

文章编号: 1671-6612 (2020) 02-170-05

# 地铁联络线中空气的流动和换热特性分析

杨 准<sup>1</sup> 何 磊<sup>2</sup> 雷 波<sup>1</sup> 邓保顺<sup>2</sup> 郭永桢<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司 西安 710043)

**【摘要】** 采用 SES 软件分析了地铁联络线中空气的流动和换热特性, 讨论了联络线长度、断面积以及距车站距离对联络线中空气的流动和换热特性的影响。结果表明: 联络线中空气的流向呈周期性正负交替变化, 一个周期内两正线通过联络线的空气交换量为 196m<sup>3</sup>; 正线流入联络线的热流量也呈周期性正负交替变化, 一个周期内两正线通过联络线的热交换量为 2579kJ; 三种影响因素中联络线距车站距离的影响最大, 联络线长度的影响次之, 断面积的影响最小。

**【关键词】** 地铁联络线; 空气流动; 热量交换

中图分类号 TU834 文献标识码 B

## Study on the Air Flow and Heat Transfer Characteristics of Subway Connecting Line

Yang Zhun<sup>1</sup> He Lei<sup>2</sup> Lei Bo<sup>1</sup> Deng Baoshun<sup>2</sup> Guo Yongzhen<sup>2</sup>

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

2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd, Xi'an, 710043)

**【Abstract】** In this paper, the Subway Environment Simulation (SES) computer program is used to calculate the air flow and heat transfer characteristics in the subway connecting line. The effects of the length, cross-sectional area and distance from the station of the connecting line on the air flow and heat transfer characteristics of the line are discussed. The results show that: the direction of air flow in the connecting line alternate between positive and negative periodically, and the air exchange volume of the two main lines through the connecting line in a cycle is 196m<sup>3</sup>; the heat fluxes of the two main lines through the connecting line also alternate between positive and negative periodically, and the heat transfer capacity of the two main lines through the connecting line in a cycle is 2579kJ; Among the three influencing factors, the distance between the connecting line and the station has the largest effect, the second is the length of the connecting line, and the smallest influence is the cross-sectional area of the connecting line.

**【Keywords】** Subway connecting line; Air flow; Heat exchange

## 0 引言

联络线是连接两条独立运营线的辅助线路, 目前的地铁隧道通风针对单线设计, 没有考虑联络线对运营线路空气流动和换热特性的影响。掌握联络线中空气的流动和换热特性, 有助于深入分析地铁线路之间通过联络线的空气交换和热交换规律, 同时可以对联络线的工程设计提供参考。

许多学者采用数值模拟、模型实验及现场实测等方法对地铁隧道空气流动和热交换特性进行了研究, 例如: 黄鹏<sup>[1]</sup>应用 CFdesign8.0 对地铁区间隧道和地铁车站内空气的流动特性进行了分析; 胡浩明<sup>[2]</sup>利用 CFD 建立动态仿真模型分析了地铁隧道内气流的温度、速度和压力场动态变化特性; 闫春利<sup>[3]</sup>采用数值模拟的方法讨论了行车对数和风

基金项目: 陕西省重点研发计划 2018SF-393

作者简介: 杨 准 (1996.8-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: yangzhun96@163.com

通讯作者: 何 磊 (1987.8-), 男, 博士, 高级工程师, E-mail: swjtuhl822@126.com

收稿日期: 2019-12-31

井位置对活塞风井通风特性的影响; JYKim 和 KYKim<sup>[4]</sup>建立 1/20 列车和隧道模型, 通过实验得出列车在加速、匀速和减速运行条件下隧道内气流变化规律; 齐江浩<sup>[5]</sup>和刘伟<sup>[6]</sup>分别对西安地铁 2 号线和苏州地铁 2 号线某站上、下行线隧道及活塞风道中的风速和温度进行监测, 分析了隧道与活塞风道内气流的运动特性及其动态变化规律; 王丽慧<sup>[7]</sup>综合运用缩尺模型实验、SES 数值模拟和现场监测三种研究方法分析地铁区间隧道速度场和温度场的特性。目前缺乏对联络线引起的正线间空气交换和热量交换的研究。

