

# 电路理论课程绪论

闫娜

**Email:** [yanna@fudan.edu.cn](mailto:yanna@fudan.edu.cn)

**Tel:** 021-51355200-836

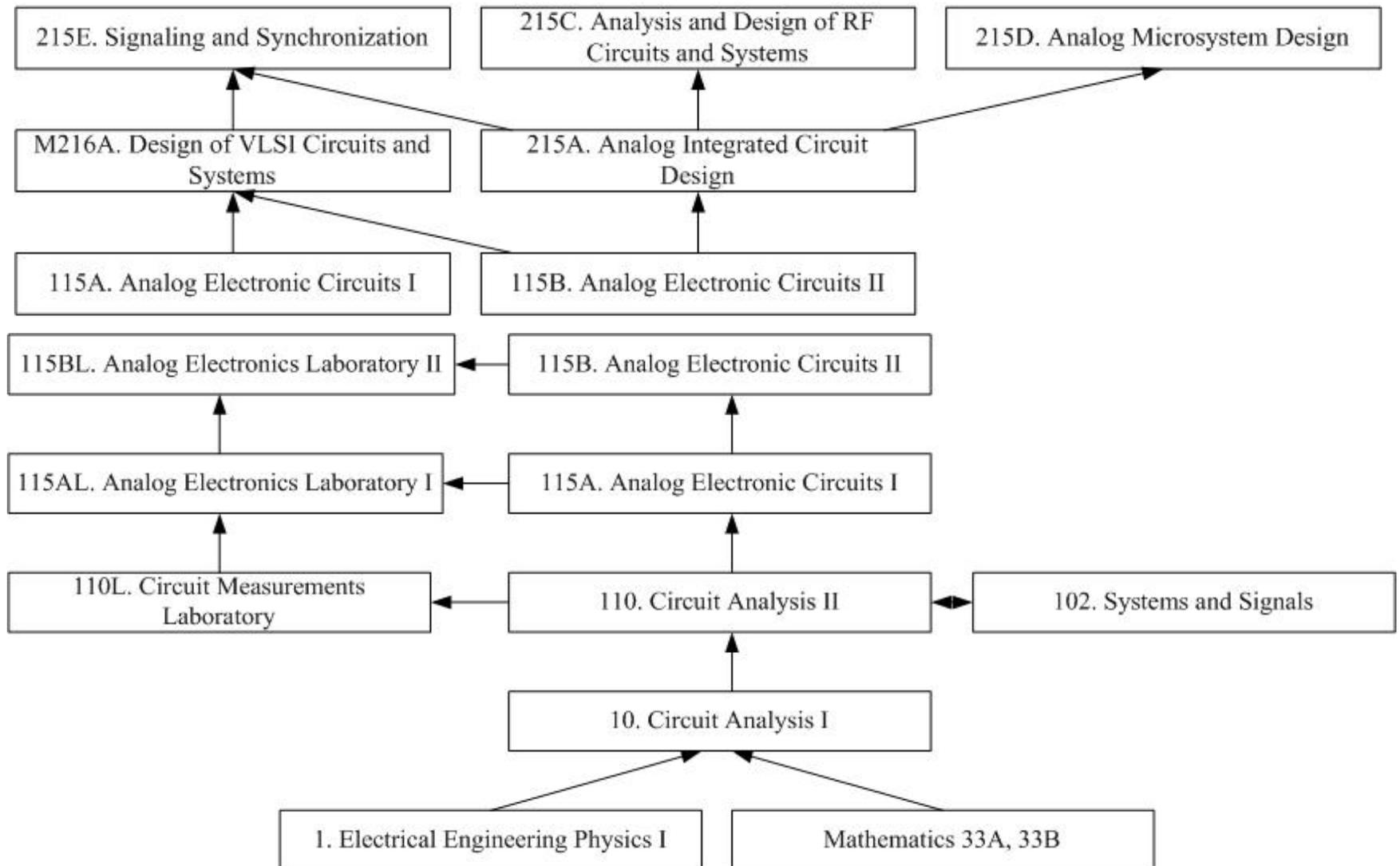
**Office:** 张江微电子楼321室

复旦大学微电子学院

# 课程简介

- 课程介绍：电路课程的入门，重要的电子技术基础课程；
- 课程目的：掌握电路的基本理论、分析电路的基本方法和进行实验、仿真的初步技能，为后续课程准备必要的电路知识。
- 授课时间：每周二1-2节，每周四3-4节
- 授课课件：[elearning.fudan.edu.cn](http://elearning.fudan.edu.cn)
- 学分：4
- 授课地点：H4305
- 考试安排：
  - 考试日期：2018/6/27
  - 13: 00-15: 00

# 课程基础：高等物理 & 高等数学



# 课程教材及参考书目

- 教材:

- 《电路理论教程》 陈希有主编, 高等教育出版社, 2013年;
- 《电路理论基础》 (第三版), 陈希有主编, 高等教育出版社, 2004年;
- 《模拟电子学基础》 (第二版) 陈光梦编著, 复旦大学出版社;

- 参考书目:

- 《电路》 (第四版、第五版), 邱关源主编, 高等教育出版社, 1999、2006年。
- 《电路分析》, 董维杰、白凤仙主编, 科学出版社, 2007年。
- 《电路分析基础》, (上、下册, 第四版), 李翰荪主编, 高等教育出版社, 2006年。
- 《Fundamentals of Electric Circuits》, Charles K. Alexander. second edition ,McGraw-Hill, 2003。
- 《Engineering Circuit Analysis》, sixth edition. William H. Hayt, Jr. , Jack E. Kemmerly, Steven M. Durbin, Mc Graw Hill, 电子工业出版社引进, 2002年6月。
- 《电路基础》, 陈洪亮, 高等教育出版社, 2007年5月。
- 《电路原理》, 于歆杰, 陆文娟, 清华大学出版社,2007年3月。
- 《电路基础理论》, 孙雨耕, 高等教育出版社, 2011年5月。

# 课程内容

- 第0章 绪论
- 第1章 电路理论的基础性问题
- 第2章 线性直流电路
- 第3章 电路定理
- 第4章 正弦交流电路
- 第5章 含磁耦合器件的电路
- 第6章 三相电路
- 第8章 电路的频率特性
- 第10章 线性电路暂态响应的时域分析
- 第11章 线性电路暂态响应的复频域分析
- 第12章 二端口网络

# 绪论

- 1 认识电路
- 2 什么是电路理论
- 3 电工技术发展史概况
- 4 电路理论发展史概况
- 5 为何学（目的）
- 6 学什么（内容）
- 7 怎么学（方法）

# 电气、电力、电子工程的区别

- **电气工程**研究的对象就是电，包括电的产生、变换、输送、控制和应用等。
- **电力工程**特指电气工程中的电能产生、变换和输送分配这个环节，也就是常说的电力系统的内容。还有一部分电气工程的内容不属于电力工程，比如电路、电磁场等电工原理，一些设备比如机床的控制设备、电力传动、汽车轮船上的电气设备等。
- 这里是指狭义的电气工程，涉及的电压高，属于**强电**，也有部分弱电。广义的电气工程包括了电气工程自动化、测控技术、计算机、电子、微电子、信息通信、生物医学工程等。国外一般所谓的电气工程都是广义的电气工程。而中国的，往往是狭义的。
- **电子工程**就是指的计算机、电子、微电子、集成电路等学科，不关心电的产生和供应，只管用电作为一种信号，涉及的电压往往比较低。

