

本书第一版荣获2011年国家科学技术学术著作出版基金

# 太阳能光伏发电 系统工程

2

第二版  
The Second Edition

TAIYANGNENG GUANGFU FADIAN  
XITONG GONGCHENG

李安定 吕全亚 编著

- 太阳能光伏产业重要和经典、高水平的科技图书，曾荣获“2011年度国家科学技术学术著作出版基金资助项目”。
- 中国工程院院士顾国彪先生、中国科学院肖立业所长亲自作序，大力推荐！
- 本次全面改版，对太阳能光伏发电最新技术进行了更加全面、系统的介绍，实例更丰富，技术内容更先进、更实用，可操作性更强！



化学工业出版社

本书第一版荣获2011年国家科学技术学术著作出版基金

# 太阳能光伏发电 系统工程

2

第二版

The Second Edition

TAIYANGNENG GUANGFU FADIAN  
XITONG GONGCHENG

李安定 吕全亚 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书作为太阳能光伏产业重要和经典、高水平的科技图书，曾荣获“2011年度国家科学技术学术著作出版基金资助项目”。本书是一部全面系统、深入介绍光伏发电技术及其应用最新成果的技术专著。

全书共分为上、下两篇，上篇为基础篇，下篇为应用篇。上篇系统阐明太阳辐射能的特点、测量和计算；光伏发电系统工作原理、构成及其分类；光伏发电系统的设计原理和方法，以及地面大型集中式并网光伏电站、屋顶并网光伏发电系统与独立光伏发电系统的设计应用；光伏发电系统构成的主要和关键部件，即太阳电池、逆变器、控制器、储能装置、直流汇流和交流配电系统以及监控测试系统、辅助电源、整流充电设备、升压变压器等辅助设备的必备知识。下篇则详细介绍太阳能光伏发电系统工程具体应用内容，重点介绍典型案例与分析，以飨读者。

本书是广大太阳能光伏发电设计与科研人员、生产人员、管理人员及施工建设人员的必备读物，也可作为高等院校相关专业师生的教学参考书。

本次全面改版，对太阳能光伏发电最新技术进行了更加全面、系统的介绍，实例更丰富，技术内容更先进、更实用，可操作性更强！

## 图书在版编目 (CIP) 数据

太阳能光伏发电系统工程/李安定，吕全亚编著. —2 版.  
北京：化学工业出版社，2015.9  
ISBN 978-7-122-24883-1

I. ①太… II. ①李…②吕… III. ①太阳能发电  
IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 185674 号

---

责任编辑：朱 彤

装帧设计：刘丽华

责任校对：王素芹

---

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 26 字数 725 千字 2016 年 1 月北京第 2 版第 1 次印刷

---

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

---

定 价：98.00 元

版权所有 违者必究

# 序 一

为保证人类稳定、持久的能源供应，保护人类赖以生存的生态环境，必须采取措施减少化石能源的耗用，大力开发利用清洁、干净的新能源和可再生能源，走与生态环境相和谐的能源之路。

太阳能堪称无限的能源。太阳辐射能完全可以转换成人类所需要的能源，其中，光能转换为电能是重要的一种转化过程，它可以方便地转换成热能、动力能、化学能等各种形式的能源，以满足人类生活、生产的需要。通过太阳电池将资源无限、清洁干净的太阳辐射能转换为电能的太阳能光伏发电技术，是新能源和重要的可再生能源技术之一。专家们预言，到 21 世纪中叶，太阳能光伏发电将发展成为重要的发电方式，在世界可持续发展的能源结构中占有相当的比例。

由中国科学院电工研究所李安定研究员等撰写的《太阳能光伏发电系统工程》一书是一部全面系统、深入介绍光伏发电技术及其应用最新成果的技术专著。该书主笔李安定研究员，长期从事太阳能发电技术研发工作，具有深厚的学术功底和丰富的实践经验，在我国光伏领域享有盛名。全书可读性和实用性俱佳，是一部重要的行业参考书。该书的及时出版将对提高我国光伏发电技术水平及广泛应用具有重要的推动作用。

本书的出版将对同行和相关领域专家、技术人员以很大的帮助和启迪。

中国工程院院士  
顾国彪



2012 年 6 月

# 序 二

近两百年来，人类在不断地以爆炸式增长的方式向地球索取能源，使得化石能源行将消耗殆尽并导致环境日益恶化。为此，世界各国政府、科技界和产业界已经共同认识到，大力开发和利用太阳能是建立起清洁和可持续发展的能源体系的必由之路。

