

采集太阳光的照明系统研究

张耀明

(南京玻璃纤维研究设计院 210012)

[摘要] 简要介绍了欧美和日本在采集太阳光用于室内照明技术研究的进展及我国在研究开发全自动跟踪太阳的采光装置,攻克聚光、跟踪和传光等关键技术所取得的成果。指出研究全光谱利用,结合采光技术和光伏发电技术,达到代电和发电功能是进一步研究、发展的目标。

[关键词] 太阳光采集; 光纤; 跟踪; 照明

[中图分类号] TK519 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)09-0063-06

1 导论

据《中国新能源与可再生能源 1999 白皮书》介绍,全球能源消耗平均每年以 3% 的速度增长,

由此带来的后果十分严重。一方面能源存在着潜在危机,从现在算起全球的化石燃料(石油、煤炭、天然气等)耗尽的时间平均不足 100 年,我国能源剩余资源探明储量及可开采年限如表 1 所示:

表 1 我国能源剩余资源储量及可开采年限*

Table 1 Remaining reserves of energy resources in China and length of time for exploitation

资源种类	煤炭	石油	天然气	水力(装机)
探明可开采储量	1.145×10^8 t	32.736×10^8 t	11.704×10^8 m ³	353×10^9 W
可开采年限**/a	54~81	15~20	28~58	38~104
可开采到	2050~2077 年	2011~2016 年	2024~2054 年	2034~2100 年

* 根据《中国新能源与可再生能源 1999 白皮书》计算 ** 保守预测数据

发展水电需淹没土地,一旦遭受战争或地震使水库塌崩,后果不堪设想;前苏联、日、韩等国的核泄漏事故使得核电成为最有争议的电能,2001 年 12 月德国通过了废除核能法律修正案,将关闭全部核电站。另一方面,化石燃料燃烧时会释放出含硫氧化物、CO 等大量有害物质,火力发电增加了大气中 CO₂ 的含量,使得地球不断变暖,生态环境日益恶化,自然灾害及其造成的损失逐年增多。

照明能耗是人类所有能源消耗中最多的一项,发达国家的照明约占总能耗的 9% 以上,我国发达

地区的照明能耗占总能耗的 6%~9%。以美国为例,每天花在照明上的费用高达 1 亿美元以上,占全部发电量的 1/4 左右,而在照明用电中真正用于发光的仅不过 25%,其余则变为热能散发于空间。众所周知,太阳光是最典型、能量最强的自然光源,取之不尽,用之不竭,但仅有很少一部分通过玻璃窗、天窗射入室内,大部分随着日月交替而白白流逝了。为此开发利用太阳光照明技术意义重大,不仅表现在节能上,同时符合人类追求生活质量和生活环境的要求。

2 国内外研发概况

2.1 日本

日本是世界上开展采集太阳光用于室内照明研发活动最为活跃的国家之一。1979年8月La Foret工程公司推出第一台采集太阳光的照明系统“1眼Himanwari”，日文名称为ヒマリソ，中文意译为“向日葵”。

Himanwari采光器的主要部件是非涅尔透镜、太阳跟踪装置和光缆，另配照明灯具及供夜间和阴雨天使用的人工照明光源装置。太阳跟踪装置包括跟踪传感器、内藏式微电脑控制器和双轴马达传动机构，控制程序中设有计时功能，可根据年、月、日、时确定太阳的位置，使透镜面向太阳；其控制程序是以地理位置为依据设计的，因此在日本本土以外使用时需要预先对控制程序进行修正。光缆是采用石英光纤，最长不超过20 m。

2.2 美国

美国对采集太阳光用于照明的研究始于20世纪90年代中期。1995年前后，美国能源部橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory)发明了组合太阳光照明系统。所谓组合照明，即以太阳光照明为主，不足部分用电照明补充。此项研究工作获得能源部和联邦资金(美国政府专用资金)的支持。《工业周刊》杂志将组合照明选为1998年度25项尖端技术之一。目前有8家公司和8所大学及科研院所组成协作组进行联合研发。

