

物理学

中册

[美] P. A. 蒂普勒 著

科学出版社

物 理 学

中 册

〔美〕P. A. 蒂普勒 著

李中生 韩辉翼 周炳辉

孙泽光 林 地



科 学 出 版 社

1 9 8 7

内 容 简 介

本书是美国近年来较为流行的理工科用的物理学教材。1976年初版，1982年第二版。中译本是按原书第二版译出的。

本书系统地论述了普通物理学的基本内容。全书共三十七章，分为力学、机械波和声学、热力学、电学和磁学、光学以及近代物理学六部分。每章均附有例题、思考题、练习题和综合题，全书共计二千多题。书中还附有各方面专家撰写的短文十八篇。

中译本分三册出版。中册包括第十四到二十五章：波动；干涉·衍射；温度；热功及热力学第一定律；热性质和热过程；能量的利用率；电场；高斯定律及静电平衡的导体；电势；电容；静电能及电介质；电流；直流电路。

本书可作为理工科院校物理专业和非物理专业普通物理学的教学参考书，也可供有关科技人员参考。

Paul A. Tipler

PHYSICS

(Second Edition)

Worth Publishers, 1982

物 理 学

中 册

[美] P. A. 蒂普勒 著

李申生 韩辉翼 周炳辉 译

孙泽先 林 婉 校

责任编辑 赵惠芝

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987年9月第一版 开本：850×1168 1/32

1987年9月第一次印刷 印张：15 1/8

印数：0001—4,200 字数：402,000

统一书号：13031·3892

本社书号：5239·13—3

定价：4.60元

目 录

第十四章 波动	1
14-1 波脉冲	2
14-2 波速	10
14-3 谐波	16
14-4 多普勒效应	22
14-5 弦上的驻波	30
14-6 声波的驻波	37
14-7 谐波的能量和强度	41
短文 声爆 (L. 霍奇斯)	46
*14-8 波动方程	49
第十五章 干涉与衍射	68
15-1 谐波的叠加和干涉	68
15-2 发自两点源的波的干涉	70
15-3 衍射	76
15-4 拍	79
15-5 谐波的分析与合成	82
15-6 波包	85
15-7 弥散	86
*15-8 驻波的叠加	92
第十六章 温度	103
16-1 宏观状态变量	103
16-2 绝热壁和透热壁	106
16-3 热力学第零定律	107
16-4 温标和温度计	110
16-5 摄氏和华氏温标	115
16-6 状态方程: 理想气体	116
16-7 温度的分子运动论解释	120

第十七章 热,功及热力学第一定律	131
17-1 热容量和比热	132
17-2 热力学第一定律	137
17-3 功与气体的 PV 图	140
17-4 气体的内能	146
17-5 理想气体的热容量	149
17-6 理想气体的准静态膨胀	150
17-7 能量均分	155
第十八章 热性质和热过程	171
18-1 热膨胀	171
18-2 相变和潜热	176
18-3 范德瓦耳斯方程和液-汽等温线	179
18-4 热传递	183
短文 太阳能(L.霍奇斯)	193
第十九章 能量的利用率	209
19-1 热机和热力学第二定律	210
19-2 开耳芬-普朗克表述法和克劳修斯表述法的等价性	213
19-3 可逆性	216
19-4 卡诺热机	219
19-5 绝对温标	222
19-6 熵	226
19-7 宇宙的熵变	231
19-8 熵和能量的利用率	234
19-9 熵的分子运动论解释	236
短文 发电厂和热污染(L.霍奇斯)	239
*19-10 关于熵的存在以及宇宙的熵永不能减少的证明	242
第二十章 电场	257
20-1 电荷	257
20-2 库仑定律	261
20-3 电场强度	265
20-4 电力线	270
20-5 计算连续电荷分布的电场	276

