

基于多源信息融合的磁浮列车组合式测速定位方法*

成 庶¹ 刘 畅¹ 宋丽伟² 向超群¹ 李 林²

(1. 中南大学交通运输工程学院, 410075, 长沙; 2. 中车株洲电力机车有限公司, 412001, 株洲//第一作者, 教授)

摘 要 分析了现有常用测速定位方法的不足及缺陷,从联邦卡尔曼滤波原理出发,提出了基于多源信息融合的磁浮列车组合式测速定位方法。该方法有效整合了惯性导航系统、全球卫星导航系统以及多普勒雷达传感器,成功搭建了列车运动模型,并设计、改良了融合算法。基于 MATLAB 软件仿真平台进行仿真试验,验证了该方法的有效性和可靠性。

关键词 磁浮列车; 测速定位; 信息融合; 卡尔曼滤波

中图分类号 U237.6; U292.91+7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.030

Maglev Train Integrated Positioning and Speed Measuring Method Based on Multi-source Information Fusion

CHENG Shu, LIU Chang, SONG Liwei, XIANG Chaoqun, LI Lin

Abstract The shortcomings and defects of the existing positioning and speed measuring methods are analyzed. Based on federated Kalman filter principle, a maglev train integrated positioning and speed measuring method based on multi-source information fusion is proposed. This method effectively integrates Inertial Navigation System, GNSS (global navigation satellite system) and Doppler radar sensor. A train movement model is successfully built, and the fusion algorithm is designed and optimized. Based on the simulation tests on MATLAB software simulation platform, the effectiveness and reliability of the proposed method is verified.

Key words maglev; positioning and speed measuring; information fusion; Kalman filter

First-author's address School of Transportation Engineering, Central South University, 410075, Changsha, China

区别于普通的轮轨式列车,磁浮列车与轨道间为无接触式运行,故无法通过计轴设备来进行测速定位。当前的磁浮列车测速定位方法按位置信息的参照可分为相对定位法和绝对定位法^[1](见

图1)。基于列车初始位置和实时位移来推算列车实时相对位置的方法称为相对定位法,其主要采用感应回线、计数轨枕、长定子齿槽检测、多普勒雷达^[2]和 INS(惯性导航系统)^[3]等技术设备。通过轨旁装置来获取列车绝对位置的方法称为绝对定位法,其主要采用 GNSS(全球卫星导航系统)^[4]、查询-应答器和脉宽编码等技术。

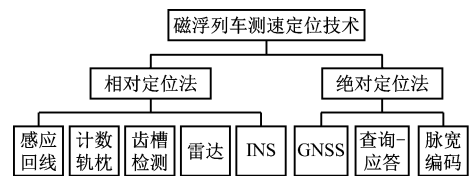


图1 磁浮列车常用测速定位方法

Fig.1 Common positioning and speed measuring method of maglev train

磁浮列车测速定位系统的精度和可靠性直接关系到列车的运行安全。传感器精度是测速定位系统的关键参数,受限于制造工艺和经济效益之间的平衡性,存在单一传感器应用的局限性。本文提出多源测速定位信息融合的技术^[5-6]。该技术通过融合多种设备的测速定位信息,能有效实现各方法之间的优势互补,克服单一测速定位方式所造成的性能缺陷,从而大幅提高测速定位系统的精度、可靠性和抗干扰能力。

基于多源测速定位信息融合技术,本文提出一种新型的磁浮列车组合式测速定位方法,通过联邦卡尔曼滤波算法,实现 INS、GNSS 及多普勒雷达的三源测速定位信息的有机融合,进而实现磁浮列车的高精度实时测速和连续定位功能。

1 组合式测速定位系统的构成及原理

组合式测速定位系统的硬件包含测速定位、数据通信、数据存储和信息处理四个模块,见图2。其

* 国家重点研发计划项目(2016YFB1200601);磁浮交通车辆系统集成湖南省重点实验室课题(2018TP1035)