# 1 认识电路

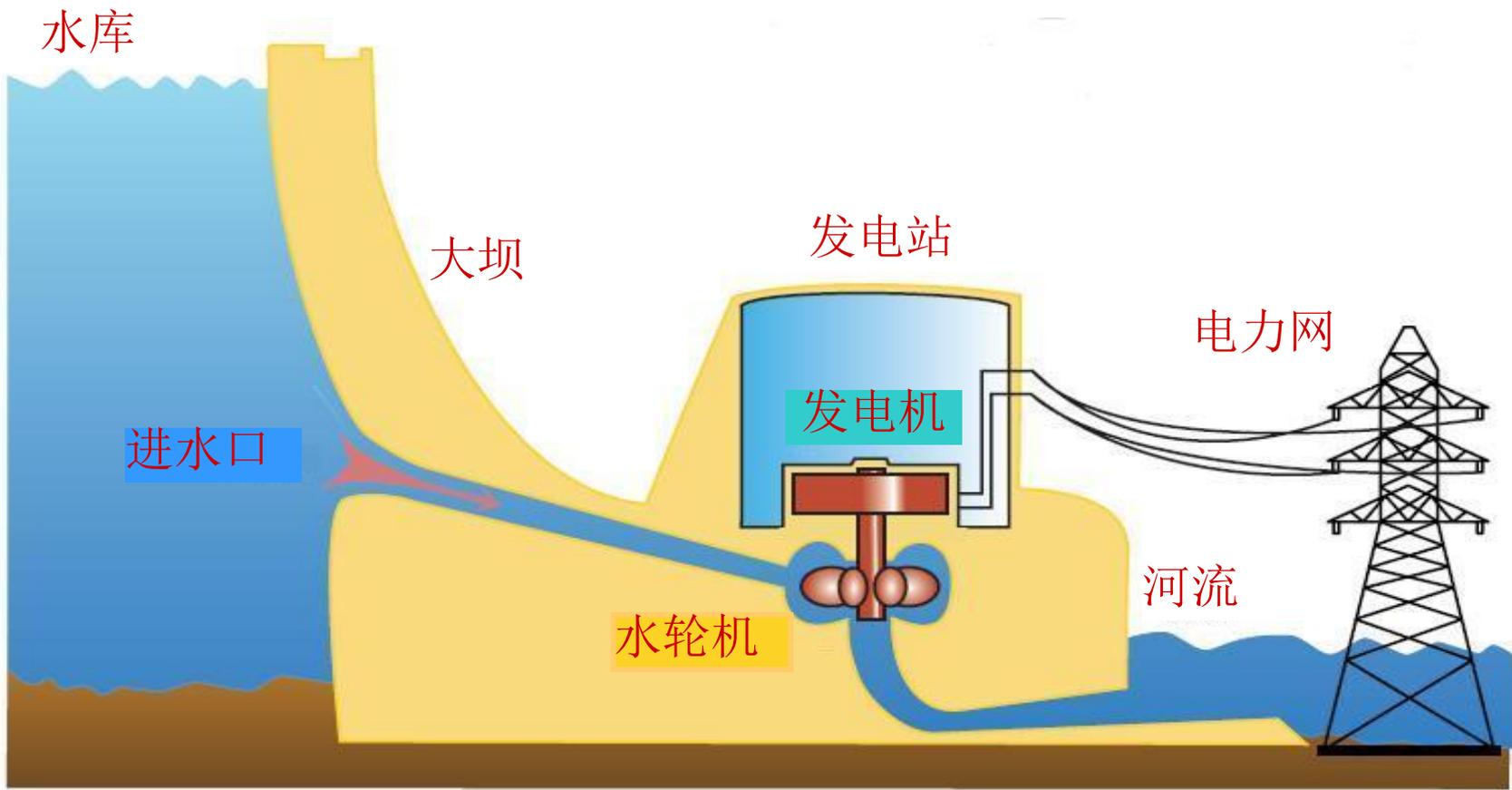
电路（**electric circuit**）：电流的通路。

电流（**current**）：电荷的有序运动形成电流。



三峡工程首台机组——2号机转子吊装到位。其最大直径18.4米，高3.4米，重1694.5吨，单机容量70万千瓦。已于2003年7月投产发电。

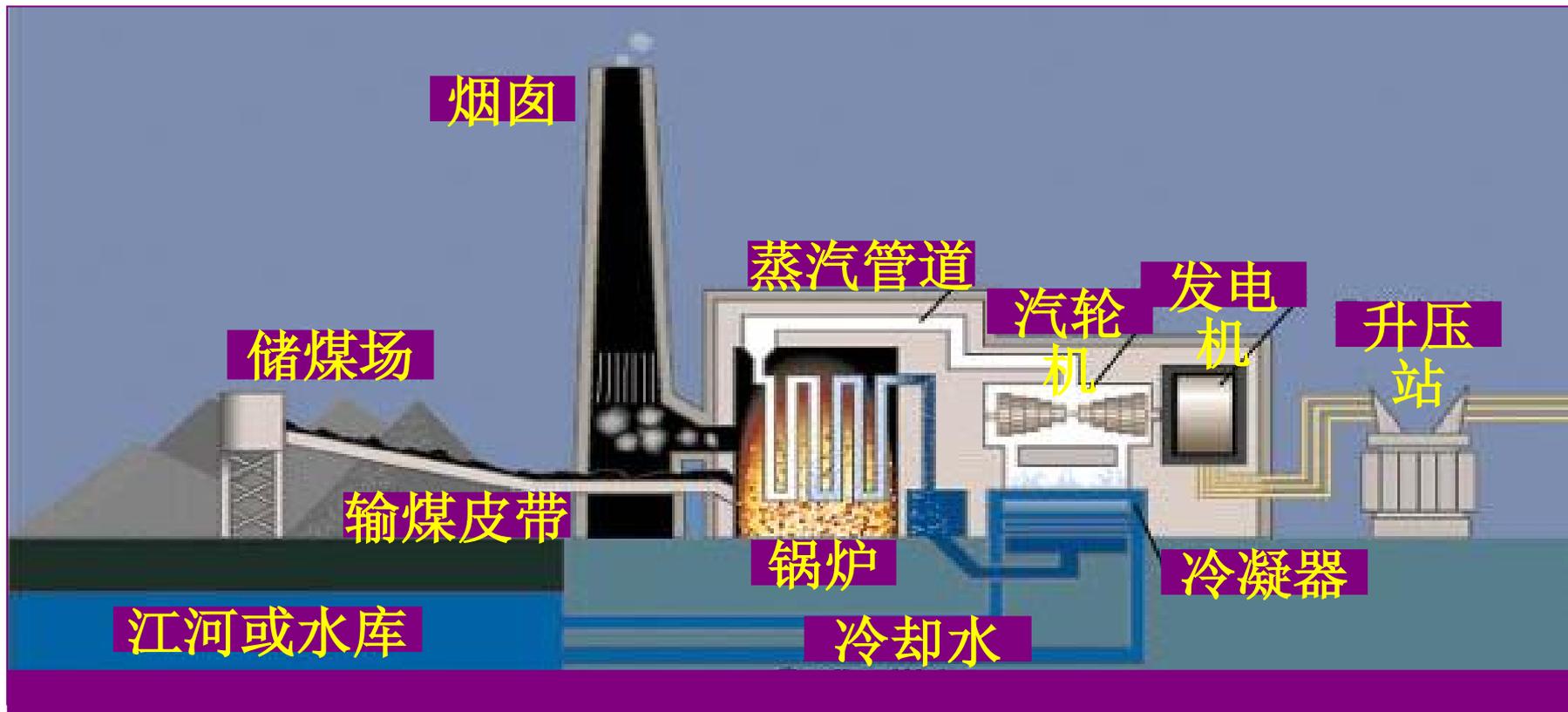
## 三峡水力发电厂



水力发电厂



火力发电厂外景

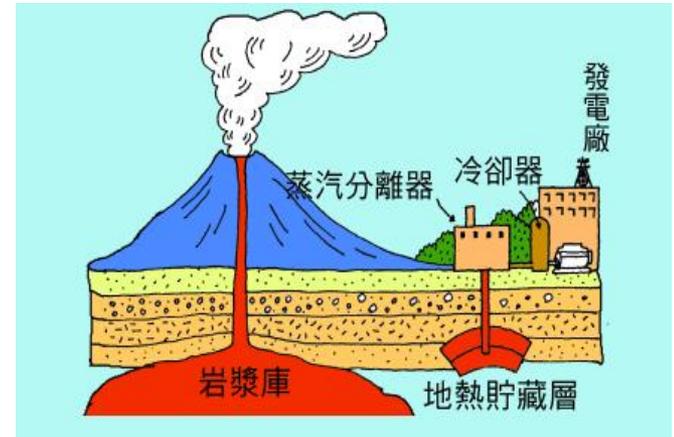
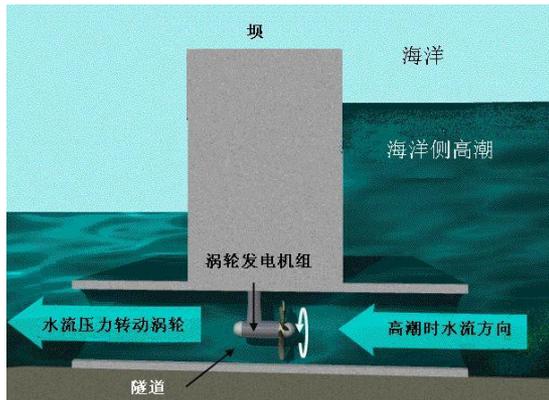


火力发电厂

## 中国最大的风力发电厂——新疆达坂城风力发电厂



利用太阳能、风能、地热、潮汐、海浪、海洋温差、沼气、垃圾、燃料电池等能源。





## 三相变压器

三相电是产生幅值相等、频率相等、相位互差 $120^\circ$ 电势的发电机称为三相发电机；  
以三相发电机作为电源，称为三相电源；  
以三相电源供电的电路，称为三相电路。



## 高压电力输送

中国国内高压输电线路的电压等级一般分为：**35KV、110KV、220KV、330KV、500KV、750KV**等。其中**110KV、330KV**多用于北方地区。

一般称**220**千伏以下的输电电压叫做高压输电，**330到750**千伏的输电电压叫做超高压输电，**1000**千伏以上的输电电压叫做特高压输电。

**为什么采用高压输电？传输距离越远，采用电压越高？**



全国互联电网示意图

# 东北电网接线示意图





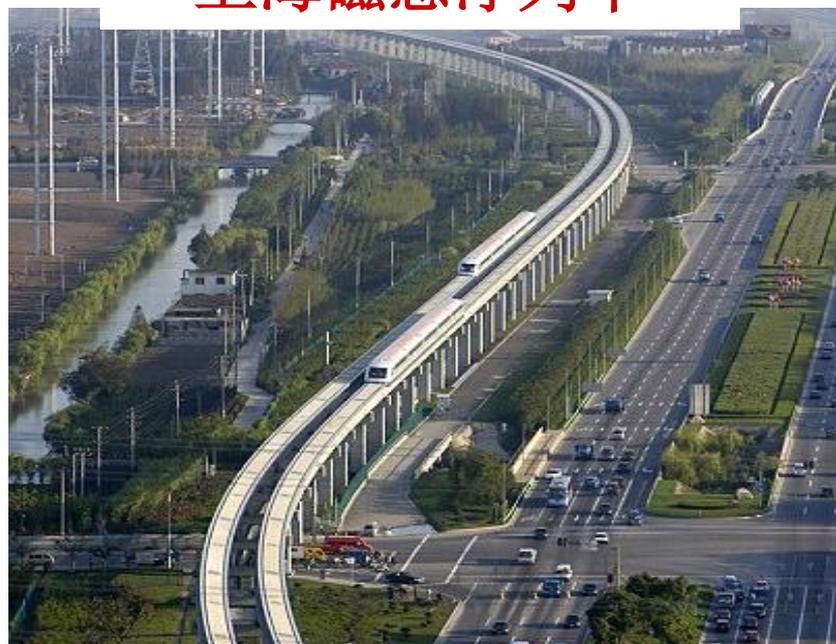
长白山号子弹头列车

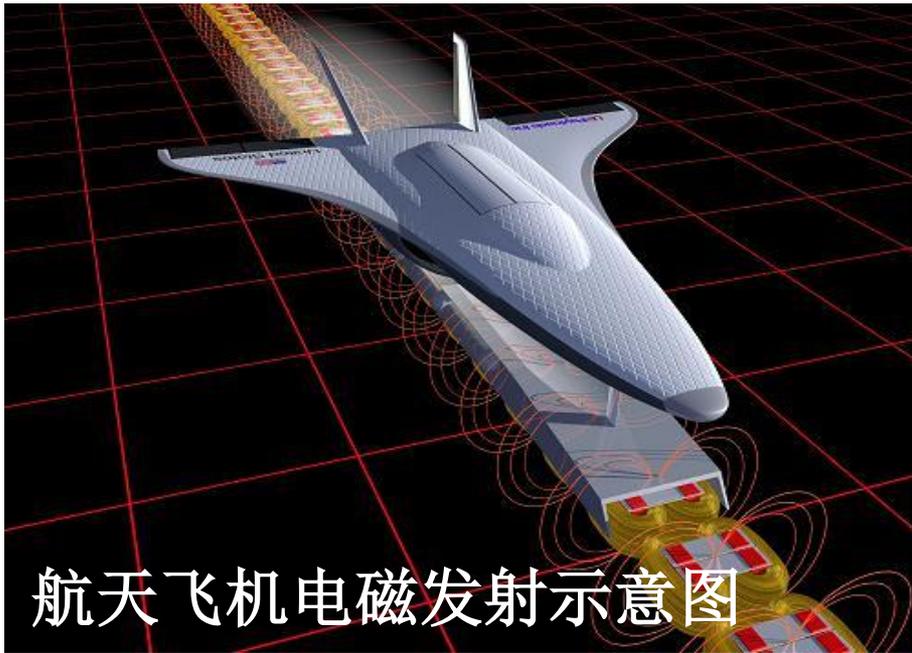


上海磁悬浮列车



由超导电动机作动力的吊舱式螺旋推进器（ABB公司）





航天飞机电磁发射示意图



电磁炮



某海军舰艇



从太空定向施放电磁脉冲

# ● 家用电器



电磁炉



热水器



微波炉



抽油烟机

## ● 办公设备



计算机



传真机



复印机

# ● 通信设备



**KX-FC333CN**



## ● 数码设备



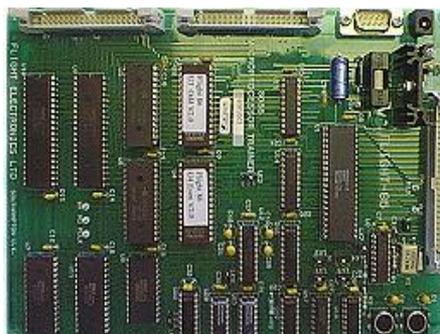
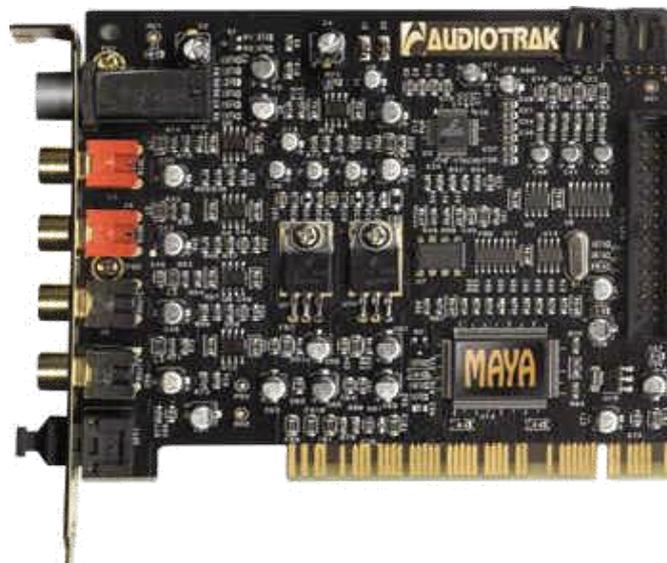
照相机

