

第五章

电波本性不是能量

如果电磁波的物理行为是 $E \times H$ 之能量行为，则我们不能说电场与磁场是独立辐射的。反之亦然。这就是本章研究电波物理行为的出发点。在大学物理书籍里，讲授有关光的干涉与衍射时，物理老师首先引入光强 I ($I \propto E^2$) 的概念，似乎告诉我们：光波的干涉是能量的干涉、明暗条纹是能量的强弱，在物理概念上与麦克斯韦的波能量及玻印廷能流密度 $E \times H$ ($\propto E^2$) 吻合，也与机械波的波能量概念相吻合。对此，我们首先指出，机械波服从牛顿力学定律，传播的波能量守恒。麦克斯韦从机械波类比到电磁波，这种基于波能量的概念，但却它既不是传播波能量守恒也不是辐射矢量场守恒 (见第 2 章的论述)。本章论证表明：对于机械波而言，它借助于煤质的振荡而传播，所以它遵循牛顿力学定律，因此机械波传播的波能量 $w_k = \frac{1}{2} \rho (\Delta V) A^2 \omega^2$ 守恒， ρ 是单位体积中的质量；但是对于真空中的电场波或磁场波来说，单位体积内的质量等于零，没有振荡传播的煤质，也没有振荡传播的动力，所以它是一种辐射。本书的第四章得出的结论是，电波是独立辐射的矢量场，其场强与距离平方成反比，如果以辐射源为中心，取球面 S_1 和 S_2 ，那么流出 S_1 面的的场量等于流出 S_2 面的场量，即辐射矢量场守恒，服从距离平方反比律。本章进一步回答电波的一切物理行为是独立矢量场行为，却不是波能流 $E \times H$ 之行为。本章目的是在物理概念上进一步否定玻印廷能流密度 $E \times H$ 传播之结论，也是在物理概念上进一步证明了电波是独立辐射的矢量场。

本章从电波的干涉、电波的传输等物理行为入手，分析得出了“电波的辐射不是波能量的传播，而是矢量场的辐射”之结论。主要结论包括：1) 电波的干涉和衍射是独立矢量场的干涉和衍射，不是波能流 $E \times H$ 的干涉和衍射，特别指出 T. Yang 实验正是矢量场的干涉却不是能量的干涉，明暗条纹是矢量场幅值的大小却不是标量能量的大小；2) 电波的反射折射是独立矢量场的反射折射，不是波能流 $E \times H$ 的反射折射；3) 电波的辐射是独立矢量场的辐射，不是波能流 $E \times H$ 的辐射；4) 电波的接收是对独立矢量场的接收，不是对波能流 $E \times H$ 的接收；5) 电波辐射矢量场守恒，而麦克斯韦旋度场既不是传播波能量守恒也不是辐射矢量场守恒；6) 正余弦电场、磁场是虚功率，正余弦电场、磁场不是能量。电场波和磁场波是虚功率，其本性不是能量。微波作用于物质将转化为热能，不是“能量对能量的直接传递”，而是矢量场作用于物质在洛仑兹力的作用下产生了热能，如同植物的光合作用一样，存在一个转化过程，也如同力作用于物体产生动能一样，存在一个转化过程。作用力 $F = ma(t)$ 和电波力 (电场力 $qE(t)$ 、磁场力 $qvB(t)$) 都不是能量。

因此本章结论是：电波的一切物理行为都不是波能量 ($w \propto E \times H$) 之行为，而是独立矢量场行为；电场波和磁场波的本性不是能量而是虚功率，它作为波动性，辐射矢量场守恒；而波长接近原子尺寸的光波在量化处理的计算上仍可按普朗克量子假设来计算。

5.1 电波干涉和衍射不是波能量行为

如果电波的辐射是场矢量辐射，那么用场矢量来分析与计算干涉、衍射过程时，所得结论应该与实验一致。如果认为电波的辐射是波能量辐射，那么用波能流 EH 或 $0.5\epsilon E^2$ 来分析与计算干涉、衍射时，所得结论应该与实验吻合。否则就不是波能量行为。

5.1.1 光的干涉和衍射均是独立矢量场行为

在本小节中，我们认定电波 (电场波和磁场波) 的行为是场矢量行为，并基于场矢量迭加原理，来分析电波的干涉和衍射。电波的干涉实验没有明显记载，我们以光波来代替电波进行讨论，虽然两者本质上有差别，但作为波动性是一样的。本章不是讨论它们之间的差别，而是讨论它们的行为是波能量行为或是矢量场行为，在这个问题上并不影响讨论。

1. 光波的干涉是独立矢量场的干涉。光波干涉有许多种，以双缝实验为例，如图 5-1 所示，其干涉条纹是该物理行为发生的物理现象。考察该物理现象即条纹的计算，可以基于场

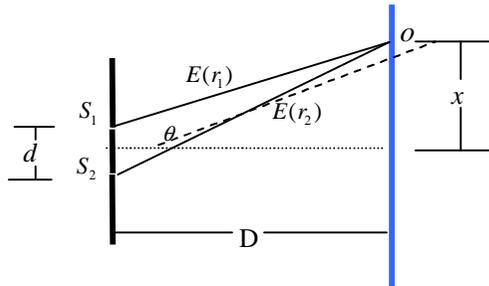


图 5-1 矢量场干涉

矢量之观点，还可基于波能量之观点。如果两种观点得到相同的结论，我们可以说它同时具有这两种属性。否则，却不然。

在该物理行为中，如果基于场矢量观点来分析时，则两束电波的电场矢量到达屏幕上被表示为

$$\begin{cases} E_1 = E_0 \cos(\omega t - \frac{2\pi r_1}{\lambda}) \\ E_2 = E_0 \cos(\omega t - \frac{2\pi r_2}{\lambda}) \end{cases} \quad (5-1)$$

式中 r_1 和 r_2 是各自的波程。迭加后合成的电波的场矢量是 $E = E_1 + E_2$ 。如果电波矢量是同方向的，则在屏幕上 o 点的合成场强为

$$\begin{aligned}
 E &= E_0 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi r_1}{\lambda}\right) + E_0 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi r_2}{\lambda}\right) \\
 &= 2E_0 \cos\left[\frac{\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)\right] \cdot \cos\left[\omega t - \frac{\pi}{\lambda}(r_1 + r_2)\right] \\
 &= 2E_0 \cos \Delta\varphi \cdot \cos\left[\omega t - \frac{\pi}{\lambda}(r_1 + r_2)\right]
 \end{aligned} \tag{5-2}$$

这里 $\Delta\varphi = \frac{\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)$ ，对于式 (5-2) 便有：

当 $r_2 - r_1 = \pm k\lambda$ ， $k = 0, 1, 2, 3$ 时， $E = 2E_0 \cos\left[\omega t - \frac{\pi}{\lambda}(r_1 + r_2)\right]$ ，屏幕上为亮条纹。

当 $r_2 - r_1 = \pm(2k-1)\frac{\lambda}{2}$ ， $k = 1, 2, 3$ 时， $E = 0$ ，屏幕上为暗条纹。

注意到 $r_2 - r_1 \approx d \cdot \sin\theta \approx d \cdot \text{tg}\theta = \frac{xd}{D}$ ，因此

当 $\frac{xd}{D} = \pm k\lambda$ ， $k = 0, 1, 2, 3$ 时， $E = 2E_0 \cos\left[\omega t - \frac{\pi}{\lambda}(r_1 + r_2)\right]$ ，屏幕上为亮条纹。

当 $\frac{xd}{D} = \pm(2k-1)\frac{\lambda}{2}$ ， $k = 1, 2, 3$ 时， $E = 0$ ，屏幕上为暗条纹。条纹之间的间隔为 $\frac{d}{D}\lambda$ 。

以上基于独立矢量场之分析与实验一致。则说明T.Yang的实验是独立矢量场的实验。换言之，T.Yang的干涉实验证明了光的干涉是矢量场的干涉，即证明了 (5-2) 式的正确性。因此双缝干涉服从 E 矢量迭加原理，它是矢量场的干涉，属于场矢量行为。事实上，容易验证，所有干涉 (包括等倾干涉、劈尖干涉、薄膜干涉、迈克孙干涉，以及牛顿环、双棱镜、洛埃镜及劳厄斑点等等) 都服从独立场的矢量迭加原理，是场矢量的行为。

以上分析中是用独立电场 E 来表述的，用独立磁场 H 矢量来分析，道理是一样的。

2. 光波的衍射是独立场矢量的衍射。 单缝衍射可用菲涅尔波带法加以说明，如图 5-2 所示。设单缝的窄边宽度为 AB ，在平行单色电波的垂直照射下，位于单缝所在处的波振面

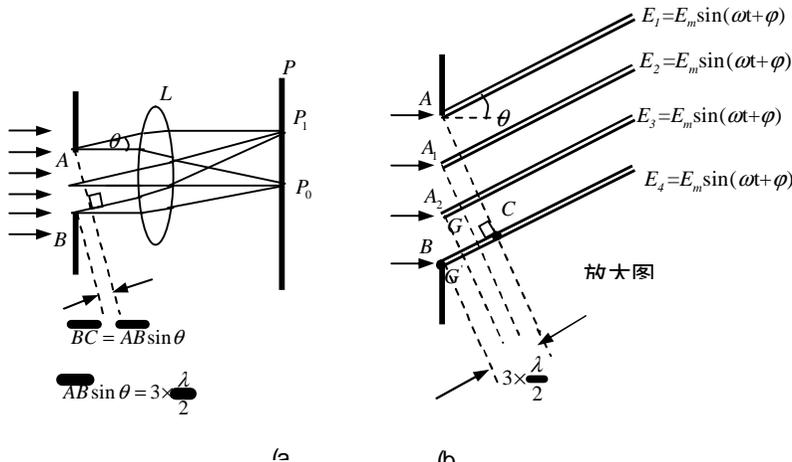


图 5-2 矢量场的衍射

\overline{AB} 上的子波沿着各个方向传播。其中衍射角为 θ 的一束平行光经过透镜后，聚焦在屏幕上的 P_1 点。这束单缝光线的两边边缘光线之间的光程差为

$$\overline{BC} = \overline{AB} \sin \theta \quad (5-3)$$

则在 P_1 点条纹的明暗完全取决于光程差 \overline{BC} 的量值。假定波振面 AB 可分成 AA_1 、 A_1A_2 、 A_2B 等整数个波带，如上图 (b) 所示。由于各个波带的面积相等，所以各个波带在 P 点所引起的光振幅 E_m 相等，两相邻的波带上，任何两个对应点 (如： A_1A_2 带上的 G 点与 A_2B 带上的 G' 点) 所发出的光线的光程差总是 $\frac{\lambda}{2}$ ，亦即相位差总是 π 。结果是任何两个相邻波带所发出的光线在 P_1 点将完全抵消。也就是说：

当 θ 满足

$$\overline{AB} \sin \theta = \pm 2k \cdot \frac{\lambda}{2} \quad k=1, 2, 3, \dots \quad (5-4)$$

