



## 第一章 导论

电磁场理论是人类数千年文明的结晶，是现代文明（电气时代）的科学基础。各种技术的进步多源自于电磁场理论的**深化应用**。

作为电气工程学科的基础，本课程的知识要点大部分和《大学物理》中的电磁学相重叠，所不同的是补充阐述每个电磁场定律的形成历史，用数学分析方法进一步理解电磁场定律的**物理意义**，建立电磁场计算思路，并以具体工程案例展示电磁场理论在电气工程中的实际应用。

本章首先简要介绍电磁场的存在性，列举日常生活中的电磁场、电力系统中的电磁场，以及电气工程学科与电磁场理论的相互关系。然后简要介绍电磁场理论的发展历程，展示电磁场理论的**基本框架**，帮助同学们建立对电磁场理论的**宏观认识**。

# 工程电磁场课程计划 (48学时)

章节	学时48	知识点
导论	2	漫长的发展历史, 复杂的理论体系, 重要的课程定位
电荷	2	电荷的基本原理, 库仑定律
静电场	16	电场强度, 电位, 电场散度、旋度, 电介质极化, 介电常数, 静电场能量, 电容, 等效电容系/部分电容
恒定电流场	4	接地电阻、接触电阻、绝缘电阻
恒定磁场	8	安培定律, 毕奥萨伐定律, 磁场散度、旋度, 磁场能量, 磁介质, 磁力
时变电磁场	14	法拉第电磁感应定律, 麦克斯韦方程组, 涡旋电场, 位移电流, 感生电势, 动生电势, 自感, 互感, 坡印廷矢量, 交界面条件/边界条件, 电准静态场, 磁准静态场, 趋肤效应, 交流阻抗, 涡流, 磁矢量位/电标量位, 唯一性定理
平面电磁波	2	电磁波, 波长, 本征阻抗, 透入深度

## 成绩评定:

- 1、平时成绩: 课堂表现 (30分, 点名没到一次扣5分, 扣完为止), 作业批改 (70分, 不及时交作业一次扣10分, 扣完为止)
- 2、期末考试试题统一命题 (判断题20分, 选择题20分, 简答题20分, 计算题40分), 临考前 (不超过一天) 确定考题及试卷印刷, 考场按全年级学号顺序统一分配教室。相邻座位试题顺序有所不同。
- 3、总成绩 = 平时成绩 $\times 0.3$  + 期末考试成绩 $\times 0.7$

请结合大学物理知识，简答下列问题：

- 1) 带电导体尖端曲率较大，是电荷的积聚点，它们为什么不会因为同性相斥而分散到电荷密度相对较小的导体其它区域？
- 2) 超高压架空输电线路为避免电晕放电而采用多分裂导线，在总截面积不变的情况下，分裂后每根导线都变细了，导线表面曲率变大了，不是更容易积聚电荷，从而更容易放电了吗？
- 3) 一根导线在直流电流、工频电流、高频电流的作用下，其等效电路有何不同？
- 4) 三相输电线路构成的是电流相互关联的互联回路，相导线间的互感该怎么定义？
- 5) 静止电荷形成的静电场、时变磁场形成的感生电场、切割磁力线形成的动生电场都具有电场属性，它们有什么不同？
- 6) 电路基本理论为什么只有在电准静态场、磁准静态场的假设条件下成立？

## 目 录 Contents

- 1 任课教师及其电磁多物理场研究方向
- 2 电磁场课程在电气工程学科中的地位
- 3 电力系统中的电磁场
- 4 电磁场理论的发展简史
- 5 电磁场理论的核心构架

# 1.1 阮江军教授简介

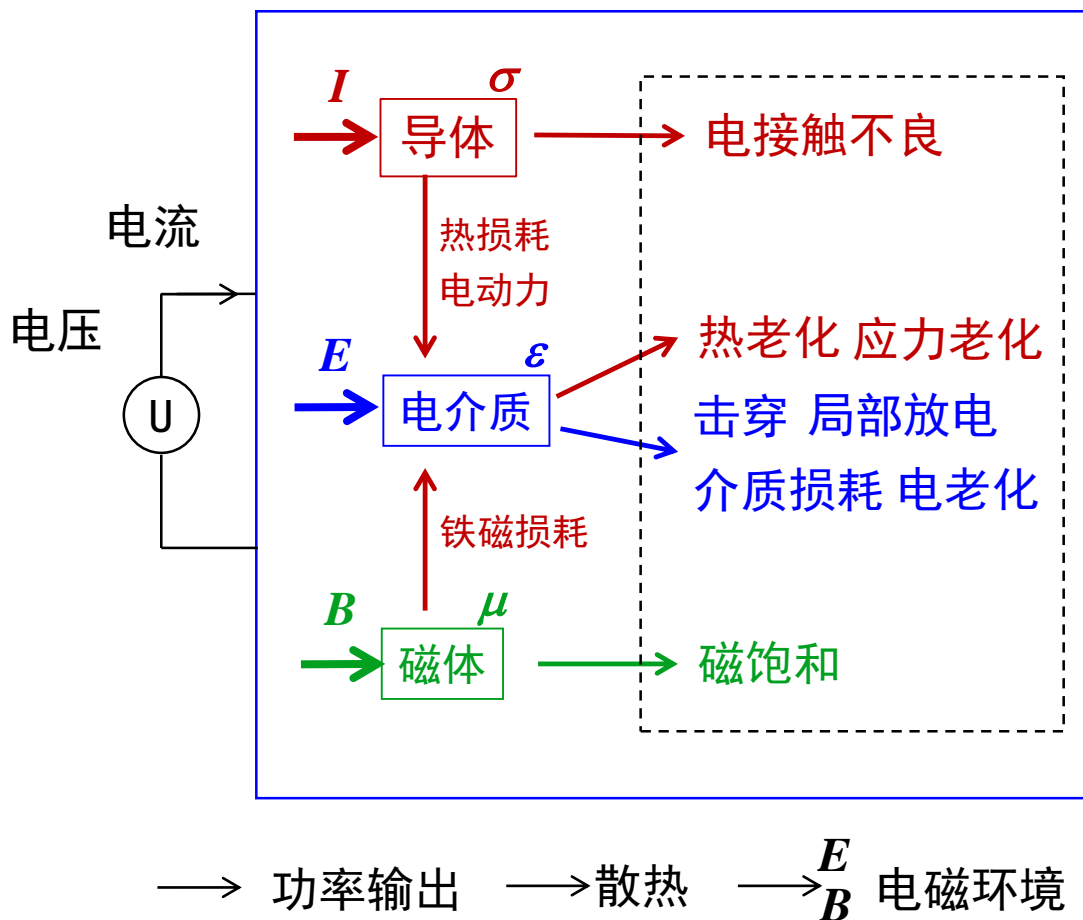
- 1968年生，浙江绍兴，春晖中学
- 1986-1995年，华中理工大学 电力系，本科、硕士、博士
- 1996-1998年，武汉水利电力大学，博士后
- 1999年，破格晋升为教授、博士生导师
- 2001~2008年：武汉大学电气工程学院 实验中心主任
- 2008~2016年：武汉大学电气工程学院 副院长（研究生教学）
- 现任：武汉大学二级教授，博士生导师
- 科研：从事高电压与绝缘技术、电工理论与新技术研究方向，主持国家973、863、科技支撑计划、自然科学基金等纵向课题，以及一批横向科研项目，科研经费累计逾10000万元
- 教学：主讲《电磁场》课程
- 荣誉：中组部“万人计划” 科技创业领军人才  
湖北省“双创战略团队” 负责人  
武汉东湖高新 “3551最具影响力人才奖”
- 兼任：中国能源行业接地标委会委员  
中国建筑学会防雷技术委员会委员  
湖北省电工技术学会副理事长  
武汉黄门电工科技有限公司董事长



