

文章编号: 0451-0712(2006)05-0233-05

中图分类号: U453.5

文献标识码: A

高海拔区特长公路隧道网络通风 仿真与优化分析

金文良, 谢永利, 李宁军, 仇玉良

(长安大学公路学院 西安市 710064)

摘 要: 针对新七道梁特长公路隧道海拔高、气候多变、洞内气流复杂等特点, 运用网络通风理论, 对不同工况下通风系统进行仿真分析, 论证该隧道通风方案的合理性, 优化通风设计和通风模式, 保证隧道通风效果, 降低通风营运费用。

关键词: 公路隧道; 网络通风; 仿真; 通风方案

新七道梁隧道位于甘肃省兰州市以南 17 km 处, 是国道 212 线与马衔山主山脊向西北延伸的相交点, 也是国道 212 线兰州~临洮高速公路上的控制工程, 双洞单向行驶, 两洞轴线相距 45 m。上行线隧道长 4 003.19 m, 纵坡为 +2.05%, 平均设计标高为 2 216.68 m; 下行线隧道长 4 070 m, 纵坡为 +2.11%, 平均设计标高为 2 219.75 m。隧道内设计行车速度为 60 km/h。

新七道梁隧道是我国目前海拔 2 200 m 以上已建的最长高速公路隧道, 所采用的全射流纵向通风加浅竖井送排式通风方式, 国内还没有此类隧道建

设的先例。该隧道具有特长、高海拔、气候多变、双洞单向交通、洞内气流复杂等特点, 仅运用一般的通风计算还不能完全把握隧道通风系统中气流的变化规律以及相应的流场状态, 因而也就无法针对可能发生的各种工况条件制定出合理可行的气流控制方案。就我国具体情况而言, 西部地区是我国相对经济比较落后的地方, 随着经济的逐渐发展, 隧道内交通量会随着增大, 这就需要解决这种前后交通量差异所造成的投资浪费, 或供风量与需风量严重不符的现象。新七道梁公路隧道由于其工程的重要性和物流的特殊性, 本文针对以上问题, 运用网络通风理论,

收稿日期: 2005-11-03

[10] Steve R Gunn. Support Vector Machines for Classification and Regression[R]. Technical Report,

University of Southampton, 1998.

Forecasting Model of Safe Thickness for Roof of Karst Cave Under Highway Tunnel

WANG Yong¹, SUN Cai-hong²

(1. China Highway Planning and Design Institute (HPDI) Consultants, INC., Beijing 100010, China;

2. Central Research Institute of Building&Construction, Beijing 100088, China)

Abstract: By means of FEM numerical simulation, the factors affecting the safe thickness of roof of karst cave are analysed and the effect of every factors on the safe thickness of roof are studied with previous data. Forecasting model of safe thickness of roof is obtained by stepwise regression analysis and SVM, which may offer guidance and reference for the design and construction of similar tunnel.

Key words: karst tunnel; FEM; safe thickness; SVM; forecasting model

建立隧道复杂通风网络仿真模型,依托新七道梁隧道通风方案进行仿真分析,实现通风方案的比选和优化。

1 通风仿真理论模型的建立

计算理论服从流体力学基本定律。节点风流连续方程,即风量平衡定律式为 $\sum_{j=1}^n Q_{ij} = 0$;回路风压

平衡方程为 $f_i = \sum_{j=1}^n \Delta P_{ij} = 0$ (不含通风动力,包括

自然风压、风机和交通通风力等) 或 $f_i = \sum_{j=1}^n \Delta P_{ij} -$

$\sum_{j=1}^n H_{ij\text{风机}} - \sum_{j=1}^n H_{ij\text{自}} - \sum_{j=1}^n H_{ij\text{交通}} = 0$ (含通风动力,包括自然风压、风机或交通通风力)。

1.1 隧管通风阻力模型

隧管本身具有的通风阻力可分为两类:一类被称为沿程阻力;另一类则称为局部阻力。沿程阻力损失 h_f 和局部阻力损失 h_ζ 计算公式可写成:

$$h_f = \frac{\lambda L \rho v^2}{2d} = \frac{\lambda L \chi \rho}{8A^3} Q^2 = R_f Q^2$$

$$h_\zeta = \zeta \frac{\rho}{2} v^2 = \frac{\zeta \rho}{2A^2} Q^2 = R_\zeta Q^2$$

则通风支路阻力损失 h_i 计算公式可写成:

$$h_i = \left(\sum_j h_{fj} + \sum_k h_{\zeta k} \right) Q_i^2 = R_i Q^2$$

由于隧管的长度、截面积、湿周对于建成的隧道是固定不变的;当流体的运动进入完全紊流状态时,沿程阻力系数仅取决于隧管内壁的相对光滑度,一定时间内是不变的,故沿程阻力系数可视为常数;局部阻力系数的主要差别在于不同类型的局部阻力具有不同的局部阻力系数,但在具体条件下是确定不变的常数;空气密度随空气温度、湿度、气压的变化而变化,但隧道内空气密度变化不大,也可视为常量。所以通风支路风阻系数也为常量。

1.2 风机风压风量曲线模型

单台轴流风机风压风量曲线 ($H \sim Q$ 曲线) 的数学表达式,常用曲线拟合的方法获得。在 $H \sim Q$ 曲线上选取足够点数的 H_i, Q_i 值,用最小二乘法拟合多项式,通式可写成:

$$H_f = b_1 + b_2 Q + b_3 Q^2 + \dots + b_n Q^{n-1}$$

解算出系数 $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$, 风机特性曲线的数学表达式即可确定。

多台风机并联的特性曲线的数学表达式,只需按相同风压各风机风量相加的原则,对 $H \sim Q$ 曲线

所选点的 H_i, Q_i 值进行计算,再用最小二乘法拟合多项式即可。

对于固定安装角下、转数一定的通风机,产生的体积流量无论在任何海拔高度上都是不变的,即 $Q_z = Q_0$ 。而风压随海拔高度的增加而降低,即与空气的密度成正比,得 $H_z = \frac{\gamma_z}{\gamma_0} H_0 = k_z H_0$ 。

1.3 交通风压模型

隧道交通通风力的计算公式可表示成:

$$H_t = \frac{A_m}{A_r} \cdot \frac{\rho}{2} n_+ (v_{u(+)} - v_r)^2 - \frac{A_m}{A_r} \frac{\rho}{2} n_- (v_{u(-)} + v_r)^2$$

将上式改写成通风支路的交通通风力公式:

$$H_{ti} = \frac{A_m}{A_r^3} \frac{\rho}{2} n_{i+} (Q_{ui(+)} - Q_{ri})^2 - \frac{A_m}{A_r^3} \frac{\rho}{2} n_{i-} (Q_{ui(-)} + Q_{ri})^2$$

$$= T_{i+} (Q_{ui(+)} - Q_{ri})^2 - T_{i-} (Q_{ui(-)} + Q_{ri})^2$$

式中: $Q_{ui(+)}, Q_{ui(-)}$ 为 $v_{ui(+)} A_{ri}, v_{ui(-)} A_{ri}$ 。

1.4 自然风压模型

隧道内自然风压的产生主要由两方面因素促成:一是隧道及竖井各进出口间的超静压差;二是隧道及竖井内外因空气温度不同引起密度变化而形成的热位差。

超静压差为:

$$\Delta P_{\text{静}} = \sum N_+ \cdot K \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_N^2 - \sum N_- \cdot K \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_N^2$$

热位差的形成源于洞内空气与外界发生了热能或其他形式能量的交换而促使空气做功,以克服隧道通风阻力,维持空气流动。热位差的计算方法如下:按流体静力学公式,隧道两洞口的空气压差为 $dp = \rho dz$, 式中空气密度取决于空气状态变化过程,即与高程、压力、温度等有关。就一般隧道而言,可近似认为属等容过程, ρ 可视为常量,积分上式有:

$$H_n = \rho_0 Z_0 - \rho_l Z_l$$

可按 $\rho = 0.0464 \frac{P}{T}$ 计算,压力 P 按毫米汞柱代入, T 按绝对温度代入。按照经验,在无实测数据的情况下,洞内空气相对湿度可取 60%, 进风口的气温可取该处地表的月平均气温,出风口的气温可按该处岩体温度减去 1~2℃ 计算。

1.5 火灾烟流阻力模型

火灾时,烟流受到节流效应、摩擦、浮力效应的联合作用,因此,烟流阻力是以上三种效应引起阻力的代数和,即 $H_h = H_j + H_m + H_b$ 。火灾过程中,洞内火焰燃烧段和烟流流过段的烟流,其温度、体积、密

度的变化差别较大,故将火灾区分为着火区和烟流污染区,对应的烟流阻力分别为火区烟流阻力和污染区烟流阻力。火区长度相对整个流程是很短的,在计算火区烟流摩擦阻力时简化烟流温度和速度,近似按线性规律变化;污染区内沿程烟流的温度分布满足负指数规律。对于水平洞烟流的浮力效应很小,可忽略不计。

火区烟流阻力:

$$H_h = \frac{\rho_0}{2} \left[v_0^2 \left(\frac{\phi_y^2}{M_k} - 1 \right) + gh_m (1 - M_k) \right] + h_a \left(\frac{\rho_0}{\rho_a} \right) \left(\frac{v_0}{v_a} \right)^2 \times \left[1 + \frac{1}{12 M_k^2} (M_k^3 + 2 \phi_y M_k^2 - 9 M_k^2 + 3 \phi_y^2 M_k + 2 \phi_y M_k + \phi_y^2) \right]$$

污染区烟流阻力:

$$H_h = \frac{\rho_1 (T_1 - A_k) [e^{(-B_k L)} - 1]}{2} \cdot \left[\frac{v_1^2}{T_1} + \frac{gh_m}{A_k + (T_1 - A_k) \exp(-B_k L)} \right] + h_a \left(\frac{\rho_0}{\rho_a} \right) \left(\frac{v_0}{v_a} \right) \left\{ \frac{A_k}{T_1} + \frac{(T_1 - A_k) [1 - \exp(-B_k L)]}{B_k T_1 L} \right\}$$

对于点火源,火区长度等于零,则摩擦阻力等于零,于是有:

$$H_h = \frac{\rho_0}{2} \left[v_0^2 \left(\frac{\phi_y^2}{M_k} - 1 \right) + gh_m (1 - M_k) \right]$$

1.6 网络通风计算程序简介

隧道网络通风仿真程序包括程序主模块、风机风压处理模块、交通风压处理模块和自然风压处理模块等。仿真程序采用斯考德——恒斯雷迭代法,正

常运营通风解算步骤如下。

(1)每一闭合回路选定一条支路为未知风量分路,设定 n 个分路风量 $Q_j (j=1, 2, 3 \dots, n)$,务必满足节点风流连续方程。

(2)利用回路风压平衡方程,解算各闭合回路未知风量支路的风量修正值:

$$\Delta q_i = - \frac{f_i}{2 \sum_{j=1}^n R_{ij} |Q_{ij}| - \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta H_{ij \text{ 风机}}}{\partial Q_{ij}} - \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Delta H_{ij \text{ 交通}}}{\partial Q_{ij}}}$$

(3)对应回路的各个支路的风量 Q_{ij} 做如下改正: $Q_{ij}^{(k+1)} = Q_{ij}^{(k)} + \Delta q_i^{(k)}$ 。

(4)进行下一回路的风量修正值 Δq_{i+1} 计算,对该回路的各个支路的风量 Q 进行修正。

(5)所有支路计算完成后进行第二次迭代,计算风量修正值 $\Delta q_i^{(k+1)}$,对各回路的各个支路风量 Q_{ij} 进行第二次修正。

(6)依此类推,逐回路、逐轮次计算,直至各支路中的 Δq_{\max} 小于设定误差,即 $\Delta q_{\max} \leq EPS$ 。

(7)终止迭代运算,输出各支路风量、风压等运算结果。

2 新七道梁隧道通风网络仿真计算

新七道梁隧道近期采用全射流纵向通风方式,远期采用全射流纵向通风加浅竖井送排式通风方式,国内还没有此类隧道建设先例。通风系统平面布置示意如图1所示。

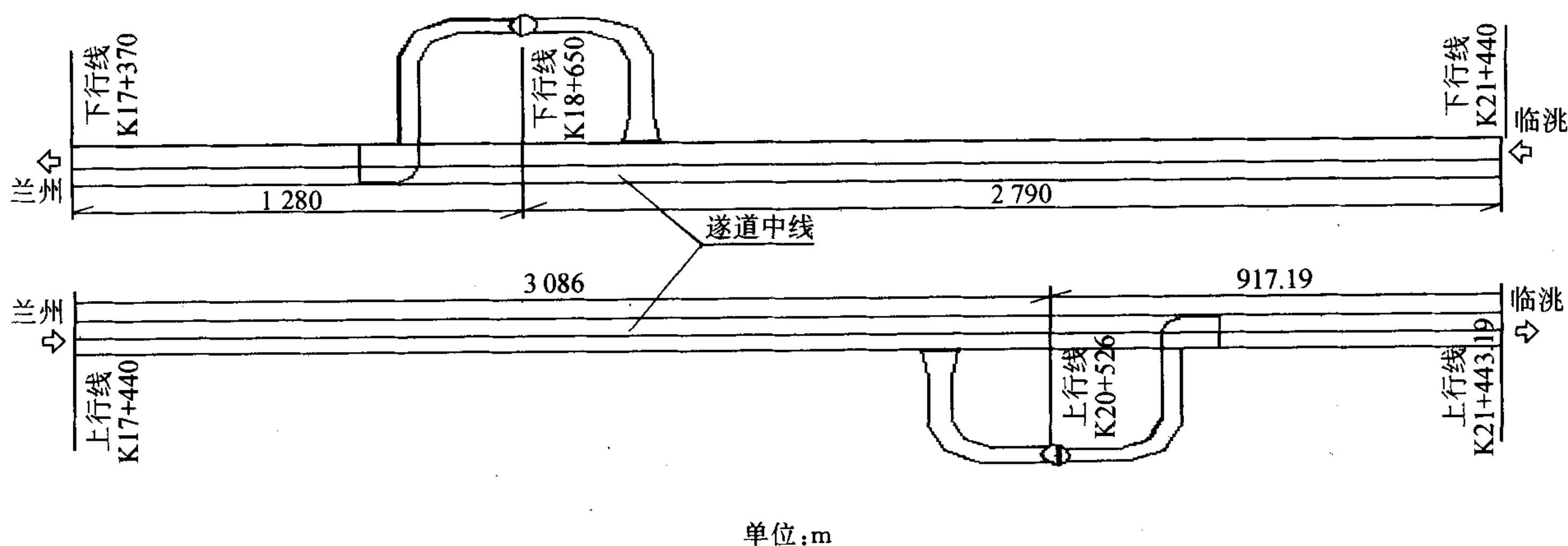


图1 浅竖井分段纵向通风方案示意

针对新七道梁公路隧道具体工程特点,前、后期交通量变化较大、不同工况车速等各种运营工况,采用网络通风仿真程序,综合考虑各种通风要素对通

风计算的影响,对通风系统进行优化,从而得出各种工况下风路各个分支风量、风压以及风机功率等最优结果。

新七道梁公路隧道实际工程模型转化为通风网络模型,上、下行线通风网络模型图相同。如图 2 所示。

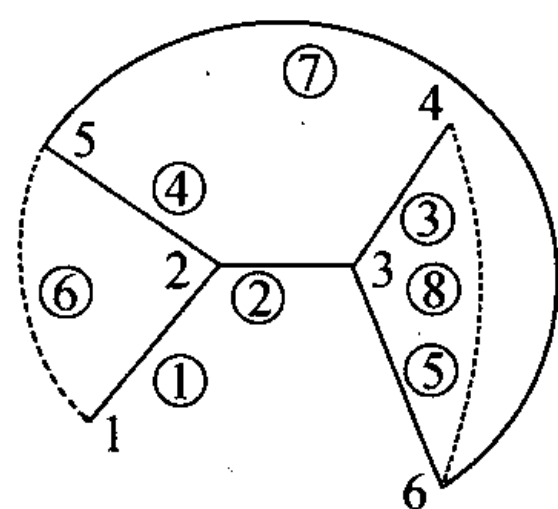


图 2 上、下行线通风网络模型

计算过程中考虑了近期设计年限 2015 年、远期设计年限 2023 年不同交通量、不同组合工况的情形,进行风机配置计算和优化,以及根据近、远期分析当量小时交通量隧道内所需的射流风机和轴流风机功率配置及该交通量下风机功率的计算。

3 整体仿真分析结论

(1)近期设计年限 2015 年隧道通风方案采用全射流纵向通风,隧道内各段风量均相同。上、下行线各个交通车速工况下(20~60 km/h)进行计算得出,交通车速为 20 km/h 时,风机需要的功率最大,若按此要求布置风机,耗能较大,布置风机较困难。实际计算时,采用的高峰小时交通量,隧道运营大部分时间段交通量较小,达不到高峰小时交通量。同时达到高峰小时交通量和交通车速 20 km/h 的情况不多,即使存在持续时间也不会太久。对于长大隧道,当交通车速为 20 km/h 或更低时,应进行交通管制、疏导交通。最终计算优化后上行线近期布置 63 台风机 1 134 kW;下行线近期布置 42 台风机 756 kW。

(2)上行线隧道远期需风量控制因素为稀释烟雾,通过对各工况风机功率计算,得到风机功率按交通车速 50 km/h、需风量为 $747.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 时来配置最经济节能。下行线隧道远期需风量控制因素是稀释 CO。对照七道梁隧道在不同行车速度下的需风量表(表略),当行车速度大于 30 km/h 时,需风量逐渐减小;行车速度 40 km/h 对应 $452.2 \text{ m}^3/\text{s}$;行车速度 50 km/h 对应 $361.8 \text{ m}^3/\text{s}$;行车速度 60 km/h 对应 $301.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。所以以上工况车速下,无论射流风机还是轴流风机,其风机功率均会比行车速度 30 km/h 时小,最终配机功率按行车速度 30 km/h 时的计算结果进行配置。

(3)远期设计年限 2023 年,隧道通风方案采用

全射流纵向通风加浅竖井送排式通风方案。针对不同工况车速,根据竖井短道内窜流风量不同的取值来计算优化风机功率,同时由于近期方案隧道段布置射流风机很多,可以充分利用这一点,调整短道窜流量和竖井排风量,使风机运营的总功率最小。

(4)近期上行线各个交通量下风机功率计算如图 3 和图 4 所示,计算中交通工况车速均取 50 km/h;近期下行线各个交通量下风机功率计算如图 5 和图 6 所示,计算中交通工况车速均取 30 km/h。实际上当交通量较小时,车速较高,风机的需求功率要比计算结果小。

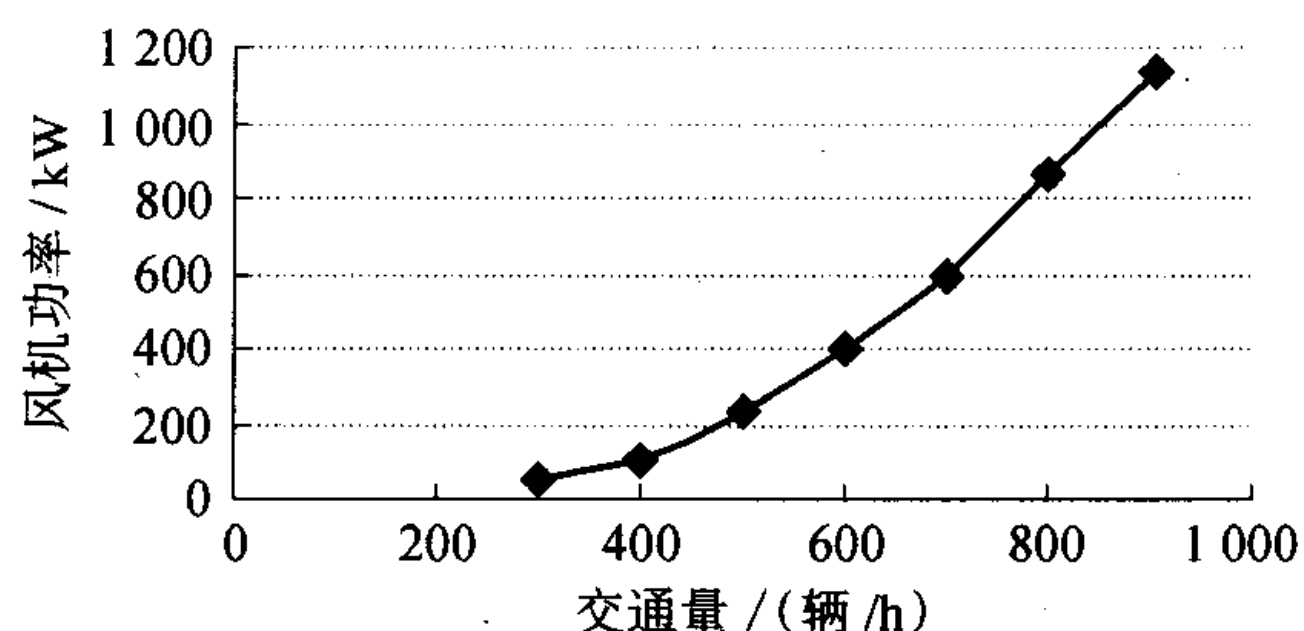


图 3 上行线近期不同交通量下风机需求功率

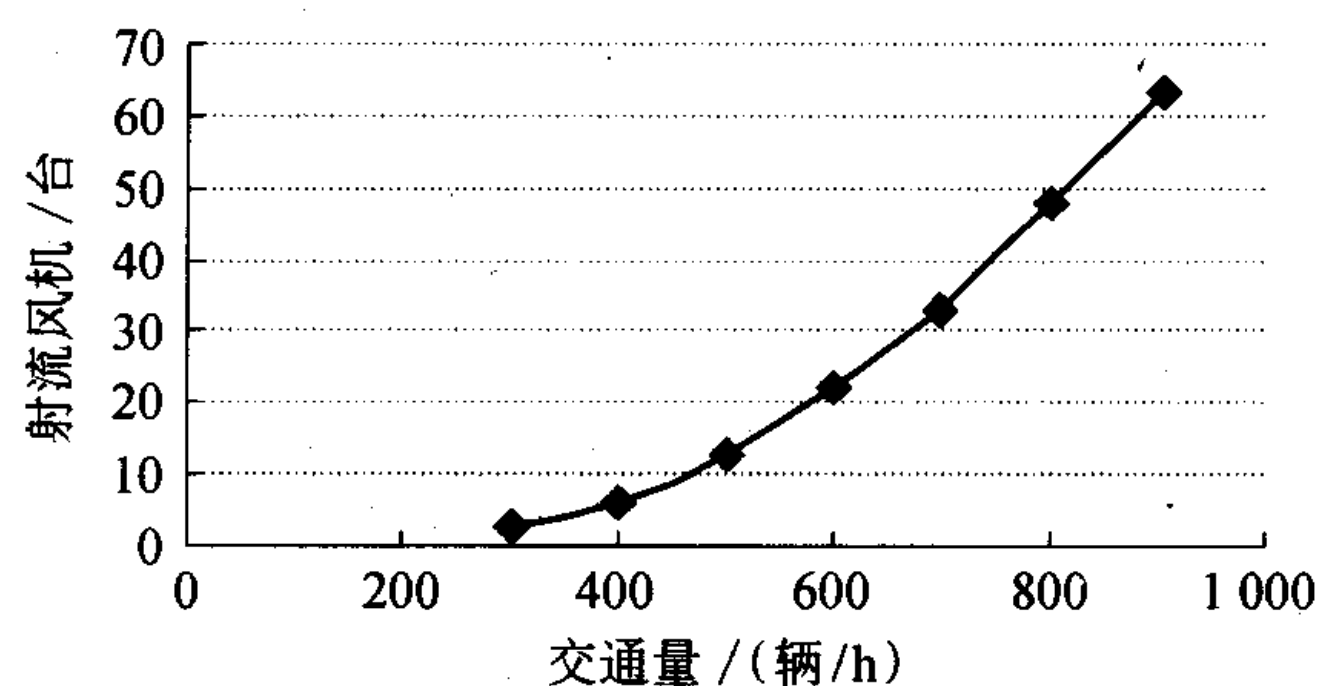


图 4 上行线近期不同交通量下所需风机台数

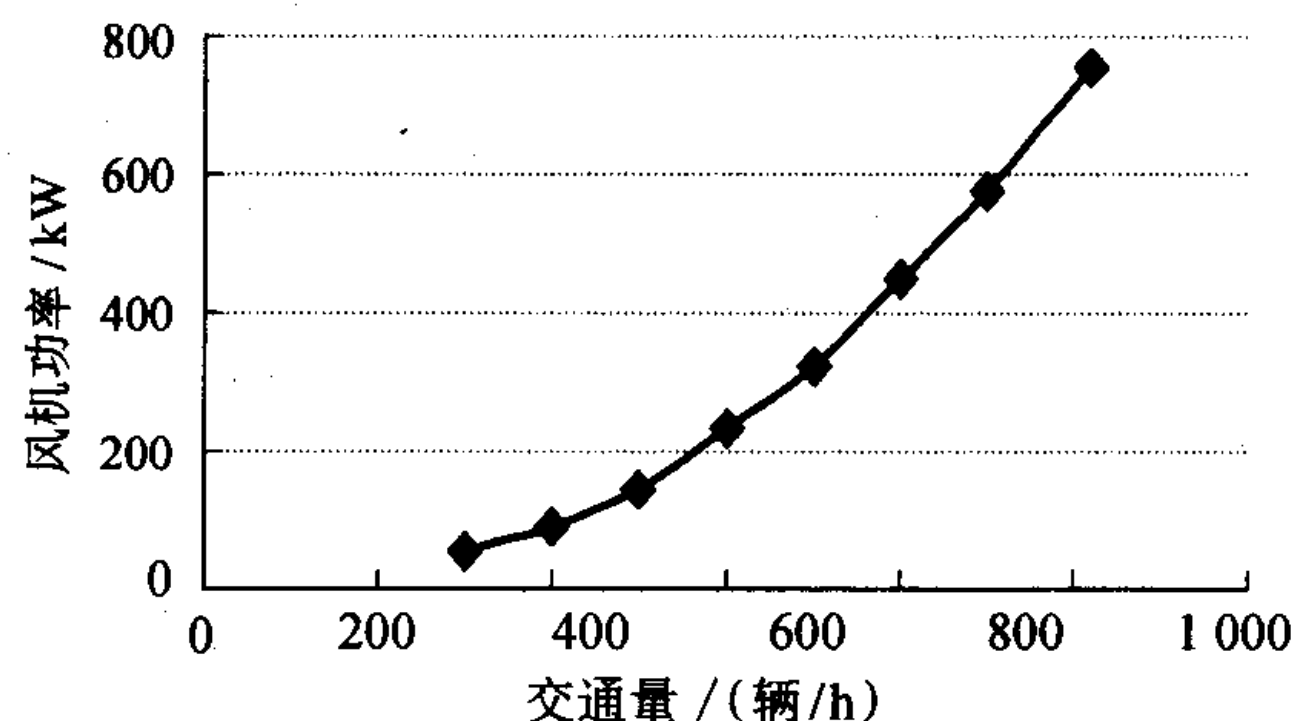


图 5 下行线近期不同交通量下风机需求功率

(5)远期设计年限下行线隧道正常运营阶段(车速 30 km/h),加大短道窜流量至 $128 \text{ m}^3/\text{s}$,可减小排风道损失,有利于减小风机功率,节省运营电费;上行线隧道控制车速 50 km/h 时,加大短道窜流量至 $320 \text{ m}^3/\text{s}$,亦有利于减小风机功率。对比下行线短道

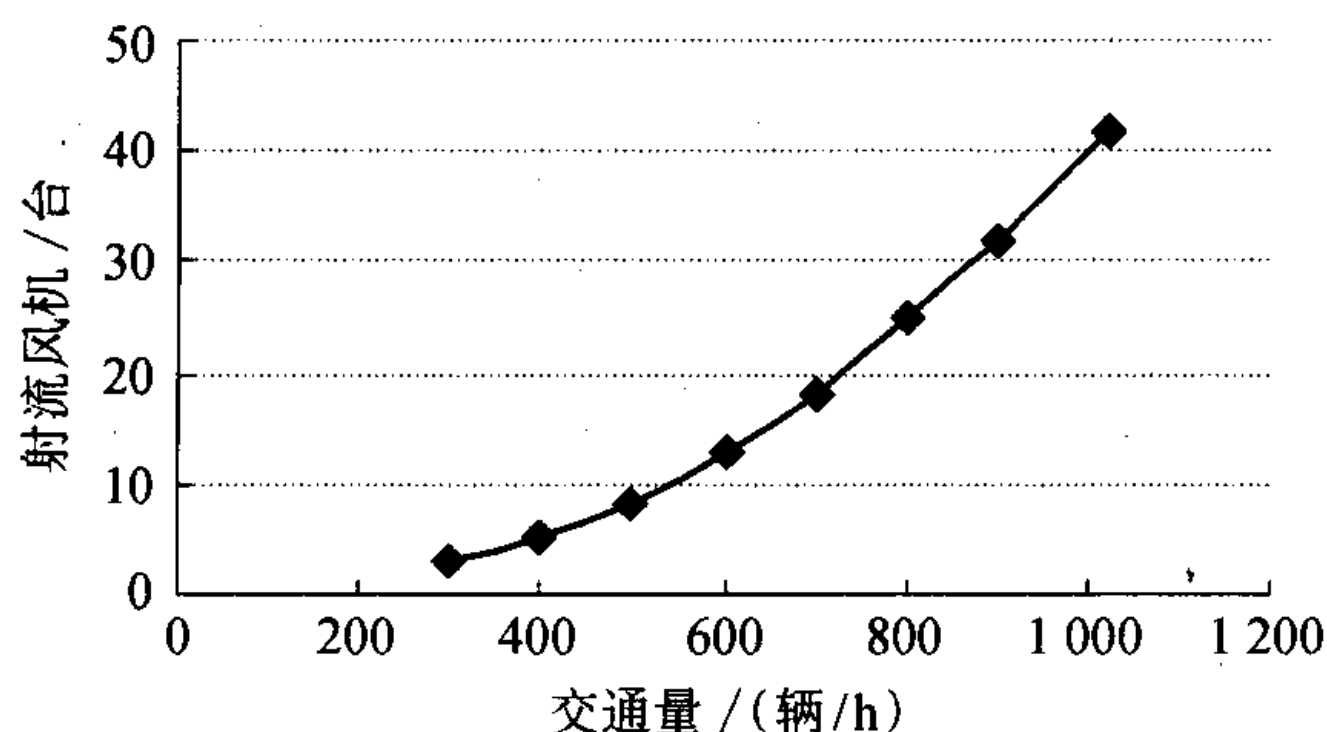


图6 下行线近期不同交通量下所需风机台数

窜流量 $Q=71 \text{ m}^3/\text{s}$ 、上行线短道窜流量 $Q=217 \text{ m}^3/\text{s}$ 风机配置功率表(表略),经调整后上、下行线总需功率减少173.46 kW。上、下行线远期风机需求功率曲线见图7和图8所示。

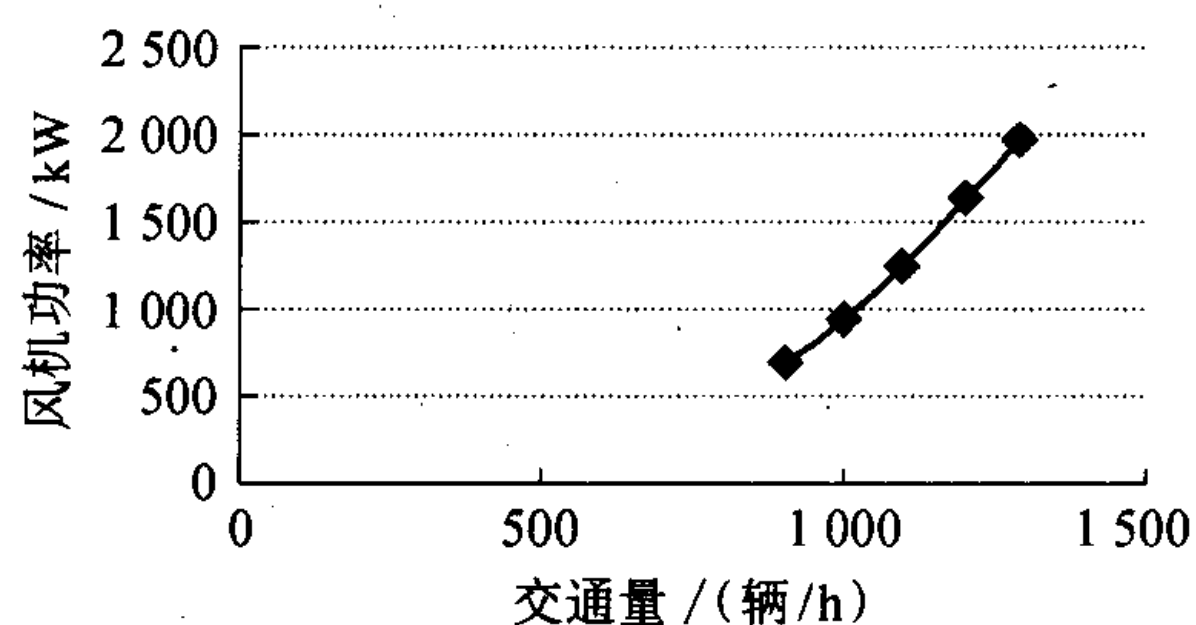


图7 上行线远期不同交通量下风机需求功率

(6)隧道正常运营时,可以根据小时交通量来管

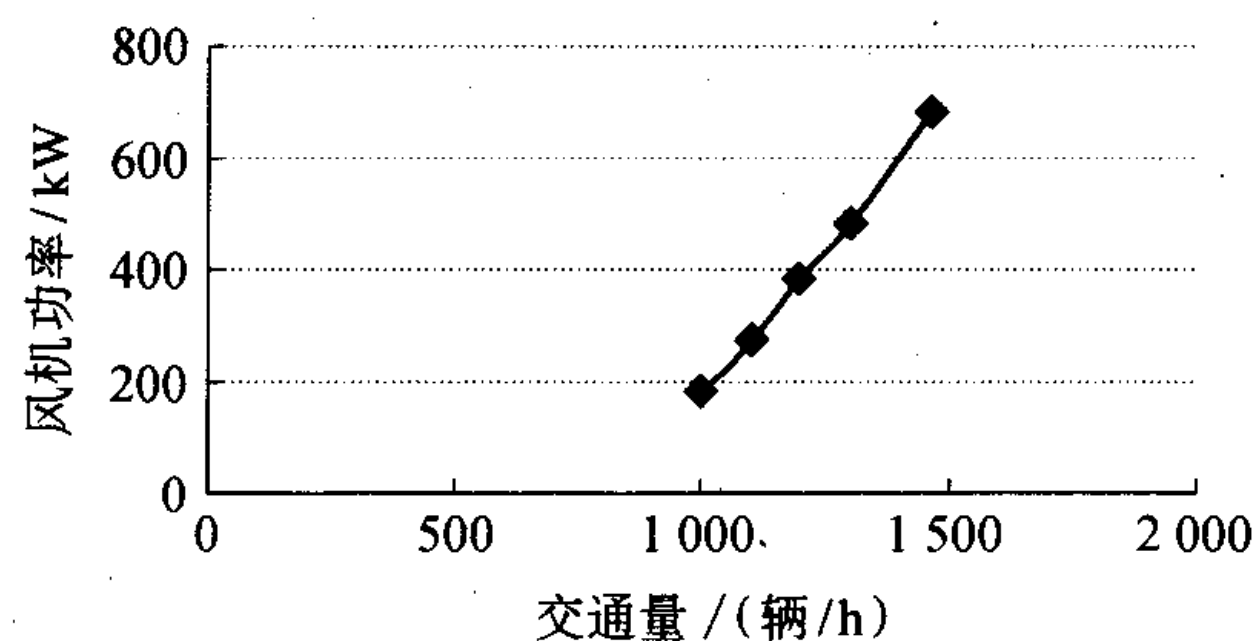


图8 下行线远期不同交通量下风机需求功率

理风机。实际中可根据隧道内污染物浓度进行实时监测,动态控制风机的开启数量。

参考文献:

- [1] JTJ 026.1—1999,公路隧道通风照明设计规范[S].
- [2] 长安大学课题组. 长大公路隧道通风仿真模拟试验技术的研究[R]. 2003.
- [3] 郑道访. 公路长隧道通风方式研究[M]. 北京:科学技术文献出版社,2000.
- [4] 蒋树平. 公路隧道竖井送排式通风模式及工程应用[J]. 世界隧道,1998.
- [5] 王英敏. 矿内空气动力学与矿井通风系统[M]. 北京:冶金工业出版社,1994.
- [6] 苑郁林. 通风网络理论在公路隧道通风设计中的应用[J]. 公路,2003,(10).

Emulation and Optimization Analysis of Network Ventilation of Extra Long Tunnel in High Altitude Region

JIN Wen-liang, XIE Yong-li, LI Ning-jun, QIU Yu-liang

(College of Highway, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: To counter the characteristics of New Qidaoliang Extra Long Tunnel with high altitude, changeable climatic condition and complicated air flow, the ventilation system under different operating condition is emulatively analyzed by network ventilation theory. The ventilation scheme rationality is demonstraed, the design and modes of ventilation optimized, the effectiveness of tunnel ventilation ensured, and the costs of ventilation operation reduced.

Key words: highway tunnel; network ventilation; emulation; ventilation scheme