

# 虚拟轨道列车轮区隔声方案设计及效果评估<sup>\*</sup>

齐玉文<sup>1</sup> 吴 健<sup>1</sup> 徐佳明<sup>2</sup> 赵海波<sup>1</sup> 陈俊霖<sup>3</sup>

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春;

2. 中车长春轨道客车股份有限公司转向架制造中心, 130062, 长春;

3. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都//第一作者, 正高级工程师)

**摘 要** 为了降低虚拟轨道列车的车内噪声, 提高乘坐的舒适性, 设计了列车轮区组合隔声方案, 并结合试验与仿真的结果研究其降噪效果。针对虚拟轨道列车轮区噪声源分布特点, 将轮区划分为若干区域, 综合考虑各区域的空间布置限制、结构隔声性能和轻量化, 设计了不同区域下的组合隔声方案。利用混响室—混响室方法对设计的隔声样件进行隔声特性测试。基于统计能量法, 建立了列车车内噪声预测模型, 并结合实际线路上的运行工况和测试结果, 预测了采用轮区隔声方案的车内噪声值, 最后根据设定的噪声目标限值对隔声方案的降噪效果进行评估。计算结果表明: 轮区板件采用设计的组合隔声方案时, 车内最大噪声声压级为1车客室后的67.5 dB(A), 最小噪声声压级为后风挡处的65.1 dB(A)。列车车内各位置的噪声声压级均小于设计的目标限值(69.0 dB(A)), 满足设计要求。

**关键词** 虚拟轨道列车; 隔声; 组合板; 轮区噪声

**中图分类号** U270.1<sup>+</sup>1

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.04.021

## Sound Insulation Scheme Design and Effect Evaluation of Virtual Rail Train Wheel Area

QI Yuwen, WU Jian, XU Jiaming, ZHAO Haibo, CHEN Junlin

**Abstract** To reduce virtual rail train interior noise and improve ride comfort, a train wheel area composite sound insulation scheme is designed, and the noise reduction effect is studied based on the results of experiments and simulations. According to the characteristics of noise source distribution in virtual rail train wheel area, the wheel area is divided into several regions, and the composite sound insulation schemes in different regions are designed considering the spatial arrangement restrictions, structural sound insulation performance and light weight accordingly. Reverberation chamber-reverberation chamber method is used to carry out sound insulation characteristic test of sound insulation samples. Based on statistical ener-

gy method, the train interior noise prediction model is established. With the operation working conditions and test results on actual lines, the interior noise value after adopting wheel area sound insulation scheme is predicted, and the noise reduction effect of the scheme is evaluated according to the regulated noise target limit. Calculation results show that when the wheel area plates adopt the designed composite sound insulation scheme, the maximum interior noise SPL (sound pressure level) is 67.5 dB (A) in the first compartment rear section and the minimum noise SPL is 65.1 dB (A) at the rear windshield. The noise SPL at each position in the train is less than the design target limit (69.0 dB (A)), meeting the design requirements.

**Key words** virtual rail train; sound insulation; composite slab; wheel area noise

**First-author's address** National Engineering Research Center of Railway Vehicle, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

虚拟轨道列车以公路上喷涂的油漆标线作为虚拟轨道, 是融合了城市轨道交通与道路公交优点的新型交通工具<sup>[1]</sup>。虚拟轨道列车通常为三模块或多模块铰接列车, 采用新能源驱动。虚拟轨道列车最大载员超过300人, 可有效缓解城市客运压力。目前, 虚拟轨道列车已在宜宾及株洲等地开通, 并在诸多城市规划建设。

虚拟轨道列车车内噪声问题不容忽视。根据噪声传播途径, 噪声控制方法一般采用声源处控制和传播途径控制<sup>[2]</sup>。针对传播路径, 可采用隔声、吸声等措施。虚拟轨道列车采用新型的轮毂电机驱动橡胶轮胎。由于列车采用的低地板设计, 故车轮区域大部分布置于客室内。胎地噪声和轮毂电机噪声声源将对车内噪声产生显著影响。为了更

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划项目(2018YFB1201600, 2018YFB1201604)

