

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.S1.025

# 跨海集群工程节能减排关键技术研究

杨秀军<sup>1</sup>, 刘建昌<sup>2</sup>, 王小军<sup>3</sup>, 汪鹏<sup>4</sup>, 汤召志<sup>1</sup>

(1. 北京交科公路勘察设计院有限公司, 北京 100191; 2. 交通运输部规划研究院, 北京 100028;  
3. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067; 4. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640)

**摘要:** 港珠澳大桥跨海集群工程囊括跨海桥梁、沉管隧道、离岸人工岛等多个领域。跨海集群工程由于建设期及运营期能耗巨大, 国内外尚无节能减排的成套技术指导工程建设, 成为制约跨海集群工程持续发展的瓶颈之一。本文依托港珠澳大桥跨海集群工程建设和运营过程, 采用理论研究、数值分析及模拟测试等多种方法, 开展了集群工程节能减排指标体系和长大沉管隧道通风、照明、人工岛运营节能减排关键技术研究, 成果支撑了工程项目节能减排目标的实现。

**关键词:** 跨海集群工程; 节能减排评价体系; 隧道智能通风系统; 自然光照明; 海水源热泵; 光伏发电技术

中图分类号: U457.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2017) S1-0134-08

## Study on Key Technologies of Energy Saving and Emission Reduction in Cross-sea Cluster Project

YANG Xiu-jun<sup>1</sup>, LIU Jian-chang<sup>2</sup>, WANG Xiao-jun<sup>3</sup>, WANG Peng<sup>4</sup>, TANG Zhao-zhi<sup>1</sup>

(1. RIOH Transport Consultants Ltd., Beijing 100191, China; 2. China Academy of Transportation Sciences, Beijing 100028, China;  
3. China Merchants Chongqing Communications Technology Research Design & Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China;  
4. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Guangdong 510640, China)

**Abstract:** Hong Kong - Zhuhai - Macao Bridge cross-sea cluster project includes cross-sea bridge, immersed tunnel, offshore artificial island and other parts. Due to huge energy consumption during the construction and operation period of this cross-sea cluster project, there is no a complete set of technologies to guide the construction, which is one of the bottlenecks restricting the sustainability development of the cross-sea cluster project. Based on the construction and operation period of Hong Kong - Zhuhai - Macao Bridge project, various methods including theoretical research, numerical analysis and simulation test are adopted to study the energy saving and emission reduction index system key technologies, including ventilation and lighting for immersed tunnel, energy-saving and emission reduction for artificial island. The result supports the accomplishment of the project's energy-saving emission reduction target.

**Key words:** bridge engineering; cross-sea cluster project; energy saving and emission reduction evaluation system; tunnel intelligent ventilation system; natural light lighting; sea water source heat pump; photovoltaic power generation technology

## 0 引言

港珠澳大桥主体工程采用桥隧组合方案, 穿越

伶仃西航道和铜鼓航道段约 6.7 km 采用隧道方案, 其余路段约 22.9 km 采用桥梁方案。为实现桥隧转换和设置通风井, 主体工程隧道两端各设置一个海

收稿日期: 2017-10-30

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2011BAG07B05); 贵州省交通运输厅科技项目 (2016-123-013)

作者简介: 杨秀军 (1981-), 男, 山东诸城人, 硕士, 高级工程师. (xj.yang@rioh.cn)

中人工岛。港珠澳大桥跨海集群工程囊括跨海桥梁、海底隧道、离岸人工岛等多个领域, 工程建设难度大, 建设期和运营期耗能高度集中<sup>[1-3]</sup>。目前国内、外缺少集群工程节能减排的成套技术, 面临工程节能减排衡量标准不统一、效果数据难采集、核算边界不清楚、分项工程差异大、隧道运营费用偏高等现实困难。本研究主要针对岛隧工程节能减排有重大影响和项目中已经采用的技术, 以港珠澳大桥跨海集群工程为例, 介绍了跨海集群工程节能减排的评价核算指标体系, 离岸特长沉管隧道通风节能成套技术、照明节能成套技术以及人工岛清洁能源利用等相关成果。目前相关研究成果已经在港珠澳大桥建设中得到应用, 取得了较好的应用效果。

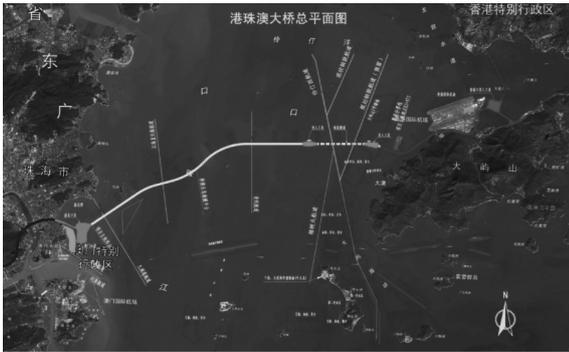


图 1 项目总体平面图

Fig. 1 Overall plane view of project

1 跨海集群工程建设期节能减排指标体系及评价模型构建

本节在分析国内外相关资料的基础上, 借鉴其他工程的经验, 结合港珠澳工程本身的建设特点, 找出工程建设过程中的节能减排要点, 建立跨海集群工程建设节能减排的指标体系<sup>[4-8]</sup>。由于港珠澳大桥跨海集群工程主要分项工程为海底隧道、人工岛、跨海大桥等, 因此建立了包含一个整体工程、3 个组成工程的节能减排指标体系。本节仅列出整个大桥工程的指标体系。