中,测速定位模块和数据处理模块是核心功能模块。

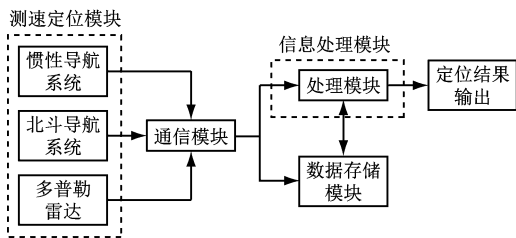


图2 组合式测速定位系统结构组成

Fig.2 Structure composition of positioning and speed measuring system

1.1 测速定位模块结构组成

测速定位模块采用组合式结构,包含 INS、多普勒雷达和 GNSS 三类信号采集终端。

INS 在假设物体做匀速运动的前提下,用物力(被测对象的加速度积分变换)实现列车的测速定位。本研究选用无需稳定平台,适于装备轻量化的联捷式惯性导航技术,其不依赖于外界信息、具备完全自主导航能力,但存在积累误差的问题。

GNSS 主要包含组网卫星、信号接收端和地面监控系统三部分,其测速定位性能不受限于时空及方位等因素,具有极高的测量效率和精度。为克服 INS 存在积累误差的缺陷,本研究选用中国北斗卫星导航系统为列车提供全天候的实时速度和位置信息,以消除积累误差。但 GNSS 的功效仍受限于铁路沿线如隧道等特殊封闭式地形的影响,存在卫星信号盲区等不可控因素。

针对 GNSS 存在信号盲区的问题,本研究采用车载 XS-IQ2 型测速雷达(其测速范围为 0.1 ~ 2 000.0 km/h)对列车进行不间断的信息采集,成功克服了 GNSS 存在工作盲区的缺陷。相应的,GNSS 和 INS 也为多普勒雷达的车体震动误差修正提供了良好参照。可见,各方法之间实现了优势互补。

由上述分析可知,这种以“核心优势”补偿“潜在缺陷”的组合方式一方面可以提高测速定位系统的整体综合效能,另一方面还为测速定位系统故障情况下的安全冗余提供了前提。

1.2 信息采集与处理

磁浮列车测速定位系统的软件功能主要包括信息采集和信息处理。通过多源测速定位模块采集的原始速度及位置信息一般可能存在互斥性,并包含各异的噪声。因此,有必要通过融合算法来对原始速度及位置等信息进行科学处理。信息采集

初始化与融合信息处理的算法流程如图 3 所示。

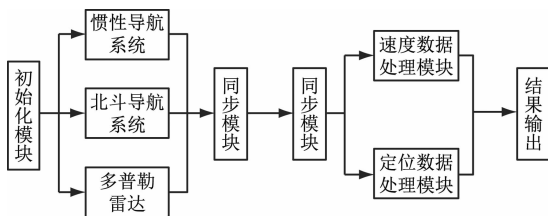


图3 信息采集初始化与融合信息处理的算法流程

Fig.3 Process of information acquisition initiation and fusion information treatment algorithm

2 信息融合算法

2.1 基于卡尔曼滤波的测速定位方法

通过在时域内建立测速定位系统的状态方程和测量方程,进而估算出状态变量的最优解。先以组合式测速定位系统中的某单一传感器模块为对象,本文选取位置信息 $S(k)$ 和列车速度 $v(k)$ 为状态变量,建立一般状态方程和测量方程如式(1)、(2)所示(其他传感器同理):

$$X(k) = \Phi(k, k-1)X(k-1) + \Gamma W(k-1) \quad (1)$$

$$Z_i(k) = H_i X(k) + M_i(k) \quad (2)$$

式中:

$X(k)$ —— k 时刻磁浮列车的状态矩阵;

Γ ——测速定位系统噪声移动矩阵;

$\Phi(k, k-1)$ ——状态一步转移矩阵;

$W(k-1)$ —— $k-1$ 时刻的系统噪声向量;

$Z_i(k)$ ——第 i 类传感器的测量输出向量;

H_i ——第 i 类传感器测量矩阵;

