



新世纪高等学校教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

天文学专业课系列教材

# 射电天文工具

K.Rohlfs T.L.Wilson 著  
姜碧沅 译



北京师范大学出版集团  
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP  
北京师范大学出版社

SHEDIAN  
TIANWEN  
GONGJU

新世纪高等学校教材

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

天文学专业系列教材

# 射电天文工具

SHE DIAN TIAN WEN GONG JU

K.Rohlfs T.L.Wilson 著

姜碧沅 译



北京师范大学出版集团  
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP  
北京师范大学出版社

---

图书在版编目(CIP)数据

射电天文工具 / (德) 罗尔夫斯(Rohlf, k.), (美) 威尔孙(Wilson, T.) 著; 姜碧涛译. —北京: 北京师范大学出版社, 2008. 11

ISBN 978-7-303-09644-2

I. 射… II. ①罗… ②威… ③姜… III. 射电天文 - 高等学校 - 教材 IV. P16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 162249 号

---

---

出版发行: 北京师范大学出版社 [www. bnup. com. cn](http://www.bnup.com.cn)

北京新街口外大街 19 号

邮政编码: 100875

印 刷: 北京新丰印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 170 mm × 230 mm

印 张: 27

字 数: 446 千字

印 数: 1 ~ 1 000 册

版 次: 2008 年 11 月第 1 版

印 次: 2008 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

---

责任编辑: 梁国志

装帧设计: 高 霞

责任校对: 李 菡

责任印制: 李 丽

**版权所有 侵权必究**

反盗版、侵权举报电话: 010 - 58800697

北京读者服务部电话: 010 - 58808104

外埠邮购电话: 010 - 58808083

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 010 - 58800825

# 译者序

很高兴《射电天文工具》的译本终于问世了。翻译本书的动机始于2002年秋天，那时，我开始在北京师范大学天文系给大四的学生讲授“射电天文学”课程，发现没有一本合适的教材，原来使用的讲义只包括了非常基础的射电天文仪器知识。当时比较好的关于射电天文的书有《射电望远镜》(克里斯琴森和霍格玻姆著，陈建生译，科学出版社1977年出版)和《射电天体物理学》(帕考尔楚克著，王绶琯、郭成光译，科学出版社1973年出版)，它们分别就射电仪器和射电天文进行了系统而深入的阐述，译文准确而流畅。然而，两本书对于本科生来讲难度都比较大，而且，它们是20世纪70年代出版的专著，不能反映此后这些年来射电天文日新月异的发展。于是，我开始搜寻比较适合作为教材的射电天文方面的书，要求内容尽量地包括最新的射电天文进展，并且包含射电仪器和射电天文两个方面，使得学生能够比较全面地了解射电天文学。当然，还需要写得比较好，可读性比较强。我的目光盯在外国的为数不多的关于射电天文的专著上，最后锁定了当时的《射电天文工具》第3版，它具备了我需要的几个条件，问题是书太厚(32开本，400多页)，需要很多时间才能翻译过来。很凑巧的是，2003年的春天，那场令大家惶恐的SARS给我提供了这个机会。学校停课，普通的会议也都禁止了，在几乎所有的社交活动都停止的2003年5月至6月，外加7月的半个月，我集中精力把这本书的本体都翻译出来了。应该说，这个翻译的进度比我预想的快，不过，那个时候确实是名副其实地每天工作8个小时。因此，自2003年的秋季开始，我就使用这个中文版作为学生的教材。在教学的过程中，发现翻译中的一些错误，有的时候只是笔误，有的

