

漫 谈 波

〔美〕 J.R. 皮尔斯 著

黄高年 李 煊 译

李 融 校

国防工业出版社

内 容 简 介

本书专讲波的物理本质。著者使用最基本的数学叙述了一切波动过程（机械波、声波和电磁波）所共有的基本规律。

本书读者对象是物理学、工程物理学、数学力学、电子学和其它许多专业的大学生，以及在各个科学技术领域工作的广大青年科技工作者和自学者。

ПОЧТИ ВСЕ О ВОЛНАХ

J. R. Pierce

Издательство «Мир» 1976

*

漫 谈 波

〔美〕J. R. 皮尔斯 著

黄高年 李 焯 译

李 融 校

责任编辑 刘树兰

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 $\frac{1}{32}$ 印张 6 125千字

1983年5月第一版 1983年5月第一次印刷 印数：0,001—7,200册

统一书号：15034·2505 定价：0.64元

作者简介

J. R. 皮尔斯是加利福尼亚理工学院 电 工 学 教 授。他 1910 年生于美国，1933 年毕业于加利福尼亚理工学院，1936 年在该院获得博士学位。此后，皮尔斯在美国“贝尔电话实验室”工作了 35 年，主要从事电真空器件的研制工作。他有 84 项发明，其中一部分与行波管有关。皮尔斯是卫星通信领域里的先驱者，在他的思想指导下，建立了卫星通信系统“回声 1 号”和“电星”。皮尔斯的著作在十本以上，其中几本（例如专著《行波管》、科普读物《电子与波》和《量子电子学》等）已译成中文。皮尔斯是九所大学的名誉博士，美国科学院院士。

译者序

波的概念是许多科学技术领域中的主要概念之一。本书用最低限度的数学，深入浅出地阐述了一切波动过程（机械波、声波和电磁波）所共有的基本规律。本书既不是一本专著，也不完全是科普读物。它写得通俗，但要求读者懂得物理学和高等数学。本书不但对在各个科学技术领域工作的广大中青年科技工作者是一本有价值的读物，而且对正在学习物理学、电子学和其它许多专业的大学生，也是一本有助于深刻理解一切波动过程的物理本质的参考书。

本书作者 J. R. 皮尔斯是我国广大读者所十分熟悉的。他长期从事通信理论、电子光学、行波管和卫星通信等方面的研究工作，是无线电电子学方面著名科学家之一。皮尔斯提出了行波管和皮尔斯电子枪等一些重要装置的理论。他的专著《行波管》以及《电子与波》、《量子电子学》和《波与信息》等科普读物都已译成中文。《漫谈波》和作者的其它几本书一样，也充分反映了皮尔斯在物理学方面的思维方法。因此，本书对于研究哲学、心理学和科学方法论的人也是很有益的。

本书是根据俄译本翻译的，限于我们的水平，错误不妥之处在所难免，希望读者批评指正。

译者

前 言

当代的物理学家和工程师们有两个有力的工具：电子计算机和数学。人们只要懂得某种装置或某一系统中的基本物理原理，即使他们所掌握的数学知识不很多，也能利用电子计算机计算出该装置（或该系统）在某一特定条件下的特性。在电子计算机问世以前最熟练的数学家也难以解决的问题，现在的青年专家们可以毫不困难地用数值算法求解出来。数学在当代起着什么作用呢？

数学像从前一样，总是充满着令人神往的诱惑力，它使那些完全献身于数学的人非常满意。可是，数学能给那些只是因为需要才来找它和只是想使用它的人以什么呢？

现在，对于使用数学的人——物理学家和工程师们——来说，只需要懂得很少一点数学就能获得问题的具体数值解答。他们甚至可以不使用复杂的函数（人们从前却不得不使用这些函数）。但是，简单的数学可以向物理学家和工程师们提供某些东西，这些东西是很难由电子计算机提供的。这里所说的“某些东西”就是对事物的理解。

由牛顿运动定律可以很方便地导出机械能和动量守恒的定律。这些定律本身是很简单的，可是它们的应用却极为普遍。这里用不着电子计算机，对于比较专门的问题才使用它们。

利用一些极为简单的数学，我们也可以获得关于波的许

多知识，这就是我希望通过这本书给予读者的东西。这本书并不向读者指明求解复杂的具体问题的最佳途径。但是它将告诉读者，题解应当具有什么样的特点。例如，当波之间有耦合存在时，本书会告诉读者，将发生什么情况？在波的能量与动量之间应当满足什么样的关系？

