

引用格式: 陈良, 曾小超, 王昊, 等. 重力储能竖井超高速多轿厢气动阻力特性及优化设计 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(5): 11-25. CHEN Liang, ZENG Xiaochao, WANG Hao, et al. Aerodynamic drag characteristics and optimization design of ultra-high speed multi-car in gravity energy storage shaft [J]. Southern energy construction, 2025, 12(5): 11-25. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-418.

重力储能竖井超高速多轿厢气动阻力特性及优化设计

陈良¹, 曾小超¹, 王昊¹, 王文才², 张郁江², 李灏², 任贺贺², 柯世堂^{2,✉}

(1. 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京 100120;

2. 南京航空航天大学 土木与机场工程系, 江苏 南京 210016)

摘要: [目的]作为一种兼具环保性和经济性的物理储能方式, 重力储能有望成为未来可再生能源持续发展的重要支撑, 但需解决重力储能设备运行过程中气动阻力损耗大且不稳定等问题。[方法]文章通过数值模拟方法, 综合考虑竖井式重力储能设备运行数量、运行状态、相对位置等因素, 模拟位于井道中不同位置的多组动/静设备由起始运动至相互交会全过程, 分析关键参数变化对于设备运行期间的气动阻力特性和井道流场分布的影响。在此基础上, 设计一种具有良好流线型的导流罩, 对加装导流罩的设备进行参数化建模并进行数值模拟计算, 分析导流罩结构对设备表面压力分布以及气动阻力的影响。[结果]研究表明: 对于单组运行工况, 在变速运动阶段受动静交会影响, 轿厢气动阻力有所增大; 对于多组运行工况, 井道截面积减小, 气流被压缩后加速流动, 轿厢的气动阻力峰值显著增大, 且交会后的匀速运行阶段气动阻力的波动性更为明显; 增设导流罩后, 轿厢的气动阻力明显降低。对于单组运行工况, 增设导流罩后轿厢的气动阻力峰值为无导流罩的 39.8%; 对于多组运行工况, 增设导流罩后轿厢的气动阻力峰值为无导流罩的 60.2%。[结论]研究通过多工况数值模拟揭示了竖井式重力储能系统气动阻力动态演化机制, 证实了加装导流罩设计的有效性, 最大降幅达 60.2%, 为同类竖井式重力储能的结构气动优化设计提供参考。

关键词: 重力储能; 超高速多轿厢; 气动阻力; 导流罩; 气动优化

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-418

文章编号: 2095-8676(2025)05-0011-15

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-418

中图分类号: TK02; TM91



论文二维码

Aerodynamic Drag Characteristics and Optimization Design of Ultra-High Speed Multi-Car in Gravity Energy Storage Shaft

CHEN Liang¹, ZENG Xiaochao¹, WANG Hao¹, WANG Wencai², ZHANG Yujiang², LI Hao², REN Hehe², KE Shitang^{2,✉}

(1. North China Power Engineering Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China;

2. Department of Civil and Airport Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] As a physical energy storage method characterized by both environmental protection and economic efficiency, gravity energy storage is expected to become an important support for the sustainable development of renewable energy in the future. Nevertheless, it is urgent to solve the problems of large and unstable aerodynamic drag loss during the operation of gravity energy storage equipment. [Method] This paper employed the numerical simulation method to simulate the whole process of multiple sets of dynamic/static equipment located in different positions in the shaft from the initial movement to the intersection of each other,

收稿日期: 2024-12-10 修回日期: 2025-02-12 网络首发日期: 2025-05-13

基金项目: 江苏省杰出青年基金“风工程与结构抗风前沿研究”(BK20211518); 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司科技项目“基于竖井的重力储能技术研究”(JBGS2023-03)

comprehensively considering factors such as the number, operation state and relative position of the shaft-type gravity energy storage equipment. The influence of key parameter changes on the aerodynamic drag characteristics and the flow field distribution of the shaft during the operation of the equipment was analyzed. Based on this analysis, a streamlined guide cover was designed. The parametric modeling and numerical simulation calculation for the equipment with the guide cover were carried out, and the influence of the guide cover structure on the surface pressure distribution and aerodynamic drag of the equipment was analyzed. **[Result]** The research indicates that, for a single set operating conditions, the aerodynamic drag of the car increases due to the influence of dynamic and static intersection in the variable motion stage; for multiple sets operating conditions, the cross-sectional area of the shaft decreases, the airflow is compressed and accelerated, the peak value of the aerodynamic drag of the car increases significantly, and the fluctuation of the aerodynamic drag is more obvious in the uniform speed operation stage after the intersection. After adding the guide cover, the aerodynamic drag of the car is obviously reduced. For a single set operating conditions, the peak aerodynamic drag of the car with the guide cover is 39.8% of that without the guide cover; for multiple sets operating conditions, the peak aerodynamic drag of the car with the guide cover is 60.2% of that without the guide cover. **[Conclusion]** The dynamic evolution mechanism of the aerodynamic drag of the shaft-type gravity energy storage system is revealed by multi-condition numerical simulation, and the effectiveness of the guide cover design is validated, with a maximum reduction of 60.2%. This paper provides reference for the structural aerodynamic optimization design of such shaft-type gravity energy storage.

Key words: gravity energy storage; ultra-high speed multi-car; aerodynamic drag; guide cover; pneumatic optimization

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

为应对日益增长的传统能源危机与环境污染问题,全球各大国家不断加大对于新能源的开发投入,然而制约可再生能源发展的主要挑战之一是其无法维持稳定的间歇性电力供应^[1]。截至 2021 年底,新能源发电技术装机容量已超过我国电网总装机容量的 25%,储能问题成为制约新能源发电技术进一步发展的主要因素^[2]。随着全球可再生能源装机规模的持续增长,储能技术的需求显著提升。根据国际能源署(IEA)发布的《全球储能市场报告》,2021 年全球储能装机容量已达到 27 GW,其中抽水蓄能占比超过 90%,但受限于选址要求及生态影响,抽水蓄能的发展受到了较大制约^[3]。相比之下,重力储能技术因其占地面积小、可扩展性强、环境友好等优势,成为近年来研究的热点。以废弃矿洞等为通道的地底竖井式重力储能技术具有良好的可扩展性与环境友好性,为突破可再生能源领域瓶颈提供了一个有效的解决方案^[4-5]。重力储能技术通过重力势能与动能转换实现能量储存释放,其轿厢高速升降过程中气动阻力显著影响系统能效。

目前,国内外主要采用数值模拟方法对高层建筑的电梯间^[6-8]和山体隧道的高铁车组^[9-10]等结构进行了研究,探讨了运行速度^[11-13]和几何外形^[5,14-15]等因素对结构气动阻力特性的影响。已有研究成果对

超高速重力储能设备设计开发具有一定的参考价值。然而高层建筑中电梯出于安全性与乘坐舒适性等原因,通常处于相对低速运行状态;隧道中的高铁车组至多考虑两车交会状态。但重力储能存在多部轿厢在狭窄井道中超高速运动相互干涉的问题,所受的气动力和井道气流的流动特性将更为复杂,漩涡脱落所带来的不稳定气致振动将会更为剧烈^[16-17]。因此探究单井道多部超高速轿厢运行时气动阻力特性,进而提出对此类超高速储能轿厢的气动布局优化设计方法,对重力储能技术的推广利用具有重要意义^[18-19]。

鉴于此,以我国拟建的重力储能示范基地为研究对象,利用计算流体力学软件,通过动网格模拟方法对储能设备进行全尺寸三维瞬态模拟,并验证了简化模型的有效性。在此基础上,对比了不同运行数量的轿厢气动特性参数及井道流场分布,最后通过增设导流罩的方法,实现了重力储能竖井内轿厢气动阻力和整体能耗的降低。

1 工程概况

本文多轿厢超高速重力储能设备气动阻力计算考虑四轿厢结构,动轿厢分别从井壁两端以 1 m/s^2 加速到 16 m/s 然后匀速运动。通过数值模拟方法,综合考虑竖井式重力储能设备运行速度、运行状态、

相对位置等因素, 模拟位于井道中不同位置的多组
动/静设备由起始运动至相互交会全过程, 分析关键
参数变化对于设备运行期间的气动力特性和井道流
场分布的影响。各工况详细设置如表 1 所示。

表 1 计算工况参数设置详细列表
Tab. 1 Detailed list of calculation condition parameter settings

工况	井道长度/m	运动设备组数	静止设备相对位置	运动设备位置	导流罩	工况说明
1	1 000	1	1/4和3/4	两端	否	有连通通道
2	1 000	1	1/4和3/4	两端	否	无连通通道
3	1 000	1	1/4和3/4	两端	否	有横梁立柱
4	1 000	1	1/4和3/4	两端	否	无横梁立柱
5	800	1	1/4和3/4	两端	否	分析井道长度对气动阻力的影响
6	600	1	1/4和3/4	两端	否	
7	450	1	1/4和3/4	两端	否	
8	600	2	—	两端 (两端)	否	分析多轿厢同步运行对气动阻力的影响
9	600	1	1/4和3/4	两端	是	分析增设导流罩对气动阻力的影响
10	600	2	—	两端 (两端)	是	

多轿厢超高速重力储能设备的几何模型如图 1
所示。由于电梯轿厢高速运动时所受的阻力以压差
阻力为主, 且考虑到减阻措施的易行性与经济性,
采用的气动优化措施通过在原有轿厢上下增设导流
罩装置实现, 为了比选最佳的导流罩形式, 文献
[20] 设计了单面导流、双面导流、三面导流、四面
导流共 4 种导流罩方案, 并对采用不同形式导流罩
的轿厢阻力系数及能量损耗进行对比, 分析了加装
4 种导流罩后轿厢阻力系数和能量损耗随轿厢长度
与不同导流罩高度比的变化规律, 结果表明采用双

