

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.06.006

基于大涡模拟的高速电梯轿厢气压变化规律

朱琳昊¹, 杨高鹏^{2*}, 苏冠楠², 俞 诚¹, 李 森²

(1. 康利电梯股份有限公司, 江苏 苏州 215000; 2. 浙江大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘 要:为解决高速电梯运行时因轿厢内气压快速变化而严重影响乘坐舒适性的问题,课题组研究了高速电梯轿厢气压变化规律,建立了基于大涡模拟的高速电梯轿厢气压方程,制定了高速电梯轿厢气压变化的多因素仿真分析流程,分析了高速电梯运行速度、加速度、提升高度、通风孔面积和有无导流罩等因素对轿厢气压变化的影响,最后以某公司的KLK2型高速电梯为例进行了测试验证。实验结果表明:提升高度是引起高速电梯轿厢内气压变化的主要原因,运行速度、加速度等对轿厢内气压变化也会产生一定的影响。课题组的研究为高速电梯轿厢气压补偿设计提供参考。

关 键 词:高速电梯;大涡模拟;轿厢气压;多因素仿真分析流程

中图分类号:TH812;TU857

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2023)06-0042-07

Air Pressure Change Rule of High-Speed Elevator Car Based on Large Eddy Simulation

ZHU Linhao¹, YANG Gaopeng^{2*}, SU Guannan², YU Cheng¹, LI Sen²

(1. Canny Elevator Company Limited, Suzhou, Jiangsu 215000, China;

2. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to solve the problem of severe impact on ride comfort caused by rapid changes of air pressure in the elevator car during high-speed elevator running, air pressure change rule in high-speed elevator car was studied. The air pressure equation of the high-speed elevator car based on the large eddy simulation was established, and the multi-factors simulation analysis flow of the air pressure change of the high-speed elevator car was proposed. The influences of the high-speed elevator car such as running speed, acceleration, lifting height, ventilation hole, whether install elevator shroud on the air pressure change of elevator car were analyzed, which were verified at KLK2 high-speed elevator of a certain company. The experimental results show that lifting height is the major factor of the air pressure change in high-speed elevator car. Running speed and acceleration will also impact on the air pressure change in the elevator car. The study can provide a reference for the air pressure compensation design of the high-speed elevator car.

Keywords: high-speed elevator; large eddy simulation; air pressure of elevator car; multi-factors simulation analysis flow

随着电梯不断向超高程、超高速方向发展,舒适性和安全性成为制约超高速电梯发展的技术瓶颈。现有研究主要集中在高速电梯的减振降噪方面^[1-6]。高速电梯升降过程中轿厢内气压发生剧烈变化,使乘客的耳膜产生饱胀、压迫等不舒适感。目前,气压变化对人耳舒适度影响的研究在高速列车领域较多,高速电

梯领域较少,比较典型的有:梅元贵等^[7]研究了高速列车通过特长隧道时耳感不适的问题,分析得出了主要影响因素为列车速度、阻塞比和隧道长度;林凤等^[8]建立了人耳气压传递的数学模型,通过测量列车内压力波动数据计算了人耳压力舒适度;Schwanitz等^[9]在科隆至法兰克福干线上进行了压力舒适度的

收稿日期:2022-11-17;修回日期:2023-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51875516);江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2018083)。

第一作者简介:朱琳昊(1990),男,江苏苏州人,双学士,工程师,康利电梯股份有限公司总裁,主要研究方向为产品数字化装配、电扶梯数字化设计。通信作者:杨高鹏(1996)男,山西晋中人,硕士研究生,主要研究方向为产品数字化设计、电梯智能诊断。E-mail:22025048@zju.edu.cn

实车实验,提出了乘客耳感不适度的连续性评估方法;周爱国等^[10]针对超高速电梯气压控制系统的风口布局优化问题,提出了一种非对称的风口布局方式。高速电梯轿厢气压的变化严重影响乘坐舒适性,研究轿厢内气压影响因素与变化规律,进而对轿厢结构优化和气压补偿是高速电梯设计领域亟待解决的技术问题。课题组建立了基于大涡模拟的高速电梯轿厢气压方程,制定了高速电梯轿厢气压变化的多因素仿真分析流程,分析了高速电梯运行速度、加速度、提升高度、通风孔面积和有无导流罩等因素对轿厢气压变化的影响,并以某公司的 KLK2 型高速电梯为例进行了实测验证。

