

基于 CIE 天空模型计算任意时间天空亮度分布

吴玉香¹ 刘春燕¹ 文尚胜^{2,3*}

¹ 华南理工大学自动化科学与工程学院, 广东 广州 510641
² 华南理工大学材料科学与工程学院, 广东 广州 510641
³ 华南理工大学发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510641

摘要 掌握任意时间天空亮度的分布情况是充分利用自然光、实现智能照明的基础。以国际照明委员会(CIE)15种天空类型及其给出的天空亮度计算公式为基础,对天空亮度计算公式中各个参数的计算方法进行了研究。使用这一计算方法,只需知道当地的经纬度、日期以及当前天空属于哪种天空类型,就可计算出其任意时间的天空亮度分布。从已有的可靠的天空亮度分布实测数据出发,将天空亮度分布的计算值与实测值进行比较,分析了计算值与实测值之间的误差。结果表明,通过计算得出的天空亮度分布数据能较好地与实测数据相吻合,因此可以用天空亮度分布的计算值代替实测值作为节能调光的重要数据。

关键词 大气光学;天空亮度分布;参数计算;CIE 天空模型

中图分类号 P422 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.1101004

Calculation of Sky Luminance Distribution at Arbitrary Time Based on the CIE Sky Model

Wu Yuxiang¹ Liu Chunyan¹ Wen Shangsheng^{2,3}

¹ College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China
² School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China
³ State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China

Abstract Knowing the distribution of sky luminance at any time is the foundation to make full use of natural light and realize intelligent lighting. Based on the CIE 15 sky types and the sky luminance formula, calculation methods of the parameters in the sky luminance formula are studied. Using this method, we only need to know the local latitude, date and sky type that the sky belongs to, and the distribution of sky luminance at any time can be calculated. Based on the existing reliable measured data of sky luminance distribution, the calculated values of the sky luminance distribution and the measured values are compared, and the differences between the calculated and measured values are analyzed. The results show that, the calculated data of the sky luminance distribution are in good agreement with the measured data, so the measured data can be replaced by the calculated data as important data for the energy-saving light regulating.

Key words atmospheric optics; sky luminance distribution; calculation of parameter; CIE sky model

OCIS codes 010.1290; 010.1310; 350.1260; 350.4600

1 引言

目前,国内外有很多专家学者对发光二极管

(LED)技术进行了大量的研究工作,取得了丰富的研究成果,促进了 LED 技术的不断发展和成

收稿日期: 2014-04-14; 收到修改稿日期: 2014-07-14

基金项目: 广东省科技厅重大科技专项(2011A080801016)、广东省战略性新兴产业专项(2011A081301017, 2012A080304012, 2012A080304001)、广州市科技计划项目(2013J4300021)

作者简介: 吴玉香(1968—),女,教授,研究生导师,主要从事非线性系统的自适应神经网络控制、机器人控制及转子系统故障诊断等方面的研究。E-mail: xyuwu@scut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: shshwen@scut.edu.cn

熟^[1-6]。对于室内空间而言,掌握室内天然光照度分布的规律,就相当于间接得到了人工照明的补偿控制策略,然后利用 LED 技术,对 LED 灯进行调光控制,可减少人工照明用电,达到节能的目的。由此可知,对室内天然光照度分布的精确计算是实现绿色节能照明的关键之一,而室内天然光照度分布可通过计算机编程计算得到。

天空亮度分布是利用计算机计算室内天然光照度的重要数据。这些数据可以通过仪器设备观测得到,也可以通过计算求出。1991 年,位于欧洲、北美、日本和中国的国际天然光观测项目(IDMP)观测站对天空亮度进行了测量。近些年,香港^[7-8]、新加坡^[9]、曼谷^[10]、英格兰^[11]、法国^[12]和西班牙^[13]公布了一些天空亮度测量数据以供研究使用。然而,纵观全球,现在只有少数这样的观测站继续进行着天空亮度的测量工作,并且实测将消耗大量成本。因此,就目前来说,通过测量仪器得到数据是不大实际的。如果有一种方法能够精确计算天空亮度分布,那么这将给计算室内天然光照度带来巨大意义。