太阳能光伏发电是开发和利用太阳能的最灵活最方便的方式。近年来得到了飞速的发展。2011年，全球新增并网光伏装机容量已经达到了29.685GW，累计并网光伏装机容量则达到了69.684GW。预计到2016年，全球新增并网光伏装机容量将达到75GW，累计并网光伏装机容量将达到300GW。近些年来，因能源需求旺盛和国家政策支持，我国的光伏发电产业发展十分迅速。2008年，我国并网光伏装机增量仅为45MW，而到2011年，这一数字增加到2200MW，足见光伏发电产业在我国的强大生命力和广阔的发展前景。

本书作者之一李安定研究员不仅是我国太阳能光伏发电工程领域的先驱者和开拓者，也是我国光伏产业早期发展的主要推动者。早在20世纪70年代，他就开展了太阳能光伏发电技术的研究。几十年来，李安定研究员辛勤耕耘于光伏发电工程领域，取得了一系列重大科技成就，他不仅具有深厚的学术功底，而且具有丰富的实践经验。例如，1994年，他就负责建成了世界海拔最高、我国当时容量最大的西藏双湖镇25kW光伏电站工程，1999年，他又领导建成了西藏安多100kW光伏电站，解决了当地的无电问题。

由李安定研究员和吕全亚先生所著的《太阳能光伏发电系统工程》一书涵盖了光伏发电技术的基本原理、系统设计原理和方法、关键装备及系统并网技术等全面内容，并介绍了一系列光伏发电工程应用实例，是当前光伏发电领域不可多得的著作。

值此机会，很荣幸为本书作序，相信本书的出版将对我国该领域的人才培养和产业发展起到有力的推动作用，对于提高我国光伏发电技术水平和建设环境友好社会也将做出重大贡献。

中国科学院电工研究所所长、研究员  
肖立业



2012年6月

# 第二版前言

太阳能光伏发电对于节约常规能源、保护环境、促进经济发展都有极为重要的现实意义和深远的历史意义。光伏发电产业也是新兴的朝阳产业，近年来在国际上受到广泛重视并获得了飞速发展。2015 年底，全国光伏发电装机总容量可望达到 5000 万千瓦，预计到 2020 年中国光伏发电装机总容量将有望再次翻番。

当前国家需要大量光伏科研人才和应用人才，为满足这一需要，笔者曾于 2012 年编写本书第一版，并由化学工业出版社正式出版。该书第一版还有幸成为“2011 年度国家科学技术学术著作出版基金资助项目”，受到广大读者和同行的认可和欢迎。为了促进我国太阳能事业的发展，笔者在本书第一版的基础上，又补充、完善了更多内容，其目的是为了更好地了解广大太阳能光伏发电设计与科研人员、生产人员、管理人员及施工建设人员的实际需要，同时为大专院校有关专业师生及关注新能源的人士提供更多的支持和帮助。

在第二版编写过程中，笔者再次尽其所能，在书中反映了国内外太阳能光伏发电领域最新技术进展和更多工程实际案例，特别是在并网光伏发电系统（大型集中式并网光伏电站、屋顶并网光伏发电系统）工程设计、并网逆变器及光伏电站智能化信息管理平台等方面进行了更深入、更系统的阐述。全书脉络清晰，层层递进，从基础和应用角度，全面、系统地对太阳能光伏发电系统进行分析 and 讲解，并详细论述太阳能光伏发电系统工程研发、设计、安装中的关键点以及分布式发电与智能微电网的最新技术和成就。本书第二版仍分为上、下两篇，上篇为基础篇，下篇为应用篇。

本书再版要特别感谢付出辛勤劳动的陈丹婷、王海波等同事，还要特别感谢化学工业出版社对本书顺利再版提供的鼎力支持。

由于时间有限，书中难免有疏漏或不当之处，敬请读者不吝赐教。

编著者

2015 年 8 月

# 第一版前言

太阳能是绿色能源，是人类取用不竭的可靠能源。太阳能光伏发电是利用太阳能最灵活方便的一种方式，近年来在国际上受到广泛重视并取得了长足进展。光伏发电产业也是新兴的朝阳产业，对于节约常规能源、保护环境、促进经济发展都有极为重要的现实意义和深远的历史意义。

进入 21 世纪以来，我国太阳电池及其相关产业发展突飞猛进，产能和产量均超过世界总量的一半以上。历经一年多时间讨论修订，国家“十二五”可再生能源规划目标终于定案：到 2015 年，其中太阳能发电将达到 1500 万千瓦，年发电量 200 亿千瓦时。显然，“十二五”期间，中国光伏发电将在规模和基本产业链条形成的基础上，在质量和应用方面实现飞跃发展。

