

中文引用格式:李聪,侯乐乐,金衍科,等. 基于 Bentley Hammer 的系留无人机载竖直管缆水锤效应研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(7): 122-132.

英文引用格式:LI Cong, HOU Lele, JIN Yanke, et al. Study on water hammer effects in tethered UAV vertical pipe cable systems using Bentley Hammer [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(7): 122-132.

基于 Bentley Hammer 的系留无人机载竖直管缆水锤效应研究*

李聪¹副教授, 侯乐乐¹, 金衍科¹, 武卓琦¹, 周睿²研究员, 姚一娜³讲师

(1 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院, 北京 100083; 2 清华大学 安全科学学院, 北京 100084; 3 中国人民公安大学 国家安全学院, 北京 100038)

中图分类号:X949

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.07.0942

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3090502);国家自然科学基金资助(52304274);中央高校基本科研业务费专项资金资助(2023ZKPYAQ06);中国民航大学民航热灾害防控与应急重点实验室开放基金资助(RZH2023-KF02)。

【摘要】 为解决系留无人机(UAV)高层灭火中竖直管缆内压力和流量的骤变影响 UAV 稳定性的问题,利用 Bentley Hammer 软件模拟竖直管缆在启停泵过程中的水锤效应,改变管缆竖直高度(160~220 m)及输运流量(260~320 L/min),分析地面泵端和 UAV 端的压力、流量以及水锤力的变化。结果表明:启停泵过程中,水锤现象可划分为静止/稳态阶段、骤升/骤减阶段、稳态/振荡减弱阶段。启泵时,地面泵端水锤力与管缆高度成正比,水锤力峰值从 7 176.502 N 升至 8 413.785 N,冲击更强但响应延迟;UAV 端水锤力受管缆高度影响小。停泵时,地面泵端水锤力峰值随管缆高度增加而增大,从 4 316.401 N 升至 7 219.388 N,管道破裂风险增加;UAV 端反向水锤力与管缆高度成反比,从 10 616 N 降至 8 158.870 N,表明管缆高度越低更易导致 UAV 姿态失控。输运流量方面,启泵时流量对水锤力峰值影响小;停泵时,地面泵端水锤力峰值与流量成正比,从 6 693.8 N 升至 7 541.606 N,破坏风险增加;UAV 端反向水锤力峰值随流量增加而减小,从 9 866.063 N 降至 8 471.582 N,流量越小越易导致系留系统损坏。

【关键词】 Bentley Hammer; 系留无人机(UAV); 竖直管缆; 水锤效应; 停泵水锤; 水锤力

Study on water hammer effects in tethered UAV vertical pipe cable systems using Bentley Hammer

LI Cong¹, HOU Lele¹, JIN Yanke¹, WU Zhuoqi¹, ZHOU Rui², YAO Yina³

(1 School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2 Institute of Public Safety Research, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3 School of National Security, People's Public Security University of China, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to address the issue of sudden changes in pressure and flow on the stability of the tethered UAV during high-rise firefighting, the water hammer effect in the vertical pipe cable during the

start pump and pump stop was simulated using Bentley Hammer software. The vertical height of the pipe cable was controlled from 160 to 220 m, and the transportation flow was set from 260 to 320 L/min. The variation laws of pressure, flow and water hammer force at the locations of the pump and tethered UAV were analyzed. The results show that the water hammer phenomenon during the start pump and pump stops can be divided into the static/steady state stage, the sudden rise/drop stage, and the steady state/oscillation weakening stage. When starting the pump, the water hammer force at the ground pump end is proportional to the pipe cable height, with the maximum water hammer force increasing from 7 176.502 N to 8 413.785 N, indicating a stronger impact and a delayed response. The water hammer force of the UAV end is minimally affected by the pipe cable height. When the pump is stopped, the maximum water hammer force at the ground pump end increases with the pipe cable height, from 4 316.401 N to 7 219.388 N, increasing the risk of pipeline rupture. The reverse water hammer force at the UAV end is inversely proportional to the pipe cable height, decreasing from 10 616 N to 8 158.870 N, indicating that a lower pipe cable height is more likely to induce the UAV attitude instability. Regarding the transport flow, during pump start-up, the transport flow has a small impact on the peak water hammer force. When the pump is stopped, the peak water hammer force at the ground pump end is proportional to flow, increasing from 6 693.8 N to 7 541.606 N, increasing the risk of damage. The peak reverse water hammer force at the UAV end decreases with the increase of flow, from 9 866.063 N to 8 471.582 N. The smaller the flow rate, the more likely it is to cause damage to the tethering system.

Keywords: Bentley Hammer; tethered unmanned aerial vehicle (UAV); vertical pipe cable; water hammer effect; water hammer of pump stop; water hammer force

0 引言

随着各类建筑数量不断扩容,与之相伴的消防安全隐患也日益凸显^[1]。近年来,国内外城市高层建筑火灾频发,造成了严重后果。在城市消防救援中,系留无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)发挥了其特有优势^[2],它能够克服传统灭火方式中建筑高度的限制,降低人员伤亡和财产损失。系留 UAV 的管缆通常用于将水输送至火灾现场。当启闭阀门或水泵工况改变时,会使得管道内的流场发生改变,从而管道内的压力也随之改变,对于这种非恒定流的瞬变过程称为水锤现象^[3]。水锤效应不仅会增加管缆本身或连接部件损伤的风险,甚至可能影响 UAV 飞行的稳定性,导致系留 UAV 的外壳、机架等结构部件发生变形、断裂或损坏^[4-5]。因此,深入研究系留 UAV 管缆中的水锤效应,明确水锤效应下对 UAV 的要求,显得尤为重要。

目前,国内外学者开展了大量水锤现象的研究,如宗琦等^[6]基于管道失效概率,采用蒙特卡罗算法建立系统韧性的量化评价指标,研究了城市输水系统应对水锤的韧性,并结合泵站加压输水系统的实例,使用正交试验方法优化空气阀的参数设置并得到最优参数。XIN Qilong 等^[7]通过试验和理论分析

开发了 2 阶段阀门关闭方法,发现其相比线性阀门关闭能显著降低水锤压力,并建立了适用于特定装置的水锤压力预测模型,为降低水锤压力提供了有效方法。ZHA Congyi 等^[8]采用应力-强度干涉理论和特征线法,结合 Kriging 代理模型与蒙特卡罗模拟,分析了流体输送管道在水锤作用下的可靠性灵敏度,发现壁厚和内径对管道应力失效影响显著。

