

# 基于多元回归分析的铁路智能安全标线设置的研究

张庭赫<sup>1</sup>, 刘丽梅<sup>2\*</sup>, 叶维震<sup>1</sup>, 赖 炜<sup>1</sup>

<sup>1</sup>沈阳工程学院机械学院, 辽宁 沈阳

<sup>2</sup>沈阳工程学院基础教学部, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2024年7月2日; 录用日期: 2024年7月17日; 发布日期: 2024年9月4日

## 摘 要

随着城市化的进程和高速铁路网络的快速发展, 站台乘客的安全受到了广泛关注。本文通过数学建模方法探讨高速列车通过站台时对候车乘客的气流影响, 分析安全标线的设置依据, 并提出保障铁路站台安全的建议。本文分别从力的计算、安全线的设置及影响因素分析三个方面进行了深入研究, 提出了基于回归分析的改进的贝努利模型。本文通过对我国幼儿、成年人、老人的各个年龄段的平均体重、体积以及列车的车速三个自变量与乘客所受风力作为因变量进行多元线性回归性分析, 得到数据分类处理。再通过改进的贝努利模型计算出在列车任何速度以及人与车的任意距离下人所受的推力或拉力大小。确定了乘客能够安全承受的最大气流力, 并引入了安全系数来考虑不同体型和稳定性的乘客。进而本文提出了不同列车速度下安全标线的最佳位置, 以确保所有乘客的安全, 提出智能安全标线设置。

## 关键词

伯努利效应, 流体力学, 动态压力

# Research on Railway Intelligent Safety Marking Setting Based on Multiple Regression Analysis

Tinghe Zhang<sup>1</sup>, Limei Liu<sup>2\*</sup>, Weizhen Ye<sup>1</sup>, Wei Lai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanics, Shenyang Institute of Engineering (SIE), Shenyang Liaoning

<sup>2</sup>General Studies Teaching Department, Shenyang Institute of Engineering (SIE), Shenyang Liaoning

Received: Jul. 2<sup>nd</sup>, 2024; accepted: Jul. 17<sup>th</sup>, 2024; published: Sep. 4<sup>th</sup>, 2024

\*通讯作者。

文章引用: 张庭赫, 刘丽梅, 叶维震, 赖炜. 基于多元回归分析的铁路智能安全标线设置的研究[J]. 流体动力学, 2024, 12(3): 35-44. DOI: 10.12677/ijfd.2024.123004

## Abstract

With the process of urbanization and the rapid development of high-speed railway network, the safety of platform passengers has received wide attention. The purpose of this study is to explore the influence of the high-speed train passing through the platform through mathematical modeling method, analyze the basis of setting up the safety line, and put forward suggestions to ensure the safety of the railway platform. This paper studies deeply from three aspects of force calculation, safety line setting and influencing factor analysis and proposes an improved Bernoulli model based on regression analysis. In this paper, the average weight and volume of children, adults and the elderly at all ages in China, as well as the speed of the train, are analyzed with multiple linear regression as dependent variables, and the data are classified and processed. Then, the thrust or pull of people at any speed of the train and any distance between people and cars can be calculated according to the improved Bernoulli model. The maximum airflow force that passengers can safely bear is determined, and a safety factor is introduced to consider passengers with different sizes and stability. Furthermore, this paper puts forward the optimal position of safety marking under different train speeds to ensure the safety of all passengers, and proposes the intelligent safety marking setting.

## Keywords

Bernoulli Effect, Fluid Mechanics, Dynamic Pressure

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在现代城市交通系统中，高速铁路作为一种高效、便捷的交通方式，其安全运营对于乘客和铁路管理者而言具有至关重要的意义。随着高速列车速度的提升，车站站台安全问题日益凸显。尤其是在高速列车进站和通过站台时，由于高速移动的列车会产生强烈的气流，这些气流能够在站台上形成显著的压力差，对候车乘客造成潜在的危险[1]-[3]。国际上对于铁路站台安全的研究已经提出了多种理论和实践方案。安全标线的设置是其中的一项基本措施，其目的在于通过界定乘客候车的安全距离来减少风险[4]-[6]。然而，如何根据列车的速度和其他因素科学地确定这一安全距离，仍然是个需要深入探讨的问题。本研究旨在通过数学建模的方法，量化列车通过站台时产生的气流对乘客的影响，从而为安全标线的合理设置提供理论支持和指导建议。传统的道路标线在应对复杂多变的交通环境时显得力不从心。因此，智能安全标线的出现，以其智能化、动态化的特点，为提升交通管理水平和降低事故率提供了新思路，但其研究也面临着一些挑战，比如如何确保标线的可靠性等。本文通过数学建模的方法，量化列车通过站台时产生的气流对乘客的影响，从而为安全标线的合理设置提供理论支持和指导建议。

