文章编号：1008－8857(2025)03－0134－10 **DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2025.03.002

空调末端分布对长直隧道内空气温度稳定性的影响

李 俊[1]，邹志军[1]，李肖涵[1]，汤 毅[2]，朱杰克[2]，朱学锦[2]，朱 喆[3]
（1. 上海理工大学 环境与建筑学院，上海 200093；2. 上海市安装工程集团有限公司，上海 200080；
3. 上海建筑设计研究院有限公司，上海 200041）

摘 要：某波荡器设备布置在长 400 m 的隧道内，因此需对隧道内空气温度进行严格控制。由于隧道内设备散热量大且空间相对狭小，空调系统采用顶端送风(多送风终端)和两端集中回风的定风量全空气系统，并采用高精度控制以及大风量小温差送风。为了达到隧道内空气温度控制精度的设计要求，采用计算流体力学(CFD)数值模拟方法，比较送风口数量和风量相等情况下 3 种不同空调末端分布方案对隧道内空气温度控制精度的影响，其中：方案 1 为送风口均匀分布、等间距 3.35 m；方案 2 为两端送风口间距较大，且随着送风管道向隧道中间延伸送风口间距逐渐变小；方案 3 的送风口分布模式与方案 2 的相反，随着送风管道向隧道中间延伸送风口间距逐渐加大。结果显示，方案 3 能够满足隧道内空气温度梯度要求：隧道内空气平均温度为 26.1 ℃，轴向温度梯度小于 0.1 ℃/(5 m)。本研究可为同类型长直风管送风的隧道内空气温度高精度调控提供工程应用参考。

关键词：长直隧道通风；气流组织；计算流体力学；模拟；大科学装置；温度梯度
中图分类号：TU831 **文献标志码**：A

Impact of air-conditioning terminal distribution on air temperature stability in long straight tunnels

LI Jun[1], ZOU Zhijun[1], LI Xiaohan[1], TANG Yi[2], ZHU Jieke[2], ZHU Xuejin[2], ZHU Zhe[3]
(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Installation Engineering Group Co., Ltd., Shanghai 200080, China; 3. Shanghai Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Shanghai 200041, China)

Abstract: A wave oscillator device is installed in a 400-meter-long tunnel, necessitating stringent control of the tunnel's air temperature. Due to the high heat dissipation of equipment and the confined space within the tunnel, a constant-air-volume (CAV) all-air system with ceiling supply

收稿日期：2024－07－22
基金项目：上海市“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(21DZ1203103)
第一作者：李 俊(1997—)，男，硕士研究生。研究方向：建筑通风。E-mail：l15655508430@163.com
通信作者：邹志军(1976—)，男，讲师。研究方向：建筑通风。E-mail：zouz@163.com

(multiple supply terminals) and centralized return air at both ends is adopted. The system employs high-precision control and large airflow with small temperature difference supply to meet the design requirements for temperature control accuracy. Computational fluid dynamics (CFD) simulations are conducted to compare the effects of three different air-conditioning terminal distribution schemes— each with equal number of supply outlets and airflow volume— on temperature control precision within the tunnel. Scheme 1 features uniformly distributed outlets spaced every 3.35 m; Scheme 2 places outlets at wider intervals near both ends, gradually decreasing toward the tunnel center; Scheme 3 reverses Scheme 2's pattern, with outlet spacing increasing toward the tunnel center. Results indicate that Scheme 3 best satisfies the tunnel's temperature gradient criteria, achieving an average air temperature of 26.1 ℃ and an axial temperature gradient below 0.1 ℃/(5 m). This research provides an engineering reference for high-precision temperature regulation in similar long straight tunnels with ducted air supply.

Keywords: long straight tunnel ventilation; airflow organization; computational fluid dynamics; simulation; large scientific facility; temperature gradient

同步辐射光源等大科学装置对现代科学发展起到重要的作用，并为化学实验、材料科学、生命科学、环境科学等提供了先进的实验平台[1−2]。温度变化可能导致精密部件发生微小形变进而影响实验结果，因此同步辐射光源内自由电子激光放大器对周边空气温度波动有严格要求[3]。此类大科学装置通常布置在隧道内，不仅可以提高实验的安全性，也可以降低外部环境温度波动对设备周围空气温度的影响。隧道内安装有精密度高、数量多的各种用电设备，且各设备在运行过程中散热量较大，造成的热量聚集会对隧道内设备产生一定的危害。因此，通过空调系统及时将产生的热量排出隧道，以保持隧道内空气温度的恒定至关重要[4]。空调系统末端空间分布直接影响隧道内气流组织形式以及空气温度分布[5]，因此对隧道内空气温度分布和温差控制的关键在于空调系统末端送风口分布的设计。

在空调系统设计阶段，研究气流组织形式和温度分布时常将计算流体力学(CFD)数值模拟方法作为论证和优化设计方案的重要手段。该方法在隧道空调领域有广泛的应用。例如 Tao 等[6]、谢海英等[7]、Zhang 等[8]、Song 等[9]均证明了该方法在气流组织形式模拟中的可行性，并通过研究不同气流组织形式对温度场及速度场的影响来判断隧道内空气温度分布的均匀性。连之伟等[10]通过实验探究了不同送风口相对位置对室内气流分布的影响。结果表明，布置送风口时应考虑建筑内部结构，且送风口靠近阻挡物会使室内气流的不均匀性加剧。Peng 等[11] 发现，在隧道内采用横向通风时随着送风口数量的增加，隧道内空气温度均匀性显著提高，空气温度最高降幅为 67%。Dang 等[12]针对超长隧道通风所采用的喷射风机的最佳布局进行了研究。结果表明，随着风机高度的升高，风机分布位置越靠近送风口前端，隧道内气流组织形式越合理。Liu 等[13]对送风口最佳布置位置进行了研究，发现当送风口位于上端时能够有效排出室内热量，且越远离送风口空气温度越高。这些研究表明送风口的空间分布对空气温度分布及其均匀性有重要影响。