建设期的能源消耗、温室气体排放和污染物排放量由内源性和外源性能源消耗、温室气体排放和污染物排放组成。内源性能源消耗、温室气体排放和污染物排放是工程本身建设过程中直接的能源消耗、温室气体排放和污染物排放, 外源性碳排放量是工程建设过程中因使用建材等材料在外生产系统已经产生的能源消耗、温室气体排放和污染物排放量。计算模型如下:

表 1 跨海集群工程建设期节能减排指标

Tab. 1 Energy saving and emission reduction indexes of cross-sea cluster project during construction period

目标	准则层指标	具体指标	指标类型
节能 A <sub>1</sub>	节能 A <sub>1</sub>	总能耗 (A <sub>11</sub> )	定量
		内源性能耗 (A <sub>12</sub> )	定量
		外源性能耗 (A <sub>13</sub> )	定量
		单位投资能耗 (A <sub>14</sub> )	定量
		单位投资内源性能耗 (A <sub>15</sub> )	定量
		单位投资外源性能耗 (A <sub>16</sub> )	定量
		单位长度能耗 (A <sub>17</sub> )	定量
		单位长度内源性能耗 (A <sub>18</sub> )	定量
		单位长度外源性能耗 (A <sub>19</sub> )	定量
		总能耗减少量 (A <sub>1a</sub> )	定量
		内源性能耗减少量 (A <sub>1b</sub> )	定量
		外源性能耗减少量 (A <sub>1c</sub> )	定量
集材 A <sub>2</sub>	集材 A <sub>2</sub>	总钢材用量 (A <sub>21</sub> )	定量
		总水泥用量 (A <sub>22</sub> )	定量
		总新鲜用水量 (A <sub>23</sub> )	定量
		单位长度钢材使用减少量 (A <sub>24</sub> )	定量
		单位长度水泥使用减少量 (A <sub>25</sub> )	定量
		单位长度新鲜用水减少量 (A <sub>26</sub> )	定量
跨海集群工程 (建设期) 节能减排 (A)	跨海集群工程 (建设期) 节能减排 (A)	温室气体总排放量 (A <sub>31</sub> )	定量
		内源性温室气体排放量 (A <sub>32</sub> )	定量
		外源性温室气体排放量 (A <sub>33</sub> )	定量
		单位投资温室气体排放强度 (A <sub>34</sub> )	定量
		单位投资内源性温室气体排放强度 (A <sub>35</sub> )	定量
		单位投资外源性温室气体排放强度 (A <sub>36</sub> )	定量
		单位长度温室气体排放强度 (A <sub>37</sub> )	定量
		单位长度内源性温室气体排放强度 (A <sub>38</sub> )	定量
		单位长度外源性温室气体排放强度 (A <sub>39</sub> )	定量
		温室气体总排放减少量 (A <sub>3a</sub> )	定量
		内源性温室气体排放减少量 (A <sub>3b</sub> )	定量
		外源性温室气体排放减少量 (A <sub>3c</sub> )	定量
降污 A <sub>4</sub>	降污 A <sub>4</sub>	污染物排放总量 (A <sub>41</sub> )	定量
		内源性污染物排放量 (A <sub>42</sub> )	定量
		外源性污染物排放量 (A <sub>43</sub> )	定量
		施工污水排放达标率 (A <sub>44</sub> )	定量
		施工噪声达标率 (A <sub>45</sub> )	定量
		施工固废处置率 (A <sub>46</sub> )	定量
		环保投资比例 (A <sub>47</sub> )	定量
		环保应急能力 (A <sub>48</sub> )	定性

表 2 跨海集群工程运营期节能减排指标体系

Tab. 2 Energy saving and emission reduction index system for cross-sea cluster project during operation period

目标层(O) 要素层(E)	指标层(C)	备注
节能指标 (E1)	运营总能耗(C <sub>1</sub> )	定量
	单位长度运营维护能耗(C <sub>2</sub> )	
	可再生能源利用量(C <sub>3</sub> )	
	可再生能源使用比例(C <sub>4</sub> )	
	节能措施节能量(C <sub>5</sub> )	
	节能措施节能比例(C <sub>6</sub> )	
跨海集群 工程节能 减排指标 体系(O)	温室气体排放量(C <sub>7</sub> )	定量
	废水排放量(C <sub>8</sub> )	
	COD 排放量(C <sub>9</sub> )	
	CO 排放量(C <sub>10</sub> )	
	NO <sub>x</sub> 排放量(C <sub>11</sub> )	
	单位长度温室气体排放量(C <sub>12</sub> )	
	单位长度废水排放量(C <sub>13</sub> )	
	单位长度 COD 排放量(C <sub>14</sub> )	
	单位长度 CO 排放量(C <sub>15</sub> )	
	单位长度 NO <sub>x</sub> 排放量(C <sub>16</sub> )	
管理性 综合指标 (E3)	节能减排管理机构设置情况(C <sub>17</sub> )	定性
	能源计量工具配备情况(C <sub>18</sub> )	
	环境监测设施配备情况(C <sub>19</sub> )	
	环境事故应急处置能力(C <sub>20</sub> )	
	节能减排公报发布情况(C <sub>21</sub> )	

$$\begin{cases} C_1 = C_{1N} + C_{1W} \\ C_{1N} = \sum_{i=1}^n C_{1Ni} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{Nij} X_{Nij} \\ C_{1W} = \sum_{i=1}^n C_{1Wi} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{Wij} X_{Wij} \end{cases}$$

