

传输线-天线-电波传播

王一平 杨恩跃 肖景明 编

西北电讯工程学院

1976

前 言

本书讲述传输线、天线和电波传播的基本原理。它是由《超高频技术》和《电磁波传输线和天线》两书合并改编而成，供雷达和通信两专业使用。为适应不同的专业要求和课程改革的情况，与原书相比除有些基本原理的讲述方法有所不同而外在内容上还有下列变动：

1. 增加波动和矢量代数矢量分析等内容。
2. 较长的数学计算部分均单独列为一节，一般加了“*”号，以便于取舍。
3. 有关电磁理论的计算并入本书末章。它包括传输线微分方程的导出及其解，电磁场的基本定律（马克士威方程），矩形和圆形波导电磁场的行波解，电偶极子电磁场的计算等。不同专业、不同班次可依教学情况来选用。
4. 增加了“无线电波传播”一章。

两个方面的专业合编一本教材还只是一个初步尝试。我们的政治思想水平和业务能力都有限，距离要求尚远，书中必有错误及不当之处，希读者随时批评指正。

编 者

1976.6.

目 录

第一章 波 动	1
§ 1-1 波	1
§ 1-2 波的表示形式	4
§ 1-3 正弦波	6
§ 1-4 波阵面	11
§ 1-5 反射和折射	13
§ 1-6 色散	19
* § 1-7 多普勒效应	20
§ 1-8 驻波	23
§ 1-9 复数表示方法	25
第二章 传输线	27
§ 2-1 传输线的基本概念	27
§ 2-2 均匀传输线的行波和特性阻抗	29
§ 2-3 无损传输线的一般性质	32
§ 2-4 反射系数和行波系数	42
§ 2-5 阻抗计算圆图	45
§ 2-6 传输线的匹配	53
§ 2-7 宽频带匹配问题	60
§ 2-8 有损耗传输线	63
§ 2-9 传输功率和效率	69
第三章 电磁波导	72
§ 3-1 横电磁波传输线	72
§ 3-2 波导	78
§ 3-3 矩形波导中的波型	81
§ 3-4 矩形波导的传输特性	84
* § 3-5 矩形波导横电波场强的计算	89
§ 3-6 矩形波导中的 TE_{10} 波	92
§ 3-7 其他形式的波导	99
§ 3-8 波导的激励	102
§ 3-9 电磁波的极化	104
第四章 波导技术元件	112
§ 4-1 引言	112
§ 4-2 匹配元件	113

§ 4 3 连接转换元件	118
§ 4 4 能量吸收元件	122
§ 4 5 分枝元件	125
§ 4 6 能量耦合元件	131
§ 4 7 谐振腔——振荡元件	138
§ 4 8 微波滤波器简述	146
§ 4 9 微波铁氧体器件	149
§ 4 10 四端环流器	158
§ 4 11 气体放电器	161
§ 4 12 测量线介绍	163
§ 4 13 波长计	165
第五章 天线原理	167
§ 5 1 引言	167
§ 5 2 电磁波辐射原理	168
* § 5 3 运动电荷辐射场的计算	172
§ 5 4 基本振子的辐射场	178
§ 5 5 电流环的辐射场	182
§ 5 6 对称振子的辐射场	185
§ 5 7 天线参数	188
§ 5 8 二元振子系的方向性	197
§ 5 9 反射面的影响	203
§ 5 10 互易原理简述	205
§ 5 11 惠更斯原理	206
* § 5 12 矩形口面的辐射场	210
第六章 天线	214
§ 6 1 喇叭天线	214
§ 6 2 抛物面天线	217
§ 6 3 双反射面天线 (卡塞格伦天线)	224
§ 6 4 单脉冲雷达天线	226
* § 6 5 天线阵方向性计算	233
§ 6 6 同相水平天线	240
§ 6 7 引向天线	245
§ 6 8 螺旋天线	251
§ 6 9 旋转场天线 (电视发射天线)	253
§ 6 10 对数周期天线	256
* § 6 11 行波导线的辐射	258
§ 6 12 菱形天线	261

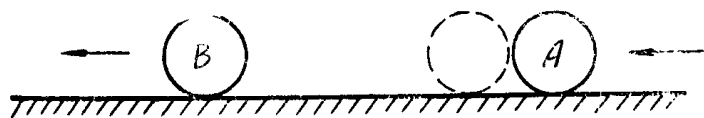
§ 6-13 水平偶极天线	263
§ 6-14 垂直天线	267
第七章 无线电波传播	278
§ 7-1 引言	278
§ 7-2 无线电波在自由空间的传播	280
§ 7-3 介质对平面波的影响	282
§ 7-4 地波传播	286
§ 7-5 天波传播	291
§ 7-6 视距传播	302
§ 7-7 散射传播	317
§ 7-8 波导传播	324
第八章 电磁场的计算	332
§ 8-1 波动方程简述	332
§ 8-2 传输线的波动方程及其解	333
§ 8-3 矢量代数概要	337
§ 8-4 空间坐标	342
§ 8-5 用积分计算电场和磁场	346
§ 8-6 矢量场的线积分和面积分	352
§ 8-7 传输线特性阻抗计算举例	356
§ 8-8 电场和磁场的能量密度	358
§ 8-9 电位和电场强度的关系——电位梯度	361
§ 8-10 电场的通量定理——高斯定理	365
§ 8-11 磁场的环量定理——全电流定律	368
§ 8-12 电磁场的运动规律	372
§ 8-13 矢量场的微分运算——散度和旋度	378
§ 8-14 电磁场运动定律的微分形式	385
§ 8-15 无界空间的平面电磁波	390
§ 8-16 矩形波导中的电磁波	392
§ 8-17 圆波导中的电磁波	397
§ 8-18 波导型谐振腔	402
§ 8-19 电偶极子的电磁场	404

