

6

高等院校本科化学系列教材

# Chemistry

# 有机波谱分析

(第四版)

孟令芝 龚淑玲 何永炳 刘英 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

6

高等院校本科化学系列教材

# Chemistry

# 有机波谱分析

(第四版)

孟令芝 龚淑玲 何永炳 刘英 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

有机波谱分析/孟令芝等编著. —4版. —武汉:武汉大学出版社,  
2016.7

高等院校本科化学系列教材

ISBN 978-7-307-17874-8

I. 有… II. 孟… III. 有机分析—波谱分析—高等学校—教材  
IV. O657.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 110481 号

责任编辑:谢文涛

责任校对:李孟潇

版式设计:马 佳

---

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.whu.edu.cn)

印刷:武汉科源印刷设计有限公司

开本:720×1000 1/16 印张:28.25 字数:568千字 插页:1

版次:1997年3月第1版 2003年9月第2版

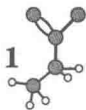
2009年9月第3版 2016年7月第4版

2016年7月第4版第1次印刷

ISBN 978-7-307-17874-8 定价:45.00元

---

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。



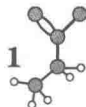
## 内 容 提 要

本书第三版自 2009 年出版发行以来,为多所高等院校和科研单位用作本科生、研究生的教材或教学参考书。

本书的第四版共分八章:电磁辐射与谱学基础、有机质谱、核磁共振氢谱、核磁共振碳谱、红外与拉曼光谱、紫外与荧光光谱、谱图综合解析、X 射线光电子能谱。书中分别论述了电磁辐射与物质量子化能态间的相互作用、各谱学基本原理及实验方法,详细阐述了有机化合物结构与各谱特征信息之间的关系及各谱在化合物结构鉴定中的应用。

书中收录了大量化合物的谱图和数表,以典型实例阐明谱图解析及化合物的结构推导。突出理论联系实际,提高独立或综合运用谱学技术解决实际问题的能力。该书还对 ESI-MS, MALDI-TOF-MS, ASAP-MS, DEPT,  $^1\text{H}$ - $^1\text{H}$  COSY, DQF COSY,  $^1\text{H}$ - $^{13}\text{C}$  COSY 的谱图特征、结构信息等,以实例进行由浅入深地讨论;对  $^{19}\text{F}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{29}\text{Si}$  NMR 谱的特征及应用也进行了介绍。书中实例涉及有机、高分子、材料、分子识别及组装、生物大分子、光化学传感等。各章后附有习题。

本书可作为高等院校化学、医学、生命科学、石油化工等专业高年级本科生、研究生的教材和教学参考书,也可供这些研究领域的相关研究人员参考。



## 第四版前言

《有机波谱分析》第三版自 2009 年出版发行以来,已印刷 8 次。为多所高等院校和科研单位用作本科生、研究生的教材或教学参考书。

本书的第四版是在多年教学实践及科研积累的基础上,广泛征求意见及参考文献后精心编写的。本书保留了第三版的结构框架,重新编写了第八章 X 射线光电子能谱,其他章节适当修改或增补。书中实例涉及有机、高分子、材料、分子识别及组装、生物大分子、光化学传感等。各章后附有习题。本书可作为高等院校化学、生命科学、医学、石油化工等专业高年级本科生、研究生的教材和教学参考书,也可供这些研究领域的相关研究人员参考。

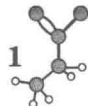
本书在编写过程中,参考了一些相关的专著、教材、文章、谱图集和信息网,受益匪浅。主要参考来源已列于各章节后及书后。武汉大学出版社谢文涛为本书的出版做了大量细致的编辑工作,在此表示致谢。

