



·脉冲功率技术·

基于 Kriging 模型的水中放电 沉积能量优化分析*

赵景林, 王志强, 王进君, 张东东, 李国锋

(大连理工大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 水中脉冲放电过程较为复杂, 放电参数与放电沉积能量之间没有明确的函数关系。为了获得最佳沉积能量, 明晰不同放电参数相互作用对沉积能量的影响, 获得最佳放电参数组合, 本文搭建了水中高压脉冲放电实验平台, 结合 Kriging 代理模型探究了电压、电极间距和电导率三种放电参数对水中放电沉积能量的影响; 利用遗传算法进行全局寻优, 确定了最佳放电参数组合。研究表明: 通过交叉验证评估该模型的均方根误差为 6.95%, 满足精度要求; 外加电压一定时, 在电极间距和电导率的协同作用下, 沉积能量的变化呈现多峰值特性; 在电压、电极间距和电导率分别为 17 kV、2.28 mm 和 0.8 mS/cm 的条件下产生的沉积能量最大, 为最佳参数组合; 通过实验验证了在最佳点的预测值和实际值相对偏差在 8% 以内。

关键词: 水中放电; 代理模型; 沉积能量; 放电参数; 交叉验证

中图分类号: TM89

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220240

Deposited energy optimization analysis of discharge in water based on Kriging model

Zhao Jinglin, Wang Zhiqiang, Wang Jinjun, Zhang Dongdong, Li Guofeng

(College of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024)

Abstract: The pulsed discharge process in water is complex and there is no clear functional relationship between the discharge parameters and the discharge deposition energy. To obtain the optimum deposition energy, clarify the influence of different discharge parameters on the deposition energy and obtain the best combination of discharge parameters, this paper builds a high-voltage pulse discharge test platform in water and investigates the influence of three discharge parameters, namely voltage, electrode spacing and conductivity, on the deposition energy of discharge in water by combining with the Kriging agent model. The optimal combination of discharge parameters was determined by using a genetic algorithm. The results of the study show that: the root mean square error of the model is 6.95%, which satisfies the accuracy requirement through cross-validation; the deposition energy varies with multiple peaks under the synergistic effect of electrode spacing and conductivity at a certain applied voltage; the best combination of voltage, electrode spacing and conductivity is 17 kV, 2.28 mm and 0.8 mS/cm respectively, which produces the highest deposition energy. The relative deviation between predicted and actual values at the optimum point were experimentally verified to be within 8%.

Key words: discharge in water, surrogate model, deposited energy, discharge parameters, cross validation

水中高压脉冲放电产生的冲击波现象被称为“液电效应”^[1]。目前, 液电效应被广泛应用于液电成形^[2]、矿石破碎^[3-4]、页岩气开采^[5]等领域。冲击波强度是评价水中高压脉冲放电的主要指标, 沉积能量是影响冲击波强度的重要因素, 大量实验结果^[6-7]证明, 冲击波强度随沉积能量的增加而加大, 并具有饱和趋势。如何优化放电参数, 明确放电参数对沉积能量的影响, 提高沉积能量, 是水中高压脉冲放电工程运用的重要关注点。

* 收稿日期: 2022-08-05; 修订日期: 2022-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51607023); 辽宁省科学技术计划项目 (2021-BS-293)

