





# 多线圈无线电能传输系统的稳态特性 和控制方法

#### 答辩人: 贺蓉

指导老师:傅旻帆

2023.4.28









- ▶ 研究背景及意义
- ≻ 研究内容
  - 补偿网络的分析和衍生方法
  - 单发射多接收系统的最优状态和控制方法
  - 多发射多接收系统的最优状态和特性评估
- ▶ 总结与展望

## 研究背景及意义



3/42







XIAOMI, 50W(Max) www.mi.com 2022.12.12

Volvocars, 功率40kW <u>www.volvocars.com</u> 2022.3.4

Wartsila, 功率2MW, 距离45cm-50cm <u>www.ship-technology.com</u> 2018.10.8



## 单发射单接收系统研究点





线圈设计	补偿网络	输出需求	效率优化
▶输出能力最大化 ▶损耗最小化 ▶位置摆放自由度	<ul> <li>▶輸出能力最大化</li> <li>▶负载无关性输出</li> <li>▶位置摆放自由度</li> </ul>	≻恒定输出电压 ≻恒定输出电流	<ul> <li>≻损耗最小化</li> <li>&gt;散热</li> </ul>





Ferrite c







#### 单接收系统:已相对成熟,较多实际应用

研究背景及意义 🔊 高阶补偿网络的设计方法 💴 单发多收系统的分析 💴 多发多收系统的分析 💴 总结与展望



400 200

5/42

0

dx (mm)

-400 -400 -200





偏移容忍度

(a)

4000

3000

1000

400 200

0

dy (mm)

-200

(W) 2000

多线圈无线充电系统

CHARGING STATI



单发射多接收系统 ■ 多发射单接收系统 多发射多接收系统

多线圈系统的目标与挑战



研究背景及意义 🔊 高阶补偿网络的设计方法 🔊 单发多收系统的分析 🔊 多发多收系统的分析 🔊 总结与展望



#### 多线圈系统研究现状:多端口分析



补偿网络特性分析



耦合线圈特性分析



研究背景及意义 >>>> 高阶补偿网络的设计方法 >>>> 单发多收系统的分析 >>>> 多发多收系统的分析 >>>> 总结与展望

研究现状: 功率分配









8/42

研究现状:效率优化





研究背景及意义 >>>> 高阶补偿网络的设计方法 >>>> 单发多收系统的分析 >>>> 多发多收系统的分析 >>>> 总结与展望

#### 课题研究内容





#### 多线圈系统

研究背景及意义 >>>> 高阶补偿网络的设计方法 >>>> 单发多收系统的分析 >>>> 多发多收系统的分析 >>>>> 总结与展望 10/42

## 课题研究内容





#### 多线圈系统

研究背景及意义 🔊 高阶补偿网络的设计方法 🔊 单发多收系统的分析 📎 多发多收系统的分析 📎 总结与展望 11/42

## 补偿网络的设计目标





研究背景及意义 🔊 高阶补偿网络的设计方法 🔊 单发多收系统的分析 📎 多发多收系统的分析 🔊 总结与展望 12/42

## 高阶补偿网络的筛选方法





研究背景及意义 🔊 高阶补偿网络的设计方法 🔊 单发多收系统的分析 📎 多发多收系统的分析 📎 总结与展望 13/42





▶ 发射侧KVL方程:

$\begin{bmatrix} j\omega M_{11} \\ j\omega M_{21} \end{bmatrix}$	$j\omega M_{_{12}}$ $j\omega M_{_{22}}$	•••	$j\omega M_{_{IN_r}}$ $j\omega M_{_{2N_r}}$	$\begin{bmatrix} I_{rx,1} \\ I_{rx,2} \end{bmatrix}$	$= \begin{bmatrix} V_{tx,1} \\ V_{tx,2} \end{bmatrix}$
$\lim_{j \bowtie M_{N_t I}}$	$\dots$ $j\omega M_{N_t^2}$	••••	$\left. \begin{array}{c} \dots \\ j\omega M_{N_tN_r} \end{array} \right _{N_t}$	$\left[ \begin{matrix} \dots \\ I_{rx,N_r} \end{matrix} \right]_{N_r \times I}$	$\begin{bmatrix} \dots \\ V_{tx,N_t} \end{bmatrix}_{N_t \times I}$