M_i ——第 i 类传感器的测量噪声向量。

定义 $i = n, b, r$, 其中, n, b, r 分别对应 INS、GNSS 和车载多普勒雷达系统。选取 $S(k)$ 和 $v(k)$ 为测量输出量。 $R(k)$ 表示测量噪声协方差, $Q(k)$ 表示测速定位系统噪声协方差(做如下合理假设: $R(k)$ 为正定矩阵, $Q(k)$ 为非负定矩阵)。在不受线路环境影响的理想情况下,将测速定位系统噪声和测量噪声视为均值为零的高斯白噪声。由此可得卡尔曼滤波递推算法。其中,时间更新方程为:

$$\hat{X}(k, k-1) = \Phi(k, k-1)\hat{X}(k-1) \quad (3)$$

$$P(k, k-1) = \Phi(k, k-1)P(k-1)\Phi^T(k, k-1) + \Gamma Q(k-1)\Gamma^T \quad (4)$$

测量更新方程为:

$$\hat{\mathbf{X}}(k) = \hat{\mathbf{X}}(k, k-1) + K(k)(\mathbf{Z}(k) - \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}(k, k-1)) \quad (5)$$

$$K(k) = \mathbf{P}(k, k-1)\mathbf{H}^T \cdot (\mathbf{H}\mathbf{P}(k, k-1)\mathbf{H}^T + \hat{\mathbf{X}}(k, k-1)) \quad (6)$$

$$\mathbf{P}(k) = (\mathbf{I} - K(k)\mathbf{H})\mathbf{P}(k, k-1) \quad (7)$$

式中:

$\hat{\mathbf{X}}(k, k-1)$ ——列车状态的一步预测向量;

$\hat{\mathbf{X}}(k)$ ——第 k 列车的状态预估向量;

$K(k)$ ——卡尔曼滤波增益矩阵;

$\mathbf{P}(k, k-1)$ —— $\hat{\mathbf{X}}(k, k-1)$ 的误差方差矩阵;

$\mathbf{P}(k)$ 和 $\mathbf{P}(k-1)$ ——分别为 k 时刻和 k 的前一时刻的估计误差方差阵;

\mathbf{H} ——传感器测量矩阵;

\mathbf{I} ——单位矩阵;

$\mathbf{Z}(k)$ —— k 时刻的传感器测量向量。

由式(3)~(7)可知,在给定状态初值 $\hat{\mathbf{X}}(0)$ 和误差初值 $\mathbf{P}(0)$ 的前提下,可根据 $\mathbf{Z}(k)$ 计算出 $\hat{\mathbf{X}}(k)$ 。

2.2 组合式测速定位系统的三源融合算法

本文采用联邦卡尔曼滤波算法来实现多源信息的高效融合,如图4所示。组合式测速定位系统中的各类传感器子模块分别按照式(3)~(7)的步骤进行常规卡尔曼滤波,通过对应传感器子模块的各子滤波器对状态值进行独立的时间更新及测量更新,得到列车运动状态局部估计值 $\hat{\mathbf{X}}_i$ 和协方差矩阵 \mathbf{P}_i 。进一步地,主滤波器将有效融合3个子滤波器输出的局部最优估计值,最终,将列车状

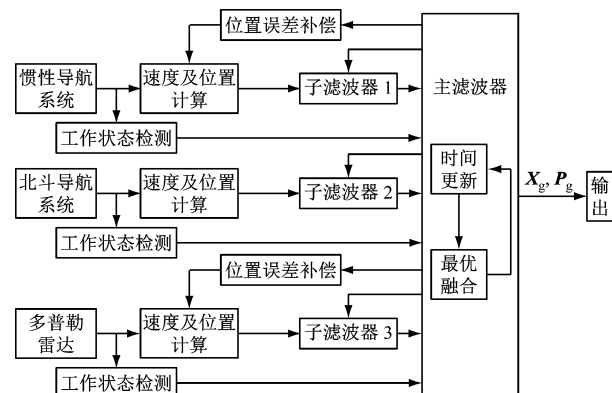


图4 三源信息融合算法框图

Fig. 4 Framework of three-source information fusion algorithm

态全局估计值 $\hat{\mathbf{X}}_g$ 和协方差阵 \mathbf{P}_g 作为测速定位系统的最优输出。即:

$$\hat{\mathbf{X}}_g(k) = \mathbf{P}_g(k) \sum_{i=n}^{b,r} \mathbf{P}_i^{-1}(k) \hat{\mathbf{X}}_i(k)$$

$$\mathbf{P}_g(k) = \left[\sum_{i=n}^{b,r} \mathbf{P}_i^{-1}(k) \right]^{-1}$$

2.3 算法参数改良及可靠性优化

主滤波器会按照权重分配的优化原理将全局估计值逐一反馈到各子滤波器,用于指导各子滤波器的数据优化。分配规则如下:

$$\hat{\mathbf{X}}_i(k) = \hat{\mathbf{X}}_g(k)$$

$$\mathbf{P}_i^{-1}(k) = \mathbf{P}_g^{-1}(k) \beta_i$$

$$\sum_{i=n}^{b,r} \beta_i = 1$$

其中, β_i 为分配系数, $i=n, b, r$ 。分配原则如下:

$$\beta_n = \begin{cases} 0.6 & (v \leq 50 \text{ km/h}) \\ 0.5 & (50 \text{ km/h} < v \leq 150 \text{ km/h}) \\ 0.4 & (v > 150 \text{ km/h}) \end{cases}$$

$$\beta_b = \begin{cases} 0.3 & (v \leq 50 \text{ km/h}) \\ 0.4 & (v > 50 \text{ km/h}) \end{cases}$$

$$\beta_r = 1 - \beta_b - \beta_n$$

在列车低速运行 ($v \leq 50 \text{ km/h}$) 阶段,由于GNSS和多普勒雷达传感器的测速定位精度较低,INS有良好的表现,故 β_n 取值较高, β_b 及 β_r 取值较低。在列车高速运行阶段,GNSS误差影响降低,且多普勒雷达可更好地发挥其测速定位优势,故增大其对应的分配系数。这种考虑列车不同运行速度区间的权重调整方案可进一步提升组合式测速定位系统的精度。

此外,本组合式测速定位系统还具备安全冗余的功能。在某个传感器突发故障的情况下,可将故障模块的分配系数平均调整给其它同级子模块,以实现故障容错。同时,可借助卡尔曼滤波算法对测速定位系统状态做出可靠估计,从而实现安全过渡,在保证列车运行安全的前提下提高线路的综合运营效率。

$$\hat{\mathbf{X}}_{k,j} = \Phi_{k,j} \hat{\mathbf{E}}(\mathbf{X}_j / \mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \dots, \mathbf{Z}_j) = \Phi_{k,j} \hat{\mathbf{X}}_j$$

$$\mathbf{P}_{k,j} = \Phi_{k,j} \mathbf{P}_j \Phi_{k,j}^T + \sum_{i=j+1}^k \Phi_{k,j} \Gamma_{i,i-1} \mathbf{Q}_{i-1} \Gamma_{i,i-1}^T \Phi_{k,j}^T$$

式中:

$\hat{\mathbf{X}}_j$ —— j 时刻的列车状态预估向量;

\mathbf{P}_j —— j 时刻的状态估计误差方差矩阵;

$\hat{X}_{k,j}$ ——由 j 时刻推算得到的 k 时刻(下一时刻)的列车状态预估向量($k > j, j$ 表示当前时刻);

$\Phi_{k,j}$ ——从 j 时刻到 k 时刻的列车状态转移矩阵;

$\hat{E}(X_j/Z_1, Z_2, \dots, Z_j)$ ——各子传感器状态向量的期望,并作为 j 时刻的状态预估向量。

3 磁浮列车运动模型搭建

为便于分析,可将磁浮列车视作 1 个处于匀速或匀加速运动状态下的惯性体。由于列车运行加速度不可突变,故列车的瞬时加速度为 1 个定值。此外,匀速运动模型可等效为加速度均值为零的匀加速运动模型。由此,本文最终选用匀加速运动模型来描述磁浮列车的运动状态。数学模型推导如下:

$$\begin{bmatrix} S(k) \\ v(k) \\ a(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S(k-1) \\ v(k-1) \\ a(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_s(k-1) \\ \omega_v(k-1) \\ \omega_a(k-1) \end{bmatrix}$$

