



哈爾濱工業大學  
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

# 电动汽车无线充电技术 专题讲座

朱春波 教授

哈尔滨工业大学

[zhuchunbo@hit.edu.cn](mailto:zhuchunbo@hit.edu.cn); 13503602980

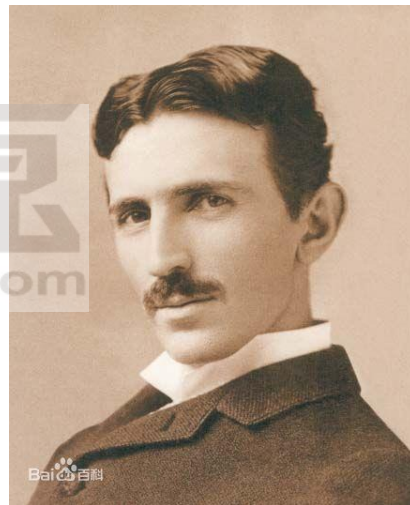


## 内 容

- 1、无线电能传输技术的历史与现状
- 2、无线电能传输技术的市场
- 3、电动汽车无线充电的价值
- 4、无线电能传输的12项关键技术
- 5、哈工大的无线电能传输技术简介

## 无线电能传输的鼻祖 —— 特斯拉

19世纪初，尼古拉-特斯拉设想通过无线方式为全球各地传送免费电能。他建造了沃登克里夫塔(Wardenclyffe Tower)，通过在地球与电离层之间建立起约8Hz低频共振，利用环绕地球表面的电磁波来实现能量传输。



尼古拉-特斯拉(1856-1943)

## 无线电能传输的鼻祖 —— 特斯拉



无绳气体放电灯



沃登克里夫塔

## 太空发电与微波输电 —— 人类解决能源问题的终极梦想

在太空用太阳能发电，采用微波向地面巨大的接受器提供电能，彻底解决地球的能源问题。

微波是波长介于无线电波和红外线辐射之间的电磁波。它能顺利通过电离层而不反射。宇宙空间是微波通过的理想媒介，通过大气层时的损耗仅为2%。



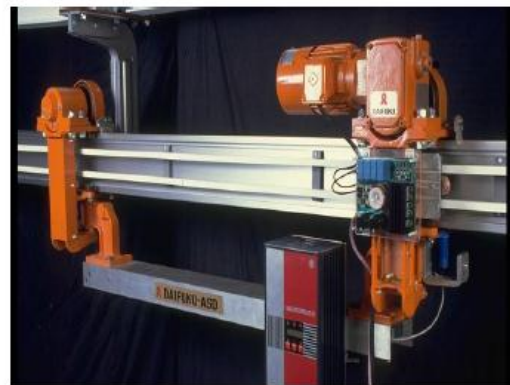
太空发电+微波输电

## 最早开展感应式无线供电技术的团队——奥克兰大学



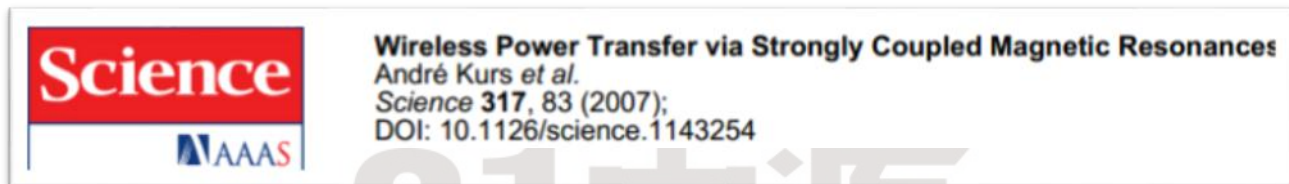
奥克兰大学功率2kW游览车

|               | Original System | Daifuku Prototype |
|---------------|-----------------|-------------------|
| Power rating  | 1W              | 400 W             |
| Efficiency    | <10%            | 85%               |
| # of Carriers | 1               | 3                 |
| Load          | 75 kg           | 250 kg            |
| Speed         | 0.1 m/s         | 1 m/s             |
| Track current | 80A             | 80A               |
| Track length  | 3 m             | 25 m              |
| Air-gap       | 2 mm            | 4 mm              |



奥克兰大学，早期研究的实验样机

## 近十年无线电能传输技术热潮的开端——MIT

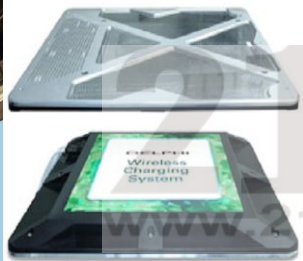


2007年，麻省理工学院（MIT）的马林·索尔贾希克教授使用磁耦合共振技术成功实现在2m内以40%的效率为60W灯泡供电，并在《Science》上发表其研究成果。



麻省理工学院(10MHz/2m/60W)

## 麻省理工学院与奥克兰大学技术的商业化



2007年，基于MIT技术成立的WiTricity公司，与Delphi公司联合研制了WiT-3300电动车感应充电系统，工作频率为145kHz，额定功率为3.3kW，气隙最大距离为20cm。



基于奥克兰大学成立的HaloIPT公司研发的电动车感应充电系统，工作频率为20kHz，额定功率为3kW，气隙最大距离为21cm。



## 国内的主要研究单位

国内，重大、哈工大、天津工大、东南大学、华南理工、华科、上交大、浙大、中科院电工所、西南交大、大连理工、南航、清华、南理工、同济、武汉大学、西交大、湖南大学、福州大学、国防科大香港大学等。

中兴新能源、海尔集团、新页电气、中惠创智、万安等公司在应用研究方面投入了大量精力。还有众多公司加入**WPC**，主要目的是生产**Qi**标准的产品。

在电工技术学会支持下，自**2011**年起，年年召开全国性学术会议。



2011年，学术沙龙，天津



2012年，中国科协年会，贵阳

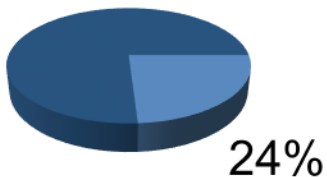
## 三大主流无线充电标准

三大联盟的会员数量（截止2015年10月22日）

### WPC

➤会员数量：221个

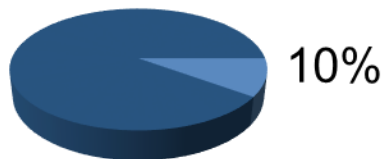
WPC会员分布



### PMA

➤会员数量：68个

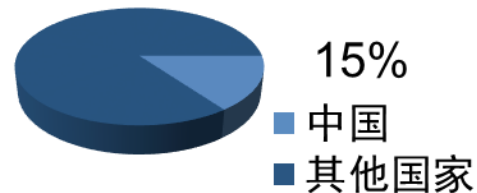
PMA会员分布



### A4WP

➤会员数量：153个

A4WP会员分布



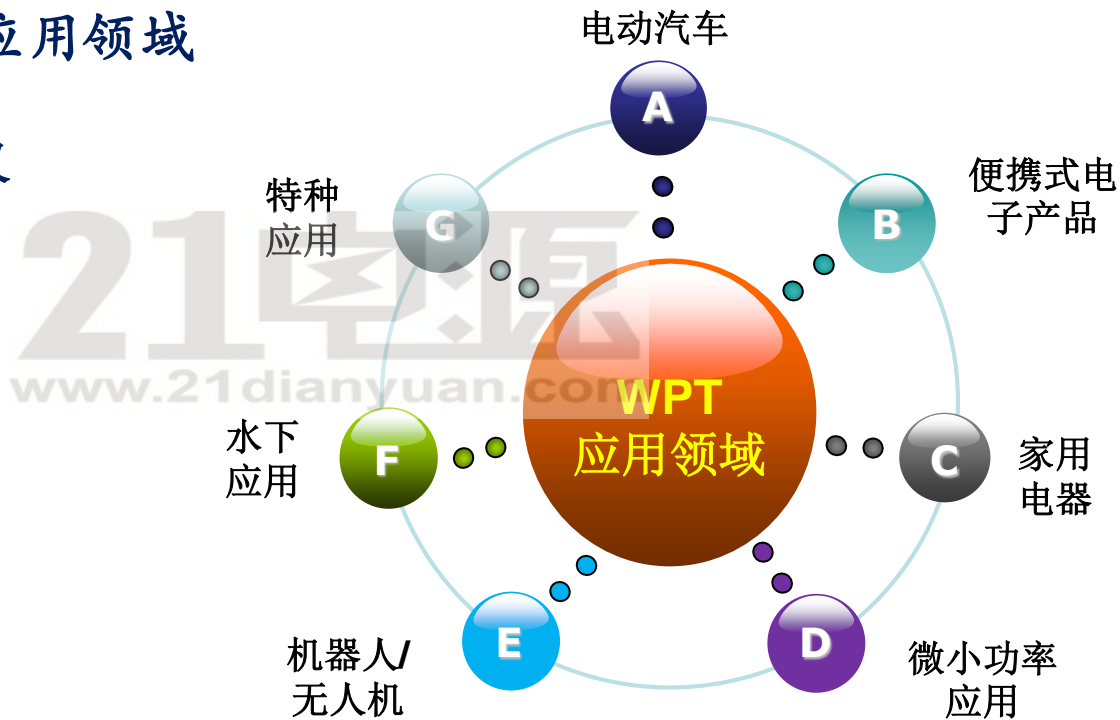
## 三大主流无线充电标准

| 联盟                              | 标准名称    | 发布时间 | 原理    | 频率          | 通信方式    | 距离     | 功率                   | 特点     | 其它                        |
|---------------------------------|---------|------|-------|-------------|---------|--------|----------------------|--------|---------------------------|
| Wireless Power Consortium (WPC) | Qi      | 2008 | 电磁感应  | 100-205 kHz | 2k 调制   | 小于 5cm | 5-15W<br>1.2版<br>2kW | 支持异物检测 | 已大规模应用，市场最大               |
| Power Matters Alliance (PMA)    | PMA     | 2012 | 电磁感应  | 277-357 kHz |         | 小于 5cm |                      |        | 尚未大规模应用<br>2015.6与 A4WP合并 |
| Alliance for Wireless (A4WP)    | Rezence | 2012 | 磁耦合谐振 | 6.78M Hz    | 2.4G 蓝牙 | 距离更远   | 小于 30W               | 可多接收端  | 2015.6与 PMA合并             |

## 无线电能传输技术应用领域

无线传能的意义  
与价值:

- 非接触、无线
- 全密封、安全
- 方便
- 自动化
- 解决有线无法解决的问题





- 静态无线充电
- 动态无线供电

**静态无线充电对电动公交车  
的意义与价值：**

**在站点补充电能，有效延长  
续驶里程；减小电池容量。**

## 德国 IPT Technology

- 频率：15~20KHz
- 距离：小于4cm
- 整体效率：超过90%
- 模块化设计，标准模块60KW



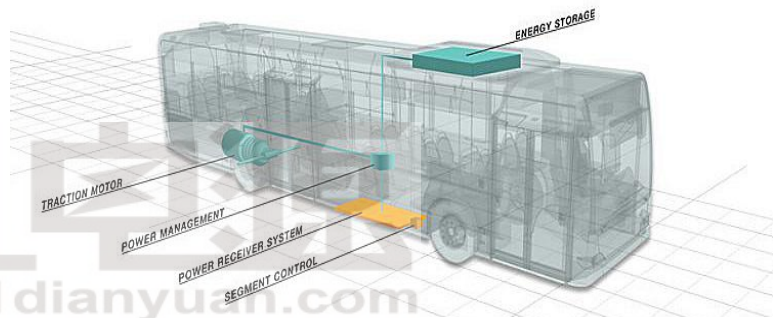
| 应用城市       | 年度   | 电池容量<br>(kWh) | 车身长度<br>(m) | 功率<br>(kW) | 巴士数量 |
|------------|------|---------------|-------------|------------|------|
| 意大利 热那亚    | 2002 | 63            | 7.5         | 60         | 8    |
| 意大利 都灵     | 2003 | 63            | 7.5         | 60         | 23   |
| 德国 罗拉赫     | 2005 | 63            | 7.5         | 60         | 1    |
| 荷兰 乌特勒支    | 2010 | 63            | 7.5         | 60         | 1    |
| 荷兰 斯海尔托亨博斯 | 2012 | 120           | 12          | 2*60       | 1    |
| 英国 米尔顿·凯恩斯 | 2014 | 150           | 9.5         | 2*60       | 8    |

## 德国 Bombardier Transportation

**BOMBARDIER**  
the evolution of mobility

**primove**  
true e-mobility

- 名称：PRIMOVE系统
- 功率：200KW
- 整体效率：超过90%



| 应用城市    | 年度   | 电池容量 (kWh) | 车身长度(m) | 功率 (kW) | 巴士数量 |
|---------|------|------------|---------|---------|------|
| 德国 布伦瑞克 | 2014 | 60         | 12      | 200     | 1    |
| 德国 布伦瑞克 | 2014 | 90         | 18      | 200     | 4    |
| 瑞士 日内瓦  | 2015 |            | 18.7    | 600     | 1    |



## 美国WAVE (犹他州立大学)



6.6m 校园巴士



12m 商用巴士

## 日本早稻田大学



2012年, 电池44KWh, 30KW,  
14cm, 92%, 1辆巴士

## 中国 中兴新能源

- 频率：45KHz
- 功率：30KW
- 距离：20cm
- 效率：超过90%



- 2014，湖北襄阳 大功率无线充电公交商用线路
- 2015，与比亚迪合作，无线充电中巴，并投入3辆进行运营



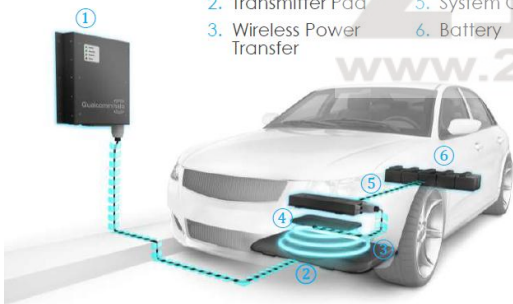
静态无线充电对电动轿车的  
意义与价值：  
操作方便、安全、自动化。



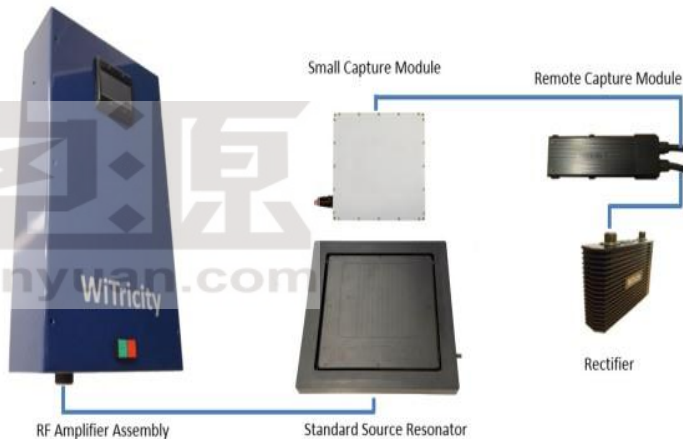
## Qualcomm 高通

Our Complete Solution

1. Power Supply
2. Transmitter Pad
3. Wireless Power Transfer
4. Receiver Pad
5. System Controller
6. Battery

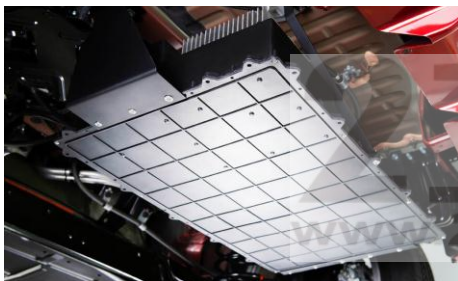


## Witricity



WiT-3300 开发套件  
FOD (异物检测)  
LOD (活体目标检测)

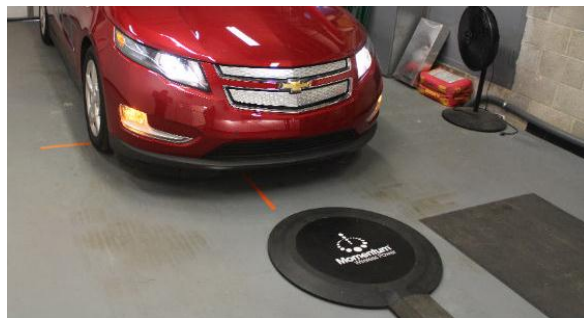
## Evatran



发射端



## Momentum Dynamics (MD公司)



Hella  
德国海拉公司



IISB 弗朗霍夫  
研究院 (德国)



ORNL 橡树岭实验室

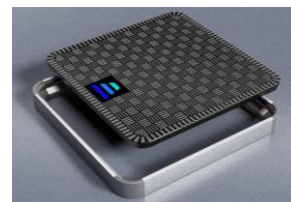


## Eaton公司



Powering Business Worldwide

## Tesla 特斯拉



# 静态无线充电 —— 轿车

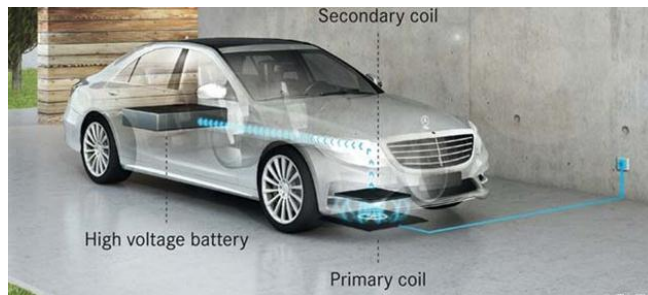
Audi 奥迪



BMW 宝马



Benz 奔驰





Volvo 沃尔沃



Volkswagen 大众



## NISSAN日产



## Toyota丰田



电动汽车动态无线供电：  
真正减少电池容量，延长续驶里程

www.21dianyuan.com

## 电动汽车最理想的供电方式：电网——车辆

有轨  
电车



无轨  
电车



## 人类的电车梦想 无线供电的公路



无电网区域-可再生能源



城市



高速公路



## 韩国 KAIST

### 应用实例——龟尾Gumi（韩国）

- 2013年，OLEV系统，分段导轨动态充电
- 路线总长：24km，充电段长度：路线总长的10~15%
- 功率100KW
- 巴士数量：2辆





**无线充电在工业领域的应用：**  
**提高自动化水平，实现无人值守**

## 德国 VAHLE



- 1999 年至今所研的CPS 产品已经成功地被应用到Skoda、Ford、BMW以及 Volkswagen 等公司
- 原边最大输出功率：10KW、45KW
- U型、E型、平板型拾取端
- 拾取端可并联使用
- 多种规格的CPS支持几乎所有的导引小车



| 型号   | CPS-PS-08 | CPS-PS-18          | CPS-PS-19          | CPS-PU-22          | CPS-PS-15          | CPS-PU-13          |
|------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 拾取类型 | 平板型       | 平板型                | 平板型                | E型                 | U型                 | U型                 |
| 传输功率 | 500W      | 2KW                | 3KW                | 22KW               | 900W               | 1350W              |
| 输出电压 | 24 VDC    | 560 VDC<br>&24 VDC | 560 VDC<br>&24 VDC | 560 VDC<br>&24 VDC | 560 VDC<br>&24 VDC | 560 VDC<br>&24 VDC |
| 最大偏移 | +/- 20 mm | +/- 10 mm          | +/- 10 mm          | +/- 15 mm          | +/- 6.5 mm         | +/- 6.5 mm         |





## 德国CONDUCTIX-WAMPFLER



平板型拾取端  
750W / 2.5KW

E型拾取端  
750W / 4KW

## 德国 SEW



平板型拾取端1.5KW



U型拾取端0.9KW

## MOVITRANS系统

新松公司

**SIASUN**



非接触供电移动机器人

**WIBOTIC**



无人机悬停无线充电



在厨房电器中的应用：

安全、整洁、方便

## PHILIPS



2015, Qi标准, 无线料理机,  
距离: 大于3cm, 功率: 2KW

## Haier



无线供电电饭煲  
功率760W



无线供电搅拌机  
功率380W



无线充电的家具产品，Qi标准



MOTO 360 二  
代智能手表，Qi  
标准，1W

WiTricity



WiT-5000C3套件, Rezence  
标准, 6.78MHz, 最大功率:  
13W, 多设备充电

Qi-infinity



超薄无线充电板, Qi标准

powermat®

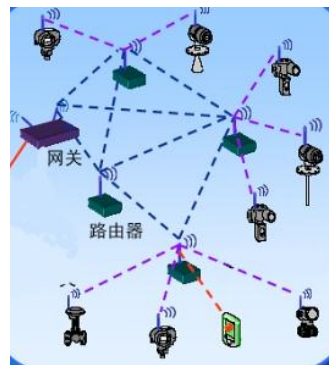
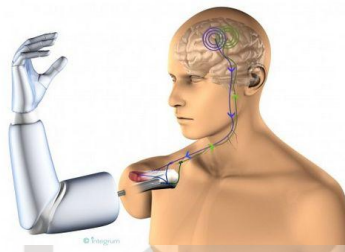


无线充电环，PMA标准，  
在美国和英国多家星巴克咖  
啡店中安装无线充电站



WiCC充电卡，PMA标准，  
插入智能手机电池旁

- 接收端小功率，
  - 植入式医疗
  - 无线传感器网络
  - 可穿戴式设备
- 特点：
  - 接收端微型化





- 机器人真正全自动化



民用机  
器人



军用机  
器人



AGV

水下设备的非接触充电：

- 水下机器人
- 水下武器
- AUV, UUV (无人水下航行器)