式中, C<sub>1</sub>为建设期能源消耗、温室气体排放和污染物排放量; C<sub>1N</sub>为建设期内源性能源消耗、温室气体排放和污染物排放量,工程本身建设过程中直接的能源消耗、温室气体排放和污染物排放量; C<sub>1W</sub>为建设期外源性能源消耗、温室气体排放和污染物排放量,工程建设过程中因使用建材等材料在外生产系统已经产生的能源消耗、温室气体排放和污染物排放量; C<sub>1Ni</sub>、C<sub>1Wi</sub>分别为第 i 项工程(典型工程)的内源性、外源性能源消耗、温室气体排放和污染物排放量; A<sub>Nij</sub>、A<sub>Wij</sub>分别为内源性、外源性能源消耗、温室气体排放和污染物排放系数; X<sub>Nij</sub>、X<sub>Wij</sub>分别为可引起内源性、外源性能源消耗、温室气体排放和污染物排放量的第 i 工程的 j 环节的工程量; i = 1,

2, …, n, 表示各类工程类型,即临时工程、路面工程、路基工程、桥梁工程、隧道工程、交叉工程、绿化环保工程、公共设施及管线工程、机电工程等; j = 1, 2, …, m, 表示各类能源、资源、材料、人工等方面的用量,即机械燃用燃料、资源性改变、人工消耗、建筑材料使用等方面可排碳环节产生的不同类别工程量,其中前 3 项为内源性能源消耗、温室气体排放和污染物排放量来源,后一项为外源性能源消耗、温室气体排放和污染物排放量的来源。

运营期的能源消耗、温室气体排放和污染物排放量由行驶车辆、工程配套设施正常运转等环节碳排放量和工程养护各项环节产生,均分别由各自的内源性和外源性能源消耗、温室气体排放和污染物排放量。计算模型如下:

$$\begin{cases} C_2 = C_{2C} + C_{2Y} = C_{2CN} + C_{2CW} + C_{2YN} + C_{2YW} \\ C_{2CN} = k \sum_{i=1}^n C_{2CNi} = k \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m B_{CNij} Y_{CNij} \\ C_{2CW} = k \sum_{i=1}^n C_{2CWi} = k \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m B_{CWij} Y_{CWij} \\ C_{2YN} = k \sum_{i=1}^n C_{2YNi} = k \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m B_{YNij} Y_{YNij} \\ C_{2YW} = k \sum_{i=1}^n C_{2YWi} = k \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m B_{YWij} Y_{YWij} \end{cases} \quad (2)$$

式中, C<sub>2</sub>为运营期能源消耗、温室气体排放和污染物排放量(静态值); C<sub>2C</sub>为运营期车辆运输、工程配套设施运转的能源消耗、温室气体排放和污染物排放量; C<sub>2Y</sub>为运营期工程养护能源消耗、温室气体排放和污染物排放量; C<sub>2CN</sub>为运营期车辆运输、工程配套设施运转的内源性能源消耗、温室气体排放和污染物排放量; C<sub>2CW</sub>为运营期车辆运输、工程配套设施运转的外源性能源消耗、温室气体排放和污染物排放量; C<sub>2YN</sub>为运营期工程养护的内源性能源消耗、温室气体排放和污染物排放量; C<sub>2YW</sub>为运营期工程养护的外源性能源消耗、温室气体排放和污染物排放量; C<sub>2CNi</sub>为第 i 项车辆运输、工程配套设施运转的运营养护工作的年内源性能源消耗、温室气体排放和污染物排放量; C<sub>2CWi</sub>为第 i 项车辆运输、工程配套设施运转的运营养护工作的年外源性能源消耗、温室气体排放和污染物排放量; C<sub>2YNi</sub>为第 i 项工程养护的运营养护工作的年内源性能源消耗、温室气体排放和污染物排放量; C<sub>2YWi</sub>为第 i 项工程养护的运营养护工作的年外源性能源消耗、温室气体排放和污染物排放量; B<sub>CNij</sub>, B<sub>CWij</sub>, B<sub>YNij</sub>, B<sub>YWij</sub>分别为车辆运

输、工程配套设施运转、工程养护的内、外源性能源消耗、温室气体排放和污染物排放系数;  $Y_{CNij}$ ,  $Y_{CWij}$ ,  $Y_{YNij}$ ,  $Y_{YWij}$  分别为车辆运输、工程配套设施运转、工程养护的可引起内、外源性能源消耗、温室气体排放和污染物排放的第  $i$  工作类别  $j$  环节工作量;  $i = 1, 2, \dots, n$ , 即车辆运输、工程配套设施运转、工程养护等运营工作中的各个类别;  $j = 1, 2, \dots, m$ , 即各个不同车型、不同燃料种类、不同机械类别、不同建材类别等所使用的量;  $k$  为工程使用年限。

