

网络变压器的作用、原理及主要参数

前言

图 1 所示的网络变压器 (Ethernet Transformer, 也称数据汞 /网络隔离变压器) 模块是网卡电路中不可或缺的部分, 它主要包含中间抽头电容、 变压器、 自耦变压器、 共模电感。该变压器一般都安装在网卡的输入端附近。工作时, 由收发器送出的上行数据信号从络变压器的 Pin16-Pin15 进入, 由 Pin10-Pin11 输出, 经 RJ45 型转接头, 再通过非屏蔽双绞线送往服务器 ;服务器送来的下行数据信号经另一对非屏蔽双绞线和 RJ45 型转接头, 由 Pin7-Pin6 进入, 由 Pin1-Pin2 输出, 然后送到网卡的收发器上。

本文将主要分析网络变压器的原理、主要参数及实现的功能。

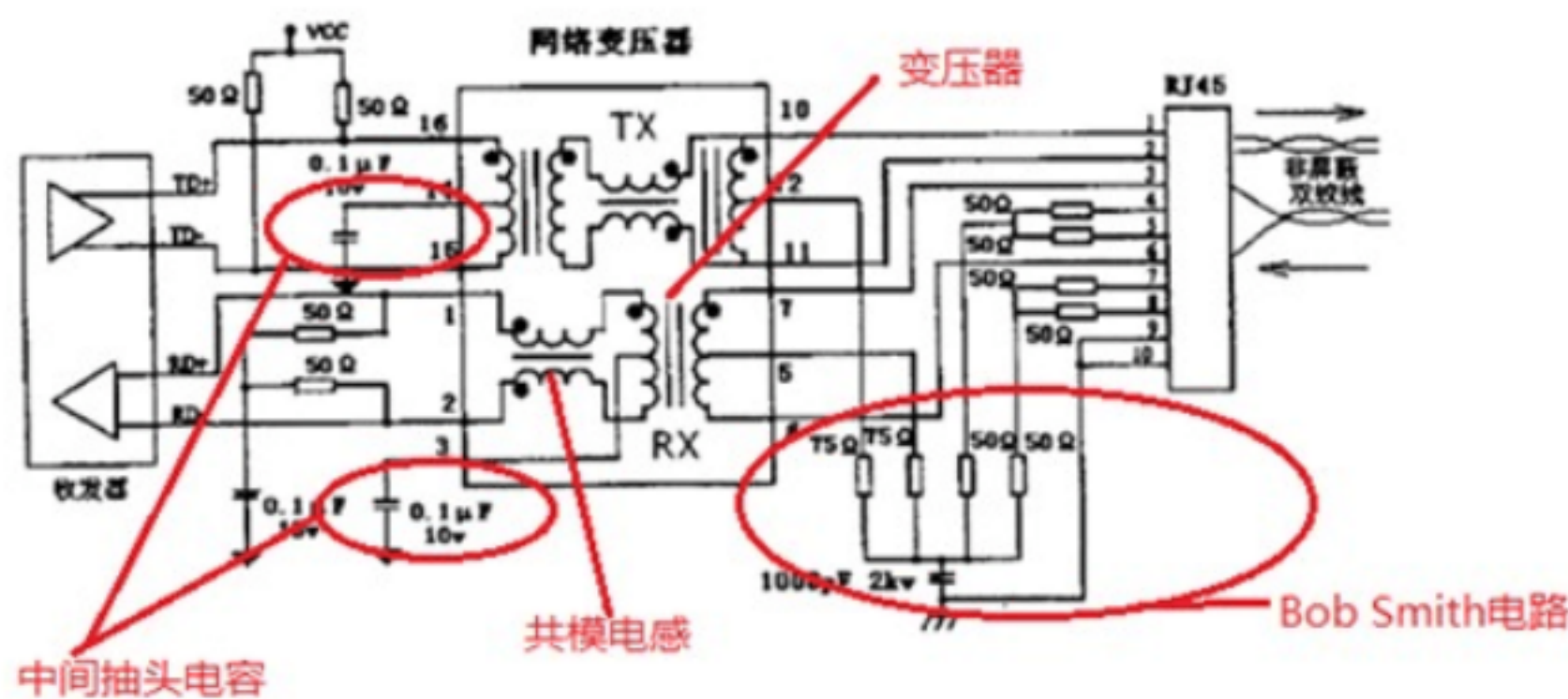


图 1: 网络变压器电路图

Ethernet Transformer主要实现以下三个功能：

- 1.满足 IEEE 802.3 电气隔离要求
- 2.无失真传输以太网信号
- 3.辐射发射的抑制

电气隔离

任何 CMOS 制程的芯片工作的时候产生的信号电平总是大于 0V 的(取决于芯片的制程和设计需求), PHY 输出信号送到 100 米甚至更长的地方会有很大的直流分量的损失。而且如果外部网线直接和芯片相连的话, 电磁感应 (打雷) 和静电, 很容易造成芯片的损坏。

