



# 磁浮列车无线辅助供电系统 多目标优化设计

程 龙<sup>1,2</sup>, 董 侃<sup>1,2</sup>, 王 硕<sup>3</sup>

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 机车车辆研究所, 北京 100081;

2. 北京纵横机电科技有限公司, 北京 100094;

3. 北京理工大学 电动车辆国家工程研究中心, 北京 100081)

**摘 要:** 当磁浮列车靠近站台时, 直线发电机产生的电能虽然能继续牵引列车前进, 但不足以同时满足车载设备的用电需求。传统的接触式供电方式存在安装维护成本高、带电导体暴露等问题。无线供电技术能够消除传统供电方式的线缆连接, 使磁浮列车摆脱机械接触, 提高列车辅助供电系统的安全性、经济性和环境适应能力。文章针对磁浮列车无线辅助供电系统功率大、效率高等应用需求特点, 开展磁耦合机构和谐振补偿电路优化设计。建立了单发多收磁耦合机构有限元模型, 对比分析了3种无线供电系统谐振补偿拓扑(S-S, LCC-S, LCC-LCC)的工作特性, 并基于Pareto最优解概念提出全局多目标优化设计策略。通过搭建8.5 kW无线辅助供电系统样机进行了验证, 试验结果表明, 所提优化方案能满足磁浮列车无线供电的设计需求, 能量传输效率达到91.9%。

**关键词:** 磁浮列车; 无线电能传输; 多目标优化; 磁耦合机构; 谐振补偿拓扑; 有限元

中图分类号: U237

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)01-0154-08

## 0 引言

磁浮列车采用电磁浮与电磁推进实现列车非接触式运行, 具有爬坡能力强、转弯半径小、噪声低等优点。目前, 国内外对磁浮列车已开展了广泛的研究, 如德国和日本分别掌握了常导电磁型高速磁浮列车技术和超导磁浮交通技术<sup>[1-3]</sup>, 韩国重点发展中低速磁浮技术<sup>[4]</sup>; 国内则相继开通了长沙磁浮线和北京S1线的试运营, 标志着我国已成为世界上中低速磁浮技术工程化领先的国家。磁浮列车与地铁、轻轨共同构建合理的市郊和城际轨道交通网络, 对城市群的互联互通具有重要推动作用<sup>[5]</sup>。

磁浮列车的牵引力源自列车上的直线发电机<sup>[6]</sup>。当列车高速运行时, 直线发电机提供的能量不仅能够牵引列车, 还能为车载用电设备进行供电; 但当列车处于静

止及低速状态(低于100 km/h)时, 直线电机虽然能继续牵引列车前进, 但是无法满足车载设备的用电需求, 必须通过外部电源经第三供电轨和受流器进行辅助供电。目前, 受流器是磁浮列车与轨道系统唯一存在机械接触与摩擦的设备, 存在安装维护成本高、摩擦阻力大等缺点, 而采用无线电能传输技术取代受流器应用于磁浮列车, 可以使其摆脱机械接触, 提高列车供电系统的安全性、降低维护成本、增强环境适应性<sup>[7]</sup>。

无线电能传输技术按能量传递介质的不同, 可分为微波式、激光式、超声波式、电场耦合式和磁场耦合式等<sup>[8]</sup>。其中, 磁感应式无线电能传输(Inductive Power Transfer, IPT)技术日趋成熟, 能满足列车或汽车等应用大气隙、高效率和大功率的技术需求<sup>[9]</sup>, 是当前领域的研究热点。针对磁浮列车的无线供电系统工程应用, 目前仅有德国蒂森克虏伯公司(Thyssen Krupp Transrapid GmbH)成功研发采用磁感应式无线充

基金项目: 国家自然科学基金项目(52177207); 中国铁道科学研究院集团有限公司基金课题(2023YJ006); 北京市科技新星计划资助项目

通信作者: 董 侃, 男, 博士, 高级工程师, 主要从事机车车辆移动装备方面的研究; E-mail: dongkan@zemt.cn

引用格式: 程龙, 董侃, 王硕. 磁浮列车无线辅助供电系统多目标优化设计[J]. 机电传动, 2025(1): 154-161. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.01.019.

Citation: CHENG Long, DONG Kan, WANG Shuo. Multi-objective optimization of auxiliary wireless power supply system for maglev trains[J]. Electric drive for locomotives, 2025(1): 154-161. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.01.019.

电技术的磁浮列车辅助供电系统并实现了实车装车测试<sup>[10-11]</sup>。文献[12-13]对高速磁浮列车IPT系统的磁耦合器进行了研究和分析, 又进一步提出了一种“三明治”型耦合器结构, 其发射线圈为长导轨, 接收线圈为矩形线圈加双E型铁芯, 在163 mm气隙传递效率可达93.4%。

针对磁浮列车无线辅助供电系统设计存在高功率密度、轻量化和低成本等要求, 本文将提出一种兼顾磁耦合结构和谐振补偿拓扑的多目标优化设计策略。首先对磁浮列车无线辅助供电系统整体架构进行介绍, 建立单发多收式磁耦合结构仿真模型; 然后采用LCC-S拓扑作为优化设计的谐振补偿电路方案, 研究综合考虑系统能量传输效率、功率密度、成本参数的磁浮列车全局多目标优化设计方法; 最终搭建系统样机, 对理论分析与优化方法进行验证。