美国斯蒂温·温特联合公司(Steven Winter Associations)的光纤日光照明技术被列为1998年美国100项重大科研成果中的第54项，原来预计2001年产品面世，但至今未能如愿。

美国的研发时间滞后于日本，但在美国政府(主要是能源部)的大力支持和企业、院校、科研机构等通力合作下，发展迅速。

2.3 欧洲

欧盟将近10年太阳能供暖研究和发展预算的85%转向日光照明技术研究。

瑞士日光巴士(Heliobus)公司和俄罗斯Aizenberg教授合作开发太阳光室内照明系统，该系统由定日镜(一种异形凹面镜)采集太阳光，通过棱镜光管(美国3M公司提供)将太阳光传入室内。1997年该系统获欧洲环保技术交易会颁发的欧洲环境奖。

1998年1月至2001年2月由德国、意大利、瑞典的建筑师和研究人员共同完成了太阳光和硫灯组合照明系统的研究，简称人造日光(Arthelio)。它是由定日镜、耦合系统、硫灯、电子控制部件、光管等几部分构成。定日镜是透镜，由德国Semperlux公司研制，装在屋顶跟踪太阳。在得不到足够太阳光时，光源自动切换为1000 W硫灯。

上述介绍的照明系统在国外被称为“光窗”(Skylight)或“日光管”(Tubular Skylight)，目前在许多学校和老人院使用，存在的问题是系统结构庞大、安装工艺复杂、太阳光的有效利用率低、导光管内层的反射薄膜加工难度大等。

2.4 中国

我国政府于1996年5月启动的“绿色照明工程”至今仅限于在中西部等地区推广太阳能光伏发电照明。对太阳能的研究主要着眼于热利用，尚未将太阳光导入室内列入议事日程。20世纪90年代初，沈阳建筑工程学院曾进行过光导采光系统的研制。该实验装置采用四块直径为200 mm凸透镜聚焦太阳光，焦点处安装玻璃光纤传导光束，传输距离10 m以内，距离光纤端头1 m时照度相当40 W的白炽灯，效率较低，距实用还有很长的距离。中国科学院南京天文仪器研究中心也做过这方面探讨，但装置不实用，难以推广。

作者认为国外采光系统的价格过高、效率偏低，开发具有自主知识产权的、适合我国国情的采光装置有必要，也有现实意义。1999年11月获江苏省科技厅支持，立项进行全自动跟踪太阳的采光装置研究。至今已申请9项中国发明专利，获4项实用新型专利授权；申请1项美国专利，已得到授权确认；申请1项PCT国际专利，已获肯定并发布公告。其中“自动跟踪阳光采集器”一项专利在2001年香港国际专利技术博览会上获金牌奖。2001年11月该项目顺利通过江苏省科技厅组织的鉴定，认为全自动跟踪太阳的采光装置的主要性能指标居国外同类产品先进水平，在性能价格比方面处于国际领先水平，其主要技术指标见表2、表3、表4和图1：

3 全自动跟踪太阳的采光装置研究

3.1 研究思路

全自动跟踪太阳的采光装置主要由采光器、自动跟踪系统、传光光纤三大部分组成。其中自

表 2 采光装置 (SLCI- (6-lens)) 性能

Table 2 Properties of sunlight collector (SLCI- (6-lens))

性能	完成指标
采光器采光效率/%	87
光纤长度*/m	≥15
跟踪精度 φ/(°)	<0.36
照明面积/m ²	>12
光通量/lm	>2000

* 聚合物光纤

表 3 SLCI- (6-Lens) 装置与 100 W 白炽灯性能比较

Table 3 Comparison of properties between SLCI- (6-Lens) collector and 100 W incandescent lamp

名称	总光通量/lm	色温/K	参考平面照度/lx
SLCI- (6-lens)	>2000	5 495	240
100 W 白炽灯	1 250	2 400~2 950	80