面导流且高度比为 3 时效果最佳, 故本文采用双面
导流的导流罩对轿厢进行减阻设计, 导流罩的具体
几何外形与尺寸参数如图 2 所示。

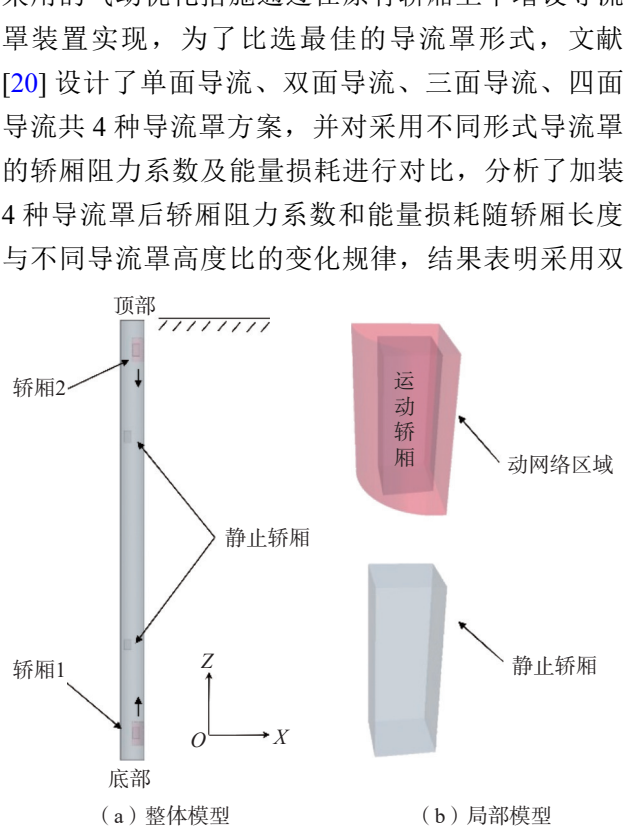


图 1 多轿厢超高速重力储能设备模型示意图
Fig. 1 Multi-car ultra-high-speed gravity energy storage
equipment model diagram

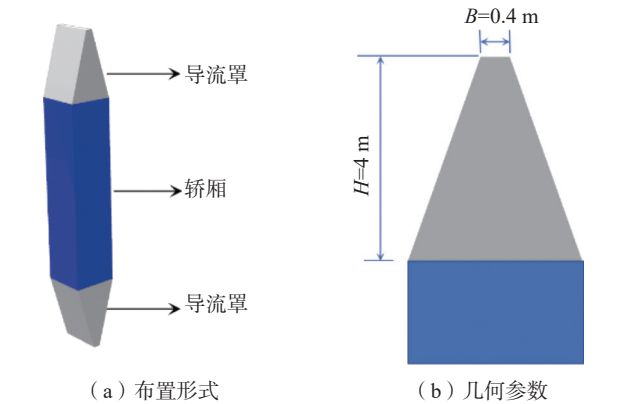


图 2 导流罩几何外形及相关参数示意
Fig. 2 Schematic of the geometrical shape of the guide
cover and related parameters

2 CFD 数值仿真模拟

2.1 数值方法

轿厢运行时, 重力储能竖井内的气流流动可视
为非定常且不可压缩的低速黏性流动, 数值模拟求
解的控制方程采用基于雷诺平均 Navier-Stokes 方程。
其控制方程的形式如下:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}\phi) = \text{div}[\Gamma \cdot \text{grad}(\phi)] + S \quad (1)$$

式中:

ρ ——空气密度 (kg/m^3);

$\mathbf{u}$ ——速度矢量;

ϕ ——流场通量;

S ——源项;

Γ ——扩散系数。

动网格方法的计算结果为非定常流场的流场数据,模拟的过程为轿厢运动边界的实时运动状况下的瞬态流场,最为符合真实情况下的轿厢运动。动网格定义物体运动时将会产生网格的变形和重构,在数值模拟时容易产生负体积而无法计算,采用动网格的运动方式需要定义轿厢的运动,由于物体“运动”时产生网格的变形和重构,在网格规模同等条件下采用动网格计算方法的计算量较大,其计算的速度会比滑移网格慢。如图 3 所示,在对轿厢运动采用动网格的运动方式时,将轿厢前后各取截面设置为动态层交界面,在这两个面上进行网格的变形与重构,以及与周围流场的信息传递。

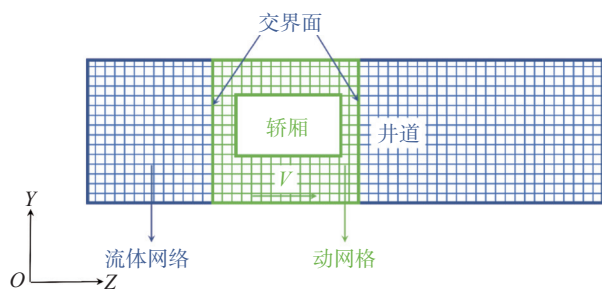


图 3 动网格方法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of moving mesh method

2.2 计算域及边界条件

考虑到多轿厢超高速重力储能设备实际工程情况,为保证雷诺数相似,模型按照实际尺寸建立。以井壁通道作为流体计算域,动轿厢及附近区域为重叠网格区域,对轿厢运动定义采用动态层动网格时,具体区域划分情况如图 4 所示;计算边界条件如表 2 所示。边界条件设置:在区域 1 中,区域 1 的井道底部设置为速度入口边界条件,顶部设置为压力出口边界条件,井道壁和轿厢壁设置为壁面边界条件;在区域 2 中,区域 2 的井道顶部设置为速度入口边界条件,底部设置为压力出口边界条件,井道壁和轿厢壁设置为壁面边界条件。在交界面 1、交界面 2、交界面 4、交界面 5 处进行轿厢周围流场数据的交互与网格重构,由于轿厢 1 和轿厢 2 以

动网格的方式在区域 1 和区域 2 内分别运动,在交界面 3 处进行区域 1 和区域 2 的流场数据交互。

采用结构化切割体网格进行划分,同时对各轿厢表面进行网格棱柱层加密。综合模拟效率和精度,表 3 给出了不同网格方案下轿厢阻力系数的变化。由表可知,3 种网格方案的轿厢阻力系数均值的计算结果相差不超过 5%,其中 9 611 万网格数的网格最小正交质量为 0.027,大于 10^{-5} ,网格最大歪斜度为 74.79° ,小于 85° ,两方面均能满足网格质量要求。为保证各计算工况网格数量保持在合理范围,选取方案二作为最终的网格划分方案。此外,为保证时间步长的合理性,我们选取 0.01 s、0.02 s、0.05 s、0.1 s 这 4 种时间步长进行对比分析,计算轿厢气动阻力的瞬态波动特性。结果显示,当时间步长小于 0.02 s 时阻力波动幅值的变化小于 5%,且计算收敛稳定,因此选取 0.02 s 作为最终的时间步长方案。

2.3 可靠性验证

本节以动#1-1 轿厢论证了井道内横梁、立柱、连通通道、井道长度等结构对设备运行时气动阻力的影响,给出了这些因素影响下的井道风速、风压分布情况和 z 轴向气动阻力时程曲线,并与简化井道模型进行对比。结合阻力系数时程对比,验证采用简化模型进行计算的可靠性。其中误差定义为以简化模型的轿厢气动阻力为基准,量化带有横梁、立柱、连通通道等不同因素后气动阻力的相对误差。

轿厢气动阻力系数根据空气动力学相关理论确定,其物理意义表示为轿厢实际受到的阻力与理论动压计算得出的阻力之比,其中轿厢实际受到的阻力为 CFD 计算过程中提取的轿厢上下表面的压力差,定义气动阻力系数为:

$$C_{(D)i} = \frac{f_{(D)i}}{0.5\rho_a v^2 A} \quad (2)$$

式中:

ρ_a ——空气密度 (kg/m^3);

$f_{(D)i}$ —— i 时刻轿厢的 Z 轴向气动阻力 (N);

v ——轿厢运动的速度 (m/s);

A ——迎风面积 (m^2)。

有连通通道的模型在距井道底部 20 m 处设置 2 条 20 m 长的分支,并将分支的边界设置为相应的速度入口和压力出口,将井道底部边界设置为壁面,对比模型两侧无连通通道,井壁边界条件设置为壁