时，在 P_1 点出现暗条纹。

当 满足

$$\overline{AB} \sin \theta = \pm (2k+1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad k=1, 2, 3, \dots \quad (5-5)$$

时，在 P_1 点出现明条纹。

这是基于矢量场 $E = E_m \sin(\omega t + \phi)$ 的分析结果。它早被大量实验所证实。事实上，可以证明，所有衍射 (缝衍射、孔衍射以及绕射等) 都是场矢量迭加的结果，均属于场矢量行为。

以上分析中是用独立电场 E 来表述的，用独立磁场 H 矢量来分析，道理是一样的。

5.1.2 光的干涉和衍射不是波能量行为

在大学物理书籍里，在讲授有关光的干涉与衍射时，物理老师首先引入光强 (光能量) 的概念，视乎告诉我们：光的干涉是能量的干涉。目前大学物理书上在介绍 T.Yang 实验之前用光能量作为引言。教科书叙述如下：

由于光强 $I \propto E^2$ ，两束相干光的合成光强 (光能量) 是 $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$ ，当 $I_1 = I_2$ 时有

$$I = 2I \left[1 + \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \right] = 4I_1 \cos^2 \frac{\Delta\varphi}{2} \quad (\#)$$

当 $\Delta\varphi$ 为偶数倍 π 时出现明条纹，等于单个光源强度 I_1 的 4 倍；当 $\Delta\varphi$ 为奇数倍 π 时出现暗条纹，光强 $I = 0$

然后，大学物理书籍接着介绍 T.Yang 实验。似乎告诉人们“T.Yang 的双缝干涉是能量的干涉”，明暗条纹是能量的大小。物理老师也这么说。但是，读者不妨自行验证以下：把 $\Delta\varphi$ 为偶数倍 π 带入式 (5-2) 中，得不到 T.Yang 的明条纹；将 $\Delta\varphi$ 为奇数倍 π 带入式 (5-2) 中，得不到 T.Yang 的暗条纹，即，公式 (#) 与 T.Yang 实验结果不符。因此说，光的干涉不是波能量的干涉。当且仅当按照独立矢量场的 (5-2) 式来计算，才能获得 T.Yang 的实验结论。即，

明暗条纹是矢量场幅值的大小，却不是标量能量的大小。

1. 光的干涉不是波能量干涉。假如，两束光的能流密度用坡印亭矢量 $P = E \times H$ 或用 $w = (EH)e_k$ 来表示，(注： e_k 是能流方向) 见图 5-3 即为

$$\begin{cases} w_1 = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_0^2 \cos^2\left(\omega t - \frac{2\pi r_1}{\lambda}\right) \\ w_2 = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_0^2 \cos^2\left(\omega t - \frac{2\pi r_2}{\lambda}\right) \end{cases} \quad (5-6)$$

式中 ε 和 μ 是自由空间中的电介常数和磁导率。两能流到达屏幕上 o 点的合成密度为

$$\begin{aligned} w &= w_1 + w_2 \\ &= \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_0^2 \left[\cos^2\left(\omega t - \frac{2\pi r_1}{\lambda}\right) + \cos^2\left(\omega t - \frac{2\pi r_2}{\lambda}\right) \right] \\ &= w_0 \left\{ 1 + \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)\right] \cdot \cos(2\omega t - \phi) \right\} \end{aligned} \quad (5-7)$$

这里 $\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(r_1 + r_2)$ ，式中的 2ω 表示能流密度按 2ω 的角频率变化。由 (5-7) 式可看出：

当 $r_2 - r_1 = \pm k\lambda$ ， $k=1,2,3$ 时， $w = w_0 [1 + \cos(2\omega t - \phi)]$ ，其模值是 $2w_0$ ；

当 $r_2 - r_1 = \pm(2k-1)\lambda$ ， $k=1,2,3$ 时， $w = w_0 [1 - \cos(2\omega t - \phi)]$ ，其模值仍然是 $2w_0$ 。两种情况下的能密相等，没有干涉条纹。但事实上是：当 $r_2 - r_1 = \pm k\lambda$ ， $k=1,2,3$ 时出现亮点，而当 $r_2 - r_1 = \pm(2k-1)\frac{\lambda}{2}$ ， $k=1,2,3$ 时出现暗点，存在干涉条纹。由此可见，双缝干涉这个物理行为不是波能量行为。

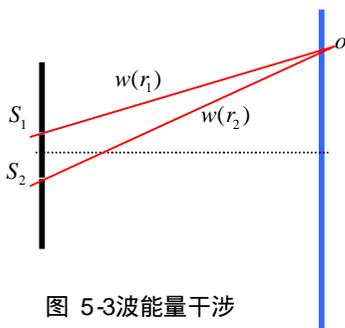


图 5-3 波能量干涉

诚然，当麦克斯韦的“孪生能流 $w = EH$ ”被否定之后，能否用能流 $w = \varepsilon E^2 c$ 来描述光微波的干涉呢？回答也是否定的。

不妨试一下，设到达屏幕的两束电场能量密度分别是

$$\begin{cases} w_1 = \varepsilon E_0^2 \cos^2\left(\omega t - \frac{2\pi r_1}{\lambda}\right) \\ w_2 = \varepsilon E_0^2 \cos^2\left(\omega t - \frac{2\pi r_2}{\lambda}\right) \end{cases} \quad (5-8)$$

式中 c_0 是真空中光速。两能流到达屏幕上 α 点的合成能密为

$$\begin{aligned} w &= w_1 + w_2 \\ &= \varepsilon E_0^2 \left[\cos^2 \left(\omega t - \frac{2\pi r_1}{\lambda} \right) + \cos^2 \left(\omega t - \frac{2\pi r_2}{\lambda} \right) \right] \\ &= w_0 \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (r_2 - r_1) \right] \cdot \cos(2\omega t - \phi) \right\} \end{aligned} \quad (5-9)$$

这里 $\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(r_1 + r_2)$ ，式中的 2ω 表示能流密度的模值按 2ω 的角频率变化。由上式可看出：
 $r_2 - r_1 = \pm k\lambda$, $k=1,2,3$ 时， $w = w_0 [1 + \cos(2\omega t - \phi)]$ ，其模值是 $2w_0$ ；
 $r_2 - r_1 = \pm(2k-1)\lambda$, $k=1,2,3$ 时， $w = w_0 [1 - \cos(2\omega t - \phi)]$ ，其模值仍然是 $2w_0$ 。两种情况下的能密相等，没有干涉条纹。但事实上，上述两种情况存在干涉条纹，可见双缝干涉这个物理行为不是波能量行为，或者说，波的本性不是能量而是场。事实上，容易验证，所有干涉（包括等倾干涉、劈尖干涉、薄膜干涉、迈克孙干涉，以及牛顿环、双棱镜、洛埃镜及劳厄斑点等等）都不是波能量行为。

2. 光波衍射不是波能量行为。波能量衍射图如图 5-4 所示。由于所谓的波能量

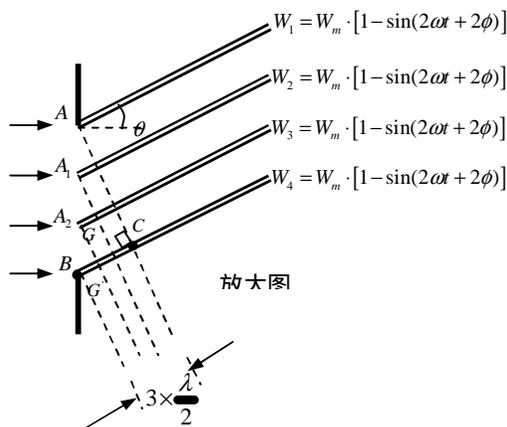


图 5-4 波能量衍射

$W \propto \varepsilon E^2 = \frac{\varepsilon E_m^2}{2} (1 - \sin 2\omega t + 2\phi)$ ，所以定义光微波能量永远是正值。一方面，两个正值能量相加不可能是零，即没有暗条纹；另一方面，即使您认为存在负能量，但因频率已变成 2ω ，波能量的波长减半，那么衍射条纹也与实验不符。既然如此，我们不可以说衍射属于波能量的衍射。也就是说，衍射不是波能量行为。事实上，可以证明，所有衍射（缝衍射、孔衍射以及绕射等）都不是波能量迭加的结果，都不是波能量行为。

5.1.3 光波的其他行为都不是波能量行为

1. 对于全息照相，参见图 5-5，物光和参考光在底片平面上的振动方程分别是：

$$E_O = E_{mO} \cos(\omega t + \phi_O - \frac{2\pi y \sin \theta}{\lambda}) \quad (5-10)$$

$$E_R = E_{mR} \cos(\omega t + \phi_R) \quad (5-11)$$

两场矢量迭加 $E = E_O + E_R$ 的结果是

$$\begin{aligned} E &= E_{mO} \cos(\omega t + \phi_O - \frac{2\pi y \sin \theta}{\lambda}) + E_{mR} \cos(\omega t + \phi_R) \\ &= \sqrt{E_{mO}^2 + E_{mR}^2 + 2E_{mO}E_{mR} \cos \phi_0} \cdot \cos(\omega t + \phi') \end{aligned} \quad (5-12)$$

式中 $\phi' = \arctg \frac{E_{mR}}{E_{mO}}$, $\phi_0 = \phi_O - \phi_R - \frac{2\pi y \sin \theta}{\lambda}$ 。当 $\cos \phi_0 = 1$ 时,有极大值 $E_{\max} = (E_{mO} + E_{mR}) \cdot \cos(\omega t + \phi')$; 当 $\cos \phi_0 = -1$ 时,有极小值 $E_{\min} = (E_{mO} - E_{mR}) \cdot \cos(\omega t + \phi')$ 。特别当 $E_{mO} = E_{mR}$ 时,有 $E_{\min} = 0$ 。条纹的强度反映了物光的振幅,条纹的疏密反映了物光倾角 θ 的大小。这完全基于场矢量迭加原理,属于矢量场行为。

同样可以证明,全息照相不是波能量行为。

2. 光的偏振显然是独立场矢量行为,或者说检偏器业已证明了光的辐射是矢量场的辐射。否则,如果您认为光传播是波能量行为,那么检偏器无法检偏,因为波能量无偏振方向。此外,玛吕斯定律的准确表达式为 $E_{out} = E_m \cos \alpha$, α 表示检偏器与光偏振间的夹角。

3. 双折射现象是场矢量行为,如图 5-6所示。同样,尼科尔棱镜和电气石二色性,都是场矢量行为。此外,磁致旋光效应和液晶显示也都是场矢量行为。

4. 非线性光学现象是场矢量行为。当电波电场强度 E 较大时,电极化强度除了正比于 E 的一次方外,还正比于 E 的二次方、三次方... 这些都是场矢量行为的有力论据。

