

定性与半定量 物理学

(第2版) © 赵凯华



高等教育出版社

04/325

2008

定性定量 物理学

(第2版) © 赵凯华



图书在版编目 (CIP) 数据

定性与半定量物理学 / 赵凯华. —2 版. —北京: 高等教育出版社, 2008. 1

ISBN 978 - 7 - 04 - 022522 - 8

I. 定… II. 赵… III. 物理学—高等学校—教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 182252 号


策划编辑 高 建 责任编辑 王文颖 封面设计 张申申 责任印制 朱学忠

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010 - 58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landaco.com.cn
印 刷	北京新丰印刷厂	畅想教育	http://www.widedu.com
		版 次	1991 年 10 月第 1 版
开 本	787 × 960 1/16		2008 年 1 月第 2 版
印 张	15.5	印 次	2008 年 1 月第 1 次印刷
字 数	260 000	定 价	22.80 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 22522-00



第二版序

本书第一版付梓至今已有一十七载，脱售有年，然而问津者仍陆续不绝。至今未再版者责任在我。在这十几年内，物理学的某些领域，特别是宇宙学，发展迅猛。现在看起来，原书的一些陈述和观点就显得落伍了。要再版，不能不作较大的修订。本人近年来忙于教材的写作，未暇顾及于此。这次再版，除了补充一些我近年来收集的有趣的例子外，有的章节几乎重写了。

本书第一版问世以来，曾得到同行们的赞誉，特别是已故王淦老赐函鼓励，作者铭谢在心，谨记于怀，永志不忘。青年学子对本书的反映，本人搜集不多。不过从选修此课的情况看，常有学生因年级低，不大能懂，来年再选一遍。对此课的这种热情，令人感动。

本书内容涉及面很宽，非作者学识所及，错误在所难免。敬祈读者指正。

赵凯华

2007年8月

序

这本小册子的内容，原本是作者在北京大学物理系从1987到1989年开设的一门选修课，听众有二年级以上的本科生和研究生，应《大学物理》编辑部之约，从1988年10月起，又在该刊上连载了两年零三个月，前后为期凡二十有七。现略事修订增补，汇成此册。

读者不难看出，本书与CUSPEA考试（我国赴美研究生考试，1980—1988）有着密切的渊源。书中不少例题直接采自CUSPEA试题。应当说，我国的物理教学，模式是比较单一而古板的。欧美各大学（特别是CUSPEA）试题风格的清新颖异、内容的丰富多彩，使我们耳目为之一新。不少教师正从中吸取营养，改进自己的教学。这些试题涉及的知识面极广，所用的方法也比较特殊（从我们传统的眼光看，也许还不大“正规”）。若仅“就题论题”地讲述，会给人以头绪纷乱、支离破碎之感。用一定的线索把有关的知识和方法尽可能地贯穿起来——这便是作者的初衷。如果书中的某些片断，有幸被纳入现行的常规教学体系之内，作者将因此而感到欣慰。错误之处，祈读者不吝指教。在作者备课、讲课期间，北大王正行和王稼军曾给予协助；在本稿连续刊出于《大学物理》时，北师大胡镜寰，做了大量校订工作，北师大天文系李宗伟在刊出后又对一些天文数据和提法给予指正，作者在此一并表示感谢。

作者谨识
燕园·马年仲冬

内 容 简 介

本书是北京大学物理系赵凯华教授在选修课讲义基础上编写的,全文曾在《大学物理》杂志(1988年第10期到1990年12期)刊载,深受广大读者欢迎。经作者增补修改后汇集出版。第一版出版于1991年,根据科学的最新发展,在第二版中某些章节做了较大的修改和补充。

作者在书中把基础物理知识生动地、巧妙地与当今物理学前沿如粒子物理、生物物理、天体物理、对称性分形等等新鲜概念与课题结合起来,与物理学思想、方法及其历史发展结合起来,古今纵横、上下环宇,格调清新、启人心智,是物理爱好者和师生们不可多得的参考资料,也有利于物理教学改革的探索。

本书内容有绪论及对称性原理、量纲分析、数量级估计、自然界的物理学等四章,并有较丰富的例题。

本书可作为各类高等学校本科和专科物理专业及学习物理课程的其他理工农医专业大学生、研究生、有关教学或科研人员的参考读物,也可供中专、中学教师及物理爱好者阅读或作进修之用。