第一章 波 动

§ 1-1 波

波动是物质运动的一种基本形式。在自然界和日常生活中经常可以看到波动现象。例如赶车的人扬鞭时，鞭绳的运动；风吹过麦田时产生的麦浪；船在水上航行时激起的水波等等都是波动。人们互相讲话就是通过空气的波动来传声的。如进行远距离通信，则要利用电磁波。

在机械运动中，两个物体相互作用以传递能量的形式，大体上有两种：一种是两个物体直接接触；另一种是在中间物体中激起波动。图1-1(a)表示第一种形式：物体A直接撞击物体B使物体B运动。图1-1(b)表示第二种形式：物体A在物体C中激起脉冲波，传播到另一端



(a) 直接碰撞传递能量



(b) 通过波动传递能量

图 1-1 物体的相互作用

使物体 B 运动。

从水的运动来看，这两种运动的差别也是很明显的。如果我们在流水上放一小木块，木块将随水漂流。这是第一种运动方式。如果我们在静水中投入石头，会产生圆形水波向四面扩散。波在前进，但是漂浮在水上的小木块之类的东西，并不随波前进，而只是当波经过时在其原处上下运动。这是第二种运动形式。也就是说，水流和水波两者是不同的运动形式。就空气来说也是一样。风是气流，但爆炸产生的气浪却是波动。气流和气浪是不同的运动形式。

总之，波动是一种在物体中传播的扰动，它携带着能量前进，并不引起传播物体作整体运动。

最基本的波动形式有两种。一种是横波，一种是纵波。

一、横波

将长绳的一端固定，另一端抖动，就有一个波向固定端运动，如图1-2(a)所示。图1-2(b)表示在波前进过程中的两个很靠近的波形，图上实线是前一位置的波形，虚线是后一位置的波形。比较这两个波形可知，如要从前一波形转变为后一波形，则绳上的一部分质点必然依次向上运动，另一部分质点必然依次向下运动。正是由于绳上各质点相继地作这种有规则的上下运动，才使波前进。在这种绳波中质点运动的方向和波的传播方向垂直，称为横波。

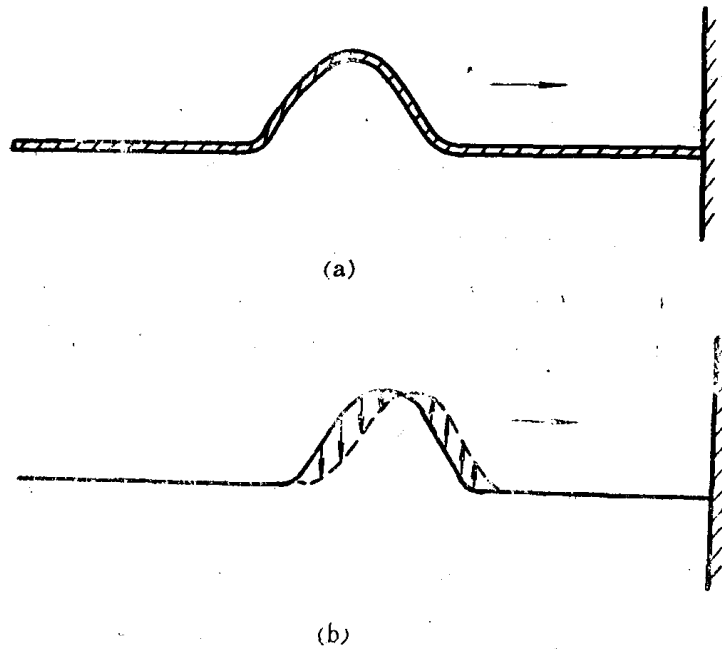


图 1-2 绳上的横波

在绳波中，绳并不随波前进，它只是波在其中传播的一种介质。因此，所谓波动就是在某种介质中传播的扰动。

二、纵波

将弹簧的一端固定，在另一端加力压缩然后放开。由于压缩使一部分弹簧得到了能量，压力去掉后，被压的一部分弹簧向邻近的弹簧释放能量，又使其受到压缩。这个过程依次进行就得如图 1-3 所示的弹簧圈之间距离变化的疏密波。在这种波中，弹簧的运动方向与波的传播方向平行，称为纵波。这时弹簧是传播介质。外力引起的质点纵向运动通过它以波的形式把能量传下去。

空气中的声波和这种弹簧上的纵波相似。人的声带或收音机中喇叭纸盆的运动相当于图 1-3 中对弹簧的压缩和放松。由此，造成空气密度变化的疏密波。图 1-4 是在管中空气脉冲波的示意图。

横波和纵波是两种最基本的波动形式。实际上发生的波动过程，有的并不这样单纯。例如，水上的表面波就是由水的质点作圆周运动造成的，它既有纵向运动也有横向运动。地震波也是既包含横波，又包含纵波。

