

常导高速磁浮交通项目速度目标值探讨^{*}

李上尚¹ 刘万明^{2**}

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海;

2. 同济大学磁浮交通工程技术研究中心, 201804, 上海//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 以常导高速磁浮交通系统为基础, 提出高速磁浮交通系统速度目标值的分析理论和方法。首先, 从系统投入方面分析了速度目标值对土建工程投资和车辆购置费的影响; 其次, 从运输经济学角度, 分析了旅客作为消费者对交通工具的选择行为, 探讨了磁浮列车服务水平(速度和票价)、项目长度(出行距离)、旅客时间价值和其他交通竞争者的服务品质等因素对磁浮交通市场份额的影响; 最后, 基于技术经济学方法, 分析了速度目标值对磁浮交通建设项目投资效益的影响, 并以项目经济效益最大化为目标, 探求速度目标值的最佳决策。以某虚拟项目为案例进行演算, 获得该项目的最佳速度目标值为 520 km/h。

关键词 轨道交通; 常导高速磁浮; 速度目标值

中图分类号 U266.4; U237

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.01.035

Discussion on Speed Target Value of Normal Conducting High-speed Maglev Transportation Project

LI Shangshang, LIU Wanming

Abstract With normal conducting high-speed maglev transportation system as basis, the theory and method for analyzing the target speed of high-speed maglev transportation system is proposed. First, the influence of target speed on civil engineering investment and vehicle purchase cost are analyzed from systematic investment perspective. Then, the behaviors of passengers choose as consumers in choosing transportation means are analyzed from transportation economics angle. How factors including maglev train service level (speed and fare), project length (travel distance), passenger time value and service quality of other transportation competitors impact the market share of maglev transportation is discussed. Finally, based on technical economics method, the influence of target speed on the investment benefits of maglev transportation construction project is analyzed. The optimal target speed decision-making strategy is

pursued, aiming to maximize the project economic benefits. A virtual project is taken as study case for calculation and the optimal target speed of the project comes out to be 520 km/h.

Key words rail transit; normal conducting high-speed maglev; speed target value

First-author's address Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China

高速磁浮列车是目前运行速度最高的地面轨道交通工具, 其环境兼容性和工程可行性已在世界范围内被认可。速度目标值是交通运输系统规划的核心技术指标, 是影响旅客出行方式选择和综合平衡经济及社会发展的重要因素。我国在近期连续 4 个五年计划中均开展了常导高速磁浮交通(以下简称“高速磁浮”)技术的开发, 目前已进入建立应用技术体系阶段, 因此从技术经济学角度探讨常导高速磁浮交通的速度目标值具有实际应用价值。

关于速度目标值, 国内外已对高速轮轨系统开展了较多的研究。早在 20 世纪 80 年代, 文献[1]就从德国社会环境角度研究了高速列车的最佳设计速度和高速铁路的最佳运营速度。文献[2]立足于经济性视角, 分别探讨了速度目标值与用户投资等多种关系, 并构建了综合投资模型。文献[3]对铁路最高运行速度和土建工程的影响关系进行了研究。我国在建设高速铁路网的过程中也有专家学者对高速铁路的速度目标值进行了研究^[4-7], 分别从客流特点、项目功能定位、时间目标值、路网协调匹配和工程投资等方面着手, 比选出综合效益最佳的速度目标值方案。而高速磁浮系统作为一种新兴技术, 至今尚无长线应用实践, 其速度目标值的研究相对较少。

^{*} 国家重点研发计划项目(2016YFB1200602)

^{**} 通信作者

本文从工程技术、市场分析和运营管理等方
面,研究速度目标值与工程投资、列车购置费、运营
成本和客运需求之间的关系,以经济效益最大化为
目标,计算高速磁浮建设项目的合理速度目标值,
为高速磁浮工程项目的速度目标值决策提供借鉴
与参考。

1 成本因素分析

轨道交通建设项目中对于速度目标值的决策
是一种投入与产出的博弈。在我国高速轨道交通
规划以及技术方案选择的过程中,速度目标值对系
统成本的影响是备受关注的焦点,提高速度目标值
必须以提高项目成本为代价。