目 录

绪 论	1
第一章 对称性和对称自发破缺	5
§ 1. 对称性的概念源于生活	5
§ 2. 什么是对称性?	9
§ 3. 各种对称性	10
3.1 镜像对称性	10
3.2 转动与平移	11
3.3 标度对称性	17
3.4 时间平移和反演	22
3.5 置换对称性	25
3.6 联合变换下的对称性	25
§ 4. 对称性原理及其应用	26
4.1 因果关系和对称性原理	26
4.2 电磁学中对称性原理的应用	28
4.3 原因不能唯一确定结果时的对称性原理	30
§ 5. 宇称不守恒与 CPT 变换	31
5.1 马赫的困惑	31
5.2 宇称不守恒	32
5.3 CP 守恒与破坏	33
5.4 麦克斯韦方程的 C、P、T 对称性	34
§ 6. 对称性自发破缺的概念和实例	35
6.1 什么是对称性的自发破缺?	35
6.2 力学中对称性破缺的实例	37
6.3 朗道二级相变理论	38
6.4 宇宙早期的真空相变与暴涨	39
6.5 耗散结构	41
6.6 一个蚁群觅食模型与自发涌现效应	42
6.7 时钟对称破缺与报酬递增律经济理论	44
§ 7. 重子-反重子的不对称	46
7.1 重子-反重子不对称及其可能的解释	46
7.2 质子衰变的实验检验	48
7.3 阿尔法磁谱仪	49
§ 8. 生物界的左右不对称性	50

8.1 巴斯德的发现	50
8.2 生物分子的手性	51
8.3 生物分子的手性起源问题	53
§9. 对称性意味着不可分辨性	54
参考文献	56
第二章 量纲分析和标度律	57
§1. 量纲分析基本原理及例题	57
1.1 Π 定理	58
1.2 例题	59
§2. 量纲法的进一步讨论	68
2.1 单位制中基本量个数的多寡有什么影响?	68
2.2 物理方程中常量的压缩与恢复	70
§3. 模拟试验与物理相似性原理	73
3.1 流体的相似性原理之一——管道流动问题	73
3.2 流体的相似性原理之二——运动物体受阻问题	74
3.3 静力学模拟的相似性原理	78
3.4 原子弹爆炸火球	79
§4. 生物界的标度律	82
4.1 大人国、小人国的比喻	82
4.2 单一特征长度的标度律	83
4.3 圆柱的标度律	85
§5. 生长的标度律与自组织	88
5.1 生长的标度律	88
5.2 斐波那契数列与黄金分割	89
5.3 植物的花序与斐波那契数列	91
5.4 植物的叶序与黄金分割	98
参考文献	99
第三章 数量级估计	100
§1. 物理世界的层次和基本物理常量	100
§2. 原 子	107
§3. 原子核	113
§4. 分子和化学键	118
4.1 氢分子	119
4.2 共价键的饱和性和方向性	121

4.3 共价键结合能	123
4.4 离子键	126
4.5 金属键	128
4.6 范德瓦耳斯键	129
4.7 氢键	130
4.8 分子的振动、转动和电子能级	133
§ 5. 物 性	134
5.1 固体和液体的密度与原子间隔	134
5.2 固体的弹性模量与液体的压缩性	135
5.3 溶解与汽化	137
5.4 液体的表面张力	142
5.5 渗透压	146
5.6 固体的热膨胀系数	148
§ 6. 地球、太阳和月亮	150
参考文献	154
第四章 自然界的物理学	155
§ 1. 人类生存的环境	155
1.1 大气	155
1.2 海洋和潮汐	159
1.3 地球的内部结构	165
1.4 地球的辐射收支	167
§ 2. 太阳系	171
2.1 类地行星	173
2.2 类木行星	178
2.3 小星体带	185
2.4 矮行星	187
2.5 彗星	188
§ 3. 恒星和其它天体	192
3.1 恒星	192
3.2 白矮星、中子星和超新星爆发	197
3.3 黑洞	203
3.4 类星体和红移	207
§ 4. 宇宙	210
4.1 从哥白尼原理到哈勃定律	210
4.2 大爆炸宇宙模型	215

