第38届全国中学生物理竞赛决赛实验考试（试题二）

物 理 竞 赛 实 验 试 题 · 试 题 二

试题二：测试同轴电缆的等效电路参数 | 2021 年 | 决赛实验考试

一、 引言与实验装置

在普通电路中，当电流或电压信号的频率较低时，电信号基本上是沿着导线回路传输的。如果信号频率高达几百 kHz 以上，即是所谓的射频信号，普通导线就会像天线一样向空间发射电磁波，因而不能成为电信号传输的有效通道。为了传输射频信号，通常采用一类特殊结构的传输线，如同轴电缆。同轴电缆的形状和结构如图 1 所示，中心导体通常为铜质导线，中心导体外面有一层介质绝缘层，绝缘层外面是外层导体，外层导体外面是塑料护套。使用时，一端接信号源，另一端接负载。输入射频信号时，由于同轴电缆内、外导体上的电流方向相反，二者的电磁场在同轴电缆外部大致抵消，仅在同轴电缆内部以横波模式沿着中心导体上的电流方向传播，随之传播的是同轴电缆内、外导体之间的电压。

图 1 同轴电缆(a)及其结构(b)和示意图(c)。为简便起见，示意图(c)中只画出了中心导体和外层导体。在同轴电缆两端，中心导体和外层导体都可与导线、负载等相连接。

本实验用不同的方法测量同一根均匀同轴电缆的多个特征参数。忽略同轴电缆的损耗。所有结果都不评估不确定度。

【实验装置】长度为 5.00 米的待测同轴电缆、信号源（内阻为 R_0，可以产生不同频率、不同波形的信号）、交流电压表（可以测量交流电压的有效值）两台、双通道数字示波器、电阻、导线等。

图待补

实物照片，详见原卷

图 1(a)

图待补

剖面照片，详见原卷

图 1(b)

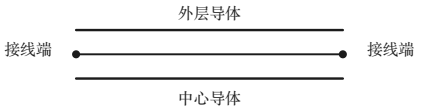

图 1(c)

A、 用低频正弦信号测量同轴电缆的等效电容与等效电感 （8 分）

2A. 当正弦信号的频率 f_0 很低、波长远大于待测同轴电缆的长度时，待测同轴电缆可近似用图 2 所示电路等效，其中 C_1、L_1 分别是低频条件下整条待测同轴电缆的等效电容和等效电感，且满足以下关系：

$$\frac{1}{2\pi f_0 C_1} \gg 2\pi f_0 L_1 \quad (1)$$

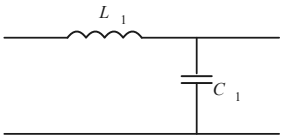

图 2 低频条件下待测同轴电缆的等效电路

请在答题纸上完成问题 2A1—2A4。

B、 用脉冲方波信号测量同轴电缆的特征阻抗、波速、单位长度的等效电容和等效电感 （32 分）

2B. 当信号频率较高、波长接近或远小于同轴电缆的长度时，流过中心导体的电流和内外导体间的电压沿电缆呈现波动性变化。如果将同轴电缆分成若干小段，使得每一小段的长度 Δx 都远小于其传输的电磁波波长（即流动在电缆上的电流波长），则每一小段 Δx 内各处的电流近似相等，这一小段同轴电缆就可以用一个等效电感 $L\Delta x$ 和一个等效电容 $C\Delta x$ 来表示，其中 L 和 C 分别为同轴电缆单位长度的等效电感和等效电容。一条长的同轴电缆可以等效成图 3 所示的电路模型。电磁波在同轴电缆中可以以波速 v_p 沿 $+x$ 和 $-x$ 两个相反的方向传输。对于沿每一个方向传输的电磁波，中心导体上一点相对于外层导体的电压与流经此处的电流之比为一个常数：

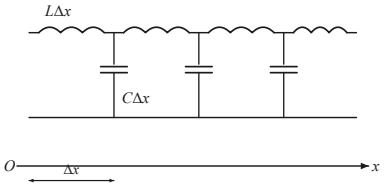

图 3 高频条件下同轴电缆的等效电路

$$\frac{V^+(x)}{I^+(x)} = \frac{V^-(x)}{I^-(x)} = Z_0 \quad (2)$$

其中 $V^+(x)$ 和 $I^+(x)$ 为沿 $+x$ 方向传输的电压、电流波，$V^-(x)$ 和 $I^-(x)$ 为沿 $-x$ 方向传输的电压、电流波，Z_0 被称为同轴电缆的特征阻抗，可以证明 $Z_0=\sqrt{L/C}$。由同轴电缆中电压或者电流的波动方程可以得到波速 $v_p=1/\sqrt{LC}$。

