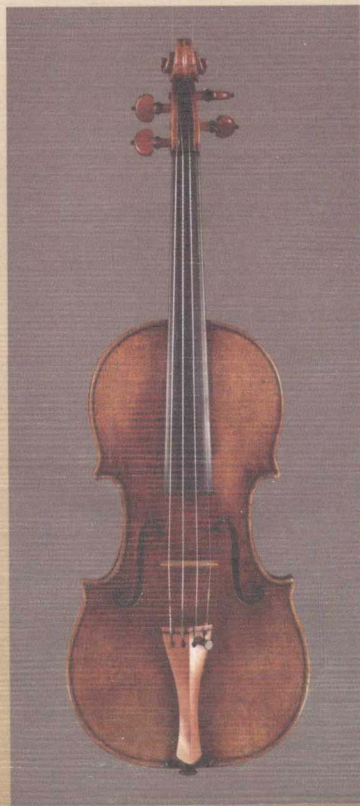
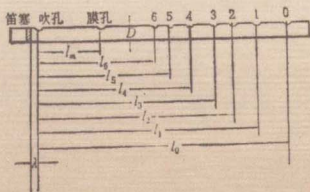


音乐中的科学



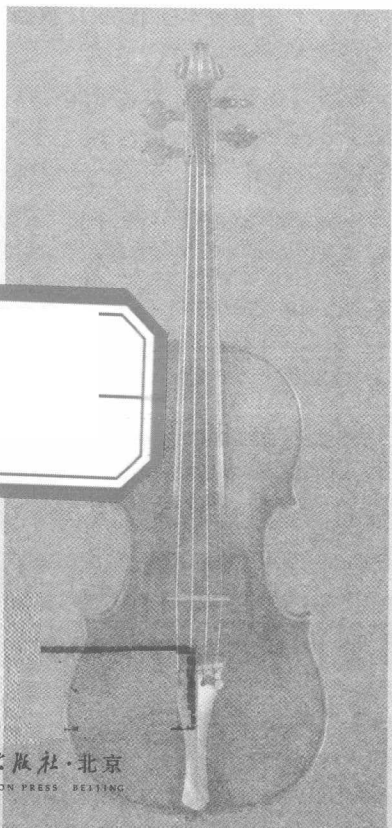
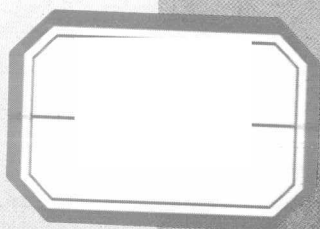
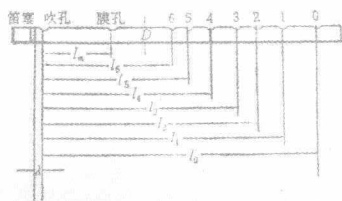
高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

HIGHER EDUCATION PRESS

Yinyue Zhong de Kex

音乐中的科学

武际可 著



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS · BEIJING

图书在版编目(CIP)数据

音乐中的科学 / 武际可著. — 北京: 高等教育出版社, 2012. 6
(大众力学丛书)
ISBN 978-7-04-035654-0

I. ①音… II. ①武… III. ①声学—普及读物 IV.
①042-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第115778号

策划编辑 王超 责任编辑 王超 封面设计 赵阳 版式设计 于婕
插图绘制 尹莉 责任校对 陈旭颖 责任印制 刘思涵

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街4号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	北京人卫印刷厂	网上订购	http://www.landracom.com
开 本	850 mm×1168 mm 1/32		http://www.landracom.com.cn
印 张	6.25	版 次	2012年6月第1版
字 数	150千字	印 次	2012年6月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	21.00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 35654-00