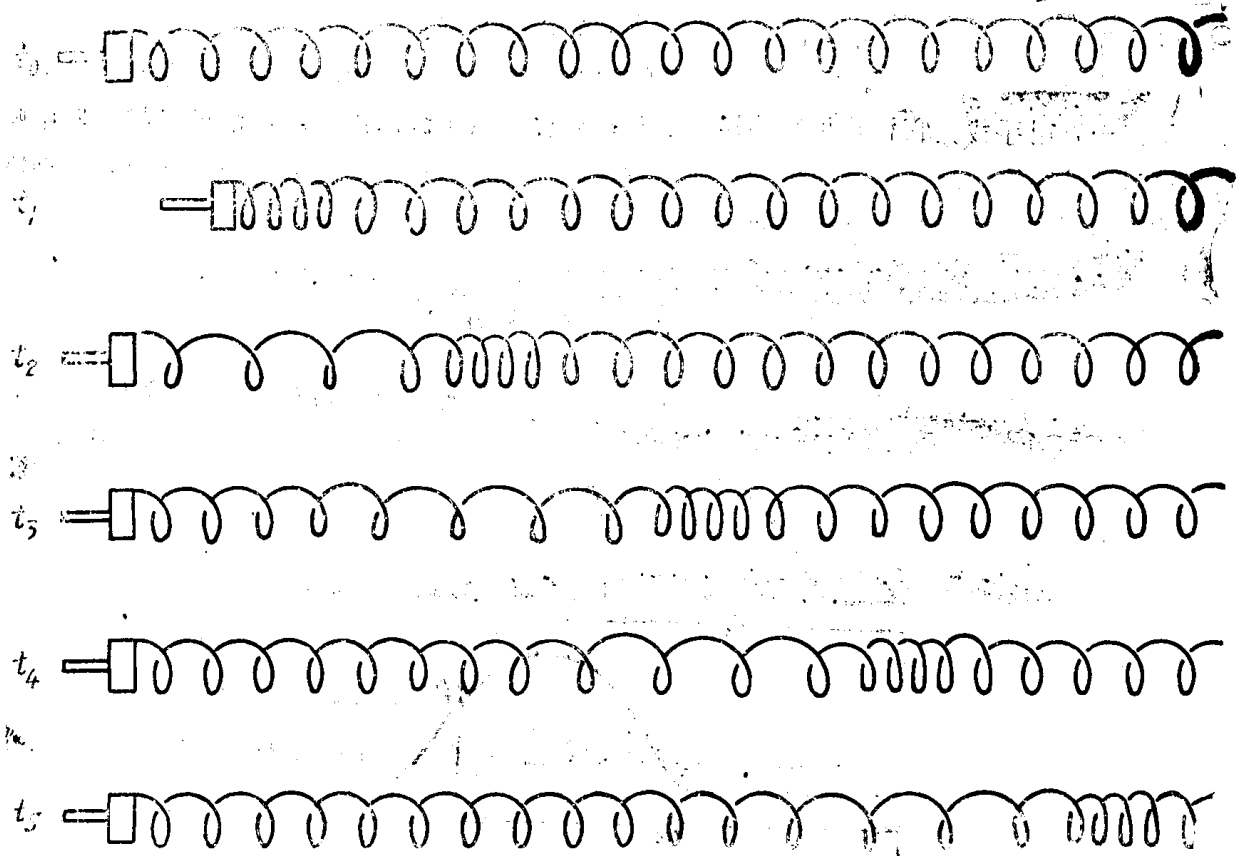


图 1-3 弹簧上的纵波

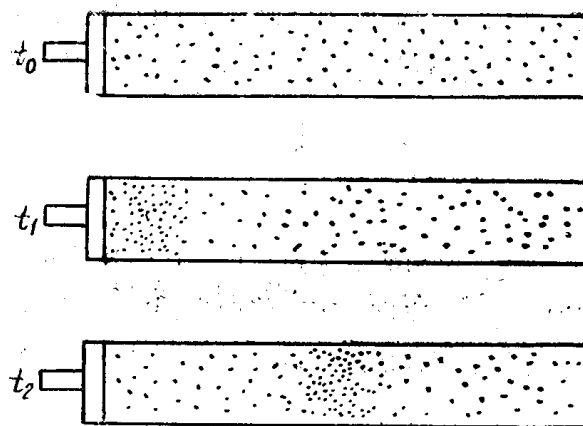


图 1-4 管中的气体纵波

以上所述都是机械波。这种波的传播必需要某种物体作为介质。这些物体可以是气体、液体或固体。至于光波，它和机械波有许多共同的基本特性。但因为光波是电磁波的一种，而电磁波是本身以波动形式存在的电磁场，在真空中也能传播。这是光波和机械波不同的地方。由于电磁波在真空中存在，所以，太阳发出的大量辐射能才能到达地球。因为，太阳与地球之间的星际空间真空程度很高，不存在可以作为传播媒介的其它物体。各种物体对电磁

波的传播有不同的影响，但不会改变它与机械波的这种差别。

波动是一种扰动的传播，产生这种扰动的起源称为波源。例如，要在长绳上产生横波，波源是在一端用手或其它机构引起的横向振动；要在空气中激起声波，波源就是扩音器中喇叭音膜的运动等等。总之，波源是一种能量转换器，它把其他形态的能量转变为在某种物体中传播的机械扰动；或者转变为能够自己传播的电磁扰动。

§ 1-2 波的表示形式

为了把波动用适当的数学形式表示出来，要先确定波速。仍以绳波为例。如图1-5所示。

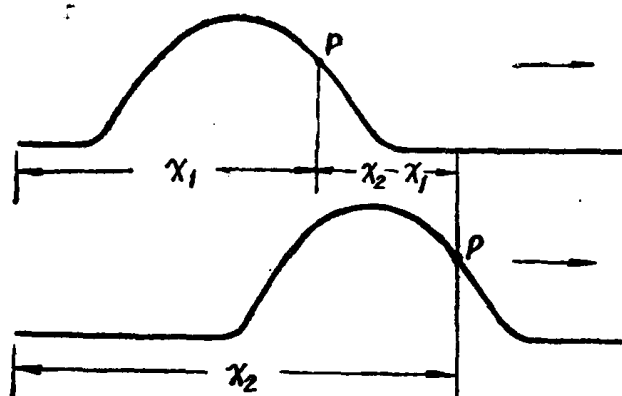


图 1-5 确定波速

有一脉冲波沿长绳向右传播。图上表示两个不同时刻波的位置。如果在传播过程中波的形状不变，就能够在波形上确定一个相对位置固定的点P。P点前进的速度就是波速。用 v 表示波速，则从图1-5可得：

$$v = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (1-1)$$

在此式中，距离的基本单位用米，时间的基本单位用秒，波速的单位就是米/秒。这是波形前进的速度，不是传播介质的质点运动速度。不可将两者混淆。波速的大小决定于传播物质的特性和状态。不论用什么方式产生何种形式的波，只要传播物质的特性和状态不变，波速都是一样的。