时候却是理解的错误，还有的时候是原版书就有的错误，其中以关于物理基础方面的错误比较多(如电磁波的传播、同步辐射，尤其是涉及量纲时)。于是，我边用边改，也开始理解了以前读书时经常看到的作者序里面的一句话，“由于能力和时间有限，错误在所难免”。基于此，我也庆幸翻译结束后没有急于出版，一直到2005年底才申报教育部的“十一五”规划教材，2006年夏天获得批准，由北京师范大学出版社出版。不过，这时候，此书的第4版已经出版，调整了结构，加上了新的进展，改正了以前的一些错误，我也将自己发现的错误与作者进行了沟通。为了跟上这个进展，也因为第4版的主要内容与第3版一致，我决定出版第4版的译本。不过，这个改版的工作比我想象的要难。2007年秋季上课之外的时间几乎都搭进去了，而且，重读以前的版本总是发现还有不对的或者不好的地方，一方面高兴自己的进步，另一方面又担心还有未被发现的错误(尤其是有关接收机的部分)，只能请读者批评性地阅读。此前未出版的第3版的译本亦有流传，直接从我这里拿走的就不在少数，我还是希望大家看看这个最新的版本。一则这是第4版，二则在文字优化和改正错误方面这个版本要好多了，三则出版社的正规排版也漂亮多了。

想要感谢的人很多。首先是原书的作者，很早就将第4版的电子版和图提供给我了，每次通信都给予细致的回答；其次是北京师范大学出版社，能够接受这么一本不会带来太多收益的纯学术性的书，尤其是编辑梁志国先生和审稿人胡镜寰先生(他曾是我的“原子物理”课的授课教师)；还要感谢陈黎、高健、杨明、姜晨在整个过程中给予的帮助。此外，书的出版得到了教育部“新世纪优秀人才支持计划”的支持。当然，我不能说感谢那段“非典”时期，不过，我很怀念那种整天坐在办公室安安静静地工作的感觉。

# 中文版序

The authors wish to thank Prof. Biwei Jiang for her translation of this text into Chinese. This is a task that involved a great deal of time. In spite of this, Prof. Jiang carried out this large amount of work without hesitation and the result is to be found in the following pages. In addition to the translation, Prof. Jiang also checked the entire text for inconsistencies and sent a list of these for comment. In nearly all cases, Prof. Jiang was correct. We thank her for this careful and complete reading of the text. We have corrected our errors and these will be incorporated in future editions. Once again, we are happy that this translation allows a larger public to have access to this book. We are gratified that Prof. Jiang has devoted her time to this task.

Tom Wilson

作者感谢姜碧沔教授将这本书翻译成中文。尽管这是一项非常耗时的任务，她还是毫不犹豫地完成了，成果都在后面的书页中。除了翻译以外，姜教授还对整个文本的一致性进行了检查，发给了我们一个错误列表，她几乎都是正确的。我们非常感谢她对本书仔细而全面的阅读，对她指出的错误进行了改正，在将来的版本中会编入她的这些改正。当然，我们非常高兴这个中文版将使得本书拥有更多的读者。再一次对姜教授花时间进行这项工作表示谢意！

Tom Wilson

## 第4版前言

科学和技术的进步再一次成为我们更新第4, 7, 8章和第14章的原因。其他的部分只是进行了一些小的改动。

在第4章“信号处理和接收机”中, 我们缩短了脉泽和参量放大器前端的讨论, 因为它们现在在射电天文中已不再是常用的微波接收机了。相反, 我们扩大了对于制冷晶体管和超导前端的讨论, 还增加了有关相干多射束系统的一个小节。

第7章现在叫“观测方法”, 主要讨论单天线观测。而第8章是关于干涉仪和孔径综合的。孔径综合现在是观测天文中最重要成像技术。它的使用一直从射电频率范围扩展到其他波段, 并提供了适用于各波段的获取极高分辨率和质量图像的唯一方法。因此, 我们扩展了对于孔径综合基础的讨论, 希望这个讨论有所进步。这章里面收集了硬件和软件设备的一些资料。

第14章“星际空间的分子”进行了很大的改变和更新。新增的天文卫星——从IRAS, ISO和中红外卫星MSX到亚毫米水分子卫星SWAS——带来了星际介质中新分子谱线的大量数据。最近, 甚长基线卫星(VLBS)VSOP/HALCA给出了高分辨率的数据。谱线项目ODIN也提供了地面上不能观测到的亚毫米波的谱线跃迁数据。这些项目极大地改变了谱线天文学, 一些新的结果也被收录了进来。