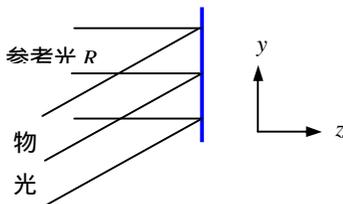


图 5-5 矢量场迭加全息照相

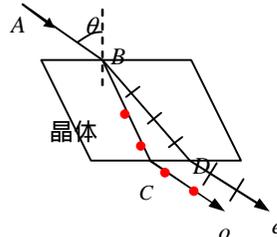


图 5-6 矢量场双折射

本节论述了电波的干涉、衍射和其它宏观物理现象都是场矢量行为,不是波能量行为,更不是玻印廷能流密度 $E \times H$ 之行为。我们可以说,电波辐射本性是场矢量,而不是波能量。这与微观世界里的普朗克量子假说并无矛盾,因为 hf 是场矢量作用于物质过程中转换为能量时,在转换过程中的最小转换单元,参见 5.4 节。

以上的独立矢量场是使用 E 来表述的,用 H 来表述,其道理是一样的。

因为机械波服从经典波动方程,第四章的独立辐射场不服从波动方程,所以用本章来说明其道理。本章的思路是,从行为看属性,从属性看守恒。既然行为不是波能量,则属性不是波能量,从而它不属于波动方程的范畴;既然行为是独立矢量场行为,则属性是独立矢量

场，辐射矢量场守恒，即，流出 S_1 球面的场量等于流出 S_2 球面的场量。也就是电磁波独立辐射矢量场守恒。

5.2 电波反射折射及传输不是波能量行为

如果认为电波（电场波或磁场波）是场矢量辐射守恒，那么用场矢量 E （或 H ）来分析计算反射折射及传输过程时，所得结论应该与客观事实吻合。如果认为电波是辐射波能量守恒，那么用波能量 EH 或 $0.5\varepsilon E^2$ 来分析计算反射折射及传输过程时，所得结论应该与客观事实吻合。否则却不然。

5.2.1 电波反射与折射是独立矢量场行为

基于场矢量迭加原理，如图 5-7 所示。在入射点上有法向电场 E_{ni} ， E_{nL} ， E_{nr} 和有切向电场 E_{ti} ， E_{tL} ， E_{tr} 。考虑边界条件的连续性，于是有

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 E_{ni} + \varepsilon_1 E_{nL} &= \varepsilon_2 E_{nr} \\ E_{ti} - E_{tL} &= E_{tr} \end{aligned} \quad (5-13)$$

即

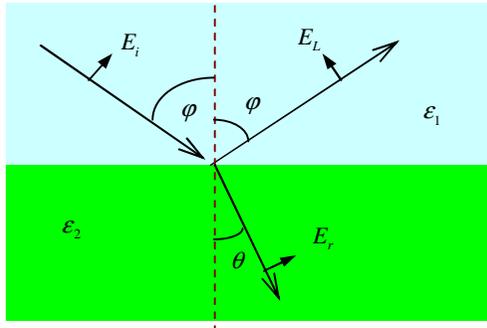


图 5-7 场矢量行为

$$\begin{cases} \varepsilon_1 E_i \sin \varphi + \varepsilon_1 E_L \sin \varphi = \varepsilon_2 E_r \sin \theta \\ E_i \cos \varphi - E_L \cos \varphi = E_r \cos \theta \end{cases} \quad (5-14)$$

上式的第一式也指面电荷密度连续，第二式也指切向电场连续。式中 ε_1 和 ε_2 分别是介质 1 和 2 的电介常数，下标 i 、 L 、 r 分别表示入射、反射、折射。

求解方程组（5-14），得到

$$E_L = \frac{\varepsilon_2 \cos \varphi \sin \theta - \varepsilon_1 \sin \varphi \cos \theta}{\varepsilon_2 \cos \varphi \sin \theta + \varepsilon_1 \sin \varphi \cos \theta} E_i \quad (5-15)$$

$$E_r = \frac{2\varepsilon_1 \sin \varphi \cos \varphi}{\varepsilon_2 \cos \varphi \sin \theta + \varepsilon_1 \sin \varphi \cos \theta} E_i \quad (5-16)$$

将斯耐尔定理 $\sin \theta = \frac{c_2}{c_1} \sin \varphi$ 代入式 (5-15) 和式 (5-16), 得到

$$E_L = \frac{\varepsilon_2 c_2 \cos \varphi - \varepsilon_1 c_1 \cos \theta}{\varepsilon_2 c_2 \cos \varphi + \varepsilon_1 c_1 \cos \theta} E_i \quad (5-17)$$

$$E_r = \frac{2\varepsilon_1 c_1 \cos \varphi}{\varepsilon_2 c_2 \cos \varphi + \varepsilon_1 c_1 \cos \theta} E_i \quad (5-18)$$

式中 c_1 和 c_2 是电磁场在各自媒质中的传播速度。

现在, 再把 $\cos \theta = \sqrt{1 - (c_2 \sin \varphi / c_1)^2}$ 代入以上两式, 得到

$$E_L = \frac{\varepsilon_2 c_2 \cos \varphi - \varepsilon_1 c_1 \sqrt{1 - (c_2 / c_1)^2 \sin^2 \varphi}}{\varepsilon_2 c_2 \cos \varphi + \varepsilon_1 c_1 \sqrt{1 - (c_2 / c_1)^2 \sin^2 \varphi}} E_i \quad (5-19)$$

$$E_r = \frac{2\varepsilon_1 c_1 \cos \varphi}{\varepsilon_2 c_2 \cos \varphi + \varepsilon_1 c_1 \sqrt{1 - (c_2 / c_1)^2 \sin^2 \varphi}} E_i \quad (5-20)$$

将折射率 $n = \frac{c_1}{c_2} = \sqrt{\frac{\mu_2 \varepsilon_2}{\mu_1 \varepsilon_1}}$ 代入, 并作简单的运算, 便是著名的 Fresnel 公式。这里, 场矢量迭

加原理式 (5-13) 是该物理行为的关键, 因此说, 反射折射这个物理行为服从独立矢量场迭加原理, 属于场矢量行为。

对于电场波入射到金属板上, 参见图 5-8, 金属电子在洛伦兹电力 $F = eE$ 的作用下也将形成时变壁电荷。而时变壁电荷必将产生时变电场 E' , 其中右图表示相位和幅度均相等的点

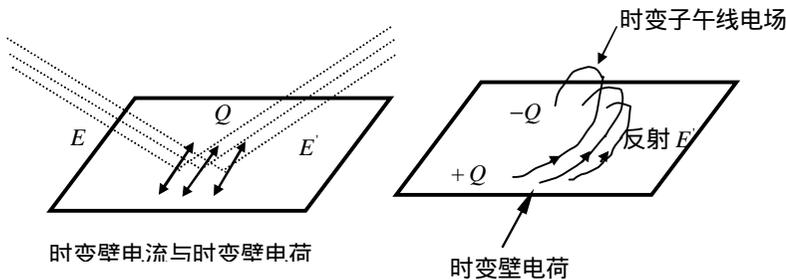


图 5-8 壁电荷产生的 E'

集, 即波振面。反射原理是: 一方面形成壁电流 $i(t)$, 另一方面聚集形成壁电荷 $Q(t)$ 。而壁电流 $i(t)$ 将产生新的磁场 B' 、壁电荷 $Q(t)$ 又将产生新的 E' , 即为反射的磁波和电波。这完全属于场矢量行为, 绝不是能流密度行为。

以上分析中是用独立电场 E 来表述的, 用独立磁场 H 矢量来分析, 道理是一样的, 详见 1.7 节。

5.2.2 电波传输是独立场矢量行为

现在我们考虑这样一个传输系统, 即电波从一种媒质 ε_1 传输到另一种媒质 ε_2 , 让我们研

究它的场矢量属性与客观事实的吻合与否。见图 5-9

不妨，我们把 $\sin \varphi = \frac{\sqrt{\epsilon_2[\epsilon_2 - (\mu_2/\mu_1)\epsilon_1]}}{\sqrt{(\epsilon_2 + \epsilon_1)(\epsilon_2 - \epsilon_1)}} = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_2 + \epsilon_1}}$ 代入上式 (5-20)，得到 $E_L = 0$ 且 $E_r = (\epsilon_1 c_1 / \epsilon_2 c_2) E_i$ ，即：对于平行极化波，电波从一种媒质传输到另一种媒质，满足此角时

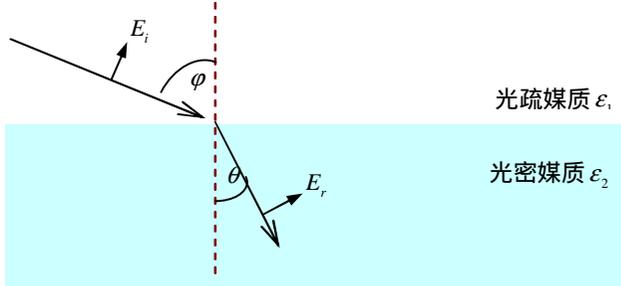


图 5-9 潜水员通信和布儒斯特角已证明无反射

没有反射，只有折射。潜水员与地面通讯正是利用此角才得以实现。

以上完全基于矢量电场分析，光纤通信和潜水员通信中，都是基于矢量场传输的分析方法。换句话说，电波在介质间的传输是场矢量的传输，属于场矢量行为，并服从场矢量迭加原理。不可能是能流密度 $E \times H$ 行为。

让我们再来研究波导中的微波传输行为。这里，我们基于矢量分析方法，设波导如图 5-10 所示，波导的宽边尺寸是 a ，窄边尺寸是 b 。基于反射传输原理，不难看出：第一，为了

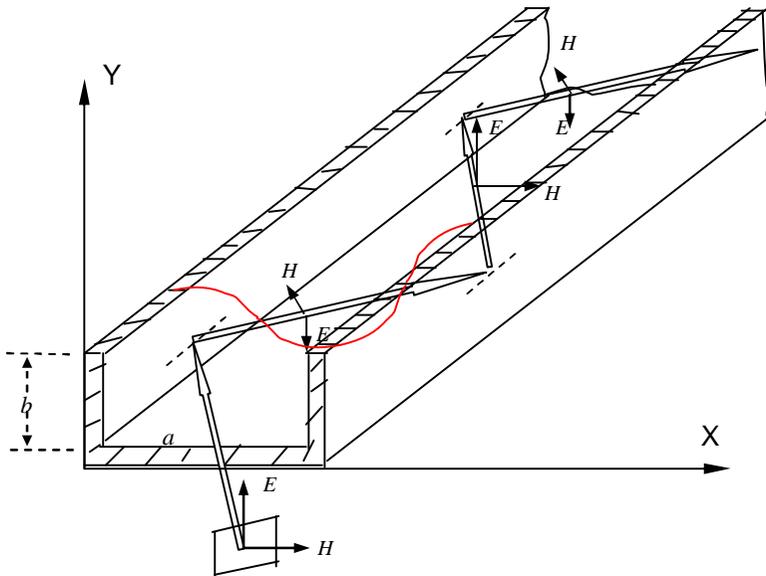


图 5-10 基于场矢量分析的传输

得到高效率的传输，波导内壁必须是光洁的良导体，特别是 b 边更应如此；第二，如果电波或磁波在自由空间的传播速度是 c_0 ，那么电波沿着波导的传播速度必然小于 c_0 ，因为它是

