

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.03.013

# 高速电梯动态气动特性研究及井道结构优化\*

唐 萍<sup>1,2</sup>, 凌张伟<sup>1,2</sup>, 王学斌<sup>1,2</sup>, 蔡伟勇<sup>1,2</sup>

(1. 浙江省特种设备检验研究院, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江省特种设备安全检测技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310020)

**摘要:**针对高速电梯动态运行过程中的气动力学问题,对电梯的动态运行特性及井道结构进行了研究及优化。以高速及超高速电梯的动态运行过程为分析对象,采用弹性光滑结合网格重构方法完成了动态网格生成,模拟计算了电梯动态运行过程中复杂的湍流气动特性,重点给出了动态运行过程中产生气动阻力的规律;以轿厢阻力、流场压强等为优化参数,进行了井道结构的优化设计;通过建立不同的井道结构计算模型,分析了不同阻塞比、开口比等参数对轿厢动态运行特性的影响规律。研究结果表明:加速过程结束时电梯轿厢所受空气阻力最大,阻塞比每提高10%,可增加3倍的轿厢阻力;在实际安装时开口比宜取0.25及以上。

**关键词:**高速电梯;动态气动;井道;优化设计

中图分类号:TH211+.6;TU229

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)03-0293-05

## Dynamic aerodynamic characteristics and well structure optimization of high speed elevator

TANG Ping<sup>1,2</sup>, LING Zhang-wei<sup>1,2</sup>, WANG Xue-bin<sup>1,2</sup>, CAI Wei-yong<sup>1,2</sup>

(1. Zhejiang Provincial Special Equipment Inspection and Research Institute, Hangzhou 310020, China;

2. Key Laboratory of Special Equipment Safety Testing Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310020, China)

**Abstract:** Aiming at the aerodynamic problem of high-speed elevator, the dynamic operation characteristics of the elevator and the well structure were studied and optimized. The dynamic operation of high-speed and super-high-speed elevators were taken as the analysis object, the elastic smoothing method combined with mesh reconstruction method was used to generate dynamic mesh. The complex turbulent aerodynamic characteristics in the dynamic operation process of elevators were simulated, and the law of aerodynamic drag in the dynamic operation process was studied. The elevator car drag and the pressure of the flow field were taken as the optimization parameters, the optimization design of the well structure was carried out. The influence of different blocking ratio and opening ratio on the dynamic operation characteristics of elevator was analyzed by establishing different calculation models of well structure. The results show that the air resistance of the elevator car is the largest at the end of the acceleration. When the blocking ratio is increased by 10%, the resistance of the car can be increased by 3 times. For opening ratio, it is advisable to be 0.25 and above.

**Key words:** high speed elevator; aerodynamic characteristics; elevator well; optimal design

## 0 引言

高层建筑中,高速电梯的高速可靠的运行成为制

约高层建筑发展的瓶颈<sup>[1-2]</sup>。

普通电梯的气动力问题一向不被人重视。但在高速电梯中,随着电梯箱体运行速度的提升,气体瞬时被

收稿日期:2018-08-14

基金项目:浙江省质量技术监督局科技计划项目(20130128)

作者简介:唐萍(1983-),女,山东菏泽人,博士,高级工程师,主要从事电梯等特种设备领域的有限元分析、流体动力学、安全评定、检验检测技术等方面的研究。E-mail:tangpingjob@163.com

急剧压缩,箱体与通道之间缝隙处的气体会产生气动阻力,甚至在箱体上下游可能会出现分离和漩涡,直接影响到箱体所受的气动阻力和气致振动。目前,高速电梯的气动问题已经引起了国内外研究学者的高度重视<sup>[3-6]</sup>。

日本是高速电梯制造领域最先进的国家之一,其高端电梯制造厂商和各研究机构对高速电梯的气动力学问题作了大量的研究。Mitsubishi 和 Toshiba 两大公司的初步研究为研究高速电梯竖井中的复杂气动奠定了基础,开创了利用空气动力学解决有关高速电梯复杂气动问题的先例。Watanabe 等<sup>[7]</sup>通过对两种类型的流线型导流罩进行了 CFD 计算和风洞实验,相比传统轿厢气动噪声降低了 7.2 db。Kawamura 等<sup>[8]</sup>研究了超高速电梯的轿厢与对重交错时产生的气动力。通过给超高速电梯的轿厢加装导流罩,气动阻力减少了约 30%。

