

雷 达 技 术 小 丛 书

傳 輸 綫

[苏联] И. П. 馬尔科夫著



國 防 工 業 出 版 社

传 輸 綫

[苏联] И. П. 馬尔科夫著

晦 曠 杰 雄 譯



國際工業出版社

1965

內 容 提 要

該書系蘇聯軍事出版社出版的“雷達技術小叢書”之一。書中詳細地敘述了電流波和電壓波沿傳輸綫（雙綫和同軸綫）的傳播、行波和駐波的形成、在各種負載下傳輸綫的特點以及傳輸綫的匹配、固定和連接的實例。同時，還介紹了各種型式傳輸綫的一般概念和仿真綫的一些概念。

本書可供初級無線電工程技術人員、大專學生學習參考之用。

ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

[蘇聯] И. П. Марков

ВОСНИЗДАТ 1958

傳 輸 綫

梅 曠 杰 雄 譯

國防工業出版社 出版

北京市書刊出版業營業許可證出字第074號

新華書店北京發行所發行 各地新華書店經售

國防工業出版社印刷廠印裝

787×1092 1/32 印張 3 9/16 74 千字

1965年10月第一版 1965年10月第一次印刷 印數：0,001—3,420冊

統一書號：15034·1041 定價：（科四）0.38 元

目 录

1. 傳輸綫的一般概念	5
2. 交流电理論中的一些概念	8
交流电流(或交流电压)視作矢量	8
交流电路中电感和电容的物理特征	13
3. 电流波和电压波沿傳輸綫的傳播	17
由无限多个具有集总电感和集总电容的迴路构成的傳輸綫	20
具有分布参数的无限长傳輸綫	25
4. 行波和駐波、反射	33
行波	34
反射系数	38
駐波	41
駐波系数(KCB)和行波系数(KBB)	45
5. 傳輸綫的輸入阻抗	48
6. 各种負載下的傳輸綫	51
終端开路的傳輸綫	51
終端短路的傳輸綫	54
終端为电抗負載的傳輸綫	58
負載为純电阻的傳輸綫	61
7. 傳輸綫的匹配	63
8. 傳輸綫元件	68
傳輸綫的型式	69
匹配元件	71
固定元件	82

9. 傳輸綫元件的連接.....	85
插头連接	86
角形連接	87
旋轉連接	88
10. 对称裝置	91
11. 仿真綫	93
非正弦波的傳播	93
已充电的傳輸綫与負載电阻的接通	97
仿真綫	102
附录 阻抗圓图	107

1. 傳輸綫的一般概念

傳輸綫的主要用途，就是以最小的損耗把高頻振蕩能量从一处傳送到另一处。

此外，傳輸綫还用作調諧綫路、振蕩迴路和滤波器中的电抗元件（电感和电容）。

在雷达技术中，通常采用对称綫、同軸綫（同心綫）和波导（圓形和矩形金屬管）作为傳輸綫。

同軸綫和对称綫是属于同一类型，通常称为双导綫傳輸綫（饋綫）。

在每一具体情况下，采用这种或那种傳輸綫，以及这些傳輸綫结构的实现，由工作波段和所傳輸的功率大小来决定。在米波波段（300兆赫以下）和分米波波段（3,000兆赫以下），通常使用对称双綫和同軸綫，而在厘米波波段（3,000兆赫以上）則用波导。

在上述頻率上，雷达中（或者一般地說，在无綫电技术中）所使用的双导綫傳輸綫，按其电气性能來說是长綫。所謂长綫，是指綫的几何长度比所傳輸的电磁振蕩的工作波长还长或者可以与之相比拟的傳輸綫。傳輸綫的几何长度与工作波长的比值，称为傳輸綫的电长度。如果沿傳輸綫的全长能放置下一个波长或者几个波长，則称这样的傳輸綫为长綫。

• 不应该从长綫这个名称便推测綫的几何长度就必须很长。在电力工程中，傳輸綫长达数百公里，但并不属于长綫，这是因为在綫上只能放置下所傳播的波的一个波长的厂部

分。因此，在某种近似程度上可以认为，在每一个给定瞬时，沿传输线的整个长度上电流和电压都相同。这就使我们有可能根据经过传输线中任何一点的过程，来估计在传输能量时线上所发生的现象。