1.1 土建工程投资

在轨道交通系统生命周期费用中,系统建设投
资是控制性指标,通常直接被用于描述系统的经济
性。土建工程投资是轨道交通系统投资的主要构
成部分,通常占系统总造价的 70%以上。

不同地形条件下,线路基础设施的设计速度对
工程费用的影响程度不同。本文以不同地形(平原
地区、丘陵地区和山区)为研究对象,根据不同设计
速度确定线路设计参数后再进行试验定线,获得了
不同地形条件下设计速度对土建工程费用的影响
系数,如表 1 所示。由表 1 可知,工程费用随着设计
速度的增加而增加。当设计速度从 200 km/h 提高
至 500 km/h 时,平原地区的设计速度对工程费用的
影响系数增加了 26%,山区的设计速度对工程费用
的影响系数增加了 33%,说明在山区地形条件下,
速度目标值对工程费用的影响较大。

表 1 不同地形条件下设计速度对工程费用的影响系数
Tab. 1 Influencing coefficients of design speed to engineer-
ing cost under different geographical conditions

设计速度/ (km/h)	不同设计速度对工程费用的影响系数		
	平原地区	丘陵地区	山区
200	1.00	1.00	1.00
300	1.09	1.09	1.10
400	1.17	1.17	1.18
450	1.21	1.23	1.24
500	1.26	1.33	1.33

注:以速度目标值为 200 km/h 时的影响系数 1.00 作为基准数据。

1.2 列车购置费用

随着列车运行速度的提高,空气动力效应和机
械振动也有所加剧。车辆的流线质量、机械强度和
密封水平需随速度的提高而提高,列车购置费也相

应有所提高。各种高速列车(含轮轨与磁浮模式)
购置费与设计运营速度的关系为^[8]:

$$H_c(v) = (0.004\ 8v - 0.431)H_c(300) \quad (1)$$

式中:

$H_c(v)$ ——最高运行速度为 v 时的购置费,元;

v ——列车最高运行速度,km/h;

$H_c(300)$ ——最高运行速度为 300 km/h 时的
购置费,元。

2 市场因素分析

一定的速度目标值对应一定的交通服务水平。
如果把交通运输能力作为向公众提供的一种服务
产品,则不同的速度目标值将对应不同的服务品质。

2.1 服务品质综合评判模型

高速磁浮交通项目的客运需求或其在交通走
廊所占的市场份额,取决于每个旅客个体对交通工
具的选择。旅客决策过程实际上是在对各种交通
工具的各种服务特性进行多目标比较和权衡之后
形成的。服务品质可以概括为六方面:经济、安全、
舒适、方便、快速、准时。

如果在城市间有 m 种轨道交通出行方式可供
选择,则第 i 种轨道交通出行方式($i=1,2,\cdots,m$)对
于旅客的效用 U_i 可以表述为:

$$U_i = \sum r_{ik} \omega_{ik} \quad (2)$$

式中:

r_{ik} ——第 i 种轨道交通出行方式所对应的第 k
种服务品质, $k=1,2,\cdots,6$;

ω_{ik} ——旅客对第 i 种轨道交通出行方式所对
应的第 k 种服务品质的偏好程度。

旅客对高速轨道交通工具的选择主要取决于
旅客对于所节省时间的支付意愿。对于轨道交通
分析中经常使用的旅客经济收入因素,实际上也可
换算为旅行时间的机会成本,用单位时间的经济价
值来体现。此外,因公和因私的出行因素可以反映
为旅行时间的生产性和生活性机会成本。因此可
用时间价值作为对出行旅客特征的基本描述。

另外,当旅客选择轨道交通工具时,对服务属
性的权重设定显然受其当次出行距离的影响,短途
出行时可能因总时间和总费用差别不大而对方便
性、可靠性赋予更大的权重。因此,分析一个轨道
交通项目的市场份额应针对其包含的各种距离 OD
(起讫点)客流需求进行分析。

将旅客的出行距离和时间价值作为影响旅客偏好程度 ω 的因素,其表达式为:

$$\omega = a_1 + a_2 W_t + a_3 W_L \tag{3}$$

式中:

