



# 船闸浮式系船柱浮动式无线供电系统设计

齐俊麟, 覃涛, 江涛

(长江三峡通航管理局, 湖北宜昌 443002)

**摘要:** 针对某大型单级船闸浮式系船柱监测系统供电问题, 提出一种用于船闸的浮式系船柱无线供电方案。设计无线供电系统电路结构, 并对耦合机构进行仿真, 得到主电路优化设计参数; 设计无线供电系统发射端及接收端的装置结构, 两者在一定水位时能自动对准并随动; 制作安装无线供电系统样机并进行测试, 结果表明: 发射端及接收端对准时, 开启无线供电系统实施充电, 实现边升降边充电, 无线供电系统接收端能有效接收发射电能, 并转换为能量流输送至监测系统蓄电池, 实现 184.36 W 的能量传输, 效率达到 67.3%。

**关键词:** 船闸; 浮式系船柱; 浮动式; 无线供电

中图分类号: TM12; U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0173-07

## Design of floating wireless power supply system for floating mooring poles of ship lock

QI Junlin, QIN Tao, JIANG Tao

(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443002, China)

**Abstract:** Aiming at the power supply issue of the monitoring system for the floating mooring column of the single ship lock, a wireless power supply scheme for the floating mooring column of a large single-stage ship lock is proposed. We designed the circuit structure of the wireless power supply system and simulated the coupling mechanism to obtain the optimized design parameters of the main circuit. The device structure of the wireless power supply system's transmitter and receiver is designed, which can automatically align and follow up at a certain water level. The prototype of wireless power supply system is manufactured and installed for testing. The results show that when the transmitting and receiving ends are aligned, the wireless power supply system is activated for charging, achieving simultaneous lifting and charging. The receiving end of the wireless power supply system can effectively receive the transmitted electrical energy, convert it into energy flow, and transmit it to the monitoring system battery, achieving an energy transmission of 184.36 W with an efficiency of 67.3%.

**Keywords:** ship lock; floating bollards; floating; wireless power supply

浮式系船柱是船闸内重要的通航设施, 它可以随闸室内充泄水时的水位变化自动升降, 长期工作在船闸高低水位落差区间, 为船舶安全过闸提供重要保障<sup>[1-2]</sup>。浮式系船柱数字化监测系统<sup>[3-5]</sup>使用蓄电池作为主要供电方式, 而蓄电池续航时间有限, 需要人工频繁地更换蓄电池, 劳动强度大、危险系数高, 更换不及时甚至出现断电现象, 影响系统运行; 浮式系船柱的工作环境恶

劣, 特别是高水头船闸, 其上下游落差较大, 水位波动频繁, 传统有线供配电方式无法满足工作要求。

本文提出一种船闸浮式系船柱无线供电方案<sup>[6-8]</sup>, 在系船柱升降过程中实现无线供电。分析无线供电需求, 并对无线供电系统电路、耦合机构、系统结构进行详细设计, 制作安装系统样机并进行测试。

收稿日期: 2023-12-02

作者简介: 齐俊麟 (1964—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为大型梯级枢纽绿色高效通航管理。

### 1 船闸浮式系船柱无线供电需求

某大型单级船闸浮式系船柱，安装在闸墙内的 U 形槽中，随水位的升降上下运行，最大设计水位落差达 27 m。如图 1 所示，船闸日均运行 16 闸次，系船柱运行到上限的位置(水位)基本稳定，每闸次在上限位停留约 0.5 h，则上限位每天停留累计时间约 8.0 h。系船柱的监测系统中布置有传感和通讯设备，总功率不大于 200 W。系船柱上下浮动工作时位置不断变化，无法在系船柱上敷设有线电缆，因此考虑采用无线供电方式对监测系统供电。