折线运动；第三，因为反射实为二次辐射，而二次辐射时，半波振子的辐射效率最好，据此推得 b 边尺寸最佳是半个波长 (可窄但不可宽，过宽将使得上端与下端产生的场强在波导中相互抵消)；第四，由于波导左右对称，为了避免散射波相互干扰，最好是使得左壁电流与右壁电流同时同相变化，为此，电波或磁波在波导中传输的斜距离应当为波长 λ ，而且入射角为 45° 为佳，于是， a 边的尺寸应为 $\frac{\lambda}{\sqrt{2}} = 0.707\lambda$ ，才是最佳传输。在实际工程中，已经证实了 $a = 0.707\lambda$ 的最佳传输状态。这里，我们完全基于场矢量分析，所以我们有理由认为传输过程是场矢量行为。换句话说，微波工程师在实践中得出了经验 $b = 0.5\lambda$ 和 $a = \frac{\lambda}{\sqrt{2}} = 0.707\lambda$ 是最佳传输，并没有使用麦克斯韦旋度理论的金属波导传输模型。

无论是光纤通信，或是潜水员的通讯体验，或是微波在波导中的传输，事实业已证明，电波的传输是矢量场的传输，属于场矢量行为，不是波能量行为。

以上分析中是用独立电场 E 来表述的，用独立磁场 H 矢量来分析，道理是一样的。

5.2.3 电波反射折射不是波能量行为

现在我们来研究电波反射折射是否是波能量行为。如果它是波能量行为，那么它应当满足能量守恒定律而且应当与电波实验不冲突。反之，如果它不满足波能量守恒定律或者得不到与电波实验一致的结论，则说明它不是能量的传输。

假如认为电波的反射折射是波能量的反射折射，那么用能流密度来获取反射折射方程，结果怎样呢？计算如下：由于能流密度是矢量，能流在分界面上连续，参见图 5-11。

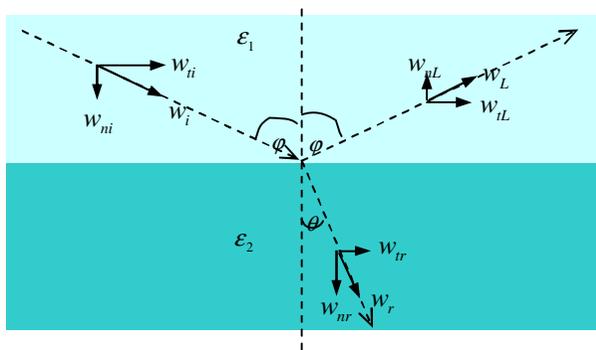


图 5-11 假如反射折射是波能量行为

$$\text{法向能流连续：} w_i \cos \varphi - w_r \cos \varphi = w_{rL} \quad (5-21)$$

$$\text{切向能流连续：} w_i \sin \varphi + w_r \sin \varphi = w_{rL} \quad (5-22)$$

即

$$\begin{cases} w_i \cos \varphi - w_r \cos \varphi = w_r \cos \theta \\ w_i \sin \varphi + w_r \sin \varphi = w_r \sin \theta \end{cases} \quad (5-23)$$

解此方程组得到

$$\begin{cases} w_L = \frac{\cos \varphi \sin \theta - \sin \varphi \cos \theta}{\sin \varphi \cos \theta + \cos \varphi \sin \theta} w_i \\ w_r = \frac{2 \sin \varphi \cos \varphi}{\sin \varphi \cos \theta + \cos \varphi \sin \theta} w_i \end{cases} \quad (5-24)$$

将 $\sin \theta = (c_2/c_1) \sin \varphi$ 和 $\cos \theta = \sqrt{1 - (c_2 \sin \varphi / c_1)^2}$ 代入上式，得到

$$\begin{cases} w_L = \frac{c_2 \cos \varphi - c_1 \sqrt{1 - (c_2 \sin \varphi / c_1)^2}}{c_2 \cos \varphi + c_1 \sqrt{1 - (c_2 \sin \varphi / c_1)^2}} w_i \\ w_r = \frac{2 c_1 \cos \varphi}{c_2 \cos \varphi + c_1 \sqrt{1 - (c_2 \sin \varphi / c_1)^2}} w_i \end{cases} \quad (5-25)$$

检验 (5-25) 式，我们不难看出：它与菲涅尔公式冲突；除了 $\varphi = 0$ 以外， $w_L + w_r > w_i$ ，即违背了能量守恒定律。因此，我们说，我们有理由认为电波的反射折射不是波能量行为。

5.2.4 电波传输不是波能量行为

我们可以考虑这样一个传输系统，即电波从一种媒质 (ϵ_1) 传输到另一种媒质 (ϵ_2)，让我们研究它的波能量传输与客观事实是否吻合。见图 5-12，设微波能量从光疏媒质发出并入射到光密媒质，如果电波的传输是波能量的传输，那么能流在分界面上连续，满足式 (5-25)，

现在以 $\varphi = \arcsin \sqrt{\frac{\epsilon_2 [\epsilon_2 - (\mu_2 / \mu_1) \epsilon_1]}{(\epsilon_2 + \epsilon_1)(\epsilon_2 - \epsilon_1)}} = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_2 + \epsilon_1}}$ 的入射角传输到光密媒质 (ϵ_2) 上，

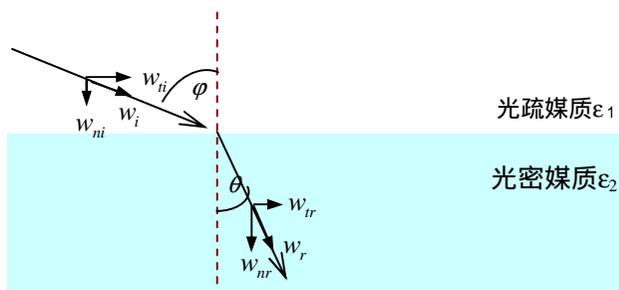


图 5-12 假如电波传输是波能量传输

于是有

$$w_L = \frac{c_2 \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}} - c_1 \sqrt{1 - \frac{c_2^2 \epsilon_2}{c_1^2 (1 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1})}}}{c_2 \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}} + c_1 \sqrt{1 - \frac{c_2^2 \epsilon_2}{c_1^2 (1 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1})}}} w_i \geq 0 \quad (5-26)$$

这就是波能量传输的结果。可以检验，除了 $c_1 = c_2$ 以外，恒有 $w_L > 0$ ，没有反射的布儒斯特角。

然而，大量事实业已证明了，当 $\varphi = \arcsin \sqrt{\frac{\epsilon_2 [\epsilon_2 - (\mu_2 / \mu_1) \epsilon_1]}{(\epsilon_2 + \epsilon_1)(\epsilon_2 - \epsilon_1)}} = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_2 + \epsilon_1}}$ 时，确有

$w_L = 0$ 。由此可见，电波从一种媒质传输到另一种媒质时，不是波能量行为。

本节基于场矢量辐射观点，所得反射折射及传输方程均与客观事实一致；但当基于波能量辐射观点来分析时，所得反射折射及传输方程与客观事实不符。因此，我们有理由认为电波的辐射不是波能量的辐射。

当入射光强给定后，反射与折射光强的计算，将有两种途径。一是基于“场矢量传输”，二是基于“波能量传输”。我们已经得知，用两种途径来分析同一物理行为时，所得结果截然不同。结论是：电波的反射是独立矢量场行为，却不是波能量行为；电波的折射是独立矢量场行为，却不是波能量行为；电波的传输是独立矢量场行为，却不是波能量行为。从而表明电波非能量属性。

因为机械波服从经典波动方程，第四章的独立辐射场不服从波动方程，所以用本章来说明其道理。本章的思路是，从行为看属性，从属性看守恒。既然行为不是波能量，则属性不是波能量，从而它不属于波动方程的范畴；既然行为是独立矢量场行为，则属性是独立矢量场，从而说明它服从矢量场守恒，即说明流出 S_1 球面的场量等于流出 S_2 球面的场量。也就是辐射独立矢量场守恒。

5.3 电波辐射不是波能量行为

如果认为电波（电场波或磁场波）辐射是波能量传播，那么接收装置应该满足能量迭加原理；如果认为电波辐射是独立场矢量的辐射，那么接收装置应该满足场矢量迭加原理。因此用接收装置上的实验可以证明电波辐射到底是波能量传播或是独立矢量场的辐射。

对于本文构思的“理想实验”——如何计算屏幕上的光强，将有两种选择：一是基于“光辐射是场矢量的辐射”之观点来计算光强；二是基于“光辐射是波能量传播”之观点来计算光强。我们将发现，两种观点考察同一事物，所得结论截然不同。虽然光波与电波在物理本质上有区别，但作为波动性，两者是同地位的，因此本小节讨论“波是能量传播或是场量辐射”，于是可以借用光学原理来讨论，到底是场量辐射或是能量传播？

5.3.1 光波辐射是独立矢量场的辐射

如果只考虑一束光波的辐射问题，既不能证实波能量传播，也不能证伪波能量传播。因此本节考虑这样一个光传输系统：见图 5-13，左边是光波发射装置，右边是光波接收装置，而中间则是光辐射的物理空间。在这个辐射空间中有 n 束光波，它们来自发射装置的透镜，并到达接收装置的屏幕。由于 n 束光波来自同一个发射源，因此它们具有相同的偏振和相同的初相位，并且在聚焦点 o 上具有相等的光程差。

如果光波辐射的正是矢量场，则 n 束光波辐射到屏幕上 o 点时，其矢量场的强度为

$$E_{sum} = E_1 + E_2 + \cdots + E_n \quad (5-27)$$

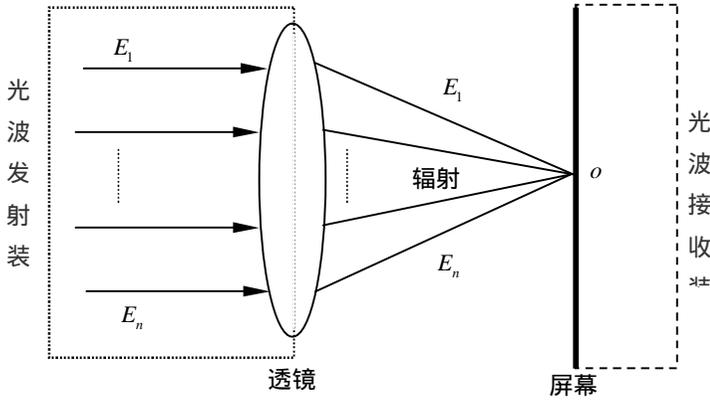


图 5-13 光波的辐射

如何检验这一物理属性 (场矢量迭加原理) 是否吻合这一物理行为 (屏幕 o 点上光强) 呢? 这在透镜干涉的大量实验中, 早被人们所证实。因此说, 光波辐射是矢量场的辐射。成立!

