

# 太阳能的基础和应用



日本太阳能学会编  
华中工学院太阳能科研组译



第一卷

# 太阳能的基础和应用

日本太阳能学会编

华中工学院太阳能科研组译

第一章

第一节 太阳能的利用  
第二节 太阳能的利用  
第三节 太阳能的利用  
第四节 太阳能的利用  
第五节 太阳能的利用

第十章

第十节 太阳能的利用  
第十一节 太阳能的利用  
第十二节 太阳能的利用

第一章

第一节 太阳能的利用  
第二节 太阳能的利用  
第三节 太阳能的利用  
第四节 太阳能的利用  
第五节 太阳能的利用

第十章

第十节 太阳能的利用  
第十一节 太阳能的利用  
第十二节 太阳能的利用



1981.1

1979年8月8日

## 执 笔 者 一 览 表

- |      |        |                  |
|------|--------|------------------|
| 第一章  | 村井 浩三  | 气象研究所 理学博士       |
|      | 松尾 阳   | 东京大学助教授 工程科学博士   |
| 第二章  | 田中 忠良  | 电子技术综合研究所 工程科学博士 |
|      | 作田 宏一  | 电子技术综合研究所        |
| 第四章  | 浅野 滔一郎 | 昭和铝业公司 工程科学博士    |
| 第五章  | 中岛 康孝  | 工学院大学教授 工程科学博士   |
| 第六章  | 谷下 市松  | 几德工业大学教务长 工程科学博士 |
| 第七章  | 木村 建一  | 早稻田大学教授 工程科学博士   |
|      | 田中 俊六  | 东海大学助教授 工程科学博士   |
| 第三章  | 石桥 敏宏  | 矢崎部品公司           |
| 第八章  |        |                  |
| 第九章  | 堀米 孝   | 电子技术综合研究所 工程科学博士 |
| 第十章  | 久留 勇   | 东京芝浦电气公司 理学博士    |
| 第十一章 | 櫻井 武磨  | 东北大学名誉教授 理学博士    |
| 第十二章 | 押田 勇雄  | 上智大学教授 理学博士      |

## 绪 言

1973年发生的石油冲击敲响的警钟向全世界发出了警告：燃料资源是有限的。现在又预告十年以后将发生第二次石油冲击，世界各国都在全力以赴地狠抓节约能源和开发新能源的工作。太阳能是具有代表性的新能源，人们当然要对它的直接利用努力进行调查研究、开发和普及。

为了推动太阳能利用事业的发展，本学会于1975年编了一本太阳能利用的普及启蒙读物《太阳能读本》，由欧姆出版社出版之后，博得了各方面的好评，我们不胜欣喜之至。

现在，我们再编一本上述读物的姐妹篇，增加了一些比较专门化的内容，这就是本书《太阳能的基础与应用》，仍由欧姆出版社出版，以供同好者参考。本书收集了有关太阳能利用装置的设计、制造和实用方面的大量有用资料，各种装置的理论与设计分别由这些方面的第一流的专家执笔。

第一章详细地讲述了太阳能利用首先必须了解的日射量及其强度的计测法，测量资料，倾斜面日射量的求法和标准气象资料等内容。第二章和第三章分别中肯地叙述了各种太阳能利用装置设计所需要的集光型集热器和平板型集热器的理论与实际。第四章介绍了各种集热器的材料及其耐用性，关于材料的知识对于任何利用装置都是最重要的问题。第五章对由于太阳能在时间上的分布不均匀而需要的蓄热装置的理论与实际作了系统的论述。以上五章是太阳能在任何方面的应用都必须具备的基础知识。

从第六章起详细介绍各方面的太阳能利用装置的理论 and 设计方法，第六章讲热水器，第七章讲太阳采暖房，第八章讲太阳热冷暖房，第九章讲太阳热发电，第十章讲太阳光发电，第十一章讲太阳炉，每一章都引用了国内外的实例，提供了丰富的设计资料。最后，第十二章论述了太阳能开发方面存在的问题，重点讨论了太阳能利用的经济性。

通观本书编入的内容，我觉得它作为太阳能利用的专业书其内容比我们原来设想的还要充实。在能源问题作为当前的重要课题出现在人们面前的时候，本书的刊行是很合时宜的。

据最近报导，我国作为世界经济大国将拿出相当大一部分积压的外汇与美国等其他国家共同进行开发新能源的研究，指导发展中国家开发新能源，在国内也要拿出一些钱来作为补助金以促进太阳房的普及，这些措施政府都将作为国策推行。因此，关心太阳能利用问题的人和从事太阳能利用事业的工程技术人员今后会越来越多。如果本书能够成为这些人的好伴侣，在解决能源问题方面作出一些贡献的话，编者们的喜出望外了。

日本太阳能学会会长

工程科学博士 谷下市松

1978年8月6日

# 译者序言

本书为日本太阳能学会所编《太阳能的基础和应用》的译本，内容全面丰富，可供从事太阳能工作人员和太阳能爱好者学习参考。近年来，世界性的能源问题日益严重，各国都在致力于太阳能的研究，我国在太阳能利用的研究和推广方面也取得了新的进展。目前，我国比较详细介绍太阳能利用的理论和实践的书还很少，我们希望此书能在普及太阳能基础知识和提高太阳能理论水平方面起到促进作用。

