

文章编号: 1671-6612 (2022) 04-643-07

# 与地铁结构共建综合管廊通风散热研究

易京凤 邓志辉

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘要】** 为研究与地铁结构共建的综合管廊内部通风散热特性,应用CFD数值模拟软件对综合管廊发热舱室—电缆舱进行了全尺寸的数值模拟。分析了相邻地铁侧不同空气温度、不同对流换热系数条件对电缆舱室内部温度分布的影响。结果表明:地铁侧空气温度的变化对电缆舱室内部温度分布的均匀性以及舱室平均温度影响显著;地铁侧对流换热系数的变化,对电缆舱没有明显影响;通风量的增加,有利于舱室温度的保持以及温度的均匀分布。

**【关键词】** 数值模拟;综合管廊;结构共建;温度分布

中图分类号 TQ028.8 文献标识码 A

## Research on the Ventilation and Heat Dissipation of the Utility Tunnel Built with the Subway Structure

Yi Jingfeng Deng Zhihui

(College of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** In order to study the internal ventilation and heat dissipation characteristics of the utility tunnel built with the subway structure, the full-scale numerical simulation of the heating compartment-cable cabin of the utility tunnel is carried out by using CFD numerical simulation software. The influence of different ventilation volume and different air temperature and different convection heat transfer coefficient at subway side on the temperature distribution in cable cabin is analyzed. The results show that the change of air temperature on the subway side has a significant effect on the uniformity of temperature distribution and average temperature in the cable cabin; the change of convective heat transfer coefficient on the subway side has no obvious effect; the increase of ventilation volume is conducive to the maintenance of cabin temperature and the uniform distribution of internal temperature.

**【Keywords】** numerical simulation; Utility tunnel; the same structure; temperature distribution

作者简介: 易京凤 (1996-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: emmayi69@163.com

通信作者: 邓志辉 (1962-), 男, 硕士, 副教授, E-mail: dzhwk1007@163.com

收稿日期: 2022-02-28

## 0 引言

综合管廊是一种同时容纳多种市政管线(水、电、通信等),可以实现统一建设、统一管理的地下空间构筑物<sup>[1]</sup>。随着城市的发展,空间需求增大,对地下空间的合理开发与应用成为趋势,并且国家还推出相关政策文件,加速了综合管廊在各大城市的规划与修建<sup>[2]</sup>。又因为地下空间开发的不可逆性,以及地下空间规划的集约性要求,于是东部的一些大城市开始把以轨道交通为枢纽建设的地下综合

体作为重点<sup>[3]</sup>。通过对城市核心区地下空间的特点、地下综合体的意义以及地下综合体实现的分析,程斌<sup>[4]</sup>指出将综合管廊纳入地下综合体的建设之中,于地下空间的规划具有重要意义;而陈曦寒<sup>[5]</sup>、林永清<sup>[6]</sup>、盛棋楸<sup>[7]</sup>等人则结合具体工程实例,讨论比较了综合管廊与轨道交通的多种结合方式,并建议在地铁区间位置考虑采用结构共建的大型盾构断面。以上,只是关于设计以及结构上的探讨,并未讨论结构共建后的相互传热影响。而综合管廊

与地铁同属地下密闭空间，内部空气流动性差，且电缆舱存在缆线发热现象，为保障缆线的正常运行以及检修人员的人身安全，综合管廊内需设置通风系统用作余热排除以及人员的新风补给<sup>[8]</sup>。

因此本文采用 Fluent 软件，对与地铁结构共建的综合管廊高压电缆舱室进行数值模拟，对在不同通风量、地铁一侧不同空气温度以及不同对流换热系数条件下的电缆舱室内部温度分布以及排热效率进行比较分析，为综合管廊与地铁结构共建时的通风设计提供参考。

## 1 高压电缆舱数值模拟

### 1.1 物理模型

以深圳某沿地铁线路共同建设综合管廊电缆舱室为依托，如图 1 所示。参考相关专利<sup>[9]</sup>，研究其电缆舱室与地铁区间结构共断面，位于顶部位置，默认电缆舱室断面形式保持与原型一致。