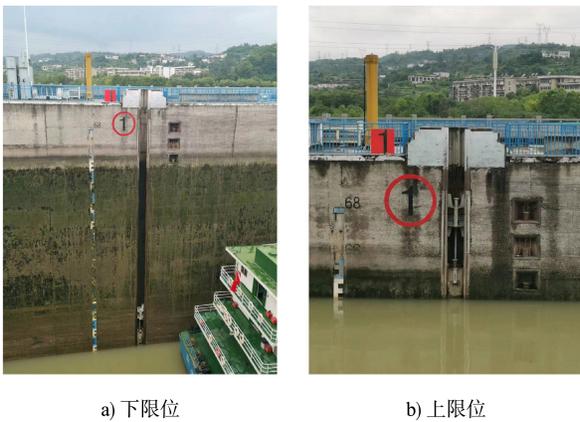


图 1 系船柱工作现场

### 1.1 无线供电系统尺寸位置需求

浮式系船柱俯视图见图 2，结合监测系统安装位置，可将无线供电系统接收端布置在位置 I 区，发射端布置在位置 II 区，即闸墙与浮式系船柱之间的间隙(10~20 cm)。

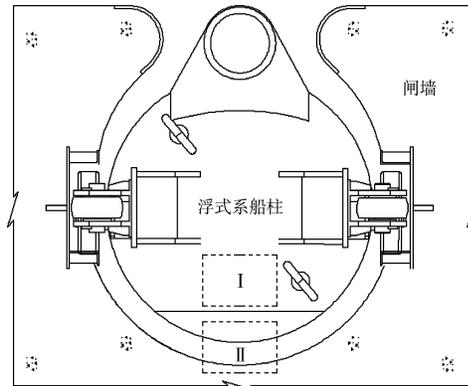


图 2 系船柱俯视图

### 1.2 无线供电系统充放电需求

系船柱监测系统外接 30 Ah 的组装蓄电池(6 串 10 并, 60 个)，单颗电池电压工作范围为 3.2~4.2 V，实际工作中，蓄电池的电压范围为 18.2~25.2 V，额定电压 24 V。无线供电系统设计指标见表 1。

表 1 无线供电系统设计指标

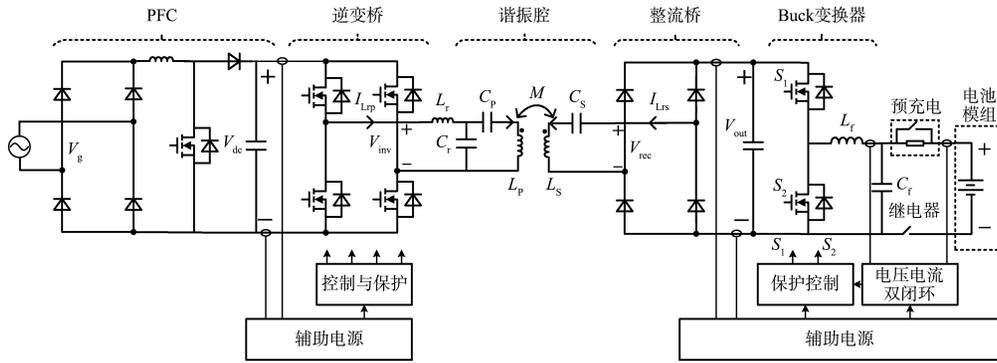
输入交流电压/V	输出直流电压/V	输出功率/W	输出电流/A	冷却方式	充电功能	保护功能
200~240	18~24	150~200	8.3	自然散热	恒压充电/恒流充电	过压、过流、过温、短路保护

## 2 船闸浮式系船柱无线供电电路方案设计

### 2.1 无线供电电路总体结构

无线供电电路拓扑见图 3，其工作流程为：首先进级功率因数校正模块(PFC)将 220 V 交流电变成 360 V 直流母线；然后通过原边的定频逆变桥将直流逆变成高频交流电，经过补偿网络<sup>[9]</sup>

(LCC-S)和耦合机构<sup>[10]</sup>，将能量无接触地传输到副边，通过二极管整流桥形成低压侧母线，级联的降压变换电路(Buck 变换器)用于电池充放电管理和控制，通过控制副边 Buck 变换器，实现恒压/恒流的切换与控制，且适应 10~20 cm 的传输距离要求。