以上分析中是用独立电场 E 来表述的, 用独立磁场 H 矢量来分析, 道理是一样的。

5.3.2 光波辐射不是波能量的传播

如果光波辐射的是波能量, 见图 5-14 则 n 束光能量传播到屏幕上 o 点时, 其能量大小 (或能流密度) 为

$$\begin{aligned}
 w_{sum} &= w_1 + w_2 + \dots + w_n \\
 &= \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E_1^2 + \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E_2^2 + \dots + \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} E_n^2 \\
 &= \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} (\sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2})^2 \\
 &= \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} (E'_{sum})^2
 \end{aligned} \tag{5-28}$$

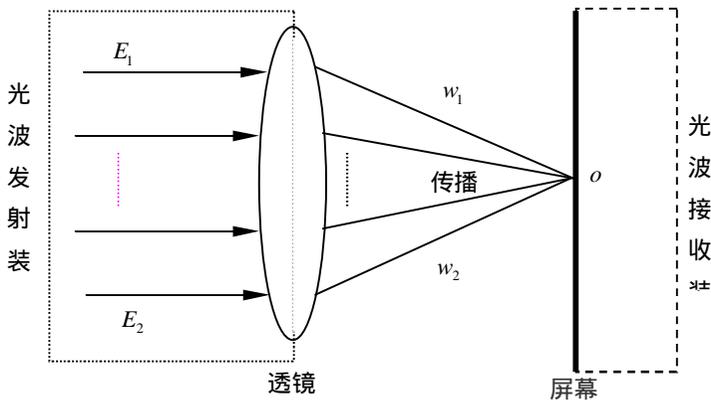


图 5-14 假设光运动是能量传播

这是 n 束光能量到达屏幕 o 点上时的总能量 w_{sum} , 相应的总电场 E_{sum} 是

$$E'_{sum} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2} \quad (5-29)$$

显然式 (5-29) 不等于式 (5-27)。如果认为光的辐射是能量的传播，那么屏幕 o 点上的光能量强度应该由式 (5-28) 的 w_{sum} 描述，折算后的场矢量应该由式 (5-29) 的 E'_{sum} 来描述。然而我们认为式 (5-28) 或 (5-29) 的光波能量 $w_{总}$ 并不反映屏幕 o 点上的光强。这是因为：既然式 (5-27) 得到了检验，那么式 (5-29) 就不可能正确，因为式 (5-29) 与式 (5-27) 不相等，即 $E'_{sum} \neq E_{sum}$ 。由于图 5-14 这种光辐射系统实际上是透镜干涉装置，在波能量辐射观点指导下，式 (5-28) 或式 (5-29) 在屏幕上不可能出现明暗条纹，所以它客观事实不符。亦即，波能量辐射观点与客观事实不符，因为接收屏幕上能够出现明暗条纹。见干涉实验。

以上分析中是用独立电场 E 来表述的，用独立磁场 H 矢量来分析，道理是一样的。

5.3.3 电波辐射是独立矢量场的行为

设有一个发射振子和一个接收振子，如图 5-15 所示。收发天线相距很远， $r \gg dl$ ，因此，到达接收天线上的电波可视为横波。注意到，到达接收天线上有三个参量： E_θ 、 H_ϕ 、 w_r 。对于电波的辐射，到底是直接辐射了 E_θ 和 H_ϕ 呢？或者是直接传播了能流密度 w_r 呢？

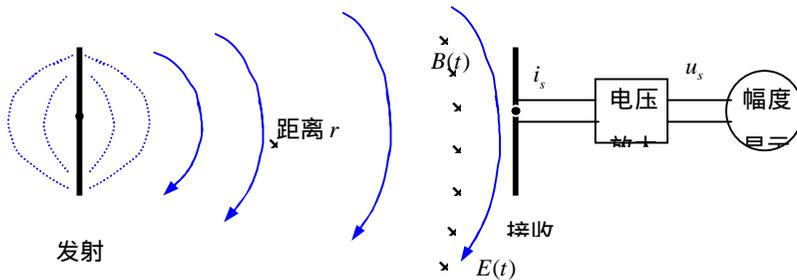


图 5-15 电波发、收简图 --场矢量辐射

辐射场矢量与传播波能量是两个不同的概念。基于场矢量辐射之观点论述如下。

正如第 4 章所述，辐射的时变电场 $E(t) \propto \frac{1}{r^2}$ 、辐射的时变磁场 $B(t) \propto \frac{1}{r^2}$ ，接收天线上的金属电子在 $E(t)$ 和 $B(t)$ 之作用下，受洛仑兹电力 $eE(t)$ 和洛仑兹磁力 $e(-c_0) \times B(t)$ 而做上下移动，从而形成信号电流。因此信号电流的大小 $i(t) \propto \frac{1}{r^2}$ ，电流乘以阻抗就是电压，加到磁式示波器上的幅度值 $U_m \propto \frac{1}{r^2}$ ；经电压放大之后，加到电压偏转板示波器上的幅度值 $U_m \propto \frac{1}{r^2}$ ；即为大家熟知的距离平方反比律。这里，我们的观点结论是，辐射是场矢量的辐射，接收是场矢量的接收。为了进一步说明，信号接收是矢量场的接收这一观点的正确性，请参见图 5-16 的 (a) 和 (b)，在各自的图中，左右两个信号源同频同相而且电路也完全一样。导线 \overline{ab} 在两个发射天线的中间并平行于发射天线，导线 \overline{ab} 可视作接收天线。可以检验，导

线 ab 上的电流为零，这是正负场矢量迭加 (对消) 的结果。

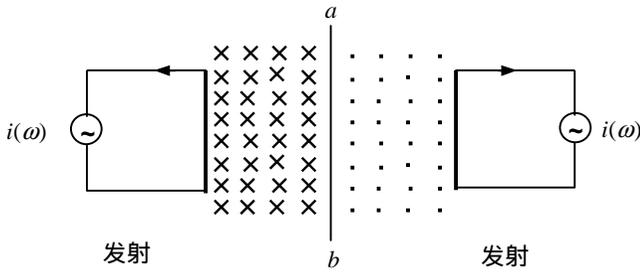


图 16(a) 矢量场的对消

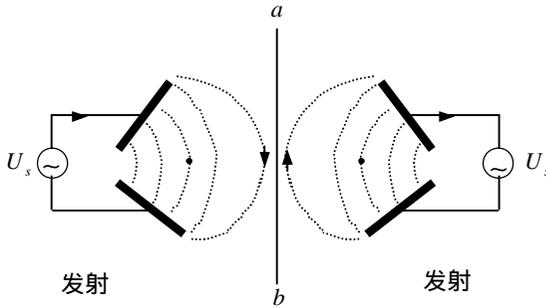


图 16(b) 对称辐射中场矢量对消

如果认为辐射了能量，那么图中接收天线 ab 上形成的信号强度多大？显然错！更不是爱因斯坦的质能关系使得 ab 导线的质量或重量增加。

以上分析中是用独立电场 E 来表述的，用独立磁场 H 矢量来分析，道理是一样的

5.3.4 电波的辐射不是波能量的行为

让我们再来看一看无线电通信中的微波辐射或辐射过程。

设有一个发射振子和一个接收振子，收发天线相距很远， $r \gg dl$ ，即在通信应用中，如果认为电波的辐射是波能量的辐射，如图 5-1 所示，那么能流密度 w_r 作用于接收天线 (一根细导线) 时，它不能形成信号电流，因为 w_r 垂直于接受天线。况且，如果认为接收天线是接收了电磁能量 w_r ，那么接收天线是否与发射天线平行就显得无关紧要。然而，事实上相当

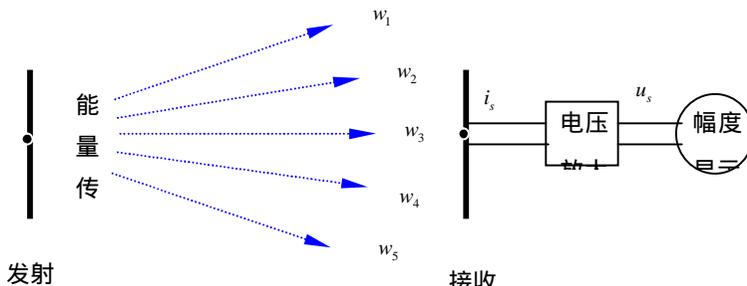


图 5-17 假若是能量传播

重要。其实，图中接收天线不是“口袋”，它也无法接收波能量。

既然接收天线不是接收波能量，那么，何以见得电波辐射了波能量呢？显然不是！

为了进一步说明，信号接收非能量接收这一观点的正确性，请参见图 5-18 的 (a) 和 (b)，在各自的图中，左右两个信号源同频同相而且电路也完全一样。导线 ab 在两个发射天线的中间并平行于发射天线，导线 ab 可视为接收天线。

如果，如果认为电波的辐射是能量 w 的传播，那么接收天线既接收了来自左边的 w ，又

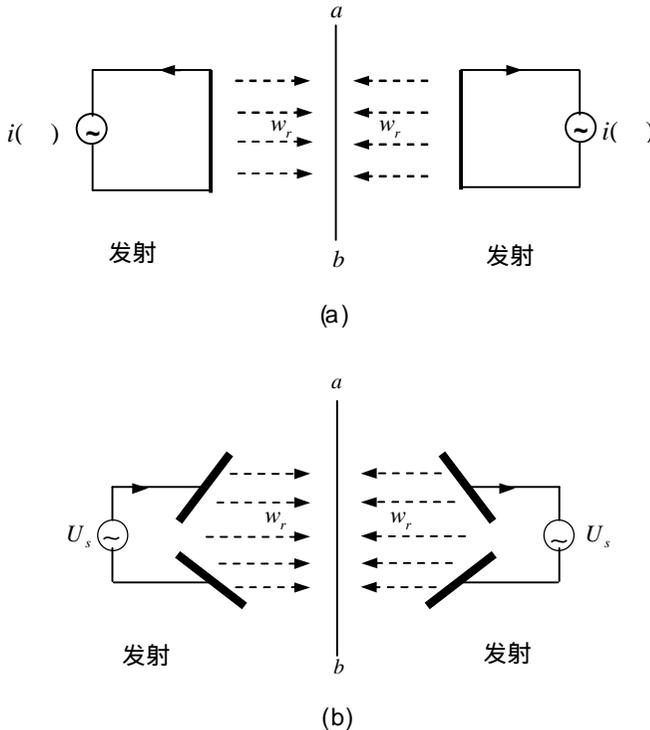


图 5-18 同频同幅同相之等距的对称传播

接收了来自右边的 w 。由于能量 w 是标量，所以接收天线 ab 共接收到了 $2w$ ，即接收信号电流比单部发射机时增强了一倍。然而，事实上恰恰相反，上图的能量对撞是无法形成信号电流。即，导线 ab 上不可能接收到两倍的电波能量。因此，我们坚定地认为：信号的接收不是对波能量的接收。

这里顺便指出，光波或者图 5-18 的电场波对着导线 (或物体) 辐射几千年几万年，也不会使得物体 ab 导线的质量增加^{[1]P92}成 mc_0^2 。经常日光浴的美女不可能增加质量，植物的光合作用作用使得植物生长，这不是地球 (水土石头等物质) 的质量长期被太阳“能”吸收的缘故。

