

文章编号: 1671-6612 (2022) 05-688-05

# 市域铁路地下单洞 双线隧道最高空气温度预测回归模型

张 璨<sup>1</sup> 杨 波<sup>2</sup> 陈 霖<sup>2</sup> 余 涛<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 中铁工程设计咨询集团有限公司 北京 100055)

**【摘 要】** 市域铁路采用单洞双线隧道模式可明显减小初投资、缩短建设周期, 但存在断面积过大、双向会车等因素不利于通风换热造成隧道内出现高温, 对隧道内最高空气温度的预测有助于单洞双线隧道的环控系统设计。建立了某市域铁路单洞双线隧道一维通风网络模型, 模拟计算了不同工况下的隧道最高空气温度, 并进行了参数敏感性分析, 采用多元线性回归方法建立了单洞双线隧道最高空气温度预测模型并进行了验证。结果表明: 不同因素对隧道最高空气温度影响程度由大到小排序为室外空气温度、列车对数、列车速度、列车编组、轨排风量、区间隧道长度、车站个数、土壤温度、阻塞比、活塞风井面积、活塞风井长度, 隧道最高空气温度预测模型的预测值与数值模拟计算值的最大偏差值为 0.9℃。

**【关键词】** 市域铁路; 单洞双线隧道; 最高空气温度; 敏感性分析; 预测回归模型

中图分类号 U25 文献标识码 A

## Prediction and Regression Model of Maximum Air Temperature in Underground Single-hole and Double-line Tunnel of Municipal Railway

Zhang Can<sup>1</sup> Yang Bo<sup>2</sup> Chen Lin<sup>2</sup> Yu Tao<sup>1</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;

2.China Railway Engineering Design and Consulting Group Co., Ltd, Beijing, 100055 )

**【Abstract】** The single-hole double-line tunnel adopted in the Municipal Railway can significantly reduce the initial investment and shorten the construction cycle. But the problems of too large sectional area and crossing of two trains are adverse to the ventilation and the heat exchange, resulting in high air temperature in the tunnel. The prediction of the maximum air temperature in the tunnel is helpful to the environmental control design of single-hole and double-line tunnel. In this paper, a one-dimensional ventilation network model of single-hole double-line of a city railway is established, the maximum air temperature of the tunnel under different working conditions is simulated and calculated, the parameter sensitivity is analyzed, and the prediction model of the maximum air temperature of single-hole and double-line tunnel is established by using multiple linear regression method. The results show that the influence degree of different factors on the maximum air temperature of the tunnel is ranked from large to small as outdoor air temperature, train pairs, train speed, train formation, rail exhaust air volume, section tunnel length, number of stations, soil temperature, blocking ratio, piston air shaft area and movable plug air shaft length. The maximum deviation between the predicted value of the tunnel maximum air temperature prediction model and the calculated value of numerical simulation is

作者简介: 张 璨 (1997.8-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 1014569818@qq.com

通讯作者: 余 涛 (1987.8-), 男, 博士, 副教授, E-mail: yutao073@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2022-04-28

0.9°C.

【Keywords】 Municipal Railway; single-hole double-line tunnel; maximum air temperature; sensitivity analysis; predictive regression model

## 0 引言

截止2020年底,全国市域铁路运营里程达到1162km<sup>[1]</sup>。某些地区由于地理及空间条件的限制,市域铁路设计中地下隧道及车站越来越多,隧道采用单洞双线模式可明显减小初投资且缩短建设周期,但由于其断面过大、双向会车等因素削弱了活塞效应,不利于隧道的通风散热<sup>[2]</sup>。《市域(郊)铁路设计规范》要求线路正常运营时隧道最高空气温度不超过40°C<sup>[3]</sup>,为了探讨市域铁路采用单洞双线隧道模式的可行性,对其进行隧道空气温度研究是十分有必要的。

隧道内空气温度受隧道参数<sup>[4,5]</sup>、活塞风井<sup>[6,7]</sup>、轨排系统<sup>[8,9]</sup>、行车组织<sup>[10,11]</sup>、室外空气温度<sup>[12]</sup>等因素影响,学者们多采用SES软件进行数值模拟以达到简化模型、计算长期效应的作用,但学者们对每个工程都进行了单独的数值模拟计算,无法快速指导设计,而隧道空气温度预测模型为其提供了便捷的途径。隧道空气温度预测研究方法主要分为神经网络分析方法<sup>[13,14]</sup>、多元线性回归方法<sup>[15]</sup>,本文采用多元线性回归方法建立市域铁路单洞双线隧道最高空气温度预测模型。