注:  $V_g$  为交流输入电压,  $V_{dc}$  为原边 PFC 之后电压,  $V_{inv}$  为原边逆变之后电压,  $V_{rec}$  为副边整流之前电压,  $V_{out}$  为副边整流之后电压,  $L_p$ 、 $L_s$  为原副边线圈自感,  $M$  为线圈互感,  $L_r$  为原边谐振电感,  $C_p$  为原边并联谐振电容,  $C_s$  为原边串联谐振电容,  $C_s$  为副边串联谐振电容,  $S_1$ 、 $S_2$  为后级 Buck 变换器的两个开关管,  $L_f$ 、 $C_f$  为后级 Buck 变换器的电感和电容,  $I_{Lip}$ 、 $I_{Lrs}$  分别为原副边谐振腔电流。

图 3 无线供电电路结构拓扑图

### 2.2 耦合机构设计

耦合机构是整个无线供电系统的核心部分, 直接决定供电系统性能, 而耦合线圈是耦合机构的主要组成部分, 考虑本方案结构简单, 功率较小, 耦合线圈采用效率高、泄漏场小的平面圆形线圈。

耦合机构设计本质是耦合线圈的设计, 影响线圈设计优劣的主要参数包括线圈形状、大小、线径、匝数、匝间距以及两线圈之间的传输距离。

如图 4 所示, 选取绕线内径  $r_{in}$  为外径  $r_{out}$  的 0.4 倍, 磁芯采取分裂式磁条排布。

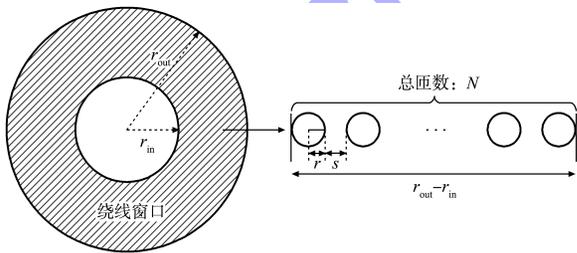


图 4 圆形线圈绕制

#### 2.2.1 耦合机构优化约束条件

考虑实际安装空间对磁耦合机构尺寸的限制, 实际磁耦合机构的结构参数受到限制, 磁耦合机构的半径约束为  $r_{max}$ , 因此结构参数的约束条件为:

$$r_{out} < r_{max} \quad (1)$$

结合 LCC-S 补偿拓扑, 根据图 3 的增益表达式为:

$$G = \frac{V_{rec}}{V_{inv}} = \frac{M}{L_r} \quad (2)$$

其中:

$$M = k \sqrt{L_p L_s} \quad (3)$$

式中:  $k$  为耦合系数。

因为 LCC-S 补偿拓扑的设计需要满足  $L_r < L_p$ , 因此线圈电气约束条件表示为:

$$\begin{cases} G = \frac{V_{rec}}{V_{inv}} = \frac{k \sqrt{L_p L_s}}{L_r} \\ L_r < L_p \end{cases} \quad (4)$$

#### 2.2.2 耦合机构优化设计目标

耦合系数  $k$  是影响磁耦合机构效率的关键, 因此耦合机构优化设计目标应当在约束条件内维持更高的  $k$ 。线圈本身具有较高的铜损, 应尽可能提高单位面积内的传能密度, 降低线圈长度, 从而降低线圈铜损。考虑到实际应用, 磁耦合机构还应具有一定的抗偏移性能, 并考虑对漏磁情况及磁屏蔽的处理。

#### 2.2.3 耦合机构优化设计结果

结合上述设计流程, 进行 ANSYS 仿真, 仿真结构与磁场分布见图 5, 铝板在最外层, 向内依次为磁芯 (厚度为 2 mm) 和线圈, 与实际结构尺寸相同, 磁场分布较为集中且泄露小。根据 ANSYS 仿真结果得到设计结果见表 2, 得到耦合机构电气参数见表 3。

表 2 耦合机构几何参数

原副边线圈 外半径/mm	原边线圈内 半径/mm	副边线圈内 半径/mm	原边线圈 匝数/匝	副边线圈 匝数/匝	绕线宽度/ mm	原副边线圈匝 间距/mm	线圈间 距离/mm
155	40	100	23	12	3	5	80