在水锤研究领域中,停泵水锤备受关注,但启泵水锤也可能产生负面影响,如 WANG Tingzheng 等^[9]通过数值模拟研究了低水头全流量抽水蓄能机组启动过程的水力特性,发现启动初期涡脱落引发水锤效应,导致压力急剧上升和流量快速变化,最终造成机组扬程大幅波动和空载不稳定性。同样,对于水平管缆问题探讨已相对深入,而竖直管缆研究则相对较少。现有的竖直管缆研究大多集中在煤矿^[10]、石油^[11]等能源开采所涉及的井筒场景。如吴根水^[12]利用岩体裂隙通道表现出与管道类似的特性,系统地研究了水锤效应在深部底板岩体中的作用及其对突水的影响;胡林翠等^[13]通过搭建仿真模型,分析了矿山高井深燃油管道在不同工况下水锤效应的产生机制。这些研究为保障井下作业安全和流体输送稳定提供了重要支持。然而,在系留 UAV 领域,竖直管缆水锤问题的研究仍较少涉及。

鉴于此,笔者拟针对系留 UAV 高层灭火中竖直输水管缆中水锤效应,通过 Bentley Hammer 软件模拟启泵和停泵情况,研究管缆竖直高度以及输运流量对不同节点的压力、流量以及水锤力的影响,以期 为实际工程设计提供一定的参考。

1 水锤效应的理论基础

1.1 水锤效应的基本控制方程及求解方法

有压管道的控制方程由连续性方程和动量方程 推导得到。特征线法是计算机求解水锤问题的主流 方法^[14]。Bentley Hammer 软件利用特征线法,将连 续性方程和动量方程的偏微分形式转化为沿特征线 的常微分方程,并通过积分得到有限差分方程。该 方法通过将管道划分为多个段,时间划分为多个时 段,逐步求解,最终得到简化的有限差分方程,从而 实现对水锤的高效求解。

1.2 水锤力的理论分析

流体振荡引起的瞬时局部压力的变化计算公 式为^[15]:

$$\Delta P = \rho a \Delta v \tag{1}$$

水锤产生的冲击力可用压力变化产生的压差乘 以管道的截面积求得,作用于管道的水锤力为:

$$F = \Delta P \times A \tag{2}$$

式中: ΔP 为水锤引起的瞬时压力变化值,Pa; Δv 为 流速的瞬时变化量,m/s; a 为压力传播速度,m/s; ρ 为流体密度,kg/m³; A 为管道流通的截面积,m²; F 为水锤产生的冲击力,N。

水锤力的冲击可能引发 UAV 的瞬时姿态变化, 因此,在无人机流体输送场景中,对 UAV 的动力系 统提出要求。

2 竖直输运模型及工况设置

2.1 竖直输运模型建立

利用 Bentley Hammer 水锤模拟软件,对管缆中 的启泵和停泵水锤开展水力模拟,模拟时对消防车 以及 UAV 采取简化处理方式,竖直输运模型如图 1 所示。水由消防车内的泵以高压的方式沿着连接的 管缆输送到高空的 UAV 处。此次模拟设置 2 个监 测点:①地面泵后端,用以记录启停泵过程中泵出口 处(管缆入口处)压力和流量波动情况;②在 UAV 前端(管缆出口处),用于探究研究变量是否对 UAV 的稳定性产生影响。

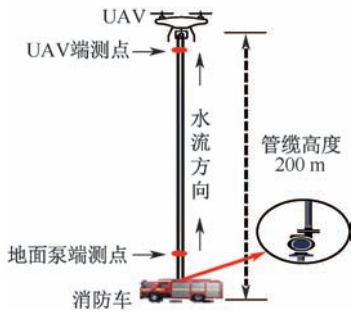


图 1 竖直输运模型

Fig. 1 Vertical transport model

2.2 模拟基本参数

运用 Bentley Hammer 软件进行水锤模拟,根据 需要建立模型,输入元件参数。消防车端的泵作为 压力供给,将其参数设置为流量 300 L/min,水头 300 m,功率为 45 kW,转速为 2 860 r/min,模拟时以 熟铁管作为管道材料,灭火剂采用水,材料参数引自 Bentley Hammer 材料库,具体参数见表 1。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameterization

对象	参数	数值
熟铁管	内径 d/m	0.065
	壁厚 e/m	0.01
	库特粗糙度 κ	0.012
	曼宁系数 n	0.012
	海森-威廉系数 C	130
	修正的海森-威廉系数 C_m	0.878
	杨氏模量 E_v/kPa	1.72×10^8
	粗糙度高度 ε/m	0.000 3
	泊松比 μ	28%
水	运动黏度 $\nu/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	1.566×10^{-6}
	相对密度 γ	1.000
	温度 $\theta/^\circ\text{C}$	4
	蒸汽压力 P_v/kPa	-101
	体积弹性模量 E/kPa	2188128

在此基础上,计算流体在管道内传输时的波速, 并模拟稳态。为保证灭火需求,设定无人机端的输 出压力为 0.5 MPa。经稳态计算,满足无人机处出 水口端的压力要求。

2.3 竖直输运模拟工况

在实际应用中,火源地点和火势大小的不确定 性要求防灭火时必须考虑管缆高度和输运流量的多 样性,因此,了解不同管缆高度和输运流量带来的影 响。2 种参数分别研究启泵水锤与停泵水锤这 2 种 工况的水锤变化,模拟工况见表 2。

表 2 工况汇总

Table 2 Summary of operating conditions

工况	输运流量/(L · min ⁻¹)	管缆高度/m
启泵	300	220
		200
		180
		160
	320	200
	300	
	280	
	200	
停泵	300	220
		200
		180
		160
	320	200
	300	
	280	
	200	

模拟时间步长设置为 0.000 1 s,总模拟时长 10 s。启泵工况设置为从第 2 s 开始启动泵,在 2~4 s 内,泵的转速按照线性规律从 0 增加到额定转速。停泵工况设置为在第 2 s 时,泵停止工作,即转速内降为 0。

3 竖管缆水锤效应模拟研究

3.1 典型启停泵水锤现象分析

水锤是流速的改变导致压力发生瞬态变化的现象,因此,根据压力变化将启停泵时的水锤各分为 3 个阶段。图 2 为高度 200 m、流量 300 L/min 时水锤现象阶段。

启泵时将水锤现象划分为静止阶段、骤升阶段以及稳定阶段 3 个阶段。在静止阶段,水泵还未启动,管缆内液体保持静止。水泵启动后,管缆内的水加速流动,流速上升导致管道内压力骤升,产生水锤,该阶段即为骤升阶段,骤升阶段中压力的突然变化产生的冲击力即为水锤力,压力上升过程中可能会产生拐点,这是由于压力波从下游往上传播所致。水泵到达稳定运行状态,此时压力波逐渐消散,管道内压力恢复稳定,在稳定阶段,水锤现象消失。

在竖管缆内可以将停泵水锤现象分为 3 个连续阶段:稳态阶段(Ⅰ)、骤减阶段(Ⅱ)以及振荡减弱阶段(Ⅲ)。在稳态阶段,流体在管缆中流动时各物理量沿流动路径呈稳恒分布,流态不随时间和位置发生剧烈变化。突然停泵时,水泵快速停止运转,