本书由华中工学院太阳能教研组翻译。在翻译的过程中，武汉单晶硅厂吴大维同志承担了第十章的翻译工作，华中工学院热工教研室有关同志给予了大力支持和协助，特此致谢。

参加本书翻译工作的有：  
凌求志 绪言、第一章、第四章、第五章、第十一章、第十二章  
唐翠影 第二章、第九章  
王崇琦 第三章、第六章  
郑贤德 第七章、第八章  
吴大维 第十章  
全书由王崇琦同志校阅。

由于译者水平有限，加上时间较为仓促，译文定有不妥及错误之处，恳请读者们给以批评指正。

译者

一九八一年元月

日本太阳能学会

日本太阳能学会

武汉市谷士街华工

日八民八平8701

# 目 录

## 第一章 日射量及其强度

- 1-1 日射量及其测量仪器..... 1
- 1-2 与日射有关的各种量..... 11
- 1-3 日射量的工程处理..... 24

## 第二章 聚焦型集热器的理论和实际

- 2-1 聚焦基础..... 31
- 2-2 集热理论..... 37
- 2-3 换热理论..... 40

## 第三章 平板型集热器的理论和实际

- 3-1 概述..... 52
- 3-2 分类..... 52
- 3-3 构造..... 56
- 3-4 集热量、集热效率的计算..... 62

## 第四章 集热器的材料和耐久性

- 4-1 概述..... 78
- 4-2 集热器材料的性能要求..... 78
- 4-3 提高集热器的耐久性..... 96

## 第五章 蓄热的理论和实际

- 5-1 概述..... 103
- 5-2 暖冷房用的蓄热..... 103

## 第六章 热水器的理论和设计

- 6-1 概述..... 129
- 6-2 热水器性能的理论计算..... 131

6—3	热水器性能的实测和年集热量的预测	135
6—4	自然循环型热水器的设计法	139
6—5	静止型热水器的设计法	145
<b>第七章 太阳能暖房的理论和设计</b>		
7—1	概述	147
7—2	太阳能自然冷暖房	151
7—3	太阳能暖房系统	157
7—4	太阳能热泵(冷)暖房系统	167
<b>第八章 太阳能冷暖房、供热水系统</b>		
8—1	概述	173
8—2	太阳能驱动的制冷机	175
8—3	太阳能冷暖房、供热水系统的设计	185
<b>第九章 太阳热发电的理论和设计</b>		
9—1	太阳热发电的基本装置	196
9—2	各种类型的太阳热发电系统	208
<b>第十章 太阳光发电的理论和设计</b>		
10—1	概述	217
10—2	太阳电池的工作原理	217
10—3	太阳电池的能量转换效率	221
10—4	太阳光发电装置	226
10—5	太阳电池的现状与今后的课题	229
<b>第十一章 太阳炉的理论和设计</b>		
11—1	绪言	231
11—2	太阳炉的基础知识	232
11—3	理论聚焦比与到达温度	233
11—4	大型太阳炉的设计与制造	239
11—5	利用太阳炉进行高温研究	243
11—6	结论	247

# 第十二章 关于太阳能开发方面几个问题

- 12-1 问题概述..... 249
- 12-2 天空光的利用..... 249
- 12-3 无跟踪聚光..... 250
- 12-4 第三聚光法..... 251
- 12-5 崩分析法的应用..... 252
- 12-6 技术经济分析法..... 254
- 12-7 太阳能的利用与成本问题..... 255

索引 (略)

在编写本书的时候，经常都会感到现有资料之不足。为了满足读者的求知欲，因此我在本书的附录中，对某些新的材料做了较多的介绍。由于本书的资料之不足，我自己不得不亲自去调查。随着太阳电池技术的发展，要求目前资料的美观也增加了一些，而且要求也提高了，这便有些不足。目前，太阳能的大部分用途是气象观测用的太阳能，这一类的太阳能主要是应用于气象观测等几个方面，将以及存在的问题。

## 12-1 问题概述

太阳辐射在穿过大气层的时候受到大气的吸收和散射的影响然后到达地表。这种影响是由于大气中的气溶胶颗粒 (Aerosols) 产生的，这些颗粒的性质各不相同。因此，大气散射可以分为两种，前者叫做瑞利散射 (Rayleigh Scattering)，后者叫做米散射 (Mie Scattering)。米散射的吸收系数以水蒸气和近红外波段对辐射的吸收最为显著，其次最具有辐射吸收能力。此外，气溶胶颗粒分子也会吸收一点，但数量非常少，对于理论探讨和实际的日照辐射量计算影响都不大。

在大气层中，实际上对每天日照量影响最大的是云产生的散射和吸收。云的存在与否对日照量影响很大。在同一个天空较厚的云层覆盖的情况下，到达地面的日照量还会比晴天时要小。另一方面，在阴天和云层只在某一处的情况下，由太阳侧向地面辐射的日照量，要比在同一个局部地区而日照量比无云时还要大。这不难看出，云的存在对日照量影响很大。因此，在大气中云对日照量影响一点云对日照量影响不大。所以，在讨论太阳辐射分布的时候，关于云对日照量影响的讨论是非常重要的。