- W_t —— 时间价值因素;
- W_L —— 出行距离因素;
- $a_1、a_2、a_3$ —— 待求参数。

旅客将在各种轨道交通出行方式中选择效用最大者出行。被选择的轨道交通出行方式的效用可以表述为:

$$U = \max(U_i) \tag{4}$$

2.2 社会客运量分配及市场份额分析模型

客运量在各种轨道交通出行方式间的分配是旅客个体对轨道交通出行方式选择结果的集合。针对具体的某一 OD 段,出行距离即为定值。故对于旅客的特性描述只剩下时间价值因素,时间价值一旦确定,旅客的选择就是唯一的。因此,不同轨道交通出行方式的市场份额取决于旅客群体的时间价值分布,将其设为 $\phi(w)$ 。以时间价值因素 $W_{t磁1}$ 和 $W_{t磁2}$ 表示选择高速磁浮列车旅客的时间价值下限和上限,则此出行方式在具体 OD 段的被选择累计概率(即份额比例) $Q_{磁}$ 为:

$$Q_{磁} = Q(W_{t磁1} \leq W_t \leq W_{t磁2}) = \int_{W_{t磁1}}^{W_{t磁2}} \phi(w) dw \tag{5}$$

旅客的时间价值分布可以采用抽样调查或根据经济统计资料计算获得。当其服从均值为 μ 、方差为 σ 的正态分布时,对于 OD 段全方式客运需求 C_0 ,高速磁浮列车的市场份额 $M_{磁}$ 可以表示为^[8]:

$$M_{磁} = Q(W_{t磁1} \leq W_t \leq W_{t磁2}) C_0 = C_0 \left[\Phi\left(\frac{W_{t磁2} - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{W_{t磁1} - \mu}{\sigma}\right) \right] \tag{6}$$

式中:

$\Phi\left(\frac{W_{t磁} - \mu}{\sigma}\right)$ —— 累积正态分布值, z 为磁 1 或磁 2。

2.3 客运市场份额的弹性分析

研究高速磁浮交通应用项目的速度目标值,即是规划该轨道交通出行方式在快速性方面的服务品质,因此需要分析高速磁浮交通市场份额的速度弹性。根据式(5)计算可以获得不同出行距离和不同平均时间价值下,高速磁浮交通出行方式所占的市场份额比例。不同的出行距离、时间价值及旅行速度时,高

速磁浮交通所占的市场份额如表 2 所示。由表 2 可知:随着出行距离的增加,高速磁浮交通出行方式在长大干线上被选择的概率更大;当出行距离有所增加时,较高的旅行速度可以获得较大的市场占有率。

表 2 不同的出行距离、时间价值及旅行速度时高速磁浮交通所占的市场份额

Tab.2 Market share of high-speed maglev transportation with different travel distances, value of time and traveling speeds

出行距离/ km	时间价值/ (元/h)	市场份额比例			
		350 km/h	400 km/h	450 km/h	500 km/h
500	12	0.889	0.944	0.947	0.949
	16	0.942	0.969	0.970	0.971
	20	0.963	0.979	0.980	0.981
800	12	0.943	0.954	0.961	0.963
	16	0.968	0.973	0.977	0.978
	20	0.979	0.982	0.984	0.985
1 000	12	0.947	0.957	0.965	0.970
	16	0.970	0.975	0.979	0.982
	20	0.980	0.983	0.986	0.987
1 200	12	0.942	0.960	0.968	0.983
	16	0.957	0.977	0.981	0.989
	20	0.902	0.984	0.987	0.992
1 500	12	0	0.903	0.972	0.978
	16	0	0.691	0.983	0.986
	20	0	0.464	0.988	0.990

2.4 市场份额回归模型

由于高速磁浮列车出行方式的市场份额取决于商业运营速度、旅客平均时间价值和旅客出行距离,可以建立一个与上述因素有关的数学模型^[8]:

$$M_{磁} = f(v_{磁}, W_t, W_L) \tag{7}$$

式中:

$v_{磁}$ —— 高速磁浮列车商业运营速度。

通过分析计算模型可知,要保证高速磁浮列车出行方式具有较好的市场占有率,其速度目标值宜按以下两个方面考虑:

1) 不同项目长度的高速磁浮项目速度目标值。不同运行距离时,高速磁浮列车的最佳运行速度如表 3 所示。

表 3 不同运行距离时高速磁浮列车最佳运行速度
Tab.3 Optimal running speed of high-speed maglev train at different travel distances

