

Springer

新能源开发与利用丛书

太阳能热利用

Harnessing Solar Heat

[爱尔兰] 布莱恩·诺顿（Brian Norton） 著
饶政华 刘刚 廖胜明 等译

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

需要全本请访问 www.ertongbook.com

关于本书

目前，人们开发的以可控方式实现太阳能热利用的系统具有多种技术路线，每一种技术都是满足特定气候条件下的独特需求。本书涵盖了太阳能热转换和热利用的多种技术，包括直接热输出利用或将热量作为其他用途（如发电或制冷）的中间媒介。本书借鉴了作者本人及克兰菲尔德大学、阿尔斯特大学、都柏林理工学院、印度新德里技术研究所、尼日利亚大学的诸多同事和合作者的研究成果。

本书前几章介绍了有关太阳能气象、辐射换热、材料性能和储能的基础知识。在阐述各种太阳能应用系统的系列章节之前，详细讨论了太阳能集热器。接着，具体讨论了特定的集热器子系统及其实际问题，给出了预测其性能的有效分析方法。在最后的章节中，对太阳能系统进行了类似的分析，讨论了包括太阳能干燥器、温室、太阳能建筑系统及其相关设计问题。

本书可供学生使用，也可作为太阳能知识教学以及大学、工业界或国家/商业实验室太阳能热利用研究人员的参考工具书。

新能源开发与利用丛书

太阳能热利用

Harnessing Solar Heat

[爱尔兰] 布莱恩·诺顿（Brian Norton） 著
饶政华 刘 刚 廖胜明 等译

机 械 工 业 出 版 社

本书全面阐述了太阳能热利用的关键技术和研究进展，包括太阳能资源评估以及各种光热技术的工作原理、系统构成、性能评估和工程应用案例等。本书既有对太阳能热转换、热储存、热应用关键部件的系统描述，又有光热系统在光伏－光热（PV/T）一体化、热水、采暖、热发电、制冷、海水淡化、干燥、温室和被动式太阳房等领域应用实践的深入探讨。

本书内容丰富、数据详实，全面且具有一定的权威性，非常适合各高等院校能源类相关专业的师生参考阅读，还可作为新能源领域研究和工程技术人员的业务参考用书。

译 者 序

当前，新能源产业的全球格局尚处在形成之中。与化石能源资源争夺战不同的是，新能源的发展有赖于技术和装备的进步，将可再生的绿色能源转换成可控可用的能源。因此，科技发展将成为未来新能源开发利用的关键。其中，太阳能取之不尽、用之不竭，具有特殊的优势和广阔的应用前景。太阳能利用已经成为国际社会的重要主题和共同行动，也是科学研究的热点领域。太阳能热利用技术发展较早，随着近年来太阳能热发电、太阳能热制氢和太阳能建筑一体化的技术突破和产业化发展，相关研究和工程应用再度兴起。太阳能热利用涉及能源动力、物理、材料、电子、建筑等多个学科领域，将这些知识融会贯通是推动太阳能热技术发展的基础。

布莱恩·诺顿教授的著作《太阳能热利用》为太阳能系统工程师和对太阳能热利用技术感兴趣的人们提供了必要的知识。本书摒弃了纯理论的写作方法，采用简明实用的写作模式，图文并茂，深入浅出，易于广大读者阅读和掌握。本书对各种光热技术类型的发展历程、操作工艺、技术创新、未来前景都进行了客观、翔实、系统的描述，其中许多内容是首次系统地呈现在国内读者面前。同时，本书引用了大量的参考文献，读者可以遵循本书的思路迅速深入到本领域研究的经典著作和最新进展中。

由于原著涉及内容广泛，为了将本书较为专业、自然地译成中文，译者邀请了中南大学可持续能源研究院的同事与研究生们参加翻译工作，他们是饶政华、刘刚、刘江维、薛天晨、王义涛、王娅琼、王鹏程、王欢、周冰洁、陈泰儒、黎雄、欧亮、陈睿。中南大学新能源科学与工程专业本科生周家正、安璐、余诗琪、刘红蕾、郭旭也参与了本书的校对工作。在此对他们的辛勤付出表示感谢。全书由饶政华统稿，廖胜明总审。