连接 特征阻抗是同轴电缆的一个基本参数。如果将两根特征阻抗分别为 Z_0 和 Z_1 的同轴电缆连接在一起，如图 4(a) 所示，则在连接两者的界面上会发生透射和反射。设输入信号通过特征阻抗为 Z_0 的同轴电缆到达界面处的电压为 V_i。之后，部分信号透射到第二根同轴电缆中继续向前传输，透射信号在界面处的电压为 V_t；部分信号可能被反射，在第一根同轴电缆中反向传输，反射信号在界面处的电压为 V_r。在界面处，两根同轴电缆上的电压应连续，即 $V_i+V_r=V_t$。此外，电流在界面处满足：$V_i/Z_0=V_r/Z_0+V_t/Z_1$。由这两式可得界面处的电压反射系数 Γ 和透射系数 T 为：

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (3)$$

$$T = \frac{V_t}{V_i} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_0} \quad (4)$$

可以证明，将图 4(a) 中任意一段同轴电缆替换为一个电阻后，例如将特征阻抗为 Z_1 的同轴电缆替换为电阻 R_3 之后，如图 4(b) 所示，（3）式和（4）式仍适用（需将式中的 Z_1 替换为 R_3）。



图 4(a)

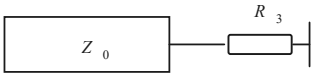

图 4(b)

测试电路

以下利用脉冲方波信号测量电磁波在同轴电缆中传输的波速 v_p 和同轴电缆的特征阻抗 Z_0。测试电路如图 5 所示，待测同轴电缆长为 l=5.00m，末端开路，始端的中心导体与交流电阻 R_g=1000Ω 相连。信号源内阻 R_0=50.0Ω，可产生幅度 V_0=10.0V、脉宽 τ=50.0μs、频率为 100Hz 的脉冲信号。脉冲信号的脉宽远大于信号在同轴电缆中往返一次的时间，即 $\tau \gg 2l/v_p$。设图 5 中连接电路所用导线很短、长度可忽略不计。

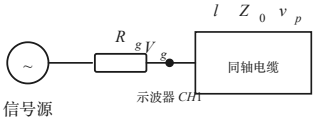

图 5 测试电路

波形

用示波器的通道 1（CH1）测试同轴电缆始端的电压波形 V_g，结果如图 6 所示。

请在答题纸上完成问题 2B1。

将图 6 中 −0.1～1.0μs 范围内上升沿波形展开放大，得到图 7 所示的台阶状波形。对该波形的说明如下：

(1) 第一个台阶电压 V_{g1}，为信号源幅度 V_0 在同轴电缆特征阻抗 Z_0 上的分压，即：

$$V_{g1}=V_0\cdot\frac{Z_0}{R_0+R_g+Z_0};$$

图待补

实测脉冲波形，详见原卷

图 6 示波器测试到的脉冲信号的波形

(2) 幅度为 V_{g1} 的信号进入同轴电缆后，沿同轴电缆 $+x$ 方向（图 5 中沿同轴电缆向右）无损耗地传输至末端。在末端反射后沿 $-x$ 方向传输。由于同轴电缆末端开路，相当于末端负载为无穷大，由（3）式可知对应的反射系数为 1。末端反射的信号沿 $-x$ 方向传输至始端后，透射出去的部分被信号内阻 R_0 和交流电阻 R_g 消耗，反射的部分在同轴电缆中沿 $+x$ 方向传输。由（3）式可知，此时始端的反射系数 Γ_1 为：

$$\Gamma_1=\frac{(R_0+R_g)-Z_0}{(R_0+R_g)+Z_0}\quad(5)$$

所以，第二个台阶电压 $V_{g2}=V_{g1}+V_{g1}+V_{g1}\Gamma_1$，其中第一个 V_{g1} 仍为信号源幅度在同轴电缆特征阻抗 Z_0 上的分压，这是由于脉冲方波信号的脉宽远大于信号在同轴电缆中往返

一次的时间，此时信号源仍在输出信号并进入同轴电缆；第二个 V_{g1} 是第一个台阶电压传输至同轴电缆末端被反射后又传输到同轴电缆始端的幅度；$V_{g1}\Gamma_1$ 为第二个 V_{g1} 在同轴电缆始端被反射后的幅度。

(3) 后续的台阶电压可以以此类推得到。

结论 由以上说明可知，图 7 所示波形中相邻台阶的时间间隔与同轴电缆的长度 l 和波速 v_p 有关，相邻两个台阶的电压之差与始端反射系数 Γ_1 有关。

请在答题纸上完成问题 2B2—2B5。

图待补

实测台阶波形，详见原卷

图 7 脉冲信号的上升沿波形