

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007277

面向最优效率的潜标耦合电能传输系统*

徐佳毅^{1,3}, 李洪宇², 谢子铭^{1,3}, 李醒飞^{1,3}

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072; 2. 山东科技大学 海洋科学与工程学院 青岛 266590;
3. 天津大学青岛海洋工程研究院 青岛 266200)

摘要:将耦合电能传输技术应用于潜标系统,能够为其携带的通信信标,提供无电气接触的充电功能。但由于信标与潜标的间距会发生变化,导致系统处于偏谐振状态,系统效率降低。本文首先分析耦合线圈随间距变化的规律,并对系统进行建模,分析系统偏谐振状态下线圈耦合效率与频率的关系;利用仿真验证了通过搜索算法调整工作频率,实现系统效率提升的可行性;建立线圈间距可变的系统样机,验证搜索算法对于系统效率提升的有效性。实验表明,当线圈间距变化时,搜索算法能够实现系统效率的提升。粒子群搜索算法的最大效率相对定步长扰动观测法提升3%,并且受到初始中心频率的选择影响较小,具有很好的鲁棒性,能够用于提升系统在线圈间距变化时的传输效率。

关键词:最优效率;潜标;耦合电能传输;偏谐振;粒子群最优算法

中图分类号: TM72 TH766 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Submerged buoy coupling power transfer system for optimal efficiency

Xu Jiayi^{1,3}, Li Hongyu², Xie Ziming^{1,3}, Li Xingfei^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. College of Ocean Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
3. Qingdao Institute for Ocean Engineering of Tianjin University, Qingdao 266200, China)

Abstract: When the coupling power transfer (CPT) is applied in the submerged buoy system, it can provide power for the communication beacon without electrical contact. However, the distance between the beacon and the submerged buoy will change. The system may be in the deviating resonance state and its efficiency will be reduced. In this article, the law of the coupling coil with the distance is analyzed. The model of the CPT system is formulated. The relationship between the coil efficiency and frequency in the deviating resonance state is studied. The system efficiency can be improved by using the search algorithm, which is evaluated by simulation. A prototype of the CPT system with variable distance is established to evaluate the search algorithm. Experimental results show that the search algorithm can improve the system efficiency under the change of the coil distance. Compared with the fixed-step perturbation observation algorithm, the maximum efficiency of the particle swarm optimization (PSO) is increased by 3%, which is less affected by the choice of the initial center frequency. The efficiency of the CPT system can be improved when the coil distance changes by using PSO.

Keywords: optimal efficiency; submerged buoy; coupling power transfer; deviating resonance; particle swarm optimization

0 引言

潜标是海洋观测领域内重要的观测设备,可以携带传感器在水下特定深度进行长期观测,避免海面恶劣环

境对设备造成破坏^[1-2]。潜标系统通常配备多组通信信标,可脱离潜标上浮至海面,并将观测数据发送至岸基终端。然而,由于信标释放前通常需要在潜标中放置超过一年的时间,目前多采用自容方式保证供电,导致其需要携带大量电池,增加了信标的质量和体积^[3-4]。

收稿日期:2020-12-22 Received Date: 2020-12-22

* 基金项目:山东省重点研发计划(2019GHY112072,2019GHY112051)、精密测试技术及仪器国家重点实验室开放基金(pilab1906)项目资助

耦合电能传输技术因其无电气连接,具有一定自由度等优势,十分适合水下设备的非接触能源补给^[5-8]。将耦合电能传输技术应用于潜标和信标中,可以实现潜标为信标的实时供电,减少信标搭载电池数量,有效的减小信标体积,增加潜标可配备信标数量。但是,由于海流的影响,信标与潜标的间距会发生变化,导致耦合线圈参数的改变,进而影响了耦合电能传输效率^[9]。

针对线圈参数变化引起耦合电能传输系统输出特性的改变,国内外学者进行了相关的研究。文献[10]提出利用调整频率的方式使初级电流相角达到 0° ,以获得最大功率输出,但当系统耦合系数较大时,会存在多个零相角频率。文献[11]进一步分析得出次级电流相角与最大输出功率之间唯一对应关系,但并没有对系统传输效率进行详细分析。文献[12]采用初次级电压变换器结构,实现耦合系数的辨识,但是增加的电压变换器会降低系统整体效率。文献[13]采用定步长扰动观测法,在保证输出功率恒定的前提下,搜索系统输入电流最小值所需的频率,实现了间接的最优效率搜索。利用具有全局搜索特性的粒子群最优搜索算法^[14-16],能够快速确定系统的最优值,及其达到最优值的条件。粒子群最优搜索算法在光伏系统的最大功率跟踪中应用十分广泛^[17-18],但是在耦合电能传输的最大效率搜索中尚未有相关研究。

