

文章编号: 1006-1355(2014)03-0001-05

# 高速曳引电梯噪声研究综述

王晓伟, 于艳杰, 张瑞军, 王胜春, 田 艳

(山东建筑大学 山东省高校机械工程创新技术重点实验室, 济南 250101)

**摘要:** 随着电梯运行速度的不断提高, 噪声已成为影响乘坐舒适性的重要指标。机械噪声和气动噪声是高速曳引电梯噪声的主要噪声源。机械噪声的研究主要集中在结构振动特性以及轿厢、对重与导轨、钢丝绳间的摩擦等方面; 气动噪声的研究主要围绕以下三个方面: 一是轿厢外形结构对气动噪声的影响, 二是对不同频段噪声采取的降噪技术与措施, 三是电梯系统动力学模型的优化设计。通过综合分析高速电梯噪声研究的现状, 探讨了高速曳引电梯噪声研究领域存在的问题和发展趋势。

**关键词:** 声学; 高速曳引电梯; 气动噪声; 机械噪声

中图分类号: TU976<sup>+</sup>.3; TU112.3

文献标识码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2014.03.001

## Summary of the Noise Research of High-speed Traction Elevators

WANG Xiao-wei, YU Yan-jie, ZHANG Rui-jun,  
WANG Sheng-chun, TIAN Yan

(Shandong Key Laboratory of Mechanical Engineering Innovative Technology,  
Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

**Abstract:** With the continuous raising of traction elevator speed, noise has become an important index of ride comfort. Mechanical noise and aerodynamic noise are the main sources of elevator noise. Research of mechanical noise reduction is mainly focused on the reduction of the resonance, the friction between elevator cars and counterweight and guide rails and wire rope. Researches of aerodynamic noise reduction mainly include three aspects: effects of the elevator car's shape on aerodynamic noise; noise reduction technique for the noise in different frequency bands; and optimal design of elevator system dynamics model. Based on the analysis above, the research trends of the high-speed traction elevator noise are discussed.

**Key word:** acoustics; high-speed traction elevator; aerodynamic noise; mechanical noise

电梯作为主要的建筑服务设施之一, 伴随建筑物高度和利用率的不提高, 其运行速度也由中低速( $<2\text{ m/s}$ )向高速( $>2\text{ m/s}$ )和超高速发展( $>5\text{ m/s}$ ), 特别是高度在300 m及以上的大楼, 电梯运行速度甚至已超过16 m/s, 速度的提高导致电梯噪声与振动问题日益突出<sup>[1]</sup>。《GB/T 10058 电梯技术条件》对电梯噪声提出了严格的要求。虽然我国电梯行业近

10年来的年均增长率一直保持在20%以上, 2012年电梯销量首次突破50万台<sup>[2]</sup>, 但在低噪音、高舒适性的高端电梯领域, 我们与国外发达国家还有比较大的差距, 特别是减振降噪等核心技术方面。

本文通过综述和分析高速电梯噪声研究的国内外现状与进展, 指出当前研究存在的关键问题, 预测电梯噪声研究的发展趋势。

## 1 高速电梯噪声激励及其特点分析

根据噪声的发生原因, 噪声分为空气动力性噪声、机械性噪声和电磁噪声<sup>[3]</sup>。空气动力性噪声是由于气体扰动产生涡流或发生压力突变等情况而产生的; 在撞击、摩擦、交互的机械应力作用下, 轴承、齿轮或其他固体零部件发生振动而产生机械性噪声; 电磁噪声是由于电磁场的脉动、交变磁场力的相

收稿日期: 2013-08-12

项目基金: 山东省高等学校科技计划项目(基金编号: J12LB60); 山东建筑大学博士科研基金项目(基金编号: XNBS1244)

作者简介: 王晓伟(1971-), 男, 山东济南人, 博士, 目前从事绿色设计与制造、工程机械设计制造。

E-mail: wxw221@163.com

相互作用而产生的噪声。

根据曳引电梯结构及其在井道中的运行状态的分析,黄友认为电梯噪声包括以下三类噪声源:

- 1) 由电梯桥厢的结构振动引起的振动噪声;
- 2) 当电梯运动时,井道气流产生的气动噪声;
- 3) 机房电机产生的噪声<sup>[4]</sup>。曳引电梯系统主要噪声来源如图1所示。