隧道空调系统送风温度受内外扰量(热源参数、渗透风等)、控制系统的灵敏度等影响，极易造成空气在输送过程中偏离原设定温度，从而使工程达不到预期的效果[12]。为满足隧道内空气温度及温度梯度的高精度要求，设计时采用大风量小温差的全空气系统空调方式[14]，将送风均匀分散送至隧道各处，并从隧道两端回风。为满足分散送风的要求，送风管道的设计十分关

键。主风管的尺寸对送风均匀性的影响较小，这有利于减小隧道内空气温度波动[15]。通常针对狭长隧道通风一般采用贯通流的形式[16]，即采用轴流风机以形成贯穿隧道的自然通风流场。关于送风口分布对隧道内空气温度的影响，以及如何实现高精度恒温控制方面的研究较少。与常规管道送风相比，长距离管道送风的平衡调试更加困难[17]。通过改变送风口风量难以使空气温度分布变得均匀，因此常需要改变送风口空间分布。本研究通过 CFD 模拟，比较不同送风口分布对隧道内空气温度均匀性等的影响，为长直隧道内温度高精度控制的空调工程设计提供依据。

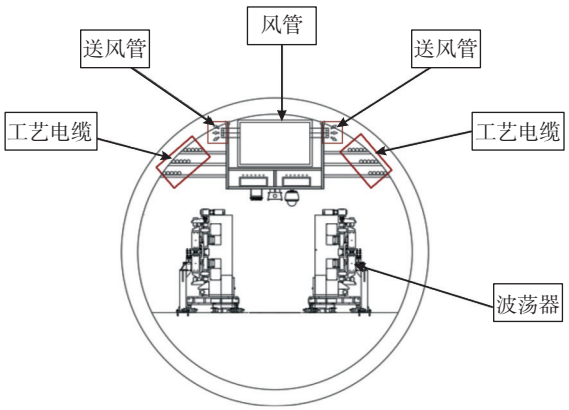


图 1 隧道断面图

Fig. 1 Tunnel cross-section diagram

1 研究方法

1.1 隧道基本情况

上海某大科学装置隧道位于地下 33 m，隧道总长 400 m，内径为 5.9 m，外径为 6.6 m。隧道内空气设计温度为 25 ～ 30 ℃，控制精度要求为±0.1 ℃，温度梯度波动小于 0.1 ℃/(5 m)。隧道断面图如图 1 所示。隧道采用定风量全空气系统，并采用一定间距分布的风口在隧道顶部侧送风、隧道两侧集中回风的气流组织形式。通风管道位于隧道中间正上方。隧道内共有 80 个散热设备，每个设备的散热量均设置为相同，其中 10% 的热量散发到隧道内，并由空调系统带走热量。

隧道空调通风系统原理图如图 2 所示，其中：隧道内 75 ～ 345 m 区间为恒温控制段；隧道顶部水平送风口集中在恒温控制段(共 160 个送风口，总风量 82 700 m^3/h)；隧道两端(0 ～ 75 m、345 ～ 400 m)无送风口，通过回风进行温度调节。空调通风系统主要负责移除工艺电缆发热量。由于工艺电缆发热量主要取决于其电流荷载，在设计阶段按此估算工艺电缆发热量。隧道内各部件发热量如表 1 所示。

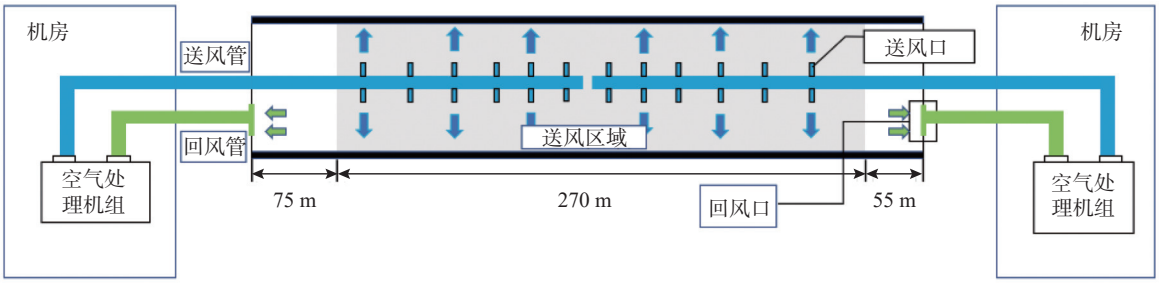


图 2 隧道空调通风系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of tunnel air conditioning airflow system

1.2 湍流模型

采用数值模拟方法对隧道内气流组织形式进行研究。空气流动和换热连续性方程、动量方程、能量方程，以及描述壁面的导热微分方程可以统一写成式(1)的通用方程[18]，即

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho u\varphi)=\mathrm{div}(\Gamma\cdot\mathrm{grad}\varphi)+S \quad (1)$$

式中：ρ为流体密度，kg/m^3；t为时间，s；φ为通用变量，代表求解变量；u为速度，m/s；Γ为广义扩散系数；S为广义源项；$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t}$为瞬态项；$\mathrm{div}(\rho u\varphi)$为对流项；$\mathrm{div}(\Gamma\cdot\mathrm{grad}\varphi)$为扩散项。