限于译者的水平，书中难免存在错误和不足之处，恳请广大读者批评指正。

廖胜明

2017 年 10 月于长沙

需要全本请访问 www.ertongbook.com

原书前言

目前，人们开发的以可控方式实现太阳能热利用的系统具有多种技术路线，每一种技术都是满足特定气候条件下的独特需求。本书涵盖了太阳能热转换和热利用的多种技术，包括直接热输出利用或将热量作为其他用途（如发电或制冷）的中间媒介。本书是对1992年首次出版的《Solar Energy Thermal Technology》（《太阳能热技术》）的全面更新、扩展和修订版本，借鉴了作者本人及克兰菲尔德大学、阿尔斯特大学、都柏林理工学院、印度新德里技术研究所、尼日利亚大学的诸多同事和合作者的研究成果。

本书前几章介绍了有关太阳能气象、辐射换热、材料性能和储能的基础知识。在阐述各种太阳能应用系统的系列章节之前，详细讨论了太阳能集热器。前几章的内容包括：太阳能资源及其在地理、光谱、天空几何和时间域的分布，太阳能在集热器表面的吸收、传输和损失的物理问题，以及太阳能热储存技术。接着，在第7、8、9章中具体讨论了特定的集热器子系统及其实际问题，给出了预测其性能的有效分析方法。在最后的章节中，对太阳能系统进行了类似的分析，讨论了包括太阳能干燥器、温室、太阳能建筑系统及其相关设计问题。

太阳能的任何利用方式都应与占主导地位的气候条件相适应。本书在全球范围内为特定的太阳能热技术与应用定义了最佳适用区域。它是一本研究性的学术专著，引用了来自工程和应用科学等领域同行评议文献的相关成果。本书可供学生使用，也可作为太阳能知识教学以及大学、工业界或国家/商业实验室太阳能热利用研究人员的参考工具书。本书对太阳能热利用技术实施过程中的困难进行了深刻的阐述，包括实际的限制和操作时的注意事项，以帮助相关人员开展可行性研究、技术支持、课程培训或设备操作调试等工作。

主要符号

A 面积（m^2）
c 工质比热（$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$）
c 光速（$m\ s^{-1}$）
C 聚光比：聚光型集热器光孔面积与吸热体面积之比
D 层厚（m）
D 直径（m）
Dn 狄恩数
e 电子电荷
F_R 热迁移因子
g 重力加速度（$m\ s^{-2}$）
g 聚光型集热器可利用散射分数
Gr 格拉晓夫数
h 换热系数（$W\ m^{-2}\ K^{-1}$）
h 垂直距离（m）
I 辐照度（$W\ m^{-2}$）
I_b 直射辐照度（$W\ m^{-2}$）
I_d 散射辐照度（$W\ m^{-2}$）
K 贝利数
l 长度（m）
m 流体质量流率（$kg\ s^{-1}$）
K 导热传热率
K 导热系数（$W\ m^{-1}\ K^{-1}$）
L 水的蒸发潜热（$J\ kg^{-1}$）
N 折射率
Nu 努赛尔数
n 到达吸热体的太阳辐射在反射器反射的平均次数
Pr 普朗特数
Q 集热器能量输出率（$W\ m^{-2}$）
r 半径（m）
R 地球半径
Re 雷诺数

R 热阻
T 时间
T 温度（K）
T_a 环境空气温度（K）
U 总热损失系数（W m^{-2} K^{-1}）
W 比负荷率
X 布鲁克斯数
Y 海伍德数
Z 耶伦特数

作者简介

布莱恩·诺顿（Brian Norton）教授，都柏林理工学院校长，曾任阿尔斯特大学工程与建筑环境学院院长、建筑环境工程学教授。他分别获得诺丁汉大学物理学学士、克兰菲尔德大学工程实验硕士和应用能源博士学位，并获诺丁汉大学博士学位。目前，他是能源研究所、爱尔兰工程师和高等教育学会的成员，英国注册工程师，曾获得英国建筑服务工程师协会纳皮尔肖奖章、能源学会罗斯科奖。同时，他还是英国建筑服务工程师协会的荣誉会员、爱尔兰工程院成员，并担任阿尔斯特大学和哈尔滨工业大学荣誉教授、休斯敦大学兼职教授等职位。

目　录

译者序
原书前言
主要符号
作者简介

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　主要背景 …… 1
1.2　与太阳能相关的法规、政策及经济 …… 4
参考文献 …… 7