## 1 磁浮列车无线辅助供电系统架构

不同于小范围、对称式的单发单收无线供电系统, 磁浮列车无线辅助供电系统的特点有: ①采用多单元无线功率传输, 即有两个及以上的接收端, 每个接收端对应一个负载; ②空间电磁场具有大范围、非对称的特征, 通常发射线圈长达数十米, 接收线圈长一般在1~2 m左右; ③总功率等级高, 至少100 kW以上。这些特征使得列车无线辅助供电系统较少采用单发单收结构, 多发多收和单发多收结构能更好地匹配现有列车辅助供电系统需求。

磁浮列车无线辅助供电系统采用发射线圈替代第三轨供电方式的供电轨, 发射线圈安装于T形台轨道的侧面, 采用接收线圈替代原有受流滑靴, 接收线圈安装于车体侧面。供电侧一次侧发射线圈与接收端二次侧线圈组成无线电能传输的磁耦合机构, 它们之间没有实体接触, 通过高频交变磁场实现从地面到车辆的无线电能传输, 其布置如图1所示。

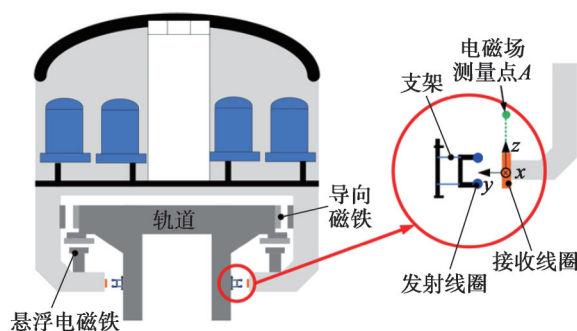


图1 磁浮列车车身前截面视图

Fig. 1 Front sectional view of maglev train

### 1.1 系统电路结构

无线辅助供电系统的整体结构如图2所示, 三相高压电网的工频交流电经过整流器和高频逆变后, 向地面发射端的导轨式发射线圈注入高频电流, 在发射线圈周围激励出高频交变磁场, 通过一次侧、二次侧补偿电路与线圈电感形成谐振以降低系统无功功率, 提升系统有效功率传输能力。接收线圈的感应电动势经过谐振补偿及高频整流后, 经过升压电路变换为车载用电设备所需的直流电压。

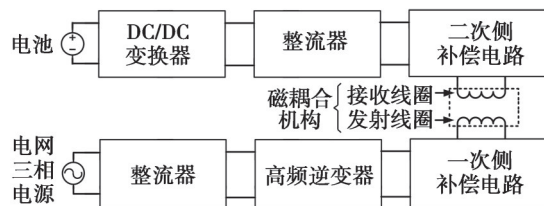


图2 系统结构框图

Fig. 2 System structure

### 1.2 无线辅助供电系统线圈结构选型

磁浮列车低速运行或停靠车站时, 辅助供电系统通过多组集电靴从供电轨获取所需的电能, 同时为了将接收线圈输出电压变换为车载电源所需的输入电压, 设计了多组车载DC/DC变换器, 其在车身的布置如图3所示。

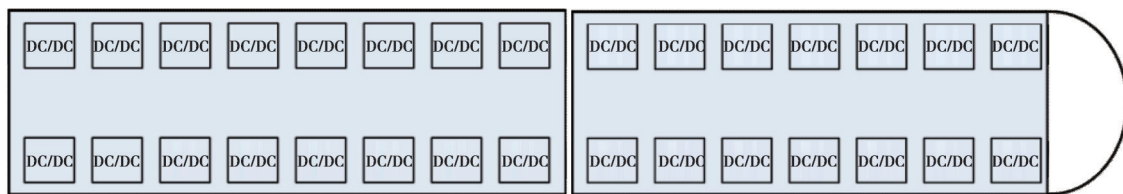


图3 磁浮列车辅助供电系统DC/DC变换器布置示意图

Fig. 3 Layout of DC/DC converters in auxiliary power supply system for maglev train

采用单发射线圈配合多个接收线圈的无线辅助供电系统结构, 能够复用现有DC/DC变换器, 减少磁浮列车辅助供电系统的改造成本。同时, 为保障列车低速运动以及停车过程中能稳定供电, 一次侧采用了长导轨单发射线圈的结构, 当列车进入发射线圈供电范围内, 接收线圈即可获得电能为车辆储能系统充电, 如图4所示。

### 1.3 单发多收磁耦合机构建模

线圈的尺寸、匝数, 以及铁芯结构都会显著影响发射线圈与接收线圈间的磁场耦合, 进而影响系统的功率传输能力。基于线圈选型与尺寸约束, 建立了单发多收磁耦合机构有限元仿真的基础模型, 如图5所示。磁耦合机构一次侧为长导轨单发射线圈, 二次侧包含了接收线圈、铁氧体铁芯与铝屏蔽层。通过对线圈匝数、铁氧体尺寸进行参数化仿真, 可获得磁耦合