Perez 模型^[14]、Igawa 模型^[15]和国际照明委员会(CIE)标准天空模型^[16]是三种著名的计算天空亮度分布的模型。为了比较 Perez 模型、Igawa 模型和 CIE 标准天空模型对天空亮度计算的准确性,Ferraro 等^[17]做了相关的研究工作,最后得出,在这几种模型中,CIE 标准天空模型对天空亮度的计算更加准确。

2004 年 CIE 和国际标准化组织(ISO)根据不同国家地区所做的相关基础研究,将不同的天空亮度模型总结成 15 种不同的标准天空类型,即 CIE 标准天空模型,并且给出了计算天空亮度的计算公式以及公式中参数的物理意义,但是没有具体给出公式中参数的计算方法。

为了计算天空亮度分布,公式中参数的计算显得至关重要。天空亮度分布是随时间变化的,为了更好地利用自然光进行节能控制,需要掌握每时每刻的天空亮度分布情况。因此,如果推导出来的天空亮度分布的计算公式以时间 t 为自变量,那么这将对节能控制起到巨大作用。本文从这一思路出发,推导出了以时间为自变量的天空亮度分布计算公式。

2 CIE 天空模型及天空亮度计算公式

2.1 CIE 天空模型

CIE 标准一般天空的抽象和角度定义如图 1 所

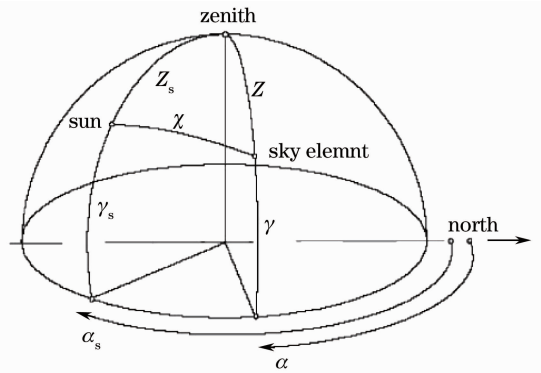


图 1 CIE 标准一般天空的抽象

Fig. 1 CIE standard general sky abstract

示。图形中参数定义如下: Z_s 为太阳与天顶角距离, Z 为计算点与天顶角距离, χ 为计算点与太阳之间的最短角距离, γ 为计算点高度角, γ_s 为太阳高度角, α 为计算点方位角, α_s 为太阳方位角。

CIE 将不同的天空亮度模型总结成 15 种不同的标准天空类型,这 15 种天空类型的分类方法如表 1 所示。

2.2 CIE 天空模型类型的确定

CIE 标准天空模型包含 15 种天空类型,确定天空模型的类型是计算任意时间天空亮度分布的前提。

2.2.1 通过天空亮度测量仪确定天空模型的类型

利用天空亮度测量仪对当前天空亮度分布进行测量^[18],将测量到的数据分别与 CIE 15 种天空类型的天空亮度分布的计算数据进行比较,分别求出它们的均方根值,取均方根值最小的那个天空类型为所需类型。

此种方法与所期望的不通过测量仪器得到天空亮度分布、降低成本似乎是相矛盾的,但是,在一般情况下,天空类型不会发生突变,一种天空类型都会维持一段时间。因此可以每隔 1 h 或者 0.5 h 时间才利用天空亮度测量仪对天空亮度测量一次,而这中间的 1 h 或 0.5 h 时间间隔的天空亮度分布则通过本文所推导的计算公式计算。在天气比较稳定的情况下,甚至可以半天或者一天才测量一次。这样,不用时时刻刻都让测量仪处于工作状态,也能在一定程度上达到降低成本的目的。

2.2.2 根据天空指数 S_i 的值确定天空模型的类型^[17]

此种方法根据 Igawa 天空指数 S_i 来确定天空模型的类型。如果把 CIE 天空模型分为表 1 的 15 种天空类型, N 对应表 1 天空类型,那么当 $S_i \leq 0.2$