MP4

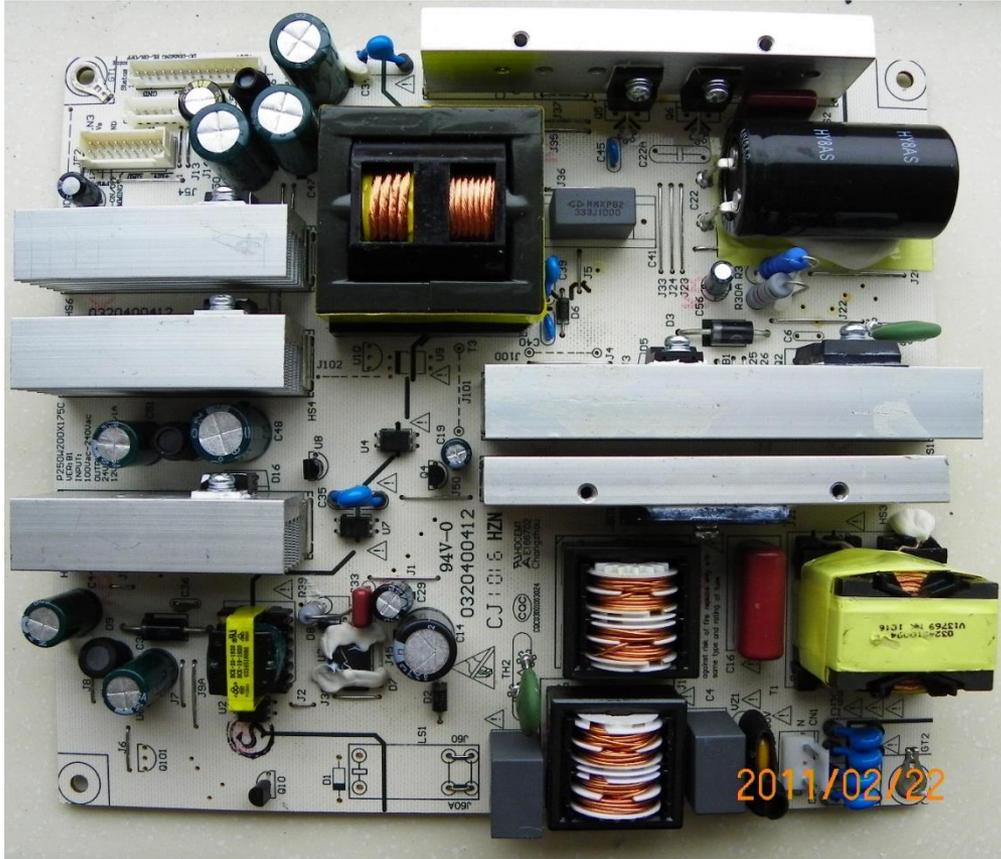


摄像机

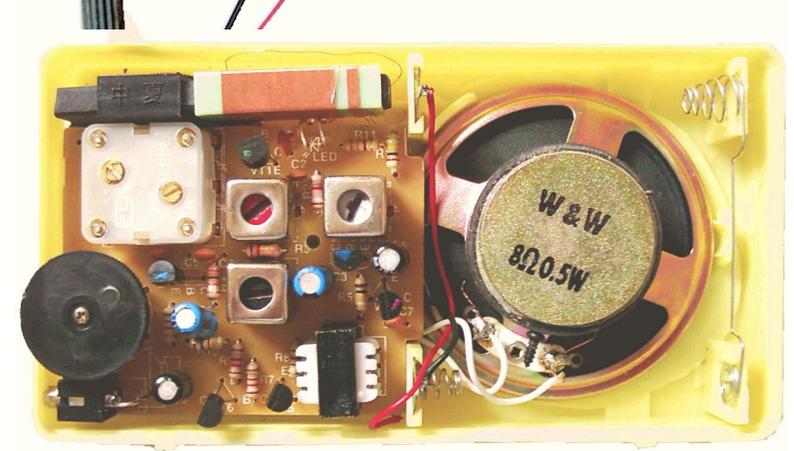




## 电子电路板



液晶电视机电源模块



收音机电路板

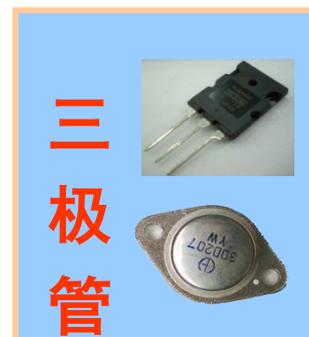




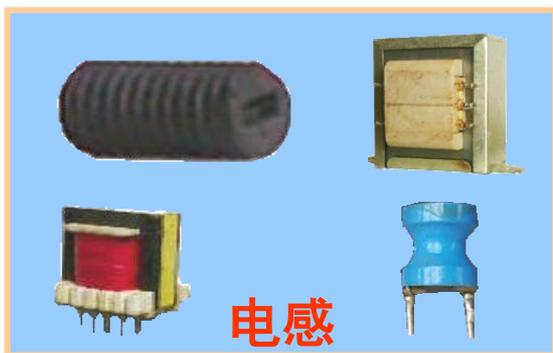
电阻



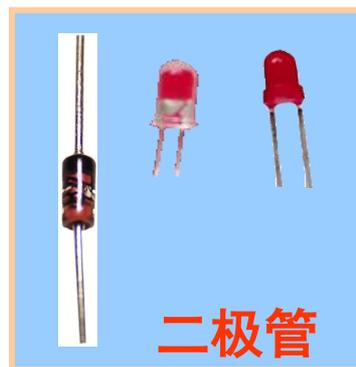
电容



三极管



电感

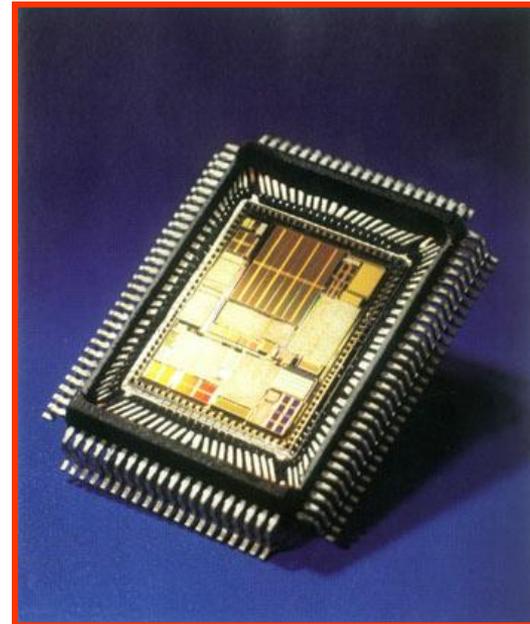
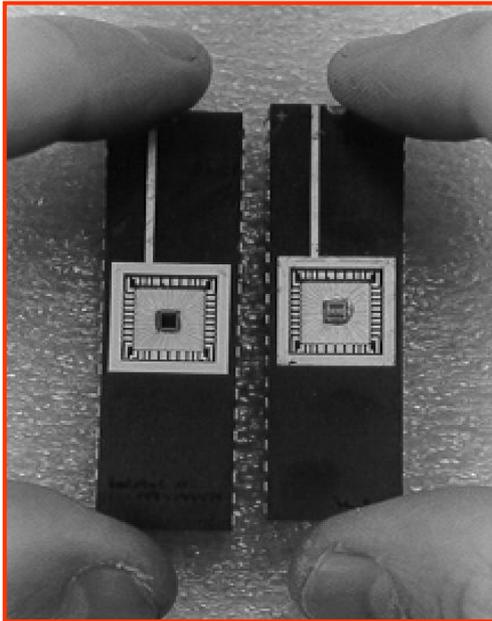
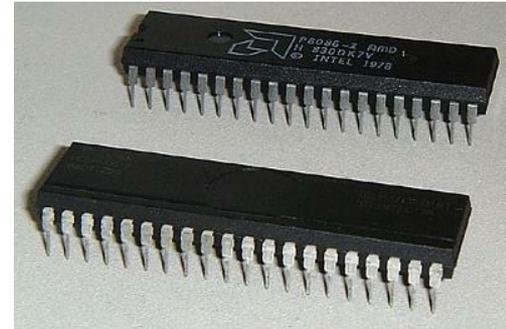
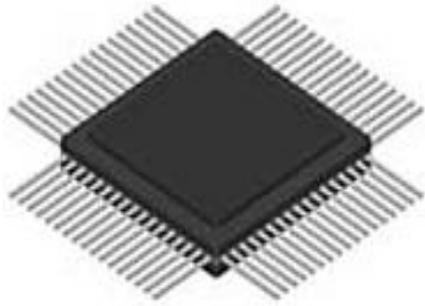


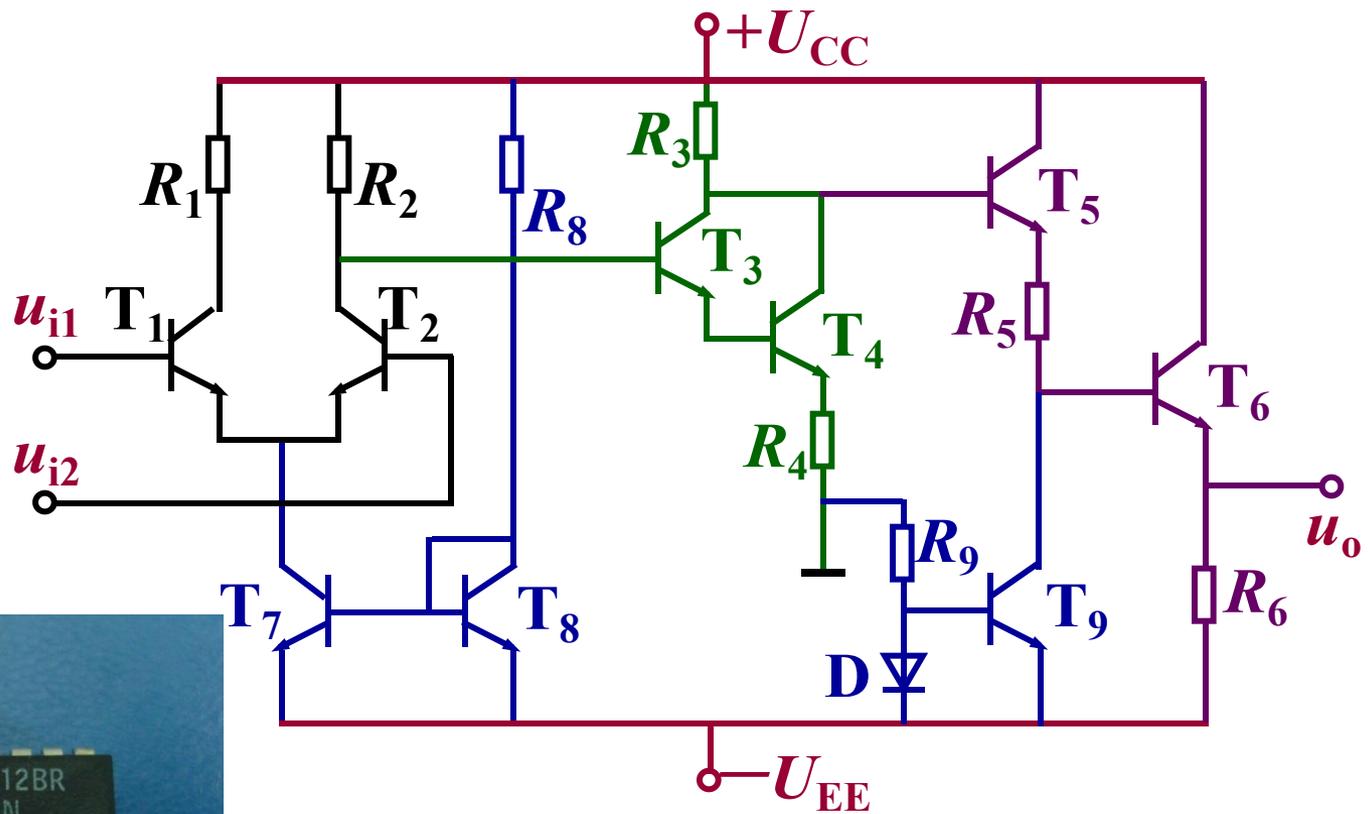
二极管



电池







集成运算放大器LM324

集成电路按集成度高低可分为

**1 SSI 小规模集成电路(Small Scale IC, <100)**

**2 MSI 中规模集成电路(Medium Scale IC,  $10^2$ - $10^3$ )**

**3 LSI 大规模集成电路(Large Scale IC,  $10^3$ - $10^5$ )**

**4 VLSI 超大规模集成电路(Very Large Scale IC,  $10^5$ - $10^7$ )**

**5 ULSI 特大规模集成电路(Ultra Large Scale IC,  $10^7$ - $10^9$ )**

**6 GSI 极大规模集成电路 (Giga Scale Integration,  $>10^9$ )**

---

## 2 什么是电路理论

(1) 电路模型(circuit model):