当前国家需要大量光伏科研人才和应用人才，为满足这一需要，适应行业快速发展步伐，在 10 年前出版同名专著基础上，增添必要章节，丰富内容，笔者重新撰写本书。全书分为上、下两篇，上篇为基础篇，下篇为应用篇。

本书上篇，深入系统阐明太阳辐射能的源泉和特点、测量和计算；光伏发电系统工作原理、构成及其分类；光伏发电系统的设计原理和方法，以及地面大型集中式并网光伏电站、屋顶并网光伏发电系统与独立光伏发电系统的设计应用；光伏发电系统构成的主要和关键部件太阳电池、逆变器、控制器、储能装置、直流汇流和交流配电系统以及监控测试系统、辅助电源、整流充电设备、升压变压器等辅助设备的必备知识。本书下篇则落笔具体应用的丰富内容，精心搜集了领域关注焦点，重点介绍了典型案例，以飨读者。

本书是笔者长期从事光伏发电系统工程研发、设计和现场工作的结晶，凝聚了理论与实践紧密结合的宝贵经验。在本书写作过程中一度征求相关专家、基层太阳能利用技术工作者的意见，经过反复修订后才定稿。全书内容紧扣“系统工程”主题展开，内容翔实、图文并茂、文字流畅。笔者尽其所能，在书中反映了光伏发电领域最新进展内容，特别是在独立光伏发电系统与并网光伏发电系统（大型集中式并网光伏电站、屋顶并网光伏发电系统）工程设计、并网逆变器等方面进行深入阐述。全书脉络清晰，层层递进，从基础和应用角度全面系统地对太阳能光伏发电系统进行分析 and 讲解，并详细论述太阳能光伏发电系统工程研发、设计、安装中的关键点。本书不仅适合太阳能光伏发电系统行业科研人员、生产人员和管理人员使用，还可作为高等院校教材及关注新能源行业人士的参考技术书籍。

本书的出版，要特别感谢付出辛勤劳动的陈丹婷、王海波等同事，还要特别感谢化学工业出版社对本书顺利出版提供的鼎力支持。

由于时间有限，书中难免有疏漏或不当之处，敬请读者不吝赐教。

编著者

2012 年 5 月

# 目 录

## 上篇 基础篇

### 第1章 太阳辐射能 2

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 1.1 太阳辐射能的源泉             | 2  |
| 1.2 地球上的太阳能              | 3  |
| 1.2.1 地球大气层上界的太阳能        | 3  |
| 1.2.2 地球表面上的太阳能          | 5  |
| 1.3 斜面上的太阳辐射能            | 8  |
| 1.3.1 斜面上的太阳总辐照度         | 8  |
| 1.3.2 水平面上太阳辐射转化成斜面上太阳辐射 | 10 |
| 1.4 太阳辐射的测量和资源计算         | 11 |
| 1.4.1 太阳辐射测量和标准          | 11 |
| 1.4.2 太阳能资源计算与分区         | 16 |
| 参考文献                     | 19 |

### 第2章 太阳能光伏发电系统集成技术及应用 20

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 2.1 太阳能光伏发电系统工程                      | 20 |
| 2.1.1 光伏系统工程研究的宗旨及内容                 | 20 |
| 2.1.2 系统分类及配置                        | 21 |
| 2.2 光伏发电系统评价指标                       | 26 |
| 2.2.1 峰值日照时数与发电量计算                   | 26 |
| 2.2.2 光伏发电系统性能比                      | 28 |
| 2.3 光伏系统的能量回收期及 CO <sub>2</sub> 减排潜力 | 28 |
| 2.3.1 能量回收期 (EPT)                    | 28 |
| 2.3.2 光伏系统 CO <sub>2</sub> 减排量       | 31 |
| 2.4 光伏能源发展线路图                        | 34 |
| 2.4.1 光伏发电系统的应用分类                    | 34 |
| 2.4.2 光伏应用发展线路图                      | 35 |
| 参考文献                                 | 38 |

### 第3章 太阳能光伏发电系统的设计原理和方法 39

|                     |    |
|---------------------|----|
| 3.1 参数分析法           | 40 |
| 3.1.1 基本公式          | 40 |
| 3.1.2 设计参数的定义       | 43 |
| 3.2 LOLP 法          | 45 |
| 3.2.1 LOLP 法的思路和特点  | 45 |
| 3.2.2 LOLP 法的基本公式   | 45 |
| 3.2.3 LOLP 法参数的确定方法 | 45 |
| 3.2.4 LOLP 法的计算流程   | 46 |