再就是设备接地方法不同, 电网环境不同会导致双方的 0V 电平不一致, 这样信号从 A 传到 B, 由于 A 设备的 0V 电平和 B 点的 0V 电平不一样, 这样可能会导致很大的电流从电势高的设备流向电势低的设备。

网络变压器把 PHY 送出来的差分信号用差模耦合的线圈耦合滤波以增强信号，并且通过电磁场的转换耦合到连接网线的另外一端。这样不但使网线和 PHY 之间没有物理上的连接而换传递了信号，隔断了信号中的直流分量，还可以在不同 0V 电平的设备中传送数据。

网络变压器本身就是设计为耐 2KV~3KV 的电压的。也起到了防雷保护作用。有些朋友的网络设备在雷雨天气时容易被烧坏，大都是 PCB 设计不合理造成的，而且大都烧毁了设备的接口，很少有芯片被烧毁的，就是变压器起到了保护作用。

隔离变压器可满足 IEEE802.3 的绝缘要求，但不能抑制 EMI。

共模抑制

在双绞线中的每一根导线是以双螺旋形结构相互缠绕着。流过每根导线的电流所产生的磁场受螺旋形的制约。流过双绞线中每一根导线的电流方向，决定每对导线发射噪音的程度。在每对导线上流过差模和共模电流所引起的发射程度是不同的，差模电流引起的噪音发射是较小的，所以噪音主要是由共模电流决定。

1. 双绞线中的差模信号

对差模信号而言，它在每一根导线上的电流是以相反方向在一对导线上传送。如果这一对导线是均匀的缠绕，这些相反的电流就会产生大小相等，反向极化的磁场，使它的输出互相抵消。在无屏蔽双绞线系统中的差模信号如图 2 所示

此主题相关图片如下： 02 无屏蔽双绞线中的差模信号 .jpg



图 2: 无屏蔽双绞线中的差模信号

在无屏蔽双绞线中，不含噪音的差模信号不产生射频干扰。

2. 双绞线中的共模信号

共模电流在两根导线上以相同方向流动 ,并经过寄生电容 C_p 到地返回。在这种情况下 ,电流产生大小相等极性相同的磁场 ,它们的输出不能相互抵消。如图 6 所示,共模电流在对绞线的表面产生一个电磁场 ,它的作用正如天线一样。

此主题相关图片如下： 03 无屏蔽双绞线中的共模信号 .jpg

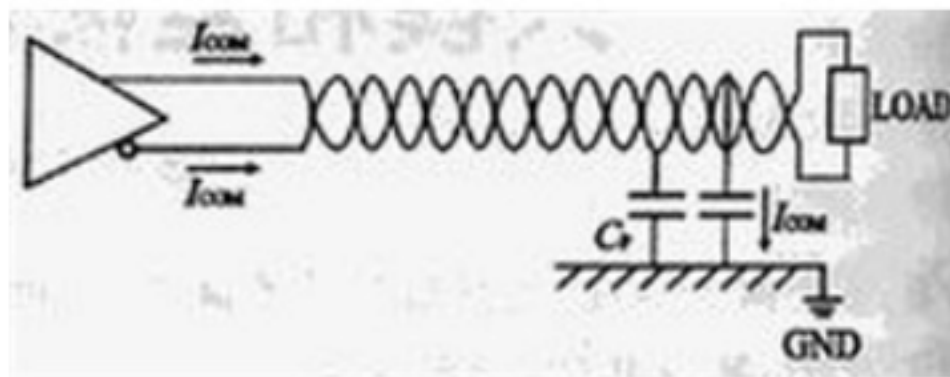


图 3: 无屏蔽双绞线中的共模信号

在无屏蔽对绞线中 ,共模信号产生射频干扰。

3. 共模、差模噪音及其 EMC

电缆上噪音有从电源电缆和信号电缆上产生的辐射噪音和传导噪音两大类。这两大类中又分为共模噪音和差模噪音两种。 差模传导噪音是电子设备内部噪音电压产生的与信号电流或电源电流相同路径的噪音电流 ,如图 4 所示。减小这种噪音的方法是在信号线和电源线上串联差模扼流圈、 并联电容或用电容和电感组成低通滤波器 ,来减小高频的噪音 ,如图 5 所示。