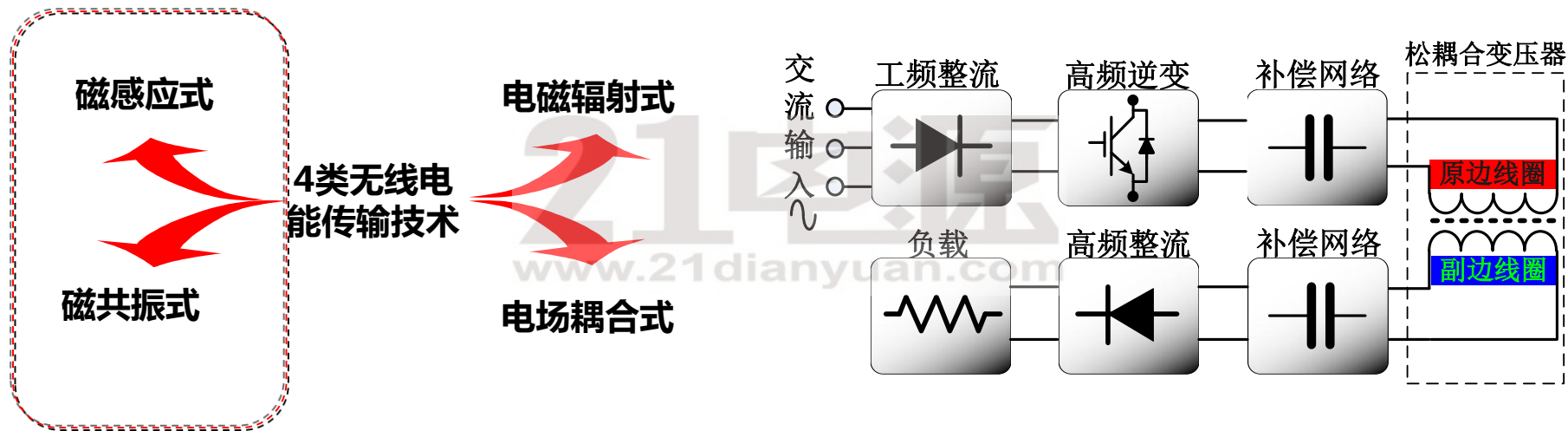
- 在一些无法用直接传导供电的场景，如：
  - 油田测井，在泥浆中的供电
  - 大型旋转设备上的小型设备供电
  - 防爆环境，无触点暴露





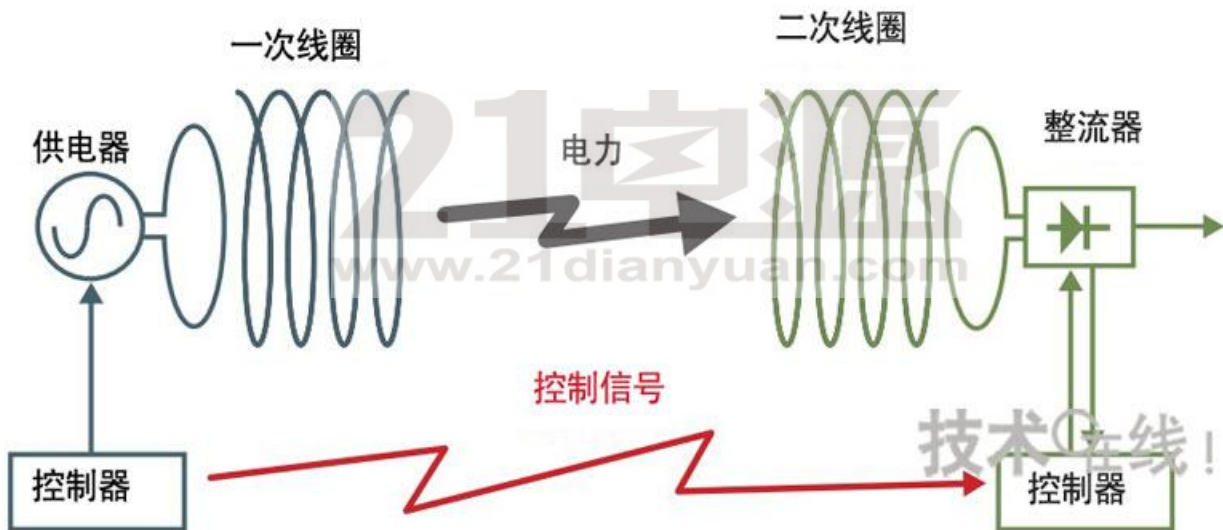
- 1、理论体系与分析方法
- 2、耦合机构设计
- 3、拓扑结构
- 4、软开关技术
- 5、品质因数提升
- 6、高频阻抗匹配
- 7、负载识别
- 8、异物检测
- 9、原边功率稳定性控制
- 10、副边功率输出控制
- 11、屏蔽技术
- 12、能量与信息同步传输

## 无线电能传输分类及原理

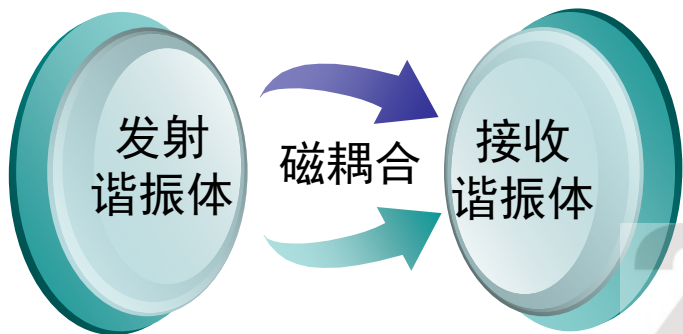


典型磁耦合无线电能传输系统结构框图

## 磁共振无线电能传输原理



# 1、理论体系分析与方法



系统需求

距离

尺寸

功率

重量

效率

动/静

接收端  
发射端  
设计

体积要求

线圈参数

特殊材料

工作频率

电磁兼容

仿真

数学  
模型

等效参数：电感，电容等

拓扑结构：并联，串联，混联

关键参数：耦合系数品质因数

传输  
性能

传输效率（动态，静态）

传输功率（负载，侧移）

参数扰动性

# 1、理论体系分析与方法





## 2、磁耦合机构优化设计



## 2、磁耦合机构优化设计

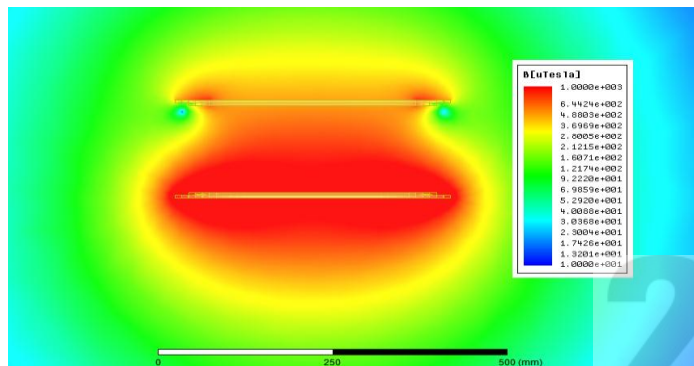


图1 无磁芯

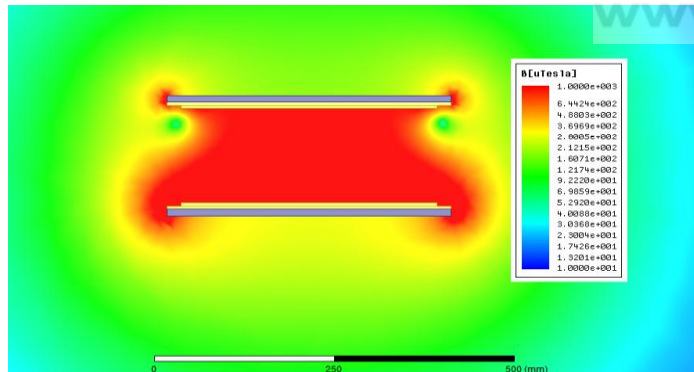


图2 平板磁芯

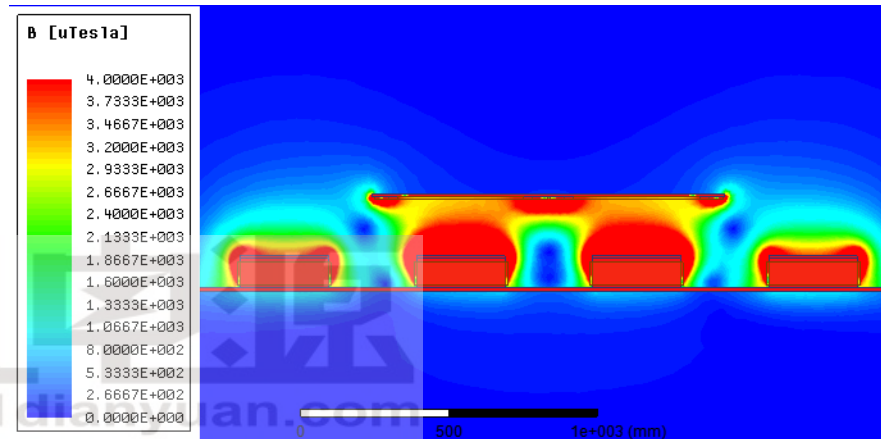
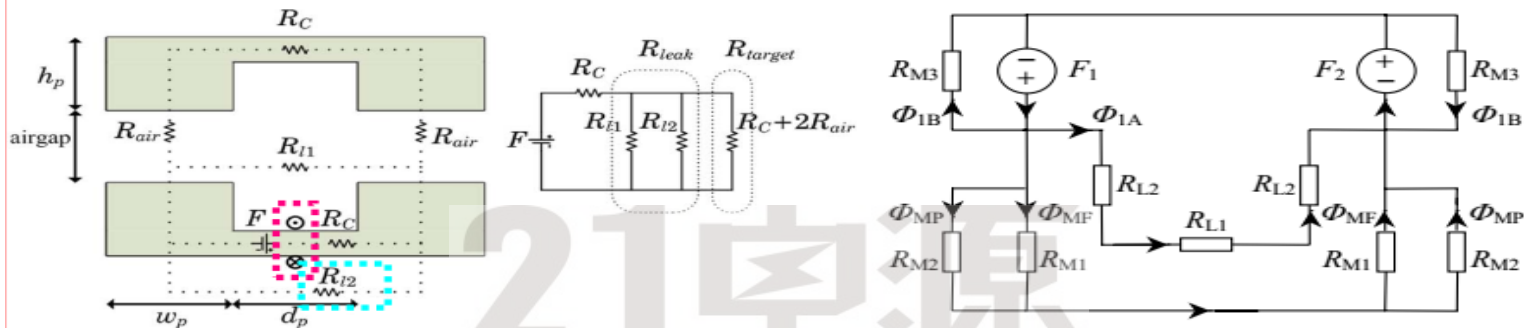


图3 窄导轨磁芯（动态WPT系统）

- 对比分析图1与图2，磁芯具有磁场塑形作用，有效减小磁耦合机构周围磁场分布范围；
- 采用平板磁芯结构的线圈电感值与互感值比无磁芯情况提升一倍。

## 2、磁耦合机构优化设计

### ➤ 常用磁路模型



通过磁路建模与有限元软件仿真分析，建立磁耦合机构参数与系统电气参数之间的函数模型。以效能与结构作为优化目标：功率密度高及电磁兼容性好。

### ➤ 常用仿真软件



### 3、谐振拓扑技术

#### 难点

负载对系统输出特性要求不同

外界扰动对系统输出的影响

#### 方法

谐振拓扑等效电路分析

系统高次谐波分析

低频阻抗匹配

多参数扰动分析

#### 重要性

实现电源与负载的阻抗匹配

满足不同负载对系统输出特性的要求

提升系统传输功率及效率

提升系统稳定性

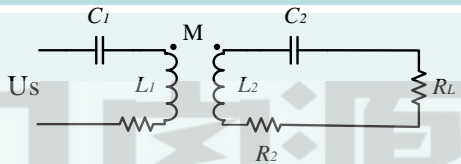
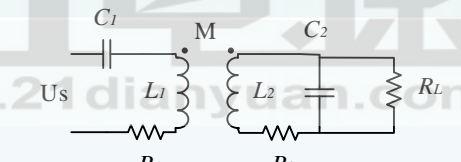
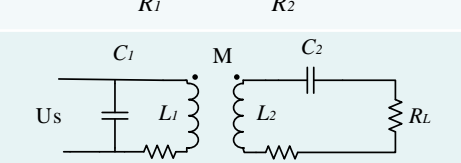
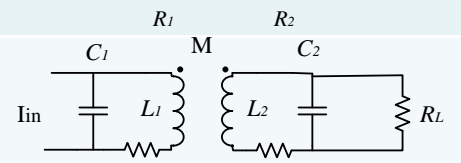
关键技术3  
谐振拓扑技术