在讨论太阳辐射分布的时候，一般总是把日照量分为几个成分来考虑。大气层中的日照量，可以分为大气中不受任何阻碍而到达地表的直射日照量，被散射之后，又散射到大气中的散射日照量。由于散射而产生的向上日照量  $I_u(\lambda)$ ，被地面向外反射回来的向上日照量  $I_{ur}(\lambda)$ ，以及向大气外散发的日照量  $I_{as}(\lambda)$ 。此外，大气中的各种气溶胶颗粒的日照量  $I_p(\lambda)$ 。这些日照量之和，即为太阳辐射量  $I_0(\lambda)$  到达地球上的日照量。

$$I_0(\lambda) = I_{0d}(\lambda) + I_{0s}(\lambda) = \alpha \downarrow (I_{0d}(\lambda) - I_{ur}(\lambda)) + \alpha \downarrow I_{0d}(\lambda) + I_{0s}(\lambda) \quad (1.1)$$

$$I_{0d}(\lambda) = I_0(\lambda) - (1 - \alpha) \downarrow I_{0d}(\lambda) - \alpha \downarrow I_{0d}(\lambda) \quad (1.2)$$

式 (1.1) 中的  $I_{0d}(\lambda)$  为大气上界的太阳辐射量 (即  $I_0(\lambda)$ )，它是指到了地球表面大气层的日照量。



# 第一章 日射量及其强度

## 1—1 日射量及其测量仪器

当我们把太阳的辐射线作为能源来利用的时候所面临的基本问题之一就是要知道射入太阳能利用装置的辐射量的绝对值及其变化情况。这些基本数据是设计各种太阳能利用装置所必需的，然而当我们一旦去收集这些资料来使用的时候，就常常会感到现有资料之不足或者测定值的精度值得怀疑。例如每种波长的日射量，对倾斜面的入射量的绝对值，日射量随气象条件的变动等资料都很缺乏。为了弥补这些资料之不足，设计者不得不亲自去测量。再者，随着太阳能利用技术的进步，要求日射资料的种类也增多了，精度要求也提高了，往往有必要重新测定。目前，日射测量大部分用的是气象测量用的日射计，这一章的主要内容就是介绍可供实用的各种日射计的分类，特点及存在的问题。

### [1] 日射量的各种成分

太阳的辐射线在通过地球大气的时候受到大气的散射和吸收的影响然后到达地面。散射是由空气分子和大气中的悬浮粒子 (aerazol) 产生的，这两种散射的性质截然不同，因此处理方法也很不一样。前者叫做雷里散射 (Rayleigh Scattering)；后者叫做米散射 (Mie Scattering)。吸收的效果以水蒸汽对近红外波段射线的吸收最为显著，其次是臭氧对紫外线的吸收。此外，氧等物质的分子也会吸收一点，但都微乎其微，对于讨论到达地面的日射量的问题来说可以忽略不计。

上面说的是无云的情况，实际上对每日日射量影响最大的是云产生的散射和吸收。云的表面的反射作用是很强的，在整个天空被厚厚的云层覆盖着的情况下，到达地面的日射量还不到入射量的10%。另一方面，在积云形的云堆积在某一处的情况下，由云的侧面向地面的反射作用很强，因此有时在某个局部地区测得的日射量比无云时还要大。这样看来，云的作用的表现形式也是很复杂的，它对日射量的影响很大。实际上大气中有云是常态，一点云都没有的情况只是一种特殊情况。所以，在研究太阳能利用中的日射问题的时候，关于云对日射的影响的知识是极其重要的。

在处理受到以上各种影响的日射量的时候，一般总是把日射量分为几个成分来考虑：大气之上的日射量 $I_0(\lambda)$ ，在大气中不受任何影响而到达地面的直达日射 $I(\lambda)$ ，被散射之后又射到地面的散乱日射 $D(\lambda)$ ，由于散射而产生的向上日射 $K \uparrow(\lambda)$ ，被地面反射回去的向上日射 $R(\lambda)$ ，向上通过大气层再向大气外散逸的日射 $K_0 \uparrow(\lambda)$ ，被大气中的各种物质所吸收的日射量 $A(\lambda)$ 。这些日射量如图1.1所示。用这些成分来表示入射到地球上的日射量

$$\begin{aligned} I_0(\lambda) - K_0 \uparrow(\lambda) &= K \downarrow(\lambda) (1 - \alpha) + A(\lambda) \\ &= [S(\lambda) + D(\lambda)] (1 - \alpha) + A(\lambda) \end{aligned} \quad (1.1)$$

