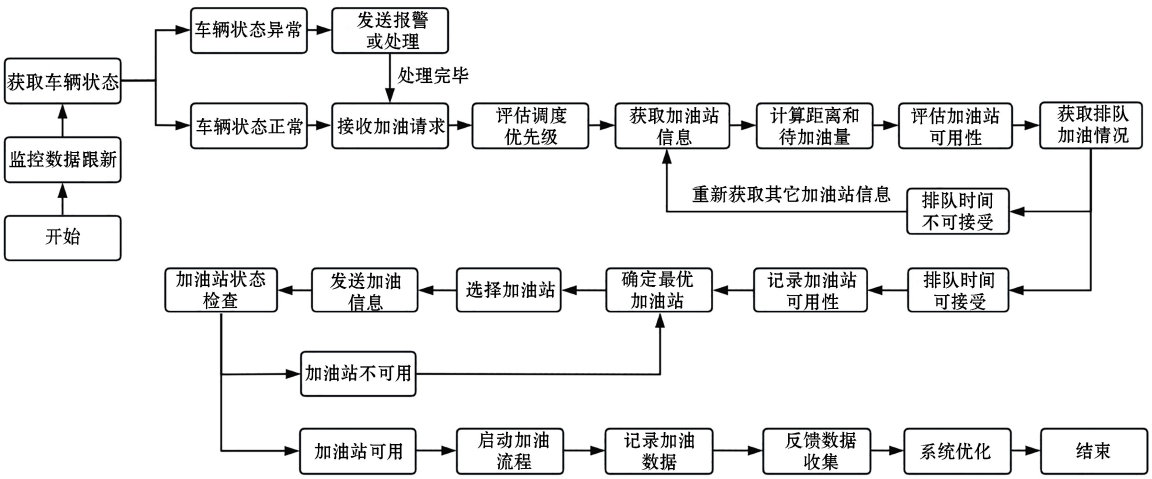


图 16 智能调度系统算法流程

Fig.16 Algorithm flowchart of intelligent scheduling system

3.3 智能监测技术

智能监测系统包括井上撬装加油站、输油管道、井下储油罐、井下加油站的状态、环境和运行参数监测,还包括井下加油站人员的人脸识别、打电话监测,以及人员聚集、滞留等危险行为的视觉监测,如图 17 所示。

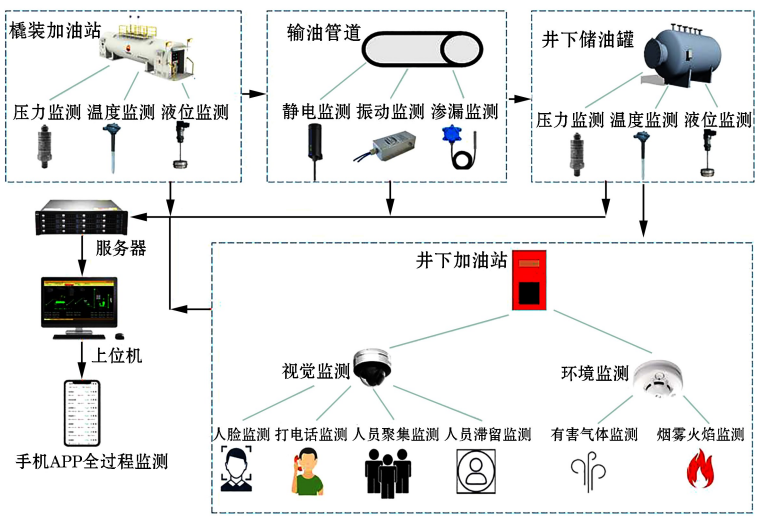


图 17 智能监测系统结构示意

Fig.17 Structure diagram of intelligent monitoring system

智能监测系统最关键在于井下加油站的视觉监测,视觉检测的算法流程如图 18 所示,整个视觉检测流程包括图像的采集、预处理和特征提取,进而进行目标的检测与分类,最终输出检测结果。同时,通过构建深度学习模型,数据经过准备、预处理和增强后进行训练和评估,优化模型参数,最后将模型部署到实际应用中,实现实时监测和反馈。

