

国外优秀化学著作译丛

国外优秀科技著作出版专项基金资助



分子器件与分子机器

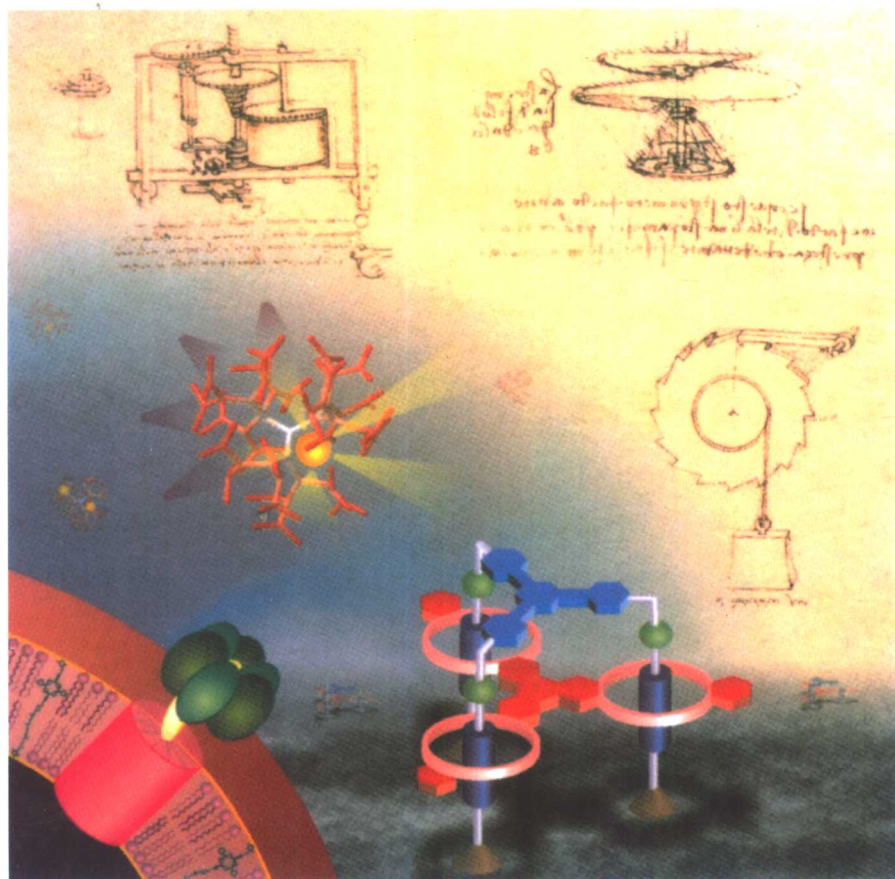
——通向纳米世界的捷径

[意] V. 巴尔扎尼 A. 克雷迪 M. 文图里 著

V. Balzani A. Credi M. Venturi

田 禾 王利民 译

Molecular Devices and Machines
A Journey into the Nanoworld



化学工业出版社
化学与应用化学出版中心



国外优秀科技著作出版专项基金资助

国外优秀化学著作译丛

分子器件与分子机器 ——通向纳米世界的捷径

Molecular Devices and Machines
A Journey into the Nanoworld

[意] V. 巴尔扎尼 A. 克雷迪 M. 文图里 著
田 禾 王利民 译



化学工业出版社
化学与应用化学出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

分子器件与分子机器——通向纳米世界的捷径/[意]巴尔扎尼 (Balzani, V.), 克雷迪 (Credi, A.), 文图里 (Venturi, M.) 著; 田禾, 王利民译.
北京: 化学工业出版社, 2005. 4

(国外优秀化学著作译丛)

书名原文: Molecular Devices and Machines

ISBN 7-5025-6857-3

I. 分… II. ①巴…②克…③文…④田…⑤王… III. 分子生物学-研究 IV. Q7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 027640 号

Molecular Devices and Machines/by V. Balzani, A. Credi, M. Venturi

ISBN 3-527-30506-8

Copyright © 2003 by WILEY-VCH Verlag GmbH. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by WILEY-VCH