本书的再版得到“武汉大学实验技术项目”的资助。

由于作者水平有限,书中如有错误和不妥之处,恳请读者和同行指正。

编者

2016 年 5 月



## 第三版前言

《有机波谱分析》第二版自 2003 年出版发行以来,已印刷 6 次。为多所高等院校和科研单位用作本科生、研究生的教材或教学参考书。

波谱分析的 MS, NMR, IR, UV, FS 谱仪的普及与发展,与计算机技术、各种分离技术的结合,使几乎所有合成的和天然的化合物及材料的结构鉴定成为可能;从分子水平上认知化合物或材料结构与性能、非共价键相互作用时结构与性能的关系成为可能。但波谱技术的合理选择及正确运用、谱学信息的充分运用及谱图的正确解释、尤其是各谱学信息的综合分析及结构的正确推导,并非简单地、公式化地可以完成;而是要在充分掌握各谱学基本原理及波谱信息的基础上,由浅入深,循序渐进,不断学习与提高。

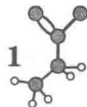
本书的第三版是在多年教学实践及科研积累的基础上,广泛征求意见及文献检索后精心编写的。保留了第二版的结构框架,对目前已使用较多的波谱技术 ESI-MS, MALDI-TOF-MS, DEPT,  $^1\text{H}$ - $^1\text{H}$  COSY, DQF COSY,  $^1\text{H}$ - $^{13}\text{C}$  COSY 的谱图特征、结构信息、谱图解析等,以实例进行由浅入深地讨论。书中除对  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$  NMR 谱详细描述外,对  $^{19}\text{F}$ ,  $^{31}\text{P}$ ,  $^{29}\text{Si}$  NMR 谱的特征及应用也进行了介绍。书中实例涉及有机、高分子、材料、分子识别及组装、生物大分子、光化学传感等。各章后附有习题。本书可作为高等院校化学、生命科学、医学、石油化工等专业高年级本科生、研究生的教材和教学参考书,也可供这些研究领域的相关研究人员参考。

本书在编写过程中,参考了一些相关的专著、教材、谱图集和信息网,受益匪浅。主要参考来源已列于各章节后及书后。武汉大学出版社谢文涛为本书的出版做了大量细致的编辑工作,在此表示致谢。

由于作者水平有限,书中如有错误和不妥之处,恳请读者和同行指正。

编者

2009 年 6 月



## 第二版前言

《有机波谱分析》自 1997 年出版发行以来，已印刷 4 次，被多所高等院校和科研单位用作本科生、研究生的教材或参考书。

本书的第二版是在经过五年教学实践的基础上，广泛征求意见、进行文献检索和集体讨论后精心编写的。该书除保留第一版对波谱学理论进行一般描述，详细阐述化合物结构与波谱特征信息之间的关系及各谱在化合物结构鉴定中的应用等特点外，还增加了电磁辐射与谱学基础、X 射线光电子能谱及荧光光谱等。它是武汉大学教材建设十五规划和面向 21 世纪教学内容改革的研究成果。

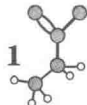
第二版共分八章。包括：电磁辐射与谱学基础、有机质谱、核磁共振氢谱、核磁共振碳谱、红外与拉曼光谱、紫外与荧光光谱、谱图综合解析和 X 射线光电子能谱。该书在论述了电磁辐射与物质量子化能态间的相互作用及各谱学的基本原理的基础上，针对一般化学及相关工作者的需要，突出理论联系实际，提高独立或综合运用谱学技术解决实际问题的能力。该书还对新的实验技术如 ESI-MS, G(L)C-MS, 3DNMR, ATR, TRS, 2DIR 和同步荧光光谱技术等及其应用进展也作了扼要介绍，应用涉及有机化学、高分子、材料、分子识别及分子自组装、生物大分子等。各章后附有习题。本书可作为高等院校化学、生化化学、医药、石油化工等专业高年级本科生及研究生的教材和教学参考书，也可供从事化学、生物化学、医药、石油化工等相关研究人员参考。