本文建立了市域铁路单洞双线隧道一维通风网络模型,通过模拟计算了不同工况下的隧道最高空气温度,进行了影响因素的敏感性分析,并采用多元线性回归方法建立了该模式下隧道最高空气温度的预测回归模型,为市域铁路单洞双线隧道可行性探讨及环控方案研究设计提供参考。

## 1 市域铁路概况与通风计算模型

### 1.1 市域铁路基本概况

市域铁路地下隧道段车站设置通常不超过10个,前期研究表明市域铁路单洞双线隧道中车站个数达到5个时,隧道最高空气温度增长率明显降低,本文选择5车站作为车站数基准。市域铁路地下隧道段站间距不宜小于2km且不宜超过8km,选定趋中值4km为基准区间隧道长度。单洞双线模式方案中盾构面积通常为70~115m<sup>2</sup>,市域车辆横截面积为11.5m<sup>2</sup>,计算得阻塞比为0.1~0.16,选

定断面面积82m<sup>2</sup>,即阻塞比0.14为基准阻塞比。

车站均采用屏蔽门双活塞风井系统,在轨行区设置两台排热风机,单台排热风机风量为50m<sup>3</sup>/s。活塞风井长度、面积分别为30m、20m<sup>2</sup>。

该线路列车采用市域动车组6节编组,设计运营最高时速为160km/h,列车平均启动加速度0.71m/s<sup>2</sup>,平均制动减速度0.86m/s<sup>2</sup>;远期高峰小时行车对数15对/h,列车停靠按60s考虑。

室外空气温度取近20年最热月月平均温度,我国主要城市该温度值为19.3°C~30.2°C<sup>[16]</sup>,选定27°C为基准室外空气温度。我国主要城市土壤温度为15.2~25.8°C<sup>[17]</sup>,选定基准土壤温度22°C。

### 1.2 一维通风网络模型

针对市域铁路单洞双线隧道的物理模型,本文采用一维数值模拟的方法对隧道的温度进行研究,一维数值模型的通风网络节点如图1所示。

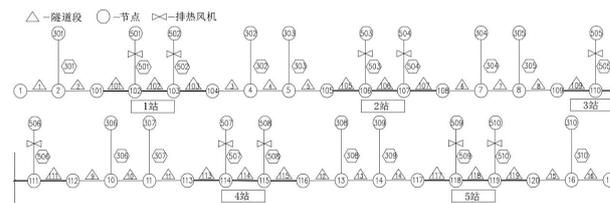


图1 一维通风网络节点模型

Fig.1 Node model of one-dimensional ventilation network

## 2 结果及讨论

### 2.1 基准工况模拟结果

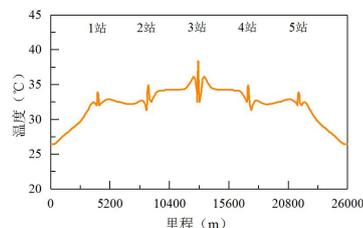


图2 基准工况隧道空气温度沿程分布图

Fig.2 Distribution of tunnel air temperature along the tunnel under reference conditions

基准工况模拟线路运营远期,隧道内空气温度沿程分布如图2所示。可以看出整体温度呈现两边低中间高的趋势,主要是因为双向列车运营时,活

塞风会向隧道中部流动，从而将热量累积到隧道中部，而与洞口相连接的隧道受室外空气温度影响大，温度相对较低。车站处由于列车的停靠散热及列车刹车时热量随活塞风进入轨行区，且隧道壁散热较区间隧道段更小，呈现出车站轨行区明显高于区间隧道段的现象，其中最高温度为38.2℃，出现在3车站处。

