

· 当代化学译丛 ·

# 分子器件与分子机器

——纳米世界的概念和前景

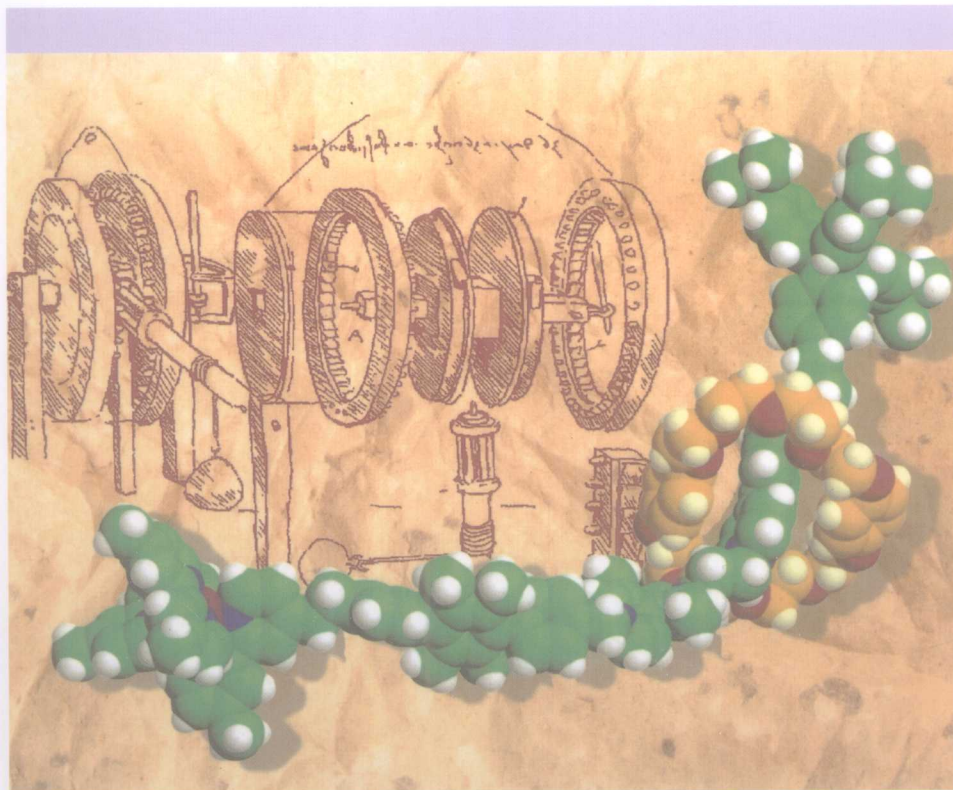
(原著第二版)

[意]Vincenzo Balzani

[意]Alberto Credi 著

[意]Margherita Venturi

马 骧 田 禾 译



华东理工大学出版社  
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

当代化学译丛

属数(910)目集编书并图

# 分子器件与分子机器

## ——纳米世界的概念和前景

### Molecular Devices and Machines

#### Concepts and Perspectives for the Nanoworld

(原著第二版)

[意] Vincenzo Balzani

[意] Alberto Credi 著

[意] Margherita Venturi

马 骧 田 禾 译



华东理工大学出版社

EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

（上海）

## 图书在版编目(CIP)数据

分子器件与分子机器 / (意) 巴尔扎尼等 (Balzani, V.)  
著: 马骧, 田禾译. —上海: 华东理工大学出版社, 2009. 8  
ISBN 978-7-5628-2610-1

I. 分... II. ①巴... ②马... ③田... III. 超分子  
结构-化学 IV. O63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 139245 号

Originally published in the English language by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstrasse 12, D-69469 Weinheim, Federal Republic of Germany, under the title "Molecular Devices and Machines. Concepts and Perspectives for the Nanoworld". Copyright 2008 by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

