

传输线变压器的机理及宽带阻抗匹配的设计

陈小刚^{1,2}, 朱昌平^{1,2,3}, 徐霞¹, 冉勇³, 冯若², 郭利强¹

(1. 河海大学计信学院, 江苏常州 213022;

2. 南京大学近代声学国家重点实验室, 南京 210093;

3. 荆州师院计信学院, 湖北荆州 434100)

摘要 传输线变压器具有频带宽、易于制作的特点, 在通信领域得到了广泛的应用。但在超声换能器与超声信号源之间采用传输线变压器实现阻抗匹配的报道较少。文章对传输线变压器实现宽带阻抗匹配的机理进行了详细的分析, 通过一个简单的等效电路阐明了传输线变压器如何巧妙地利用传输线间的分布电容, 使其由影响高频能量传输的不利因素而转换为电磁能量转换必不可少的条件, 从而达到宽频带传输的目的。以 500kHz~2MHz 范围内的超声换能器的阻抗匹配变压器的设计为例, 具体给出了确定传输线变压器特性阻抗、线长、磁心、导线型号和匝数的方法。

关键词: 传输线; 阻抗匹配; 宽带; 超声

中图分类号: TN773

文献标识码: A

Mechanism of broadband transmission line and design of impedance match transformer

CHEN Xiao-gang^{1,2}, ZHU Chang-ping^{1,2,3}, XU Xia¹, RAN Yong³, FENG Ru², GUO Li-qiang¹

(1. College of Computer & Information Engineering, Hohai University, Changzhou 210032, China;

2. State Key Laboratory of Modern Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

3. College of Computer & Information Engineering, Jingzhou Normal College, Jingzhou 434100, China)

Abstract: With its broadband characteristic and the ease of manufacturing, transmission line transformers have been widely used in communication. However, few articles have been published to mention the fact that impedance match between an ultrasonic transducer and the signal source can be achieved by using a transmission line transformer. Analysis is given in this article on how a transmission line transformer can realize broadband impedance match. Through a simple equivalent circuit it is illustrated that distributed capacitance along the transmission line can be utilized, turning an adverse factor in the transmission of high-frequency energy to an advantage. As a result, transmission of energy over a broad frequency band is realized. As an example, design of an impedance match transformer of an ultrasonic transducer working in the frequency range of 500kHz~2MHz is described. The characteristic impedance, wire length, magnetic core, specifications of wire, and winding turns are determined.

Key words: transmission line; impedance match; broadband; ultrasonic

1 引言

自《超声换能器的宽带阻抗匹配器研究》一文^[1]发表以来, 不断有同行咨询有关传输线变压器在超声换能器宽带阻抗匹配中的应用的原理和具体的设计方法。为了将有关研究引向深入, 使传输线变压器在超声换能器的阻抗匹配中发挥更大的作用。特别对传输线变压器的工作原理和宽频带传输线变压器的设计方法进行介绍。

2 传输线变压器的工作原理

在功率超声领域, 由于不同频率的超声换能器的阻抗差别很大, 因此要实现功率放大器与超声换能器最佳匹配就必须采用宽带阻抗匹配变压器。宽带变压器一般有两种形式: 一是采用高频磁心的普通变压器; 另一种是利用传输线原理构成的传输线变压器。由于采用高频磁心的普通变压器利用的是变压器原理, 因而由于其分布电容和漏感的作用, 使其较难在宽频带范围满足应用要求, 所以采用高频磁心的普通变压器作为超声换能器的宽带阻抗匹配网络有许多技术难题要解决。而传输线变压器巧妙地利用了传输线间的分布电容, 使其由影响高频能

收稿日期: 2002-08-26; 修回日期: 2002-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(19934001); 教育部资助项目(00250)

作者简介: 陈小刚(1972-), 男, 江苏常州人, 助教, 从事电子信息专业的教学和科研。

量传输的不利因素转换为电磁能量转换必不可少的条件,从而达到宽频带传输的目的,因此用传输线变压器比较容易实现超声换能器的宽带阻抗匹配。

从图 1 可以清楚地看到传输线变压器中的两根导线恰好组成了一条传输线,但它同时又是变压器的两个线圈^[2]。信号源电压自 1、3 端将能量加到传输线变压器,经过传输线的传输,在 2、4 端将能量馈给负载。由于两根导线紧靠在一起,所以导线间电容很大,且在整个线长上是均匀分布的。另外,两根等长的导线同时绕在高 μ 磁心上,所以导线上每一线段 Δl 的电感也是很大,且也是均匀分布在整条线上的。如图 1 中虚线所示^[3]。当信号源加到输入端时,信号源向电容充电,使电容储能,然后电容通过电感放电,使电感储能。再往后电容又与电感进行能量交换,如此往复不已。输入信号就以电磁能的形式,自始端传输到终端,最后被负载吸收。