在国内,北京航空航天大学段颖等<sup>[9]</sup>,对影响高速电梯气动效应的参数进行了无量纲分析,设计并建成了一套简化高速电梯气动特性试验设备。为了改善乘客的压耳感,同济大学的周爱国等<sup>[10]</sup>对电梯轿厢内的风速场进行分析,提出了一种新的风口布局方式。上海交通大学的史立群<sup>[11]</sup>对高速电梯轿厢-对重交错过程气动力学问题进行了数值模拟,建立了全三维的电梯轿厢-对重模型,定量分析了气动力的大小。浙江大学的曾天<sup>[12]</sup>针对通井道高速电梯多运行工况气动特性、关键气动部件结构与气动参数优化进行了研究等。

国外在电梯气动方面的大量研究,已将其应用于高速电梯的研制过程中,但国内在高速及超高速电梯的设计及优化方面相对落后。

本文针对某高速电梯动态运行过程中的气动力学问题,对电梯的动态运行特性及井道结构进行研究及优化。

## 1 计算模型

针对高速电梯的流场计算,数值模拟求解的控制方程采用基于可压缩的雷诺平均 Navier-Stokes 方程,其在惯性系下,任意拉格朗日欧拉(ALE)形式的表达式为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \vec{W} d\Omega + \int_{\partial\Omega} (\vec{F}_c - \vec{F}_v) dS = 0 \quad (1)$$

式中: $t$ —时间; $\Omega$ —控制体; $\partial\Omega$ —包围控制体的封闭表面; $S$ —控制体的任意边界面元; $\vec{W}$ —守恒变量; $\vec{F}_c$ —对流量; $\vec{F}_v$ —粘性通量。

湍流模型为  $k-\varepsilon$  模型,采用有限体积法进行求解。采用弹性光滑结合网格重构方法完成电梯动态运行过程中的动态网格生成。其中,轿厢及其附面层区域为刚体运动区域以模拟电梯的运行过程。弹性光滑结合局部重构方法动态生成井道内的网格,实现电梯高速运行过程中的网格动态生成。

本研究分别采用结构网格、混合网格方法生成了高速电梯的 80 万、162 万和 300 万的网格,进行高速电梯的流场分析。计算入口速度为 12 m/s 时,与结构网格相比,162 万和 80 万网格的相对误差分别为 0.5% 和 4.5%。综合计算精度和计算量,本文采用混合网格进行模拟分析。

为了模拟电梯加速、匀速和减速的运行过程,本研究将电梯轿厢置于井道的底端(左端),采用混合网格生成电梯的流场网格,其中井道壁面及电梯表面生成附面层网格。

本研究以 12 m/s 的高速电梯为研究对象,综合计算成本及实际模拟结果的覆盖性。在本次动态模拟中,高速电梯井道的长度设定为 98 m,将高速电梯的加速和减速阶段均假设为匀加速运动,模拟计算的电梯提升高度为 72 m。其中,加速运行 18 m,匀速运行 36 m,减速运行 18 m。

## 2 动态气动特性分析

动态运行过程中不同运行时间下的速度和压力分布如图 1 所示。

分析各截面压力场和速度场以及电梯轿厢受力数据,可知:

(1) 电梯轿厢顶部气流速度较小,但静压很大,贴近轿厢顶的区域气体接近静止。电梯轿厢所受到的阻力主要来自于压强阻力。因此在优化方案中应抓住主要矛盾,重点考虑通过优化轿厢的外形,以减小电梯轿厢两端的压差;

(2) 气流进入电梯轿厢与井道壁的夹缝处和流体从轿厢底部与竖井壁的夹缝流出的两个区域存在较大的局部阻力,因此需要设法使此两处的流动更加顺畅;