▶ 接收侧KVL方程:

 $\begin{bmatrix} j\omega M_{11} & j\omega M_{21} & \dots & j\omega M_{N_t 1} \\ j\omega M_{12} & j\omega M_{22} & \dots & j\omega M_{N_t 2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ j\omega M_{1N_t} & j\omega M_{2N_t} & \dots & j\omega M_{N_r N_t} \end{bmatrix}_{N_r \times N_t} \begin{bmatrix} I_{tx,I} \\ I_{tx,2} \\ \dots \\ I_{tx,N_t} \end{bmatrix}_{N_t \times I} = \begin{bmatrix} V_{rx,I} \\ V_{rx,2} \\ \dots \\ V_{rx,N_r} \end{bmatrix}_{N_r \times I}$ 

传输增益	合格拓扑
G <sub>tx,vi</sub>	B5, C4, C8, C12, C17, C26, C27
G <sub>tx,ii</sub>	A1, B6, C1, C2, C6, C16, C18
G <sub>rx,vi :</sub>	B5, C4, C8, C12, C17, C26, C27
G <sub>rx,vv :</sub>	A1, B6, C1, C2, C6, C16, C18

研究背景及意义 >>>> 高阶补偿网络的设计方法 >>>> 单发多收系统的分析 >>>> 多发多收系统的分析 >>>> 总结与展望





## 寄生电阻的影响: VVA1 vs. VVB1



16/42

理想状态(无 ESR)	电压增益	传输效率
$v_{in} = \begin{bmatrix} C_{tx} & L_{tx} \\ C_{t1} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & L_{tx} \\ C_{t1} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{tx} & C_{tx} \\ C_{tx} & C_{tx}$	$G_{VVA1} = \frac{k}{m_t} \sqrt{\frac{L_{rx}}{L_{tx}}}$	1
$v_{in} \qquad v_{ix} \qquad v$	$G_{VVB1} = \frac{m_r}{k} \sqrt{\frac{L_{rx}}{L_{tx}}}$	1

非理想状态(有 ESR)	电压增益	传输效率
VVA1	$G_{VVAI}' = G_{VVAI} * \eta_{rx}$	$\eta'_{c,VVAI} = \frac{\omega^2 M^2}{\omega^2 M^2 + r_{tx} (R + r_{rx})} \cdot \frac{R}{R + r_{rx}}$
$ \begin{array}{c c}  & & i_{rx} & f_{rx} \\  & & & i_{rx} & f_{rx} \\  & & & & i_{rx} & f_{rx} \\  & & & & & i_{rx} & f_{rx} \\  & & & & & & i_{rx} \\  & & & & & & & i_{rx} \\  & & & & & & & & i_{rx} \\  & & & & & & & & & i_{rx} \\  & & & & & & & & & & i_{rx} \\  & & & & & & & & & & & i_{rx} \\  & & & & & & & & & & & & & i_{rx} \\  & & & & & & & & & & & & & & i_{rx} \\  & & & & & & & & & & & & & & & & i_{rx} \\  & & & & & & & & & & & & & & & & & & $	$G_{VVB1}' = G_{VVB1} * \eta_{tx}$	$\eta'_{c,VVB1} = \frac{\omega^2 M^2}{\omega^2 M^2 + r_{tx} \left(\frac{X^2}{R} + r_{rx}\right)} \cdot \frac{\frac{X^2}{R}}{\frac{X^2}{R} + r_{rx}}$

研究背景及意义 🎾 高阶补偿网络的设计方法 💴 单发多收系统的分析 💴 多发多收系统的分析 💴 总结与展望







研究背景及意义>>> 高阶补偿网络的设计方法 >>> 单发多收系统的分析>>> 多发多收系统的分析 >>> 总结与展望

## 实验验证: VVA1 vs. VVB1







研究背景及意义 🎾 高阶补偿网络的设计方法 💴 单发多收系统的分析 💴 多发多收系统的分析 💴 总结与展望

#### 课题研究内容





#### 多线圈系统

研究背景及意义 🔊 高阶补偿网络的设计方法 🔊 单发多收系统的分析 📎 多发多收系统的分析 📎 总结与展望 19/42







 接收侧的控制目标:效率 发射侧的控制目标:功率



达到共同的稳态时,输入输出状态如下:

2 发射侧的控制目标:效率 接收侧的控制目标:功率



 $I_{tx,opt} = \frac{\sqrt{P}}{\omega M} \sqrt{2r_{rx} + \frac{2r_{tx}r_{rx} + \omega^2 M^2}{\sqrt{r_{tx}r_{rx} + \omega^2 M^2}}} \sqrt{\frac{r_{rx}}{r_{tx}}} \qquad R_{rx,opt} = r_{rx} \sqrt{1 + \frac{\omega^2 M^2}{r_{tx}r_{rx}}} \qquad \eta_{c,opt} = \left(\sqrt{1 + \frac{\omega^2 M^2}{r_{tx}r_{rx}}} - 1\right) / \left(\sqrt{1 + \frac{\omega^2 M^2}{r_{tx}r_{rx}}} + 1\right)$ 

研究背景及意义>>> 高阶补偿网络的设计方法 >>> 单发多收系统的分析>>> 多发多收系统的分析 >>> 总结与展望

### 最优状态分析:单发多收系统





线圈参数

耦合状态

• 输入激励 I<sub>m</sub>

线圈参数

负载电阻R<sub>rx,i</sub>

接收侧KVL方程:

$\int j\omega M_1$	$R_{rx,l} + r_{rx,l}$	0	0	$\begin{bmatrix} I_{tx} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$
$j\omega M_2$	0	$R_{rx,2} + r_{rx,2}$	0		0
				<sup>-</sup>	-
$\int j\omega M_{N_r}$	0	0	 $R_{rx,N_r} + r_{rx,N_r}$	$I_{rx,N_r}$	$\lfloor 0 \rfloor$

最优负载 全局最优效率 $\eta_{c,ropt}$  $R_{rx, j, ropt} = r_{rx, j} \sqrt{1 + \sum_{j=1}^{N_r} \frac{\omega^2 M_j^2}{r_{rx} r_{rx, j}}}$  $\frac{\partial \eta_c}{\partial R_{rx,j}} = 0$  $\eta_{c,ropt} = \frac{\sqrt{1 + \sum_{j=1}^{N_r} \frac{\omega^2 M_j^2}{r_{tx} r_{rx,j}}} - 1}{\sqrt{1 + \sum_{i=1}^{N_r} \frac{\omega^2 M_j^2}{r_{tx} r_{rx,i}}} + 1}$ 

输出功率:











研究背景及意义 🎾 高阶补偿网络的设计方法 🎾 单发多收系统的分析 💴 多发多收系统的分析 💴 总结与展望

## 最优激励计算:单发多收系统



- DC/DC 变换器: 输出功率 $P_i$  2 ● DL/DC 又」入HE INT
   ● 线圈电流I<sub>tx</sub>:传输效率



#### 特殊系统:

- 相同接收线圈
- 相同耦合状态
  - 相同功率需求



可等效为单发射单接收系统

最优激励电流:

$$I_{tx,opt} = \frac{\sqrt{P}}{\omega M} \sqrt{2r_{rx} + \frac{2r_{tx}r_{rx} + N_r\omega^2 M^2}{\sqrt{r_{tx}r_{rx} + N_r\omega^2 M^2}}} \sqrt{\frac{r_{rx}}{r_{tx}}}$$

接收侧KVL方程:

$\int j\omega M_1$	$R_{rx,l} + r_{rx,l}$	0		0	$I_{tx}$		$\begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$	
$j\omega M_2$	0	$R_{rx,2} + r_{rx,2}$		0	$I_{rx,1}$		0	
					••••	-		
$j\omega M_{N_r}$	0	0	 $R_{rx,N}$	$r_r + r_{rx,N_r}$	$I_{rx,N_r}$		0	