此主题相关图片如下： 04 差模噪声 .jpg

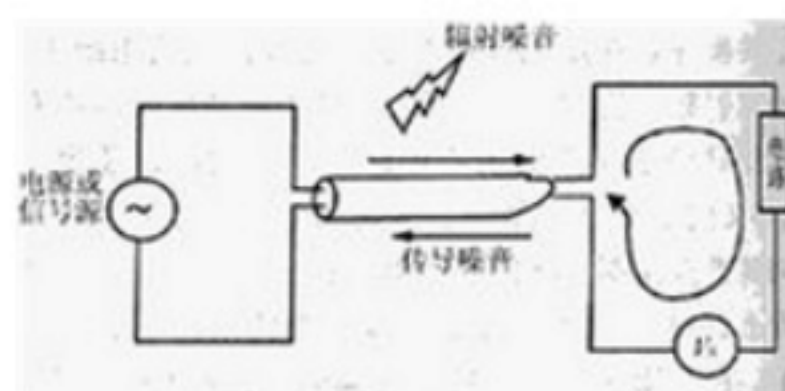


图 4: 差模噪声

此主题相关图片如下： 05 差模噪声的抑制 .jpg

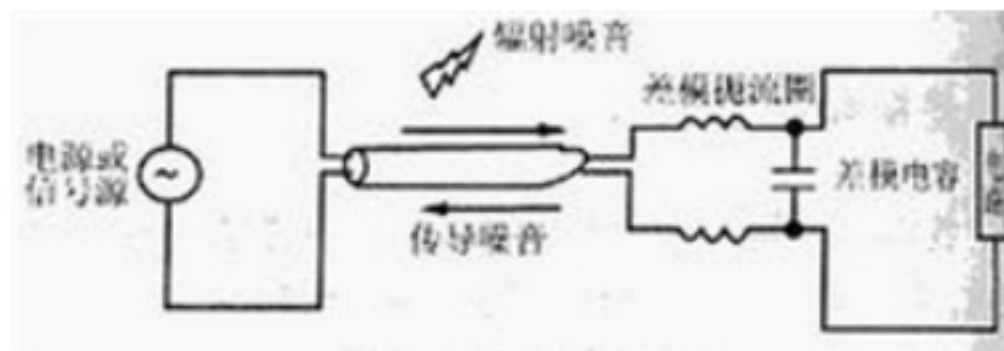


图 5: 差模噪声的抑制

差模辐射噪音是图 4 电缆中的信号电流环路所产生的辐射。这种噪音产生的电场强度与电缆到观测点的距离成反比，与频率的平方成正比，与电流和电流环路的面积成正比。因此，减小这种辐射的方法是在信号输入端加 LC 低通滤波器阻止噪音电流流进电缆；使用屏蔽电缆或扁平电缆，在相邻的导线中传输回流电流和信号电流，使环路面积减小。