中国力学学会《大众力学丛书》

总 序

科学除了推动社会生产发展外，最重要的社会功能就是破除迷信、战胜愚昧、拓宽人类的视野。随着我国国民经济日新月异的发展，广大人民群众渴望掌握科学知识的热情不断高涨，所以，普及科学知识，传播科学思想，倡导科学方法，弘扬科学精神，提高国民科学素质一直是科学工作者和教育工作者长期的任务。

科学不是少数人的事业，科学必须是广大人民参与的事业。而唤起广大人民的科学意识的主要手段，除了普及义务教育之外就是加强科学普及。力学是自然科学中最重要的一门基础学科，也是与工程建设联系最密切的一门学科。力学知识的普及在各种科学知识的普及中起着最为基础的作用。人们只有在对力学有一定程度的理解后，才能够深入理解其他门类的科学知识。我国近代力学事业的奠基人周培源、钱学森、钱伟长、郭永怀先生和其他前辈力学家非常重视力学科普工作，并且身体力行，有过不少著述，但是，近年来，与其他兄弟学科（如数学、物理学等）相比，无论从力量投入还是从科普著述的产出来看，力学科普工作显得相对落后，国内广大群众对力学的内涵及在国民经济发展中的重大作用缺乏有深度的了解。有鉴于此，中国力学学会决心采取各种措施，大力推进力学科普工作。除了继续办好现有的力学科普夏令营、周培源力学竞赛等活动以外，还将举办力学科普工作大会，并推出力学科普丛书。2007年，中国力学学会常务理事会决定组成《大众力学丛书》编辑委员会，计划集中出版一批有关力学的科普著作，把它们集结为

《大众力学丛书》，希望在我国科普事业的大军中团结国内力学界人士做出更有效的贡献。

这套丛书的作者是一批颇有学术造诣的资深力学家和相关领域的专家学者。丛书的内容将涵盖力学学科中的所有二级学科：动力学与控制、固体力学、流体力学、工程力学以及交叉性边缘学科。所涉及的力学应用范围将包括：航空、航天、航运、海洋工程、水利工程、石油工程、机械工程、土木工程、化学工程、交通运输工程、生物医药工程、体育工程等等。大到宇宙、星系，小到细胞、粒子，远至古代文物，近至家长里短，深奥到卫星原理和星系演化，优雅到诗画欣赏，只要其中涉及力学，就会有相应的话题。这套丛书将以图文并茂的版面形式、生动鲜明的叙述方式，深入浅出、引人入胜地把艰深的力学原理和内在规律介绍给广大读者。这套丛书的主要读者对象是大学生、中学生以及有中学以上文化程度的各个领域的人士。我们相信本套丛书对广大教师和研究人員也会有参考价值。我们欢迎力学界和其他各界的教师、研究人員以及对科普有兴趣的作者踊跃撰稿或提出选题建议，也欢迎对国外优秀科普著作的翻译。

丛书编委会对高等教育出版社的大力支持表示深切的感谢。出版社领导从一开始就非常关注这套丛书的选题、组稿、编辑和出版，派出了精兵强将从事相关工作，从而保证了这套丛书以优质的内容和崭新的形式亮相于国内科普丛书之林。

中国力学学会《大众力学丛书》编辑委员会

2008年4月

前言

Preface

大众
力学
丛书

英国著名学者约翰·布莱金(1928—1999)说:“人类组织声音,声音也组织人类”。这句话的意思是,音乐和人类社会有着共生共存的关系,也就是说,音乐有助于规范人类的社会行为,改变生产与生活方式,强化、提升和净化人类的经验和情感。我国春秋战国时期的著作《周礼》则说:“凡音者,生人心者也。情动于中,故形于声。声成文,谓之音。”还说:“是故审声以知音,审音以知乐,审乐以知政,而治道备矣。”贝多芬说:“领悟音乐的人,能从一切世俗的烦恼中超脱出来。”由此可见,中外古今对音乐都是很重视的。音乐不仅可以陶冶性情,还可以促进社会和谐,实在是善莫大焉。