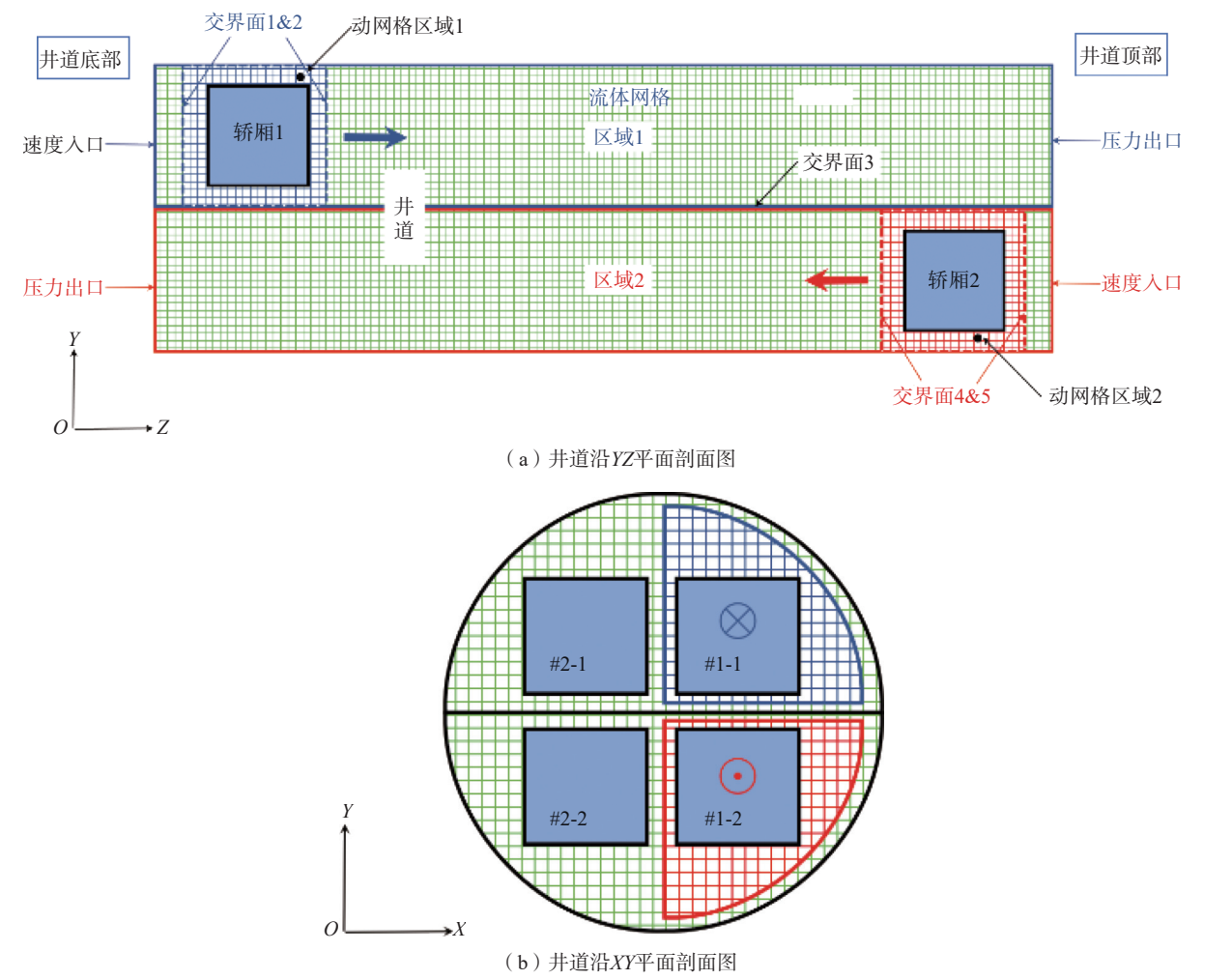


图 4 多轿厢超高速重力储能设备井道流场区域划分图

Fig. 4 Division map of shaft flow field area of multi-car ultra-high-speed gravity energy storage equipment

表 2 模型计算参数及边界条件

Tab. 2 Model calculation parameters and boundary conditions

计算参数	参数设定
模型尺寸	足尺模型
计算域主体	多轿厢超高速重力储能设备井道
网格方案	计算域采用结构化网格进行划分, 并对细部构件进行局部加密。最小单元尺寸为0.05 m。
入口边界条件	速度入口
出口边界条件	压力出口
壁面边界条件	无滑移边界条件
轿厢运动方法	动网格区域
流场求解方法	SIMPLEC
收敛容差	10^{-6}
对流项求解格式	二阶迎风格式

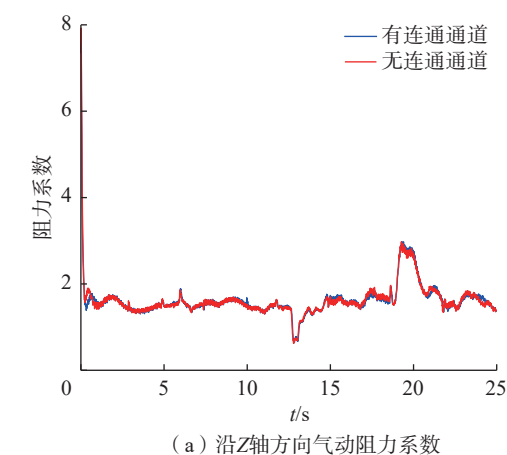
面, 井道底部边界条件设置为速度入口和压力出口。其余参数设置均与有连通通道一致。对比结果如图 5

表 3 网格无关性验证

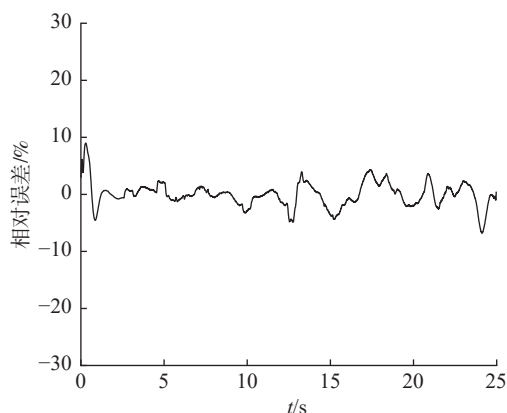
Tab. 3 Mesh independence verification

网格方案	方案一	方案二	方案三
网格总数/万个	6 255	9 611	12 420
网格最小正交质量	0.010	0.027	0.094
网格最大歪斜度/(°)	80.99	74.799	75.475
阻力系数均值	1.694	1.845	1.912

所示, 分析发现有无连通通道的气动阻力分布结果基本一致, 相对误差均在 10% 以内。建立带有横梁和立柱的全尺寸模型进行数值模拟计算, 与无横梁和立柱模型的计算结果进行对比, 分析横梁和立柱对井道流场的影响, 对比结果如图 6 所示, 分析发现有无横梁立柱前 15 s 的气动阻力分布结果基本一致, 在 15~22.5 s 阶段, 最大误差达到了 20%, 此



(a) 沿Z轴方向气动阻力系数

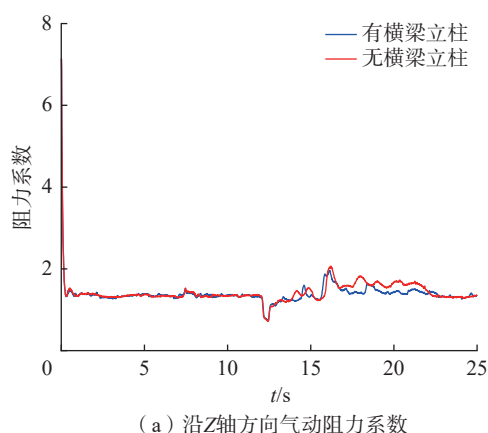


(b) 沿Z轴方向气动阻力系数有无连通通道的误差

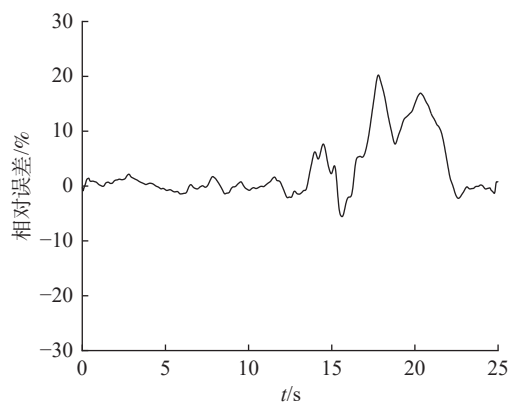
图 5 有无连通道工况下沿 Z 轴气动阻力系数及误差
Fig. 5 The aerodynamic drag coefficient along the Z-axis and the error under conditions with and without interconnected channels

阶段为动#1-1 轿厢与动#1-2 轿厢交会分离后的运行过程,此时竖井中动#1-1 轿厢运行速度大,且运行路径内的流场经过了动#1-2 轿厢的尾流干扰,因此动#1-1 轿厢表面的涡结构相较于 15 s 之前更为复杂;而横梁的存在会破坏轿厢表面的涡结构,使竖井内的流场更加紊乱,改变动#1-1 轿厢所受的压差阻力,因而使有无横梁立柱两种工况的动#1-1 轿厢气动阻力相对误差增大,但横梁立柱的影响对于轿厢的气动阻力是有利的,且气动阻力峰值处二者的取值近似,为了提高计算效率,故忽略了横梁立柱的影响。

建立 4 种不同长度的通井道模型 (1000 m、800 m、600 m、450 m),不同模型间除了井道长度不同,其余参数设置均一致。分析发现不同井道长度下的轿厢所受的气动阻力变化趋势相似,其中 Z 向气动阻力占主导地位,另外两个方向的阻力可



(a) 沿Z轴方向气动阻力系数



(b) 沿Z轴方向气动阻力系数有无横梁的误差

图 6 有无横梁立柱工况下沿 Z 轴气动阻力系数及误差
Fig. 6 The aerodynamic drag coefficient along the Z-axis and the error under conditions with and without a crossbeam

忽略不计。如图 7 所示,通过时程归一化处理,给出了 4 种井道长度下的 Z 向气动阻力变化对比图,从图中可以看出,1000 m、800 m、600 m 长度下的气动阻力变化趋势和取值基本一致,450 m 长度下的气动阻力在交会处出现极值增大的现象,这可能是因为井道匀速段长度过低所致。基于以上分析,可以考虑采用 600 m 井道长度来进行模拟计算,在

