

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.11.013

基于不同井道模型的超高速电梯气动特性研究

陈栋栋

(浙江省特种设备检验研究院 国家电梯检验中心, 浙江 杭州 310000)

摘要:针对超高速电梯气动特性研究问题,对比研究了电梯运行 10 m/s 时二维井道模型、三维井道模型及带层门地坎的三维井道模型。利用 ANSYS 有限元软件对各模型下的井道气动特性进行了分析,研究得到了各井道模型中不同截面上的气流分布情况,并进行了比较研究;建立了井道对称截面上各直线位置处气流的速度特性曲线,对井道前后侧速度大小进行了研究;建立了对称截面各直线上气流最大值,并进行了比较分析;在两种不同的三维井道模型中,针对层门地坎对轿厢的气动力影响大小进行了分析。研究表明,二维井道模型中整体井道流速大,最大流速相比增大近 25%,且无法捕捉井道左右侧气流影响;三维井道模型中,层门地坎导致井道后侧流速增大,井道前侧流速减少,同时增加轿厢上下气动阻力 93.2% 及轿厢前后倾覆力 566.7%。

关键词:超高速电梯;井道模型;气动特性;层门地坎

中图分类号:TH211+.3;TK83

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)11-1359-05

Aerodynamic characteristic of the super high speed elevator base on different hoistway models

CHEN Dong-dong

(National Elevator Inspection Center, Zhejiang Provincial Special Equipment
Inspection and Research Institute, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Aiming at the research of the aerodynamic characteristics of super high-speed elevator, the models of 2D-hoistway, 3D-hoistway and 3D-hoistway with land sill were compared and studied at the velocity of the 10 m/s elevator. Aerodynamic characteristics was analyzed in different hoistway models through the ANSYS, which airflow distributions were got and compared in each hoistway models, which the airflow velocity curves were built at the lines in the symmetrical hoistway section and the velocity values were analyzed at the front and back side hoistway, which the maximum airflow velocity was built and compared in each line in the symmetrical hoistway section, which the influence of elevator aerodynamic force by the land sill was analyzed in the two models of 3D-hoistway. The results indicate that analysis has got the bigger airflow velocity overall which maximum airflow velocity is increased nearly 25%, and the air influence from the left-side and right-side cannot be attained in the 2D-hoistway model. In the 3D-hoistway models, land sill caused the incremental of the air velocity at the back-side hoistway and decremental at the front-side hoistway, and the resistance force of the elevator car is increased nearly 93.2% and the overturning force was increased nearly 566.7%.

Key words: super high-speed elevator; hoistway models; aerodynamic characteristics; land sill

0 引 言

超高速电梯是指电梯轿厢运行额定速度超过 6 m/s 或者建筑超过 100 m 时使用的电梯^[1-2]。电梯由

曳引钢丝绳牵引拖动,随着运行速度提高,需解决一系列技术问题。电梯超高速运行导致密闭井道中的气体被急剧压缩,使轿厢受气体冲击波影响,于井道中受隧逆气动效应,直接影响到了轿厢运行的舒适感^[3-4]。

国内外学者将超高速电梯轿厢与对重交错运行与

两列高速列车在隧道内等交会进行类比,并进行了实验^[5-6];Shi 等^[7]通过二维模型对超高速电梯进行了动态模拟,得出电梯轿厢与对重交错前后轿厢的气动特性;李晓冬、曾俊峰等^[8-9]分别从定网格与动网格角度,对安装不同导流罩的轿厢外形进行了气动分析;Duan 等^[10]设计试验设备,对井道阻塞比、开口比、端头留空白等进行了实验研究。

超高速电梯的隧逆气动效应加剧电梯轿厢的运行稳定性,准确地了解分析方法是设计超高速电梯的关键;层门地坎作为电梯安全运行的部件,往往在数值分析时被忽略。

本研究结合数值流体动力学分析(CFD),对比研究二维井道模型与三维井道模型的气动特性,在考虑电梯层门地坎的情况下,深入研究地坎对轿厢气动特性的影响,为工程人员合理的结构设计提供一定的理论依据。