## 2. 伯努利模型

### 2.1. 模型的假设

本模板仅针对采用 A4 纸型的论文版式。请务必确保您的论文采用 A4 幅面(21 厘米 × 28.5 厘米)进行排版。针对该问题，本文进行如下模型假设：

假定列车的侧面为平滑的,忽略由于窗户、门和其他结构造成的气流细节变化,进而简化气流模型。

假设列车通过时产生的气流是均匀分布的,并且气流的速度分布在站台边缘具有对称性。

假设列车通过时产生的气流是稳定的,并且在短时间内气流特性不发生变化。

假设人的密度近似于水的密度,人按照简单的圆柱体进行计算。

假设乘客在站台上的分布是均匀的,忽略因乘客聚集或分布不均导致的局部气流变化。

假设车和人站在同一水平线上。

假设人与地面的摩擦力系数为0.5。

## 2.2. 符号设定

本文引进了一些参数符号如表1所示。

**Table 1.** Parameter symbols and meanings

**表 1.** 参数符号和意义

符号	意义
$p$	风压
$d$	列车到人的距离
$D$	列车的宽
$h$	流体到水平线的距离
$S$	受力面积
$V$	人体体积
$k$	扩散系数
$\mu$	摩擦系数
$M$	人体质量
$\rho$	空气密度
$F_f$	人与地面的摩擦力
$v_{\text{风}}$	风速
$v_{\text{车}}$	列车速度
$F$	作用在人体上的风压力

## 2.3. 模型的建立

伯努利方程是流体动力学中一个重要的原理,以及流体动力学相应原理,这是描述高速流体导致压力降低的现象因此本文使用伯努利方程计算站台边缘的气压差,如图1所示空气流动速度与压强大小的关系图[7]-[9]。

伯努利方程表现形式:  $p_1 + 0.5\rho v_1^2 + \rho gh = p_2 + 0.5\rho v_{\text{风}}^2 + \rho gh$ 。

压强差方程:  $\Delta p = p_1 - p_2 = 0.5\rho v_{\text{风}}^2 - 0.5\rho v_1^2$ 。

其中,  $p_1$ : 人体所处位置的空气压强,  $p_2$ : 列车所处位置的空气压强,  $\rho = 1.224 \text{ kg/m}^3$ : 空气密度

$h$ : 流体与地平线的距离。这个方程表明, 当高速列车经过站台的时候, 它会在车身周围推动空气形成快速的气流。根据伯努利方程, 当空气流速增大的时候, 气体的压强就会减小, 从而就会形成人身体前后的压强差。当人体前的流速越大的时候, 压强就会越小。这样人身体前后形成的压强差就会形成一个力, 这个力通过本文上述所说的伯努利方程就能够计算。然后, 可以由列车的速度所产生的风速( $v_{风}$ )来估算出动压差, 进而计算出力的大小( $F$ )。

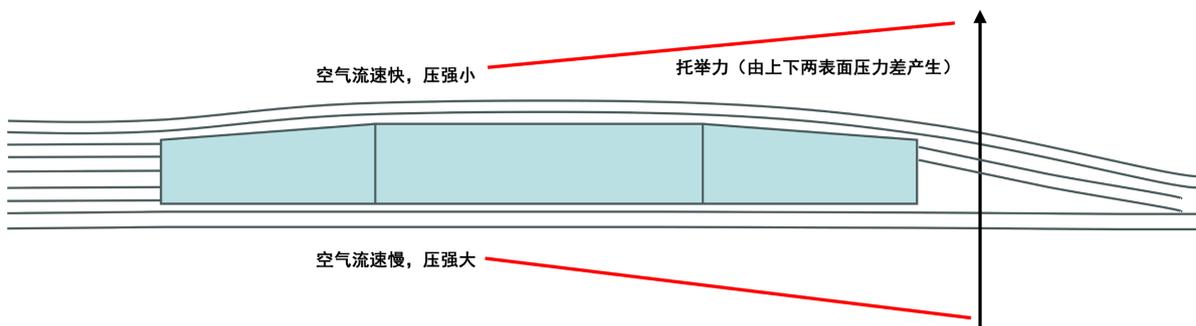


Figure 1. Air flow and pressure diagram

图 1. 空气流动与压强图

## 2.4. 风速计算

理论风速计算公式(1):