根据建立的核算体系和评价模型可以对港珠澳大桥跨海工程建设期和运营期的节能减排效果进行评价。

## 2 隧道通风节能技术研究

隧道通风系统是隧道的能耗大户, 以港珠澳大桥沉管隧道为例, 隧道通风系统用电负荷占到隧道用电总负荷的 78%, 因而对隧道通风系统进行节能减排技术研究对隧道运营节能意义重大。

针对港珠澳大桥沉管隧道的工程特点, 对通风系统节能的关键因素进行了识别, 对通风系统设计关键参数确定<sup>[9-13]</sup>、射流风机效率提升<sup>[12]</sup>、洞口污染气体串流干预、自然风在隧道通风有效利用<sup>[14]</sup>、轴流变频技术进行了综合节能技术研究, 在此基础上基于污染物控制指标、交通量、交通组成及风机控制之间的最优匹配关系和通风变频技术, 开发了沉管隧道多目标智能通风控制系统, 达到隧道通风按需通风的目的。

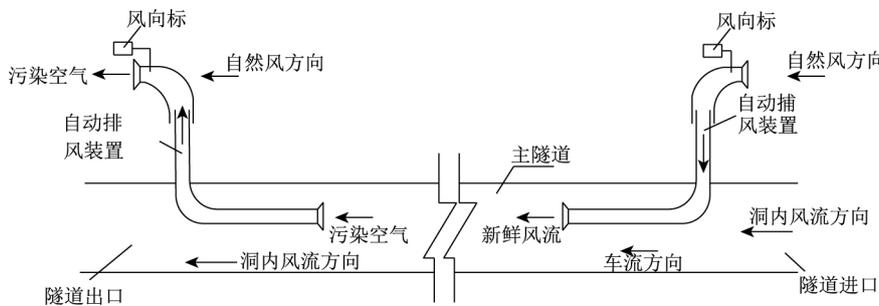


图 3 隧道自动捕风装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of tunnel automatic wind catching device

在外界自然风风向与捕风装置的角度在  $0^\circ \sim 45^\circ$  之间时, 流进管内的流量较小, 而在  $45^\circ \sim 90^\circ$  之间时, 则流进管内的流量较大。即在该角度下可以保证捕风装置能以较高的效率工作<sup>[14]</sup>。该设施在隧道交通流较小的情况下可以对隧道内运营环境有所缓解, 降低机械通风的能耗。

考虑到隧道洞口的实际情况, 通过 CFD 软件建立了三维数值模型, 进行了洞口污染气体扩散的数值模拟。对增加中隔墙的长度、遮光棚顶端开口及增加中隔墙的长度 + 遮光棚顶端开口不同方案, 洞口污染气体扩散路径分析, 确定其最终解决方案。综合分析采用中隔墙加长及顶部开口方案对污染气体扩散路径进行干预。

对隧道出口处无风时, 对遮光棚顶部方案的污染空气串流情况进行了模拟, 采用 CO 作为示踪气体, 洞口污染气体扩散如图 2 所示。

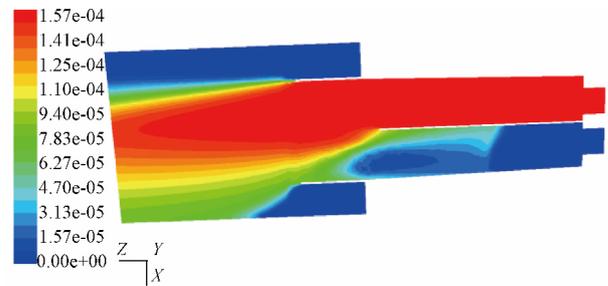


图 2 洞口污染气体扩散云图 (单位:  $cd^3/m^3$ )

Fig. 2 Nephogram of pollutant gas diffusion near Tunnel portal (unit:  $cd^3/m^3$ )

经测算大约有 5% 污染气体进入相邻隧道, 相对与原方案的 20%, 大大降低了污染气体串流所带来的不利影响, 降低了通风系统能耗。

考虑到港珠澳大桥区域自然风资源丰富, 且风向比较稳定的特点, 对自然风利用进行了研究。开发的自动捕风装置基于上述自然风原理进行设计, 该装置示意图如图 3 所示<sup>[14]</sup>。