共模传导噪音是在设备内噪音电压的驱动下，经过大地与设备之间的寄生电容，在大地与电缆之间流动的噪音电流产生的，如图 6 所示。

此主题相关图片如下： 06 共模噪声 .jpg

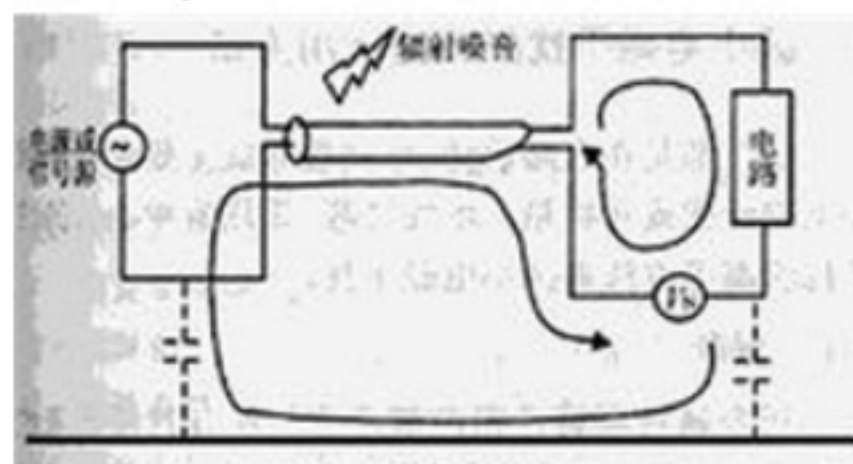


图 6: 共模噪声

减小共模传导噪音的方法是在信号线或电源线中串联共模扼流圈、在地与导线之间并联电容器、组成 LC 滤波器进行滤波，滤去共模传导噪声。其电路如图 7 所示。

此主题相关图片如下： 07 共模噪声的抑制 .jpg

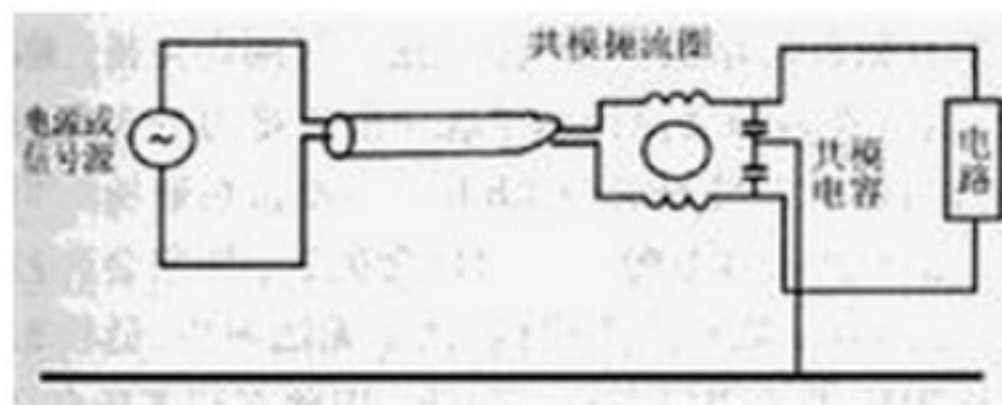


图 7：共模噪声的抑制

共模扼流圈是将信号线与地线同方向绕在铁氧体磁芯上构成的，它对线间流动的差模信号电流和电源电流阻抗很小，而对两根导线与地之间流过的共模电流阻抗则很大。共模辐射噪音是由于电缆端口上有共模电压，在其驱动下，从大地到电缆之间有共模电流流动而产生的。辐射的电场强度与电缆到观测点的距离成反比，(当电缆长度比电流的波长短时)与频率和电缆的长度成正比。减小这种辐射的方法有：通过在线路板上使用地线面来降低地线阻抗，在电缆的端口处使用 LC 低通滤波器或共模扼流圈。另外，尽量缩短电缆的长度和使用屏蔽电缆也能减小辐射。

网络变压器中集成的共模电感可有效抑制共模电流引起的 EMI 问题，但需要特别注意共模电感的位置，如果放在芯片侧，则不适合于电流驱动型的芯片，如图 8 所示，当电流流经共模电感的方向相同时，共模电感磁芯中并没有磁力线相互抵消，此时共模电感的阻抗阻碍电流的变化，进而影响到正常工作的信号。