表 4 国内外同类装置比较

Table 4 Comparison of similar devices at home and abroad

	6-lensmini-himanwari (日本 La Foret Engineering Co. Ltd.)	Sun Wire Fiber optic daylighting system (美国 Steven Winter Associates.)	光导采光系统 (沈阳建筑工程学院)	全自动跟踪太阳的采光装置 SLCI- (6-lens)
技术方案	光轴传感器、计算机控制跟踪太阳 5 m 长石英光纤束; 小口径菲涅尔透镜 (总采光面积为 0.043 2 m ²) 步进电机	跟踪 (力图最终取消跟踪) 聚合物光纤 正在研制中的 3D Non-imaging concentrator 聚合物	不跟踪太阳 长度小于 10 m 的玻璃光纤束 玻璃透镜 (总采光面积为 0.12 m ²)	全方位光纤光敏探测器跟踪太阳 大于 15 m 的大芯径锥头聚合物光纤 大口径菲涅尔透镜 (总采光面积为 0.2 m ²) 普通伺服电机
效果	1 180 lm		350 lm	>2 000 lm
价格	3 000 美元	正在研制中	仅为实验装置	800 美元 (预测)

注：以上数据是在晴天太阳光直射照度为 90 000 lx 时测得。

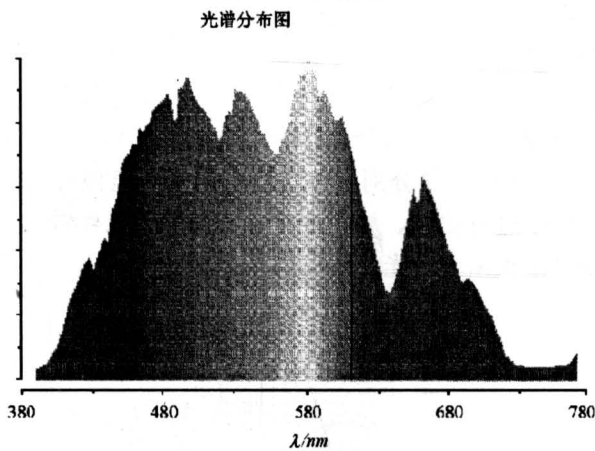


图 1 可见光区光谱分布

Fig.1 Spectral distribution in visible range

动跟踪系统主要包括太阳光跟踪传感器、跟踪控制电路、机械传动机构和驱动电机。太阳光跟踪传感器探测太阳位置并传递信号至跟踪控制电路，控制电路输出驱动信号驱动相应电机，通过机械传动机构带动采光器转动，从而实现跟踪并对正太阳的功能，工作原理如图 2 所示。

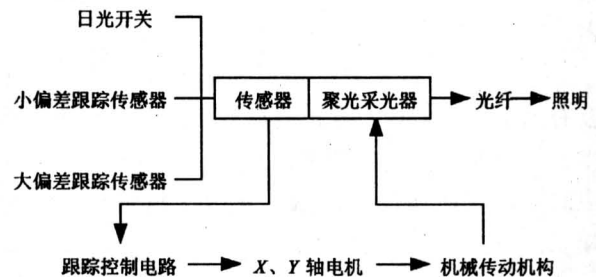


图 2 装置工作原理图

Fig.2 Function diagram of the system

该装置采用光电传感技术，精密地跟踪太阳，将聚光元件采集到的太阳光经传光光纤传至室内照明，光路传输示意如图 3，太阳 1 发出的光线经过聚光元件 2 的会聚，经由滤光片 3，通过光纤 4 传至弥散灯头 5 后输出。