1 高速电梯结构组成及轿厢简化模型

高速电梯包含轿厢系统、导向系统、重量平衡系统、曳引系统、门系统、电力拖动系统、电气控制系统以及安全保护系统等,高速电梯结构如图 1 所示。考虑物理模型的复杂性、网格划分难度以及求解效率,将电梯轿厢气压影响不大的组件忽略,同时简化轿厢壁外形等细节特征;保留轿门位置以及轿厢顶部、底部与轿顶、轿底接合处的轿厢通风条缝作为轿厢内外空气交换通道。电梯轿厢的简化模型如图 2 所示。

2 基于大涡模拟的高速电梯轿厢气压动力学方程

2.1 高速轿厢气压流体运动基本方程

高速电梯运行中的轿厢气压变化为流体运动问题,采用流体运动基本方程 Navier-Stokes 方程,即 N-S 方程^[11]。N-S 方程主要包含连续方程、动量方程和能量方程,表达式分别为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial(u_i \tau_{ij})}{\partial x_j}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j h)}{\partial x_j} = \text{div}(k \text{grad } T) + \frac{\partial(u_i \tau_{ij})}{\partial x_j}。 \quad (3)$$

式中: ρ 为流体密度; x_i, x_j 为直角坐标的分量($i, j = 1, 2, 3$); u_i, u_j 为流体在第 i, j 方向上的速度分量; p 为流体压力; e 为热力学能; k 为热传导系数; T 为气体热力学温度; t 为时间; τ_{ij} 为黏性应力张量, $\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$, 其中 δ_{ij} 为克罗内克尔符号,

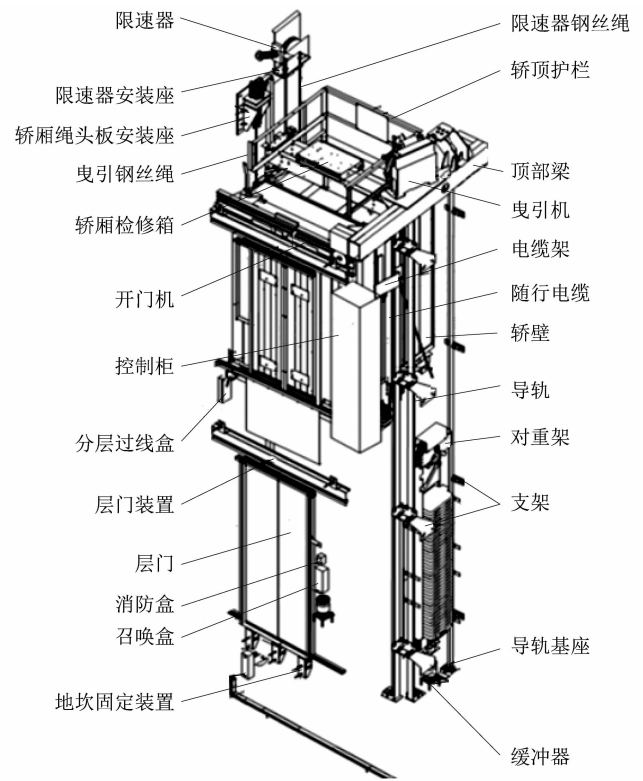


图 1 高速电梯结构

Figure 1 Structure of high-speed elevator

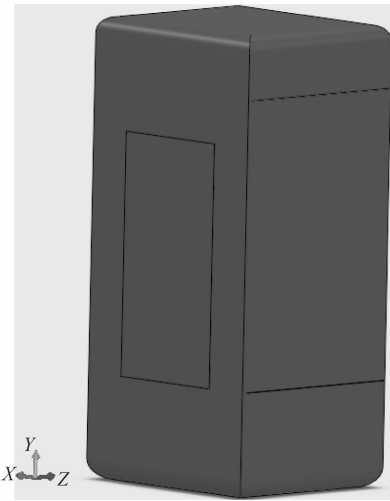


图 2 电梯轿厢的简化模型

Figure 2 Simplified model of elevator car

当 $i=j$ 时, $\delta_{ij} = 1$, 否则 $\delta_{ij} = 0$; μ 为空气动力黏度; h 为焓, $h = e + \frac{1}{2} u^2 + \frac{p}{\rho}$ 。