海洋设备的能源大多来自其自身携带的电池,因此,保证耦合电能传输系统在线圈参数变化时处于最大效率工作状态,对于提升潜标工作寿命具有重要的意义。本文首先建立潜标耦合电能传输系统模型,分析系统效率与频率关系。利用潜标与信标间已有的数据传输链路,本文提出将负载端和供电端功率直接传输至初级,实时计算系统效率。将粒子群最优搜索算法引入耦合电能传输系统的最优效率搜索中,并在线圈间距处于 $20\sim 60\text{ mm}$ 变化范围内,与定步长扰动观测算法进行比较分析。

1 潜标耦合电能传输系统模型

潜标系统总体结构如图1所示,包括潜标和信标两部分。潜标配备多个充电仓,可同时携带多套信标存储观测数据。当信标接收到释放命令,利用自身的正浮力特性上浮至水面,通过卫星将数据发送至岸基终端。潜标与信标之间无电气连接,利用耦合电能传输技术实现实时能源供给,可以减少放置于信标内的电池数量。

1.1 潜标系统结构及线圈分析

具体到充电仓与信标,其电路结构如图2所示。耦合电能传输系统包括高频逆变电路、耦合线圈、整流滤波电路、负载、无线通讯模组等。潜标内锂电池包输出的直流电 U_{bus} 经过高频逆变电路,转换为高频方波,其有效值

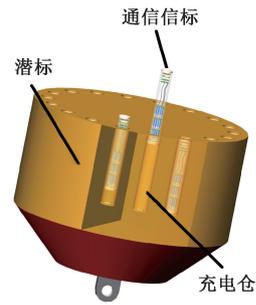


图1 潜标系统总体结构

Fig. 1 The overall structure of the submerged buoy

为 U_{IN} ,经过耦合线圈的电磁转换成为 U_{eq} ,通过信标内的整流滤波电路,最后变为直流电 U_{out} 为信标内的负载 R_L 供电。 P_{in} 和 P_{out} 分别表示潜标锂电池包的输出功率与信标负载接收功率。同时,充电仓与信标间配备超短距离无线通信模组,实现数据的交互。

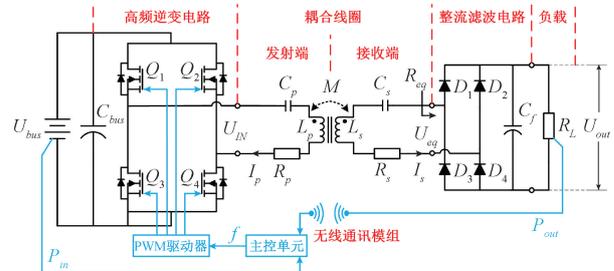


图2 耦合电能传输系统电路模型

Fig. 2 The circuit model of the coupling power transfer system

耦合线圈是电能传输系统的关键部件,由于信标自身具备正浮力,其在充电仓内的位置不固定,加之海流的影响,会导致耦合线圈的间距发生变化,进而影响系统传输特性。因此,分析耦合线圈参数随线圈间距的变化规律至关重要。

图3所示为耦合线圈的主要参数随间距变化的关系曲线。现有文献分析中,间距仅影响线圈的耦合系数,但是当间距变化较大时,其对线圈自感和交流电阻的影响无法忽略。在系统补偿结构已经确定的情况下,线圈自感的变化会导致偏谐振现象,即系统未达到完全谐振状态。因此,线圈自感、交流电阻与耦合系数将作为自变量为线圈间距 g ($20 \leq g \leq 60$)的函数在下文中进行分析,并满足式(1)~(3)。