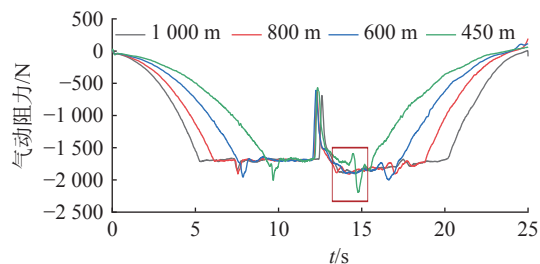


图 7 不同井道长度下动#1-1 气动阻力对比图
Fig. 7 Comparison of aerodynamic drag of moving #1-1 under different shaft lengths

保证计算结果与1000 m一致的前提下, 提高计算效率; 同时对 4 种井道长度下轿厢的气动阻力累计做功和平均功率进行对比, 表 4 给出单组轿厢运动工况气动阻力做功取值列表, 从表中可以看出, 1000 m、800 m、600 m 长度下的气动阻力实际累计做功与理论累计做功的比值均为 1.5 左右, 450 m 长度下比值为 1.485, 与其他三种长度存在明显差异, 因此可以认为采用 600 m 井道长度来进行模拟计算对累计气动阻力累计做功影响与 1000 m 长度一致。

表 4 单组轿厢运动工况气动阻力做功取值列表

Tab. 4 List of aerodynamic drag work value for single set of car movement conditions

井道长度/m	运动时间/s	实际累计做功/kJ	理论累计做功/kJ	比值 (实际/理论)
1 000	75.620	1 455.442	955.862	1.523
800	64.750	1 117.106	731.481	1.527
600	52.250	771.521	507.100	1.521
450	42.250	486.537	327.596	1.485

3 计算结果与分析

3.1 多轿厢交会气动性能分析

根据上文分析可知, 井道建模时可不考虑连通道和横梁立柱的影响, 同时采用 600 m 井道长度进行数值模拟可兼顾计算精度和效率。本节给出了 600 m 井道长度下的不同运行组数的超高速重力储能轿厢采用 1 m/s² 加速度加速到 16 m/s 运行的全过程分析, 重点关注首次动静交会 (16.3 s)、动动交会 (25.4 s)、二次动静交会 (35.1 s) 过程中的气动阻力变化, 对比了 4.0 s、8.0 s、12.0 s 和 16.0 s 的井道流场速度、压力云图及交会过程中 24.9 s、25.3 s、25.6 s、27.0 s 时刻的流场井道内风速、风压分布情况, 由于速度云图更加关注轿厢周围的流场尤其是尾流流场, 因此需要将更多的尾流部分截取出来进行比较, 所以轿厢位置相对靠前; 而压力云图则更加关注轿厢前后表面的压力差对比, 因此截取时轿厢位置相对居中。

图 8 给出单组轿厢运动加速阶段轿厢周围速度与压力云图, 加速过程中, 轿厢运动前部和后部附近的流场速度增加, 高流速区域的面积逐渐增大, 轿厢后方存在一个较大面积的高速气流区; 轿厢运

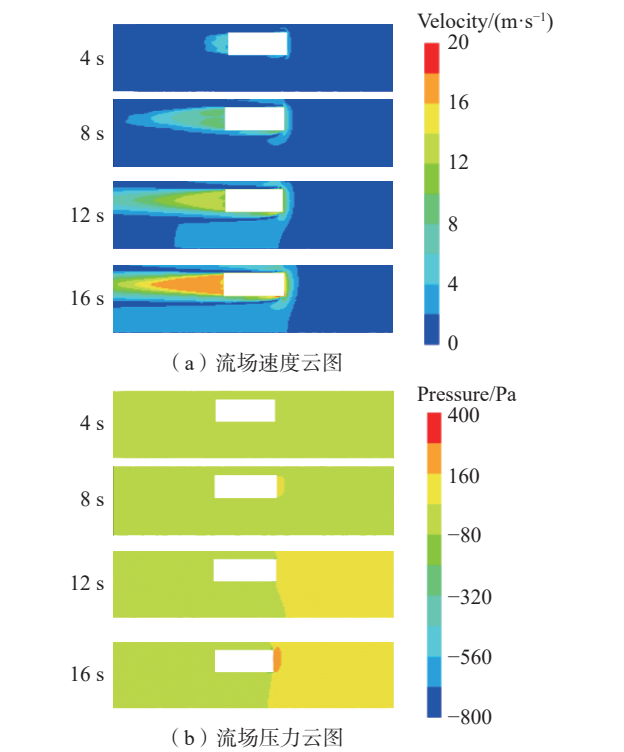


图 8 单组轿厢运动加速阶段流场速度、压力分布图
Fig. 8 The velocity and pressure distribution of the flow field in the acceleration stage of a single set of car movement

动前方的空气压力呈增大趋势, 并且随着加速过程的推进, 动轿厢前部的压力与高压区面积均越来越大; 轿厢侧面和轿厢后方因空气流速较高存在负压区。

图 9 给出了单组轿厢匀速交会过程轿厢周围速度与压力云图, 速度云图显示, 加速过程结束后轿厢周围流场较远处流场速度有明显提高, 轿厢两侧和运动后方区域存在高速气流。随着两部轿厢的距离不断减小, 两个流动剧烈的流体区域融合为一个大流场区, 轿厢周围的空气流动更为复杂且剧烈; 压力云图显示, 轿厢距离较远时, 运动前方的空气压力较高, 并向对向的低压区辐射, 轿厢两侧和运动后方的区域产生负压区; 轿厢距离更近时, 两部轿厢前方的高压区融合为一个高压区域, 而当轿厢足够接近时轿厢的高压区消失; 交会过程结束后, 轿厢运行的前方产生正压区并向外辐射。

图 10 给出了单组轿厢运动工况下动轿厢所受气动阻力时程变化曲线, 动轿厢所受的气动阻力方向相反, 其绝对值大小变化规律基本一致。以动轿厢#1-1 为例, 在匀加速阶段, 气动阻力绝对值呈现

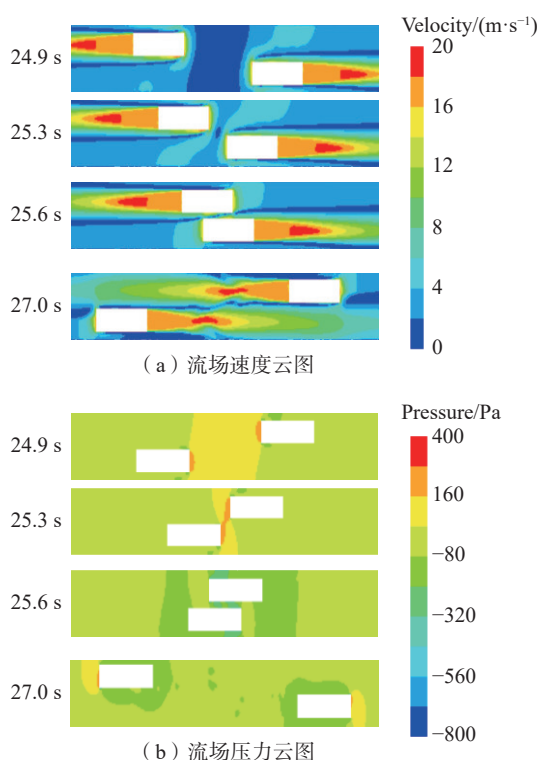


图 9 单组轿厢匀速交会阶段流场速度、压力分布图

Fig. 9 The velocity and pressure distribution of the flow field at uniform speed intersection stage of a single set of car

增大趋势, 由于动静交会, 在加速过程结束时, 轿厢所受气动阻力增速加快, 其峰值为 -2166.63 N 。动静交会结束后动轿厢气动阻力会回升至交会前的匀速运动时气动阻力, 其值为 -1750 N 左右。在两部动轿厢的交会过程中, 轿厢所受气动阻力先骤减到 -644.17 N 再骤增到 -2031.07 N ; 轿厢交会后的驶离过程中, 气动阻力在波动中逐渐减小至匀速运动时阻力大小; 在减速过程刚开始时, 发生第二次动静交会, 轿厢所受气动阻力再次增大, 其峰值为 -2132.71 N ; 随后的匀减速过程中轿厢所受气动阻力逐渐减小。

图 11 给出了单组轿厢运动工况下静止轿厢所受气动阻力时程变化曲线, 静轿厢所受的气动阻力绝对值仅在动静交会时骤然增加。其气动阻力峰值出现在动静轿厢首次交会时, 达到 990.65 N , 次峰值出现在第二次动静交会时, 其值大小为 -872.62 N 。其余阶段气动阻力在零值附近波动, 其中静轿厢在交会后的阻力波动性更为强烈。