假定高速电梯轿厢内气压不可压缩,轿厢内气体温度不变,流体运动基本方程可简化为连续方程与动量方程:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0; \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (5)$$

2.2 基于大涡模拟的高速电梯轿厢气压方程

高速电梯运行过程中轿厢内气体会产生湍流现象,故采用湍流模型进行模拟。湍流模拟主要有3种方法:直接数值模拟、时均方程模拟和大涡模拟。直接数值模拟通过N-S方程对数值直接进行计算,适用于简单几何边界问题的模拟。时均方程忽视了流体时空变化细节,模拟过程中丢失了大量信息。大涡模拟结合了直接数值模拟和时均方程模拟的特点,通过滤波器(如高斯滤波器、盒式滤波器等)将涡运动分解成大涡运动和小涡运动,对于大涡运动直接模拟求解,对于小涡运动则通过建立压格子应力模型描绘小尺度对大尺度涡的影响求解。课题组用盒式滤波器进行大小尺度的过滤,高速电梯轿厢气压湍流控制方程如下:

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau'_{ij}}{\partial x_j} \quad (7)$$

式中:上标“-”表示时均值; τ'_{ij} 为压格子应力,通过压格子应力模型得到。

最常用的压格子应力模型为涡黏模型,其表达式为:

$$\tau'_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -\mu_i \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

式中: μ_i 为压格子湍流黏性系数,可以通过Smagorinsky-Lilly模型求得。

高速电梯轿厢设有通风孔进行内外气体交换,轿厢门缝与轿顶轿底接合处的条缝对轿厢内气流存在一定的影响。轿厢提升高度会引起内外气压差,使得轿厢内的气体与外界气体交换频繁。针对轿厢内外气流交换的复杂性引入 κ - ε 湍流模型^[12], κ - ε 湍流模型对复杂流动问题具有较强的模拟能力。

理想气体状态方程:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T。$$

式中: p 为气体压力, V 为气体体积, n 为气体物质的量, R 为气体常数, T 为气体热力学温度。

结合式(6)和式(7),得出高速电梯轿厢气压变化

的 κ - ε 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_\kappa; \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} + S_\varepsilon \quad (10)$$

式中: ρ 为轿厢内空气密度; μ 为轿厢内空气动力黏度; μ_t 为轿厢内空气湍流黏度系数; G_κ 为气体速度梯度的平均数对应的湍动能; G_b 为空气浮力对湍动能影响的变化值; Y_M 为可压缩流体的影响值, $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, \sigma_\kappa, \sigma_\varepsilon, S_\kappa, S_\varepsilon$ 为常数; κ 为湍动能, ε 为湍动能耗散率。

κ 和 ε 计算公式为:

$$\kappa = \frac{3}{2} (\bar{u} l)^2; \quad (11)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{\kappa^{3/2}}{l'} \quad (12)$$

式中: $\bar{u}$ 为湍流平均速度; l 为湍流强度,取值为0.5%; $C_\mu^{3/4}$ 为常数,取值为0.08; l' 为湍流的长度。

3 基于大涡模拟的高速电梯轿厢气压变化仿真分析

3.1 高速电梯轿厢气压变化仿真分析流程

基于大涡模拟的高速电梯轿厢气压变化模型,采用FLUENT软件对轿厢气压变化进行仿真分析,获得高速电梯运行速度、加速度、提升高度、通风孔面积和有无导流罩等因素对轿厢内气压变化的影响曲线,为高速电梯的气压补偿设计提供依据。高速电梯轿厢气压变化仿真分析流程如图3所示。