表 1　隧道内各部件发热量

Tab. 1　Heat generation of various components inside the tunnel

分段区间/m	工艺电缆发热量/kW	设备发热量/kW
0 ～ 75	35.2	1.30
75 ～ 209	26.5	8.05
209 ～ 345	26.5	8.05
345 ～ 400	25.1	0.87

采用有限体积法对上述控制方程进行离散求解。对于湍流流动的模拟，本研究采用雷诺时均方法中的标准 k–ε 模型进行处理。该模型具有较低的计算成本[19]，目前被广泛应用于工程中[20–21]。

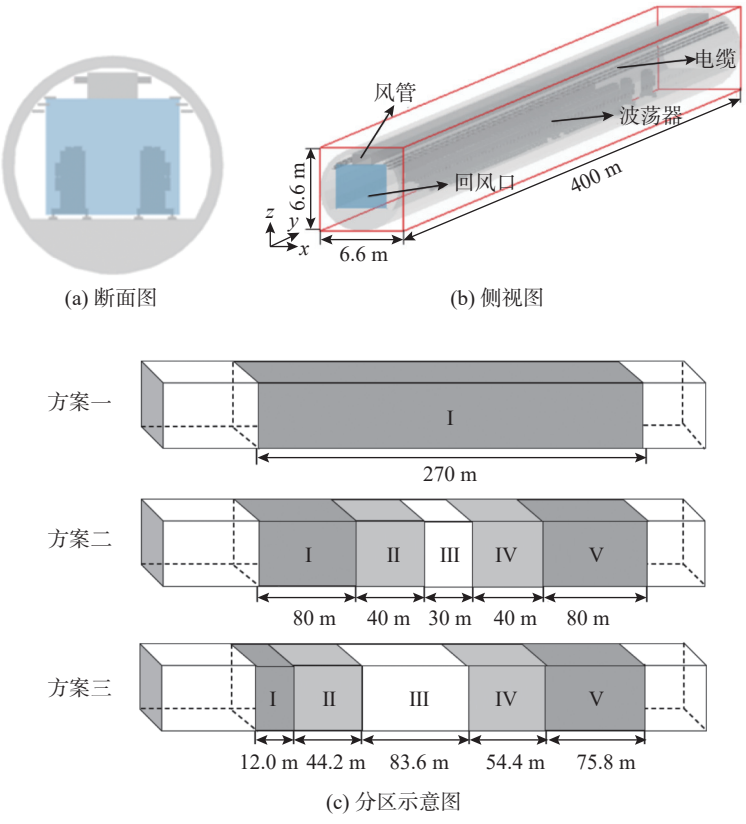
1.3　几何模型和送风方案

按照隧道的几何尺寸建立隧道几何模型。图 3(a)、(b)和(c)分别为隧道几何模型的断面图、侧视图和分区示意图。

不同送风口间距对隧道内空气温度梯度有显著影响。在方案设计阶段，考虑采用均匀送风的形式，以获得较为均匀的温度场。但是，由于采用两端回风的气流组织形式，隧道内的气流在由中间向两端流动的过程中，逐渐携带了内部热源产生的热量。因此，均匀送风的温度场并不均匀，且局部区域的温度梯度过大，难以满足 0.1 ℃/(5 m)的温度梯度要求。为此，本研究通过逐步调整送风口间距，确定了 3 种送风方案，以解决隧道内温度分布不均匀的问题。

方案一：送风口间距为 3.35 m，每个支管末端设置送风口，送风口尺寸为 0.5 m × 0.2 m，送风量均为 516 m^3/h，送风温度为 25 ℃。方案一送风口布置参数如表 2 所示。

方案二：将隧道内 75 ～ 345 m 区间划分为 5 个区，其中：Ⅰ区共 36 个送风口，间距为 5 m；Ⅱ区共 28 个送风口，间距为 2.5 m；Ⅲ区共 32 个送风口，间距为 1.25 m；Ⅳ区共 28 个送



(a) 断面图　　(b) 侧视图

(c) 分区示意图

图 3　隧道几何模型

Fig. 3　Tunnel model

表 2 方案一送风口布置参数

Tab. 2 Air terminal layout parameters for scheme 1

送风温度/℃	区号	送风口数量/个	分段区间/m	送风口间距/m	送风量/($m^3 \cdot h^{-1}$)
25	Ⅰ	160	75 ～ 345	3.35	82 700

表 3 方案二送风口布置参数

Tab. 3 Air terminal layout parameters for scheme 2

送风温度/℃	区号	送风口数量/个	分段区间/m	送风口间距/m	送风量/($m^3 \cdot h^{-1}$)
25	Ⅰ	36	75 ～ 155	5	18 518
	Ⅱ	28	155 ～ 195	2.5	14 529
	Ⅲ	32	195 ～ 225	1.25	17 324
	Ⅳ	28	225 ～ 265	2.5	14 064
	Ⅴ	36	265 ～ 345	5	18 265

风口，间距为 2.5 m；Ⅴ区共 36 个送风口，间距为 5 m。方案二送风口布置参数如表 3 所示。

方案三：将隧道内 75 ～ 345 m 区间划分为 5 个区，其中：Ⅰ区共 8 个送风口，间距为 3 m；Ⅱ区共 26 个送风口，间距为 3.4 m；Ⅲ区共 44 个送风口，间距为 3.8 m；Ⅳ区共 32 个送风口，间距为 3.4 m；Ⅴ区共 50 个送风口，间距为 3 m。方案三送风口布置参数如表 4 所示。

