

文章编号: 1671-6612 (2021) 05-733-05

一种地下综合交通枢纽 逐层日射得热负荷计算方法

刘金 毕海权 赖晓龙

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 为解决地下综合交通枢纽类建筑层间通透所导致的各层太阳辐射得热负荷难以计算的问题,在工程常用的冷负荷系数法的基础上,提出利用太阳高度角、太阳方位角及楼层层高求解顶部天窗在各层的有效投影面积,进而对冷负荷系数法所求得的总负荷值逐层分项,计算得到各层日射得热负荷的方法。并引入室内蓄热平板模型法作为对比,结果表明两种方法计算得到的各层日射得热负荷相对误差均在10%左右,最大相对误差为13.54%,进一步验证了该方法的可行性,为实际工程中层间通透且具有大面积玻璃穹顶的地下综合交通枢纽类建筑各层日射得热负荷计算提供参考。

【关键词】 地下综合交通枢纽; 太阳辐射; 负荷; 冷负荷系数法

中图分类号 U231.1 文献标识码 A

Research on Solar Radiation Heat Load in Underground Comprehensive Transportation Hub Station

Liu Jin Bi Haiquan Lai Xiaolong

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 To solve the problem that the solar radiation heat load of each layer is difficult to calculate due to the interlayer permeability of underground comprehensive transportation hub buildings, this paper proposes to use the solar altitude angle, solar azimuth angle, and solar azimuth angle based on the commonly used cooling load coefficient method in engineering. The floor height is calculated to calculate the effective projected area of the top skylight on each floor. The total load value obtained by the cooling load coefficient method is divided layer by layer, and the process of calculating the solar heat load of each floor. The indoor heat storage flat-plate model method is introduced for comparison. The results show that the relative error of the solar radiation heat load of each layer calculated by the two methods is within 20%, which further verifies the technique's feasibility. It is transparent and transparent between the layers in the actual project. The solar heat load calculation on each floor of an underground comprehensive transportation hub building with a large-area glass dome provides a reference.

【Keywords】 Underground comprehensive transportation hub; Solar radiation; Load; Cooling load coefficient method

0 引言

城市地下综合交通枢纽通常为体量大、热环境复杂的城市功能中心,其室内环控系统的合理设置是满足旅客舒适性及节能降耗的关键。站内负荷计

算是环控系统设计的基础,由于综合交通枢纽体量巨大、层间净空高,因此并不需要对整体热环境进行严格控制,仅在人员停留时间较长的候车厅等区域进行舒适性控制即可^[1],这就要求相对详细地确

作者简介: 刘金 (1995.11-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: liu2018200279@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 毕海权 (1974.12-), 男, 博士研究生, 教授, E-mail: bhquan@163.com

收稿日期: 2021-01-05

定站内各层不同区域的负荷分布。大型地下综合交通枢纽多采用顶部天窗采光的设计来引入自然光^[2]，大面积采光穹顶的运用虽然有效地提高了建筑光环境品质并减少了照明能耗，但由此带来的太阳辐射得热在站内各层引起的瞬时负荷成为环控系统负荷计算的难点，特别是在冬季，充分利用这部分太阳辐射得热对降低客站供暖能耗有重要意义。

实际工程应用中多采用冷负荷系数法计算透过玻璃窗的太阳辐射所形成的负荷，利用玻璃窗冷负荷系数结合相关修正参数，直接从太阳辐射得热量求得其逐时负荷。但地下综合交通枢纽并不在相应楼层围护结构侧壁设置窗户，而是在建筑顶部设置大面积天窗，并且逐层开孔至下层进行采光，打造层间通透的建筑格局。因此使用冷负荷系数法计算时，只能得到透过天窗进入站内的太阳辐射得热所形成的总负荷值，无法得出各层日射得热负荷结果，为各层环控系统设计 and 负荷分析带来困难。本文提出利用太阳高度角、太阳方位角及层高求解顶部天窗在各层的虚拟投影面积，进而对冷负荷系数法的计算结果逐层分项得到各层日射得热负荷的方法，并引入平板蓄热模型法作为对比，验证该方法的准确性。平板蓄热模型法建模简单方便，计算结果相对准确，但计算所需的各层太阳辐射得热量的求解需要借助专业软件，且热平衡方程求解复杂、计算量较大，并不适用于设计人员在实际工程中使用。基于投影面积的冷负荷系数法计算简单，相应系数均可通过查阅规范获得，只要选取适宜的参数即可获得相对准确的负荷计算结果，适用于设计人员手算求解，为地下综合交通枢纽类建筑逐层太阳辐射得热负荷计算提供参考。