几年前，格·弗内斯用非常简便的方法导出了关于无线电发射的公式，这是一些熟练的数学家和物理学家们都未能办到的。这件事触动了我，使我想到还有许多与波有关的问题可以用非常简单的方法导出答案。我由于对这一问题的兴趣而写出了这本书。

在编写本书时遇到过一些困难的问题，为了阐明这些问题，我伤透了脑筋。作者十分感谢格·哈乌斯教授和奇·巴巴士教授的帮助，还要特别感谢莫泽清博士，他阅读了本书的两种手稿，提出了许多很有价值的意见。

J. R. 皮尔斯

目 录

第一章	波的概念	1
第二章	正弦波 它们的强度和功率	10
第三章	媒质与模式	16
第四章	相速和群速	19
第五章	矢量表示法和复数表示法	32
第六章	耦合模式	38
第七章	耦合模式 (另一种解)	47
第八章	空间谐波与耦合	50
第九章	耦合与非均匀媒质	58
第十章	波与力	71
第十一章	波在运动媒质中的能量和动量	88
第十二章	旋转媒质中的能量和动量矩	98
第十三章	参量放大器	105
第十四章	极化	112
第十五章	平面波和准平面波	124
第十六章	天线与衍射	139
第十七章	标量波动方程	153
第十八章	辐射	163
第十九章	结束语	179
作者简介		185

第一章 波 的 概 念

波——这是物理学中最重要、最普遍的概念之一。人类自远古以来就开始与波打交道了。列昂纳尔多和文奇在十五世纪曾对波作了如下的描述：“波比水跑得快得多。因为在许多情况下，当波远离其发生地以后，水仍停留在原处，就象五月里在涅瓦河上由风激起的水波那样，波似乎在原野上奔驰，而涅瓦河却并没有离开自己的位置。”显然，列昂纳尔多当时就已经认识到，当波从一个地方向另一个地方运动时，水并不随波而去。

现代物理学中到处都遇到波：地震学所研究的地震波；海洋、湖泊、池塘中的浪涛和涟漪；空气中传播的声波；绷紧的弦上或石英晶体（被用来稳定无线电发射机的频率）中的机械振荡波；电磁波（包括光波和由无线电发射机辐射并由无线电接收机接收的无线电波）。还有什么波呢？也许还应当算上表示几率的波，它们在量子力学中被用来描述电子、原子或更复杂的物质形式的行为。

那么，波到底是什么东西呢？波既不是泥土、水或空气，也不是钢铁、弦索或石英。波只是在这些物质中传播。十九世纪的物理学家曾认为，为了传播电磁波，真空中必须充满以太。但是，这只是物理学家随意想象出来的，所以没过多久，以太就仅成为那些因无法解释的物理现象而焦躁不安的学者们用来自我安慰的东西，不再能够对现象本身作出真正

的解释。而当涉及量子力学中的波时，物理学家们甚至不能对波提出与通常所说的波的概念一致的阐释，虽然所有物理学家们都一致认为，为了正确地预言实验结果，须要应用这些波的概念。

看来我们最好不谈什么叫做波，而谈关于波我们能说些什么。这样将不会发生误解。我们可以认为，波是某种状态或某种过程，在对各种不同的物理系统都适用的普遍形式中可以用数学方法描述。如果我们发现某种现象中有波，我们就有可能对这种现象发表许多议论，并可以预言许多东西，即使我们不完全清楚新发现的波是如何产生和如何传播的也无妨。例如，当初还不知道空间有电磁波的时候，人类就已经认识到光的波动性和由此得出的许多重要结论。而且，当有人提出光的物理本质是电磁波的想法时，许多物理学家虽然很清楚光是某种形式的波，但却不承认这种解释。

我们可以利用熟悉的简单的例子来研究波的最重要的性质。然后可以用适当的词句写出对任何波（无论是在什么地方遇见的波）都适用的一些普遍原理。

我们可以立刻说出波的一个性质。与任何运动物体一样，波在运动时也把能量从一个地方带到另一个地方。

从太阳往地球上传播的光和热的电磁波具有大约每平方米一千瓦的功率。太阳能电池可以把射到它上面的太阳能的大约十分之一转变成电能。太阳能电池可以用作通信卫星和其它宇宙装置的能源。太阳辐射的电磁波的能量在绿色原野上转变为植物的化学能。当我们燃烧树木或煤炭时，就把这种能量释放出来并加以利用。电视台发射的电磁波，功率可达数十千瓦，但每一台电视接收机只接收到发射功率中极其