射流风机的横断面安装间距, 纵向设置间距也会对风机效率产生影响, 通过研究确定了最优风机的设置方案, 提高了射流风机效率。

在对隧道通风系统综合节能技术研究的基础上, 为更好地实现风机控制, 达到按需通风的目的。利用变频技术, 实现交通量、交通组成、车速、污染

物控制指标以及风机开启方案（见图 4）之间的最优匹配在 PIARC 通风技术规范的基础上，开发了长大沉管隧道智能通风模拟系统。

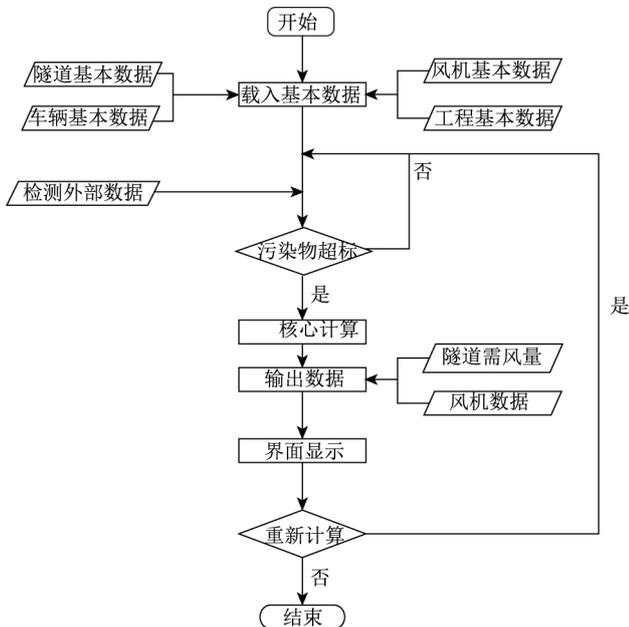


图 4 隧道智能通风系统计算流程图

Fig. 4 Calculation flowchart of tunnel intelligent ventilation system

通过隧道前方设置的车检器采集的交通数据输入到监控中心的计算软件，根据风机位置，隧道内污染气体浓度，确定风机开启方案，实现按需通风的目的。

### 3 隧道照明节能技术研究

隧道照明是隧道运营另一个耗电大户，照明系统能否节能运行对项目运营期节能至关重要。结合隧道地处海域，自然光自然充裕，根据太阳辐射度和光度学理论，进行了公路隧道太阳光光纤照明的适应性研究。结合不同太阳光辐射条件与隧道照明需求对太阳光照明系统的影响，建立起特定照明需求下不同太阳辐射强度与所需的太阳光光纤照明系统规模之间的关系，如图 5 所示。

考虑到一天不同时刻太阳高度角不同，太阳光光纤照明系统的光采集器与太阳光入射角度的夹角不同，从而影响到太阳光采集系统所采集到的太阳光能量的大小。在太阳光光纤照明系统的研究中分析了太阳光追踪系统对光采集效果的影响，确定太阳光追踪效率对光采集效果的影响，分析结果如图 6 所示，从而为太阳光光纤照明系统的设计与研制提供了理论基础<sup>[15-16]</sup>。

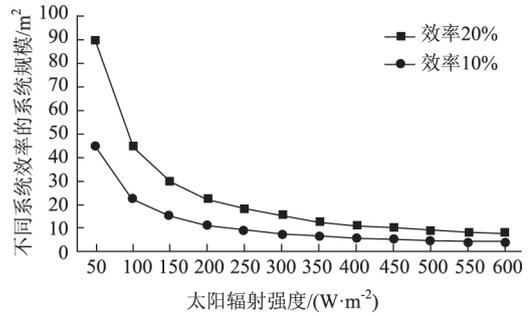


图 5 太阳辐射强度与所需系统规模的关系

Fig. 5 Relationship between solar radiation intensity and required system scale

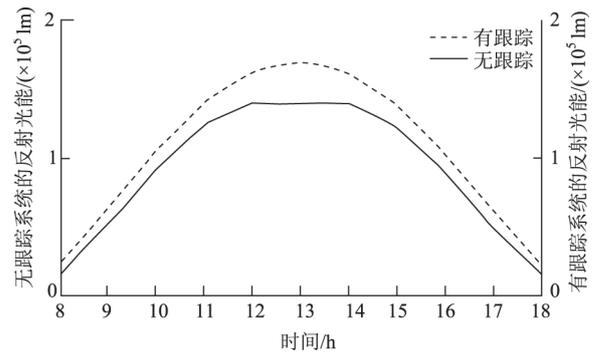


图 6 太阳光跟踪系统影响

Fig. 6 Effect of sunshine tracking system

根据隧道入口段高亮度的照明要求，在对现在技术调研的基础上，对太阳光光纤照明系统的构成进行了研究。主要包括太阳光采集方法、传输太阳光的光纤技术及太阳光出射系统。

针对目前太阳光采集系统由于受到采光面积或采光系统结构限制，使得现有太阳光采集器所收集的太阳光能偏低，不能满足隧道照明高光通量的需求。研究采用光线跟踪原理，设计了高效的自由曲面透镜太阳光采集器，根据隧道照明所需光通量和系统设计对光线进行追踪，确定符合隧道照明光能要求的自由曲面透镜的表面结构、焦距等结构参数。其模型及光线追踪效果如图 7 所示。

隧道照明要求不同于一般建筑的照明要求，现有太阳光光纤照明系统的出射尾灯均是针对一般建筑设计，出射光的光强分布不能满足隧道照明要求。结合隧道照明的光分布要求及从光纤尾端出射光的光强分布，对光纤尾灯进行了全新设计，根据隧道照明要求进行了尾灯的配光分布设计，使出射的太阳光符合隧道空间矩形配光的照明分布要求，从而提高了太阳光的利用率，避免了太阳光的浪费<sup>[17-18]</sup>。