20-6	电场中点电荷的运动	284
20-7	电场中的电偶极子	286
短文	本杰明·富兰克林(1706—1790)(I. B. 科恩)	290
第二十一章	高斯定律及静电平衡的导体	304
21-1	电通量	306
21-2	高斯定律	308
21-3	导体	315
21-4	导体表面的电荷及场强	317
21-5	感应起电	321
*21-6	高斯定律的数学推导	322
第二十二章	电势	332
22-1	电势差	332
22-2	点电荷系的电势及静电势能	336
22-3	场强与电势:等势面	338
22-4	电势的计算	339
22-5	电荷分配	348
第二十三章	电容、静电能及电介质	359
23-1	电容的计算	360
23-2	电容器的并联和串联	365
23-3	电容器中的静电能	367
23-4	静电场能量	369
23-5	电介质	372
短文	静电学与静电印刷术(R. 赞仑)	377
第二十四章	电流	390
24-1	电流和电荷的运动	391
24-2	欧姆定律和电阻	393
24-3	电路中的能量	399
24-4	电传导的经典模型	404
24-5	电传导经典理论的修正	409
*24-6	导体,绝缘体和半导体	410
短文	晶体管(R. E. 小艾雷)	414
第二十五章	直流电路	426

25-1 电阻器的串联和并联	426
25-2 基尔霍夫定则	431
25-3 RC 电路	439
25-4 安培计,伏特计和欧姆计	444
25-5 惠斯通电桥	448
短文 指数型增长 (A. A. 巴特利特).....	450
答案.....	467

第十四章 波 动

目的与要求 学完本章应该做到:

1. 能够陈述: 弥散、横波、纵波、叠加、谐波、强度、强度级等的意义。
2. 了解机械波的波速度取决于哪些量。
3. 能够陈述谐波的波速 v 、周期 T 、频率 f 、波长 λ 、角频率 ω 以及波数 k 诸量之间的关系。
4. 能够导出声源或接收者在运动时的多普勒频移的表达式,并用这些表达式解题。
5. 能画出各种振动的弦和风琴管中振动空气柱的驻波图,并从这些图得出驻波的各种可能频率。
6. 理解波的强度取决于它的振幅。
7. 能够用瓦每平方米表示的强度计算用分贝数表示的强度级,或反之。

波动可以看成是能量和动量从空间的一点到另一点的传播,而没有物质的传播。在机械波,例如水波、弦的振动或声波等等之中,能量和动量是通过媒质中的扰动来传播的,而扰动的传播则是因为媒质有弹性的缘故。另一方面,在电磁波中,能量和动量是被能在真空中传播的电场和磁场运载的(电场和磁场将在以后某些章中定义)。

虽然在自然界观察到的波动现象具有无限多样性,但其中许多特征是各种波动所共有的,另外一些特征也存在于大量波动现象之中。本章和下一章我们将研究弦的振动和声波。在这里论述的很多概念和结果将在以后我们研究光和其他电磁波的各章中应用。

14-1 波 脉 冲

将一条在张力作用下绷紧的绳子像图 14-1 那样轻轻抖动一下，绳子的形状随时间作有规则的变化。抖动在绳子的自由端产生一个沿着绳子传播的隆起部分，叫做波脉冲。它是弦的一个扰动，或者说是弦的正常或平衡形状的一个畸变。此脉冲沿着弦以一定的速率传播，其速率决定于弦的性质和张力。通常脉冲在移动时不断改变其形状而逐渐展平，这种效应称为弥散(现象)，或多或少地出现于各种波动之中(真空中的电磁波除外)，但在很多重要的实例中，弥散是微不足道的，因而波脉冲近似以不变的形状传播。波脉冲在弦的另一端的结局决定于弦在该端的具体情况。如果它被固定在刚性的支持物上，脉冲将被反射(波形)颠倒着返回，如图 14-2 所示。如果支持物不是刚体，脉冲将部分地或全部被吸收掉。如果弦系于质量密度与之不同的另一弦上，脉冲将部分被传播过去而部分被反射。如果第二条弦比第一条弦重，脉冲的反