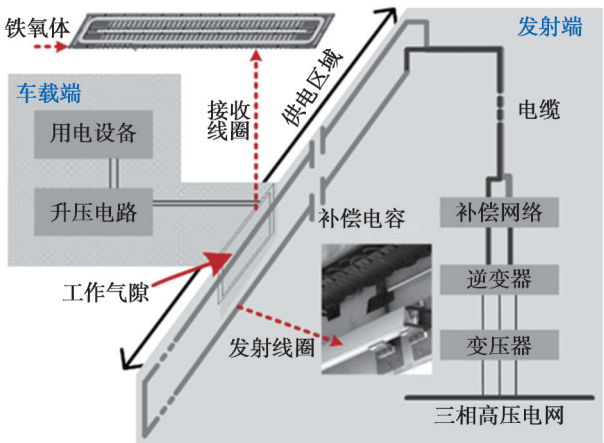


图4 无线辅助供电系统一次侧和二次侧线圈结构  
Fig. 4 Structures of primary and secondary coils of auxiliary WPT system

机构一次侧和二次侧的自感、互感。

2 单发多收式无线供电系统谐振补偿拓扑分析

无线电能传输系统中的发射线圈与接收线圈受气隙影响互感较小、漏感较大，如果由交流电直接为线圈供电则会存在大量的无功功率，在元器件耐压与热

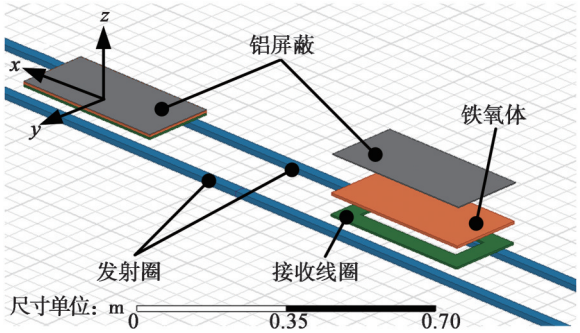
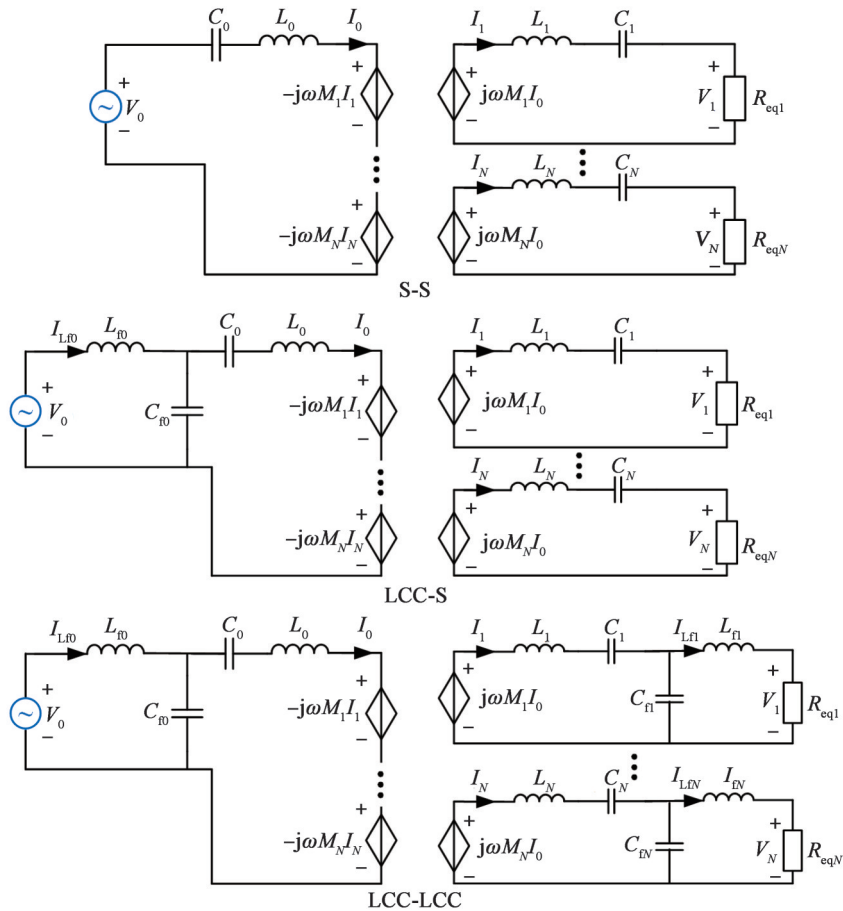


图5 单发多收磁耦合机构有限元仿真模型  
Fig. 5 Finite element simulation model of magnetic coupling mechanism with a STMR configuration

应力约束下系统通常难以满足大功率电能传输的要求。通过在一次侧、二次侧引入谐振补偿网络，使发射线圈与接收线圈工作在谐振状态，可有效降低系统中的无功，提高电路品质因数，进而提升系统的传输性能。常见的谐振补偿拓扑（见图6）包括单电容补偿与复合补偿拓扑，其中单电容补偿可以根据补偿电容与一、二次侧线圈的串联或并联形成串/串(S-S)、串/并(S-P)等结构；复合补偿拓扑则采用多个电感与电容元件组合形成具有特定特性的补偿电路网络，如电感-电容-