电缆舱室具体的结构参数如下：内径 6m，壁厚 350mm，材料为钢筋混凝土；通风区间长度定为 200m，风口尺寸为 1.5m×1.5m，位于其中一侧

检修通道顶部；电缆呈品字型排布，共计纳入 10 回高压电缆，电缆具体参数见表 1；电缆支架长 600mm，除一二层电缆层间距为 0.6m 外，其余皆为 0.5m，底部支架距离底板距离为 0.2m；两侧检修通道中心位置距离舱室中心面垂直距离为 1m；底板厚度为 250mm，钢筋混凝土结构。

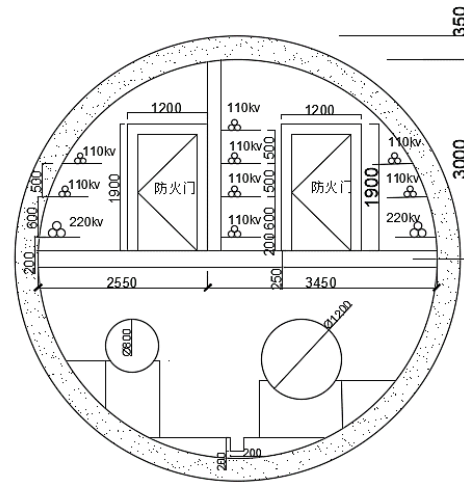


图 1 管廊截面图

Fig.1 Section drawing of the utility tunnel

表 1 管廊内含管线参数

Table 1 Pipeline parameters

舱室名称	管线类别	管线材质	外径 mm	90°C时，铜的电阻率 Ω·mm <sup>2</sup> /m	电缆载流量 A	电缆线芯最高工作温度 °C
电力舱 内径 6m 长 200m	110kV*8	铜芯-XPLE	93.5	0.0226	700	90
	220kV*2	铜芯-XPLE	122.6	0.0226	1000	90

### 1.2 数学模型

流体流动遵循三大基本守恒定律<sup>[10]</sup>：

(1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中： $\rho$  为气体密度； $t$  为时间； $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的速度分量。

(2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

式中： $\rho$  为气体密度； $t$  为时间； $x_i$ 、 $x_j$  为  $i$ 、 $j$  方向上的坐标； $u_i$ 、 $u_j$  分别是流体速度在  $i$ 、 $j$  方向上的分量； $p$  为静压； $\tau_{ij}$  为切应力矢量； $g_i$  为  $i$  方向的重力分量； $F_i$  为由阻力、其他项引起的其他能

源项。

(3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T \quad (3)$$

式中： $t$  为时间； $T$  为温度； $k$  为流体传热系数； $S_T$  为流体的内热源以及其他热源项； $\rho$  为气体密度； $c_p$  为流体的定压比热。

### 1.3 模型简化

采用 DesignMolde 建立模型，为加快计算速度，并未建立围护结构以及内部管线的实体结构，通过边界条件的设定以及相应材料物性的确立来考虑其实体结构的相关影响。将 8 回 110kV 电缆、2 回 220kV 高压电缆分别简化为直径 220mm、260mm，200m 长的圆柱，共计 10 根。进、排风口

尺寸为 1.5m×1.5m, 位于两端。此外作如下假设:

(1) 电缆舱围护结构组成材料为各向同性的均匀介质, 且物性参数都保持不变设为常数;

(2) 电缆运行处于稳定状态, 发热量保持恒定;

(3) 土壤温度沿轴向不发生变化。

简化后的模型如图 2 所示。

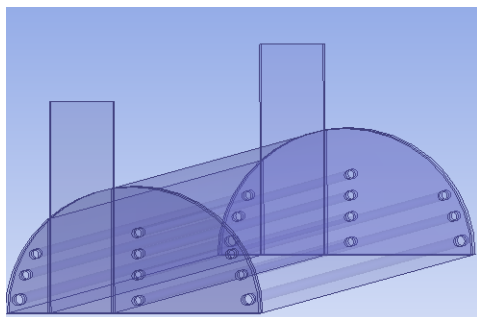


图 2 简化后模型图

Fig.2 A simplified model

#### 1.4 边界条件及求解设置

本文采用 Fluent19.2 进行模拟计算。进风温度为深圳地区最热月月平均温度<sup>[11]</sup>, 28.85℃, 一个大气压; 将 110kV 和 220kV 电缆表面设为恒热流