在长度可以与传输能量的波的工作波长相比拟的传输线上，在同一瞬时，传输线导体中的电流以及导体间的电压不仅可能具有不同的数值，而且可能具有不同的方向。因此，这类传输线的特性就取决于线长度的改变、线的终端是短路还是开路以及负载的类型。

传输线的这种特性决定了它有各种各样的、极为广泛的应用。它不仅用作发射机和天线之间以及天线和接收机之间的能量传输线，而且也作为级间连接元件，振荡回路，以及调谐线路的电抗元件（电感和电容），滤波器和阻抗变换器。

对用来传输电磁能量的传输线提出的基本要求是：从能源到负载保证有最大的传输功率。也就是说，在传输能量时，传输线应具有最小的电阻损耗、介质损耗和寄生辐射损耗（天线效应），这时，线的输入端和输出端必须与电源及负载匹配。此外，为了不使传输的脉冲信号发生畸变，传输线（包括波导）必须有足够宽的通频带，并在给定传输功率和频率的条件下具有最小的尺寸。

在米波和分米波波段，甚至在厘米波波段的上限频率，都应用了这种或那种结构的双导线传输线（馈线）（图1）。在厘米波和毫米波波段则使用波导。

必须指出，表征双导线传输线或者波导的应用范围的严格频率界限是没有的。在更低的频率上使用波导，受到几何尺寸的限制，波导将变得很笨重。在更高的频率上使用双导

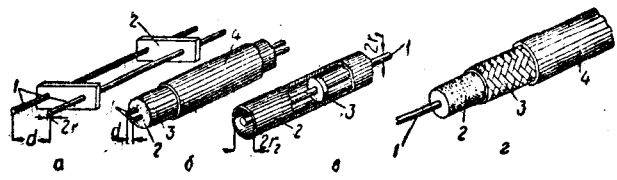


图 1 傳輸綫 (饋綫)

- a—对称双綫明綫：1—饋綫导体；2—絕緣子。
- b—对称双綫屏蔽綫：1—饋綫导体；2—絕緣物；3—金屬屏蔽；4—保护皮。
- B—硬同軸綫：1—內导体；2—外导体兼屏蔽；3—絕緣子。
- G—軟同軸綫：1—內导体；2—絕緣物；3—外导体兼屏蔽；4—保护皮。

綫傳輸綫，則受到損耗增大、有击穿危險和結構难于實現的限制。例如，对称双綫明綫 (图 1 a)，当其导体間的距离接近于波长时，将开始显著地輻射能量。在該傳輸綫的几何尺寸下，頻率愈高，則傳輸到天綫的能量愈少。如将两根导綫靠近，則衰減将增大，并且由于綫上可能出现击穿，故能够傳輸的极限功率也将减小。因此，在米波波段，对称双綫明綫很少采用。在更短的波长上 (分米波和厘米波) 就用同軸綫 (图 1 G) 傳輸能量。但是，在厘米波段使用同軸綫已經不方便了，因为內导体很难固定。此外，用来固定的垫圈和四分之一波长絕緣子沒有寬頻帶特性；在同軸綫导体之間的空間內填充介质，則由于会使損耗增大，也是不适宜的。

也必須指出，沿同軸綫內导体流过的电流密度比外导体上的大。結果，內导体产生大量的热 (很大的損耗)，同时还使电場强度增高，在傳輸大功率时就会导致过压，产生电击穿。于是便有必要去掉同軸綫的內导体而沿空管——波

导——傳輸能量。

因此，从 10 厘米开始及更短的波长上，由于損耗增加到不能容許的地步，用同軸綫不再适宜，而用波导則更适宜了。波导中的电磁場完全集中在管的空腔內，因此，在波导中也和在同軸綫中一样，沒有輻射損耗。波导中能量傳播的物理过程与同軸綫中的过程不同，并且如上所述，波导中的損耗是很小的（如果頻率不是很接近临界頻率的話）。