$$L(g) = 42.21e^{-0.109g} + 47.48e^{-0.0006g} (\mu\text{H}) \quad (1)$$

$$R(g) = 2.461e^{-0.611g} + 0.343e^{-0.001g} (\Omega) \quad (2)$$

$$k(g) = 1.033e^{-0.031g} \quad (3)$$

1.2 耦合电能传输系统模型

潜标耦合电能传输系统简化模型如图4所示,补偿方式采用双边串联补偿,便于分析偏谐振现象。图4中,

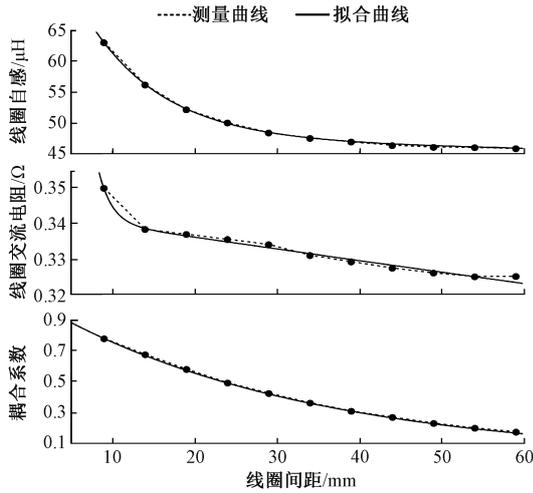


图3 线圈参数随线圈间距变化曲线

Fig. 3 Relationship between coupling coils' parameters and distance

U_{IN} 为逆变方波基波的有效值; L_p 、 R_p 、 C_p 分别为初级线圈的自感、交流等效电阻和初级补偿电容; L_s 、 R_s 、 C_s 分别为次级线圈的自感、交流等效电阻和次级补偿电容。 M 为初次级线圈互感, 可由耦合系数 k 表示为 $M = k\sqrt{L_p L_s}$ 。其中自感 L_p 和 L_s , 交流等效电阻 R_p 和 R_s , 耦合系数 k 分别满足式(1) ~ (3)。 I_p 和 I_s 分别为初级和次级电流; R_{eq} 为等效负载电阻。当高频逆变电路与整流滤波电路为理想状态时, 存在:

$$U_{IN} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{bus} \quad (4)$$

$$R_{eq} = \frac{8}{\pi^2} R_L \quad (5)$$

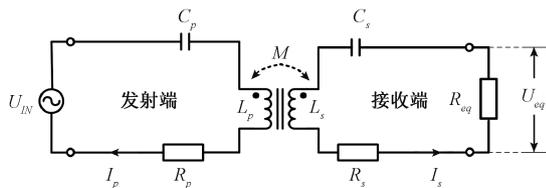


图4 耦合电能传输系统简化模型图

Fig. 4 The simplified circuit model of the coupling power transfer system

对系统列解基尔霍夫电压方程可得:

$$\begin{bmatrix} U_{IN} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_p + jX_p & j\omega M \\ j\omega M & R_s + R_{eq} + jX_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$X_p = \omega L_p - \frac{1}{\omega C_p} \quad (7)$$

$$X_s = \omega L_s - \frac{1}{\omega C_s} \quad (8)$$

其中, ω 为系统角频率, 满足 $\omega = 2\pi f$ 。定义初级电流相角 θ_p 为初级线圈电流与逆变输出电压间的相位差, 定义次级电流相角 θ_s 为次级线圈电流与逆变输出电压间的相位差, 定义线圈耦合效率 η_{coil} 为次级整流滤波电路前的有功功率与逆变输出有功功率之比。上述参数分别表示为:

$$\theta_p = \arctan\left(\frac{\text{Im}[I_p]}{\text{Re}[I_p]}\right) = \arctan\left(\frac{\omega^2 M^2 X_s - [(R + R_{eq})^2 + X_s^2] X_p}{\omega^2 M^2 (R + R_{eq}) + [(R + R_{eq})^2 + X_s^2] R_p}\right) \quad (9)$$

$$\theta_s = \arctan\left(\frac{\text{Im}[I_s]}{\text{Re}[I_s]}\right) = \arctan\left(\frac{\omega^2 M^2 + R_p (R_s + R_{eq}) - X_p X_s}{(R_s + R_{eq}) X_p + R_p X_s}\right) \quad (10)$$

$$\eta_{coil} = \frac{I_s^2 R_{eq}}{I_p^2 R_p + I_s^2 (R_s + R_{eq})} = \frac{\omega^2 M^2 R_{eq}}{[(R_s + R_{eq})^2 + X_s^2] R_p + \omega^2 M^2 (R_s + R_{eq})} \quad (11)$$

1.3 耦合电能传输系统特性分析

当系统等效阻抗为纯阻性, 即 $X_p = X_s = 0$ 时, 系统处于谐振状态, 此时 $\omega = 1/\sqrt{L_p C_p} = 1/\sqrt{L_s C_s}$, 并且 $\theta_p = 0^\circ$, $\theta_s = 90^\circ$, 因此可以通过检测初次级电流相角, 判断系统是否达到谐振状态, 使得 η_{coil} 达到最大值。但由于补偿电容存在容差, 实际系统中通常无法完全满足谐振条件, 此时称系统处于偏谐振状态。并且当 C_p 和 C_s 确定时, 由于耦合线圈间距发生变化, L_p 和 L_s 的变化同样会导致系统无法满足谐振条件, 处于偏谐振状态。利用表1参数, 对不同线圈间距下 η_{coil} 、 θ_p 、 θ_s 与 f 的关系进行了仿真, 如图5所示, 其中竖实线表示效率取得最大值时对应的系统频率。对比图5(a) ~ (c), 在偏谐振状态下, 当 η 取得最大值时, θ_p 和 θ_s 并没有特定的值对应, 所以无法通过检测电流相角实现最大效率的搜索。