本文采用 SES 软件对经联络线连通的两线地铁隧道进行模拟计算, 分析联络线中空气的流动和换热规律, 以及联络线的长度、断面积和距车站距离等因素的影响。

### 1 地铁模型与计算参数

本文以西安地铁 A、B 两条屏蔽门系统线路为例, 建立计算模型。两线各有 9 个有效长度为 120m 的地下岛式站台, 区间隧道长度为 1000m, 隧道断面积为 20m<sup>2</sup>, 线路长度为 11220m, 活塞风井长度为 20m, 活塞风井横截面积为 20m<sup>2</sup>, 联络线均位于两线第三站与第四站间区间隧道, 正常工况列车最大车速均为 80km/h。进出站端分别设有活塞风井, 车站轨行区设置排风量为 60m<sup>3</sup>/s 的轨道排热系统 (TES), 两线行车对数均为 30 对/h, 初始列车发车时间 A 线早于 B 线 95s。以西安最热月平均温度 26.7℃ 为计算温度。

模拟计算的基准工况: 联络线长度为 400m, 断面积为 20m<sup>2</sup>, 联络线距车站距离均为第四站进站端前 200m, 联络线位置如图 1 所示, 图 1 中 A<sub>1</sub>-A<sub>9</sub> 分别表示 A 线第 1~9 车站, B<sub>1</sub>-B<sub>9</sub> 分别表示 B 线第 1~9 车站。

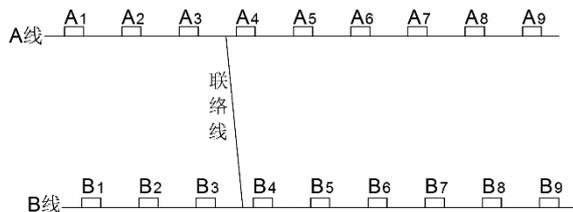


图 1 联络线位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of connecting line location

### 2 联络线中空气的流动和换热特性参数

将联络线作为研究对象, 规定联络线中空气由 A 线流向 B 线为正向, B 线流向 A 线为负向。

#### 2.1 联络线中空气流动特性参数

本文用 CL 代指联络线, 联络线中空气流速  $v_{CL}$  (m/s) 可由 SES 计算得到, 规定空气由 A 线流向 B 线时  $v_{CL}$  为正值, 反之  $v_{CL}$  为负值。

一个周期  $\tau$  (s) 联络线空气净风量  $V_j$  (m<sup>3</sup>)、正向流动风量  $V_+$  (m<sup>3</sup>) 和负向流动风量  $V_-$  (m<sup>3</sup>) 可以按 (1) 计算。

$$\begin{cases} V_j = F \int v_{CL} d\tau, (\text{净风量}) \\ V_+ = F \int v_{CL} d\tau_+, (A \rightarrow B) \\ V_- = F \int v_{CL} d\tau_-, (B \rightarrow A) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $F$  为联络线断面积, m<sup>2</sup>;  $v_{CL}$  为联络线中空气流速, m/s;  $\tau$  为周期时间, s;  $\tau_+$  为周期内空气正向流动时间, s;  $\tau_-$  为周期内空气负向流动时间, s。

#### 2.2 联络线中空气换热特性参数

联络线中空气与 A、B 线换热热流量如图 2 所示。



图 2 热流量计算示意图

Fig.2 Heat flow calculation diagram

从 A 线流入联络线的热流量  $q_A$  (kJ/s) 和从联络线流入 B 线的热流量  $q_B$  (kJ/s) 可分别按 (2)、(3) 计算。根据联络线中空气的流动方向规定: 空气由 A 线流入联络线时  $q_A$  为正值, 联络线流入 A 线时  $q_A$  为负值, 联络线流入 B 线时  $q_B$  为正值, B 线流入联络线时  $q_B$  为负值。

$$q_A = \begin{cases} c\rho Fv_{CL}t_A, (A \rightarrow CL) \\ c\rho Fv_{CL}t_{CL}, (CL \rightarrow A) \end{cases} \quad (2)$$

$$q_B = \begin{cases} c\rho Fv_{CL}t_B, (B \rightarrow CL) \\ c\rho Fv_{CL}t_{CL}, (CL \rightarrow B) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $c$  为空气比热容, kJ/kg·℃;  $\rho$  为空气密度, kg/m<sup>3</sup>;  $F$  为联络线断面积, m<sup>2</sup>;  $v_{CL}$  为联络线