音乐是科学同艺术结合的产物。在人类世代追求音乐发展的过程中出现过许多伟大的演奏家、歌唱家、作曲家和指挥家。在人们享受他们的演奏、歌唱、音乐的同时,别忘记,在他们背后还有许多科学家来揭示声音、音乐和各种乐器的奥秘;在他们的背后有一串伟人的名字:毕达哥拉斯、管仲、伽利略、牛顿、伯努利、达朗贝尔、沈括、亥姆霍兹、朱载堉、韦伯等。

音乐背后的科学问题,首先是力学问题。因为声音的产生和传播本身就是一个典型的力学问题,乐器的研制和改进,无论是

管乐器还是弦乐器，抑或是其他乐器，都离不开深入的力学知识。进一步说，音乐不仅与力学有关，还是与力学、数学、物理学、生理学、心理学、电子学、计算机科学等多学科密切相关的。不仅如此，就是在今天，也不能说音乐和音响背后的科学道理都完全清楚了。特别是在研制新的音响设备中，在歌唱的计算机模拟中，还存在许多困难问题等待研究解决。

本书并不是一本音乐艺术的专著，也不是一本讲述音乐背后科学原理的严肃的专门学术著作。因为笔者既不是音乐家，也够不上是一个合格的音乐声学家。不过笔者由于对音乐的业余爱好，以及喜爱对音乐背后的科学道理进行探求和思索，写成了这二十多篇科普文章，如果对喜爱音乐而又爱好科学的青少年朋友能够有一点启示，产生进一步追根问底的兴趣，笔者就很满足了。这些文章中有一部分曾在科学网笔者的博客上发表过。有少数几篇在笔者以前的科普小册子《拉家常·说力学》中刊出过，因为内容也是关于音乐的，所以经过一些补充，又收入本书了。

因为笔者不是这两方面的内行，所以说几句外行话，或者说错，也是难免的，敬请读者批评指正。

武际可

2012.5

目 录

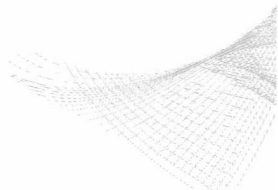
Contents

- 1 漫话周期运动
——从天体的运行和乐器的发声说起 / 1
- 2 谈声音 / 16
- 3 漫话共振 / 29
- 4 律学和十二平均律 / 41
- 5 千锤打锣一锤定音 / 52
- 6 有关编钟的遐想 / 60
- 7 谈鼓 / 67
- 8 律管 / 74
- 9 管乐器漫谈 / 81

大众
力学
丛书



- 10 怎样制作笛子 / 92
- 11 从弹棉花说起 / 98
- 12 说说弦乐器 / 106
- 13 弓弦乐器里面的学问 / 116
- 14 丝不如竹，竹不如肉 / 125
- 15 为什么在洗澡间里唱歌特别好听 / 132
- 16 声音大小的度量
——分贝 / 137
- 17 亥姆霍兹振子的妙用 / 144
- 18 音乐爱好者是怎样发起“烧”来的 / 149
- 19 湍流和声音 / 157
- 20 闲话键盘乐器 / 162
- 21 让我们的兴趣更宽一点！ / 171
- 22 音乐科学研究大事记 / 176



1

Chapter

漫话周期运动

——从天体的运行和乐器的发声说起

我们周围环境中存在着的周期变化的事物，从远古时期起就引起了人们的兴趣，吸引人们去观察、探索和研究。早在两千多年以前，我国战国时期的思想家管仲在《管子》一书中就曾有“天，覆万物，制寒暑、行日月、次星辰，天之常也。治之以理，终而复始”的论述。

西方哲学家亚里士多德（公元前 384—前 322）在他的名著《物理学》中给出了圆周运动的精确定义，并且说：“圆运动先于直线运动，因为它比较单一、完全”，“循环运动是一切运动的尺度”。