在温度为 0°C ，一个大气压的干空气中，声波的速度是331.45米/秒。从 0°C 到 20°C 左右范围内，大约温度每升高 1°C ，速度增加0.6米/秒。在液体和固体中声速显著增大。例如在海水中，当温度为 17°C 时，声速为1510~1550米/秒；在铁杆中温度为 20°C 时，声速为5170米/秒。在真空中的电磁波，不论是无线电波或光波，它的波速都是 3×10^8 米/秒。在普通物体中，波速要减小。例如在土壤中，无线电波的波速有可能减小到真空中波速的一半。但电磁波在气体中的减小极为微小，故在空气中计算时常用真空的波速。

图1-5是两个不同时刻 t_1 和 t_2 的波。在此不同时刻波的空间位置也发生了变化。因此，如果要用一个随时间变化的函数来表示运动中的波，则其中所含的时间变量又必然与空间位

置有关。

在 x 轴的原点 0 放一个记录仪 A，在与原点相距 x 处再放一个记录仪 B。设有一个脉冲波自左向右沿 x 轴的正方向传播，如图 1-6(a) 所示。当波经过 A 时记下了 0 点处质点运动随时间变化的曲线。然后，波继续传下去到达 B 处时，也记下了 x 点处质点运动随时间变化的曲线。只要在传播中波的形状不变，这两条曲线随时间变化的规律是完全相同的。换句话说，如果只以各记录仪自己的时间为自变量来表示质点运动的函数图形，则两个图形恒等。

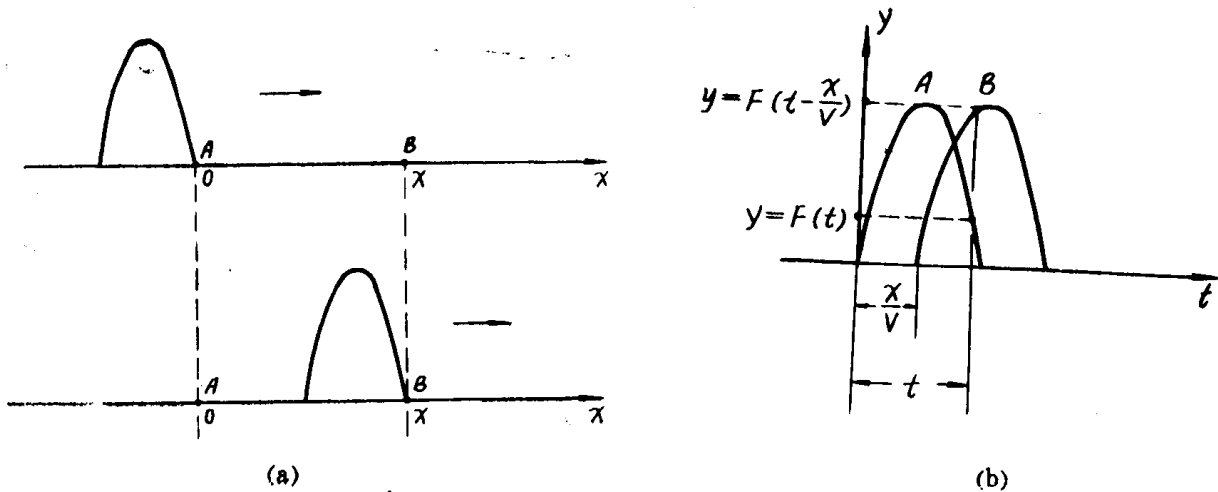


图 1-6 波的函数表示

如果两者用共同的时间坐标表示出来，就会得到图 1-6(b) 的两条曲线。由于波从 0 点传到 x 点需要一段时间，所以 B 仪器的记录要迟后一段时间才重复 A 仪器记下的变化。这段迟后时间等于 x/v 。这里， v 表示波速， x 是 A 至 B 的距离。如果用 Y 表示仪器 A 的结果，则为

$$Y = F(t)$$

命 y 表示仪器 B 的结果，则从图上的坐标关系可知它必然应该写成

$$y = F\left(t - \frac{x}{v}\right) \quad (1-2)$$

可见，只要把 Y 中的自变量 t 换成 $t - \frac{x}{v}$ ， Y 就变成了 y 。

(1-2) 说明，如果在 $x=0$ 处有一波源，产生了一个用 $F(t)$ 表示的扰动，在它传到 x 处时，就应该用 $F\left(t - \frac{x}{v}\right)$ 来表示。换句话说， $F\left(t - \frac{x}{v}\right)$ 表示在 $x=0$ 点发出而沿 x 轴正方向以速度 v 传播的波。在这个表示式中自变量 $t - \frac{x}{v}$ ，被称为推迟时间。它告诉我们 t 时刻在 x 点观测到的扰动是 $t - \frac{x}{v}$ 以前在 $x=0$ 处的扰动。

问 题

1. 由于光速比声速快得多, 可利用这个差别来粗略地测定声波。问: 用什么方法?
2. 船向海底发出声波, 1.6秒后得到回波。如海水中的声速为1520米/秒。问: 船所在地的海底有多深?
3. $F\left(t + \frac{x}{v}\right)$ 表示自 $x=0$ 点发出沿 x 轴负方向传播的波。为什么?