微小的一部分能量。海洋中的波涛以极其巨大的力量冲击海岸，在暴风雨的时候，海浪可以移动数吨重的岩石。人的声音声波的功率非常之小。在所有这些情况下，波都把能量从一个地方传送到另一个地方，虽然被传送的能量的数值是很不相同的。

与运动着的物体一样，运动着的波也具有动量。当物体吸收或反射波的时候，波也推动物体。通常，波的动量并不象波的能量那样引人注目。然而，1951年5月在杂志 *Astounding Science Fiction* 上终于发表了萨乌恩杰尔斯的文章《宇宙航帆》。该文声称，原则上可以利用大面积船帆所受到的光压来推动宇宙飞船在太阳系中飞行。因此，在研究密实物体的特性和行为时，物理学家们必须考虑声波和光波的压力。

最后，为了使波从一个地方传播到另一个地方，需要一定的时间。这就是说，波具有有限的速度。光波运动得非常快，速度达每秒30万公里。声波在空气中传播得较慢，其速度大约是每小时1240公里，或者说每秒344米。声波在水中和固体中传播得较快，水面波则运动得比较慢。

能量、动量和速度是波的最重要的特性。波还有一个令人惊讶的特性，这就是很多种波都显示出线性。

如果往池塘里扔两块石头，则由石头激起的两组圆形水波互不影响。一组水波在通过另一组水波时不发生变化。两个波相交时的图形可能有点复杂，但是这的确是两组相互独立地扩散开去的圆形水波。当两个人对话时，他们声音的声波并不互相影响，而是互相穿透。微弱星光的光束并不受明亮的太阳光辉的影响，虽然它们在射向地球的路途中曾与太

阳光相交过。

如果一种波不影响其它波的通过,则这种波称为线性波,因为这些波的总和等于各个波的简单叠加。如果两个线性波的波峰高度分别为 H_1 和 H_2 , 则它们相交时的最大高度为 $H_1 + H_2$ ——线性关系。波峰高度为 $2H$ 的线性波可以看作是在同一时间处于同一位置的两个波峰高度为 H 的线性波。线性波的速度与波峰高度或波的强度无关,因为幅值大的波可以简单地看成是幅值小的波的叠加。

严格的线性波是很少的。很多种波(例如声波)在通常强度的情况下非常接近于线性波,所以,如果把它们当作线性波来处理,则我们差不多可以得到完全精确的结果。本书所叙述的几乎全是线性波。

回声是大家所熟悉的。如果站在某个直立的表面(例如大楼正面或陡峭的悬崖)前呼喊一声,则声音将从坚硬的表面反射回来,就像皮球从墙壁弹回来一样。但也有不同之处。

我们刚才已经讲过一个不同点。如果同时向墙壁抛掷许多球,则这些球可能相互碰撞,相互“弹射”,就像从墙壁弹回一样。而线性波(音量适中的声波是线性波)是可以相互穿透的。例如,如果在一个墙壁光滑的大厅里大喊一声,就可以听到从墙壁多次反射的回声,像听不清楚的絮语声。声学中有一个概念叫做交混回响时间——经过多次反射以后,声音的功率或能量下降到原来的百万分之一所需的时间。

在波反射的现象中还有一点与弹性物体(例如皮球)“反射”不同的地方。弹性物体具有一定的形状,在反射以后弹性物体仍保持原状。而波在反射以后的情况怎样呢?

在反射时波的形状可能发生很大变化。如果波射到一个

粗糙的表面上，它就可能散射，即向很多方向反射。如果皮球落到高低不平的表面上，它可能向完全意料不到的方向反射，但不能同时向各个不同的方向反射。我们打算在此阐述关于波反射的全部复杂问题，只准备说明一种重要而又简单的特殊情形。

图 1.1 的曲线示出一个正在趋近某表面的波。它表示压力、电场或绷紧的弦的位移随 z 方向的距离而变化的情况。假设这条曲线整个以速度 v 向右 ($+z$ 方向) 运动，并撞到一个理想的反射表面上。那么，反射波将是什么样的呢？