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 3.3 模拟法 .....               | 46 |
| 3.3.1 模拟法的思路 .....          | 46 |
| 3.3.2 光伏系统构成部件的模拟基本公式 ..... | 48 |
| 参考文献 .....                  | 52 |

## 第4章 太阳能光伏发电系统的设计 53

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 4.1 大型集中式并网光伏电站的设计 .....          | 53  |
| 4.1.1 项目前期工作 .....                | 54  |
| 4.1.2 大型集中式并网光伏电站的配置 .....        | 55  |
| 4.1.3 电站直流发电系统设计 .....            | 56  |
| 4.1.4 并网逆变器的选配 .....              | 68  |
| 4.1.5 光伏电站交流电气系统设计 .....          | 72  |
| 4.1.6 电气二次部分 .....                | 75  |
| 4.1.7 光伏电站的监控系统设计方案 .....         | 76  |
| 4.1.8 光伏电站的防雷接地 .....             | 81  |
| 4.2 屋顶并网光伏发电系统的设计 .....           | 84  |
| 4.2.1 屋顶光伏系统分类 .....              | 84  |
| 4.2.2 BIPV 系统设计的规定与要求 .....       | 85  |
| 4.2.3 BIPV 设计要点 .....             | 87  |
| 4.2.4 BIPV 对太阳电池组件提出的一些特殊要求 ..... | 89  |
| 4.2.5 BIPV 的电气连接方式 .....          | 90  |
| 4.2.6 安全防火——直流故障及保护措施 .....       | 92  |
| 4.2.7 光伏组件在建筑上的应用 .....           | 93  |
| 4.3 独立光伏发电系统的设计 .....             | 97  |
| 4.3.1 独立光伏发电系统的容量设计 .....         | 98  |
| 4.3.2 逆变器、控制器的选配 .....            | 102 |
| 4.3.3 独立光伏发电系统设计的验证 .....         | 107 |
| 4.4 光伏系统设计软件 .....                | 112 |
| 参考文献 .....                        | 117 |

## 第5章 太阳电池、组件及方阵 118

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 5.1 太阳电池 .....             | 118 |
| 5.1.1 太阳电池及其分类 .....       | 118 |
| 5.1.2 太阳电池的工作原理及基本特性 ..... | 119 |
| 5.1.3 晶硅太阳电池的制造 .....      | 143 |
| 5.1.4 薄膜太阳电池 .....         | 151 |
| 5.1.5 聚光太阳电池 .....         | 164 |
| 5.2 太阳电池组件及方阵 .....        | 166 |
| 5.2.1 太阳电池组件 .....         | 166 |
| 5.2.2 太阳电池方阵 .....         | 170 |
| 参考文献 .....                 | 174 |

## 第6章 储能技术及装置 175

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 6.1 绪论 .....          | 175 |
| 6.1.1 储能的必要性及意义 ..... | 175 |

|                  |     |
|------------------|-----|
| 6.1.2 储能的定义及分类   | 176 |
| 6.2 电化学储能        | 177 |
| 6.2.1 铅酸储能蓄电池    | 177 |
| 6.2.2 其他电化学电池    | 186 |
| 6.3 物理储能         | 204 |
| 6.3.1 飞轮储能       | 204 |
| 6.3.2 压缩空气储能     | 213 |
| 6.3.3 抽水蓄能       | 216 |
| 6.4 其他储能         | 218 |
| 6.4.1 超导储能       | 218 |
| 6.4.2 金属-空气电池    | 220 |
| 6.4.3 燃料电池       | 224 |
| 6.5 储能技术及装置的类比应用 | 225 |
| 参考文献             | 230 |

## 第7章 光伏发电系统的控制与监控

232

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 7.1 光伏系统控制的特点和主要功能   | 232 |
| 7.1.1 特点             | 232 |
| 7.1.2 主要功能           | 233 |
| 7.2 充电、放电控制          | 237 |
| 7.2.1 蓄电池充放电控制方法     | 237 |
| 7.2.2 充放电控制器类别及其工作原理 | 238 |
| 7.3 光伏电站用直流控制柜       | 242 |
| 7.3.1 独立光伏电站用直流控制柜   | 242 |
| 7.3.2 并网光伏电站用直流配电柜   | 247 |
| 7.4 最大功率跟踪控制器        | 248 |
| 7.4.1 恒压控制           | 249 |
| 7.4.2 最大功率跟踪控制       | 250 |
| 7.5 光伏发电监控系统         | 254 |
| 7.5.1 监控系统功能         | 254 |
| 7.5.2 监控系统构成         | 256 |
| 7.5.3 监控系统设计原则       | 258 |
| 参考文献                 | 259 |