边界条件, 热流值依据电缆母线发热量计算法进行计算, 分别为 68.7W/m<sup>2</sup> 和 93.43W/m<sup>2</sup>, 材料为交联聚乙烯; 上壁面设为无滑移、恒壁温边界条件, 壁面温度考虑多年运行热量堆积情况设置为 30.5℃ (恒温层温度 24℃)<sup>[12]</sup>, 材料为钢筋混凝土, 壁厚 350mm; 共结构底板处设为第三类边界条件, 具体参数见表 2; 进风口设为 Velocity-inlet 边界, 进风量依据排热量计算条件给定, 见表 2, 通风口处湍流边界条件为 K and Epsilon, 计算公式见式 (4)、(5); 排风口设为 Outflow 边界; 模型两端设为绝热边界条件<sup>[13,14]</sup>。相关材料物性参数见表 3。湍流模型设置为 Reliable k-epsilon 模型, Standard 壁面函数, 考虑浮升力影响; 压力与速度离散方法为 Simplec, 除压力为标准外格式外, 其余皆为二阶迎风格式, 收敛标准为 10<sup>-4</sup>、10<sup>-7</sup>。

$$k = \frac{3}{2} (uI)^2 \quad (4)$$

$$\varepsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (5)$$

式中,  $u$  为断面平均速度;  $I$  为湍流强度;  $l$  为湍流尺度;  $C_{\mu}$  为经验常数, 0.09。

表 2 边界条件

Table 2 boundary conditions

底板边界条件		进风口风速条件			
地铁侧空气温度/℃	30、33、35、38、40	计算条件	0.6Q	0.8Q	Q
地铁侧对流换热系数 W/m <sup>2</sup> ·K	6、8、10、12	入口风速 m/s	2.34	3.12	3.9

注: (1) 地铁侧空气温度参考文献[15]给定;

(2) 对流换热系数是与地铁活塞风速相关的值, 参考多篇文献<sup>[12,16,17]</sup>, 选择具有代表性的值;

(3) Q代表内部总的电缆散热量, 以余热计算风量按照进出口温差为 10℃。

表 3 各种材料主要物性参数

Table 3 The main physical properties of various materials

材料名称	密度 kg/m <sup>3</sup>	导热系数 W/m·K	比热 J/kg·K
交联聚乙烯 (XLPE)	1200	0.32	2300
钢筋混凝土	2500	1.74	920
空气	1.225	0.024	1.006

#### 1.5 网格无关性验证

以不同网格尺寸对同一模型进行划分, 网格数分别为: 160 万、221 万、317 万、400 万以及 600 万, 以 600 万网格计算结果为标准, 对比不同网格数模型在相同计算条件下, 检修通道中心处高度

1.8m 位置温度与基准温度的相对误差, 结果如图 3 所示。

从图 3 可知当网格数大于 317 万时, 相对于基准网格, 计算结果相对误差已小于 0.2%, 故之后的计算模型皆以 317 万网格模型尺寸划分。

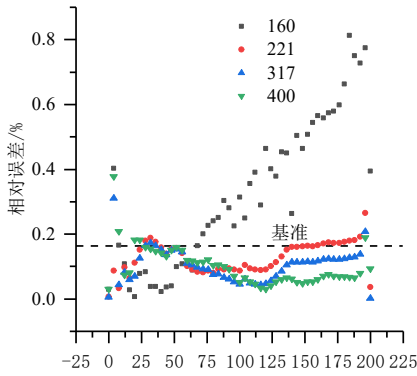


图3 网格无关性验证图

Fig.3 Grid independence verification diagram

## 2 结果分析

### 2.1 地铁侧对流换热系数的影响

在进风风速为 2.34m/s、3.12m/s、3.9m/s，隧道侧空气温度为 311K（38℃）工况条件下，改变地铁侧的对流换热系数，研究其对地铁与管廊之间相互传热的影响以及管廊内的温度分布特性。