此主题相关图片如下： 08 两线共模电感用于电流驱动型的芯片 .jpg

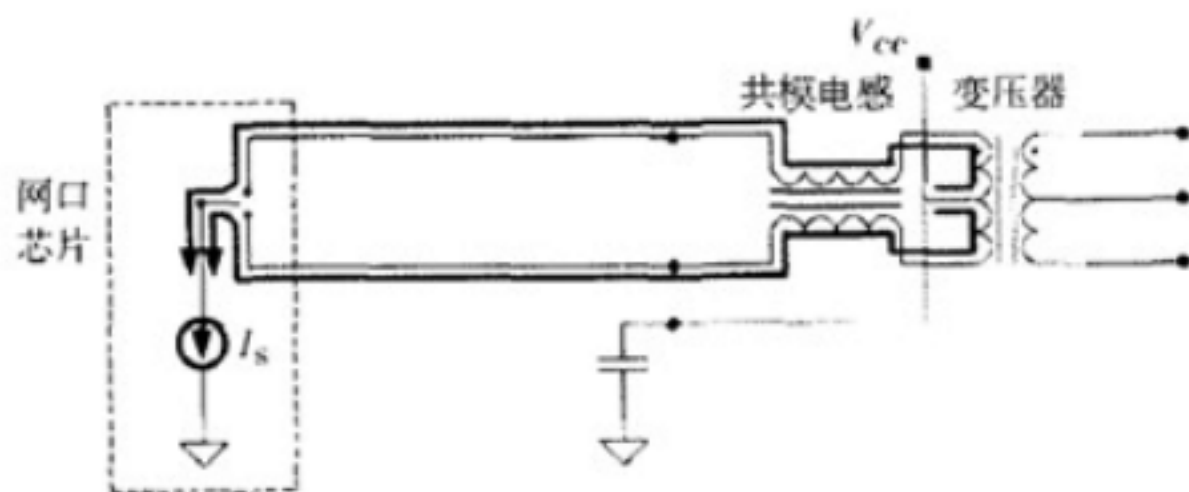


图 8：两线共模电感用于电流驱动型的芯片

如果放在电缆侧，为保证 Bob Smith 电路的匹配作用，需要再增加一个自耦变压器，如图 9。

此主题相关图片如下： 09 自耦变压器的作用 .jpg

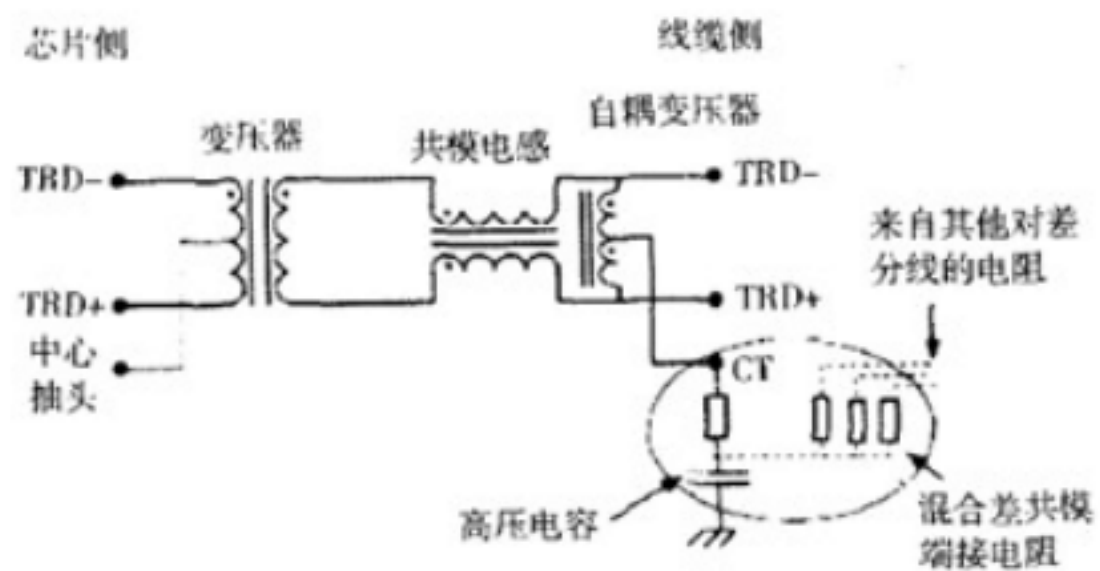


图 9：自耦变压器的作用

此主题相关图片如下： 10mnc2401gs 网络变压器 .jpg

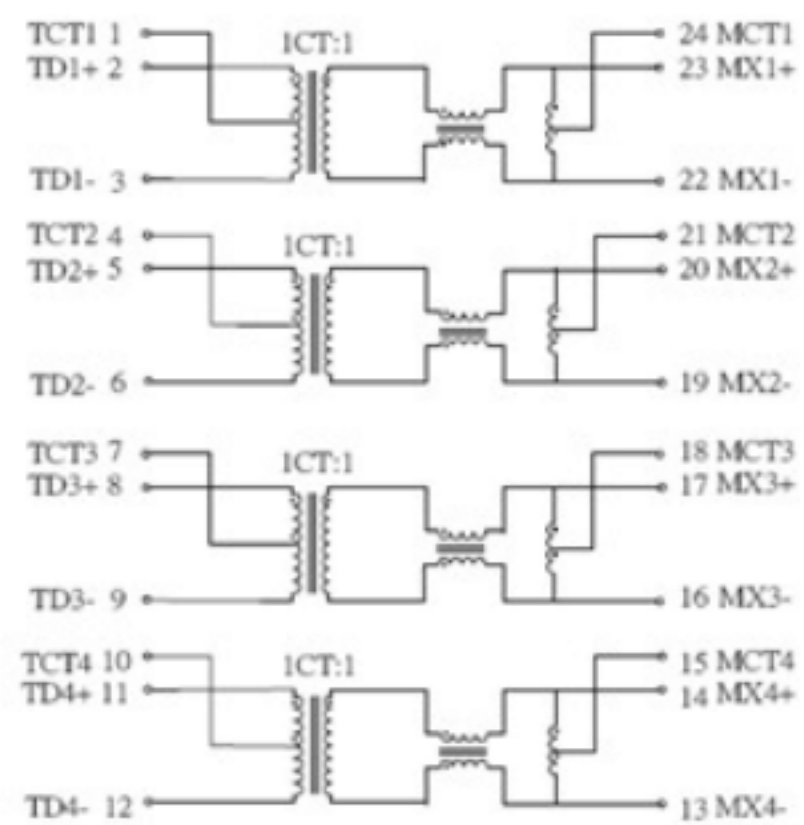


图 10: MNC2401GS 网络变压器 (V211 使用)