图 12 给出了多组轿厢运动加速阶段轿厢周围速度与压力云图, 运动过程中, 轿厢周围流场的最

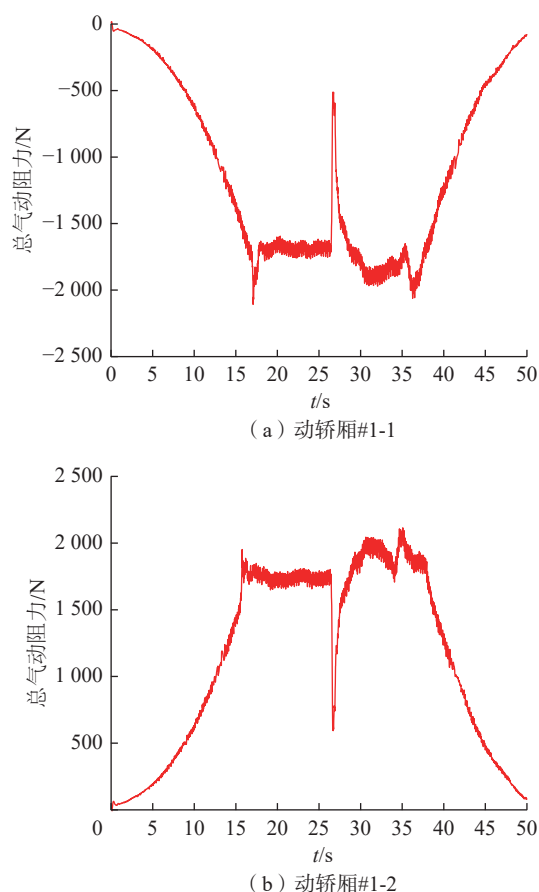


图 10 单组轿厢运动工况动轿厢气动阻力时程变化曲线
Fig. 10 The time history curve of aerodynamic drag of moving car in single set of car movement condition

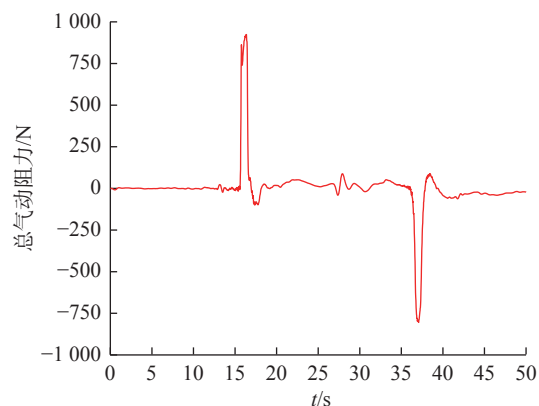
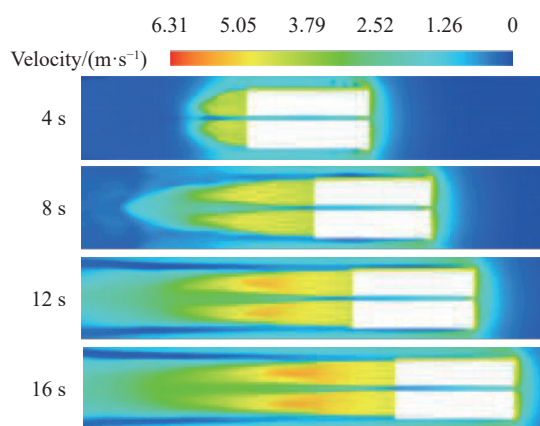
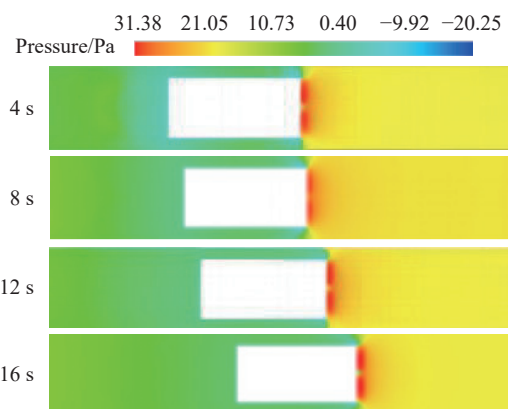


图 11 单组轿厢运动工况静轿厢气动阻力时程变化曲线
Fig. 11 The time-history curve of aerodynamic drag of static car under single set of car movement condition

高流速均超过当前时刻轿厢运动速度的 40% , 随着加速进行, 动轿厢前部和后部附近的流场速度越来越高, 并且高流速区域的面积越来越大; 轿厢运动



(a) 流场速度云图



(b) 流场压力云图

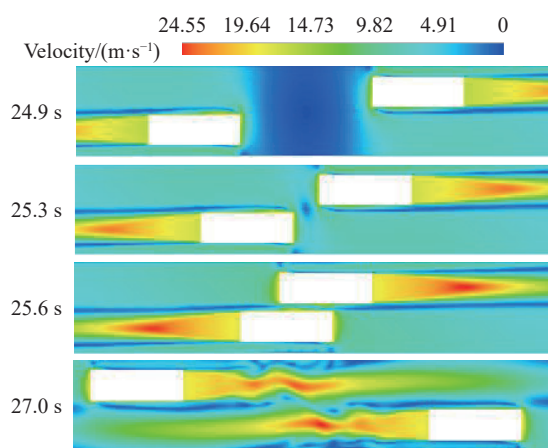
图 12 多组轿厢运动加速阶段流场速度、压力分布图

Fig. 12 The velocity and pressure distribution of the flow field in the acceleration stage of multiple sets of car movement

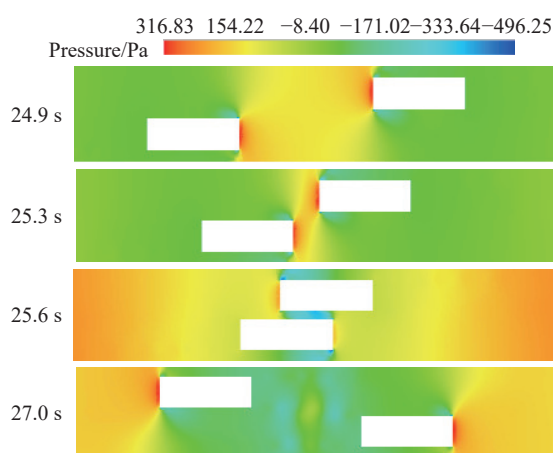
前方的空气压力呈增大趋势,并且随着加速过程的推进,动轿厢前部的压力及高压区面积均越来越大,至16 s时,动轿厢前部的压力达309.88 Pa;轿厢侧面和轿厢后方由于空气流速较高存在负压区。

图13给出了多组轿厢运动匀速交会阶段轿厢周围速度与压力云图,轿厢距离较远时,轿厢两侧和运动后方区域存在较大面积的高速气流并产生负压区;随着轿厢接近,低风速区消失且两个局部流体区域相互融合;在交会期间仅轿厢间的交错位置存在局部高负压区;两部轿厢交会时周围流场的极值风速相较未交会前有所下降;27.0 s时轿厢交会过程结束轿厢背向运行,其运行的前方正压区恢复并向外辐射,运动后方负压大小受尾流影响下降。

图14给出了多组轿厢运动工况下动轿厢所受气动阻力时程变化曲线,不同运动方向轿厢所受的



(a) 流场速度云图



(b) 流场压力云图

图 13 多组轿厢匀速交会阶段流场速度、压力分布图

Fig. 13 The velocity and pressure distribution of the flow field in the uniform speed intersection stage of multiple sets of car

气动阻力方向相反,其绝对值大小变化规律基本一致。两组轿厢同时运动时会显著放大轿厢受到的气动阻力。以向上轿厢为例,多组轿厢的气动阻力不再受动静交会影响,其峰值出现在匀减速运动开始阶段,其值较单轿厢工况放大了24.8%;交会后的驶离过程中,气动阻力在波动中逐渐减小至匀速运动时的阻力大小;匀减速过程中,轿厢所受气动阻力呈现逐渐减小的趋势。

3.2 轿厢导流罩气动性能优化

图15给出了增设导流罩后单组动轿厢首次和静止轿厢交会过程中轿厢周围速度与压力云图,动轿厢在通过静止轿厢时引起了静止轿厢前部和后部流速的显著差异;动轿厢在通过静止轿厢后,静止轿厢周围的流场速度分布逐渐趋于均匀;同时静止

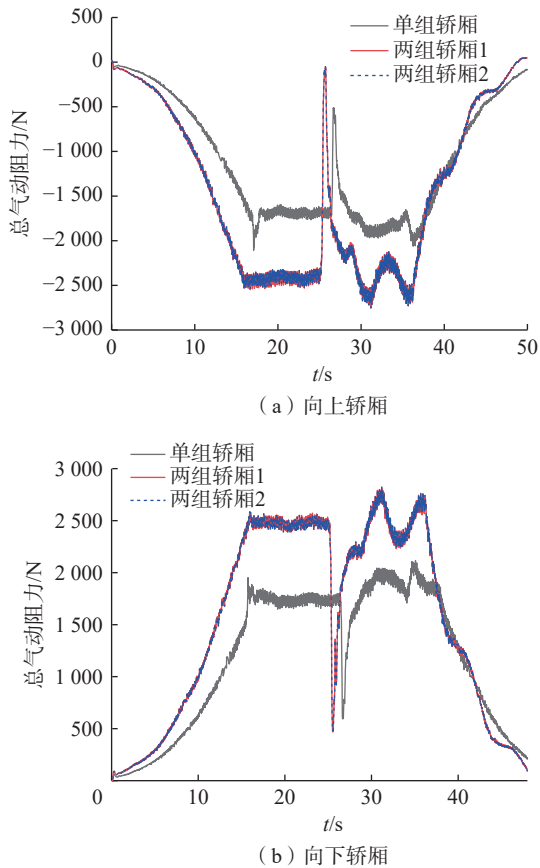


图 14 多组轿厢运动工况动轿厢气动阻力时程变化曲线
Fig. 14 The time-history curve of aerodynamic drag of moving car under multiple sets of car movement conditions

