

第 1 章

传输线理论

射频识别（Radio Frequency Identification, RFID）是 20 世纪 80 年代发展起来的一种自动识别技术，RFID 利用射频信号的空间耦合实现无接触信息传输并通过所传输的信息进行目标识别。射频识别包括射频（Radio Frequency, RF）与识别（Identification, ID）两个部分，其中“射频”部分主要指电子标签和读写器中的射频电路即射频前端和天线，是实现射频识别的基础；“识别”部分则包含读写器和电子标签，以及它们之间的通信技术（编码与调制技术、防碰撞技术和安全技术等）。

本章将引入射频电路设计中的基本概念——传输线。随着工作频率的升高，波长不断减小，当波长减小到可以与电路的几何尺寸相比拟时，传输线上的电压和电流将随着空间位置而变化，这一点与低频电路完全不同。在射频频段，基尔霍夫定律不再适用，必须使用传输线理论取代低频电路理论。

1.1 认识传输线

1.1.1 长线的含义

传输线是传输电磁能量的一种装置。在低频传输线中，电流几乎均匀地分布在导线内部，低频电路中的导线属于传输线的一种特例。随着工作频率的升高，波长不断减小，电流集中在导体表面，导体内部几乎没有能量传输。传输线上的电压和电流随着空间位置不同而变化，电压和电流呈现出波动性。下面引入长线的概念来区分它们。

长线是指传输线的几何长度和线上传输电磁波的波长的比值（即电长度）大于或接近于 1；反之，则称为短线。可见，长线和短线是相对的概念，取决于传输线的电长度而不是它的几何长度。在射频电路中，传输线的几何长度有时只不过几厘米，但因为这个长度已经大于工作波长或与工作波长差不多，仍称它为长线；而输送市电的电力线，即使几何长度为几千米，但与市电的波长（如 6 000 km）相比，还是小得多，所以仍然只能将它看作



短线。传输线理论是针对长线而言的，用来分析传输线上电压和电流分布，以及传输线上阻抗变化的规律。传输线理论是电路理论与电磁场波动理论的结合，可以认为它是电路理论的扩展，也可以认为它是电磁场波动方程的解。

在传统的低频电路中，连接元件的导线是理想的短路线，只须考虑传输信号幅度，而无须考虑相位，称为集总参数电路。在低频电路中常常忽略元件连接线的分布参数效应，认为电场能量全部集中在电容器中，而磁场能量全部集中在电感器中，电阻元件是消耗电磁能量的。而在射频电路中，长线上每一点都分布有电阻、电感、电容和电导，导致沿线的电流、电压随时间和空间位置不同而变化，称为分布参数电路。随着频率的提高，电路元件的辐射损耗，导体损耗和介质损耗增加，电路元件的参数也随之变化。当频率提高到其波长和电路的几何尺寸可相比拟时，电场能量和磁场能量的分布空间很难分开，而且连接元件的导线的分布参数已不可忽略。

1.1.2 传输线的构成

从传输模式上看，传输线上传输的电磁波可以分为三种类型。

- (1) TEM 波（横电磁波）：电场和磁场都与电磁波传播方向相垂直。
- (2) TE 波（横电波）：电场与电磁波传播方向相垂直，传播方向上只有磁场分量。
- (3) TM 波（横磁波）：磁场与电磁波传播方向相垂直，传播方向上只有电场分量。

TEM 波模型如图 1-1 所示，电场 (E) 与磁场 (H) 与电磁波传播方向 (V) 垂直。TEM 传输线上电磁波的传播速度与频率无关。本书射频电路只涉及 TEM 传输线。

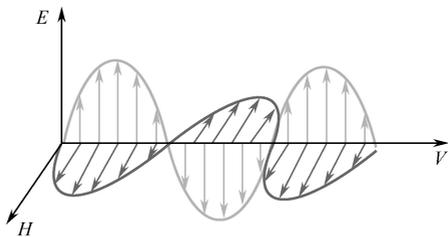


图 1-1 TEM 波模型

1.1.3 传输线举例

TEM 传输线有很多种类，常用的有双线传输线、同轴线、带状线和微带线（传输准 TEM 波），用来传输 TEM 波的传输线一般由两个（或两个以上）导体组成。



1. 同轴线

当频率高达 10 GHz 时,几乎所有射频系统或测试设备的外接线都是同轴线,如图 1-2 (a) 所示,同轴线由内圆柱导体(半径为 a)、外导体(半径为 b)和它们之间的电解质层组成。通常,外导体接地,电磁场被限定在内外导体之间,所以同轴线基本没有辐射损耗,也几乎不受外界信号干扰。同轴线的工作频带比双线传输线宽,可以用于大于厘米波的波段。