表1 系统参数

Table 1 System parameters

参数	取值
初级线圈电感 $L_p/\mu\text{H}$	式(1)
初级线圈交流电阻 R_p/Ω	式(2)
初级线圈电容 C_p/nF	136.8
次级线圈电感 $L_s/\mu\text{H}$	式(1)
次级线圈交流电阻 R_s/Ω	式(2)
次级线圈电容 C_s/nF	167.2
耦合系数 k	式(3)
负载等效电阻 R_{eq}/Ω	5

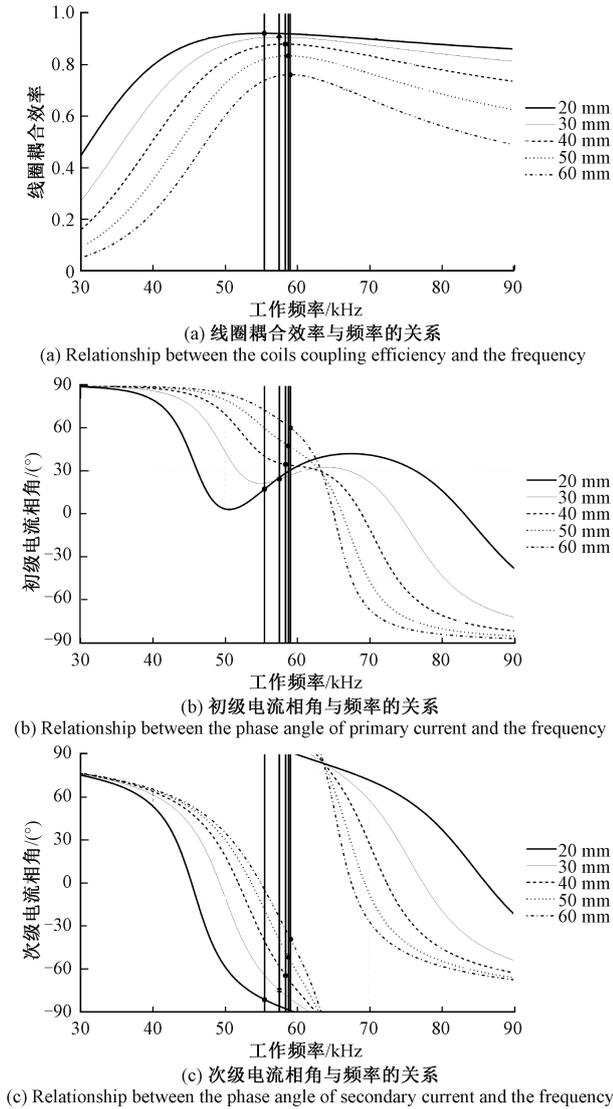


图5 不同线圈间距下系统参数与频率的关系

Fig. 5 Relationship between system parameters and the frequency in different coils' distance

2 偏谐振状态下最优效率搜索

潜标耦合电能传输系统的整体效率 η 由3部分构成,即高频逆变效率 η_{inv} 、线圈耦合效率 η_{coil} 、整流滤波效率 η_{rec} ,并满足 $\eta = \eta_{inv} \eta_{coil} \eta_{rec}$ 。由图5结果可知,随着线圈间距发生变化, η_{coil} 最大值对应的频率会发生偏移,并且无法通过检测初级或次级电流相角确定其最大,这势必也影响了 η 。为了保证系统在线圈间距变化时能达到 η 的最大值,即系统的最优效率 η_{max} ,最为直接有效的方式采集负载端和输入端的功率用于计算 η ,并利用搜索方式调整系统频率,确定 η_{max} 。

2.1 定步长扰动观测算法

定步长扰动观测算法自文献[13]提出以来,在耦合电能传输系统的最大功率和最优效率搜索中得到广泛应用。其基本思想是以特定偏差改变系统参数,并比较目标值前后大小实现最优搜索。针对潜标耦合电能传输系统,采用定步长扰动观测算法的流程如图6所示。