联系方式: 赵景林, 2855806591@qq.com。

通信作者: 王志强, wangzq@dlut.edu.cn。

针对上述问题,国内外学者开展了广泛的研究。童得恩^[8]等人通过数值模拟,明确了随着电导率的增加,预击穿能量减少,有利于击穿阶段能量的沉积。卞文娟^[9]等人通过实验研究了电导率对放电模式的影响,实验结果表明随着电导率的增加,放电形式由火花放电到流注放电再到电晕放电转变,沉积能量逐渐降低。Rond^[10]等人研究了针-针电极条件下电导率对流注发展的影响,明确了电导率的增加有助于流注长度的缩短。Zingerman^[11]等人对冲击波压强 P_m 和放电通道沉积能量 E_0 的关系进行了实验研究,给出了斜坡脉冲波形下计算压强 P_m 的经验公式。Liu Yi^[12]等人的实验结果表明,等离子体通道中的沉积能量不仅取决于等离子体通道的阻抗特性,还取决于振荡电流,电流上升时间越短,等离子体通道中能量沉积功率越高。喻越^[13]等人研究了充电电压对冲击特性的影响,明确了在电极间距一定时,等离子体通道能够容纳的能量是有限的,不会随着充电能量的增加一直增大,存在最佳间隙使得冲击波能量达到最大。吴敏干^[14]等人研究了液电效应的冲击波特性,明确了电压对通道电阻、沉积能量和冲击波的影响,电压的增加导致通道电阻减小,沉积能量和冲击波能量增加。黄海^[15]等人通过正交试验的方法,确定了电容量、电压以及电极间距的最优组合方案,实现水下放电产生冲击压力的优化设计。

上述研究多考虑单一因素,例如液体电导率、电极间距、施加电压等,对沉积能量的影响,对多参数协同作用的研究结果比较少^[16]。并且通过实验的方法,往往只能确定出某一参数的最佳范围,无法给出多放电参数的最佳组合点。本文在实验研究的基础上,借助代理模型方法,构建了以沉积能量为优化目标,以电压、电导率和电极间距为优化变量的 Kriging 模型,通过模型分析,明确了不同充电电压下,电极间距和电导率相互作用对沉积能量的影响。结合遗传算法,确定了变量可行域内的最佳放电参数组合,最后通过实验验证了模型的准确性。

1 水中高压脉冲放电实验

1.1 高压脉冲放电实验平台

水中高压脉冲放电实验平台如图 1 所示,实验平台主要由三个部分组成:充电储能部分、放电部分和测量部分。充电储能部分包括正极性高压电源、高压气体开关、限流电阻以及高压脉冲成形电容。放电单元包括圆柱形 304 不锈钢容器、锥形高压电极和圆柱形接地电极(半径 30 mm、高度 10 mm, 304 不锈钢材料),高压电极与接地电极间距可调,容器中充满水。测量单元包括型号为 Tektronix P6015A 的高压探头(电压衰减比为 1000:1)、Person 电流传感器(电压电流比为 0.01 V/A)以及安捷伦 DSO5054A 示波器。

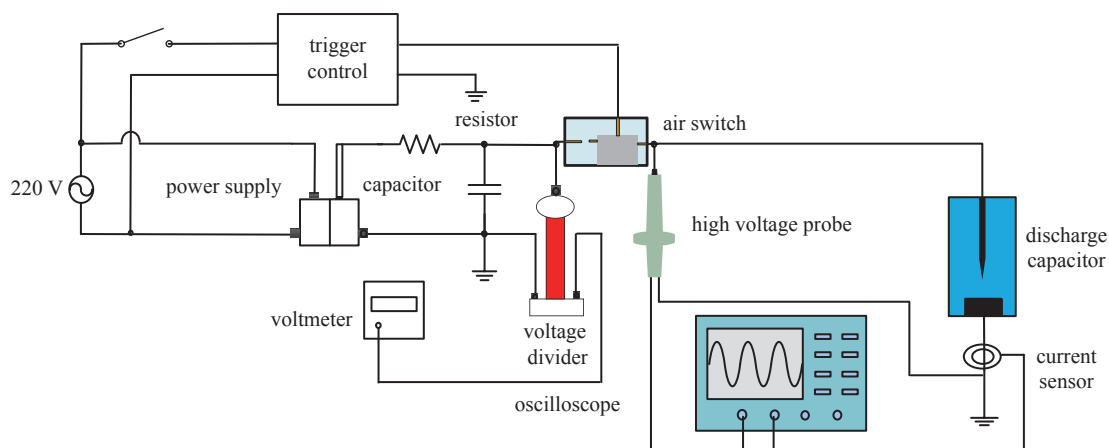


Fig. 1 Schematic diagram of underwater high-voltage pulse discharge experiment system