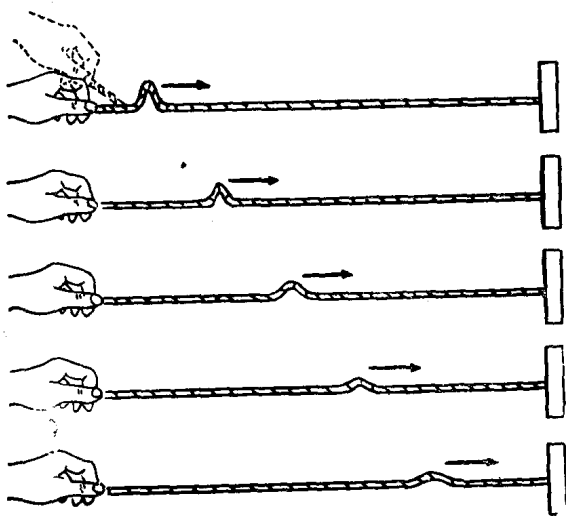


图 14-1 沿着一条绷紧的弦上向右传播的波脉冲，它在传播中形状的改变称为弥散

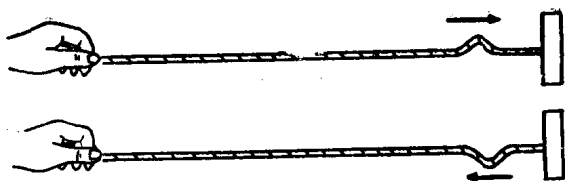


图 14-2 波脉冲到达弦的固定端(支持物为刚体)时被反射并颠倒

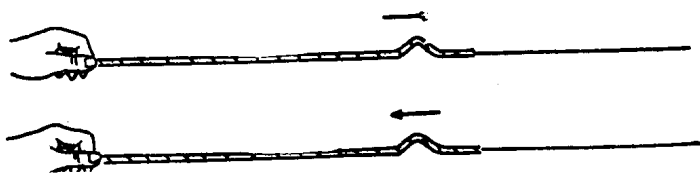


图 14-3 到达弦的自由端的波脉冲被反射但并不颠倒

射部分波形将是颠倒的;如果它比第一条弦轻,则反射的脉冲不被颠倒。如果第二条弦极轻,例如一段棉线,使原弦的端点实际成为自由端,脉冲将全部被反射而不被颠倒(图 14-3)。

沿着绷紧的弦传播的脉冲仅是波脉冲的一种: 炮声是声波脉冲,闪电是光波脉冲,潮浪是水波脉冲等等。波脉冲的一个主要特征是它有始点和终点。它是一种局部的扰动。在任何时刻只有空间的有限区域被扰动。在任一点波脉冲只在有限时间内通过。

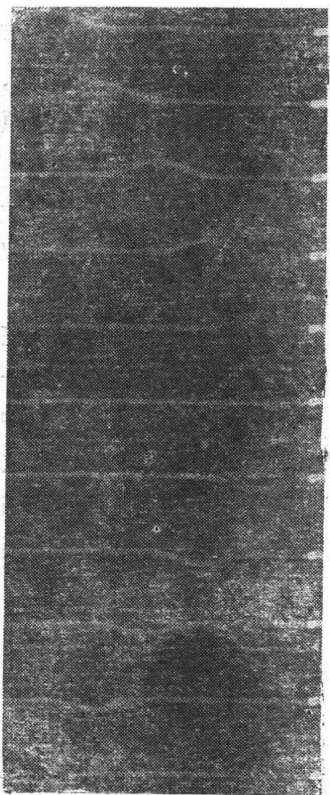
在一条拉紧的弦上挂一个重物并在弦的一端抖动一下,如图 14-4 所示,就可以演示能量和动量通过波脉冲传递的情况。当脉冲到达重物时,重物将被瞬时提起。手抖动弦的一端的动作沿着弦传播,直到另一端的重物被提起,这通常被描述为: 由抖动弦的一端的手所引起的动量沿着弦传播并被重物接收。同样,手在抬