3.4 智能消防及自动灭火技术

井下加油站的火灾风险和影响远高于地面加油站,地下空间具有空间受限、通风条件不良、救援通道单一等显著特征,在火灾动力学特征、烟气扩散规律及应急救援处置等方面均呈现出更为复杂的特性。基于该特殊场景下的消防安全需求,创新性提出智能化消防灭火系统与特种消防机器人协同作业的双重保障机制。

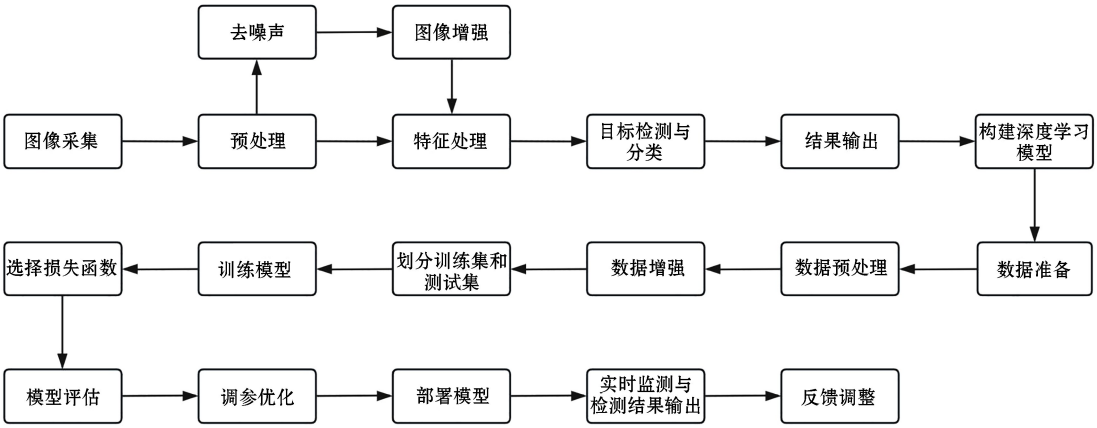


图 18 视觉监测算法流程

Fig.18 Flow chart of visual monitoring algorithm

图 19 为消防智能灭火装置的结构,主要由控制箱、烟雾传感器、摄像头、声光报警器、光粒子探测器、喷射装置等组成,具备自动识别和灭火功能。通过摄像头识别火源,烟雾传感器识别烟雾,控制箱接收到火源信号后发出声光报警信号,同时将火警信号传递至地面监测系统,并触发喷射装置对加油站进行全覆盖灭火。



图 19 消防智能灭火装置结构示意

Fig.19 Structural diagram of fire automatic extinguishing device

在发生随机火情或加油站火源未被扑灭的情况下,可采用消防机器人进行灭火。消防机器人的结构原理如图 20 所示,由履带底盘、消防炮、双目视觉系统、控制柜与角度传感器、导航系统、通信系统等组成,控制柜中包括图像采集模块、图像传输模块与控制模块等。

消防机器人主要特点是能够实现精准实时跟踪定位灭火,火源识别速度快,灭火定位精准。导航系统采用 GPS 和激光雷达技术,能够自主导航并避开障碍物,确保机器人迅速准确地到达火灾现场。此外,机器人的通信模块通过 Wi-Fi 或 5G 与监测系统保持实时通信,及时传输报警信号和视频监控信息。