1 流体分析理论

超高速电梯正常运行时,流体流动马赫数低,可视流体为不可压缩理想气体,CFD 分析采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,其传播方程为:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial (ku_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

其中: $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_\mu = 0.09$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$ 。

2 电梯井道模型

2.1 井道模型及基本参数

超高速电梯轿厢与井道实际结构较为复杂,单一的气动特性分析可对其模型简化^[11]。本研究的电梯规格为载重量 1 000 kg,运行速度为 10 m/s,其安装的层门地坎间距为 2.9 m,轿厢左右侧对称分布于单井道里;在二维井道模型与简化而忽略层门地坎的三维井道模型中,轿厢门与井道壁面间距均为 0.2 m。根据 GB7588-2003,电梯层门地坎均布于井道中,其大大缩短了电梯与轿厢间距离,取其最大间距为 35 mm^[12]。

本研究为了简化数值分析,取高 8 m 的单井道模型来研究,二维井道模型与三维井道模型及相关工程参数如图 1 所示。

2.2 网格划分及边界条件

通过 ANSYS 自带的 ICEM CFD 对不同的单井道

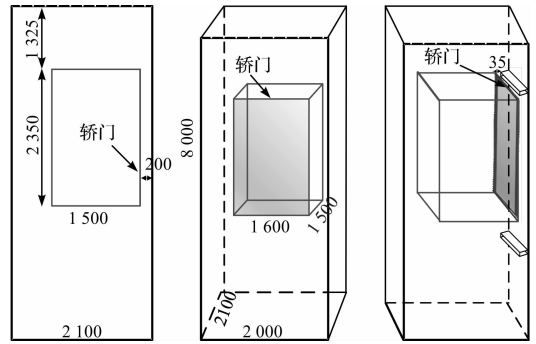


图 1 二维与三维井道模型及相关参数(单位:mm)

模型进行网格划分。电梯轿厢与井道模型结构规则、简单,对二维井道模型进行四边形网格划分(网格总数 6 000 左右),三维井道模型则采用六面体网格划分(网格总数 2.2×10^5 左右)。为了更精确捕捉轿厢周边流动特性,对轿厢周边井道区域进行网格加密。

井道模型中的空气视为不可压缩的理想气体;常温 20 ℃ 下空气密度为 1.205 kg/m³,分析时不考虑热传导;湍流模型采用两方程 $k-\varepsilon$ 模型;井道模型上方入口处设置成速度 10 m/s 时流量入口边界条件(其中二维井道模型入口流量为 25.2 kg/s,三维井道模型为 50.61 kg/s);井道出口边界条件设置成高斯压力分布为 0。

3 结果分析

电梯在 10 m/s 超高速运行下,本研究首先对比分析了二维井道模型与三维井道模型的气动特性;其次研究均布层门地坎的井道模型对轿厢的影响。研究对象位置分别取通过轿厢左右两侧面的 S_1 、 S_3 井道截面,通过轿厢正中间的 S_2 井道截面和二维模型 S_0 井道截面。在井道模型的 S_0 、 S_2 井道截面上设置轿厢上侧、中间侧、底部侧及井道截面正中间处直线 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 、 L_{01} 、 L_{02} 、 L_{03} 、 L_{04} 来进行研究,二维井道模型与不带层门地坎三维井道模型各截面与直线分布如图 2 所示。

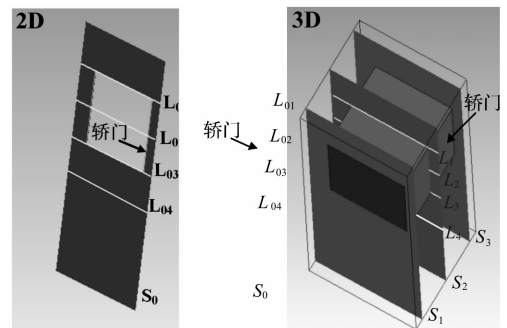


图 2 二维井道模型与不带层门地坎三维井道模型各截面与直线分布

3.1 二维井道模型与三维井道模型

二维井道模型考虑轿厢左右对称于井道中而简化分析,因而本研究选取三维井道模型 S_2 截面与二维井道模型 S_0 截面进行气动特性对比。通过后处理,分别取得 S_2 井道截面与 S_0 井道截面上的流线分布如图 3 所示。