电梯曳引机由曳引电动机、制动器、减速箱、曳引轮等组成。因电梯频繁的起动、制动、正转、反转,而且负载变化大,从而使曳引电动机的转动部分发生摩擦、撞击和共振,进而产生机械噪声。而电机定子和转子因偏心作用产生的不平衡的单边磁拉力,从而产生电磁噪声<sup>[5]</sup>。当所施加力的频率与电机定子的模态频率一致时,电机将产生高峰值噪声<sup>[6]</sup>。如果制动器动平衡偏差较大,就会产生较大的离心力,从而产生机械噪声<sup>[7]</sup>。高速电梯减速箱的蜗轮蜗杆啮合面间的摩擦也会产生机械噪声。曳引机通过曳引轮与嵌挂在其上的钢丝绳之间的曳引力将能量传给轿厢,从而导致钢丝绳与曳引轮之间出现滑动,使曳引轮槽产生不均匀磨损,并产生机械噪声<sup>[8]</sup>。

电梯轿厢由轿厢架和轿厢体两部分组成,轿厢架由上梁、下梁和立梁组成,主要作用是固定和悬吊轿厢。如果轿厢壁板振动频率与系统振动频率相

近,则产生共振;轿厢紧固件松动或者紧固件的位置、数量不合理会引起机械噪声;轿厢顶绳轮高速转动时因摩擦产生很大的机械噪声<sup>[9]</sup>。在开、关门过程中,厅门和轿门连锁机构动作声、安全触板接触撞击声。

导向系统由导轨、导靴和导轨支架等组成,使轿厢和对重只能沿着导轨作升降运动,轿厢和对重沿导轨上下运行时因摩擦产生很大的机械噪声,导轨安装架不牢固或刚性不够,使紧固件松动,导轨安装不垂直,导致弯曲变形,从而使轿厢、对重在导轨上的运动产生振动,进而导致噪声的产生。导靴与导轨间的摩擦产生的噪声,导靴弹簧预紧力不够或是与导轨面的间隙不合理,进而使导轨与导靴的安装有松动,从而产生机械噪声<sup>[5]</sup>。

当电梯在井道内运行时,井道气流受到压缩,会产生很大的气动噪声,在高速电梯中,随着电梯箱体运行速度的提高,气体在瞬间被急剧压缩,甚至会产生压力波<sup>[9]</sup>。同时箱体与通道之间的缝隙处的气体,由于流动面积的突然缩小,相对于箱体的流动速度便会突然增加,因此会产生很大的气动阻力,甚至在箱体上下游处可能会出现分离和漩涡,这种隧道气动效应直接影响到轿厢所受的气动阻力和气动噪声<sup>[10, 11]</sup>。

