



太阳能技术在城市道路中的应用

■ 张心悦^{1,2} 张晓平^{1,2*} 朱灵^{2,3} 陈欣健^{1,2} 赵楚涵^{2,4} 陈祥宇^{1,2}

(1. 武汉大学土木建筑工程学院; 2. 武汉大学土木建筑工程学院岩土与结构工程安全湖北省重点实验室;
3. 武汉大学水利水电学院; 4. 武汉大学计算机学院)

摘 要: 提出了将全封闭式城市道路隔音棚与光伏组件、太阳能集热器及雨水收集管道相结合的设置,使道路成为“供热水、发电、蓄水、隔音”四位一体的绿色新型道路系统,为今后全封闭式隔音棚建设提供了一种新思路。以武汉地区为例建立了理论模型,验证了系统模型的合理性。

关键词: 太阳能建筑; 城市道路; 隔音棚; 太阳能集热器; 光伏组件; 集水灌溉

0 引言

近年来,建筑行业开始大力倡导“绿色建筑”,即充分利用自然资源、实现节能减排的建筑,太阳能与建筑一体化是其中的热门研究方向。建筑领域对太阳能的利用主要是太阳能供暖、太阳能热水和光伏组件发电^[1],大多都是通过与建筑外墙的结合来实现。

民用建筑拥有较为规整的建筑立面和建筑顶面,便于铺设太阳能集热器和光伏组件,因此容易实现对太阳能的利用,目前对太阳能与建筑一体化的研究也主要聚焦于民用建筑。但是通过民用建筑来利用太阳能存在以下这些问题: 1) 民用建筑的建筑面积相对有限,不能大面积地接收太阳辐射,因此对太阳能的利用率低,经济效益较低; 2) 目前国家尚未制定太阳能与建筑一体化相关的设计规范,民用建筑上太阳能设备的安装布局缺乏整体协调性,对城市建筑外观产生了严重影响; 3) 民用建筑的建筑外墙难以为太阳能集热

器提供接收太阳辐射所需的最佳倾角,经济效益低^[2-3]。以上问题限制了太阳能技术在民用建筑中的大规模应用,因此,相关研究人员将目光转向了城市道路工程。

目前已有不少学者投入到了道路与太阳能技术相结合的研究中,主要的研究成果有太阳能路灯和光伏路面等。但是太阳能路灯收集到的太阳能很少; 光伏路面由于长时间承受行车荷载,其透光性能难以保障,使用寿命短,后期维护成本高,经济性较差。

为了推动太阳能与建筑一体化更广泛地应用,本文提出了将太阳能设备与全封闭式城市道路隔音棚相结合的设置,即“绿色新型道路系统”。绿色新型道路系统是在全封闭式城市道路隔音棚顶棚上铺设太阳能集热器和光伏组件,顶棚的斜面可为集热器和组件提供集热的最佳倾角,并且该斜面可收集雨水,灌溉城市道路的绿化带; 而且这一设计还增强了隔音棚顶棚的隔音效果,打

收稿日期: 2019-03-19

通信作者: 张晓平(1982—),男,博士、教授,主要从事地下工程、岩土力学和地质工程方面的研究。jxhkzhang@163.com



造出“供热水、发电、蓄水、隔音”四位一体的绿色新型道路系统。

1 绿色新型道路系统的理论模型

1.1 模型介绍

本文提出的绿色新型道路系统设想是以全封闭式城市道路隔音棚顶棚为基本骨架,由太阳能区(包括太阳能热水区与光伏发电区)和集水灌溉区组成,具有供热水、发电、蓄水、隔音4大功能。系统模型图如图1所示。