中空气流速, m/s;  $t_A$  为 A 线流入联络线的空气温度, °C;  $t_B$  为 B 线流入联络线的空气温度, °C;  $t_{CL}$  为联络线流入 A 线或者 B 线的空气温度, °C。

一个周期从 A 线流入联络线的净热量  $Q_A$  (kJ) 和从联络线流入 B 线的净热量  $Q_B$  (kJ) 可以按 (4) 计算。

$$Q = \int q d\tau \tag{4}$$

式中:  $q$  为热流量, kJ/s, 包括  $q_A$  和  $q_B$ ;  $\tau$  为周期时间, s。

一个周期联络线隧道壁面与空气的换热量  $Q_{CL}$  (kJ) 可按 (5) 计算。

$$Q_{CL} = Q_A - Q_B \tag{5}$$

### 3 计算结果与分析

SES 软件计算可得  $v_{CL}$ 、 $V_+$ 、 $V_-$ 、 $t_{CL}$ 、 $t_A$  和  $t_B$ 。由公式 (1) 计算可得  $V_j$ , 公式 (2)、(3) 计算可得  $q_A$  和  $q_B$ , 公式 (4)、(5) 计算可得  $Q_A$ 、 $Q_B$  和  $Q_{CL}$ 。本文列车行车对数为 30 对/h, 对应一个周期  $\tau$  时间为 120s。

#### 3.1 联络线的空气流动和换热基本特性

本文从基准工况一个周期内  $v_{CL}$  的变化分析联络线中空气流动基本特性; 从一个周期内  $q_A$  和  $q_B$  的变化分析联络线中空气换热基本特性。

##### 3.1.1 空气流动基本特性

一个周期内  $v_{CL}$  的变化如图 3 所示。

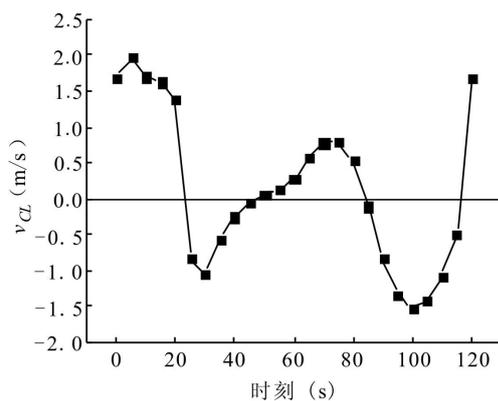


图 3 一个周期内联络线空气流速变化

Fig.3 Change of air velocity in connecting line in a cycle

由图 3 可见, 一个周期内  $v_{CL}$  正负交替变化, 正、负流动各两次, 正向流速最大为 2m/s, 反向流速最大为 1.5m/s。计算得  $V_+$  为 1130m<sup>3</sup>,  $V_-$  为 -934m<sup>3</sup>,  $V_j$  为 A 线流向 B 线 196m<sup>3</sup>。这一现象的