1 计算模型及方法

1.1 计算模型

地下综合交通枢纽的玻璃穹顶为半透明围护结构，物理模型及太阳辐射作用方式如图 1 所示。照射到玻璃天窗的太阳辐射一部分直接被玻璃穹顶吸收，使其温度升高后以对流的方式向两侧传热，进而影响室内热环境；另一部分透过玻璃穹顶直接进入室内，被内围护结构、家具等吸收后逐渐向室内放热^[3]。

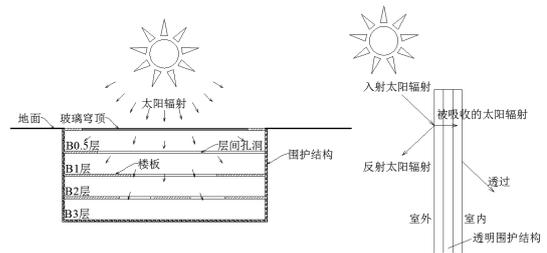


图 1 太阳辐射作用示意图

Fig.1 Schematic diagram of solar radiation

本文模拟的地下综合交通枢纽位于北京市，为地下四层车站，车站建筑面积 20 万平方米，埋深 30 米，建筑模型如图 2 所示。车站顶部设计了大面积的玻璃采光穹顶，采光面积 2.2 万平方米，同时每层公共区域设计了大面积的开洞，形成了超大体量、错落共享的空间。顶部天窗材质为双层 Low-e 中空玻璃，地下一层 (B0.5 层) 为进站平台，旅客由此进入其他楼层；地下二层 (B1) 为进站厅，主要进行旅客安检工作；地下三层 (B2) 为候车厅，是站内人员聚集数量最多、停留时间最长的区域；地下四层 (B3) 为站台层，主要为站台及轨行区。一般在建筑的热过程模拟中，取 1h 作为室外扰量的采样时间已经能够满足计算要求，因此太阳辐射造成的室内负荷变化也以 1h 为计算步长^[4]。

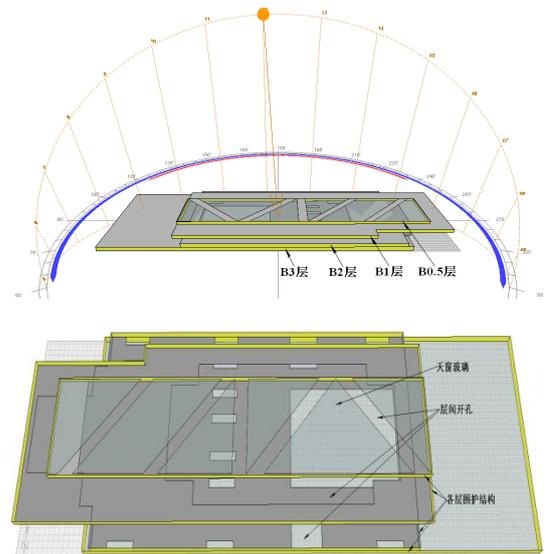


图 2 地下综合交通枢纽建筑模型

Fig.2 Architectural model of underground comprehensive transportation hub

1.2 计算方法

冷负荷系数法是用 Z 传递函数改进反应系数

法后提出的负荷计算方法, 它将得热量与负荷的计算合并, 不用求室内得热量, 而是直接从热扰求得分项逐时冷负荷, 适用于编制图表供设计人员手算求得建筑负荷。对于太阳辐射得热透过半透明围护结构形成的瞬时负荷, 可采用玻璃窗冷负荷系数计算太阳辐射得热在室内所形成的总冷负荷^[5]。工程上采用冷负荷系数法进行负荷计算时, 所需要的窗口有效面积系数、窗玻璃遮阳系数等无因次系数可以通过查阅相关设计手册获得。为保持冬、夏季计算方法的统一性, 本文采用 ASHRAE 手册中的太阳得热系数计算透过玻璃窗进入站内的太阳辐射得热, 则这部分日射得热形成的负荷可按下式计算^[6]:

$$Q_s = SHGC \cdot A_w \cdot IC_{LQ} \quad (1)$$

式中: $SHGC$ 为太阳得热系数, 无因次; A_w 为窗口面积, m^2 ; IC_{LQ} 为窗玻璃冷负荷系数, 无因次; I 为入射到天窗表面的太阳辐射照度, 包括直射辐射和散射辐射两部分, W/m^2 。