本书在编写过程中，参考了一些相关的专著、教材和谱图集，受益匪浅。主要参考资料已列于各章节后和书后。本书还得到了武汉大学教务部、武汉大学化学与分子科学学院教学指导委员会的资助和支持，本院实验中心的胡翎、吴晓军为本书提供了部分谱图，武汉大学出版社谢文涛为本书的出版做了大量细致的编辑工作，在此一并致谢。

由于作者水平有限，书中如有错误和不妥之处，恳请读者和同行指正。

编者

2003 年 6 月



## 第一版前言

有机波谱分析法在有机化学和高分子化学研究及化合物结构鉴定中起着极为重要的作用。随着谱仪的普及与发展,紫外光谱、红外光谱、核磁共振氢谱和碳谱、有机质谱已成为化学工作者最常用的分析工具。因此,掌握这些实验方法并利用谱图提供的结构信息,实为从事有机化学及相关学科工作者所必需。

本书集作者多年讲授《有机化学》及《有机结构分析》课程的经验,结合为本科生编写的《有机结构分析》讲义及为研究生编写的《有机波谱实验》教材,经过认真讨论总结改编而成。

全书分为六章。前五章分别阐述红外及拉曼光谱、紫外光谱、核磁共振氢谱、核磁共振碳谱、有机质谱的基本原理和实验方法,内容侧重于有机化合物的结构与其谱图特征信息之间的关系及波谱法在有机化合物结构鉴定中的应用。第六章为多谱的综合解析,用不同谱图提供的结构信息,互相印证与补充,推导较为复杂的有机化合物的结构。

考虑到一般化学工作者的兴趣在于“识谱”及波谱技术的实际应用,书中仅对波谱学理论进行一般讨论,而通过大量的典型实例,详细阐明谱图的解析及结构的推导,以引导初学者理论联系实际,由谱图推导化合物的结构。对各谱的应用介绍,涉及有机化学、高分子化学、天然产物、生物大分子等学科,有些是作者自己的研究工作。对一些近代的实验方法如:同核、异核 2D J 谱,同核、异核 COSY 谱, SERS, FT-IR, GC-MS 等作了扼要介绍,还介绍了标准谱图的检索方法。书中收录了各种典型化合物的谱图和数表,每章后均附有习题。本书可作为高等学校化学、化工、生化、医药等专业大学生、研究生的教材、教学参考书,也可供从事有机化学、波谱分析及相关学科的工作者参考。

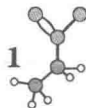
本书在编写过程中得到吴成泰教授、陈远荫教授的鼓励和支持;武汉大学分析测试中心冯子刚教授仔细地审阅了全部文稿,并提出许多修改意见,特向他们表示衷心的感谢。本书在出版过程中得到武汉大学出版社的大力支持,金丽莉为本书的出版做了大量细致的编辑工作,在此致以诚挚的感谢。

由于编者知识浅薄,书中如有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

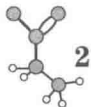
1996年6月



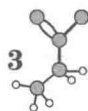


## 目 录

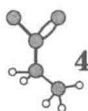
第 1 章 电磁辐射与谱学基础	1
1.1 电磁辐射基础	1
1.2 电磁辐射能与波谱技术	1
1.3 X 射线光谱	3
1.4 电子能谱	4
1.5 分子能级与分子光谱	4
1.6 磁共振谱	6
参考文献	9
第 2 章 有机质谱	11
2.1 质谱基本知识	11
2.1.1 质谱计	11
2.1.2 离子化的方法	12
2.1.3 质量分析器	18
2.1.4 质谱术语及质谱中的离子	24
2.2 分子离子与分子式	26
2.2.1 分子离子峰的认识	26
2.2.2 分子离子峰的相对强度	28
2.2.3 分子式的推导	29
2.3 有机质谱中的裂解反应	38
2.3.1 研究有机质谱裂解反应的实验方法	38
2.3.2 有机质谱裂解反应机理	38
2.3.3 有机化合物的一般裂解规律	40
2.4 各类有机化合物的质谱	45
2.4.1 烃类化合物的质谱	45
2.4.2 醇、酚、醚	49
2.4.3 硫醇、硫醚	52
2.4.4 胺类化合物	54