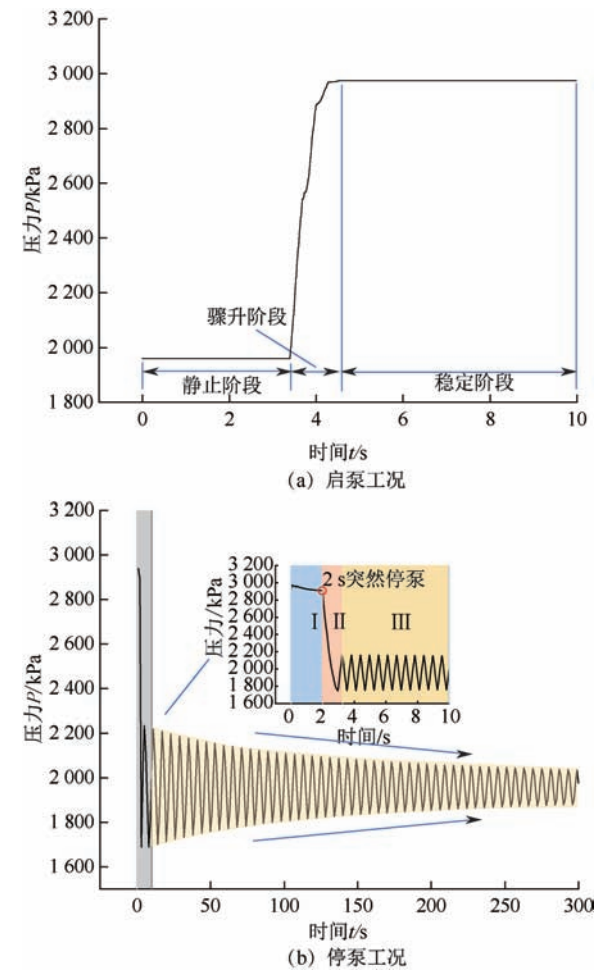


图 2 启泵和停泵水锤现象阶段
Fig. 2 Vertical transport model

此时输送的流体动量突然改变,发生压力的骤减,产生极大水锤力。水锤引发的压力波动会在管中不断传播并呈现周期性变化^[16],停泵后由于重力作用,导致地面泵端压力增大,泵的阻碍作用将产生的压力波往无人机端反射,地面泵端的压力减小,如此往复。由于管缆内摩擦和阻力作用,振幅逐渐减小,这就是振荡减弱阶段。在足够长的时间内,压力波动逐渐平稳下来,最终趋于稳定。无论是启泵工况还是停泵工况,都会在瞬时产生压力的骤升或骤减,造成水锤力,因此,应当考虑采用安全措施。

3.2 管缆高度对水锤特性的影响

1) 启泵工况水锤模拟计算。图 3 为各监测点在不同管缆高度下启泵时流量随时间的变化曲线。由图 3a 可知:启泵时地面泵端流量上升时间随着管缆高度的升高略有滞后,160 m 时流量上升时间为 3.257 s,220 m 时流量上升时间为 3.473 s。地面泵端的流量在启泵后上升到峰值后逐渐回归到 300 L/min,流量峰值随着管缆高度的增加而逐渐降低,

160 m 时峰值为 330 L/min, 220 m 时峰值为 310 L/min。图 3b 与图 3a 相比, UAV 端流量上升时间与地面泵端呈现相同趋势, 但是流量发生变化的时间与地面泵端相比稍有延迟, 管缆高度从 160 到 220 m 时, 流量发生变化的时间从 3.370 s 上升到 3.629 s, 这是由于水由地面泵端向 UAV 传播需要时间。此外, UAV 端没有产生流量峰值。

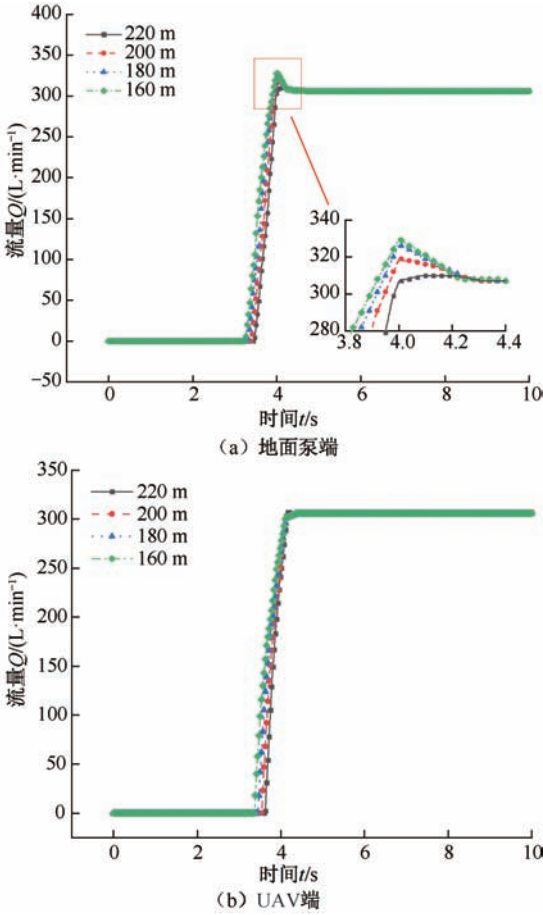


图 3 启泵时流量变化曲线

Fig. 3 Flow change curve at start pump

启泵后流速的改变必然引起压力的变化, 图 4 为各监测点在不同管缆高度下启泵时的压力变化。由图 4a 可知: 启泵前地面泵端的压力与管缆高度成正相关, 管缆高度为 160、180、200、220 m 时启泵前压力分别为 1 566、1 762、1 957 和 2 153 kPa, 这是因为 Bentley Hammer 的启泵工况为有水启泵, 即在启泵前管缆内已经充满水。图 4a 显示出压力上升时出现明显拐点, 这是由于压力波从 UAV 端往地面泵端传播导致。图 4b 与 4a 压力变化一致, 稳态时 UAV 端压力出现较大差值, 稳态压力也与管缆高度成反比, 管缆高度由 160 到 220 m 稳态压力值从 1 396 kPa 下降至 795 kPa。