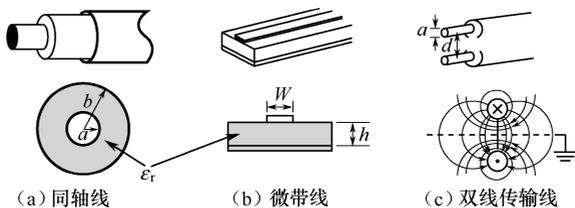


图 1-2 常见传输线

2. 微带线

多数电子系统通常采用平面印制电路板作为基本介质实现。当涉及射频电路时,必须考虑蚀刻在电路板上导体的高频特性。1965 年,固体器件和微带线相结合,出现了第一块微波集成电路。在射频电路中平面型传输线得到了广泛的应用,多数射频电路是由微带线实现的。图 1-2 (b) 所示为微带线结构,它是在厚度为 h 的介质基片一面制作宽度为 W 、厚度为 t 的导体带,另一面制作接地导体平板而构成,整体厚度只有几毫米。

3. 双线传输线

双线传输线由两根圆柱形导线构成,如图 1-2 (c) 所示。双线传输线是开放的系统,当工作频率升高时,其辐射损耗会增加,同时也会受到外界信号的干扰。相隔固定距离的双导线上由导体发射的电和磁力线可以延伸到无限远,并影响线附近的电子设备。由于导线系统像一个大天线,辐射损耗很高,所以双线是有限制地应用在射频领域。

1.2 传输线等效电路表示法

电路工作频率的提高意味着波长的减小。当频率提高到超高频时,相应的波长范围为 10~100 cm;当波长与电路元件的尺寸相当,电压和电流不再保持空间不变,不能再通过基尔霍夫电压和电流定律对宏观的传输线传输特性进行分析,而必须用波的特性来分析它们。可以对传输线进行分割,当传输线被分割成足够小的线段时,即可以用分布参量来描述,在微观尺度上也遵循基尔霍夫定律。如图 1-3 所示的等效电路,将均匀传输线分割成许多微分段 Δz ($\Delta z \ll \lambda$, λ 为波长),这样每个微分段可看作集总参数电路,整个传输线的等效电路是无限多的微分段单元电路的级联。

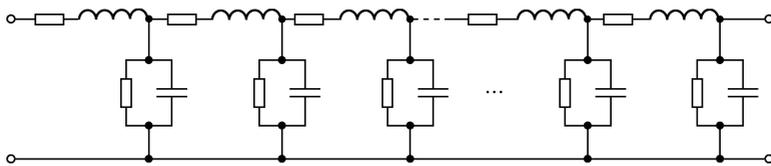


图 1-3 双线传输线的等效表示

图 1-4 所示的是用双线传输线建立的一个单元模型。由于长线上每一点都分布有电阻、电感、电容和电导，我们把双线传输线分为长度为 Δz 的线段。这种分割到微观的表示法主要的优点是：能够引入分布量描述，在微观尺寸上的分析可以遵循基尔霍夫定律，同时也提供了一个更直观的图形。在位置 z 和 $z+\Delta z$ 之间的小段传输线上，每个导体（两根传输线）是用电阻 R 和电感 L 的串联来描述的。另外，由两导体电荷分离引出的电容效应可用 C 表示，考虑到所有介质都有损耗，还必须包含电导 G 。在 Δz 长度内的分割单元满足集总参量分析如图 1-4 所示。

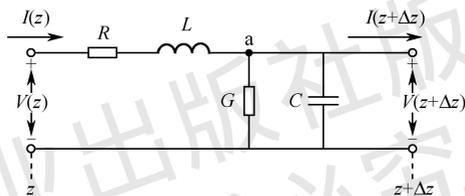


图 1-4 在 Δz 长度内满足集总参量分析

在上述等效模型中，传输线的线路中有着四个分布参数：分布电阻 R 、分布电导 G 、分布电感 L 和分布电容 C ，它们的数值均与传输线的种类、形状、尺寸及导体材料和周围媒质特性有关。分布参数定义如下：