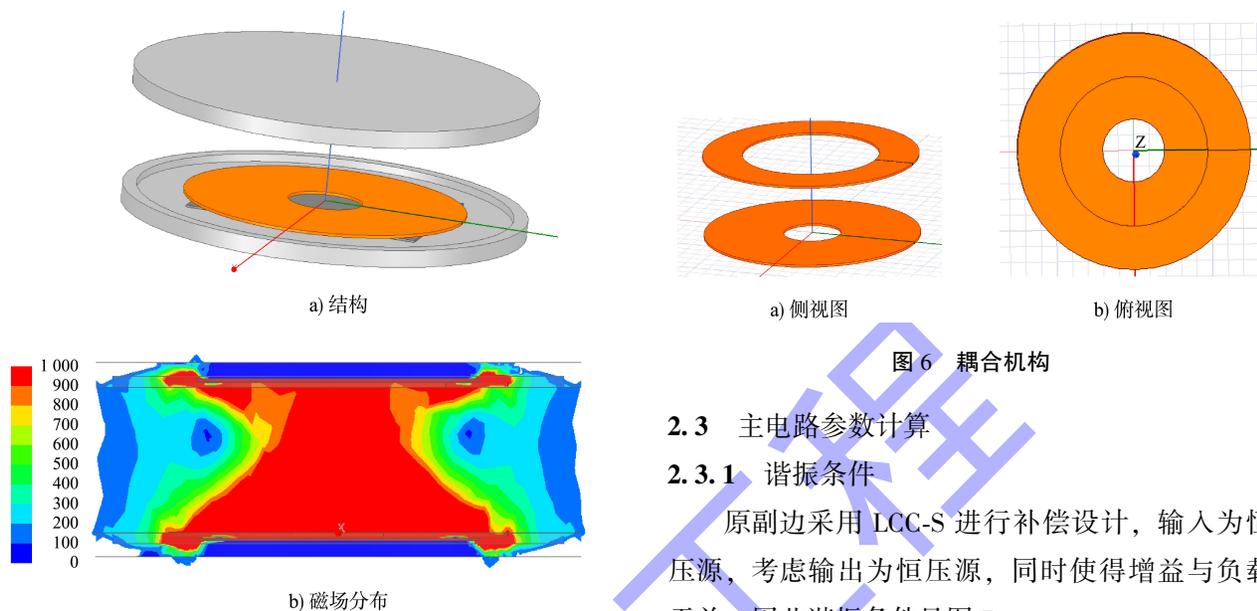


图 5 耦合机构结构和磁场分布

表 3 耦合机构电气参数

原边线圈 自感/ $\mu\text{H}$	副边线圈 自感/ $\mu\text{H}$	耦合 系数	原边线圈等效 电阻/ $\text{m}\Omega$	副边线圈等效 电阻/ $\text{m}\Omega$
93.4	30.15	0.13	39.7	8.63

2.2.4 耦合机构工作范围

浮式系船柱工作时随水位波动，无线供电系统工作时耦合机构可能不完全对准，此时耦合机构错位偏移，耦合系数也将产生变化，导致充电板的输入电压发生改变。如图 6 所示，耦合机构采用不对称线圈。由于充电板的输入电压为 30~60 V，因此耦合系数也有一定范围的变化。通过实际测量，耦合机构外边界在 35~45 cm 范围内变化时，充电板输入电压范围为 32~50 V。

图 6 耦合机构

2.3 主电路参数计算

2.3.1 谐振条件

原副边采用 LCC-S 进行补偿设计，输入为恒压源，考虑输出为恒压源，同时使得增益与负载无关，因此谐振条件见图 7。

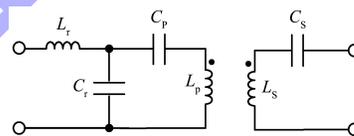


图 7 谐振电路

原边设计补偿电感  $L_r$  和谐振电容  $C_r$  谐振，满足：

$$L_r C_r = 1/\omega^2 \tag{5}$$

考虑到软开关，选择线圈自感  $L_p$ 、补偿电感  $L_r$  和谐振电容  $C_p$  谐振，使得变压器自感对增益无影响，即满足：

$$(L_p - C_r) C_p = 1/\omega^2 \tag{6}$$

副边设计补偿电感  $L_s$  和谐振电容  $C_s$  谐振，满足：

$$L_s C_s = 1/\omega^2 \tag{7}$$

式中:  $\omega$  为谐振角频率, 设置为开关角频率, 即:  $\omega = 2\pi f_s$ , 其中  $f_s$  为开关频率, 根据损耗、体积关系自行设计确定。