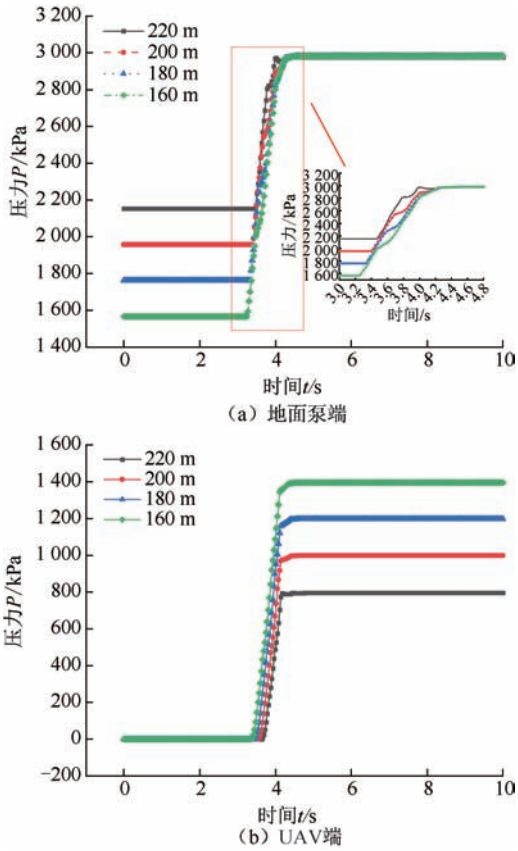


图 4 启泵时压力变化曲线

Fig. 4 Pressure change curve at start pump

不同管缆高度下启泵时的水锤的变化曲线如图 5 所示, 图 5a 中, 地面泵端的水锤力最大值随管缆高度的增加而增大, 从 160 到 220 m 时, 水锤力最大值从 7 176. 502 N 上升到 8 413. 785 N。这表明管缆高度越高, 水锤力的响应时间越晚, 但地面泵端受到的冲击强度更大。水锤力会因为压力波由地面泵端往 UAV 端传播而下降, 最终到达稳态时压力不再发生改变, 水锤力变为 0。相比于图 5a 地面泵端水锤力的最大值有明显的差距, 图 5b 中 UAV 端的水锤力最大值差距不明显, 数值上为 8 000 N 左右, 方向与重力相反。水锤力产生的冲击可能导致系留系统的连接部位松动或损坏, 这要求 UAV 需要具备足够的推力和抗冲击能力, 以应对这种反向冲击力。

2) 停泵工况水锤模拟计算。图 6 为不同管缆高度下停泵时各监测点的流量变化以及 UAV 处空腔变化趋势, 图 6a 中, 停泵后地面泵端流量迅速下降, 由于水泵为强制理想边界条件, 因此, 地面泵端的流量迅速降为 0, 不再发生任何变化。不同管缆高度下流量下降为 0 的时间不同, 与管缆高度成反比。160 到 220 m 管缆下降为 0 的时间从 3.239 s 下降到 2.837 s。与图 6a 相比, 图 6b 在流量快速下

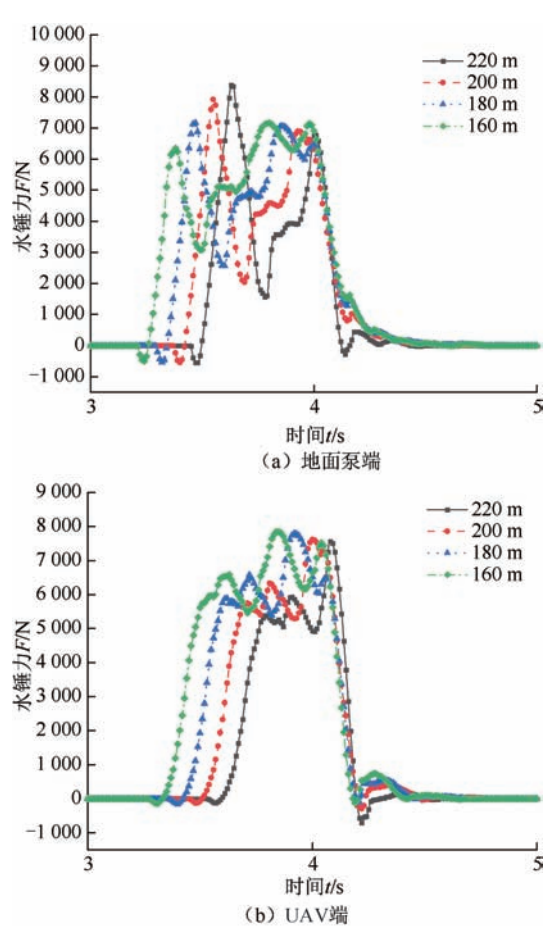


图 5 启泵时水锤力变化曲线

Fig. 5 The curve of water hammer force changes at start pump

降后有明显围绕 0 上下波动的现象,这是由于空气在 UAV 端反向进入管缆,与管缆内的流体耦合,造成 UAV 处流体介质和空气交错波动,管缆内没有液柱的部位就形成了空腔。

由于是竖管缆,停泵后地面泵端不可能出现空腔。停泵时不同管缆高度产生的空腔的最大值也有所差距,管缆高度越高,产生的空腔越大,从 160~220 m 产生的空腔最大值从 56 mL 上升到 181 mL。由于流量波动的产生是水与空气的耦合作用,因此,流量和空腔的大小有一定关联。图 7 为流量和空气容积变化关系曲线,流量减小时,空气容积增大,流量增加时,空气容积减小,流量和空气容积成相反趋势。

图 8 为停泵时各监测点的压力变化趋势,停泵后压力迅速下降(图 8a),地面泵端处会观察到压力波的波动现象,而 UAV 端的压力下降为 0。这是因为停泵造成的动能转换为压力能,压力波在管道内传播,导致地面泵端出现压力波动,且压力波动围绕

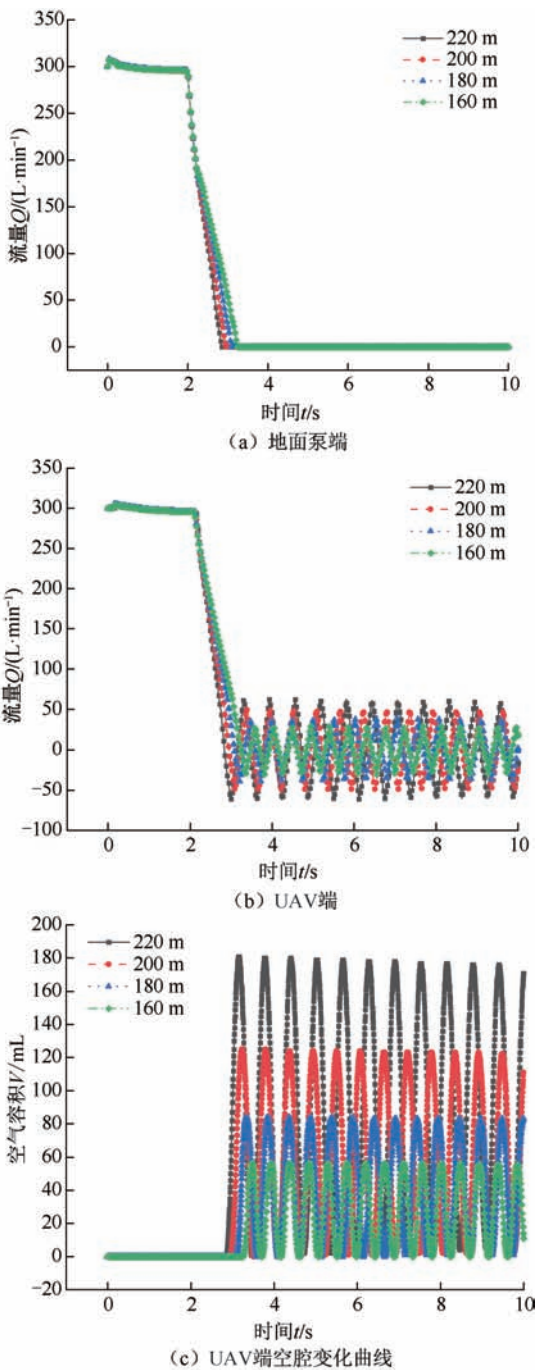


图 6 停泵时流量变化曲线与 UAV 端空气容积变化曲线

Fig. 6 Flow change curve and tethered UAV end cavity change curve at pump stop

的值与启泵时静止阶段的值相近。相比于图 8a 停泵后出现压力波动,图 8b 压力直接下降为 0,这是因为 UAV 端由于流体动能迅速耗散,无法形成有效的压力波传播。停泵前,管缆高度与稳态压力成反比,与启泵时 UAV 段到达稳态压力时趋势保持一致。