原因是一个周期内两线各有一辆列车经过联络线与正线连接处, 联络线与 A 线、B 线的联络点处各有两次正负压过程。

##### 3.1.2 换热基本特性

一个周期  $q_A$  和  $q_B$  的变化如图 4 所示。

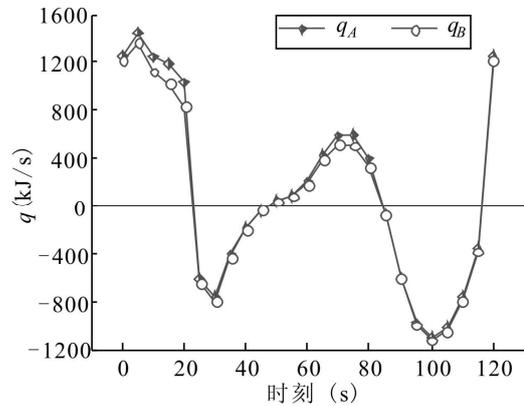


图 4 一个周期内联络线热流量变化

Fig.4 Change of heat flow in connecting line in a cycle

由图 4 可见,  $q_A$ 、 $q_B$  均在一个周期内正负交替变化,  $q_A$  始终大于  $q_B$ , 故空气流经联络线失热, 即联络线吸热。对比图 3 发现热流量变化与空气流速变化同步, 计算得  $Q_A$  为 8925kJ,  $Q_B$  为 2579kJ,  $Q_{CL}$  为 6346kJ。这一现象的原因是正常工况下联络线内无列车通过, 联络线隧道壁温低于正线隧道, 空气流经联络线被冷却。

#### 3.2 不同因素对联络线中空气的流动和换热特性的影响

联络线中空气的流动和换热特性受多个因素的综合影响, 本文主要对联络线长度、断面积以及距车站距离 3 种因素进行分析和讨论, 除需分析的影响因素外, 其他参数与基准工况相同。

将  $V_+$ 、 $V_-$  和  $V_j$  作为联络线中空气流动特性的评价指标, 将  $Q_A$ 、 $Q_B$  和  $Q_{CL}$  作为联络线中空气换热特性的评价指标。规定下文图表  $V_+$  和  $V_-$  均以正值表示, 联络线内净风量 A 线流向 B 线时  $V_j$  为正值, 反之  $V_j$  为负值,  $Q_A$  和  $Q_B$  正负值规定与前文  $q_A$  和  $q_B$  一致。联络线吸热时  $Q_{CL}$  正值, 放热时  $Q_{CL}$  为负值。

##### 3.2.1 联络线长度

为分析联络线长度对联络线中空气的流动和换热特性的影响, 长度分别取 200m、300m、400m 和 500m 进行计算。

不同长度联络线对风量的影响如图 5 所示。

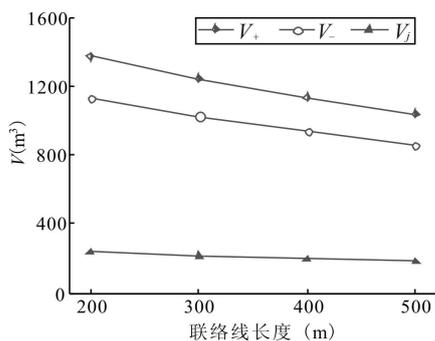


图 5 不同长度联络线对风量的影响

Fig.5 Influence of different lengths of connecting lines on air volume

由图 5 可见,  $V_+$ 、 $V_-$ 和  $V_j$ 均随联络线长度的增加而减小。联络线长度由 200m 增加到 500m,  $V_+$ 减小了 24.3%,  $V_-$ 减小了 24.4%,  $V_j$ 减小了 24.1%。这是由于联络线长度增加, 联络线沿程阻力增加导致风量减小。

不同长度联络线对换热量的影响如图 6 所示。

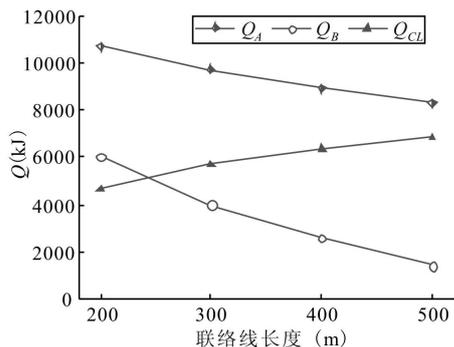


图 6 不同长度联络线对换热量的影响

Fig.6 Influence of different lengths of connecting lines on heat transfer

由图 6 可见,  $Q_A$ 和  $Q_B$ 均随着联络线长度增加而减小,  $Q_B$ 减小幅度更大,  $Q_{CL}$ 随着联络线长度增加而增大。联络线长度由 200m 增加到 500m,  $Q_A$ 减小了 22.7%,  $Q_B$ 减小了 76.5%,  $Q_{CL}$ 增大了 47.6%。 $Q_A$ 减小是联络线风量降低造成,  $Q_{CL}$ 增大是长度增加, 空气与联络线隧道壁面换热面积增大造成, 由公式 (5) 知  $Q_B$ 是  $Q_A$ 与  $Q_{CL}$ 之差, 故  $Q_B$ 降幅大于  $Q_A$ 。