#### (1) 共用底板结构传热分析

相较于地铁运行时的发热量<sup>[18]</sup>，综合管廊的发热量较少，所以结构共用处的传热量对综合管廊内部的热环境影响较大，故基于综合管廊总的散热量探究传热量比例，如图 4 所示，由图可知，相互传热量占缆线总散热量的比例在 3.98%~11.35%之间，与对流换热系数呈正相关关系，因为对流换热系数的增大，可以减小换热热阻，使热量传递变得容易，同样随着入口风速的增加，传热量占比也是在不断增长，最大值可达 11.35%，可能引起管廊排风温度近 1℃温升，原因是随着入口风速的增长，通风量增大引起管廊一侧对流换热系数的增加，且缆线散热量不变，舱室内部空气平均温度降低，底板结构两侧的温差增大，共同导致传热量增加。并且从图 3 可以看出风速从 3.12m/s 变到 3.9m/s 相比于风速从 2.34m/s 变到 3.12m/s，期间传热量占比的增长变缓，说明当进口风速大于某一临界值时，进风风速对结构共用处相互传热的影响变小；同样随着地铁侧对流换热系数的不断增大，其传热量比例变化值也在逐渐减小，这是因为共用结构处传热量的大小是由壁面两侧的对流换热系数以及结构本身特性共同决定的。

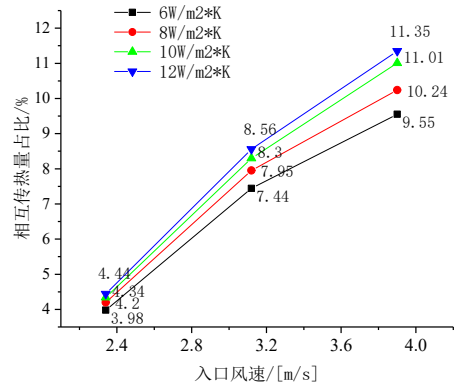


图4 传热量占比随地铁侧对流换热系数变化图

Fig.4 The proportion of heat transfer changes with the Convective heat transfer coefficient

#### (2) 温度分布特性

① 以对流换热系数 8W/m²·K，进风风速 3.12m/s 为例，取一侧检修通道中心 X=4m 位置，做纵向断面温度分布云图，如图 5 所示。由图 5 可以看出随着纵向距离的不断增大，空气温度逐渐升高，这是因为在空气流向排风口的过程中，不断与缆线进行换热，使得温度升高，同时在空气密度差导致的浮升力影响下，热空气向上部位置偏移，又因为上壁面的冷却作用，导致近壁面空气温度降低，于是形成了如此的空气温度分布。温度分布曲线基本呈抛物线型，但是受底板附近处地铁侧传热影响，导致温度分布曲线发生逆向变化。

② 以对流换热系数 6W/m²·K、进风风速 2.34m/s 为例，分析管廊横向断面温度分布，如图 6 所示。从图 6 可以发现截面右侧通道高温区域覆盖面积大于左侧通道，这是因为左侧通道与进、风口处在同一横向位置处，空气流动效果较好；因为热空气的一个浮升作用，舱室上部区域温度较高，但又因为顶部壁面的冷却作用，使得顶部位置近壁面处空气温度有所降低，截面上出现明显的温度分层现象，且主要在舱室后半段比较明显，因为前半段舱室整体温度保持在较低水平，缆线散热对通道温度分布影响较小。同时图 5 进一步说明舱室整体温度随着纵向长度的增加而增大。

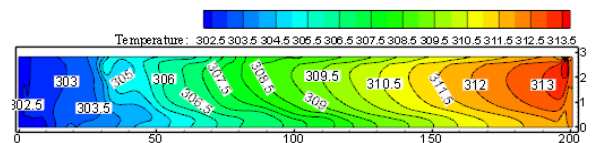


图5 检修通道中心面 (X=4m) 温度分布云图

Fig.5 Cloud map of temperature distribution in the center surface of the access channel (X=4m)