4.3 广义相对论宇宙动力学	218
4.4 为什么宇宙曾经暴胀?	223
4.5 Λ CDM 模型	227
4.6 “热寂说”的终结	236
参考文献	237

绪 论

物理学推理性强,逻辑严密,实验测量可达极高的精度。这些都是物理学与其它学科相区别的突出特点。物理学是一门高度量化的学科,它使人类对自然界的认识获得了长足而深入的进步,成为自然科学中公认的成功范例。在历史上,作为一门量化的严密学科为物理学赢得声誉的,首先是牛顿力学。牛顿的万有引力定律把苹果落地和月亮的运动法则统一起来,不仅成功地解释了由开普勒总结的行星运行规律,由此定律还推算出月球运动的若干细节,说明了岁差、章动和潮汐等现象。众所周知,牛顿力学最辉煌的成就要算对一颗新行星(海王星)的预言,理论推算的误差只有 1° 。①近代物理学高度精确的计算和测量更加令人赞叹不已。1957年量子电动力学计算的电子反常磁矩值为 $\mu = 1.0011614\mu_B$ (μ_B 为玻尔磁子),它与以前所得的精密实验值 $\mu = (1.001167 \pm 0.000005)\mu_B$ 符合到第六位有效数字!到了1984年,物理学家竟然能写出它的十二位有效数字: $\mu/\mu_B = 1.001159652193$ 。更有甚者,1987年H. Dehmelt小组测得的这一量值的最新结果是

$$\mu/\mu_B = 1001159652187.9(4.3) \times 10^{-12},$$

达到了13位有效数字。H. Dehmelt为此分享了1989年诺贝尔物理学奖。遗憾的是,物理学中这样高度量化的研究方法未能推广到其它学科,如生命科学和社会科学。这是因为在这些领域中的现象要错综复杂得多,理论家所需的素材(观察资料)很少可能有物理学中那样的精度,因而他们无法建立起较为完善的数学模型。

由于量化的方法在物理学中获得如此的成功,在这个领域中“定性”一词往往成了带贬义的字眼儿。卢瑟福有句名言:“定性就是量化不够”。在一些人的心目中,作定性的分析是出于不得已,只有高度量化才是最重要的。其实这种认识是片面的,事情并不尽然。我们可以举些例子来说明。

设想图0-1中的灰色线 $f(x)$ 是一条实验曲线,黑色线 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 是建立在两个不同模型上的理论曲线,它们都与实验曲线拟合得不太好。从定量的意义上说, $f_1(x)$ 的曲线稍好些,因为偏差

① 参看:A. P. 弗伦奇. 牛顿力学. 郭敦仁, 何成钧译. 北京: 人民教育出版社, 1980, 第八章, 616.

$$\int |f_1(x) - f(x)| dx < \int |f_2(x) - f(x)| dx.$$

但从定性的趋势看, $f_2(x)$ 比 $f_1(x)$ 更接近 $f(x)$. 为了进一步探索这实验现象的机理, 你更倾向于哪个理论模型呢? 我猜大多数理论物理学家宁愿要 $f_2(x)$, 认为它背后的理论模型更接近真正的机理, 尽管它给出的定量结果要比 $f_1(x)$ 的偏差大. 讲这个例子, 我不是要证明什么, 只是想揭示人们心理上的一个自然倾向, 即乐于承认曲线的定性趋势所具有的内在价值.

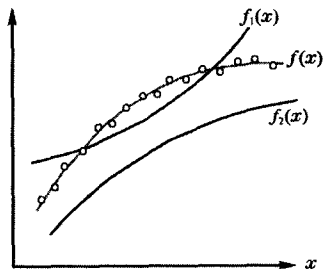


图 0-1 理论曲线
与实验曲线的拟合

作为另一个例子, 我们考虑圆电流在自身所在平面内的磁场分布. 学过普通物理的人都知道, 圆心处的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (\text{定义为 } B_0), \quad (0.1)$$

式中 R 为圆线圈的半径, I 为电流强度. 圆心以外的地方情况怎样呢? 原则上我们是可以根据毕奥-萨伐尔定律来计算的, 甚至其结果还可以用解析式表达出来. ① 在圆内 ($r < R$),

$$B(r) = \frac{2B_0}{\pi} \frac{1}{1-k^2} \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k'^2 \sin^2 \theta} d\theta, \quad (0.2)$$

在圆外 ($r > R$),

$$B(r) = \frac{2B_0}{\pi} \left[\frac{k'}{1-k'^2} \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k'^2 \sin^2 \theta} d\theta - k' \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-k'^2 \sin^2 \theta}} \right], \quad (0.3)$$