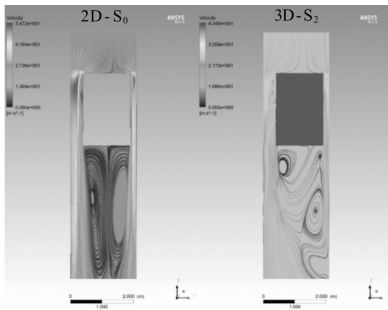


图 3 S_2 与 S_0 井道截面上流线分布

受隧逆气动效应影响,两井道截面上气流速度较大区域都分布在井道截面突然变小区域。同一分别 S_2 与 S_0 井道截面上观察,发现轿厢底部以上井道前后侧流体流线趋势相近;不同截面上对比轿厢底部以上井道前侧和后侧流线,发现趋势也相近。整体上发现, S_2 截面上速度最大值 V_{2max} 为 43.4 m/s ,而 S_0 截面上速度最大值 V_{0max} 为 54.7 m/s ,增大近 25%;同时两截面同区域气流速度值相差较大。两截面流线在轿厢底部区域表现出完全不同流动特性 S_0 截面上流线相对稳态,两涡流近对称分布且大小相近;相反, S_2 截面上流线复杂,涡流多且大小不一。

本研究分别在井道模型 S_2 与 S_0 截面上取得同一位置处流速进行分析, L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 、 L_{01} 、 L_{02} 、 L_{03} 、 L_{04} 线上流体速度值如图 4 所示。

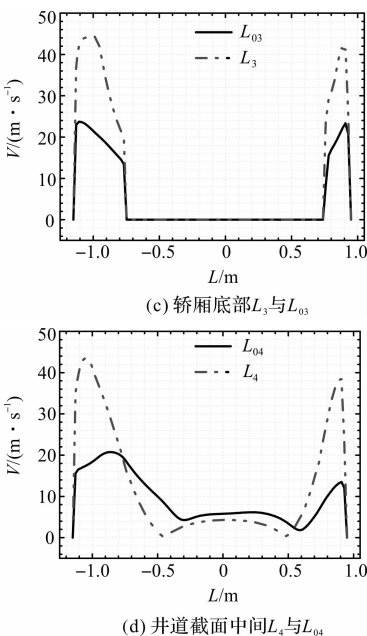
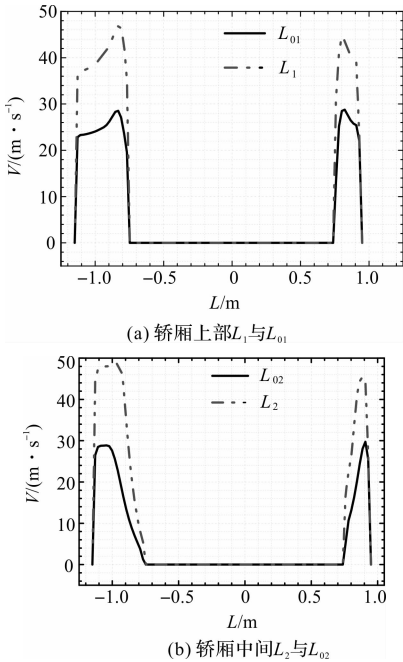


图 4 S_2 与 S_0 截面上不同位置线处流速

其进一步证实轿厢底部之上井道中流速趋势相似,井道前后侧速度值也近似对称,成“凹”字形值图。井道轿厢底部气流表现较为不同,二维分析得到速度值更大也得到证实。同一位置线上井道前侧、后侧最大速度 V_{max1} 、 V_{max2} 比较如表 1 所示。