第 2 章　太阳能资源 …… 8

2.1　概述 …… 8
2.2　太阳能的地面测量 …… 11
2.3　太阳能的预测 …… 15
2.3.1　水平面上的太阳辐射 …… 16
2.3.2　倾斜面上的太阳辐射 …… 17
2.4　利用卫星信息获取太阳能数据 …… 19
2.5　太阳辐射的可用性 …… 19
2.6　日光数据 …… 21
2.7　太阳能的地域可用性 …… 22
2.8　太阳几何学 …… 26
2.9　散射辐射的天空分布 …… 27
参考文献 …… 30

第 3 章　太阳能集热器的光学和传热学问题 …… 33

3.1　概述 …… 33
3.2　玻璃 …… 33
3.3　塑料材料 …… 34
3.4　太阳能透射率 …… 35
3.5　太阳能反射器材料 …… 39
3.5.1　平面反射器 …… 39
3.5.2　抛物型反射器 …… 41

3.6 线轴聚光器中的热传递 …… 51
3.7 集热器吸热体 …… 58
参考文献 …… 61

第 4 章 太阳能热储存 …… 64

4.1 概论 …… 64
4.2 液体显热储存 …… 65
4.3 固体显热储存 …… 68
4.4 潜热储存 …… 69
参考文献 …… 74

第 5 章 平板和真空管集热器 …… 78

5.1 概述 …… 78
5.2 平板空气加热器 …… 79
5.3 平板集热器 …… 82
5.4 真空管太阳能集热器 …… 89
5.5 太阳能集热器的性能测试 …… 92
5.6 太阳能集热器的建筑一体化 …… 93
参考文献 …… 95

第 6 章 光伏装置的热利用与热管理 …… 98

6.1 概述 …… 98
6.2 PV/T 热水集热器 …… 99
6.3 PV/T 空气加热器 …… 100
6.4 光伏热管理 …… 101
参考文献 …… 102

第 7 章 太阳能热发电和工业热利用 …… 105

7.1 概述 …… 105
7.2 槽式系统 …… 107
7.3 菲涅尔反射系统 …… 107
7.4 塔式系统 …… 108
7.5 碟式系统 …… 109
7.6 聚光型太阳能热发电系统的特点 …… 110
7.7 非对流太阳池 …… 111
7.8 太阳能烟囱发电厂 …… 116
7.9 太阳能过程热应用 …… 117
7.9.1 工业 …… 117
7.9.2 太阳能水处理 …… 118
7.9.3 太阳灶 …… 118
参考文献 …… 119

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第 8 章　太阳能热水及热水供暖联合系统 …… 123

8.1　概述 …… 123
8.2　一体被动式太阳能热水器（IPSWH） …… 130
8.3　分布式热水器 …… 132
8.4　光伏太阳能热水器 …… 140
8.5　防冻保护 …… 140
8.6　系统测试方法 …… 142
参考文献 …… 144

第 9 章　太阳能干燥 …… 149

参考文献 …… 159

第 10 章　太阳能冷却、制冷和海水淡化 …… 160

10.1　前言 …… 160
10.2　吸附式制冷机组 …… 161
10.3　吸收式制冷机组 …… 164
10.4　太阳能海水淡化 …… 165
参考文献 …… 168

第 11 章　温室工程 …… 169

11.1　概述 …… 169
11.2　温室材料 …… 170
11.3　温室内部环境的数学建模 …… 171
11.4　温室辅助加热系统的控制和能量储存 …… 172
参考文献 …… 176

第 12 章　被动式和混合式太阳房设计 …… 178

12.1　概述 …… 178
12.2　太阳能的获取 …… 179
12.3　温带气候下的被动式太阳房构造 …… 182
12.3.1　直接受益式太阳房 …… 183
12.3.2　间接受益式太阳房 …… 185
12.3.3　分离受益式太阳房 …… 187
12.3.4　混合系统 …… 195
12.3.5　预防过热 …… 198
12.4　被动式太阳房的辅助供热及其控制 …… 199
12.5　炎热气候下的被动式太阳房构造 …… 200
参考文献 …… 203