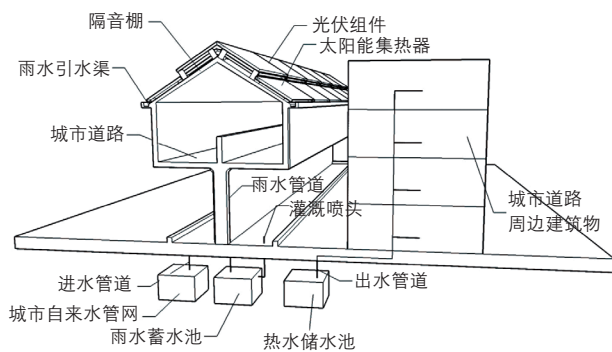


图1 绿色新型道路系统模型图

1.1.1 基本功能——隔音

目前国内外广泛采用设置声屏障的方式来减少交通噪音污染^[4],其将交通噪音封闭在声屏障内部,降噪效果比现阶段广泛采用的半封闭式声屏障更优。本文中铺设于隔音棚顶棚的太阳能集热器和光伏组件也间接增强了隔音效果。由于隔音棚的顶棚大而平缓,便于其上铺设的太阳能集热器和光伏组件更有效地收集利用太阳能。

1.1.2 核心功能——供热水、发电

目前,具有隔音棚的城市道路一般为城市高架桥、地面城市轨道,这类道路的树木遮挡较少,光照资源充足,并且周围以居住类高层建筑为主。这些高层建筑耗能主要体现为热水的大量使用,因此从节能环保的角度考虑,应优先选用太阳能热利用系统^[5];而且目前太阳能集热器的光热转换效率普遍达60%以上,而光伏组件的光电转换效率只有18%~21%^[6]。所以在综合考虑周围建筑自身的耗能类型和光热、光电转换效率后可

以发现,太阳能区以太阳能热利用为主是最经济、合理的。

本系统可与城市自来水管网、城市电网、道路周边建筑连接,形成一个以利用太阳能资源为主的多功能市政系统。系统的优点在于:1)系统经过了整体规划设计,与道路和周边建筑均具有良好的协调性,并且对顶棚形态进行了设计,使其造型美观,不会破坏城市形象;2)将太阳能集热器和光伏组件铺设于隔音棚顶棚,可避免二者受到遮挡,以获得更充足的光照。

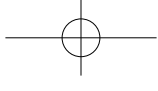
隔音棚顶棚上铺设的大面积太阳能集热器将市政自来水管网输送来的自来水加热至一定温度后,再由埋于地下的热水管道输送至道路两侧的建筑物,供市民直接取用。阴雨天及冬季由于太阳辐射弱,仅靠太阳能难以将水加热至合适的温度,此时需要利用电能对水进行二次加热。

为了保证系统全年可正常供应热水,将太阳能区与城市电网连接。当光照充足时,光伏组件除了为全封闭式城市道路隔音棚中的路灯供电,解决由全封闭式城市道路隔音棚给城市道路带来的光线遮挡问题外,还可将多余电力并入电网;当阴雨天太阳能集热器水温不足时,可利用城市电网电力对其进行二次加热,使热水达到供给温度的要求。这样就充分利用了太阳能资源,节约了电力。

若安装有储能设备,本系统也可作为一套独立的供热水、供电系统,在电力匮乏或没有电力供应的地方也可以使用。

1.1.3 附属功能——蓄水灌溉

配合隔音棚顶棚的弧度,在顶棚两侧设置雨水引水渠,把雨水引入到地下的雨水收集系统中;经过简单的过滤处理后,一部分雨水可储存起来用于灌溉植被、清洗路面,另一部分可排至城市污水管网。雨水引水渠的设计要保证在节约成本的同时尽可能提高雨水收集率。如此一来,不仅有效利用了雨水,节约了水资源,还在一定程度上缓解了雨季的排水压力,防止城市内涝。



1.2 系统创新点

1.2.1 太阳能集热器倾角可变

太阳能集热器安装倾角的准确选取是最大限度利用太阳能的一个重要条件,要使系统的太阳能利用率最大,集热器的倾角应根据环境的变化不断变化^[8]。

在本系统中,太阳能集热器通过四角的千斤顶支撑在隔音棚顶棚的骨架上,集热器和骨架之间填充隔音材料,通过调节千斤顶的高度可以改变集热器的倾角。隔音棚顶棚的剖面图如图2所示。