### 2.2 隧道最高空气温度及参数敏感性分析

隧道最高空气温度的影响因素主要分为五类：活塞风井、轨排系统、行车组织、隧道参数、温度参数。五个主要部分又细分为以下几个部分：

- (1) 活塞风井：活塞风井长度、活塞风井面积；
- (2) 轨排系统：轨排风量；
- (3) 行车组织：列车速度、列车对数、列车编组；
- (4) 隧道参数：区间隧道长度、车站个数、阻塞比；
- (5) 温度参数：室外空气温度、土壤温度。

确定了研究的设计参数，还需要确定每项参数的变化范围及步长，表1为各设计参数的参照值、变化范围及步长，其中步长步数为3~5个，由变化范围计算得到。

表1 隧道设计的参照值、变动范围及步长

**Table 1 Reference value, range of variation and step size for tunnel design**

	参数	单位	参照值	变化范围	步长
活塞风井	长度	m	30	10~90	20
	面积	m <sup>2</sup>	20	15~30	5
轨排系统	总风量	m <sup>3</sup> /s	100	75~150	25
行车组织	列车速度	km/h	160	100~160	20
	列车对数	对/h	15	12~21	3
	列车编组	节	6	4~8	2
隧道参数	平均站间距	km	4	2~8	2
	车站个数	个	5	3~9	2
	阻塞比	—	0.14	0.1~0.16	0.02
温度参数	土壤温度	℃	22	16~25	3
	室外空气温度	℃	27	19~31	4

单洞双线隧道共进行了43次模拟，对模拟结果

进行敏感性分析，用影响因子来衡量各因素对隧道最高温度的影响程度大小，其定义为<sup>[18]</sup>：

$$IC = \frac{OP - OP_{bc}}{OP_{bc}} / \frac{IP - IP_{bc}}{IP_{bc}} \quad (1)$$

式中：IC为影响因子；OP为模拟输出参数结果，即隧道最高空气温度；OP<sub>bc</sub>为基准模拟输出参数结果；IP为模拟输入参数值；IP<sub>bc</sub>为基准模拟输入参数值。

表2显示了11项参数在其变化范围内对隧道最高温度的平均影响因子。不同的设计参数对隧道最高温度的影响因子不同。影响因子的绝对值大小反映了该项设计参数对相应输出结果的影响程度，值越大，则其影响越大。影响因子为正，则表示随着设计参数值的增大相应的输出值将增大，反之则减小。例如列车速度、列车对数对隧道最高空气温度的影响因子分别为0.277、0.509，表示随着列车速度及对数的增加隧道最高空气温度增加，且列车对数对隧道空气最高温度的影响较速度更大。

表2 平均影响因子

**Table 2 The average influence factors**

	参数	影响因子
活塞风井	长度	0.004
	面积	-0.007
轨排系统	总风量	-0.141
	列车速度	0.277
行车组织	列车对数	0.509
	列车编组	0.235
隧道参数	平均站间距	-0.080
	车站个数	0.040
	阻塞比	-0.016
温度参数	土壤温度	0.018
	室外空气温度	0.527

按隧道最高空气温度的敏感性将影响因素排序，结果为室外空气温度、列车对数、列车速度、列车编组、轨排风量、区间隧道长度、车站个数、土壤温度、阻塞比、活塞风井面积、活塞风井长度。

### 2.3 隧道最高空气温度预测模型

采用多元线性回归方法<sup>[19]</sup>可快速得到隧道空气温度的预测值。影响隧道最高空气温度的设计参数较多，剔除影响较小的活塞风井长度及面积，选取对其影响较大的室外空气温度、列车对数、列车

速度、列车编组、轨排风量、区间隧道长度、车站个数、土壤温度、阻塞比共9项参数作为研究对象。每项设计参数按设计值进行不同的输入,即可产生196608 (4<sup>8</sup>×3<sup>1</sup>)个模拟结果。影响隧道最高空气温度的主要设计参数及不同输入值如表3所示。

表3 影响隧道最高温度的主要设计参数及不同输入值

Table 3 Main Design Parameters and Different Input Values Affecting Maximum Tunnel Temperature