§ 1-3 正 弦 波

如果波源的振动是随时间依正弦或余弦函数变化, 则它所产生的波称为正弦波。因为, 余弦函数不过是有 90° 相移的正弦函数, 所以, 我们通用正弦波这一名称。下面, 首先回顾谐振动的表示形式, 然后进一步讨论正弦波。

一、谐振动

某个物理量随时间按正弦函数或余弦函数变化, 就称为谐振动。由于以后在讲到波动时主要用余弦函数的形式, 所以, 在此我们也用余弦函数来表示谐振动, 即

$$y = A \cos \omega t \quad (1-3)$$

它的函数图形如图 1-7 所示。在此式中函数 y 的最大值 A , 称为振幅。函数的两个相邻重复数值所经历的时间称为周期, 用 T 表示。它的基本单位为秒。在图 1-7 中就是 ωt 从 0 变到 2π 所经过的时间。单位时间 (1 秒) 内的周期数称为频率, 用 f 表示。它的基本单位为赫芝。显然, 周期和频率的关系为:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1-4)$$

在 (1-3) 式中 ω 称为角频率。它的数值乘以时间就得角度。振动在一个周期内经历的角度为 2π 弧度。因此, $\omega T = 2\pi$ 。再把 (1-4) 式代入即得角频率与频率的关系为

$$\omega = 2\pi f \quad (1-5)$$

在谐振动中 $\theta = \omega t$ 称为相位或相角。一般地说, 两个同一频率的谐振动, 不一定有相同的相位。如果以其中一个为准, 另一个与之相对有一固定的相移, 则此两个谐振动可以写为:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= A_1 \cos \omega t \\ y_2 &= A_2 \cos(\omega t - \phi) \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

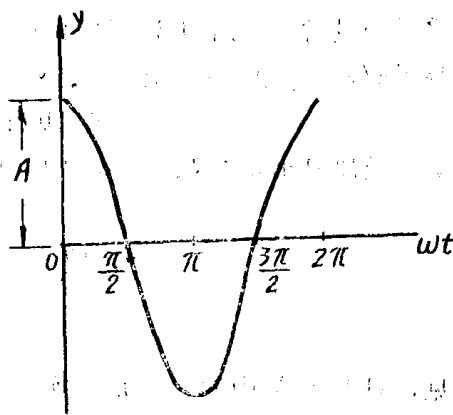


图 1-7 谐振动

在此式中，如果 $\phi < 0$ ，表示 y_2 超前于 y_1 ； $\phi > 0$ 表示 y_2 滞后于 y_1 ； $\phi = 0$ 表示 y_1 与 y_2 同相。

在正弦交流电路中讨论过的电流和电压，都是谐振动的实际例证。

二、周期波

如果使长绳的一端作有规则的周期振动，则将得到如图 1-8 所示的连续周期波。波动的最高点称为波峰，最低点称为波谷。图上显示了振动在一个周期内波的运动情况。

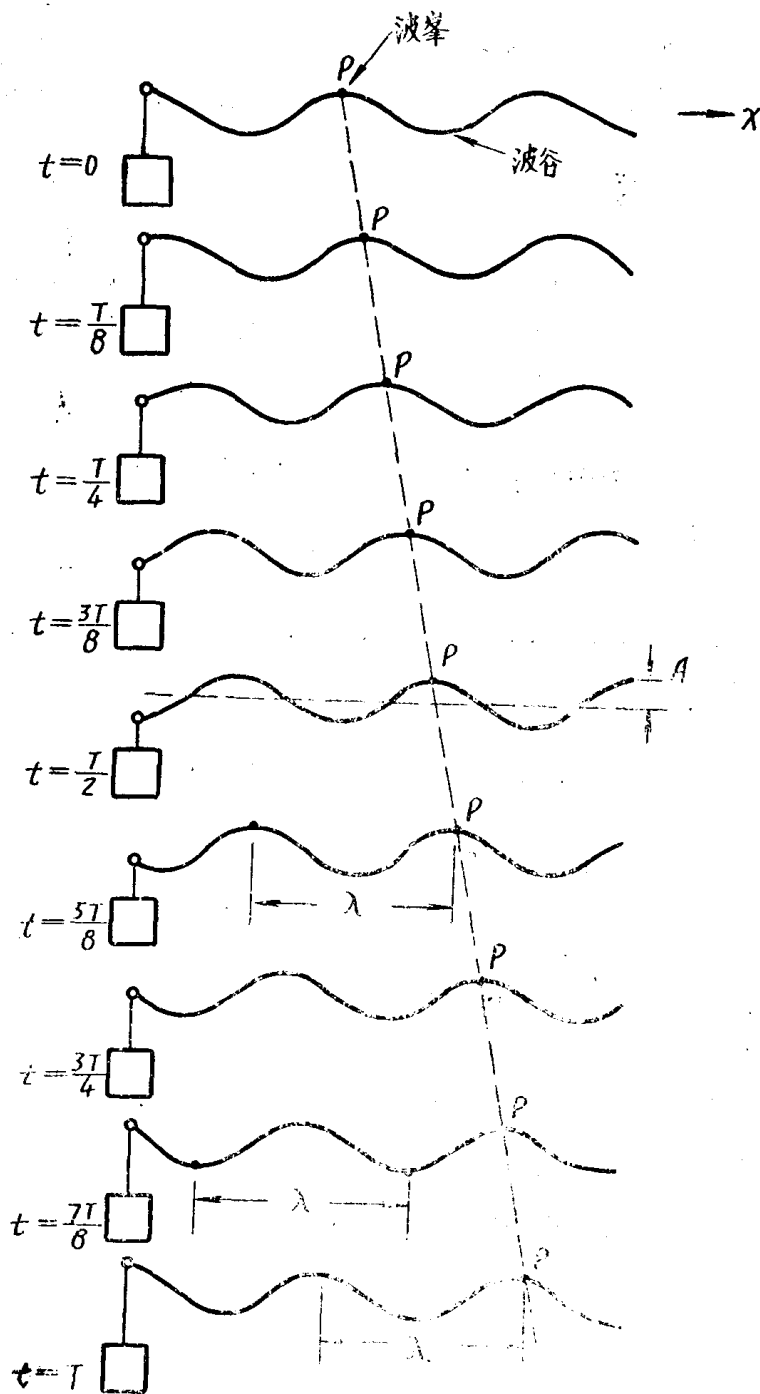


图 1-8 周期波

如在传播波形上选一固定点，如图 1-8 中的 P 点，则这一点在振动进行一个周期时将前进一段距离。这一段距离叫做一个波长，通常用 λ 表示。它的基本单位为米。在图中，所选的固定点恰好是波峰点，所以，波长也就是相邻两个波峰点的距离。既然，在一个周期的时间内波前进的距离为一个波长，那末，波长与周期之比必然等于波速。再考虑到 (1-4) 式就能得到下面的公式：