(3) 轿厢底部存在一个明显的涡流区,静压值很小。该涡流区域的存在,增大了轿厢的运行阻力,影响了电梯运行的安全性,因此优化时应尽可能减小这两个区的存在。

在模拟过程中,选取阻力系数为考察指标,得到电梯轿厢在整个运行过程中阻力的变化规律。电梯轿厢运行过程中阻力系数  $f$  随时间  $T$  的变化规律如图 2 所示。

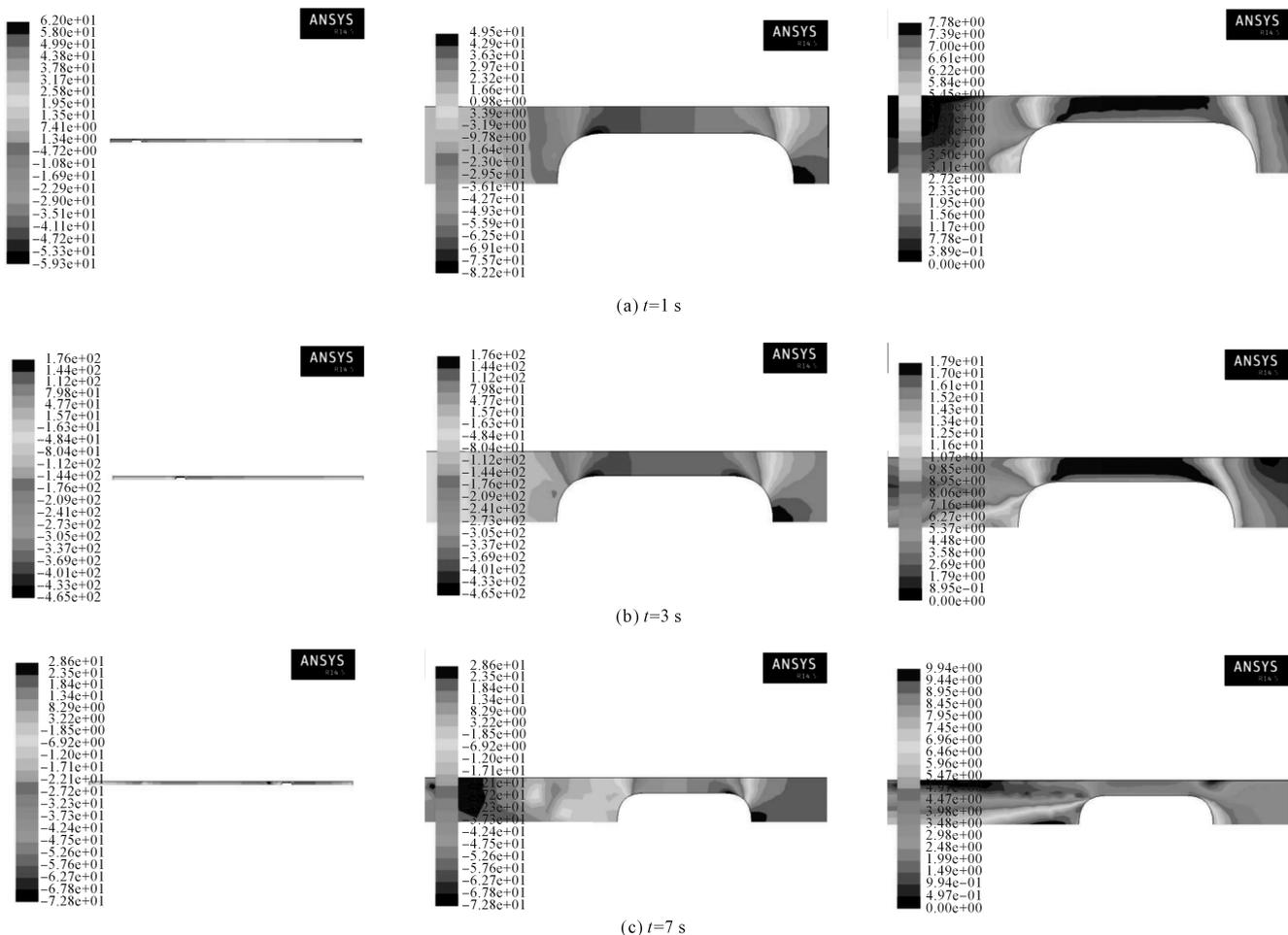


图1 动态运行模拟图(左图为全局图,中图为轿厢局部压力分布图,右图为轿厢局部速度分布图)