由理想元件组成, 用于近似描述实际电路的主要特征并建立电路理论。

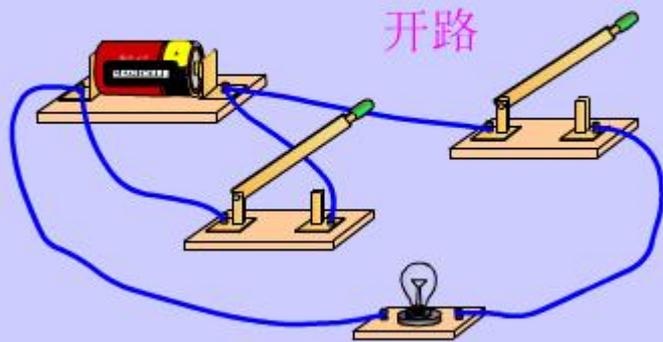
(2) 理想元件(element):

人为定义的表示单一电磁关系的元件, 例如电阻、电感、电容、电压源、电流源、受控电源等。

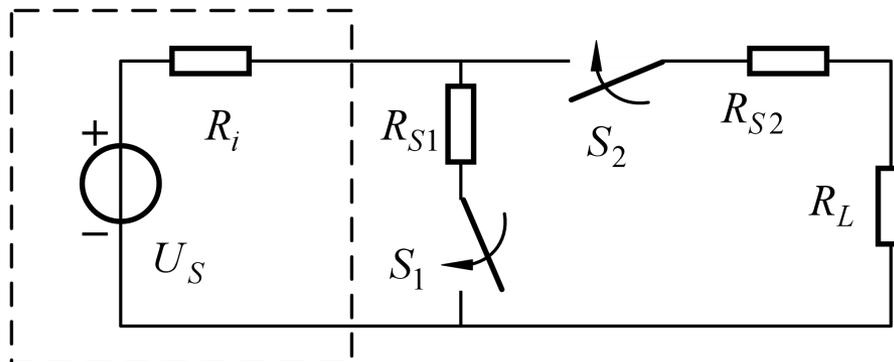
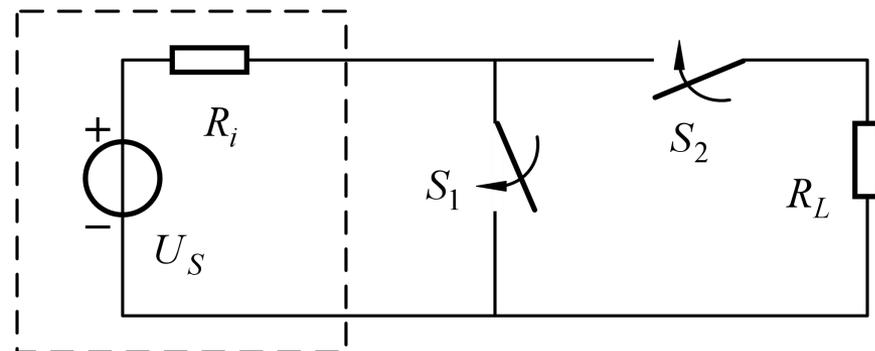
(3) 理想元件特点:

仅表示单一的电磁关系, 数量少。其不同组合可用以近似描述实际电路的主要特征。

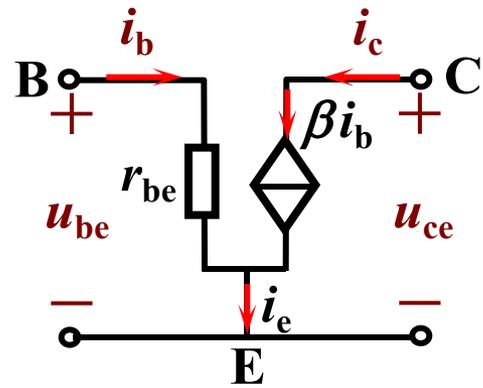
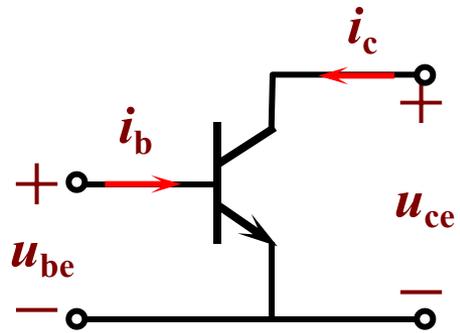
## 电路和电路图



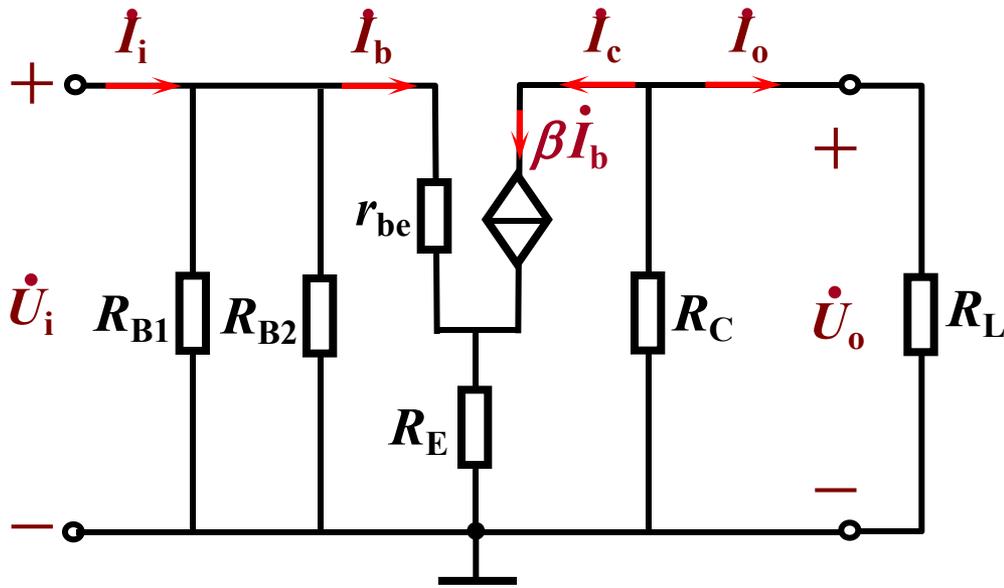
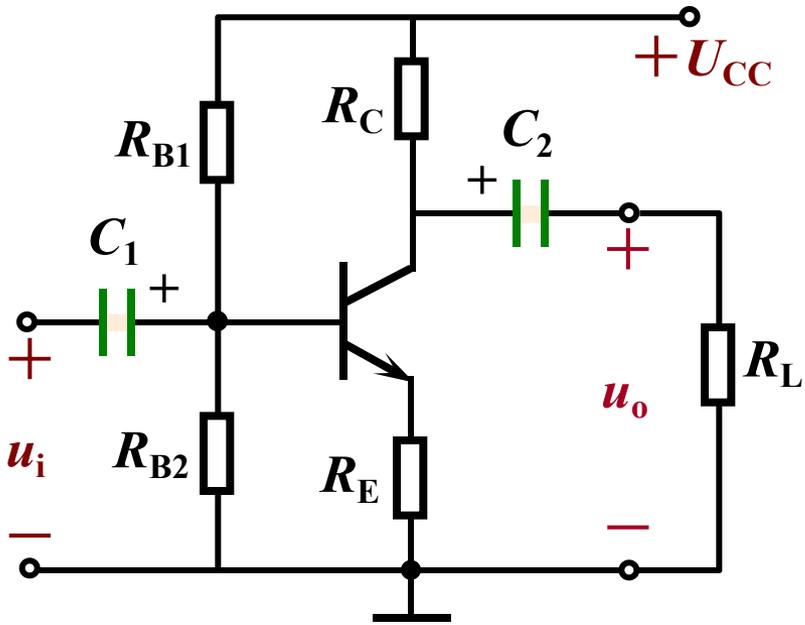
请点击电键K



实际电路及其电路模型



三极管放大工作的  
低频小信号电  
路模型



共射极放大电路的交流小信号电路模型

#### (4) 电路理论 (Circuit Theory, Electrical Network Theory)

“电路理论”是研究电与磁系统的理论，该理论用积分量描述电与磁现象，对象是电路模型。

说明：电磁场相关的微分量例如有电场强度、电通密度、磁场强度、磁通密度、体电荷密度、电流密度、磁矢量。电磁场相关的量的积分量例如有：电压、电流、电荷、磁通、磁压、磁链。