表 1 15 类天空类型的分类方法

Table 1 Classification method of 15 sky types

Type	Coefficient <i>a</i>	Coefficient <i>b</i>	Coefficient <i>c</i>	Coefficient <i>d</i>	Coefficient <i>e</i>	Sky luminance distribution
1	4.0	-0.70	2	-1.0	0	CIE standard overcast sky, luminance towards the zenith is sharp gradient, but all sides are the same
2	4.0	-0.8	0	-1.5	0.15	Overcast sky luminance is sharp gradient, and the side towards the sun is a bit brighter
3	1.1	-0.8	2	-1.0	0	Overcast sky luminance is gentle gradient, and all sides are the same
4	1.1	-1.0	0	-1.5	0.15	Overcast sky luminance is gentle gradient, and the side towards the sun is a bit brighter
5	0	-1.0	2	-1.0	0	Well-distributed sky
6	0	-1.0	5	-1.5	0.15	Part of the sky has clouds, and luminance towards the zenith is not gradient
7	0	-1.0	10	-2.5	0.30	Part of the sky has clouds, and sides around the sun are a bit brighter
8	0	-1.0	2	-3.0	0.45	Part of the sky has clouds, and luminance towards the zenith is not gradient, but there is obvious aura
9	-1.0	-1.0	5	-1.5	0.15	Part of the sky has clouds, and the sun cannot be seen
10	-1.0	-0.55	10	-2.5	0.30	Part of the sky has clouds, and positions around the sun are bright
11	-1.0	-0.55	10	-3.0	0.45	In white clear sky, there is obvious aura
12	-1.0	-0.32	10	-3.0	0.45	In CIE standard clear sky, the clear atmosphere can be seen
13	-1.0	-0.32	16	-3.0	0.30	In CIE standard clear sky, the turbid atmosphere can be seen
14	-1.0	-0.15	16	-3.0	0.30	In cloudless turbid sky, a wide range of aura can be seen
15	-1.0	-0.15	24	-2.8	0.15	In white turbid clear sky, a wide range of aura can be seen

时, $N = 1$; 当 $0.2 < S_i \leq 2$ 时, $\tilde{N} = 14.558344 + 6.9639239 \times \ln^2(S_i) - \frac{6.4914481}{S_i}$, N 取最接近于 \tilde{N} 的整数; 当 $S_i > 2$ 时, $N = 15$ 。

天空指数 S_i 的计算公式为

$$S_i = K_c + C_{le}^{0.5}, \quad (1)$$

式中 K_c 为晴朗天空指数 (dear sky index), 其计算公式为

$$K_c = \frac{G}{G_{go}}, \quad (2)$$

C_{le} 为无云比率, 其计算公式为

$$C_{le} = \frac{1 - C_e}{1 - C_{es}}, \quad (3)$$

(2) 式中 G 为水平面辐照度, G_{go} 为标准辐照度, 其计

算公式为

$$G_{go} = \frac{1148.28}{m} \exp(-0.0675m), \quad (4)$$

(3) 式中 C_e 为有云比率, 其计算公式为

$$C_e = \frac{G_d}{G}, \quad (5)$$

C_{es} 为标准晴空有云比率, 其计算公式为

$$C_{es} = 0.01299 + 0.07698m - 0.003857m^2 + 0.0001054m^3 - 0.00000103m^4, \quad (6)$$

(4) 式和 (6) 式中 m 为相对空气质量, 其计算公式为

$$m = \frac{1}{\sin \gamma_s + 0.15(\gamma_s + 3885)^{-1253}}, \quad (7)$$

(5) 式中 G_d 为水平面漫射辐照度。

2.3 天空亮度计算

CIE 给出的天空亮度为^[16]

$$L_a = \frac{\left\{ 1 + c \left[\exp(d \cdot \chi) - \exp\left(d \cdot \frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 \chi \right\} \cdot \left[1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\cos Z}\right) \right]}{\left\{ 1 + c \left[\exp(d \cdot Z_s) - \exp\left(d \cdot \frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 Z_s \right\} \cdot [1 + a \cdot \exp b]} \cdot L_z, \quad (8)$$

式中 L_a 为计算点亮度, L_z 为天顶亮度, a, b, c, d, e 为标准 15 种天空类型中的参数。CIE 给出了 a, b, c, d, e 的取值方法, 其取值见表 1。

下文将介绍求取(8)式中参数的方法。

2.3.1 太阳高度角 γ_s 的计算

应用球面三角形余弦公式, 结合图 2, 可以推出任意时刻太阳高度 γ_s 的计算式为

$$\begin{aligned} \cos(90^\circ - \gamma_s) &= \cos(90^\circ - \varphi) \cdot \cos(90^\circ - \delta) + \\ \sin(90^\circ - \varphi) &\cdot \sin(90^\circ - \delta) \cdot \cos h, \end{aligned} \quad (9)$$