地下综合交通枢纽类建筑通过顶部天窗所接受的太阳辐射由直射辐射、散射辐射和大气长波辐射组成。其中直射辐射在法向方向上的强度均相同, 散射辐射在任意方向上都均一, 而大气长波辐射在白天太阳辐射照度计算中可以忽略, 可认为入射到天窗表面的辐射只包含直射辐射和散射辐射两部分, 采用 ASHRAE 手册中的晴天太阳辐射模型^[7]计算。

入射到与太阳光线垂直的表面上的太阳辐射照度 E_o 为:

$$E_o = E_{sc} \left\{ 1 + 0.033 \cos \left[360^\circ \frac{(n-3)}{365} \right] \right\} \quad (2)$$

式中: E_{sc} 为大气层外与太阳光线垂直的表面上的太阳辐射强度, 常用 $1367W/m^2$; n 为计算日在一年中的排序。

则晴天时的太阳直射强度 E_b 与散射强度 E_d 分别为:

$$E_b = E_o \exp(-\tau_b m^{ab}) \quad (3)$$

$$E_d = E_o \exp(-\tau_d m^{ad}) \quad (4)$$

式中: τ_b 、 τ_d 为光学深度; ab 、 ad 为空气质量指数, m 为相对空气质量。

上式中 τ_b 和 τ_d 的值与地区有关, 并且在一年中会随时间变化, 体现了太阳辐射对当地海拔等条件

的依赖性, 可以通过查表获得。空气质量指数 ab 、 ad 是根据 τ_b 、 τ_d 的值计算得到的。相对空气质量 m 是实际太阳光线所通过路径中的大气质量与假设太阳直接在竖直上方时会存在的大气质量之比, 仅是太阳高度角 β 的函数。相对空气质量与空气质量指数的经验计算公式分别如下:

$$m = \frac{1}{\sin \beta + 0.50572(6.07995 + \beta)^{-1.6364}} \quad (5)$$

$$ab = 1.454 - 0.406\tau_b - 0.268\tau_d + 0.021\tau_b\tau_d \quad (6)$$

$$ad = 0.507 + 0.205\tau_b - 0.080\tau_d - 0.190\tau_b\tau_d \quad (7)$$

对于水平天窗, 入射到天窗表面的太阳直射强度 $E_{b,h}$ 与散射强度 $E_{d,h}$ 分别为:

$$E_{b,h} = E_b \cos \theta \quad (8)$$

$$E_{d,h} = E_d \quad (9)$$

式中: θ 为太阳入射角, 对于水平面 $\theta = 90^\circ - \beta$ 。

由此得到入射到水平天窗表面的太阳辐射照度 I 为:

$$I = E_{b,h} + E_{d,h} = E_b \cos \theta + E_d \quad (10)$$

太阳高度角 β 指太阳光入射方向与地平面之间的夹角, 是决定太阳辐射热能数量的重要因素, 太阳高度角小时地面受热面积大, 光热分散, 因此太阳辐射强度小。太阳方位角 α 指太阳光线在地平面上的投影与当地子午线的夹角。在建筑结构和位置确定的情况下, 进入地下综合交通枢纽站内的太阳辐射得热量及其在各楼层的分布受太阳高度角和太阳方位角的影响。

定义顶部天窗玻璃垂直向下投影, 落到每一层除开孔以外地面上的面积为天窗有效投影面积。由于天窗有效投影面积随太阳位置的变化而变化, 因此需用太阳高度角和方位角结合楼层层高对顶部天窗逐时虚拟位置进行修正, 各层天窗偏移位置的计算示意图如图 3 所示。定义正东方向为 X 轴正向, 正北方向为 Y 轴正向, 竖直向上为 Z 轴正向。根据层高和逐时太阳高度角 β 可求得天窗偏移的总距离, 再由对应的太阳方位角 α 求得偏移距离在 X 轴及 Y 轴的分量, 得到天窗在该层的虚拟位置, 从而计算得到天窗有效投影面积。以每层的天窗有效投影面积作为各层窗口有效面积, 逐层分解冷负荷系数法求得的太阳辐射得热总负荷, 进而得到各层逐