本书中文简体字版由 WILEY-VCH Verlag GmbH 授权化学工业出版社独家出版发行。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2005-0876

国外优秀化学著作译丛

分子器件与分子机器

——通向纳米世界的捷径

[意] V. 巴尔扎尼 A. 克雷迪 M. 文图里 著

田禾 王利民 译

责任编辑: 李晓红 路金辉

责任校对: 凌亚男

封面设计: 郑小红

*

化学工业出版社 出版发行

化学与应用化学出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 28 字数 526 千字

2005年6月第1版 2005年6月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-6857-3/O·111

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

译者的话

2004年春，化学工业出版社的路金辉先生与我谈及荷兰科学家 Feringa 教授主编的专著 *Molecular Switch* 《分子开关》，该社有意将其翻译出版。我亦同意翻译该书，但考虑到该书是 2001 年出版的，若现在翻译出版，内容难免有些滞后，又因为专著所涉及的内容大多数为综述文章，其整体编排的连贯性、逻辑性也并不适合作为教学参考书；而且这些文章大多是由一些国际上著名的学术权威针对不同专题而各自撰写章节而形成，故在不同章节存在若干内容上的重复；基于此，我推荐了意大利著名学者 V. Balzani 教授等撰写的 *Molecular Devices and Machines* 《分子器件与分子机器》（2003 年出版）这本专著的翻译出版。首先，这本专著是从一些基本概念、学术术语结合相关领域发展的历史开始，介绍分子器件与分子机器的相关内容，通俗易懂、深入浅出，全书始终贯穿一个当前国际前沿课题：一条通向纳米世界的捷径，这也正是此书的副标题；其次，此书所涉及的学科非常广泛，包含了化学、物理、生物和纳米科学等，对于相关学科今后的发展具有重要的指导意义；再者，由于我国在分子器件与分子机器方面的研究正处于蓬勃发展的阶段，还需大批有志向的青年学生和青年科学工作者加入到这一领域来。如果我们及时地将国际著名学者系统全面地介绍和评述这一前沿领域的大作翻译出版，无疑对有志于该领域的科技工作者，特别是年轻科技工作者的科研思路的开阔将起到良好的引导作用。我的想法得到了化学工业出版社领导和编辑的赞同。

此间正值我承担华东理工大学“高等精细化学品化学”研究生学位课程建设项目，其课题内容之一是要求应用化学研究生学位课中进一步加强专业英语的内容，因此要求研究生每人选取此书的部分章节进行翻译以提高专业英语水平，这也是我自 1994 年承担这门学位课以来每年度都要求研究生们必须完成若干当年最前沿课题的评述工作的课程内容之一。

在此书翻译出版之际，我们首先要感谢盛佳、邵珏华、马骧、徐俊、冯艳丽、范鑫、孟宪乐、林友刚、李伟、张妍、许兆武、张琼、徐军、吴洁、张亮等同学们，他们为翻译本书的初稿做出了一定的成绩。同时，我亦相信这些同学不仅拓展了自己的学识，提高了专业英语水平，而且也深深认识到能够从事这些相关领域的研究而感到由衷的自豪，并为化学家像建筑艺术家一样去构建和模拟各种超分子器件和分子机器的高超本领所折服。更重要的是，此书也会进一步激发

我们的创新精神，在反复修改和研读书稿的过程中，我对在这一领域的“闪光点”、“里程碑”似的工作中所体现出的新思想有了更深入的理解，这更促进了我们自己科研工作向更新更深更高的方向发展，亦有利于更加努力从事我们的事业，对此我自己也深有体会。本书的另一位译者王利民博士为此书的翻译、整理工作付出了辛勤的劳动，做出了很大的贡献。

最后还要感谢此书的作者 V. Balzani 教授。我们和他为此书的翻译进行了多次交流与讨论，他对中文版的出版寄予了极大的热情并积极支持。我们希望 Balzani 教授的热忱指导和我们的辛勤劳动能够物有所值。当然，由于我们个人的学术水平与 Balzani 教授国际大师级的水平相差甚远，对他书中所体现出的深邃哲理和思路的把握不一定十分准确，因此，此书的翻译难免有不足之处，甚至是错误，谨请读者批评指正。