式中:

$S(k), a(k), v(k)$ ——分别代表 k 时刻的位移、加速度和速度信息;

$\omega_s(k), \omega_a(k), \omega_v(k)$ ——分别代表位移、加速度和速度信息在 k 时刻所包含的系统噪声。

令:

$$X(k) = \begin{bmatrix} S(k) \\ v(k) \\ a(k) \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$\Gamma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad W(k) = \begin{bmatrix} \omega_s(k) \\ \omega_v(k) \\ \omega_a(k) \end{bmatrix}$$

可得式(1)、式(2)所对应的列车离散状态方程和传感器测量方程如下:

$$Z(k) = \begin{bmatrix} Z_n(k) \\ Z_b(k) \\ Z_r(k) \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$
$$M(k) = \begin{bmatrix} M_n(k) \\ M_b(k) \\ M_r(k) \end{bmatrix}$$

代入预设参数值后,即可得到列车匀加速运行工况下的离散状态方程和传感器测量方程。

4 仿真试验

依据已建立的磁浮列车匀加速运动模型,本文借助 MATLAB 软件平台对本算法进行仿真试验。试验中加入的噪声参数取值如表 1 所示,设定仿真时长为 500 s,主滤波器融合周期为 1 s,则通过磁浮列车匀加速运动模型的模拟仿真,即可得到列车运行仿真结果如图 5 及图 6 所示。

表 1 组合式测速定位系统的噪声参数取值表

Tab. 1 Noise parameters of the integrated positioning and speed measuring system

噪声参数	取值
加速度噪声/(m/s ²)	0.10
速度噪声/(m/s)	0.10
位置噪声/(m)	0.50
惯导系统测量噪声/(m/s)	0.50
多普勒雷达测量噪声/(m/s)	0.50
北斗导航系统测量噪声/(m/s ²)	0.05

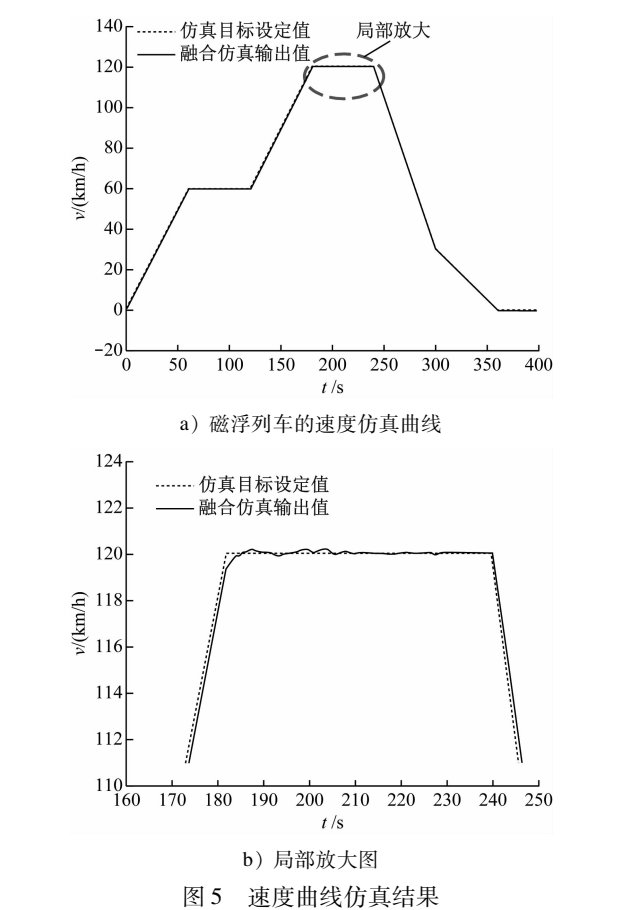
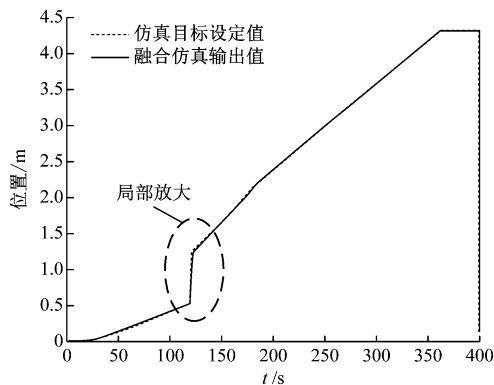