3.2 关键技术

3.2.1 聚光技术 聚光光学系统 (或元件) 根据光学原理可分为折射或反射聚光。

通过实验研究，决定设计并使用具有特定光学结构的大口径、短焦距、小像差、透光性能好的菲涅尔透镜。

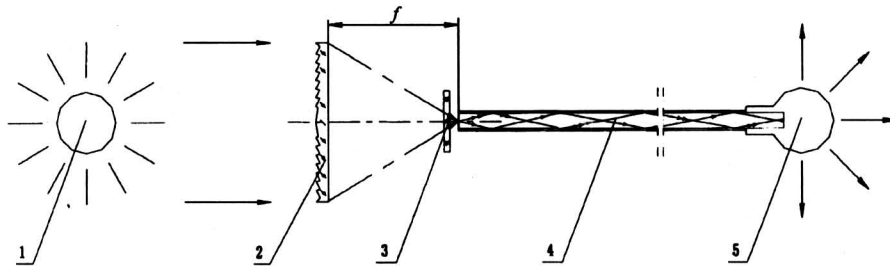


图 3 光路传播示意图

Fig.3 Sketch of optical circuit propagation

3.2.2 跟踪技术 为高效采集太阳光，采用了自动跟踪系统，使得采光器的光轴始终平行于太阳入射光线。技术方案有以下几种：**a.** 计算机程序控制跟踪太阳，能达到高精度跟踪的目的，但成本昂贵。**b.** 时钟式结构跟踪，存在不可克服的累计误差。**c.** 光电传感器跟踪。

用具有自主知识产权的光纤光敏探测器太阳光跟踪传感器，采用闭环控制电路，并有效克服机械空回和加工精度误差，比较经济地实现太阳光的精密跟踪。

1) 光纤光敏探测器，包含探测太阳入射光线偏离传感器中心轴线大、小偏差信号的跟踪传感器。

a. 小偏差传感器结构形式如图 4 所示，它主要有固定装置 005，聚光透镜 006，感光元件光纤束，耦合元件光敏二极管 007—010 等组成，光纤束的感光端面构成输入端，光敏二极管构成输出端。

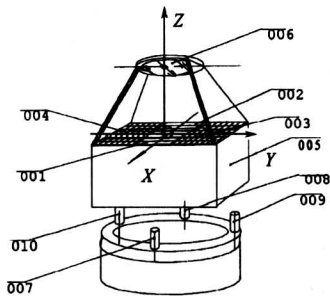


图 4 传感器结构示意图

Fig.4 Sketch of sensor structure

光纤束的感光面分布形成图 5 的 4 个象限，分别为第 I 象限 ($X \sim Y$)、第 II 象限 ($-X \sim Y$)、第 III 象限 ($-X \sim -Y$)、第 IV 象限 ($X \sim -Y$)，组成 4 个区域 (001、002、003、004)。每个区域

对应的不同线条方向代表可感受光在相应区域坐标轴方向的光信号分量的不同组感光面，共形成 4 组输入端感光面，4 个区域的 4 组感光面分别感受光在对应区域坐标轴方向的光信号分量。因此每一象限内的感光面分属 2 个相邻区域的 2 组感光面，感受光在 2 个坐标轴方向的光信号分量，因而每个象限形成一种分属、共存的感光面布置方式。如在第 I 象限中，由垂直线代表的能感受 + X 轴方向和由水平线代表的能感受 + Y 轴方向的光信号分量的感光面，形成共存的感光面设置；同时，能感受 + X 坐标轴方向光信号分量的感光面全部位于 001 区域，可感受 + Y 坐标轴方向光信号分量的感光面全部位于 003 区域。当一束光线通过透镜聚焦形成的光斑落于输入端某一象限时，就被该象限内共存的感受 2 个坐标轴方向的光信号分量的 2 部分感光面所接收，这 2 部分感光面分属于 2 个相邻区域的 2 组感光面，再分别由 2 组输出端输出至跟踪控制电路中进行比较、放大处理后控制聚光元件转动直至对准太阳入射光线。