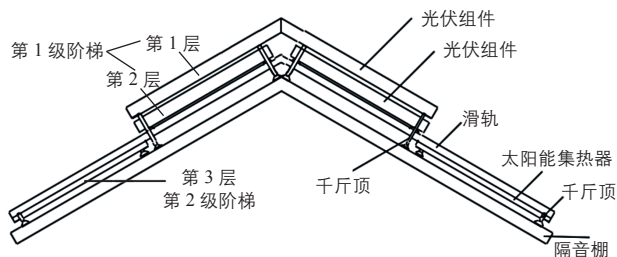


图2 隔音棚顶棚剖面图

本文以隔音棚的倾角作为太阳能集热器的初始倾角,再以月或季度最大太阳辐射接收量为原则,每月或每季度调整集热器的倾角。

1.2.2 顶棚上太阳能热水区、光伏发电区面积的确定

由图2可知,隔音棚顶棚以3层双阶的形式利用太阳能。第1层光伏组件的位置固定,属于常用类型,不可自由移动;第2层的光伏组件属于备用类型,其底部安装有2条滑轨,滑轨位于第1级阶梯内侧与第2级阶梯外侧之间,光伏组件可沿滑轨滑动,以上两层为光伏发电区;第3层铺设太阳能集热器,为太阳能热水区。顶棚的局部俯视图如图3所示。

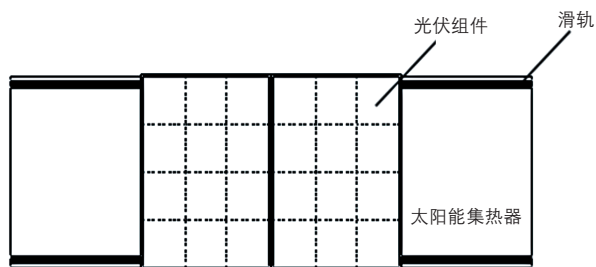


图3 隔音棚顶棚的局部俯视图

太阳能热水区的面积主要根据各地区全年太阳辐射量和道路周边建筑的热水用量来确定,对于热水用量大的地区,倾向于增大热水区的面积。光伏发电区面积主要是根据各地区全年的天气状况进行确定,若某地区阴雨天较多,晴天较少,则倾向于减少光伏发电区的面积;反之亦然。因此,太阳能热水区和光伏发电区的具体面积应在综合考虑安装此系统的地区的太阳辐射量、天气状况和热水用量等相关因素后,通过计算得到。

顶棚第2层备用光伏组件的作用是调节太阳能热水区和光伏发电区的面积比。由于太阳能热水区需要连接进、出水管,位置不便于移动,不适合设置在上层,因此上层只能设置光伏组件。备用的光伏组件不用时完全隐藏在第1层板之下;使用时沿滑轨下滑,部分或完全遮盖住第3层,可根据需要调节太阳能热水区和光伏发电区的面积。

2 适用于武汉地区的绿色新型道路系统设计

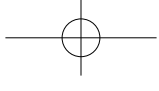
2.1 隔音棚倾角的确定

考虑到本系统以热水供应为主,电力供应为辅,因此以太阳能集热器的最佳倾角作为隔音棚的倾角。太阳能集热器最佳倾角主要是以集热器接收的年太阳辐射量最大或集热器年需辅助加热量最小为目标来确定^[7]。本文以集热器全年接收到的太阳辐射量最大为原则来确定,因此本系统在武汉地区应用时,隔音棚的最佳倾角为 23.9° ^[7]。

当隔音棚倾角为 23.9° 时,武汉地区各月的平均日照时长、组件单位面积接收到的太阳辐射总量及太阳辐射强度如表1所示。

2.2 太阳能热水区和光伏发电区的面积比例

根据 GB/T 20095-2006《太阳热水系统性能评定规范》^[8],太阳能集热器的热效率 η_1 取41%(该值已考虑加热过程中的热量散失)。

表 1 武汉地区各月平均日照时长、组件单位面积
太阳辐射总量及太阳辐射强度表

月份	平均日照 时长	组件单位面积 太阳辐射总量 /MJ·m ⁻²	太阳辐射 强度 /W·m ⁻²
1	10 h 20 min	252.2	218.7
2	11 h 00 min	251.6	226.9
3	11 h 50 min	291.0	220.3
4	12 h 53 min	371.7	267.1
5	13 h 40 min	416.8	273.3
6	14 h 7 min	413.6	271.3
7	13 h 58 min	495.0	317.6
8	13 h 12 min	516.8	350.8
9	12 h 30 min	422.3	312.8
10	11 h 21 min	372.8	294.3
11	10 h 30 min	322.9	284.6
12	10 h 18 min	293.6	255.6