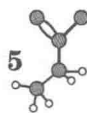
2.4.5 卤代烃 .....	55
2.4.6 羰基化合物 .....	56
2.4.7 双取代芳环的邻位效应 .....	65
2.4.8 质谱图中常见碎片离子及其可能来源 .....	67
2.5 质谱中的非氢重排 .....	68
2.5.1 环化取代重排(cyclization displacement rearrangement) .....	68
2.5.2 消去重排(elimination rearrangement) .....	69
2.6 质谱解析及应用 .....	70
2.6.1 质谱解析一般程序 .....	70
2.6.2 质谱解析实例 .....	71
2.6.3 质谱应用实例 .....	75
参考文献 .....	83
习题 .....	84
第3章 核磁共振氢谱 .....	89
3.1 核磁共振基本原理 .....	89
3.1.1 原子核的磁矩 .....	89
3.1.2 核磁共振 .....	91
3.1.3 弛豫过程 .....	92
3.1.4 核磁共振的谱线宽度 .....	94
3.2 核磁共振仪 .....	94
3.2.1 连续波核磁共振波谱仪(continual wave-NMR) .....	94
3.2.2 脉冲 Fourier 变换核磁共振波谱仪(pulse Fourier transform-NMR) .....	95
3.3 化学位移 .....	96
3.3.1 电子屏蔽效应 .....	96
3.3.2 化学位移 .....	97
3.3.3 核磁共振氢谱图示 .....	98
3.4 影响化学位移的因素 .....	99
3.4.1 诱导效应 .....	99
3.4.2 化学键的各向异性 .....	100
3.4.3 共轭效应 .....	103
3.4.4 Van der Waals 效应 .....	103
3.4.5 浓度、温度、溶剂对 $\delta$ 值的影响 .....	103
3.4.6 各类质子的化学位移及经验计算 .....	104
3.4.7 氘代溶剂的干扰峰 .....	112



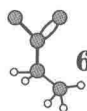
3.5 自旋耦合与裂分 .....	112
3.5.1 自旋-自旋耦合机理 .....	112
3.5.2 ( $n+1$ ) 规律 .....	114
3.5.3 核的等价性 .....	114
3.6 耦合常数与分子结构的关系 .....	117
3.6.1 同碳质子间的耦合( $^2J$ 或 $J_{\text{同}}$ ) .....	117
3.6.2 邻碳质子间的耦合( $^3J$ 或 $J_{\text{邻}}$ ) .....	119
3.6.3 远程耦合 .....	126
3.6.4 其他核对 $^1\text{H}$ 的耦合 .....	126
3.7 常见的自旋系统 .....	129
3.7.1 核磁共振氢谱谱图的分类 .....	129
3.7.2 自旋系统的分类与命名 .....	129
3.7.3 二旋系统 .....	131
3.7.4 三旋系统 .....	133
3.7.5 四旋系统 .....	137
3.8 简化 $^1\text{H}$ NMR 谱的实验方法 .....	140
3.8.1 使用高频(或高场)谱仪 .....	140
3.8.2 重氢交换法 .....	140
3.8.3 溶剂效应 .....	141
3.8.4 位移试剂(shift reagents) .....	141
3.8.5 双照射去耦 .....	142
3.9 核磁共振氢谱解析及应用 .....	145
3.9.1 $^1\text{H}$ NMR 谱解析一般程序 .....	145
3.9.2 $^1\text{H}$ NMR 谱解析实例 .....	147
3.9.3 $^1\text{H}$ NMR 谱图检索 .....	150
3.9.4 $^1\text{H}$ NMR 谱的应用 .....	150
参考文献 .....	155
习题 .....	156
第4章 核磁共振碳谱 .....	162
4.1 $^{13}\text{C}$ NMR 的特点 .....	162
4.2 $^{13}\text{C}$ NMR 的实验方法及去耦技术 .....	164
4.2.1 $^{13}\text{C}$ NMR 的实验方法 .....	164
4.2.2 $^{13}\text{C}$ NMR 的去耦技术 .....	167
4.3 $^{13}\text{C}$ 的化学位移及影响因素 .....	174