参考文献 …… 206

第 1 章

绪　论

1.1　主要背景

驱动太阳能热利用发展的基本因素包括：

1）环境可持续性：降低储量有限的化石能源消耗，减少全球温室气体排放，缓解当地空气污染；

2）能源安全分散化：降低集中式能源系统对地缘政治、价格波动、自然灾害、人为破坏和攻击等因素的依赖性；

3）商业机会：为国家和地区提供太阳能热生产、服务及供应等工作机会；

4）经济可行性：在很多情况下，太阳能热利用是最可行的选择。

太阳能热利用系统的应用形式包括：

1）不同规模的供热系统，通常使用热水或者热空气作为媒介；

2）并网的大规模高温太阳能热发电系统；

3）采用太阳能热驱动的冷却、海水淡化、干燥、烹饪、水净化、制冷和工业应用等系统。

应设法使太阳能热利用系统具有最佳的生命周期，并包含以下特征：

1）高效的太阳能转换效率；

2）与全天负荷或全年负荷的逐时变化相匹配，如有必要可利用储能设施；

3）与负荷的能量和温度相匹配，如有必要可利用储能设施或热泵；

4）初始投资低；

5）运营费用低；

6）对运行环境影响小；

7）对物化环境影响小；

8）稳定性、耐久性和安全性高。

从概念上来讲，太阳能热利用系统可实现太阳能的收集、热流体分配、储热以及对取热和热循环的控制。各部件有各自单独的功能，也可以相互配合实现多种功能。例如，联合太阳能集热和储热系统可应用于太阳能热水器、非对流太阳池以及直接受益式太阳房供暖等。每个系统部件的最佳参数取决于当地太阳能资源的特点、环境温度和负荷温度以及热能利用随时间变化的规律。

集热器类型			聚光比，C_1代表直射辐射	代表性温度T(K)
	名称	示意图		
固定式	一体被动式		$C\leqslant 1$	$300<T<320$
	非对流太阳池	平面吸热体	$C\leqslant 1$	$300<T<360$
	平板集热器		$C\leqslant 1$	$300<T<350$
	平板光伏/光热复合式集热器		$C\leqslant 1$	$300<T<360$
	真空管		$C\leqslant 1$	$320<T<460$
移动式 太阳跟踪 单轴	复合抛物面反射器	管式吸热体	$1\leqslant C<5$	$340<T<510$
			$5\leqslant C\leqslant 15$	$340<T<560$
	光伏/光热一体槽形反射器		$10<C<40$	$340<T<460$
	抛物面反射器		$15<C<40$	$340<T<560$
	线性菲涅尔反射器		$10<C<40$	$340<T<560$
	线性菲涅尔透镜		$10<C<40$	$340<T<540$
	柱面反射器		$10<C<50$	$340<T<540$
	菲涅尔透镜		$40<C<300$	$340<T<1000$
双轴	抛物型碟式反射器	点式吸热体	$100<C<1000$	$340<T<1200$
	球面碗状反射器		$100<C<300$	$340<T<1000$
	定日镜场		$100<C<1500$	$400<T<3000$

图 1.1　太阳能集热器的分类及其主要特点

在较短的时间段（如1h或更短时间）内，太阳辐照度、环境温度以及输出能源的利用模式（如太阳能热水器输出的热水利用模式）常常是不确定的，特别是在高纬度和易产生热带风暴的地区以及山区。随着太阳辐射累积计算的时间尺度从小时、天、月、季度逐渐增大到年，太阳辐射的变化模式一般逐渐减小。阳光充足的地区，即使在较短的时间间隔内太阳能也表现出一定的稳定特性；在这种地区，跟踪型太阳能集热器上的太阳辐射特性（如法向直射辐射）也会快速变化。在一些特定的应用形式下，控制负荷的变化可以使系统具有更好的可预测性。

太阳辐射具有以下的特点：

1）系统性变化规律：昼夜循环和年度循环；

2）随机性变化规律：主要由云层覆盖的程度和特性造成；

3）高纬度地区能源密度低：虽然夏季晴空正午时的能源密度约为$900\mathrm{Wm^{-2}}$，但是年均密度可能仅略大于$100\mathrm{Wm^{-2}}$；

4）常利用热储存：为完全满足夜间或者低辐照度期间许多应用形式的需求。

尽管太阳能和许多热负荷都有随机性的特点，但是热收集、热传输和热储存通常是采用确定的系统，可作为难以预测的瞬时输入和输出之间可预测的中间量。

太阳能集热器一般至少可分为15种类型，如图1.1所示。分类的依据为聚光的程度，其中聚光型集热器需要配置太阳能跟踪系统。

按国际通行评定程序对太阳能热利用装置部件或系统进行测试的结果，为部件或系统的选择提供了依据。对于小型装置，其额定性能往往取决于单台机组。而对于大型的、更复杂或特殊的应用形式，则有必要使用计算机辅助设计工具。设计工具的理论分析模型也用于性能预测。图1.2显示了这些与太阳能热系统开发相关的其他活动之间的联系。