- 分布电阻 R ——传输线单位长度上的总电阻值，单位为 Ω/m ；
- 分布电导 G ——传输线单位长度上的总电导值，单位为 S/m ；
- 分布电感 L ——传输线单位长度上的总电感值，单位为 H/m ；
- 分布电容 C ——传输线单位长度上的总电容值，单位为 F/m 。

均匀传输线是指传输线的几何尺寸、相对位置、导体材料及导体周围媒质特性沿电磁波的传输方向不改变的传输线，即沿线的分布参数是均匀分布的。本章只关注均匀传输线。

1.3 传输线方程及传输线特征参数

在射频电路中，传输线上的电压和电流将随空间位置而变化。为了能够得到传输线上指定位置电压和电流值，本节引入了一般传输线方程并得到该方程的通解，再由方程推出



几个传输线的特征参数。

1.3.1 一般传输线方程——基尔霍夫定律表示式

1. 基尔霍夫电流定律 (KCL)

对于任一节点，所有流出节点的支路电流的代数和恒等于零，即对任一节点，有

$$\sum i = 0$$

规定：流出节点的电流前面为“+”；流入节点的电流前面为“-”。KCL的实质是流入节点的电流等于流出节点的电流。

2. 基尔霍夫电压定律 (KVL)

任一回路的所有支路电压的代数和恒等于零，即对任一回路，有

$$\sum u = 0$$

规定：指定回路的绕行方向，支路电压方向与回路绕行方向一致时，前面为“+”；反之，前面取“-”。KVL的实质是电压与路径无关。

3. 电阻 R 、电感 L 和电容 C 的阻抗

电阻 R 的阻抗为

$$Z_R = \frac{\dot{U}_R}{\dot{I}_R} = R$$

“电阻” = R ，“电抗” = 0

电感 L 的阻抗为

$$Z_L = \frac{\dot{U}_L}{\dot{I}_L} = j\omega L = jX_L$$

“电阻” = 0，“电抗” = ωL ， $X_L = \omega L$ 为感抗

电容 C 的阻抗为

$$Z_C = \frac{\dot{U}_C}{\dot{I}_C} = \frac{1}{j\omega C} = jX_C$$

“电阻” = 0，“电抗” = $-\frac{1}{\omega C}$ ， $X_C = -\frac{1}{\omega C}$ 为容抗



4. 基尔霍夫定律表示传输线的一般方程

在 1.2 节中, 双线传输线被分割成足够小的线段, 建立了一个可以使用基尔霍夫定律的模型。下面我们就用基尔霍夫电压和电流定律分别应用于如图 1-4 所示的回路和节点 a。

由基尔霍夫电压定律可得出

$$(R + j\omega L)I(z)\Delta z + V(z + \Delta z) = V(z) \quad (1.1)$$

式 (1.1) 两边同除 Δz , 然后取极限可得电压降的导数, 即

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \left(-\frac{V(z + \Delta z) - V(z)}{\Delta z} \right) = -\frac{dV(z)}{dz} = (R + j\omega L)I(z)$$

或

$$-\frac{dV(z)}{dz} = (R + j\omega L)I(z) \quad (1.2)$$

式中, R 和 L 为双线的组合电阻和电感, 也就是说将电阻和电感合在一起了。

再对图 1-4 中的节点 a 应用基尔霍夫电流定律, 得

$$I(z) - V(z + \Delta z)(G + j\omega C)\Delta z = I(z + \Delta z) \quad (1.3)$$

同样, 式 (1.3) 也可转换成

$$\lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{I(z + \Delta z) - I(z)}{\Delta z} = \frac{dI(z)}{dz} = -(G + j\omega C)V(z) \quad (1.4)$$