好地控制列车车内噪声水平,板件结构设计须满足相关声学规范的要求。

复合板件结构的隔声特性比传统板结构好。文献[3]通过试验方法,研究了多种高速列车复合板材的隔声性能。文献[4]基于统计能量法探究了复合板材中隔声材料排布顺序对于整体结构隔声特性的影响规律。文献[5]以波纹状铝型材为基板,研究了表面喷涂阻尼层对板件声学性能的改善效果。文献[6]研究了喷涂阻尼浆对地铁车辆地板铝型材隔声特性的影响规律。文献[7]将吸声性能较好的材料与各隔音材料组合成隔音垫,研究了其对车内噪声的降噪效果。文献[8]结合试验与仿真,研究了车内噪声源分布以及空气传声、结构传声路径对车内噪声的贡献,使用统计能量法建立了100%低地板列车车内噪声预测模型。

目前,虚拟轨道列车的相关研究较少,其噪声方向的研究更是缺乏。本文以某型3节编组虚拟轨道列车车轮区域板件结构为研究对象,针对各局部区域采用不同的组合隔声方案,通过“混响室-混响室”方法测得各区域组合结构的隔声量;采用统

计能量法建立整车车内 SEA(统计能量分析)噪声预测模型,并以车内各位置噪声水平为参考值,评价降噪方案的效果。

1 轮区隔声方案测试

针对列车车轮不同区域的隔声性能要求,综合考虑布置空间限制、隔声量和质量大小,设计了不同区域的组合方案。车轮的 A、B、C、D、E 各区域对应的位置布局如图 1 所示。各区域的隔声组合结构方案如表 1 所示。

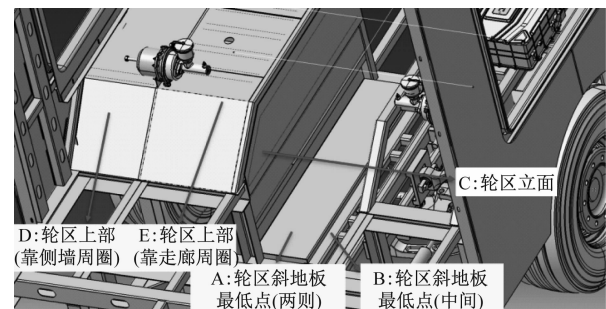


图 1 车轮各区域对应的位置布局  
Fig. 1 Layout of corresponding positions in each wheel area

表 1 虚拟轨道列车各区域的隔声组合结构方案  
Tab. 1 Sound insulation composite structure scheme of virtual rail train areas

结构层	各区域结构层的组成				
	区域 A	区域 B	区域 C	区域 D	区域 E
外结构层	厚 1.0 mm 碳钢封板; 厚 1.0 mm 阻尼层; 厚 1.0 mm 铝板	厚 1.0 mm 碳钢封板; 厚 1.0 mm 阻尼层; 厚 1.0 mm 铝板	厚 1.0 mm 碳钢封板; 厚 1.0 mm 阻尼层; 厚 1.0 mm 铝板	厚 1.0 mm 碳钢封板; 厚 1.0 mm 阻尼层; 厚 1.0 mm 铝板	
内结构层	厚 3.0 mm 防火隔声毡; 厚 6.0 mm Armasound 240 吸音棉; 厚 2.0 mm 防火隔声毡; 厚 2.0 mm 防火隔声毡	厚 3.0 mm 防火隔声毡; 厚 29.2 mm 预氧丝布包预氧丝棉; 厚 2.0 mm 防火隔声毡; 厚 2.0 mm 防火隔声毡	厚 20.0 mm 隔音包; 厚 10.0 mm Armasound 吸音棉; 厚 8.0 mm 预氧丝布包预氧丝棉	厚 2.0 mm 防火隔声毡; 厚 2.0 mm 防火隔声毡; 厚 8.0 mm 预氧丝布包预氧丝棉; 厚 2.0 mm 防火隔声毡	厚 20 mm 隔音包; 厚 2.0 mm 防火隔声毡; 厚 40 mm 预氧丝布包预氧丝棉; 厚 2.0 mm 防火隔声毡
隔声层	厚 19.0 mm 酚醛地板; 厚 2.5 mm PVC(聚氯乙烯)地板布	厚 19.0 mm 酚醛地板; 厚 2.5 mm PVC 地板布	厚 2.0 mm 内装板	厚 2.0 mm 内装板	厚 2.0 mm 内装板