集热管采用真空管, 1 m² 热水区内的自来水体积 V 可按式 (1) 计算, 公式为:

$$V = \frac{\pi d^2}{4s} \quad (1)$$

式中, d 为真空管内径, 取 40 mm; s 为管

间距, 取 60 mm^[9]。

代入相关数值后, 可得 $V=0.02 \text{ m}^3$ 。

由于自来水供水管道暴露于室外, 可认为自来水温度等于环境温度, 因此, 武汉地区各月的自来水初始温度 T_0 取各月的平均环境温度。每个月太阳能集热器可将自来水从初始温度 T_0 加热至温度 T , 二者之间的关系式为:

$$T = \frac{3600\eta_1 P t_0}{cV} + T_0 \quad (2)$$

式中, P 为太阳辐射强度; t_0 为加热时长, 即平均日照时长^[10]; c 为水的比热容, 取 $4.2 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$ 。

热水供给温度 $T_{\text{供}}$ 一般为 60°C , 因此当 $T < 60^\circ\text{C}$ 时, 需要靠电能辅助加热至 60°C , 所需电能 Q 可由式 (3) 进行计算:

$$Q = cV\Delta T \quad (3)$$

式中, ΔT 为 T 与 $T_{\text{供}}$ 的差值。

武汉地区各月热水区面积为 1 m² 时水的电辅助加热用电量如表 2 所示。

表 2 武汉地区各月 1 m² 热水区水的电能辅助加热所需电量

月份	自来水初始 温度 $T_0/^\circ\text{C}$	平均日照 时长 t_0	太阳辐射 强度 $P/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	一次加热温度 $T/^\circ\text{C}$	与热水供给温度差 $\Delta T/^\circ\text{C}$	辅助加热用电量 Q/MJ
1	4	10 h 20 min	218.7	43.7	-16.3	1.37
2	6	11 h 00 min	226.9	49.9	-10.1	0.85
3	11	11 h 50 min	220.3	56.8	-3.2	0.27
4	17	12 h 53 min	267.1	77.5	17.5	0
5	22	13 h 40 min	273.3	87.6	17.6	0
6	26	14 h 07 min	271.3	92.7	32.7	0
7	30	13 h 58 min	317.6	100.0	40.0	0
8	32	13 h 12 min	350.8	100.0	40.0	0
9	26	12 h 30 min	312.8	94.7	34.7	0
10	18	11 h 21 min	294.3	76.7	16.7	0
11	13	10 h 30 min	284.6	65.5	5.5	0
12	8	10 h 18 min	255.6	54.3	-5.7	0.48

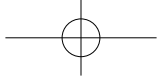
全年电辅助加热所需电能 $Q_{\text{总}}$ 为:

$$Q_{\text{总}} = \sum Qd \quad (4)$$

式中, d 为各月天数。

代入相关数值, 可得 $Q_{\text{总}}=89.52 \text{ MJ}$ 。

光伏发电区所发电量主要用于水的辅助加热, 对于面积为 1 m² 的热水区, 需要配置面积



为 S 的光伏发电区。倾角为 23.9° 的光伏组件单位面积上全年太阳辐射总量 $Q_{\text{太阳}}$ 取 4130.3 MJ/m^2 , 光伏组件发电效率 η_2 取 18% , 电热水效率 η_3 取 85% , 则光伏发电区的面积 S 为:

$$S = \frac{Q_{\text{总}}}{\eta_2 \eta_3 Q_{\text{太阳}}} \quad (5)$$

代入相关数值后, 可得 $S=0.14 \text{ m}^2$ 。

由计算结果可知, 武汉地区常年光照充足, 大多数月份仅依靠集热器就能完成自来水的加热, 但由于光伏发电区还需要为路灯供电, 因此太阳能热水区和光伏发电区的面积之比可取为 $1:0.2$ 。对于武汉地区的城市道路而言, 隔音棚顶棚上主要铺设太阳能集热器即可, 这样可以降低系统造价。但为了充分利用太阳能资源, 增加发电量, 可以按道路周边建筑热水需求量确定太阳能热水区的面积, 其余部分仍铺设光伏组件。

