

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.050

城市隧道运行环境能效评价实验与理论研究

朱培根, 刘 军, 徐万里, 涂江峰, 田义龙

(解放军理工大学, 南京 210007)

摘 要: 为了对城市隧道运行环境与能效做出合理的评价, 对不同类型城市隧道内 CO 浓度分布进行了理论研究。以某城市 3 条典型隧道为研究对象, 对隧道运行环境各项参数进行了现场测试, 统计了隧道总用电量和照明用电量, 初步分析了不同隧道运行环境与能效。对所测数据采用主成分分析法建立了运行环境能效评价的理论模型, 并对城市隧道运行环境与能效进行了综合评估, 得到相对优化的隧道运行模式, 此结论对城市隧道建设具有一定的参考价值。

关键词: 城市隧道; 运行环境; 能效评价; 主成分分析

中图分类号: TU997 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)S1-0219-03

Experimental and Theoretical Research of Operating Environment and Energy Efficiency Evaluation in City Tunnel

Zhu Peigen, Liu Jun, Xu Wanli, Tu Jiangfeng, Tian Yilong

(PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, P. R. China)

Abstract: In order to make a reasonable evaluation on operating environment and energy efficiency in city tunnel, the distribution of CO concentration in different types of city tunnels has been studied. Three typical city tunnels have been researched, the main parameters of their operating environment have been tested, the electricity consumption has been stated. Operating environment and energy efficiency of different tunnels have been analyzed. Principal component analysis has been used to establish a theoretical model of evaluation of operating environment and energy efficiency, a comprehensive assessment has been conducted. Relatively optimal operating mode of the tunnel has been gated. This conclusion has a certain reference value for the construction of city tunnel.

Key words: city tunnel; operating environment; energy efficiency evaluation; principal component analysis

随着经济的不断发展, 越来越多的城市开始建设地下隧道, 以满足日益增长的交通需求。城市隧道在为经济发展注入无限活力的同时, 隧道自身运营带来的环境问题和巨大能耗也成为备受关注的话题^[1-3]。据相关研究表明^[4-5], 城市隧道运行中的通风照明用电量已成为城市隧道运营的一项重要开支, 甚至已成为城市隧道运营的严重负担, 这种负担使不少隧道运营管理部门采取减少隧道照明灯具开启数量、减少风机开启时间等方式来达到降低运营成本的目的^[6-8], 这样对隧道运行环境造成影响, 加大了隧道交通的安全隐患。文中以南京 3 条典型城市隧道为研究对象, 对其运行环境各项参数进行现场测试, 运用主成分分析法对城市隧道运行环境与能效进行评价。

1 理论研究

在城市隧道中, 汽车排放出来的废气中有害物质很多, 包括 CO、CO₂、NO_x、SO₂ 等, 其中 CO 对人体健康和人的反应能力影响最为突出, 将其稀释至无害于人体健康的需风量最多, 因此, CO 排放量是隧道运行环境的一个重要指标^[9-10], 对不同类型隧道内 CO 浓度分布进行研究显得尤为重要。

隧道内 CO 排放量与隧道内汽车数目、车速等因素有关,

隧道 CO 排放量的计算方法为^[11-13]:

隧道全长的 CO 排放量:

$$Q_{CO} = \frac{1}{3600} \cdot q_{CO}^0 \cdot f_v \cdot f_i \cdot f_h \cdot n \quad (1)$$

隧道内车辆数:

$$n = N \cdot L / (3600 \times v_i) \quad (2)$$

式中: q_{CO}^0 为车辆的 CO 基本排放量, $m^3 \cdot h^{-1} \cdot \text{辆}$; f_v 为考虑 CO 的车速系数; f_i 为考虑 CO 的坡度系数, 城市隧道内取 1; f_h 为考虑 CO 的海拔高度系数, 城市隧道内取 1; N 为交通量, 辆/h; L 为隧道长度, m; v_i 为汽车行驶速度, m/s。

整理得:

$$Q_{CO} = \frac{1}{3600} \cdot q_{CO}^0 \cdot f_v \cdot f_i \cdot f_h \cdot n = 2.778 \times 10^{-9} \times N \cdot L \quad (3)$$

车辆行驶产生 CO 时车辆均为 CO 的点源, 即 CO 只能在车辆的所在位置处排放。然而由于 CO 的扩散具有一个延迟时间, 故在交通量较大的情况下, 可近似认为 CO 的排放为线源, 即隧道内各处均在排放 CO。

隧道有无通风竖井对隧道内 CO 的分布有很大的影响, 在已有分析的基础上, 分别计算出有无通风竖井隧道内 CO

收稿日期: 2012-03-12

作者简介: 朱培根, 男, 副教授, 博士, 主要从事地下空间除湿与节能研究, (E-mail) zhupeigen0713@163.com。

分布浓度,见式(4)和式(5)。通过分析可知:无竖井隧道内 CO 浓度呈线性分布,隧道入口端 CO 浓度最小,而出口端最大;有竖井隧道内 CO 浓度则根据竖井位置分布而变化。

无竖井隧道内 CO 浓度:

$$\delta = 2.778 \times 10^{-9} \frac{N}{Q} \cdot l + \delta_0 \quad (4)$$

有竖井隧道内 CO 浓度:

$$\delta_{n+1} = 2.778 \times 10^{-9} \frac{N}{Q_{n+1}} \cdot L_{n+1} +$$

$$\frac{Q_{n+1} + Q_n - |Q_{n+1} - Q_n|}{2Q_{n+1}} \cdot \delta_n \quad (5)$$

式中: l 为考察位置与入口端的距离,m; Q 为隧道断面风量, m^3/h ; δ_0 为入口端 CO 体积浓度; δ_n 为第 n 段隧道末端 CO 体积浓度。

2 现场实验方案

选取南京玄武湖隧道、通济门隧道和新模范马路隧道 3 条典型隧道进行研究,玄武湖隧道采用的是普通灯光照明和机械通风的方式,照明灯具沿隧道方向配置间距为 4 m;通济门隧道采用的是普通灯光照明和竖井自然通风的方式,照明灯具沿隧道方向配置间距为 6 m;新模范马路隧道采用 LED 灯光照明和竖井自然通风的方式,照明灯具沿隧道方向配置间距为 5 m。隧道内噪声、CO 浓度、CO₂ 浓度、氩离子浓度和照度由现场实测得到,总用电量和照明用电量由隧道运营管理机构提供。

由于客观条件限制,隧道内车流量大,测试人员不能在隧道内随意走动,现场测试时需要用到大量的测试仪器,记录大量的数据,所以测试点只能布置在隧道两侧,并尽量靠近设备房门口,现场测试时将设备平放在设备房门口隧道边上,除自动测试与记录外,测试人员每 30 min 记录一次数据。

照度测试时,每条隧道选取一股车道,在此车道上选取入口段、中间段、出口段和通风竖井段共 4 段进行照度分布测量,每段约长 80 m,每 20 m 选择一个测量断面,共选取 5 个测量断面,分别是断面 1、2、3、4 和 5,另外在出口处和入口处分别选取一个室外测量点,如图 1 所示。



图 1 隧道照度测试断面位置选取示意图(含通风竖井)

$$\mathbf{X}_{3 \times 6}' = \begin{pmatrix} \text{CO 浓度} & \text{CO}_2 \text{ 浓度} & \text{氩离子} & \text{噪声} & \text{总用电量} & \text{单位面积单位照度照明用电量} \\ 11.9 & 924 & 0.3 & 83.2 & 8.03 \times 10^{-3} & 6.51 \times 10^{-5} \\ 2.4 & 499 & 0.2 & 85.3 & 3.87 \times 10^{-3} & 7.72 \times 10^{-5} \\ 2.9 & 572 & 0.2 & 83.4 & 4.52 \times 10^{-3} & 6.13 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

计算样本的样本均值和标准差,得样本均值:

$$\bar{X}'_{j=1} = (11.9 + 2.4 + 2.9)/3 = 5.73, \bar{X}'_{j=2} = 665,$$

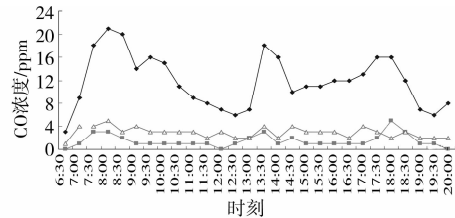
$$\bar{X}'_{j=3} = 0.23, \bar{X}'_{j=4} = 83.9, \bar{X}'_{j=5} = 5.47 \times 10^{-3}, \bar{X}'_{j=6} = 4.45 \times 10^{-3}.$$

样本标准差为

$$S_{j=1} =$$

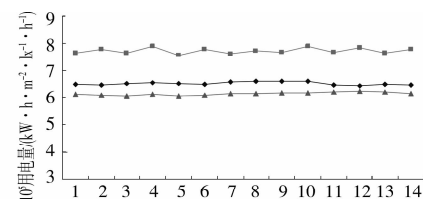
3 实验数据处理分析

3 条隧道 CO 浓度测试均值对比见图 2,3 条隧道平均单位面积单位照度单位时间照明用电量对比见图 3。



注: → 玄武湖隧道 → 通济门隧道 → 新模范马路隧道

图 2 CO 浓度平均值对比



注: → 玄武湖隧道 → 通济门隧道 → 新模范马路隧道

图 3 3 条隧道两次测量平均单位面积单位照度单位时间照明用电量对比

由图 2 可知 3 条隧道的 CO 浓度均低于国家标准,符合规范要求,其中玄武湖隧道 CO 浓度最高,新模范马路隧道次之,通济门隧道最低。说明全暗埋模式、采用机械通风模式的玄武湖隧道,其运行环境效果比采用自然通风模式、并设有通风竖井的通济门隧道和新模范马路隧道要差一些。由图 3 可知 3 条隧道平均单位面积单位照度单位时间照明用电量通济门隧道最高,玄武湖隧道次之,新模范马路隧道最低,说明采用 LED 灯照明模式的能效比采用普通照明模式高。

4 隧道运行环境能效模型的建立

主成分分析是将多指标化为少数几个综合指标的一种统计分析方法,能在变量信息损失较少的前提下得到既综合总体各方面的信息又彼此不相关的新指标,因此被广泛应用于各类专题的综合评价中^[14-15]。

采用 3 条隧道测试得到的各项参数的平均值建立隧道运行环境能效评价模型,建立样本的能效模型矩阵为 $\mathbf{X}' = (\mathbf{X}'_{ij})_{3 \times 6}$:

$$\sqrt{\frac{1}{2} [(11.9 - 5.73)^2 + (2.4 - 5.73)^2 + (2.9 - 5.73)^2]} = 5.64,$$

$$S_{j=2} = 247.4, S_{j=3} = 0.58, S_{j=4} = 1.18, S_{j=5} = 2.24 \times 10^{-3}, S_{j=6} = 3 \times 10^{-4}$$

对本矩阵进行无量纲化,可得标准化阵 $\mathbf{Y} = (\mathbf{Y}_{3 \times 6})$:

$$Y'_{3 \times 6} = \begin{pmatrix} 1.15 & 1.14 & 1.15 & -0.76 & 1.14 & -0.33 \\ -0.62 & -0.73 & -0.58 & 1.15 & -0.72 & 1.12 \\ -0.53 & -0.41 & -0.58 & 0.8 & -0.43 & -0.79 \end{pmatrix}$$

同理可求出该标准矩阵的协方差阵 R, R 的特征值为:

$$\lambda' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0.03 \\ 1.25 \\ 4.72 \end{bmatrix}$$

对应的特征向量为:

$$e' = \begin{bmatrix} -0.4301 & 0.6712 & -0.3401 & 0.1655 & 0.2570 & -0.4396 \\ -0.3870 & -0.1172 & 0.7279 & -0.3179 & 0.1575 & -0.4518 \\ -0.0792 & -0.6586 & -0.4998 & -0.0726 & 0.2967 & -0.4329 \\ 0.0992 & 0.0444 & 0.2223 & 0.3406 & 0.3209 & 0.3729 \\ 0.7832 & 0.2758 & 0.0381 & -0.3119 & 0.1711 & -0.4504 \\ 0.1892 & -0.1550 & 0.2321 & 0.8081 & 0.7214 & 0.2708 \end{bmatrix}$$

故可得协方差阵的特征值为: $\lambda'_1 = 4.72 > \lambda'_2 = 1.25 > \lambda'_3 = 0.03 > 0$

所以特征值相应的累积方差贡献率为:

$$\eta_1 = \lambda'_1 / (\lambda'_1 + \lambda'_2 + \lambda'_3) = 0.787 = 78\%$$

$$\eta_2 = (\lambda'_1 + \lambda'_2) / (\lambda'_1 + \lambda'_2 + \lambda'_3) = 0.995 = 99.5\%$$

根据累积方差累积贡献率大于 85% 的原则,可以建立样品模型的综合评价的第一、第二主成分评价函数:

$$Z'_1 = -0.4396Y_1 - 0.4518Y_2 - 0.4329Y_3 + 0.3729Y_4 - 0.4504Y_5 + 0.2708Y_6$$

$$Z'_2 = 0.2570Y_1 + 0.1575Y_2 + 0.2967Y_3 + 0.5209Y_4 + 0.1711Y_5 + 0.7214Y_6$$

5 隧道运行环境与能效分析

由第一主成分的表达式可以看出,第一主成分主要综合反映了 Y_1, Y_2, Y_3 和 Y_5 这 4 个指标的信息(系数都在负 0.45 左右),而这 4 项系数代表了隧道运行环境测试中的 CO 浓度、CO₂ 浓度、氢离子浓度和单位面积单位时间总用电量的信息,并且这 4 项越小,则 Z'_1 就越大,将协方差阵 $Y'_{3 \times 6}$ 带入到第一主成分评价模型中,可得:

$$Z'_{1\text{玄武湖隧道}} = -2.1886, Z'_{1\text{通济门隧道}} = 1.3033, Z'_{1\text{新模范马路隧道}} = 0.8942$$