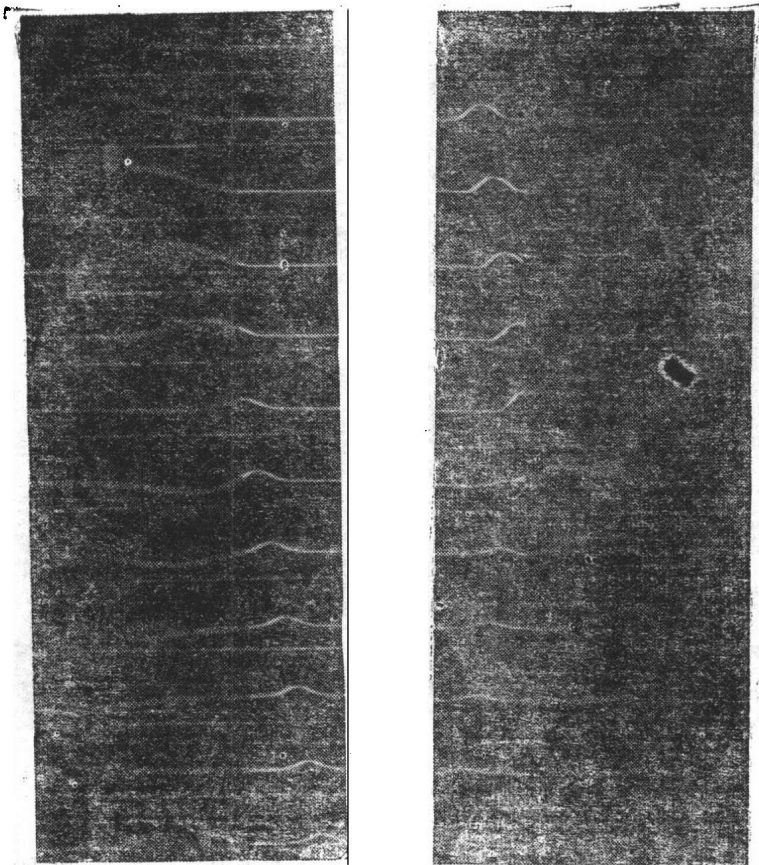
图 14-4 这里,用脉冲到达时重物被提起来说明波脉冲同时传递了能量和动量

起弦时所做的功变为弦在脉冲处的动能和势能。(后面我们将计算弦中的这一能量。)这个能量沿着弦传播并转化为提起重物的功。因此,这样一个波脉冲同时传递了能量和动量。

被传播的不是弦的质量元而是抖动一端所引起的形状的扰动。事实上,弦的质量元在垂直于弦的方向上因而也就是在垂直于脉冲传播的方向上运动。扰动与传播的方向垂直的波称为横波。横波的其他例子是由引起交变电场和磁场的振动电荷系统所产生的任何电磁波(光、雷达、无线电、电视等等)。电场和磁场矢量垂直于电磁波的传播方向。另一方面,空气中的声波则不是横



波脉冲从一固定端的反射,反射的波脉冲是颠倒的



(左图)从一个轻弹簧到达一个重弹簧的波脉冲，波部分地传播过去而部分地反射，反射的脉冲是颠倒的。(右图)从一个重弹簧到达一个轻弹簧的波脉冲，波部分地传播过去并部分地反射，在这种情况下，反射的脉冲并不颠倒

波。在声波中由物体(如音叉、小提琴弦)的振动使空气的压强和密度产生一个扰动，这个扰动就通过空气分子的碰撞在空气中传播。空气分子运动方向与此传播的方向相同。扰动方向与传播方向平行的波都称为纵波。声音是由纵波组成的。突然压缩一下弹簧，就能够在弹簧中产生一个类似于声音脉冲的纵波(图 14-5)。