注:各层结构均按由外至内的顺序排列;隔音包为预先设计好的组合隔声结构。

根据不同区域的隔声组合结构方案,制作相应的隔声样件,并对其隔声特性进行测试。本文中所有隔声样件的测试均在隔声室中进行。需依据 GB/T 19889.3—2005<sup>[9]</sup>,利用“混响室-混响室”方法对隔声样件进行隔声特性测试。测试时,将隔声

样件置于测试洞口内,用螺栓将隔声样件固定牢靠后,并用密封胶密封隔声样件四周。传感器的布置均满足国家标准。设置测试中心频率为 100 ~ 3 150 Hz,隔声量  $R$  为:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg(S/S_A)$$

(1)

式中:

- $L_1$ ——发声室的平均声压级;
- $L_2$ ——接收室的平均声压级;
- $S_A$ ——被测样件的辐射面积;
- $A$ ——等效吸声面积,可通过测试接收室的混响时间得到。

1.1 轮区地板

轮区地板(区域 A 及区域 B)隔声组合结构方案的隔声特性测试结果如图 2 所示,其中区域 A 及区域 B 隔声样件的面密度分别为  $42.7\text{ kg/m}^2$ 、 $41.2\text{ kg/m}^2$ 。以计权隔声量  $R_w$  作为被测样件的隔声量单值评价标准。由图 2 计算可得,  $R_w$  分别为  $43.8\text{ dB}$ 、 $46.5\text{ dB}$ 。

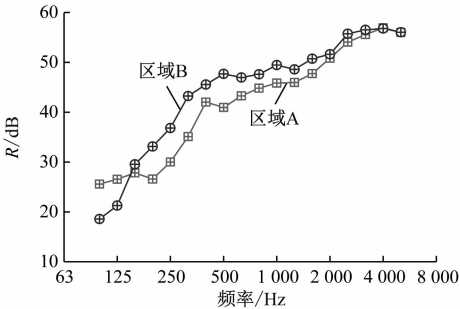


图2 轮区地板隔声组合结构方案的隔声特性测试结果  
Fig. 2 Sound insulation characteristic test results of the wheel area floor sound insulation composite structure scheme

1.2 轮区立面

轮区立面(区域 C)隔声组合结构方案中,20 mm 隔音包是由铝金属板对隔声毡、Armasound 吸音棉及铝吸音板进行包裹密封制成的,其横截面如图 3 所示。其中,组合结构的面密度为  $99.8\text{ kg/m}^2$ 。

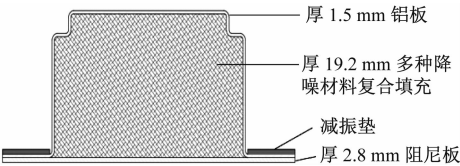


图3 隔音包横截面示意图

区域 C 隔声样件的隔声特性测试结果如图 4 所示。由图 4 计算可得,  $R_w$  为  $47.9\text{ dB}$ 。

1.3 轮区上部

轮区上部区域(区域 D 和区域 E)隔声组合结构方案的隔声特性测试结果如图 5 所示。其中,区域 D 及区域 E 隔声样件面密度分别为  $89.1\text{ kg/m}^2$ 、

$94.5\text{ kg/m}^2$ 。由图 5 计算可得,  $R_w$  分别为  $46.0\text{ dB}$ 、 $47.3\text{ dB}$ 。

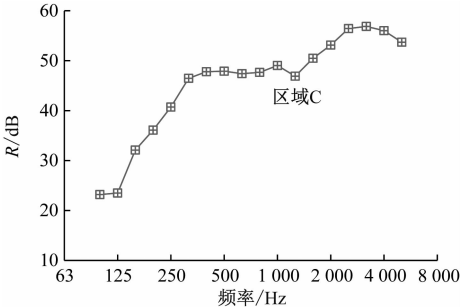


图4 轮区立面隔声组合结构方案的隔声特性测试结果  
Fig. 4 Sound insulation characteristic test results of the wheel area facade sound insulation composite structure scheme