这里 $k=1/k'=r/R$, r 为场点到圆心的距离. 以上两式包含了第一、第二类全椭圆积分, 它们的数值可以在数学手册中查到, 也可以利用它们的级数展开式作数值计算. 所得数值结果还可以用曲线表示出来, 如图 0-2. 不过, 如果不是某种实验装置或工程技术设计的需要, 看了(0.2)和(0.3)式那样的复杂公式, 我们对磁场的分布能形成些什么概念呢? 图 0-2 中的曲线倒能给我们一个大概的印象, 它告诉我们, 由圆心趋向圆周 ($r \rightarrow R$) 时, $B \rightarrow \infty$; 过渡到圆外, B 突然反向, 随着 $r \rightarrow \infty$, B 从 $-\infty \rightarrow 0$. 在 $r=R$ 和 ∞ 区间 r 的渐近行为是怎样的? 回答这个问题, 可以取(0.2)和(0.3)式在 $k \rightarrow 1, k' \rightarrow 1$ 和 0 时渐近表达式. 但我们可以有更简单的办法: 当场点趋近圆周时, 圆弧可看成是无限长的直导线, 所以在这一里 B 的渐近行为是反比

① 参看: 彭中汉, 蔡领. 大学物理. 1983(11): 12.

于 $R-r$ 的; 当 $r \rightarrow \infty$ 时, 圆线圈看起来像个磁偶极子, 从而 B 渐近地反比于 r^3 。仔细的验证会告诉我们, (0.2) 式和 (0.3) 式的渐近行为确实如此。如果不是这样, 那就是什么地方推导错了, 故而用这种取极限情形的方法还可检查繁复计算的对错。如果我们根本就不需要定量的结果, 利用上述取极限的方法, 我们可立即得到磁场分布的一个大致概念。这种取极限情形的方法, 是物理学中重要的定性方法之一。讲这个例子, 我是想说明, 并非在所有的场合下繁复的计算都是必要的,

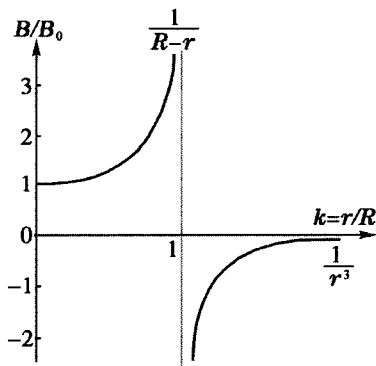


图 0-2 圆电流在自身所在平面内的磁场分布

的, 有时定性的方法来得更为有效。即使需要作严格的理论计算时, 这种取极限情形的方法是检验所得理论公式对错的重要方法, 是每个理论工作者必须学会的方法。

我国物理教学的优良传统, 是课程的内在联系紧密, 论述条理清晰, 逻辑严整。这样可使学生获得的知识在结构上不是零散现象的罗列和定律的堆砌, 而是一个有层次、有组织的有机整体。正像近代庞大计算机软件那样, 这种知识结构有利于“读出”和“写入”, 其中还有各种层次的“子程序”、“功能块”, 调用起来也很方便。然而, 我们总觉得, 在我们的教学中还缺少点什么。问题在于, 我们的学生不是亲自编写“程序”的人, 他们不知问题的来龙去脉, 不体会独立创新工作中的甘苦。每逢遇到问题, 我们的学生总喜欢用系统的理论工具去作详尽的定量计算, 或利用现有的仪器埋头于细致的测量, 尽管有的问题本可以通过简单的思考就能得到定性的或半定量的结论。下面我想引用一段费因曼的故事, 这直接摘自他的一本回忆录。^① 故事描述他第二次去日本时遇到的情况:

在我所到的地方, 每位搞物理的人都告诉我他们正在做什么, 我也愿意同他们讨论。通常他们先一般地讲讲问题的所在, 然后就开始大串大串地写起公式来。

“等一下”, 我说: “这个一般性问题有特例吗?”

“怎么会没有? 当然有。”

^① R. P. Feynman, *Surely You're Joking, Mr. Feynman!* W. W. Norton & Co. 1985, p. 223. (中译本: 爱开玩笑的科学家——费曼。吴丹迪等译。北京: 科学出版社, 1989.)