田 禾

华东理工大学

2005 年 2 月 18 日

前 言

人类社会的进程总是与新型的机器和设备联系在一起的。由于各种不同的使用目的，一种机器或设备可以很大，也可以很小。在过去的 50 年里，在机器和器件设备中使用的组件逐步微型化，致使技术领域，特别是信息处理领域取得了很大的成就。人们预言，微型化进程并不只局限于缩小物质型号和增大计算机的力量，在医药、环境、能量以及材料领域中也同样要开辟一条新的道路。

到目前为止，微型化使用的是“从上向下（化大为小）”的方法，而这种方法已经接近其物质能力的极限（几百纳米）。然而，微型化还能有更远的发展前景，正如 Richard R. Feynman 在 1959 年对美国物理协会所做的著名报告中所说的“底部仍有大量空间”。在过去的 10 年里，化学家们接受了 Feynman 的挑战。分子，这种物质的最小实体，具有其独特的形状和性质，化学家们因此由分子着手，发展了一种“积小为大（bottom-up）”的方法，使分子机器设备达到了纳米的尺寸。

人们对人工分子机器结构的灵感大多来源于分子生物学所取得的进步，分子生物学已经开始揭示天然分子机器的秘密，而天然分子机器正是构成生命的物质基础。积小为大的方法与自然界中存在的其他方法一样复杂，当然，它也是一项不可能的任务。因此，化学家们尝试将分子机器的结构简单化，不模仿生物分子机器的复杂结构。近年来，化学界的精英结合机器驱动设计出许多有意思的分子机器结构。

许多这样的人工系统在溶液中被发现。虽然分子机器有相当的重要性，但是在溶液中的不合逻辑性往往成为形成有用的官能团的主要障碍。毋庸置疑，这种观念将有助于形成更实用的系统。我们将要跨入新的世纪，的确需要投入无限的精神，抓住各种机会，很好地开发积小为大达到纳米技术。

由于化学界对分子机器的兴趣与日俱增，我们认为很有必要开一个专题讨论会，以介绍该领域所涉及的各种问题，并提出关于该化学界前沿理论的支持的、反对的和中立的观点。本书中所提出的各个观点都得到了论证，这些例子都从近年来关于人工分子机器的文献中参考的。当然，也选择了一些天然的和仿生的分子机器为例，这些例子并不是想与人工系统做对比，仅仅是想让人们感受到化学机器构成的生命的美与复杂性。在书中，非均相或固相系统的人工分子系统只作简要说明，尽管这也非常重要，但并不是因为篇幅有限，而是因为我们相信该领

域是需要大量实验的，而现在尚未完全成熟。

本书中包括很多章节的介绍，所引用的基本原则都是以已取得的成就为标的。我们努力在本书中涵盖先进的科研成果，用通俗易懂的语言，使用公式、表格或其他数据，使我们所要表达的主题尽量清楚。最后附录所包含的词汇表与缩写也能够帮助读者更好地阅读本书。

本书所讨论的体系与传统化学不同。例如，主-客体通常认为属于有机化学的范畴，多核金属络合物几乎全部都出现在无机化学中讨论，电化学与闪光光解则属于物理化学范畴。本书的一个不容忽略的贡献就是激励着传统化学家冲破传统的学科限制，加强与表面上不相关的（实际上互补的）研究小组之间的合作。

我们认为，这本书不仅对化学、物理、生物和纳米科技领域的研究具有重大意义，同样也可以作为本科生或硕士研究生的学习教材，例如，可以作为超分子化学，物理有机化学，光化学，电化学以及能量或电子传递的教材。我们相信，不久后，以分子机器为重点的学科必将成为大学里的一门必修课。

没有哪一个作者能够单独完成一本书的撰写，本书也是如此，它是很多研究者们共同努力的结晶。首先，感谢我们研究小组的成员，感谢他们的支持与帮助。特别要感谢 Roberto Ballardini, Maria Teresa Gandolfi 和 Mauro Maestri, 他们对本书的一些章节做出了特别大的贡献。我们同样也要感谢 J. Fraser Stoddart 教授和他的研究小组，感谢他们在分子机器领域与我们长期友好的合作与支持。