水波既不完全是横波也不完全是纵波，而是两者的结合。图

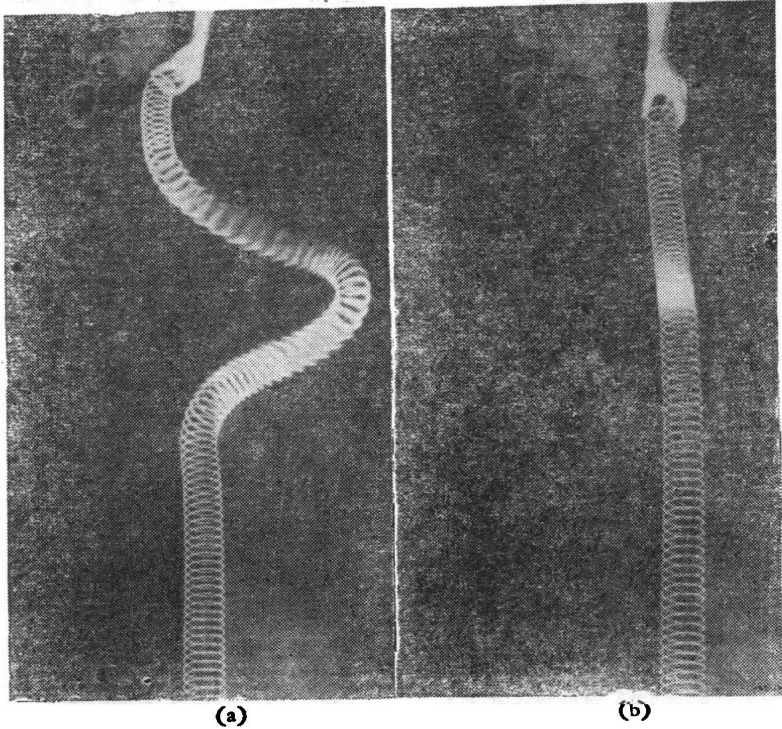


图 14-5 (a) 在一弹簧中的横波脉冲，扰动与波的运动方向垂直。(b) 在一弹簧中的纵波脉冲，扰动与波的运动方向相同

14-6 表示在水波中一个水质点的运动。水质点沿一近似圆形的轨迹运动，其运动既有横向分量又有纵向分量。

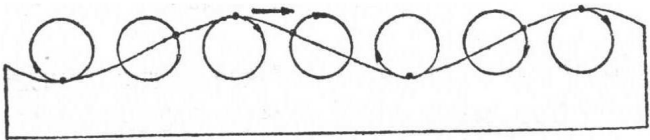


图 14-6 在水上的表面波，水表面上的质点沿一近乎圆形的轨迹运动，既有横向分量，也有纵向分量

图 14-7 表示 $t = 0$ 时在弦上的一个脉冲。此时刻弦的形状可用某一函数 $y = f(x)$ 来表示。在以后某时刻，脉冲沿着弦

向前移动了一段距离，所以那一时刻它的形状是 x 的另一函数。让我们假设脉冲的形状不变，并引入一个新的坐标系，其原点 O' 以脉冲的速率 v 运动。在这个新参照系中，脉冲是固定不动的。在所有时间弦的形状都是 $y' = f(x')$ 。这两个参照系的坐标的关系为

$$y = y' \text{ 及 } x = x' + vt.$$

因此，在参照系 O 中，弦的位移可写为

$$y = f(x - vt) \quad \text{波向右运动。} \quad (14-1)$$

将同样的推理方法应用于向左运动的脉冲可得

$$y = f(x + vt) \quad \text{波向左运动。} \quad (14-2)$$

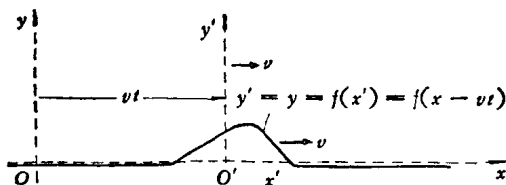


图 14-7 一形状不变的波脉冲相对于原点 O 沿 x 正方向以速率 v 运动。在以与脉冲相同的速率运动的带撇的坐标系中，在所有的时刻波函数都是 $y' = f(x')$ 。在不带撇的坐标系中，波函数是 $y = f(x - vt)$