电路理论包括：

电路分析：已知电路结构、参数，分析电路特性。

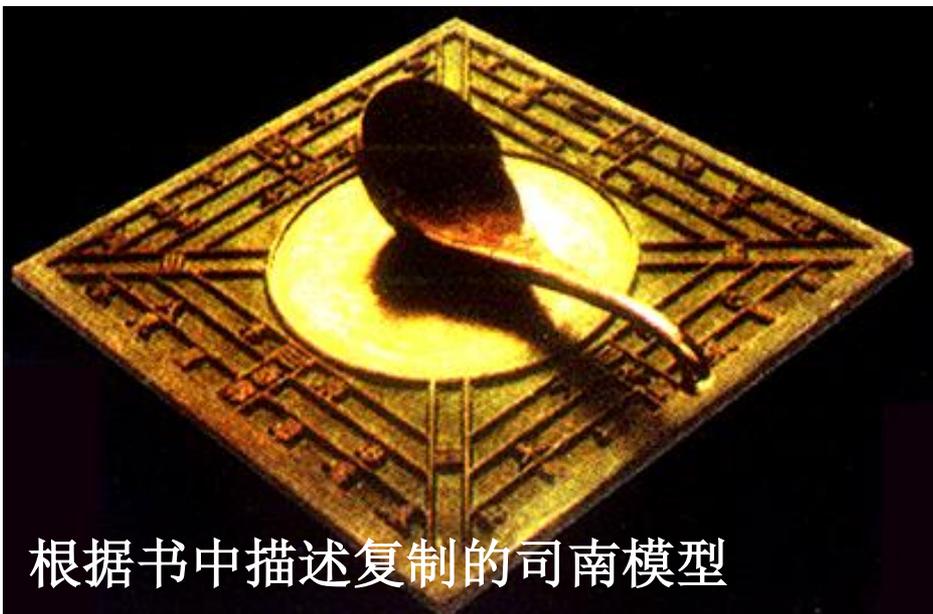
电路综合：已知电路特性，确定电路结构和参数。

故障诊断：已知正常和故障情况下的特性，确定故障类型、故障位置和故障参数。

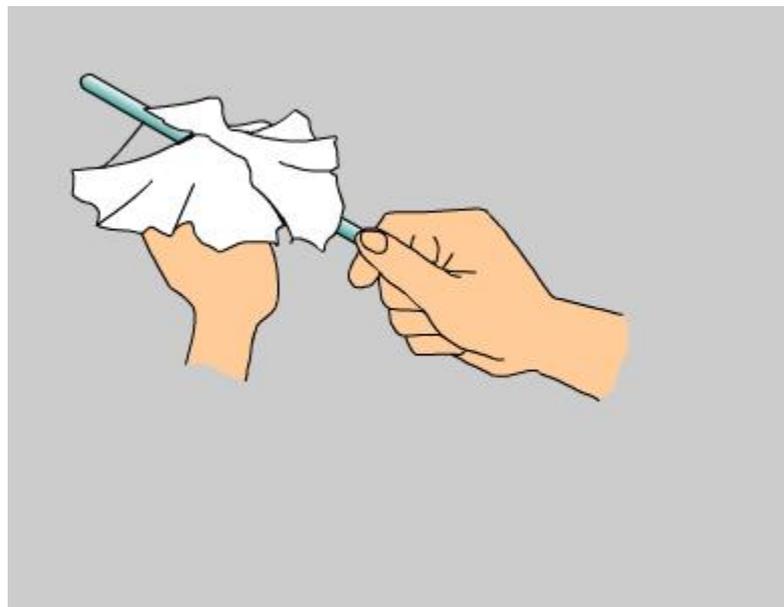
## 3 电工技术发展史概况

**第一阶段**，从公元前大约7世纪至公元16世纪上半叶，人类对电、磁现象的认识十分缓慢，一直停留在单纯地观察记录的水平上。两千余年。

- 在古籍中有“琥珀拾芥”（公元前580年，希腊哲学家泰勒斯）和“慈石召铁”（公元前239年，《吕氏春秋》）的记载。
- 公元1世纪,王充著《论衡》记载,“顿牟掇(duo)芥,磁石引针”
- 磁石首先应用于指示方向和校正时间。
- 由于航海事业的需要,我国在11世纪就发明了指南针。



根据书中描述复制的司南模型



**第二阶段**，自16世纪下半叶英国女王的侍医官**吉尔伯特**开始，人们对电磁现象进行了深入探讨，有了“带电体”和“非带电体”的概念。有意识研究。二百年。



吉尔伯特和他的著作《论磁石》，1600

带有莱顿瓶(荷兰莱顿大学)的起电机，1745年

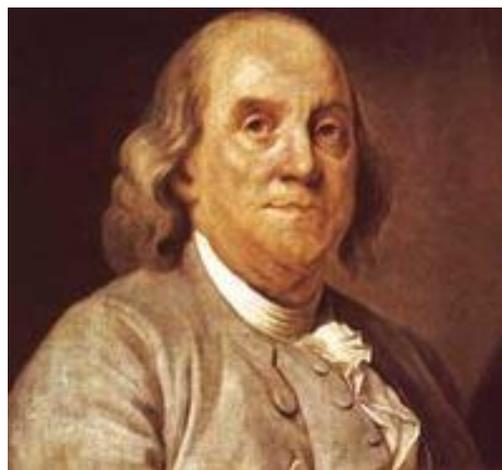


莱顿瓶电容器的原形，存贮电

**第三阶段**，电工技术的迅猛发展主要是从18世纪末的富兰克林和库仑开始，人们对电磁现象的研究进入了用科学方法定量研究、总结归纳从而得出规律的阶段。

富兰克林，(1706-1790)美国历史上第一位享有国际声誉的科学家和发明家。同时还是政治家、实业家（印刷）、社会活动家、思想家、文学家和外交家。1752年7月，他做了一个吸引雷电的风筝实验，把风筝系在莱顿瓶上，获得了电荷，轰动了全世界。46岁。

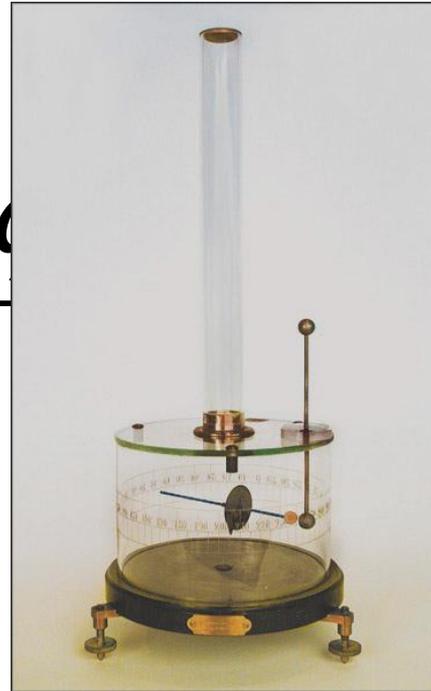
**发现正电荷和负电荷**



1785 年, 法国科学家库仑建立了库仑(1736-1806)定律。49岁。



$$\frac{q_1 q_2}{r^2}$$



库仑和他发明的扭力天平（用于测量电荷量，1777）

- 1800年意大利物理学家伏特(1745-1827)发明了**伏打电**  
**池**，从而使化学能可以转化为源源不断的电能。电学研究迈出了静电范围。电学的重要里程碑。55岁。



伏特与伏打电池

1820年，奥斯特(1777-1851)发现了电流对磁针有力的作用，揭开了电学理论新的一页。同年法国物理学家安培（1775—1836）确定了通有电流的线圈的作用与磁铁相似。

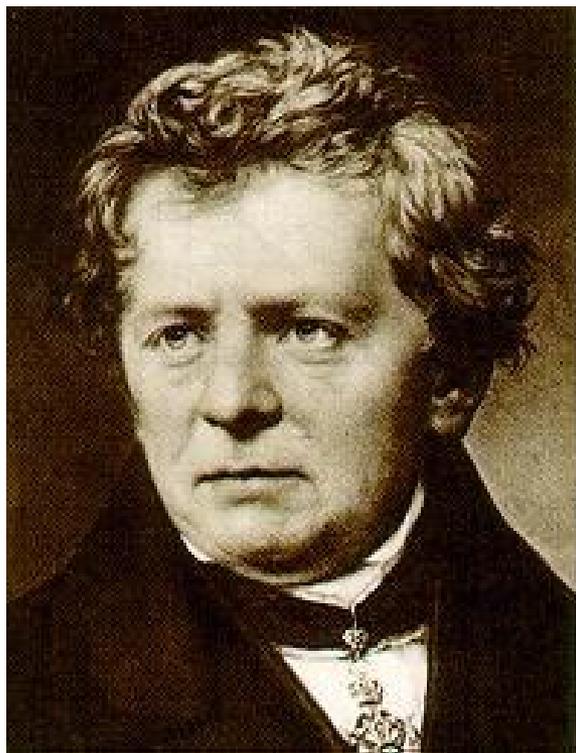


安培与他的实验装置

奥斯特

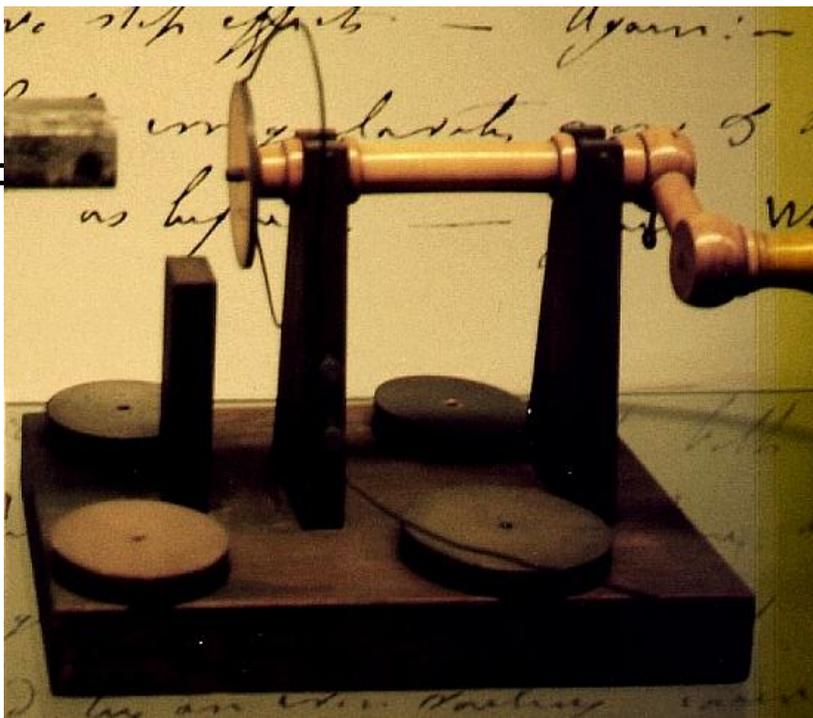
发现电流的磁效应

- 1826年，德国物理学家欧姆(1787-1854)建立了欧姆定律，用公式描述电压、电流和电阻的关系。39岁。



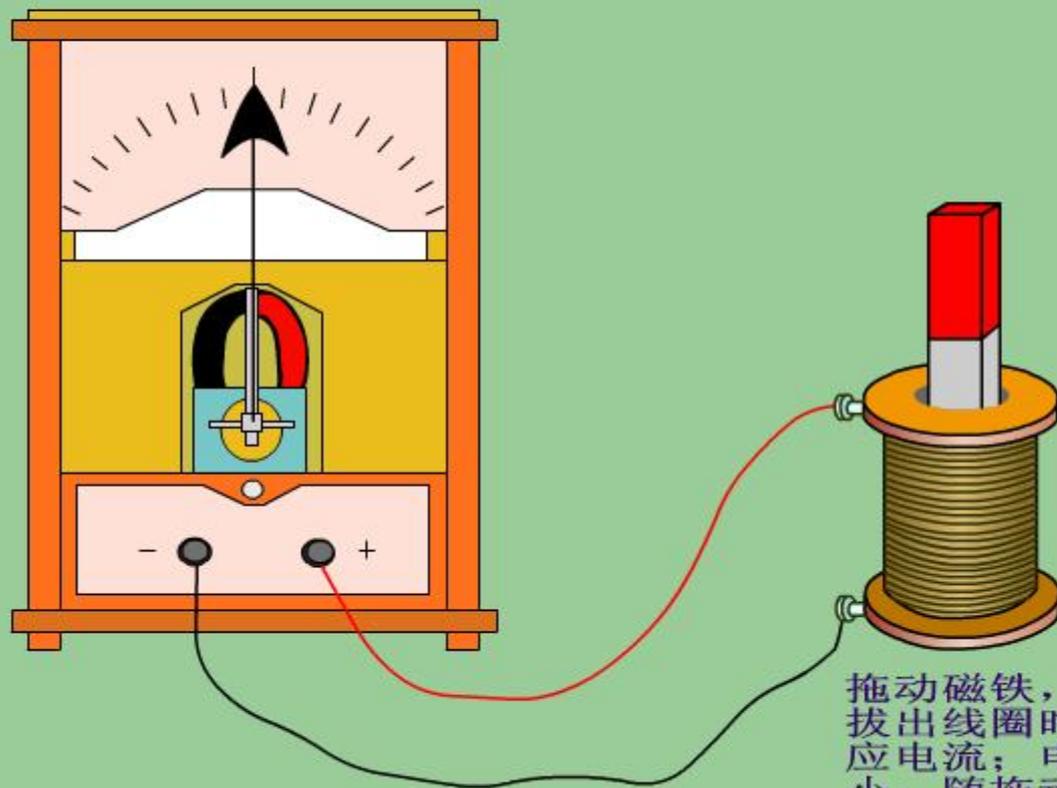
欧姆与他的实验装置

- ❖ 1831年，英国法拉第（1791—1867）发现的电磁感应现象是以后电工技术的重要理论基础。40岁。



法拉第与最早的发电机—法拉第盘

## 电磁感应



拖动磁铁，插入和拔出线圈时产生感应电流；电流的大小，随拖动磁铁速度的变化而变化。

- 1832年，法国科学家皮克斯(Pixii)发明了第一台实用的**直流发电机**。
- 1833年，建立**楞次**（俄国物理学家，1804—1865）**定律**。其后他致力于电机理论的研究并阐明了电机的可逆性原理。29岁。