导师：周克定教授：开创计算电磁学  
解广润教授：防雷接地著名专家

## 1.2 电磁多物理场是电气设备的“硬核”

“材料研制→结构设计→制造工艺→运行维护→退出运行”全寿命周期



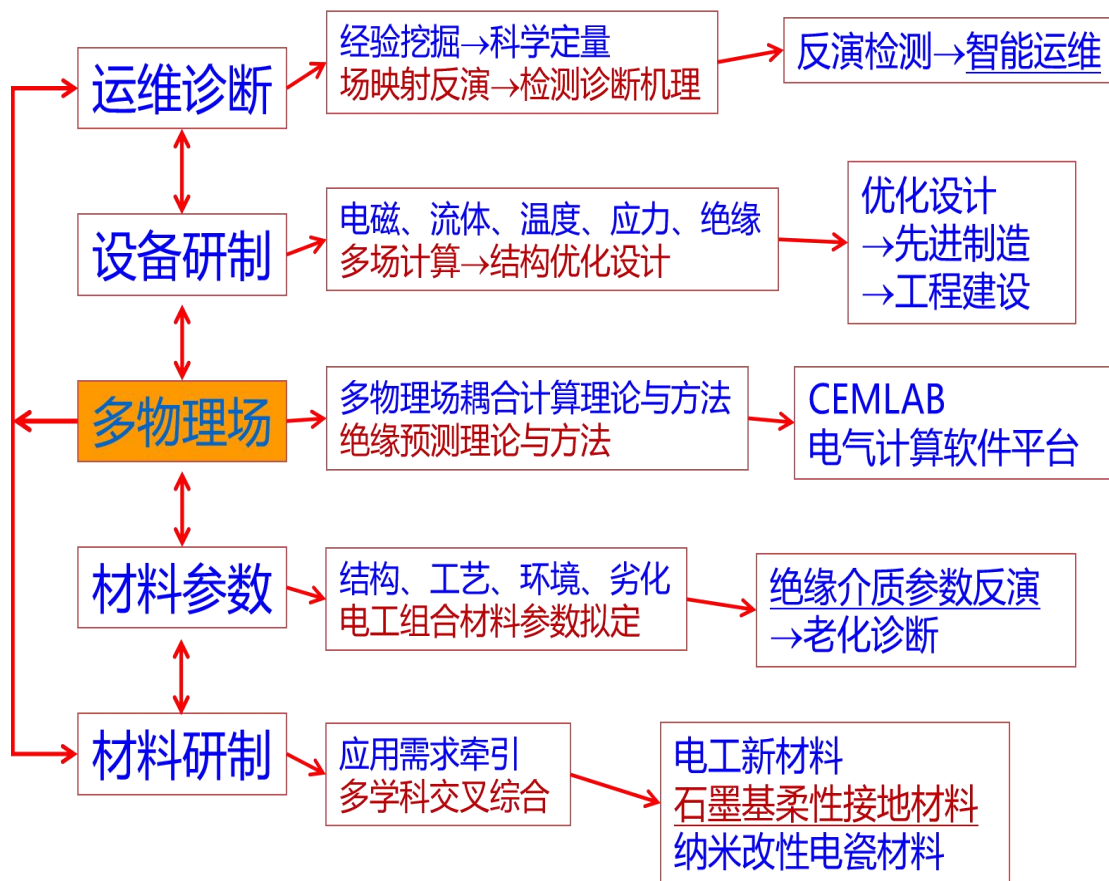
- ✓ 设备中的电场强度  $E$  由电压  $U$  (额定电压、过电压) 产生, 受绝缘介质放电电压耐受值的限制。
- ✓ 磁场  $B$  由电流  $I$  产生, 受导磁材料的饱和特性限制。
- ✓ 电流  $I$  在导体中产生热损耗, 磁场  $B$  在铁芯中产生铁磁损耗, 电压  $U$  在绝缘介质中产生介质损耗, 这些损耗产生的热量通过绝缘介质向大气散热 (传导、对流、辐射), 在设备中形成的温升  $T$  受绝缘介质的温度限值限制。
- ✓ 电气设备在结构自重、外力 (冰载荷、风载荷、地震)、电动力等作用下在设备结构中形成应力场  $F$ , 受材料的机械强度限制。
- ✓ 绝缘介质在电场、温度、应力作用下会逐渐老化  $\lg \delta$ , 绝缘强度不断下降, 危及设备安全。



# 1.3 构建了“电工装备电磁多物理场” 计算与应用理论架构



坚持30余年的基础理论研究，建立了电工装备从研发→制造→运维的数字化仿真实理论与应用技术体系

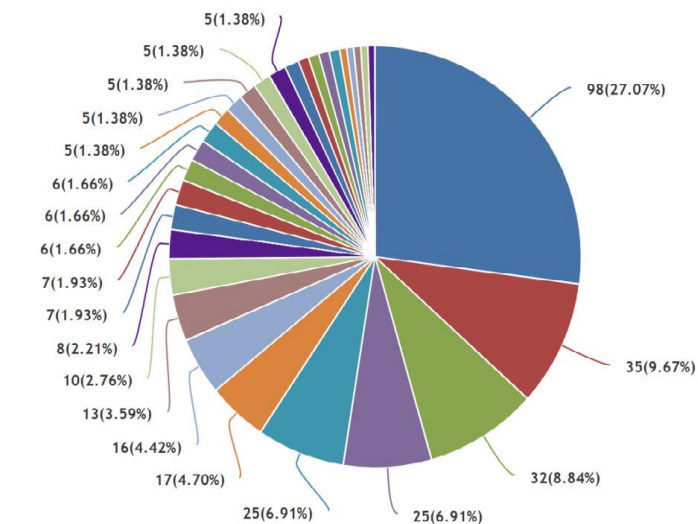


## 中国科学出版社《电磁工程计算丛书》

- 1 运动导体涡流场数值计算与应用
- 2 空气绝缘预测理论与应用
- 3 空间离子流场数值计算及工程应用
- 4 变压器油浸纸绝缘状态反演检测技术
- 5 油浸式变压器绕组热点温度反演监测技术
- 6 开关柜内部热点温度反演检测技术
- 7 绝缘管母接头热点温度反演检测技术及其应用
- 8 高压电气设备电场计算与控制技术
- 9 高压断路器机械缺陷诊断技术
- 10 高压隔离开关机械缺陷诊断技术
- 11 输电线路塔线系统力学分析与应用
- 12 高压开关柜短路爆炸仿真与泄压技术
- 13 接地电流场计算与应用
- 14 电磁场理论在电气工程中的应用
- 15 脉冲功率科学技术



# 1.4 科研成果 (论文)



中文: 333篇

中国电机工程学报: 31篇

电工技术学报: 24篇

高压技术: 97篇

最高被引次数: 372次

高压期刊论文数量全国排名: 6

英文: 161篇

IEEE 期刊论文: 62篇

其他国际期刊: 38篇

国际学术会议: 61篇

最高被引次数: 163次

第28卷第21期  
2004年11月  
文章编号: 1000-3673 (2004) 21-0080-05  
电网技术  
Power System Technology  
中图分类号: TM86; TM726  
文献标识码: A  
学科代码: 470-4034  
Vol.28 No.21  
Nov. 2004

输电线路杆塔模型与防雷性能计算研究

莫付江<sup>1,2</sup>, 陈允平<sup>1</sup>, 阮江军<sup>1</sup>

Ultra High Voltage Transmission in China: Developments, Current Status and Future Prospects

作者: Huang, DC (Huang, Daochun)<sup>[1]</sup>; Shu, YB (Shu, Yinbiao)<sup>[2]</sup>; Ruan, JJ (Ruan, Jiangjun)<sup>[1]</sup>; Hu, Y (Hu, Yi)<sup>[3]</sup>

PROCEEDINGS OF THE IEEE

卷: 97 期: 3 页: 555-583

DOI: 10.1109/JPROC.2009.2013613

出版时间: MAR 2009

已索引: 2009-03-01

文献类型: Review



## 目 录 Contents

- 1 任课教师及其电磁多物理场研究方向
- 2 电磁场课程在电气工程学科中的地位
- 3 电力系统中的电磁场
- 4 电磁场理论的发展简史
- 5 电磁场理论核心构架

## 2.1 课程简介

“电磁场不仅是现代文明的第五要素，更是电气工程学科的基石。”

- **地位：**是电气工程学科一级学科所包含的电机与电器、电力系统及其自动化、高电压与绝缘技术、电力电子与电气传动、电工理论与新技术等二级学科的理论基础。

前导课程	知识点	支撑点
《高等数学》	函数极限、多元函数、偏导数、全微分、重积分、正交坐标系、向量运算	场、梯度、散度、旋度 高斯定理、斯托克斯定理
《大学物理》	力、功率、势能、静电场、稳恒磁场、电磁感应	电磁场基本概念

- **关键：**
  - ✓ 在学习电磁场理论的过程中，**数学**是必备的基础。
  - ✓ 掌握电磁场理论的标尺是：能否透过**微分算子**看到电磁场的特征，能否透过**电磁场方程**看到电场与磁场相互转化的物理规律。
  - ✓ 通过电磁场理论的学习，**实验探索与归纳总结**思维得到了充分的应用，也为电气工程的专业课程的学习奠定了坚实的基础

## 2.2 本课程与其它课程之间的关系

后续课程	知识点	电磁理论基础
《电路》	电路元件（电阻、电容、电感、互感），基本物理量（电压、电流），电路基本定律	静电场、电流场、时变电磁场、传输线与波过程
《电机学》	电磁能量、电磁转矩、绕组、磁链、磁动势、电动势方程、时空向量图、电枢反应、同步电抗、瞬变电抗	时变电磁场
《电力系统分析》	电力系统元件数学模型（线路、变压器、发电机、电动机）	时变电磁场
《电气工程基础》	变压器、线路等值，开关电器、互感器，过电压防护	静电场、电流场、时变电磁场、传输线与波过程
《高电压绝缘技术》	气体放电、电介质击穿、局部放电、电介质损耗、过电压波过程、雷电与防护	静电场、传输线与波过程
《电力系统接地技术》	接地电阻、接触电势、跨步电压、有效散流长度、三极法测量、火花效应	静电场、电流场
《电力系统电磁兼容》	干扰源（静电、雷电、电磁脉冲）、干扰途径（传导耦合、辐射耦合）、电磁屏蔽（静电屏蔽、磁屏蔽、电磁屏蔽、接地）	静电场、电流场、时变电磁场、传输线与波过程
《电气传感技术》	电阻式、电容式、电感式、电动势式（压电、霍尔、磁电）、光纤（电场、磁场效应）	电流场、时变电磁场
《电力系统过电压》	分布参数、波过程、工频过电压、操作过电压、雷电过电压、铁磁谐振	时变电磁场、传输线与波过程
《高压电器》	电接触、动热稳定性、电弧	电流场、时变电磁场