在以上各式中， v 都是波的传播速率。函数 $y = f(x - vt)$ 称为波函数。对于弦上的波，波函数是弦在 x 点和 t 时刻的竖直位移。因此，这个波函数是两个变量的函数。对于声波的类似波函数，一个是压强 $P(x - vt)$ ，另一个是相关函数，即气体分子偏离平衡位置的位移。

设有在弦上沿相反方向相对运动的两个脉冲，如图 14-8 所示。它们相遇时弦的形状可以通过将两个脉冲各自产生的位移相加而得(如图)。就两个脉冲形状相同、但上下颠倒(见图 14-9)这一特殊情况而言，两个脉冲将在某一时刻交叠在一起而相加为零。在这一时刻，弦虽是平直的，但它并不静止。时间不长，两个脉冲重又出现，各自按原来方向继续前进。两个单独的波合并后产生一个合成波叫做干涉。干涉是波动的特性，凡两个波在空间同一区域

相遇时即发生干涉现象。在质点的运动中则没有类似的现象。两个质点永远不能这样彼此交叠或相加在一起。干涉是波动所特有的现象。

如果在弦上有两个象图 14-8 和 14-9 中那样的脉冲，我们就不能将弦的形状只是表为 $x - vt$ 或 $x + vt$ 的简单函数。不过，弦的形状仍然是 x 和 t 二变量的函数。让我们用 $y(x, t)$ 代表有两个脉冲的弦的波函数，就是说， $y(x, t)$ 是 x 点在时刻 t 的位移，我们可以利用数学来分析干涉现象。只要注意到，如果我们把向右运动的单个脉冲叫做 $y_1(x - vt)$ 而把向左运动的脉冲叫做 $y_2(x + vt)$ ，那么总的波函数就是两个波函数的代数和：

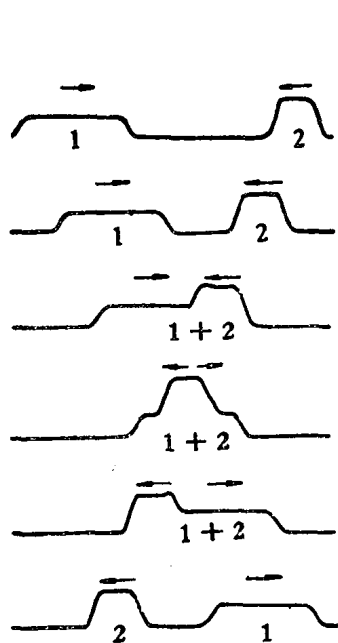


图 14-8 在弦上沿相反方向运动的两个波脉冲。两脉冲相遇时，可将它们各自的位移相加而得到弦的形状。波的这种叠加性质称为相长干涉

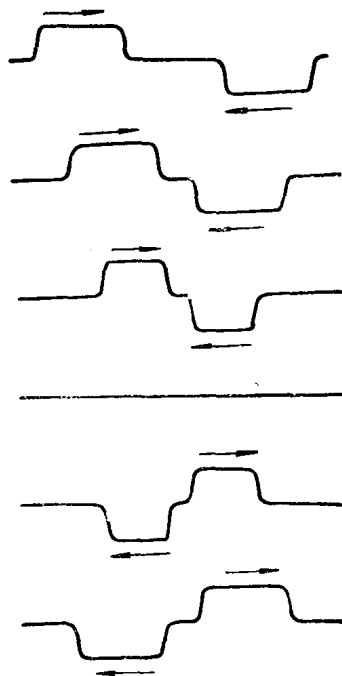


图 14-9 具有相反位移的脉冲的叠加。这里，各个脉冲的位移的代数和等于其大小之差，这称为相消干涉

$$y(x, t) = y_1(x - vt) + y_2(x + vt). \quad (14-3)$$

例如, 设有两个波形相同但上下颠倒的脉冲, 将会出现它们交叠的时刻 $t = t_1$. 这时, $y_1(x - vt_1) = -y_2(x + vt_1)$, 所以 $y(x, t_1) = 0$.