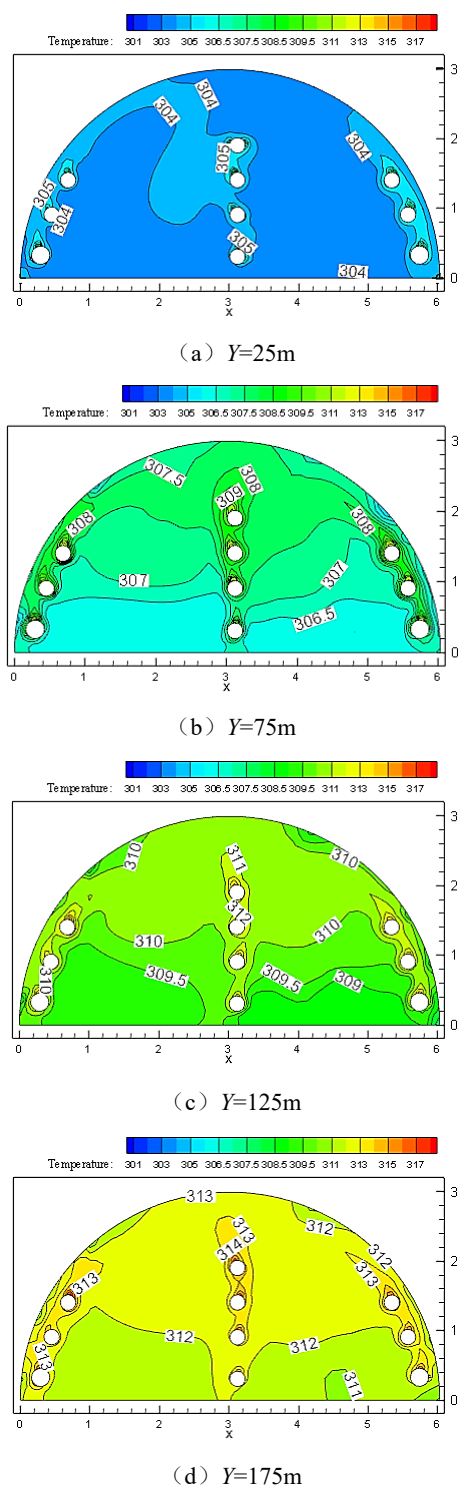


图 6 横向温度分布云图

Fig.6 Cloud map of lateral temperature distribution

③温度分布均匀性分析

不仅仅是电缆运行对温度分布的均匀性存在要求, 而且为保障检修人员的人身安全, 管廊内部温度分布应该保持一定的均匀性, 而地铁侧对流换

热系数的变化, 引起散入综合管廊内部的热量不断变化, 通风散热量不断变化, 故探究其对舱室内部温度分布均匀性的影响。现就  $Y=5m$  到  $Y=195m$  范围, 沿纵向方向, 每间隔  $5m$  截取断面, 共计 39 个断面, 计算断面平均温度标准差, 作图 7; 其值越小, 说明舱室内部温度分布越均匀。由图 7 可知, 当进风风速较小时, 地铁侧对流换热系数的变化对舱室内部空气温度分布均匀性的影响不显著, 这是因为在小风速条件下, 舱室整体温度较高, 传热温差小, 通过共用结构处散入的热量少, 故对整个舱室内部的温度分布影响较小; 反之, 在较大风速条件下, 不仅舱室内部共用结构处对流换热系数增大, 而且舱室内部空气温度有所降低, 传热温差大, 若再增大地铁侧的对流换热系数, 则会进一步增大共用结构处的传热量, 进而影响舱室内部的温度分布均匀性。总的来说, 舱室内部温度分布均匀性受通风影响较大, 受地铁侧对流换热系数的影响不太明显。

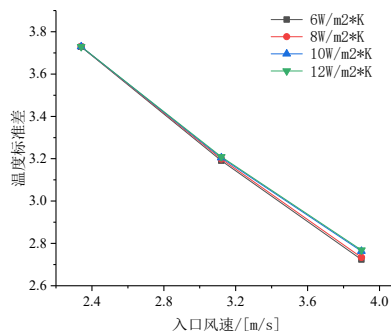


图 7 断面平均温度标准差

Fig.7 Standard deviation of the average temperature of the cross-section

2.2 地铁侧空气温度变化的影响

在进风风速为  $2.34m/s$ 、 $3.12m/s$ 、 $3.9m/s$ , 地铁侧的对流换热系数为  $6W/m^2 \cdot K$  工况条件下, 改变地铁侧空气温度, 研究其相互传热的影响以及对管廊内温度分布的影响。