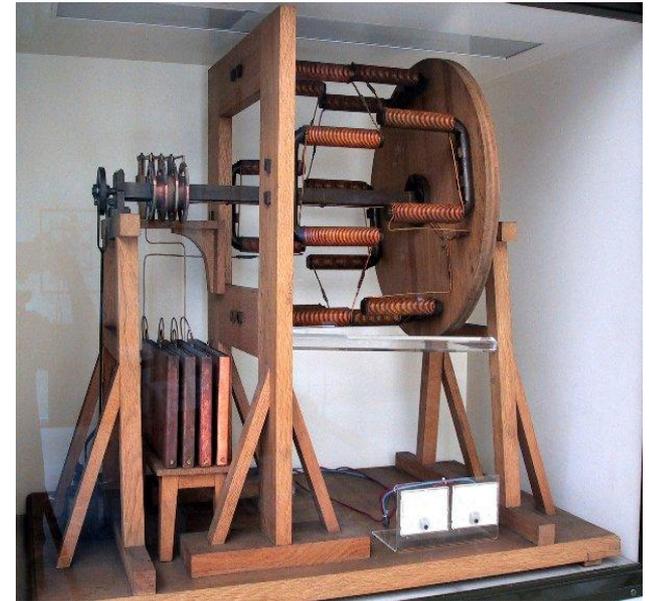


皮克斯发明的  
直流发电机



楞次, 3. X.

- 1834年，德籍俄国物理学家雅可比（1804—1851）制造出**世界上第一台电动机**，功率15W，从而证明了实际应用电能的可能性。30岁。



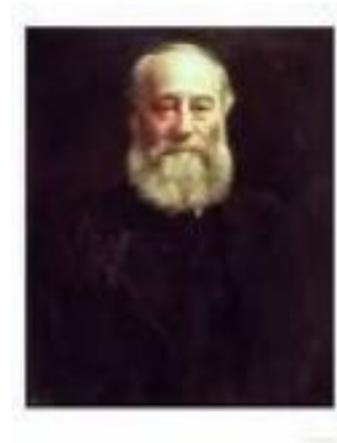
雅可比发明的世界上第一台电动机模型与实用电动机

- 1844 年，俄国物理学家楞次（Lenz，1804—1865）与英国物理学家焦耳（1817—1889）分别独立确定了电流热效应定律。



楞次，Э. X.

楞次



焦耳

- 1847年，德国物理学家基尔霍夫（1824—1887）建立了基尔霍夫定律。KCL、KVL。23岁。

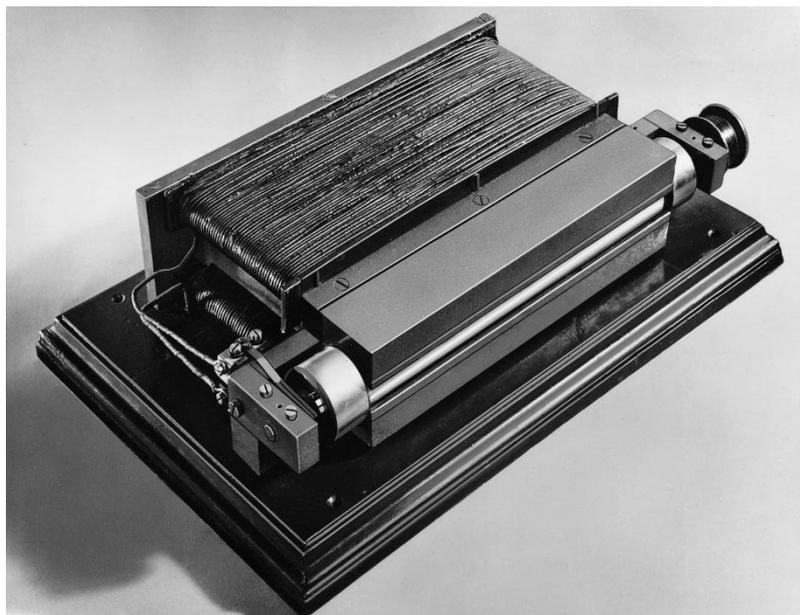
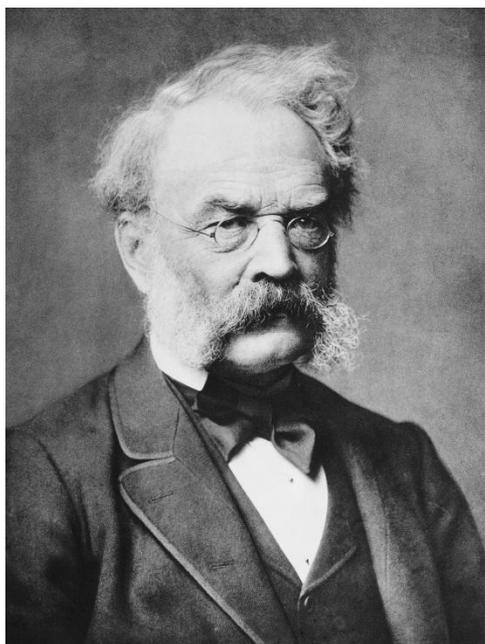
$$\text{KCL: } \sum_{\text{node}} i_k = 0$$

$$\text{KVL: } \sum_{\text{loop}} u_k = 0$$



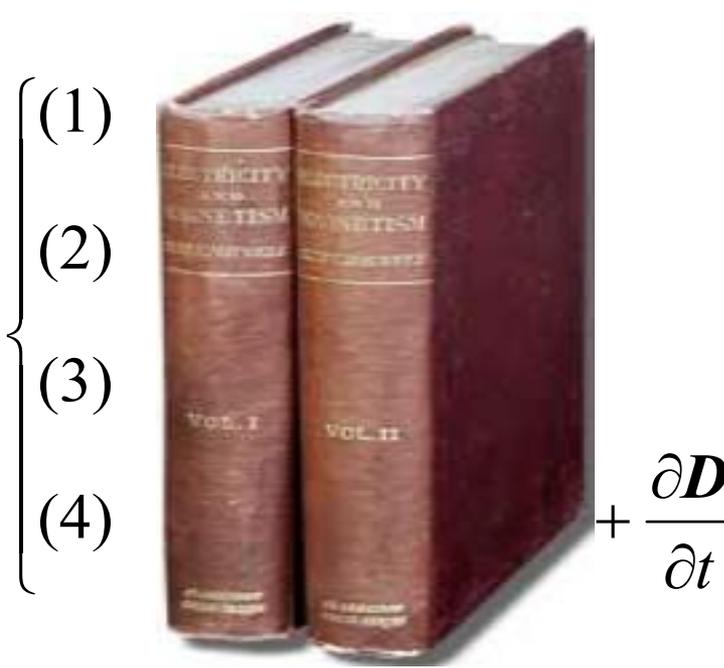
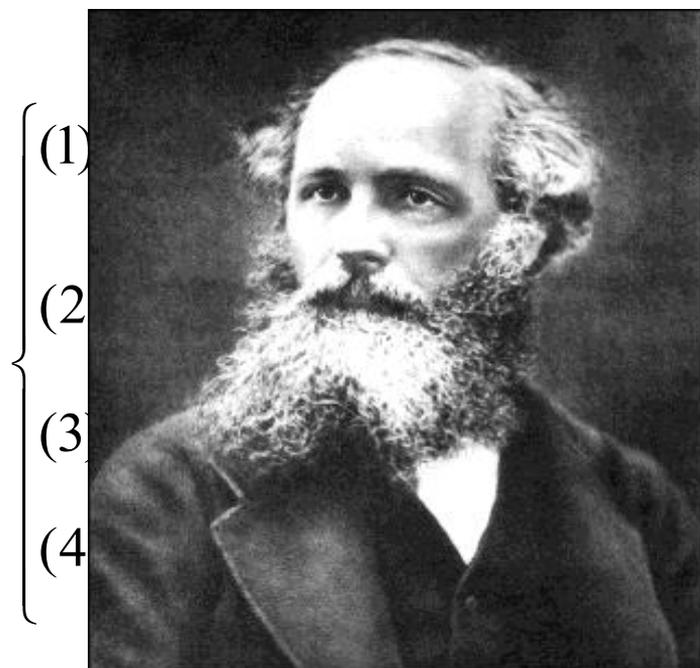
基尔霍夫, G. R.

- 1866年，德国科学家西门子(Siemens, 1816—1892)制成了**第一台自激式发电机**。标志制造大容量发电机技术的突破，具有划时代意义。50岁。



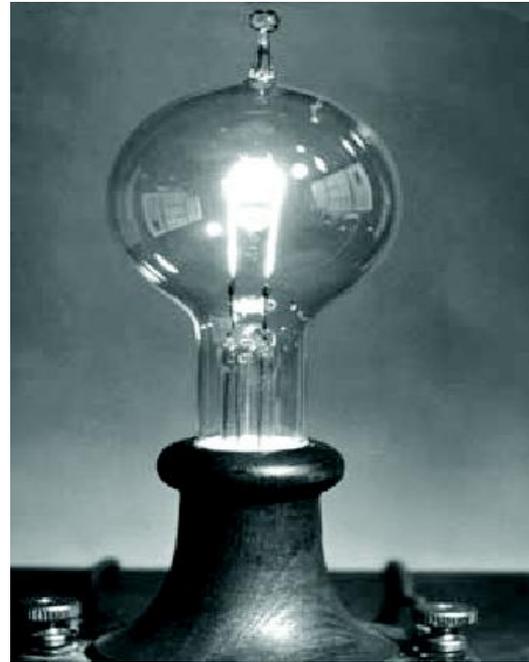
西门子和他的自激式发电机

1864 ~ 1873年，英国物理学家麦克斯韦（1831—1879）完成划时代科学理论著作《电磁通论》。是现代电磁学重要理论基础，是20世纪科学迅猛发展的主要动力之一。33—42岁



麦克斯韦与他所著的《电磁通论》，1873年

- ❖ 1879年，美国发明家爱迪生（1847—1931）实验成功真空玻璃泡中碳化竹丝通电发光的**灯泡**。



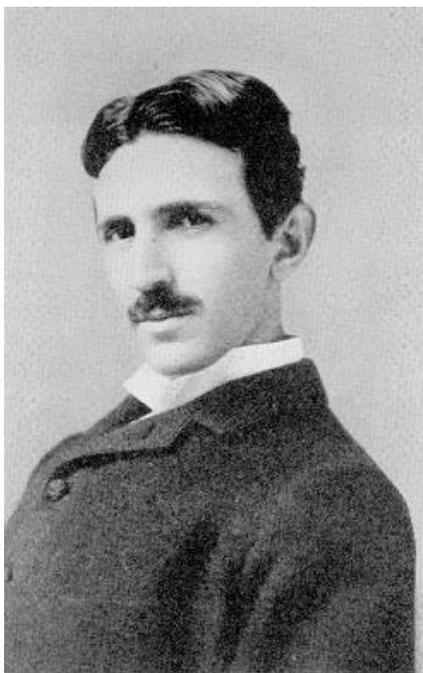
电弧灯(左)与爱迪生发明的白炽灯(右)