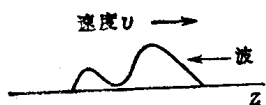


图 1.1

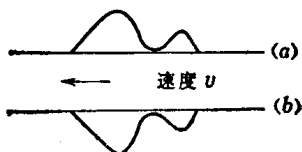


图 1.2

图 1.2 示出两种简单的情况。反射波自右向左运动，并且具有翻转的侧面。这是很容易理解的。先达到反射表面上的那一部分波当然先向后反射。但是，在这种情况下反射回来的波可以是图 1.2 中 (a) 所示的形状，也可以是 (b) 所示的形状。(a) 所示的波翻倒过来就是 (b) 所示的形状。如果入射波的压力高于平均值，则反射波 [(b) 所示] 的压力就低于平均值。(b) 所示反射波的情况正是如此，原来的正电场变成了负的。如果是弦索，则原来是向上的位移将变成向下的位移。这是什么意思呢？

设想有一个电压波沿输电线行进。如果电线终端开路 [如图 1.3(a) 所示]，则反射波将如图 1.2(a) 所示。如果

电线终端短路〔如图 1.3(b) 所示〕, 则反射波将如图 1.2(b) 所示。为什么?

如果电线在反射点短路, 则在该点的电压应当等于零。因此, 在反射过程中, 入射波与反射波之和应当始终为零。所以, 在反射过程的每一瞬间, 反射波始终应当与入射波相同但符号相反。

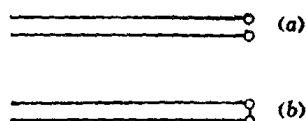


图 1.3

(a) 开路线; (b) 短路线。

我们再看一个沿着绷紧的弦索传播的、具有横向位移的波。如果弦索终端固定在一个固体上, 则由弦索终端反射的波应当是图 1.2(b) 所示那种形状的波。当用手指弹动吉他的琴弦时, 波就在吉他琴弦的两个终端之间往返奔驰。波从每一个终端多次反射。每次到达终端时, 波的运动方向都要改变, 并且反射波也取相反的符号。

波每经过两次反射再到达琴弦的一端时, 都具有初始的方向和初始的形状。如果弦长为 L , 则琴弦上产生的波应当在通过路程为 $2L$ 时又回到初始状态, 即在两端各反射一次后重又具有初始的运动方向和初始形状。如果波的速度是 v , 则波每秒钟将在 $2L$ 的距离上奔驰 f 次, 即

$$f = \frac{v}{2L} \quad (1.1)$$

f 称为频率, 它决定琴弦音调的高低。如果把手指放在使琴弦自由部分的长度缩短到 $1/2$ 的那个品的上方, 用手指把琴弦压向指板, 音调就会提高一倍。音调提高八度, 相当于频率加倍。

半音的高度比等于 2 开 12 次方。吉他指板上各品的位置就是依据这样的关系而确定的。从反响板上的弦马到指板上任何两个相邻品之间的距离的比值等于

$$\frac{L_2}{L_1} = 2^{1/12} = 1.05946 \quad (1.2)$$

如图 1.4 中所示。

波沿钢琴或吉他琴弦传播的速度与琴弦的拉力以及琴弦单位长度的质量有关。琴弦绷得愈紧，则波速愈大，音调愈高；琴弦愈沉重，则波速愈慢，音调愈低。钢琴上音调低的琴弦是用金属丝绕成的，其目的就是要使琴弦较重，以降低波速和音调。

在这一章中我们谈到了波的一些一般性问题，并且稍详细地叙述了波的反射问题。后面我们还将再讨论这些问题。例如，

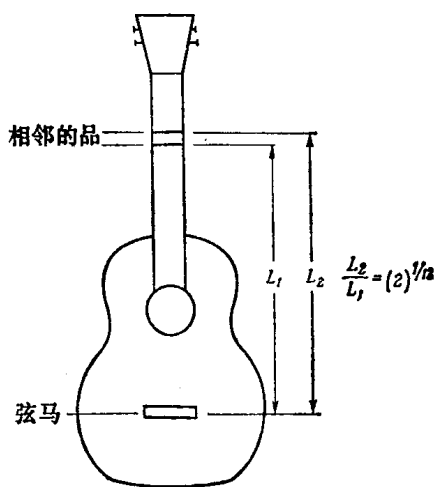


图 1.4

我们将会知道波有两种不同的速度：相速和群速。我们还将发现，关于波动量的概念并不很简单。我们还将阐明，只有在正弦波这种特别简单的情况下，才容易给能量、动量和速度的概念下定义，尽管其它类型的波可以看作是若干正弦波叠加的结果。

今后我们还将由那些已经确定的波的特性推导出某些

结论。

在超短波波段的无线电系统和雷达系统中，常利用定向耦合器使波从一个波导传输到另一个波导。我们确信，不必研究电磁波不同于其它波的那些特点，我们就能懂得这些装置的工作原理。