民间谚语“三十年河东，三十年河西”概略描述了河床周期性变化的规律。《三国演义》的第一句话“话说天下大势，分久必合，合久必分”，描述了社会现象的周期变化。《汉书·礼乐志》中有一句话：“阴阳五行，周而复始。”则将周期变化总结为一般的规律。

在众多周期变化的事物中，有两类特别引起人们的兴趣，一类是日月星辰即天体的周期变化，另一类是乐器的发声。

乍看起来，这两类事物是如此的不同。前一类是自然的，而

后一类则是人造的；然而，它们都是周期运动，而且在今天看来都是最易于观察到的周期运动。它们都是同人类生活息息相关的。

中国历代统治者虽然视科学技术为“奇技淫巧”，但却对这两类现象的研究表现出特有的偏爱。在官修的二十五史之中，总是以显著的篇幅描述天体运行的历与乐器发声的律，合称律历志。这种偏爱是基于对这两个领域重要性的认识。天体运行不仅关系草木荣枯的周期变化，还关系人类作息，农事周期，而且在他们看来，“凡帝王之将兴也，天必见祥于下民”（吕不韦语），“治道失于下，则天文见于上”（陆贾语），即人世的治乱都可以从天体运行上看出来。对于乐则认为“乐也者，天地之和也”，“可以善民心”，“审声以知音，审音以知乐，审乐以知政，而治道备矣”（《礼记》）。天象和音乐竟有这么大的作用，难怪历朝历代都设有管天的钦天监，管乐的乐府、教坊等专门机构，组织专门的研究队伍，委派专门的官吏掌管。不少封建统治者本身就是这方面的专家：唐明皇和三国时代的周瑜是音乐家，明代王子朱载堉是律学家，清朝皇帝康熙是通晓天文和乐律的专家。

在1957年人类首次发射人造天体之前，日月星辰本身变化不大。但是描述它的观察资料日益丰富，描述它运行的理论、学说不断发展。至于乐器，从史前到现在，种类日益繁多、功能日臻完善、内容也不断丰富。

考古发掘证实，我国约八千年前就已有笛，而七千年前就已有埙这种古老的吹奏乐器；之后有钟、磬、鼓、琴、箫等。到了周朝，见于记载的乐器即有70多种，仅《诗经》中提到的乐器就有29种之多。《周礼》将它们大致分为8类，即匏（笙类）、土（埙或缶等）、革（鼓类）、木（板类）、石（磬类）、金（钟类）、丝（琴类）、竹（管类）。唐代乐器空前发达，加上从外域传来的，据记载有300种以上。

胡琴的出现是乐器史上的大事，它是弓弦乐器的始祖。北宋

的大学问家沈括(1031—1095)在《梦溪笔谈》中有“马尾胡琴随汉车”的名句,这表明宋代已有了胡琴。《元史·礼乐志》中有正式的胡琴记载,说:“胡琴,制如火不思,卷颈、龙首,二弦用弓揆之,弓之弦以马尾。”西方的小提琴等弓弦乐器是从东方传去的,历经改进到15—16世纪才定型为现代的式样。

电子琴是20世纪才出现的,它是把近代非线性电子管振荡器用于乐器制造的产物。1920年,一位苏联学者发明了差频式电子琴。由于那时电子管体积大,性能也不理想,虽几经改进,在60年代之前大多没有实用价值。六七十年代之后,由于三极管、集成电路的出现和振荡器性能的改进,新的电子琴可以模仿任何乐器的音色。一架电子琴在手,演奏起来可以达到一个乐队的效果。电子琴目前仍方兴未艾,它的前程无量。

天体运行和乐器振动的各种理论发展,其内容之丰富、道路之曲折,绝不是在一篇短文中所能详尽的。这里,我们仅将它作一简要的回顾。大致是:天体运动精确化描述,乐器的线性振动理论,天体动力学模型及乐器非线性振动几个重要阶段。