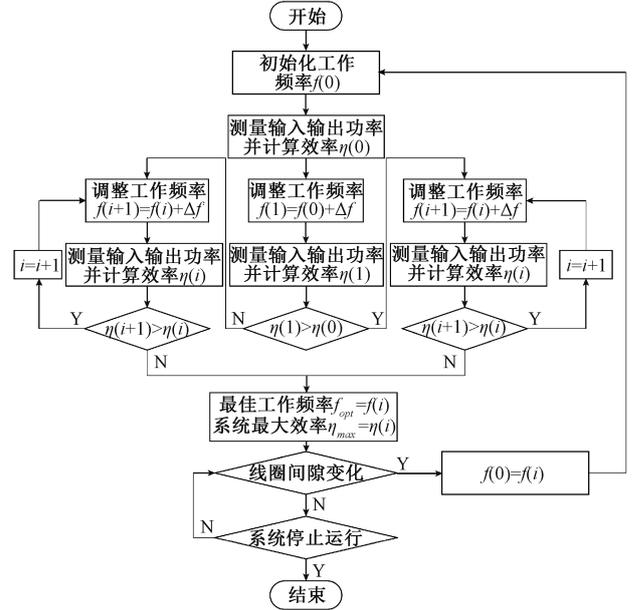


图6 定步长扰动观测算法流程图

Fig. 6 Flow chart of the fixed-step perturbation observation algorithm

定步长扰动观测算法复杂度较低,对控制器的计算能力需求较低,适合轻量化的设备。但该算法易受到目标值干扰,而导致未能正确搜索到最优值,并且当需要精细化搜索时,搜索效果十分依赖初始频率的选取,不利于时变系统的快速响应。

2.2 粒子群最优效率搜索算法

针对定步长扰动观测算法存在的问题,本文提出利用粒子群最优效率搜索算法,实现频率的快速调节。算法的核心在于更新频率粒子群,由式(12)~(14)获得。

$$f_k(i) = f_k(i-1) + \Delta f_k(i) \quad (12)$$

$$\Delta f_k(i) = w(i) \Delta f_k(i-1) + c_1 [f_{kmax}(i-1) - f_k(i-1)] \cdot Rand + c_2 [f_{max}(i-1) - f_k(i-1)] \cdot Rand \quad (13)$$

$$w(i) = \left(1 - 0.7 \frac{i}{N}\right) w(i-1) \quad (14)$$

其中, $f_k(i)$ 表示第 k 个粒子在第 i 次迭代时的频率; $\Delta f_k(i)$ 表示第 k 个粒子在第 i 次迭代时的频率增量; $f_{kmax}(i)$ 表示第 k 个粒子在第 i 次迭代时的群内最大效率对应的频率; $f_{max}(i)$ 表示第 i 次迭代时的全局最大效率对应的频率; $w(i)$ 表示第 i 次迭代时的增量惯性系数;

c_1 表示粒子惯性系数; c_2 表示全局惯性系数, $Rand$ 表示取 0~1 之间的随机数。

粒子群最优搜索算法的具体步骤如下:

- 1) 确定种群规模后初始化工作频率粒子群, 分别为 $f_k(0)$, 测量输入输出功率并计算效率 $\eta_k(0)$ ($k=1, 2, 3, 4, 5$);
- 2) 比较获得全局最大效率 $\eta_{\max}(0)$, 及此时工作频率 $f_{\max}(0)$;
- 3) 由式 (12)~(14) 更新工作频率粒子群为 $f_k(i)$, 测量输入输出功率并计算效率 $\eta_k(i)$ ($k=1, 2, 3, 4, 5$);
- 4) 在种群内比较获得群内最大效率 $\eta_{k\max}(i)$, 及此时工作频率 $f_{k\max}(i)$ ($k=1, 2, 3, 4, 5$);
- 5) 比较获得全局最大效率 $\eta_{\max}(i)$, 及此时工作频率 $f_{\max}(i)$;
- 6) 若达到迭代次数, 步骤 5) 获得的即为最佳工作频率 f_{opt} 和系统最大效率 η_{\max} ; 反之, 重复步骤 3)~5)。

相比于定步长扰动观测算法, 粒子群最优效率搜索算法可看作一种变步长搜索算法, 并且随着迭代次数的增加, 每一个粒子都会向着最优粒子的方向逼近。该算法的优势在于能够在短时间内实现全范围的搜索, 且不受初始频率的影响。

2.3 最优效率搜索算法的仿真分析

利用 Simulink/Simscape 库, 对潜标耦合电能传输系统进行了搭建, 系统电路参数选取如表 1 所示。其中, 耦合器的自感、交流电阻与耦合系数随着线圈间距的变化而改变。利用 S-function 编写定步长与粒子群最优搜索算法, 并与无搜索算法的情况进行比较。两种算法的相关参数如表 2 和 3 所示。

表 2 定步长扰动观测算法参数

Table 2 Parameters of the fixed-step perturbation observation algorithm

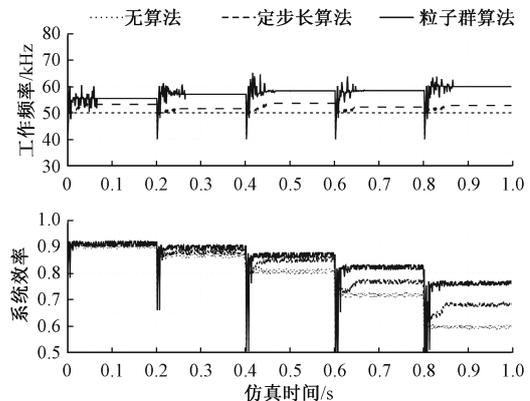
参数	初始值	范围
频率 f /kHz	60	40~80
频率步长 Δf /kHz	0.2	-