停泵后地面端和 UAV 端的水锤力变化曲线如

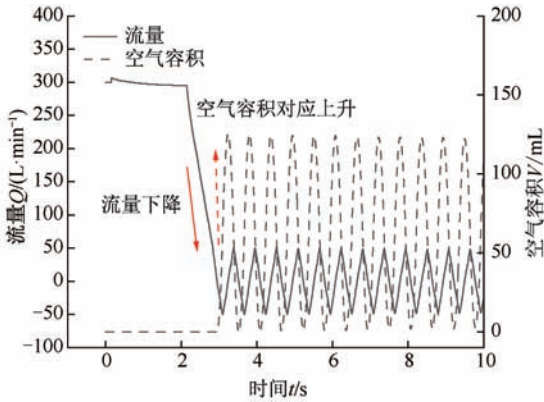


图7 流量和空气容积关系变化曲线

Fig. 7 Curve of relationship between flow rate and air volume

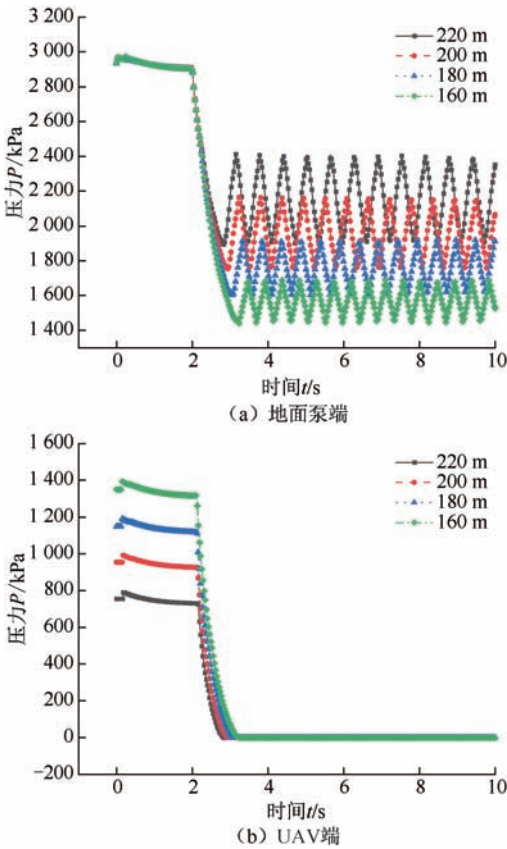


图8 停泵时压力变化曲线

Fig. 8 Pressure change curve at pump stop

图9所示,图9a中,停泵后,地面泵端的压力迅速下降,水锤力方向与初始流动方向相反。随后压力开始上升并形成波动,水锤力也随之产生波动。研究表明:地面泵端的水锤力最大值与管缆高度成正相关。当管缆高度从160 m增加到220 m时,水锤力的最大值从4 316.401 N上升到7 219.388 N。这种显著增大的水锤力会对管道及相关设备施加巨大的压力冲击,可能导致管道破裂、设备损坏或系统振动

加剧。由图9b可知:停泵后,UAV端的压力迅速下降,随后水锤力反向增大。高管缆高度响应较晚,且管缆越高,反向水锤力的峰值越小。管缆高度从160 m增加到220 m时,水锤力的最大值从10 616 N下降至8 158.870 N。这表明管缆高度越高,水锤力的冲击越弱,对UAV的稳定性威胁也越小。管缆高度越低,UAV受到的与重力同向的水锤力冲击越强烈,导致其下沉趋势加剧,进而严重影响飞行方向和姿态控制,对UAV的稳定性威胁越大。

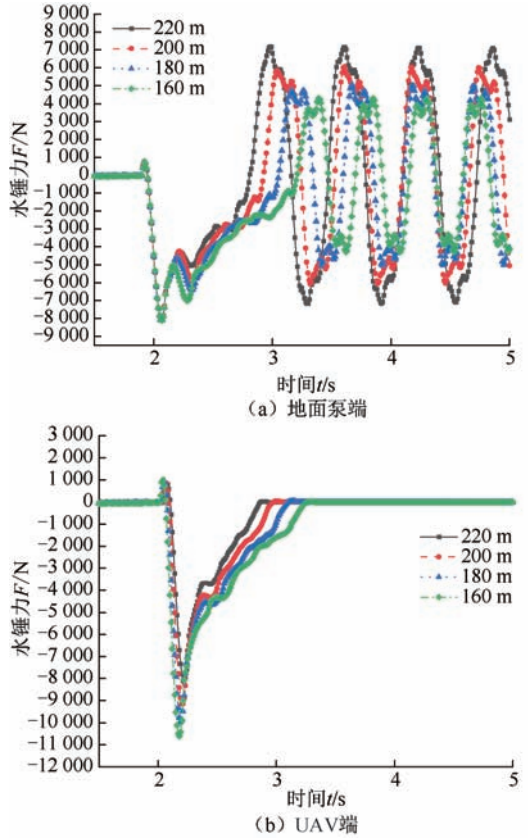


图9 停泵时水锤力变化曲线

Fig. 9 Water hammer force curve at pump stop

3.3 输运流量对水锤特性影响

1) 启泵工况水锤模拟计算。图10为不同输运流量时的各测点的流量变化曲线,图10a中,不同输运流量时,启泵后输运流量开始上升的时间不同,输运流量由260到320 L/min时间由3.35 s上升到3.438 s,启泵后输运流量与流量开始变化时间成正比。地面泵端出现了流量的峰值,且峰值与稳定阶段时的流量差值明显,从260到320 L/min流量差值从26 L/min下降到4 L/min。由图10b可知:260、280、300、320 L/min启泵后UAV端流量开始变化的时间分别为3.492、3.517、3.546、3.58 s,与图10a相比,由于水的传播出现了时间的滞后,UAV端

