

# 天空散射光照度转换成天顶亮度\*

陈 仲 林

(建筑系)

**摘 要** 本文建议了一种天顶亮度转换系数,它与室外无遮挡水平面上的天空散射光照度相乘,就能获得该天空类型的天顶亮度值。

**关键词** 天空散射光照度,天顶亮度

对于某一地区来说,除了一般需要人工照明的下雨、沙暴和雪暴等特殊天气现象外,根据云量、天空和日光状况,并从天空亮度分布出发,把天空分为四类:晴天空、类似于晴天空和类似于全云天空、全云天空。

某一地区的平均天空就是该地区在多年时期内这四类天空的平均状态,也就是该地区在多年时期内,在某一个太阳位置时天气光学的统计状态。

平均天空亮度分布,就是某地区在多年时期内,在某一个太阳位置时整个天空亮度分布的统计状态。平均天空亮度模式<sup>(1)</sup>:

$$L_{av} = K_{cl} L_{zcl} + K_{inc1} L_{zinc1} + K_{inc2} L_{zinc2} + K_{oc} L_{zoc} \quad (1)$$

式中:  $K_{cl}$ 、 $K_{inc1}$ 、 $K_{inc2}$ 、 $K_{oc}$ ——分别为某一地区在多年时期内、某一个太阳位置时晴天空、类似于晴天空、类似于全云天空、全云天空的出现概率;

$L_{zcl}$ 、 $L_{zinc1}$ 、 $L_{zinc2}$ 、 $L_{zoc}$ ——分别为某一地区在多年时期内、某一个太阳位置时晴天空、类似于晴天空、类似于全云天空、全云天空的天顶亮度。

(1)式中的晴天空相对亮度分布公式  $L_{zcl}$  和全云天空相对亮度分布公式  $L_{zoc}$  可由CIE标准公式确定。在部分有云天时,根据多年时期内平均状态这个观点,可以认为云在平均天空中是以均匀状态分布的<sup>1</sup>,按日光状况把部分有云天划分为类似于晴天空和类似于全云天空两大类。由于类似于晴天空和晴天空对光的衰减是不一样的,所以宜用实测资料对晴天空相对亮度分布公式  $L_{zcl}$  中的系数修正后,就能获得在类似于晴天空时、任一天空元的相对

本文1989年6月17日收到。

\*. 本文是国家自然科学基金资助的“平均天空及采光计算”课题的研究成果之一。

亮度计算式

$$L_{r_{incl}} = f_1(\gamma)\phi_1(\zeta)/f_1(z_0)\phi_1(0^0) \quad (2)$$

式中:  $f_1(\gamma) = 0.526 + 5\exp(-1.5\gamma)$ ,

$$f_1(z_0) = 0.526 + 5\exp(-1.5z_0),$$

$$\phi_1(\zeta) = 1 - \exp[-0.80\sec(\zeta)],$$

$$\phi_1(0^0) = 0.55067$$

$\gamma$ ——所考虑的天空元距视在太阳位置的角距离;

$z_0$ ——天顶太阳角, 即天顶距视在太阳位置的角距离;

$\zeta$ ——所考虑的天空元距天顶的角距离。

根据云在平均天空中是以均匀状态分布这个统计观点, 可认为日光状况为  $\Pi$  的部分有云的天空相对亮度分布类似于 CIE 全云天, 并由 CIE 全云天天空相对亮度分布标准公式确定。在类似于全云天和全云天天空条件下, 任一天空元的相对亮度计算式均为

$$L_{r_{inoc}} = L_{roc} = [1 + 2\cos(\zeta)]/3 \quad (3)$$

因此(1)式可改写成

$$L_{ov} = K_{cl} L_{zcl} L_{rel} + K_{incl} L_{zincl} L_{rincl} + (K_{inoc} L_{zinoc} + K_{pc} L_{zoc}) L_{roc} \quad (4)$$

各类天空的出现概率反映了当地的云量和天空状况的变化规律, 它随太阳高度变化而发生。它宜从各地气象台站多年的常规观测的地面气候资料中获得; 也可根据当地气候条件, 按文献<sup>3</sup>方法处理。各类天空的天顶亮度体现了当地的云量、云状、天空状况、日光状况和大气透明度的变化规律, 但是天顶亮度资料比室外无遮挡水平面上的天空散射光照度资料要少得多, 而且所需的测试仪器——亮度计的价格比照度计贵得多, 测试方法也不如观测照度时那样简便。所以从照度实测资料中换算出天顶亮度资料的方法是有益的。