图 1 水中高压脉冲放电实验平台示意图

1.2 实验参数设置

选取电压、电极间距以及电导率三种放电参数为实验变量,参考文献 [13,17] 中实验参数数据,本文实验中三种放电参数的变化范围如表 1 所示。为了减少放电随机性对实验数据的干扰,对实验数据采取多次实验取平均值的方法进行处理^[18]。

表 1 实验变量及其范围

Table 1 Experimental variables and their scope

voltage/kV	electrode spacing/mm	conductivity/($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)
13-17	2-5	0.2-0.8

1.3 沉积能量的计算

在实验中选择一组典型的放电电压和电流波形,如图2所示,与之对应的流注发展过程如图3所示。实验条件为:电容充电电压16 kV,溶液电导率0.46 mS/cm,电极间距4.95 mm。水中脉冲放电过程划分为三个阶段:预击穿阶段、放电阶段和衰减振荡阶段。

(1) 预击穿阶段(0~69.67 μs): 针-板电极间电压升至15.47 kV,此后,电压波形以指数形式下降, $t=69.67\ \mu\text{s}$ 时,电压下降至12.34 kV。此阶段内,水间隙尚未被击穿,等离子体通道未贯穿水间隙,间隙间仅有泄漏电流流过。

(2) 放电阶段(69.67~83.49 μs): 水间隙被完全击穿,形成贯穿针-板电极间隙的等离子体通道。如图3所示,流注不断向前发展,主干分支桥接至接地平板电极,形成等离子体通道,间隙阻抗迅速减小。电压作用于水间隙两端,使得放电电流迅速上升,电压快速下降,回路工作于欠阻尼状态。此阶段,等离子体通道电阻消耗的能量称为沉积能量^[19]。在第一个放电电流半周期内沉积到等离子体通道中的能量对冲击波的产生及幅值起主要影响,因此本文专注于第一个电流半周期内沉积能量的计算。在两个电流零点 t_1-t_2 之间(图4),对电压电流的乘积进行积分,得到沉积能量^[20]。即

$$E_R = \int_{t_1}^{t_2} p(t)dt = \int_{t_1}^{t_2} i(t)u(t)dt \quad (1)$$

式中: t_1 和 t_2 分别是第一个电流半周期的起止时刻, $i(t)$, $u(t)$ 分别为放电过程中的瞬时电流和瞬时电压。其计算结果如图4中蓝色阴影所示。

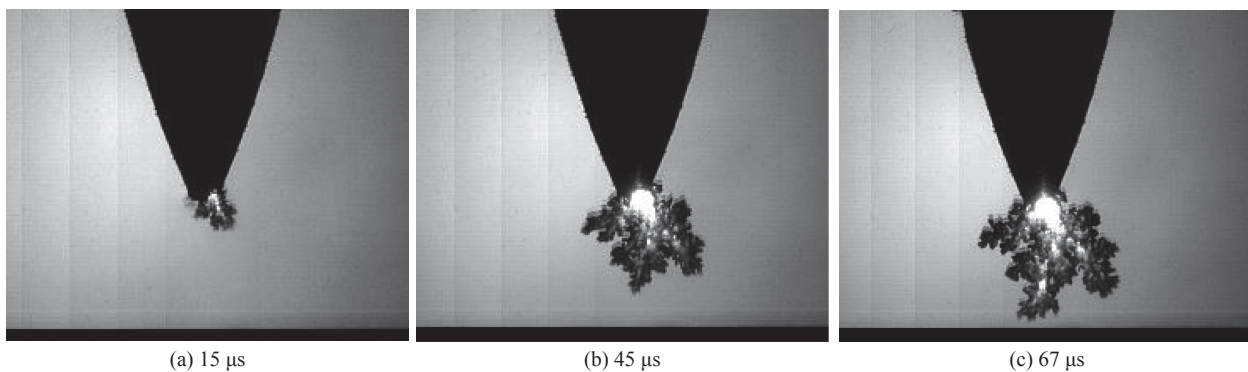


Fig. 3 Plasma channel development process

图3 流注发展过程

(3) 回路振荡阶段(>83.49 μs): 由于回路电感的存在,导致放电回路呈欠阻尼衰减振荡状态,电压和电流经过一段时间的周期性变化,衰减为零。

2 水中脉冲放电的代理模型

目前,水中高压脉冲放电参数优化设计通常采用正交试验的方法,正交试验所得到的最优值受所选水平的限制且无法得到目标函数和设计变量之间的数学关系。代理模型是一种采用少量数据构建近似模型,从而模拟真实模型的数学方法,其计算结果与真实的物理试验结果相似。代理模型可结合遗传算法等得到整个设计空间内的最佳参数组合,该参数组合不受样本水平数的限制。本文通过代理模型构建多