轿厢的存在干扰了动轿厢一侧的尾流发展；在动静交会过程中，轿厢运动前方的空气压力先增大，当前端脱离静止轿厢后开始减小。且静止轿厢前后的压力相对大小发生多次变化，说明静止轿厢在交会期间所受的气动阻力具有高频振荡的特性。

图 16 展示了增设导流罩后单组轿厢在匀速运动交会阶段轿厢周围速度与压力云图。在增加导流罩后，高速运动的轿厢对周围气流的加速作用减弱，动轿厢侧后方区域的流场速度分布均匀。两轿厢交会过程并未对气流产生进一步加速作用，轿厢周围的空气流动很快趋于稳定；轿厢距离较远时，对比增加导流罩前，动轿厢前方高压区面积显著减小；导流罩的存在提前了两轿厢接近的时刻，二者间的高压区已经消失；从 25.9~26.7 s 轿厢逐渐脱离至交会结束背向运动，轿厢运行的前方正压区逐步恢复并向后辐射。

图 17 给出了单组轿厢运动工况下有无导流罩

的动轿厢所受气动阻力时程对比曲线，导流罩的设置显著减小了轿厢运行过程中的气动阻力大小。以

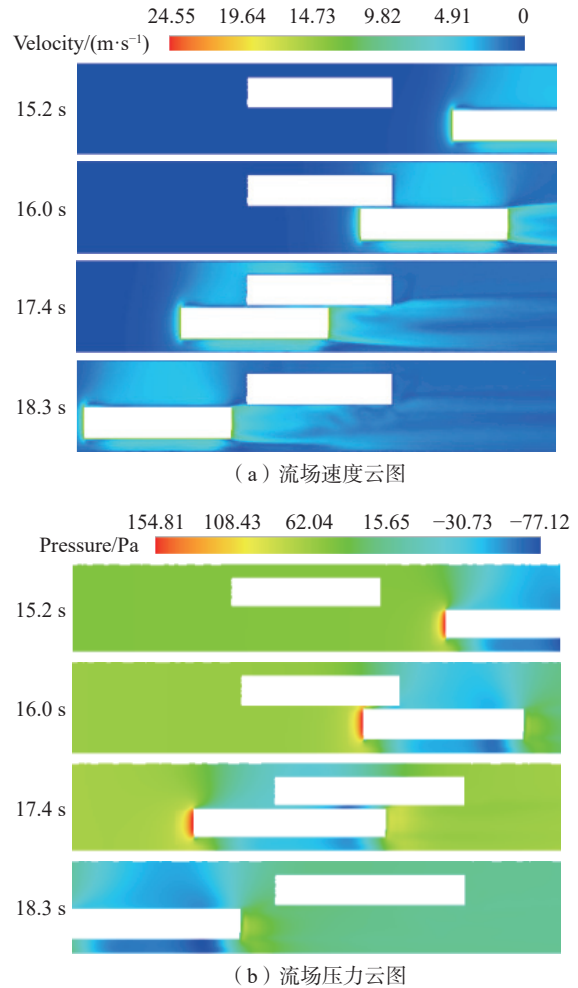
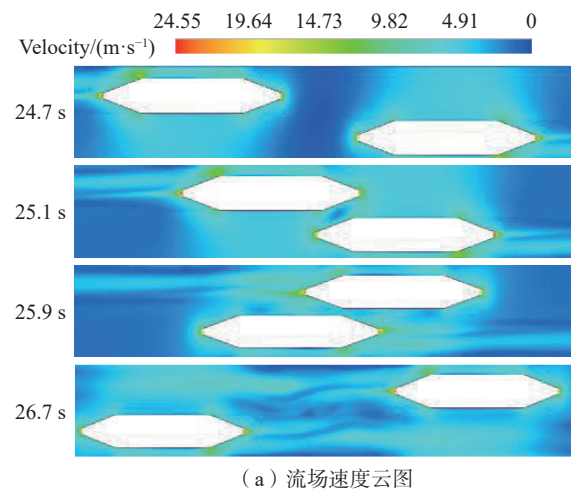


图 15 带导流罩的单组轿厢动静交会速度、压力分布图
Fig. 15 Velocity and pressure distribution diagram of a single set of car with guide cover in dynamic and static intersection stage



(a) 流场速度云图

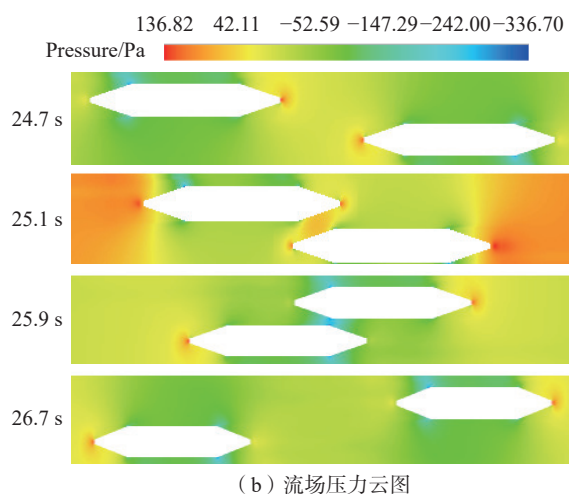
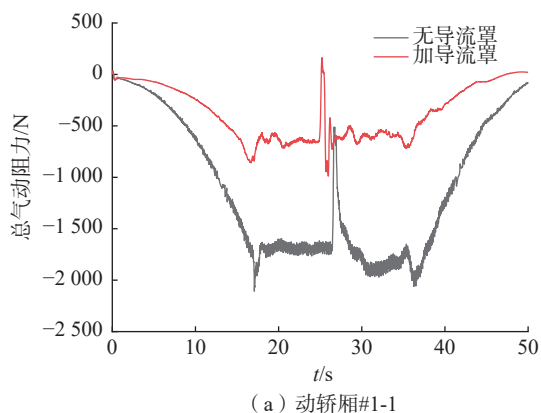
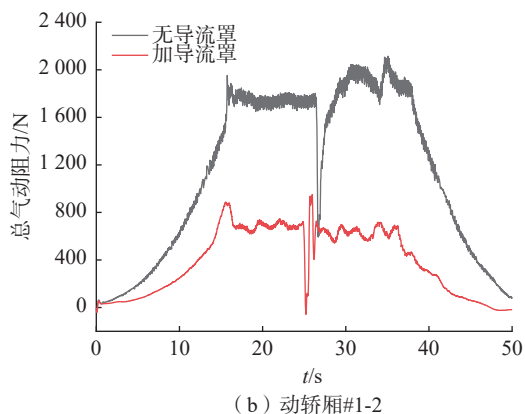


图 16 带导流罩的单组轿厢匀速交会速度、压力分布图
Fig. 16 Velocity and pressure distribution diagram of a single set of car with guide cover in the uniform speed intersection stage

动轿厢#1-1 为例,在匀加速阶段最后发生动静交会时,增设导流罩的轿厢气动阻力峰值为 -863.33 N ,



(a) 动轿厢#1-1



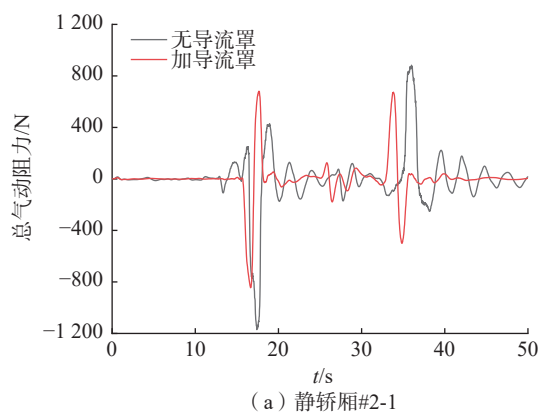
(b) 动轿厢#1-2

图 17 带导流罩单组轿厢工况动轿厢气动阻力时程曲线
Fig. 17 The time-history curve of aerodynamic drag of the moving car of a single set of car with guide cover

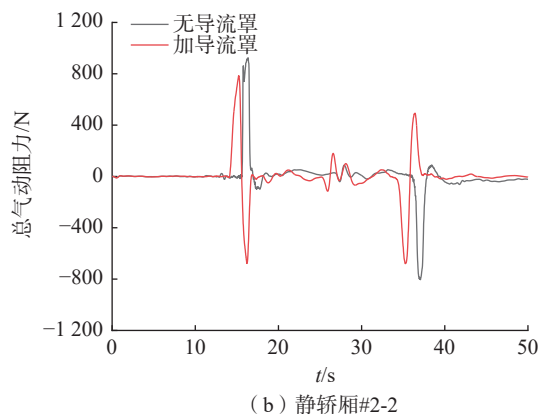
仅为原来气动阻力大小的 39.8%。在动静交会结束后的匀速运动阶段,其气动阻力在 -630 N 附近波动变化,其大小约为原来的 36.0%。增设导流罩的两部动轿厢的交会过程中,轿厢所受气动阻力反复振荡,首先出现有短暂的气动升力 159.02 N ,后气动阻力骤增至整个运动过程中的最大值 -1023.52 N ;轿厢交会后的驶离过程中,气动阻力在波动中逐渐减小至匀速运动时的阻力。

图 18 给出了单组轿厢运动工况下静止轿厢所受气动阻力时程变化曲线,可以看到,静止轿厢#2-1 和#2-2 所受的气动阻力方向相反,其绝对值大小变化规律基本一致。增设导流罩的静轿厢所受的气动阻力在单个动静交会期间出现骤增骤减现象,与风压分布分析结果一致。以静轿厢#2-1 为例,增设导流罩后,在动静首次交会时,其首先受到峰值为 -840.03 N 的负压(原始轿厢为 -1161.27 N),后又受峰值为 679.22 N 的正压。