### ■ 讨论题1

- ✓ 在百度网上以“**电磁场+天书**”为关键词检索相关信息，了解各高校大学生对电磁场课程的学习体会，就电磁场课程被形容为“天书”，**陈述你的看法**。
- **华电学长经验**：“**骨灰级天书：电磁场**。……至少**我是一点没有听懂**，虽然我一次就过了……据传说，这个不是一般人能搞懂的，就算你天天听课了，如果没有足够的智商，课下也没有下够功夫的话，能搞懂的也仅限于几个晦涩的名词而已。如果说电路是入门级的少林罗汉拳，那么**电磁场就是易筋经**，即使公之于众，也只有少数人能看懂学会”。
- **西交学长经验**：“我的电磁场就这样考完了，说实在的，都不知道考的是什么。……四大天书之首的电磁场，彻彻底底的让全体电气学院2004级同仁们感受到了酷暑中的严寒 ……”

## 目 录 Contents

- 1 任课教师及其电磁多物理场研究方向
- 2 电磁场课程在电气工程学科中的地位
- 3 电力系统中的电磁场
- 4 电磁场理论的发展简史
- 5 电磁场理论核心构架

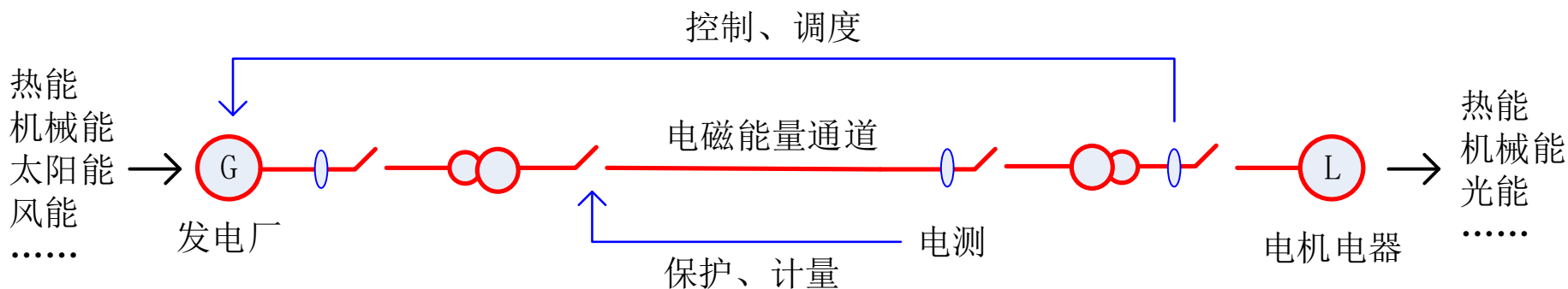


## 3.1 电力系统中的电磁场

➤ “在我们的生活空间中，充斥着高频电磁场，在电力系统中充斥着工频电磁场。”

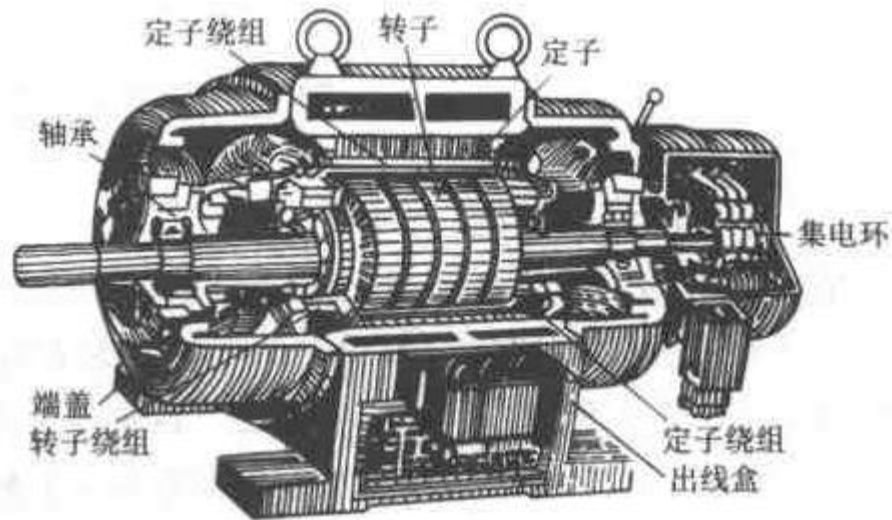
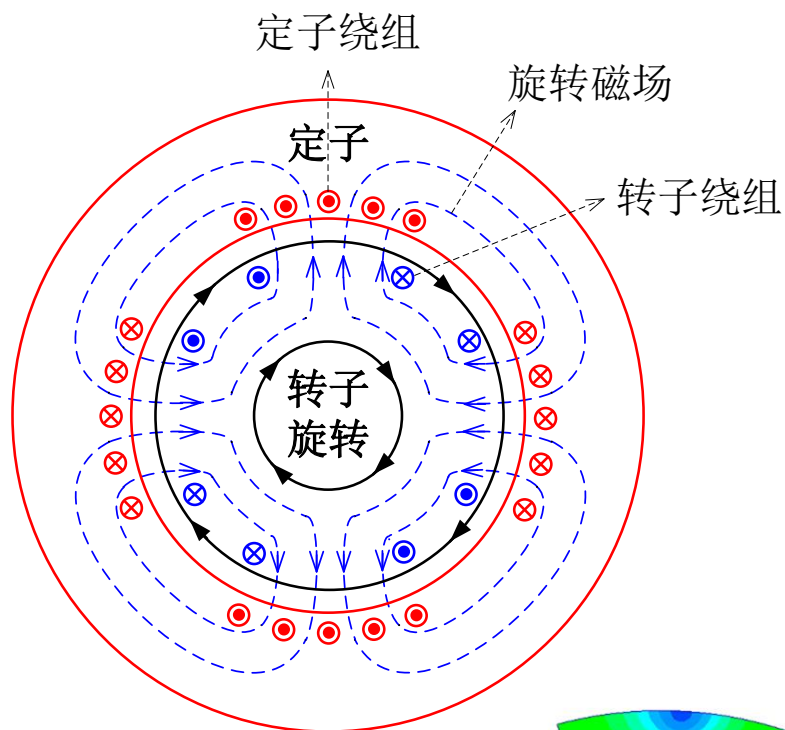
### ■ 什么是电力系统？

- ✓ **概念：**由发电厂、变电站、线路、供配电所和用电等环节组成的电能生产、传输与分配系统。
- ✓ **功能：**将自然界的一次能源通过发电装置转化成电能（清洁能源），经输变电和配电将电能供应到千家万户。