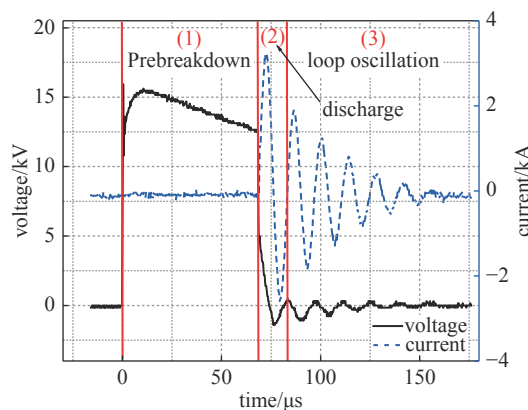


Fig. 2 Typical voltage and current waveform of high voltage pulse discharge in water

图2 水中高压脉冲放电典型电压电流波形图

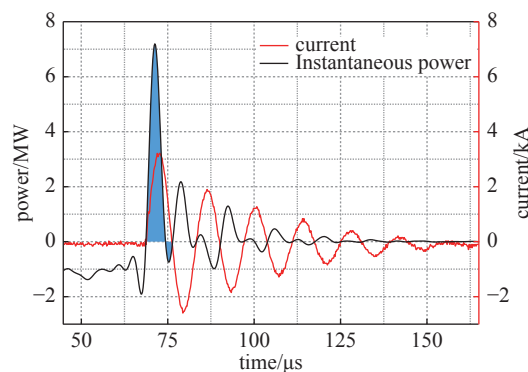


Fig. 4 Results of deposited energy calculation

图4 沉积能量的计算结果图

变量条件下,放电沉积能量的变化曲面,直观地体现出放电参数对沉积能量的影响。最具代表性的代理模型是 Kriging 模型,下面介绍模型的构建过程。

2.1 基于 Kriging 模型的参数优化设计流程

优化流程如图 5 所示:(1) 确定实验变量及其范围,采用优化拉丁超立方设计方法确定初始样本点,样本点的选择需要满足空间正交性和均匀性的要求;(2) 结合水中高压脉冲放电实验获取样本点对应的沉积能量;(3) 构建 Kriging 模型。使用实验获取的 20 组初始样本数据建立 Kriging 模型。构建 Kriging 模型重要的环节是进行精度校验,只有精度在一定范围内,才能继续优化设计,否则,继续加点,提升精度;(4) 在 Kriging 模型的基础上,结合遗传算法,进行优化设计,得到变量可行域内的最佳放电参数组合,并在最佳参数下进行实验,验证代理模型的结果是否有效。