以上方案需要多增加一个磁芯，所以目前应用更多的是使用三线共模电感，如图 11。此种方案既可以适用于电流驱动型的芯片，而且只需要两个磁芯，减少了成本。

此主题相关图片如下： 11 三线共模电感的作用 .jpg

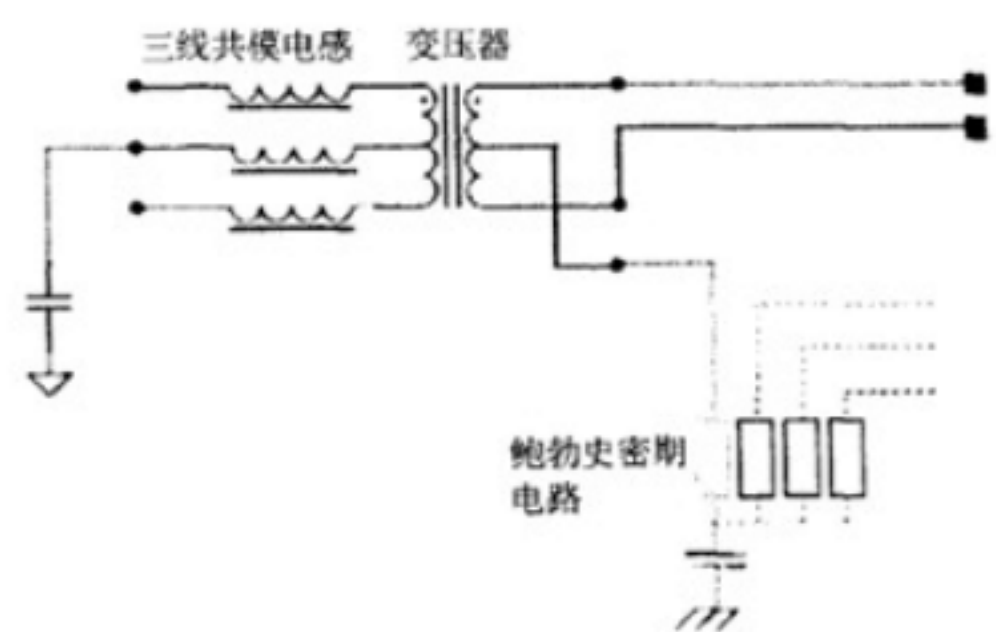


图 11: 三线共模电感的应用

图 11 所示的方案还有一个好处，就是对于地上的共模噪声有很好的抑制作用，如图 12，当地噪声是共模源时，电流同向经过 3 个线圈，共模阻抗较

大，起到抑制共模噪声的作用。

此主题相关图片如下： 13 变压器初级和次级之间的耦合电容 .jpg

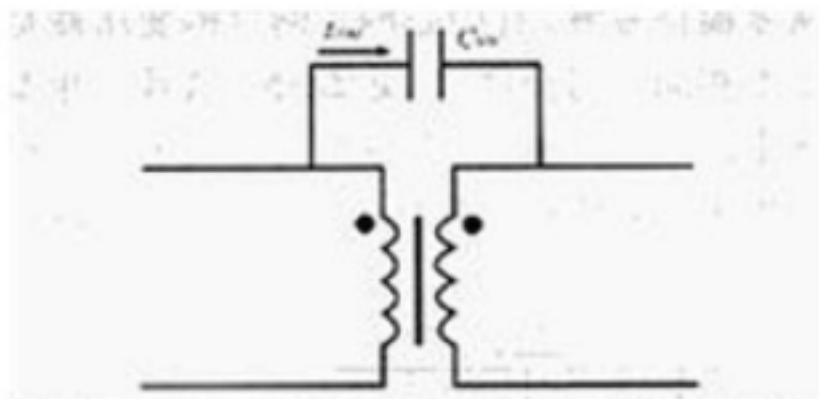


图 13: 变压器初级和次级之间的耦合电容

变压器与噪音传导

理想变压器理论上是完美的电路元件，它能用完美的磁耦合在初级和次级绕组之间传送电能。理想变压器只能传送交变的差模电流。它不能传送共模电流，因为共模电流在变压器绕组两端的电位差为零，不能在变压器绕组上产生磁场。

实际变压器初级和次级绕组之间有一个很小但不等于零的耦合电容 C_{ww} ，见图 13。

此主题相关图片如下： 13 变压器初级和次级之间的耦合电容 .jpg

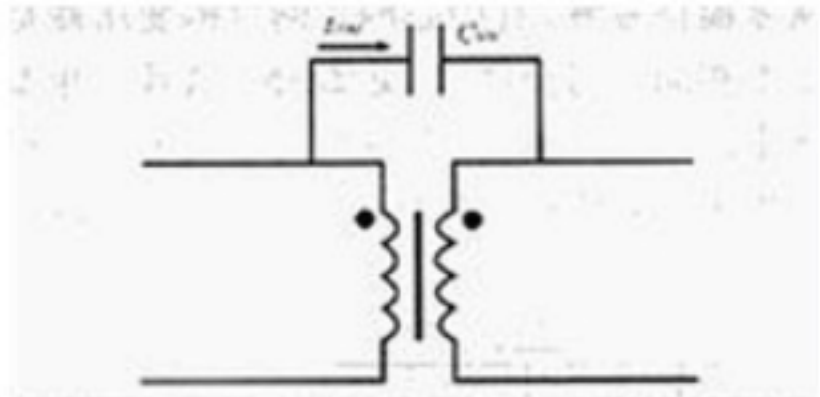


图 13: 变压器初级和次级之间的耦合电容

这个电容是绕组之间存在非电介质和物理间隙所产生的。增加绕组之间的空隙和用低介电常数的材料填满绕组之间的空间就能减小绕组之间电容的数值。电容 C_{ww} 为共模电流提供一条穿过变压器的通道，其阻抗是由电容量的大小和信号频率来决定的。

中间抽头 (Center Tap)

中间抽头主要有两个作用：

1. 为共模电流提供低阻抗路径，降低共模电流 /电压 (同 Choke 作用)
2. 为 Transceiver 中 Rx/Tx 信号提供直流偏置

所以对于不同的问题频率点，我们可以选择不同的电容值以提供低阻抗返回路径。对于不同芯片和不同 PCB，此容值选择多少可以达到效果，需实际尝试，但有一点可以确定，此电容对网口辐射发射有着很大影响