化简后得太阳高度角 γ_s 为

$$\gamma_s = \arcsin(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos h), \quad (10)$$

式中 φ 为计算点纬度, 计算点确定以后则 φ 为一常数, δ 为太阳赤纬, 其计算式为^[19]

$$\begin{aligned} \delta &= 0.3723 + 23.2567 \sin \theta + 0.1149 \sin 2\theta - \\ &0.1712 \sin 3\theta - 0.758 \cos \theta + \\ &0.3656 \cos 2\theta + 0.0201 \cos 3\theta, \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $\theta = \frac{2\pi(N_1 - N_0)}{365.2422}$, $N_0 = 79.6764 + 0.2422 \times$

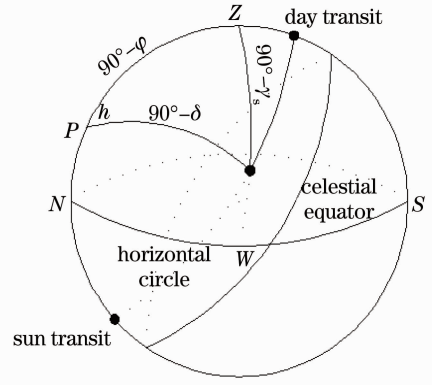


图 2 太阳高度角的计算

Fig. 2 Calculation of the solar altitude

($Y-1985$)-INT[($Y-1985$)/4], INT 表示取整数部分, Y 为年份, N_1 为积日。因此, 当年份日期确定以后, δ 也是一个常数。

h 为太阳时角。 $h = 15(S - 12)$,

$$S = t \pm [4 \times (L_{st} - L_{log})] / 60 + E_t / 60, \quad (12)$$

式中 S 为太阳时, t 为当地标准时, L_{st} 为当地标准时根据的经度, L_{log} 为地方经度, 式中“+”号适用西半球, “-”号适用东半球为^[20]。其中:

$$E_t = 0.0028 - 1.9857 \cdot \sin \theta + 9.9059 \cdot \sin 2\theta - 7.0924 \cdot \cos \theta - 0.6882 \cdot \cos 2\theta. \quad (13)$$

综上, 太阳高度角 γ_s 为

$$\gamma_s = \arcsin \left\{ \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \left\{ 15 \cdot \left[t \pm \frac{4}{60} \cdot (L_{st} - L_{log}) + \frac{0.0028 - 1.9857 \cdot \sin \theta + 9.9059 \cdot \sin 2\theta - 7.0924 \cdot \cos \theta - 0.6882 \cdot \cos 2\theta}{60} \right] - 12 \right\} \right\}. \quad (14)$$

2.3.2 太阳方位角 α_s 的计算

太阳方位角即太阳所在的方位, 指太阳光线在地平面上的投影与当地子午线的夹角, 可近似地看作是竖立在地面上的直线在阳光下的阴影与正南方的夹角。方位角以正南方向为零, 向西逐渐变大, 向东逐渐变小, 直到在正北方合在 $\pm 180^\circ$ 。

按以上定义, 太阳方位角 α'_s 为^[19] $\cos \alpha'_s = \frac{\sin \gamma_s \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_s \cdot \cos \varphi}$ 。因此:

$$\alpha'_s = \arccos \left(\frac{\sin \gamma_s \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_s \cdot \cos \varphi} \right). \quad (15)$$

但是 CIE 定义太阳方位角 α_s 以正北方为零, 按顺时针方位角逐渐变大, 其取值范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。因此, 由(14)式计算出来的需经过以下调整: 当时间为上午时的太阳方位角 α_s 为

$$\alpha_s = \pi - \arccos \left(\frac{\sin \gamma_s \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_s \cdot \cos \varphi} \right), \quad (16)$$

当时间为下午时的太阳方位角 α_s 为

$$\alpha_s = \pi + \arccos \left(\frac{\sin \gamma_s \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_s \cdot \cos \varphi} \right). \quad (17)$$

2.3.3 天空元与太阳之间的最短角距离 χ 的计算
根据球面三角形余弦定理同样可得 χ 的计算式为

$$\chi = \arccos[\cos Z_s \cdot \cos Z + \sin Z_s \cdot \sin Z \cdot \cos(\alpha - \alpha_s)], \quad (18)$$