式 (1.2) 和式 (1.4) 是一对相互联系的一阶微分方程组, 将式 (1.2) 变形导入式 (1.4) 中可得

$$\frac{d^2V(z)}{dz^2} - k^2V(z) = 0 \quad (1.5)$$

式中, 我们设 k 为复传播常数, 即

$$k = k_r + jk_i = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

同理, 将式 (1.4) 变形导入式 (1.2) 中, 可得

$$\frac{d^2I(z)}{dz^2} - k^2I(z) = 0 \quad (1.6)$$

式 (1.5) 和式 (1.6) 两个方程的解是两个指数函数, 对于电压有



$$V(z) = V^+ e^{-kz} + V^- e^{+kz} \quad (1.7)$$

对于电流有

$$I(z) = I^+ e^{-kz} + I^- e^{+kz} \quad (1.8)$$

由式(1.7)和式(1.8)可以看出,传输线上任意位置的复数电压和电流均由两部分组成,第一部分是向 $+z$ 方向传播的,即由信号源向负载方向传播的行波,称为入射波,其振幅不随传输方向变化,其相位随传播方向 z 的增加而滞后;第二部分是向 $-z$ 方向传播的,即由负载向信号源方向传播的行波,称为反射波,其振幅不随传播方向变化,其相位随反射波方向 $-z$ 的增加而滞后。传输线上任意位置的电压和电流均是入射波和反射波的叠加。

式(1.7)和式(1.8)可以说是传输线方程的通解,接下来我们将引入一些传输线的特征参数,最后求方程的特解。

1.3.2 特性阻抗

我们把式(1.7)代入式(1.2)中并求微分,可得

$$kV^+ e^{-kz} - kV^- e^{+kz} = (R + j\omega L)I(z)$$

整理可得

$$I(z) = \frac{k}{R + j\omega L} (V^+ e^{-kz} - V^- e^{+kz}) \quad (1.9)$$

电压和电流是通过阻抗联系起来的,根据式(1.9),我们引入特性阻抗 Z_0 的概念

$$Z_0 = \frac{(R + j\omega L)}{k} = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}} \quad (1.10)$$

对于无耗传输线模型, $R=G=0$,这时特性阻抗简化为

$$Z_0 = \sqrt{L/C} \quad (1.11)$$

将式(1.8)代入式(1.9),有

$$I^+ e^{-kz} + I^- e^{+kz} = \frac{1}{Z_0} (V^+ e^{-kz} - V^- e^{+kz})$$

容易得到

$$Z_0 = \frac{V^+}{I^+} = -\frac{V^-}{I^-} \quad (1.12)$$



结论：特性阻抗是传输线上入射波电压与入射波电流之比，或反射波电压与反射波电流之比的负值。

虽然特性阻抗可以用电压和电流比来表示，但它本身是针对于某一特定的传输线而言的，与负载无关。

在引入特性阻抗后，我们对传输线方程做第一次变形得到

$$\begin{aligned}V(z) &= V^+ e^{-kz} + V^- e^{+kz} \\ I(z) &= \frac{1}{Z_0} (V^+ e^{-kz} - V^- e^{+kz})\end{aligned}\quad (1.13)$$

1.3.3 传播常数

传播常数 k 是描述传输线上入射波和反射波的衰减和相位变化的参数，其表达式为

$$k = k_r + jk_i = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

用一般公认的工程技术符号表示为

$$\alpha \equiv k_r, \quad \beta \equiv k_i$$

其中实部 α 称为衰减常数，虚部 β 称为相移常数。衰减常数用来表示单位长度行波振幅的变化，相移常数用来表示单位长度行波相位的变化。

因为我们研究的是无耗线路，故

$$k = j\omega\sqrt{LC}, \quad \alpha = 0, \quad \beta = \omega\sqrt{LC}\quad (1.14)$$

我们把无耗传输线中参数 α , β 代入传输线方程式，对其做第二次变形，得

$$V(z) = V^+ e^{-j\beta z} + V^- e^{+j\beta z}\quad (1.15)$$

$$I(z) = \frac{1}{Z_0} (V^+ e^{-j\beta z} - V^- e^{+j\beta z})\quad (1.16)$$

1.4 均匀无耗传输线工作状态分析

传输线上的波一般为入射波与反射波的叠加。波的反射现象是传输线上最基本的物理现象。传输线上合成电压（或电流）振幅值的不同，是由于各处入射波和反射波的相位不同而引起的。可见，当入射波的相位与该点反射波的相位同相时，则该处合成波电压（或