$V_0$ ——一次侧逆变器的输出电压； $R_{eq1}$ 、 $R_{eqN}$ ——车载负荷的等效电阻； $M_1$ 、 $M_N$ ——一、二次侧线圈的互感； $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_N$ ——一次侧和二次侧线圈的主补偿电容； $C_{00}$ 、 $C_{01}$ 、 $C_{0N}$ ——一次侧、二次侧的辅助补偿电容； $L_0$ 、 $L_1$ 、 $L_N$ ——一次侧、二次侧线圈的自感； $L_{00}$ 、 $L_{01}$ 、 $L_{0N}$ ——一次侧、二次侧的辅助补偿电感。

图6 S-S、LCC-S和LCC-LCC谐振补偿拓扑结构图  
Fig. 6 Topologies of S-S, LCC-S, LCC-LCC resonant compensation

电容拓扑(LCC)等。针对单发多收结构的S-S、LCC-S、LCC-LCC系统等效电路结构如图6所示。

上述补偿拓扑电路在全谐振条件下的工作特性如表1所示, 由于各二次侧输出侧共辅助直流母线, 因此各二次侧线圈输出端的车载负荷等效电阻相同, 即表1中的 $R_{eq}=R_{eq1}=R_{eqN}$ 。通过分析可看出, LCC-S拓扑发射

线圈的输出电流只与一次侧电压和一次侧辅助电感相关。在系统单个接收线圈单元发生故障时, 一次侧线圈电流及其产生的磁场不会发生变化, 也不会影响一次侧线圈对其他接收单元的功率传输。因此, 本研究选取了LCC-S结构作为优化设计的补偿拓扑。

表1 S-S、LCC-S、LCC-LCC补偿拓扑特性对比

Table 1 Comparison of compensation characteristics among S-S, LCC-S, and LCC-LCC topologies

| 参数     | S-S                                                          | LCC-S                                                                                                       | LCC-LCC                                                                                                                                                    |
|--------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 谐振条件   | $C_0 = \frac{1}{\omega^2 L_0}, C_i = \frac{1}{\omega^2 L_i}$ | $C_0 = \frac{1}{\omega^2 (L_0 - L_{i0})}, C_{i0} = \frac{1}{\omega^2 L_{i0}}, C_i = \frac{1}{\omega^2 L_i}$ | $C_0 = \frac{1}{\omega^2 (L_0 - L_{i0})}, C_{i0} = \frac{1}{\omega^2 L_{i0}}, C_i = \frac{1}{\omega^2 (L_i - L_{fi})}, C_{fi} = \frac{1}{\omega^2 L_{fi}}$ |
| 输入电流   | $I_0 = \frac{V_0}{NZ_f} = \frac{V_0 R_{eq}}{N \omega^2 M^2}$ | $I_{L_{i0}} = \frac{V_0 \cdot NZ_f}{\omega^2 L_{i0}^2} = \frac{NM^2 V_0}{L_{i0}^2 R_{eq}}$                  | $I_{L_{i0}} = \frac{V_0 \cdot NZ_f}{\omega^2 L_{i0}^2} = \frac{NM^2 V_0 R_{eq}}{\omega^2 L_{i0}^2 L_{fi}^2}$                                               |
| 发射线圈电流 | $I_0 = \frac{V_0}{NZ_f} = \frac{V_0 R_{eq}}{N \omega^2 M^2}$ | $I_0 = \frac{V_0}{j \omega L_{i0}}$                                                                         | $I_0 = \frac{V_0}{j \omega L_{i0}}$                                                                                                                        |
| 接收线圈电流 | $I_i = \frac{V_0}{N \cdot j \omega M}$                       | $I_i = \frac{M V_0}{L_{i0} R_{eq}}$                                                                         | $I_i = \frac{M V_0 R_{eq}}{\omega^2 L_{i0} L_{fi}^2}$                                                                                                      |
| 输出电流   | $I_i = \frac{V_0}{N \cdot j \omega M}$                       | $I_i = \frac{M V_0}{L_{i0} R_{eq}}$                                                                         | $I_{L_{fi}} = \frac{M V_0}{j \omega L_{i0} L_{fi}}$                                                                                                        |
| 输出电压   | $V_i = \frac{V_0 R_{eq}}{N \cdot j \omega M}$                | $V_i = \frac{M V_0}{L_{i0}}$                                                                                | $V_i = \frac{M V_0 R_{eq}}{j \omega L_{i0} L_{fi}}$                                                                                                        |

3 系统多目标优化设计

3.1 优化设计流程

无线供电系统中的磁耦合机构和补偿拓扑采用独立优化设计, 但磁耦合机构、补偿拓扑的设计参数与无线充电系统功率、效率存在复杂的非线性关系, 独立设计难以获得兼顾多系统设计目标的最优解。基于Pareto最优解的概念, 本文针对磁浮列车IPT系统提出全局多目标优化设计流程, 如图7所示。

具体流程如下:

① 在初始阶段, 先设定工作频率、输出功率、输入输出电压等级等系统参数, 并选择线圈形状和材料型号。

② 在决策过程中, 首先固定一部分自由度, 包括气隙、频率、电流密度、一次侧线圈长度、铁氧体单元尺寸、谐振补偿拓扑等, 然后选取几个决策变量, 如线圈尺寸、线圈匝数、铁氧体排布方案等, 并确定各个决策变量的取值范围和步长, 通过排列组合, 即得到包含N个独立点的决策空间。原则上, 系统中所有参数均可作为固定变量、决策变量或约束变量。决策变量的具体数目没有限制, 但仿真时间会随决策变量数目的增多而大幅增长。因此在实际应用中, 可通过预选步骤, 先选取一部分参数作为固定量, 以减少决策变量的数目, 降低程序编写难度并减少仿真时间。