1.4 网格划分及边界条件

本模型采用的结构化网格如图 4 所示，其中：半径 r=2.45 m，回风口尺寸为 4 m × 3.5 m。采用标准的三维空间六面体结构化网格划分计算区域，对边界复杂的边界区域则采用局部实体

表 4 方案三送风口布置参数

Tab. 4 Air terminal layout parameters for scheme 3

送风温度/℃	区号	送风口数量/个	分段区间/m	送风口间距/m	送风量/($m^3 \cdot h^{-1}$)
25	Ⅰ	8	75 ～ 87	3	412 8
	Ⅱ	26	87 ～ 131.2	3.4	13 416
	Ⅲ	44	131.2 ～ 214.8	3.8	22 844
	Ⅳ	32	214.8 ～ 269.2	3.4	16 512
	Ⅴ	50	269.2 ～ 345	3	25 800

(partial solid)进行几何形状的简化和优化处理，以便于计算和模拟。

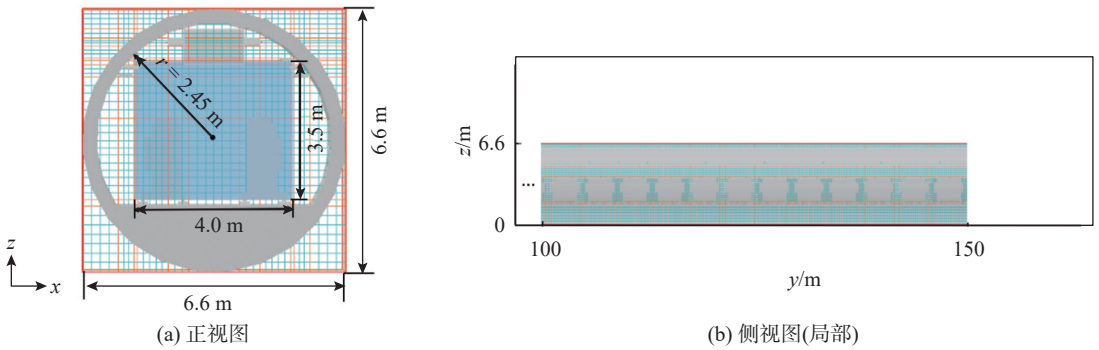
对送风口处、电缆处以及设备附近进行局部网格加密处理，这样既可以保证计算精度，又可以尽可能减少网格数量，缩短计算时间[22]。本研究分别选取 228 万、334 万、452 万、568 万网格求解网格无关解，结果如图 5 所示。经过网格无关解验证，最终确定网格数量为 334 万。

数值计算的边界条件设定如表 5 所示。隧道壁面土壤温度低于隧道内空气温度，这对空调负荷而言是有利因素，但随时间推移土壤温度会逐渐升高，因此在模拟中考虑最不利工况，将壁面设置为绝热。

2 结果分析

2.1 方案一：送风口等间距

通过 CFD 模拟得到的隧道内空气温度分布及温度梯度如图 6 所示。由图可知，隧道内空气



(a) 正视图 (b) 侧视图(局部)

图 4 隧道网格

Fig. 4 Tunnel mesh

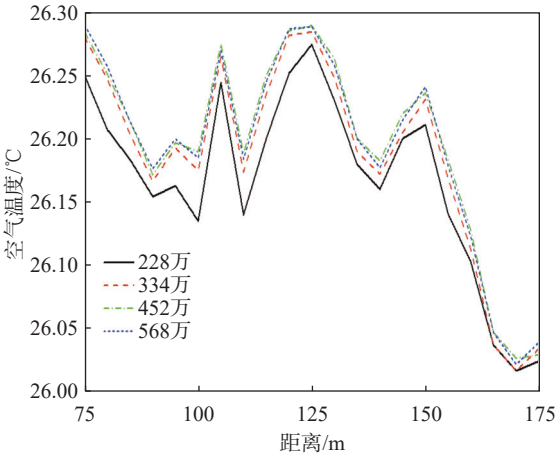


图 5　网格无关解

Fig. 5　Grid-independent solution

表 5　边界条件设定

Tab. 5　Boundary condition settings

名称	边界类型	备注
隧道壁面	Blockage	绝热
出风口	Vel. Flow Rate-Inlet	516 m^3/h
回风口	Opening	压力出口
电缆	Blockage	物性参数按照不同电缆发热量设置

温度为 25.7 ～ 26.6 ℃，平均温度为 26.2 ℃，可满足空气温度在 25 ～ 30 ℃ 内波动的设计要求。

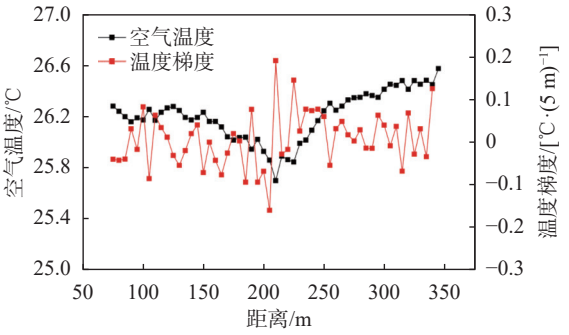
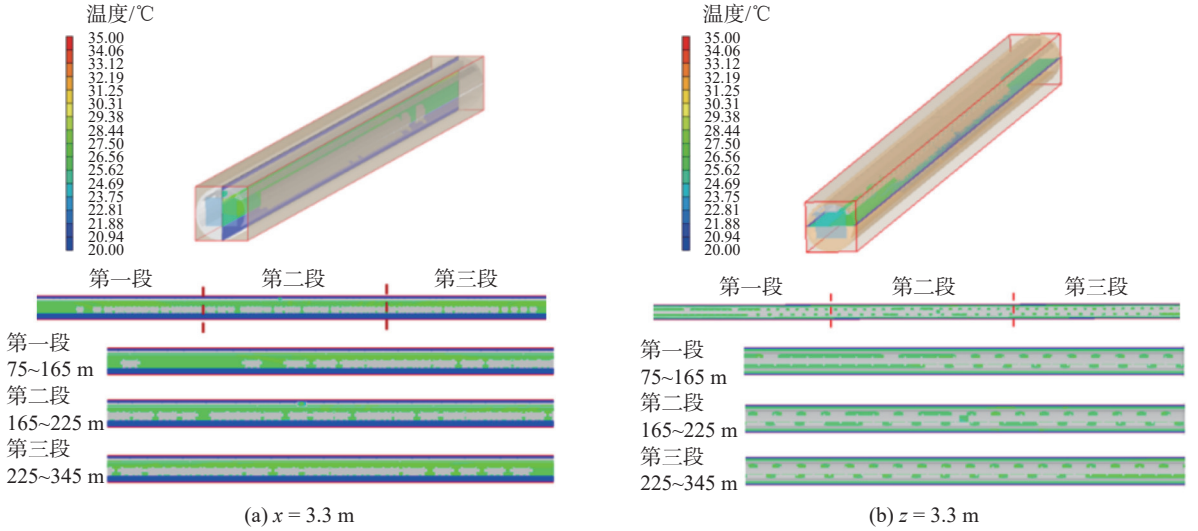


图 6　方案一隧道内空气温度分布及温度梯度

Fig. 6　Temperature distribution and gradient in tunnel under scheme 1

隧道内 195 ～ 240 m 区间温度梯度变化较大，最大温度梯度为 0.19 ℃/(5 m)。隧道 210 m 处无波荡器设备，使得该点温度梯度变化较剧烈。同时部分区域的温度梯度不满足小于 0.1 ℃/(5 m) 的设计要求。

图 7 为方案一、稳态边界条件下，隧道中心截面 z=3.3 m 处及竖直截面 x=3.3 m 处恒温控制段内空气温度分布云图。在截面 z=3.3 m 处，空气温度范围为(26±0.6) ℃。隧道内 200～225 m 区间散热设备较少，且隧道内设备以及工艺电缆的发热量沿隧道中心轴向向两端逐渐增加，因此该区域最低温度为 25.7 ℃，隧道两端最高温度为 26.6 ℃。隧道内发热设备呈不规则分布，使得设备在不同区域发热量不同，进而引起个别测



(a) x = 3.3 m　　(b) z = 3.3 m

图 7　方案一隧道内空气温度分布云图

Fig. 7　Temperature contour plot in tunnel under scheme 1

点空气温度梯度变化较大。

2.2 方案二：送风口间距由两端向中间逐渐缩小

为了使隧道内空气温度梯度达到设计要求，在均匀送风模拟结果的基础上，对送风口的位置进行调整，将送风口布置改为两端稀疏中间密集，通过增加中部空气流道，使中部空气以更低的温度携带隧道内热源向两端回风流动，从而改善方案一不符合温度设计要求区域的温度分布。通过 CFD 模拟，方案二隧道内空气温度分布及温度梯度如图 8 所示。随着不同分区内送风口间距的改变，隧道内空气平均温度为 26.0 ℃，温度范围为 25.5 ～ 26.7 ℃，可满足 25 ～ 30 ℃ 的设计要求。

由图 8 可知，方案二隧道内 170～255 m 区间温度梯度出现剧烈变化，最大温度梯度可达 0.24 ℃/(5 m)。由于Ⅲ区送风口较密集，较大的送风量使得该区温度出现较大变化，导致温度梯度波动较大，不满足 0.1 ℃/(5 m) 的设计要求。

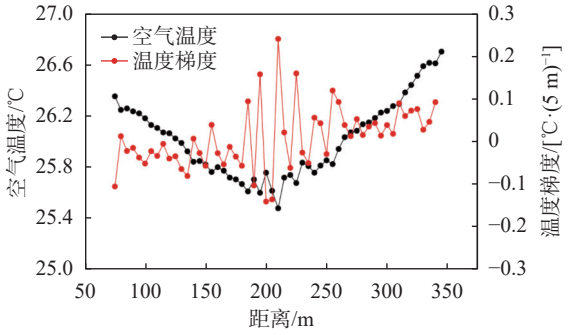


图 8 方案二隧道内空气温度分布及温度梯度

Fig. 8 Temperature distribution and gradient in tunnel under scheme 2

图 9 为方案二、稳态边界条件下隧道中心截面 z=3.3 m 处及竖直截面 x=3.3 m 处恒温控制段温度分布云图。在截面 z=3.3 m 处，隧道内温度范围为(26±0.5) ℃，且在 210 m 处温度最低，两端温度较高。

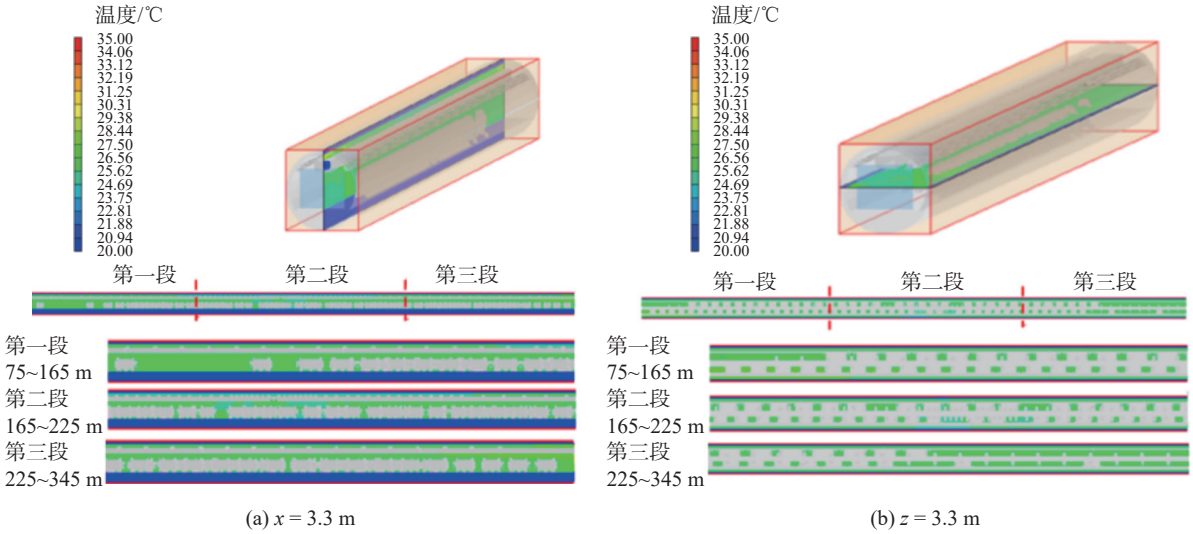


图 9 方案二隧道内空气温度分布云图

Fig. 9 Temperature contour plot in tunnel under scheme 2

2.3 方案三：送风口间距由中间向两端逐渐缩小

上文调整隧道内各送风口位置后发现温度梯度不满足小于 0.1 ℃/(5 m) 的设计要求。因此，采用一种改变隧道各区送入空调冷量的设计思路，即送风口排布为两端密集、中间稀疏。根据设备分布对送风口间距进行微调，以形成个性化送风。

方案三隧道内空气温度分布及温度梯度如图 10 所示。从图可以看出，隧道内空气温度较为均匀。由于扩大了Ⅲ区的送风口间距，即减少了该区域的送风量，对比其他方案可知：Ⅲ区温度梯度超标的现象得到了改善；Ⅳ、Ⅴ区发热设

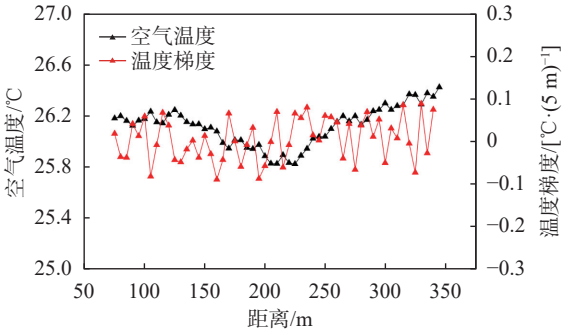
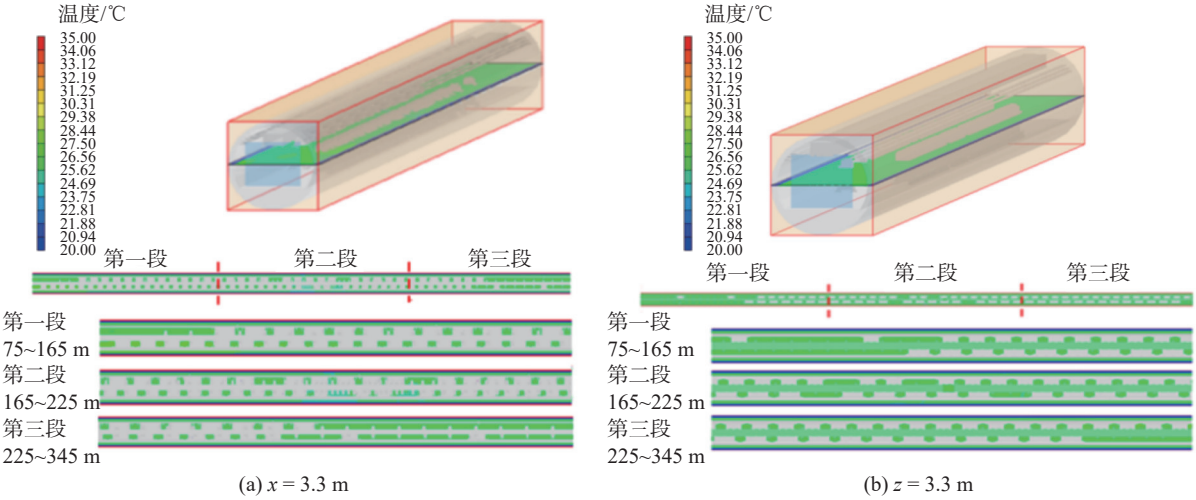


图 10　方案三隧道内空气温度分布及温度梯度

Fig. 10　Temperature distribution and gradient in tunnel under scheme 3

备较多，因此增加了Ⅳ、Ⅴ区送风量，以增强送风与设备换热，使得隧道内该区域温度与Ⅰ、Ⅱ区的基本接近。空气平均温度为 26.1 ℃，温度范围为 25.9 ～ 26.4 ℃，温度梯度可满足控制精度要求。

图 11 为方案三隧道内恒温控制段空气温度分布云图。与方案二相比，隧道中心截面 z=3.3 m 处温度更加均匀，温度范围为(26±0.2) ℃；竖直截面 x=3.3 m 处，两端温度为 26.1 ～ 26.4 ℃，整体温度变化幅度较小，送风口排布更合理。



(a) x = 3.3 m　　(b) z = 3.3 m

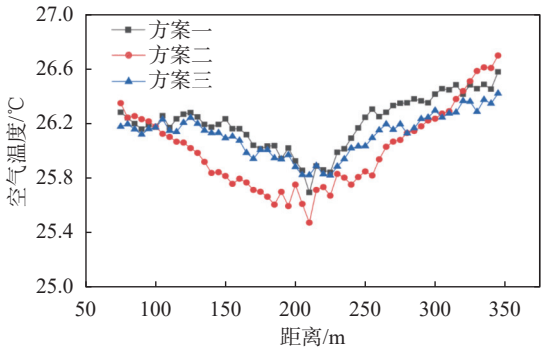
图 11　方案三隧道内空气温度分布云图

Fig. 11　Temperature contour plot in tunnel under scheme 3

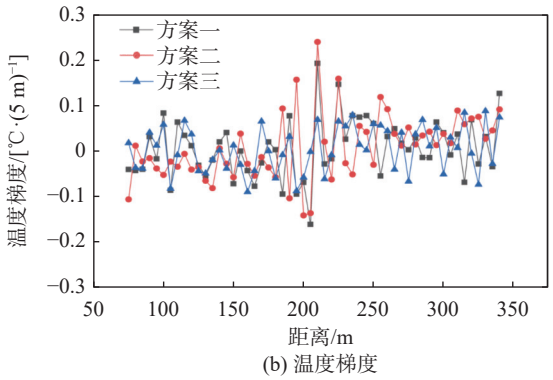
将上述 3 种方案的空气温度分布及温度梯度进行比较，结果如图 12 所示。由图可知，3 个方案的结果均满足设计要求，空气温度均在 25 ～ 30 ℃ 之间。方案二隧道Ⅲ区送风口较为密集，送风量较大，因而温度较低，但隧道恒温控制段两端空气温度略高于方案一、方案三的值。方案三在恒温区域空气温度变化优于其他 2 个方案。

模拟结果表明，仅方案三温度梯度满足 0.1 ℃/(5 m) 的设计要求，且温度稳定性好。方案一温度在隧道内 195 ～ 240 m 处变化较大，最大温度梯度为 0.27 ℃/(5 m)，表明送风口均匀布置时未能及时排出热量，不满足设计要求。方案二隧道内 175 ～ 275 m 处温度梯度变化最大，最大温度梯度为 0.24 ℃/(5 m)。由于Ⅲ区送风口布置相对密集，该段送风量较大，能够有效降低设备散热引起的周围空气温度升高，但冷、热气流混合，使温度出现较大变化，进而影响温度梯度，导致无法满足设计要求。

为了探究隧道内气流组织形式对排出热量的



(a) 空气温度



(b) 温度梯度

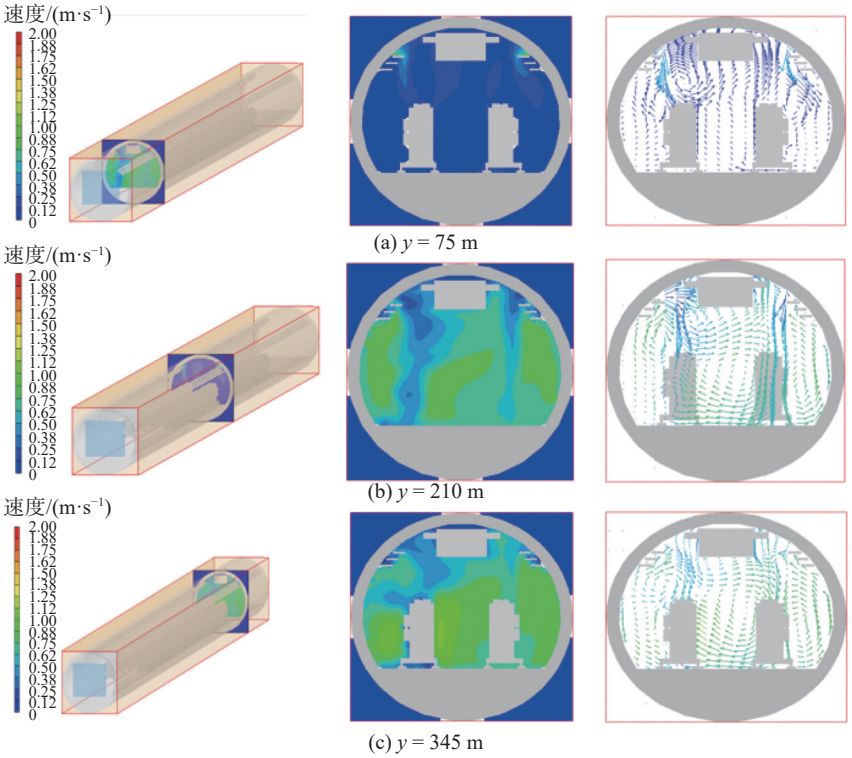
图 12 不同方案空气温度分布与温度梯度对比

Fig. 12 Comparison of average air temperature and temperature gradient under different schemes