$$V_{风1} = \frac{V_{车}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Kd}{D}\right)^2}} \quad (1)$$

其中,  $v_{风1}$  是估算的风速,  $V_{车}$  是列车的速度,  $d$  是列车到人的距离,  $D$  是列车的宽,  $K$  是一个经验常数, 它取决于射流的扩散特性和列车的具体形状。由这个公式本文可以推出, 当距离  $d$  较小的时候, 风速  $v_{风1}$  比较接近列车速度  $v_{车}$ , 但是随着距离  $d$  的增加, 风速会因为空气流与周围静止空气的混合而降低。

实际风速计算公式(2):

$$V_{风1} = \frac{V_{车} \cdot D}{D + Kd} \quad (2)$$

其中,  $V_{风1}$  是站台上人所感受到的风速。这个公式考虑到空气流动由于射流扩散导致的风速减小。在风速计算当中, 随着距离  $d$  的增加, 导致风速  $v_{风1}$  下降。

## 2.5. 受力计算

理论风速计算公式(1): 压强差产生的力( $F$ )计算:  $F = \Delta P \times S$ 。  $S$  表示人体正对列车方向的受力面积。假设人体按照简单的圆柱体, 可以按照体积和体重来估算其半径和面积。

## 3. 基于回归分析的改进的伯努利模型

### 3.1. 车速的设定

由于在现实生活中不论是列车还是高铁都存在各种不同的型号, 本文将主要阐述一下几种在生活中最为常见的车型来作为分析的依据。车型主要包括有 CRH380A、CRH380B (CRH380A 与 CRH380B 的行驶时速基本相同)、CRH3、CRH5、CRH2E。

### 3.2. 基于多元回归分析的数据处理

首先对我国幼儿、成年人、老人的各个年龄段的平均体重、体积以及列车的车速三个因变量作为自变量与乘客所受风力作为因变量进行回归性分析。首先，做出因变量  $Y$  与自变量  $X$  的样本散点图如图 2 所示。