式 (1.1) 的左边表示大气上端的净通量 (net flux)，它起到了地球及其大气的热源的作用

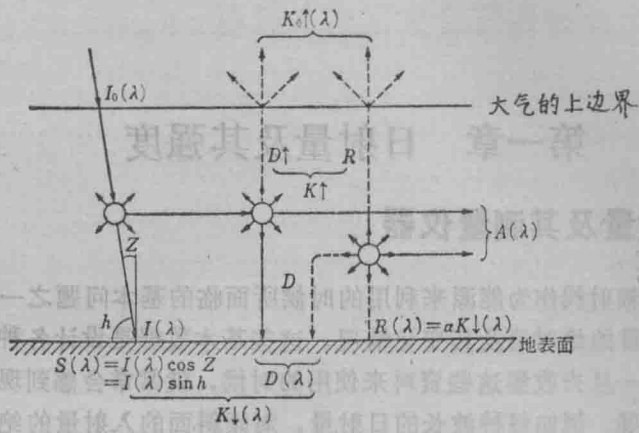


图1.1 地球大气中日射的各种成分

用。当然，在求作为大气运动的原动力的热能的时候，以红外辐射的形式向大气外散逸的能量是重要的，必须考虑，不了解这一点就不能正确地求得使大气运动的热能，但在这里我们不详细讨论关于红外辐射的问题。根据WMO（世界气象机构）所下的定义将日射的主要成分列成如表1.1所示的一览表。

以上是作为气象要素的日射的各种成分，除了最后的太阳常数 ( $I_0$ ) 不变之外，其余各种成分都随地球大气的状态而剧烈改变，以各种不同的比例来分配。这些比例随时间、空间而变，这就是大气循环的原动力，也是气候变化的重要因素之一。

〔2〕 辐射测定

日射测定的原理就是把入射到受光面上的日射能量全部吸收起来并变换成其他形式的能量来进行测定。因此，值得考虑的问题可以大体上分为受光面的吸收率和能量的变换方法这两方面的问题。关于受光面值得考虑的问题，在测定直达日射时和测定全天空日射时稍微有些不同，但最重要的问题都是全部吸收射到受光面上的辐射能的问题。用黑色涂料来吸收辐射能虽然简单，但能够全部吸收辐射能的涂料物质可并不易得。现在，日射计中所用的最优质的黑色涂料是以帕松斯光学黑漆 (Parsons optical black lacquer) 为代表的涂料，其吸收率达99%以上，且不随波长而变，但这是外国产品，很不容易弄到手。无论如何，保证百分之百的吸收物质是得不到的，我们就必须实测各种受光面的吸收率，这就是辐射量的绝对测定一大障碍。最近，人们不单纯依赖涂料物质，利用空洞吸收的原理研制了一种接近绝对黑体的器件，进行了完全吸收入射能的试验，试验结果性能优良。用这种方法研制出可以测出辐射的绝对值的辐射计是最近几年的重大研究课题。

关于受光面还有一个问题，就是在测量以任意入射角射入受光面的辐射通量时出现的问题。全天空日射量的测定就是这种情况的一个例子。按照前面的定义，全天空日射量可以用下式表示。

$$K\downarrow = S + D = I_0 \cos Z + \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} i(\theta, \varphi) \cos\theta \sin\theta d\theta \quad (1.2)$$

表1.1

辐射的各种成分

1	<p>向下辐射 (<math>Q \downarrow</math>) (downward radiation)</p> <p>全天空日射 (<math>K \downarrow</math>) (global solar radiation)</p> <p>直达日射的铅直成分 (<math>S</math>) (vertical component of direct solar radiation)</p> <p>直达日射 (<math>I</math>) (direct solar radiation)</p> <p>散乱日射 (<math>D</math>) (sky radiation, diffused solar radiation)</p> <p>向下的大气辐射 (<math>L \downarrow</math>) (<math>A \downarrow</math>) (downward atmospheric radiation)</p>	<p>向下的日射和大气辐射</p> <p>从 <math>2\pi</math> 立体角的一切方向朝下入射到水平面上的直达日射和散乱日射之和</p> <p>从太阳面直接入射到水平面的日射</p> <p>从太阳面直接入射到与入射方向垂直的平面上的日射</p> <p>从 <math>2\pi</math> 立体角中除掉太阳面所占的立体角之外的一切方向入射到水平面上的散乱日射。</p> <p>由大气放出的向下的长波辐射</p>	<p><math>Q \downarrow = K \downarrow + L \downarrow</math></p> <p><math>K \downarrow = S + D</math></p> <p><math>S = I \cos Z = I \sin h_0</math> Z: 太阳天顶角 <math>h_0</math>: 太阳高度角</p> <p><math>L \downarrow = A \downarrow</math></p>
2	<p>向上辐射 (<math>Q \uparrow</math>) (upward radiation)</p> <p>由于反射而产生的向上日射 (<math>K \uparrow</math>) (<math>R</math>) (reflected solar radiation)</p> <p>向上的地球辐射 (<math>L \uparrow</math>) (upward terrestrial radiation)</p> <p>向上的大气辐射 (<math>A \uparrow</math>) (upward atmospheric radiation)</p> <p>由反射产生的大气辐射 (<math>r</math>) (reflect atmospheric radiation)</p> <p>地面辐射 (<math>L_g</math>) (upward terrestrial surface radiation)</p>	<p>向上的日射与由地面和大气放出的朝上的长波辐射之和</p> <p>由地面反射的日射与由大气向上散射的日射之和</p> <p>由地面与大气放出的向上的长波辐射</p> <p>由大气放出的向上的长波辐射</p> <p>由地面反射的长波辐射</p> <p>由地表面放出的长波辐射</p>	<p><math>Q \uparrow = K \uparrow + L \uparrow</math></p> <p>R 是只由地面反射的成分 <math>K \uparrow = R + D \uparrow</math></p> <p><math>L \uparrow = A \uparrow + r + L_g</math></p>
3	<p>净辐射量 (<math>Q^*</math>) (net radiation)</p> <p>净日射量 (<math>K^*</math>) (net solar radiation)</p> <p>净地球辐射量 (<math>L^*</math>) (net terrestrial radiation)</p>	<p>向下辐射与向上辐射之差</p> <p>向下日射与向上日射之差</p> <p>向下的大气辐射与向上的地球辐射之差</p>	<p><math>Q^* = Q \downarrow - Q \uparrow</math> <math>= K^* + Q^*</math></p> <p><math>K^* = K \downarrow - k \uparrow</math></p> <p><math>L^* = L \downarrow - L \uparrow</math></p>
4	<p>太阳常数 (<math>I_0</math>)</p>	<p>当太阳和地球处于平均距离时, 射到大气外面的垂直于入射方向的平面上的日射量</p>	<p><math>I_0 = 1.94 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}</math></p>