参数	单位	不同输入值				
		1	2	3	4	
轨排系统	轨排风量	m <sup>3</sup> /s	75	100	125	150
	列车速度	km/h	100	120	140	160
行车组织	列车对数	对/h	12	15	18	21
	列车编组	节	4	6	8	—
	平均站间距	km	2	4	6	8
隧道参数	车站个数	个	3	5	7	9
	阻塞比	—	0.1	0.12	0.14	0.16
温度参数	土壤温度	℃	16	19	22	25
	室外空气温度	℃	19	23	27	31

随机选取500组进行了模拟,基于以上500次模拟的数据和结果,通过SPSS软件并采用多元线性回归方法<sup>[19]</sup>建立了市域铁路单洞双线隧道最高温度的预测模型,其综合表达式如式(2)所示。

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \dots \quad (2)$$

式中: Y为隧道最高空气温度,℃; X<sub>1</sub>为轨排风量, m<sup>3</sup>/s; X<sub>2</sub>为列车速度, km/h; X<sub>3</sub>为列车对数, 对/h; X<sub>4</sub>为列车编组, 节; X<sub>5</sub>为区间隧道长度, km; X<sub>6</sub>为车站个数, 个; X<sub>7</sub>为阻塞比; X<sub>8</sub>为土壤温度, ℃; X<sub>9</sub>为空气温度, ℃。β<sub>1</sub>~β<sub>9</sub>为回归系数。

对模拟结果进行拟合,其表达式如(3)所示。该预测模型的拟合度R<sup>2</sup>、F分别为0.964、65.6,其中R<sup>2</sup>介于0~1之间,其值接近1代表拟合效果较好,F值较高代表模型线性关系显著。

$$Y = -8.74317 - 0.07294 X_1 + 0.09354 X_2 + 0.07102 X_3 + 1.22664 X_4 - 0.53889 X_5 - 0.18819 X_6 + 8.88889 X_7 + 0.74826 X_8 + 0.09074 X_9 \quad (3)$$

在α=0.05的显著水平下,变量的显著性检验(t检验)如图3所示。

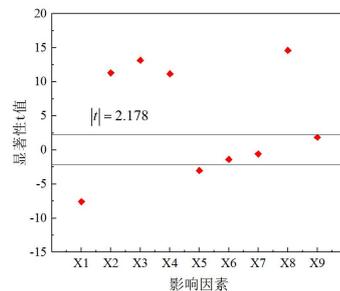


图3 变量显著性 t 检验

Fig.3 Variable significance t-test

当变量为9时,有显著性临界值2.178,在|t|=2.178的临界条件下,X<sub>6</sub>(车站个数)、X<sub>7</sub>(阻塞比)、X<sub>9</sub>(土壤温度)未通过显著性检验。

剔除不显著变量后对模拟结果进行再次拟合,最终拟合方程表达式如(4)所示。

$$Y = -6.54549 - 0.07294 X_1 + 0.09354 X_2 + 0.71019 X_3 + 1.22664 X_4 - 0.53889 X_5 + 0.74826 X_8 \quad (4)$$

该预测模型的拟合度R<sup>2</sup>、F分别为0.953、84.6。当变量为6时,有显著性临界值2.447,在|t|=2.447的临界条件下,自变量均通过显著性检验。

### 2.4 模型对比验证

为了评估该单洞双线隧道最高空气温度预测模型的准确性,采用SPSS软件从196608组参数组合中随机选取了20组进行数值模拟得到隧道最高空气温度,并与单洞双线隧道最高空气温度预测回归模型的预测值进行对比,基于20组随机回归模型预测值与模拟最高空气温度值的对比结果如图4所示。

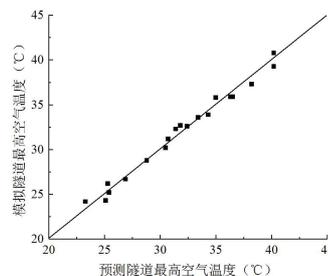


图4 预测值与模拟值的比较

Fig.4 Comparison between predicted and simulated values

市域铁路单洞双线隧道最高空气温度的预测值与模拟隧道最高空气温度值相比总体上较一致,模拟值均匀分布在预测回归线性模型的附近,且预

测值与模拟值的最大偏差为  $0.9^{\circ}\text{C}$ 。该市域铁路单洞双线隧道最高空气温度预测模型能够较好地预测由于轨排风量、列车速度、列车对数、列车编组、区间隧道长度、室外空气温度这 6 项主要设计参数对隧道最高空气温度的影响,从而为单洞双线隧道最高空气温度预测及环控方案设计提供了便捷的工具有。