#### 选取原则

根据负载供电需求及系统阻抗匹配要求等

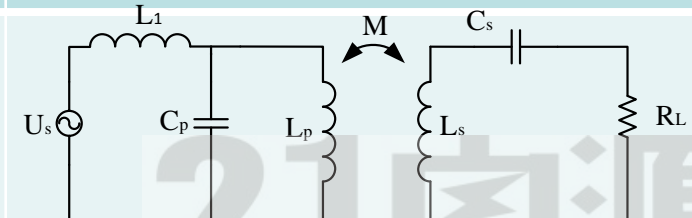
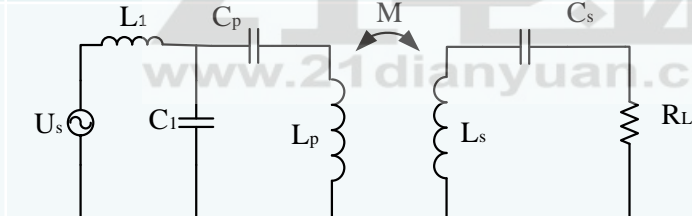
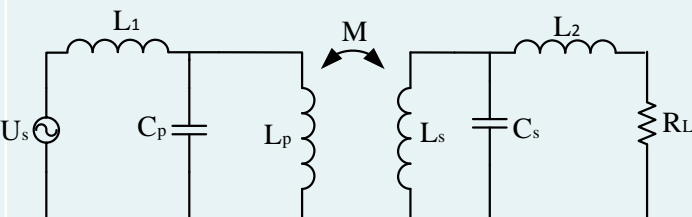
### 3、谐振拓扑技术

#### 四种经典谐振拓扑及特性

| 拓扑名称        | 电路结构  | 典型特性                      |
|-------------|---|---------------------------|
| 串联-串联 (S-S) |   | 输出呈电流源特性，适合于恒流充电场合，空载特性差。 |
| 串联-并联 (S-P) |   | 输出呈电压源特性，适合于恒压充电场合，空载特性差。 |
| 并联-串联 (P-S) |   | 适合电流源驱动，空载特性好，发射回路稳定性差。   |
| 并联-并联 (P-P) |  | 输出呈电压源特性，空载特性好，系统稳定性差。    |

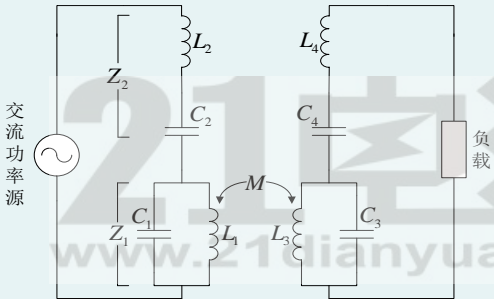
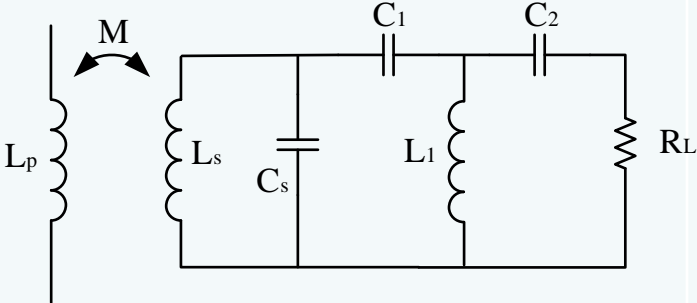
### 3、谐振拓扑技术

#### 几种复合谐振拓扑及应用

| 拓扑名称    | 电路结构  | 典型应用                                |
|---------|---|-------------------------------------|
| LCL-S   |   | 原边具有恒流源特性，空载特性好，常应用于多负载或负载工况较复杂的场合  |
| LCC-S   |   | 特性同LCL-S拓扑，增加的电容使系统参数设计更加灵活         |
| LCL-LCL |  | 原副边同时具有恒流源特性，常应用于输入电压和负载所需电压相差不大的场合 |

### 3、谐振拓扑技术

#### 几种复合谐振拓扑及应用

| 拓扑名称             | 电路结构  | 典型应用   |
|------------------|---|--|
| SP-SP            |   | SP复合谐振具有3个谐振点，在原副边同时应用SP复合谐振适合电能和信息双向同步高速无线传输的场合 |
| 原/副边Parallel T结构 |  | 用于提升远距离、弱耦合情况下电能无线传输功率和传输效率                      |

## 4、软开关技术



### 难点

负载参数变化对  
软开关有影响

随品质因数提  
高而易于失效

### 方法

高频逆变电压超前  
或滞后电流实现关  
断或开通ZVS/ZCS  
(相位跟踪)

谐振点跟踪 (ZPA)

相移法ZVS/ZCS

负载网络调节

### 重要性

降低开关管应力  
及开关损耗

提升效率

提升稳定性

提高开关频率

提高功率密度

降低电磁辐射

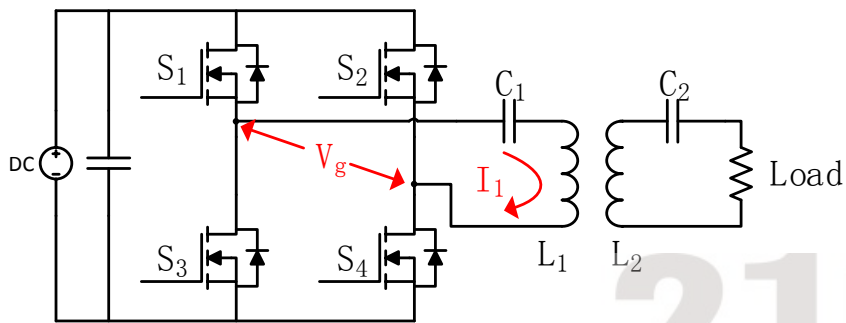
关键技术4  
软开关技术

### 选取原则

结合拓扑结构频  
率与功率等级



## 4、软开关技术



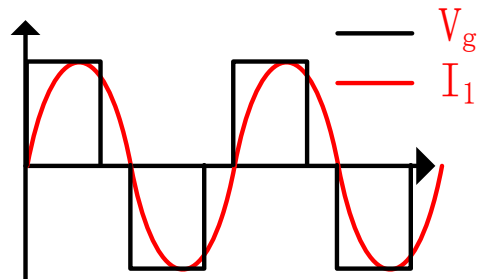
单级结构

优点：单级结构，系统结构简单。

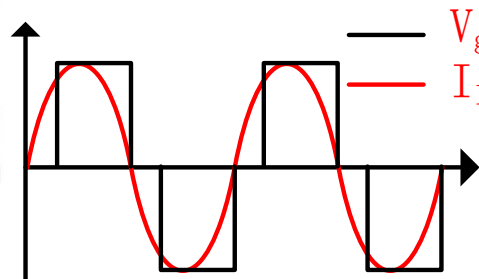
缺点：适用于相位跟踪方式实现软开或软关，无法同时实现软开关，无功分量，系统控制复杂。

控制方式：满占空比调频； PWM相位跟踪；移相相位跟踪。

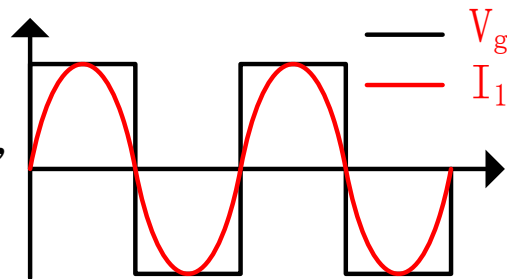
软“开”



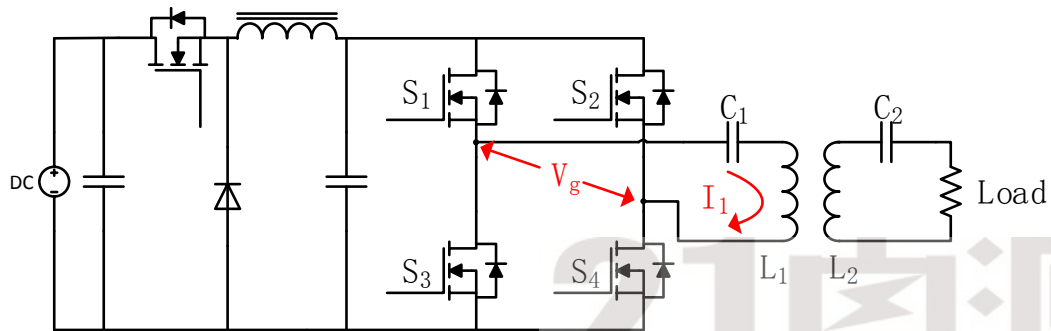
软“关”



软“开关”



## 4、软开关技术

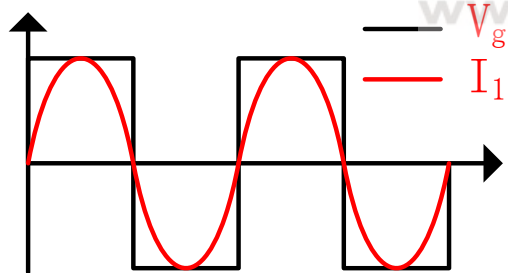


### 两级结构

优点：可同时实现软“开关”，无功分量小，逆变效率高，系统控制简单。

缺点：级数增加，系统复杂度增加。

控制方式：谐振点跟踪，相位跟踪。



软“开关”