辐射线从各个不同的方向同时射入受光面， $i(\theta, \varphi)$  是从  $(\theta, \varphi)$  方向射入受光面的日射强度。在这种情况下，如果受光面的吸收率随入射方向而变，测量就会产生误差。如果入射强度为  $i$ ，则以入射角  $\theta$  射入受光面的辐射通量就是  $i \cos \theta$ ，这就叫做辐射测定的余弦定律。可是对于实际的辐射测定仪器来说，要得到满足这个定律的受光面是很难的。各种测量方法所采用的受光面的形式也各不相同。一般的日射计的射线吸收面上都盖着玻璃。在分光测定等特殊情况下，还采用扩散板或积光球作为受光面。这样看来，难以使各种各样的受光面都完全服从上述的余弦定律。实际上，在入射角大的情况下（对于直达日射来说就是太阳高度低的情况），吸收率降低，结果灵敏度就差了。以上我们提出了在日射测定时受光面的两个关键问题，如果不预先在实验室确定这两方面带来的偏差，测量精度就得不到保证。

前面提到过的第二个问题就是把受光面吸收到的能量转换成什么能量来测量的问题。主要方法有下列四种：

- (1) 转换成热量再测量的方法
- (2) 利用光电效应变成电量来测量的方法
- (3) 化学变化，主要是照相法
- (4) 目测法

其中每一种方法还包括有种种不同的方法，我们先把这四种方法的特性用表1.2表示如下：

表1.2 辐射测量各种方法的特性

方 法	波 长 范 围	灵 敏 度	直 线 性	波 长 选 择 性
热量测定法	全波长	低	极好	无
光电测定法	40 $\mu\text{m}$ 以下	高	好	高
照相测定法	1.2 $\mu\text{m}$ 以下	高	不好	高
目测法	0.4~0.75 $\mu\text{m}$	高	极不好	高

由此表可以看出，各种方法的特性差别很大，重要的是要根据不同的目的来选择适当的方法。各种方法能够测量的波长范围也相差很大，我们在这里只谈一谈作为气象要素的辐射的波长范围。

首先，我们谈太阳辐射的波长范围。从太阳射出的辐射强度按波长的分布情况和6000K左右的黑体辐射很一致。太阳辐射线通过地球大气时受到前面讲过的各种影响而衰减，然后到达地面。能够到达地面的最短波长约为0.3 $\mu\text{m}$  (3000 $\text{\AA}$ )左右。波长比它更短的射线已被上层空气分子完全吸收掉了。太阳的长波辐射线当然有红外线，波长比红外线更长的射线也是存在的，但其量极少，可以忽略不计。无论如何，可以忽略波长为4 $\mu\text{m}$ 以上的日射量。也就是说，我们把到达地面的日射波长范围定为0.3~4 $\mu\text{m}$ 是足够的了。另一方面，地球射出的红外线接近于大约250K的黑体辐射，其波长几乎都在3 $\mu\text{m}$ 以上。这样，两者的波长范围可以以3~4 $\mu\text{m}$ 为界划分开来。因此，在要将地球放出的红外辐射与日射相区别的时候，就把

它们分别叫做长波辐射和短波辐射。

第一种方法——热量测定法是历史最长的最常用的方法，银盘日射计，埃斯川姆电气补偿式日射计和热电偶式全天空日射计等气象测量上使用的日射计几乎都属于这一种（关于它们的构造等问题，后面再讲）。

第二种方法——光电测定法采用光电倍增管、光电管、光电池等作为检测器。由表1.2可以看出，其灵敏度随波长的变化很大。因此用它来测量波长范围很宽的日射是不合适的，对于分光测定之类的情况，它是有效的。选用适合被测波长的检测器，可以得到灵敏度非常高的测量仪器。不可能用这种方法进行绝对测量，必须用别的什么方法对这种仪器进行标定。关于绝对值标定以后再讲，从目前的情况看，要分波长进行标定是非常困难的。