### 3.2.2 联络线断面积

为分析联络线断面积对联络线中空气的流动和换热特性的影响, 断面积分别取 20m<sup>2</sup>、25m<sup>2</sup>、30m<sup>2</sup>和 35m<sup>2</sup>进行计算。

不同断面积联络线对风量的影响如图 7 所示。

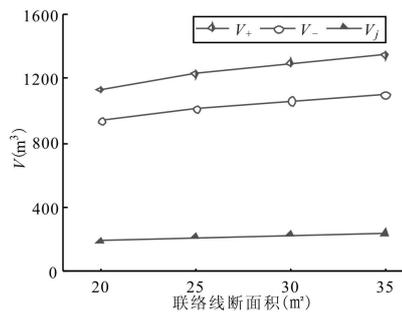


图 7 不同断面积联络线对风量的影响

Fig.7 Influence of different cross-sectional areas of connecting lines on air volume

由图 7 可见,  $V_+$ 、 $V_-$ 和  $V_j$ 均随联络线断面积的增加而增大。联络线断面积由 20m<sup>2</sup>增加到 35m<sup>2</sup>,  $V_+$ 增大了 19.1%,  $V_-$ 增大了 18.2%,  $V_j$ 增大了 23.4%。这是由于联络线断面积增加, 联络线沿程阻力减小导致风量增加。

不同断面积联络线对换热量的影响如图 8 所示。

由图 8 可见,  $Q_A$ 、 $Q_B$ 和  $Q_{CL}$ 均随着联络线断面积增加而增大。联络线断面积由 20m<sup>2</sup>增加到 35m<sup>2</sup>,  $Q_A$ 增大了 21.4%,  $Q_B$ 增大了 30.8%,  $Q_{CL}$ 增大了 17.6%。 $Q_A$ 增大是联络线风量增大造成,  $Q_{CL}$ 增大是断面积增加, 空气与联络线隧道壁面换热面积增大造成,  $Q_A$ 增幅大于  $Q_{CL}$ , 根据公式 (5) 知  $Q_B$ 为  $Q_A$ 与  $Q_{CL}$ 之差, 故  $Q_B$ 随联络线断面积的增加而增大。

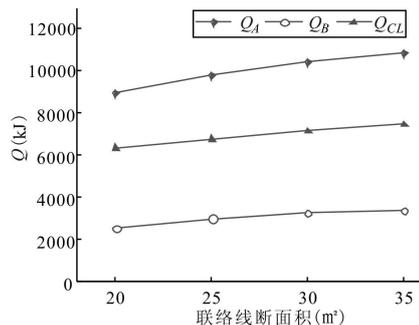


图 8 不同断面积联络线对换热量的影响

Fig.8 Influence of different cross-sectional areas of connecting lines on heat transfer

### 3.2.3 联络线距车站距离

为分析联络线距车站距离对联络线中空气的流动和换热特性的影响, 联络线距车站距离分别取 100m、200m、300m、400m 和 500m 进行计算。

联络线距车站不同距离对风量的影响如图 9

所示。

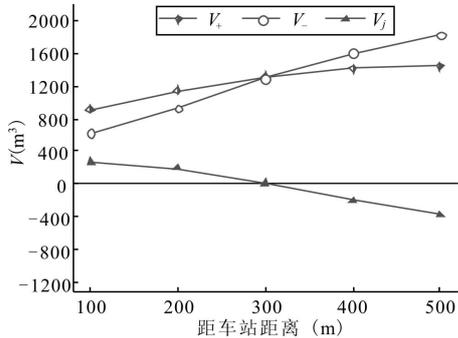


图9 联络线距车站不同距离对风量的影响

Fig.9 Influence of different distances of connecting lines to stations on air volume