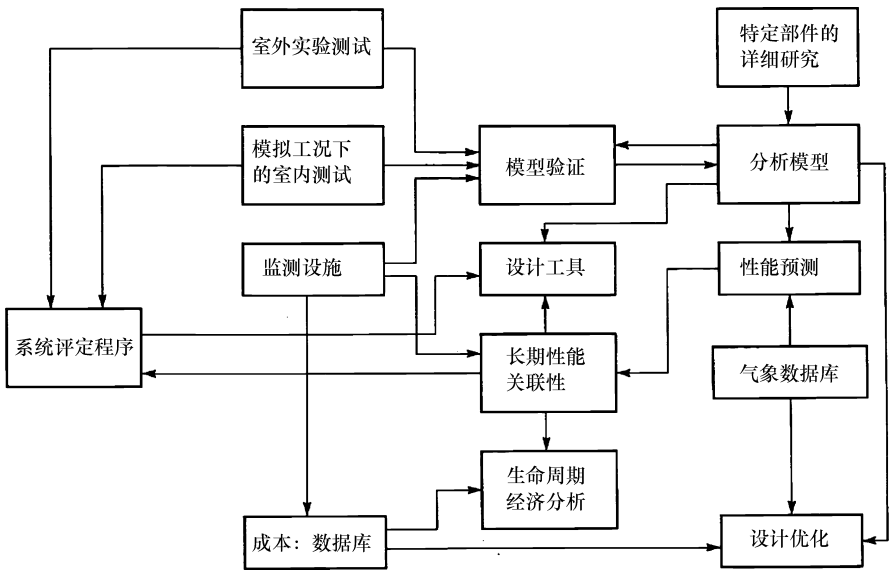


图1.2 太阳能热系统设计和创新的主要方面及其之间的联系

1.2 与太阳能相关的法规、政策及经济

现行主流的市场结构、公共政策、隐性和公开的政治推测以及有关环境的社会价值都影响着太阳能热利用技术的经济性评估。极端情况下，这些因素可能会在无形中给太阳能热系统的利用带来不必要的障碍，例如被要求满足过于精确的经济性标准，或是将太阳热能以不适宜的方式应用或用于不适宜的地区。对能源技术的成本－效益对比分析显示（Holmeyer，1988），使用化石燃料和核能会造成额外的不良后果，其中有很大一部分将转嫁给民众。这些后果包括全球及当地的污染物排放、对人体健康的负面影响及就业模式发生不利的转变。其中，最间接而长期的影响在于实际中无法将其专门纳入到每个能源消费者支付的能源费用中；这些问题将以税收、国内生产总值减少、国际收支赤字及生活质量下降等多种形式出现并由整个社会承担。通过比较，应用太阳能热技术可以使这些不利影响最小化，以减少这种间接成本。利用补贴来刺激太阳能热水技术的应用可以而且已经形成了特定的市场。然而，取消补贴后，这些市场往往很难维持。如果推出针对太阳能热技术的强制性政策（比如新建或改建的建筑），市场的发展将会顺利进行，从而形成特定市场的长期特征。

图 1.3 给出了实现环境可持续性发展的主要驱动力。通常，只有当太阳能热利用技术能够同时符合社会与经济两方面的可持续性要求时，这种环境友好型技术才会被推广使用。图 1.4 总结了法律监管的范围，需要确保太阳能热系统具有以下特征：

1）可容许的：通过建筑规范和健康、安全法律；

2）公平的：通过城市规划和分区；

3）经济可行的：通过对化石能源和核能规定法定义务和进行平等对待。

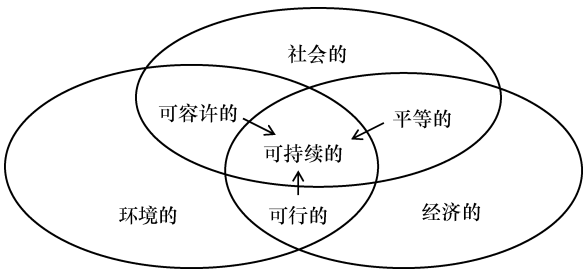


图 1.3 环境可持续性的驱动力

地方和国家政府都在试图控制城市发展，以确保：①公共设施、基础设施和资源的高效利用；②保护历史建筑和社区；③交通要道、重工业区与居民区分开；④寻求环境可持续性。另外，新建房屋的开发者会通过采用限制条款之类的措施，以迫使房屋所有者保持原来的设计风格。这就会对在房屋上加装太阳能集热器的改造活动造成阻碍。在美国，许多州已经取缔了禁止太阳能集热器安装的限制性协议（Bronin，2009）。