输出功率:  $P_{i} = I_{rx,i}^{2} R_{rx,i}$ 



最优激励电流:  $I_{tx,opt} = \left(\frac{1}{r_{tx}}\sum_{i=1}^{N_r} \frac{P_i^2 r_{rx,i}}{\omega^2 M_i^2}\right)^{\overline{4}} \qquad \sum P_{loss,tx} = \sum P_{loss,rx}$ 

损耗分布:

研究背景及意义 >>>> 高阶补偿网络的设计方法 >>>> 单发多收系统的分析 >>>> 多发多收系统的分析 >>>> 总结与展望

基于耦合区间的恒定电流控制:单发单收系统4FPCC<sup>\*</sup>



**資料合时:** 
$$I_{tx,min} = \frac{\sqrt{P}}{\omega M_{max}} \sqrt{2r_{rx} + \frac{2r_{tx}r_{rx} + \omega^2 M_{max}^2}{\sqrt{r_{tx}r_{rx} + \omega^2 M_{max}^2}} \sqrt{\frac{r_{rx}}{r_{tx}}}}$$
  
**号耦合时:**  $I_{tx,max} = \frac{\sqrt{P}}{\omega M_{min}} \sqrt{2r_{rx} + \frac{2r_{tx}r_{rx} + \omega^2 M_{min}^2}{\sqrt{r_{tx}r_{rx} + \omega^2 M_{min}^2}} \sqrt{\frac{r_{rx}}{r_{tx}}}}$ 

基于耦合区间的恒定电流控制:  $I_{tx,ave} = \frac{I_{tx,min} + I_{tx,max}}{2}$ 



#### 在一定耦合区间内保持较高传输效率

研究背景及意义\_>>> 高阶补偿网络的设计方法 \_>>> 单发多收系统的分析 \_>>> 多发多收系统的分析 \_>>> 总结与展望

基于耦合区间的恒定电流控制:单发多收系统4EPCL<sup>\*</sup>







以单发射双接收系统为例:



研究背景及意义>>>>> 高阶补偿网络的设计方法 >>>> 单发多收系统的分析>>>> 多发多收系统的分析 >>>> 总结与展望

#### 实验1验证:最优输入激励





研究背景及意义>>> 高阶补偿网络的设计方法 >>> 单发多收系统的分析>>> 多发多收系统的分析 >>> 总结与展望

## 实验2验证: 恒定电流控制







研究背景及意义>>> 高阶补偿网络的设计方法 >>> 单发多收系统的分析>>>多发多收系统的分析>>> 总结与展望

#### 课题研究内容







研究背景及意义 💭 高阶补偿网络的设计方法 💭 单发多收系统的分析 📎 多发多收系统的分析 📎 总结与展望 🛛 28/42

#### 多线圈系统的最优状态





耦合线圈及其补偿网络

系统	无功率约束	有功率约束
单发单收;多发单收;单发多收	直接求导	直接求导
多发多收	矩阵计算	?