运行距离/km	速度推荐值/(km/h)
100(近距离)	≥200
500(中等距离)	≥300
800~1500(远距离)	≥350

2) 不同旅客平均时间价值的高速磁浮项目速度目标值。不同旅客平均时间价值时的旅行速度推荐值如表 4 所示。

表 4 不同旅客平均时间价值时的旅行速度推荐值
Tab. 4 Recommended traveling speed for average time value of different passengers

旅客平均时间价值/(元/h)	旅行速度推荐值/(km/h)
12	400
16	420
≥20	≥450

综上所述:由表 1 可知,速度目标值的概念是土建设施的最高设计速度;由表 2—表 4 可知,速度目标值主要反映旅客的出行耗时,是旅行速度的概念。一般认为旅行速度约为土建设计速度的 0.6~0.8 倍,其与项目平均站间距离有关。

3 投资效益分析

速度目标值是交通建设项目中最重要的技术标准,对项目的工程配置、投资规模、客流大小和运营成本等技术经济指标具有控制性的影响。以虚拟的某平原地区项目为例,基于技术经济学方法分析运行速度对投资效益的影响,并以项目财务净现值最大化为目标,获得最佳速度目标值。

3.1 固定设施投资及余值

3.1.1 固定设施投资

固定设施投资主要包括土建基础设施、轨道设备、道岔及其他转线设备、牵引供电设备、运行控制系统设备、车站及相关服务设施等费用。其中,线路主体结构 and 牵引供电设备与速度目标值有关,其他费用则与速度目标值关联度较小,因此本文忽略不计。

1) 土建基础设施投资。由表 1 可知,平原地区若以速度设计值为 200 km/h 时的费用影响系数 1.00 作为基准数据,则当速度设计值为 500 km/h 时的费用影响系数为 1.26。反之,若以速度设计值为 500 km/h 时的费用影响系数 1.00 作为基准数据,则不同速度目标值下的费用影响系数如表 5 所示。

2) 牵引供电设备费用。由于不受传统铁路的轮轨黏着条件限制,高速磁浮列车可以实现较大的牵引力,因此其功率配置较大。同时,由于磁浮列车高速运行时的空气阻力增长较快,系统的功率配置增长也较快,所需牵引功率模块的数量也会随着速度目标值的提高而有所增加,其对费用的影响

表 5 以设计速度为 500 km/h 为基准的不同速度目标值下的费用影响系数

Tab. 5 Cost influencing factors of different target speeds with the design speed of 500 km/h as baseline

速度目标值/(km/h)	费用影响系数
200	0.79
300	0.87
400	0.93
450	0.96
500	1.00

也相应增加。以上海磁浮列车示范线的运行速度与功率曲线^[9]为例(见图 1),牵引功率与列车速度大致成正比。

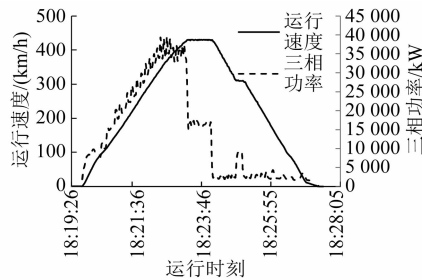


图 1 上海磁浮线的列车速度与功率消耗
Fig. 1 Train speed and power consumption of Shanghai maglev line

功率乘以功率单价即为牵引供电设备费用。通过最小二乘法一次拟合,可以获得列车功率配置需求 P 的近似关系式为:

$$P = 90 v_{\max} + 125 \tag{8}$$

式中:

v_{\max} ——系统设计速度, km/h。

3.1.2 固定设施余值

对于土建设施、轨道设备、房屋建筑、供电系统和声屏障等固定设施,根据相应的折旧率和经济评价计算其余值和残值。

3.2 运营收益

运营收益计算式为:

$$I_i = C_i \bar{S}_i H_i \tag{9}$$

式中:

I_i ——运营第 i 年的客运收入;

C_i ——运营第 i 年的客运需求;

\bar{S}_i ——运营第 i 年的平均运距;