许多法律都赋予了房屋所有者无遮蔽获得太阳能的权利，这是为了保留其原有的获得日光的权利，比如英国基于“Ancient Lights”法律的权利（Bickford－Smith 和 Fran-

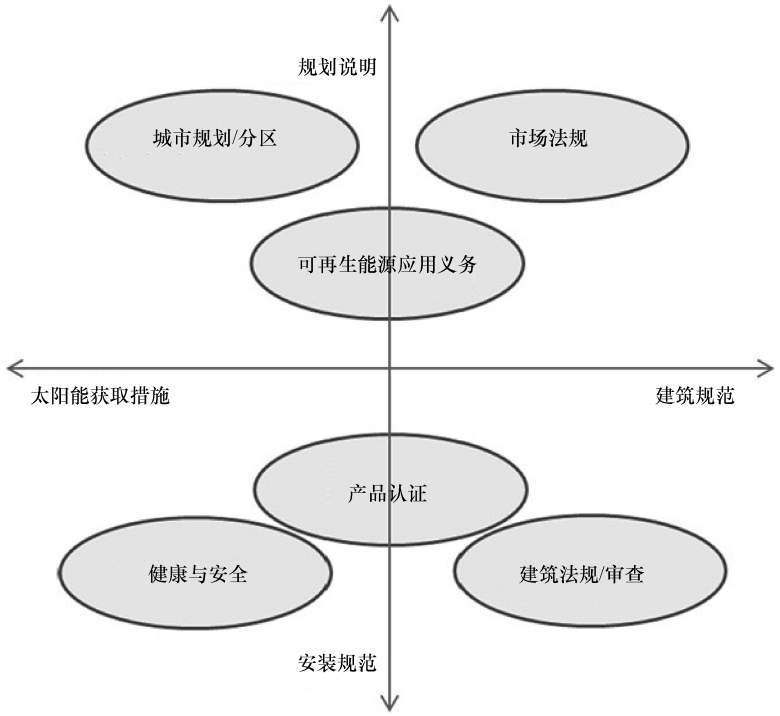


图 1.4 太阳能热应用的法律监管范围

cis，2007），或者日本基于健康的阳光保证权利（不特指能源）（Takagi，1977）。而在美国，直到最近相关法律也没有赋予房屋所有者拥有房屋接收到的太阳能的权利，尽管在一些州（尤其是威斯康星州、加利福尼亚州和墨西哥州）这些权利已经得到了肯定（Paddick 和 Grinlinton，2010）。

实际上在全世界所有的法规中，通常都有规定试图确保永久性建筑有足够的结构强度，以能够抵御可能产生的自然灾害（比如地震、暴风雨、龙卷风等），同时确保健康卫生的内部环境并且实现低能耗。这些法规一般应用于新建建筑，但是一些国家已经将其扩展至现有建筑的改造工程中。在一些行政辖区中，太阳能热水器的安装是强制性的，尽管这可能并没有出现在现有的建筑规范中。比如在中国，许多省的建筑规范中就有安装太阳能热水器的规定；事实上，如果没有安装太阳能热水器，施工将不得继续进行（Runqing 等，2012）。

一个国家监管认证的产品可能无法进入某些其他国家的市场。比如，国家试图阻止以牺牲本国企业产品为代价而进行不公平的低价进口来占领市场份额的行为，这由有影响力的国家利益集团做出判断。政府可以征收进口关税，以消除这种竞争优势。除非是政治因素驱动的经济制裁，彻底禁止进口仍是比较少见的。然而，对于出口商来说，遵守复杂的国家法规和标准不可避免会增加成本，这与进口禁令有明显不同。最具讽刺意味的是，当为获得太阳能热水器经济可行性而需要降低初安装成本时，上述行为可能会导致太阳能集热器在特定市场中的成本居高不下。

需要全本请访问 www.ertongbook.com