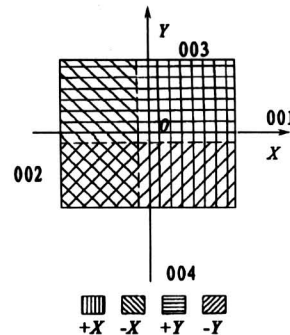


图 5 传感器感光面分布四象限原理图

Fig.5 Photosensitive surface distribution quadrants of the sensor

b. 大偏差传感器。上述传感器只能实现小偏

差角度精确调整，在此基础上增加另外 4 组光纤束，沿固定装置 005 的下部侧壁的 8 个卦限布置，用做太阳光偏斜较大时使用，简称大偏差传感器，如图 6。8 个卦限区划为 4 个区域 001'、002'、003'、004'。该 4 个区域区划方式如下：固定装置 A-A 剖面为 X'O'Y' 面，Z 轴为固定装置中心轴线，X' 为正的 4 个卦限为区域 001'、X' 为负的 4 个卦限为区域 002'、Y' 为正的 4 个卦限为区域 003'、Y' 为负的 4 个卦限为区域 004'。每个区域规则排列一组光纤束，每组光纤束形成 1 个输入端，即有 4 个光信号输入 (IN001' - IN004')，每一卦限内因含有 2 部分光纤束，可感受沿 2 个坐标轴方向的光信号分量。排列于端面 XOY 面光纤形成的 4 个输入端 (IN001 - IN004) 与排列于周壁光纤形成的 4 个输入端 (IN001' - IN004') 按 4 个方位对应组合，分别与光敏二极管耦合，总共形成 4 个输出信号。

大小偏差传感器相结合，共同完成太阳光信号接收，探测无盲区。

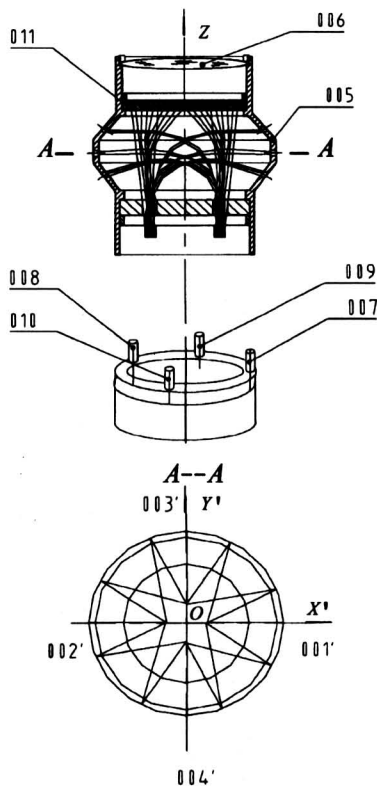


图 6 大小偏差传感器结构示意图

Fig. 6 Structure sketch of sensors for big and small deviation

2) 跟踪控制电路对传感器信号按照大小偏差接力、小偏差优先的自动控制原则进行比较处理，控制驱动电机按所要求方向转动。

跟踪控制电路主要包括传感信号处理电路、逻辑控制电路、电机控制电路等，由光电耦合器隔离成 3 个独立的单元，以最大限度地减少相互干扰。

跟踪控制电路还包括智能定时电路，可以自由设置 1 周中每天的跟踪时间，且具有每天工作完毕自动返回初始位置待命的功能。该电路只在设定跟踪时段的 1/10 时间中控制电机运转，其他时间电机均处于待命状态，因此不仅节电，而且可避免频繁启动，延长电机和机械传动装置的寿命。

3) 机械传动机构主要有单轴和双轴两类。前者只做太阳方位角的跟踪，高度角定期调整，系统精度较低；为实现精密跟踪，机械驱动机构采用双轴机构。

3.2.3 传光技术 采光装置的太阳光传输低损耗特性要求传光光纤有高的传光效率、良好的耐热性能、能符合照明功能及方式的要求且成本低。

为此采用 solid-filled 技术制造出大芯径锥头聚合物光纤，形成合理的光纤结构。

4 结语

采集太阳光的照明系统可广泛用于以下场所：

- a. 暗室、地下室、地下停车场、大型仓储和商场等无日照或日照不足的场所照明；
- b. 弹药库、煤矿、油库、煤气贮罐等有特殊安全要求的场所和博物馆、手饰等陈列展览场所照明；
- c. 室内植物栽培进行光合作用；
- d. 与自然阳光同步变化，能够营造出保持人们日常生活习惯的环境，享受清爽舒适的日光浴，尤其适宜老人和病人，因此发展潜力巨大。