表 1 各直线井道前后侧最大速度 V_{max1} 、 V_{max2} 比较						
直线	$V_{max1}/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	V_{max1} 位置 /m	V_{max1} 相对 /% ¹⁾	$V_{max2}/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	V_{max2} 位置 /m	V_{max2} 相对 /%
L_1	28.8	0.82		28.5	-0.83	
L_{01}	44.7	0.80	55.2	46.8	-0.83	64.2
L_2	29.7	0.91		28.9	-1.0	
L_{02}	45.5	0.89	34.7	48.7	-0.95	68.5
L_3	23.3	0.91		23.7	-1.11	
L_{03}	42.3	0.89	81.5	44.3	-0.98	86.9
L_4	13.5	0.91		20.7	-0.85	
L_{04}	38.5	0.91	185	43.5	-1.04	110

注: L_{01} 上速度相对于 L_1 上

显而易见,两种井道模型得到井道前侧与后侧速度最大值的位置较为接近,而速度大小则差距很大,如 L_4 相较 L_{04} 线,都在井道前侧 0.91 m 处产生速度最大值,但后者相对前者速度增加了 185%。

三维井道模型中受到井道左右侧流体攻击,阻碍了气流运行,导致 S_2 截面上流速相对于 S_0 截面流速大小低很多,同时使轿厢底部涡流形态不一。二维井道模型分析忽略了井道左右侧气流影响,其井道上方流体近似对称的从轿厢前后侧流入轿厢底部碰撞,产生近似对称涡流。可见,简化的二维井道模型对超高速电梯数值模拟真实物理环境不适用。

3.2 三维井道模型

电梯运行速度 10 m/s 时,三维井道模型中 S_1 、 S_2 、 S_3 各截面上流线分布如图 5 所示。

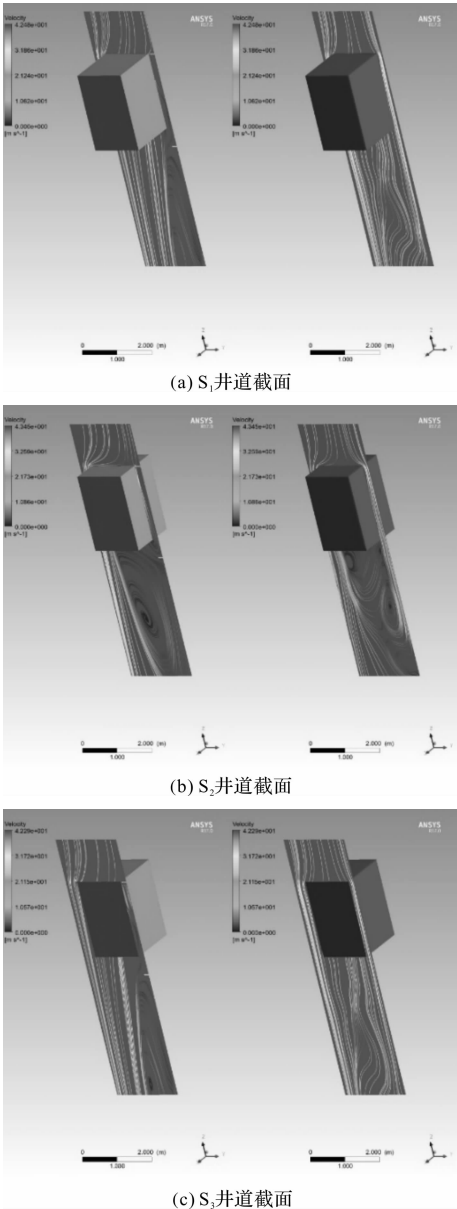


图 5 S_1 、 S_2 、 S_3 截面上流线分布

由于轿厢左右侧对称分布井道中, S_1 、 S_3 井道截面表现出相同特性,其不带层门地坎的井道模型开始出现涡流,形态并不明显,而带层门地坎的井道模型中,轿厢底部区域已形成明显涡流,且靠近地坎下方区域。 S_2 井道截面处于井道左右侧正中间,气流活动最为剧烈,受井道左右侧流体流入本模型井道中间,不带层门地坎的井道截面形成多个涡流,大小不一;带层门地坎的井道截面相对于该模型 S_1 截面则加剧了涡流强度,且单个涡流相较 S_1 截面往井道后侧方移动。可见,层门地坎影响了截面上流线分布,流体被迫从井道