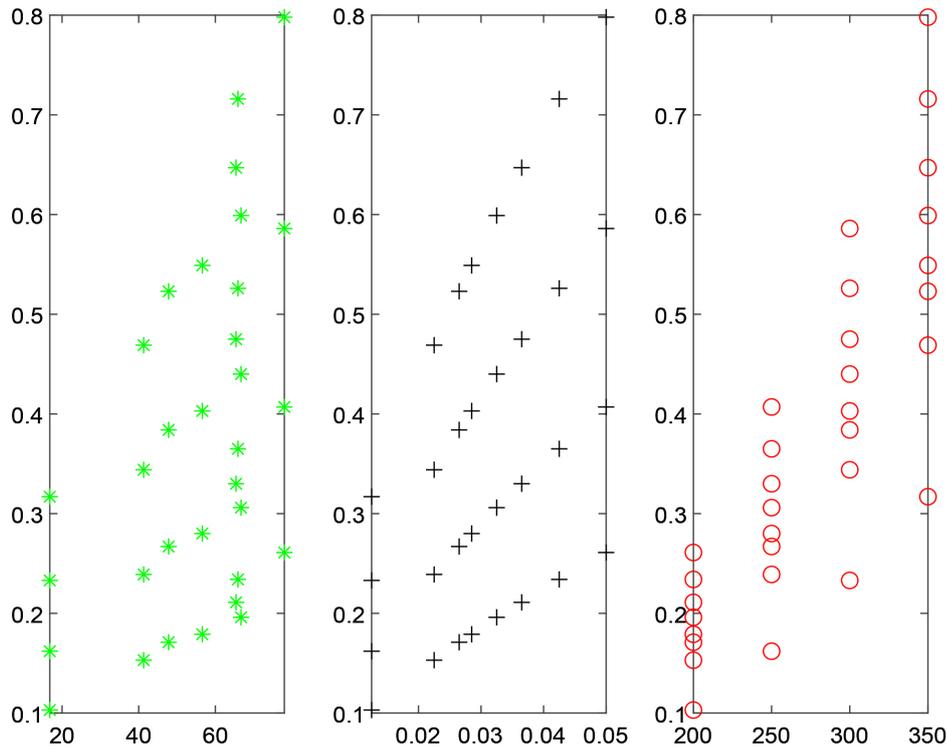


Figure 2. Sample scatter plot  
图 2. 样本散点图

由样本散点图图 2 可以看出，在乘客的体重与列车的车速固定时，乘客的体积的越大，乘客所受的风力就越大；当乘客的体重与体积保持不变的情况下，列车车速越快，乘客所受的风力就越大；最后从这三幅图中可以看出这三个自变量与因变量都存在线性关系，所以本文决定采用线性回归分析方法来进行数据的处理，同时因为自变量存在多个，所以采用多元线性回归分析来进行处理。

设回归方程为：

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_3 x_3 \quad (3)$$

将上文中已经处理好的数据通过 MATLAB 进行多元线性回归分析，可得到的计算结果如表 2 所示。

因此可得线性回归方程为：

$$\hat{y} = -0.6041 + 0.0009x_1 + 6.7221x_2 + 0.0026x_3 \quad (4)$$

由表可知相关性系数  $R$  的绝对值为 0.9769，该值处于 0.8 到 1 之间，表明该模型的线性相关性强；同时因为  $P < 0.0001$ ，所以很容易便可看出  $P <$  预定的显著水平，因此证明了因变量与自变量之间存在显著的线性关系。同时上述两种证明方法结果一致，进一步证明了因变量与自变量存在显著的线性关系。

通过上文中得出的线性回归方程，本文将进行数据处理，处理结果如表 3 所示。

**Table 2.** Multiple regression linear analysis  
**表 2.** 多元回归线性分析

回归系数	回归系数的估计值	回归系数的置信区间
$\beta_0$	-0.6041	[-0.6889, -0.5194]
$\beta_1$	0.0009	[-0.0014, 0.0033]
$\beta_2$	6.7221	[2.8316, 10.6125]
$\beta_3$	0.0026	[0.0023, 0.0028]
$R^2 = 0.9543$	$F = 159.0702$	$P < 0.0001$
		$S^2 = 0.0016$

**Table 3.** Data processing of linear regression equation  
**表 3.** 线性回归方程数据处理

体积/(m <sup>3</sup> )	体重/(kg)	车速/(km/h)			
		200	250	300	350
0.0125	16.8	0.103	0.162	0.233	0.317
0.0225	41.3	0.153	0.239	0.344	0.469
0.0265	47.8	0.171	0.267	0.384	0.523
0.0285	56.6	0.179	0.28	0.403	0.549
0.0325	66.7	0.196	0.306	0.44	0.599
0.0365	65.4	0.211	0.33	0.475	0.647
0.0425	69.5	0.234	0.365	0.526	0.716
0.05	78	0.261	0.407	0.586	0.798

通过表 3 可知, 本文将乘客所受到的风力的大小为判断依据进行数据的分类(风力为 0.3 KN 为分界点), 首先, 经过多次数据统计可知幼儿所受到的风力通常小于 0.3 KN, 所以本文将乘客分为成人与幼儿; 其次因为男女之间存在差异, 同时一部分女性所受风力大小小于 0.3 KN, 因此又将乘客以性别差异进行分类; 最后由线性回归方程可知, 车速对风力的大小存在显著影响, 因此将车速分为 200 km/h、250 km/h、300 km/h、350 km/h 这四种。

### 3.3. 改进的伯努利模型的应用

由于高站台的安全线的划分为固定值, 所以这里不做考虑。同时对于非高站台本文决定通过修改代码来计算在不同列车速度下人与列车的安全距离。

首先对于列车速度, 先详细阐述在 CRH380A 型号的列车行驶时, 成年男性与女性应设立的安全标线的距离为多少; 其次根据本文所查资料可知, 成年男性的平均体重为 72.4 kg, 女性的平均体重为 58.8 kg。