特别要感谢我们小组的 Paola Ceroni, 以及 Nicola Armaroli (ISOF-CNR, Bologna), Sebastiano Campagna (Università di Messina), Fernando Pina (Universidade Nova de Lisboa) 以及 Franco Scandola (Università di Ferrara), 他们给本书提出了很多建议。感谢 Filippo Marchioni 为本书所做的插图，感谢 Serena Silvi, Mara Monari 为本书提供索引，感谢世界各地的同事，感谢科技期刊的编辑。

结束之前，我们希望本书所讨论的主题能够在今后取得更多的进步，让人类为和平做更多的贡献，并缩小贫富之间的差距。

Vincenzo Balzani, Alberto Credi, Margherita Verturi

2002年7月，于Bologna

目 录

第 1 章 基本概念	1
1.1 分子水平的器件和机器	1
1.2 器件和机器的微型化	2
1.3 “化大为小”的方法	2
1.4 “积小为大”的方法	3
1.4.1 “积小为大”原子的堆积	4
1.4.2 “积小为大”分子的堆积	5
1.5 超分子(多组分)化学	6
1.5.1 大分子和超分子体系的比较	8
1.5.2 自组装和共价合成的设计	9
1.5.3 超分子化学, 艺术和纳米技术	9
参考文献	12
第 1 部分 用于处理电子和能量的器件	17
第 2 章 电子转移和能量传递的基本原理	18
2.1 概述.....	18
2.2 光诱导的电子转移和能量传递过程.....	19
2.2.1 电子转递.....	19
2.2.1.1 电子因素.....	20
2.2.1.2 核因素.....	20
2.2.2 能量传递.....	21
2.2.2.1 库仑机理.....	22
2.2.2.2 交换机理.....	23
2.2.3 桥基的作用.....	25
参考文献	26
第 3 章 导线及相关体系	29
3.1 概述.....	29
3.2 导电率的测量.....	29
3.3 电极上的电子转移过程.....	31

3.4	光诱导的电子转移	32
3.4.1	含有金属络合物的共价连接体系	32
3.4.2	基于有机化合物的共价相连体系	34
3.4.3	含有卟啉的共价连接体系	36
3.4.4	DNA 及相关体系	39
3.5	非均相的光致电子转移	41
3.6	能量传递	42
3.6.1	含有金属络合物的共价体系	42
3.6.2	基于有机化合物的共价体系	45
3.6.3	含有卟啉的共价体系	48
3.6.4	DNA 及相关系统	50
	参考文献	50
第4章	分子开关中的电子转移和能量传递过程	58
4.1	概述	58
4.2	开关电子转移	59
4.2.1	光输入	59
4.2.1.1	长寿命开关	60
4.2.1.2	快速和超快速开关	62
4.2.2	氧化还原输入	69
4.2.3	酸-碱输入	69
4.2.4	其他因素	74
4.3	开关能量传递	74
4.3.1	光输入	74
4.3.2	氧化还原输入	77
4.3.3	酸-碱输入	79
4.3.4	其他因素	80
	参考文献	82
第5章	光收集天线	87
5.1	概述	87
5.2	天然天线系统	88
5.3	卟啉基阵列	89
5.4	多发色团的环糊精	93
5.5	树枝状分子	93
5.5.1	含金属络合物的树枝状分子	94
5.5.1.1	金属络合物作为核的体系	94