早期,无论是东方还是西方,自然科学都是从观察天体运行迈出的第一步。尽管天体运行相对简单,但还是经历了漫长的岁月。从对日月星辰运动的观察,不断积累资料、完善理论模型,从地心说到日心说,在西方经过从托勒密、哥白尼、第谷、开普勒、伽利略,经过了剑与火的斗争,才迎来了17世纪牛顿力学的诞生。牛顿力学的第一个胜利便是成功地、精确地解释了行星运行的轨迹。关于天体运行的争论至此似乎画上了一个句号。牛顿力学也是近代精密科学的开始。它使人类形成了绝对时间、空间,运动的速度、加速度、质量以及力的概念,并能用这些概念及运动定律列出描述物体运动的运动方程。这些都为乐器发声理论的研究奠定了基础。

乐器的发声来自振动。振动也是一种周期运动,不同的是它的周期很短。天体运行的周期是以年为单位的。而乐器振动周期

只有百分之一秒左右，以 C 调的 la 为例，频率是 440 Hz，约是天体运行周期的 10^{-10} ，所以比起天体的周期运动来说更难于观测。

事情还得从意大利科学家伽利略(1564—1642)谈起。传说他小时候在教堂随大人作弥撒，对于圣经毫无兴趣，却不时去观察教堂大吊灯的摆动，这导致他后来对单摆进行实验，得到了单摆周期等时性的结论，并且得到了周期同摆长关系的物理定律。基于摆的等时性，才产生了近代意义下的计时装置——摆钟。用它度量其他运动，在技术上实现了亚里士多德的“循环运动是一切运动的尺度”。有了这个尺度，人们可以进而观察像乐器振动这样较快的运动了。

在众多的乐器中，弦乐器最易于研究。法国僧人马森(M. Mersenne, 1588—1648)进行了弦振动的实验，得到了弦长与振动频率的关系。之后有拉格朗日、达朗贝尔、亥姆霍兹等对弦、板和其他各种乐器进行了大量实验与理论研究。1877 年英国人瑞利的巨著——《声学理论》集前人研究之大成，概括总结了弦、板、管等的振动与发声，就是现今关于线性振动理论的主要内容。

在我国历史上，这类问题的提出还要早。例如，在《周易》中有“同声相应，同气相求”的记载，可谓共振原理的萌芽。在《汉书》等中有弦乐器音阶的“三分损益”的记载，它简单说明了音阶同弦长的关系。北宋沈括在《梦溪笔谈》中记载了琴瑟上调弦时的共振实验，他说：“欲知其应者，先调诸弦令声和，乃剪纸人加弦上，鼓其应弦，则纸人跃，他弦即不动。”明朝王子朱载堉在世界上首先提出了十二平均律。这些贡献无疑都是了不起的。但由于量的精确化不够，没有形成精确的表述方式，所以甚至连振动的周期、频率、声速等基本概念也不是首先在中国准确形成的。

20 世纪以前的研究结果应当说是相当丰硕的了，然而在所

有的研究中，还没有涉及一个乐器发声的根本哲理性的问题。声由物体振动产生，而一般振动，如击鼓所形成的振动，总会由于材料的内耗和介质的阻尼衰减而最终停止。那么一个持续的声音或振动将是怎样产生的呢？例如，埙、笛、笙，只要对吹口连续吹气，且气足够长，声音即可延续足够长；弓弦乐器，只要弓足够长，持续拉动，弦即不断振动。即是说，单调的口风和弓子的平动怎能产生周期运动呢？直到 19 世纪末，人类还没法回答这一问题。

综前所述，我们观察客观世界，无论是自然界，还是社会现象，总是充满了循环往复。老子把“道”的实质表述为“周行而不殆”^[6]。就是说，客观世界永远是循环往复而无休止地运行着的。日月星辰，寒来暑往，周而复始，往复不已；生物的世代交替，世道的兴衰，股票市场的振荡起伏，也是在无穷无尽的振荡中发展着。在物理和力学中研究的声波、水波、弹性波、光波、电磁波，在时间和空间上都是周期变化着的。