既然电波作为波动性的所有行为都是独立矢量场行为，却不是同生共死的 $E \times H$ 能量行为，那么我们就有理由认定，电波辐射不是波能量的传播，而是各自辐射矢量场。只有所有物理行为均是同生共死的 $E \times H$ 能量行为，才能说传播了波能量。实际上由麦克斯韦旋度理论而得到的 $E \times H$ 是距离 r 的多项式，也并不是传播波能量守恒，而且是一个负能量值，显然他与客观事

实不符。虽然 $E \times H$ 是矢量，但能量是标量。谁推动了标量的前进？无人！

因为机械波服从经典波动方程，第四章的独立辐射场不服从波动方程，所以用本章来说明其道理。本章的思路是，从行为看属性，从属性看守恒。既然行为不是波能量，则属性不是波能量，从而它不属于机械波波动方程的范畴；既然行为是独立矢量场行为，则属性是独立矢量场，从而说明它服从矢量场守恒，即说明流出 S_1 球面的场量等于流出 S_2 球面的场量。也就是辐射独立矢量场守恒。

5.4 电波的本性不是能量

自从麦克斯韦理论、波动方程和坡印亭矢量诞生以来，人们一直认为微波辐射了波能量。即认为： $w = EH = c\epsilon E^2 = c\mu H^2$ 具有能流密度的量纲，在时间 t 内流过截面积 s 的波能量的平均值是

$$W = \frac{1}{2} c\epsilon E_m^2 s t \quad (5-30)$$

照此说来，似乎微波暗箱可以储存波能量、微波加热是能量交换。我们也常常听到“微波能量”之说，而且有微波能量交换成热能等术语。这似乎微波本身就是能量、似乎这种微波作用于物质时是把能量直接传递给了物质。更有荒唐者把物质与能量等同起来^{[1]P32}。

通过本节的阐述，我们将认识到，时变电磁场是虚功率，微波本身不具有波能量属性，它与物质作用的过程是矢量场激发物质后转化成热能，并非波能量的直接传递。这里，我们需注意到“场矢量激发成热能”与“波能量交换成热能”，是两个不同的物理变化过程和两个不同的物理概念。

5.4.1 辐射的时变电磁场是虚功率

对于集中参数元件 (电路尺寸远小于波长)，含有电抗元件的电路，其解是：全响应等于暂态响应 + 稳态响应。我们感兴趣的是这种正余弦稳态响应所带来的正余弦微波之物理属性。

大家知道，在含有电抗元件的端口电路中，在正余弦稳态情况下，端口电压为 $v(t) = V_m \cos(\omega t + \phi)$ 、端口电流为 $i(t) = I_m \cos(\omega t + \angle I)$ ，则相应的复功率是

$$P = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\angle V - \angle I) + j \frac{1}{2} V_m I_m \sin(\angle V - \angle I)$$

式中， $\angle V$ 是电压角、 $\angle I$ 是电流角。右边第一项是实功率，第二项是虚功率。实功率消耗能量，虚功率不消耗能量。

据此，让我们来研究电容中的时变电场和电感中的时变磁场的属性。

1. **正余弦电场是虚功率。** 见图 5-19，在 RC 电路中施加的电压源是 $v_s(t) = V_m \cos \omega t$ ，图中的电阻 R 包括电源内阻和传导线的电阻率所带来的阻值，即

$$R = R_{\text{源}} + R_l \quad (5-31)$$

求解该电路得到，端口 1-2 的复功率是：

$$P_s = \frac{1}{2} \frac{V_m^2 R \omega^2 C^2}{1 + R^2 \omega^2 C^2} - j \frac{1}{2} \frac{V_m^2 \omega C}{1 + R^2 \omega^2 C^2} \quad (5-32)$$

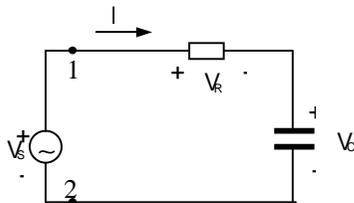


图 5-19 正余弦电场是虚功率

这也是电压源提供的复功率。式中 $\frac{1}{2}$ 是平均功率的定义。

对于电阻端口，其复功率是：

$$P_R = \frac{1}{2} \frac{V_m^2 R \omega^2 C^2}{1 + R^2 \omega^2 C^2} + j0 \quad (5-33)$$

对于电容端口，其复功率是：

$$P_C = 0 - j \frac{1}{2} \frac{V_m^2 \omega C}{1 + R^2 \omega^2 C^2} \quad (5-34)$$

通过以上计算分析得到如下结论：稳态情况下，电压源提供的能量全部用于电阻上。在电容中，虽然不断地产生了(正余弦)时变电场，但它并不消耗能量，因为它是虚功率。

这里值得注意的是，一旦电容中放置媒质水，水在时变电场的作用下，由洛仑兹电力使得水分子做热运动，于是水发热，这是一种转化过程，但时变电场的本性不是能量，而是需功率。此外，电容中置入水之后，电容量和电路阻值也变了。所以需功率本性不是能量。

2. 正余弦磁场是虚功率。 见图 5-20，在 RL 电路中施加的电压源是 $v_s(t) = V_m \cos \omega t$ ，图中的电阻 R 包括电源内阻和传导线的电阻率所带来的阻值，即

$$R = R_{\text{源}} + R_l \quad (5-35)$$

求解该电路得到，端口 1-2 的复功率是

$$P_s = \frac{1}{2} \frac{V_m^2 R}{R^2 + \omega^2 L^2} - j \frac{1}{2} \frac{V_m^2 \omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (5-36)$$

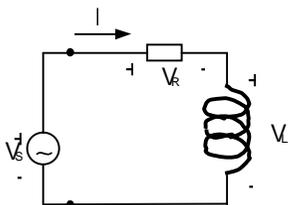


图 5-20 正余弦磁场是虚功率

这也是电压源提供的复功率。

对于电阻端口，其复功率是：

$$P_R = \frac{1}{2} \frac{V_m^2 R}{R^2 + \omega^2 L^2} + j0 \quad (5-37)$$

对于电感端口，其复功率是：

$$P_L = 0 + j \frac{1}{2} \frac{V_m^2 \omega L}{R + \omega^2 L^2} \quad (5-38)$$

通过以上计算分析得到如下结论：电压源提供的能量全部用于电阻上。在电感中，虽然不断地产生了(正余弦)时变磁场，但它并不消耗能量，因为它是虚功率。

3. 正余弦电磁场不是能量。 见图 5-21, 在 RLC 电路中施加的电压源是 $v_s(t) = V_m \cos \omega t$ ，图中的电阻 R 包括电源内阻 $R_{源}$ 和导线的电阻率所带来的阻值 R_l ，即 $R = R_{源} + R_l$ 。

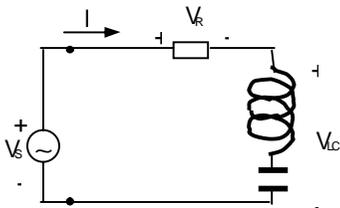


图 5-21 正余弦电磁场是虚功率

求解该电路得到，电源端口提供的平均复功率是：

$$P_s = \frac{1}{2} \frac{V_m^2 R \omega^2 C^2}{(\omega RC)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2} + j \frac{1}{2} \frac{V_m^2 \omega^3 LC^2}{(\omega RC)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2} - j \frac{1}{2} \frac{V_m^2 \omega C}{(\omega RC)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2} \quad (5-39)$$

其中电阻端口的平均复功率是：

$$P_R = \frac{1}{2} \frac{V_m^2 R \omega^2 C^2}{(\omega RC)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2} + j0 \quad (5-40)$$

电感端口的平均复功率是(呈阳性)

$$P_L = 0 + j \frac{1}{2} \frac{V_m^2 \omega^3 LC^2}{(\omega RC)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2} \quad (5-41)$$

电容端口的平均复功率是(呈阴性)

$$P_C = 0 - j \frac{1}{2} \frac{V_m^2 \omega C}{(\omega RC)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2} \quad (5-42)$$

特别是在谐振中，因 $\omega^2 LC = 1$ ，则

2) 电容端口的平均复功率是(呈阳性)

$$P_C = j \frac{1}{2} \frac{V_m^2}{\omega R^2 C} \quad (5-43)$$

1) 电感端口的平均复功率是(呈阴性)

$$P_L = -j \frac{1}{2} \frac{V_m^2}{\omega R^2 C} \quad (5-44)$$

通过以上计算分析得到如下结论：正弦稳态情况下，电压源提供的能量全部用于电阻上，而在 LC 端口中虽然不断地产生了时变电场和时变磁场，但它们并不消耗能量，是虚功率。如果说，它们之间存在着某种交换，那就是电感中阳性虚功率与电容中阴性虚功率之间的交换。这就是时变电场和时变磁场之间的虚功率交换。

4. 辐射的电波是虚功率。把图 5-2 中的电感和电容逐步展开 (参见图 4-23) 那么自由空间必有时变电磁场, 即电波, 如图 5-22 所示。此图中的时变电磁场是虚功率, 则 4-23 图中的时变电磁场也必然是虚功率。从左图到右图, 这是顺理成章的事情, 电源提供的能源消耗在内阻和传导电阻上, 虚功率的电波不消耗能源。

这里, 把电感电容中的时变场向着自由空间辐射, 就是伟大赫兹实验逻辑 (参见图 4-23)。既然时变电磁场是虚功率, 辐射到自由空间显然也是虚功率。从而说明电波是虚功率, 其本性不是能量。

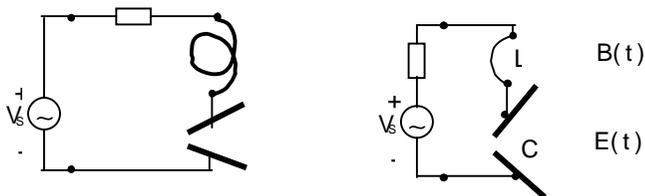


图 5-22 电波是虚功率

这里需要注意, 当电容或电感中填充非完纯介质 (例如水) 时, 相当于电感或电容中增加了电阻值, 则电源提供的功率增加了, (5-39) 式中的实功率增加了, 即消耗的电能增加了。这属于物质在广义洛仑兹力的作用下转化成热能。但作用在物质上的时变场本身不是能量。

5.4.2 微波暗箱没有波能量储存

设微波暗箱是由多面体组成的, 内壁镀有良导体银 (或者假设内壁是由超导体组成的), 如图 5-23 所示。我们可以这样假定: 暗箱内壁的电阻率为零, 不产生焦耳热损耗; 辐射到暗箱里的微波在暗箱中作无限次反射而不泄漏。在这样的情况下, 它储存能量了吗?