③ 在多目标优化问题中, 满足约束条件的解均称为可行解, 所有可行解的集合称作可行域。首先根据

理论计算或仿真, 求出决策空间内每个点的耦合器自感、互感、耦合系数等参数; 然后在此基础上利用基波分析法匹配零功率吸收条件下的谐振腔元件参数, 得到电路的电压电流参量; 同时建立功率损耗计算模型, 求解系统在磁耦合器和谐振补偿电路中的损耗, 估算每个点的效率、成本、功率密度等目标值; 随后通过漏磁场强度、效率、成本和器件应力等约束条件, 过滤掉一些不符合条件的解点; 最后以目标函数 $f_1$ 能量传输效率、 $f_2$ 功率密度、 $f_3$ 成本倒数为 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 坐标轴, 标记每个可行解, 这个包含N个离散点的空间即为该优化问题的可行域, 每个点代表一套独立的设计方案。

④ 在可行域内, 利用拟合法绘制出Pareto前沿曲线, 前沿上所有的点构成Pareto非劣解集。在得到所有设计目标的Pareto非劣解集后, 根据应用场景需求在最优解集内进行决策, 选取最佳设计点, 并可直接导出该设计方案的自感/互感等电路参数、功率传输效率等性能参数以及面积功率密度/重量功率密度等产品设计参数, 从而得到适合该应用场景的最佳设计方案。

3.2 无线辅助供电系统优化模型

为了对磁浮列车无线辅助供电系统进行优化设计, 需要建立系统优化模型的目标函数和约束条件。本文选取了系统能量传输效率、功率密度和成本作为系统的目标函数。此外, 根据空间尺寸、电磁兼容要求和最低效率等参数设定了优化模型的约束条件。

①无线供电系统的能量传输效率为

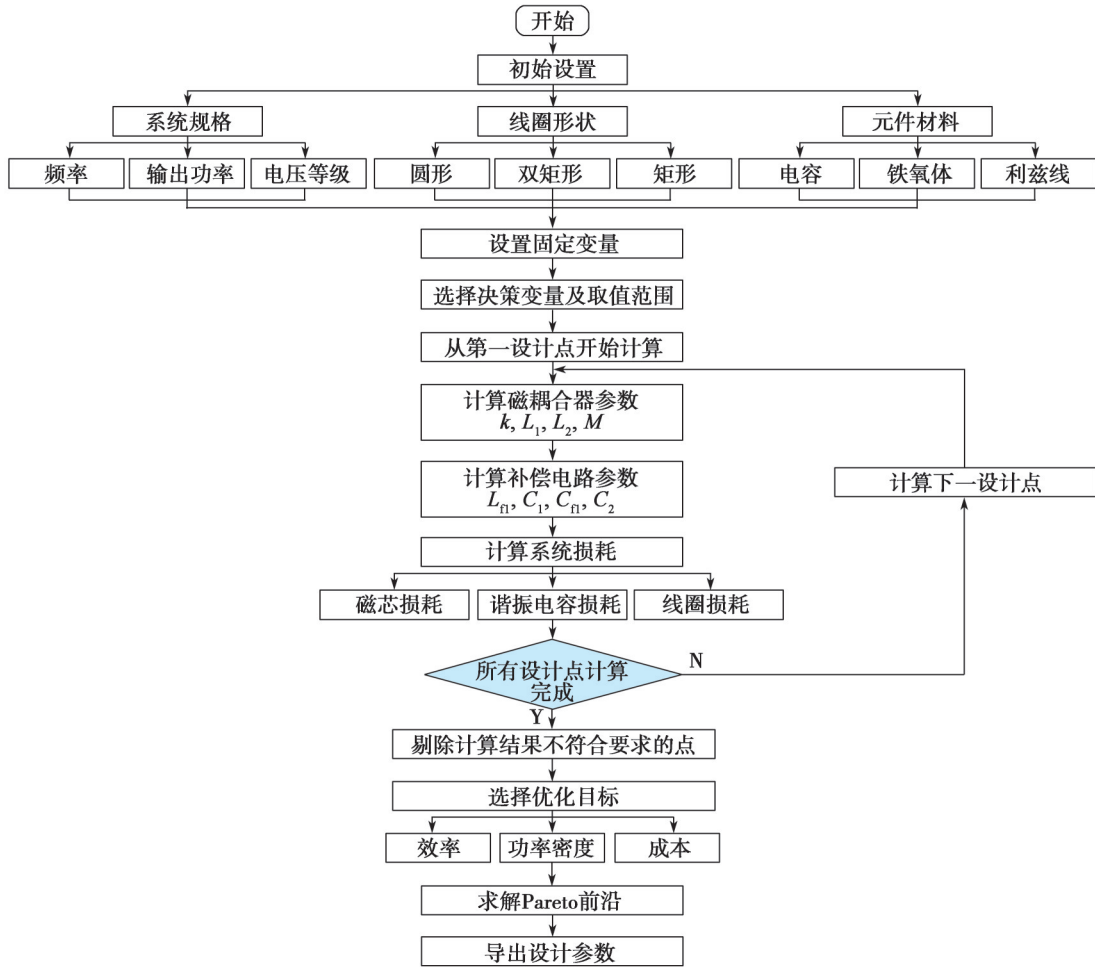


图7 磁浮列车无线供电系统多目标优化设计流程

Fig. 7 Process flow of multi-objective optimized design for WPT system for maglev train

$$\eta = \frac{P_{\max} \cdot n_s}{P_{\text{loss}_t} + P_{\text{loss}_r} \cdot n_s + P_{\max} \cdot n_s} \quad (1)$$