“好吧，请给我举个例子。”这是为了我自己，因为我不能普遍地理解任何事，我心中必须怀着一个特例，注视着它如何发展。起初有些人以为我有点迟钝，以为我不懂，因为我问了许多“愚蠢的”问题，如“阴极是正的还是负的？”“阳离子往这边走，还是往那边走？”

但是过了一会儿，当这位朋友停在一串方程式中间想说点什么的时候，我却说：“请稍等一下，这儿有个错！那不可能是对的！”

此人检查一下他的公式，过了一会儿，果真发现了错误。他很惊讶，想道：“真见鬼，这家伙怎么搞的，开初他简直不懂，现在怎么会在这团乱糟糟的公式中找出个错儿？”

他以为我在跟着他一步步地作数学推演，其实不是那么一回事。我心中有了特殊的物理实例，这正是他企图分析的问题。我从直觉和经验知道这件事的性质。所以当公式告诉我们说这件事应如此这般时，我一感到不对头，就跳起来说：“等等，那有个错儿！”

这样，在日本，没有物理实例我就不懂，也不能和任何人讨论问题。但他们经常给不出实例来。即便给出来，也往往是个弱例，就是说，这问题本可用简单得多的分析方法来解决。

因为我总不问数学方程，而是问他们想搞的问题的物理实例，我的访问被总结到一篇油印的文章里，在科学家中间传阅。文章的标题是《费因曼的轰炸和我们的回击》。

当一位成熟的物理学家进行探索性的科学研究时，常常从定性的或半定量的方法入手。这包括对称性的考虑和守恒量的利用、量纲分析、数量级估计、极限情形和特例的讨论、简化模型的选取，以至概念和方法的类比，等等。他们通过定性的思考或半定量的试验，力求先对问题的性质、解的概貌取得一个总体的估计和理解。否则一下子陷入细枝末节的探讨，往往会一叶障目，只见树木，不识森林。这种定性或半定量的分析问题的能力，对初学者来说却是最难不过的。因为这要靠一定的物理直觉和洞察力，没有相当的经验 and 功力是做不到的。但是，青年学生应从头培养这种能力。平常除了刻苦学习之外，还应勤于思考（但不是空洞的思辨），以寻找各种事物之间的内在联系。经过定量计算或精密测量之后，对所得的某些结果人们未必就知道其所以然。从整体上作了定性思考之后，才有可能抓住问题的本质。有意识地这样锻炼下去，久而久之，就会融会贯通。孔夫子曰：“学而不思则罔（无知），思而不学则殆（危险）。”哲理名言，似乎也适用于这层意思。

第一章 对称性和对称自发破缺

§ 1. 对称性的概念源于生活

所谓“对称”，通常多指左右对称。人体本身就有近似的左和右的对称性(图 1-1^①)。多数动物(如哺乳动物、鸟类、鱼类)的外形具有左右对称性,但也有例外,例如蜗牛,其螺壳或左旋或右旋,左右不对称。还有

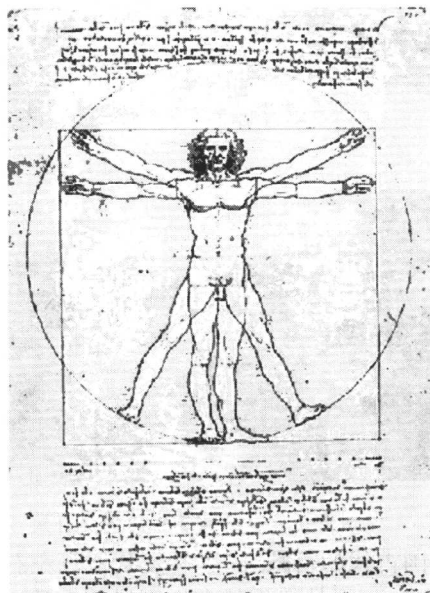


图 1-1 列昂纳多·达·芬奇的比例匀称人体草图

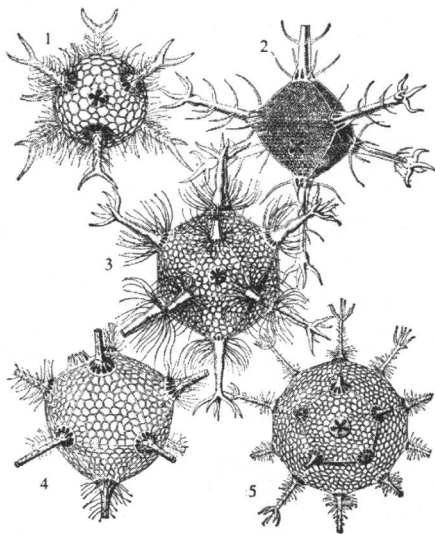


图 1-2 放射目生物骨架具有正多面体的对称性

一些动物具有其它对称性,如图 1-2 所示的放射目海洋生物具有正八面体对称性、二十面体对称性和十二面体对称性。

各类建筑,特别是很多民族的古代建筑,都有较高的左右对称性。我

^① 这张有名的图称为列昂纳多·达·芬奇的 Vitruvian man。Vitruvius 为古罗马的建筑师,他认为庙宇等建筑物各部分之间的比例必须遵照人体的比例,因为人体是完美的典型。他相信,人体的臂与腿的长度可与完美的几何图形——圆和正方形相拟合。他的这一未完成的理念吸引了文艺复兴时代艺术家。有人试图把手足的端点置于与圆外切的正方形的顶点上,结果因臂太长腿太短而失败。达·芬奇解决了这个问题,如图所示,在他的图形里正方形只有底边与圆相切。Vitruvian man 的匀称比例成为后来艺术家们奉行的圭臬。

