

# On the Combination of Course Teaching and Scientific Research Examples

## —A Case Study of Maximum Power Transfer

Yanghong Tan<sup>1</sup>, Wuli Chen<sup>2</sup>, Xin Yin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha Hunan

<sup>2</sup>Hunan College of Information, Changsha Hunan

Email: [tanyho@126.com](mailto:tanyho@126.com)

Received: Feb. 26<sup>th</sup>, 2015; accepted: Mar. 2<sup>nd</sup>, 2015; published: Mar. 9<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

### Abstract

*Circuits* is an important course in electrical and electronic subject. The combination of basic theories of courses and frontier scientific research examples is emphasized in *Principles of Electrical Circuits* course teaching. And the train of thought for combination is illuminated by modeling and simulations of maximum power transfer. Teaching experiences show that this method is helpful for fostering scientific research ability and extending academic perspective of the students.

### Keywords

Principles of Electrical Circuits, Scientific Research Examples, Research Ability

---

# 电路教学与科研案例的结合

## —以最大功率传输定理为例

谭阳红<sup>1</sup>, 陈五立<sup>2</sup>, 尹新<sup>1</sup>

<sup>1</sup>湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙

<sup>2</sup>湖南信息学院, 湖南 长沙

Email: [tanyho@126.com](mailto:tanyho@126.com)

收稿日期: 2015年2月26日; 录用日期: 2015年3月2日; 发布日期: 2015年3月9日

## 摘要

《电路》是电气、电子信息类专业的重要专业基础课程。本文在“电路原理”课程教学中，强调将课程基础知识与前沿科研案例相合，并以利用最大功率传输定理为例说明结合思路。实践表明，将课程基础知识与前沿科研案例结合对培养学生的研究能力和拓宽学生的学视眼非常有利。

## 关键词

电路原理，科研案例，研究能力

## 1. 引言

《电路》是电类本科生必修的重要专业基础课，它具有很强的理论性，同时也有着较强的实践性，又是后续技术基础课及专业课学习的必备基础。对电路理论及其分析方法掌握的好坏在相当程度上决定着学生对后续技术基础课及专业课学习的进程。然而令人不尽如意的是：由于“电路原理”课程内容的基础性较强，很难将教学内容与前沿的科学研究相结合，这对开拓学生的学术视眼、培养学生的研究兴趣和创新意识是不利的[1]。

笔者在“电路原理”课程教学中，尝试将电路原理基础知识与工程应用和科研相结合，并通过简单的科研案例对学生进行科研思路和方法训练，使学生深刻理解电路的基础知识和实用价值，掌握科学研究的基本方法，提高研究能力和研究兴趣，拓宽视野，培养创新意识。在传统“电路原理”教材和教学中，我们只强调对电路的基本分析方法和求解，而学生对电路模型的来源和应用并不理解。例如，学生都知道最大功率传输定理，但是，对其实际应用却知之甚少。在教学中，通过分析最大功率传输定理，说明一个典型的工程应用：阻抗匹配，并要求学生在课后搭建实际匹配电路，并进行测量和验证。

## 2. 教学与科研案例结合示例——最大功率传输定理

### 2.1. 最大功率传输定理

最大功率传输定理是电路原理的基本定理之一，有着重要的理论意义和广泛的工程应用背景。如图1所示，最大功率传输定理可描述为“线性有源一端口网络向可变负载 $Z_L$ 传输最大功率的条件是：当负载电阻 $Z_L$ 与一端口网络的内阻抗 $Z$ 和 $Z_L$ 互为共轭，即 $Z = Z_L^*$ 时， $Z_L$ 可获得最大功率 $P_{\max} = U_{oc}^2 / (4\text{Re}[Z])$ ，称为最大功率匹配条件，其中， $\text{Re}[Z]$ 表示 $Z$ 的实部。”