本书为 Wiley 公司授权的独家简体中文译本, 翻印必究。  
著作权合同登记号: 图字 09-2009-302 号。

当代化学译丛

## 分子器件与分子机器——纳米世界的概念和前景 (原著第二版)

原 著 / [意] Vincenzo Balzani [意] Alberto Credi [意] Margherita Venturi

译 者 / 马 骧 田 禾

策划编辑 / 周永斌

责任编辑 / 陈新征

封面设计 / 陆丽君

责任校对 / 张 波

出版发行 / 华东理工大学出版社

地址: 上海市梅陇路 130 号, 200237

电话: (021)64250306(营销部) 64252253(编辑部)

传真: (021)64252707

网址: press.ecust.edu.cn

印 刷 / 常熟华顺印刷有限公司

开 本 / 710 mm × 1000 mm 1/16

印 张 / 31.75

字 数 / 685 千字

版 次 / 2009 年 8 月第 1 版

印 次 / 2009 年 8 月第 1 次

印 数 / 1—3000 册

书 号 / ISBN 978-7-5628-2610-1/O · 210

定 价 / 88.00 元

(本书如有印装质量问题, 请到出版社营销部调换。)

## 译者的话

2005年我们曾翻译了由巴尔扎尼教授等撰写的第一版《分子器件与分子机器》(2003),直到2007年在上海召开的第一届国际分子机器与传感器大会上,第一版的中文译本都给国内相关领域特别是研究生们带来了研究激情和一股创新冲动,这是巴尔扎尼教授等没有想到的,也正是我们当时决定翻译出版中文版的理想。据出版社称,像这类专业著作能再版印刷在国内并不多见。正如作者在本书的第二版前言中所述,这几年国际上在分子器件与机器研究领域的发展日新月异,很有必要补充和更新相关内容。该书的三位作者于2007年5月在上海参加国际分子机器与传感器大会时不仅感受到中国年轻研究生对他们的崇拜,而且会议上所展示的信息也进一步促进了他们完成第二版的撰写。

2008年第二版出版,我们在尽可能早的时间里获得了该版的电子版,时正值我给本校研究生上学位课期间,这些最新的资料也就成为我上课内容的来源之一。应用化学及相关专业的年轻研究生今后的研究前途是什么?或者说对于站在十字路口的化学我们能够做些什么?超分子化学的未来又是什么?我不仅经常自问,也把这些问题带进课堂,希望那些没有思维束缚,进取而创新的年轻头脑与我们一同来解决这些困惑。在翻译巴尔扎尼教授等著的第二版的过程中,我们不仅细细品味着、体会着国际研究领域的先驱者们所获取的知识,也进一步开拓着我们的创新思维。正如Stoddart教授在Nature Chemistry(2009)中所述,纳米科技对于超分子化学工作者而言是个绝佳机会。我们必须勇敢面对功能导向和应用驱使的挑战,去设计复杂的集成系统。在这个系统里的一切过程,包括化学反应,都通过高度的相互联系以及一种“可交流”的方式而被编排,这样就像悦耳的节奏以交响乐的形式在不同的时空上和谐地表现出来。我们希望通过第二版的翻译,读者也能从中体会到一个全新时代即将来临。

像第一版翻译一样,我仍鼓励刚刚学到这些内容的研究生们与我们一起阅读和翻译。虽然这些前沿的内容对于初学者而言是那么的生涩和艰难,有些翻译稿甚至花去我许多精力去修改,但我相信是值得投入的,更相信这些经历对于参与翻译的研究生们是难为忘怀和值得纪念的,他们是孙如意、邬帅帆、张辉、寇欣欣、瞿三寅、丁煜宾、徐彬、王成有、靳家玉、黄战武、李文琴、孙春雨、应伟江、凌祥、王兵、吴永真、蒋林、周珏、朱金辉、邹志芹、左虎进、吴苹、石磊和刘珍珍。初稿由马骧博士整理翻译,我们一起定稿。限于水平有限,难免有