这本书的第3版出版不久, 由T. L. Wilson和S. Huttemeister编写的《问题和解答》作为本书的补充书也出版了。对于观测射电天文学的基本理解能够通过练习掌握, 这就是这个题解的作用。我们希望它能够对读者有所帮助。

Kristen Rohlfs

T. L. Wilson

# 旧版前言

这本书描述了射电天文学家完成他们的工作所需要的工具。一方面，这些工具包括了作为分析天体射电信号所需要的射电望远镜和不同种类的接收机；另一方面，包括了连续谱和谱线辐射的物理机制。这本书产生于在 Bochum 的 Ruhr-University 大学重复讲述的研究生的一年教程。我们希望，这本书也会对使用射电天文数据和结果的科学家有用，能够帮助他们理解射电方法的优势和一些缺点。最后，这本书偶尔也可以为一些在射电天文领域工作的科学家节省一些搜寻相关工具所需要的时间。

虽然这门课程的授课对象已经有了相当的物理知识背景，在讨论仪器方面的问题时，他们一般还会觉得困难。显然，同一个主题在物理书和工程书中的讲述是有所不同的。一个例子就是，对于四终端网络使用方式的描述。我们尽量使用对天文学家和一般的物理学家都比较熟悉的概念来解释每件事情。

每章都给出了一系列的参考文献，参考文献的列表包括两部分：一般文献，包括覆盖一般方面的文章和书，它们一般对所涉及的课题进行了深入的讨论；特殊文献，只针对特别的话题。但是，这些文献不可能是相关领域的很全面甚至近似全面的综述。引用的文章都是我们目前能比较方便找到的文章。

从这本书的第 2 版开始，来自德国波恩射电天文所的 T. L. Wilson 开始加入，保证了对于最新的射电天文进展的覆盖。对于文章的许多修改和增加都归功于他，尤其是文章的可读性很是受益于他是一个母语为英语的作者。

与第1版比较,另一个根本的变化是,这本书是用 LATEX 编译的,这不仅仅是一个技术上的变化,因为文章里面很大的改变和排序,现在都变得相当容易了.第1版的文字被扫描下来,虽然普通的文本能够被自动地成功识别,公式却必须被手动转化成 TEX 的语法.所有这些对于文章的改变都收录到这个重建的电子版本中.

不过,第1版里面的基本概念没有变化.这本书试图给出总体的射电天文的方法和工具.结果只是作为一个例子,或者证明方法的可行性.它试图对于射电天文的应用有所帮助,而不是所有通过它获得的结果的描述.

写教科书时遇到的另外一个问题是,标记符号和单位的一致性.可以引入一套对整个研究领域都自洽的系统.但是,将文章和文献里面的结果比较时,往往就会变得很困难.而过于尊重不同领域的习惯,又会带来命名方面的矛盾.因此我们在这两极之间寻找一个合适的方法.由于天文领域比较固执地遵循他们传统的混合单位制,我们从第1版中使用的 SI 单位制走出来了,切换到 CGS 单位制,同时将其他一些单位进行了补充与混合.就像在一些研究文献中所遇到的情况一样,只要有可能,我们列出的方程都会给定数值常数,作为物理参量和单位的关系,只有当这些表述变得过于繁杂的时候我们才扔掉单位,而在相应的文章中进行解释.这在第14章(星际空间的分子)中尤其如此.科学的论证不会因此受到影响,它使得我们的表述与 L. Spitzer 著名的《星际介质物理学》中的表述一致.

这本书的第1章至第8章是技术部分,第9章到第14章是物理背景.我们把关于接收机的第7章,移到了第4章,并重新命名为“信号处理和接收机”.原因是,我们觉得,信号处理的概念应该首先讨论,以便在后面的章节中自由地使用.接收机前端的讨论,进行了极大的改版和现代化.关于接收机灵敏度的部分现在包括了对于一个相干系统的最小可能噪声的讨论.在过去的几年里,非相干探测器,一般是热辐射计,在远红外波段得到使用.因此,我们对非相干探测计和它们的噪声极限进行了一个简短的讨论.对第1版中的参量放大器的较长讨论,由现代的半导体设备取而代之,如 HEMT 放大器和 SIS 混频器.