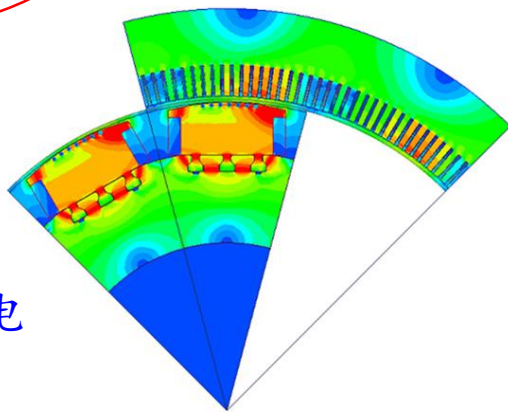


电力系统充斥着各种形态的电场、磁场，及其能量的转换和流动过程。

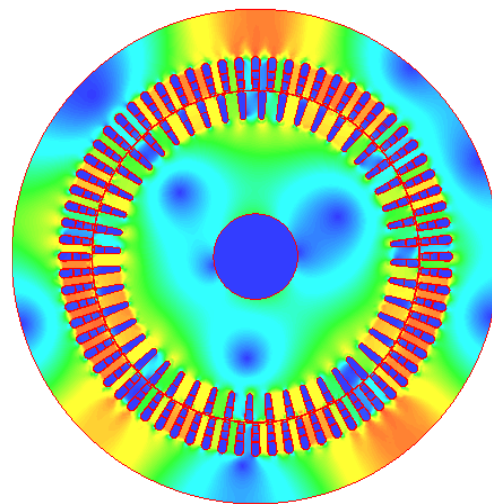
## 3.2 发电机中的磁场



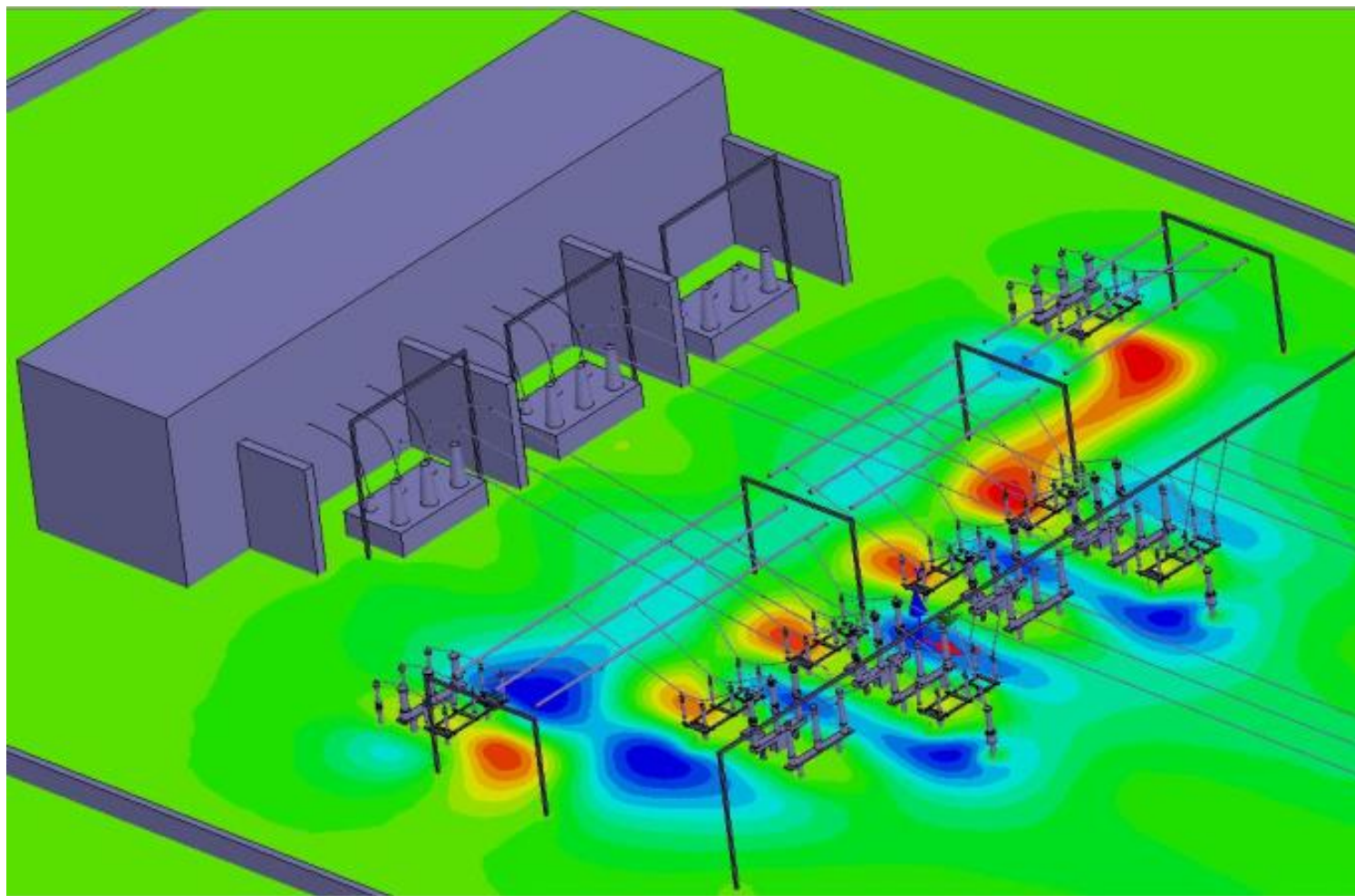
抽水蓄能发电  
机磁场分布



无刷双馈发电机空载磁场分布



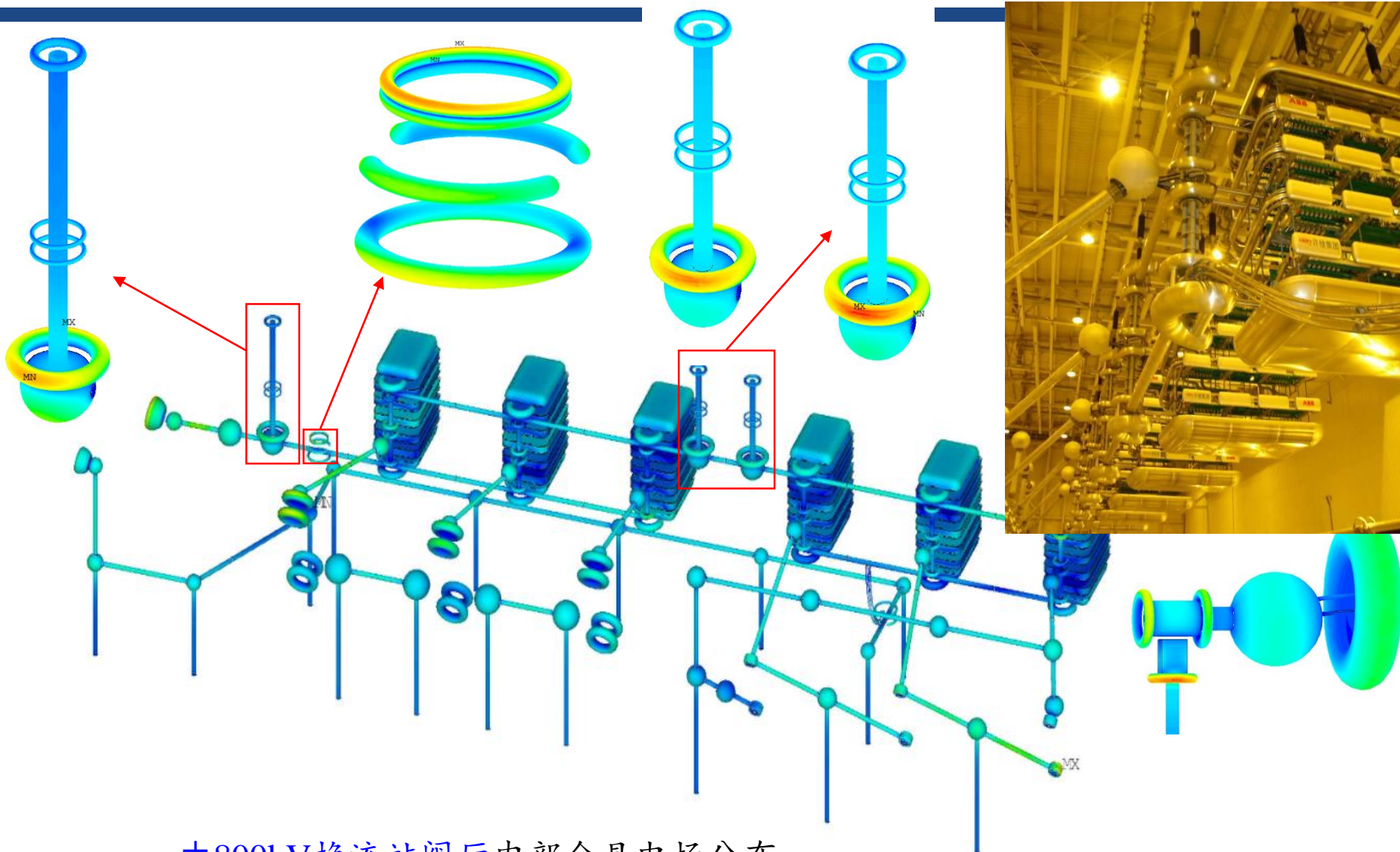
### 3.3 变电站中的电场



变电站工频电场强度分布

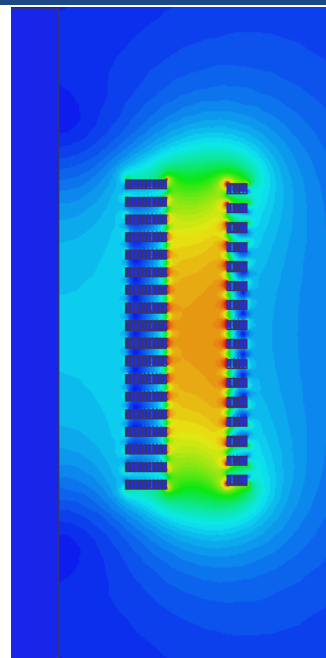
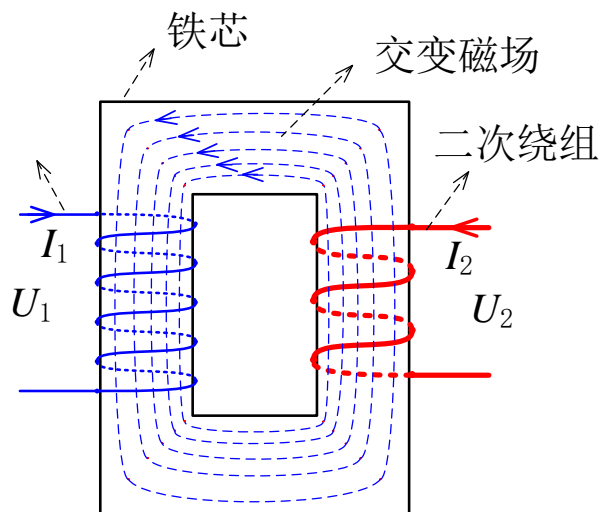


## 3.4 换流站中的电场

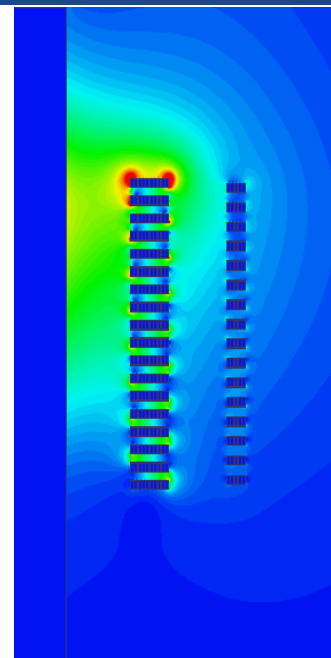
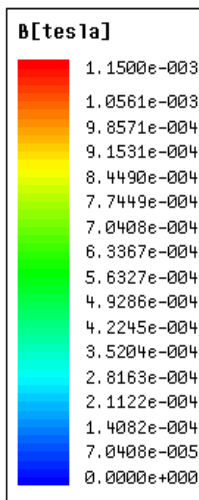