式中： $\eta$ 为能量传输效率； $P_{\text{loss}_t}$ 为发射端的功率损耗； $P_{\text{loss}_r}$ 为接收端的功率损耗； $P_{\max}$ 为单个接收端的最大输出功率； $n_s$ 为接收端的个数。

②功率密度的计算。

无线供电系统的功率密度 $\rho$ 定义为单个接收端的最大接收功率与接收端质量的比值，计算公式如下：

$$\rho = \frac{P_{\max}}{m_f + m_w + m_o} \quad (2)$$

式中： $P_{\max}$ 为最大接收功率； $m_f$ 为铁氧体条的质量，可通过铁氧体的体积和密度进行估算； $m_w$ 为绕组质量，可通过利兹线长度和密度进行估算； $m_o$ 为其他部件的质量，包括接收端壳体、线缆、电容、紧固件等质量，总质量约为17 kg。

③成本的计算。

无线供电系统的物料总成本包括3个部分，计算公式如下：

$$S = S_w + S_f + S_c \quad (3)$$

式中： $S_w$ 为利兹线成本； $S_f$ 为铁氧体条的成本； $S_c$ 为电容成本。

④磁浮列车全局多目标优化模型的建立。

磁浮列车IPT系统全局多目标优化设计模型表示如下：

$$F = \max_{\vec{x}=(x_1, x_2, x_3, x_4)} \begin{cases} f_1 = \eta(\vec{x}, \vec{a}, \vec{w}) \\ f_2 = \rho(\vec{x}, \vec{a}, \vec{w}) \\ f_3 = \frac{1}{S(\vec{x}, \vec{a}, \vec{w})} \end{cases}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} g_1: B_{\text{pas}} < 27 \mu\text{T} \\ g_2: \eta \geq 95\% \\ g_3: S < 10 \\ g_4: U_{c1\_rms} < 3000 \text{ V} \\ g_5: U_{c2\_rms} < 2300 \text{ V} \\ g_6: \vec{x}_{\min} \leq \vec{x} \leq \vec{x}_{\max} \\ g_7: \vec{w}_{\min} \leq \vec{w} \leq \vec{w}_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $F$ 为目标函数，即 $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 这3个目标值应尽可能大； $f_1$ 为能量传输效率； $f_2$ 为功率密度； $f_3$ 为成本的倒数； $\vec{x}$ 为决策向量，包括接收线圈长度 $x_1$ 、接收线圈宽度 $x_2$ 、接收线圈匝数 $x_3$ 、铁氧体条数 $x_4$ 共4个决策变量； $\vec{a}$ 为固定向量； $\vec{w}$ 为随动向量； $g_1 \sim g_7$ 为不等式约束。

### 3.3 仿真与优化结果

通过仿真计算得到的可行域包括320个可行解。以效率为横坐标、以成本和功率密度为纵坐标，投影出

两个平面解空间, 在该坐标系中表示出每组磁耦合器参数对应的目标函数值, 同时利用拟合法求解近似的 Pareto 前沿。由于能量传输效率模型只考虑磁耦合机构和谐振补偿电路的传能部分, 不包括前级逆变器和后级整流桥, 因此以效率不低于 95%、成本不高于 10 万元、车侧磁感应强度小于  $27\text{ }\mu\text{T}$  为约束, 筛选出 320 个可行解中符合全部约束条件的 11 个点, 画出其近似的 Pareto 前沿, 得到 5 个前沿解, 如图 8 所示。

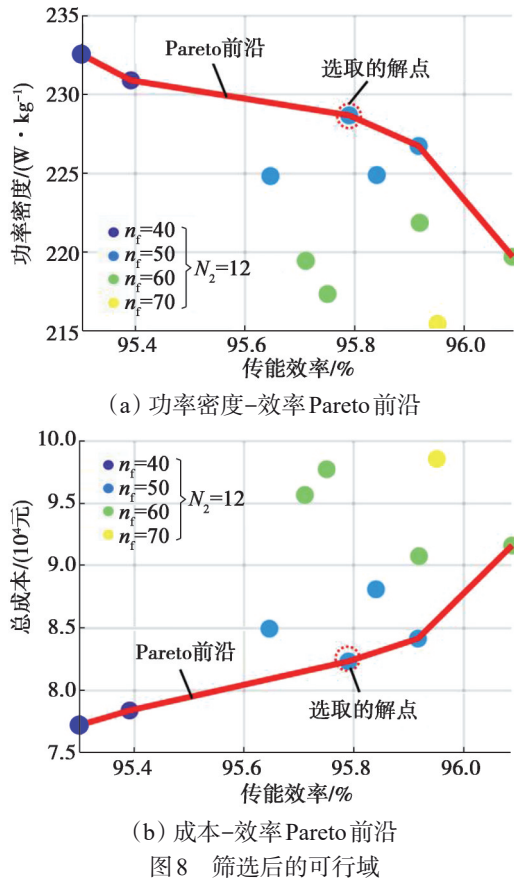


图 8 筛选后的可行域

为了解系统各部分产生功率损耗的占比, 对系统的损耗进行了分析, 图 9 为针对实车 150 kW 功率需求得到最优解的损耗分布情况。由图 9 可知, 系统损耗最主要的来源为铝板中的涡流损耗, 约占总损耗的 37%; 利兹线损耗即铜损, 是第二大损耗来源, 约占总损耗的 30%, 其中, 超过 80% 的利兹线损耗来自于发射线