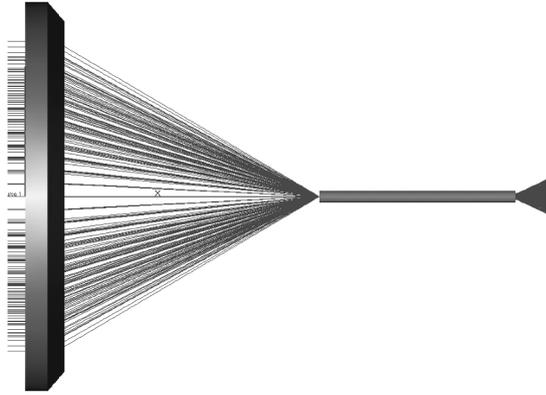


图 7 太阳光采集器的三维结构及模拟仿真图

Fig. 7 Three-dimensional structure and simulation of sunshine collector

在太阳光光纤照明理论及设计方法与布灯方法研究的基础上, 考虑了洞外太阳光条件不足时, 隧道照明仍需满足我国《公路隧道照明设计细则》所规定的要求, 研究在自然光与人工光相结合的照明方式下, 采用最优化控制方式, 根据洞外太阳光条件, 结合不同天气及不同时段所需达到的隧道照明要求, 进行自然光光纤照明技术与人工光照明技术之间的优化控制, 从而在满足隧道照明所需光通量的前提下, 充分利用太阳光能, 大大减少隧道照明能耗, 具体控制方法流程如图 8 所示。研究将自然光与人工光相结合的照明方式应用到隧道全区段, 根据不同区段隧道照明要求及在太阳光照明的前提下, 通过检测隧道照明段的实际光照效果和光通量需求, 调节人工光的光照强度, 实现在太阳光照明下, 自然光与人工光的有效互补, 从而在满足隧道照明需求的前提下, 实现太阳光的最大利用率。

#### 4 人工岛清洁能源利用

港珠澳大桥跨海集群工程地处海域, 海水资源及太阳能资源丰富, 如何有效地利用清洁能源, 减少对化石能源的利用, 对人工岛节能具有重要影响。

本研究结合工程特点建立了符合海岛建筑空调热水能耗特点的太阳能海水源热泵系统冷热联供负荷计算模型, 实现太阳能集热器和海水源热交换器工况最佳控制策略, 促进冷热联供系统的集成高效利用; 依据海岛环境进行太阳能光伏发电的应用测试分析, 提出适合于人工岛用电负荷需求的光伏供电及并网控制系统, 实现海岛可再生能源的最大化利用, 减少对环境的排放; 进一步针对太阳能海水

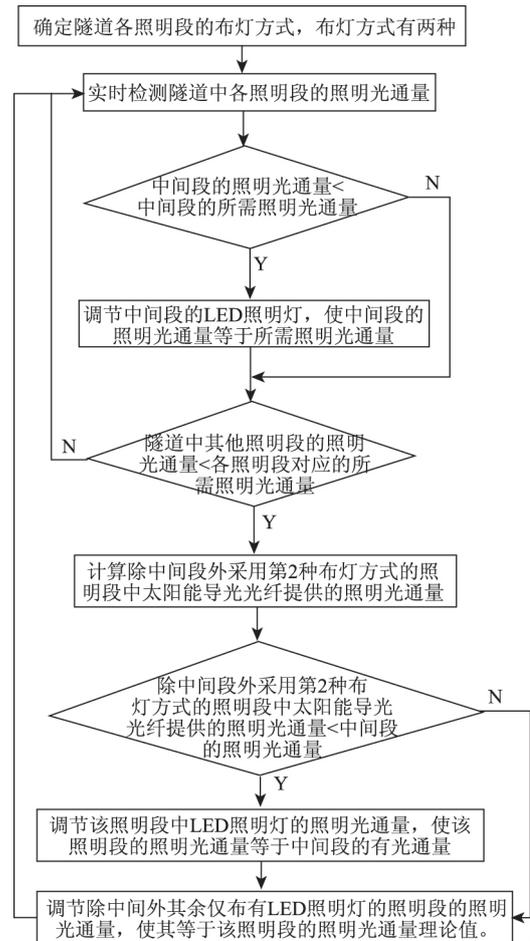


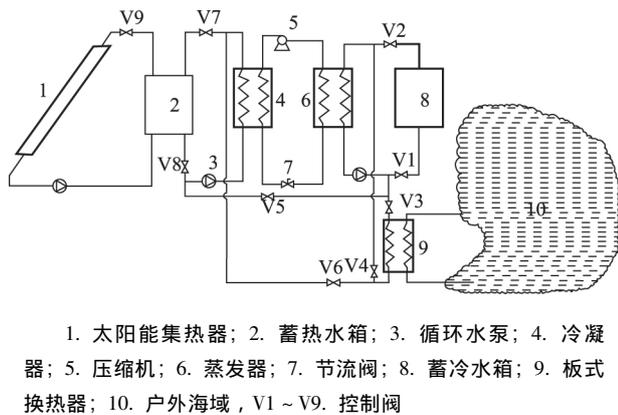
图 8 自然光与人工光相结合的隧道照明控制方法  
Fig. 8 Tunnel lighting control method combining natural and artificial light

源热泵技术和光伏微网发电技术提出人工岛节能减排技术方案, 并使用静态和动态投资的评价方法对其进行评价。同时建立人工岛用能系统评价模型, 从技术、经济、环境 3 方面综合对技术方案的效果进行评价, 为工程设计提供支撑。