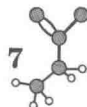
4.3.1	屏蔽原理	174
4.3.2	影响 $\delta_c$ 的因素	177
4.3.3	各类碳核的化学位移范围	181
4.4	$sp^3$ 杂化碳的化学位移及经验计算	182
4.4.1	烷烃	183
4.4.2	取代烷烃	185
4.4.3	环烷烃及其衍生物	187
4.5	$sp^2, sp$ 杂化碳的化学位移及经验计算	189
4.5.1	烯烃及其衍生物	189
4.5.2	芳烃、杂芳烃及其衍生物	193
4.5.3	羰基化合物	196
4.5.4	$sp$ 杂化碳的化学位移及经验计算	200
4.6	$^{13}C$ NMR 的耦合及耦合常数	201
4.6.1	$^1H$ 与 $^{13}C$ 的耦合	201
4.6.2	$^2H$ 与 $^{13}C$ 的耦合	204
4.6.3	$^{13}C$ 与 $^{13}C$ 的耦合	205
4.6.4	$^{19}F$ 与 $^{13}C$ 的耦合	205
4.6.5	$^{31}P$ 与 $^{13}C$ 的耦合	207
4.7	$^{13}C$ NMR 谱解析	209
4.7.1	$^{13}C$ NMR 谱解析一般程序	209
4.7.2	$^{13}C$ NMR 谱解析实例	210
4.7.3	$^{13}C$ NMR 谱图检索	213
4.8	$^{13}C$ NMR 的应用	214
4.8.1	$^{13}C$ NMR 在立体化学中的应用	214
4.8.2	研究动态过程	216
4.8.3	正碳离子的研究	216
4.8.4	合成高分子的研究	217
4.8.5	有机硅聚合物结构分析	218
4.9	自旋-晶格弛豫时间 ( $T_1$ )	219
4.9.1	自旋-晶格弛豫机制	219
4.9.2	$T_1$ 的应用	221
4.10	二维核磁共振谱	223
4.10.1	2DNMR 实验方法及分类	223
4.10.2	几种二维谱的信息	226
4.11	其他磁共振技术	235



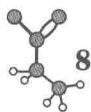
4.11.1 固体高分辨 NMR 谱 .....	235
4.11.2 三维核共振 .....	235
4.11.3 磁共振成像 .....	236
4.12 其他重要自旋核的核磁共振 .....	237
4.12.1 $^{19}\text{F}$ 核磁共振谱 .....	237
4.12.2 $^{31}\text{P}$ 核磁共振谱 .....	238
4.12.3 $^{29}\text{Si}$ 核磁共振谱 .....	239
参考文献 .....	242
习题 .....	243
<b>第 5 章 红外与拉曼光谱 .....</b>	<b>249</b>
5.1 基本原理 .....	249
5.1.1 红外吸收与拉曼散射 .....	249
5.1.2 振动自由度与选律 .....	252
5.1.3 分子的振动方式与谱带 .....	255
5.2 仪器介绍及实验技术 .....	256
5.2.1 红外光谱仪结构及工作原理 .....	256
5.2.2 Fourier 变换红外光谱仪 .....	257
5.2.3 激光拉曼光谱仪 .....	258
5.2.4 实验技术 .....	259
5.3 影响振动频率的因素 .....	262
5.3.1 外部因素 .....	262
5.3.2 内部结构因素 .....	263
5.4 各类有机化合物的红外特征吸收 .....	271
5.4.1 第一峰区 ( $3700\sim 2500\text{cm}^{-1}$ ) .....	272
5.4.2 第二峰区 ( $2500\sim 1900\text{cm}^{-1}$ ) .....	279
5.4.3 第三峰区 ( $1900\sim 1500\text{cm}^{-1}$ ) .....	284
5.4.4 第四峰区 ( $1500\sim 600\text{cm}^{-1}$ ) .....	290
5.5 红外光谱解析及应用 .....	296
5.5.1 红外光谱解析一般程序 .....	296
5.5.2 红外谱图的检索 .....	298
5.5.3 红外光谱解析实例 .....	299
5.5.4 红外光谱的应用 .....	302
5.6 红外光谱在分子结构研究中的应用 .....	304
5.6.1 高分子样品的制备 .....	304