## 5、品质因数提升技术

### 难点

选频特性

高频效应影响

近距离传能矛盾

材料因素

环境因素

### 重要性

远距离传能的必要条件

系统损耗的衡量标准

**关键技术5**  
**品质因数提升技术**

### 方法

合理选择磁性材料及线材

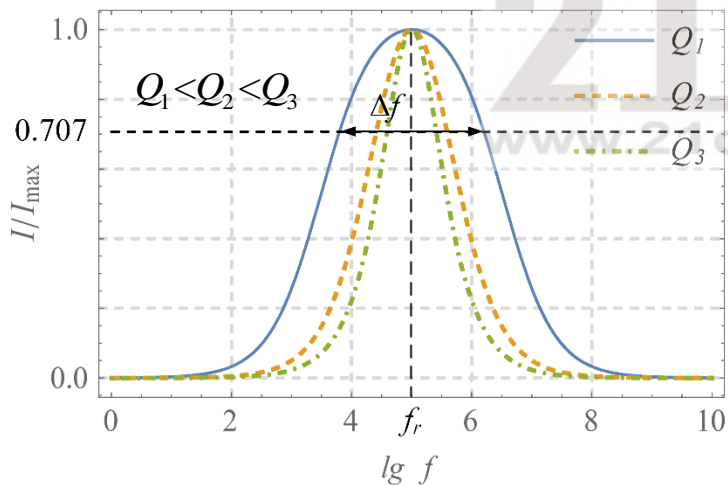
分布参数

磁屏蔽

## 5、品质因数提升技术

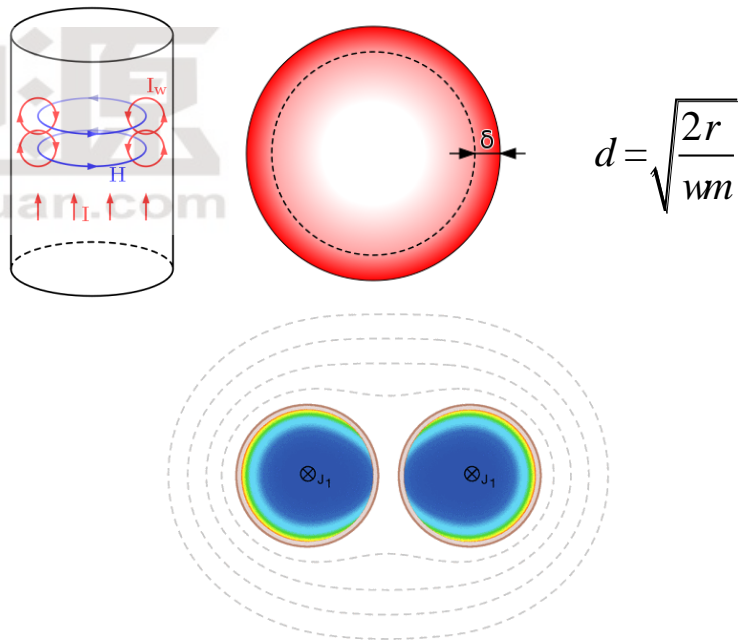
➤ 对谐振电路或储能器件，品质因数定义为

$$Q = 2\pi \times \text{谐振频率} \times \frac{\text{系统储能}}{\text{功率损耗}}$$



谐振电路品质因数与选频特性

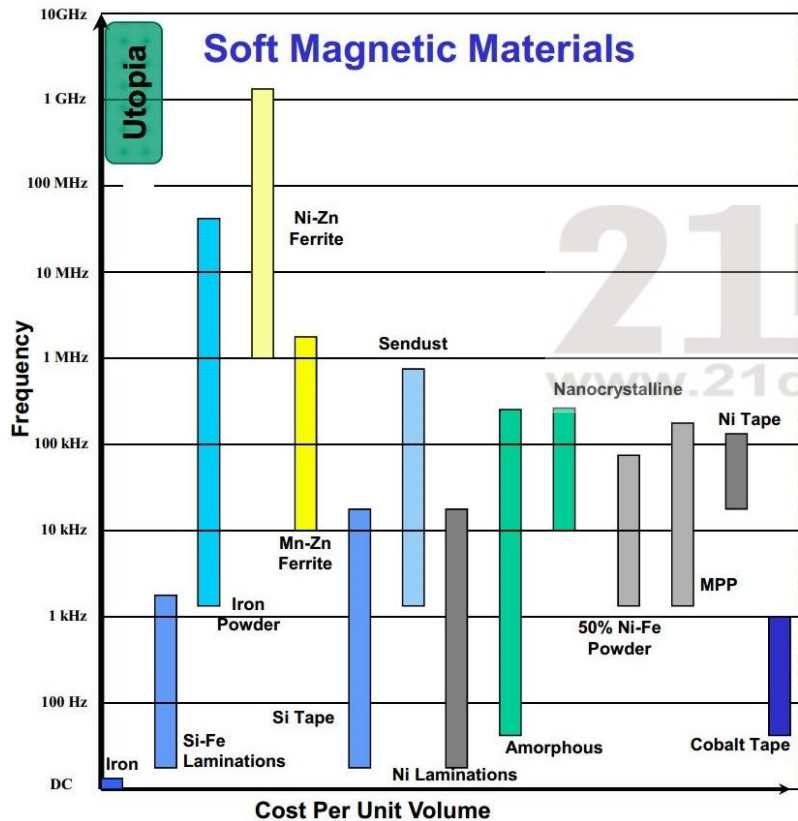
➤ 频率较高场合下，趋肤（集肤）效应与邻近效应会引起交流内阻增大，导致功率损耗增加。



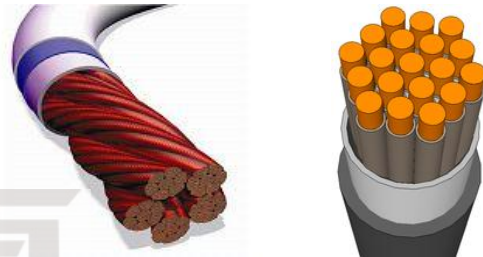
$$d = \sqrt{\frac{2r}{\omega \mu}}$$

## 5、品质因数提升技术

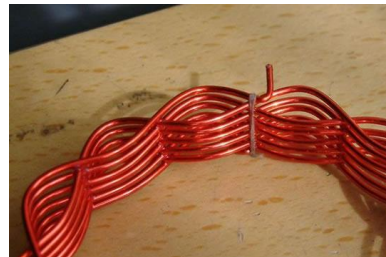
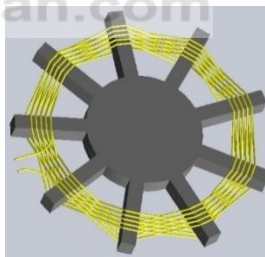
- 选择合适磁性材料，减少线圈匝数



- 采用多股绝缘线，减小趋肤与邻近效应



- 采用交叉绕制方法，减小线圈分布参数



- 采用优质高频材料做骨架，减小介质损耗
- 优化线圈周围环境布局，减小环境损耗

## 6、高频阻抗匹配技术

### 重要性

能量传输效率  
的重要保障

提升系统稳定  
性

提升系统的负  
载适应性

为驱动源软开关  
提供技术保障

### 应用条件

负载存在参数变化

关键技术6  
阻抗匹配技术

### 方 法

动态调节电容矩阵

系统频率调节

DC/DC变换

中继调节

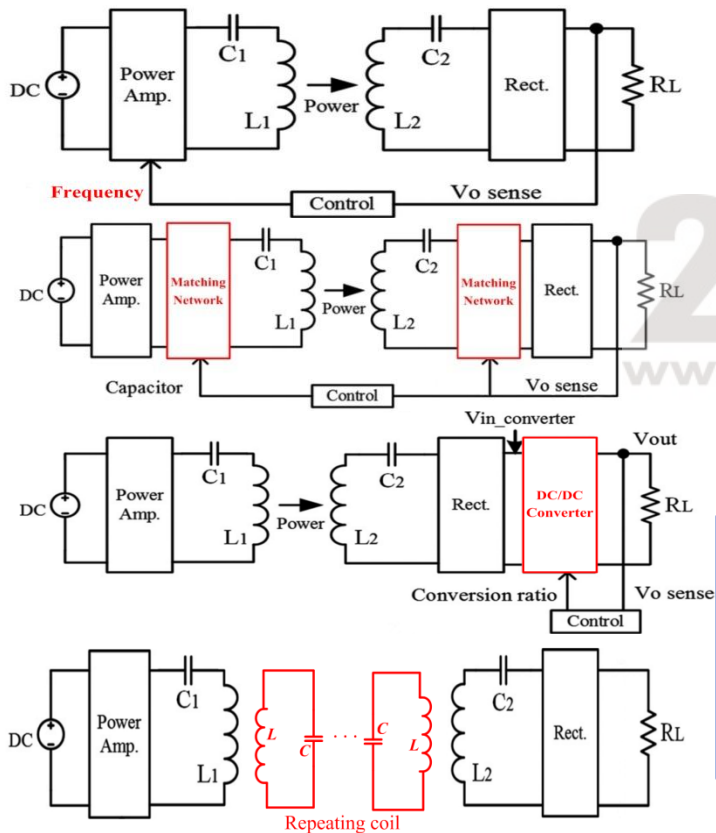
### 难 点

需随线圈位置及距离  
变化而自动调节

阻抗调节范围有限

# 6、高频阻抗匹配技术

## 常用高频阻抗匹配方法 ( MHz )

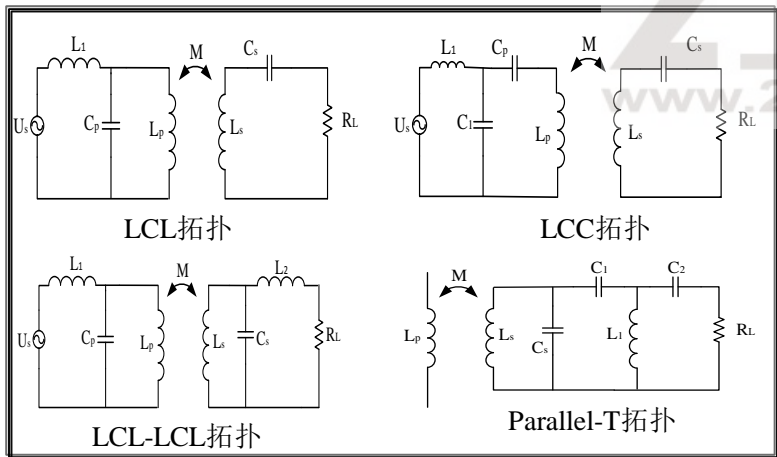
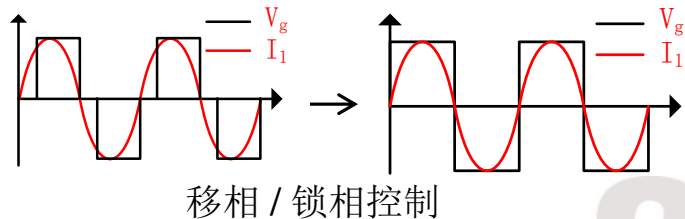


| 匹配方法    | 作用       | 优点           | 缺点                 |
|---------|----------|--------------|--------------------|
| 系统调频    | 变频调节系统阻抗 | 控制简单         | 传输效率低, 系统失谐, 匹配范围窄 |
| 无源网络    | 最大功率输出   | 可靠性高, 匹配范围可控 | 系统体积大, 控制精度低       |
| DC/DC变换 | 负载阻抗变换   | 阻抗调节精度高      | 阻抗, 控制复杂           |
| 中继调节    | 负载阻抗变换   | 配置灵活, 调节范围宽  | 受相对位置影响            |

- ✓ **高频阻抗匹配** 目标在于系统无反射功率, 使系统达到满足负载要求的最大功率输出。并保证能量传递过程的最大效率。
- ✓ **低频阻抗匹配** 无需考虑系统反射, 追求某项恒定参数而进行的系统参数匹配。例如系统效率最高时的恒流或恒压输出。

# 6、高频阻抗匹配技术

## ➤ 低频阻抗变换方法



复合谐振阻抗变换网络

| 匹配方法     | 高频 | 低频 |
|----------|----|----|
| 移相控制     |    | ✓  |
| 复合谐振拓扑网络 |    | ✓  |
| 系统调频     | ✓  | ✓  |
| 无源网络     | ✓  |    |
| DC/DC变换  | ✓  | ✓  |
| 中继调节     | ✓  | ✓  |