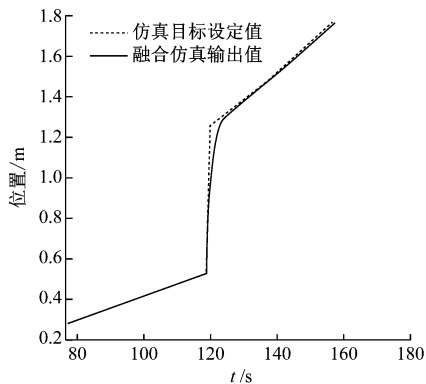
Fig. 5 Simulation results of speed curve

图 5 为磁浮列车的速度仿真曲线。由图 5 可见,融合波形与参考波形高度拟合。由局部放大图可以看出,测速误差小于 $\pm 0.5 \text{ km/h}$ 。

图 6 为匀加速工况下磁浮列车的位置曲线及局部放大仿真结果。由图 6 b) 局部放大图可以看出,定位误差小于 $\pm 10 \text{ m}$,仅在变速时刻产生较明显误差,但组合式测速定位系统仍能在短时间内恢复列车位置跟踪。



a) 磁浮列车的位置仿真曲线



b) 局部放大图

图 6 位置曲线仿真结果

Fig. 6 Simulation results of position curve

由仿真结果可知,本文提出的磁浮列车新型组合式测速定位方法能达到较高的精度水平。组合式测速定位系统在综合考虑外界干扰的情况下,仍能保持较高的校正精度和稳定的波形输出。这体现出本测速定位方案具有较优的测量精度,以及较强的鲁棒性和自主运行能力。

5 结语

本文首先分析 INS、GNSS 及多普勒测速雷达传感器等测速定位方法的优缺点,提出了基于多源信息融合的组合式磁浮列车在线测速定位方法;随后,基于联邦卡尔曼滤波算法,通过分配系数优化、安全冗余和状态预估等手段提高系统的测速定位精度和系统鲁棒性;然后,搭建磁浮列车匀加速运行工况下的精确数学运动模型;最后,采用 MATLAB 软件进行仿真试验,验证了所提方法的有效性和可靠性。

参考文献

- [1] 张世聪. 适用于磁浮列车的测速定位方法研究综述[J]. 铁道标准设计, 2018(10): 186.
ZHANG Shicong. Research review of speed and position detection methods applied to maglev trains[J]. Railway Standard Design, 2018(10): 186.
- [2] 李萌, 曹林, 王东峰. 用于机车测速的雷达传感器算法研究[J]. 传感器与微系统, 2016(12): 69.
LI Meng, CAO Lin, WANG Dongfeng. Algorithm study of radar sensor for locomotive speed measuring[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016(12): 69.
- [3] 王洪先. 陆用惯性导航系统技术发展综述[J]. 光学与光电技术, 2019(6): 77.
WANG Hongxian. Summary of the technology development of land inertial navigation system[J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2019(6): 77.
- [4] 王迪, 陈光武, 杨厅. 一种快速高精度 GPS 组合定位方法研究[J]. 铁道学报, 2017(2): 67.
WANG Di, CHEN Guangwu, YANG Ting. Study on a fast and precise GPS integrated positioning method[J]. Journal of the China Railway Society, 2017(2): 67.
- [5] ZHOU Y W. Research of multi-sensor integration system for train speed and position measurement[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 105-107: 1920.
- [6] 李晓龙, 刘锡良, 史黎明. 磁浮列车测速定位中的信息融合研究[J]. 电子科技大学学报, 2013(1): 87.
LI Xiaolong, LIU Xiliang, SHI Liming. Information fusion research in maglev train velocity and position detection[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2013(1): 87.

(收稿日期: 2020-06-16)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: tougao. umt1998. com