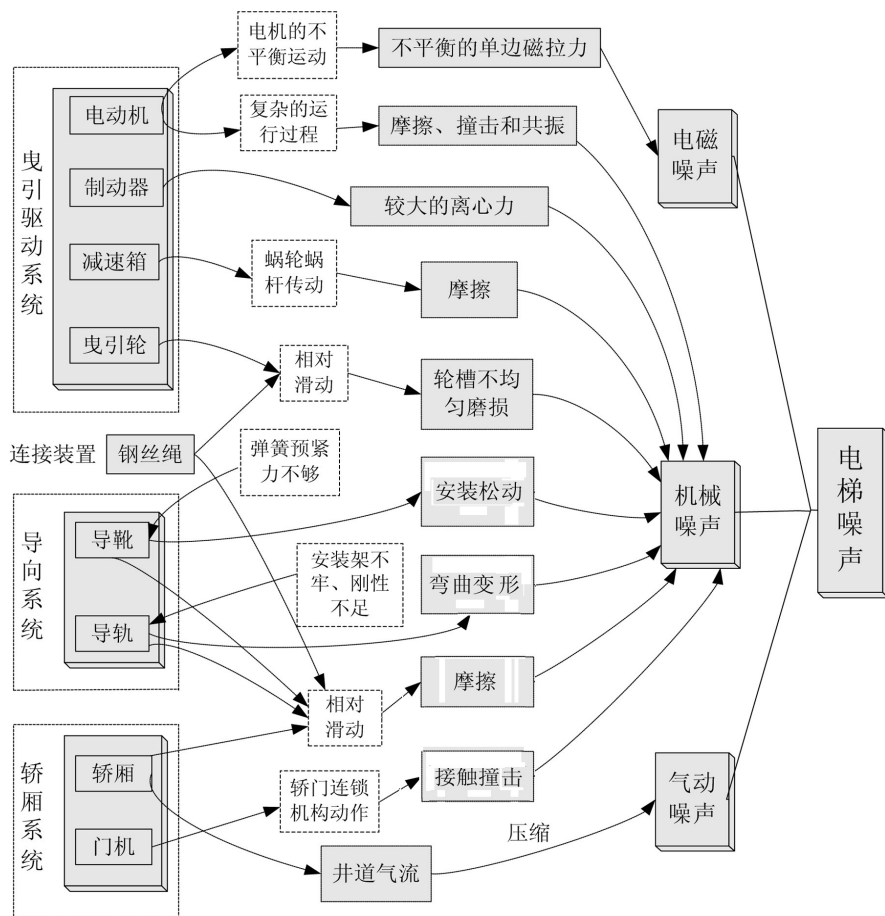


图1 曳引电梯噪声产生原因

从以上分析来看,电梯的结构振动引起的机械噪声和井道气流产生的气动噪声是电梯噪声主要噪声源,因此下面主要分析这两方面的研究情况。

## 2 国内外研究现状与进展

高速电梯在井道中运行会产生很大的隧道压差阻力、气动噪音等,与高速列车经过隧道有相似之处,而对于列车穿越隧道的问题,已经做了大量的研究<sup>[12-14]</sup>。孙艳君等人根据气动噪声的性质介绍了高速列车的气动噪声源包括结构体表面流体产生的噪声和紊流产生的噪声,分析了高速列车各部位气动噪声的产生机理<sup>[15]</sup>。在研究高速电梯的气动噪声时可以从已成熟的高速列车的研究中得到借鉴,从而分析高速电梯的气动噪声源达到降低电梯的气动噪声的目的,但电梯是在一个封闭的空间内运行,与列车经过开放的隧道还是有一定差别的,有学者就两者间的差别进行了研究。段颖等人认为高速电梯的运行状态和物理几何参数跟高速列车有很大差别,如电梯的阻塞比要大得多,开口比小得多,电梯轿厢有往复运动等,认为高速电梯在井道中的运行需要专门研究<sup>[16]</sup>。虽然电梯在井道中的运动与列车经过隧道有相似之处,但运动状态还是有很大区别的,故需要建立新的试验设备来专门模拟研究高速电梯的运行和气动特性,但还是可以从高速列车的运行中得到借鉴和学习的。

### 2.1 电梯的机械噪声

在高速电梯发展的初期,很多电梯公司采用被动控制的方式来解决电梯高速运行时所产生的振动及噪声等复杂的气动问题<sup>[17, 18]</sup>。尹纪财认为电梯振动产生的原因包括曳引机的制造和安装缺陷,导向系统的设计、制造和安装误差,电梯起动加速、制动减速时对电梯轿厢产生的冲击载荷,曳引绳张紧力不均匀<sup>[19]</sup>。杜小强用时变元法建立高速曳引电梯的曳引绳-轿厢系统非线性时变动力学方程,对高速曳引电梯整个工作行程内的非线性水平振动响应进行了仿真分析<sup>[20]</sup>。陈祥认为电梯运行过程中产生振动的主要原因是发生共振现象,可通过改变曳引机的激励频率,使其远离曳引机的固有频率,从而降低电梯的运行振动,还可通过在曳引机和电梯的连接部位采取消振方式来降低其他方式的振动传播<sup>[5]</sup>。曹志超对电梯运行的加速度曲线进行分析,通过适当的调整加速度变化率、最大加速度等参数来改变电梯运行中激励力振动位移的大小,从整体上反映出电梯运行时垂直方向的振动特性和振动规律<sup>[21]</sup>。YU Dongmei等人认为电梯轿厢在导轨上滑动必然会产生很大的机械噪声,他们使用改进后的非接触

轨,即使用磁悬浮制动器来控制孔隙间隙高度,通过减少摩擦和降低噪声,使电梯获得较高的舒适性和速度<sup>[22]</sup>。

### 2.2 电梯的气动噪声

随着高速电梯运行速度的进一步提高,单纯的被动控制方式难以满足对减振消声的要求,一些电梯公司,如Mitsubishi、Toshiba等,开始从空气动力学角度来研究问题,开创了利用空气动力学的理论来解决有关高速电梯复杂气动问题的先例<sup>[23]</sup>。Mitsubishi公司研究了电梯高速运行所产生的的噪声问题,他们推断出,对于高速电梯来说,由于高速气流及其压力场的剧烈变化所引起的气动噪声要比碰撞所产生的的振动噪声大的多<sup>[24]</sup>。Shi Liquan等人也认为当电梯到达某一速度时,井道气流产生的气动噪声成为轿厢内部环境噪声的主要部分<sup>[25]</sup>。因此,如何降低气动噪声也是发展高速电梯迫切需要解决的一个问题。目前关于高速曳引电梯气动噪声的研究主要围绕以下三个方面:

#### (1) 电梯轿厢外形的优化设计研究

轿厢外形在气动特性方面的缺陷易造成电梯运行时阻力大,产生振动以及噪声大等问题。Matsukura等人建议在高速电梯的两端各加一个流线的壳体,并对加装流线型壳体的电梯模型进行了风洞实验,结果表面安装流线型壳体的电梯模型可以将噪声降低4.1~4.3 dB<sup>[24]</sup>。李晓东和王凯发现了轿厢外形在气动特性方面的主要缺陷,并认为在轿厢顶端和底部加装椭圆形导流罩可有效地优化电梯轿厢的外形,并改善高速电梯轿厢的气动特性,减小电梯运行时的阻力、振动和噪声<sup>[26]</sup>。王凯应用湍流数值模型和数值方程的离散计算分析得出电梯轿厢所受阻力与绕流阻力系数随椭圆形导流罩高度的增加而减少,电梯轿厢两端的压差随导流罩高度增大而减少,他选择1.0 m高椭圆形导流罩的方案,并将其作为电梯动态运行模拟的轿厢模型<sup>[27]</sup>。陆志华等人根据噪声频率和电梯振动特性判别噪声源,分别从空气传声和固体传声两方面提出了隔声降噪措施,通过设计隔声罩控制空气传声;通过加强轿厢局部刚度,减少轿厢的噪声辐射,抑制轿厢的局部振动和轿厢产生的结构噪声<sup>[28]</sup>。Okada和Nishimura N等人介绍了开发750 m/min电梯所采用的多项降噪技术,包括改善轿厢减阻形式和采用双层吸音地板<sup>[29]</sup>。Salmon JK和Yoo YS则在轿厢的上部和下部安装空气导流板,这样可以减少井道内的空气湍流,轿厢在井道内运动产生的空气湍流被定向到井道的两侧,从而降低轿厢在井道中的运动产生的噪声和振动<sup>[30]</sup>。



### (2) 电梯不同频段噪声的降噪研究

因声音都不是单一频率的纯声,而是包括很多不同频率成分的复音,有些学者通过区分不同频段的噪声来达到分别降噪。杜小强根据统计能量分析建模方法建立高速曳引电梯轿厢SEA模型,通过换轿厢内装饰材料来提高轿厢内吸声系数来降低轿厢内所有频段的噪声级;增加轿门框架阻尼层和增加轿顶板厚度可有效改善轿厢内中低频段的噪声级,但对高频段噪声级影响不大<sup>[20]</sup>。Landaluze等人采用主动噪声控制(Active Noise Cancellation, ANC)技术来降低轿厢内部的低频噪声<sup>[31]</sup>。马登华和何永胜认为电梯的导轨噪声属于低频振动,通过试验对比,确定采用一种电梯导轨减振降噪装置,对电梯的导轨进行了减振综合治理,经专业机构检测,在电梯高速运行下降噪效果依然明显<sup>[32]</sup>。

### (3) 电梯系统动力学模型的优化设计研究

电梯轿厢动力学模型的建立关系到轿厢内外部声场的研究,与噪声源的确定有密切的关系。李奇,隋洪涛利用声学分析软件ACTRAN,建立模拟高速电梯轿厢气动噪声影响分析流程,根据电梯井道以及轿厢的几何形式,分析结果涵盖了井道内电梯轿厢的外部声场分布、电梯结构的振动响应以及轿厢内部的声场分布<sup>[33]</sup>。黄友,李奇分析了井道内流场产生的气动噪声对轿厢内部的影响,他们经试验发现噪声源主要分布在轿厢附近,而轿厢壁结构内部多孔材料与空腔有很好的消声作用,轿厢壁面缝隙的漏声效果明显<sup>[4]</sup>。杜海军根据活塞风形成的机理,以及通过对隧道内高速运行的列车和矿井内提升设备气动模型的比较研究,建立了基于仿真试验基础上的气体扰动力模型,并以此修正了高速、超高速电梯运行过程垂直方向和水平方向上的动力学