太阳能水源热泵复合系统如图 9 所示, 该系统由两大部分组成: 一部分为太阳能集热系统, 由太阳能平板集热器、蓄热水箱、循环泵和控制阀组成; 另一部分为海水源热泵系统, 主要由海水源热泵、板式换热器、蓄冷水箱及户外海域等组成。这两部分通过水管、循环泵及控制阀有机连接在一起, 形成了太阳能海水源热泵三联供系统<sup>[19-20]</sup>。

太阳能集热系统、海水源热泵系统冷凝器端通过并联的方式对蓄热水箱进行加热; 蓄冷水箱、户外海域并联与蒸发器端连接从而实现冷量的储存, 或通过板式换热器将冷量释放至户外海域。

并网光伏电站主要由太阳电池方阵、并网逆变器、直流以及交流配电、防雷系统等组成, 包括太



1. 太阳能集热器; 2. 蓄热水箱; 3. 循环水泵; 4. 冷凝器; 5. 压缩机; 6. 蒸发器; 7. 节流阀; 8. 蓄冷水箱; 9. 板式换热器; 10. 户外海域, V1~V9. 控制阀

图9 太阳能海水源热泵复合系统结构原理图

Fig. 9 Schematic diagram of structure of solar water source heat pump compound system

阳电池组件、直流电缆及汇流箱、逆变器、交流配电柜、接入系统等。其中, 电池组件到逆变器的电气系统称为光伏发电单元系统, 也称光伏发电单元方阵; 并网逆变器输出三相电压并入市电 380 V 低压侧。10, 110 kV 交流系统, 是常规输配电系统<sup>[19-20]</sup>。

太阳能电池方阵将太阳能转化为直流电, 并通过直流汇流箱传递到与之相连的逆变器上, 逆变器采用最大功率跟踪 (MPPT) 技术最大限度将直流电 (DC) 转变成交流电 (AC), 输出符合电网要求的电能, 经过升压与高压电网连接。光伏并网发电系统的原理示意如图 10 所示。其中, 光伏发电系统的核心元件是太阳能电池组件和并网逆变器。

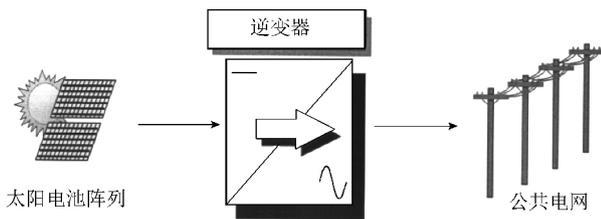


图10 并网光伏系统原理图

Fig. 10 Schematic diagram of grid-connected photovoltaic systems

## 5 结论

本研究依托港珠澳大桥跨海集群工程介绍了跨海集群工程节能减排的相关研究成果和工程实践。结合工程实践和节能减排需求, 建立了跨海集群工程节能减排指标体系及核算方法, 提出了智慧型的长大隧道照明与通风节能减排关键技术方案和人工岛运营节能减排技术方案, 支撑了港珠澳大桥工程的科学建设, 为后期运营节能提供了技术支持, 相关成果可为同

类工程的节能减排工作提供借鉴和参考。

参考文献:

References:

- [1] 张劲文, 朱永灵. 港珠澳大桥主体工程项目管理规划 [J]. 公路, 2012 (3): 143-147.  
ZHANG Jin-wen, ZHU Yong-ling. Project Management Planning for Construction of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge (HZMB) Main Bridge Project [J]. Highway, 2012 (3): 143-147.
- [2] 李英, 陈越. 港珠澳大桥岛隧工程的意义及技术难点 [J]. 工程力学, 2011 (S2): 67-77.  
LI Ying, CHEN Yue. The Importance and Technical Difficulties of Tunnel and Islands for Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge Project [J]. Engineering Mechanics, 2011 (S2): 67-77.
- [3] 陈越. 港珠澳大桥岛隧工程建造技术综述 [J]. 施工技术, 2013 (9): 1-5.  
CHEN Yue. Review on Construction Technology of Tunnel and Artificial Islands for Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. Construction Technology, 2013 (9): 1-5.
- [4] KIBERT C J. Policy Instruments for a Sustainable Built Environment [J]. Journal of Land Use and Environmental Law, 2002, 17: 379-394.
- [5] SONG J, PARMENTER B, WEBB A, et al. Impacts of Urbanization on Emissions and Air Quality: Comparison of Four Visions of Austin, Texas [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42 (19): 7294-7300.
- [6] SONG G, YU L, ZHANG X. Emission Analysis at Toll Station Area in Beijing with Portable Emission Measurement System [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2008, 2058: 106-114.
- [7] LIU H, BARTH M, SCORA G, et al. Using portable Emission Measurement Systems for Transportation Emissions Studies Comparison with Laboratory Methods [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2158: 54-60.
- [8] LEE J C, EDIL T B, TINJUM J M, et al. Quantitative Assessment of Environmental and Economic Benefits of Recycled Materials in Highway Construction [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2010, 2158: 138-142.
- [9] JTG/T D71-2004, 公路隧道交通工程设计规范 [S]. JTG/T D71-2004, Design Specification for Traffic Engineering of Highway Tunnel [S].
- [10] JTJ 026.1-1999, 公路隧道通风照明设计规范 [S]. JTJ 026.1-1999, Specifications for Design of Ventilation and Light of Highway Tunnel [S].
- [11] PIARC Technical Committee on Road Tunnel Operation (C5). Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation (2004) [R]. [S. l.]: PIARC-World Road Association, 2004.