# 7、负载识别技术



| 通信技术      | 蓝牙、zigbee | Wifi | DSRC | WiMAX | 卫星通信  | 磁通信    |
|-----------|-----------|------|------|-------|-------|--------|
| 最大通信距离/km | <0.1      | <0.1 | <1   | <50   | >1000 | <0.01  |
| 传输速率/Mbps | <1        | <100 | <27  | <70   | >100  | <13.56 |
| 延迟        | 大         | 大    | 非常小  | 大     | 非常大   | 小      |
| 成本        | 低         | 低    | 中    | 高     | 低     | 低      |



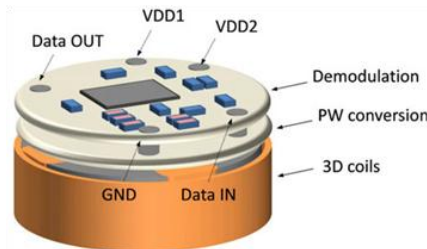
Zigbee模块



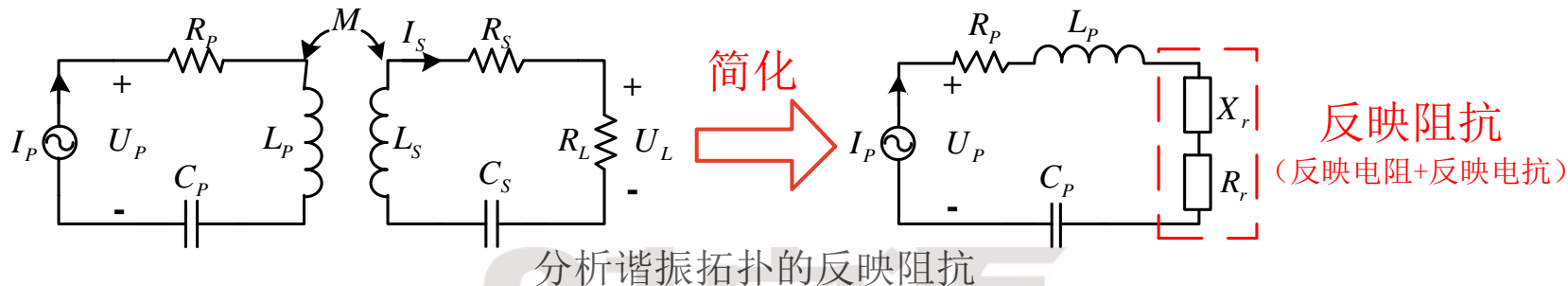
Wifi模块



DSRC设备



磁通信模块



| 负载识别策略                   | 优点        | 缺点              |
|--------------------------|-----------|-----------------|
| 测量发射有功功率，计算反映阻抗          | 结构简单，准确度高 | 难识别互感、负载阻值等详细信息 |
| 测量发射端电压电流相位差，计算负载阻值      | 识别速度快     | 只能应用于特定谐振拓扑     |
| 测量谐振电容电压、线圈电流等，计算互感和负载阻值 | 能识别负载详细状态 | 只能应用于特殊谐振拓扑     |

## 8、异物检测技术

重要性

效率

安全性

研究内容

金属异物检测

生物异物检测

主要方法

异物检测线圈

互电容检测

雷达检测

机器视觉检测

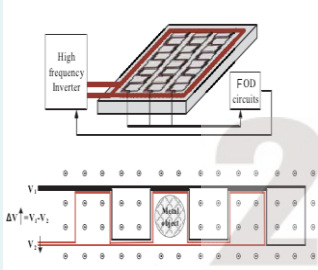
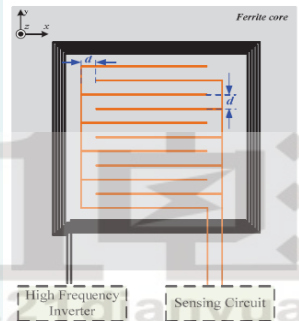


关键技术8  
异物检测技术

难点

小金属异物检测  
准确性快速性

成本与集成性

# 8、异物检测技术

| 主要方法        | 异物检测线圈  | 互电容检测  | 雷达检测  | 机器视觉检测  |
|-------------|---|--|---|---|
| <p>图示</p>   |  |  |  |  |
| <p>原理简介</p> | <p>利用异物对两个检测线圈的磁通量和感应电压差的影响检测异物</p>   | <p>利用活体生物对发射端表面检测电容的影响检测活体异物</p>   | <p>调频连续波雷达通过测量发射信号与回波信号的频率差来检测异物</p>  | <p>利用图像处理算法，与无任何异物时的场景比较，从而提取出异物</p>  |

## 8、异物检测技术

| 主要方法 | 异物检测线圈 | 互电容检测 | 雷达检测 | 机器视觉检测 |
|------|--------|-------|------|--------|
| 结构   | 简单     | 简单    | 复杂   | 复杂     |
| 功耗   | 无      | 低     | 高    | 高      |
| 灵敏度  | 高      | 一般    | 高    | 高      |
| 集成度  | 高      | 高     | 低    | 低      |
| 成本   | 低      | 低     | 高    | 高      |