### 2.3.2 增益限制

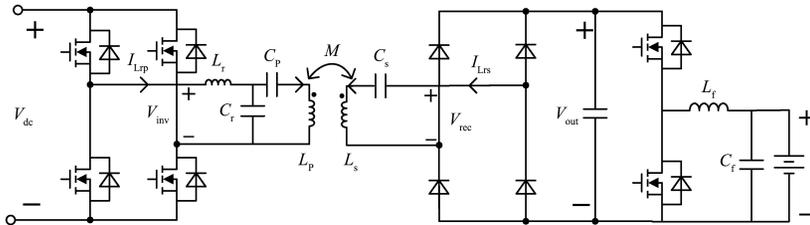


图8 原副边补偿电路

输入电压  $V_{dc}$  与经过逆变之后谐振腔输入电压  $V_{inv}$  之间的关系为:

$$\frac{V_{inv}}{V_{dc}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \quad (9)$$

谐振腔输出电压  $V_{rec}$  经过整流之后与输出电压  $V_{out}$  之间的关系为:

$$\frac{V_{out}}{V_{rec}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \quad (10)$$

综上, LCC-S 输入电压到输出电压总的增益特性可表示为:

$$G_{in-out} = \frac{V_{out}}{V_{dc}} = \frac{V_{inv}}{V_{dc}} \cdot \frac{V_{rec}}{V_{inv}} \cdot \frac{V_{out}}{V_{rec}} = \frac{M}{L_r} \quad (11)$$

额定状态下(额定功率与额定输入输出电压), 使电压增益等于额定输出电压/额定输入电压。额定输入电压 360 V, 输出电压范围 45.6~50.4 V, 额定输出电压 36 V, 额定功率为 200 W。因此, 在额定状态下, 设计 LCC-S 输入电压到输出电压总增益  $G_{in-out}$  为 0.1。

将  $k=0.13$ ,  $L_p=93.4 \mu\text{H}$ ,  $L_s=30.15 \mu\text{H}$  代入式(11)得到谐振电感取值, 根据谐振条件, 得到谐振电容值:  $C_p=37.3 \text{ nF}$ ,  $C_r=105 \text{ nF}$ ,  $C_s=82.5 \text{ nF}$ ,  $L_r=68 \mu\text{H}$ 。

### 2.3.3 效率条件

谐振腔等效电路模型见图9, 通过列写时域表达式求解效率表达式。

当原副边补偿拓扑满足以下条件时(图8), 谐振网络的增益可表示为:

$$G_{LCC-S} = \left| \frac{\dot{V}_{rec}}{\dot{V}_{inv}} \right| = \frac{M}{L_r} \quad (8)$$

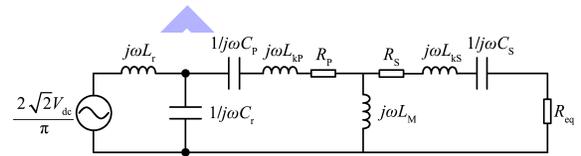


图9 谐振腔等效电路模型

其中  $L_{kp}$ 、 $L_{ks}$  为原副边自感减去互感得到:

$$\begin{cases} L_{kp} = L_p - L_M \\ L_{ks} = L_s - L_M \end{cases} \quad (12)$$

$L_M$  为互感, 其公式为:

$$L_M = k\sqrt{L_p L_s} \quad (13)$$

考虑谐振条件, 根据图9可列出效率表达式为:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{(\omega L_M)^2 (R_s + R_{eq})}{R_{eq} [R_p (R_s + R_{eq}) + (\omega L_M)^2]} \quad (14)$$

式中:  $R_p$ 、 $R_s$  分别为原副边线圈的电阻,  $R_{eq}$  为负载等效电阻, 仿真得到原边线圈电阻为  $0.024 \Omega$ , 副边线圈电阻为  $0.012 \Omega$ , 损耗为 95.5%, 满足设计要求。