误，欢迎指正。

最后，还要再次感谢原著作者意大利博洛尼亚大学的巴尔扎尼教授、克雷迪教授和文图里教授的各方面的支持与帮助。

## 书的序言

译者

2009年5月

本书是作者多年从事高分子物理教学工作的经验总结，也是作者多年从事高分子物理教学工作的经验总结。本书共分五章，第一章介绍高分子物理的基本概念，第二章介绍高分子物理的基本概念，第三章介绍高分子物理的基本概念，第四章介绍高分子物理的基本概念，第五章介绍高分子物理的基本概念。本书可作为高等院校物理专业及相关专业的教材，也可供从事高分子物理工作的工程技术人员参考。

本书共分五章，第一章介绍高分子物理的基本概念，第二章介绍高分子物理的基本概念，第三章介绍高分子物理的基本概念，第四章介绍高分子物理的基本概念，第五章介绍高分子物理的基本概念。本书可作为高等院校物理专业及相关专业的教材，也可供从事高分子物理工作的工程技术人员参考。

本书共分五章，第一章介绍高分子物理的基本概念，第二章介绍高分子物理的基本概念，第三章介绍高分子物理的基本概念，第四章介绍高分子物理的基本概念，第五章介绍高分子物理的基本概念。本书可作为高等院校物理专业及相关专业的教材，也可供从事高分子物理工作的工程技术人员参考。

## 第二版前言

几年前，由于人们对能表现出有用功能的超分子体系的兴趣愈浓，我们感觉有必要撰写一部专著来做一些介绍，以及在整体上对这个科学研究前沿做个总的概述。因此我们决定撰写《分子器件和分子机器——通向纳米世界的捷径》这本书，该书于2003年2月由Wiley-VCH出版社出版。此书被学界广为接受和欢迎，被多个最重要的科学期刊引用和评述。2005年，这本书由田禾教授和王利民教授（华东理工大学，上海）翻译成中文，并由中国化学工业出版社（北京）出版。该书的日语版也即将由NTS（东京）出版。

最近几年，人们对设计、合成及操作人工分子器件和机器的兴趣逐渐增加。也涌现出很多新的基本观念并涉及了许多新的体系。在2006年春天，Wiley-VCH告诉我们第一版的书还有一些印刷版，并建议不要重新印刷，他们认为出版此专著的新版本将对科学界更为有用。和几个同僚商量后，我们确实认识到是时候修订及更新《分子器件和分子机器——通向纳米世界的捷径》这本书了，我们保留了书名，但修改了副标题以强调这是同一本书的新版本。

《分子器件和分子机器——纳米世界的概念和前景》的确保持了原版的基本结构，但是内容却有了充分的改变，为了帮助读者认识新兴的发展趋势，书中关于基本原理的章节大部分进行了重写。如关于电子及能量转移等基本过程的讨论，认识分子器件及分子机器与宏观世界的相似之处，理解纳米世界具有许多不一般的特征（并不像科幻电影、电视剧和小说里的那样），另外关于特殊器件和机器的章节也同时进行了更新和改进，并加入了一些新的章节。

和第一版一样，本书中所涉及的概念都用例证来加以说明，并增加了一些最近出版的期刊上的例子。虽然此书主要关注人工的分子水平的器件和机器，但我们也向读者介绍了一些自然界的和仿生的体系，以此让读者认识“自然”和“人工”之间复杂性的差异是如此之大，同时也让读者体验到生活中材料方面所存在的美妙的化学机理。其中有一章举例介绍了基于多相或固态体系的器件和机器，这个体系比起溶液体系更接近于实际应用。附录中的术语表以及主体索引都经过了修订和扩展。

我们这本书的最大特点是含有大量的图解，因为卡通图和化学式对于理解体系的组分以及分子器件和分子机器的操作是必须的。我们尽力做得比第一版更好，力图做到如Steven A. Edwards在他的《纳米技术先锋》（Wiley-VCH，

2006: 52) 一书中所说的: “光是图解就值一本书的价钱”。

在这本书的最后, 我们从作为当今科学家的角度表达了几点对“科学与社会”的看法。我们确信当今社会的科学家应该发挥更重要的作用, 不是获得更多的基金资助, 而是去引导大众的观点和帮助政策制定者来建设一个更加文明与和平的世界。