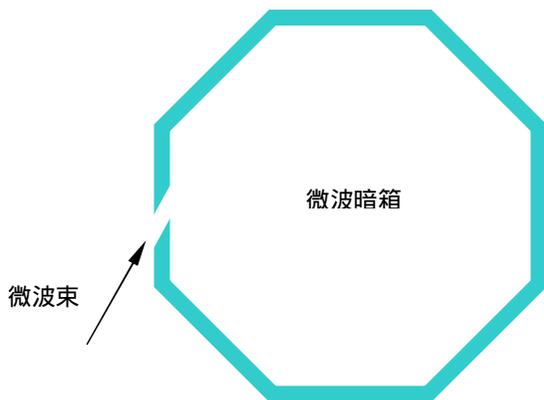


图 5-23 微波暗箱无能量储存

让我们做两个理想实验来回答这个问题。

实验一。用一个自带干电池的收音机，在暗箱外边将收音机调准到某一广播电台上，设收到的电场强度是

$$E = E_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (5-45)$$

记录下收音机的音量指示值；再把收音机放入屏蔽室内，记录下收音机的音量指示值。您将会发现两个现象：收音机在屏蔽室内，其音量十分微弱；收音机在室外时，其音量比较大。值得注意的是，收音机放入屏蔽室内并把屏蔽门虚掩，这种情况下的音量比室外音量更大。



图 5-24 场矢量迭加

收音机音量之所以增强了，是因为场矢量迭加的结果——入射的电场矢量在屏蔽室内来回反射的电场矢量迭加在一起，致使作用在收音机天线上的电场增强，收音机上的电平指示增大（以前的收音机有这个电平指示器）从而使得信号电流增强，这是场矢量迭加，如图 5-24 所示。

如果说它是电波能量的相加，那么根据三角函数公式，则能流密度表达式成为

$$w_{\lambda} = c\epsilon E^2 = 0.5c\epsilon E_{m\lambda}^2 \cdot [1 + \cos(2\omega t + \varphi_{\lambda})] \quad (5-46)$$

$$w_{\text{反}} = c\epsilon E^2 = 0.5c\epsilon E_{m\text{反}}^2 \cdot [1 + \cos(2\omega t + \varphi_{\text{反}})] \quad (5-47)$$

$$w_{\text{合}} = w_{\lambda} + w_{\text{反}} = c\epsilon E_{m1}^2 \cdot [1 + \cos(2\omega t + \varphi_1)] \quad (5-48)$$

相加结果是：在屏蔽室内收音机收到的频率是 2ω ，而调谐在 ω 处时，就无信号。这显然与实际不符，因为在 2ω 处或许根本就没有电台，只在 ω 处及其附近才有电台。由此看来，音量增强不是微波能量相加。这是因为，微波是虚功率，在时间周期内的积分等于零；虚功率直接乘以时间也不是真实的能量。

暗室中收音机的音量的有与无，随着屏蔽室门的开启与关闭而“立竿见影”，可见暗室并无微波能量储存。假如，如果说暗室储存了波能量，那么当暗室门关闭之后所储存的波能量足以使收音机继续响亮一段时间。可是没有，根本就没有。这就说明电波属性是一个瞬时功率，而不是波能量。

实验二。设有 1000 瓦的微波炉“干烧”1 小时的时间之后。然后关掉微波炉电源，立即向微波炉内注入 1 公升的自来水，并停留 3 分钟。您将发现，水温不会升高。尽管微波炉事先“接受”了一个“千瓦·小时”的虚能量，但它并没有微波能量的储存。

但是，如果您先将自来水注入微波炉中，然后将虚功率为 1000 瓦的微波向暗箱内辐射 3 分钟，您将发现水很热。究其原因，应该是，需功率的时变场作用于水，使水产生分子电流和传导电流，由于水的电阻率不为零，从而产生焦耳热，所以水的温度升高。这是电场力作用的结果。其焦耳热可用下式来计算：

$$\begin{aligned}
 Q \quad dI &= \frac{dU}{R} & R &= \rho \frac{dl}{dS} \\
 \rho &= \frac{1}{\sigma} & \frac{dU}{dl} &= E \\
 P_{\text{功率}} &= \Delta I^2 R \\
 \therefore W_J &= \int_0^t \sigma E^2(t) \Delta V dt & & (5-49)
 \end{aligned}$$

式中 W_J 是焦耳热能, σ 是电导率, ΔV 是被作用物质的体积。注意到 $E = E_m \sin(\omega t + \varphi)$, 假定 $E(t)$ 在 ΔV 内均匀分布的话, 再运用三角函数公式, 那么上式的积分结果是:

$$W_J = \frac{1}{2} \sigma E_m^2 \Delta V \cdot t \quad (5-50)$$

这个能量就是时变电场作用于非完纯介质时所产生的焦耳热能。除此之外, 根据广义洛仑兹磁力, 时变磁场作用于自由电子 (或离子) 也会形成电流, 同样产生焦耳热能。也就是说, 这里存在一个从时变场到热能的转换过程, 不是能量对能量的直接传递。

5.4.3 进一步说明

电流通过辐射装置转化为矢量场, 矢量场作用于特定的物质将转化为焦耳热能或其它能。这里, 矢量场与物质的作用过程并不是能量直接传递过程, 而是一种场与能之转化过程, 从而影响提供场之源的提供电能多少。就像我们击球一样, 给球施加力, 球将有动能, 但施加的力本身不是能量。忽视转化就等于失去了物理过程的本质属性。犹如时变力踩动自行车, 可以转化为机械能和热能一样, 但时变力与物体的作用过程并不是能量直接传递过程, 而是作用之后的转化过程, 虽然提供力消耗了人的体能, 但踩车力的本性不是能量。

我们说辐射矢量场守恒, 矢量场本身不是能量, 因此我们不可说辐射波能量守恒。犹如时变力作用于物体一样, 物体将产生动能。但时变力本身不是动能, 我们千万不要被一些组合起来的“量纲”所迷惑! 即分清物理概念。

例如, $\frac{F(t)}{s} c_0$ 具有能流密度之量纲 -- 单位时间内流过单位面积的能量, 虽然 $F(t)c_0$ 具有能流的量纲, 但是, 我们千万不可以把时变力 $F(t)$ 说成是能量。力就是力, 力场矢量不是能量。尽管时变力作用于物体可以“转化”出动能来。但是, $F(t)$ 与物体的作用过程不是能量交换过程, 我们不可说力场能量 $F(t)c_0/s$ 作用于物体交换成了动能。

同样的, 对于电场力或电波 $E(t)$, 尽管 $c_0 \varepsilon E^2 \cdot t$ 具有能量之量纲, 而 $\sigma E_m^2 V \cdot t$ 是焦耳热能, 但所发生的物理过程不是能量传递; 或者尽管 $\varepsilon E^2 V$ 具有能量之量纲, 而 $\sigma E_m^2 V \cdot t$ 是焦耳热能, 但所发生的物理过程不是能量传递。我们不可说波能量 $c_0 \varepsilon E^2 st$ (或 $EHst$) 被交换成了热能。其道理再也清楚不过了: 第一, 时变电场、时变磁场、时变电磁场都是虚功率, 虚功率在周期内的积分值是零, 虚功率乘以时间 t 也不是真实能量; 第二, 事实上 $c_0 \varepsilon s$ 和 σV 是两个截然不同的物理属性 (尽管量纲相同, 但各自表达的物理意义是不同的)。因此本章认

为，其物理过程决不可能是能量交换过程，而是转化过程。

通过以上分析，所得结论是：电波本性不是能量而是虚功率。

5.5 电波辐射矢量场守恒

5.5.1 概念与本质

在整个物理学中，有许许多多的假设、模型和定律，这些模型或定律界定了物理行为的属性，也为物理现象提供了定量或定性的解释与描述。在这诸多物理定律与诸多物理现象之间必然存在某种内在联系，即现象与本质的联系。在现象与本质之间，或者说在行为与定律之间，某个物理行为可能服从一个或多个物理定律；同样的，某个物理定律可能属于一个或多个物理行为。究竟那些行为服从那些定律，或者，究竟那些现象具有那些本质的东西，这取决于给定的物理定律是否能够检验该物理行为。具体地讲，就是用给定的物理模型及其概念，去计算、分析、考察某物理行为及其现象时，看两者是否吻合，是否得到了充分地体现与描述。

本章围绕现象与本质之间的内在联系、行为与定律之间的必然联系，考察了电波本身的自然属性。我们说干涉非能量波属性，指的是，电波的干涉非能量所为，也即，该物理行为不能用波能量的观点来计算、分析和描述。否则，若用能量或能流密度来描述干涉现象时，将与客观事实不符。我们说电波的传输不服从波能量守恒，指的是，电波的传输不是对能量的传输而是矢量场的传输，也即该物理行为不能用能量的观点来计算、分析与描述。否则，若用能量或能流密度来描述反射折射现象时，将得不到反射折射方程，甚至出现“能量增生”。我们说，电波的传播不是波能量的传播，指的是，电波传播的实体是矢量场而不是波能量。或者说，如果认为传播的实体是波能量，那么用能量观点来考察所接收到的光强时，将与事实不符。也许，假如认为光传播既是场的传播又是能量的传播，那么用这两种观点来描述光强时，答案应该一致，然而，事与愿违。基于以上诸多分析，我们有理由认为，电波的辐射不是波能量的辐射。

值得注意的是，电波在一定条件下并作用于特定物质，可转化为能量，这是从量变到质变的飞跃。本章不是讨论质变过程，而是讨论电波在那个飞跃之前的自然属性。电场也好，磁场也好，力场也罢，它们在一定条件下并作用于特定物质，必将转化为一定的能量，这是无可非议的。一旦转换成能量后，能量守恒，也是必然的。力（恒力或时变力）作用于物体，可转换为动能，但力（恒力或时变力）的本性不是能量。这似乎与电场、磁场有相仿之处。过去，人们对物体受力之作用的研究，尽善尽美，可告终结。现在，人们对物质受场之作用的研究，刚刚起步，任重道远。由于场与物质相互作用的机理尚未完全揭示开来，致使有人把个别现象当作普遍真理而误认为“电波就是能量”，我不得不说那是一件憾事。

本章以上得出的结论是，简单地说，电波不是直接辐射了波能量，而是辐射了矢量场。

这一结论与波粒二象性及量子假说，并无冲突。我们说，电波本身是连续的，但也不反对把这个连续的东西进行量化处理 --比方说波子、光子。因为，无论是量化或是数字化，对于计算处理是方便的。特别是频率很高的光波、紫外线、 x 射线和 γ 射线，频率越高，更显粒子本性。或许，到了 x 射线这个频率界限，由于波长短至可与电子尺寸相比拟的地步，它完全表现为粒子性，或者说它主要表现为粒子性。

1900年，普朗克根据他提出的量子假设 $\varepsilon = hf$ ，并应用古典统计理论算出了振子的平均能量，普朗克推得了黑体辐射的公式。从目前看来，似乎用得非常之广，比如光电效应、康普顿效应以及整个量子力学，等等。这属于光波的另一属性，粒子性。

尽管光波以及频率更高的射线具有“粒子性”，已被众人所接受，而且已家喻户晓，但这些并不影响“电波的辐射是场矢量的辐射，并服从辐射矢量场守恒”这一结论。因为那些“粒子性”属于“二象性”的研究范畴。比方说，从阴极发射出来的电子流的衍射呈同心环状，虽然是衍射波动性，但我们不能说电子流的运动就是传播了波能量。中国有一种鸟枪，枪膛里灌装的是小颗粒金属球，发射之后打在靶上呈同心环状斑点，虽然具有相同的波动性，但我们不能说金属球的运动就是传播了波能量。同样的，例如，功率为一千瓦、频率为