启泵时并没有出现流量峰值。

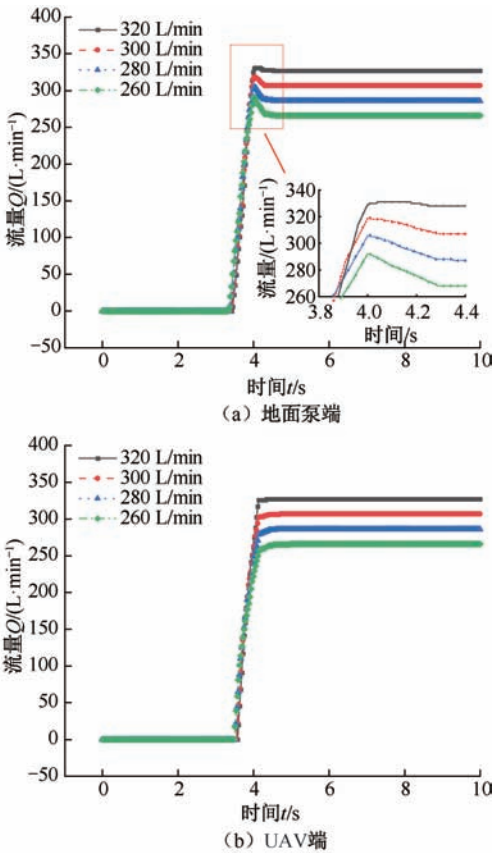


图 10 启泵时流量变化曲线
Fig. 10 Flow change curve at start pump

压力变化与流量变化相关,图 11 为启泵后不同输运流量压力变化。启泵后各监测点压力上升,由图 11a 可知:不同输运流量时压力上升时间不同,由 260 到 320 L/min 压力开始上升时间从 3.349 s 下降至 3.437 s,压力上升时间与流量成正比。到达稳态阶段时,输运流量越大,稳态压力越小,由 260 到 320 L/min 的稳态压力由 3 231 kPa 下降到 2 842 kPa。由图 11b 可知:UAV 端不同输运流量压力上升时间不同,260、280、300、320 L/min 压力开始上升时间分别为 3.497、3.523、3.546、3.588 s,输运流量越小,压力上升时间越提前。到达稳态阶段时,不同输运流量 UAV 端的压力分别为 1 254、1 132、999、855 kPa,稳态时压力与输运流量成反比。

图 12 为启泵时不同输运流量时各测点水锤力变化曲线,由图 12 可知:无论是地面泵端还是 UAV 端,启泵时不同输运流量生成的水锤力的最大值差距较小,这是因为管内流体速度从零开始加速,即使流量不同,流体加速的初期相似,导致初始压力波及其引发的水锤力在不同流量下差别不显著。尽管输运流量对地面泵端和 UAV 端水锤力的最大值影响

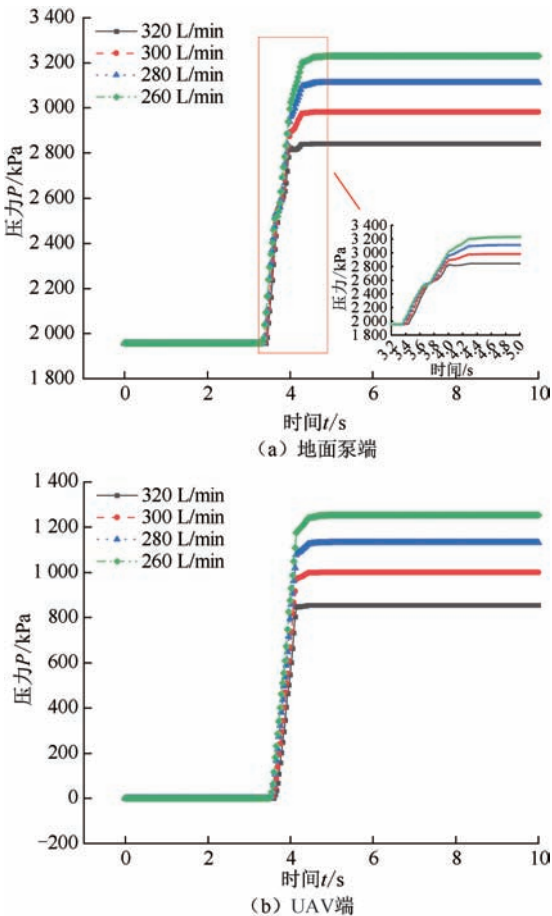


图 11 启泵时压力变化曲线
Fig. 11 Pressure change curve at start pump

不大,但为确保系统正常运行,地面泵端需具备足够的耐压强度和抗冲击能力,以应对启泵时产生的水锤力;同时,UAV 端应配备高性能的动力系统和稳定的飞控单元,以维持飞行姿态并抵抗水锤力的干扰。从图 12a 可以看出,输运流量越大,水锤力的响应时间越延迟。输运流量从 260 L/min 增加到 320 L/min 时,地面泵端水锤力的开始上升时间从 3.248 s 延迟到 3.336 s,UAV 端的水锤力响应时间也呈现出相同趋势。由图 12b 可知:输运流量从 260 L/min 增加到 320 L/min 时,水锤力的开始上升时间从 3.396 s 延迟到 3.487 s。

2) 停泵工况水锤模拟计算。停泵后不同输运流量下各监测点的流量变化及 UAV 处空腔变化趋势如图 13 所示。由图 13a 可知:当地面的水泵停止工作后,由于水泵的强制理想边界条件作用,地面泵端的流量迅速降至 0,并保持稳定,不再有任何流量变化。260、280、300、320 L/min 流量下降到 0 的时间分别为 3.093、3.023、2.953、2.88 s,流量下降到 0 的时间与输运流量成反比。UAV 端由于外部空气

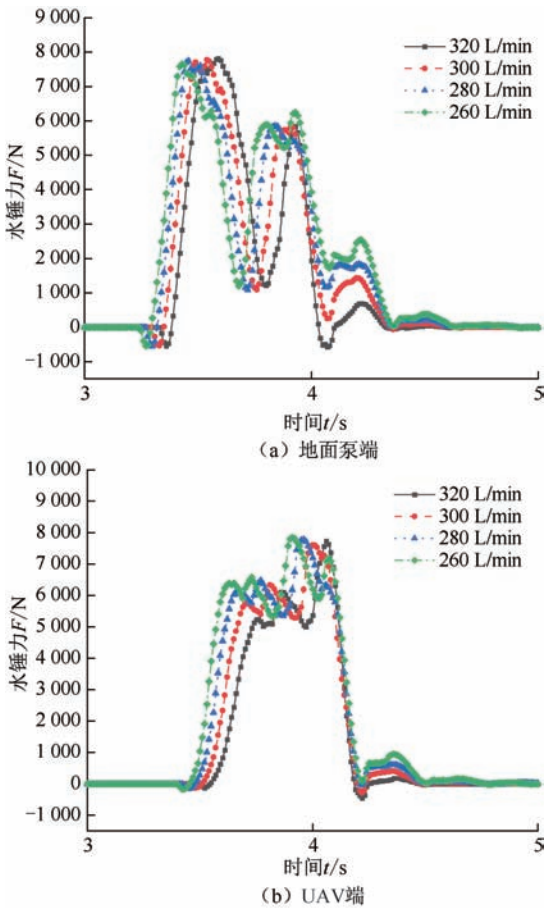


图 12 启泵时水锤力变化曲线

Fig. 12 The curve of water hammer force changes at start pump

的反向进入与水耦合,流量呈现围绕 0 波动状态,由图 13b 可知:输运流量越大,围绕 0 波动的幅值越大。由图 13c 可知:空腔生成的时间与输运流量成反比,从 260 到 320 L/min 开始生成空腔的时间从 3.115 s 下降到 2.889 s。生成的空腔容积大小与输运流量成正比,流量从 260 到 320 L/min 生成的最大空腔由 90 mL 上升到 147 mL。