与同軸綫相比，波导的損耗可以大大降低。这是因为波导沒有內导体及引入介质損耗的絕緣子（垫圈），且电流流过的表面比同軸綫中的大得多，故相应地表面层电阻很小。在波导的几何长度与同軸綫相同的情况下，波导可以傳輸大得多的功率而不致过压和击穿。此外，波导的结构簡單，因为沒有內导体及其固定元件。

本书中将討論用作能量傳輸工具（信道）的双綫和同軸綫、它們的型式、装置、与負載的匹配、在具有分布参数的傳輸綫上傳輸电磁能量时的基本关系以及与傳輸綫的負載有关的几种可能工作状态●。

2. 交流电理論中的一些概念

交流电流（或交流电压）視作矢量

工业上的交流电流（或交流电压）的获得是基于电磁感应現象。这个現象在于：在处于磁場中的一切迴路里，如果

● 关于波导傳輸綫的問題，見小冊子：Б. А. Фогельсон, «Волноводы», Воениздат, 1958 年。

磁場的磁通发生变化，則迴路里將感應起電動勢[●]。無論是迴路在磁場中運動而使穿過迴路的磁力綫數的變化，或者是由於發出磁力綫的磁源運動而使磁通變化，或者磁通的變化與任何機械運動無關，在迴路中將感應起電勢。在所有情況下，如果迴路的兩端開路，則在兩端將產生交變電位差；如果迴路的兩端閉合，則在迴路中將產生交流電流。

設綫圈 AB (圖 2) 在均勻磁場中以等角速度 ω 旋轉。我們取綫圈的位置與水平軸成角度 α_1 的瞬間作為計算的始點。經過時間 t 後，綫圈的位置將改變 ωt ，與水平軸成角度 $(\omega t + \alpha_1)$ 。

因為磁場均勻且綫圈旋轉速度恒定，故感應電勢由下式確定：

$$e_1 = E_{m_1} \sin(\omega t + \alpha_1),$$

式中 E_{m_1} —— 電勢的幅值。

第二個綫圈 A_1B_1 則與第一個綫圈不同，一方面是在起始瞬間相對於水平軸的位置不同，另一方面是尺寸也要小些，故感應電勢為

$$e_2 = E_{m_2} \sin(\omega t + \alpha_2)。$$

上述正弦量的圖解表示法可以有幾種。例如，交流電勢 e_1 和 e_2 可以畫在直角座標內，其中橫軸表示時間，而縱軸則表示變量 e_1 和 e_2 (圖 3 6)。

當必須表示出以同一頻率按正弦規律變化的許多個變量時，用矢量圖就顯得更方便 (圖 3 a)。從該圖中可以看出，與每一個按正弦變化的電勢 (e_1 或 e_2) 相對應的是一個大小

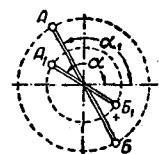


圖 2 交流電勢的獲得

● 以下將電動勢簡稱為電勢。——譯者

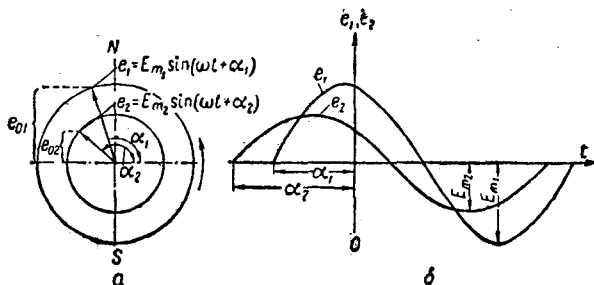


图3 正弦量的图解表示
 a—矢量图形；b—正弦图形。

等于感应电势的幅值、并以角速度 ω 旋转的矢量（这个矢量每一瞬时纵轴上的投影对应于交流电势的数值）。变量的初始值对应于矢量与水平轴成角度 α_1 （或 α_2 ）时，矢量在纵轴上的投影。随时间按正弦规律变化的量与旋转矢量完全对应，其加减运算可以用矢量图来进行，既迅速又简单。