如图 19 给出了增设导流罩的多组轿厢同时运



(a) 静轿厢#2-1



(b) 静轿厢#2-2

图 18 带导流罩单组轿厢工况静轿厢气动阻力时程曲线
Fig. 18 The time-history curve of the aerodynamic drag of the static car of a single set of car with guide cover

动加速阶段轿厢周围速度与压力云图,加速运动过程中,轿厢周围流场的高流速与当前时刻轿厢运动速度基本一致,增设导流罩后轿厢运动对气流运动基本无加速作用,且在轿厢后方的高速气流区域面积小并很快发散;轿厢运动前方的正压区和侧后方的负压区大小均小于未设导流罩的工况。

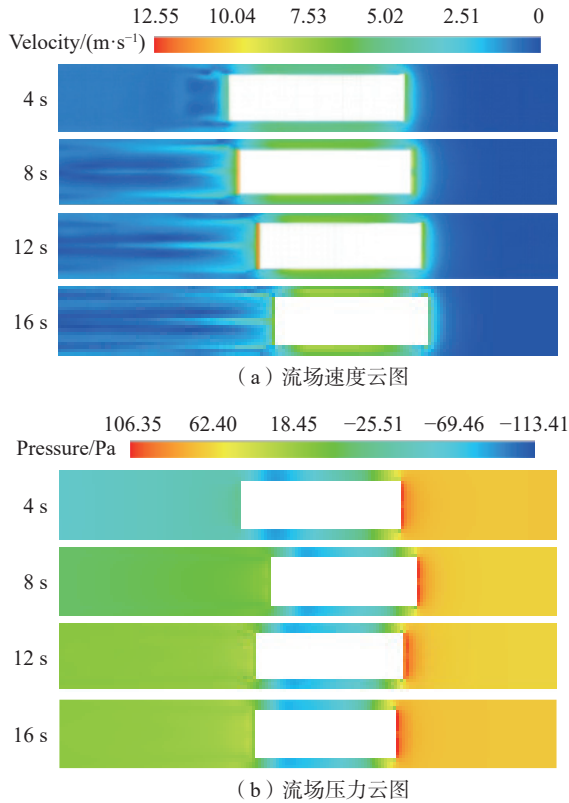


图 19 带导流罩多组轿厢工况加速阶段流场速度、压力分布图

Fig. 19 The velocity and pressure distribution of the flow field in the acceleration stage of multiple sets of cars with guide cover

图 20 展示了增加导流罩后多组轿厢在匀速运动交会阶段轿厢周围速度与压力云图,增加导流罩后,高速运动的轿厢对周围气流的加速作用减弱,动轿厢侧后方区域的流场流速分布均匀。两轿厢交会过程并未对气流产生进一步加速作用,轿厢周围的空气流动很快趋于稳定;轿厢距离较远时,运动前方的高压范围显著减小;25.1 s 时,导流罩的存在提前了两轿厢接近的时刻,二者间的高压区已经消失;轿厢逐渐脱离至背向运动时,轿厢运行前方正压区逐步恢复并向后辐射。

图 21 展示了增设导流罩前后多组轿厢运动工

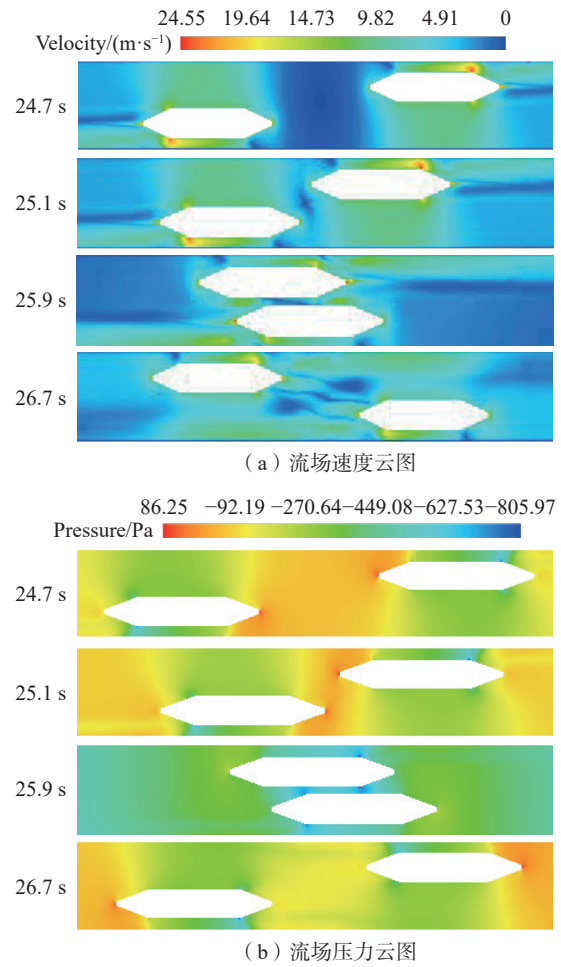


图 20 带导流罩多组轿厢工况匀速交会阶段流场速度、压力分布图

Fig. 20 The velocity and pressure distribution of multiple sets of cars with guide cover in uniform speed intersection stage

况下动轿厢所受气动阻力时程变化曲线,可以看到,不同运动方向的轿厢所受的气动阻力方向相反,其绝对值大小变化规律基本一致。以向上轿厢为例,对于有导流罩的不同运行组数工况,运行过程中的轿厢气动阻力峰值出现在动交会阶段,多组同时运行的峰值为 -1651.22 N ,较单组运行工况增大了 66.9% ;在交会前的匀速运动阶段,多组同时运行的气动阻力大小约为 -1350 N ,为单组运行工况的 2.14 倍。对于有无导流罩的 2 组轿厢运行工况对比,有导流罩的运行过程中的轿厢气动阻力峰值减小了 1102.18 N ,降低了 39.8% ;在交会前的匀速运动阶段,多组共同运行的气动阻力大小约为无导流罩工况的 56.8% 。

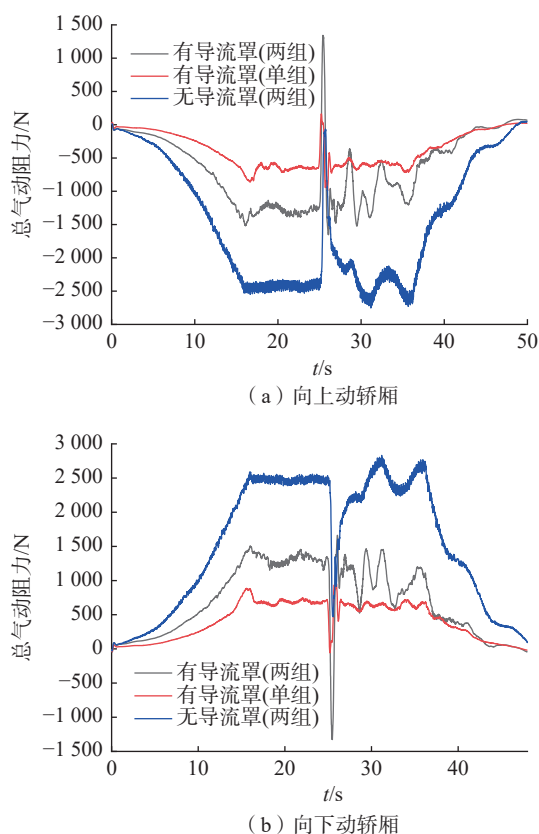


图 21 带导流罩多组轿厢工况动轿厢气动阻力
时程变化曲线

Fig. 21 The time-history curve of aerodynamic drag of the
moving car of multiple sets of cars with guide covers

4 结论

本研究通过动网格方法,利用场函数模拟了竖井式重力储能轿厢在井道内的加速、匀速和减速过程,确定了连通通道、横梁立柱及井道长度对于模拟结果的影响。对比分析单组轿厢和两组轿厢在运行全过程中各典型时刻的流场特性和压力分布情况,探究了不同工况下轿厢运行全过程的气动阻力;并通过增设导流罩的方法改变结构气动外形,实现运行过程中结构的气动性能优化。主要研究结论如下:

1) 连通通道与横梁立柱对气动阻力分布影响可忽略,且采用 600 m 井道长度可保证与 1000 m 模型计算结果一致性,这为实际工程数值模拟提供重要简化准则。

2) 匀加速阶段轿厢所受气动阻力呈现逐渐增大趋势,动静交会阶段呈现骤变特征,动动交会阶段轿厢所受气动阻力先骤减后骤增,交会后的匀速运行阶段受流场扰动影响,气动阻力出现波动性。

3) 多组运行工况下气动阻力峰值较单组工况增大 24.8%,且波动幅度增加 37%。实际工程布局需权衡储能密度与气动损耗:当井道直径受限时,建议采用单组运行模式;若需多组协同,则应保持轿厢具有足够间距,并通过交错运行时序降低气流干涉效应。

4) 双面导流罩设计使单组/多组工况气动阻力峰值分别降低至 39.8% 和 60.2%,其流线型外形可很大程度上减少尾流分离面积。

致谢: 本文中重力储能系统结构设计及数值模拟方案的制定工作是在南京航空航天大学工作人员的大力支持下完成的,在此一并谨表谢意。

参考文献:

- [1] 修晓青,李建林,李文启,等. 储能系统商业模式及其优化规划方法 [J]. 电力建设, 2019, 40(6): 41-48. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2019.06.005.
- XIU X Q, LI J L, LI W Q, et al. Research on business model and optimization planning method of energy storage station [J]. Electric power construction, 2019, 40(6): 41-48. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7229.2019.06.005.
- [2] 崔文倩,魏军强,赵云灏,等. 双碳目标下含重力储能的配电网多目标运行优化 [J]. 电力建设, 2023, 44(4): 45-53. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2023.04.006.
- CUI W Q, WEI J Q, ZHAO Y H, et al. Multi-objective operation optimization of distribution network with gravity energy storage under double carbon target [J]. Electric power construction, 2023, 44(4): 45-53. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2023.04.006.
- [3] 史沁鹏,郭茹,洪剑锋,等. 直线电机在竖井式重力储能中的应用和研究 [J/OL]. 南方能源建设, 2024: 1-10 (2024-10-31) [2024-12-10]. <https://www.energychina.press/cn/article/doi/10.16516/j.ceec.2024-244>. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-244.
- SHI Q P, GUO R, HONG J F, et al. Application and research of linear motors in vertical gravity energy storage [J/OL]. Southern energy construction, 2024: 1-10 (2024-10-31) [2024-12-10]. <https://www.energychina.press/cn/article/doi/10.16516/j.ceec.2024-244>. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-244.
- [4] 曾小超,史沁鹏,洪剑锋,等. 竖井式重力储能系统模型构建及功率优化 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(4): 37-47. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-319.
- ZENG X C, SHI Q P, HONG J F, et al. Model establishment and power optimization of vertical gravity energy storage system [J]. Southern energy construction, 2025, 12(4): 37-47. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-319.
- [5] JING H, ZHANG Q, ZHANG R J, et al. Aerodynamic characteristics analysis of ultra-high-speed elevator with different

- hoistway structures [J]. *International journal of structural stability and dynamics*, 2022, 22(2): 2250020. DOI: 10.1142/S0219455422500201.
- [6] 崔瀚文. 高速电梯轿厢交会过程气动特性及参数影响研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2021. DOI: 10.27273/d.cnki.gsajc.2021.000088.
- CUI H W. Research on aerodynamic characteristics and parameter influence of high speed elevator car rendezvous process [D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2021. DOI: 10.27273/d.cnki.gsajc.2021.000088.
- [7] 李超越. 超高速电梯环隙流场流动行为与气动声学特性研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2024. DOI: 10.27273/d.cnki.gsajc.2024.000228.
- LI C Y. Research on the flow behavior and aeroacoustic characteristics of the annular flow field in the ultra-high-speed elevator [D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2024. DOI: 10.27273/d.cnki.gsajc.2024.000228.
- [8] 陈西忍, 叶文华, 颜晗, 等. 超高速电梯导流罩气动特性与耗能研究 [J]. *中国工程机械学报*, 2023, 21(5): 492-497. DOI: 10.15999/j.cnki.311926.2023.05.021.
- CHEN X R, YE W H, YAN H, et al. Research on aerodynamic characteristics and energy consumption of ultra-high-speed elevator fairing [J]. *Chinese journal of construction machinery*, 2023, 21(5): 492-497. DOI: 10.15999/j.cnki.311926.2023.05.021.
- [9] 王田天, 黄大飞, 王钰, 等. 升力翼对高速列车通过隧道时气动效应的影响 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2024, 55(5): 1702-1712. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2024.05.004.
- WANG T T, HUANG D F, WANG Y, et al. Influence of aerodynamic effect of wings on high-speed trains passing through tunnels [J]. *Journal of Central South University (science and technology)*, 2024, 55(5): 1702-1712. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2024.05.004.
- [10] 周细赛, 刘堂红, 陈争卫, 等. 头部主型线变化对列车隧道交会气动性能的影响 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2018, 49(2): 493-501. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2018.02.031.
- ZHOU X S, LIU T H, CHEN Z W, et al. Influence of head outlines on aerodynamic effect of two trains intersecting in tunnel [J]. *Journal of Central South University (science and technology)*, 2018, 49(2): 493-501. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2018.02.031.
- [11] LI F L, LUO J J, WANG L, et al. Analysis of aerodynamic effects and load spectrum characteristics in high-speed railway tunnels [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2021, 216: 104729. DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104729.
- [12] 周苗苗, 刘堂红, 夏玉涛, 等. 不同速度模式下列车通过隧道引起的压力波的比较研究 (英文) [J]. *中南大学学报 (英文版)*, 2022, 29(8): 2639-2653. DOI: 10.1007/s11771-022-5098-2.
- ZHOU M M, LIU T H, XIA Y T, et al. Comparative investigations of pressure waves induced by trains passing through a tunnel with different speed modes [J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(8): 2639-2653. DOI: 10.1007/s11771-022-5098-2.
- [13] QIU L M, ZHOU H F, WANG Z L, et al. A stepped-segmentation method for the high-speed theoretical elevator car air pressure curve adjustment [J]. *Energies*, 2020, 13(10): 2585. DOI: 10.3390/en13102585.
- [14] 卫梦杰, 刘峰, 邸娟, 等. 高速列车通过最不利隧道气动阻力数值分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2024, 58(1): 167-177. DOI: 10.7652/xjtub202401016.
- WEI M J, LIU F, DI J, et al. Numerical analysis of aerodynamic resistance for high-speed trains passing through the most unfavorable tunnel [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2024, 58(1): 167-177. DOI: 10.7652/xjtub202401016.
- [15] 王家斌, 高广军, 张琰, 等. 高速列车周围风雪运动特性及转向架区域积雪成因分析 [J]. *铁道学报*, 2024, 46(7): 30-41. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2024.07.004.
- WANG J B, GAO G J, ZHANG Y, et al. Movement characteristics of wind and snow around high-speed trains and causes of snow accumulation in bogie regions [J]. *Journal of the China railway society*, 2024, 46(7): 30-41. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2024.07.004.
- [16] 高广军, 张普阳, 商雯斐, 等. 流线型部位风阻制动板对高速列车气动特性的影响分析 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2023, 54(9): 3708-3718. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2023.09.030.
- GAO G J, ZHANG P Y, SHANG W F, et al. Analysis of influence of aerodynamic braking plates installed on streamlined parts on aerodynamic characteristics of high-speed train [J]. *Journal of Central South University (science and technology)*, 2023, 54(9): 3708-3718. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2023.09.030.
- [17] 刘庆杰. 超高速双轿厢电梯井道活塞风特性及多参数影响分析 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2024. DOI: 10.27273/d.cnki.gsajc.2024.000572.
- LIU Q J. Analysis of piston wind characteristics and multi-parameter effects in the hoistway of the ultra-high-speed double car elevator [D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2024. DOI: 10.27273/d.cnki.gsajc.2024.000572.
- [18] 孟令飞, 张雷, 刘赛赛, 等. 高速电梯含导流罩的轿厢气动特性仿真分析 [J]. *中国电梯*, 2023, 34(9): 16-18.
- MENG L F, ZHANG L, LIU S S, et al. Simulation analysis of aerodynamic characteristics of high-speed elevator car with shroud [J]. *China elevator*, 2023, 34(9): 16-18.
- [19] 史沁鹏, 郭茹, 洪剑锋, 等. 竖井式重力储能系统发电效率影响因素 [J]. *南方能源建设*, 2025, 12(5): 58-69. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-247.

SHI Q P, GUO R, HONG J F, et al. Influencing factors of generation efficiency of vertical gravity energy storage [J]. *Southern energy construction*, 2025, 12(5): 58-69. DOI: [10.16516/j.cec.2024-247](https://doi.org/10.16516/j.cec.2024-247).

[20] 曾天. 通井道高速电梯多运行工况气动特性优化设计及其应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.

ZENG T. Aerodynamic optimization design of single-shaft multi-car high speed elevator in multiple operation conditions and its application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

作者简介:



陈良

陈良 (第一作者)

1983-, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事火电水工结构设计工作 (e-mail) chenliang@ncpe.com.cn.

曾小超

1970-, 男, 正高级工程师, 学士, 主要从事火电、新型储能等电力工程设计工作 (e-mail) zengxc@ncpe.com.cn.

王昊

1988-, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事机械、新型储能等电力工程设计工作 (e-mail) wanghao2023@ncpe.com.cn.

王文才

2001-, 男, 博士, 主要从事风工程与结构抗风研究工作 (e-mail) 13016979825@163.com.

张郁江

1999-, 男, 硕士, 主要从事风工程与结构抗风研究工作 (e-mail) zyjiang006@163.com.

李灏

2001-, 男, 硕士, 主要从事风工程与结构抗风研究工作 (e-mail) 1872312766@qq.com.

任贺贺

1990-, 男, 副教授, 博士, 主要从事风工程与结构抗风研究工作 (e-mail) renhehe@nuaa.edu.cn.

柯世堂 (通信作者)



柯世堂

1982-, 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事风工程与结构抗风研究工作 (e-mail) keshitang@163.com.

项目简介:

项目名称 基于竖井的重力储能技术研究 (JBGS2023-03)

承担单位 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司

项目概述 项目主要研究竖井式重力储能技术结构布置方案、机电系统配置、大功率电动/发电机技术及其运行控制, 重物块运行轨迹控制的重力储能电站成套技术方案。

主要创新点 (1) 提出新型竖井式重力储能系统结构; (2) 运用多目标寻优算法, 得出最优系统运行参数; (3) 对核心设备进行参数选取, 确定相关系统配置规划原则。

(编辑 徐嘉铨)