±800kV换流站阀厅内部金具电场分布

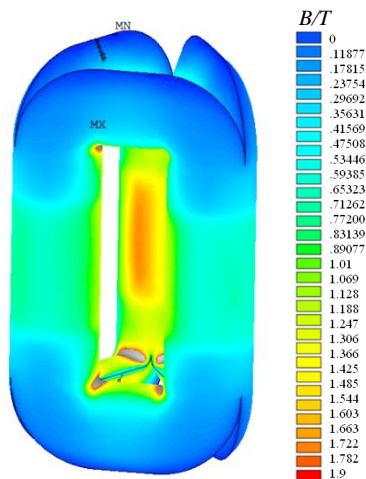
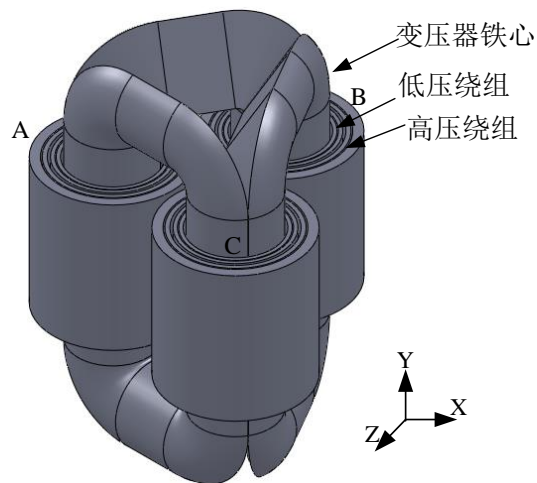
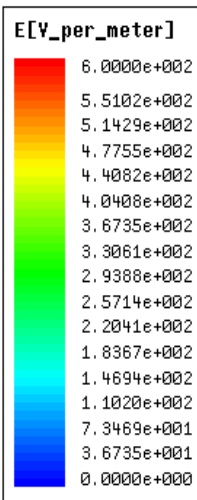
# 3.5 变压器中的磁场



磁感应强度分布



电场分布

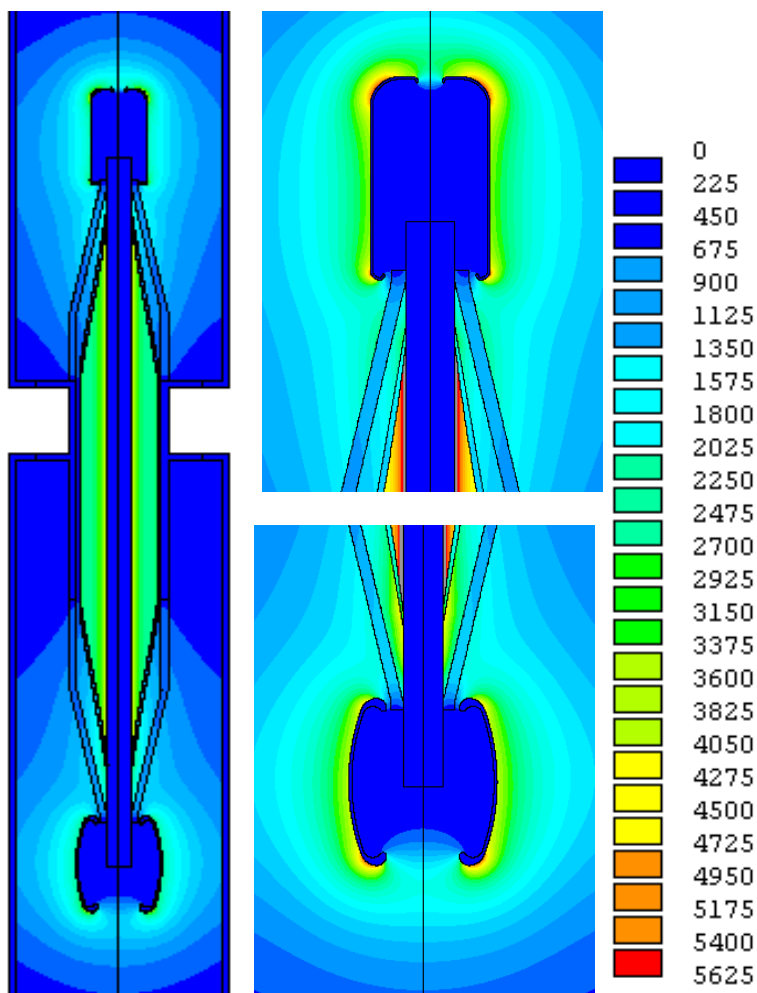


特高压换流变压器  
绕组电磁场分布

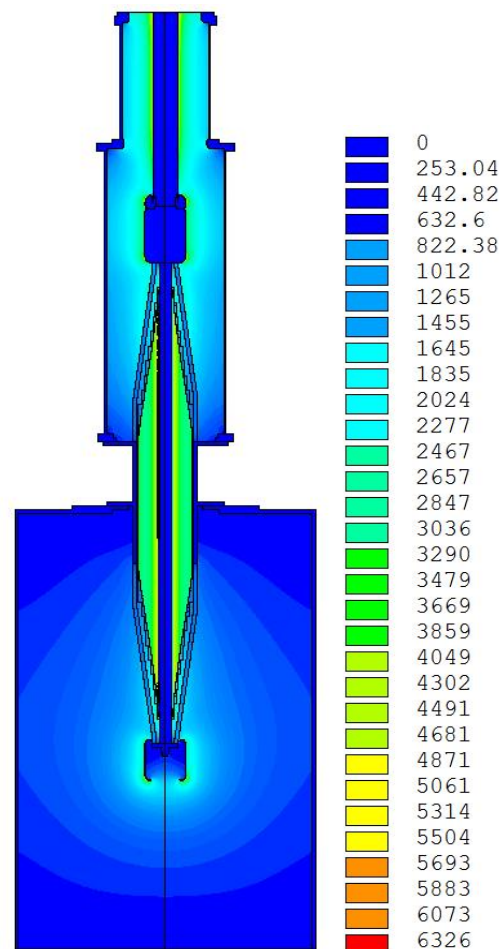
10kV油浸式立体  
卷铁心变压器铁  
心磁通密度分布



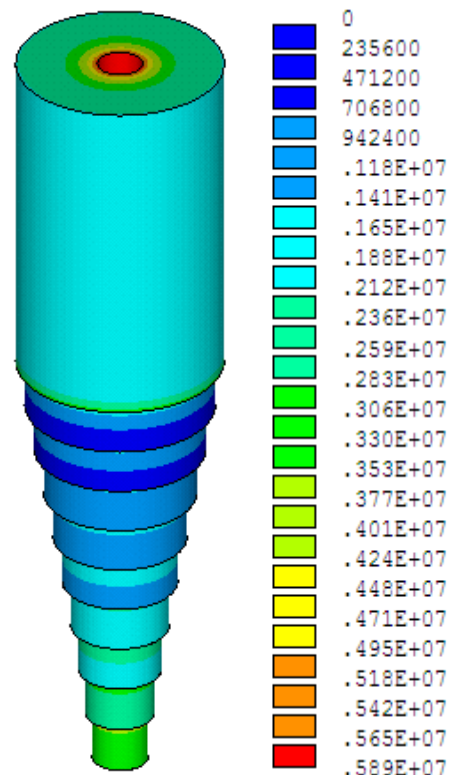
## 3.6 套管中的电场



500kV油气套管电场分布

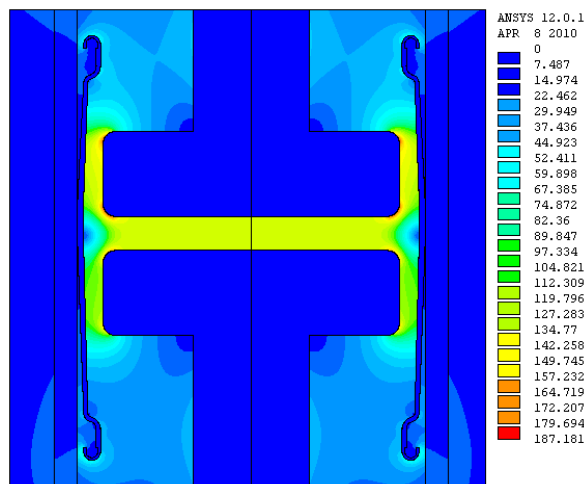
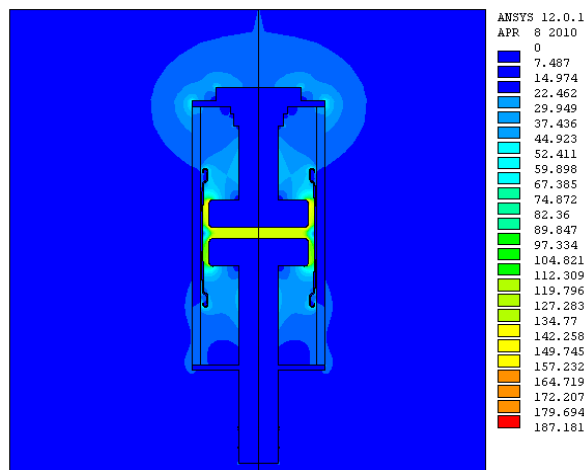