现在我们要问的是，客观世界本来就是这样充满周行不已的运动呢，还是由更为简单的单向变化转变而来的呢？既然一些科学家认定，宇宙本来是由一个起点，经过大爆炸而来的，从逻辑上推论，我们自然可以想象，宇宙起源的最初一定是只有简单的单向的变化，而随后才发展出许多往复循环的复杂花样，以至于，这种周行变化充满宇宙的任何一个角落“而不殆”。另外一些人曾经认定，宇宙的初期是处于混沌初开，天地混一，也是很简单的一种运动，后来才发展出复杂的情形，重者为地，轻者为天。宇宙到底是怎样发展到现在这个模样的，这实在是一个很有意思的问题。

要普遍地论证这件事，还是有一定困难的。而且就目前我们看到的文献，也没有普遍严格的论证。不过我们可以从简单的现象来加深这种理解。

我们先来考虑几个简单的例子。图 1.1 是自来水龙头没有拧

紧时的情形。开始，水从龙头狭缝里单向地连续往外流，不过由于水的表面张力的阻挡，水没有办法连续地流下去。等到积累到一定程度，在重力作用下，达到表面张力无法支持才整滴地下落，而形成周期性的滴答。

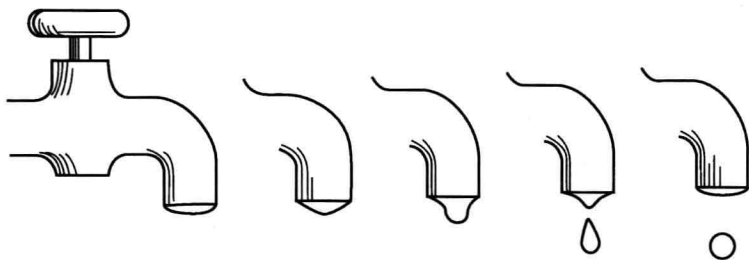


图 1.1

图 1.2 是一个标准的间歇虹吸的示意图。水管 2 连续地往容器 1 中注水，只有水面高过 h_2 时虹吸管才把容器中的水很快泄流，而当水面低于 h_1 时虹吸断流。整个看起来，这个设备是把水管 2 单向连续的流动转变为水管 3 断续而又周期性的流动了。

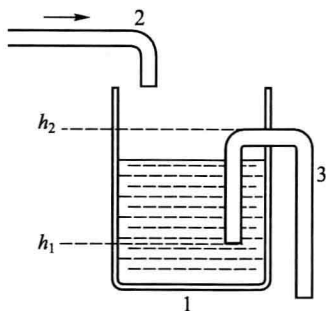
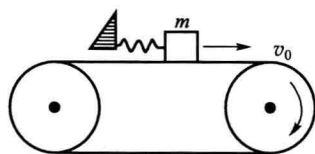
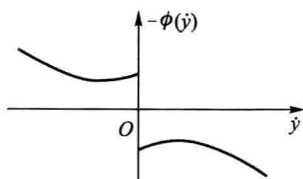


图 1.2

第三个例子如图 1.3 的装置。一端系在弹簧上的滑块 m 被搁置于以速度 v_0 运动的传送带上，弹簧的另一端固定。



(a)



(b)

图 1.3

在人们想象中，由于传送带的运动，滑块会随着传送带向前一段距离，在新的位置上达到新的平衡。其实不然，最先滑块是静止在传送带上的，当传送带向前运动一小段距离后，由于摩擦力作用，滑块相对于传送带还是静止地跟随运动，不过弹簧被拉长了一小段。当传送带继续向前，摩擦力不能与弹簧继续伸长增加的弹力平衡时，滑块就不能够再前进而与传送带产生了相对运动。由于滑块与传送带之间的摩擦力 $\phi(\dot{y})$ 是与这个相对运动速度 $\dot{y}$ 的大小有关(如图 1.3(b))，而且当 $\dot{y}$ 不为零时，它比最大静摩擦要小一点。所以这时，滑块就会迅速后退，在弹簧与传送带的共同作用下，就会来回摆动。形成通常所说的摩擦振动。