借助于矢量来解决交流电的各种问题的方法特别方便，因为矢量在另一个垂直轴上的投影也表示一个正弦量，后者在相位上比矢量在第一个轴上的投影要滞后或超前 90° （ $\frac{\pi}{2}$ ）。在交流电路中常常会遇到这种现象。

用矢量图表示交流电路中的物理量，便有可能利用数学中复变量的计算方法。下面我们对此种方法作一些说明。

当采用直角坐标系时，任何一个矢量都可以分解为两个分量，或者说矢量具有两个分量：横轴分量 $a = E \cos \alpha$ 和纵轴分量 $b = E \sin \alpha$ ●，其中， E ——矢量的绝对值； α ——矢量的正向与横轴之间的夹角。

● 原文中误为 $a = E \sin \alpha$ 和 $b = E \cos \alpha$ 。——译者

矢量的运算可以用它們的分量的运算来代替。为此，就必須求出內容完全相符的矢量的代数表示式。我們研究一下用复数三角公式来表示矢量 E 的方法。

假如需要把某一个量表示成綫段（几何表示法），則应在实数軸 $O'O''$ 上取一段相应尺度的綫段（图 4）。若該量为正且大小为 E 个单位，則在 $O'O''$ 軸上就用綫段 $OA(+E)$ 来表示它。将 $+E$ 乘以 -1 时，我們便得到新的量 $-E$ 。这个新量 $(-1) \cdot (+E)$ 将用实数軸上的綫段 OB 表示。綫段 OB 也可以看成是由綫段 OA 繞 O 点旋轉 180° 后得到的（一般規定沿反时針方向旋轉）。将 $-E$ 再乘以 -1 ，又得到一个新量 $(-1) \cdot (-E) = +E$ ，这相当于把上述綫段再旋轉 180° ，也就是綫段 OA 一共旋轉了 $180^\circ \times 2 = 360^\circ$ 。

因此，将正的量乘 n 次 (-1) ，也就是乘以 $(-1)^n$ ，相当于把綫段旋轉 $180 \cdot n$ 度。

在数学中已經証明，数值 n 也可以表示成簡分数，例如

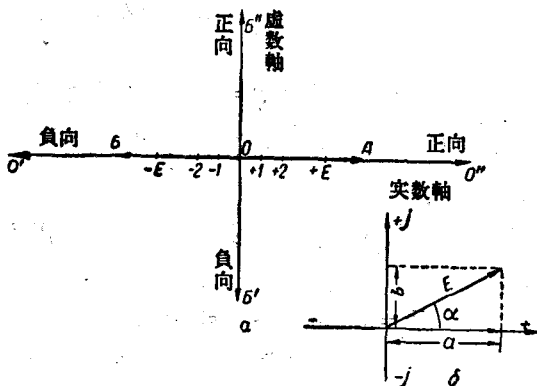


图 4

a —座标軸； b —矢量沿两个座标軸的分解。

$n = \frac{1}{2}$ ，这对应于把綫段 OA 旋轉 90° ；用代数式表示即为 $\sqrt{-1} \cdot E$ ，这是大家都很熟悉的虛数表示式，它由实数 E 乘以一个虛数单位而成，虛数单位用字母 j 表示。

因此，除了实数軸外，还存在有与实数軸垂直的虛数軸。包含有虛数的表示式称为复数表示式。

复数具有虛数部分和实数部分，并且是这两部分的几何和（图 4）。因此，关于数的概念就扩大为：既有大小又有方向，并且可以将矢量向空間給定方向旋轉。

矢量 \vec{E} 可以用代数式写成如下的复数形式：

$$\vec{E} = a + jb。$$

沿两个座标的分量将对应于复数的实部（ a ——矢量在实軸上的投影）和虛部（ b ——矢量在虛軸上的投影）。

由于随時間按正弦变化的量可以表示成旋轉矢量的形式，故矢量的复数形式的代数表示式就提供了这样的可能性，即交流电路中物理量的运算不用几何作图方法而用計算方法进行。

矢量 \vec{E} 可以写成复数形式 $\vec{E} = a + jb$ ，其中两个分量 $a = E \cos \alpha$ 和 $b = E \sin \alpha$ 表示按正弦变化而彼此有 $90^\circ \left(\frac{\pi}{2} \right)$ 相位移的量。