### 2.3.4 软开关

无线电能传输系统的谐振网络为了满足软开关要求, 输入阻抗应为感性, 易于实现开关管零电压开通。理想情况下全谐振电压电流同相呈阻性, 不利于软开关, 可通过将原边  $C_p$  略微减小, 副边  $C_s$  略微增大, 电流可以抽走电荷, 使电压为 0, 实现软开关。

### 2.4 蓄电池充电管理策略

系统蓄电池采用两段式充电管理策略<sup>[11]</sup>，见图 10。在开始充电之前，首先检测电池电压，若电池电压低于门限电压(约 19.2 V)，则以 0.1 C 的小电流对电池进行涓流充电，使电池电压缓慢上升；当电池电压达到门限电压时，进入恒流充电，在此阶段以较大的电流(0.5~1.0 C)强度对电池进行快速充电，电池电压上升较快，电池容量将达到额定值的 85%；在电池电压上升到上限电压(25.2 V)后，电路切换到恒压充电模式，电池电压基本维持在 25.2 V，充电电流逐渐减小，充电速度变慢，这一阶段主要保证电池充满，当充电电流降到 0.1 C 或 0.05 C 时，即判定电池充满。

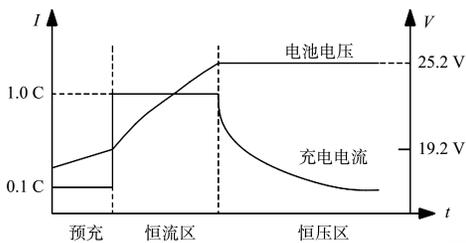


图 10 电池组充电策略

闸充水时，浮式系船柱随船闸水位上升而上升，当达到设计水位时，无线供电系统发射端与接收端对接，无线供电系统向监测系统蓄电池充电；当水位进一步上涨时，接收端托架与发射端接触，接收端托住发射端随水位上升，无线供电系统继续工作；船闸泄水时，无线供电系统发射端随接收端下降，当发射端下降至滑轨下端极限位时与接收端分离，无线供电系统停止充电。

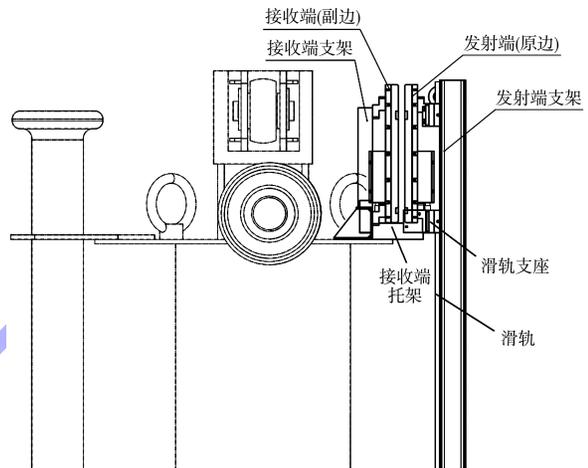


图 11 无线供电系统结构

## 3 船闸浮式系船柱无线供电系统的设计

### 3.1 无线供电系统总体设计

浮动式无线供电系统由发射端支架(含滑轨、滑轨支座)、发射端(原边)、接收端(副边)、接收端支架、接收端托架等组成，见图 11。

无线供电系统总体设计方案可以在浮式系船柱运行中实现边升降边充电。其工作原理为：船

### 3.2 无线供电系统原副边结构设计

无线供电系统原副边结构见图 12，包含：PCB 壳上盖、PCB 壳体、线圈上盖、线圈外壳侧壁，线圈底板、线圈外壳底板和法兰垫圈等零部件，各零部件之间采用螺栓连接，O 形圈密封，主体结构采用 6061 铝合金，线圈外壳底板和线圈底板采用聚四氟乙烯。