H_i ——运营第 i 年的旅客票价。

3.3 运营支出

运营期内各年度的运营支出包括能耗费用、运营人员工资及福利、列车和其他设备维修费、管理费及财

务费用等。由于高速列车运行能耗随着运行速度的提高而增大,年度运营总支出也与系统的速度目标值有关。按照铁路建设项目经济评价办法,运营支出按与行车量有关(同时与速度有关)和与行车量无关(主要是固定设备维修费)两部分计算,其表达式为:

$$E_i = E_e(v)C_i + E_jL \quad (10)$$

式中:

- E_i ——第 i 年的运营支出;
- $E_e(v)$ ——与速度 v 有关的单位运营支出;
- C_i ——以周转量计算的第 i 年客运需求;
- E_j ——单位线路长度的维修费定额;
- L ——项目线路长度。

3.4 车辆购置费及余值

车辆购置费取决于列车需求数量。除运营初期根据预测的客运需求购置列车外,运营期内将随着客运需求的增加,新增购置列车。由于项目的速度目标值决定了列车完成一次运输任务所需的时间,所以按预测客流需求每天需开行的列车对数所需的列车车底数量也与速度目标值有关。计算期内第 i 年的列车购置费 $E_c(v, i)$ 可以表示为:

$$E_c(v, i) = [K(v, i+1) - K(v, i)] H_c(v) \quad (11)$$

式中:

- $K(v, i+1)$ ——第 $i+1$ 年按预测客运需求计算的列车需要量;
- $K(v, i)$ ——第 i 年预测的列车需要量;
- $H_c(v)$ ——列车购置单价,与速度目标值有关。

计算列车需要量时应考虑列车备用和列车检修的因素。根据车辆的固定资产形成率和折旧率可计算出到计算期末的车辆残值。

3.5 项目经济效益

项目的经济效益体现为项目生命周期内的各年度的收益与投资 and 运营支出的差,再折现后的总和。即项目的经济效益目标值 O 为:

$$O = \max(N) = \sum_{i=m+1}^{m+n} I_i(v, W_i, i) (1 + R_D)^{-(i-1)} - \sum_{i=m+1}^{m+n} E_c(v, i) (1 + R_D)^{-(i-1)} - \sum_{i=1}^m A_i(v, G, i) (1 + R_D)^{-(i-1)} - \sum_{i=m+1}^{m+n} E_i(v, i) (1 + R_D)^{-(i-1)} + [A_{sg}(v, G) + A_{sc}(v, G)] (1 + R_D)^{-(m+n)} \quad (12)$$

式中:

N ——项目净现值;

$I_i(v, W_i, i)$ ——第 i 年的运输收益,其值与 v 、 W_i 以及运营年度有关;

$A_i(v, G, i)$ ——第 i 年的投资,其值与 v 、自然条件因素 G , 以及项目进展年度有关;

$A_{sg}(v, G)$ 和 $A_{sc}(v, G)$ ——项目计算期结束时的固定资产余值和车辆余值,其值与固定资产原值有关;

R_D ——折旧率。

以某平原地区的高速磁浮为例,该线路长度为 1 300 km,根据上述方法计算获得的设计速度目标值优化结果为 520 km/h。

4 结语

高速磁浮交通建设项目的合理速度目标值与项目所处的自然环境(如地形地质条件)和社会经济环境(如客运需求、经济发展水平)有关。在磁浮交通系统技术水平许可的速度范围内,每个具体建设项目存在一个经济合理的最高设计速度。本文提出的基于设计速度对高速磁浮项目各技术经济指标定量影响的速度目标值确定方法,有利于高速磁浮系统工程化应用过程中对速度目标值的科学决策。以案例项目进行分析演算得出的最佳设计速度结果(520 km/h)与常导高速磁浮系统的技术性能相匹配。我国研发的最高速度为 600 km/h(车辆构造速度一般比运营速度提高 10%)的常导磁浮列车,可以覆盖实际工程应用的速度目标需求。本文提出的速度目标值确定方法可供常导高速磁浮工程建设项目技术决策参考。

由于本文的速度目标值推荐值是在特定算例下取得的,不一定适合不同应用环境的建设项目,所以在实际工程实践中,应根据项目具体情况(如地形条件、线路长度、区域经济发展水平等)参考本文的研究方法以确定速度目标值。

参考文献

- [1] BRETTMANN E. Die optimal-wirtschaftliche Geschwindigkeit Spurgebundenen Reiseverkehrs[J]. Eisenbahntechnische Rundschau, 1976(4): 314.
- [2] LEVINSON D M, GILLEN D. The full cost of intercity highway transportation[J]. Working Papers, 1998, 3(4): 207.
- [3] MEZHER S B, CONNOLLY D P, WOODWARD P K, et al. Railway critical velocity-analytical prediction and analysis[J].