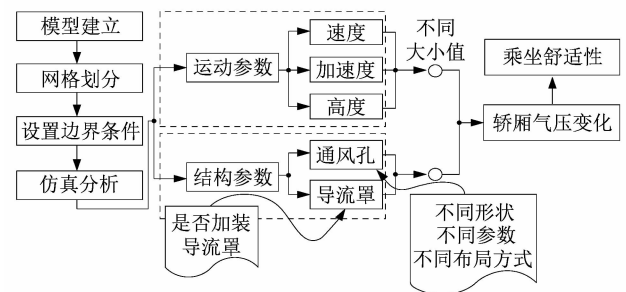


图3 高速电梯轿厢气压变化仿真分析流程

Figure 3 Simulation analysis process of air pressure change in high-speed elevator car

3.2 高速电梯轿厢模型网格划分

对简化后的轿厢三维模型进行网格划分。轿厢内部、门缝、轿顶轿底接合处与气体交换直接相关,相应的网格需要划分的比较细密,离轿厢较远部分网格划分较为粗大。轿厢模型网格划分如图4所示。

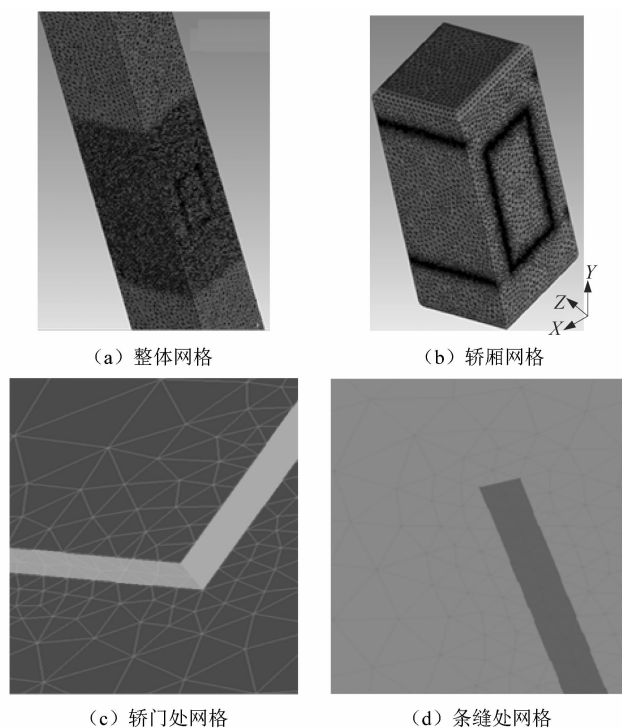


图4 电梯轿厢模型网格划分

Figure 4 Mesh generation of elevator car model

3.3 高速电梯轿厢气压仿真边界条件设置

网格划分完成后转换为通用网格文件格式 *.mesh,供 FLUENT 软件读取调用。由于研究对象是压

力随时间变化的规律,故在 FLUENT 中选取基于压力的瞬态求解器 Pressure-Based;由于湍流流动是一种高度非线性的复杂流动,选取 Realizable 和 κ -epsilon 2 方程湍流计算模型;建立与控制方程相应的离散方程,因生成的离散方程不能直接求解,对各未知量(速度、压力等)的求解顺序与方式进行处理,选取压力-速度耦合求解方法 (pressure-velocity coupling)。轿厢气压在 FLUENT 中的边界条件设置如表1所示。

表1 电梯轿厢气压分析边界条件设置

Table 1 Assignment of boundary conditions for air pressure analysis of elevator car

区域	边界条件	备注
轿厢	Wall	静止壁面
轿厢壁通风条缝	Interior	内部面
轿门条缝	Interior	内部面
空气入口	Velocity-inlet	速度值通过 UDF 赋予
空气出口	Pressure-outlet	出口相对压力为 0
井道壁	Wall	移动壁面,速度同空气入口

3.4 高速电梯轿厢气压变化的多因素仿真分析

为研究轿厢内气压变化的影响因素,依据电梯轿厢的三维模型与轿厢模型的网格划分,对高速电梯轿厢气压进行模拟仿真。轿厢内气压变化的影响因素很多,课题组从运动参数与结构参数两方面入手,选取不同的速度、加速度、提升高度、通风孔面积和是否加装导流罩等因素针对仿真模型进行了模拟分析,得出轿厢内外气压压力场变化云图如图5所示。由图5可以看出:轿厢内部各处气压相差不大,故可任取轿厢内一