### 3 结论

本文对市域铁路单洞双线隧道最高空气温度进行了参数敏感性分析,并建立、评价了其最高空气温度预测回归模型,经过分析表明:

(1) 通过对市域铁路单洞双线隧道最高空气温度 11 项影响参数进行敏感性分析,得到对隧道最高空气温度的影响大小排序依次为:室外空气温度、列车对数、列车速度、列车编组、轨排风量、区间隧道长度、车站个数、土壤温度、阻塞比、活塞风井面积、活塞风井长度。

(2) 室外空气温度、列车对数、列车速度、列车编组、轨排风量、区间隧道长度六个参数通过显著性检验并用于市域铁路单洞双线隧道最高温度预测回归模型建立,预测模型为:

$$Y = -6.54549 - 0.07294 X_1 + 0.09354 X_2 + 0.71019 X_3 + 1.22664 X_4 - 0.53889 X_5 + 0.74826 X_8$$

(3) 市域铁路单洞双线最高温度预测回归模型能够较准确地预测由于 6 项设计参数改变的隧道最高空气温度,且最高空气温度的预测值与模拟值最大偏差为  $0.9^{\circ}\text{C}$ 。

### 参考文献:

- [1] 李鹏.国内市域铁路发展现状和规划及典型案例[J].交通与港航,2021,8(5):9-16.
- [2] 池东.某地下单洞双线隧道通风排烟方案研究[J].铁道工程学报,2020,37(4):69-73.
- [3] TB10624-2020,市域(郊)铁路设计规范[S].北京:中国铁道出版社,2021
- [4] 黄俊杰.市域铁路地下隧道通风系统模拟分析[J].建筑热能通风空调,2020,39(6):73-76.
- [5] 赵小龙,陈长坤,陈杰,等.阻塞比对地铁隧道烟气流速及温度分布的影响分析[J].消防科学与技术,2019,38(2):177-180.
- [6] 余涛,雷波.莞惠城际铁路隧道通风系统性能研究[J].铁道建筑,2012,(6):70-73.
- [7] 郝娜.地铁隧道通风系统活塞风井布置探讨[J].城市轨道交通研究,2012,15(8):141-144.
- [8] 苗好,冯炼,袁艳平.某市域线地下隧道通风设置优化研究[J].制冷与空调,2016,30(4):472-475.
- [9] 华正博,雷波.地铁轨行区不同通风模式热环境研究[C].第十四届西南地区暖通空调热动力学术年会论文集,2011:48-51.
- [10] 朱培根,韦炜致,孔维同.列车运行速度对地铁热环境的影响研究[J].建筑热能通风空调,2018,37(11):47-50,58.
- [11] 闫春利,雷波.行车对数和位置对活塞风井通风特性的影响[J].制冷与空调,2018,32(1):1-6.
- [12] 孙克国,刘建正,于铭钊,等.气象要素对寒区隧道径向温度场影响规律研究[J].土木工程学报,2021,54(S1):140-148.
- [13] 方杰.地铁热环境状态的神经网络预测与数值模拟分析[D].北京:北京交通大学,2020.
- [14] 鲁斌,蒋涛,王树刚等.隧道运营期内部空气温度的预测分析[J].隧道建设(中英文),2020,40(4):597-602.
- [15] 范晶,马砺.区间隧道火灾临界风速和温度特性[J].消防科学与技术,2019,38(1):30-34.
- [16] GB/T 51357-2019,城市轨道交通通风空气调节与供暖设计标准[S].北京:中国铁道出版社有限公司,2019.
- [17] 冯学民,蔡德利.土壤温度与气温及纬度和海拔关系的研究[J].土壤学报,2004,(3):489-491.
- [18] 杨柳,侯立强,李红莲等.空调办公建筑能耗预测回归模型[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2015,47(5):707-711.
- [19] 袁志发,宋世德.多元统计分析(第2版)[M].北京:科学出版社,2009.
- [20] 于义良,罗蕴玲,安建业.概率统计与 SPSS 应用[M].西安:西安交通大学出版社,2009.