随后将数据代入 MATALB 之中, 进行进一步的可视化分析。

首先以男性的平均体重为样例, 设体重为 72.4 kg, 将其输入代码产生相关的可视化图如图 3。

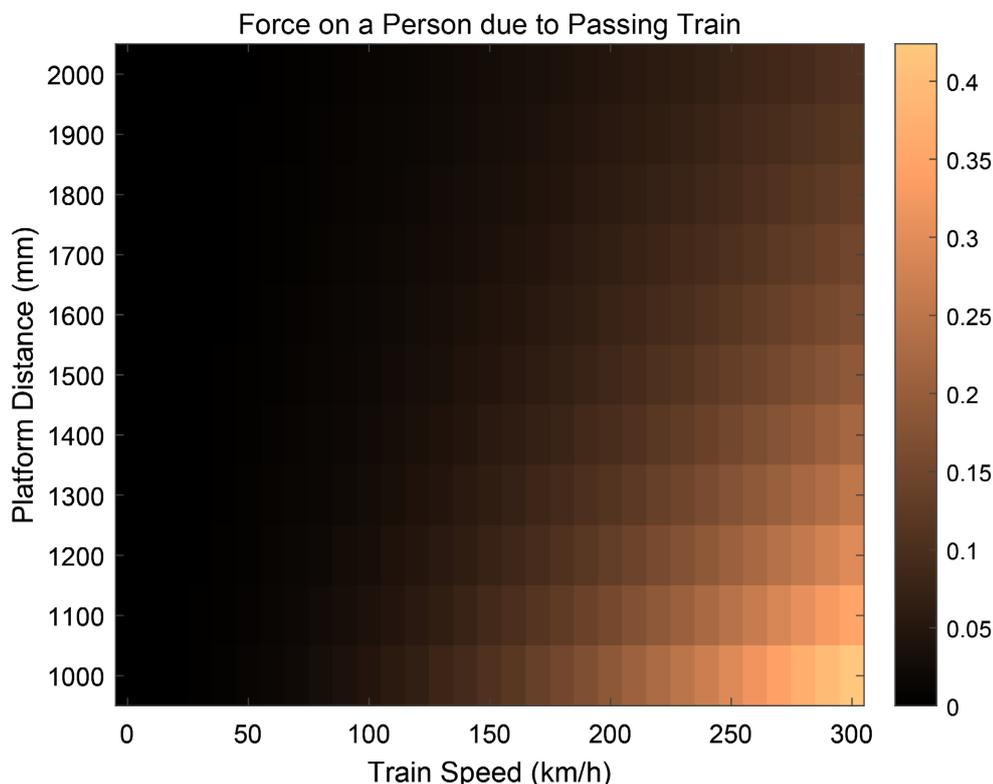


Figure 3. Thermal diagram of distance between people and trains and train speed

图 3. 人和列车距离与列车速度的热力图

从图 3 中可以看出, 当横轴速度(单位: 千米/小时)不变时, 纵轴平台距离(单位: 毫米)即安全警戒线与站台边缘的距离越小, 人所受到的力的作用越大。当安全警戒线与站台边缘的距离不变时, 列车的速度越大, 人所受到的力的作用越大。同时通过受力分析可知道, 人在站台上时收到两个力的作用。通过受力分析图可知, 人分别收到因气流产生变化而形成的风力与地面给人的摩擦力。

设摩擦系数为  $\mu$ ,  $\mu = 0.5$ , 人的质量为  $M$ , 重力加速度为  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ , 摩擦力为  $F_f = \mu Mg$ , 风力:  $F = \Delta P \times S$ 。当风力与摩擦力进行矢量的相叠加之后, 所得出的力即为合力, 也就是“吸力”或“推力”。同时根据摩擦力的定义可以分析得出, 人在列车经过时是否会被“吸走”或“推开”是由于风力的大小能否超过摩擦力的大小决定的。所以可以将摩擦力的最大值看作一个阈值。