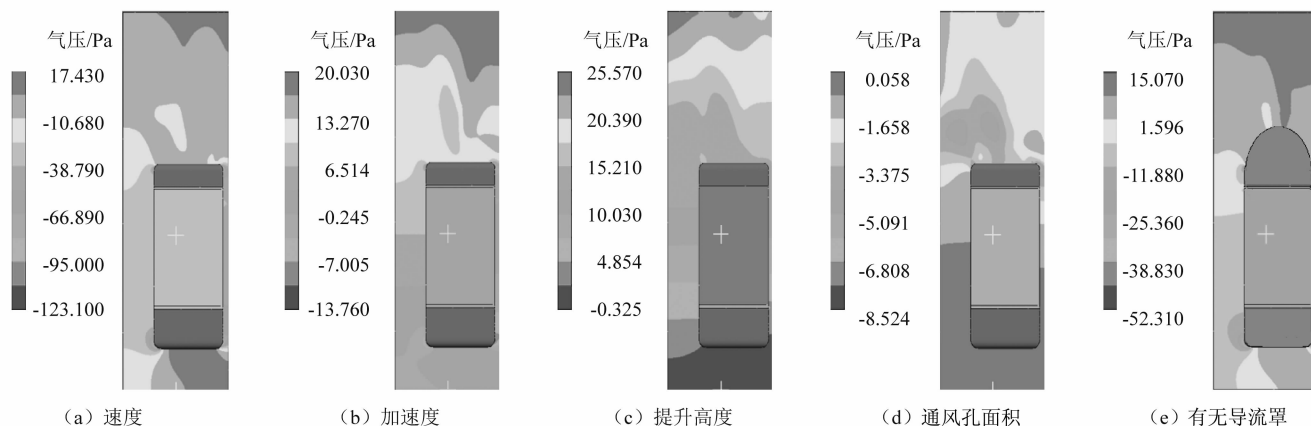


图5 电梯轿厢气体压力云图

Figure 5 Air pressure nephogram of elevator car

点对轿厢内气压进行研究;不同影响因素对轿厢内气压都有一定的影响,其中提升高度对轿厢内气压的影响最大,加装导流罩对轿厢内气压也有一定的改善作用。

3.4.1 高速电梯运行速度对轿厢气压变化的影响

选取高速电梯运行速度为 5.0, 7.0 和 9.0 m/s 进行仿真获得轿厢气压变化曲线,结果如图 6 所示。由图 6 可以看出高速电梯在不同运行速度下运行时轿厢内气压变化存在差异,但运行速度对轿厢内气压变化影响不显著,在进行气压补偿时运行速度可作为次要因素考虑。

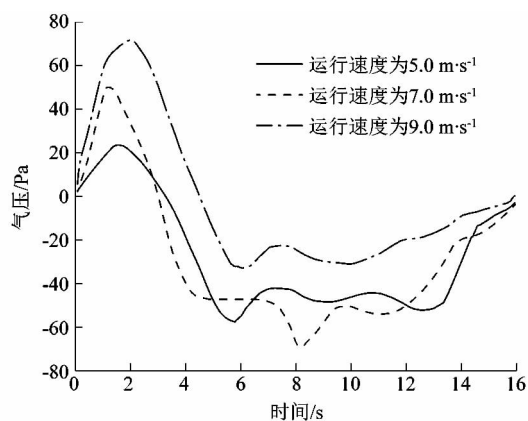


图 6 运行速度对电梯轿厢气压的影响

Figure 6 Influence of running speed on air pressure of elevator car

3.4.2 高速电梯运行加速度对轿厢气压变化的影响

选取高速电梯运行加速度为 1.0, 1.2 和 1.3 m/s^2 进行仿真,得出轿厢气压变化曲线,结果如图 7 所示。由图 7 可以看出不同加速度下运行时轿厢内气压变化存在差异,但加速度对轿厢内气压变化影响不显著,在进行气压补偿时加速度可作为次要因素考虑。