将 a 和 b 的值代入，就得到交流电理論中常用的矢量 \vec{E} 的三角表示式：

$$\vec{E} = E (\cos \alpha + j \sin \alpha)。$$

根据数学中的熟知公式 $e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha$ 及 $e^{-j\alpha} = \cos \alpha - j \sin \alpha$ ，矢量 \vec{E} 又可以写成指数形式 $\vec{E} = E e^{j\alpha}$ （或相应地 $\vec{E} = E e^{-j\alpha}$ ）其中， $e^{j\alpha}$ ——旋轉因子，它表示矢量 \vec{E} 相对

于实轴的正向反时针旋转了 α 角度 (e —— 自然对数的底)。

这样一来, 正弦量 $E \sin(\omega t + \alpha)$ 便可以写成 $Ee^{j(\omega t + \alpha)}$ 的形式。

必须注意, 正弦量的这种表示只能进行线性运算。因此, 把交流电压矢量与交流电流矢量相乘来计算功率显然是不行的, 因为得到的结果是不正确。

现在我们来推导后面要用到的几个复数公式。

如果复数为 $\vec{E} = a + jb$, 则其共轭复数为 $\vec{E}^* = a - jb$ 。

复数与其共轭复数之和为实部的两倍即 $\vec{E} + \vec{E}^* = 2a$, 而两者之差则为 $\vec{E} - \vec{E}^* = 2jb$ 。由此, 复数的实部为

$$a = \frac{\vec{E} + \vec{E}^*}{2},$$

而虚部为

$$b = \frac{\vec{E} - \vec{E}^*}{2j}。$$

利用指数形式的复数表示式 $\vec{E} = Ee^{j\alpha}$, 其中, E —— 矢量的绝对值 ($E = \sqrt{a^2 + b^2}$), α —— 矢量的幅角, 即矢量相对于实轴旋转的角度 ($\operatorname{tg} \alpha = \frac{b}{a}$)。便可以写出用指数形式表示的三角函数的两个重要公式:

$$\frac{e^{j\alpha} + e^{-j\alpha}}{2} = \cos \alpha, \quad (1)$$

$$\frac{e^{j\alpha} - e^{-j\alpha}}{2j} = \sin \alpha。 \quad (2)$$

交流电路中电感和电容的物理特征

前面已经指出, 当交流发电机的转子旋转时, 在其绕组

的两端就会产生按正弦规律变化的电势。如果把一个纯电阻负载接到发电机上，则在闭合回路中将有电流流通，电流的幅值由欧姆定律确定，而变化则与电阻两端电压的变化同时（同相）。电流和电压变化的同时性（同相性）可以用电阻并没有引入任何“阻碍”或者“加速”的因素来解释。

电压和电流变化的同时性，也决定了功率耗散（能量吸收）的连续性。这个结果的产生，是由于在每一瞬时从发电机进入到负载的能量都花在维持电阻中的电流上，并转换为热能。

这种过程与物体在一切媒质中的运动相似。物体在媒质中由于克服摩擦而消耗能量，其速度仍旧不变。

当把电感或电容作为负载接到发电机上时，就会发生另一种过程。现在我们来研究这个过程。假设电路由产生正弦电压的发电机和接到发电机上的电感线圈组成，线圈的损耗电阻实际上很小。我们取连接电感线圈的发电机端子上的电压为最大值的瞬时作为初始时刻 $t = 0$ (图 5)。在这个瞬时，电流 i 力图上升到很大的数值（ R 实际上几乎等于零），但却遇到了自感电势的反抗。自感电势是由于磁通迅速地变化（从零到某一数值）所引起的，其大小由电流变化的速度决定。因为电流变化的速度在初始瞬时最大，故自感电势在这个瞬时也最大。