第5章“天线原理基础”和第6章“连续孔径天线”,基本没变.虽然有些方面的措辞改变了并进步了,对于实际的连续孔径天线的讨论,我们选择了摩登的系统.

这本书的后半部分,第9章至第14章涉及我们认为对于射电天文学家来讲最重要的概念性工具,将星际空间的信息与物理过程联系起来.我们意识

到，一本 450 页的书不可能涵盖所有的细节，所以我们希望每一位读者都能帮助我们，并告知我们你所感兴趣的课题只是粗略地被提及甚至根本没有被提及。我们期望，对于刚刚进入这个领域的人来说，整体的布局得到了较好的平衡，即使跳过了很多有趣的和重要的课题。第 9 章和第 10 章讨论连续谱的发射机制，并给出了一些例子，对于同步辐射和相应源的讨论比第 1 版有所增加。

有几个审稿人都提出，缺少了对于脉冲星物理的讨论。因此，我们在第 10 章里面增加了一节。再一次重申，像这本书的其他部分一样，它不是对于整个脉冲星射电天文的综述，而只是对于基本的和没有争议的概念和结果的描述。

对于谱线研究的介绍，是在第 11 章至第 14 章，第 12 章是关于超精细和精细结构谱线的研究，第 13 章是关于复合谱线的研究，第 14 章描述分子谱线。第 14 章已经超过了 60 页，因为我们试图收集在这个领域所需要的物理理论的许多方面。它们在天体物理的其他领域都是未知的。

虽然我们尽量删去不必要的细节，这本书还是比第 1 版增加了  $1/3$  的厚度。显然，超出了两个学期的课程所能涵盖的内容。

这本书的参考文献与第 1 版基本没有变化，除了最新的文献被补充以外，我们没有试图给出一个完备的综述，只选择了那些最新的和最全面的文献。

有几个同事告诉我们书中的一些错误，包括打印的错误和一些错误的论证。尤其是来自瑞典 Onsala 的 Anders Winnberg。我们谢谢所有这些人，希望新的版本有所提高。许多人帮助我们完成了这本书，我们尤其希望感谢 Bochum 的 H. Kampmann，他完成了大部分的 LATEX 排版工作。

# 目 录

## 第 1 章 射电天文学基础 /1

- 1.1 射电天文在天体物理中的地位 ..... 1
- 1.2 射电窗口 ..... 3
- 1.3 一些基本定义 ..... 4
- 1.4 辐射转移 ..... 6
- 1.5 黑体辐射和亮温度 ..... 9
- 1.6 Nyquist 原理和噪声温度 ..... 13

## 第 2 章 电磁波传播基础 /14

- 2.1 麦克斯韦方程组 ..... 14
- 2.2 能量守恒和坡印亭矢量 ..... 15
- 2.3 复数场矢量 ..... 16
- 2.4 波动方程 ..... 18
- 2.5 绝缘介质中的平面波 ..... 19
- 2.6 波包和群速度 ..... 22
- 2.7 耗散介质中的平面波 ..... 24
- 2.8 稀薄等离子体的频散量 ..... 25

## 第 3 章 波的偏振 /29

- 3.1 矢量波 ..... 29
- 3.2 庞加莱球和斯托克斯参量 ..... 33
- 3.3 准单色平面波 ..... 35

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 3.4 准单色波的斯托克斯参数 ..... | 37 |
| 3.5 法拉第旋转 .....       | 38 |