表 3 粒子群最优效率搜索算法参数

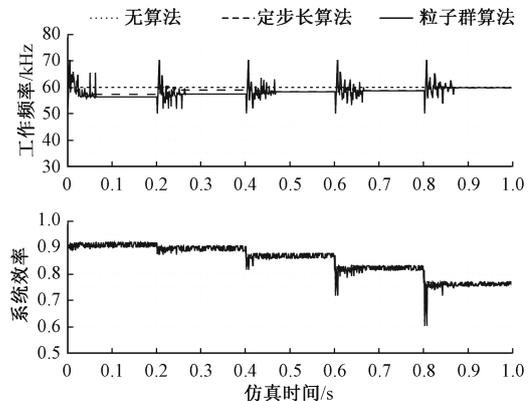
Table 3 Parameters of the particle swarm optimization search algorithm for optimal efficiency

参数	初始值	范围
种群规模 K	5	-
频率 f_k /kHz	50/55/60/65/70	40~80
频率步长 Δf_k /kHz	0	-8~8
增量惯性系数 w	1	0.3~1
粒子惯性系数 c_1	2	-
全局惯性系数 c_2	2	-
迭代次数 N	10	-

仿真中设定线圈间距的初始值为 20 mm, 每隔 0.2 s, 线圈间距增加 10 mm, 从而比较不同线圈间距情况下无搜索算法与两种算法的搜索能力, 仿真结果如图 7 所示。为了验证初始频率对两种搜索算法的影响, 定步长算法初始频率选择 50、60、70 kHz, 粒子群算法的初始频率选择 40/45/50/55/60 kHz, 50/55/60/65/70 kHz, 以及 60/65/70/75/80 kHz, 保证两种算法的初始中心频率一致。相应的无算法情况, 设置系统的工作频率为 50、60、70 kHz。考虑到实际测量情况, 仿真中设定功率测量存在 $\pm 1\%$ 的波动。对比图 7(a)~(c) 可知, 两种搜索算法相对于无算法的情况, 不同线圈间距时最终稳定的效率都有所提升, 说明采用搜索算法提升系统效率的可行性。初始频率的选择对定步长算法的影响较大, 当初始频率偏离理论最佳频率较大时, 搜索效果较差。这是由于定步长算法仅比较前后两个时刻的目标值, 容易受到测量值波动的影响, 导致无法搜索到最优效率; 而对于粒子群最优效率搜索算法, 其判断条件是多时刻目标值同时比较, 减小了测量值波动带来的影响, 因此初始频率的选择对其最终搜索效果影响较小, 在不同初始频率条件下均能够获得最优效率及其对应的频率。



(a) 初始中心频率为 50 kHz 搜索算法对比
(a) Comparison of search algorithms with initial center frequency of 50 kHz



(b) 初始中心频率为 60 kHz 搜索算法对比
(b) Comparison of search algorithms with initial center frequency of 60 kHz

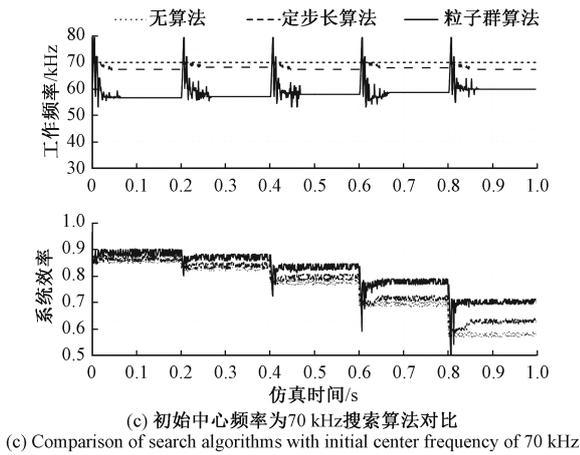


图7 搜索算法仿真结果
Fig.7 Simulation results of the search algorithm

3 实验验证与分析

为了进一步验证粒子群搜索算法的优势,针对上文分析,建立潜标耦合电能传输系统实验样机,如图8所示。稳压电源输出替代潜标中的锂电池包,作为样机的直流输入,经过高频逆变电路产生高频方波,通过耦合线圈将能量传递至次级,利用整流滤波电路将高频交流方波转换为直流,电子负载作为系统的等效负载,以 $5\ \Omega$ 的恒阻模式运行。功率示波器的两路通道分别采集稳压电源的输出功率和电子负载的输入功率,并将测量数据实时导入电脑,执行搜索算法。电脑计算得到相应的频率,并调整高频逆变电路的输出频率。实验样机参数如表1所示。其中,线圈间距通过直线导轨进行调节。