模型<sup>[34]</sup>。

## 3 研究总结与研究趋势预测

随着人们生活水平的不断提高及土地资源的日趋紧缺,高层建筑成为我国城镇化的主要选择,高速电梯作为高层建筑的重要服务设施,由于振动的加剧和气流压力场的剧烈变化而使得轿厢噪声问题突出,已成为影响乘坐舒适性的指标。

当前高速曳引电梯噪声研究主要集中在机械噪声和气动噪声两方面,研究现状及存在问题如图2所示。

机械噪声的研究主要集中在结构振动特性以及轿厢、对重与导轨、钢丝绳间的摩擦等方面,研究相对成熟。

气动噪声的研究主要围绕以下三个方面:一是轿厢外形结构对气动噪声的影响,轿厢外形在气动特性方面的缺陷易造成电梯运行时阻力大,产生振动及噪声大等问题,并且目前对轿厢外形的假设较单一;二是对不同频段噪声采取的降噪技术与措施,噪声有不同的频段,而不同频段的抑制噪声的方法有所不同,并且目前对噪声的频段分析较为粗范,有一定的盲区,无法达到更好降噪的要求;三是电梯系统动力学模型的优化设计,电梯轿厢动力学模型的建立关系到轿厢内部声场的研究,与噪声源的确定有密切的关系,故电梯系统动力学模型的建立在电梯噪声的分析中有着不可或缺的作用。

因此,可以预测高速曳引电梯噪声研究将集中在以下几个方面:

(1) 通过优化轿厢外形和结构,最大限度降低电梯的气动噪声;

(2) 通过细化分析电梯噪声的频谱特点,研究针

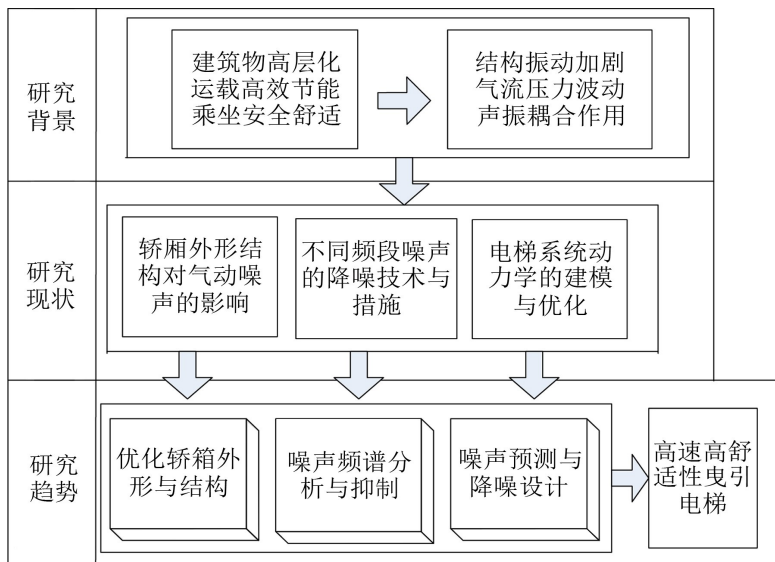


图2 高速曳引电梯噪声研究总结

对各个频段特性的轿厢噪声抑制措施;