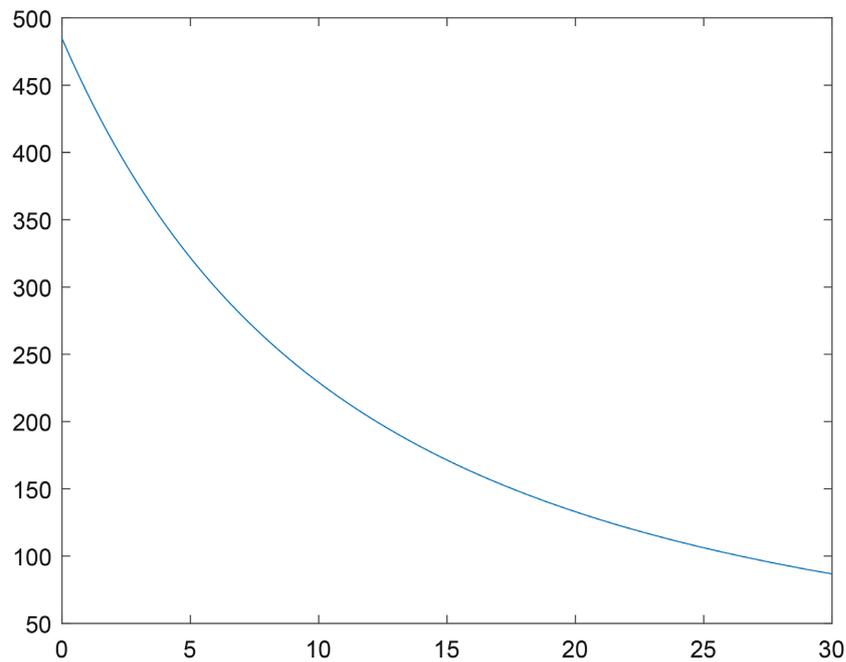
假设男性的平均体重为  $72.4 \text{ kg}$ , 平均体积为  $0.05 \text{ m}^3$ , 则  $M = 70 \text{ kg}$ , 从而产生最大摩擦力  $F_{f_{\max}} = \mu Mg = 354.76 \text{ N}$ , 故对于男性而言, 阈值为  $354.76 \text{ N}$ 。

同时将计算出的阈值代入数学模型的代码中得到风速与铁路标线距离的可视化关系图如图 4 所示。

图 4 横轴为风速(单位: 千米/小时), 纵轴平台距离(单位: 毫米), 将图 4 与图 3 进行比较, 可以得到当列车型号分别为 CRH380A、CRH3、CRH5、CRH2E 即车速分别为  $350 \text{ km/h}$ ,  $300 \text{ km/h}$ ,  $250 \text{ km/h}$ ,  $200 \text{ km/h}$ , 时的铁路安全标线距离分别为  $14 \text{ m}$ ,  $8.85 \text{ m}$ ,  $3.75 \text{ m}$ ,  $0 \text{ m}$ 。

又假设女性的平均体重为  $55.7 \text{ kg}$ , 平均体积为  $0.05 \text{ m}^3$ ,  $M = 55 \text{ kg}$ , 产生的最大摩擦力  $F_{f_{\max}} = \mu Mg = 269.5 \text{ N}$ , 故对于女性而言, 阈值为  $269.5 \text{ N}$ 。

将阈值代入数学模型的代码中并与上文的可视化图表进行对比也可得到相应的铁路安全标线距离。本文还对成年男性女性体重的最大值和最小值做了相应的拓展, 其铁路安全标线距离如表 4。



**Figure 4.** Wind speed and railway marking distance  
**图 4.** 风速与铁路标线距离

**Table 4.** Adult male and female weight railway safety marking distance table  
**表 4.** 成年男性女性体重铁路安全标线距离表

性别	体重/(kg)	车速/(km/h)				
		350	300	250	200	
男	最大值	74.3	13.5	8.4	3.35	0
	平均值	72.4	14	8.85	3.75	0
	最小值	70.4	14.5	9.3	4.1	0
女	最大值	60.8	17.35	11.7	6.1	0.45
	平均值	58.8	17.9	12.2	6.5	0.8
	最小值	55.7	19.1	13.2	7.35	1.45

由上表可知，当车速为 200 km/h 时，对于成人来说，安全标线应该以体重较轻的女性为标准，所以安全标线应设置为 1.5 m；以此类推，在车速为 250 km/h 时，标线的设定应为 7.35 m；当车速为 300 km/h 时，标线应在 13.2 m 处；当车速在 350 km/h 时，标线应在 19.1 m 处(注：在实际生活中列车进入站台时若车速达到 250 km/h，应在站台上加装护栏)。