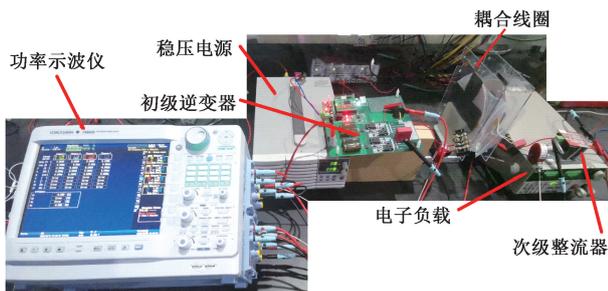


图8 实验样机
Fig.8 Experimental prototype

为满足系统快速响应的需求,定步长和粒子群最优效率搜索算法的计算次数均设置为50次,稳定时间设置为150次。根据系统参数确定算法初始中心频率为60 kHz,即定步长算法初始频率为60 kHz,粒子群算法初始频率为50/55/60/65/70 kHz。图9展示了实验样机中两种算法在搜索过程中频率和效率的变化趋势,并在

表4中对两种算法获得的最佳频率和最优效率进行了统计。相应的,图9和表4提供了无算法时的系统效率,用于凸显搜索算法的必要性。

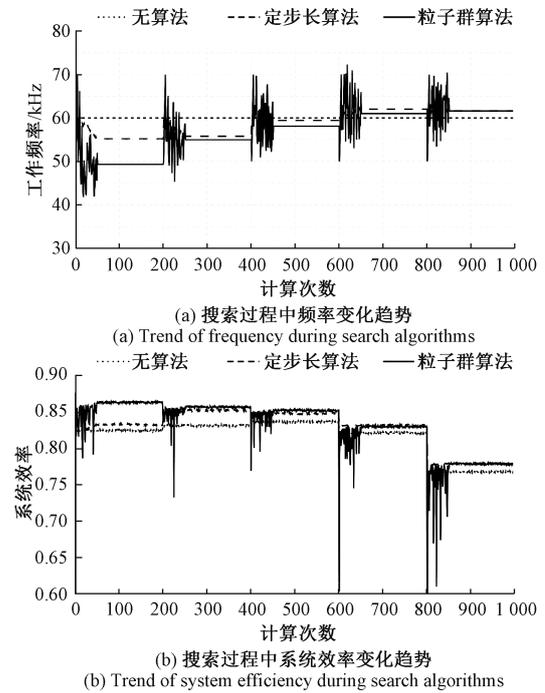


图9 搜索算法实验结果

Fig.9 Experimental results of the search algorithm

表4 最佳频率和最优效率的实验数据

Table 4 Experiment data of the best frequency and efficiency

线圈间距/mm	最佳频率/kHz			最优效率		
	无算法	定步长	粒子群	无算法/ %	定步长/ %	粒子群/ %
20	60	55.2	49.3	82.449	83.277	86.277
30	60	55.8	55.0	83.118	85.188	85.646
40	60	59.4	58.1	83.612	84.808	85.203
50	60	62.0	61.0	82.117	83.116	82.960
60	60	61.6	61.6	76.737	77.875	77.825

从图9和表4中得出,无论是定步长算法还是粒子群算法,相对于无算法情况,系统效率都得到了提升。针对于两种搜索算法的对比,当线圈间距较小时,系统的实际最佳频率偏离搜索算法设定的初始中心频率较大,此时粒子群算法的全局搜索优势得到体现,在相同搜索次数的前提下,其搜索得到的最优效率相较定步长算法提升3%,有效的延长了潜标系统的工作时长。另一方面,根据图5可知当线圈间距较小时,系统效率在一定范围内随频率变化缓慢,且由于功率测量误差的影响,会导致定步长算法陷入平稳点,而无法向最优效率方向搜索。

这一情况在线圈间距逐渐增大时得到改善,间距的增加使得效率最优值更加突出,但是线圈间距增加到 50 mm 时,粒子群算法依旧能够搜索到最优效率。因此,粒子群算法对于不同线圈间距的系统均具有很好的最优效率搜索特性。

4 结 论

本文针对潜标耦合电能传输系统的最优效率搜索算法进行了分析研究,利用潜标与信标间已有的数据链路,采集输入端与负载端功率,进行系统传输效率的直接计算。提出将粒子群最优效率搜索算法用于本系统,并在线圈间距变化的条件下,与定步长扰动观测算法进行了仿真与实验的对比。结果表明:在两种算法计算次数相同的情况下,粒子群算法的最大效率相对于定步长扰动观测法提升达到 3%,并且受到初始中心频率的选择影响较小,具有很好的鲁棒性,能够用于提升潜标耦合电能传输系统在线圈间距变化时的传输效率。