影响，图 13 展示了方案三隧道恒温控制段左断面 y=75 m 处、中间断面 y=210 m 处以及右断面 y=345 m 处的速度分布云图和矢量图。从速度分布云图可以得出，送风吸收发热设备及电缆产生的热量，并在靠近设备表面产生了较强的热羽流，将产生的热量带出隧道。从速度矢量图可以得出，送风经送风口送出后，沿着隧道壁面向下依次经过电缆、发热设备，最后到达隧道中间区域后向位于隧道两端的回风口流出，带走热量，表明气流组织形式合理。

3 结论

本文采用 CFD 数值模拟方法，研究 3 种不同送风口排布形式对上海某大科学装置狭长隧道内高精度温度控制的影响，并分析了其内部流场和温度场分布。针对该狭长隧道内采用的送风口均匀送风、两端回风的气流组织形式，以及隧道内的温度梯度控制要求，最终确定采取在隧道两端采用较为密集的送风口布置，而隧道中部区域减少送风口个数，从而降低送风量的设计方案，即隧道Ⅰ和Ⅴ区送风口间距均为 3 m，Ⅱ和Ⅳ区送风口间距为 3.4 m，Ⅲ区送风口间距为 3.8 m。该方案所有送风口送风量均为 516 m^3/h。通过调整送风口间距，使隧道内空气平均温度为 26.1 ℃，温度范围为 25.9 ～ 26.4 ℃，可满足温



(a) y = 75 m

(b) y = 210 m

(c) y = 345 m

图 13 方案三断面速度分布云图和矢量图

Fig. 13 Contour plot and vector field of cross-sectional velocity distribution under scheme 3

度分布及温度梯度的设计要求。为使隧道内轴向空气温度分布更加均匀，应采取相对减少隧道中段送风量、提高两端送风量的方式，使隧道轴向温度梯度更小。

参考文献：

[1] 丁伯承, 吴睿昌, 封云飞, 等. 同步辐射在原子分子物理研究中的应用 [J]. 自然杂志, 2024, 46(3)：194－202.

[2] 鲁文翰, 周国平. 同步辐射光源束流控制系统的设计 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(5)：40－41.

[3] 寿炜炜, 张伟程, 滕汜颖, 等. 上海光源工程储存环隧道恒温空调设计 [J]. 暖通空调, 2007, 37(7)：86－92.

[4] 焦毅, 白正贺, 李晓. 第四代同步辐射光源加速器物理与技术 [J]. 物理, 2024, 53(2)：71－79.

[5] MAO N, SONG M J, CHAN M Y, et al. Computational fluid dynamics (CFD) modelling of air flow field, mean age of air and CO_2 distributions inside a bedroom with different heights of conditioned air supply outlet[J]. Applied Energy, 2016, 164：906－915.

[6] TAO H G, CHEN H X, XIE J L, et al. Comparison on simulation and experiment of supply air through metro vehicle air conditioning duct[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 44-47：1724－1728.

[7] 谢海英, 沐贤维, 李晓, 等. 自然通风建筑内空气流动和污染物扩散的数值模拟 [J]. 能源研究与信息, 2019, 35(3)：134－141.

[8] ZHANG Z W, CHEN F, YANG S, et al. Study on temperature control of ventilation system in construction period of high ground temperature tunnel[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 741(1)：012100.

[9] SONG K, WEI W R, WU S Q, et al. Numerical investigation on effect of air vent on air supply[J]. AIP Advances, 2022, 12(8)：085221.

[10] 连之伟, 戚大海, 刘蔚巍, 等. 室内障碍物对嵌入式空调气流组织的影响 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2010, 41(1)：364－369.

[11] PENG M, ZHOU Y, MING Y Y, et al. Study on the influence of air supply and smoke exhaust on full transverse exhaust of long highway tunnel[J]. Fire and Materials, 2024, 48(3)：299－310.

[12] DANG Y R, LI A G, YIN H G. Experimental investigation on heat transfer performance in an underground dam tunnel of hydropower station[J]. Advanced Materials Research, 2011, 374－377：494－497.

[13] LIU F Y. Simulation study on air outlet of data center[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1865(4)：042096.

[14] AMAI H, LIU S C, NOVOSELAC A. Experimental study on air change effectiveness: improving air distribution with all-air heating systems[J]. Building and Environment, 2017, 125：515－527.

[15] DENG Q, LIU H C, HE Y C, et al. Uniformity and energy evaluation of equal cross-section ventilation system (ECVS) for long tunnel in underground buildings[J]. Energy and Built Environment, 2022, 3(1)：86－94.

[16] 邓海峰, 李良策, 赵晨. 欧洲规范下隧道施工通风系统研究 [J]. 公路, 2024, 69(2)：157－161.

[17] HU Q, YUAN Z Y. Hydraulic balance debugging method for air conditioning water system[J]. E3S Web of Conferences, 2020, 165：06056.

[18] 王海东, 陈倩茹, 汤毅. 送风温度波动对恒温波荡器隧道温控精度的影响 [J]. 暖通空调, 2023, 53(3)：133－137, 122.

[19] DOBROWOLSKI B, KRĘCISZ K, SPYRA A. Usability of selected turbulence models for simulation flow through a pipe orifice[J]. TASK Quarterly, 2005, 9(4)：439－448.

[20] LIU S, ZHANG G L, LIU X W. Numerical simulation for part effect of ventilation of extra-long road tunnel[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 110-116：3092－3096.

[21] ZHANG N, JIN M J. Numerical simulation and experimental study on characteristics of fire in high-altitude tunnels[J]. Information Technology Journal, 2013, 12(13)：2489－2496.

[22] KOTRASOVA K, MICHALCOVA V. The study of the numerical diffusion in computational calculation[J]. MATEC Web of Conferences, 2020, 310：00039.