图 14 为停泵时不同输运流量下各监测点的压力变化,由图 14a 可知:停泵后,压力迅速下降,动能与压力能相互转换,地面泵端的压力以压力波的形式在管缆内演替,由于管缆高度固定,停泵后压力围绕 2 000 kPa 上下波动。UAV 端停泵后压力迅速下降,由于流体动能迅速耗散,无法形成有效的压力波传播,因此压力迅速下降为 0,如图 14b 所示。各输运流量下,压力下降为 0 的时间不同,从 260 到 320 L/min 压力下降为 0 的时间从 3.083 s 下降至 2.864 s,输运流量越大,压力降为 0 的时间反而越短。

图 15 为停泵后不同输运流量下水锤力变化,由图 15a 可知:由于地面泵端是水锤现象的起始点,水

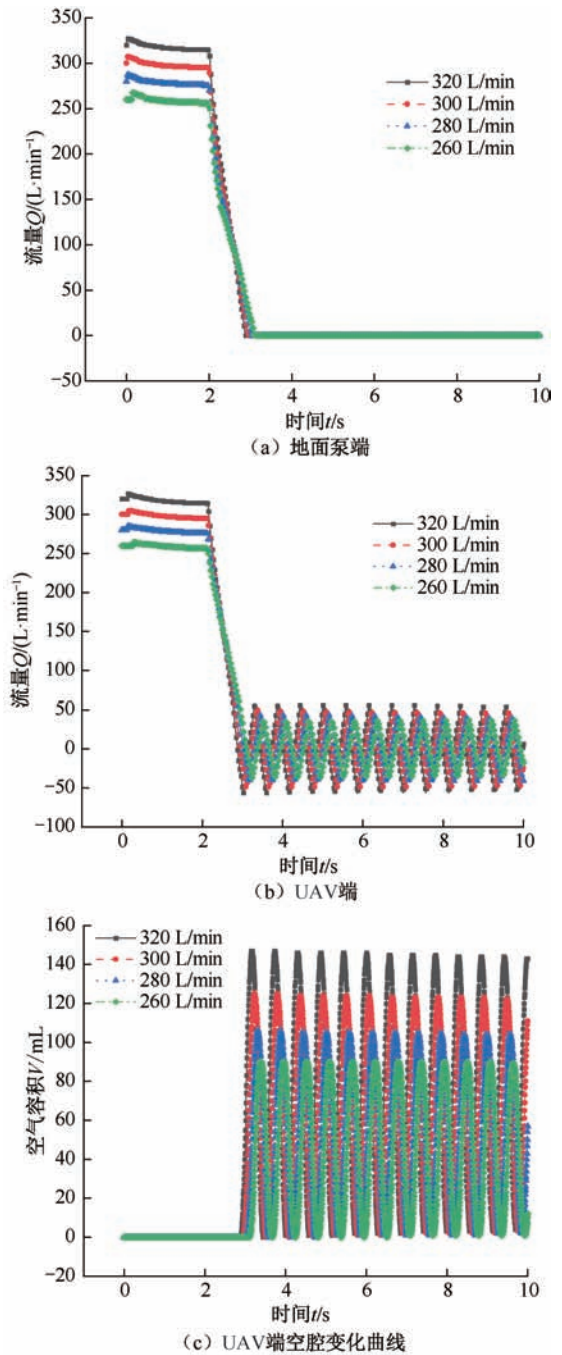


图 13 停泵时流量变化曲线与 UAV 端空气容积变化曲线

Fig. 13 Flow change curve and tethered UAV end cavity change curve at pump stop

锤力在这一端最为直接,波动的范围最为显著,表现出明显的振荡现象。输运流量越大,水锤力振荡的峰值也越大,由 260 到 320 L/min 产生的最大水锤力从 6 693.8 N 上升至 7 541.606 N,压力波动越剧烈,从而对管道系统和连接设备造成更大的冲击和潜在破坏风险。由图 15b 可知:停泵后,压力下降,水锤力反向增大。输运流量从 260 L/min 增加到