5.5.1.2 金属络合物作为分支中心的体系	97
5.5.2 基于有机发色团的树枝状分子	98
5.5.3 含卟啉的树枝状分子	103
5.5.4 主-客体体系	106
5.5.5 光诱导电子转移	109
5.6 其他体系	110
5.6.1 聚合(高分子)电解质	110
5.6.2 聚合物	111
5.6.3 轮烷	111
5.6.4 沸石	112
参考文献	113
第6章 光致电荷分离和太阳能转化	120
6.1 概述	120
6.2 自然界的反应中心	121
6.2.1 引言	121
6.2.2 细菌的光合作用	121
6.2.3 光合系统 II	124
6.3 人工反应中心	125
6.3.1 引言	125
6.3.2 二元体	126
6.3.3 三元体	127
6.3.4 四元体和五元体	133
6.3.5 天线反应中心体系	136
6.3.5.1 基于卟啉的阵列	136
6.3.5.2 双层膜	140
6.3.5.3 自组装单分子层	140
6.3.5.4 层状组装体和沸石	140
6.3.6 造氧体系	141
6.4 杂化体系	144
6.4.1 质子驱动的光转化	144
6.4.2 光驱动合成 ATP	145
6.5 人工太阳能转化	146
6.5.1 光转化为燃料	146
6.5.2 光转化为电	149
参考文献	151

第 2 部分 存储、逻辑门和相关体系	159
第 7 章 双稳态体系	160
7.1 概述	160
7.2 光致变色体系	161
7.3 主-客体相互作用模型	163
7.4 荧光开关	165
7.5 手性光开关	166
7.5.1 空间位阻很大的烯烃	168
7.5.2 二噻吩乙烯	168
7.6 光化学生物分子开关	169
7.7 电致变色体系	171
7.8 氧化还原开关	173
7.9 其他系统	174
参考文献	174
第 8 章 多态-多功能体系	180
8.1 概述	180
8.2 双光致变色超分子体系	180
8.3 伴随其他刺激的光化学输入	182
8.3.1 三态体系: 写—锁—读—解锁—擦除过程的循环	182
8.3.2 光化学-电化学的联合刺激	185
8.3.3 光化学与(酸-碱)联合刺激	188
8.3.4 分子转移寄存器	191
8.4 多电子氧化还原过程	196
8.4.1 具有相同氧化还原单体的体系	197
8.4.2 具有不同氧化还原单体的体系	200
8.5 电化学输入与化学输入的联合使用	204
8.6 多种化学输入	206
参考文献	206
第 9 章 逻辑门	212
9.1 概述	212
9.2 逻辑门的基本概念	212
9.3 作为逻辑门的分子开关	214
9.4 基本逻辑门	215
9.4.1 YES 门	216

9.4.2	NOT 门	216
9.4.3	OR 门	217
9.4.4	AND 门	218
9.4.5	NOR 门	219
9.4.6	NAND 门	219
9.4.7	XOR 门	219
9.4.8	XNOR 门	221
9.5	组合逻辑	222
9.5.1	INH 逻辑操作	222
9.5.2	ENOR 逻辑操作	223
9.5.3	半加法器	223
9.5.4	三态、三输入、两输出的分子开关	226
9.6	神经中枢型体系	227
9.6.1	本征阈值机制控制下的 XOR 逻辑体系	227
9.6.2	感知器型电路	229
9.7	分子开关之间的信号交流	230
9.8	基于寡核苷酸的计算	232
9.9	分子基电路	233
9.10	结论	235
	参考文献	235

第 3 部分 分子机器 241

第 10 章 分子机器的基本原理 242

10.1	引言	242
10.2	分子机器的概念	242
10.3	能量供应	244
10.3.1	化学能	245
10.3.2	光能	246
10.3.3	电化学能	246
10.4	其他要求	247
10.4.1	运动的类型	247
10.4.2	控制与监测	247
10.4.3	复原	247
10.4.4	时标	247
10.4.5	功能	248

参考文献	248
第 11 章 自发的类似机械的运动	251
11.1 概述	251
11.2 转子	251
11.3 钝齿轮	252
11.4 传动装置 (齿链, gear)	253
11.5 叶轮	254
11.6 十字转门	254
11.7 闸	255
11.8 棘轮	256
11.9 陀螺烷与陀螺仪	257
参考文献	258
第 12 章 与开、关及换位相关的运动	261
12.1 概述	261
12.2 变构运动	261
12.2.1 变构酶	261
12.2.2 人工变构体系	262
12.3 镊子和叉子	264
12.3.1 镊子	264
12.3.2 叉子及相关体系	267
12.4 主-客体体系的可控组装与解离	268
12.4.1 引言	268
12.4.2 光诱导过程	269
12.4.2.1 内包结物	269
12.4.2.2 金属离子的释放	272
12.4.3 氧化还原诱导的过程	273
12.5 蛋白质和 DNA 中的构象变化	275
12.5.1 蛋白质折叠-展开过程	275
12.5.2 基于 DNA 的分子机器	276
12.6 分子锁	278
12.7 金属离子的移位	279
12.7.1 氧化还原驱动过程	279
12.7.2 酸-碱驱动过程	280
12.8 离子通道	281
12.8.1 自然界中的金属离子通道	281