后侧区域流入,加快该区域流速;层门地坎阻碍了井道上方流体,同时受井道后侧流体流入井道底部,靠近地坎下方区域形成单个涡流。中间截面受层门地坎与轿厢的前后阻挡,涡流开始在轿厢底部下面后侧区域形成;不带层门地坎的井道模型受井道前后近似对称的流体流入轿厢底部,其底部表现出卡门涡街现象^[13]。

S_2 井道截面上 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 线上速度值(L^1 、 L^2 、 L^3 、 L^4 为带层门地坎的井道模型数值)如图 6 所示。

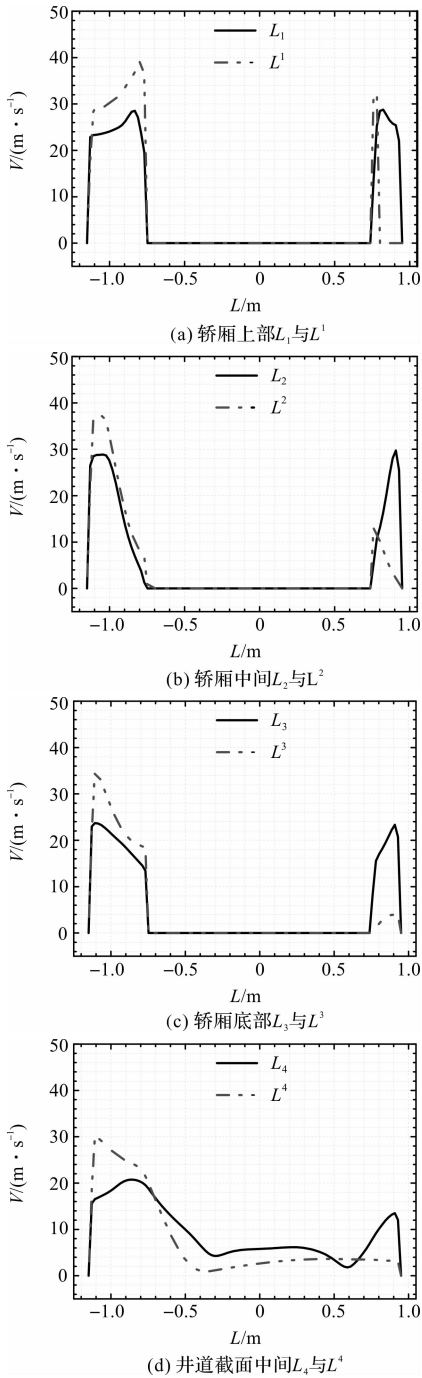


图 6 S_2 截面上不同位置线处流速

轿厢附近井道后侧区域气流速度明显增高,井道前侧气流则大大降低,使“凹”字形值图变得不对称,

具体数值比较如表 2 所示。

表 2 各直线井道前后侧最大速度 $V_{\max 1}$, $V_{\max 2}$ 比较

直线	$V_{\max 1} /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$V_{\max 1}$ 位置/m	$V_{\max 1}$ 相对/ $\%^{1)}$	$V_{\max 2} /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$V_{\max 2}$ 位置/m	$V_{\max 2}$ 相对/ $\%$
L_1	28.8	0.82	11.8	28.5	-0.83	38.6
L^1	32.2	0.78		39.5	-0.79	
L_2	29.7	0.91	-56.2 ²⁾	28.9	-1.0	29.4
L^2	13.0	0.76		37.4	-1.07	
L_3	23.3	0.91	-83.3	23.7	-1.11	47.7
L^3	3.9	0.91		35.0	-1.10	
L_4	13.5	0.91	-74.1	20.7	-0.85	46.4
L^4	3.5	0.76		30.3	-1.10	