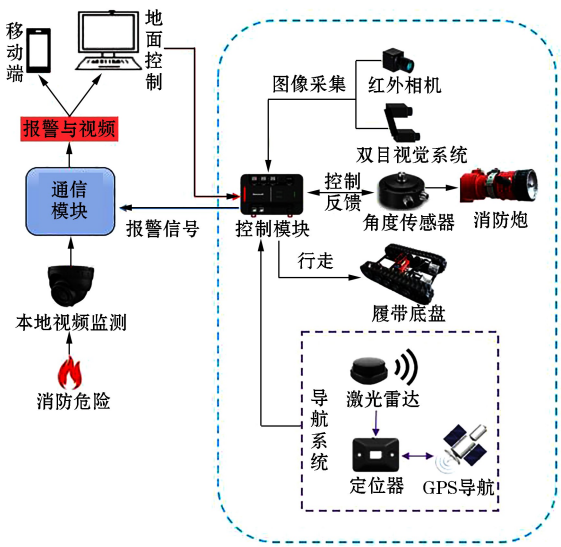


图 20 消防机器人结构示意

Fig.20 Structural schematic diagram of firefighting robot

4 结论

(1) 针对管道油料垂直输送系统的输油管道选型、布置、固定和连接提出了安全设计要求,并从输油管道安装稳定性和动态稳定性两个方面进行数值计算和仿真分析,验证输油管道选型和安装方式的安全性和可靠性。

(2) 采用数值计算和仿真分析的方法对油料输送系统进行柴油输送压力、流速模拟仿真,通过减压阀和节流阀对输油压力和流量进行控制,减小输油压力和流量或增大关阀时间可以有效降低水锤压力。

(3) 提出智能加油技术、智能监测技术、智能调度技术、智能消防和自动灭火技术等智能化关键技术的设计方案,为高井深油料输送系统智能化设计提供技术支撑。

(4) 管道油料垂直输送系统的安全性设计和智能化设计理论还需要进行大量的试验测试和工业性试验进行验证分析,最终形成管道油料垂直输送系统安全性设计和智能化设计的标准体系,从而为管道油料垂直输送系统的安全性设计和智能化设计提供系统性的设计依据。

参考文献(References):

[1] 吴爱祥,王勇,张敏哲,等.金属矿山地下开采关键技术新进展与展望[J].金属矿山,2021(1):1-13.
WU Aixiang, WANG Yong, ZHANG Minzhe, et al. New development and prospect of key technology in underground mining of metal mines [J]. Metal Mine,2021(1):1-13.

[2] 吴钦正,刘兴全,李桂林,等.我国金属矿山深部开采发展现状及对策研究[J].采矿技术,2021,21(5):23-27.
WU Qinzheng, LIU Xingquan, LI Guilin, et al. Research on the development status and countermeasures of deep mining in metal mines in China [J]. Mining Technology,2021,21(5):23-27.

[3] 胡林翠,张登云,徐明儒,等.矿山高井深燃油管道垂直输送系统流动特性分析[J].矿业研究与开发,2024,44(5):228-233.
HU Lincui, ZHANG Dengyun, XU Mingru, et al. Vertical transportation system of high well depth oil pipeline in mine [J]. Mining Research and Development, 2024, 44(5): 228-233.

[4] 谯露,舒勤,赵克全.油库选址问题的多目标优化方法[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2023,40(1):82-87.
QIAO Lu, SHU Qin, ZHAO Kequan. Multi-objective optimization method for oil depot location problem [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition),2023,40(1):82-87.

[5] 陈淼,陶润鹏,何建元,等.矿山深井油料输送系统优化设计[J].采矿技术,2024,24(5):306-311.
CHEN Miao, TAO Runpeng, HE Jianyuan, et al. Optimization design of oil transportation system in deep mine[J]. Mining Technique,2024,24(5):306-311.

[6] BRODSKYI Y, GYRYA V, ZLONTNIK A. Simulation of gas mixture dynamics in a pipeline network using explicit staggered-grid discretization [J]. Applied Mathematical Modelling,2025,137:115717.

[7] 袁嘉瑞,丁虎,陈立群.微曲输流管道振动固有频率分析与仿真[J].应用数学和力学,2022,43(7):719-726.
YUAN Jiarui, DING Hu, CHEN Liqun. Vibration natural frequency analysis and simulation of micro-curved pipe conveying fluid[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2022,43(7):719-726.

[8] 冀洁梅,何川,王文明.大埋深油气管道防腐层破损检测技术研究[J].石油与天然气化工,2021,50(6):91-95.
JI Jiemei, HE Chuan, WANG Wenming. Research on damage detection technology of anticorrosive coating for oil and gas pipeline with large buried depth[J]. Petroleum and Natural Gas Chemicals,2021,50(6):91-95.