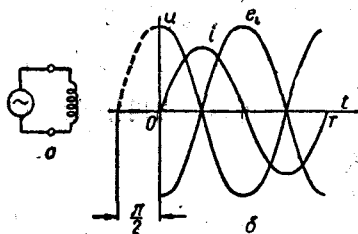


图 5 由发电机和电感线圈组成的电路中，电压、电流和自感电势的变化

在这个瞬时，电流 i 力图上升到很大的数值（ R 实际上几乎等于零），但却遇到了自感电势的反抗。自感电势是由于磁通迅速地变化（从零到某一数值）所引起的，其大小由电流变化的速度决定。因为电流变化的速度在初始瞬时最大，故自感电势在这个瞬时也最大。

因为电流变化的速度在初始瞬时最大，故自感电势在这个瞬时也最大。

随后，电流 i 便在发电机端子上电压的作用下增大，增大的速度受自感电势 e_L 的限制， e_L 的数值与发电机的电压“相等而符号相反”。

由于自感电势的“阻碍”作用(图5)，线圈中电流变化的特性便滞后于发电机端子上的电压(电压为最大时，电流还等于零；当电压降到零时，电流才刚达到最大值，如此等等)。

“阻碍”这个名词之所以要加上引号，是因为在这种情况下，事实上没有发生什么阻碍(损耗能量而变为热)。说得更确切一些，在这种情况下表现出了线圈反抗电流增大(或者更一般地说反对电流变化)的属性，这与力学中当对物体施力时，物体所表现出的反抗速度变化的惰性完全一样。

上面讨论的从 $i = 0$ 到 $i = \frac{T}{4}$ 的时间内线圈中电流增大过程的特点，是消耗发电机的能量。这是由于线圈中有电流流通，并且这个电流得到发电机电势的维持。在第二个四分之一周期内，发电机发出的电压符号改变，故电流不可能再保持原来的方向。但是，电流在达到了最大值后，还继续向同一方向流动。这一现象的产生仍然是由于线圈有惰性，这种惰性表现在依靠电流所产生的磁通的变化(减小)来维持自感电势。

这样，在第一个四分之一周期内以磁场能量形式储存在线圈中的能量，便消耗在第二个四分之一周期内使电流维持原来的方向上。

因为在第二个四分之一周期内，电流流动的方向与发电机电势的作用相反，所以在这种情况下，线圈中的场便做功，把能量送回发电机。如果忽略电阻中的能量损耗，则在第二

个四分之一周期结束时，以磁能形式储存在线圈中的能量将全部返回发电机。

线圈储存磁能的能力和抵抗线圈电流变化的能力，便建立起了在发电机交流电压变化的半个周期内能量互相交换的条件。这种能力和电流的相位滞后于电压 $\pi/2$ ，便是接在交流电路中的电感的物理特征。

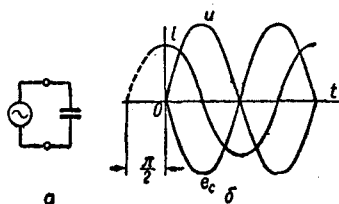


图6 在发电机和电容器组成的电路中，电压、电流及电容器上的电压的变化

当把电容器接到发电机上时（图6），形成交流电流的过程与上面讨论的则有所不同。

在电容器充电的初始时刻，来自发电机的充电电流在电路中流通。在一段很小时间间隔 Δt 内，充电电流的

大小与电荷增量 $\Delta q = C\Delta u$ 成正比：

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = C \frac{\Delta u}{\Delta t}。$$

一开始，电流的数值最大，因为在同样的时间间隔 Δt 内，在开始时电荷的增量 $\Delta q = C\Delta u$ 比第一个四分之一周期末的大。电流在开始时最大，经过四分之一周期则降为零（图6b）。在第一个四分之一周期结束时，电容器上的电压（ e_c ）达到发电机电压的最大值，但符号相反。在第一个四分之一周期内，电容器储存能量，其能量集中在电容器的电场内。在第二个四分之一周期内，发电机的电压下降——电容器极板与发电机端子上的电位趋于平衡，电荷将向相反的方向流动，因而形成电容器放电的电流。