式中 $Z = \frac{\pi}{2} - \gamma, Z_s = \frac{\pi}{2} - \gamma_s$, 因此有

$$\chi = \arccos\left[\cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_s\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) + \sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_s\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) \cdot \cos(\alpha - \alpha_s)\right] = \arccos[\sin \gamma_s \cdot \sin \gamma + \cos \gamma_s \cdot \cos \gamma \cdot \cos(\alpha - \alpha_s)]. \quad (19)$$

2.3.4 天顶亮度 L_z 的计算

天顶位于观察者正上方处的天球点,天顶对应天球上的坐标与观察者所在的位置,与时间有关。天顶处的亮度即为天顶亮度。

天顶亮度 L_z 的计算式如下^[21]:

$$L_z = \exp(a_0 + a_1 \cdot \gamma_s + a_2 \cdot \gamma_s^2 + a_3 \cdot \gamma_s^3 + a_4 \cdot \gamma_s^4 + a_5 \cdot \gamma_s^5), \quad (20)$$

式中系数 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ 的取值根据晴空指数的取值变化而不同,其取值方法见表 2。表中 K_v 为晴空指数 (clearness index), γ^2 为决定系数。

因为 γ_s 是以时间为变量的函数,所以 L_z 也是以时间为变量的函数。

天顶亮度 L_z 的值也可以通过测量仪器测量得到,并且通过测量得到的值将更加准确。

表 2 天顶亮度计算公式中的系数的选择

Table 2 Choice of coefficients in the calculation formula of the zenith luminance

K_v	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	r^2
0.1±0.05	-0.61028	0.07637	-0.00230	4.1759×10^{-5}	-3.5364×10^{-7}	9.9856×10^{-10}	0.7886
0.2±0.05	-0.74443	0.13868	-0.00622	1.6009×10^{-4}	-2.0732×10^{-6}	1.0384×10^{-8}	0.8821
0.3±0.05	-0.80534	0.15724	-0.00748	2.0423×10^{-4}	-2.7761×10^{-6}	1.4533×10^{-8}	0.8648
0.4±0.05	-0.70779	0.11398	-0.00327	4.4639×10^{-5}	-2.0180×10^{-7}	-2.3249×10^{-10}	0.8805
0.5±0.05	-0.54822	0.07021	-8.8670×10^{-4}	-8.7851×10^{-6}	2.9294×10^{-7}	-1.5406×10^{-9}	0.8585
0.6±0.05	-0.51149	0.06782	-0.00243	7.2244×10^{-5}	-1.0678×10^{-6}	5.8770×10^{-9}	0.8128
0.7±0.05	-0.58312	0.09006	-0.00447	1.2809×10^{-4}	-1.7135×10^{-6}	8.6374×10^{-9}	0.7182
0.8±0.05	-0.60908	0.09863	-0.00523	1.5046×10^{-4}	-1.9881×10^{-6}	9.6937×10^{-9}	0.5519

综合以上所有推导,(8)式可变成

$$L_a = \frac{\left\{1 + a \cdot \exp\left[\frac{b}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right)}\right]\right\} \cdot L_z}{\left\{1 + c \left\{\exp\left[d \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \gamma_s\right)\right] - \exp\left(d \cdot \frac{\pi}{2}\right)\right\} + e \cdot \cos^2\left(\frac{\pi}{2} - \gamma_s\right)\right\} \cdot [1 + a \cdot \exp b]}. \quad (21)$$

$$\left\{1 + c \left\{\exp\left[d \cdot \arccos\left\{\sin \gamma_s \cdot \sin \gamma + \cos \gamma_s \cdot \cos \gamma \cdot \cos\left[\alpha - \pi \mp \arccos\left(\frac{\sin \gamma_s \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_s \cdot \cos \varphi}\right)\right]\right\}\right] - \exp\left(d \cdot \frac{\pi}{2}\right)\right\} + e \cdot \cos^2\left\{\arccos\left\{\sin \gamma_s \cdot \sin \gamma + \cos \gamma_s \cdot \cos \gamma \cdot \cos\left[\alpha - \pi \mp \arccos\left(\frac{\sin \gamma_s \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_s \cdot \cos \varphi}\right)\right]\right\}\right\}\right\},$$

在确定了经纬度、日期和当前天空类型以后,式中除了 γ_s 以外,其余参数都是常量。又由(14)式可知, γ_s 是以时间 t 为自变量的变量,因此(21)式是以时间 t 为自变量的函数式,那么任意时间的天空亮度分布都可通过(21)式计算出来。