最优状态求解方法





研究背景及意义 🎾 高阶补偿网络的设计方法 🎾 单发多收系统的分析 🞾 多发多收系统的分析 沙 总结与展望

## 端口特性:无功率约束 vs. 有功率约束



系统	功率 约束	最优电流 I <sub>tx,i,opt</sub>	最优负载 R <sub>rx,j,opt</sub>	传输效率		
前	无	$I(P_1)$	$r_{rx,I}\sqrt{\frac{\omega^2 M_{II}^2}{\pi}}$	$\left(r_{rx,I}\sqrt{\frac{\omega^2 M_{II}^2}{r_r}} \cdot I\right) / \left(r_{rx,I}\sqrt{\frac{\omega^2 M_{II}^2}{r_r}} + I\right)$		
半久半収	有	$\left(\frac{1}{r_{tx,1}}\frac{P_1^2 r_{rx,1}}{\omega^2 M_{11}^2}\right)^{\frac{1}{4}}$	$\bigvee \mathbf{r}_{tx,I}\mathbf{r}_{rx,I}$	$( \bigvee \boldsymbol{r}_{tx,I} \boldsymbol{r}_{rx,I} ) / ( \bigvee \boldsymbol{r}_{tx,I} \boldsymbol{r}_{rx,I} )$		
夕尘的历	无	$\frac{M_{tx,i}}{r_{tx,i}}I(P_1)$	$\sum_{i=1}^{N_i} \omega^2 M_{il}^2$	$\left(r - \frac{\sum_{i=1}^{N_i} \omega^2 M_{il}^2}{\sum_{i=1}^{N_i} \lambda_{il}^2} \right) \left(r - \frac{\sum_{i=1}^{N_i} \omega^2 M_{il}^2}{\sum_{i=1}^{N_i} \lambda_{il}^2} + 1\right)$		
多反半収	有	$\frac{\omega M_{il}}{r_{tx,i}} \left( P_1^2 r_{rx,l} / \left( \sum_{i=1}^{N_i} \frac{\omega^2 M_{il}^2}{r_{tx,i}} \right)^3 \right)^{\frac{1}{4}}$	$r_{rx,I}\sqrt{\sum_{i=1}^{n} r_{tx,i}r_{rx,I}}$	$\left(r_{rx,l}\sqrt{\sum_{i=1}^{2}r_{tx,i}r_{rx,l}}-1\right)/\left(r_{rx,l}\sqrt{\sum_{i=1}^{2}r_{tx,i}r_{rx,l}}+1\right)$		
<b>送                                    </b>	无	I(P)	$\boldsymbol{r}_{rx,j} \sqrt{\sum_{j=1}^{N_r} \frac{\omega^2 \boldsymbol{M}_{1j}^2}{\boldsymbol{r}_{tx,1} \boldsymbol{r}_{rx,j}}}$	$\left( r_{rx,j} \sqrt{\sum_{j=1}^{N_r} \frac{\omega^2 M_{1j}^2}{r_{tx,1} r_{rx,j}}} - 1 \right) / \left( r_{rx,j} \sqrt{\sum_{j=1}^{N_r} \frac{\omega^2 M_{1j}^2}{r_{tx,1} r_{rx,j}}} + 1 \right)$		
平反歹収	有	$\left(\frac{1}{r_{tx,1}}\sum_{j=1}^{N_r}\frac{P_j^2r_{rx,j}}{\omega^2 M_{lj}^2}\right)^{\frac{1}{4}}$	$\frac{\omega^2 \boldsymbol{M}_{1j}^2}{\boldsymbol{P}_j} \sqrt{\frac{1}{\boldsymbol{r}_{tx,1}} \sum_{j=1}^{N_r} \frac{\boldsymbol{P}_j^2 \boldsymbol{r}_{rx,j}}{\omega^2 \boldsymbol{M}_{1j}^2}}$	$\frac{\sum_{j=1}^{N_r} P_j}{\left(\sum_{j=1}^{N_r} P_j\right)} + 2\sqrt{r_{tx,1} \sum_{j=1}^{N_r} \frac{P_j^2 r_{rx,j}}{\omega^2 M_{1j}^2}}\right)$		
夕尘夕फ	无	$\frac{1}{I_{tx,i}r_{tx,i}}\sum_{j=1}^{N_r}\frac{\omega M_{ij}}{r_{rx,j}}\sum_{i=1}^{N_t}\omega M_{ij}I_{tx,i}=\beta^2-1$	$r_{rx,j}\beta$	$\frac{1-\beta}{1+\beta}$		
夕久夕収	有	$\frac{1}{r_{tx,i}}\sum_{j=1}^{N_r}\omega M_{ij}\left(-\frac{\lambda_j}{2}\right)^{\frac{3}{2}}\sqrt{\frac{P_j}{r_{rx,j}}}$	$r_{rx,j}\left(-\frac{2}{\lambda_j}\right)$	$\sum_{j=1}^{N_r} \mathbf{P}_j \left/ \left( \sum_{j=1}^{N_r} \mathbf{P}_j - \sum_{j=1}^{N_r} \boldsymbol{\lambda}_{P,j} \mathbf{P}_j \right) \right $		