12.8.2	天然质子泵	282
12.8.3	人造离子通道	284
12.8.3.1	引言	284
12.8.3.2	天然模板通道的修饰	284
12.8.3.3	基于生物聚合物的离子通道	285
12.8.3.4	合成的离子通道模型	285
	参考文献	287
第 13 章	旋转运动	298
13.1	概述	298
13.2	天然旋转发动机	298
13.3	杂化旋转马达	300
13.4	人造系统中的旋转运动	301
13.4.1	化学驱动过程	301
13.4.2	光化学驱动过程	306
13.4.3	电化学驱动的过程	309
13.4.4	其他效应	311
	参考文献	311
第 14 章	分子穿梭-脱梭运动	315
14.1	概述	315
14.2	化学驱动	317
14.2.1	基于金属-配体键的体系	317
14.2.2	基于氢键和静电作用的体系	318
14.2.3	基于给体-受体相互作用的系统	321
14.3	电化学驱动	328
14.4	光化学驱动	333
14.5	非均相系统	338
	参考文献	341
第 15 章	线性运动	350
15.1	概述	350
15.2	自然界的线性马达	350
15.3	轮烷的线性运动	353
15.3.1	引言	353
15.3.2	化学驱动的体系	355
15.3.2.1	基于金属络合物的轮烷	355
15.3.2.2	基于氢键和给体-受体相互作用的轮烷	356

15.3.2.3 基于葫芦脲的轮烷·····	359
15.3.2.4 基于环糊精的轮烷·····	362
15.3.3 电化学驱动的体系·····	363
15.3.4 光化学驱动的体系·····	366
15.3.5 展望·····	372
15.3.5.1 三站点轮烷·····	372
15.3.5.2 作为传输载体的轮烷·····	372
15.4 与表面和固载物连接的轮烷·····	374
15.4.1 表面上固定的光转换轮烷·····	374
15.4.2 轮烷基电子器件·····	376
参考文献·····	376
第 16 章 索烃的运动 ·····	382
16.1 概述·····	382
16.1.1 合成·····	382
16.1.2 旋转过程·····	383
16.1.3 功能化的索烃·····	386
16.2 化学驱动的运动·····	389
16.3 电化学驱动的运动·····	393
16.4 光化学驱动的运动·····	399
16.5 展望·····	400
16.5.1 索烃中的单向环旋转·····	400
16.5.2 轮索烃 (rotacatenane) 分子齿轮·····	400
16.6 与表面和固相载体相连接的索烃体系·····	402
16.6.1 索烃的二维排列·····	402
16.6.2 基于索烃的固态器件·····	403
参考文献·····	406
附录 ·····	411
术语表·····	411
缩略语·····	424
主题索引 ·····	428

第 1 章 基本概念

1.1 分子水平的器件和机器

器件是为了一个特定的目的而发明并组装出来的东西^[1]，而机器，无论是简单的还是复杂的，都是利用、转换、施加或传输能量的机械装置的组合^[1]。在日常生活中我们广泛使用肉眼可见的器件和机器。通常来讲，器件和机器是设计出来用以实现某一特定功能的元件的组装体。组装体的每一个元件都有特定的功用，而整个组装体作为一个特定的器件或机器则有着更为复杂和有用的功能。举例来说，一个电吹风（产生热风）的功能是由一个开关、一个加热器和一个电扇通过电线组装在一个合适的框架中共同表现出来的。一个宏观器件和机器的概念在某种简单的意义上可以被扩展到分子水平（图 1.1）^[2]。一个分子水平的器件可以被定义为由许多不连续的分子元件（比如一个超分子结构，见下页）组装起来，用以体现一特定功能的组装体。每个分子元件有着其特定的功能，而整个超分子组装体由于各个不同分子元件的协同作用则表现出了一个更为复杂的功能。一个分子水平的机器则是一种特定类型的分子水平的器件，其中各个分子元