传感器,一个传感器测量天空亮度,另一个传感器测量天空辐射度。每隔 4.5 min 就能测量一次天空苍穹的 145 个点。这 145 个点的分布情况如图 3 所示。图中天空穹顶被分成 145 个天空元,每个天空元里所标的数字分别表示所测天空元的序号、高度角和方位角^[7]。

3 天空亮度的实测数据的引用

位于欧洲、北美、日本和中国的 IDMP 观测站使用天空扫描仪对天空亮度进行测量。这种扫描仪能够对天空各个方位进行天空亮度测量,它有两个

所使用的数据是在 2007 年 10 月 21 日的日本大阪($34^{\circ}36'N, 135^{\circ}30'E$)所测量到的数据。

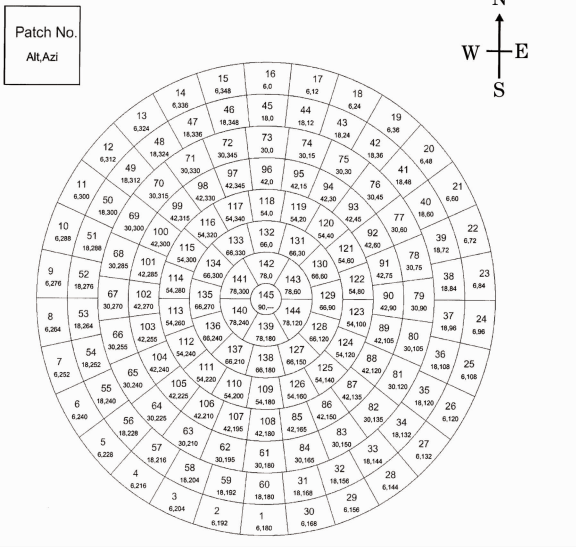


图 3 天空亮度扫描仪的测量点分布

Fig. 3 Distribution of measurement points for the sky luminance scanner

4 计算数据与实测数据的比较

所论述的计算天空亮度分布的方法是以时间为自变量的,即天空亮度分布是随着时间变化而变化的。当已知一些基础的数据(测量点的经度、纬度、天空元的高度角、方位角、天空类别)以后,输入任意时间,该方法就能计算出天空亮度分布。经度、纬度、高度角、方位角是很容易得到的量,而天空类型可通过所述方法确定。方便起见,采用第一种方法确定当前天空类型。

为了验证所论述方法的有效性,选择了不同时间点所测量的数据。时间点分别是 9:02,12:02,16:02。

通过 Matlab 编程仿真,可以画出本文方法计算的天空亮度分布图,然后把实测数据也加入图中与计算值进行对比。

图 4~6 中圆圈分别表示 2007 年 10 月 21 日 9:02,12:02,16:02 时天空亮度扫描仪所测量的实测数据;实线是根据本文所论述的方法计算出来的天空亮度数据绘制的曲线,其中在计算时天顶亮度 L_z 是测量得到的值;虚线也是根据本文所论述的方法计算出来的天空亮度数据绘制的曲线,但在计算时天顶亮度 L_z 是根据(20)式计算出来的值。

因为在 9:02,12:02,16:02 这三个时刻,天空都处于晴天空状态,所以在计算天空亮度分布绘制曲线时,从 CIE 15 种天空类型中选出代表晴天空类型的第 11~15 种作为候选的天空类型。通过计算,最后选择了第 12 种类型作为当前天空类型。

由图 4~6 可知,用本文方法所计算的天空亮度分布能近似预测实际的天空亮度分布,并且实线比虚线更加逼近实测值,这是因为实线的天顶亮度值 L_z 为实测得到,因此计算出来的天空亮度分布将更加准确。但虚线与实测值非常接近,因此在要求不高或者测量天顶亮度不大方便的情况下,可以用(20)式计算的天顶亮度值代入(8)式计算天空亮度分布。