我们认为这本书不仅仅对在化学、物理、生物和纳米技术领域从事研究活动的科学家有重大意义, 它同时可以补充或作为高年级本科生及研究生的学习教材。例如, 作为超分子化学、物理有机化学、光化学、电化学以及能量、电子转移过程的教材。而这书的第一版的确已经被用作教学目的。毫无疑问, 在不久的将来, 关于分子器件和分子机器的课程将在大部分重要大学里开设。

我们真诚地感谢我们研究组成员的支持、讨论和建议, 更重要的是——他们的友谊。感谢 Giacomo Bergamini, Monica Semeraro 和 Serena Silvi 对绘制插图和文献检索作出了很大的贡献, 其中 Mara Monar 是本书的编辑秘书。还要热情地感谢 J. Fraser Stoddart 教授 (UCLA) 和 Fritz Vögtle 教授 (波恩大学) 在分子器件和分子机器的设计、合成和操作上的长期、有益、友好的合作。我们同时感谢全世界那些向我们友好地提供他们最新的论文的同行人, 以及几个科学期刊的编辑, 他们允许我们复制了许多图片。最后我们还要衷心感谢在 Wiley-VCH 工作的职员们, 他们的工作十分专业和出色。

Vincenzo Balzani, Alberto Credi, Margherita Venturi

2007年7月于Bologna



# 目 录

第 1 部分 基本概念	1
第 1 章 概述	2
1.1 分子水平的器件和机器	2
1.2 纳米科学与纳米技术	3
1.3 超分子(多组分)化学	5
1.4 “化大为小”的方法	8
1.5 “积小为大”的方法	8
1.6 “积小为大”分子的堆积	9
1.7 自组装和共价合成的设计	12
1.8 能量与信号	12
参考文献	13
第 2 章 通过分子和超分子体系传递能量和信号	19
2.1 概述	19
2.2 分子电子学	20
2.3 分子光子学	22
2.4 分子离子学	23
2.5 分子电子光子学	25
2.5.1 溶液系统	25
2.5.2 固态	26
2.6 分子电子化学离子学	26
2.7 分子光电子学	28
2.7.1 均相系统中的光诱导电子转移	28
2.7.2 非均相系统中光诱导的电荷的产生	29
2.8 分子光化学离子学	29
2.8.1 光子的释放或吸收	30
2.8.2 金属离子的释放	30
2.8.3 阴离子的释放	31
2.8.4 分子的释放	31



2.8.5	构型的变化	32
2.9	分子化学光子学	32
2.10	分子化学电子学	33
2.11	多输入/过程	33
2.11.1	两种有序的化学输入和一个光输入产生的光发射	34
2.11.2	平行的两个电化学输入产生一个有序的化学和光子的过程	34
2.11.3	光输入产生并行和串行的过程	34
	参考文献	36
<b>第2部分 用于处理电子和能量的分子器件</b>		<b>41</b>
<b>第3章 光激发的电子和能量转移的基本原理</b>		<b>42</b>
3.1	分子和超分子光化学	42
3.1.1	分子光化学	42
3.1.2	超分子光化学	44
3.2	电子传递	45
3.2.1	Marcus 理论	46
3.2.2	量子力学理论	48
3.2.2.1	电子因子	48
3.2.2.2	核因子	50
3.2.2.3	光电子转移	50
3.3	能量转移	51
3.3.1	库仑机理	51
3.3.2	交换机理	52
3.4	桥基的作用	53
	参考文献	55
<b>第4章 导线及相关体系</b>		<b>58</b>
4.1	概述	58
4.2	导电率的测量方法	59
4.3	电极上的电子转移过程	60
4.4	基于光诱导电荷分离的线型体系	61
4.4.1	概述	61
4.4.2	双体、三体 and 更大的体系	61
4.4.3	含有金属络合物的共价连接的体系	63
4.4.4	包含卟啉的共价连接体系	67
4.4.5	基于有机化合物的共价相连体系	71