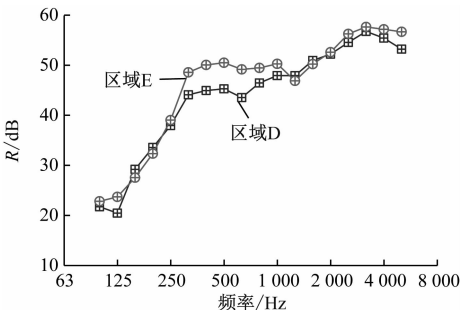


图5 轮区上部组合方案的隔声特性测试结果  
Fig. 5 Sound insulation characteristic test results of the wheel area upper part composite scheme

2 车内噪声特性预测

2.1 预测模型

SEA 是目前公认的、解决中高频耦合系统振动噪声问题的有效方法之一。为了分析各区域的隔声组合结构方案对车内的降噪效果,本文基于 SEA 建立虚拟轨道列车的整车车内噪声预测模型。首先,把整体结构划分为子系统,并将各子系统的振动能量作为描述振动的基本参数;然后根据振动波和模态间的内在联系,建立可以分析噪声及结构振动的动力学模型。

VA One 软件以统计能量分析为基础,融合了有限元分析、边界元分析和混合分析,是全频段振动及噪声分析软件。根据虚拟轨道列车实际尺寸大小,利用 VA One 软件建立整车车内噪声 SEA 预测模型,并根据实际运行时车内外激励的方式、位置和大小等,在模型上施加相关激励,如图 6 所示。

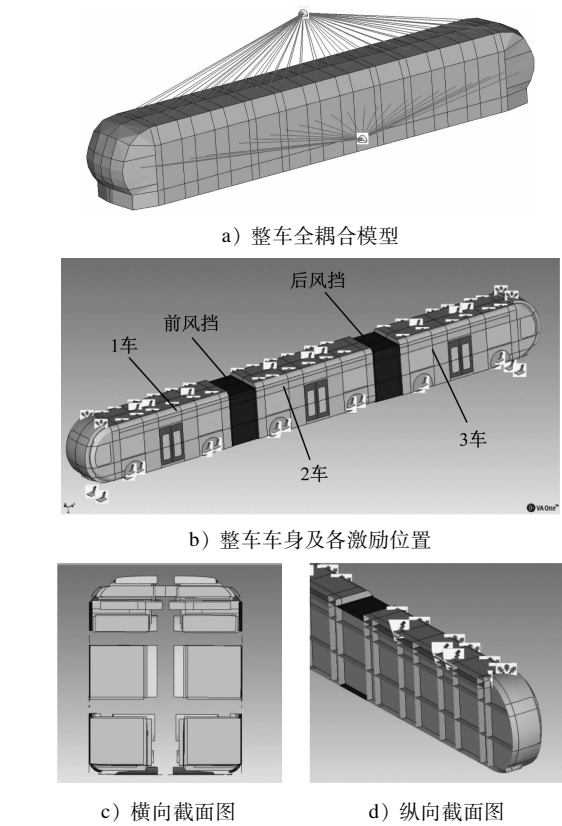


图 6 虚拟轨道列车的车内噪声 SEA 预测模型  
Fig. 6 SEA prediction model of virtual rail train interior noise

列车的车体结构主要由 SEA 板子系统模拟,车内外空气流体用声腔子系统模拟。在各客室内的前、中、后等常用声压测试点位,均划分出了单独的声腔子系统,以便直接读取相关位置的车内声压级大小。列车车轮区域的噪声主要为胎地噪声、轮毂电机噪声及牵引逆变器噪声,车厢上部噪声源主要为空调、蓄电池及辅助逆变器。另外,车内顶部区域还需考虑出风口及回风口的噪声影响。各噪声源激励的频谱均由相关测试的结果获得。车体板件结构的隔声量需在连接面上进行设置。将各区域结构的隔声量均按表 1 中相应方案的  $R_w$  测试结果取值。