## 第8章 DC-AC 逆变器

260

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 8.1 逆变器分类及主要功能    | 260 |
| 8.1.1 逆变器分类       | 260 |
| 8.1.2 逆变器的主要功能    | 260 |
| 8.2 逆变器的技术要求及性能指标 | 263 |
| 8.2.1 逆变器技术要求     | 263 |
| 8.2.2 逆变器性能指标     | 263 |
| 8.3 离网逆变器的结构及工作原理 | 265 |
| 8.3.1 离网逆变器的结构及选用 | 265 |
| 8.3.2 正弦波逆变器的工作原理 | 266 |
| 8.4 并网逆变器的结构及工作原理 | 273 |

|       |                |     |
|-------|----------------|-----|
| 8.4.1 | 两级式逆变器         | 273 |
| 8.4.2 | 单级并网型逆变器       | 276 |
| 8.4.3 | 并网逆变器的孤岛检测技术   | 277 |
| 8.4.4 | 并网逆变器的低电压穿越    | 281 |
| 8.5   | 逆变器的发展沿革、现况和趋势 | 283 |
| 8.5.1 | 逆变器的发展沿革       | 283 |
| 8.5.2 | 逆变器的现况及趋势      | 284 |
|       | 参考文献           | 291 |

## 第9章 交流配电系统 292

|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 9.1   | 光伏电站交流配电系统的构成           | 292 |
| 9.2   | 光伏电站交流配电系统的主要功能和原理      | 292 |
| 9.3   | 对交流配电系统的主要要求            | 293 |
| 9.3.1 | 通用要求                    | 293 |
| 9.3.2 | 技术要求                    | 294 |
| 9.3.3 | 结构要求                    | 295 |
| 9.3.4 | 交流配电柜的保护功能              | 295 |
| 9.4   | JKJP-60k-3CH 交流配电柜的操作使用 | 295 |
| 9.4.1 | 主要参数和技术指标               | 296 |
| 9.4.2 | 机柜面板和内部布局               | 296 |
| 9.4.3 | 工作原理和防雷保护               | 298 |
| 9.4.4 | 机柜安装                    | 298 |
| 9.4.5 | 操作使用                    | 299 |
| 9.4.6 | 与微机监控系统的连接调试            | 300 |
| 9.4.7 | 故障判断                    | 301 |
| 9.4.8 | 注意事项                    | 301 |
| 9.5   | 低压架空配电线路                | 302 |
| 9.5.1 | 结构与组成                   | 302 |
| 9.5.2 | 运行管理                    | 304 |
| 9.6   | 电力变压器及其选择               | 306 |
| 9.6.1 | 常用电力变压器的种类和容量系列         | 306 |
| 9.6.2 | 变压器容量与数量的选择原则           | 306 |
| 9.7   | 电力线缆及其选择                | 308 |
| 9.7.1 | 按机械强度条件选择导线截面积          | 308 |
| 9.7.2 | 按导线载流量条件选择导线截面积         | 308 |
| 9.7.3 | 按电压损失选择导线截面积            | 309 |
| 9.7.4 | 按短路条件选择导线截面积            | 312 |
| 9.7.5 | 按经济电流密度选择截面积            | 314 |
| 9.7.6 | 线路选择条件分析                | 314 |
| 9.7.7 | 保护线的选择                  | 315 |
|       | 参考文献                    | 315 |

## 第10章 分布式光伏发电与智能微电网 316

|        |       |     |
|--------|-------|-----|
| 10.1   | 分布式能源 | 316 |
| 10.1.1 | 引论    | 316 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 10.1.2 分布式发电 .....         | 317 |
| 10.1.3 未来能源系统 .....        | 318 |
| 10.2 分布式光伏发电 .....         | 318 |
| 10.2.1 分布式光伏发电分类及其应用 ..... | 319 |
| 10.2.2 分布式光伏发电的技术提要 .....  | 324 |
| 10.3 分布式光伏发电与微电网 .....     | 332 |
| 10.3.1 智能电网与智能微电网 .....    | 332 |
| 10.3.2 智能微电网的研究发展 .....    | 334 |
| 参考文献 .....                 | 339 |