两个波函数数学相加得到合成的波函数, 如式(14-3)那样, 称为叠加. 合成波函数是单个波函数的代数和这个结论称为叠加原理. 在大部分波动现象中, 小的波脉冲都遵循这个原理. 真空中的电磁波总是遵循它; 而在其他波动现象中, 叠加原理对极大的脉冲不成立, 换言之, 由两个极大脉冲的干涉产生的波函数不只是该两个波脉冲的代数和. 这样的波叫做非线性波, 不属本书研究范围.

如果两个脉冲类似图 14-9 那样, 波形彼此颠倒, 则当两脉冲相遇时其代数和相当于一个算术差, 合成脉冲小于较大的脉冲, 也许同时小于两个脉冲. 当脉冲交叠时, 它们趋于彼此抵销. 这样的干涉称为相消干涉. (只当形状相同时才能出现完全抵销.)

另一方面, 若两脉冲的位移方向相同, 当它们交叠时, 合成脉冲大于每一个单独的脉冲. 这叫做相长干涉.

思 考 题

1. 除了课文中所提到的以外, 试举出在自然界中波脉冲的其他一些例子, 并说明每例中出现了偏离平衡位置的哪一种扰动?

2. 设一长列汽车彼此相隔均为一车之长, 并以相同速率行驶, 其中一辆汽车为了避开一条狗突然减速然后再加速, 直到它又和前面的一辆车相距一车之长. 试讨论各汽车间的间距沿汽车队向后传播的情况. 这与波脉冲有何相似之处? 有没有传递能量和动量? 此波是横波还是纵波? 其传播速度取决于什么? (在一个所有汽车原来都是静止的参照系中考察这种情况可能会有帮助.)

3. 当两个脉冲相向运动而发生干涉时, 其中一个脉冲阻碍另一个前进吗?

14-2 波 速

波动有一个普遍的特性：就是它们的速率决定于媒质的性质而与波源相对于媒质的运动无关。（光和其他电磁波是不需要媒质的，它们可在真空中传播。电磁波在真空中的速率为一定值，约 3×10^8 米/秒。）例如，火车汽笛发出的声波其速率仅取决于空气的性质而与火车的运动无关。对于在弦上形状不变的脉冲，我们可由力学定律导出一个用弦的性质表示的速率表达式。

设一脉冲以速率 v 沿弦向右运动。速率 v 与弦的张力 T 以及弦的单位长度的质量 μ 有以下的关系：

$$v = \sqrt{T/\mu}. \quad (14-4)$$

以下对这个结果的推导多少带有人为的性质，但它说明式 (14-4) 是将牛顿定律应用于弦的脉冲部分而得到的。更一般的推导将在节 14-8 中叙述。

设在一个参照系 O' 中来考虑这个脉冲，在该参照系中脉冲是静止的。具体说，在这个参照系中，弦以速率 v 向左运动，而脉冲是静止不动的。为了帮助理解，不妨想像一根与脉冲形状相同的玻璃管静止在这个参照系中，如图 14-10 (a) 所示。于是出现了一个颇不寻常的现象：弦可以不碰管壁地从玻璃管中通过去。一小段弦 [图 14-10 (b)] 在作半径为 r 的近似圆弧运动。张力的合力恰好足以给这小段弦一个向心加速度 v^2/r 。令这小段弦上张力的合力等于该小段弦的质量乘它的向心加速度，就导出式 (14-4)。

令 θ 为这小段弦所张的角度。图 14-10 (b) 表明，在小段弦每一端的张力 T 与过弦段中点的切线（它在这里是水平的）成一角度 $\theta/2$ 。在每一端的张力的径向分量（在图中是竖直的）为 $T \sin \theta/2$ 。因为这个张力同时作用在弦段两端，故指向圆心的径向合力大小为

$$F_{\text{合}} = 2T \sin \theta/2 \simeq 2T(\theta/2) = T\theta,$$

其中设角度 θ 很小，故可应用近似等式 $\sin \theta/2 \simeq \theta/2$ 。弦段的长