(3) 系统研究电梯动力学模型,进行高速运行状态下的仿真分析和噪声预测,为电梯降噪设计提供理论依据。

(4) 重点解决轿厢系统的流—固—声耦合或声—固耦合的分析与控制。

#### 参考文献:

- [1] Lorsbach G P. Analysis of elevator ride quality, vibration [J]. **Elevator World**, 2003, 51(6): 108,110-111.
- [2] 保障房建设推动电梯行业增长, 低压变频器市场受益 [Z]. 变频器世界, 2012, 7: 52-54.
- [3] 袁昌明, 方云中, 华伟进. 噪声与振动控制技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007. 5.
- [4] 黄友, 李奇. 高速电梯气动/振动噪声一体化仿真分析[J]. 现代振动与噪声技术, 2011, 9: 329-334.
- [5] 陈祥. 电梯运行振动浅析[J]. 中国高新技术企业, 2012, (30): 60-62.
- [6] 季江龙. 电梯运行噪声的分析[J]. 科技创新导报, 2011, (7): 56-58.
- [7] Shenbo Yu, Pingping Pan, Huijun Wang, Lixiang Chen, Renyuan Tang. Investigation on noise and vibration origin in permanent magnet electrical machine for elevator[J]. **Electrical Machines and Systems**, 2005, (1): 330-333.
- [8] 丁子佳, 吕大尉, 李吉. 电梯噪声分析与控制[J]. 噪声与振动控制, 2005, (6): 57-70.
- [9] YOSH IAKIT, MASATSUGU Y, YOU JI F. Lateral oscillation of a moving elevator rope and cabin high-rise building[J]. **Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu**, 1993, 55(9): 686-693.
- [10] TAMURAT, ITOH Y. Unstable aerodynamic phenomena of a rectangular cylinder with critical section[J]. **Journal of Wind Engineer**, 1999, 83(4): 121-133.
- [11] 冯永慧, 张建武, 张鑫, 等. 高速电梯水平振动主动控制研究[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(8): 1076-1079.
- [12] Schetz A. Aerodynamics of high-speed trains[J]. **Ann Rev Fluid Mech**, 2001, 33: 371-414.
- [13] Baron Arturo, Mossi Michele, Sibilla Stefano. The alleviation of the aerodynamic drag and wave effects of high-speed trains in very long tunnels[J]. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 2001, 89(5): 365-401.
- [14] 朱卫. 高速列车气动外形风洞试验研究[J]. 流体力学实验与测量, 1997, 11(2): 105-107.
- [15] 孙艳军, 夏娟, 梅元贵. 高速列车气动噪声及减噪措施介绍[J]. 铁道机车车辆, 2009, 29 (3): 25-28.
- [16] 段颖, 申功圻, 张永刚, 等. 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.
- [17] Shigate M, Inaba H. Development of super high speed elevators[J]. **Elevator Word**, 1995, (4): 69-73.
- [18] 张志谊, 胡建友, 董灵燕, 等. 高速电梯振动及噪声的控制[J]. 中国电梯, 2000, (3): 41-43.
- [19] 尹纪财, 芮延年. 中高速电梯曳引系统振动问题的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2011.
- [20] 杜小强. 高速曳引电梯动态分析理论及轿厢噪声预测方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [21] 曹志超. 高层高速电梯振动特性研究与实验[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [22] YU Dong- mei, HAO Ming- liang, LIU Hao. Fuzzy control of maglev guiding system in liner elevator based on feedback linearization[J]. **Chinese Control Conference**, 2011, 2899-2902.
- [23] Teshima N, Miyasako K. Experimental and numerical studies on ultra- high- speed elevators[J]. **Elevator Techninology**, 1992, (4): 276-285.
- [24] Matsukura Y, Watanabe E, Sugiyama Y. New mechanical techniques for super- high- speed elevators[J]. **Elevator Techninology**, 1992, (4): 174-181.
- [25] Shi Liquan, Liu Yingzheng, Jin Siyu, et al. Numerical simulation of unsteady turbulent flow induced by two-dimensional elevator car and counter weight system[J]. **Journal of Hydrodynamics**, 2007, 19 (6): 720-725.
- [26] 李晓东, 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, 41(6): 82-86.
- [27] 王凯. 高速电梯气动特性研究与优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [28] 陆志华, 王水来. 电梯轿厢噪声控制研究[J]. 噪声与振动控制, 2006, (1): 80-83.
- [29] Okada K, Nishimura N. Noise and vibration reduction techniques for 750 m/min elevators[J]. **Wold Elevator**, 2000, 48 (11): 76-78.
- [30] Salmon J K, Yoo Y S. Reduction of noise and vibration in an elevator car by selectively reducing air turbulence[J]. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 1991, 90 (6): 3387-3388.
- [31] Landaluze J, Portilla I, Pagalday J M, Martinez A, Reyero R. Application of active noise control to an elevator cabin[J]. **Control Engineering Practice**, 2003, 11: 1423-1431.
- [32] 马登华, 何永胜. 浅谈电梯导轨隔振降噪的实践经验[J]. 环境工程, 2012, 30: 143-147.
- [33] 李奇, 隋洪涛. 高速电梯轿厢气动噪声影响分析[J]. 声学技术, 2010, 29(6): 268-269.
- [34] 杜海军, 芮延年, 秦健聪. 气体扰动对高速电梯系统动态特性影响的研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2009.