## 下篇 应用篇

### 第 11 章 大型集中式地面并网光伏电站——341

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 11.1 甘肃省张掖南滩 20MWp 并网光伏电站 .....    | 341 |
| 11.1.1 项目概况 .....                  | 341 |
| 11.1.2 张掖南滩光伏电站的技术览要 .....         | 344 |
| 11.1.3 张掖南滩 20MWp 光伏电站运行分析 .....   | 349 |
| 11.2 蚌埠曹山 2MWp 非晶硅薄膜并网光伏示范电站 ..... | 354 |
| 11.2.1 项目概况 .....                  | 354 |
| 11.2.2 项目总图 .....                  | 354 |
| 11.2.3 关键设备和技术 .....               | 355 |
| 11.2.4 安装过程中的技术问题 .....            | 359 |
| 11.2.5 电站性能参数测试及分析 .....           | 360 |
| 参考文献 .....                         | 366 |

### 第 12 章 分布式屋顶并网光伏发电系统——367

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 12.1 江苏省常州科教城 1.0994MWp 并网光伏发电系统 ..... | 367 |
| 12.1.1 项目概况 .....                      | 367 |
| 12.1.2 总体方案设计及所依据标准 .....              | 368 |
| 12.1.3 光伏阵列布局及支架设计 .....               | 371 |
| 12.1.4 项目技术亮点 .....                    | 380 |
| 12.2 深圳国际园林花卉博览园 1MWp 并网光伏发电系统 .....   | 386 |
| 12.2.1 工程简述 .....                      | 386 |
| 12.2.2 系统设计与安装 .....                   | 386 |
| 12.2.3 工程关键器件与设备的选型 .....              | 387 |
| 12.2.4 工程设计建设中的几个技术亮点 .....            | 387 |
| 12.2.5 工程的节能减排效益 .....                 | 388 |
| 参考文献 .....                             | 389 |

### 第 13 章 太阳能光伏照明——390

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 13.1 太阳能照明装置概要 .....     | 390 |
| 13.1.1 工作原理及系统构成 .....   | 390 |
| 13.1.2 分类及应用 .....       | 393 |
| 13.2 太阳能照明装置的设计及安装 ..... | 397 |
| 13.2.1 设计依据 .....        | 397 |
| 13.2.2 现场考察 .....        | 398 |

|        |                    |     |
|--------|--------------------|-----|
| 13.2.3 | 系统设计计算 .....       | 398 |
| 13.2.4 | 合理选用控制器 .....      | 400 |
| 13.3   | 太阳能 LED 道路照明 ..... | 400 |
| 13.3.1 | LED 光源的优势 .....    | 400 |
| 13.3.2 | 太阳能 LED 路灯 .....   | 401 |
| 参考文献   | .....              | 402 |

# 上篇 基础篇

# 第 1 章

## 太阳辐射能

- 1.1 太阳辐射能的源泉
- 1.2 地球上的太阳能
- 1.3 斜面上的太阳辐射能
- 1.4 太阳辐射的测量和资源计算

物质在分子运动中，将以电磁波的形式向四周辐射能量。太阳是一个巨大的炽热球体，其表面的平均热力学温度高达 6000K，这一热体以电磁波的形式向四周辐射能量，即太阳辐射能。

### 1.1 太阳辐射能的源泉

太阳是太阳能取之不尽的源泉，其直径约  $1.39 \times 10^6 \text{ km}$ ，是地球直径的 109 倍。太阳的体积为  $1.42 \times 10^{27} \text{ m}^3$ ，是地球的 130 万倍，其质量  $1.98 \times 10^{27} \text{ t}$ ，是地球质量的 33 万多倍。太阳不停地向四周空间放射出巨大的能量，其总量平均每秒即达  $3.865 \times 10^{26} \text{ J}$ ，而地球所接收到的能量仅是太阳发出总量的 22 亿分之一。尽管如此，每秒也有  $1.765 \times 10^{17} \text{ J}$  之多，折合标准煤  $6 \times 10^6 \text{ t}$ 。图 1-1 所示为太阳能与地球保有的能量之间的关系。