第三种方法——照相测光法最近用得差不多了，但这种方法也有它的优点，可以在野外把某一瞬间的状态拍照下来再拿回实验室去从容处理。最近出现了性能优良的照相材料，也有了测量干片黑化度的精度非常高的浓度计，还有，浓度的色彩表示法也相当普及了，它能有效地适用于各种目标。这样看来，对用照象测定辐射的方法有必要再次重新评价。

第四种方法——目测法，人的眼睛能够感觉的是波长范围约为 $0.4\sim 0.75\mu\text{m}$ 的全部可见光，而不能察觉约占日射能量的一半的近红外线和紫外线。因此，人的眼睛几乎是起不到测量仪器的作用的，但它有一个特长，就是对亮度差的测量精度好得出人意外。在电测法还没

表1.3 气象用辐射测量仪器的分类

分 类	定 义	所 用 的 幅 射 计
直达日射计 (pyrheliometer actinometer)	测定射到垂直于入射方向 的平面上的直达日射量 <sup>1</sup>	埃斯川姆电气补偿式日射计 银盘日射计 林克—福斯纳日射计 流水日射计
全天空日射计 (pyranometer)	测从半球的一切方向 ( $2\pi$ 立体角) 射到水平面上的 日射量 包括全天空日射量，散乱 日射量和向上的散乱日射 量 $K\downarrow, D, K\uparrow$	艾普里全天空日射计 莫尔—哥尔钦斯基全天空日射计 雅尼谢夫斯基全天空日射计 罗比奇全天空日射计 (在测定散乱日射 $D$ 的时候，用遮蔽环 或遮蔽板挡住直射成分)
全天空辐射计 (pyrradiometer)	测定从 $2\pi$ 立体角的一切方 向射到水平面上的一切波 长的辐射量 $Q\downarrow = K\downarrow + L\downarrow$	从原理上分析，应该去掉上列全天空日射 计上的玻璃罩，但把受光面暴露在外也不 好，于是就用聚乙烯钟罩来代替玻璃罩
净幅射计 (net pyrradiom- eter, balance meter)	测定表1.1所示的幅射收 支量 $Q^* = Q\downarrow - Q\uparrow$	休尔彻收支计 芬克收支计 (如果把这些仪器的朝下的受光面遮蔽 起来，就可当作上述的全天空辐射计使 用)
净日射计 (net pyranom- eter)	测定日射收支量 $K^* = K\downarrow - K\uparrow$	只要把上述幅射收支计的受光面的复 盖物换成玻璃等只透过日射的物质就行 了。

有发展起来的时代里的测光法就利用了这个特点，在定性测量的情况下，它是有效的。

我把各种辐射计归类，并列出一览表（表1.3）。

当然，表1.3并没有把所有的辐射计都列进去，只列出了比较常用的几种。表1.1, 1.2中所采用的术语还有一些含混不清之处。如前面所说的，日射这个词只用于短波辐射，但辐射这个词则有时只用于长波辐射，有时又表示长波辐射和短波辐射的总和的意思。还有，收支量这个词对应的英文是net flux，这个词并不是最恰当的，只是从人的感觉来看，把从天空射向地面的射线通量看作“收”，把从地面射向天空的射线通量看作“支”，它们的差net flux就应当叫做“收支量”了。有关辐射方面的术语还没有完全统一，所以要特别注意它与外国语的对应关系。

### [3] 日射测量仪器

为了测定前面讲过的辐射的各种要素，研制了多种型式的日射计和辐射计，最近有了较大的进展，似乎可以进行高精度测量了。但是，问题并没有完全解决，最大的问题在于绝对测定仪器的研制。下面我们来介绍一下目前官方气象机构所常用的几种测量仪器。

#### (a) 直达日射计

(1) 埃斯川姆电气补偿式日射计 (Ångström electric compensation pyr heliometer) 它是1893年由K. Ångström设计的测量仪器，其目的是进行绝对测定。为了说明它的原理，将它的感受部件的构造表示如图1.2 (a)。感受元件是表面黑化了的两块锰铜薄片 (20×2mm，厚度0.01mm)，放在直径为20cm左右的圆筒的底部，每一块薄片的反面都接上热电偶，用检流计 $G_1$ 来检测两块薄片的温度差(如图1.2 (b)所示)。这两块薄片都可以