## 第4章 信号处理和接收机 /42

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| 4.1 信号处理和平稳随机过程 .....                             | 42 |
| 4.1.1 概率密度, 期望值和遍历性 .....                         | 42 |
| 4.1.2 自相关和功率谱 .....                               | 43 |
| 4.1.3 线性系统 .....                                  | 45 |
| 4.1.4 高斯随机变量 .....                                | 47 |
| 4.1.5 平方律检波器 .....                                | 48 |
| 4.2 接收机的极限灵敏度 .....                               | 50 |
| 4.2.1 相干系统的可能最小噪声 .....                           | 52 |
| 4.2.2 基本噪声极限 .....                                | 53 |
| 4.2.3 接收机的稳定性 .....                               | 56 |
| 4.2.4 接收机的定标 .....                                | 60 |
| 4.3 非相干辐射计 .....                                  | 61 |
| 4.3.1 热辐射计 .....                                  | 61 |
| 4.3.2 热辐射计的噪声等效功率 .....                           | 63 |
| 4.3.3 当前使用的热辐射计系统 .....                           | 64 |
| 4.4 相干接收机 .....                                   | 65 |
| 4.4.1 基本组成 .....                                  | 65 |
| 4.4.2 半导体结 .....                                  | 69 |
| 4.5 低噪声前端和 IF 放大器 .....                           | 72 |
| 4.5.1 非制冷混频器 .....                                | 73 |
| 4.5.2 脉泽放大器 .....                                 | 74 |
| 4.5.3 参量放大器 .....                                 | 75 |
| 4.5.4 高电子迁移晶体管 (HEMT) .....                       | 75 |
| 4.5.5 超导混频器 .....                                 | 78 |
| 4.5.6 热电子辐射计 (Hot Electron Bolometers, HEB) ..... | 80 |
| 4.6 目前使用的前端小结 .....                               | 81 |
| 4.6.1 单像素接收机系统 .....                              | 81 |
| 4.6.2 多射束系统 .....                                 | 81 |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 4.7 后端:相关接收机,偏振计和频谱仪 ..... | 82 |
| 4.7.1 相关接收机和偏振计 .....      | 82 |
| 4.7.2 频谱仪 .....            | 86 |
| 4.7.3 脉冲星观测的后端 .....       | 98 |

## 第5章 天线原理基础 /101

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 5.1 电磁势 .....       | 101 |
| 5.2 波动方程的格林函数 ..... | 103 |
| 5.3 赫兹偶极子 .....     | 105 |
| 5.4 互易定理 .....      | 109 |
| 5.5 描述天线的参数 .....   | 111 |
| 5.5.1 功率方向图 .....   | 112 |
| 5.5.2 主瓣的定义 .....   | 113 |
| 5.5.3 有效面积 .....    | 115 |
| 5.5.4 天线温度的概念 ..... | 117 |

## 第6章 连续孔径天线 /118

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 6.1 局域源的辐射场 .....         | 118 |
| 6.2 孔径照明和天线方向图 .....      | 120 |
| 6.3 圆形孔径 .....            | 123 |
| 6.4 主馈源 .....             | 126 |
| 6.4.1 主焦点馈源:偶极子和反射体 ..... | 127 |
| 6.4.2 主焦点喇叭馈源 .....       | 127 |
| 6.4.3 多反射体系统 .....        | 129 |
| 6.5 天线偏差理论 .....          | 131 |
| 6.6 抛物面天线的实际设计 .....      | 134 |
| 6.6.1 一般考虑 .....          | 134 |
| 6.6.2 具体的望远镜 .....        | 136 |

## 第7章 观测方法 /142

|                 |     |
|-----------------|-----|
| 7.1 地球的大气 ..... | 142 |
| 7.2 定标的程序 ..... | 146 |

|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 7.2.1 | 一般天线定标 .....            | 146 |
| 7.2.2 | 致密源 .....               | 147 |
| 7.2.3 | 展源 .....                | 149 |
| 7.2.4 | 厘米波望远镜的定标 .....         | 149 |
| 7.2.5 | 毫米和亚毫米波外差系统望远镜的定标 ..... | 150 |
| 7.2.6 | 热辐射计定标 .....            | 152 |
| 7.3   | 连续谱观测的策略 .....          | 153 |
| 7.3.1 | 点源 .....                | 153 |
| 7.3.2 | 展源的连续谱成图 .....          | 154 |
| 7.4   | 谱线观测的额外要求 .....         | 156 |
| 7.4.1 | 视向速度设置 .....            | 156 |
| 7.4.2 | 频率基线 .....              | 157 |
| 7.4.3 | 杂散辐射的影响 .....           | 159 |
| 7.4.4 | 谱线观测技巧 .....            | 160 |
| 7.5   | 混淆问题 .....              | 162 |