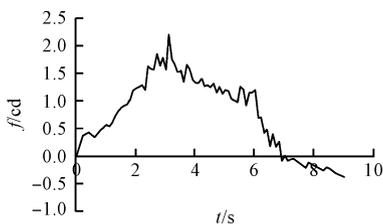


图2 动态模拟轿厢阻力系数

从图2中可以看出,电梯轿厢的受力最大时刻为第3 s。即高速电梯运行过程中,电梯轿厢所受空气阻力最大的时刻是加速过程即将结束的时刻,由于电梯轿厢此时的运行速度已达到电梯的最大运行速度,此时电梯轿厢的空气阻力消耗的功率最大。同时,由于该时刻电梯轿厢处于加速过程的末期,也就是电梯的拖拽系统对重力做功功率最大的时刻,在考虑电梯动力设备的最大功率时必须注意到这一时刻两个最大功率的叠加,本文将以电梯运行过程中此时刻受到的阻力为分析参数,进行井道结构的优化设计。

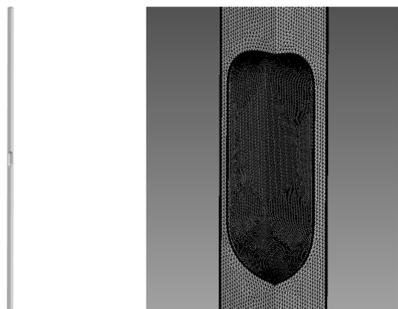
### 3 结果分析

高速电梯在井道中运行会产生隧道气动效应,产生隧道压差阻力、气动噪音等,因此,需要重点研究该类结构参数对于气动特性的影响规律。

#### 3.1 阻塞比对气动特性的影响规律研究

本文针对不同阻塞比的高速电梯及井道进行计算,其中电梯轿厢尺寸为  $2.35\text{ m} \times 2.4\text{ m} \times 1.7\text{ m}$ ,导流罩高度为  $0.8\text{ m}$ 。井道长、宽分别设计为  $2.4 \times 2.8\text{ m}$ 、 $2.6 \times 3.0\text{ m}$  和  $2.8 \times 3.2\text{ m}$ ,对应的阻塞比分别为  $0.595$ 、 $0.512$  和  $0.446$ 。阻塞比  $0.595$  的网格结构如图3所示。

对于阻塞比分别为  $0.595$ 、 $0.512$  和  $0.446$  的电梯,在运行速度分别为  $4\text{ m/s}$ 、 $6\text{ m/s}$ 、 $8\text{ m/s}$ 、 $10\text{ m/s}$ 、 $12\text{ m/s}$  的流场进行了数值模拟。运行速度  $6\text{ m/s}$  阻塞比为  $0.595$  的流场及压强分布如图4所示。