- ❖ 19 世纪末，发明了**三相同步发电机**、三相变压器、三相异步电动机以及三相输电方式。
- ❖ 1879年，德国制造出**第一列电力驱动列车**，三节车厢，18人乘坐。



德国制造的第一列电力驱动列车(1879)

❖ 1886年，美国科学家特斯拉（1856-1943）研制出两相异步电动机。30岁。



特斯拉与他发明的两相异步电动机

❖ 1888年，赫兹(1857-1894，德国)通过实验获得**电磁波**。  
31岁。



赫兹 Herz

斯坦梅茨 (Steinmetz, Charles, 1865-1923, 德国)



最大成就：在二十岁时运用二百年前的虚数概念，详尽**求解交流电路——相量法**，使人们能够有效地分析和设计交流电路。他的理论逐渐在电工界传播开来，使从特斯拉开始的交流电与直流电之争以交流电的胜利而告结束。

1901年，越洋通信。加拿大的纽芬兰岛和英国的波尔杜。意大利无线电发明人马可尼（1873—1973）。

1911年，发现汞的超导电性。荷兰莱顿大学卡麦林·昂内斯（1853—1926）。

1945年，宾夕法尼亚大学制造出第一台电子计算机。

1947年，美国科学家布拉顿（1902—1987）、巴丁（1902—1991）和肖克利（1910—1989）发明晶体管。

1970年，美国康宁玻璃公司，贝尔实验室，研制出半导体激光器，开始了光纤通信。

1986年，IBM苏黎世实验室科学家米勒（1927—）等，发现高温超导材料。

2007年，中国直流输电长度7085km，容量18560MW，世界第一。

2010年，中国手机用户突破7亿，世界第一。

---

## 4 电路理论发展史概况

20世纪30年代，电路理论从一般的电磁理论中脱颖而出，形成了一门独立的学科。从19世纪20年代到20世纪30年代这一时期的成果有：

欧姆定律（1827）；      基尔霍夫定律（1847）

等效电源定理（1853）； 变换（1899）

对偶原理（1904）；      阻抗概念（1911）

Foster的电抗定律（1924）； 瞬态响应概念（1926）

等效电路概念、多端口网络概念等，并且形成了电路模型的概念。所有这一切都是为了满足当时电力工程和通信工程的需要。

20世纪30-40年代，电路在理论上进一步成熟。  
在此期间的重要成果有：

网络综合逼近理论（1930年）

正实函数的概念（1931年）

网络函数概念（1936年）

Nyquist稳定判据（1932年）

电路的综合实现等。

到了20世纪40年代，电路理论的体系在分析方面主要包括**直流、交流和暂态**几个组成部分；在综合方面主要包括**实现、逼近和等值**方面问题。

20世纪40年代以后，由于生产的发展和二次世界大战的需要，除了电力和电信以外，自动控制技术也飞速发展。这样，在电气科学技术领域内就形成了三足鼎立的体系：**电力系统、通信系统和控制系统。电路理论乃是这三个系统的共同基础。**

为了适应这一发展，电路理论经历了一次重大变革。这一发展阶段大体上延伸到20世纪50年代末和60年代初。在此期间的主要成果有**特勒根定理**（1952年）、**状态变量分析**（20世纪60年代）、**拓扑分析**等。这一次重大变革标志着电路理论在学术体系上进一步完备，在学术思想上进一步成熟。通常把20世纪60年代以前的发展阶段称为经典电路理论阶段。

20世纪50年代中期以后，随着控制、信息、电子、计算机技术及航天等尖端技术的发展，促进了电路理论内容和体系的革新，从而形成了**近代电路理论**。主要特征为：

**在器件上：**多端化、电路集成化；

**在分析方法上：**系统化、通用化、计算机辅助化；

**综合上：**有源化、最佳化、数字化、可集成化；

**在体系上：**从线性扩大到非线性、从无源扩大到有源、从时不变扩大到时变、从模拟扩大到数字、从分立到集成。

**新方向迭起：**超大规模集成电路、开关电容网络、故障诊断、非线性电路、器件建模、数字处理与数字综合等。

近代电路理论已成为现代科学基础理论中一门举足轻重的学科。

## 5 为何学（目的）

电的作用： 重要的能量、信息载体、控制手段。

电的优越性： 易于传输、变换、控制。

迫切需要： 后续课程需要、工作需要、生活需要、  
考研需要。

电极大地改变了人们的生产生活方式，减轻劳动、提高生产率、使生活丰富多彩、产品层出不穷。

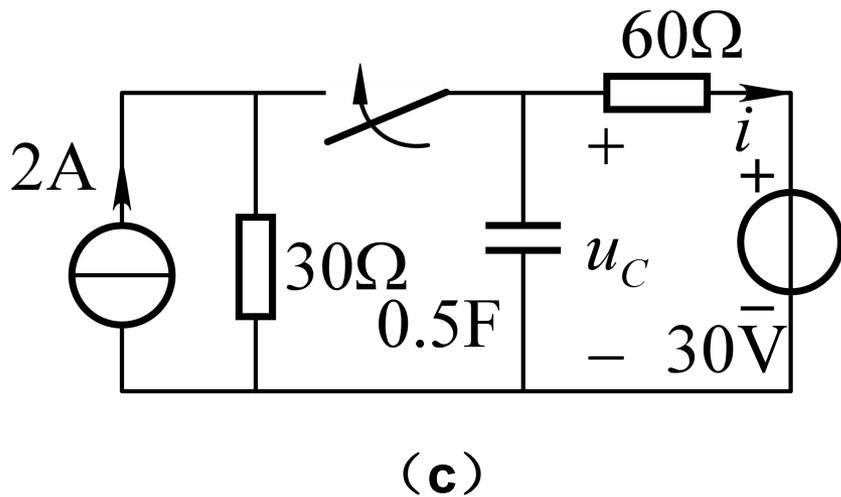
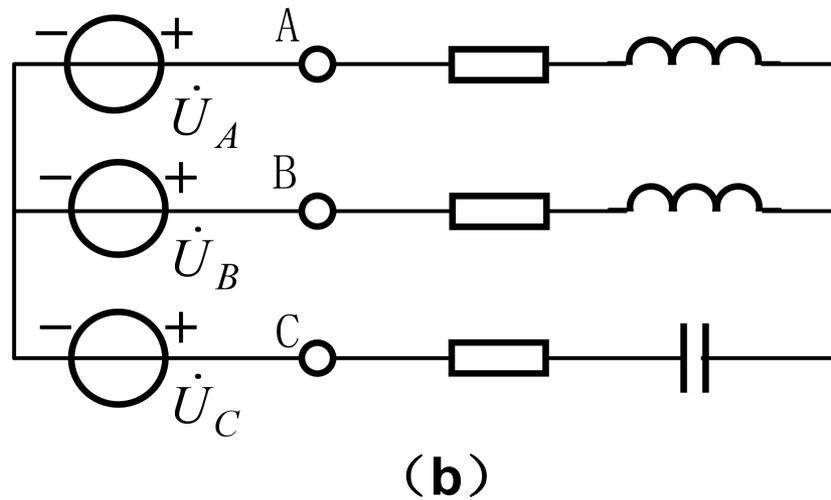
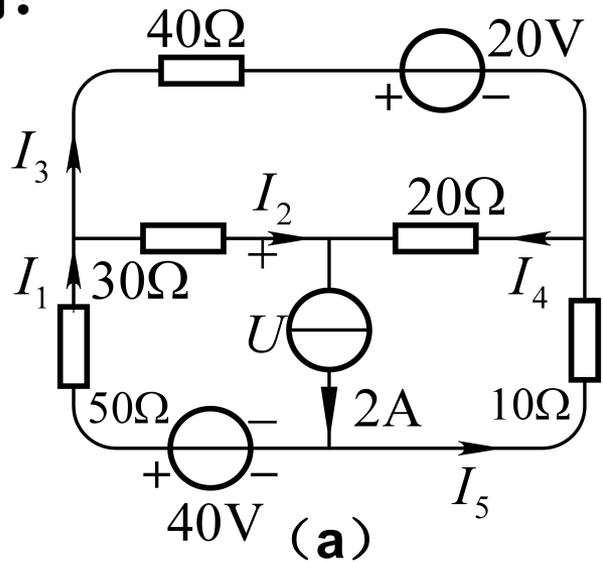
数学、物理学、电子技术、电力技术、信息技术、控制技术，在电路理论中得到了完美结合。

## 6 学什么（内容）：

常用术语：串联、三角形连接、初始值、相位差、幅值；  
基本定义：阻抗、谐振、时间常数、谐波、有效值；  
常用元件：R、L、C、互感器、运算放大器；  
基本概念：电路模型、集中参数、线性；  
基本定律：KCL、KVL；  
主要定理：叠加定理、戴维南定理、特勒根定理；  
分析方法：支路法、节点法、稳态分析、暂态分析；  
基本实验技能和仿真技能、电工测量

注：不含电路综合与故障诊断内容。

举例:



## 7 怎么学（方法与要求）

课程性质：专业大类课程，专业基础课，技术基础课。

听课：最好的学习方式还是到课堂。

笔记：养成习惯。

作业：完成指定的作业。

答疑：学问=学+问。大疑大悟；小疑小悟；无疑不误。

求学问、需学问、只学答、非学问。

阅读：中外文参考书、电工发展史、登陆课程网站。

前续课：高中物理、高等数学。

法拉第特别喜欢以撒·华滋博士的《悟性的提升. **Improvement of the Mind**》, 该书为失学和愿意上进的青年提供了系统的学习方法, 例如

读书要随手做笔记;

坚持去上课受教育;

要有读书的同伴;

要成立读书会;

仔细观察、用词准确。

迈克尔·法拉第都一一做到了。

绪 论 结 束

# 电路课程特点及教学法

- 1 衔接性：与高中物理和大学物理的电学部分联系密切，极大延伸和提高；与后续电子技术、电机学、电力系统、电力电子密不可分；
- 2 理论性：概念多、基本知识点多、公式多、单位制复杂、解题方法灵活、逻辑性强、较强的整体性、许多章节展示了科学研究方法，假设、论证、推理、归纳、结论。
- 3 实践性：通过试验去理解、验证、巩固。

## 如何教好

### 1 整理、归纳、理出线索

(1) 列表法：例如，元件模型表、含耦合电感电路的等效分析、对称三相电路、动态电路分析。列表是一种较高层次的思维过程；可以使知识一目了然。

(2) 线索法：总结出要掌握的几个基本概念、基本规律和基本方法，尽量将无意义的学习变成有意义的学习，增加记忆。

(3) 展开法：从中学向大学展开；从直流向交流展开；从理论向应用展开。

### 2 探究式教学方法

有一次，狄拉克在普林斯顿大学演讲。演讲完毕，一位听众站起来说：“我有一个问题请回答：我不懂怎样从公式（2）推导出来公式（5）。”狄拉克不回答。主持者说：“狄拉克教授，请回答他的问题。”狄拉克说：“他并没有问问题，只是说了一句话”——《人情物理，杨振宁》224，译林出版社，叶中敏著