## 9、原边功率稳定性控制



### 技术难点

#### 研究背景

负载动态变化

互感动态变化

系统参数漂移

1. 逆变器输出功率不稳定；
2. 系统谐振状态不稳定；
3. 逆变器软开关特性受影响。

#### 优化方法

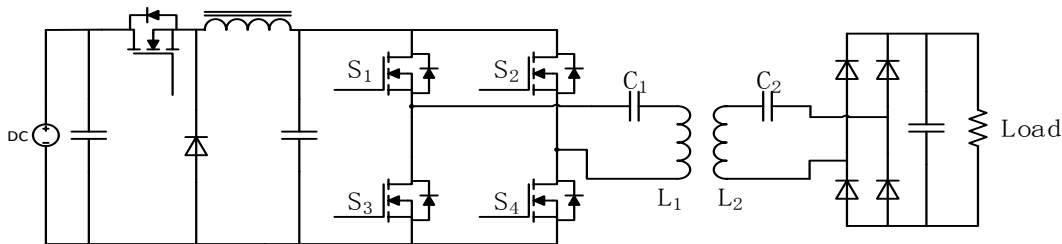
1. 锁相环控制
2. 频率调节

#### 控制目标

稳定且可靠的原边功率输出

## 9、原边功率稳定性控制

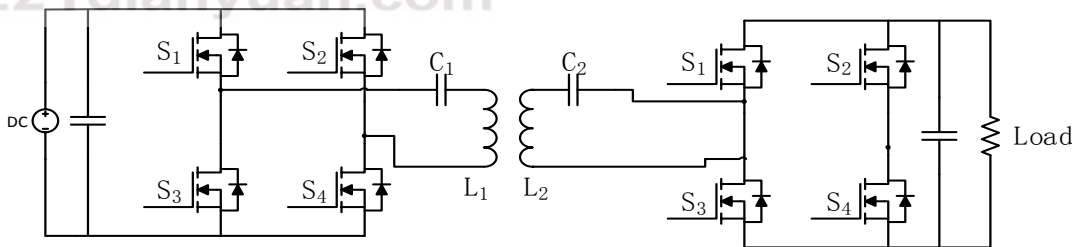
系统结构之一：  
原边全桥逆变频率跟踪  
+dc-dc变换器调功



优点：副边无需控制，系统处于  
谐振状态

缺点：需要原副边通信，系统调节  
速度慢

系统结构之二：  
原边全桥逆变锁相环控制  
+副边可控整流调功



优点：原副边结构对称，可应用于V2G，原副边无需通信

缺点：系统处于非谐振状态  
系统谐振与软开关冲突



## 评价标准

控制稳定性

响应快速性

系统鲁棒性

## 重要性

动力电池组寿命及安全性

功率输出稳定性及可靠性

关键技术10

副边功率输出控制

## 难点

负载动态变化

互感动态变化

## 控制策略

原边控制

副边控制

原副边协同控制

## 控制目标

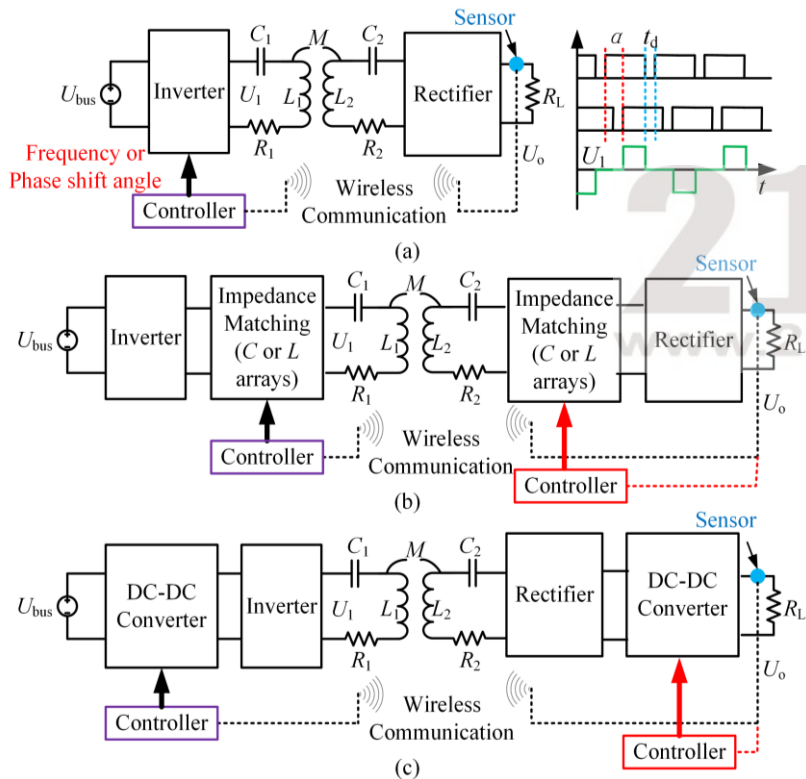
恒压/恒流充电

高系统效率

低硬件成本

# 10、副边功率输出控制

## 常用控制策略概述

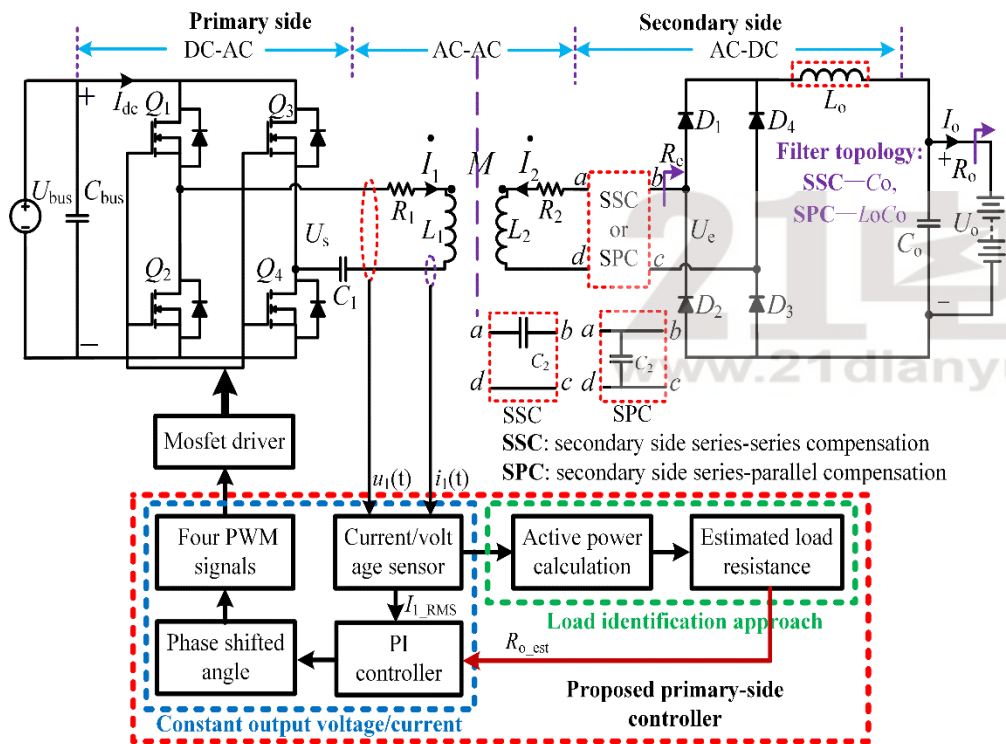


| 控制策略     | 优点          | 缺点          |
|----------|-------------|-------------|
| DC/DC控制  | 控制精度高，调节范围宽 | 系统效率较低，体积大  |
| 移相控制     | 无需额外电路，成本低  | 控制复杂，软开关问题  |
| 谐振补偿网络控制 | 能够以最大功率传输   | 系统体积大，控制精度低 |
| 调频控制     | 成本低，控制简单    | 功率调节范围窄     |

- ✓ **副边控制** 无需无线通信，不足在于需增加额外的接收端电路，通常适用于多负载充电场合。
- ✓ **原边控制** 需要无线通信，需特别注意系统响应速度和稳定性问题。

# 10、副边功率输出控制

## ➤ 基于无通信方式的新型原边控制策略



### 技术难点:

- 1、避免双边无线通信;
- 2、接收端结构紧凑;
- 3、恒流/恒压充电需求。

### 解决方案:

通过原边移相控制发射线圈谐振电流的串串/串并补偿结构WPT系统。

$$SS: I_{1\_RMS} \approx \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{\omega M} U_o = \beta U_o = \beta I_o R_o$$

$$SP: I_{1\_RMS} \approx \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{L_2}{M} I_o = \gamma I_o = \gamma \frac{U_o}{R_o}$$

## 重要性

### 指标

安全应用的基础

产品推广的前提

评价标准

安全标准

生物体影响

对系统自身影响

性价比

关键技术11  
屏蔽技术

### 方法

高低频被动屏蔽

主动屏蔽

降低工作频率

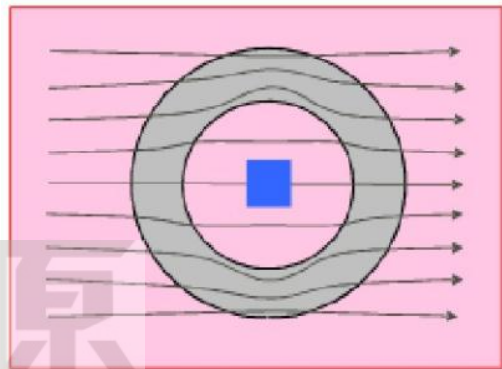
### 难点

实现完全磁屏蔽困难

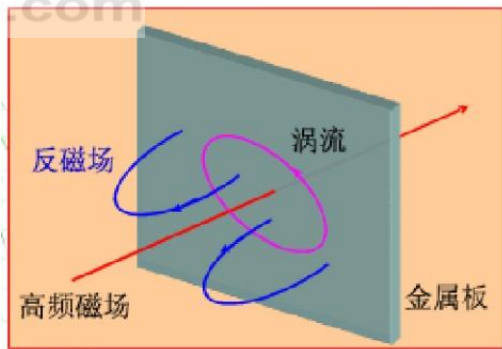
屏蔽材料对系统影响

## 高低频被动屏蔽

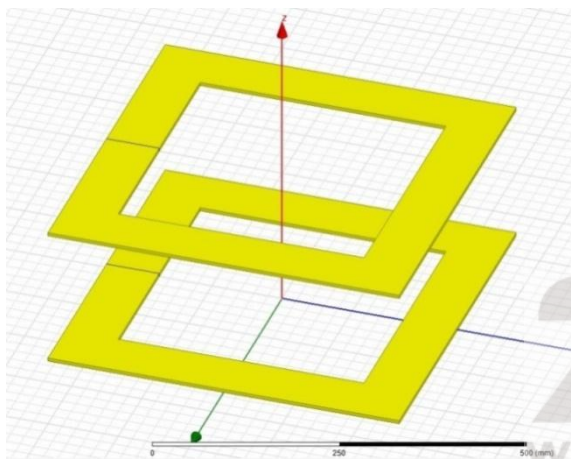
低频被动屏蔽，利用高磁导率的铁磁性材料，对空间磁场进行“塑形”，引导系统磁通远离人体或敏感元器件所在位置。



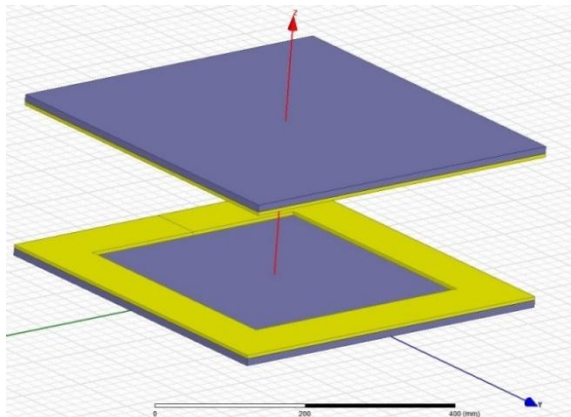
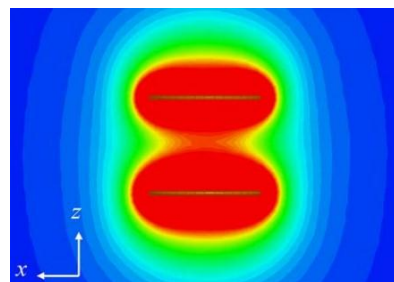
高频被动屏蔽，利用金属导体的涡流效应，产生与源磁场反向的抵消磁场，对高频磁场抑制更明显。



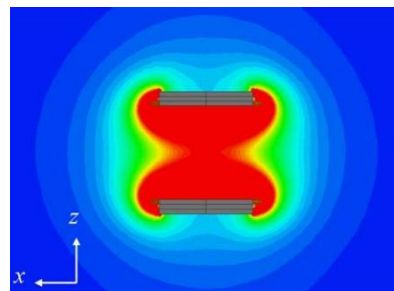
# 11、屏蔽技术



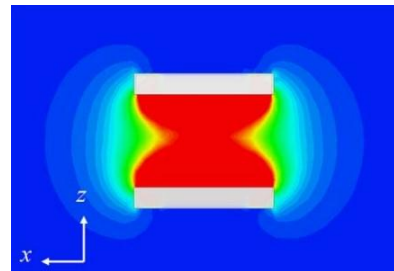
Only coil



With core



With core & aluminum



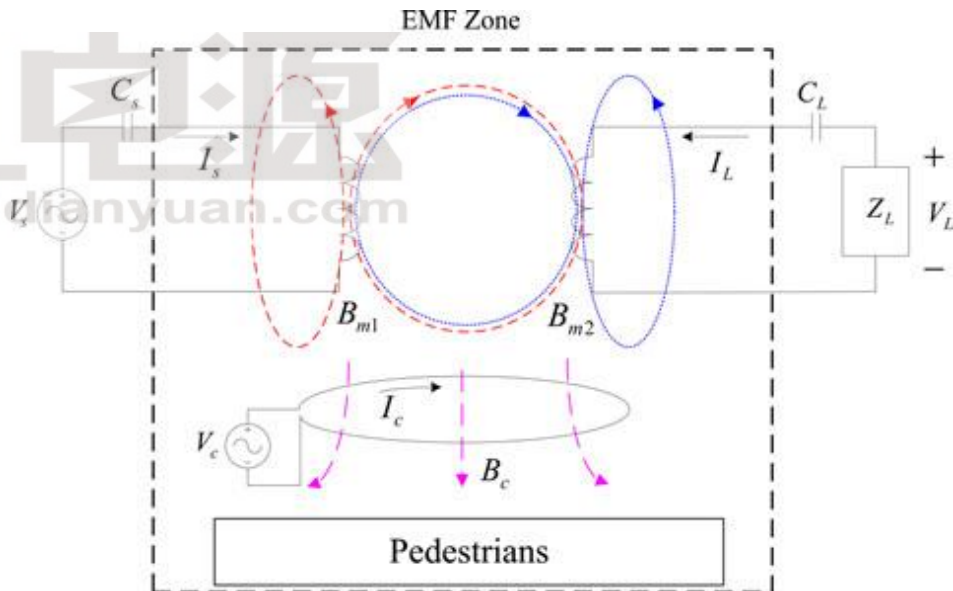
## 主动屏蔽

近年来的研究热点之一。引入主动屏蔽线圈，通过控制产生的磁场方向和大小，以抵消源磁场。相比于被动屏蔽具备一系列优点。

耗材少、空间小、性价比高

存在少量线损、整体损耗极少

理论上可实现完全屏蔽





国际非电离辐射防护委员会 (ICNIRP)



World Health Organization

Europe-EN 62233: 2008



| 频率范围       | 电场强度(kV/m)               | 磁场强度(A/m)             | 磁通密度(T)                |
|------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|
| 25~50Hz    | $5$                      | $1.6 \times 10^2$     | $2 \times 10^{-4}$     |
| 50~400Hz   | $2.5 \times 10^{-2} / f$ | $1.6 \times 10^2$     | $2 \times 10^{-4}$     |
| 400Hz~3kHz | $2.5 \times 10^{-2} / f$ | $6.4 \times 10^4 / f$ | $8 \times 10^{-2} / f$ |
| 3kHz~10MHz | $8.3 \times 10^{-2}$     | 21                    | $2.7 \times 10^{-5}$   |



《电磁辐射防护规定》（GB8702-88）对公众照射限值有如下规定

| 频率范围(MHz) | 电场强度(V/m)     | 磁场强度(A/m)       | 功率密度(W/m <sup>2</sup> ) |
|-----------|---------------|-----------------|-------------------------|
| 0.1~3     | 40            | 0.1             | 40                      |
| 3~30      | $67/\sqrt{f}$ | $0.17/\sqrt{f}$ | $12/f$                  |
| 30~3000   | 12            | 0.032           | 0.4                     |
| ...       |               |                 |                         |

2017年，《电动汽车无线充电系统电磁环境限值与测试方法》（征求意见稿）发布。规定电动汽车无线充电系统对人体的电磁场限值应满足ICNIRP导则的相关要求，并针对85kHz频率做了进一步说明：

- 1、规定了以车内前后座为中心的保护区域
- 2、对于85kHz，电场和磁场的公众曝露参考值分别为83V/m和27 $\mu$ T
- 3、对于85kHz，接触电流的公众曝露限值为17mA