在晴天空时, 如果定义一种天顶亮度为单位的标准晴天空, 那末对于实际晴天空, 就可以认为它仅是在标准晴天空上均匀地增加或失去一层衰减物质, 而天空相对亮度分布保持不变, 并且均可由 CIE 晴朗天空相对亮度分布的标准公式确定。在平均天空条件下, 这种对晴天空的处理方法也适用于类似于晴天空、类似于全云天和全云天天空的情况。总之, 在平均天空条件下, 定义一种天顶亮度为单位的标准天空类型后, 就可以认为该类型的某一实际天空仅是在相应的标准天空上均匀地增加或失去一层衰减物质, 而天空相对亮度分布保持不变。因此在平均天空条件下, 实际天空与对应的标准天空之间存在着一定关系, 这个关系是由该天空类型的天顶亮度转换系数与室外无遮挡水平面上天空散射光照度的乘积确定的, 也就是由实际天空的天顶亮度确定的。所谓天顶亮度转换系数指的是在某种标准的天空相对亮度分布条件下, 天顶亮度与室外无遮挡水平面上天空散射光照度的比值, 其单位为  $(\text{cd}/\text{m}^2)/\text{lx}$ , 现用字母  $zk$  表示。

在某种标准的天空相对亮度分布条件下, 任一天空元的亮度

$$L'_p = L'_z L_{rp} \quad (5)$$

由立体角投影定律算得室外无遮挡水平面上天空散射光照度

$$E'_b = \int_0^\pi L'_p \cos(\zeta) d\omega \quad (6)$$

在某一特定条件下, 天顶亮度  $L'_z$  应为一常数, 所以有关系式

$$E_D' = L_z' \int_{\omega} L_{rp} \cos(\zeta) d\omega \quad (7)$$

由天顶亮度转换系数定义得

$$ZK = L_z' / E_D' = 1 / \left[ \int_{\omega} L_{rp} \cos(\zeta) d\omega \right] \quad (\text{cd/m}^2) / \text{lx} \quad (8)$$

实际上, 所谓天顶亮度转换系数, 就是当天顶亮度为单位时, 在相应的天空亮度分布条件下求得的室外无遮挡水平面上天空散射光照度之倒数。它的值仅取决于太阳高度。

当某一实际天空的亮度分布属于某种标准天空亮度分布时, 对于某一瞬时而言, 实际天空的天顶亮度值  $L_z$  为一常数。于是由立体角投影定律求得室外无遮挡水平面上的天空散射光照度

$$E_D = \int_{\omega} L_p \cos(\zeta) d\omega \quad (9)$$

$$\because L_p = L_z L_{rp} \text{ 和 } L_z = \text{const}$$

$$\therefore E_D = L_z \int_{\omega} L_{rp} \cos(\zeta) d\omega \quad (10)$$

因此有

$$L_z = E_D \cdot \left\{ 1 / \left[ \int_{\omega} L_{rp} \cos(\zeta) d\omega \right] \right\} \quad (11)$$

由(8)式可得

$$L_z = E_D ZK \quad (\text{cd/m}^2) \quad (12)$$

(12)式中的天顶亮度转换系数  $ZK$  可由标准天空的相对亮度分布和(8)式求得。

在类似于全云天空和全云天空时, 由(3)式和(8)式可得

$$\begin{aligned} ZK &= 1 / \left[ \int_{\omega} L_{rp} \cos(\zeta) d\omega \right] \\ &= 1 / \left\{ \frac{2\pi}{3} \int_0^{\frac{\pi}{2}} [\cos(\zeta) + 2\cos^2(\zeta)] \sin(\zeta) d\zeta \right\} \\ ZK &= \frac{9}{7\pi} \end{aligned} \quad (13)$$

所以在类似于全云天空和全云天空时, 天顶亮度转换系数为  $\frac{9}{7\pi}$

在晴天空和类似于晴天空时, 由于这两类天空的相对亮度分布是以太阳所在的时圈为对称分布的, 所以只要讨论以太阳所在的时圈为天空微元方位角起始位置的半个天空就可以了。为了减少计算误差和缩短计算机用时, 可取较大的天空元, 也就是天空元的天顶角和方位角均以  $5^\circ$  间隔进行计算, 每一个天空元均取其中心处对应值作为该天空元的亮度值, 于是由立体角投影定律求得

$$E_D' = \sum_{i=1}^{18} \sum_{j=1}^{36} \left\{ 2 \cdot \frac{2\pi}{72} L_z' L_{r_{ij}} [\cos(\zeta_{i-1}) - \cos(\zeta_{i+1})] \cos(\zeta_i) \right\} \quad (14)$$

对于同一个天顶角  $\xi$  有

$$[\cos(\xi_{i-1}) - \cos(\xi_{i+1})]\cos(\xi_i) = \text{const}$$

所以可把 (14) 式写成

$$E'_D = L'_z \sum_{i=1}^{18} \left\{ \frac{\pi}{18} [\cos(\xi_{i-1}) - \cos(\xi_{i+1})] \cos(\xi_i) \sum_{j=1}^{36} L_{r\xi_j} \right\}$$