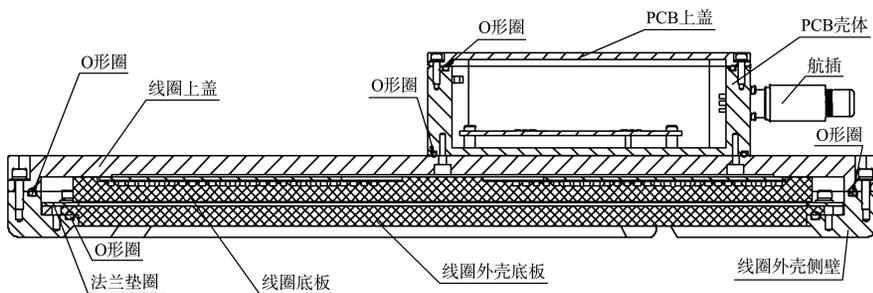


图 12 原副边结构设计方案

## 4 船闸浮式系船柱无线供电系统的安装与测试

### 4.1 无线供电系统安装

根据无线供电系统总体设计方案，加工制作

无线供电系统样机，并进行现场安装，见图 13。无线供电发射端通过支架安装在闸墙内，接收端通过支架安装在浮式系船柱上部平台，发射端支

架以开槽方式安装在闸墙内部。闸面上布置弹簧线缆为发射端供电,接收端通过线缆与蓄电池连接。



图 13 无线供电系统现场安装

#### 4.2 无线供电系统测试

将无线供电系统接入 200~240 VAC 市电网络下,接通电源后测试无线供电系统的工作状态,使用数字万用表、数字钳流表检测发射端和接收端电压及电流,系统测试结果见表 4。

表 4 测试结果

端口	电压/V	电流/A	功率/W
发射端输入	215.60	1.27	273.81
接收端输出	22.76	8.10	184.36

系统各模块工作正常,发射端输入电压为 215.60 V,输入电流由 0 A 升至 1.27 A 后稳定,接收端输出电压为 22.76 V,输出电流由 0 A 升至 8.10 A 后稳定,系统输出功率 184.36 W,对应充电效率为 67.3%,所设计的无线供电系统实现浮式系船柱无线供电任务需求。

#### 5 结语

1) 分析船闸浮式系船柱监测系统供电需求,针对浮式系船柱工作环境和运行特点,提出一种可浮动的船闸浮式系船柱无线供电方案。

2) 重点对无线供电的耦合机构进行优化,得到耦合机构几何参数和电气参数;对主电路参数进行计算,得到原边、副边各电元件参数值;对

无线供电系统的发射端和接收端进行结构设计,两者在一定水位时能自动对准并随动。

3) 制作安装浮式系船柱无线供电系统样机,并进行现场测试。结果显示:浮式系船柱上升至一定水位时,接收端与发射端对准并开启供电系统的充电,实现边升降边充电。系统各模块工作正常,接收端可有效接收发射电能,并转换为能量流输送至监测系统蓄电池,传能 184.36 W,效率 67.3%。

#### 参考文献:

- [1] 齐俊麟,汪洋,张勇. 三峡—葛洲坝梯级枢纽安全高效绿色通航技术与实践[J]. 长江技术经济, 2023, 7(1): 98-105.
- [2] 刘振嘉. 葛洲坝船闸水工建筑物运行维护管理实践[J]. 水运工程, 2020(2): 9-13.
- [3] 刘明维,王钟浩,吴林键,等. 船闸浮式系船柱系缆安全监测方法研究[J]. 水运工程, 2023(3): 85-91.
- [4] 刘明维,李明龙,吴林键,等. 船闸浮式系船柱受荷响应力学模型[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(5): 127-132.
- [5] 刘明维,曾丽琴,齐俊麟,等. 船闸浮式系船柱受力状态数值模拟[J]. 水运工程, 2020, (12): 112-117.
- [6] 傅文珍,张波,丘东元,等. 自谐振线圈耦合式电能无线传输的最大效率分析与设计[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(18): 21-26.
- [7] 王晨宇. 旋转式非接触电能传输装置的设计[D]. 大庆:东北石油大学, 2022.
- [8] 杨可. 基于原边反馈的无线充电装置设计[D]. 西安:西安石油大学, 2021.
- [9] 耿琪琛,刘坤,程少宇,等. 不同补偿拓扑结构下电动汽车无线充电系统传输特性对比[J]. 电力科学与工程, 2021, 37(9): 18-25.
- [10] 邵瑞,侯德超. 非接触牵引供电系统电磁耦合机构优化设计研究[J]. 变压器, 2023, 60(4): 49-54.
- [11] 邢乐晟. 电动汽车移动无线充电系统恒流恒压控制研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2022.

(本文编辑 赵娟)