时日射得热负荷。

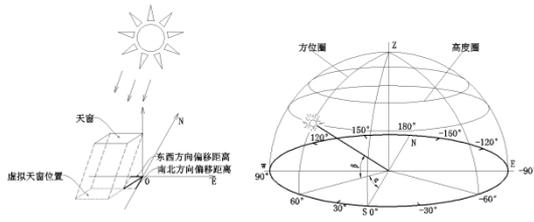


图 3 天窗偏移距离计算示意图

Fig.3 Schematic diagram of calculation of sunroof offset distance

2 计算结果与分析

2.1 冷负荷系数法计算结果

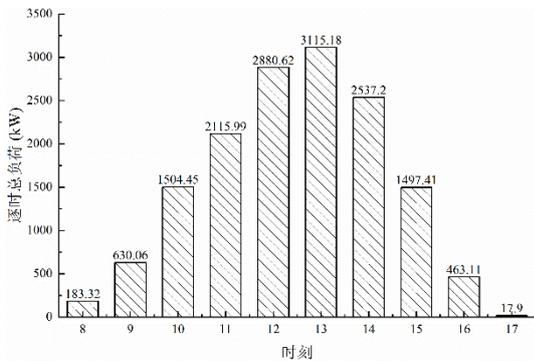


图 4 逐时日射得热总负荷值

Fig.4 The total heat load value of hourly radiation

冷负荷系数法计算得到的日射得热负荷结果如图 4 所示，由计算结果可以看出，随着太阳辐射照度的变化，透过顶部玻璃天窗进入站内的逐时日射得热总负荷先增大后减小，总负荷峰值为 3115.18kW，出现在中午 13:00。

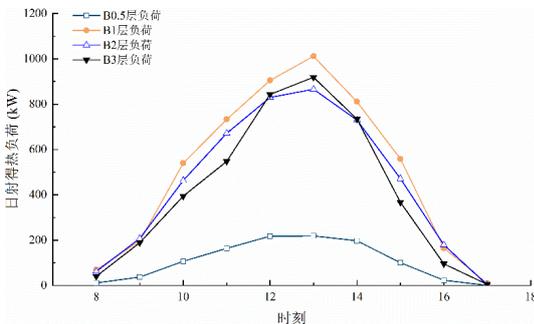


图 5 各层日射得热负荷值

Fig.5 Solar heat load of each layer

根据太阳高度角、太阳方位角及层高求解顶部天窗在各层的虚拟投影面积后，对站内总负荷计算结果进行逐层分项得到如图 5 所示的各层日射得

热负荷。各层负荷值随时间变化趋势均相似，受不同楼层建筑面积及层间开孔大小的影响，各层负荷量存在差异。因各层开孔面积随埋深逐层减小，B0.5 层开孔面积最大，太阳辐射照射面积最小，其负荷值在同一时刻均小于其他三层；天窗有效投影面积随时刻发生变化后，使 B2 层负荷值在中午 12:00~14:00 小于 B1 层和 B3 层。

2.2 与平板蓄热模型法的比较

平板蓄热模型法是参考 DeST 中的平板模型^[8]所建立的用于计算太阳辐射透过玻璃窗所形成室内负荷的方法，能够简化室内各层太阳辐射得热负荷的复杂计算过程。杨爽^[9]通过对比计算验证了该方法的准确性，因此本文引入平板蓄热模型法验证利用天窗有效投影面积分项所得到的各层日射得热负荷的准确性。

平板蓄热模型的提出是基于有效热容 (effective thermal capacitance) 和显式热容 (apparent thermal capacitance) 的概念^[10]，有效热容反映了内围护结构等部件的蓄热性能，显式热容则是某部件的密度、体积、比热容三个参数的乘积。在室内平板模型的建立中，将内围护结构与室内家具等物品的显式热容都归于室内蓄热的显式热容，根据建筑面积及围护结构材料即可确定所建立平板模型的相关参数。

对于地下综合交通枢纽，蓄热平板平行于天窗放置，其热平衡由三个部分组成：平板接受的辐射量 q_1 、平板自身储存的热量 q_2 、平板逐时放出的热量 (即太阳辐射形成的瞬时冷负荷) q_3 。则在计算出各层太阳辐射得热量后，即可通过热平衡方程求解室内蓄热平板的逐时温度 t_i ，利用对流换热公式方便快捷地计算得到太阳辐射得热负荷 q_3 。

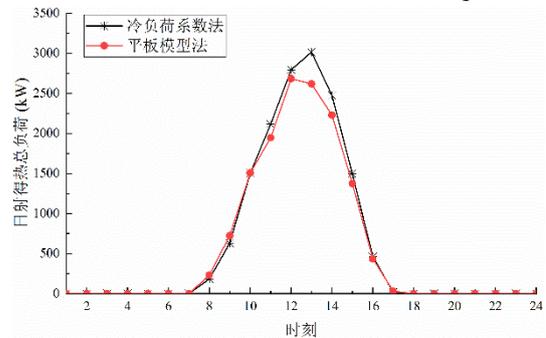


图 6 透过天窗的日射得热总负荷对比

Fig.6 Comparison of total solar heat gain through skylight

冷负荷系数法与平板模型法计算得到的地下综合交通枢纽站内逐时总负荷对比如图6所示,两种方法得到的逐时总负荷变化规律基本吻合,负荷峰值出现在中午12:00~13:00,相对误差为11.03%,可以用于工程初步设计阶段的站内日射得热负荷计算。