- [11] 杨秀军, 王晓雯. 公路隧道通风中射流风机纵向最小间距研究 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2008, 27 (1): 40-43.  
YANG Xiu-jun, WANG Xiao-wen. Study on Minimum Longitudinal Distance of Jet Fan in Ventilation of Highway Tunnel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2008, 27 (1): 40-43.
- [12] DG/T J08-2033-2008, 道路隧道设计规范 [S].  
DG/T J08-2033-2008, Road Tunnel Design Code [S].
- [13] 王明年, 汤召志. 沉管隧道自动捕风节能系统研究 [J]. 土木工程学报, 2013, 46 (8): 105-110.  
WANG Ming-nian, TANG Zhao-zhi. A Study of Automatic Wind-catching and Energy-saving System in Immersed Tunnel [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46 (8): 105-110.
- [15] 刘兴茂, 史玲娜, 涂耘, 等. 隧道入口段太阳光直接照明的光能分析 [J]. 照明工程学报, 2015 (6): 91-96.  
LIU Xing-mao, SHI Ling-na, TU Yun, et al. Energy Analysis of Sunlight for the Tunnel Lighting in the Entrance Section [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2015 (6): 91-96.
- [16] 罗亨俊, 史玲娜, 涂耘, 等. 太阳光光纤照明在隧道中应用的可行性分析 [J]. 照明工程学报, 2016, 27 (4): 55-60.  
LUO Xiang-jun, SHI Ling-na, TU Yun, et al. Feasible Analysis of the Application of Solar Fiber Lighting in Tunnel [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2016, 27 (4): 55-60.
- [17] 史玲娜, 涂耘, 王小军. 太阳光光纤照明在短隧道中的应用方案研究 [J]. 公路交通技术, 2015 (6): 109-112.  
SHI Ling-na, TU Yun, WANG Xiao-jun. Research on Application Solutions of Sunlight Optic Fiber Light in Short Tunnels [J]. Technology of Highway and Transport, 2015 (6): 109-112.
- [18] 李松, 史玲娜, 涂耘, 等. 基于视觉适应性的公路隧道太阳光光纤照明技术应用研究 [J]. 照明工程学报, 2016, 27 (5): 48-52.  
LI Song, SHI Ling-na, TU Yun, et al. Feasible Analysis of the Appliance of Solar Fiber Lighting in Tunnel [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2016, 27 (5): 48-52.
- [19] 刘瑾, 李璐, 汪鹏, 等. 港珠澳大桥跨海大桥人工岛可再生能源利用方案研究 [J]. 建筑技术, 2013, 44 (2): 128-130.  
LIU Jin, LI Lu, WANG Peng, et al. Study on Renewable Energy Utilization of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. Architecture Technology, 2013, 44 (2): 128-130.
- [20] 李劲彬, 陈隽. 风光互补可再生能源发电的综合效益优化研究 [J]. 电器自动化, 2013, 35 (5): 24-26  
LI Jin-bin, CHEN Jun. Research on the Optimization of Comprehensive Benefits of Wind-solar Hybrid Renewable Generation System [J]. Electrical Automation, 2013, 35 (5): 24-26.

(上接第 133 页)

- [2] GB 50168-2006, 电气装置安装工程电缆线路施工及验收规范 [S].  
GB 50168-2006, Code For Construction and Acceptance Of Cable System Electric Equipment Installation Engineering [S].
- [3] DL/T 5221-2016, 城市电力电缆线路设计技术规定 [S].  
DL/T 5221-2016, Technical Code for the Design of Urban Power Cables [S].
- [4] JGJ 16-2008, 民用建筑电气设计规范 [S].  
JGJ 16-2008, Code For Electrical Design of Civil Buildings [S].
- [5] 孟毓, 朱爱钧, 陆歆. 上海长江桥隧工程敷设 220kV 电缆的设计要点 [J]. 供用电, 2009, 26 (3): 12-15.  
MENG Yu, ZHU Ai-jun, LU xin. The Design Philosophy of 220 kV Power Cable Laying in Shanghai Changjiang Bridge & Tunnel Project [J]. Distribution & Utilization, 2009, 26 (3): 12-15.
- [6] 张庆达. 电缆实用技术手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.  
ZHANG Qing-da. Cable Practical Technical Manuals [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [7] 廖希亮. 实用机械识图速成 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2010.  
LIAO Xi-liang. Practical Mechanical Reading Speed. [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 2010.
- [8] 樊兆馥. 机械安装实用技术手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.  
FAN Zhao-fu. Mechanical Installation Technical manual. [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.
- [9] 龚坚刚. 中压电力电缆载流量参考手册 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2015.  
GONG jian-gang. Medium Voltage Power Cables Carrying Capacity Reference Manual [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2015.
- [10] 胡其秀. 电力电缆线路手册 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.  
HU Qi-xiu. The Power Cable Line Handbook [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2005.