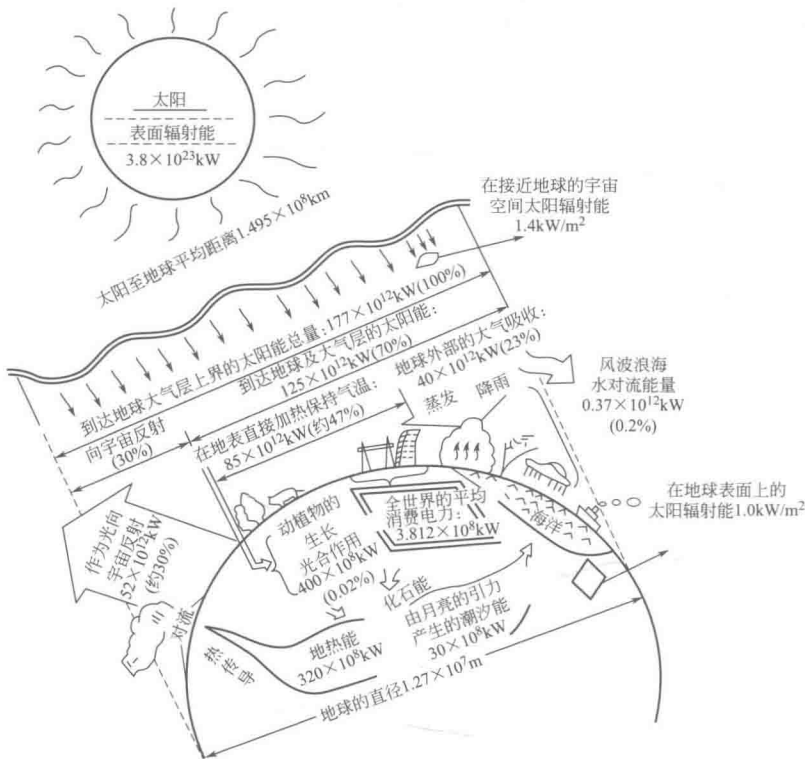
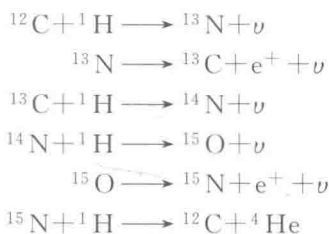


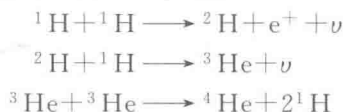
图 1-1 太阳能与地球保有的能量之间的关系

太阳辐射起源于太阳在高温、高压下进行的热核聚变反应。据此，目前有以下两种说法。

① 碳氮循环。碳氮循环的反应过程为



② 氢-氢链式反应。氢-氢链式反应的反应过程为



以上两种热核反应的结果都是将 4 个氢核聚变成 1 个氦核，同时释放出大量的能量，如下式所示



式中， $\Delta m$  表示反应中的质量亏损。

当 4 个氢核聚成 1 个氦核时，就发生了质量亏损，即 1 个氦核的质量 ( $6.6477 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ) 比 4 个氢核的质量之和 ( $4 \times 1.672648 \times 10^{-27} \text{ kg} = 6.690592 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ) 小  $4.29 \times 10^{-29} \text{ kg}$ 。这部分亏损掉的质量，根据爱因斯坦的质能关系式，有

$$E = mc^2$$

式中， $E$  为能量； $m$  为质量； $c$  为光速 ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )。由此可知，1kg 质量可转化成  $9 \times 10^{16} \text{ J}$  的能量。也即发生了  $4.29 \times 10^{-29} \text{ kg}$  的质量亏损时，也就相应有

$$\begin{aligned}
 4.29 \times 10^{-29} \text{ kg} \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 &= 3.86 \times 10^{-12} \text{ J} \\
 &= 2.41 \times 10^7 \text{ eV}
 \end{aligned}$$

的能量发射出来。太阳每秒释放  $3.865 \times 10^{26} \text{ J}$  的能量，按现有的热核反应速率计算，太阳的寿命仍有  $5 \times 10^9$  年。太阳能真可谓“取之不尽，用之不竭”。

## 1.2 地球上的太阳能

在太阳能利用中，人们关注地球上某处采光面所能截获的太阳辐照度。太阳辐照度的大小取决于以下四个方面。

- ① 日-地距离；
- ② 太阳对地球上某处某时刻的相对位置；
- ③ 太阳辐射进入大气层的衰减情况；
- ④ 太阳能接收表面的方位和倾角。

### 1.2.1 地球大气层上界的太阳能

#### 1.2.1.1 太阳常数

地球的平均半径只有  $6.37 \times 10^3 \text{ km}$ ，相对于日-地平均距离（约为  $1.50 \times 10^8 \text{ km}$ ）来说，几乎可视为一个点，它与直径为  $1.39 \times 10^6 \text{ km}$  的太阳形成  $32'$  的平面张角（见图 1-2），其立体角  $\Omega_s$  为：