2.3 雨水引水渠的设计

雨水引水渠可仿照建筑天沟的做法, 按 CJJ 142-2014《建筑屋面雨水排水系统技术规程》^[11] (下文简称为《建排规程》) 进行计算。

根据《建排规程》3.3.4, 设计暴雨强度 q 可按式 (6) 计算:

$$q = \frac{167A(1+C\lg p)}{(t+B)^n} \quad (6)$$

式中, A 、 B 、 C 、 n 为各地区的降雨参数, 对于武汉地区, $A=5.898$ 、 $B=4$ 、 $C=0.65$ 、 $n=0.56$; p 为设计重现期, 对于城市道路引水渠, 可按重要公共建筑屋面取值, 即 $p=10$ 年; t 为降雨历时, 一般可取 $t=5 \text{ min}$ 。

代入相关数据后, 可得 $q=4.74 \text{ L/(s} \cdot 100 \text{ m}^2)$ 。

根据《建排规程》3.3.1, 汇水面雨水设计流量 Q_L 可按式 (7) 计算:

$$Q_L = k \Psi q F \quad (7)$$

式中, k 为汇水系数, 取 1.0 ; Ψ 为径流系数, 此处可取 1.0 ; F 为汇水面面积, 对于坡度较大的汇水面, 其值为汇水面水平投影面积与一半的竖向投影面积之和。对于本系统, 汇水面为隔音

棚顶棚, 其倾角为 23.9° , 第 20 m 设置 1 个落水管, 城市道路宽取 30 m , 则单位道路长度的汇水面面积 $F=360.64 \text{ m}^2$ 。

代入相关数据后, 可得 $Q_L=17.4 \text{ L/s}$, 即 $17.4 \times 10^7 \text{ mm}^3/\text{s}$ 。

设引水渠宽度 b 为 200 mm ; 引水渠为水泥砂浆抹面的混凝土槽, 粗糙度 n 为 $0.012 \sim 0.013$, 取 $n=0.013$; 引水渠内水流速度 v 为 0.75 m/s (此为保持天沟不淤积的最小流速), 则引水渠过水断面面积 A_q 为:

$$A_q = \frac{Q_L}{v} \quad (8)$$

将相关数值代入, 可得 $A_q=23200 \text{ mm}^2$ 。

引水渠设计水深 h 为:

$$h = \frac{A_q}{b} \quad (9)$$

将相关数值代入, 可得 $h=116 \text{ mm}$ 。

根据《建排规程》中的规定, 引水渠有效深度 H 的公式为:

$$H = h + h_0 \quad (10)$$

式中, h 为设计水深; h_0 为最小保护高度, 该值不得小于 75 mm 。

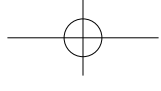
代入相关数据可得, $H=191 \text{ mm}$ 。根据《建排规程》中的规定, 引水渠的有效深度 H 不宜小于 250 mm , 因此取 $H=250 \text{ mm}$ 。

根据《建排规程》中的规定, 引水渠的纵向排水坡度 i 不应小于 0.3% , 因此取 $i=0.5\%$ 。

综上, 雨水引水渠可设计为宽度 200 mm , 深度 250 mm , 内部纵向排水坡度为 0.5% 。

3 结论

本文提出了一种“绿色新型道路系统”设想, 将全封闭式城市道路隔音棚顶棚与太阳能热利用、光伏发电、降雨收集处理有机结合, 打造了“供热水、发电、蓄水、隔音”四位一体的绿色新型道路系统。该系统充分利用了优质光照资源, 减少了碳排放; 有效利用了自然雨水, (转第 70 页)