(a) 流场计算区域 (b) 轿厢局部网格

图 3 阻塞比 0.595 网格图

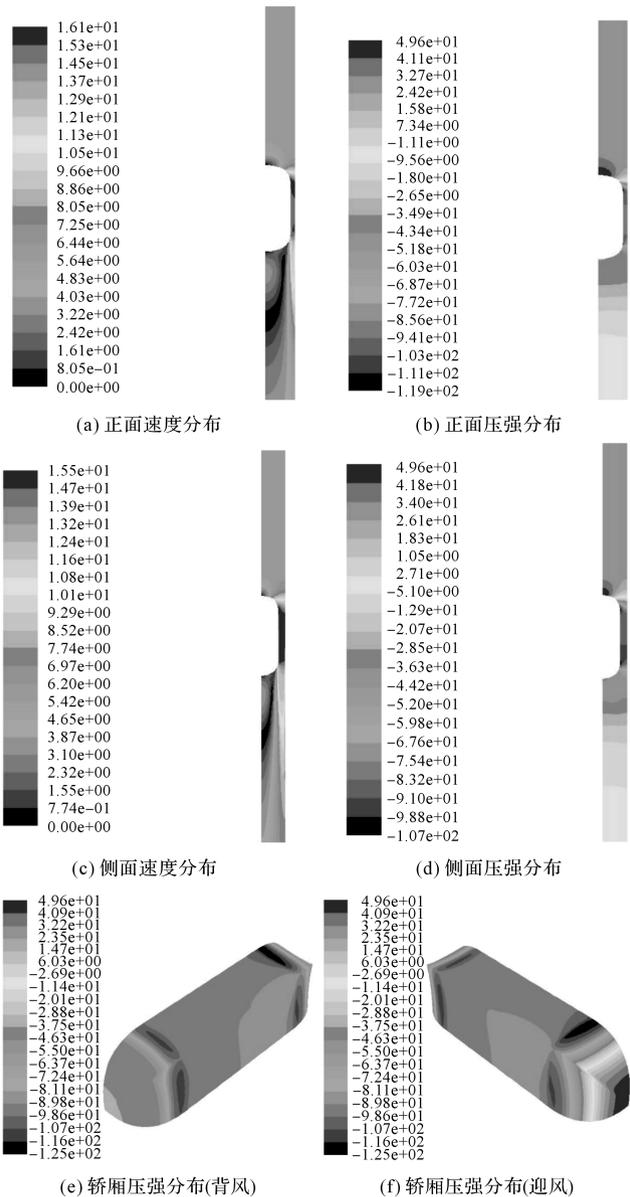


图 4  $v = 6 \text{ m/s}$  阻塞比 0.595 的流场及压强分布图

由研究计算结果可知,阻塞比较大时井道速度值较大,当来流速度为  $12 \text{ m/s}$  时可达  $30 \text{ m/s}$ 。当阻塞比较小时,其流道大幅度增加,速度值可减少至  $22 \text{ m/s}$ 。在各个阻塞比下,轿厢阻力均随着速度的

增加而增加。不同阻塞比下的轿厢阻力分布规律如图 5 所示。

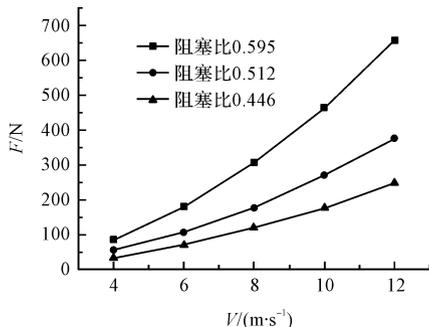


图 5 不同阻塞比的轿厢阻力

从图 5 中可以看出:相同阻塞比下随着速度的增加轿厢阻力  $F$  逐渐增加;相同速度下随着阻塞比的增加,最大阻力逐渐增加,且随着速度的增加该现象更为显著。因而,高速电梯的阻塞比对提升对轿厢阻力的影响较明显,阻塞比每提高 10%,可增加 3 倍的轿厢阻力。

### 3.2 开口比对气动特性的影响规律研究

对不同开口比的高速电梯进行计算,其中电梯轿厢尺寸如前所述,井道长  $\times$  宽选定为  $2.6 \times 3.0$ 。在楼道顶部进行开口,开口尺寸分别为  $1.3 \times 1.125$ 、 $1.3 \times 1.5$  和  $1.3 \times 1.875$ ,对应的开口比为 0.19、0.25 和 0.31。

对开口比分别为 0.19、0.25 和 0.31 的电梯,在运行速度分别为  $4 \text{ m/s}$ 、 $6 \text{ m/s}$ 、 $8 \text{ m/s}$ 、 $10 \text{ m/s}$ 、 $12 \text{ m/s}$  时的流场进行了数值模拟。