1000kV油气套管电场分布

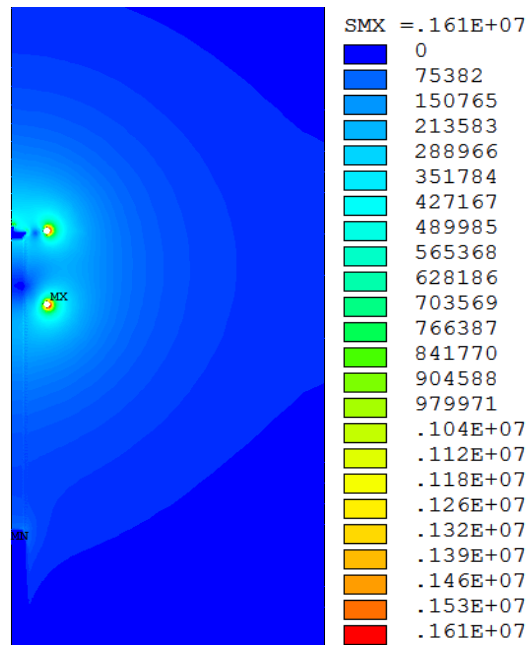


套管电容芯子电场分布

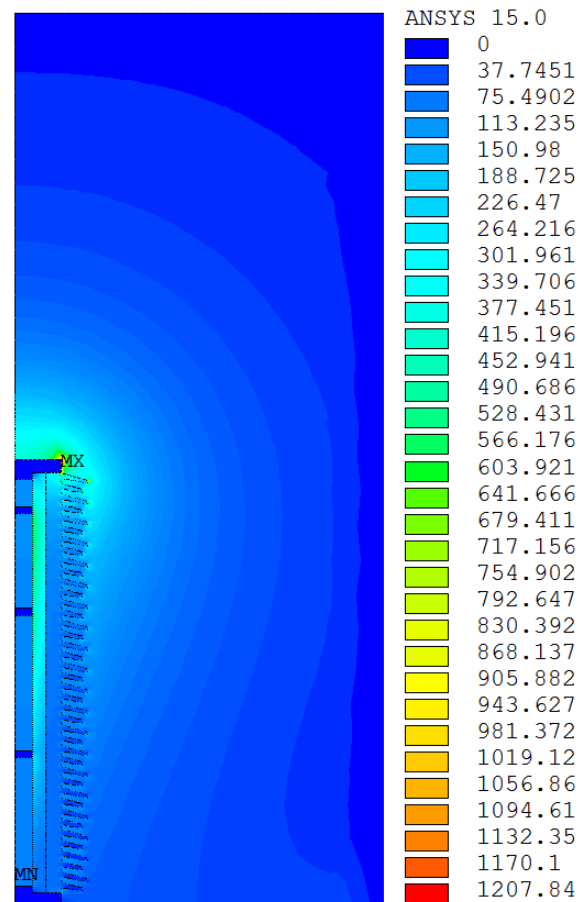
## 3.7 断路器中的电场



真空断路器灭弧室  
电场分布

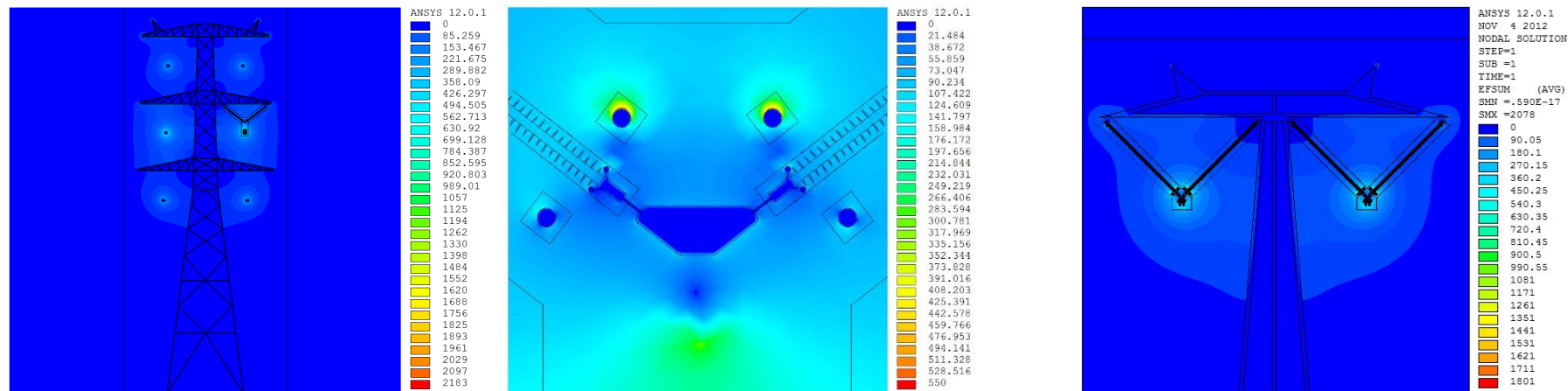


换流站直流分压器  
电场分布



500kV避雷器电场分布

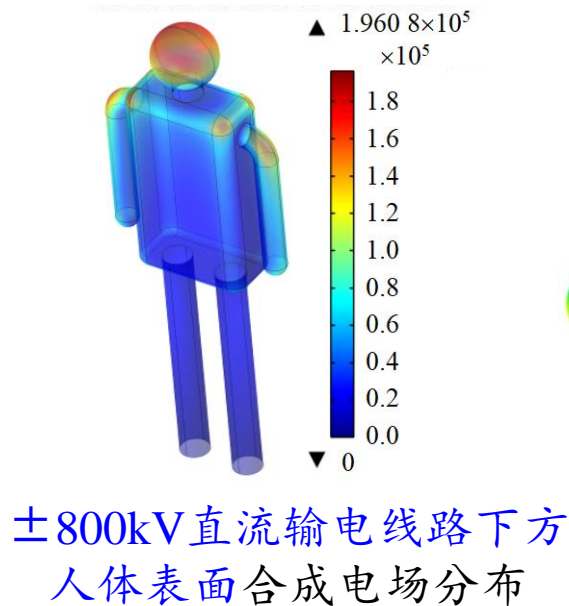
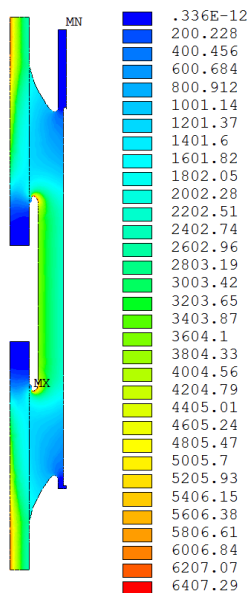
# 3.8 输电线路附近的电场