研究背景及意义 🔊 高阶补偿网络的设计方法 🔊 单发多收系统的分析 🔊 多发多收系统的分析 🔊 总结与展望





#### 无功率约束

a) 两侧线圈的传输效率:

$$\eta_{tx,i} = 1 - \beta = \frac{2\eta_{c,max}}{1 + \eta_{c,max}}$$
  $\eta_{rx,j} = \frac{1}{1 + \beta} = \frac{1 + \eta_{c,max}}{2}$ 

如果 
$$\eta_{c,max} > 85\%$$
 ,  $\eta_{tx,i} pprox \eta_{rx,j}$ 

b) 两侧损耗: 
$$\sum P_{loss,tx} \approx \sum P_{loss,rx}$$





研究背景及意义 🎾 高阶补偿网络的设计方法 🎾 单发多收系统的分析 🞾 多发多收系统的分析 沙 总结与展望





研究背景及意义 >>>> 高阶补偿网络的设计方法 >>>> 单发多收系统的分析 >>>> 多发多收系统的分析 >>>> 总结与展望

## 特性评估: 计算结果





研究背景及意义 >>>> 高阶补偿网络的设计方法 >>>> 单发多收系统的分析 >>>> 多发多收系统的分析 >>>> 总结与展望

34/42

## 特性评估:计算结果



研究背景及意义>>>>> 高阶补偿网络的设计方法>>>> 单发多收系统的分析>>>> 多发多收系统的分析>>>> 总结与展望

实验验证1:最优状态





最优状态时, 输入端口: ①  $I_{tx,2}$ : $I_{tx,1}=a_{opt}$  输出端口: ②  $R_{rx,1}=R_{rx,1,opt}$  ③ $R_{rx,2}=R_{rx,2,opt}$ 



研究背景及意义 🎾 高阶补偿网络的设计方法 🎾 单发多收系统的分析 🎾 多发多收系统的分析 洳 总结与展望

## 实验验证2:不同系统特性评估





研究背景及意义>>>>> 高阶补偿网络的设计方法>>>> 单发多收系统的分析>>>> 多发多收系统的分析 >>>> 总结与展望

#### 不同系统特性评估:实验验证





垂直距离: Z=5mm 负载功率: P1=P2=20W



垂直距离: Z=5mm 负载功率: P1=3P2=30W

#### 多发射线圈的系统效率表现更平稳

研究背景及意义 >>>> 高阶补偿网络的设计方法 >>>> 单发多收系统的分析 >>>> 多发多收系统的分析 >>>> 总结与展望 38

#### 总结与展望



- 1. 补偿网络的分析和衍生方法
  - ✓ 基于不同目标筛选合适的补偿网络结构
  - ✓ 适用于多线圈系统的补偿网络设计方法
  - ✓ 对比不同补偿网络的传输特点



展望:

- 不同补偿网络组合不同线圈的输出特性
- > 交叉耦合对补偿网络的影响
- ▶ 集成化设计多个线圈的补偿网络
- 2. 单发射多接收系统的最优状态和控制方法
  - ✓ 传输性能最优时的输入输出状态
  - ✓ 满足不同功率需求时的端口特性
  - ✓ 简单、稳定且低成本的控制方法



- ▶ 闭环调试和验证控制方法的有效性
- 交叉耦合对稳态特性的影响
- 交叉耦合对控制方法的影响
- 3. 多发射多接收系统的最优状态和特性评估
  - ✓ 统一的分析方法
  - ✓ 无功率需求时系统的端口特性
  - ✓ 有功率需求时系统的端口特性
  - ✓ 分析、对比不同系统的稳态特性
  - ✓ 评估不同耦合器的性能特点