### 2.2. 最大功率传输定理和科研案例的结合及其实施

实际系统的最大功率传输需要实现负载和电源(信号源)内阻的匹配，因此匹配电路非常重要。移动和无线传输设备已经得到了广泛的应用，例如移动电话、车载天线、蓝牙装置等。随着周围环境的改变，天线的场分布也会受到影响而改变天线的阻抗值，这种易变性会导致天线负载与传输线的失配。匹配失调不仅会降低系统效率，还会带来许多不良的影响，例如信号会在传输线上形成驻波，导致温度过高，甚至会损坏发射设备，产生振荡辐射干扰等[2]-[4]。阻抗匹配是射频设计中的一部分，主要是指传输线上所有高频信号都能传至负载点，而不会有信号反射回源点，也可以认为负载阻抗与源级阻抗相互匹配得到最大功率输出。天线负载阻抗必须与激励源阻抗实现共轭匹配，才能满足功率输出最大化。这种匹配条件称为共轭匹配，否则为失配。

阻抗失配会降低功率传输效率、响应线性度和输出信号功率。通过在源级和负载之间加入一个阻抗匹配网络, 改变天线负载的阻抗值, 以实现最大功率输出。这个阻抗自动匹配网络能够实时跟踪负载阻抗变化, 并根据负载阻抗变化快速作出参数调整, 使信号源(或功率源)和负载之间始终处于阻抗匹配状态, 从而保证信号或能量的传输质量。

### 2.2.1. 计算模型

如图 1 所示的  $\pi$  型阻抗匹配网络[2] [3], 源级信号通过功率放大器(Power Amplifier)进行放大, 在通过匹配网络将信号以最大功率输送给天线发射出去。通过传感器(Sensor)测得输入端阻抗值, 传给中央处理单元(Processor)进行处理, 中央处理单元通过优化匹配算法计算出电感和电容值, 在调整自适应阻抗匹配网络(Tunable Matching Network)中的各个元器件的参数值, 从而实现自适应阻抗匹配。

将图 1 中的自适应阻抗匹配网络单独提取出来, 简化匹配模型可以得到图 2。其中, 天线的戴维南等效电路为交流信号源  $AC$  和传输阻抗  $R_s$  的串联, 功率放大器及其负载侧的等效电路为负载阻  $Z_L = R + jX$ 。信号源电压取  $U_s = 1 \text{ V}$ ,  $R_s$  通常为  $50 \Omega$ ;  $L$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  为匹配网络中的三个参数、设  $U_{oc}$  是输出端的电压、 $\omega$  为频率。

根据图 2 所示电路, 有输入阻抗  $Z_{in}$  为:

$$Z_{in} = \frac{(\omega^2 RLC_1 - R) - j(\omega^2 XLC_1 - \omega L - X)}{\left[ (\omega^3 XLC_1C_2 + \omega^2 LC_2 - \omega XC_1 - \omega XC_2 - 1) + j(\omega^3 RLC_1C_2 - \omega RC_1 - \omega RC_2) \right]} \quad (1)$$

同理, 输出阻抗  $Z_{eq}$  和输出电压  $U_{oc}$  的表达式为:

$$Z_{eq} = \frac{(\omega^2 R_s LC_1 - R_s) - j\omega L}{(\omega^2 LC_2 - 1) + j(\omega^3 R_s LC_1 C_2 - \omega R_s C_1 - \omega R_s C_2)} \quad (2)$$

$$U_{oc} = \frac{(\omega^2 LC_2 - 1) + j(\omega^3 R_s LC_1 C_2 - \omega R_s C_1 - \omega R_s C_2)}{(\omega^2 LC_2 - 1)^2 + (\omega^3 R_s LC_1 C_2 - \omega R_s C_1 - \omega R_s C_2)^2} U_s \quad (3)$$

得到负载电压  $U_L$  和负载电流  $I_L$  分别为:

$$U_L = \frac{U_{oc} Z_L}{Z_{eq} + Z_L}, \quad I_L = \frac{U_{oc}}{Z_{eq} + Z_L} \quad (4)$$

负载功率  $P_L$  是负载电压与负载电流共轭值  $\bar{I}_L$  乘积的实部  $P_L = \text{Re}(U_L \bar{I}_L)$ 。

### 2.2.2. 算例及其结果分析

天线阻抗匹配的目的是负载上得到的功率为最大, 因此, 定义目标函数为

$$P_L = \text{Re}(U_L \bar{I}_L) \quad (5)$$

故

$$\frac{\partial f}{\partial C_2} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial C_1} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial L} = 0 \quad (6)$$