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \quad (1-7)$$

这个公式适用于所有的周期波，并不限于绳上的横波。例如，已知在真空中的无线电波波速为 $v = 3 \times 10^8$ 米/秒，某一电台广播的频率为 540 千赫，则由 (1-7) 式可知广播的波长为

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3 \times 10^8}{540 \times 10^3} = 560 \text{ (米)}。$$

又如已知声速为 343 米/秒，某声波的波长为 1 厘米，则此声波的频率由 (1-7) 式算出为：

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{343}{0.01} = 34300 \text{ (赫)} = 34.3 \text{ (千赫)}$$

它属于人耳听不见的超声波。通常可见光的波长范围约为 0.4~0.76 微米；可听见的声波波长约为 0.17~17 米。表 1-1 是无线电波的频率和波长。

表 1-1

名 称	频 率	波 长	名 称
极 低 频	0~3千赫	∞ ~100公里	极 长 波
甚 低 频	3~30千赫	100~10公里	超 长 波
低 频	30~300千赫	10~1公里	长 波
中 频	300~3000千赫	1000~100米	中 波
高 频	3~30兆赫	100~10米	短 波
甚 高 频	30~300兆赫	10~1米	米 波
特 高 频	300~3000兆赫	10~1分米	分 米 波
超 高 频	3~30千兆赫	10~1厘米	厘 米 波
极 高 频	30~300千兆赫	10~1毫米	毫 米 波

波的频率受波源控制。在传播中频率是不变的。波的速度和波长却可随传播介质而变。

三、正弦波

设在波源处的振动为 $F(t) = A \cos \omega t$ ，则由 (1-2) 式可知，在距波源 x 处的振动为

$$F\left(t - \frac{x}{v}\right) = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{v}\right)$$

$$= A \cos(\omega t - \alpha x) \quad (1-8)$$

其中, $\alpha = \frac{\omega}{v}$ 。这是沿 x 轴正方向传播的正弦波。在此式中, A 为波的振幅, ω 是角频率。

它与频率 f 的关系由 (1-5) 式决定。 α 称为相移常数, 它的单位为弧度/米, 它和频率、波长、波速之间的关系为。

$$\alpha = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1-9)$$

它的意义在下面解释。

四、相位滞后与相移常数

比较两个谐振动的表示式, 例如比较交流电路中两条支路的电流, 可以把它们分别写为

$$i_1 = I_{01} \cos \omega t$$

$$i_2 = I_{02} \cos(\omega t - \phi)$$

这里, 电流 i_2 总是滞后 i_1 一个固定的相位角 ϕ 。另一方面由 (1-8) 式可知在波源处 ($x=0$) 和空间任一点 x 处的两个振动为:

$$\left. \begin{aligned} F(t) &= A \cos \omega t \\ F\left(t - \frac{x}{v}\right) &= A \cos(\omega t - \alpha x) \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

把这一结果和上面两个电流的表示式相对照, 可以看出, 当波沿 x 的正方向传播时, 在空间任一点 x 的振动总是滞后于波源一个相位角 αx 。与波源相距越远的点, x 越大, 滞后的相位角也越大。如果在同一时间坐标中把上两式画出, 则将得到如图 1-9 所示的两条曲线。它表

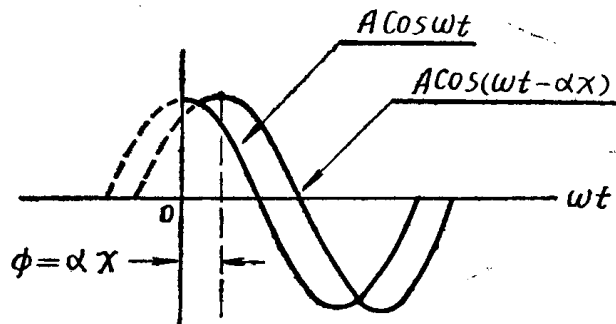


图 1-9 传播波的相移

明相对于波源的振动相位滞后角度由观察点的位置 (即波经过的路程) 来确定。从 (1-9) 式可知, 如果 x 等于半个波长, 则相位滞后为 π , 即 180° 。在正弦波传播中, 这种由路程而引起的相移, 在分析电磁波的辐射时是经常用到的基本概念。

弄清了 (1-10) 式中 αx 的意义之后, α 的意义也就清楚了它表示 $x=1$ 的相移角, 即 α 代表传播一个单位长的相移, 所以, 称它为相移常数, 或相位常数。它的大小与波长, 亦即与传播介质有关。例如, 前述广播电台的频率为 540 千赫, 已算出其波长为 560 米, 由 (1-9)

式算出基相移常数 $\alpha = \frac{2\pi}{560} = 0.01$ 弧度/米。如在距电台 50 公里处收听广播，则接收点的振动相对于发射点的相位滞后大约为 $35.7 \times 2\pi$ 弧度或 1.21×10^4 度。