5.6.2	红外光谱在 高分子定性分析中的应用	304
5.6.3	聚合物立体构型、构象分析及结晶度测定	304
5.6.4	聚合反应的研究	305
5.6.5	差减光谱技术	305
5.7	红外光谱技术及近期发展	306
5.7.1	FT-IR 反射光谱	306
5.7.2	光声光谱(photoacoustics spectroscopy, PAS)	309
5.7.3	时间分辨光谱(time resolved spectroscopy, TRS)	310
5.7.4	二维红外光谱(two dimensional infrared spectroscopy, 2D IR)	310
5.7.5	红外显微成像技术	313
5.8	拉曼光谱的特征谱带	313
5.8.1	拉曼光谱的特征谱带	313
5.8.2	拉曼光谱与红外光谱的区别	314
5.9	拉曼光谱的应用	317
5.9.1	用于聚合物结构的研究	318
5.9.2	用于生物大分子的研究	318
5.9.3	表面增强激光拉曼光谱(SERS)的应用	318
	参考文献	319
	习题	322
<b>第 6 章</b>	<b>紫外光谱与荧光光谱</b>	<b>326</b>
6.1	紫外光谱基本原理	326
6.1.1	电子光谱的产生	326
6.1.2	自旋多重性及电子跃迁选择定则	328
6.1.3	有机分子电子跃迁类型	329
6.1.4	紫外光谱表示法及常用术语	331
6.1.5	紫外光谱常用溶剂及溶剂效应	333
6.2	仪器简介	334
6.3	非共轭有机化合物的紫外吸收	335
6.3.1	饱和化合物	335
6.3.2	烯、炔及其衍生物	335
6.3.3	含杂原子的双键化合物	336
6.4	共轭有机化合物的紫外吸收	338
6.4.1	共轭烯烃及其衍生物	338
6.4.2	共轭炔化合物	341

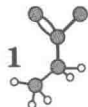


6.4.3	$\alpha, \beta$ -不饱和醛、酮	342
6.4.4	$\alpha, \beta$ -不饱和酸、酯、酰胺	345
6.5	芳香族化合物的紫外吸收	345
6.5.1	苯及其衍生物的紫外吸收	345
6.5.2	杂芳环化合物	350
6.6	空间结构对紫外光谱的影响	351
6.6.1	空间位阻的影响	352
6.6.2	顺反异构	352
6.6.3	跨环效应	353
6.7	紫外光谱解析及应用	354
6.7.1	紫外光谱提供的结构信息	354
6.7.2	紫外光谱解析实例	354
6.7.3	紫外谱图和数据检索	356
6.7.4	紫外光谱的应用	357
6.8	荧光光谱	361
6.8.1	分子荧光光谱	361
6.8.2	仪器简介	363
6.8.3	结构因素对分子荧光的影响	364
6.8.4	环境因素对分子荧光的影响	366
6.8.5	荧光光谱的应用	367
	参考文献	370
	习题	371
<b>第7章</b>	<b>谱图综合解析</b>	<b>373</b>
7.1	谱图综合解析的一般程序	373
7.2	解析实例	375
	参考文献	386
	习题	386
<b>第8章</b>	<b>X射线光电子能谱</b>	<b>396</b>
8.1	XPS的基本原理和常用术语	396
8.1.1	光电效应	396
8.1.2	原子能级的划分和XPS谱图中谱线的表示	397
8.1.3	电子逸出深度和XPS的取样深度	398
8.1.4	电子结合能	398