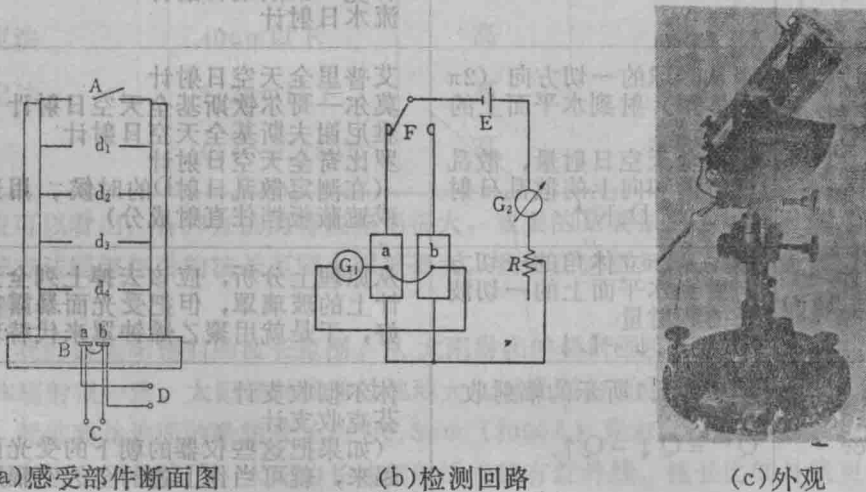


图1.2 埃斯川姆电气补偿式日射计的断面图，检测线路和外貌  
 A—光闸， B—受光面 (a, b两片并排)， C—热电偶输出端子，  
 D—加热器，  $d_1 \sim d_4$ —光闸， E—加热器电源， F—加热电路开关，  
 $G_1, G_2$ —检流计， R—可变电阻

用由电池E来的电流来加热，用 $G_2$ 可以测得加热电流的大小。圆筒的上端有两个光闸，打开其中的一个时，只有一块锰铜薄片（例如薄片a）暴露在直达日射之下。这样，薄片a温度升高， $G_1$ 测到有电流。然后，用由电池E来的电流流过薄片b，产生焦耳热使b的温度升高，结果使 $G_1$ 为零，也就是a片与b片的温度相等了。这时，由日射供给a片的热量与由电流供给b片的热量相等。只要知道加热电流*i*和b片的电阻*r*，就可求出日射量，其关系如下。设电流供给的热量为 $Q$  [ $\text{cal}\cdot\text{s}^{-1}$ ]，根据焦耳定律有

$$Q = 0.24i^2r \quad (1.3)$$

另一方面，由日射供给a片的热量也等于 $Q$

$$Q = \frac{Sl\alpha}{60} \quad (1.4)$$

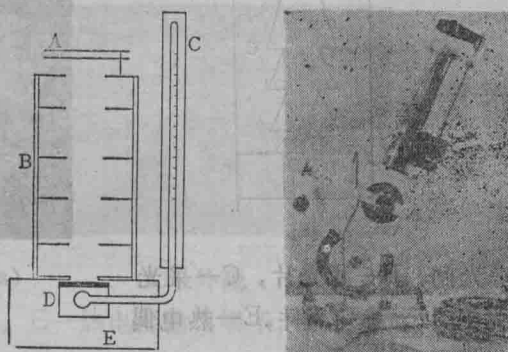
式中， $S$ 是直达日射量 [ $\text{cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ ]， $l$ ， $d$ 是薄片的长度和宽度， $\alpha$ 是a片表面的吸收率。把以上两式联立起来就得到

$$S = 14.4i^2r/l\alpha = Ci^2 \quad (1.5)$$

只要测得*i*就可求出日射量 $S$ 。式中的 $C = \frac{14.4r}{l\alpha}$ 是预先确定了了的仪表常数。

这样，从原理上看用这种仪器可以进行绝对值测定，但实际上误差很大。其最大的原因是边缘效应（edge effect）。这是由于筒内的光闸的影响使得暴露在日射下的薄片上的日射强度不均匀，在边缘部分减弱了的缘故。再者，日射的吸收是在薄片表面上的极薄一层中进行的，而电流是流过整个薄片来加热的。由于加热情况是这样的不同，测定时就会产生误差，这样测出来的日射量偏小了。要消除这些误差或者要找到一种修正方法都是很困难的，所以，这种仪器不能当作常用的绝对测定仪器来使用。现在，世界各地都用过这种仪器，公开发表了测定值，为了能够把这些值互相比较，就有必要把各地的测量仪器与世界公认的标准仪器进行比较观测，以确定它们的仪表常数。埃斯川姆日射计的标准仪器的仪表常数 $C$ 是在精密测量情况下确定的，这台标准仪器现在保存在斯德哥尔摩。

(2) 银盘日射计 (Silver-disk Pyrheliometer) 是美国 Smithsonian Institution 的 C. G. Abbot 于 1908 年设计制造的，其断面图如 1.3 (a) 所示。顾名思义，它采用表面黑化了的银制圆盘作为日射的吸收面。银盘放在圆筒的底部，吸收通过了圆筒内的光闸的日射。将水银温度计的感温部分埋入银盘测温。银盘的一部分被厚金属块包围着，热容量很大，在测定时温度不会变化。圆筒的头部装有光闸，打开光闸吸收日射，通过测定银盘的温度变化的办法来测定日射量。设金属内壁的温度为  $T_0$ ，光闸打开  $t_1$  时间之后银盘温度为  $T_1$ ，则日射量



(a) 断面图 (b) 外观  
A—光闸， B—采光部光闸， C—水银温度计 D—温度计感受部 E—绝热壁

图1.3 银盘日射计的断面图和外观

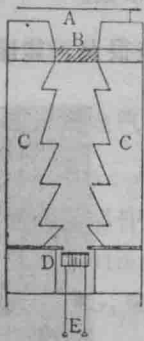
$$I = C_1 (T_1 - T_0) \quad (1.6)$$

此式中的系数 $C_1$ 包含着复杂的内容，不是常数。因此，这种仪器不能当作绝对测量仪器使用，必须与其他标准仪器比较进行标定。Abbot等人把它与早已研制成功的流水日射计进行比较来标定银盘日射计。流水日射计是用吸收日射使水升温的原理来测日射量的，是一种量热器，它能够非常精密地测得绝对数值。但是，由于它的操作复杂，不宜用作日常测量，所以还是采用银盘日射计。银盘日射计必须进行标定，测量时间较长，但是它结实耐用，可以作高精度的测量，这是非常大的优点。