五、相速

在正弦波中，由图 1-5 和 (1-1) 式确定的波速有进一步的意义。在确定波速时波形上的固定点是使余弦函数 (1-10) 式为定值的点。为此，必须 $\omega t - \alpha x = \text{常数}$ 。这就是说，波形上某一固定点前进的速度，也是相位 $\omega t - \alpha x = \text{常数}$ 的点前进的速度。因为设 x_1 是该点在 t_1 时的位置， x_2 是该点在 t_2 时的位置，则由 $\omega t - \alpha x = \text{常数}$ ，必然有：

$$\omega t_1 - \alpha x_1 = \omega t_2 - \alpha x_2 = \text{常数}$$

$$\frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = v = \frac{\omega}{\alpha}$$

这个结果就是 (1-1) 和 (1-9) 式。所以，在正弦波中，由 (1-1) 式和 (1-9) 式所确定的波速称为相速。

波形在传播中形状不变时，相速代表能量传播的速度，它与波长或频率无关，而只决定于传播物质的参数。如果波在传播中形状发生了改变，则由图 1-5 和 (1-1) 式可知我们原来以波形上一个固定点的移动来确定波速的方法将会失去作用。因为在不断变形的波中，是无法确定一个固定点的。在变形波中，相速常常会失去确定的意义而变为仅仅具有形式上的含意。在这种场合就需要重新规定波的速度，使之能代表能量传播的速度。

问 题

1. 我国第一颗人造地球卫星用 20.009 兆赫的频率播送东方红乐曲，问此无线电波的波长是多少米？

2. 在温度 20°C 时声波在三种介质中的速度如下：

空气	343米/秒
水	1540米/秒
铁杆	5170米/秒

设声振动的频率为 1000 赫，求在此三种情况下的波长。

3. 已知黄光的波长范围为 $0.57 \sim 0.6$ 微米，试计算其相应的频率范围。

4. 一频率为 500 赫的正弦波，其相速为 350 米/秒，问相位差为 $\frac{\pi}{3}$ 、 $\frac{\pi}{2}$ 、 π 和 2π 两点之间的距离各为多大？

5. 已知在一正弦波传播方向上某一点 A 的振动表示式为

$$y_A = 6 \cos \frac{\pi}{2} t$$

式中各量的单位是厘米，秒等。设波的传播相速为 200 厘米/秒。问与 A 点相距为 500 厘米处的 B 点上的振动表示式 y_B 应如何写出？B 点和 A 点相对相移多大？

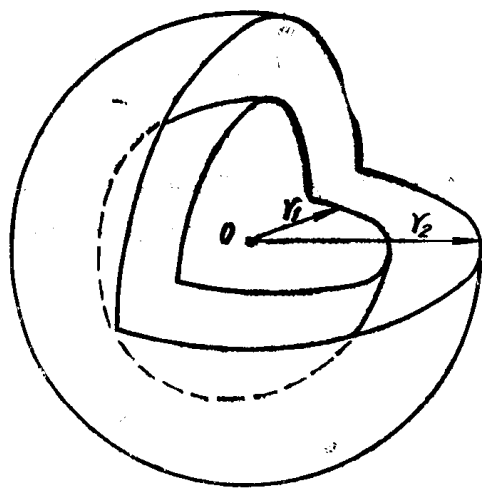
§ 1-4 波 阵 面

前面业已指出，在正弦波的传播中，波经过一定距离后，其振动有确定的相位滞后。在一般情况下，波是在全空间范围内传播的。因此，这种具有相同相移的点不会只有一个，而是可以连成一片，形成空间的曲面。这样的曲面称为波阵面或波面。若波阵面是以波源为中心的球面，则称为球面波；若波阵面是垂直于传播方向的平面，则称为平面波。实际的波中，振幅也可能随空间变化，这时，振幅相等的曲面有可能和相位相等的曲面不一致。在这种情形下，通常仍然以等相位面，即波阵面来区别波的类型。

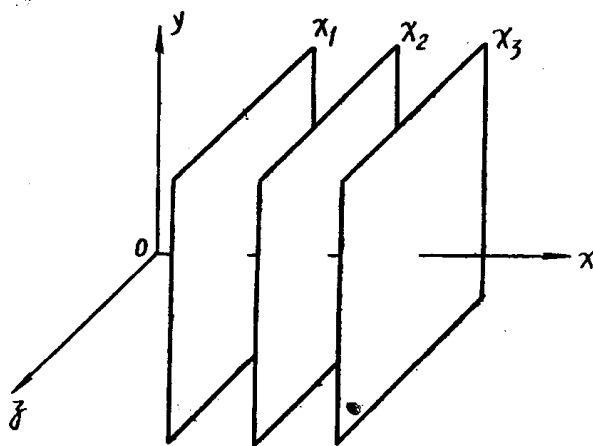
波阵面是从表示波动的函数关系中得到的几何曲面。它有助于人们想象波在传播中的空间结构和解释传播的物理过程。设一波源位于坐标原点作谐振动，振动的方式是发出以原点为中心沿着半径方向传播的波，则仿照 (1-8) 式可以把这种波的数学形式写成：

$$A(r)\cos(\omega t - \alpha r)$$

在此式中， r 表示和原点的距离。 $A(r)$ 表示在这样传播的波中，其振幅也可能是 r 的函数。但波阵面的形状由 $\cos(\omega t - \alpha r)$ 来判定。从 $\cos(\omega t - \alpha r)$ 的函数式，按照波阵面的意义，可知这个波的波阵面在某个一定的时刻，即 t 一定时，是 $r = \text{常数}$ 的曲面。显然，它是球面，如图 1-10 (a) 所示。因此，上式表示球面波。另一方面在 (1-8) 式中，当 $\cos(\omega t - \alpha x)$ 表示沿 x 轴正方向传播的波时，在直角坐标系中，它的波阵面在某一定的时刻是 $x = \text{常数}$ 的面