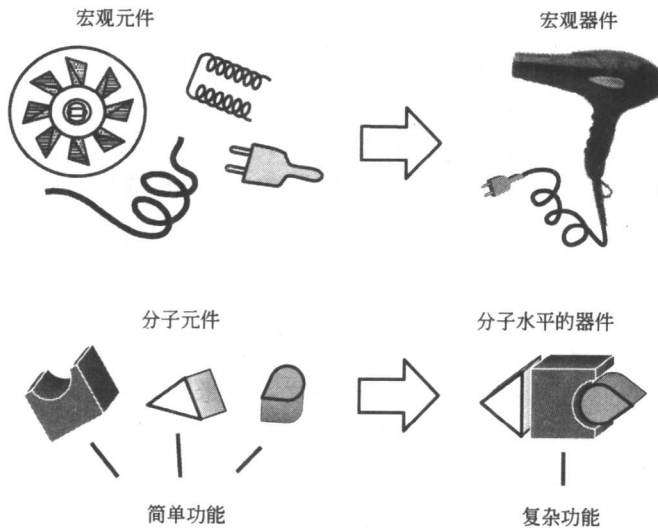


图 1.1 分子级微型器件的示意图

件的相对位置可以因某些外界刺激而改变^[3]。分子水平的器件和机器的运作需经由电子和（或）核的重排，与宏观的器件和机器一样，它需要能量进行操作，用信号与操作者进行交流。

器件和机器的概念扩展到分子水平是很有意义的，这不仅是基础性的研究，而且对纳米科学和技术的发展也是很有意义的^[3,4]。

1.2 器件和机器的微型化

文明的进步经常与新型器件和机器的建造有关系。在过去的 50 年中，已有许多不同的新的器件和机器被用来采集、处理、显示和存储信息。信息技术的杰出发展与用来建造这类器件和机器的结构的逐步微型化密切相关。第一台电子计算机由 18000 个电子管组成，重达 30t，其体积占据了整个一间屋子，每次修理平均要花费 5.6h^[5]。而现今技术最好的微处理器包含超过 4000 万个晶体管，将来其数量还会增加^[6]。或许会有这样的疑问，我们是否确实需要不断制造更小的东西。其答案是未来的微型化不仅是使计算机的尺寸减小，能力提高，而且希望开拓新的能引起医药革命、生产许多以提供新型能源的新材料以及解决环境污染问题等技术领域的新途径^[7~10]。

1.3 “化大为小”的方法

器件和机器的元件结构微型化的方法目前主要采用“化大为小”（top-down）的手段。物理学家和工程师们通过照相制版及相关技术来制备越来越小的器件，这种技术到现在为止已经发展到了极限。早在 1965 年 G. E. Moore^[11]就曾预言，每过 3 年：①器件尺寸就会缩小 33%；②芯片内存的规模将会提高 50%；③在一个芯片上元件的数量将会增加 4 倍。迄今为止，这一预言是正确的，激光技术在“化大为小”方法中常常被用于微电子装置的微型化（MEMS）^[12]。一个“化大为小”方法的典型例子如图 1.2 所示，公牛精美轮廓的图像通过双光子的光聚合作用得到^[13]。然而，依靠硅基芯片的现代电脑技术很显然会很快达到其物理容量的极限^[14,15]，特别是当光刻法的线性极限尺寸小于 100nm 的阶段。这个尺寸按日常经验的标准来说是非常的小（大约为人头发的千分之一），但是相对于原子尺寸（十分之一纳米）和分子尺寸（纳米）来说则很大。因此，正如理查·费曼（Richard P. Feynman）^[16]在 1959 年的一次美国物理会上的精彩演讲中所述，进一步的微型化“还有很大的空间”，但是“化大为小”的方法似乎不能开拓更多的机会。为了实现进一步的微型化，科技需要寻找新的途径。