Bob Smith 电路

此电路有两种功能：提供网口任意两队差分信号间 150ohm 的阻抗匹配；可以对共模信号提供一个回流路径。

考虑到第一种功能，我们就可以清楚看到为什么共模电感放在电缆侧时不能满足 Bob smith 电路的匹配要求，如图 14 所示：

此主题相关图片如下： 14 共模电感位于电缆侧时的电路 .jpg

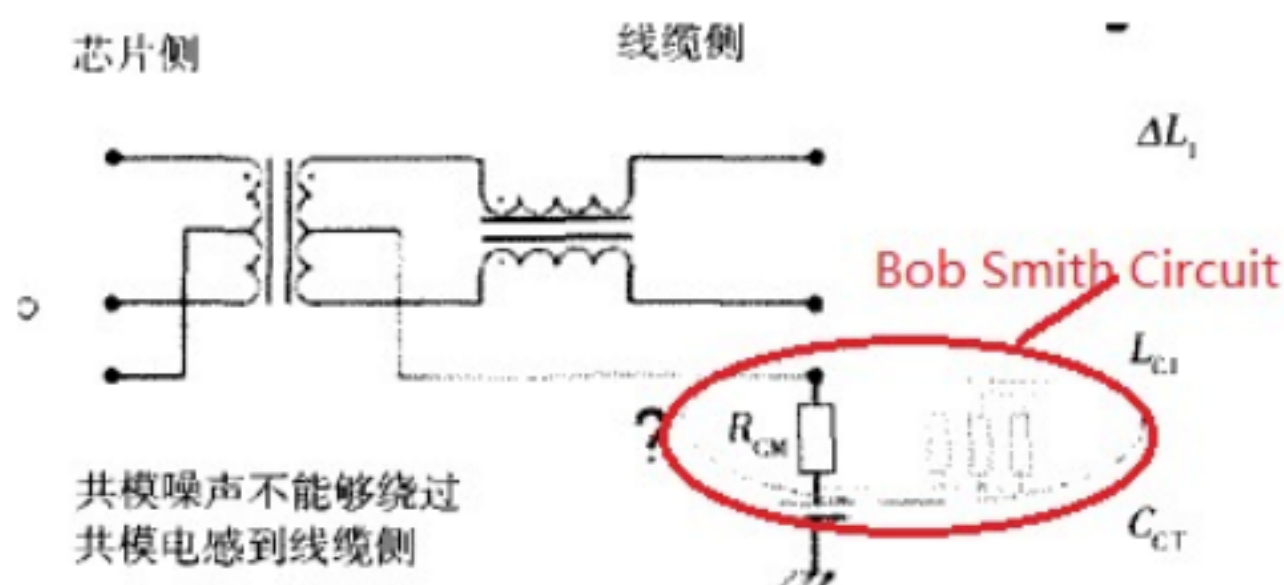


图 14：共模电感位于电缆侧时的电路

此时匹配电阻不是 150ohm，而变成 $Z=2 \times 75 + 2 \times Z_{cmc}$ ，不能满足其阻抗匹配要求，所以两线共模电感不能放在电缆侧，如果放在电缆侧，则需要额外增加一个自耦变压器。

考虑第二种功能，它所能提供的阻抗：

要想在较宽频率范围内获得低阻抗，需要控制连线阻抗，保证 Bob-smith 电路的低阻抗连接。针对不同的问题频率点还可以适当调整电路中电容的容值。其作用与中心抽头电容类似，但因为其路径上有 75ohm 的串联电阻，并且此电