(a) 球面波



(b) 平面波

图 1-10 球面波与平面波的波阵面

这是垂直于 x 轴的，也就是垂直于传播方向的平面，如图 1-10(b)所示。所以， $A\cos(\omega t - \alpha x)$ 表示平面波。在此波中振幅 A 是常数。

除以波阵面表示波动的空间形象外，还可以用射线来表示波的传播。我们不在此讨论射线的严密理论，而只把射线理解为自波源画出的垂直于波阵面的空间几何曲线，它表示波的传播方向，如图 1-11所示。利用波面和射线，可使波动过程形象化，使我们容易认识波在空间传播的物理过程。因为，波在传播中只要不受阻碍，不受其他物质影响，总是直线传播

的。在这种情况下，射线是直线。如果在传播过程中受到阻碍或其他影响，则射线必然发出弯曲，相应地波面在空间的分布也会发生改变。

当以射线表示球面波时，它是从波源为中心向周围发出的直线，如图 1-12(a) 所示。当以射线表示平面波时它是垂直于波面的平行线如图 1-12(b) 所示。

最后，还需说明的是球面波与平面波的关系。实际的波源本身所占据的空间都是有限的。对于这样的波源，在近处看不可能成为一点，所以不存在纯粹的球面波。但是，正因为波源的尺寸是有限的，所以，在距离它足够远的地方，波源可近似为一个点，这时我们就可得到球面波。另一方面即使我们在较近处观察，我们仍然可以把有限尺寸的波源视为许多微小波源的相加。对每一个微小波源可以看作点源，而认为它所产生的波是球面波。由此可见，前面所讲的球面波虽然是一种理论上的抽象，但它是很有实际意义的。至于平面

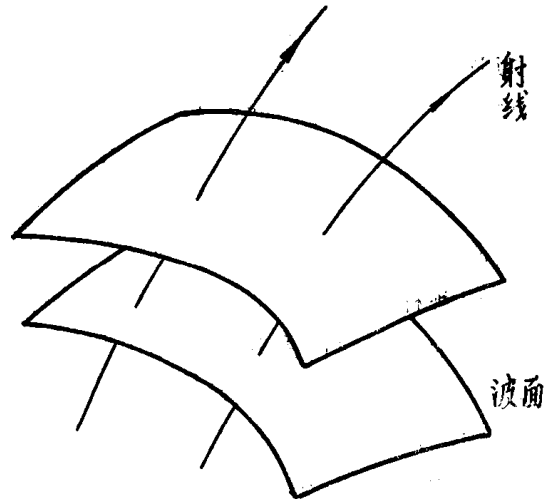


图 1-11 射线

波，则是在距波源足够远处研究小范围内球面波的一种近似。只要所研究的范围比之与波源的距离来说小得多，则这种近似是符合实际情况的。这时，在此范围内可以不考虑波阵面的弯曲和振幅的变化。这和我们把一小块球面看作平面的情形是相似的。实际上，当我们看太阳时，可看出光波是以太阳为中心辐射的，它应该是球面波。但是，当我们具体地研究到达地面上的阳光时，常常把它看作平行射线，看作是平面波。对于在远离波源处研究一切其他类型的波时，也是一样。这种情形下对平面波进行分析和计算比球面波简单得多。所以，平面波的概念也是很有实际意义的。在某些特定的情况下，还可以引用柱面波的概念，但其实际意义不如球面波和平面波那样重要，这里不再赘述。

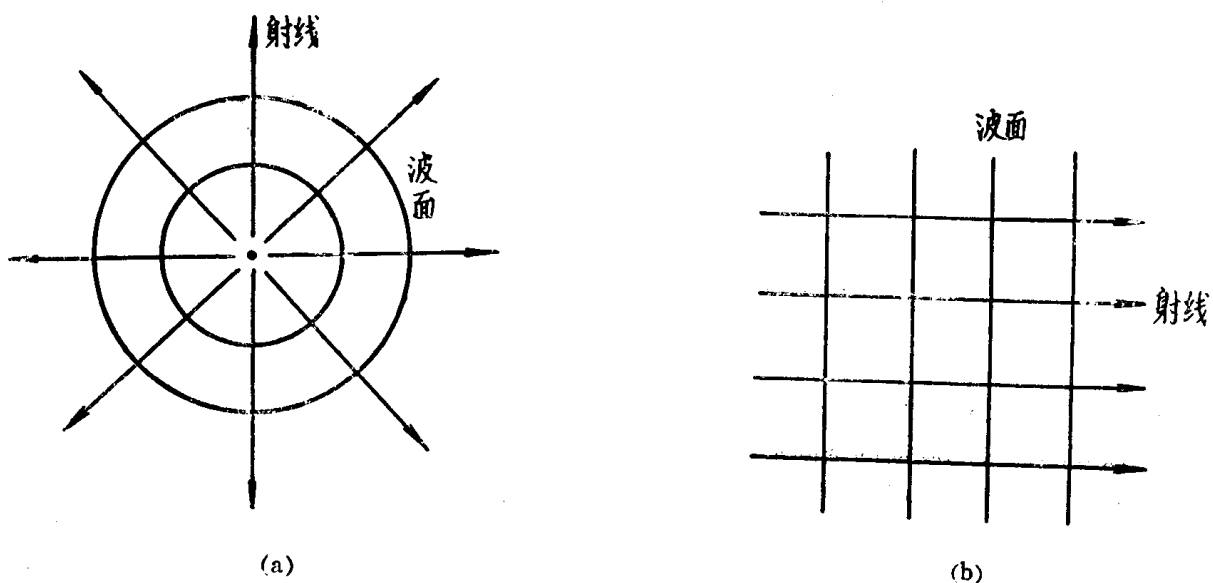


图 1-12 球面波与平面波的波面和射线