3.4.3 高速电梯提升高度对轿厢气压变化的影响

选取提升高度为 100, 200 和 300 m 进行仿真得出轿厢气压变化曲线,结果如图 8 所示。由图 8 可以看出提升高度对轿厢气压的变化影响较大,且气压变化曲线随时间变化波动较小,提升高度是轿厢内气压变化的主要影响因素。在进行气压补偿时提升高度应作为主要因素考虑。

3.4.4 高速电梯通风孔面积对轿厢气压变化的影响

选取通风孔面积为 200, 300 和 400 cm^2 仿真得出轿厢气压变化曲线如图 9 所示。由图 9 可以看出通风

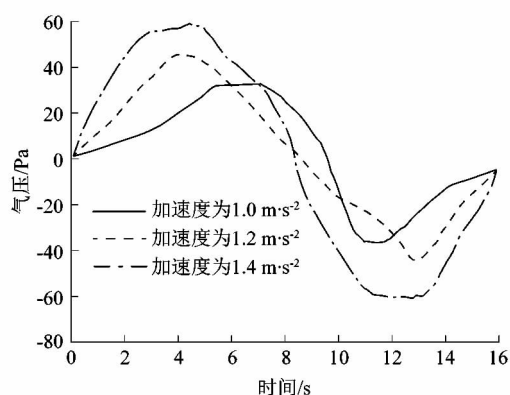


图 7 运行加速度对轿厢气压的影响

Figure 7 Influence of running acceleration on air pressure of elevator car

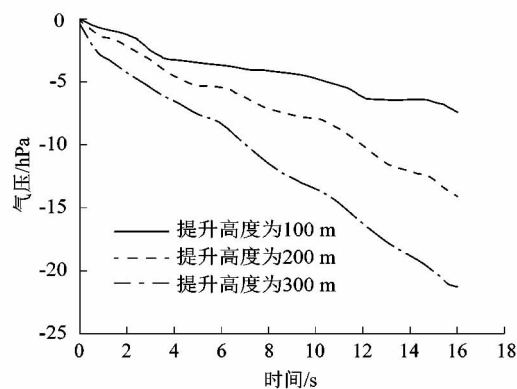


图 8 提升高度对轿厢气压的影响

Figure 8 Influence of lifting height on air pressure of elevator car

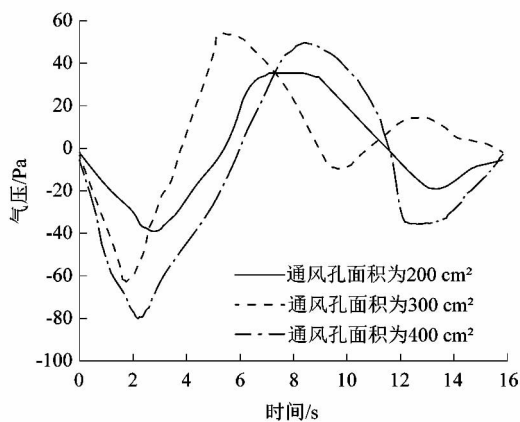


图 9 通风孔面积对轿厢气压的影响

Figure 9 Influence of ventilation hole on air pressure of elevator car

孔大小对轿厢内气压变化存在一定的影响,通风孔起到了气体交换功能,可降低高速电梯轿厢内的气压变化率。

3.4.5 高速电梯导流罩对轿厢气压变化的影响

针对是否安装导流罩进行仿真得出轿厢气压变化曲线如图 10 所示。由图 10 可以看出加装导流罩对轿厢外部气流的改善会影响轿厢内部气压变化,在轿厢外增加导流罩并合理设计导流罩尺寸、形状可降低轿厢气压变化率。

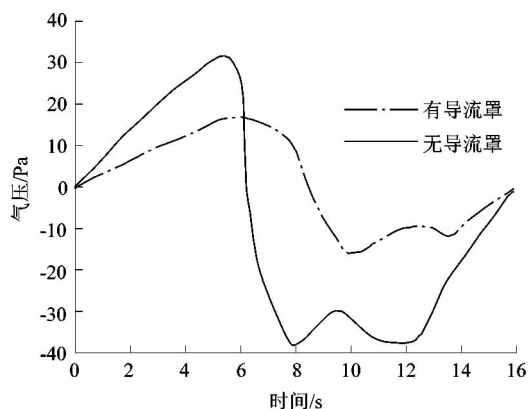


图 10 是否加装导流罩对轿厢气压变化的影响

Figure 10 Influence of whether install elevator shroud on air pressure of elevator car