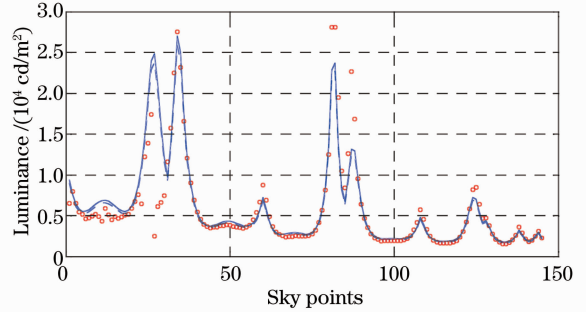


图 4 日本大阪 2007 年 10 月 21 日 9:02 分天空亮度分布

Fig. 4 Distribution of sky luminance at 9:02, 21-10-2007, Osaka, Japan

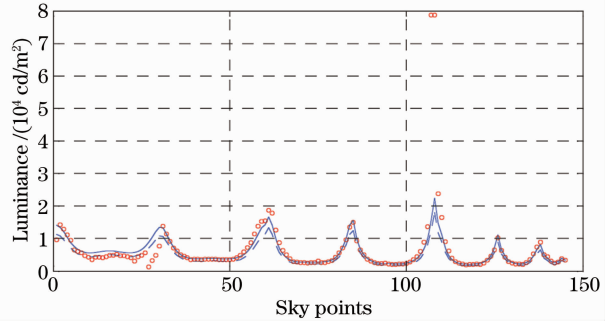


图 5 日本大阪 2007 年 10 月 21 日 12:02 分天空亮度分布

Fig. 5 Distribution of sky luminance at 12:02, 21-10-2007, Osaka, Japan

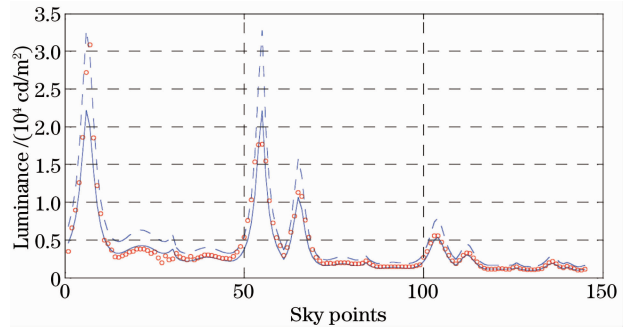


图 6 日本大阪 2007 年 10 月 21 日 16:02 分天空亮度分布

Fig. 6 Distribution of sky luminance at 16:02, 21-10-2007, Osaka, Japan

为了更加精确地比较计算值与实际值之间的误差,用图中实线所表示的计算值与实际值之间的平均偏差百分比来衡量它们之间的误差程度。平均偏差百分比的计算公式为

$$M = \frac{\sum_{i=1}^N [(V_{c,i} - V_{m,i}) / V_{m,i}]}{N_p} \times 100\%, \quad (22)$$

式中 $V_{c,i}$ 表示第 i 个天空元的亮度的计算值, $V_{m,i}$ 表示第 i 个天空元的亮度的测量值, N_p 为参与比较的数据个数。

排除一些明显错误的实测点,根据(22)式计算得:图 4~6 的平均偏差百分比分别为 5.4%, 3.54%, -7.76%。

5 结 论

提出了计算任意时间天空亮度分布的方法。当经纬度、日期、天空类型确定以后,该方法就能计算出任意时间的天空亮度分布。通过计算值与实测值的比较可知,该方法能较好地对天空亮度分布进行预测,并且具有较高精度。

因此,如果将该方法用来计算天空亮度分布,将这些数据作为计算机的输入计算出室内天然光亮度,然后再对室内灯光亮度进行调节,将起到节能的作用。

参 考 文 献

- Zhang Zhenming, Li Kang, Kong Fanmin, *et al.*. Study on improving light emitting efficiency of LED by using silver nanodisk array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0423001. 张振明, 李康, 孔凡敏, 等. 采用银纳米圆盘阵列提高 LED 发光特性的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0423001.
- Li Liang, Jin Shangzhong, Cen Songyuan, *et al.*. Influence of phosphor concentration and current intensity on phosphor-based white LED characteristics [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(3): 032301. 李亮, 金尚忠, 岑松原, 等. 荧光粉浓度和电流强度对白光 LED 特性的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(3): 032301.
- Qian Minhua, Lin Yandan, Sun Yaojie. Life prediction model for LEDs based on the photo-electro-thermal-life theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0823001. 钱敏华, 林燕丹, 孙耀杰. 基于光-电-热-寿命理论的 LED 寿命预测模型[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0823001.
- Wang Xiangxian, Wang Bo, Fu Qiang, *et al.*. Design of uniform illumination optical source with 365 nm LED and application in lithography [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0416001. 王向贤, 汪波, 傅强, 等. 均匀辐照 365 nm LED 光源设计及其在光刻中的应用[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0416001.
- Li Lin, Wang Guangzhen, Wang Lili, *et al.*. Lens design for uniform illumination with LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0222002. 李林, 王光珍, 王丽莉, 等. 实现均匀照明的 LED 系统设计方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0222002.