## 第8章 干涉仪和孔径综合 /165

|       |                                       |     |
|-------|---------------------------------------|-----|
| 8.1   | 角分辨率的追求 .....                         | 165 |
| 8.2   | 相干函数 .....                            | 167 |
| 8.3   | 展源的相干函数: van Cittert-Zernike 定理 ..... | 168 |
| 8.4   | 二元干涉仪 .....                           | 171 |
| 8.5   | 孔径综合 .....                            | 174 |
| 8.5.1 | 一个合适的坐标系统 .....                       | 174 |
| 8.5.2 | 孔径综合的发展历史 .....                       | 178 |
| 8.5.3 | 干涉仪观测 .....                           | 180 |
| 8.5.4 | 改进可见度函数 .....                         | 181 |
| 8.5.5 | $uv$ 数据的格栅化 .....                     | 182 |
| 8.5.6 | 首要解, 脏图和脏射束 .....                     | 183 |
| 8.6   | 先进的软件方法 .....                         | 186 |
| 8.6.1 | 自定标 .....                             | 187 |
| 8.6.2 | 洁化(CLEAN)脏图 .....                     | 188 |
| 8.6.3 | 最大熵去卷积方法(MEM) .....                   | 188 |
| 8.7   | 干涉仪的灵敏度 .....                         | 189 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 8.8 甚长基线干涉仪(VLBI) ..... | 192 |
| 8.9 天体测量和测地学中的干涉仪 ..... | 193 |

## 第9章 连续辐射的发射机制 /196

|                                               |     |
|-----------------------------------------------|-----|
| 9.1 射电源的本质 .....                              | 196 |
| 9.1.1 天体的黑体辐射 .....                           | 198 |
| 9.2 一个被加速电子的辐射 .....                          | 200 |
| 9.3 单个碰撞的韧致辐射的频率分布 .....                      | 201 |
| 9.4 电离气体云的辐射 .....                            | 204 |
| 9.5 非热辐射机制 .....                              | 207 |
| 9.6 回顾洛伦兹变换 .....                             | 208 |
| 9.7 单个电子的同步辐射 .....                           | 210 |
| 9.7.1 辐射的总功率 .....                            | 211 |
| 9.7.2 辐射的角分布 .....                            | 212 |
| 9.7.3 发射的频率分布 .....                           | 213 |
| 9.8 同步辐射的光谱和偏振 .....                          | 214 |
| 9.9 电子集体的同步辐射的能谱分布 .....                      | 217 |
| 9.9.1 均匀磁场 .....                              | 220 |
| 9.9.2 随机磁场 .....                              | 221 |
| 9.10 同步辐射源的能量要求 .....                         | 222 |
| 9.11 非热源的低能截断 .....                           | 224 |
| 9.12 逆康普顿散射 .....                             | 225 |
| 9.12.1 苏尼阿耶夫-泽尔多维奇(Sunyaev-Zeldovich)效应 ..... | 225 |
| 9.12.2 高亮度源的能量损失 .....                        | 226 |

## 第10章 一些热和非热射电源的例子 /227

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 10.1 宁静太阳 .....         | 227 |
| 10.2 H II 区的射电辐射 .....  | 230 |
| 10.2.1 热辐射 .....        | 230 |
| 10.2.2 电离星风的射电辐射 .....  | 232 |
| 10.3 超新星和超新星遗迹 .....    | 233 |
| 10.4 超新星遗迹的流体力学演化 ..... | 235 |
| 10.4.1 第一阶段: 自由膨胀 ..... | 236 |