电流) 出现最大值, 反之两者相位相反时, 合成波出现最小值, 故有

$$|V|_{\max} = |V^+| + |V^-| = |V^+|(1 + |\Gamma|) \quad (1.17)$$

$$|V|_{\min} = |V^+| - |V^-| = |V^+|(1 - |\Gamma|) \quad (1.18)$$

式中, Γ 为反射系数, 即反射波电压 $V^-(z)$ 与入射波电压 $V^+(z)$ 之比。我们考虑三种反射系数的极端情况

- (1) $|\Gamma|=0$, 即有入射波没有反射波时 (无反射);
- (2) $|\Gamma|=1$, 即入射波完全返回 (全反射);
- (3) 当 $0 < |\Gamma| < 1$ 时 (部分反射)。

这三种状态分别为: 无反射, 称为行波状态; 全反射, 称为驻波状态; 部分反射, 称为行驻波状态。

传输线只存在入射波而没有反射波, 这样的工作状态称为行波工作状态。因为电磁波可以在传输线上很好地“行走”, 最终全部“走到”终端。行波状态的负载条件为

$$Z_L = Z_0$$

即终端阻抗等于传输线的特性阻抗, 这种情况也称为负载完全匹配。完全匹配就是说让负载将入射波的能量完全吸收。

驻波是由两个振幅相同、频率相同、相位相同或相位差恒定的波源 (相干波) 在同一直线上沿相反方向传播时叠加后形成的。如图 1-5 所示, 驻波工作状态中某些点的合成电压永远为零, 取最小值点, 这些点称为节点。在某些点的合成电压的振幅具有最大值, 这些点称为腹点; 其他各点的合成电压的振幅在 0 与最大值之间。腹点是最大值点, 但并不是说这一点的值是固定不变的, 它也在做着简谐运动。形象地说, 驻波模型是这样的: 两个固定的波节点之间最开始是“平地”, 日积月累慢慢鼓起来, 变成一座“山峰”, “山峰”被不断侵蚀渐渐降低变回平地, 接着平地下陷, 变成一个“坑”, 最后把“坑”填平。它的特点是各分段各自独立地波动, 没有看似“跑动”的波形, 因此也就没有能量传播, 所以称为驻波。能量不再沿线传播, 好像“驻扎”在传输线一样。驻波状态意味着入射波功率完全没有被负载吸收, 即负载与传输线完全失配。

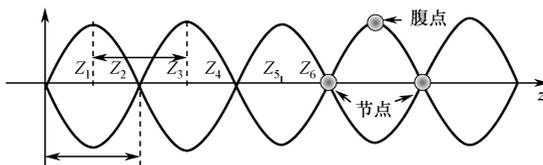


图 1-5 驻波电压示意图



在驻波状态时，入射波等于反射波，也就是说 $|\Gamma|=1$ 。

1.5 本章小结

在低频传输线中，电流几乎均匀地分布在导线内部，电流和电荷可等效地集中在轴线上；高频传输线上的电压和电流将随着空间位置变化而变化，使电压和电流呈现出波动性。高频传输线也称为长线，长线是指传输线的几何长度和线上传输电磁波的波长的比值（即电长度）大于或接近于1。

本章对传输线引入单位长度分布参数，如分布电阻 R 、分布电导 G 、分布电感 L 和分布电容 C ，得到均匀传输线方程电压和电流的通解

$$V(z) = V^+ e^{-kz} + V^- e^{+kz}$$

$$I(z) = I^+ e^{-kz} + I^- e^{+kz}$$

可以看出，线上任意位置的电压和电流均是入射波和反射波的叠加。

特性阻抗 Z_0 为传输线上入射波电压与入射波电流之比，或反射波电压与反射波电流之比的负值。特性阻抗是针对于某一特定的传输线而言的，是不变的，与负载无关。

波的反射现象是传输线上最基本的物理现象，为了表示传输线的反射特性，引入反射系数 Γ ，它决定了传输线的三种工作状态：

- (1) $|\Gamma|=0$ ，即有入射波没有反射波时（无反射）；
- (2) $|\Gamma|=1$ ，即入射波完全返回（全反射）；
- (3) $0<|\Gamma|<1$ ，部分反射。

上述三种工作状态分别称为行波工作状态、驻波工作状态和行驻波工作状态。

思考与练习

- (1) 射频传输线主要包括哪些分布参数？
- (2) 解释长线的概念，试列举几种常用的传输线。
- (3) 试建立传输线方程并求其通解。
- (4) 从反射的角度解释均匀无耗传输线行波和驻波的特点。