注:① L^1 上速度相对于 L_1 上;②负数表示速度变小。

如图 6 与表 2 所示,井道后侧气流速度峰值位置前移。另从气动力角度分析,不带地坎的井道模型中,轿厢受上下气动阻力为 1 026 N,而受向轿门方向倾覆力 21 N;带层门地坎的井道模型受上下气动阻力为 1 982 N,相比增加 93.2%,倾覆力为 140 N,相比增加 566.7%。

可见,层门地坎阻碍了上方气流,且气流仅从 35 mm 的地坎间距中流入底部,导致井道前侧气流速度峰值前移,加剧了轿厢上下压差,增加轿厢运行阻力;同时其使气流更多从轿厢后侧挤入,轿厢前后倾覆力加剧。因而,层门地坎对轿厢的气动特性产生很大影响,不适合在数值模拟分析中忽略。

4 结束语

笔者研究了超高速电梯二维井道模型与三维井道模型的气动特性,分析了层门地坎对气动特性的影响。在电梯超高速运行时,井道气流变复杂,二维井道模型不能捕捉轿厢左右侧气流,整体三维 S_2 截面上速度最大值 $V_{2\max}$ 为 43.4 m/s,而二维 S_0 截面上速度最大值 $V_{0\max}$ 为 54.7 m/s,增大近 25%。因而,其不适合作为高速电梯简化井道模型来分析气动特性。在三维模型分析中,层门地坎大大阻碍了气流从轿厢前侧流入,导致轿厢上下阻力增加 93.2% 和前后倾覆力增加 566.7%,相比不考虑地坎的井道模型,整个井道的气动特性发生大的变化,不可在分析中忽略其影响。

同时,超高速电梯技术要求高,其气动特性分析需要轿厢整流罩,井道通风孔等进一步综合考虑来分析。

参考文献(References):

[1] 张志信,杨凯杰,陈栋栋. 超高速电梯的一些关键技术及技术的综合优化[J]. 中国电梯,2014,26(17):35-37.

[2] 马幸福,陈炳炎,程一凡. 电梯补偿链配置计算方法研究[J]. 机电工程技术,2014,43(11):52-54,64.

[3] TERUMICHI YOSHIKAKI, YOSHIKAWA MASATSUGU, FUKAWA YOUJI. Lateral Oscillation of a Moving Elevator Rope and Cab in High-rise Building[J]. *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu*,1993,55(9):686~693.

[4] TERSUROTAMURA, Y Itoh. Unstable Aerodynamic Phenomena of a Rectangular Cylinder Section[J]. *Journal of Wind Engineer*,1999,83(4):121-133.

[5] TAKAGI R, GOODMAN C J, ROBERTS C. Modelling Aerodynamics of High Speed railway Train[J]. *Progress in Aerospace Science*,2002,38(6-7):469-514.

[6] RAGHUNATHAN R S, KIM H, SETOGUCHI T. Aerodynamics of high-speed railway train[J]. *Progress in Aerospace sciences*,2002,38(6-7):469-514.

[7] SHI Li-qun, LIU Ying-zheng, JIN Si-yu. Numerical Simulation of unsteady turbulent flow induced by two-dimensional elevator car and counterweight system[J]. *Journal Hynamics*,2009,19(6):720-725.

[8] 李晓冬,王 凯. 高速电梯气动特性研究与优化[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,10(6):82-86.

[9] 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院,2014.

[10] DUAN Y, SHEN G, ZHANG Y. Aerodynamic testing simulation facility for high-speed elevator[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*,2004,30(5):444-447.

[11] 徐文灿,张士宏. 气动元件结构形状对流量特征参数的影响[J]. 液压气动与密封,2014,34(4):38-41.

[12] 国家技术监督局. GB 7588-2003 电梯制造与安装安全规范[S]. 北京:中国标准出版社,2003.

[13] 王振东. 冯卡门与卡门涡街[J]. 自然杂志,2010,32(4):243-245.

[编辑:张 豪]

本文引用格式: