



根据光气候数据确定隧道洞外景物亮度的方法

翁季, 张婷

(重庆大学建筑城规学院, 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室; 重庆 400045)

摘要: 具体某地区隧道洞外景物亮度参考值的确定一直缺乏方便可靠的方法。为了解决这一问题, 根据隧道照明的实际需求, 以重庆地区一年的光气候实测数据为依据, 首先以垂直面照度映射洞外景物亮度, 分析它的各影响因素, 然后建立了不同朝向垂直面转换发光功效和晴朗指数及太阳高度角的数学模型。经过与重庆地区其他年份实测数据的对比, 证明该模型具有较高的精度。基于光气候数据中长期连续的水平太阳辐射及天气状况的观测, 该方法可快速且相对精确地确定洞外景物亮度参考值。

关键词: 洞外景物亮度; 光气候; 发光功效; 晴朗指数; 太阳高度角

中图分类号: TU113.19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)06-0120-08

Method of determining typical elements' luminance at tunnel portals according to the data of luminous climate

Weng Ji, Zhang Ting

(Faculty of Architecture and Urban Planning; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: There is short of reliable methods to determine typical elements' reference luminance at tunnel portals in a certain area. In order to solve this problem, the measured data of luminous climate of a year in Chongqing was firstly used to investigate the reflection of vertical illuminance on the typical elements' luminance. The influencing factors were studied to develop the mathematical models of vertical conversion luminous efficacy and clearness index as well as solar altitude in four directions. Compared with the data collected in another year in Chongqing, model shows relatively high precision. On the base of long-term continuous measurement of solar radiation and weather conditions among the luminous climate data, this method could be used to determine typical elements' reference luminance at tunnel portals effectively and relatively accurately.

Key words: typical elements' luminance at tunnel portals; luminous climate; luminous efficacy; clearness index; solar altitude

收稿日期: 2015-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(51278507)

作者简介: 翁季(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事建筑技术科学研究, (E-mail) wengji0403@163.com.

Received: 2015-08-28

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51278507)

Author brief: Weng Ji (1972-), professor, doctoral supervisor, main research interests: architectural technology and science, (E-mail) wengji0403@163.com.

在隧道照明设计方法中,不论是察觉对比法还是 k 值法等,都需要确定隧道洞外景物亮度这一设计的基础参数。CIE88:2004^[1]中建议用一年中至少出现75h的最高洞外景物亮度值作为等效光幕亮度 L_{seq} 的计算参考值,这实际上是一个累积频率的概念。从理论上讲,这种参考值的确定,需要对隧道洞外进行至少长达一年的长期连续的测试,再加上每个隧道洞外的具体情况又不一样,所以从工程实施角度来说非常困难。虽然CIE 88:2004和中国的公路隧道照明设计规范^[2]均给出了不同朝向的景物亮度参考值,但实际上,不同的地理位置、不同的光气候条件以及洞口要素的不同材质和反射特性,都会致使洞外景物表面亮度值差异很大^[3],目前缺乏长期且大范围的洞外景物亮度观测数据的积累。因此,规范建议的景物亮度参考值缺乏理论和实测依据,无法快速且相对精确地确定某一具体地点累积频率下的洞外景物亮度参考值。

景物表面亮度、照度及太阳辐射之间存在相应的转换关系。光照度和辐射关系的研究主要集中在各种光气候条件下垂直面照度与垂直面太阳辐射之间的关系^[4-7]和水平面照度与水平太阳辐射之间的关系^[8-11],并建立了各种光气候条件下水平面照度和水平太阳辐射的数学模型,以及从水平面照度到垂直面照度的转换^[12]。而对于垂直面照度和水平太阳辐射,二者之间的关系非常复杂,影响因素很多,如直射辐射、散射辐射、地面反射辐射^[13-14]、地理纬度、赤纬角、太阳高度角、日序、朝向、天气状况等,目前相关研究较少,也缺乏更为全面系统的光气候观测数据。笔者在隧道照明设计背景下研究垂直面照度和太阳辐射之间的关系,根据垂直面照度的影响因素分析和数据的筛选,建立相应的数据模型以确定不同朝向的垂直面照度,结合景物反射特征和累积频率的概念便可快速确定隧道洞外景物亮度参考值,并满足实际工程应用的精度。

1 研究思路

隧道洞外景物除了路面、天空外,均可假设为均匀漫反射的垂直表面,其表面照度水平即反映表面亮度水平,二者存在正比关系,故研究隧道洞外景物亮度可转化为研究隧道洞外垂直面照度。累积频率概念下的垂直面照度和当地的太阳辐射有着密切关

系,且中国各地的气象站对太阳辐射和天气状况等都有长期连续的观测数据。根据太阳辐射确定垂直面照度,进而确定洞外景物亮度,这种方法既有实测数据可依,也具有实际可操作性。因此,垂直面照度和水平太阳辐射的关系是笔者的研究重点。

借鉴发光功效^[8]的概念,将垂直面照度 E_v 和水平太阳辐射 E_h 的比值定义为垂直面转换发光功效 K_v ,即

$$K_v = E_v/E_h \quad (1)$$

从 K_v 的定义不难看出,只要能确定发光功效 K_v 和水平太阳辐射 E_h ,就能确定垂直面照度 E_v 。因此, K_v 是根据光气候数据确定隧道洞外景物亮度的关键参数。全面的光气候数据资料较为有限,尤其是涉及到垂直面照度的数据,重庆地区仅在20世纪90年代初进行过系统、连续观测,虽然数据年代较为久远,但笔者旨在探寻规律以提供一种相对精确的确定方法。基于重庆地区1991年每隔1min的连续光气候观测数据^[15],从隧道照明工程应用的角度出发,研究垂直面照度的影响因素,确定建立 K_v 模型的变量,根据光气候数据寻找特定天气状况和特定时段下 K_v 和变量间的关系,以期得到能满足工程应用、较为精确的数学模型,并用1992年的数据进行验证,以此根据光气候数据确定隧道洞外景物亮度。

2 垂直面照度的影响因素

利用重庆地区1991年的光气候数据研究垂直面照度的变化规律,分析累计频率概念下垂直面照度较高值出现时的相关因素,并选取其中的主要参数作为变量,以便建立合理的数学模型。

2.1 朝向

针对东、西、南、北4个朝向的垂直面照度进行一整年的数据整理,分别按照照度值从大到小降序排列,统计出4个朝向垂直面照度在一年中出现的累积频率,见图1。图1表明,4个朝向的照度最大值差异显著,以北向最低,西向最高,东向南向接近。对于累积出现75h的垂直面照度参考值,从图中看出,从小到大依次为北向、南向、东向、西向。因此,朝向对垂直面照度变化规律影响巨大,故4个朝向应区别对待,分别研究。

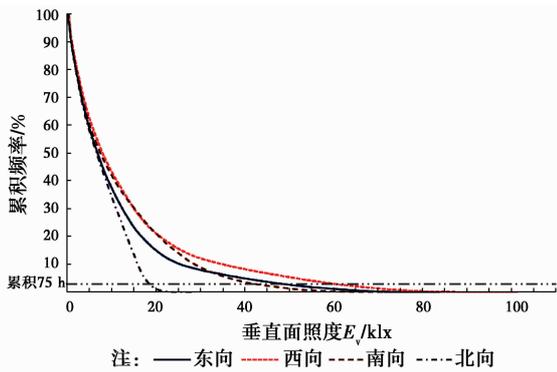


图 1 不同朝向垂直面照度一年中出现的累积频率
Fig. 1 Cumulative frequency of vertical illuminance in four orientations of a year

2.2 太阳高度角

对 4 个朝向的全年垂直面照度在同一太阳高度角时取平均,得到垂直面照度在全天候条件下随太阳高度角的变化规律,如图 2。图 2 表明,对于南、北向,垂直面照度在正午(重庆地区为 13 时左右)即太阳高度角达到最大时也同步达到最大,并以此为轴上、下午对称下降。而对于东西向,最大值在上午或下午达到,其变化趋势大概以正午时为轴呈对称分布,与太阳高度角的变化并不同步。太阳高度角所反映的因素其实是综合的,其计算式为^[15]

$$\sin h_s = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \Omega \quad (2)$$

式中: h_s 为太阳高度角; ϕ 为地理纬度; δ 为赤纬角; Ω 为时角。由式(2)可以看出,地理纬度、赤纬角、时角和高度角都是相互联系的。所在地区决定了地理纬度,月份和日期(即日序)决定了赤纬角,在这两者都一定的情况下,时间(决定时角)和太阳高度角存在对应关系。所以对某确定地区而言,太阳高度角综合反映了月份、日期、时间等因素,是能影响垂直面照度的重要参数,故在数据拟合时作为自变量考虑。

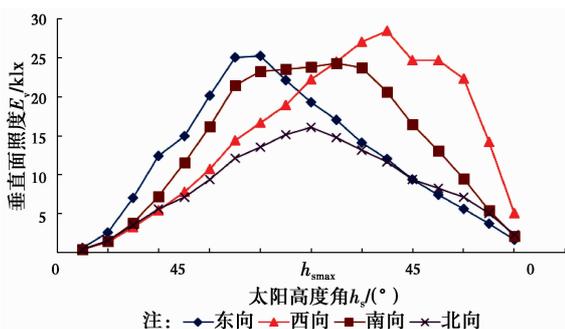


图 2 垂直面照度随太阳高度角的变化规律
Fig. 2 The changing rule of vertical illuminance with solar altitude

2.3 天气状况

天气状况作为光气候资料的重要参数,对隧道外的照度、亮度值都有重大影响,且 4 个朝向上都有类似影响。以西向为例,选取累积出现 75 h 的最大垂直面照度并统计它们所处的天气状况,图 3 表明日面状况为 \odot^2 占到 65%, \odot 次之,且云量越少的天气状况出现次数越多^[16]。总的来说,天气状况越接近全晴天,垂直面照度值最高值的出现概率就越大。

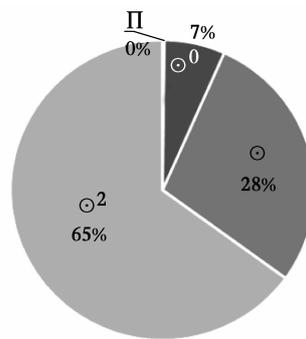


图 3 西向垂直面照度累积频率下的日面状况分布
Fig. 3 Sun conditions distribution of western vertical illuminance under the cumulative frequency

日面状况、云量、云状等因素综合反映了天气状况,引入晴朗指数^[17-18]这一参数以便定量分析。天空晴朗指数 k_t 定义为:

$$k_t = E_e / E_{et} \quad (3)$$

式中: k_t 为晴朗指数; E_e 为水平太阳辐射量, W/m^2 ; E_{et} 为地外辐射量, W/m^2 , 可近似地看作常量, $E_{et} = 1\ 367\ W/m^2$ 。晴朗指数 k_t 即太阳经过大气云层的总辐射量与地外太阳总辐射量的比值,综合地反映了天气状况。这一参数也将作为数据拟合时的另一重要自变量。

上述研究表明,累积出现 75 h 的垂直面照度参考值在各个朝向并不相同,故 4 个方向分别建立模型,太阳高度角和晴朗指数作为影响垂直面照度的重要参数,选取它们为垂直面转换发光功效模型的自变量。

3 垂直面转换发光功效模型的建立

3.1 数据处理

在进行数据拟合之前,由于全年连续观测数据量巨大,需要对数据进行筛选和整理。根据隧道照明设计的要求,分析并筛选出累积频率概念下洞外

景物垂直面照度较高值出现的月份、时间,以及天气状况。

对4个朝向的全年垂直面照度在各月取平均,得到垂直面照度在全天候条件下随月份的变化规律,如图4,以北向为例,月平均照度最高值出现在5、6、7、8、9这几个月份,尤其以6、7、8这3个月份最为集中,其他月份基本成对称趋势依次降低,4个朝向基本遵循同一规律。说明夏季的隧道洞外垂直面照度普遍高于其他季节,累积75h的最大垂直面照度值基本上出现在6月—8月。

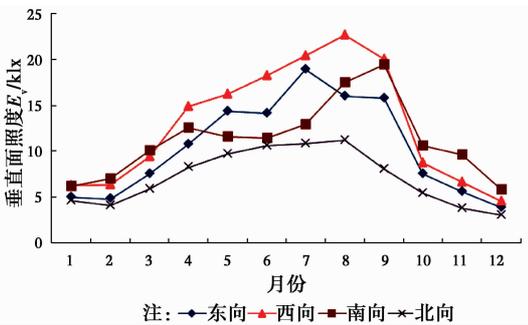


图4 垂直面照度随月份的变化规律

Fig. 4 The changing rule of vertical illuminance with month

图5所示4个朝向的垂直面照度随时间的变化规律存在明显差异。对于南北向,12:00—14:00是垂直面照度高值出现的集中时间,而对于东、西向,东向高值的出现集中在9:00—11:00,西向则是在15:00—17:00,这是太阳所在方位决定的。在数据拟合时为了探寻规律,4个朝向上前后各拓展了1h的数据。

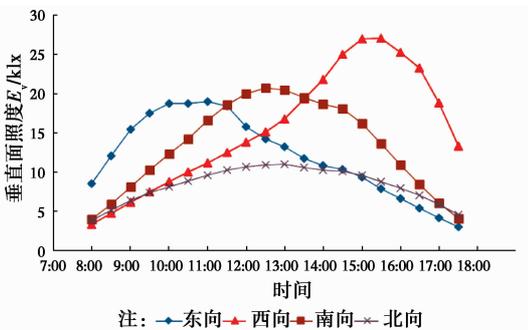


图5 垂直面照度随时间的变化规律

Fig. 5 The changing rule of vertical illuminance with time

天气状况越接近全晴天,日面状况为 \odot^2 时垂直面照度最高值出现的概率就越大。综合起来,在数据拟合前筛选出6、7、8三个月日面状况为 \odot^2 的晴天,东向选取上午8:00—12:00,西向选取下午14:00—

18:00,南、北向选取11:00—15:00的相关数据。

3.2 重要参数的相关性分析

为准确建立垂直面转换发光功效模型,先对两个重要参数做相关性分析,如表1。按月份、时间、天气状况筛选出隧道照明中不利情况的数据,分析表明,太阳高度角和晴朗指数对各朝向垂直面转换发光功效都有显著相关性。但相对而言,对于东、西向,太阳高度角的影响大于晴朗指数;对于南、北向,相比晴朗指数,太阳高度角的影响并不明显。故在东、西向上对垂直面转换发光功效进行太阳高度角和晴朗指数这2个参数的拟合,南、北向则对垂直面转换发光功效进行晴朗指数的拟合。

表1 垂直面转换发光功效和两个参数间的相关系数及显著性

Table 1 The correlation coefficient and significance between vertical conversion luminous efficacy and two important parameters

垂直面转换发光功效	太阳高度角 $h_s / (^\circ)$	晴朗指数 k_t
东向垂直面转换发光功效 K_{ve}	-0.800	-0.638
西向垂直面转换发光功效 K_{vw}	-0.902	-0.739
南向垂直面转换发光功效 K_{vs}	-0.140	-0.633
北向垂直面转换发光功效 K_{vn}	-0.144	-0.903

注:在0.01水平上显著相关。

3.3 模型的建立

根据月份、时间、天气状况所筛选出的相关数据包括水平太阳辐射、东西南北向垂直面照度、太阳高度角,将水平太阳辐射和垂直面照度带入式(1)得到垂直面转换发光功效,将水平太阳辐射代入式(3)计算出天空晴朗指数 k_t ,并对所有数据进行分段整理和无效数据清理。将太阳高度角 h_s 的正弦值和晴朗指数作为东、西向模型的横坐标值,东、西向垂直面转换发光功效 K_v 作为纵坐标值,图6(a)、(b)分别显示了东、西向垂直面转换发光功效和太阳高度角及晴朗指数的关系,经拟合得到的东、西向垂直面转换发光功效的计算模型分别为

$$K_{ve} = -517.50 + 427.34/\sin h_s - 74.86/(\sin h_s)^2 + 969.72 k_t - 1066.32 k_t^2 \quad (4)$$

$$K_{vw} = -266.60 + 181.26/\sin h_s - 21.91/(\sin h_s)^2 + 815.40 k_t - 994.42 k_t^2 \quad (5)$$

将晴朗指数 k_t 作为南、北向模型的横坐标值,

图 6(c)、(d)分别显示了南、北向垂直面转换发光功效和晴朗指数的关系,经拟合得到的南、北向垂直面转换发光功效的计算模型分别为

$$K_{vs} = 85.04 - 112.65 k_t + 51.54 k_t^2 \quad (6)$$

$$K_{vn} = 80.10 - 171.93 k_t + 117.27 k_t^2 \quad (7)$$

东、西、南、北向 4 个计算模型的拟合优度 R^2 分别为 0.994 8, 0.997 3, 0.882 6, 0.965 7, 表明拟合结果较为理想。

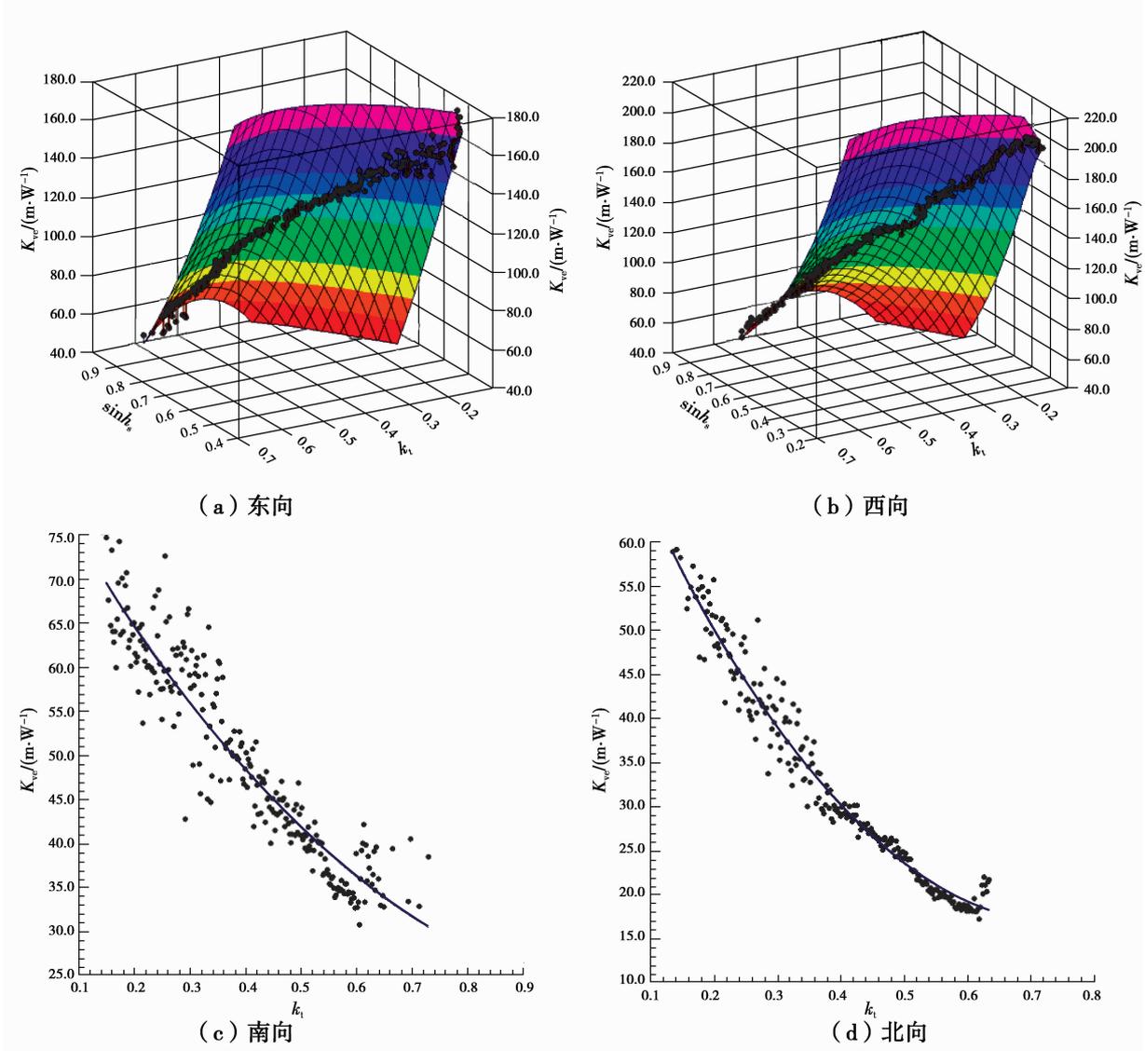


图 6 垂直面转换发光功效 K_v 的模型

Fig. 6 The models of vertical conversion luminous efficacy

4 模型可靠性验证和误差分析

4.1 与重庆地区 1992 年实测数据的对比

模型拟合过程是基于重庆地区 1991 年的连续观测,为验证模型的可靠性,现用垂直面转换发光功效模型与重庆地区 1992 年的连续观测数据实测值进行比较,对比结果如图 7。将计算值和实测值进

行比对后得到的平均误差 MBE 和均方根误差 RMSE 的绝对值和相对百分比如表 2 所示。可以看出,4 个方向的平均误差均控制在 10% 以内,均方根误差均控制在 20% 以内(或左右)。因此,该模型具有较高的精度,有一定的可靠性和实用性,能够满足隧道照明等实际工程应用。

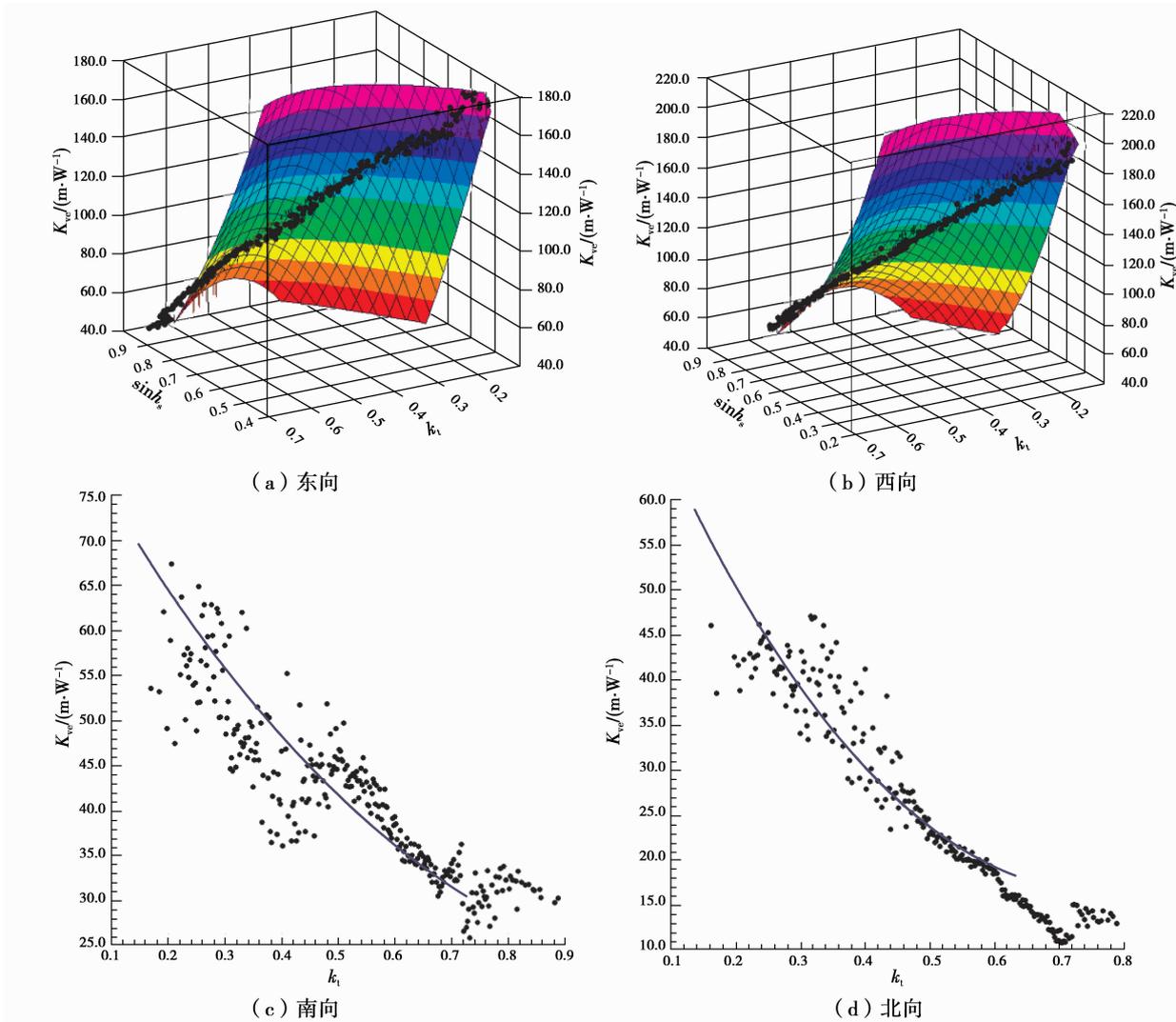


图7 垂直面转换发光功效的自拟模型和1992年实测值比较

Fig. 7 The comparison of vertical conversion luminous efficacy fitting model and the measured values of 1992

表2 模型计算值和实测值的误差分析

Table 2 Error analysis of model calculation values and the measured values

方向	MBE/ (lm · W ⁻¹)	MBE 相对百 分比/%	RMSE/ (lm · W ⁻¹)	RMSE 相对 百分比/%
东向	10.20	5.38	16.79	17.86
西向	6.63	2.02	19.82	17.41
南向	0.44	0.74	4.82	11.28
北向	0.94	8.67	3.88	20.03

4.2 误差分析

分析研究过程中有可能产生误差的环节后发现,误差的来源主要包括以下几个方面:

1) 原始实测数据误差

分析所用原始实测数据可能存在一定的误差。在连续两年多的光气候数据观测过程中,不管是仪

器自动记录并输出的辐射值照度值,还是人工记录的天气状况,都不可能做到完全精准客观,前者在低值时存在明显的不正常波动,后者由于加入了人为观测的偶然因素一定是存在误差的。故在数据处理的过程中对于存在明显缺陷的无效数据予以清理,以求最大程度地还原真实观测情况。

2) 数据点选取的误差

基于隧道照明的实际应用背景,仅选取了一定月份、时间和天气状况下的数据,即垂直面照度可能出现较高值的相关数据进行拟合。但实际上洞外景物亮度或照度的高值不尽然出现在所选取的6、7、8这3个月的晴天中,例如还可能出现在5月或9月甚至其他月份,阴天在云量很多的情况下由于散射很大也可能出现高值,所以,由于数据点的选取导致拟合结果可能存在误差,但为了实际应用必然是考

虑大部分不利情况而忽略特殊情况。

3) 光气候变化

由于所依据的观测数据距今已有 20 多年的时间,这期间中国乃至全球的光气候都有一定的变化,尤其是随着工业化进程的加速,空气中各种影响太阳辐射和光照度的粒子都在增加,所以,所建立的模型与现今的实际值存在一定偏差。但影响是相对的,辐射值和照度值都在变化,发光功效作为二者之比受到的影响是综合的,且所建立的模型旨在提供一种确定洞外景物亮度值的方法,这种转化思路是更为重要的研究意义所在。

5 结 论

1) 从隧道照明工程应用的角度出发,根据重庆地区 1991 年的光气候测试数据,结合朝向、月份、时间、天气状况等因素,得到适合于重庆的特定天气状况和特定时段下 4 个朝向垂直面转换发光功效的数学模型,经过 1992 年光气候测试数据的对比验证,证明该模型具有较高的精度。

2) 垂直面转换发光功效和气象站提供对应的水平太阳辐射数据的乘积即可得垂直面照度的数据库,进而可以统计出累积出现 75 h 的各朝向垂直面参考照度,再结合实地测量的景物反射系数等参数就能得到符合察觉对比法测试要求的隧道洞外景物亮度参考值。这一方法有光气候理论依据,同时具备工程实施可操作性,可快速且相对精确地确定某一具体地区的隧道洞外景物亮度参考值。

3) 由于数据资料有限,研究仅限于重庆地区或晴朗指数分布及地理纬度与重庆相近的地区,对于其他地区,可以在该方法的基础上,根据当地的光气候实测数据确定垂直面转换发光功效的新模型或对重庆地区的模型系数进行修正。

参考文献:

- [1] International Commission on Illumination. CIE 88:2004 Guide for the lighting of road tunnels and underpasses [R]. CIE Central Bureau, Vienna, Austria, 2004.
- [2] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T D70/2-01—2014 公路隧道照明设计细则[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2014.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG/T D70/2-01—2014 Guidelines for design of lighting of highways tunnels [S]. Beijing: China Communications Press, 2014. (in Chinese)
- [3] 孙春红. 基于光气候理论的隧道洞外景物亮度研究[D]. 重庆:重庆大学, 2011.
Sun C H. Research on the luminance of typical elements at tunnel portals based on theory of luminous climate [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011. (in Chinese)
- [4] Li D H W, Lam J C. Predicting vertical luminous efficacy using horizontal solar data [J]. Lighting Research and Technology, 2001, 33(1): 25-42.
- [5] Muneer T, Younes S, Munawwar S. Discourses on solar radiation modeling [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11:551-602.
- [6] Li D H W, Lam J C. Vertical solar radiation and daylight illuminance data for Hong Kong [J]. Lighting Research and Technology, 2000, 32(2): 93-98.
- [7] Li D H W, Lam J C. Measurements of solar radiation and illuminance on vertical surfaces and daylighting implications [J]. Renewable Energy, 2000, 20: 389-404.
- [8] 王爱英,金海,王洪珍,等. 用太阳辐射转化法计算室外照度值[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(3): 88-93.
Wang A Y, Jin H, Wang H Z, et al. Obtaining outdoor illuminance values with solar irradiation transformation models [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(3):88-93. (in Chinese)
- [9] 姚万祥,李峥嵘,李翠,等. 各种天气状况下太阳辐射照度与太阳光照度关系[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2013, 41(5):784-787.
Yao W X, Li Z R, Li C, et al. Relationship between solar radiance and solar illuminance under all sky types [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(5):784-787. (in Chinese)
- [10] 宋贤杰,胡荣生. 光照度和辐照度的转换[J]. 光源与照明, 1997(1): 20-21.
Song X J, Hu R S. The conversion of illuminance and irradiance [J]. Lamps and Lighting, 1997(1):20-21. (in Chinese)
- [11] 鞠喜林. 晴空条件下光照度和辐射照度的关系[J]. 太阳能学报, 1999, 20(2):190-195.
Ju X L. Relationship between illuminance and irradiance of the clear sky conditions [J]. Acta

- Energiae Solaris Sinica, 1999, 20(2):190-195. (in Chinese)
- [12] 奚于成, 杨光璇, 张青文. 从水平面照度到垂直面照度转换系数的探讨[J], 照明工程学报, 1994, 5(3): 34-37.
Xi Y C, Yang G X, Zhang Q W. Discussion from horizontal illumination to vertical illumination conversion coefficient [J]. China Illuminating Engineering Journal, 1994, 5(3):34-37. (in Chinese)
- [13] de Rosa A, Ferraro V, Kaliakatsos D, et al. Calculating diffuse illuminance on vertical surfaces in different sky conditions [J]. Energy, 2008, 33(11):1703
- [14] Robledo L, Soler A. Modeling the luminous efficacy of diffuse solar radiation on inclined surfaces for all sky conditions [J]. Energy Conversation and Management, 2003, 44(1):177.
- [15] 柳孝图. 建筑物理[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [16] 张青文,杨春宇,胡英奎,等. 重庆地区的光气候研究[J]. 照明工程学报, 2011,22(5):21-28.
Zhang Q W, Yang C Y, Hu Y K, et al. Study on daylight climate of Chongqing [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2011, 22(5):21-28. (in Chinese)
- [17] Younes S, Muneer T. Improvements in solar radiation models based on cloud data [J]. Building Services Engineering Research & Technology, 2006, 27(1):41-54.
- [18] Muneer T, Munawwar S. Improved accuracy models for hourly diffuse solar radiation [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2005, 128(1):104-117.

(编辑 胡英奎)