# 12、能量与信息同步传输技术

## 重要性

闭环控制

水下通信

地下通信

封闭环境通信

## 难点

信道带宽窄、信道容量小；信号干扰；信号双向传输。

**关键技术12**  
能量信息同步  
传输技术

## 解决方法

多谐振点  
复合型收发结构

信号扩频、数据冗余

接收端非阻性调制

频率分割、空间分割、时间分割

# 12、能量与信息同步传输技术

## 1. 多谐振点复合型收发结构

利用其固有的双谐振特性，低频传能，高频传信息。

优点：传递能量的同时，也能传递控制指令、反馈系统状态等；

缺点：能量传输效率受负载影响大。

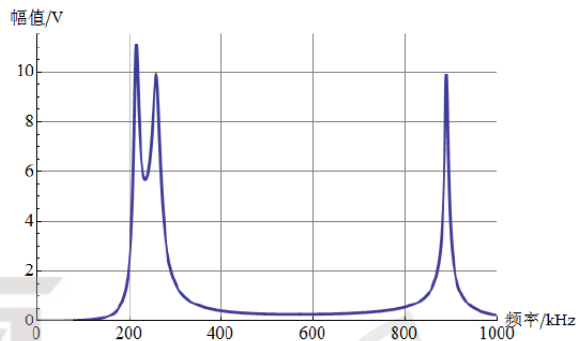


图1. 负载电压变化曲线

## 2. 信号扩频

在发送端进行信息调制、扩频调制和射频调制；在接收端进行信息解调、解扩和射频解调。

优点：扩频信号带宽远大传能带宽；

缺点：同步性要求严格（DS）、设备复杂（FH）、对连续波干扰无抵抗能力（TH）。

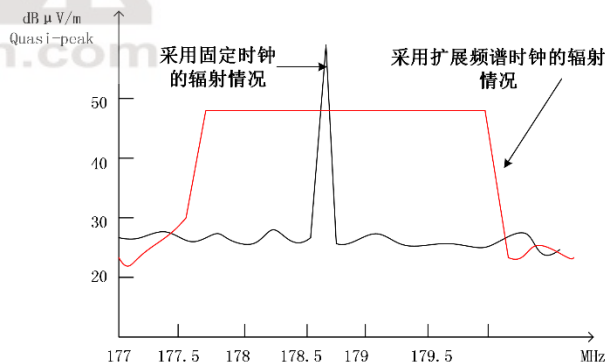


图2. 两种时钟的辐射频谱对比

### 3. 接收端的非阻性调制

开关键控调制方式：包括电容负载调制和电阻负载调制，可实现信息的同步回传。图3为电阻负载调制电路图，将电阻 $R_{\text{mod}}$ 换成电容即为电容负载调制。

优点：使用的是数字调制，可以利用编码方式大幅度提高抗干扰性能；对硬件要求低，成本低；

缺点：需要较宽的频带、设备复杂。

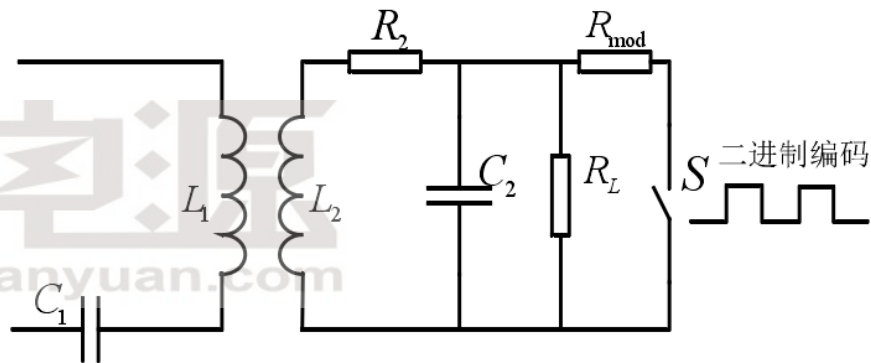


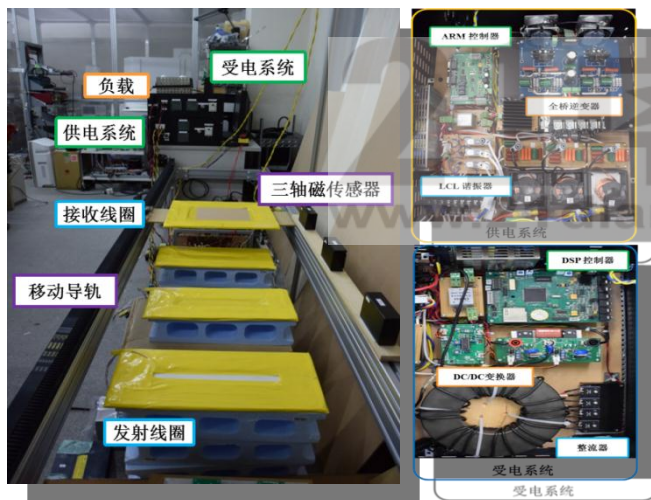
图3. 电阻负载调制电路图



## 哈工大的无线充电技术研究简介

- 无线电能传输团队依托于哈工大电动汽车团队，目前参与的教师10人，其中教授5人，硕士博士研究生40余人
- 自2006年底开始，开展了10年研究
- 涉足从小功率瓦级到大功率几十千瓦级
- 目前的主攻方向是电动汽车移动式无线供电技术

## 多初级绕组并联方式动态无线 供电系统—— 2013年



## 长线圈型电动汽车动 态无线供电系统—— 2014年



## 100米电动汽车动态无线供电实验线







**室外试验线，功率20千瓦，无线传输距离20厘米**  
**地点：张北，国家电网公司风光储实验基地**

## 超级电容观光车静态无线充电 —— 2013年



|      |       |
|------|-------|
| 传输距离 | 15cm  |
| 工作频率 | 85kHz |
| 传输功率 | >3kW  |

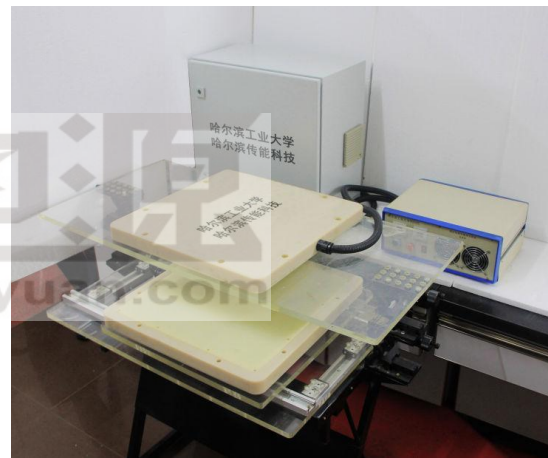
|        |      |
|--------|------|
| 传输效率   | >90% |
| 恒流充电电流 | 30A  |
| 负载     | 超级电容 |

## 水下大功率非接触充电 —— 2013年



|      |         |
|------|---------|
| 输出功率 | 15kW    |
| 传输距离 | 3cm-5cm |
| 工作频率 | 22.5kHz |
| 效率   | 85%     |

## 电动汽车静态无线充电样机 —— 2015年



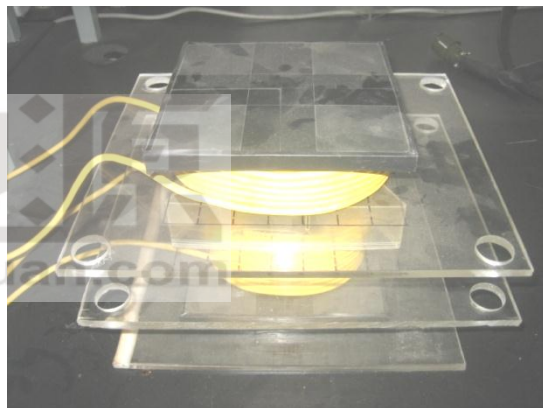
|      |         |
|------|---------|
| 输出功率 | 10kW    |
| 传输距离 | 20cm    |
| 工作频率 | 22.5kHz |
| 效率   | 92%     |

## 自主无线充电机器人 —— 2012年



|      |           |
|------|-----------|
| 工作频率 | 250kHz    |
| 输出功率 | >50W      |
| 传输距离 | 20cm-30cm |

## 低频无线电能传输 —— 2012年



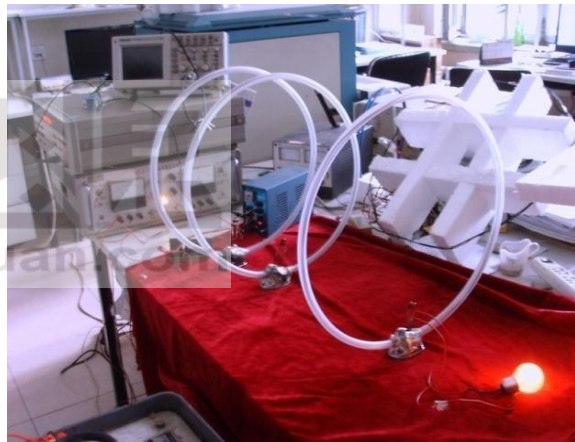
|      |         |
|------|---------|
| 工作频率 | 9.6kHz  |
| 输出功率 | 2kW-4kW |
| 传输距离 | 10cm    |

## 早期研究：无线传感器网络无线充电 —— 2009年



|      |      |
|------|------|
| 传输距离 | 1.5m |
| 系统负载 | LED  |
| 负载数量 | 50个  |

## 早期研究：中继式无线电能传输 —— 2008年



|      |      |
|------|------|
| 传输距离 | 1.3m |
| 传输功率 | 40W  |

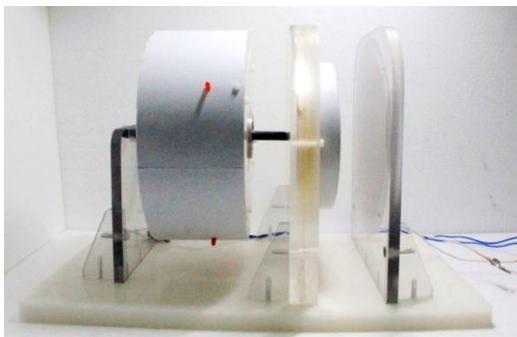
## AGV动态无线供电—— 2016年



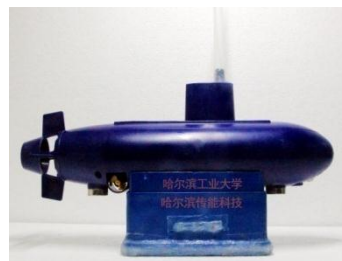
## 无线充的电无人机——2016



## 旋转设备的无线供电——2016



## 无线充电的潜水艇模型 —— 2015年





## 总 结

- ◆ 市场巨大 —— 是技术牵引的原动力
- ◆ 国内学术研究的水平 —— 几乎与国际同步
- ◆ 工程化、产业化、商业化水平 —— 初级阶段
- ◆ 产学研结合 —— 有待真正的有机结合，相互理解

Questions?





# Thank You!

www.21dianyuan.com



Prof.Chunbo ZHU 朱春波教授

[zhuchunbo@hit.edu.cn](mailto:zhuchunbo@hit.edu.cn) ;

[www.wpt-hit.com](http://www.wpt-hit.com)