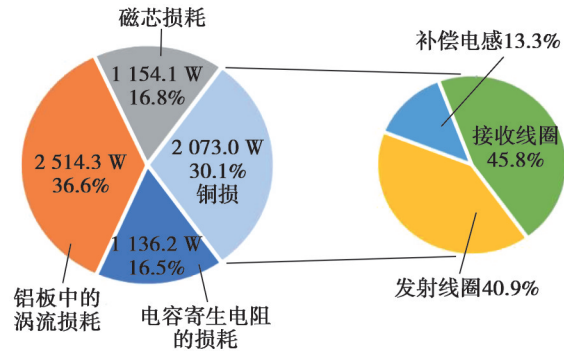


图 9 系统损耗分析

Fig. 9 Analysis of system loss

圈和接收线圈, 仅 13.3% 来自发射端的补偿电感  $L_n$ ; 此外, 电容寄生电阻导致的损耗和磁芯损耗大致相当, 都大约占总损耗的 17%。

3.4 系统样机搭建与试验验证

根据优化设计方案, 搭建了面向磁浮列车无线辅助供电系统的缩比测试样机。该磁浮列车无线供电试验平台包含单个发射端和 3 个接收端, 可实现 8.5 kW 功率传输, 如图 10 所示。为了验证系统全局优化设计方法的实用性和有效性, 在优化方案的基础上, 同时采用了两个不同的接收线圈进行对比。

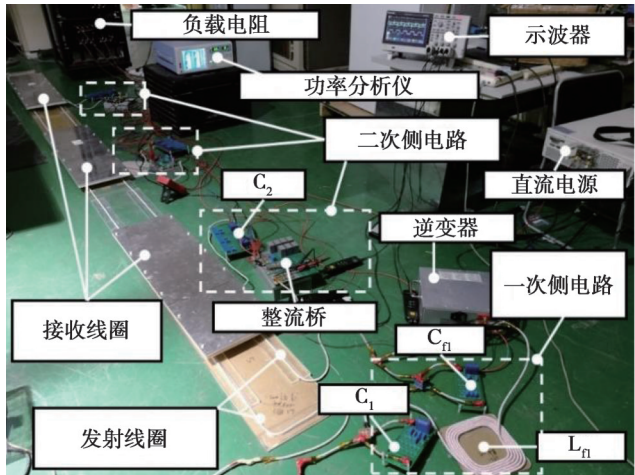
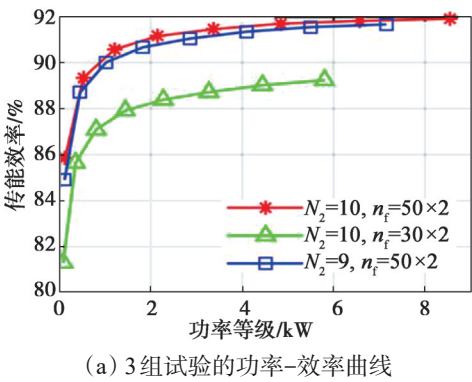


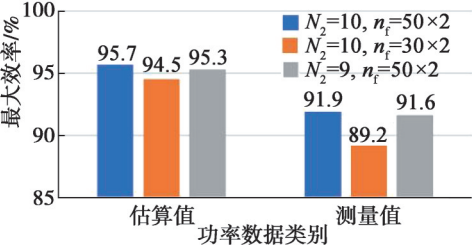
图 10 8.5 kW 样机试验平台

Fig. 10 Experimental platform of 8.5 kW prototype

通过对 3 个线圈进行无线电能传输测试, 得到仿真估算分析结果与实际测量的结果, 如图 11 所示, 其中蓝色为优化解, 橙色和灰色分别为两个对照线圈。由图 11(b) 可知, 采用优化解线圈的系统最大能量传输效



(a) 3 组试验的功率-效率曲线



(b) 效率估算值和测量值对比

图 11 对照试验结果

Fig. 11 Comparative experimental results

率为91.9%，优于采用对照线圈的系统，效率测量值相比于估算值约低了4个百分点，主要原因是逆变器和整流器存在损耗。

## 4 结论

本文以磁浮列车无线辅助供电系统为研究对象，提出了一种兼顾单发多收磁耦合结构和谐振补偿拓扑的多目标优化设计策略。主要结论如下：

① 对比分析S-S、LCC-S、LCC-LCC这3种谐振补偿拓扑的工作特性，确定了LCC-S拓扑作为磁浮列车无线充电系统的补偿电路方案。该拓扑在单个接收线圈单元发生故障时，能够保持一次侧线圈电流的稳定性，确保其他接收单元的功率传输不受影响。