所以在第一主成分评价中,通济门隧道的综合评价价值最高,说明 3 条隧道中通济门隧道 CO 浓度、CO₂ 浓度、氢离子浓度和单位面积单位时间总用电量的综合评价最好,新模范马路隧道次之,玄武湖隧道最差。说明通济门隧道运行环境最好,新模范马路隧道次之,玄武湖隧道最差,与数据分析得出的结论一致,说明模型建立比较准确。

在第二主成分的表达式中,主要体现了指标 Y_6 的影响, Y_6 代表了隧道运行环境中的单位面积单位照度照明用电量,即隧道运行环境中的能效因素,并且 Y_6 越小,则 Z'_2 就越小,表示隧道运行照明灯具的单位面积单位照度用电量越小,能效就越高,将协方差阵 $Y'_{3 \times 6}$ 带入到第二主成分评价模型中,可得:

$$Z'_{2\text{玄武湖隧道}} = 0.4295, Z'_{2\text{通济门隧道}} = 0.8374, Z'_{2\text{新模范马路隧道}} = -1.2716$$

由第二主成分分析结果可知,新模范马路隧道综合评价

值最小,玄武湖隧道其次,通济门隧道最大,说明在隧道照明运营中,新模范马路单位面积单位照度能耗最少,玄武湖次之,通济门最大,反映了新模范马路的照明灯具能效最高,与数据分析得出的结论一致。

6 结论

通过对南京 3 条典型隧道内各项参数的测试与用电量的统计,并又等其运行环境与能效进行了对比分析,运用主成分分析进行隧道运行环境能效分析得知通济门隧道运行环境最好、新模范马路隧道能效最高,数据分析与主成分分析法分析结果一致,这说明了主成分分析法在隧道运行环境能效评价中的准确性,并充分论证了 LED 灯照明和通风竖井在城市隧道节能环保中的优越性,对城市隧道的建设具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] Jojo S M, Chow W K. Numerical studies on performance evaluation of tunnel ventilation safety systems[J]. Tunnel and Underground Space Technology, 2003, 18: 435.
- [2] 茅靳丰,黄玉良,朱培根,等. 火灾工况下城市隧道自然通风模型实验[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2008,9(4):357-362.
- [3] Wang Z, Li N. Road tunnel lighting control system model of energy-saving hardware design and implementation [J]. Enterprise Technology Development, 2009,28(4):22-25.
- [4] 刘磊实,林卫. LED 光源在城市隧道照明中的应用与分析[J]. 照明工程学报,2010,3:50-55.
- [5] 陈仲林,胡英奎,刘英婴,等. 道路照明光源的发光效率计算[J]. 灯与照明,2006,30(4):1-2.
- [6] Chen Z L, Hu Y K, Liu Y Y, et al. Road lighting luminous efficiency calculation[J]. Light and lighting, 2006,30(4):1-2.
- [7] Onaygil, Sermin. Determination of the effects of structural properties on tunnel lighting with example from turkey[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003, 18(1): 86-91.
- [8] 张光鹏,雷波. 公路隧道纵向通风神经网络在线控制[J]. 西南交通大学学报,2005,12:765-768.
- [9] 李广平,李志远,邢薇薇. 公路隧道通风节能技术研究[J]. 公路,2011,9:265-267.
- [10] Bickel J O, Kuesel T R, King E H. Tunnel Engineering Handbook[M]. 2ed. New York: Chapman & Hall, 1996:388-389.
- [11] Johannes S. Emission factors from road traffic from a tunnel study(Gubit tunnel, Switzerland)[J]. Atmos Environ, 1998, 32(6):999-1009.
- [12] Steven N R, Ute P, Tom D. Gaseous emission from vehides in a tunnel in vancouver[J]. J Air and Waste Manage Assoc, 1998, 84:604-615.
- [13] JTJ 026-1999 公路隧道通风照明设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [14] 韩星,张脩,张旭. 公路隧道通风需风量计算中车密度系数的讨论[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2008,4:217-220.
- [15] 戴忧华,郭忠印,马艳,等. 高速公路隧道运行环境安全评价指标[J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,38(8): 1171-1176.
- [16] 张生瑞,马壮林. 高速公路隧道交通环境评价指标体系[J]. 长安大学学报:自然科学版,2006,2(2):77-80.