- Xu Daisheng, Chen Xiao, Zhu Xiang, *et al.*. A dimming lighting source based on cold and warm white LEDs [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0123004. 徐代升, 陈晓, 朱翔, 等. 基于冷暖白光 LED 的可调色温可调光照明光源[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0123004.
- Danny H W Li, Chris C S Lau, Joseph C Lam. Overcast sky conditions and luminance distribution in Hong Kong [J]. *Building and Environment*, 2004, 39(1): 101-108.
- Danny H W Li, Chris C S Lau, Joseph C Lam. Evaluation of overcast-sky luminance models against measured Hong Kong data [J]. *Applied Energy*, 2001, 70(4): 321-331.
- S K Wittkopf, L K Soon. Analysing sky luminance scans and predicting frequent sky patterns in Singapore [J]. *Lighting Research and Technology*, 2007, 39(1): 31-51.
- S Chirarattananon, P Chaiwiwatworakul. Distributions of sky luminance and radiance of North Bangkok under standard distributions [J]. *Renewable Energy*, 2007, 32: 1328-1345.
- M T Markou, A Bartzokas, H D Kambezidis, *et al.*. A new statistical methodology for classification of sky luminance distributions based on scan data [J]. *Atmospheric Research*, 2007, 86(3): 261-277.
- M B Kobav, G Bizjak, D Dumortier, *et al.*. Complete analysis of the luminance measurements gained with a sky scanner [C]. *Proc of the 11th European Lighting Conference Lux Europa*, 2009, 9-11.
- J L Torres, M De Blas, A Garcia, *et al.*. Sky luminance distribution in the North of Iberian Peninsula during winter [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2010, 72(16): 1147-1154.
- R Perez, R Seals, J Michalsky, *et al.*. All-weather model for sky luminance distribution-preliminary configuration and validation [J]. *Solar Energy*, 1993, 50(3): 235-245.
- Igawa, Y Koga, T Matsuzawa, *et al.*. Models of sky radiance distribution and sky luminance distribution [J]. *Solar Energy*, 2004, 77(2): 137-157.
- National Standardization Technical Committee. GB/T 20148-2006. Spatial Distribution of Daylight-CIE Standard General Sky [S]. Beijing: China Standard Press, 2006. 国家标准化技术委员会. 日光的空间分布 CIE 一般标准天空 GB/T 20148-2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- Vittorio Ferraro, Valerio Marinelli, Marilena Mele. A method for selecting the CIE standard general sky model [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2013, 95-96: 59-64.
- Li Wei, Zhan Jie, Shao Shiyong, *et al.*. Development of hemispherical instrument for sky brightness [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1844-1848. 李威, 詹杰, 邵士勇, 等. 一种半球形天空亮度测量仪器的研制[J]. *光学学报*, 2008, 28(10): 1844-1848.
- Chen Xiaoyong, Zheng Keke. Discussions on the formula of declination angle in building sunshine calculation [J]. *Zhejiang Construction*, 2011, 28(9): 6-8. 陈晓勇, 郑科科. 对建筑日照计算中太阳赤纬角公式的探讨[J]. *浙江建筑*, 2011, 28(9): 6-8.
- Qiu Guoquan. Calculation of the solar time [J]. *Solar Energy*, 1998, (1): 7. 邱国全. 太阳时的计算[J]. *太阳能*, 1998, (1): 7.
- A Soler, K K Gopinathan. Analysis of zenith luminance data for all sky [J]. *Renewable Energy*, 2001, 24(2): 185-196.
- V Ferraro, M Mele, V Marinelli. Analysis of sky luminance experimental data and comparison with calculation methods [J]. *Energy*, 2012, 37(1): 287-298.
- Vittorio Ferraro, Marilena Mele, Valerio Marinelli. Sky luminance measurements and comparisons with calculation models [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2011, 73(13): 1780-1789.