[9] MIAO Wenkang, ZHAO Xingdong. Traffic congestion scheduling for underground mine ramps based on an improved genetic scheduling algorithm [J]. Applied Sciences,2024,14(21):9862.

[10] 蔡伟星,徐方,张雷,等.基于强化学习的自动化物料运输系统调度策略[J].计算机工程与设计,2024,45(10):3128-3135.
CAI Weixing, XU Fang, ZHANG Lei, et al. Scheduling strategy of automated material transportation system based on reinforcement learning[J]. Computer Engineering and Design,2024,45(10):3128-3135.

[11] YANG Jingzhe, ZHENG Yili, WU Jian, et al. Enhancing manufacturing excellence with digital-twin-enabled operational monitoring and intelligent scheduling [J]. Applied Sciences,2024,14(15):6622.

[12] HUO Da, SARI Yuksel Asli, ZHANG Qian. Smart dispatching for low-carbon mining fleet: a deep reinforcement learning approach [J]. Journal of Cleaner Production,2024,435:140459.

[13] 李晶晶,黄章进,邹露.基于运动引导图卷积网络的人体动作识别[J].计算机辅助设计与图形学学报,2024,36(7):1077-1086.
LI Jingjing, HUANG Zhangjin, ZOU Lu. Human motion recognition based on motion guided graph convolutional network [J]. Journal of Computer Aided Design and Graphics,2024,36(7):1077-1086.

[14] 张清蓉,陈龙灿,刘庆.视频前景区域运动目标姿态识别仿真[J].计算机仿真,2024,41(7):258-262.
ZHANG Qingrong, CHEN Longcan, LIU Qing. Video foreground region moving target pose recognition simulation [J]. Computer Simulation,2024,41(7):258-262.

[15] 郭志鑫,冯秀芳.MEC-Net:基于运动捕捉和通道注意力的行为识别方法[J].计算机工程与设计,2024,45(6):1805-1811.
GUO Zhixin, FENG Xiufang. MEC-Net: Behavior recognition method based on motion capture and channel attention[J]. Computer Engineering and Design, 2024, 45(6):1805-1811.

[16] 陈煜平,邱卫根.基于视觉的人体行为识别算法研究综述[J].计算机应用研究,2019,36(7):1927-1934.
CHEN Yuping, QIU Weigen. A survey of vision-based human action recognition algorithms [J]. Computer Application Research,2019,36(7):1927-1934.

[17] AL-FARIS Mahmoud, CHIVERTON John, NDZI David, et al. A review on computer vision-based methods for human action recognition[J]. Journal of Imaging,2020,6(6):46.

[18] CAO Huade, MAGDI Mohareb, IOAN Nistor. Finite element for the dynamic analysis of pipes subjected to water hammer[J]. Journal of Fluids and Structures, 2020, 93:102845.

[19] PRANJAL K, SIDDHARTHA C, KUMAR L A. Human pose estimation using deep learning: review, methodologies, progress and future research directions[J]. International Journal of Multimedia Information Retrieval, 2022,11(4):489-521.

[20] 邱钟毓,尹小恰,陈凯,等.消防机器人城区内自主导航系统[J].计算机系统应用,2025,34(1):80-89.
QIU Zhongyu, YIN Xiaoqia, CHEN Kai, et al. Fire robot autonomous navigation system in urban areas[J]. Computer System Applications,2025,34(1):80-89.

[21] ZHANGShuo, YAO Jiantao, WANG Ruochao, et al. Design of intelligent fire-fighting robot based on multi-sensor fusion and experimental study on fire scene patrol[J]. Robotics and Autonomous Systems,2022,154:104122.

[22] BAI Yun, SUN Zhenzhong, ZENG Bo, et al. A multi-pattern deep fusion model for short-term bus passenger flow forecasting[J]. Applied Soft Computing,2017,58:669-680.

[23] LI Aijuan, CAO Jiaping, LI Shunming, et al. Map construction and path planning method for a mobile robot based on multi-sensor information fusion[J]. Applied Sciences,2022,12(6):2913.

[24] MIAO Kebin, MA Jian, LI Zefang, et al. Research on multi feature fusion perception technology of mine fire based on inspection robot[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021(1):12064.