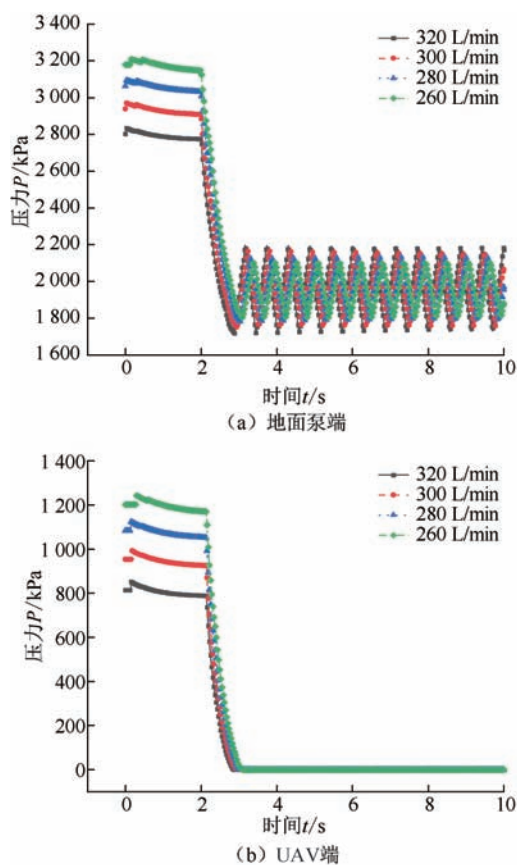


图 14 停泵时压力变化曲线

Fig. 14 Pressure change curve at pump stop

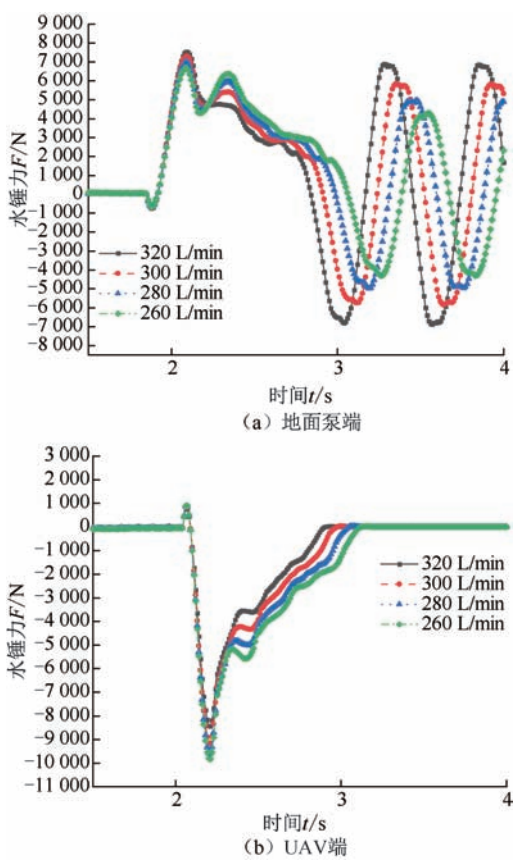


图 15 停泵时水锤力变化

Fig. 15 Water hammer force curve at pump stop

320 L/min 时,UAV 端的最大水锤力从 9 866.063 N 下降至 8 471.582 N。这表明输运流量越小,反向水锤力的峰值越大,对 UAV 稳定性的影响越显著,可能导致飞行姿态失控或动力系统过载。此外,水锤力的冲击还会对 UAV 的系留系统造成额外应力,影响其结构强度。

4 结 论

- 1) 在竖直管缆内,启停泵过程中水锤现象可划分为静止/稳态阶段、骤升/骤减阶段、稳态/振荡减弱阶段。无论是启泵停泵工况,都会在瞬时产生压力的骤升或压力的骤减,产生水锤力。
- 2) 管缆高度对启停泵工况下的水锤力有显著

影响,随着管缆高度的增加,地面泵端水锤力冲击更强且响应略迟,UAV 端反向力变化平稳;停泵时,地面泵端最大水锤力与高度成正相关,UAV 端反向水锤力趋减,较低的管缆高度可能加剧姿态扰动风险。

3) 输运流量对水锤力的影响在启停泵工况下有所不同。输运流量升高时,启泵阶段水锤峰值变化较小而响应略迟;停泵阶段,地面泵端水锤力峰值趋升,UAV 端反向力趋降,输运流量较低时可能易导致飞行姿态失控和系留系统损坏。

4) 下一步可以深入研究多场耦合作用对 UAV 稳定飞行造成的影响,并探索优化管道设计、设置缓冲装置等措施,提高 UAV 在复杂工况下的稳定性和安全性。

参 考 文 献

[1] 周恩毅, 谭露, 胡金荣. 城市建筑物消防安全评估[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(3): 179-185.
ZHOU Enyi, TAN Lu, HU Jinrong. Fire safety assessment of urban buildings[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 179-185.

[2] 李聪, 金衍科, 许文博, 等. 基于无人机投放灭火弹的雾场铺展特性及灭火效能研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(增 1): 185-191.
LI Cong, JIN Yanke, XU Wenbo, et al. Study on spreading characteristics and fire extinguishing efficiency of water mist

- based on UAV-borne fire extinguishing bombs[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(S1): 185-191.
- [3] 汪顺生, 郭新源. 基于 Bentley Hammer 的气囊式空气罐的水锤防护研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(6): 177-182, 244.
WANG Shunsheng, GUO Xinyuan. Water hammer protection effect of gasbag-type pneumatic tank based on the analysis using the Bentley Hammer software[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(6): 177-182, 244.
- [4] 郭亚周, 刘小川, 白春玉, 等. 轻型消费级无人机软包锂离子电池在机械强冲击载荷下的力学响应特性[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(2): 65-75.
GUO Yazhou, LIU Xiaochuan, BAI Chunyu, et al. Dynamic response characteristics of soft-pack lithium batteries for lightweight consumer drones under mechanical strong impact loads[J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(2): 65-75.
- [5] 何伟, 张素侠, 李亚泽, 等. 系留无人机系统冲击张力实验研究[J]. 力学学报, 2024, 56(5): 1 448-1 457.
HE Wei, ZHANG Suxia, LI Yaze, et al. Experimental study on the impact tension of a tethered unmanned aerial vehicle system[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2024, 56(5): 1 448-1 457.
- [6] 宗琦, 许仕荣. 城市输水系统应对水锤的韧性评价及其应用研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2023, 46(6): 120-127.
ZONG Qi, XU Shirong. Evaluation indicators for the resilience of urban water distribution systems to water hammer and application research[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2023, 46(6): 120-127.
- [7] XIN Qilong, DU Jiyun, LIU Musa, et al. Experimental study on the effects of two-stage valve closure on the maximum water hammer pressure in micro-hydroelectric system[J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 65: DOI: 10.1016/j.jwpe. 2024.
- [8] ZHA Congyi, PAN Chenrong, SUN Zhili, et al. Reliability sensitivity analysis for water hammer-induced stress failure of fluid-conveying pipe[J]. Applied Mathematical Modelling, 2024, 130: 51-65.
- [9] WANG Tingzheng, YU Chuqiao, YANG Haocheng, et al. Investigations into hydraulic instability during the start-up process of a pump-turbine under low-head conditions[J]. Processes, 2024, 12(9): DOI:10.3390/pr12091876.
- [10] CAO Huade, MOHAREB M, XIA Jianxin, et al. Interaction of wave motion and water hammer on the response of the risers in deep-sea mining[J]. Ocean Engineering, 2023, 279: DOI:10.1016/j.oceaneng. 2023.
- [11] ZHANG Xuliang, ZHENG Yushan, YANG Chengxin, et al. Influence of instantaneous shut-in on the safety of tubing string in ultra-deep high-temperature and high-pressure gas well[J]. Energy Technology, 2024, 12(8): DOI:10.1002/ente. 202400809.
- [12] 吴根水. 华北型煤田深部底板岩体宏观破坏机理及水锤效应研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2023.
WU Genshui. Investigation on macro-micro failure mechanics mechanism and water hammer effect of deep floor rock mass in north china type coal fields[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2023.
- [13] 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. Flow characteristics of vertical transportation system for high well deep fuel pipeline in mines[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(5): 228-233.
- [14] 宗琦. 泵站加压输水管道系统应对水锤的韧性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.
ZONG Qi. Resilience study of pumping station pressurised aqueducts to cope with water hammer[D]. Changsha: Hunan University, 2022.
- [15] 韩娟, 曾咏奎, 施少波. 某核级管道积气对小支管 BOSS 头焊缝影响分析[J]. 设备管理与维修, 2023 (23): 53-57.
- [16] 刘渊铭. 基于液压管路阀门关闭规律的水锤抑制方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
LIU Yuanming. Research on water hammer suppression method based on valve closing rule in hydraulic pipeline[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.

作者简介: 李 聪 (1991—),男,安徽淮南人,博士,副教授,主要从事森林火灾动力学、火灾图像识别等方面的研究。E-mail: 18600156862@163.com。