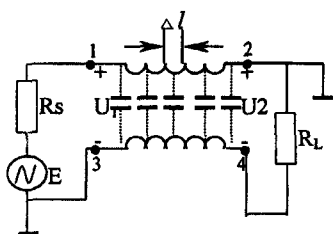


图 1 1:1 传输线变压器示意图

由此可见,传输线变压器传输宽带信号时,传输能量的方式与普通变压器是不同的。在高频端传输线模式起主要作用,能量通过电磁能交替变换的传输方式传输,因此传输线变压器的最高工作频率可以很高。在低频端变压器模式和传输线模式同时起作用,能量依靠磁耦合方式和传输线方式来进行传输。考虑到功率放大器的输出阻抗为 50Ω ,如果要实现阻抗匹配,则传输线变压器相对于宽带信号的下限角频率 ω_L 的初级阻抗至少也应为 50Ω 左右,即 $\omega_L L \geq 50\Omega$,所以在我们应用频率范围内 L 较大,即匝数较多,低频性能较好。这一点有别于用于射频通信的传输线变压器,由于其匝数较少,因此下限频率较高。

利用上述原理,可以连接成 1:4 的传输线变压器,如图 2 所示。

传输线变压器在信号源与负载间起了一个阻抗变换器的作用,即负载电阻 R_L 经传输线后在输入端的等效电阻,应等于信号源内阻(若信号源是一个功率放大器则应等于其最佳负载电阻) R_s 。这样传输系统将达到匹配。根据传输线原理^[3]可知,满足

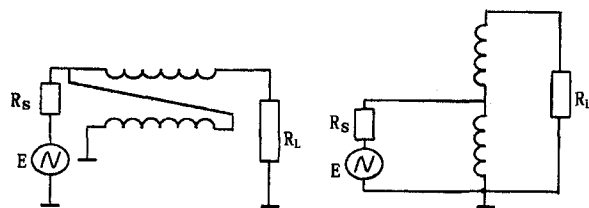


图 2 1:4 阻抗变换传输线变压器

最佳功率传输条件的传输线特性阻抗为:

$$Z_0 = \sqrt{R_s R_L}$$

因此,当 R_s 、 R_L 已知时,传输线特性阻抗 Z_0 就确定了,从而就可以选择为保证得到该特性阻抗的磁心类型、导线长度、线圈匝数等等。

3 宽频带传输线变压器的设计

传输线变压器的设计主要内容是:确定特性阻抗、确定线长、选择磁心、导线型号和匝数等等。

3.1 根据信号源内阻和负载阻抗确定传输线变压器特性阻抗

在本研究中作为信号源的功放的内阻为 50Ω ,作为负载的超声换能器的阻抗的变化范围为 $20\Omega \sim 1k\Omega$ 。根据具体要求,我们可选用 4:1、1:1、1:4、1:9、1:16 等阻抗变换传输线变压器来实现超声换能器与功放的大致阻抗匹配。为简单起见,我们假定 $R_L = 50\Omega$,则 $Z_0 = \sqrt{R_s R_L} = 50\Omega$,设计出 5 个相同的 1:1 传输线变压器来通过组合实现阻抗匹配。

3.2 根据传输线变压器插入损耗确定线长

电磁波从传输线变压器始端传输到终端是需要一定时间的,因此终端与始端电压和电流就有一相位差 φ , $\varphi = 2\pi/\lambda \cdot l$,其中 λ 为工作波长, l 为传输线长度。

显然,由于 φ 的存在使得输出端的有效阻抗就不再是纯阻抗而是与工作频率有关的阻抗了。实际运用中负载的数值是固定的,这样最佳匹配条件一般就不能满足了,负载处于失配状态。此时,传输到终端的能量只有一部分被负载吸收,其它能量在回路中损耗掉了,称为插入损耗。因此,缩短 l 的长度有利于减少插入损耗,但 l 不宜过短,否则传输线变压器的低频传输特性将恶化。

经综合考虑,我们按以下原则确定线长:

(1) 为使插入损耗尽可能小,传输线长度 l 尽量满足传输线变压器的特性阻抗 Z_0 接近最佳特性阻抗的前提下,让传输线长度 l 最短。

(2) 根据传输理论:在高频端,传输线长度 $l_{\max}$

$\leq 18000n/f_H$;在低频端,传输线长度 $l_{\min} \geq 50R_L / [(1+\mu_r)f_L]$ 。式中: f_L 、 f_H 的单位为 MHz; n 为常数,一般取 0.08 左右; R_L 为负载电阻, μ_r 为铁氧体在低频时的相对磁导率,我们选用的罐型铁氧体的磁导率 μ_r 约为 1000; l 的单位为 cm。我们选定线长范围为: $5\text{cm} \leq l \leq 720\text{cm}$ 。 l 的具体长短由考虑综合因素实测而定。

3.3 根据最低工作频率 f_L , 确定传输线变压器的初级电感量

一般初级感抗应为传输线特性阻抗的 3 倍以上,即 $\omega L \geq 3Z_0$,故:

$$L \geq 3Z_0 / 2\pi f_L = 3 \times 50 / (2\pi \times 5 \times 10^5) = 4.8 \times 10^{-5} (\text{H})$$

3.4 磁心和导线型号的确定^[4]

为了减小磁心的功率损耗,我们选用高频铁氧体作磁心。选用锰锌(MXO)罐型磁心,磁心外径为 60mm,其相对磁导率 μ_r 为 1000。

我们选用普通漆包线作为变压器的导线,线径为 0.80mm。

3.5 确定传输线变压器的初级绕组匝数 N

初级绕组匝数的确定由考虑以上因素在实验过程中进行调试,从中取一最佳值。

4 传输线变压器在超声换能器宽带阻抗匹配中的应用与讨论

我们利用上述设计方案自制了 5 个相同的传输

线变压器。采用不同的组合方式,实现了 500kHz~2MHz 范围内几种不同阻抗的超声换能器与 EIN-2100L 功放的大致匹配,使用效果良好。

传输线变压器虽然具有通频带宽的优点。但由于受其结构的限制,它只能实现电压比为:1:1、1:2、1:3、1:4、1:5……等电压的变换,相应的阻抗比只能是一些特定的分立值:1:1、1:4、1:9、1:16、1:25……,而不能象普通变压器那样,依靠改变初、次级绕组的匝数比实现任何阻抗比的变换。目前已有报道^[5]可以在 30MHz 到 450MHz 范围内实现任意阻抗的变换,此方法能否适用于超声换能器的宽带阻抗匹配尚待研究。

参考文献:

- [1] 朱昌平,陈兆华,冯若等.超声换能器的宽带阻抗匹配的研究[J].声学技术,1994,13(2):79-81.
- [2] 张肃文.高频电子线路(上册)[M].北京:高等教育出版社,1984,322-334.
- [3] 清华大学通信教研组.高频电路(上册)[M].北京:人民邮电出版社,1979.403-425.
- [4] Ashaf W. Lotfi and Matthew A. Wilkowski. Issue and advances in high-frequency magnetic for switching power supplies[J]. Proceedings of the IEEE. 2001. 89(6):833-839.
- [5] 高雪,胡鸿飞,傅德民等.宽带传输变压器的分析与设计[J].电波科学学报,2001,16(4):447-450.

《扩声技术原理及其应用》中译本出版发行

《扩声技术原理及其应用》中译本于 2002 年 11 月由电子工业出版社出版,同济大学王季卿教授和南京大学赵其昌教授合译。该书介绍最新扩声技术的研究成果和实践经验。内容包括扩声系统的功能和组成、室内音质与听觉心理学、扩声设备和声处理设备、声传输中有关参量的计算、扩声系统设计和校准调试。书末用一章的篇幅详细介绍和分析许多项成功的扩声设计实例,更具实用价值。这里包括了露天广场、数万人大型演唱会和体育场、交通客运站厅、音乐厅、歌剧院、会堂、讲堂、教学、会议厅、工厂、办公楼等多种场合的扩声工程,其中不少还是作者本人主持设计的项目,都是具有参考价值的设计资料。

原书作者之一阿诺德教授,曾在前民主德国文化部从事扩声工程技术多年,其后个人开业从事声学设计顾问工作,并开发了在扩声工程界很著名的声学设计软件,即 EASE 和 EARS 软件创始者,后者为可听化之用。阿诺德教授长期在大学教书,对扩声技术的原理也颇有研究,发表论著甚多,尤其和 Reichardt(国际著名声学家,德累斯登大学教授)合著的,以理论为主的“扩声技术基础”(1981 年)一书尤为著名。

(本刊编辑部)