### (3) 其他的直达日射计

上述两种仪器是具有代表性的直达日射计，此外还研制了许多种型式的仪器，下面再简单地介绍几种。

林克—福斯纳日射计 (Linke—Feussner actinometer) 这种日射计的感受元件是表面涂黑的薄片型热电偶 (Moll thermopile)，它装在厚金属圆筒的底部。其断面图如图1.4



A—光闸，B—滤光片，C—采光部光闸，D—受光部件，E—热电偶输出端子



(a) 日本产品



(b) 外国产品

图1.5 分波长自动记录式日射计

图1.4 林克—福斯纳日射计

所示。金属圆筒的热容量是感受元件的10000倍以上，其温度变化可以忽略。热电偶的冷接点接在金属圆筒上。用这种仪器不能作绝对测定，必须标定之后使用，但有它的优点，只要在圆筒前面装上滤光片就可以进行分波长测定，很方便。最近在防止金属圆筒温度变化方面下了些功夫，提高了仪器的稳定性和灵敏度。图1.5所示的是分波长自动记录式林克—福斯纳直达日射计。

艾普里直达日射计 (Eppley normal incidence pyr heliometer) 是上述这种仪器的改良。它在整体构造上与上述仪器相同，只是感受元件分为两部分，一部分暴露在日射之下，另一部分遮起来。它们分别接到热电偶的接点上，接线方式要使产生的电动势方向相反。这样一来，由遮蔽部分产生的电动势抵消了由于仪表温度变化而产生的误差，提高了测量精度。

雅尼谢夫斯基日射计 (Savinov Yanishevsky thermoelectric actinometer) 是苏联采



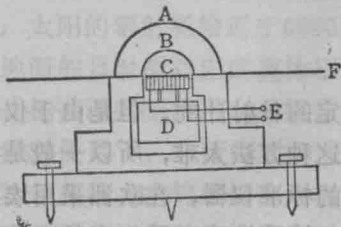
用的仪器，它与银盘日射计的构造相同，只是改用热电偶来测量银盘的温度。它也同样不能进行绝对测量，必须用其他标准仪器对它进行标定。

这些仪器都必须进行标定，这是不方便的，但另一方面也有它们的优点，如果把它们装在赤道仪上，用时钟机构来带动它们，就可以自动跟踪太阳进行连续测量。

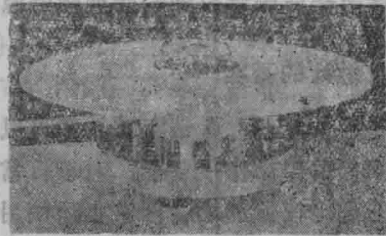
以上所讲的是几种常用的测量仪器，除此之外还有几种就不在这里讲了。我国多采用银盘日射计，国内的标准埃斯川姆日射计和标准银盘日射计保存在国家气象厅。另外，最近为了监视大气污染，研制了属于林克——福斯纳型的日射计，已经开始用它在岩手县棱里进行连续测量。

### (b) 全天空日射计

(1) 莫尔——哥尔钦斯基日射计 (Moll-Gorczyński Pyranometer) 它是欧洲广泛采用的仪器，感受元件是所谓莫尔型热电偶。莫尔型热电偶是康铜——锰铜热电偶，做成  $10 \times 1 \times 0.005 \text{mm}$  的薄片。共有14个热接点，感受元件的总面积为  $10 \times 14 \text{mm}^2$ 。薄片上涂有黑色涂料，反射率很小，表面很符合余弦定律。冷接点接到很大的金属外壳上。感受元件用两层玻璃钟罩罩住。在与感受元件同一平面上装有一块外径为300mm的白色环形板，以防止日射使金属外壳加温。图1.6是这种仪器的断面图和外观。



(a) 断面图



(b) 外观

A、B—玻璃钟罩，C—受光面，D—吸热器，E—热电偶输出端子，F—遮光圆板

图1.6 莫尔——哥尔钦斯基全天空日射计

(2) 雅尼谢夫斯基日射计 (Yanishevsky pyranometer) 是苏联采用的测量仪器。

它与前述仪器不同的是，它的受光面是黑白相间布置的。黑受光面接到锰铜——康铜热电偶的热接点上，白受光面接在冷接点上。它的感受元件的灵敏度与哥尔钦斯基日射计大致一样，约为  $7 \sim 10 \text{mV} \cdot \text{cal}^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{min}$ 。

(3) 艾普里全天空日射计 (Eppley pyranometer) 这种仪器是美国研制的，其外观如图1.7所示。它的感受元件是两个银制的同心圆环，外面的圆环涂上白色涂料（氧化镁），里面的圆环涂上黑色涂料（帕松斯光学黑



图1-7 艾普里全天空日射计