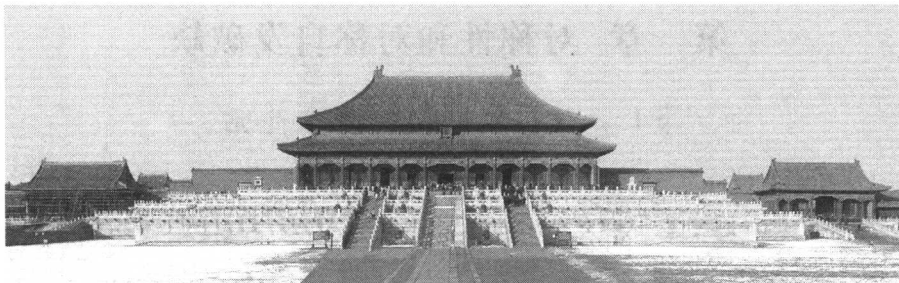


图 1-3 太和殿左右对称



图 1-4 园林建筑布局错落有致

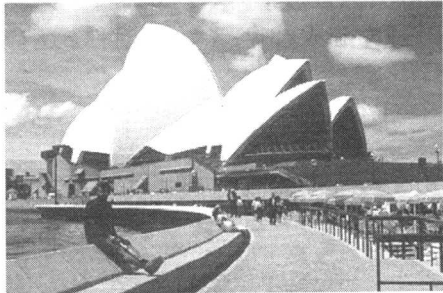
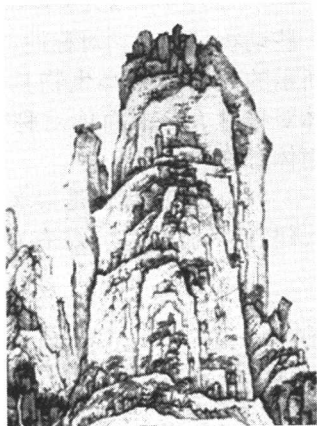
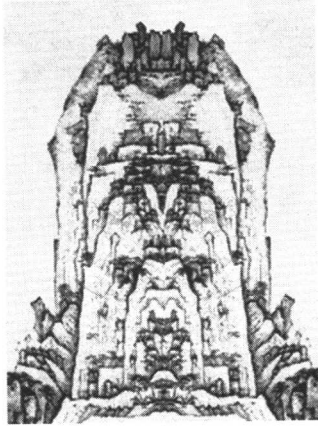


图 1-5 澳大利亚悉尼歌剧院

国古代的宫殿、庙宇和陵墓建筑左右高度对称,以凸现其庄重、神圣(图 1-3);而园林建筑的布局则错落有致,于不对称中见对称(图 1-4);而某些现代派的建筑师则极尽其不对称之能事(图 1-5)。图 1-6a 是画家弘仁的一



a



b

图 1-6 弘仁的画及其对称化

幅原作,图 1-6b 把它对称化了,你觉得哪一张更美? 看起来,后者似乎还



图 1-7 慈禧太后



图 1-8 英国戴安娜王妃

用意到平仄，都要求有一定的对称性或反对称性。图 1-9 所示为昆明大观楼的楹联，这是我国最长的对联，上下联各 90 字，共 180 字。上联写东南西北四方，环顾滇池周边的地理；下联写汉唐宋元四朝，追忆征服云南的历史。这里是空间对时间。上联“莫孤(辜)负四围香稻万顷晴沙三春杨柳九夏芙蓉”赞赏良辰美景之怡人，下联“只

有点阴森恐怖之感。

照相术刚传入我国时，皇帝太后们拍照时都正襟危坐，左右对称，以示其威严(图 1-7)；而在西洋，王妃的照片很不对称，显得轻松活泼(图 1-8)。所以审美观点是随着时代而变迁的，也因地因人而异。

楹联是我国的一种独特的文化，从遣词、



图 1-9 昆明大观楼楹联