- $\Box$
- > 交叉耦合对端口特性的影响
- ▶ 求解最优状态的收敛性
- > 获取每个线圈的耦合状态
- 合理有效的控制方法

研究背景及意义 💭 高阶补偿网络的设计方法 💭 单发多收系统的分析 📎 多发多收系统的分析 📎 总结与展望 39/42



#### 期刊论文发表/在审:

- **1. R. He,** X. Wang, H. Wang, and M. Fu. Optimal AC Condition and Coupler Estimation for Multi-Coil Inductive Power Transfer System with Equality Power Constrains. IEEE Transactions on Power Electronics, under review.
- **2.** 贺蓉, 汪鑫林, 傅旻帆. 多线圈无线电能传输系统效率最大化研究. 电源学报,2022,20(6):102-110.
- 3. R. He, P. Zhao, G. Ning, K. Yue, Y. Liu, and M. Fu. Optimal Driving and Loading Scheme for Multiple-Receiver Inductive Power Transfer. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(12): 12665-12675.
- R. He, P. Zhao, M. Fu, Y. Liu, H. Wang, and J. Liang. Decomposition and Synthesis of High-Order Compensated Inductive Power Transfer Systems for Improved Output Controllability. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique, 2019, 67(11): 4514-4523.
- 5. X. Wang, **R. He**, J. Liang, H. Wang, and M. Fu. Modified LCC Compensation and Magnetic Integration for Inductive Power Transfer. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics on Power Electronics, under review.
- K. Zhao, G. Ning, R. He, H. Yang, H. Wang, and M. Fu. An Unsymmetrical Driving Scheme for Inductive Power Transfer Systems Using Decoupled Transmitter Coils. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics on Industrial Electronics, vol. 4, no. 2, pp. 614-624, April 2023.
- 7. S. Wang, Y. Yin, **R. He**, J. Liang and M. Fu. High-Order Compensated Capacitive Power Transfer Systems With Misalignment Insensitive Resonance. in IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 69, no. 8, pp. 3450-3460, Aug. 2022.
- 8. P. Zhao, G. Zheng, **R. He**, Y. Liu and M. Fu. A 45-W Two-Stage Wireless Fast Charger Using Unregulated Inductive Power Transfer. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, vol. 2, no. 3, pp. 287-296, July 2021.

## 主要学术成果



#### 会议论文发表:

- **1. 贺蓉**, 李家齐, 傅旻帆. 高位置自由度单发射双接收无线充电系统研究. 2021中国新能源车充电与技术大会(EVCP' 2021), 中国·上海, 2021年7月9-11日.
- 2. R. He, G. Ning, and M. Fu. A D4Q Pad with High Misalignment Tolerance for Inductive Power Transfer System. IEEE Wireless Power Week, Seoul, Korea, May 5-9, 2020.
- **3. 贺蓉**,傅旻帆. 感应式无线电能传输的高阶补偿网络的分析方法与研究. 中国电源学会第二十三届学术年会(CPSSC' 2019),中国·深圳, 2019年11月1日-4日.
- 4. Y. Jiang, **R. He**, K. Zhao and M. Fu. Impedance-Model-Based Design of High-Order Class E Inverter. 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 2022, pp. 1-5.
- 5. X. Wang, **R. He**, G. Ning and M. Fu. Optimal Driving Current Interval for Multiple-Receiver Inductive Power Transfer System. 2022 Wireless Power Week (WPW), Bordeaux, France, 2022, pp. 717-721.
- K. Zhao, M. Fu, G. Ning, R. He, H. Yang and H. Wang. A Novel Driving Scheme for Inductive Power Transfer Systems Using Decoupled Transmitter Coils. 2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022- ECCE Asia), Himeji, Japan, 2022, pp. 161-166.
- 7. G. Ning, P. Zhao, **R. He** and M. Fu. A Novel Passive Current Sharing Method for a Two-Receiver-Coil IPT System," 2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), Seoul, Korea (South), 2020, pp. 354-357.
- 8. P. Zhao, **R. He**, K. Yue, Y. Liu and M. Fu. A Novel Wireless Fast Charger Using Unregulated IPT Stage. IECON 2019 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Lisbon, Portugal, 2019, pp. 4171-4176.

#### 专利:

- 1. 傅旻帆, **贺蓉**, 宁广栋, 汪鑫林, "一种无线充电系统快速开发验证方法", 专利申请号CN202210322220.
- 2. 赵凯,傅旻帆,宁广栋,贺蓉,"一种针对具有双线圈接收或发射的无线充电系统的驱动电路与补偿电路",申请中







# 感谢各位专家莅临! 感谢傅老师的培养! 感谢同学们的陪伴! 请批评指正