881	4.4.6	DNA 及相关体系 .....	74
884	4.5	非均相的光诱导的电子转移 .....	75
884	4.6	能量传递 .....	76
781	4.6.1	含有金属络合物的共价连接体系 .....	76
881	4.6.2	包含卟啉的共价键合体系 .....	81
111	4.6.3	基于有机化合物的共价相连的体系 .....	82
111	4.6.4	DNA 及其相关体系 .....	84
88		参考文献 .....	85
	<b>第 5 章</b>	<b>分子开关中的电子转移和能量传递过程 .....</b>	<b>94</b>
84	5.1	概述 .....	94
84	5.2	开关电子转移 .....	95
841	5.2.1	光输入 .....	95
881	5.2.1.1	长寿命开关 .....	95
841	5.2.1.2	快速和超快速开关 .....	99
881	5.2.2	氧化还原插入 .....	103
181	5.2.3	酸碱输入 .....	104
181	5.2.4	其他因素 .....	107
885	5.3	开关能量传递 .....	107
881	5.3.1	光输入 .....	108
881	5.3.2	氧化还原插入 .....	110
881	5.3.3	酸-碱插入 .....	111
881	5.3.4	其他因素 .....	112
88		参考文献 .....	114
	<b>第 6 章</b>	<b>光收集天线 .....</b>	<b>119</b>
886	6.1	概述 .....	119
886	6.2	天然天线系统 .....	120
886	6.3	树枝状分子 .....	122
881	6.3.1	基于卟啉的阵列和树枝状分子 .....	123
881	6.3.1.1	卟啉基阵列 .....	123
781	6.3.1.2	树枝状分子 .....	126
781	6.3.2	含金属络合物的树枝状分子 .....	128
811	6.3.2.1	金属络合物作为核的体系 .....	128
131	6.3.2.2	金属络合物作为分支中心的体系 .....	130
131	6.3.3	基于有机发色团的树枝状分子 .....	133
131	6.3.3.1	聚芳醚树枝状分子 .....	133

157	6.3.3.2	苯乙炔树枝状分子	133
157	6.3.3.3	聚亚苯基和低聚(对亚苯基次亚乙烯基)树枝状分子	135
157	6.3.4	主-客体系统	135
157	6.3.4.1	主体有机分子系统	137
158	6.3.4.2	主体金属离子体系	138
158	6.4	其他系统	141
158	6.4.1	多发色团的环糊精	141
158	6.4.2	酞菁	142
159	6.4.3	方形金属超分子	142
159	6.4.4	轮烷	142
159	6.4.5	沸石	142
160	6.4.6	聚电解质	143
160	6.4.7	聚合物	144
160	6.4.8	生物结构的自组装	145
160		参考文献	145
		<b>第7章 太阳能转化</b>	151
160	7.1	简介	151
160	7.2	自然界的光合成	153
160	7.2.1	概述	153
161	7.2.2	细菌的光合作用	153
161	7.2.3	光合系统II	156
161	7.3	人工的光合作用	158
161	7.3.1	概述	158
161	7.3.2	氢经济	158
161	7.3.3	水的光化学分解	159
161	7.3.4	人工天线和反应中心组装单位的结合	160
161	7.3.4.1	简介	160
161	7.3.4.2	有机化合物和卟啉体系	162
161	7.3.4.3	金属络合物体系	166
161	7.3.5	多电子氧化还原过程与单光子电荷分离过程的结合	167
161	7.3.5.1	概述	167
161	7.3.5.2	氧气释放中电子与质子转移	168
161	7.3.5.3	其他体系	171
161	7.3.6	组装方案	171
161	7.3.6.1	概述	171