行时, 组件的光电转换效率最高可达 11.24%; 当热泵机组未运行时, 组件的光电转换效率最高为 10.16%。

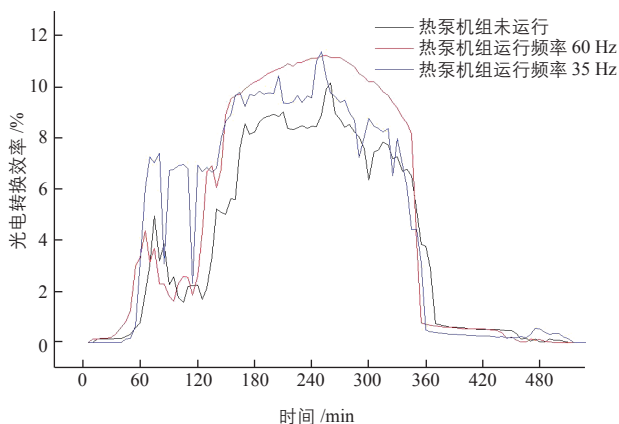


图7 不同工况下 CIGS 薄膜光伏组件光电转换效率的变化曲线

2.3 小结

综上所述, 光伏组件背板温度受环境温度的影响较大, 尤其是在日平均气温较高时, 背板温度对组件光电转换效率的影响更为明显。因此, CIGS 薄膜光伏组件与热泵机组联合运行不仅可以获取热水, 还可以显著提高光伏组件的发电效率。尤其是采用变频式热泵机组, 可以根据太阳辐射强度适时地调节其运行功率, 起到节能的效果。

3 结论

本文以北京地区为例, 构建了 CIGS-BIPV/T 系统实验平台, 对 CIGS-BIPV/T 系统在 3 种不同工况下将 200 L 水从 15 °C 加热至 50 °C 过

(接第 60 页)

D 形水箱的太阳能热水器的日有用得热量提高了 7.3%, 平均热损因数降低了 6.3%, 热性能指标有明显提升。D 形水箱改变了传统太阳能热水器水箱的圆形外观, 不仅提升了传热效果, 还增加了视觉效果, 可以与建筑物的斜屋顶进行更好的结合; 并且方便布置光伏组件, 增加了其附加功能。

程中组件背板温度的变化情况进行了测试, 得到组件的发电功率与光电转换效率变化曲线。实验结果表明, 背板温度对光伏组件光电转换效率的影响显著, CIGS 薄膜组件与热泵机组联合运行不仅可以获取热水, 还可以显著提高组件的发电效率。

参考文献

- [1] 季杰, 程洪波, 何伟, 等. 太阳能光伏光热一体化系统的实验研究[J]. 太阳能学报, 2005, (2): 170 - 173.
- [2] Zondag H A, De Vries D W, Van Helden W G J, et al. The yield of different combined PV-thermal collector designs[J]. Solar Energy, 2003, 74(3): 253 - 269.
- [3] Chow T T, Pei G, Fong K F, et al. Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector with and without glass cover[J]. Applied Energy, 2009, 86(3): 310 - 316.
- [4] 季杰, 刘可亮, 裴刚, 等. 对太阳能热泵 PV 蒸发器的理论研究及基于分布式参数法的数值模拟[J]. 太阳能学报, 2006, 27(12): 1202 - 1207.
- [5] Brinkworth B J, Cross B M, Marshall R H, et al. Thermal regulation of photovoltaic cladding[J]. Solar Energy, 1997, 61(3): 169 - 178.
- [6] Chyng J P, Lee C P, Huang B J. Performance analysis of a solar-assisted heat pump water heater[J]. Solar Energy, 2003, 74(1): 33 - 44.
- [7] Bellos E, Tzivanidis C, Moschos K, et al. Energetic and financial evaluation of solar assisted heat pump space heating systems[J]. Energy Conversion & Management, 2016, 120: 306 - 319.
- [8] Yahya M, Fudholi A, Hafizh H, et al. Comparison of solar dryer and solar-assisted heat pump dryer for cassava[J]. Solar Energy, 2016, 136: 606 - 613.
- [9] Tzivanidis C, Bellos E, Mitsopoulos G, et al. Energetic and financial evaluation of a solar assisted heat pump heating system with other usual heating systems in Athens[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 106: 87 - 97. 太阳能

参考文献

- [1] 李仁飞, 高文峰, 刘滔, 等. 累计太阳辐射量对真空管太阳能热水器日得热量的影响[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2014, 34(1): 31 - 35.
- [2] GB/T 18708-2002, 家用太阳热水系统热性能试验方法[S].
- [3] 刘海波, 组建立, 于海芹, 等. 家用太阳热水系统标准探讨[J]. 节能, 2010, 29(1): 8 - 11, 2.
- [4] GB/T 19141-2011, 家用太阳热水系统技术条件[S]. 太阳能