以上三个例子都具有把单向的简单运动变为往复运动的效应的。我们可以总结它们的共同特点是都具有：(1) 单向的简单运动；(2) 阻碍单向运动能量积累的机制；(3) 能量释放的机制。可以把这三点简单归结为：单向运动和擒(阻碍)纵(释放)机制。在图 1.1 中的单向运动是水管的进水，其阻碍机制是表面张力，释放机制是在重力作用下使表面张力破裂而水滴下落。在图 1.2 中的单向运动是水管 2 的连续进水，阻碍机制是水位下落到 h_1 ，释放机制是虹吸管 3 的快速泄流。而在图 1.3 中，单向运动是传送带的匀速运动，阻碍机制是弹簧拉住滑块，释放机制解释为滑块所受的摩擦力达到最大静摩擦后的滑脱。简单说来，它们都是把一种简单的单向变化在一擒一纵之间变为往复的或周期的变化。在以往的研究中，人们把这类现象统一归结为一类力学现象，称之为“自振”^[7]。

可不要轻视我们刚才考查的这三个简单的例子。其实从机理上说，成千上万种类的简单的单向运动变为往复运动都和它们一样，具有相同的原理。摆钟把发条的能量转变为钟摆不间断的摆动、蒸汽机把单向送来的蒸汽转变为活塞的往复运动，汽锤、心脏的跳动、电铃的鸣响等等，都是这个道理。

单向的风可以激发树枝的往复摇动，可以引发树叶的沙沙作

响，可以吹皱一池春水激起波浪，可以使无垠的平沙形成空间周期分布的沙丘和沙波(图 1.4)。进而凡是两种相互之间有相对运动的介质，在一定条件之下，都会出现这种界面之间的随空间分布的周期现象。在技术上，蒸汽机单向地进汽，会驱动活塞周期往复运动，同样，内燃机、汽轮机也是把单向运动变为往复运动。

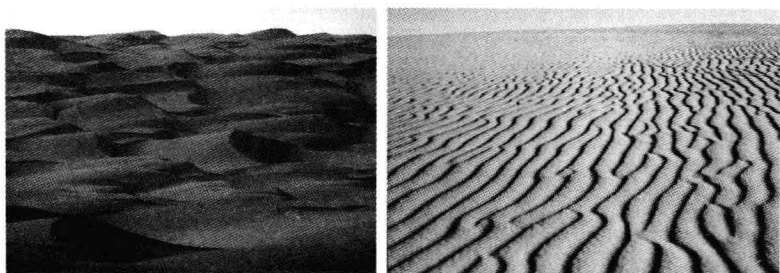


图 1.4 沙丘和沙波

地震活动的平静与再现、火山的沉寂与复活都具有某种往复规律。在一定程度上，集权社会的镇压与暴动及改朝换代、股票的涨落以及经济危机也具有一定的周期。它们的规律也有类似特点。

在弦上单向移动的弓可以使小提琴和二胡的弦产生往复振动而发出美妙的声音，单向的鼓风可以使风琴、排箫、笛子、黑管和唢呐等也发出美妙的声音，此外各种语音、鸟兽鸣叫声都是单向的气流引起的发声。进而，一切摩擦噪声，也都是物体之间的摩擦力和物体的弹性力交互擒纵而产生的。

熟悉流体力学的人自然会联想到，在均匀来流绕过圆柱之后，产生的漩涡是周期性交错排列的，这就是所谓的卡门涡街。水平夹在两层温度不同的平行金属板之间的流体，当下面金属板的温度比上层金属板的温度高过一定值后，流动会形成沿空间周期分布的胞腔，称为白纳腔。这些都是由于流体具有黏性的缘故。