采集太阳光的照明系统已是各国竞相研究的热点，笔者认为：a. 本世纪前 20 年将是应用推广和市场培育阶段，价格是进入家庭的瓶颈，商业建筑和工矿企业的照明应用会呈上升需求，特殊及安全场所将占有应用优势，为此获得政府等方面支持和研究规模化生产技术非常必要；b. 全光谱利用将是该系统的发展趋势，即利用太阳能的可见光和红外光，结合采光技术和光伏发电技术，达到代电和发电功能。

参考文献

- [1] Zhang Yaoming, etc. Sunlight tracking sensor and its application [A]. PROCEED of SPIE "Advanced Photonic Sensors Technology and Application" [C], Volume 4220
- [2] 张耀明,等.跟踪太阳的阳光采集和光纤传输装置[P].中国,ZL 99227276.9
- [3] 张耀明,等.全自动跟踪太阳的采光装置[P].中国,ZL 99228399.X
- [4] 张耀明,等.太阳光跟踪传感器[P].中国,ZL 00219971.8
- [5] 张耀明,等.自动跟踪阳光采集器[P].中国,ZL 00219321.3
- [6] Zhang Yaoming, etc. Sunlight tracking sensor and its use in full-automatic solar tracking and collecting device [P].美国,Docket No.46162.5USPT
- [7] 李宝骏编著.太阳能光导采光设计原理[M].沈阳:东北大学出版社,1993
- [8] Cariou J M, etc. Transport of solar energy with optical fibers[J]. Solar Energy,1982,29(5):399

Research on Sunlight Collecting and Illuminating System

Zhang Yaoming

(Nanjing Fiberglass Research & Design Institute, Nanjing 210012, China)

[Abstract] This paper gives a brief introduction to the progress in the research of collecting sunlight for indoor illumination in USA, Europe and Japan, and the achievements in the development of a system for automatically tracking and collecting sunlight by tackling key technologies, such as light focusing, tracking and transmitting, in China. It is noted that the future development is aimed at the research of light collection and photovoltaion technologies to achive functions of electric power substitution and generation.

[Key words] sunlight collection; optical fiber; tracking; illumination

《中国工程科学》2002年第4卷第10期要目预告

- | | | | |
|------------------------------|------|--------------------------|------|
| 卫星移动通信的现状与发展 | 张乃通等 | 大孔径光纤过渡器中光波特性和分析 | 王云明等 |
| 面临挑战和机遇的中国花卉业 | 陈俊愉 | 用有限元强度折减法进行边坡稳定分析 | 郑颖人等 |
| 新世纪的精细化工 | 杨锦宗 | 三峡工程对葛洲坝枢纽下游近坝段水位与 | 陆永军等 |
| 冷风闪速冶金在中国的实现和发展 | 张文海 | 航道影响研究 | 张万钧等 |
| 以科学为基础的复杂系统工程研制 | 徐志磊 | 三种固体废弃物综合利用的研究 | 杨春燕等 |
| 资源循环 | 邱定蕃 | 可拓策划研究 | 王伯鲁 |
| 电动车锂离子电池的材料问题 | 陈立泉 | 运输技术结构与发展方向问题分析 | 王伯鲁 |
| 东部城市天然气应用方式探讨 | 江 亿 | 波长三次重用的多波长星形网络及其性能 | 甘朝钦 |
| 痢疾杆菌全基因组序列及痢疾岛的分析 | 刘 红等 | 分析 | 黄志洵 |
| 虚位数据法——具有新概念的误差形状误差分离法 | 洪迈生等 | 中微子研究新进展 | 黄志洵 |