4 高速电梯轿厢气压变化实验验证

为验证基于大涡模拟的高速电梯轿厢气压变化仿

真分析结果,在某品牌电梯试验塔内对 KLK2 型号的高速电梯(最高运行速度 7 m/s,额定载质量 1 600 kg)进行了实验。选择佐格 DSR-THP 温湿压记录仪,如图 11(a)所示,其气压测量范围 500.0 ~ 1 100.0 hPa,最小采样间隔为 2 s,气压测量精度 ± 0.5 hPa;采用 PMT-EVA625 电梯综合性能测试仪记录轿厢速度及高度变化,如图 11(b)所示。

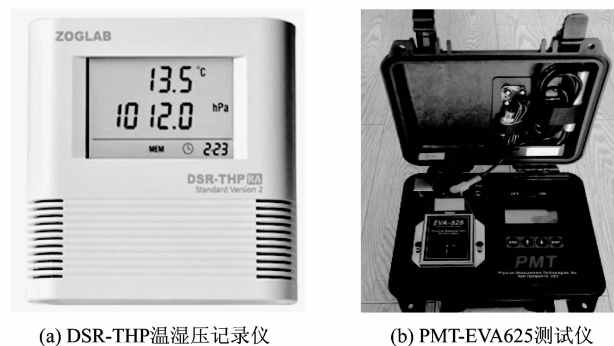


图 11 实验仪器

Figure 11 Laboratory apparatus

实验分为 3 组,每组设有上行与下行 2 组数据互为参照,记录数据为 5 次测量的平均值。I 组与 II 组互为对照,通过控制提升高度不变,观察与记录不同运行速度下轿厢内压力的变化,及是否有压耳感产生;II 组与 III 组互为对照,通过控制轿厢速度不变,观察并记录不同提升高度下轿厢内压力变化及耳压感时的气压。具体实验数据如表 2 所示。

表 2 高速电梯轿厢气压变化实验数据

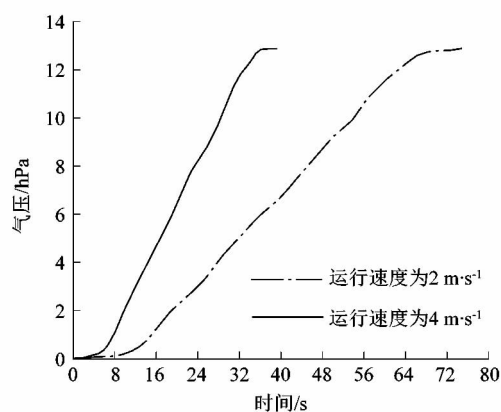
Table 2 Experimental data of air pressure change in high-speed elevator car

实验组别	运行速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	楼层 A 层数	楼层 B 层数	楼层 A 气压 P_A/hPa	楼层 B 气压 P_B/hPa	是否有 压耳感	上行压耳感 气压 P_1/hPa	上行与出发层 气压差 $\Delta P_1/hPa$	下行压耳感 气压 P_2/hPa	下行与出发层 气压差 $\Delta P_2/hPa$
I	4.0	1	37	1 004.0	991.2	有	999.0	-5.0	996.2	5.0
II	2.0	1	37	1 004.0	991.2	有	998.8	-5.2	996.7	5.5
III	2.0	17	37	998.3	991.2	有	993.0	-5.3	995.8	4.6

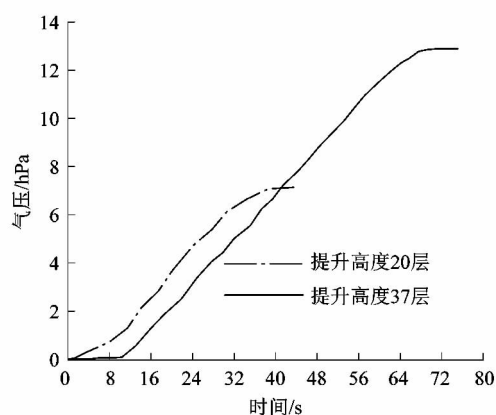
根据测试仪的实验数据,相同提升高度、不同运行速度下的气压曲线以及相同运行速度、不同提升高度下的轿厢气压变化曲线如图 12 所示。