联立(6)式的 3 个方程可以求得匹配元件  $C_1$ 、 $C_2$  和  $L$  的值。

举例来说, 采用无线局域网 WLAN 中 2.45 GHz, 源级阻抗  $R_s = 50 \Omega$ , 天线负载  $Z_L = 20 - j30\Omega$ , 电源电压为 1 V。从(6)式解得  $L = 4.66 \text{ nH}$ ,  $C_1 = 0.79 \text{ pF}$ ,  $C_2 = 1.53 \text{ pF}$ , 得到  $Z_{in}$  最终值为  $49.99 - 0.00i\Omega$ ,  $|Z_{in} - R_s|$  的误差为  $1.43 \times 10^{-11}$ , 负载功率为 0.005 W, 可以认为  $Z_{in}$  与  $R_s$  阻抗匹配成功。

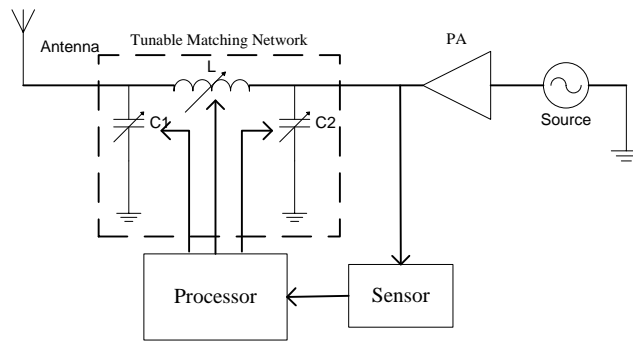


Figure 1. Automatic antenna tuning system

图 1. 天线自动匹配系统

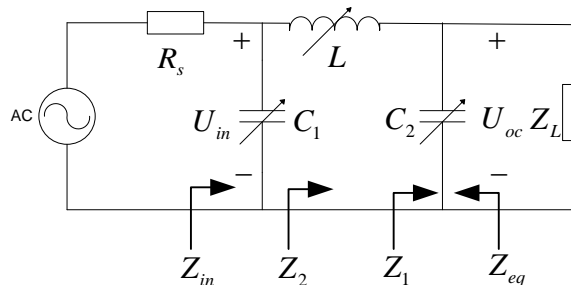


Figure 2. Parameters calculation for Pi matching network

图 2.  $\pi$  型匹配网络参数计算

上文只给出了频率为 2.4 GHz 下的匹配结果，单一频率和固定负载不能体现阻抗匹配的效果，因此给出了不同频率点上和不同负载值下的匹配结果。频率选用 0.9 GHz、1.8 GHz、2.4 GHz 这三个固定点频率，负载阻抗随机选择  $20-j30\Omega$ 、 $50\Omega$ 、 $200\Omega$ 、 $50+j75\Omega$ 、 $50-j75\Omega$ 、 $25+j50\Omega$ 、 $25-j50\Omega$  七个阻抗值来测试，负载包括了电阻性负载、电容性负载、电感性负载三种常见负载值，计算结果如表 1 和表 2 所示。

表 1、表 2 显示了在不同负载和不同频率的匹配结果。表中输入阻抗  $Z_{in}$  的实部和虚部都均在  $10^{-11}$  以下，趋近理论值  $Z_{in} = 50\Omega$ ，达到与  $R_s$  匹配要求。 $Z_{in}$  与  $R_s$  现了最佳阻抗匹配，负载功率都为 0.005 W，实现了功率传输的最大化。由此得出结论： $\pi$  型网络的阻抗匹配是有效的。

### 3. 教学与科研案例结合的启示

经过一周的实践，大部分学生都能顺利完成。未完成的学生则可以在讲解之后继续完成。通过上述实践，学生学会查阅文献，阅读科研资料，也了解了更多的有关的知识。有 95.6% 的学生表示理解了何谓科研，76.4% 的学生表示其实科研也并不难，几乎所有的学生都表示，此任务的完成加深了对课本知识的理解。