7.3.6.2	自组装	171
7.3.6.3	双层膜	173
7.4	掺杂体系	173
7.4.1	掺杂的光合反应中心	173
7.4.2	光向质子驱动力的转换	174
7.4.3	三磷酸腺苷(ATP)的光驱动产生	175
7.5	通过光电化学电池将光能转换为电能	176
	参考文献	179
<b>第3部分 存储器、逻辑门和相关体系</b>		185
<b>第8章 双稳态和多稳态体系</b>		186
8.1	概述	186
8.2	能量激发	187
8.2.1	光子激发:光致变色体系	187
8.2.2	电子激发:电致变色体系	190
8.3	双稳态体系	191
8.3.1	主-客体相互作用模型	191
8.3.2	荧光开关	192
8.3.3	手性光开关	192
8.3.4	光化学生物分子开关	194
8.3.5	氧化还原开关	196
8.3.6	其他体系	197
8.4	多稳态体系	197
8.4.1	双-多光致变色超分子体系	197
8.4.2	伴随其他刺激的光化学输入	199
8.4.2.1	三态体系:写-锁-读-解锁-擦除过程的循环	199
8.4.2.2	光化学-电化学的联合刺激	202
8.4.2.3	光化学与(酸-碱)联合刺激	205
8.4.3	多电子氧化还原过程	208
8.4.3.1	具有相同氧化还原单体的体系	209
8.4.3.2	具有不同氧化还原单体的体系	211
8.4.4	电化学输入与化学输入的联合使用	216
8.4.5	多种化学输入	218
	参考文献	219
<b>第9章 逻辑门和逻辑电路</b>		229
9.1	概述	229

9.1.1	基于电子学的信息处理	229
9.1.2	生物学信息处理	229
9.1.3	化学电脑	230
9.2	逻辑门的基本概念	230
9.3	作为逻辑门的分子开关	232
9.3.1	输入/输出信号	232
9.3.2	重新组合、叠加及综合	234
9.4	基础逻辑门	235
9.4.1	YES 和 NOT 门	235
9.4.2	OR 和 NOR 门	236
9.4.3	AND 和 NAND 门	237
9.4.4	XOR 和 XNOR 门	240
9.4.5	INH 门	241
9.5	组合逻辑电路	242
9.5.1	EnOR 和 EnNOR	242
9.5.2	其他功能	243
9.5.3	分子开关之间的信号交流	244
9.5.4	半加法和半减法器	246
9.5.5	全加法和全减法器	249
9.5.6	2-to-1 分子数字多路器	253
9.6	时序逻辑电路	254
9.6.1	分子存储器	255
9.6.2	分子键盘锁	257
9.7	神经中枢型体系	259
9.7.1	本征阈值机制控制下的 XOR 逻辑体系	259
9.7.2	感知器型电路	261
9.8	生物逻辑器件	262
9.9	非均相体系	264
9.10	分子逻辑的应用	266
9.11	结论	268
	参考文献	269
<b>第 4 部分 分子水平上的器件、机器、马达</b>		<b>277</b>
<b>第 10 章 基本原理</b>		<b>278</b>
10.1	概述	278

10.2	生物分子机器及布朗运动	279
10.3	人造系统	280
10.3.1	术语和定义	281
10.3.2	机械装置	283
10.3.3	机器	283
10.3.4	马达	284
10.4	能量供应	284
10.4.1	化学能	285
10.4.2	光能	286
10.4.3	电化学能	286
10.5	其他特征	287
10.5.1	运动的类型	287
10.5.2	控制与监测	287
10.5.3	复原	287
10.5.4	时标	287
10.5.5	功能	288
	参考文献	288
<b>第 11 章</b>	<b>自发的类机械运动</b>	<b>291</b>
11.1	概述	291
11.2	转子	291
11.3	钝齿轮	292
11.4	齿轮	292
11.5	叶轮	294
11.6	十字转门	295
11.7	闸	296
11.8	棘轮	297
11.9	陀螺烷与罗盘	298
11.10	其他运动	299
	参考文献	300
<b>第 12 章</b>	<b>与开关及换位相关的运动</b>	<b>302</b>
12.1	概述	302
12.2	变构运动	302
12.2.1	变构酶	302
12.2.2	人工变构体系	303
12.3	镊子和叉子	305
12.3.1	镊子	305