参考文献

- [1] PALM J, ESKILSSON C. Mooring systems with submerged buoys: Influence of buoy geometry and modelling fidelity[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 102, DOI: 10.1016/j.apor.2020.102302.
- [2] 于非, 陈永华, 周春, 等. 国产深海准实时传输潜标系统设计[J]. *海洋科学*, 2020, 44(7): 194-200.
YU F, CHEN Y H, ZHOU CH, et al. Design of deepsea quasi-real-time-communication submerged buoy systems[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(7): 194-200.
- [3] ZHANG ZH G, QI SH B, LI SH ZH. Marine observation beacon clustering and recycling technology based on wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2019, 19(17), DOI: 10.3390/s19173726.
- [4] MORONI D, PIERI G, SALVETTI O, et al. Sensorized buoy for oil spill early detection [J]. *Methods in Oceanography*, 2016, 17: 221-231.
- [5] 李洪宇, 王茜, 苗雨润, 等. LCL 补偿型浮标感应耦合电能传输系统特性[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(2): 122-129.
LI H Y, WANG Q, MIAO Y R, et al. Characteristics of LCL compensation inductively coupled power transmission system for buoy [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(2): 122-129.
- [6] FANG CH, LI X F, XIE Z M, et al. Design and optimization of an inductively coupled power transfer system for the underwater sensors of ocean buoys [J]. *Energies*, 2017, 10(1): 84.
- [7] KAN T Z, MAI R K, MERCIER P, et al. Design and analysis of a three-phase wireless charging system for lightweight autonomous underwater vehicles [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 33(8): 6622-6632.
- [8] ZHANG K H, ZHANG X Y, ZHU ZH B, et al. A new coil structure to reduce Eddy current loss of WPT systems for underwater vehicles [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(1): 245-253.
- [9] XU J Y, LI X F, XIE Z M, et al. Design and analysis of inductively coupled power transfer system on mooring buoy with double ultracapacitor chargers using indirect control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(6): 4836-4845.
- [10] LIM Y, TANG H Y, LIM S, et al. An adaptive impedance-matching network based on a novel capacitor matrix for wireless power transfer [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(8): 4403-4413.
- [11] GATI E, KAMPITSIS G, MANIAS S. Variable frequency controller for inductive power transfer in dynamic conditions [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(2), 1684-1696.
- [12] DAI X, LI X F, LI Y L, et al. Maximum efficiency tracking for wireless power transfer systems with dynamic coupling coefficient estimation [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(6), 5005-5015.
- [13] YANG Y, ZHONG W X, KIRATIPONGVOOT S, et al. Dynamic improvement of series-series compensated wireless power transfer system using discrete sliding mode control [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(7): 6351-6360.
- [14] 彭若桐, 许贤泽, 郑通, 等. 一种磁悬浮平面电机多目标优化方法[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(8): 76-83.
PENG R T, XU X Z, ZHENG T, et al. Multi-objective optimization method of magnetic levitation planar motor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(8): 76-83.
- [15] 李肃义, 赵彦超, 孙卫斌, 等. 海洋可控源电磁数据的新小波基消噪方法[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(2): 67-74.
LI S Y, ZHAO Y CH, SUN W B, et al. New wavelet-based denoising method for marine controlled source

electromagnetic data [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 67-74.

- [16] 马学森, 谈杰, 陈树友, 等. 云计算多目标任务调度的优化粒子群算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 133-143.

MA X S, TAN J, CHEN SH Y, et al. Research on optimal particle swarm optimization for multi-objective task scheduling in cloud computing [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8): 133-143.

- [17] LETTING L, MUNDA J, HAMAM Y. Optimization of a fuzzy logic controller for PV grid inverter control using S-function based PSO[J]. Solar Energy, 2012, 86(6): 1689-1700.

- [18] 韩鹏, 李银红, 何璇, 等. 结合量子粒子群算法的光伏多峰最大功率点跟踪改进方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 101-108.

HAN P, LI Y H, HE X, et al. Improved maximum power point tracking method for photovoltaic multi-peak based on quantum-behaved particle swarm optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 101-108.

作者简介



徐佳毅, 2015 年于天津大学获得学士学位, 现为天津大学硕博连读研究生, 主要研究方向为水下耦合电能传输技术。

E-mail: xjy0125@tju.edu.cn

Xu Jiayi received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2015. He is currently pursuing his Ph. D. degree at Tianjin University. His main research interest is the underwater coupling power transfer technology.



李醒飞 (通信作者), 1988 年于哈尔滨工程大学获得学士学位, 1994 年于东南大学获得硕士学位, 2000 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学教授, 主要研究方向为海洋智能装备、惯性元件和智能制造。

E-mail: lxftju@hotmail.com

Li Xingfei (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Harbin Engineering University in 1988, received his M. Sc. degree from Southeast University in 1994, and received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2000. He is currently a professor at Tianjin University. His main research interests include ocean intelligent equipment, inertial components, and intelligent manufacturing.