某些类型的扩音器带有喇叭，我们将告诉读者关于喇叭频率特性的某些重要知识。

在通信卫星和其它一些超短波通信系统中，为了放大发射的信号使用了行波管。在行波管中，超短波辐射输出的能量取自电子注。我们将使读者确信，不必深入研究电子注中波的特点，而只要一般地研究波的能量和动量并研究在任何运动媒质中的波的能量，就能理解这种放大机理。

为了放大非常弱的超短波信号，常使用参量放大器。参量放大器的作用是基于电路中的某个参量（电感、电容、介电常数或波速）随时间而变。我们可以用非常简单的方式说明，强非线性波如何能放大弱线性波，并迫使它们随距离而增强。

我们还将懂得，为什么无线电天线能辐射定向波，并将确定超短波接收天线能接收发射天线辐射功率的多大一部分。

我们还将知道，关于由比平面波运动得更快的物体（例如在介质内运动的电子或在水面航行的船舶）所辐射的功率的某些知识。

因此，在本书的各章节中，我们将既讨论波的基本性质，也讨论波的这些性质在极其不同场合下的实际应用。

习 题

1. 设波的形状不是如图 1.1 所示的光滑曲线, 而是简单的矩形波。试画出两种情况〔图 1.2(a) 和图 1.2(b)〕下波反射的各阶段。在各中间阶段的反射波应当与入射波重叠。

2. 在管子 (例如管风琴的管子) 中有声波的情况下, 如果管子终端是封闭的, 则声压由管子终端反射的情况如图 1.2(a) 所示; 如果管子终端是敞开的, 则声压由管子终端反射的情况如图 1.2(b) 所示。试按下列各种情况, 通过管子长度和波速表示出音调的高度: a) 管子两端都敞开; b) 管子一端敞开, 另一端封闭; c) 管子两端都封闭。

3. 若管风琴的管子一端敞开, 另一端封闭。为使音调高度等于 440 赫 (第一个音程中的 “6” 音), 管子的长度应当是多少?

4. 在下列两种情况下的音调高度是多少: a) 两端封闭的 3 米长的管子; b) 两端短路的 3 米长的输电线。

5. 有时候使用夹子夹紧吉他品之间的琴弦。如果用手指压紧夹子部分下方的琴弦, 使它紧贴吉他的指板, 就如同其上方不存在夹子一样, 此时将如何?

6. 高 150 米的塔用来当无线电天线。塔基附近地面导电良好。试问 “音调有多高” (谐振频率有多高)?

7. 钢琴相邻两键之频率比为 $2^{1/12}$, 即约为 1.05946。钢琴中五度音程包括 7 个半音, 钢琴的四度音程包括 5 个半音, 钢琴的三度音程包括 4 个半音。声音纯正的五度音程的频率比为 $3/2$, 四度音程的频率比为 $4/3$, 而三度音程的频率比为 $5/4$ 。试问钢琴 (或音律调节器) 的五度音程、四度音程和三度音程偏离相应的声音纯正的音程的百分数是多少?

第二章 正弦波 它们的强度和功率

在刮大风的时候去看看大海，你就会相信，波的确是很复杂的。当希望弄明白某件事情的时候，最好从最简单的事例着手。所以，我们先研究定向波，例如，绷紧的弦上的机械波，或沿同轴电缆传播的电磁波，而暂不研究在自由水面上的波，也不研究在开敞空间传播的声波或无线电波。

此外，我们首先将只研究那种在媒质所确定的方向上运动时随时间和空间的变化特别简单的波。这种波将是正弦波。

在论述这种波的时候，我们将使用能表征波在给定时间和给定位置上的强度的量。这个量可以是电场强度或磁场强度；可以是给定时间和坐标上的电压或电流；可以是声波中的压强或速度；也可以是琴弦上的横向位移或这种位移的变化速度。

无论波具有什么样的性质，也不论波的强度以什么单位计量，我们都用同一符号 S 来表示波的强度。

所以，我们将研究具有任意性质的正弦波。我们把波的传播方向称为 z 方向。因为使用余弦函数比使用正弦函数更方便，所以，正弦波的强度 S 随时间和距离而变化的规律可以用下式表示：

$$S = S_0 \cos(\omega t - kz + \varphi) \quad (2.1)$$

式中 S_0 ——常数，称为波的振幅；