Transportation Geotechnics, 2016, 6: 84.

- [4] 杨华峰,戴新鑫,梁栋. 关于高速铁路速度目标值选择的思考[J]. 铁道经济研究, 2017(2): 6.
- YANG Huafeng, DAI Xinliu, LIANG Dong. Considerations on the selection of speed target of high-speed railway[J]. Railway Economics Research, 2017(2): 6.
- [5] 马红伟. 成渝中线高铁速度目标值研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(3): 1.
- MA Hongwei. Research on target value of high-speed railway of Chengdu-Chongqing middle-line[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(3): 1.
- [6] 陶叶平. 沿江高速铁路速度目标值方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(7): 67.
- TAO Yeping. Study on targeted speed scheme for the riverside high-speed railway[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(7): 67.
- [7] 郭靖. 基于 Logit 模型与双层规划理论的高速铁路最佳运营速度目标值决策研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.

GUO Jing. Research on decision making of the optimal operation speed target value of high speed railway based on Logit model and bi-level programming theory[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

- [8] 刘万明. 我国高速铁路客运专线主要技术经济问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2002.
- LIU Wanming. Research on main engineering economics problems of Chinese high-speed passenger-only guided transport system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002.
- [9] 吴祥明, 常文森, 刘万明. 上海高速磁浮列车及磁浮技术发展刍议[J]. 综合运输, 2005, 27(1): 28.
- WU Xiangming, CHANG Wensen, LIU Wanming. Discussion on the high-speed magnetic suspension train and magnetic suspension technology development of Shanghai[J]. China Transportation Review, 2005, 27(1): 28.

(收稿日期: 2022-04-20)

(上接第 172 页)

维修周期优化后, 每列车每年的客室车门系统维修费用约为 4 524 元, 而维修周期优化前每列车每年的客室车门系统维修费用约为 7 056 元。维修周期优化后, 在保证车门系统可靠性不变的情况下, 每列车每年的维修成本降低了 1/3。

4 结语

基于动车组车门系统故障间隔服从威布尔分布, 建立了以历史可靠度为约束条件、车门系统单位时间维修费用最低为目标的维修模型。以中国铁路上海局集团有限公司 CRH2A 型动车组车门系统实例进行分析, 在保证车门系统可靠性满足运行要求的情况下, 车门系统维修周期由 30 d 优化为 65 d, 维修费用降低了 1/3, 大大降低了车门系统的维修费用, 验证了维修模型的实用性和经济性。

参考文献

- [1] 郑锐. 三参数威布尔分布参数估计及在可靠性分析中的应用

[J]. 振动与冲击, 2015, 34(5): 78.

- ZHENG Rui. Parameter estimation of three-parameter Weibull distribution and its application in reliability analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(5): 78.
- [2] 张可新. 动车组可靠性评估及维修策略优化方法研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2015.
- ZHANG Kexin. Study on EMU reliability evaluation and optimization methods of maintenance strategy[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences Group, 2015.
- [3] 朱玲, 江朝抒, 陈祝明. KS, χ^2 检验方法的 K 分布杂波参数估计研究[J]. 电子科技大学学报, 2008(增刊 1): 13.
- ZHU Ling, JIANG Chaoshu, CHEN Zhuming. Parameter estimation study of K-distribution based on the goodness-of-fit test[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008(S1): 13.
- [4] 游鹏飞, 寇玮华. 浅析墨菲定律及海因里希法则对控制事故的作用[J]. 安全、健康和环境, 2008, 8(8): 14.
- YOU Pengfei, KOU Weihua. Discussion about the role of Murphy law and Heinrich theory to control accidents[J]. Safety Health & Environment, 2008, 8(8): 14.

(收稿日期: 2022-04-12)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

<http://umt1998.tongji.edu.cn>