### 2.2 仿真预测结果

目前,我国相关部门还没有制定虚拟轨道列车的车内外噪声限值标准,故本文参考国内外城市轨道交通和城市客车噪声相关限值标准,将虚拟轨道列车车内噪声的声压级目标限值设定为 69.0 dB(A)。这一目标限值优于目前国内地铁噪声标准,要求比较严格。通过计算并读取车内相应位置声腔的计算结果,即可获得车内各位置的声压级预测值,如表 2 所示。

表 2 车内各位置的声压级预测值			
Tab.2 Predicted SPL at various positions in the train			
位置	声压级/dB(A)	位置	声压级/dB(A)
1 车司机室	66.7	2 车客室后	66.9
1 车客室前	67.4	后风挡	65.1
1 车客室中	66.8	3 车客室后	66.6
1 车客室后	67.5	3 车客室中	67.1
前风挡	65.5	3 车客室前	66.5
2 车客室前	67.2	3 车司机室	67.1
2 车客室中	66.4		

从表 2 可见,当轮区板件采用表 1 中的组合隔声方案时,车内最大声压级为 1 车客室后的 67.5 dB(A),最小声压级为后风挡处的 65.1 dB(A)。由此可见,列车车内各位置的声压级均小于设计目标限值(69.0 dB(A))。这说明采用表 1 的隔声组合结构方案对轮区区域板件结构进行改造能够满足设计要求。

### 3 结语

本文针对虚拟轨道列车车轮区域噪声源特点,综合考虑车内外布置空间限制及隔声性能需求,提出了轮区各区域的隔声组合结构方案。利用“混响室-混响室”方法对组合结构隔声样件进行隔声特性测试。采用 SEA 建立了列车车内噪声预测模型,结合隔声特性测试结果对车内噪声的声压级进行计算,并对隔声方案的降噪效果进行了评价。主要结论如下:

1) 区域 A 及区域 B 的隔声组合结构面密度分别为 42.7 kg/m<sup>2</sup>、41.2 kg/m<sup>2</sup>, $R_w$  分别为 43.8 dB、46.5 dB;区域 C 的隔声组合结构面密度为 99.8 kg/m<sup>2</sup>, $R_w$  为 47.9 dB;区域 D 及区域 E 的隔声组合结构面密度分别为 89.1 kg/m<sup>2</sup>、94.5 kg/m<sup>2</sup>, $R_w$  分别为 46.0 dB、47.3 dB。

2) 各区域采用表 1 中的隔声组合结构方案时,车内最大噪声声压级为 1 车客室后的 67.5 dB(A),最小噪声声压级为后风挡处的 65.1 dB(A)。列车车内各位置的噪声声压级均小于设计目标限值(69.0 dB(A)),满足设计要求。

### 参考文献

[1] 陆海英,丁铁成,杨岗. 智能轨道列车综述[J]. 电子世界, 2021(3): 166.  
LU Haiying, DING Tiecheng, YANG Gang. Summary of smart