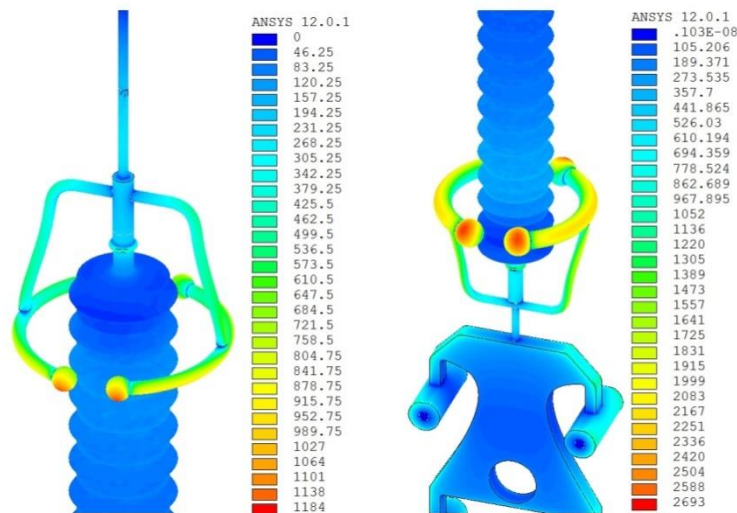
特高压交流输电线路电场分布

±800kV直流输电线路电场分布

110kV电缆接头  
电场分布

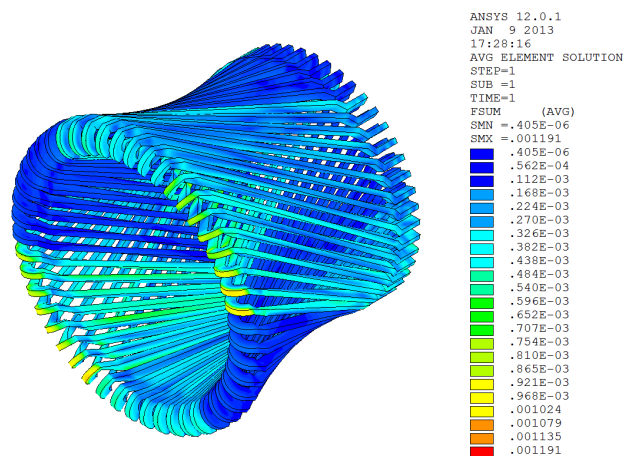


±800kV直流输电线路下方  
人体表面合成电场分布

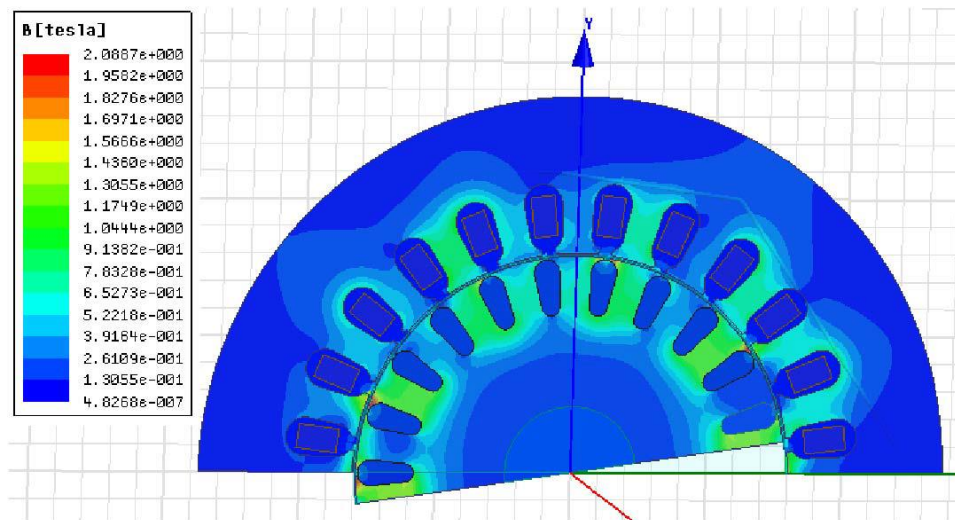


500kV交流输电线路并联间隙  
电场分布

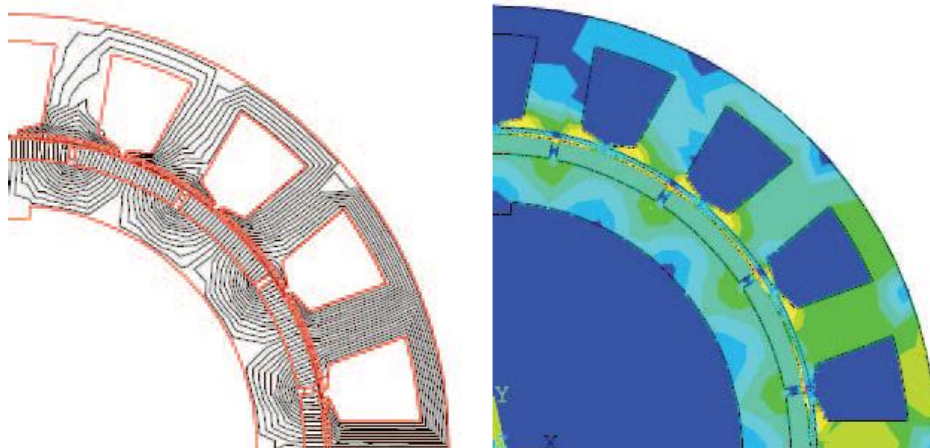
# 3.9 电动机中的磁场



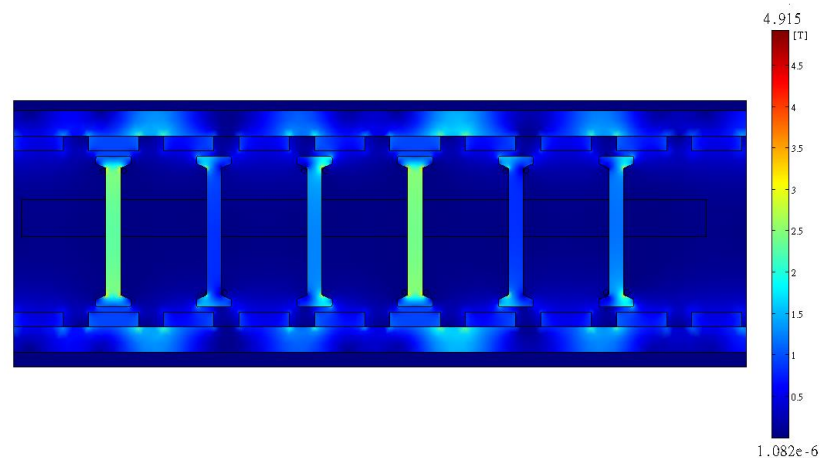
感应电动机磁激振力



异步电机磁场分布



永磁同步电机磁场分布



直线电机磁场分布

## 目 录 Contents

- 1 任课教师及其电磁多物理场研究方向
- 2 电磁场课程在电气工程学科中的地位
- 3 电力系统中的电磁场
- 4 电磁场理论的发展简史
- 5 电磁场理论核心构架



## 4.1 实验→定律 思想→数学

### 自然界电磁现象的观察与发现

磁引力的发现与磁学起步

电引力的发现与电学起步

### 电磁规律的实验探索

电荷定量研究

电流产生

电生磁设想与证实

磁生电设想与证实

### 电磁场理论的建立

电磁场理论建立在库仑、奥斯特、安培、法拉第等一批伟大的科学家对电和磁现象的探索与实验而提出的一系列定律之上，如库仑定律、安培力定律、毕奥萨伐尔定律、安培环路定律、法拉第定律等。

麦克斯韦的伟大之处在于，他用数学的方法阐述了法拉第提出的力线思想和电紧张态，并从数学的角度提出了位移电流及涡旋电场，从而用一组麦克斯韦方程组统一了所有前人的研究成果，构建了近乎完美的经典电磁场理论。

在麦克斯韦建立的电磁场理论中，基本物理量如电场强度、磁感应强度，对应的电位移矢量、磁场强度，以及引入的辅助变量如磁矢量位、电标量位等，它们的定义必须用到积分的方法才能准确描述。这些变量所具有的物理本质，必须用旋度、散度、梯度等微分算子才能准确表达。

## 4.2 观察发现

- 电磁场理论的建立是一部典型的科学发展史。是3000多年人类文明的结晶
- 电磁场理论的发展可分为三大阶段：电磁自然现象的观察发现、电磁相互作用力的科学实验、麦克斯韦方程组的建立。

### 1、观察、发现、经验总结

年代	国籍	姓名	主要成就
公元前16~11世纪，殷商时代	中国	—	发明文字 “雷”
公元前11世纪~前771年，西周时代	中国	—	发明文字 “电”
公元前6世纪	希腊	泰勒斯	摩擦引力、磁石
公元前?~前645年，春秋时代	中国	管仲	磁石
1031~1095	中国	沈括	地磁场、指南针
1269	西方	派勒格令尼	《论磁体的信》提出磁极 “异性相吸，同性相斥”

## 4.3 磁学诞生

### 感性到理性

年代	国籍	姓名	主要成就
1544-1603	英国	吉尔伯特	《论磁体》 <b>地磁学</b> ，实验哲学，电以太气的假说提出“ <b>电荷</b> ”的概念
—	—	伽森迪	《物理学》思辩电学
1561-1626	<b>英国</b>	<b>培根</b>	<b>提出技术实践论，知识就是力量</b>
1644	法国	笛卡尔	《哲学原理》，磁流体涡旋运动假说，磁体只能在一个封闭的场中运动

- 从磁现象的发现到磁学研究，其本质的界线在于是否开始通过**实验**的方式开始进行理性的研究，并试图提出一些**理论分析或假说**，找到具有普适性的规律。
- 遗憾的是，中国古代关于磁的认识尽管极为丰富，但关于磁现象的本质及解释，缺乏深入细致的考究。即使作为“中国科学史上的坐标”的沈括，对磁现象也是“莫可原其理”、“未深考耳”，致使在我国历史上，一直未能出现可与英国吉尔伯特《论磁》比美的电磁方面的著作。

## 4.4 电学诞生


年代	国籍	姓名	主要成就
1660	德国	盖利克	摩擦发电机，旋转的大硫磺球
—	英国	豪克斯比	发明空心玻璃球摩擦发电机，电风，提出棉线验电器
1753	英国	康顿	发明木髓球静电计
1776	意大利	卡伐洛	发明卡伐洛静电计，成为电学家们的常用工具
1720	英国	格雷	《关于一些新电学实验的说明》，区分 <b>导体</b> 、 <b>电介质</b> ，电学奠基人
1733	法国	迪菲	<ul style="list-style-type: none"><li>《论电》电排斥的涡旋假说，电的二元流体的假设：<b>“松脂电”</b>和<b>“玻璃电”</b></li><li>静电学中的第一个基本原理——<b>“同性相斥，异性相吸”</b>，总结出物体带电的三种方式——<b>摩擦带电</b>，<b>传导带电</b>和<b>感应带电</b></li></ul>
1745	荷兰	克莱斯特	<b>莱顿瓶</b>
—	英国	瓦特孙	莱顿瓶的重大改进， <b>电容器</b> 原型

## 4.5 电荷，定量研究

年代	国籍	姓名	主要成就
1706-1790	美国	富兰克林 	<ul style="list-style-type: none"> <li>尖端放电，电学的第二条基本定律—<b>电荷守恒定律</b>，提出<b>正电荷、负电荷</b>，电容器诞生</li> <li>证明了人工电和雷电的同一性，<b>雷电、避雷针</b>，使“电学显示了最为惊人的自然力”</li> <li>用莱顿瓶放电第一次使钢针磁化</li> </ul>
1750	英国	米谢尔	磁极间相互作用力与距离平方成反比
1754	英国	康顿	<b>静电感应原理</b> —电学第三条基本原理
1764	—	威尔克	发明起电盘
1767	英国	普里斯特利	提出 <b>电作用力与距离平方成反比</b>
1771	英国	开文迪许	<ul style="list-style-type: none"> <li>提出“<b>电势</b>”概念，提出地球电势为零</li> <li>一生开展了大量的富有开拓性的电学研究，但没有发表</li> <li>实验验证了电作用力二次方规律，研究了电作用定律和电荷沿导体表面分布；电容量的确定和表示；电介质的电容率（即<b>介电常数</b>）的测定；相对电导力。</li> </ul>
1787	法国	库伦 	<ul style="list-style-type: none"> <li>扭力秤实验，<b>库伦定律</b></li> <li>电流体和磁流体是两种完全不同的实体</li> <li>磁分子模型和分子磁化</li> </ul>



## 4.6 电池发明，稳定的电流

年代	国籍	姓名	主要成就
1780	意大利	伽伐尼	发现 <b>动物电</b> ，提出神经电流体
1745-1827	意大利	<b>伏特</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1782，<b>伏打电容器静电计</b></li> <li>• 1792，提出接触电动势，中间金属定理</li> <li>• 1755，发明永动起电盘</li> <li>• 1782，确定了电量Q，电容C和电位V三者间的关系</li> <li>• 1800，发明<b>伏打电池</b>，标志电学的第二电源时代的开始</li> </ul>
1782	法国	拉普拉斯	<b>拉普拉斯方程</b> $\nabla^2 \varphi = 0$