8.1.5	化学位移	399
8.1.6	离子溅射	400
8.1.7	XPS 的其他物理效应	400
8.2	电子能谱仪简介	401
8.2.1	X 射线激发源	402
8.2.2	电子能量分析器	402
8.2.3	电子探测器	403
8.2.4	真空系统	403
8.2.5	辅助功能	404
8.2.6	谱仪的性能指标	404
8.2.7	样品的制备	404
8.3	X 射线光电子能谱图的解释及其化学信息	405
8.3.1	XPS 谱图的一般特点	405
8.3.2	XPS 谱图中的定峰与伴峰	405
8.3.3	价带结构	413
8.4	XPS 谱图的处理及分析	414
8.4.1	谱的获取	415
8.4.2	谱图处理	415
8.4.3	定性分析	418
8.4.4	定量分析	419
8.4.5	深度剖析	420
8.4.6	面分析	423
8.5	XPS 的应用	424
8.5.1	XPS 在纳米材料领域中的应用	424
8.5.2	XPS 在催化领域的应用	425
8.5.3	在腐蚀科学中的应用	426
8.5.4	在薄膜材料研究中的应用	428
8.6	发展前景及展望	430
	参考文献	430
	习题	431





## 第1章 电磁辐射与谱学基础

由于量子力学、电子及光学技术、计算机科学的兴起与发展,波谱学及波谱分析方法得到了迅速的发展,并成为人类认识分子的最重要手段之一。

研究分子必须了解分子的态(即能级)的性质。分子从一个态跃迁至另一个态,可以通过光的作用,也可以通过电子、中子等粒子的碰撞进行能量交换<sup>[1-2]</sup>。

### 1.1 电磁辐射基础

光是由可见光和不可见光组成的。从经典理论来看,光是一种电磁波,光波之所以称为电磁波,是因为光波可以用一个振荡电场和磁场来描述。光的波动性质可根据相互垂直的电场矢量( $E$ )和磁场矢量( $H$ )来解释<sup>[3-6]</sup>,两者都是正弦波,且都垂直于波的传导方向。

电磁辐射是高速通过空间传播的光子流,具有波动性和微粒性。Planck 量子理论认为,辐射能的发射或吸收不是连续的,而是量子化的。这种能量的最小单位即为“光子”,每个光子具有的能量( $E_L$ )与其频率( $\nu$ )及波长  $\lambda$  之间的关系为

$$E_L = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = hc\bar{\nu} \quad (1.1)$$

式中,  $h$  为普朗克常数( $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ );  $c$  为光速( $2.998 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $\bar{\nu}$  为波数( $\text{cm}^{-1}$ )。(1.1)式表明光子的波长越短,其能量就越大,光子的能量可用电子伏(eV)或焦耳(J)表示,  $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$ ,  $1 \text{ eV}$  表示一个电子在经过电位差为1 V 的电场时所获得的能量。

电磁辐射就其光能由高到低可分为  $\gamma$  射线区, X 射线区, 远紫外、紫外、可见光区, 近红外、红外、远红外光区, 微波区和射频区。

### 1.2 电磁辐射能与波谱技术

波谱学(spectroscopy)涉及电磁辐射与物质量子化的能态间的相互作用。其理论基础是量子化的能量从辐射场向物质转移(或由物质向辐射场转移)。物质分子是由原子核(质子、中子)和电子组成的。辐射电场与物质分子间相互作用,引起分子吸