记传热量占比为共结构底板处传热量与电缆舱缆线总散热量的百分比, 其中负值表示传入地铁区间, 正值表示传入电缆舱, 如图 8 所示。从图 8 可以看出随着地铁侧空气温度的增长, 其通过共用结构处的传热方向以及传热量是不断变化的, 且由于进风风速即通风量的不同, 传热方向发生改变的铁侧空气温度不同, 这是因为共用结构处电缆舱室侧的温度会随着通风量的大小发生相应地变化。

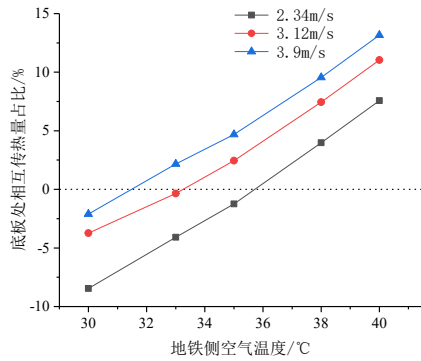


图 8 传热量占比随地铁侧空气温度的变化

Fig.8 The proportion of heat transfer changes with the air temperature on the subway side

随着地铁一侧空气温度的不断变化, 电缆舱室内部的温度以及排风温度也逐渐变化, 如图 9、10 所示; 受共用结构处的传热影响, 排风平均温度不断升高, 且舱室内部的平均温度也逐渐升高。从图 10 可知, 要满足排风温度小于 313K, 至少需要按照缆线散热量的 80% 计算通风量, 且在地铁侧空气温度高于 311K 时, 应当以缆线全热计算风量运行。

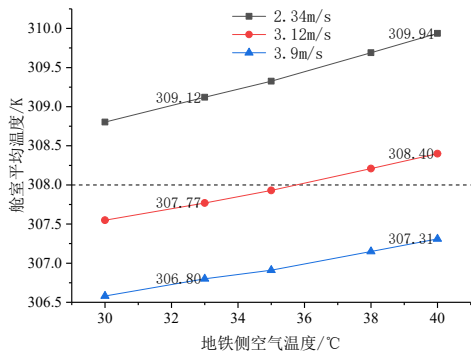


图 9 舱室平均温度图

Fig.9 Average cabin temperature graph

从 Y=5m 到 Y=195m 间隔 5m 截取 39 个断面, 计算这 39 个断面平均温度标准差, 结果如图 11 所示, 其值随着地铁侧空气温度的升高而增大, 且在小风量条件下, 变化越明显, 这进一步说明地铁侧空气温度对电缆舱室内部的温度分布有较大影响。

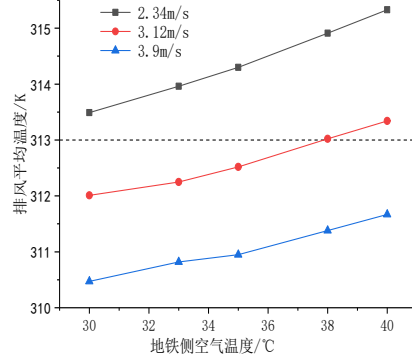


图 10 排风平均温度图

Fig.10 Exhaust air average temperature graph

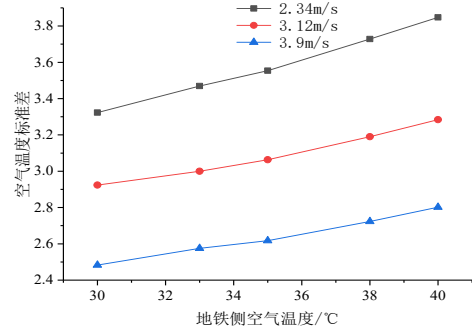


图 11 空气温度标准差随地铁侧空气温度变化图

Fig.11 The standard deviation of air temperature varies with the air temperature on the subway side