$$\Omega_s = \frac{\pi R_s^2}{D_{s-e}^2}$$

式中， $R_s$  为太阳半径； $D_{s-e}$  为日-地距离。

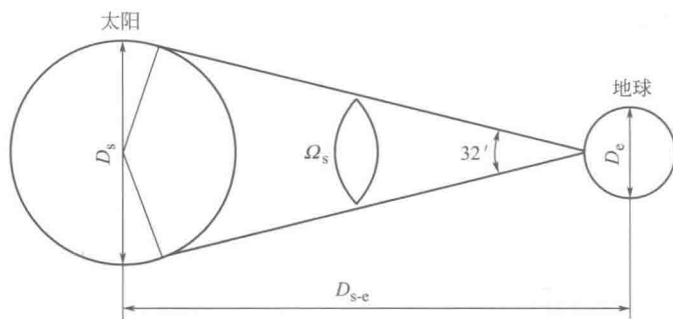


图 1-2 日-地平均距离时的几何关系

$D_s$ —太阳直径,  $1.39 \times 10^6 \text{ km}$ ;  $D_e$ —地球直径,  $1.27 \times 10^4 \text{ km}$ ;

$D_{s-e}$ —日-地距离,  $1.50 \times 10^8 \text{ km}$

地球大气层上界表面上单位立体角中的太阳辐照度为

$$I_s = \sigma T_s^4 \quad (\text{W/m}^2)$$

式中,  $\sigma$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数,  $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $T_s$  为太阳表面的平均温度, K。

故大气层上界  $\Omega_s$  立体角中与太阳光线垂直的单位表面积上的太阳辐照度  $I_{sc}$  为:

$$I_{sc} = \sigma T_s^4 \times \frac{R_s^2}{D_{s-e}^2} \quad (\text{W/m}^2) \quad (1-1)$$

由式(1-1)可知,  $\sigma$ 、 $R_s$ 、 $T_s$  都是常数, 故  $I_{sc}$  仅是  $D_{s-e}$  的函数。因地球绕太阳运行的椭圆形轨道的长短轴偏心率仅为 3%, 即  $D_{s-e}$  一年中也只是略有变化, 所引起的  $I_{sc}$  的变化仅为年平均值的  $\pm 3.5\%$ , 故将  $I_{sc}$  视为常数来定义, 即定义在日-地平均距离处地球大气层上界垂直于太阳光线的表面上, 单位面积、单位时间内所接收到的太阳辐射能量为太阳常数。1981 年, 世界气象组织 (WMO) 公布的太阳常数值为

$$I_{sc} = 1368 \text{ W/m}^2 = 8.21 \text{ J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$$

当然, 太阳本身的活动也会引起太阳辐射能的波动。但多年来, 世界各地观察结果表明, 太阳活动峰值年的辐射量与太阳活动宁静年相比只有 2.5% 左右的增大而已。所以, 可以认为太阳常数就是地球上所接收到的太阳辐照度的最大极限值。

### 1.2.1.2 太阳辐射光谱分布

太阳辐射是一种电磁波辐射, 即有波动性, 也有粒子性。其光谱的主要波长范围为  $0.15 \sim 4 \mu\text{m}$ , 而地面和大气辐射的主要波长范围则为  $3 \sim 120 \mu\text{m}$ 。在气象学中, 根据波长的不同, 通常把太阳辐射称为短波辐射, 而把地面和大气辐射称为长波辐射。

太阳辐射的光谱依波长划分波段: 波长小于  $0.4 \mu\text{m}$  为紫外波段; 从  $0.4 \sim 0.75 \mu\text{m}$  为可见光波段; 波长大于  $0.75 \mu\text{m}$  的则为红外波段。在可见光谱的波长范围内, 不同波长的电磁辐射对人眼产生不同的颜色感觉。表 1-1 列出了各种颜色的波长及其光谱范围。

表 1-1 各种颜色的波长及其光谱范围

| 颜色 | 波长/nm | 光谱范围/nm | 颜色   | 波长/nm | 光谱范围/nm |
|----|-------|---------|------|-------|---------|
| 红色 | 700   | 640~750 | 绿色   | 510   | 480~550 |
| 橙色 | 620   | 600~640 | 蓝~靛色 | 470   | 450~480 |
| 黄色 | 580   | 550~600 | 紫色   | 420   | 400~450 |

以辐射能量为纵坐标, 波长为横坐标所绘制的太阳光谱能量分布曲线如图 1-3 所示。由图可知, 尽管太阳辐射的波长范围较宽, 但绝大部分的能量却集中在  $0.22 \sim 4.0 \mu\text{m}$  的波段内, 占总能量的 99%。其中, 可见光波段约占 43%, 红外波段约占 48.3%, 紫外波段约占 8.7%。