- rail trains[J]. Electronics World, 2021(3): 166.
- [2] 李宝泉, 赵凤启, 王志涛, 等. 轨道客车整车降噪方案简析[J]. 中国高新技术企业, 2014(2): 112.
- LI Baoquan, ZHAO Fengqi, WANG Zhitao, et al. Brief analysis of railway passenger car noise reduction scheme[J]. China High-Tech Enterprises, 2014(2): 112.
- [3] 李牧鼎, 沈火明, 王瑞乾, 等. 高速列车复合板隔声性能的试验研究[J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(3): 60.
- LI Muxiao, SHEN Huoming, WANG Ruiqian, et al. Experimental study on sound insulation performance of composite plates of high-speed trains[J]. Noise and Vibration Control, 2015, 35(3): 60.
- [4] 徐磊, 张学飞, 王瑞乾, 等. 隔声材料排布顺序对复合板材隔声特性的影响[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(4): 58.
- XU Lei, ZHANG Xuefei, WANG Ruiqian, et al. Influence of the insulation material arrangement on sound insulation properties of composite sheets[J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(4): 58.
- [5] 王瑞乾, 肖新标, 刘佳, 等. 高速列车阻尼喷涂式铝型材减振降噪特性试验[J]. 噪声与振动控制, 2014, 34(4): 52.
- WANG Ruiqian, XIAO Xinbiao, LIU Jia, et al. Experiments on vibration and noise reduction effect of sprayed-damping section aluminum applied to high-speed trains[J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(4): 52.
- [6] 张学飞, 孔令行, 王瑞乾, 等. 喷涂阻尼浆对地铁车辆地板铝型材隔声性能影响研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2016, 28(3): 79.
- ZHANG Xuefei, KONG Lingxing, WANG Ruiqian, et al. Study on the effect of spraying damping slurry on the sound insulation properties of the floor aluminum profile of the metro vehicles[J]. Journal of Changzhou University (Natural Science Edition), 2016, 28(3): 79.
- [7] 武智方, 夏均忠, 刘晓凯, 等. 商用车发动机舱隔音垫的降噪效果研究[J]. 军事交通学院学报, 2017, 19(2): 48.
- WU Zhifang, XIA Junzhong, LIU Xiaokai, et al. Noise attenuation effect of sound insulation pad in commercial vehicle engine cabin[J]. Journal of Military Transportation University, 2017, 19(2): 48.
- [8] 张捷, 肖新标, 张玉梅, 等. 100%低地板列车车内噪声传递特性分析[J]. 振动工程学报, 2015, 28(4): 541.
- ZHANG Jie, XIAO Xinbiao, ZHANG Yumei, et al. Study on transfer path characteristic of interior noise of 100% low-floor railway train[J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 28(4): 541.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 声学 建筑和建筑构件隔声测量 第3部分: 建筑构件空气声隔声的实验室测量: GB/T 19889.3—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Acoustics—measurement of sound insulation in buildings and of building elements—part 3: laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements: GB/T 19889.3—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [10] 李晔, 王瑞乾, 徐秋婷, 等. 基于心理声学的高速列车车内噪声预测及选材方法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(12): 78.
- LI Ye, WANG Ruiqian, XU Qiuting, et al. Noise prediction and material selection method of high-speed train based on psychoacoustics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(12): 78.
- [11] 张捷, 姚丹, 王瑞乾, 等. 基于试验统计能量分析的高速列车车内噪声预测方法[J]. 铁道学报, 2020, 42(11): 45.
- ZHANG Jie, YAO Dan, WANG Ruiqian, et al. An approach for interior noise prediction of high-speed trains based on experimental statistical energy analysis[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(11): 45.

(收稿日期: 2022-08-01)

## 交通运输部颁布《地铁车辆运营技术规范(试行)》

为深入贯彻落实《国务院办公厅关于保障城市轨道交通安全运行的意见》(国办发〔2018〕13号)等文件的有关要求,进一步提高地铁车辆运行可靠性、可用性、可维护性和安全性,2023年2月27日,交通运输部颁布了《地铁车辆运营技术规范(试行)》。该规范共13章和2个附件,主要包括以下四部分内容:一是文件目的和适用范围。说明了规范编制目的、适用范围及车辆组成,提出了车辆基本结构参数。二是车辆总体要求。从可靠性、可用性、可维护性和安全性等方面入手,提出了车辆动力学性能、加减速性能、关键速度匹配、防火性能、防水防尘性能、减振降噪性能、气密性和电磁兼容等总体要求。三是各组成部件和系统技术要求。对车体及车端连接、转向架、牵引及辅助供电系统、制动系统、列车控制与管理系统、列车广播和乘客信息系统,以及司机室和客室等8个系统和部件,从功能、性能、安全、服务、维修等方面提出了具体要求。四是与其他系统接口相关要求。明确了车辆与信号、通信、接触网(轨)、轨道等系统的机械接口、电气接口、通信接口、传输信息等要求,并与已印发的《城市轨道交通信号系统运营技术规范(试行)》(交办运〔2022〕1号)进行了充分的衔接。

(来源:交通运输部网站)