|        |                        |     |
|--------|------------------------|-----|
| 10.4.2 | 第二阶段: 绝热膨胀 .....       | 237 |
| 10.5   | 较老的超新星遗迹的射电演化 .....    | 241 |
| 10.6   | 脉冲星 .....              | 243 |
| 10.6.1 | 脉冲星的探测和源的本质 .....      | 243 |
| 10.6.2 | 距离估算和银河系的分布 .....      | 244 |
| 10.6.3 | 强度谱和脉冲形状 .....         | 246 |
| 10.6.4 | 脉冲星定时 .....            | 249 |
| 10.6.5 | 旋转变慢和磁矩 .....          | 251 |
| 10.6.6 | 双星脉冲星和毫秒脉冲星 .....      | 254 |
| 10.6.7 | 射电发射机制 .....           | 256 |
| 10.7   | 河外源 .....              | 257 |
| 10.7.1 | 射电星系: Cygnus A .....   | 258 |
| 10.7.2 | 苏尼阿耶夫-泽尔多维奇效应的例子 ..... | 259 |
| 10.7.3 | 相对论效应和时变 .....         | 259 |

## 第 11 章 谱线基础 /263

|      |                       |     |
|------|-----------------------|-----|
| 11.1 | 爱因斯坦系数 .....          | 263 |
| 11.2 | 含有爱因斯坦系数的辐射转移方程 ..... | 264 |
| 11.3 | 偶极跃迁概率 .....          | 267 |
| 11.4 | 速率方程的简单解 .....        | 268 |

## 第 12 章 中性氢原子的谱线辐射 /271

|        |                       |     |
|--------|-----------------------|-----|
| 12.1   | 中性氢原子的 21 cm 谱线 ..... | 272 |
| 12.2   | 塞曼效应 .....            | 274 |
| 12.3   | 自旋温度 .....            | 275 |
| 12.4   | 发射线和吸收线 .....         | 277 |
| 12.4.1 | 射束填充因子和源的几何的影响 .....  | 278 |
| 12.5   | 弥漫星际气体的物理状态 .....     | 280 |
| 12.6   | 较差速度场和谱线形状 .....      | 282 |
| 12.7   | 星际气体中的银河系速度场 .....    | 285 |
| 12.8   | 河外星系中的原子谱线 .....      | 288 |
| 12.8.1 | 位力质量 .....            | 290 |
| 12.8.2 | Tully-Fisher 关系 ..... | 292 |

**第 13 章 复合谱线 /294**

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 13.1 发射星云 .....            | 294 |
| 13.2 气体星云的光致电离结构 .....     | 294 |
| 13.2.1 纯粹的氢云 .....         | 294 |
| 13.2.2 氢星云和氦星云 .....       | 297 |
| 13.2.3 真实的 H II 区 .....    | 299 |
| 13.3 里德伯原子 .....           | 299 |
| 13.4 LTE 条件下的谱线强度 .....    | 302 |
| 13.5 LTE 条件不适用时的谱线强度 ..... | 304 |
| 13.5.1 碰撞致宽 .....          | 309 |
| 13.6 对射电复合谱线的观测的解释 .....   | 311 |
| 13.6.1 反常的例子 .....         | 313 |
| 13.7 其他元素的复合谱线 .....       | 314 |

**第 14 章 星际空间的分子 /315**

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 14.1 引言 .....                | 315 |
| 14.1.1 历史 .....              | 316 |
| 14.2 分子结构的基本概念 .....         | 318 |
| 14.3 双原子分子的转动光谱 .....        | 320 |
| 14.4 对称和不对称陀螺分子 .....        | 323 |
| 14.5 分子结构的更多细节 .....         | 324 |
| 14.5.1 自旋统计 .....            | 324 |
| 14.5.2 电子角动量 .....           | 326 |
| 14.5.3 超精细分裂 .....           | 326 |
| 14.6 振动跃迁 .....              | 328 |
| 14.7 应用于星际分子 .....           | 329 |
| 14.8 能级布居与谱线强度的关系 .....      | 331 |
| 14.8.1 LTE 条件下的 CO 柱密度 ..... | 334 |
| 14.8.2 比较复杂的分子的柱密度的确定 .....  | 337 |
| 14.8.3 受阻运动的分子 .....         | 341 |
| 14.9 分子的激发 .....             | 341 |
| 14.9.1 二能级系统的激发 .....        | 341 |