本文还考虑到老人和婴幼儿的情况，通过上述方法得到的铁路安全标线距离表如表 5 所示。

同理可得，对于幼儿来说，在进站车速为 200 km/h 时，安全标线应设置为 5.7 m；以此类推，在车速为 250 km/h 时，标线的设定应为 12.7 m；当车速为 300 km/h 时，标线应在 19.7 m 处；当车速在 350 km/h 时，标线应在 26.6 m 处。

**Table 5.** Railway safety mar distance table introducing weight of old people and children  
**表 5.** 引入老人小孩体重铁路安全标线距离表

性别	体重/(kg)	车速/(km/h)				
		350	300	250	200	
男	最大值	23.1	18.1	12.4	6.7	0.9
	平均值	19.8	21.2	15	8.9	2.75
	最小值	16.4	25.6	18.9	12.1	5.2
女	最大值	21.9	19.2	13.3	7.4	1.5
	平均值	18.9	22.4	16	9.8	3.4
	最小值	15.8	26.6	19.7	12.7	5.7

### 3.4. 智能安全标线

同时为了达到安全标线的设置的智能化,该技术利用传感器、高清摄像头等设备,实现对铁路安全标线的实时监测与预警功能。该技术具有以下几个特点:一是实时性,能够迅速感知列车进站时的车速并做出提醒;二是动态性,可根据乘客的重量、体积等因素自动调整标线状态;三是智能化,能够自动识别乘客是否已经超出安全标线的距离并发出预警。智能安全标线技术将广泛应用于铁路、城市道路、高铁道等交通场景。

智能安全标线作为现代交通管理的重要组成部分,对于提升交通管理水平和降低事故率具有重要意义。通过持续创新和技术突破,智能安全标线将在未来发挥更加重要的作用。

## 4. 结论

本文以回归数据处理为基础,建立改进的伯努利模型,通过输入数据即可判断出观察点所受的力和风速,就可以判断出是否安全,具有很好的应用性,准确性和实践性。文中所建立的数学模型,物理基础坚实,通过运用一些时间的物理公式,如动态压力和人体所受到的风压力,人体表面积的计算。在该模型中,可以对题中提供的数据进行合理分析,而且该模型可以非常容易地适应不同的参数,如列车的速度、列车与人之间的距离以及人体的参数等。同时通过 MATLAB 代码仿真的可视化更加清晰地看到不同条件对数据的影响,从而精确而有效地确定可能的地点位置是否安全,节省时间且判断准确。本文通过分类研究得出标线的安全设置距离,比如通过感应器,当不同体重的人踩上去的瞬间会获得相应的智能标线。但在进行数学建模的过程中,本文做了一些假设,比如假定列车的侧面为平滑的,忽略由于窗户、门和其他结构造成的气流细节变化,从而简化气流模型,这可能在一些实际场景当中是不够准确的,所提出的模型具有一定的局限性,因此今后可以进一步优化研究。

## 基金项目

本文由教育部产学合作协同育人项目 2023 年批次项目(项目编号:230828424907023)、辽宁省教育厅 2024 高校基本科研项目(序号 25)和沈阳工程学院 2024 年大学生创新项目(项目编号:D202404171521260958)支持。

## 参考文献

- [1] 国家体育总局. 国家国民体质监测中心发布《第五次国民体质监测公报》[EB/OL].

<https://www.sport.gov.cn/n315/n329/c24335066/content.html>, 2024-05-28.

- [2] 郗艳红. 横风作用下的高速列车气动特性及运行安全性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2012
- [3] 吴礼斌, 李柏年. 数学实验与建模[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [4] 叶其孝, 姜启源. 数学建模[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [5] 卓金武. MATLAB 在数学建模中的应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [6] 刘来福. 数学建模方法与分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [7] 熊小慧, 汪欣然, 张洁, 等. 升力翼对高速列车列车风与尾流特性的影响[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(3): 148-161.
- [8] 郭晨. 风浪联合作用下车桥动力响应研究及概率安全评估[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [9] 彭益华. 风雨/冰作用下高速列车与斜拉桥耦合振动研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2022.