由图 12 气压变化曲线可知,提升高度相同而运行速度不同时,轿厢内气压变化量相等,但气压变化率存在显著差别;运行速度相同而提升高度不同时,轿厢内

气压变化率差异较小,但气压变化量存在明显差别。可见提升高度是引起高速电梯轿厢内气压变化的主要原因,而运行速度、加速度等对轿厢内气压变化存在一定的影响。实验结果证实了基于大涡模拟的高速电梯轿厢气压变化仿真分析方法的有效性,可为高速电梯轿厢气压补偿设计提供依据。



(a) 不同运行速度对气压的影响



(b) 不同提升高度对气压的影响

图 12 不同运行速度和提升高度下
实测气压变化曲线

Figure 12 Measured air pressure of elevator car
under different running speeds and lifting heights

5 结语

课题组对基于大涡模拟的高速电梯轿厢气压建模与变化规律进行了研究,在介绍高速电梯结构组成及轿厢简化模型基础上,建立了基于大涡模拟的高速电梯轿厢气压方程,制定了高速电梯轿厢气压变化的多因素仿真分析流程,采用 FLUENT 软件对轿厢气压变化进行仿真分析,获得了高速电梯运行速度、加速度、提升高度、通风孔面积、是否加装导流罩等对轿厢内气压变化的影响曲线,得出提升高度是引起高速电梯轿

厢内气压变化的主要原因,运行速度、加速度等对轿厢内气压变化也会产生一定的影响。轿厢气压变化规律曲线可为高速电梯气压补偿设计提供依据。以某公司的 KLK2 型高速电梯为例进行了实测验证,实验结果证实了基于大涡模拟的高速电梯轿厢气压变化仿真分析方法的有效性。

参考文献:

- [1] ROMEU J, JIMENEZ S, SALUENA X, et al. Technical note: field survey of noise generated by elevator installations [J]. Building Acoustics, 2009, 7(3): 225 - 232.
- [2] LANDALUZE J, PORTILLA I, PAGALDAY J M, et al. Application of active noise control to an elevator cabin [J]. Control Engineering Practice, 2012, 11(12): 1423 - 1431.
- [3] GUO K J, LI H G, MENG G. Modeling and simulation of vibration for slide guide system in an elevator [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 158(1): 93.
- [4] ZHANG Q, YANG Z, WANG C, et al. Intelligent control of active shock absorber for high-speed elevator car [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(11): 3804 - 3815.
- [5] OKADA K, NISHIMURA N. Noise and vibration reduction techniques for 750 m/min elevators [J]. Mitsubishi Electric ADVANCE, 1994, 67: 2 - 4.
- [6] KAWANO K, MATSUDA H, YOKONO Y. Noise reduction of a high-speed elevator [J]. Transactions of Visualization Society of Japan, 1993, 13(1): 59 - 62.
- [7] 梅元贵, 张成玉, 周朝晖. 单列高速列车通过特长隧道时耳感不适问题研究 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(14): 100 - 107.
- [8] 林凤, 陈春俊. 车内压力波动对旅客舒适度影响的研究 [J]. 中国测试, 2014, 40(2): 125 - 129.
- [9] SCHWANITZ S, WITKOWSKI M, ROLNY V, et al. Continuous assessments of pressure comfort on a train: a field-laboratory comparison [J]. Applied Ergonomics, 2013, 44(1): 11 - 17.
- [10] 周爱国, 梅存浩, 林宝照. 超高速电梯气压控制系统的风口布局优化分析 [J]. 计算机仿真, 2015, 32(1): 278 - 282.
- [11] 李广宁, 李杰, 李凤蔚. S-A 湍流模型在 N-S 方程求解中的应用研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(2): 1180 - 1182.
- [12] 刘臻, 史宏达, 刘芸. 应用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型的振荡水翼绕流数值模拟研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(6): 628 - 634.