② 提出了基于Pareto最优解的磁浮列车无线辅助供电系统全局多目标优化设计流程。通过仿真计算，筛选出符合约束条件的可行解，并绘制了Pareto前沿曲线，为系统设计提供了最优解集。

③ 依据设计方案搭建了8.5 kW单发三收LCC-S补偿式IPT系统原理样机，能量传输效率达91.9%，并通过对比试验验证了全局多目标优化设计方法的有效性。

本研究中未考虑无线充电系统设计中电力电子变换器对系统效率的影响，未来应建立各级变换器的损耗模型，并将损耗纳入优化设计的考虑，进一步提升设计的有效性。

## 参考文献：

- [1] CASSAT A, JUFER M. MAGLEV projects technology aspects and choices[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2002, 12(1): 915-925.
- [2] SONG B M, KRATZ R, GUROL S. Contactless inductive power pickup system for maglev applications[C]//IEEE. Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting. Pittsburgh: IEEE, 2002: 1586-1591.
- [3] SAKAMOTO S, WATANABE H, TAKIZAWA T, et al. Development of a maglev superconducting magnet for the Yamanashi test line in Japan: vibration characteristics and analysis for design[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 1997, 7(3): 3791-3796.
- [4] PARK D Y, SHIN B C, HAN H. Korea's urban maglev program[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(11): 1886-1891.
- [5] 孙玉玲, 秦阿宁, 董璐. 全球磁浮交通发展态势、前景展望及对中国的建议[J]. 世界科技研究与发展, 2019, 41(2): 109-119.
- [6] SUN Yuling, QIN Aning, DONG Lu. Research on development and prospects of maglev transportation and suggestions to China[J]. World sci-tech R & D, 2019, 41(2): 109-119.
- [7] WANG Hao, LI Xin. Review and research progress of wireless power transfer for railway transportation[J]. IEEJ transactions on electrical and electronic engineering, 2019, 14(3): 475-484.
- [8] CHUNG Y D, LEE C Y, LEE W S, et al. Operating characteristics for different resonance frequency ranges of wireless power charging system in superconducting maglev train[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2019, 29(5): 1-5.
- [9] 赵争鸣, 刘方, 陈凯楠. 电动汽车无线充电技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 30-40.
- [10] ZHAO Zhengming, LIU Fang, CHEN Kainan. New progress of wireless charging technology for electric vehicles[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2016, 31(20): 30-40.
- [11] 张波, 黄润鸿, 疏许健. 无线电能传输原理[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [12] ZHANG Bo, HUANG Runhong, SHU Xujian. Principle of wireless power transmission[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [13] DIEKMANN A, HAHN W, KUNZE K, et al. The support magnet cladding with integrated IPS® pick-up coil of transrapid vehicles[C]//TRID. MAGLEV'2006: The 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. Dresden: TRID, 2006: 1-5.
- [14] BAUER M, BECKER P, ZHENG Q. Inductive power supply(IPS®)for the transrapid[C]//TRID. MAGLEV'2006: The 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives. Dresden: TRID, 2006: 1-6.
- [15] ZHANG Ying, ZHANG Ruihua, DU Yumei. Study and optimized design of contactless power transformer for high speed maglev train[C]//IEEE. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing: IEEE, 2011: 1-4.
- [16] ZHANG Ying, DU Yumei, ZHANG Ruihua, et al. Study on a novel flat winding transformer with sandwich construction magnet core in CPS system for high speed transportation[C]//IEEE. 2012 15th International Conference on Electrical Machines and Systems. Sapporo: IEEE, 2012: 1-4.

# Multi-objective optimization of auxiliary wireless power supply system for maglev trains

CHENG Long<sup>1,2</sup>, DONG Kan<sup>1,2</sup>, WANG Shuo<sup>3</sup>

- (1. Locomotive and Car Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;
- 2. Beijing Zongheng Electro-Mechanical Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China;
- 3. National Engineering Research Center of Electric Vehicles, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** During the operation of maglev trains approaching stations, the electric energy generated by the linear generators propels the trains but is insufficient to meet the power demands of onboard equipment. Traditional contact power supply methods have shown deficiencies in various aspects, such as high installation and maintenance costs, as well as the safety risks associated with exposed live conductors. In contrast, wireless power transfer (WPT) technology eliminates the need for physical cable connections, allowing maglev trains to operate without mechanical contact and enhancing the safety, economic efficiency, and environmental adaptability of their auxiliary power supply system. This paper focuses on the optimized design for the magnetic coupling mechanism and resonant compensation circuit, addressing specific requirements of auxiliary WPT systems in maglev train applications including high power demands and efficiency requirements. A finite element model of a magnetic coupling mechanism with a single-transmitter multiple-receiver (STMR) configuration was established. The operational characteristics of three resonant compensation topologies (S/S, LCC/LCC, LCC/S) for WPT systems were compared and analyzed. A global multi-objective optimization design strategy was introduced based on the concept of Pareto optimal solutions. Furthermore, an 8.5 kW auxiliary WPT system prototype was built for verification. The experimental results demonstrated the proposed optimization scheme in meeting the design requirements of WPT systems for maglev trains, with an energy transfer efficiency of up to 91.9%.

**Keywords:** maglev train; wireless power transfer (WPT); multi-objective optimization; magnetic coupling mechanism; resonant compensation topology; finite element