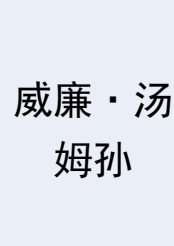
**吉尔伯特**指出**电和磁是两种不同现象**，使得电和磁的分立长期成为物理学家们的一个潜在认识。人们除了知道电和磁的作用都有吸引和排斥，而且都遵从平方反比律以外，更多的是看到它们之间的不同之处：

- ◆ **库仑**在18世纪末断言电流和磁流是两种完全不同的实体，它们不可能相互转化；
- ◆ **安培**在1802年宣称他愿意去“证明电和磁是相互独立的两种不同的实体”；
- ◆ **毕奥**1819年还坚持认为“不允许我们设想电与磁具有相同的本质”。

## 4.7 电生磁设想与证实

年代	国籍	姓名	主要成就
1724-1804	德国	康德	自然界不同物质运动形态是普遍联系的
1820	丹麦	奥斯特	1812-1820, 10年发现 <b>电流的磁效应</b> ，《电流对磁针作用的实验》
1820	法国	安培	安培定则、电流计、分子电流假说、 <b>安培定律</b> 、电动力学
1820	法国	毕奥 萨伐尔	<b>毕奥-萨伐尔定律</b> $B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Idl \times r}{r^3}$
1777-1855	德国	高斯	<b>高斯定理</b> $\oint_S A \cdot dS = \int_V \nabla \cdot A dV$
1781-1840	法国	泊松	<ul style="list-style-type: none"> <li>1813, <b>泊松方程</b> <math display="block">\nabla^2 \varphi = f</math></li> <li>1811, 建立电荷面密度与导体形状的关系, 导体表面曲率越大, 面电荷密度就越大</li> </ul>
1828	英国	格林	<ul style="list-style-type: none"> <li>格林把满足于拉普拉斯方程的函数称为“<b>势函数</b>”</li> <li><b>格林定理</b>: 曲面积分和体积分的一般关系</li> </ul>
1826	德国	欧姆	<b>欧姆定律</b> , $U=RI$

## 4.8 磁生电设想与证实:电气时代的曙光

年代	国籍	姓名	主要成就
1831	英国	<b>法拉第</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 他对安培的分子电流假说表示怀疑, 认为电和磁应该是相互作用中得到统一, 1822-1831, 10年时间, <b>电磁感应定律</b></li> <li>• 力线思想、发电机原理、变压器原理</li> </ul>
1843	—	威廉·汤姆孙 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1843, 导体内部的电力(电场)处处为零</li> <li>• 1845, 发明<b>电镜像法</b></li> <li>• 1851, 《磁学的数学理论》给出了磁场的定义, 推导了介质中磁场的特性, 并把磁场强度和具有通量性质的区别开来</li> <li>• 1853, 推出了<b>磁场的能量公式</b></li> <li>• 他对包含电感和电容的电路进行数学分析, <b>把电感和电容第一次引入欧姆定律</b>, 给出了电路振荡方程</li> <li>• 1854-1858, 海底电缆, 提出了第一个<b>电报方程</b></li> <li>• 1861, 温差电现象的汤姆孙效应</li> <li>• <b>麦克斯韦的导师</b></li> </ul>
1845	德国	诺埃曼	提出矢量势, 并运用安培电动力学推导出了法拉第电磁感应定律
1791-1872	美国	莫尔斯	电磁式电报机
1798-1895	—	纽曼	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 纽曼公式</li> <li>• 矢量磁位A</li> </ul>

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

## 4.9 电磁场统一方程，迈入电气文明时代

发展阶段	年代	国籍	姓名	主要成就
建立完整的电磁场统一方程	1831-1879	英国	麦克斯韦 	涡旋电场 位移电流 电磁波 麦克斯韦方程组
	1847-1922	美国	贝尔	电话机
	1847-1931	美国	爱迪生	留声机、电灯、电话、电报、电影
	1853-1928	荷兰	洛伦兹	经典电子论、洛伦兹力
	1855-1938	美国	霍耳	磁场霍耳效应
交流电力系统	1856-1943	美国	特斯拉	交流多相电力传输系统、感应电机
电磁波的证实	1857-1894	德国	赫兹	电磁波

## 目 录 Contents

- 1 任课教师及其电磁多物理场研究方向
- 2 电磁场课程在电气工程学科中的地位
- 3 电力系统中的电磁场
- 4 电磁场理论的发展简史
- 5 电磁场理论的核心构架



# 5.1 电磁学基本关系

“电磁场千变万化的形态存在，归根到底，是电荷的运动”。

1) **电荷**是所有电磁场形式的源头，在第二章中介绍；

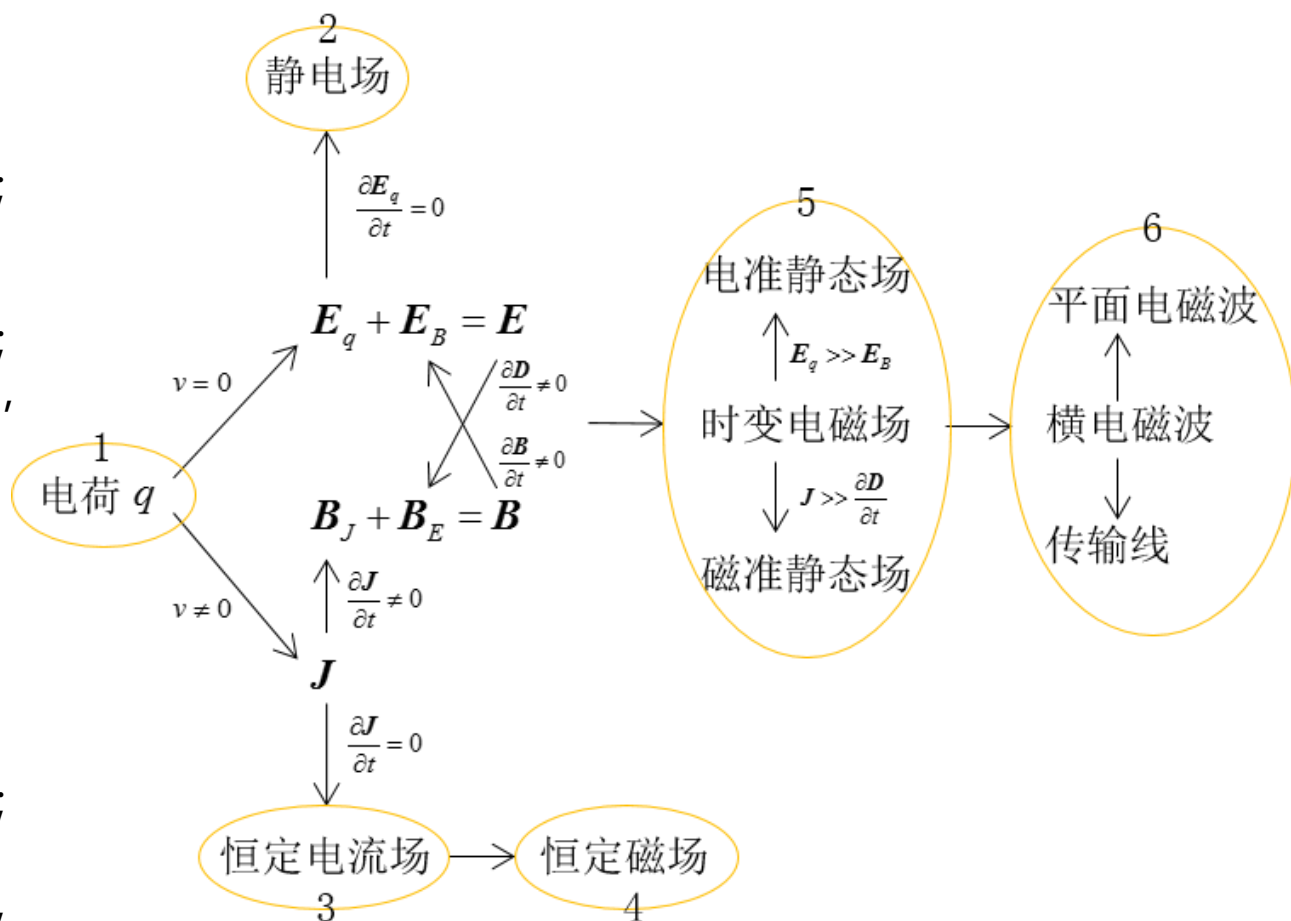
2) 相对于观察者静止且电荷量不变的静止电荷，形成**静电场**，在第三章中介绍；

3) 电荷的稳定定向运动，形成**恒定电流场**，在第四章中介绍；

4) 稳恒电流产生磁场，形成**恒定磁场**，在第五章中介绍；

5) 变化磁场激发电场，变化电场激发磁场，形成**时变电磁场**，在第六章中介绍；

6) 磁生电场和电生磁场的重复循环，形成了**电磁波**，在第七章中介绍。



- 1、写出梯度、散度、旋度算子的微分表达式，阐述其物理意义。
- 2、阐述高斯定理、斯托克斯定理及其物理意义。

The background of the slide features a photograph of a traditional Chinese building with a tiled roof and red window frames, partially obscured by white cherry blossoms. A horizontal blue line is positioned above the text.

本章讲授完毕

谢谢！

A horizontal blue line is positioned below the text.