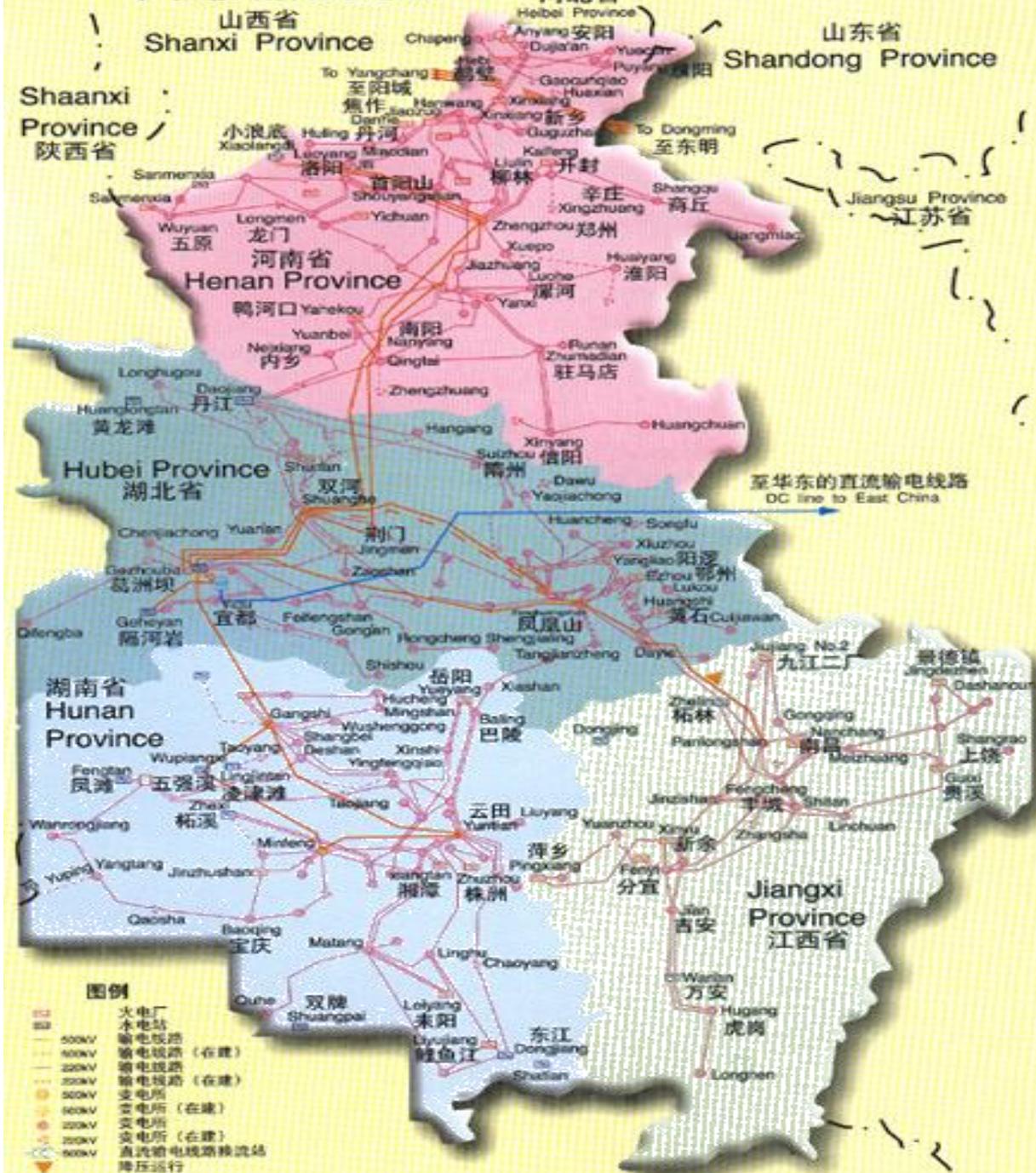
内蒙古  
INNER MONGOLIA

# 华北电网接线示意图



- 图例**
- 火电厂
  - 水电站
  - 500 kV 变电所
  - 220 kV 变电所
  - 500 kV 输电线路
  - 220 kV 输电线路
  - - - 500 kV 输电线路 (在建)
  - ⊗ 500 kV 变电所 (在建)

# 华中电网接线示意图



**组成：**

- 1 电源：** 电池、信号源、发电机。
- 2 负载：** 电灯、扬声器、电机、投影仪、电脑。
- 3 变换：** 开关、放大、升压、半导体器件、电阻、电感、电容。
- 4 连线：** 连接导体、架空电缆、地下电缆。

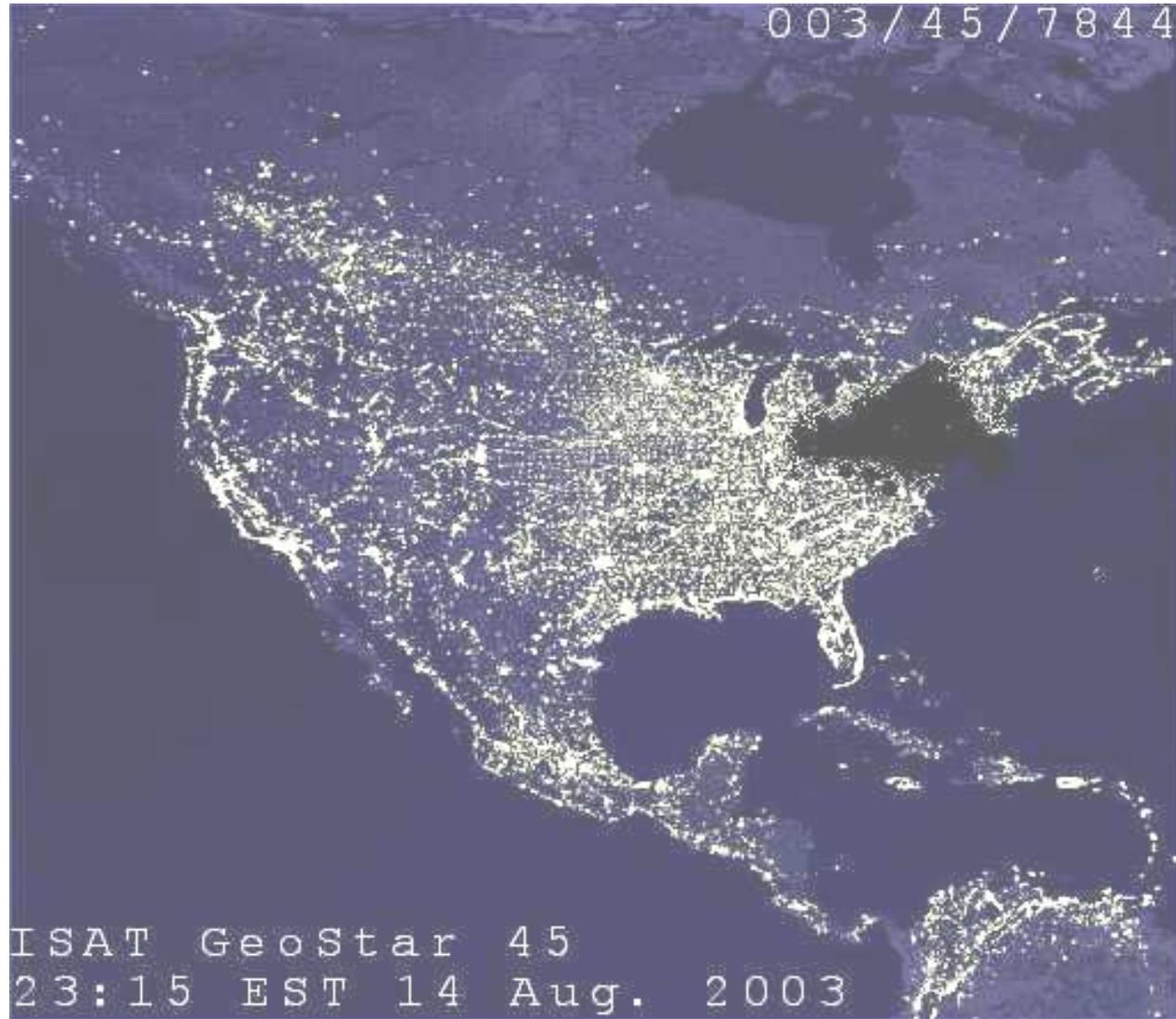
**特点：** 种类繁多、功能各异。

美加地区2003年大停电，一天损失超过300亿美元，超过三峡全部建设费用。

2008年1月10日—2月5日，中国南方电网遭受雨雪冰冻灾害，1万多条线路、600多座变电站受损，直接经济损失超过1500亿（注：2006年中央财政教育支出538亿）。  
---电的重要性和脆弱性。



003/45/7844



ISAT GeoStar 45  
23:15 EST 14 Aug. 2003

爱因斯坦说：

我们的时代富于创造思想，我们的发现本应该可以大大地使我们的生活轻松愉快。我们利用电能横渡大西洋。我们使用电能来减轻人类繁重的体力劳动。我们学会了飞行，我们利用电波很容易地把消息发到全球各处。

但是，虽然有这一切，我们的商品生产和分配是完全无组织的。人们必须生活在忧虑中，担心被人从经济生活中抛出，失去一切。除此之外，生活在不同国家中的人们每隔一个长短不等的时间就要进行互相杀戮，因此，每一个想到未来的人必然都生活在经常的忧恐中。

背景：1938年8月，罗斯福总统请爱因斯坦把自己的思想写出来（100单词左右），埋在国际博览会展馆地基下，待5000年后取出。

电工基础是电气工程师的“黄油与面包”。

#### (4) 电路理论 (Circuit Theory, Electrical Network Theory)

Study of electric and magnetic systems in which the electric and magnetic phenomena are described in terms of [integral quantities](#).

See also IEV (International Electrotechnical Vocabulary – Part 131: circuit theory) 131-11-02

尼古拉·特斯拉(1856年7月10日—1943年1月7日)，发明家、物理学家、机械工程师和电机工程师。克罗地亚人，历史上一位重要的发明家。

最有价值的成就是发现了旋转磁场原理，进而发明了多相交流供电系统和交流感应电动机，推动了第二次工业革命。

最著名的发明是“特斯拉线圈”。这是一种分布参数高频共振变压器，可以获得上百万伏的高频电压。

无线电遥控的鼻祖，最早阐述了雷达的原理，最先用他自制的高灵敏度接收机接收到了天外无线电脉冲信号，探测过宇宙射线，发明过一种革命性的无叶片涡轮机等等。

为了表彰他在交流电系统中的实际贡献，国际电工委员会将磁感应强度的国际单位制命名为“特斯拉”，T。

与爱迪生相比：特斯拉的专利是独自构思和撰写的；而爱迪生是靠他创立的美国通用电器公司的庞大的实验队伍完成的；特斯拉于布拉格大学毕业，爱迪生小学未毕业。一对一比较而言，特斯拉个人的科学与发明成就要比爱迪生个人的纯商业发明成就伟大许多倍。他们都是人才。但是，特斯拉是科技天才、商业地才，而爱迪生是科技地才、商业天才。出于利益上的原因，爱迪生还经常打压特斯拉及其发明的交流电。



效果炫目的特斯拉线圈

## 特斯拉的构想

把地球作为内导体，把地球电离层作为外导体，通过放大发射机以径向电磁波振荡模式，在地球与电离层之间建立起大约8Hz的低频共振，再利用环绕地球的表面电磁波来传输能量。但因财力不足，特斯拉的大胆构想并没有得到实现。

后人从理论上证实了这种方案的可行性、高效性和生态安全性，并且不会干扰无线电通信。只不过涉及到世界范围内的能量广播和免费获取，在现有的政治和经济体制下，无人问津这种主张。

## 特斯拉的构想



Wardenclyffe Tower（瓦登克里夫塔）—1904年建于纽约长岛，占地200英亩，高154英尺，顶部为直径100英尺的巨大铜线圈。由于资金问题终止，1917年被毁掉。