容为高压电容，容值很难选得很大，所以其对网口辐射发射的影响并没有中心抽头那么明显，但也是我们可以调整解决网口问题的一个方面。

主要参数

图 15 是变压器等效电路图，图 16 为 MNC H1606DG 产品的主要参数表，其中涉及的主要参数有

此主题相关图片如下： 15 变压器等效电路 .jpg

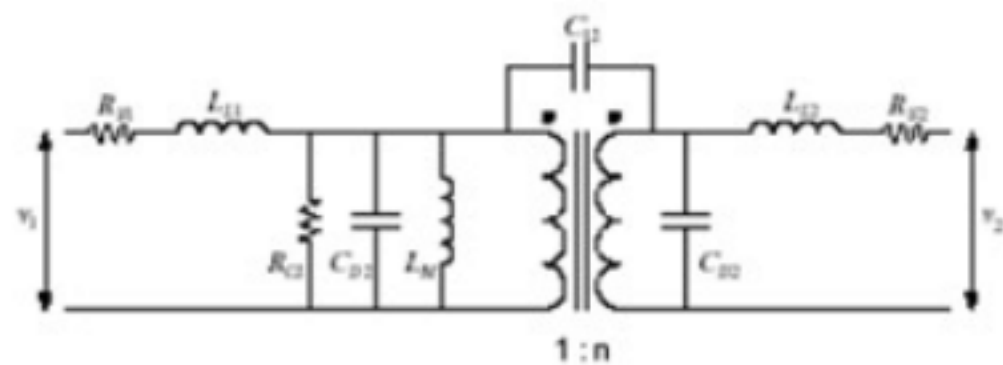


图 15: 变压器等效电路

- 1. 开路电感 (OCL) : Open Circuit Inductance ，图 15 中的
- 2. 漏电感 : Leakage Inductance ，图 15 中的、，与变压器耦合系数有关，(取决于绕线技术和磁芯)
- 3. 互绕电容 : Interwinding Capacitance ，图 15 中 C12 是也。小的话对于变压器信号没有影响， 过大则为共模电流提供低阻抗路径， 由此会产生不利效果
- 4. 直流阻抗 : DC Resistance 图 15 中 RL1、RL2
- 5. 变压器变压比 : Turn Ratio ，初级和次级线圈匝数比
- 6. 插入损耗 dB : Insertion Loss= $20 \times \log(V1/V2)$ ，其中 V1 为插入变压器后输出端的电平， V2 是未插变压器时输出端电平。此参量用以衡量插入变压器后对传输信号的影响， 越小越好。一般指网络变压器对信号衰减程度与信号频率之间的关系曲线

7. 回波损耗 dB：Return Loss，衡量插入网络变压器后系统阻抗失配程度与信号频率之间的关系曲线 $\text{Return Loss}=20\times\log(V_r/V_i)$ ，其中 V_r 为反射信号幅度， V_i 为入射信号幅度
8. 交越干扰 dB：Cross Talk，两个单元电路中的一个单元电路中的信号 V_1 与感应到另一个单元电路中的信号 V_2 之比值 $\text{Cross Talk}=20\times\log(V_2/V_1)$
9. 共模抑制比 dB：CMRR= $20\times\log(V_{out}/V_{in})$ ，网络变压器输入端的共模干扰信号幅度 V_{in} 与输出端的共模干扰信号幅度 V_{out} 之比值
10. 隔离电平：Isolation HOT-POT，电气隔离电平

此主题相关图片如下： 16 mnc h1606dg 的参数表 .jpg

C. Electrical Specification @25°C		
Open circuit Inductance:	350uH Min @ 100KHz 0.2V 8mA DC BIAS	
Leakage Inductance:	0.50uH Max @ 100KHz 0.2V	
Interwinding Capacitance:	25pF TYP @ 100KHz 0.2V	
DC Resistance:	1.2Ω Max	
Turn Ratio:	1CT:1CT(TX)/1CT:1CT(RX)±5%	
Polarity:	1-16,6-11 In-Phase	
Insertion Loss:	0.5-100 MHz	1.1dB Max
Return Loss	0.5-30 MHz	18dB Min
	30.1-60MHz	18-20log(f/30)dB Min
	60.1-80MHz	12dB Min
Cross Talk:	0.5-40MHz	35dB Min
	40.1-100MHz	33-20*log(f/50)dB Min
CMRR:	0.5-100MHz	30dB Min
Isolation HI-POT:	1500VAC,1mA,1S	
Operating Temperature:	0°C to 70°C	
Storage Temperature:	-25°C to +125°C	
Product Type:	Green Product	

图 16：MNC H1606DG 参数表

TBD

关于中间抽头的接法问题（有的接地、有的接电源，电平值也有可能不一样），网上有以下一段 Q&A：

Q：在以太网设备中，通过 PHY 接 RJ45 时，中间都会加一个网络变压器。有的变压器中心抽头接电源，有的又接电容到地。而且接电源时，电源值又可以不一样，3.3V，2.5V，1.8V 都有。这个变压器的作用到底是什么呢？

A：下面是一个大概的解答：

1、中间抽头为什么有些接电源？有些接地？这个主要是与使用的 PHY 芯片 UTP 口驱动类型决定的，这种驱动类型有两种，电压驱动和电流驱动。电压驱动的就要接电源；电流驱动的就直接接个电容到地即可！所以对于不同的芯片，中心抽头的接法，与 PHY 是有密切关系的，具体还要参看芯片的 datasheet 和参考设计了。

2、为什么接电源时，又接不同的电压呢？这个也是所使用的 PHY 芯片资料里规定的 UTP 端口电平决定的。决定的什么电平，就得接相应的电压了。即如果是 2.5v 的就上拉到 2.5v，如果是 3.3v 的就上拉到 3.3v。

3.这个变压器到底是什么作用呢，可不可以不接呢。从理论上来说，是不需要接变压器，直接接到 RJ45 上，也是能正常工作的。但是呢，传输距离就很受限制，而且当接到不同电平网口时，也会有影响。而且外部对芯片的干扰也很大。当接了网络变压器后，它主要用于信号电平耦合。其一，可以增强信号，使其传输距离更远；其二，使芯片端与外部隔离，抗干扰能力大大增强，而且对芯片增加了很大的保护作用（如雷击）；其三，当接到不同电平（如有的 PHY 芯片是 2.5V，有的 PHY 芯片是 3.3V）的网口时，不会对彼此设备造成影响。

总的来说，网络变压器主要有信号传输、阻抗匹配、波形修复、信号杂波抑制和高电压隔离等作用。

查找 PHY 芯片资料，没有发现 UTP 端口电平的相关描述，因此这个地方还存在疑问。