### 2.3 影响因素显著性分析

利用 SPSS 24.0, 分析进风风速、地铁侧对流换热系数、地铁侧空气温度与电缆舱排风平均温度之间的显著性关系, 结果如表 4 所示。

表 4 多因素方差分析结果

Table 4 Multivariate ANOVA results

	III类平方和	自由度	均方	F	P (显著性)
进风风速	51.960	2	25.980	2470.834	0.000**
地铁侧温度	4.508	4	1.127	107.182	0.000**
对流换热系数	0.017	3	0.006	0.523	0.672
残差	0.179	17	0.011		

注:  $R^2=0.997$ ;  $*p<0.05$ ;  $**p<0.01$

从表 4 可知, 进风风速的变化、共用结构处地铁侧空气温度的变化, 对管廊的排风平均温度的影响极为显著, 而共用结构处地铁侧对流换热系数的

变化, 相对于另外两个变量, 其对管廊排风平均温度的影响不显著。故当综合管廊电缆舱室与地铁区间结构共建时, 应当更多关注地铁区间的空气温度,

当地铁区间空气温度较高时, 建议增加电缆舱室通风量, 以满足电缆舱室的排风要求。

### 3 结论与建议

(1) 当综合管廊电缆舱室与地铁区间结构共建时, 地铁区间的空气温度对电缆舱室排风温度影响显著, 在舱室风量计算时可附加 10%左右的余热量;

(2) 可通过增加通风量, 改善电缆舱室内部空气温度分布的均匀性;

(3) 综合管廊电缆舱与地铁区间共用结构时, 电缆舱室保持通风的情况下, 对地铁区间热环境的影响较小, 故从通风角度来说, 两者结构共建是可行的。

#### 参考文献:

- [1] 刘胡州. 城市综合管廊通风系统设计分析研究[J]. 建筑节能通风空调, 2017, 36(5): 86-88.
- [2] 姜金延. 综合管廊研究综述[J]. 城市道桥与防洪, 2020, (6): 278-282.
- [3] 程光华, 王睿. 国内城市地下空间开发利用现状与发展趋势[J]. 地学前缘, 2019, 26(3): 39-47.
- [4] 程斌. 结合地铁区间建设地下综合体[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(S1): 1344-1347.
- [5] 陈曦寒, 韦梓春. 基于可持续发展的城市综合管廊与轨道交通协同建设--以南通市为例[C]. 2017 城市发展与规划论文集, 2017.
- [6] 林永清. 结合地铁建设同步实施地下综合管廊的研究[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 10(21): 73-78.
- [7] 盛棋楸. 综合管廊与轨道交通一体化设计研究[J]. 中外建筑, 2018(6): 154-156.
- [8] 王恒栋, 薛伟辰. 综合管廊工程理论与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [9] 阮艳妹, 史海欧, 王建, 等. 地铁与城市地下综合管廊共建的施工方法及建筑结构[P]. 中国: 201710249415.6, 2017-04-17.
- [10] 李粤川, 邓志辉. 地下综合管廊运行优化研究[J]. 制冷与空调, 2020, 34(5): 549-553.
- [11] 李思茹, 袁艳平, 曹晓玲, 等. 综合管廊埋管换热系统传热特性的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2021, 42(5): 24-31.
- [12] 王丽慧, 张娜, 杜志萍, 等. 地铁隧道围岩土体蓄放热特性各影响因素显著性研究[J]. 制冷学报, 2019, 4(40): 135-143.
- [13] 邱灏, 邓志辉, 袁艳平, 等. 通风形式对综合管廊内空气温度影响的研究[J]. 制冷与空调, 2018, 32(6): 668-672.
- [14] 胡康. 地下电力电缆隧道通风系统的模拟计算[J]. 电网设计, 2020, (6): 55-60.
- [15] GB 50157-2013, 地铁设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [16] 胡增辉, 李晓昭. 隧道围岩温度场分布的数值分析及预测[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 867-872.
- [17] 王维, 王丽慧. 新建地铁隧道内活塞风温度变化理论分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 4(10): 962-967.
- [18] 张君瑛. 地铁列车运行内热源作用的区间热环境分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(6): 1312-1317.