我们还对学生提出一些问题，进一步引导其科研兴趣和冲动，例如：

- (1) 上述过程只是考虑了单点匹配，而实际上，任何一个电路都有一定的工作带宽，此时，如何处理？
- (2) 匹配网络中的电容和电感有哪些寄生参数？
- (3) 如果考虑到匹配网络中的电容和电感有哪些寄生参数，单点该如何匹配？考虑到其工作带宽，该怎么办？
- (4) 计算出匹配网络中的参数值后，如何付诸硬件实现？
- (5) 如何将上述任务进行推广应用？

在完成规定任务后，对于 22.3% 而对学生会选择上述任务中的一部分，继续研究，特别是硬件设计

Table 1. Matching results for the same load working in different frequencies

表 1. 同负载不同频率匹配结果

频率和负载	$Z_{in}$ 实部绝对误差	$Z_{in}$ 虚部( $\Omega$ )	负载功率(W)
$Z = 20 - j30\Omega$ , 0.8 GHz	2.8599E-11	6.4837E-13	0.005
$Z = 20 - j30\Omega$ , 2.4 GHz	2.7299E-11	1.5632E-12	0.005
$Z = 20 - j30\Omega$ , 0.9 GHz	2.6603E-11	1.2557E-13	0.005

Table 2. Matching results for different loads working in the same frequency

表 2. 同频率不同负载匹配结果

负载阻抗(1.8 GHz)	$Z_{in}$ 实部误差( $\Omega$ )	$Z_{in}$ 虚部误差( $\Omega$ )	负载功率(W)
$Z = 20 - j30\Omega$	2.8599E-11	6.4837E-13	0.005
$Z = 50\Omega$	1.5802E-11	-2.3382E-13	0.005
$Z = 200\Omega$	2.3398E-11	-1.9563E-12	0.005
$Z = 50 + 75j$	2.5601E-11	-4.6741E-13	0.005
$Z = 50 - 75j\Omega$	2.1402E-11	4.3920E-13	0.005
$Z = 25 + 50j\Omega$	1.9298E-11	2.2350E-12	0.005
$Z = 25 - 50j\Omega$	2.7200E-11	-1.3416E-12	0.005

部分(问题 4), 69.4%的学生会将此定理进行推广应用(问题 5)。

#### 4. 结语

通过教学与科研案例结合, 学生收获的知识远远超出了“电路原理”课程的范围。既让学生了解电路原理基本方法在工程实际、科学前沿研究中的应用, 也掌握了研究实际工程科研问题的基本思路, 培养了研究兴趣。

因此, 在“电路原理”课堂教学中, 淡化电路分析方法和计算技巧方面的内容, 增加教学与前沿科研案例相结合的内容, 从实际工程的需要提出理论和分析的必要性, 将有利拓宽学生视野, 提高学习的兴趣, 激励学生的创造性冲动, 有利于学生感受鲜活的研究过程研究的具体过程, 增强学习的积极性和主动性, 培养学生分析问题和解决问题的综合研究能力, 这对应用型人才和创新型人才的培养都将是非常有益的。

#### 基金项目

本文受国家自然科学基金 No.61102039、湖南省自然科学基金资助项目 No.14JJ7029 和项目批准号、中央高校基金和湖南省教改项目的资助。

#### 参考文献 (References)

- [1] 李玉玲, 王晓坤, 储江龙 (2013) 浅谈电路课程教学与科研案例的结合. *电气电子教学学报*, **2**, 24-26.
- [2] Tan, Y.H., Sun, Y.C. and Lauder, D. (2013) Automatic impedance matching and antenna tuning using quantum genetic algorithms for wireless and mobile communications. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 1-8.
- [3] Tan, Y.H., Sun, Y.C. and Yin, X. (2013) Analog fault diagnosis using S-transform preprocessor and a QNN classifier. *Measurement*, **46**, 2174-2183.
- [4] Tan, Y.H., Yi, R.F. and Sun, Y.C. (2012) Wideband tuning of impedance matching networks using hierarchical genetic algorithms for multistandard mobile communications. *Journal of Computers*, **7**, 356-361.