由图9可见,随联络线距车站距离的增加, $V_+$ 和 $V_-$ 增加, $V_j$ 先减少后反向增大。联络线距车站距离由100m增加到500m, $V_+$ 增大了59.6%, $V_-$ 增大了190.1%, $V_j$ 减少了233.1%。 $V_+$ 和 $V_-$ 增大主要是由于活塞风压随列车速度的增加而增大,随着联络线远离车站,联络线所处列车速度越来越大,风压越来越大,故联络线风量增大。 $V_j$ 先减少后反向增大是因为联络线位置改变,两线初始列车发车时间和行车对数保持不变,列车通过联络点的时间发生变化,当A线列车通过联络点时,B线列车与联络点的相对位置发生改变,造成 $V_+$ 和 $V_-$ 增幅不同。

联络线距车站不同距离对换热量的影响如图10所示。

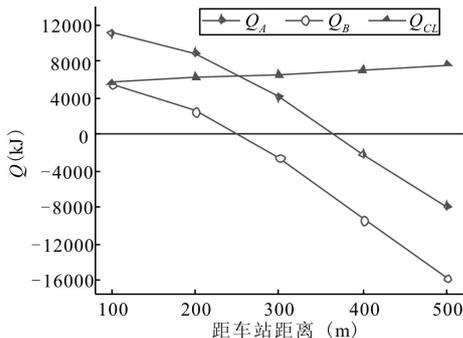


图10 联络线距车站不同距离对换热量的影响

Fig.10 Influence of different distances of connecting lines to stations on heat transfer

由图10可见,随着联络线距车站距离的增加, $Q_A$ 、 $Q_B$ 均先减少后反向增大,与 $V_j$ 的变化情况相似, $Q_{CL}$ 增大。联络线距车站距离由100m增加到500m, $Q_A$ 减少170.8%, $Q_B$ 减少384.4%, $Q_{CL}$ 增大了35.2%。 $Q_{CL}$ 增大是因为单向风量增大,联络线中空气与隧道壁面换热增大,由公式(1)~(4)

可知 $Q_A$ 、 $Q_B$ 与联络线中流动风量和温度相关,所以 $Q_A$ 、 $Q_B$ 与 $V_j$ 的变化相似,均为先减少后反向增大,但因为温度不同, $Q_A$ 、 $Q_B$ 和 $V_j$ 的变化不同步。

通过上述分析可以看出两正线通过联络线的空气交换量和热交换量受联络线距车站距离的影响最大,联络线长度的影响次之,断面积的影响最小。

### 4 结论

本文对线路参数、最大行车速度和行车对数相同的两条地铁线路之间联络线中空气的流动和换热特性进行了分析,探讨了联络线长度、断面积和距车站距离对联络线中空气流动和换热特性的影响,得出以下结论:

(1) 联络线中空气流向呈周期性正反交替变化,基准工况一个周期内两正线通过联络线的空气交换量为 $196m^3$ ;正线流入联络线的热流量也呈周期性正反交替变化,基准工况一个周期内两正线通过联络线的热交换量为 $2579kJ$ ,同时联络线吸热量为 $6346kJ$ 。

(2) 两正线通过联络线的空气交换量和热交换量随联络线长度的增加而减少,随联络线断面积的增加而增大,随联络线距车站距离的增加先减少后增大。三种影响因素中联络线距车站距离的影响最大,联络线长度的影响次之,断面积的影响最小。

### 参考文献:

- [1] 黄鹏.地铁隧道及车站内流动特性的数值模拟研究[D].北京:北京交通大学,2007.
- [2] 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.
- [3] 胡浩明.不同排热模式下地铁隧道内气流分布特征的研究[C].2014 铁路暖通年会,2014:49-56.
- [4] JYKim, KYKim. Experimental and numerical analyses of train-induced unsteady tunnel flow in subway[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006.
- [5] 齐江浩,赵蕾,王君,等.地铁隧道活塞风实测及特征分析[J].铁道科学与工程学报,2016,13(4):741-747.
- [6] 刘伟,周小涵,徐清荣.屏蔽门制式地铁隧道气温测试及规律研究[J].铁道标准设计,2018,62(7):153-159.
- [7] 王丽慧,吴喜平,宋洁,等.地铁区间隧道速度场温度场特性研究[J].制冷学报,2010,31(3):55-62.