兆赫兹的偶极子发射天线，向自由空间辐射的矢量场分别是 $E \propto \frac{1}{4\pi r^2}$ 和 $B \propto \frac{1}{4\pi r^2}$ ，我们只能说它辐射了矢量场，不能说它辐射了粒子。我们说“电波辐射非能量属性”，主要指辐射过程中，它是以矢量场的本性在真空中辐射的，但它在与物质相互作用时，在某些场合可能表现为粒子性并转化成能量，但这是转化，不是能量直接传递。本节要否定的正是电波里的 $W = \iint_S E \times H ds$ ，而不是光波里的“量子假设 hf ”。波动性与粒子性，属于两个概念中的两种属性，因此对于电波不可用光波领域里的“粒子性”来考察电波的辐射结论。

事实上可以验证，所有的电波行为都不可用波能量的观点来分析。大量物理实验事实表明，对电波的一切行为都是独立场矢量作用的结果，却不是波能量直接的作用结果。当然光波作用于黑体可产生热辐射、光波作用于氧化钾二极管可产生电流、光波作用于皮肤可使人感到发烫、光波作用于植物可产生光合作用、光波作用于电子可产生衍射，等等这些属于光波与物质之间发生的质变过程，质变过程中产生了热能或其它能量，其转化的最小单元可按能量子 hf 来计算，也就是说，光波作为粒子性，服从普朗克量子假说；但电波作为波动性，服从矢量场辐射守恒。

5.5.2 辐射矢量场守恒

把图 5-25 中的电感和电容逐步展开 那么自由空间必有时变电场和时变磁场，即电波。

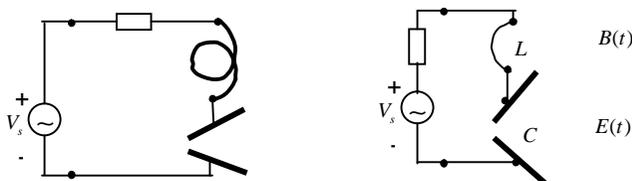


图 5-25 电波是虚功率

左图中的时变电磁场是虚功率，则右图中的时变电磁场也必然是虚功率。从左图到右图，这是顺理成章的事情，伟大的赫兹实验就是这种 LC 振荡器，电源提供的能源消耗在内阻和传导电阻上，虚功率的电波不消耗能量。对于广阔自由空间也是这样，电波本性不是能量，而是虚功率。

在前三节内容和本节上述内容中，我们得出的结论是：1)电波的干涉是独立矢量场的干涉，不是波能流 $E \times H$ 的干涉；2)电波的传输是独立矢量场的传输，不是波能流 $E \times H$ 的传输；3)电波的辐射是独立矢量场的辐射，不是波能流 $E \times H$ 的传播；4)电波的接收是对独立矢量场的接收，不是对波能流 $E \times H$ 的接收；5)正余弦电场磁场是虚功率，正余弦电场磁场不是能量；6)电波磁波是虚功率，其本性不是能量。那么，围绕现象与本质之间的内在联系、行为与定律之间的必然联系，从而说明电场与磁场是独立辐射的，这就意味着，以辐射源为球面中心，取 S_1 和 S_2 球面，则流出 S_1 面的场强等于流出 S_2 面的场强，即辐射矢量场守恒，即辐射虚功率守恒。对于声波、水波借助于振荡媒质而传播，因此机械波属于传播动能守恒；而电波（电场波或磁场波）因它没有振荡传播的媒质，只能是直接辐射矢量场，因此电波属于辐射矢量场守恒。我们在第四章中介绍的电场与磁场独立辐射，其场强与距离平方成反比，恰恰满足辐射矢量场守恒原则。因此我们认定：电波是辐射矢量场守恒。因此，本章认为，电波的辐射服从场矢量守恒。如图 5-26 所示。只有这样，才能体现独立矢量场的上述一切行为。否则就是波能量 $E \times H$ 行为，即传播波能量守恒。然而事实上，上述一切行为却不是波能量行为，那么显而易见，不是传播波能量守恒。

其实，即使认为麦克斯韦的传播波能量守恒，但由麦克斯韦旋度理论得到的 $E \times H$ 是距离 r 的多项式，也无法满足守恒。因为旋度理论的结论是 (2-1)、(2-2) 和 (2-3) 式，显然流出 S_1 面的波能量不等于流出 S_2 面的波能量，流出 S_1 面的磁场量也不等于流出 S_2 面的磁场量。从这个角度讲，也可证明麦克斯韦旋度理论是错误的。

参见第四章的 (4-3) 式，对于时变电荷元所辐射的时变电场是

$$E(r, t) = Q_m \frac{\sin(\omega t - \omega r / c_0)}{4\pi\epsilon_0 r^2} e_r \quad (5-55)$$

再参见第四章的时变电流元所辐射的时变磁场是

$$dB(r, t) = \frac{\mu_0 \cdot k(t - \frac{r}{c_0}) dl \cdot \sin \theta}{4\pi r^2} e_\phi \quad (5-56)$$

由于独立辐射的电场强度与独立辐射的磁场强度都满足距离平方反比律，因此结合图 5-26 立即得到电场波和磁场波都是辐射矢量场守恒之结论。而麦克斯韦旋度理论的结论既不是辐射矢量场守恒也不是传播波能量守恒。这就进一步说明了第四章的正确性，或者说本章是对第四章的支持。

自从有了势能、动能和功的定义之后，麦克斯韦从机械波的动能出发，他认为以太媒质在电力的扭拉下也具有动能，从而他提出波能量的概念，沿用至今。人们也认可了波能量之说，特别是关于 T.Yang 实验的物理本质问题，所有人都认为：干涉中的明暗条纹是能量的强弱。不仅物理老师这么说，而且书中也这么写。但是，当您真正用波能量去计算干涉

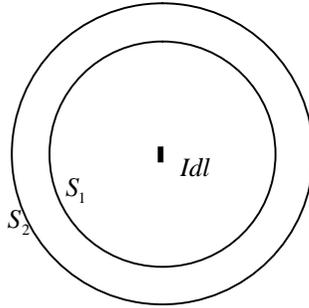


图 5-26 辐射矢量场守恒

时，却得不到 T.Yang 实验的干涉条纹。这就是人们囫圇吞枣、不仔细研究的结果。总之，物理概念与数学计算应该一致，既然用光能量概念的计算结果与实验不符，那么说明光的行为不是能量行为，而是矢量场的行为。T.Yang 实验证明了本章结论。

遗憾的是，人们不仅把场波当作能量去看待，而且把物质也当作能量去计算，核物理学者总是用 $E = mc_0^2$ 去做文章（注：这里 c_0 是光子相对于光源的相对速度，也是爱因斯坦所用的光速），说什么一公斤铀矿之能量等于一公斤木材之能量、一公斤氢气之能量等于一公斤锂之能量，显得很有学问。难道 $E = mc_0^2$ 指导了核物理的实验步骤和实验过程吗？没有！也不可能，仅仅是文字斌斌而已。我认为爱因斯坦的 $E = mc^2$ 抹杀了材料物理学，也抹杀了物质与物质之间的本质差别，更是阻碍了材料物理学的发展。可以清楚的看到，卢瑟福实验和居里夫人夫人实验的物理本质不是 $E = mc_0^2$ ，我国的两弹一星也不是 $E = mc_0^2$ 的物理过程。事实上，铀 235 钚 239 炸药、汽油、木材等各自的爆炸力不同，是由材料的物理性质决定的，只有了解各种元素的各自物理性质才能了解其物理本质。这一点至关重要，我希望核物理专家进一步深究核力之作用，发展和利用核力，解决能源问题。

埃！谈起相对论质能关系来，过去似乎很时髦，一些人戴上相对论的头衔似乎显得学术水平高。可结果呢？很糟糕！例如德布罗意等人，他们使用相对论质能关系去定义物质波：一个质量为 m_0 的物体已经以速度 v 运动着，它具有的总能量是

$$E_{\text{总}} = mc_0^2 = hf \quad (5-57)$$

它具有的总动量是

$$P_{\text{总}} = mv = \frac{hf}{c_0} \quad (5-58)$$

于是上式由恒等式 $c_0 = \lambda f$ 得到：已经运动着的物体具有的单色波的波长是

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (5-59)$$

式中 $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$ 是相对论的质量， mv 是相对论的总动量，以上是目目前物理书籍上的结论。

请注意，德布罗意所定义的“已经运动着的物体具有总能量是 mc_0^2 ，已经运动着的物体具有的总动量是 mv ”，由此可见德布罗意在定义中确实是运用了相对论的质能关系式。

这里要指出的是，按照相对论的质能关系式定义，那么月球以速度 v 绕地球运动的总能量是 mc_0^2 、总动量是 mv ，现在我们用 (5-57) 式除以 (5-58) 式，立即得到

$$\frac{E_{\text{总}}}{P_{\text{总}}} = \frac{mc_0^2}{mv} = \frac{hf}{hf/c_0} \quad (5-60)$$

即有

$$\frac{c_0^2}{v} = \frac{c_0}{1} \quad (5-61)$$

或即

$$v = c_0 \quad (5-62)$$

这表明，已经绕地球运动着的月球速度是 c_0 。这就是使用相对论质能关系所带来的笑柄。

再如，对获奖波粒二相性的光子使用相对论的质量 m ，则根据式 (5-59) 就得到

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v} \sqrt{1-\beta^2} \quad (5-63)$$

因光辐射 $v = c_0$ ，上式 $\beta = 1$ ，即为 $\lambda = 0$ 。这意味着所有的光波之波长等于零。这种光速假设的相对论运用质能关系式得到光的波长等于零，实为滑稽。这意味着爱因斯坦的相对论与他获奖的波粒二像性矛盾。我宁可相信波粒二像性，也不相信我身体有 mc_0^2 之大能量，更不相信小朋友长身体是在长能量。

当然，德布罗意、戴维逊和革末等人在他们的“电子在晶体上的反射电流与加速电位差”实验中实际上并没有使用相对论质量 m 而是使用了牛顿质量 m_0 ，更没有使用爱因斯坦的质能关系式，这就是“口是心非”。确切地讲，是“口是行动非”。写文章时戴上相对论这个头衔显得很有学问，而实际实验操作却是牛顿定律。像这类学者较多，目前不少学者，不深究其物理本质，引用名人的公式，文字彬彬，显得很有学问。可悲可怕！更可怕的是，科学界许多文人喜欢使用 mc_0^2 ，显得很有学问。如此下去，自然科学的研究将停滞不前。

因此本章结论是：电波的一切物理行为都不是波能量 ($w \propto E \times H$) 之行为，而是独立矢量场行为；电场波和磁场波的本性不是能量而是虚功率，它作为波动性，辐射矢量场守恒；而波长接近原子尺寸的光波在量化处理上仍可按普朗克量子假设来计算。