由研究计算结果可知,开口比较小时轿厢及整个流道内的压力值较大。其中速度为  $12 \text{ m/s}$  时可达  $5950 \text{ Pa}$  且分布范围广。当开口比较大时最大压力值只有  $2600 \text{ Pa}$  且分布范围集中在电梯顶点。不同开口比的流场最大压强如图 6 所示。

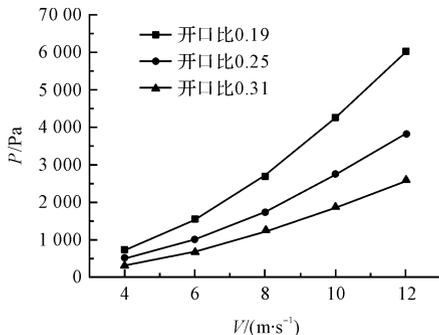


图 6 不同开口比的流场最大压强

从图中 6 可以看出:相同开口比下随着速度的增加最大压强  $P$  逐渐增加;相同速度下随着开口比

的增加,最大压强逐渐减小。井道开口比小于 0.19 时井道内压力过高,影响机械及人员安全。考虑到开口比在 0.25 及以上时井道内压力大幅度下降,故兼顾流场特性及现场实际情况,实际安装时可取在 0.25 及以上。

## 4 结束语

本文以高速及超高速电梯的动态运行过程为分析对象,采用动网格技术,建立了合适的湍流数学计算模型,模拟计算了电梯动态运行过程中复杂的湍流气动特性,分析了轿厢动态运行过程中各处气体的流动特性,重点研究了动态运行过程中产生气动阻力的规律;分析了井道阻塞比、开口比等参数对轿厢运行特性的影响机理。

通过对比分析得出结论:高速电梯的阻塞比对轿厢阻力的影响较明显,阻塞比每提高 10%,可增加 3 倍的轿厢阻力;开口比较小时轿厢及整个流道内的压力值较大,在兼顾流场特性及现场实际情况,实际安装时开口比宜取 0.25 及以上。

## 参考文献 (References):

- [1] 段燕晓. 高速电梯在超高层建筑应用中的技术难题及方案探讨[D]. 天津:天津大学电气工程学院,2015.
- [2] 马 焱. 高速电梯气动特性研究[J]. 装备机械,2013(2):46-48.
- [3] 邱成东. 电梯井道气动噪声问题的分析与研究[J]. 机械

工程师,2014(3):218-219。

- [4] 曾俊峰. 超高速电梯关键部件气动特性分析与优化设计[D]. 杭州:浙江大学机械工程学系,2014.
- [5] WANG X, LIN Z, TANG P, et al. Research of the blockage ratio the aerodynamic performance of high speed elevator [C]. International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering. 2015.
- [6] 陈栋栋. 基于不同井道模型的超高速电梯气动特性研究[J]. 机电工程,2016,33(11):1359-1363.
- [7] WATANABE T, MUTO D, ABE Y, et al. Study on reduction of aerodynamic noise for ultra-high-speed elevator[C]. The Transportation and Logistics Conference. The Japan Society of Mechanical Engineers, 2015.
- [8] KAWAMURA Y, WATANABE T., KAWABATA R., et al. Aerodynamic force suppression method for passing the counter weight in the ultra-high speed elevator[J]. *Jsmee-arc*, 2016(9):9-12.
- [9] 段 颖,申功焱,张永刚. 高速电梯气动特性实验模拟设备研制[J]. 北京航空航天大学学报,2004,30(5):444-447.
- [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] 史立群. 高速电梯轿厢-对重交错过程气动力的数值模拟[D]. 上海:上海交通大学机械与动力工程学院,2007.
- [12] 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:浙江大学机械工程学院,2018.

[编辑:李 辉]

## 本文引用格式:

唐 萍,凌张伟,王学斌,等. 高速电梯动态气动特性研究及井道结构优化[J]. 机电工程,2019,36(3):293-297.

TANG Ping, LING Zhang-wei, WANG Xue-bin, et al. Dynamic aerodynamic characteristics and well structure optimization of high speed elevator[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(3):293-297.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>