因此天顶亮度转换系数

$$ZK = 1 / \sum_{i=1}^{18} \left\{ \frac{\pi}{18} [\cos(\xi_{i-1}) - \cos(\xi_{i+1})] \cos(\xi_i) \sum_{j=1}^{36} L_{r\xi_j} \right\} \quad (15)$$

这样可以减少机时，提高程序质量。各类天空的天顶亮度转换系数如表 1 所示。

表 1 天顶亮度转换系数

太阳高度	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
晴天	.143	.140	.138	.139	.142	.147	.156	.169	.185	.206	.233	.268	.313	.371	.444	.540	.663	.823	1.031
晴天 (污染大气)	.130	.124	.120	.118	.119	.122	.128	.137	.149	.166	.187	.214	.249	.294	.353	.428	.525	.652	.816
类似于晴天	.201	.202	.205	.209	.214	.221	.230	.241	.255	.272	.291	.315	.342	.375	.412	.456	.507	.567	.636
类似于全云天	.409																		
全云天																			

由于真实大气的折射效应，会使真太阳天顶角和视太阳天顶角之间发生差别，相差的范围从天顶为零变到地平时大约为 0.570 度，真太阳天顶角和视太阳天顶角之差与视太阳天顶角之间的函数关系见文献 [4]。在计算太阳天顶角时，对于较大的太阳天顶角，必须把真太阳天顶角  $z$ ，订正到视太阳天顶角  $z_0$ 。

$$z_0 = z - \Delta\theta \quad (16)$$

式中： $\Delta\theta$ ——真太阳天顶角和视太阳天顶角之差，由文献 [4] 给出。

由于地球在以太阳为一个焦点的椭圆上围绕太阳公转。虽然目前轨道的偏心率不大，但日地距离的平方对其平均值的变化为 3.3%，就此而言偏心率又是显著的。平均天空亮度模式中的天顶亮度值是在日地距离为平均值时确定的，所以由天空散射光照度值查算相应天空类型的天顶亮度值时，应先对实测照度值  $E_{DK}$  作日地距离订正

$$E_D = E_{DK} / G \quad (17)$$

式中： $G$ ——日地距离订正系数，由文献 [5] 给出精度高于  $10^{-4}$  的计算式。

这样就可以根据多年的室外照度实测资料，以太阳高度为准查算对应的天顶亮度转换系数，并与室外无遮挡水平面上的天空散射光照度相乘，即可获得在该类天空条件下、与太阳高度相对应的天顶亮度值，然后采用最小二乘法对各类天空的天顶亮度值进行曲线拟合。据研究表明，为了便于实际使用，晴天空<sup>[9]</sup>和类似于晴天空的天顶亮度一般可表示成

$$L_z = a_0 + a_1 h_s + a_2 h_s^2 + a_3 h_s^3 \quad (\text{cd/m}^2) \quad (18)$$

式中： $h_s$ ——太阳高度、单位为度。

而类似于全云天空和全云天空<sup>[9]</sup>的天顶亮度一般可表示为

$$L_z = b_0 + b_1 \sin(h_s) + b_2 \sin^2(h_s) \quad (\text{cd/m}^2) \quad (19)$$

(18)和(19)两式中的回归系数是由当地的云量、云状、天空状况、日光状况和大气透明

度等决定的。当不同地区的气候因素差别较大时,上述回归系数也会随之产生较大的变化。

由(4)式可知,一旦确定了各类天空的天顶亮度值和各类天空的出现概率后,就可以利用平均天空亮度模式进行采光计算研究。

### 参 考 文 献

- [1] Chen Zhonglin, Average Sky Luminance Model, CHINA-NORTH AMERICA DAYLIGHTING CONFERENCE, 1988 PROCEEDINGS
- [2] IES (North America) Calculation Proceedings Committee, Recommended Practice for the Calculation of Daylight Availability, J.of IES July, 1984, pp.381-392
- [3] 中村洋、他:世界各地における平均天空を構成するための系数について、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、pp.11-12、昭和63年10月
- [4] R.A.McClatchey 等,大气光学性质,中国科学院大气物理研究所一室译,pp.35-36
- [5] G.W.Paltridge and C.M.R.Platt, 气象学和气候学中的辐射过程,科学出版社,1981年, p.37
- [6] S.Treado and G.Gillette, Measurements of sky luminance, sky illuminance, and horizontal solar radiation, J.of IES April, 1983

(编辑:徐维森)

## ZENITH LUMINANCE CONVERTING FROM SKY ILLUMINANCE

*Chen Zhonglin*

(Department of Architecture)

**ABSTRACT** This paper suggests a zenith luminance converting factor. By means of multiplying outdoor horizontal sky illuminance by this factor, the value of zenith luminance of the sky can be obtained.

**KEY WORDS** horizontal sky illuminance, zenith luminance