根据太阳位置及建筑层高对冷负荷系数法计算结果分项后,得到的各层日射得热负荷值与平板蓄热模型法的各层负荷计算结果对比如图7所示。可以看出,通过有效投影面积修正后所得的逐层日射得热与平板蓄热模型法的计算结果变化规律相同,两种计算方法所得的负荷峰值均出现在中午13:00左右,各层负荷相对误差均不超过13.54%,大多数时刻相对误差在10%以内,说明通过太阳高度角、太阳方位角及层高计算采光穹顶在各层的有效投影面积,从而拆分冷负荷系数法逐时日射得热总负荷得到各层日射得热逐时负荷的方法可行。

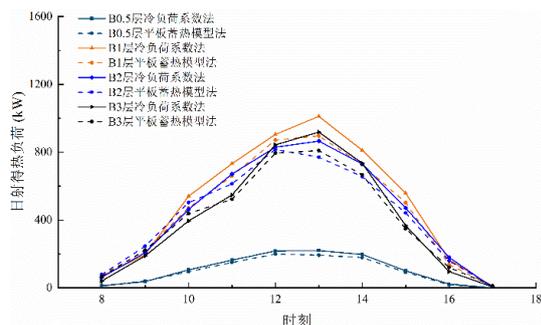


图7 透过天窗的日射得热逐层负荷对比

Fig.7 The layer-by-layer load comparison of solar heat gain through skylight

3 结论

本文通过理论分析和计算,提出了一种采用顶部天窗在各层的有效投影面积拆分冷负荷系数法所求得的日射得热逐时总负荷,得到地下综合交通枢纽各层日射得热逐时负荷的方法,并与平板蓄热模型法的各层太阳辐射得热负荷计算结果进行对比,验证了该方法的可行性,得出以下结论:

(1) 地下综合交通枢纽站内各层太阳辐射得热负荷的分布除与自身建筑面积有关外,还受太阳高度角、太阳方位角及楼层埋深的影响。楼层顶板

开孔面积越大、底板开孔面积越小,同一太阳位置下该层天窗有效投影面积越大,太阳辐射得热形成的负荷值越大;

(2) 冷负荷系数法与平板模型法计算得到的各层逐时日射得热负荷变化规律一致,相对误差均在13.54%以内。对地下综合交通枢纽类建筑,可根据采光穹顶在各层的投影面积拆分冷负荷系数法日射得热逐时总负荷,得到各层日射得热逐时负荷,简化各层太阳辐射得热计算过程,为实际具有大面积采光穹顶的地下综合交通枢纽站内各层空调系统设计和负荷分析提供参考。

参考文献

- [1] 张涛,刘晓华,李凌杉,等.高铁客站供暖空调系统设计、运行现状及研究展望[J].暖通空调,2019,49(6):25-31, 16.
- [2] 罗萍.大型地下交通枢纽光环境/能耗模拟及采光优化设计研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020
- [3] 陆亚俊.暖通空调(第二版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [4] 谢晓娜,宋芳婷,燕达,等.建筑环境设计模拟分析软件DeST 第2讲 建筑动态热过程模型[J].暖通空调,2004, (8):35-47.
- [5] 周敏,宋晗,吴松恒,等.国际上常用的简易冷负荷计算方法对比及分析[J].暖通空调,2020,50(11):21-27.
- [6] GB50736-2012,民用建筑供暖通风与空气调节规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [7] ASHRAE. 2017 ASHRAE HANDBOOK-FUNDAMENTALS[M]. Atlanta: ASHRAE Inc, 2017: CHAPTER 14.
- [8] 燕达,张晓亮.建筑环境设计模拟分析软件DesT技术文档[C].全国空调模拟分析学组学术交流会议文集, 2004:21-23.
- [9] 杨爽.城市规划阶段建筑冷负荷的修正负荷因子法[D].大连:大连理工大学,2013.
- [10] ANTONOPOULOS K A, KORONAKI E. Apparent and effective thermal capacitance of buildings[J]. Energy, 1998,23(3).