12.3.2	叉子及相关体系	307
12.4	主客体体系的控制组装与分解	308
12.4.1	引言	308
12.4.2	光诱导的过程	310
12.4.3	氧化还原诱导的过程	313
12.4.4	化学诱导过程	316
12.5	分子锁	317
12.6	金属离子的移位	317
12.6.1	氧化还原驱动的过程	318
12.6.2	酸-碱驱动的过程	319
12.7	离子通道	320
12.7.1	自然界中的离子通道	320
12.7.2	天然质子泵	321
12.7.3	人造离子通道	323
12.7.3.1	概述	323
12.7.3.2	天然通道模型的修饰	323
12.7.3.3	基于生物聚合物的离子通道	324
12.7.3.4	合成的离子通道模型	324
	参考文献	327
<b>第 13 章</b>	<b>DNA 纳米机器</b>	<b>336</b>
13.1	引言	336
13.2	DNA 的重要性能	336
13.2.1	单链与双链 DNA 的结构与性质	336
13.2.2	DNA 多组分纳米结构的构造	338
13.2.3	DNA 纳米机器的表征方法	340
13.3	简单的构象转变	340
13.3.1	缠绕机	340
13.3.2	镊子	341
13.3.3	其他体系	343
13.4	步行机以及相关的体系	344
13.5	旋转器件	347
13.6	应用	348
	参考文献	351
<b>第 14 章</b>	<b>线性运动</b>	<b>354</b>
14.1	概述	354



14.2	天然线性马达	354
14.3	穿梭-脱梭运动	356
14.3.1	概述	356
14.3.2	化学驱动的运动	358
14.3.2.1	基于金属-配体键的系统	358
14.3.2.2	基于氢键和静电相互作用的系统	359
14.3.2.3	基于给体-受体相互作用的系统	360
14.3.3	电化学驱动的运动	362
14.3.4	光化学驱动的运动	366
14.4	轮烷的线性运动	369
14.4.1	概述	369
14.4.2	化学驱动的运动	371
14.4.2.1	基于金属络合物的轮烷	371
14.4.2.2	基于氢键和给体-受体相互作用的轮烷	371
14.4.2.3	基于葫芦脲的轮烷	375
14.4.2.4	基于环糊精的轮烷	376
14.4.2.5	其他体系	376
14.4.3	电化学驱动的运动	376
14.4.4	光化学驱动的运动	380
14.4.4.1	基于金属络合物的轮烷	380
14.4.4.2	基于光致异构化反应的体系	381
14.4.4.3	基于光诱导的电子转移的系统	382
14.4.5	允许/阻止环运动	386
	参考文献	389
<b>第 15 章 旋转运动</b>		<b>400</b>
15.1	概述	400
15.2	天然旋转马达	400
15.3	杂化旋转马达	402
15.4	人造系统中的旋转运动	403
15.4.1	化学驱动过程	405
15.4.1.1	围绕碳碳单键的旋转	405
15.4.1.2	轮烷和索烃中的环转换过程	407
15.4.1.3	夹心型化合物中围绕金属离子旋转的控制	410
15.4.2	电化学驱动过程	412
15.4.2.1	轮烷中的环转换过程	412

15.4.2.2	索烃中的环转换过程	413
15.4.2.3	夹心型化合物中围绕金属离子旋转的控制	417
15.4.3	光化学驱动过程	417
15.4.3.1	围绕碳碳双键的定向旋转	417
15.4.3.2	锁烃的环开关过程	421
15.4.3.3	索烃的单向环旋转	422
	参考文献	427
<b>第 16 章 从溶液到非均相体系</b>		433
16.1	概述	433
16.2	表面上的旋转马达	433
16.3	分子阀	436
16.4	分子肌肉	438
16.5	STM 驱使的分子运动	439
16.6	掺杂的生物纳米器件	440
16.7	驱动的微米级物体	441
16.8	改变表面性能	443
16.9	表面上的线性和互锁式化合物	443
16.10	固态器件中的互锁化合物	449
	参考文献	453
<b>第 5 部分 科学和社会</b>		459
<b>第 17 章 我们这个时代的科学地位</b>		460
17.1	概述	460
17.2	科学永无止境	460
17.3	一个脆弱的世界	460
17.4	一种不可持续增长	461
17.5	一个不平等的世界	462
17.6	科学家的角色	462
17.7	结论	464
	参考文献	465
<b>附录</b>		466
	术语表	466
	缩略语	480
<b>主题索引</b>		484