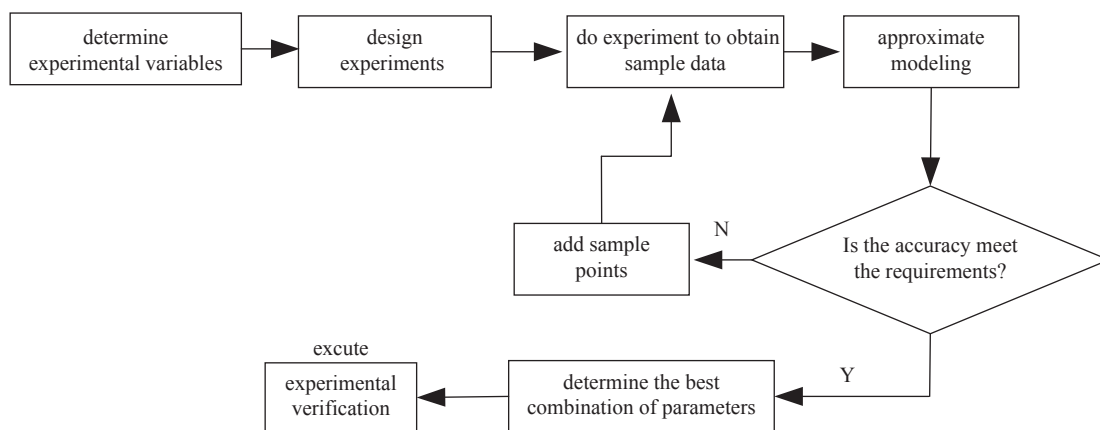


Fig. 5 Flowchart of the optimization search analysis

图 5 优化设计流程图

2.2 初始数据样本

代理模型方法是近年来兴起的一种确定最优参数组合的方法,代理模型主要包含两方面的内容:一是选取构造模型的样本点;二是数据拟合与预测模型的建立。初始样本点的选择是构建代理模型重要的一步,其空间填充性的好坏会影响代理模型的预测精度。初始样本点最好是空间均匀分布的,这样能使得代理模型在整个设计空间内有相似的精度。目前,最常用的空间分层抽样方案是拉丁超立方设计,本文采用基于拉丁超立方设计改进的优化拉丁超立方设计获取初始样本点,优化拉丁超立方设计点的生成方法为

$$x_q^j = \frac{\pi_q^j + U_q^j}{n} \quad (2)$$

式中: j 表示第 j 次实验, q 为第 q 个设计变量, n 为样本点数量, π 表示 $0, 1, \dots, n-1$ 的随机排列, U 表示区间 $[0, 1]$ 的随机数。

一个较为精确的代理模型,其样本点的数量一般为设计变量的 10 倍^[21],且初始样本点和新增样本点的比例约为 2:1^[22]。对于以电压、电导率和电极间距三种放电参数为设计变量的代理模型,可选择 20 个初始样本点,其余样本点通过加点准则补充。利用上述方法得到的 3 个变量 20 个初始样本点的三维空间分布情况如图 6 所示,这些样本点有良好的空间填充性。

优化拉丁超立方设计得到的是三种不同放电参数归一化后的无量纲值。因此,需结合表 1 中三种放电参数的实际范围,将优化拉丁超立方设计得到的 20 组初始样本点反归一化,得到带量纲的实际值,反归一化的方法为

$$X_q^j = X_{\min} + x_q^j * (X_{\max} - X_{\min}) \quad (3)$$

式中, X_{\max} 和 X_{\min} 分别表示放电参数最大值和最小值,具体数值见表 1。

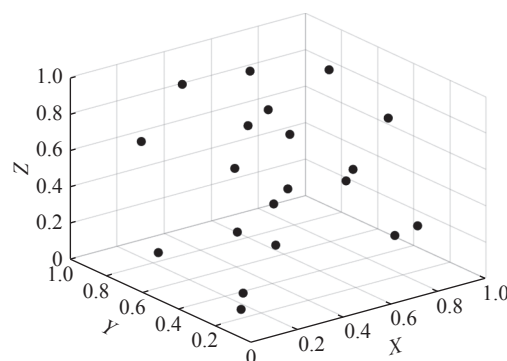


Fig. 6 Spatial distribution of the 20 initial sample points

图 6 20 个初始样本点的空间分布

在反归一化后得到的 20 组实际放电参数值下进行实验,得到对应的放电电压和电流波形,结合图 4 的计算方法求得 20 组参数值组合对应的响应值,即沉积能量值。部分实验结果如表 2 所示,在实验结果基础上结合代理模型方法对沉积能量进行建模分析。

表 2 反归一化后的部分初始样本点及对应的实验结果

Table 2 Some of the initial sample points after inverse normalization and the corresponding experimental results

voltage/kV	conductivity/(mS·cm ⁻¹)	electrode spacing/mm	deposited energy/J
14.1	0.26	4.53	40.46
13.4	0.77	4.37	26.00
16.2	0.33	2.16	62.3
15.1	0.45	4.68	46.87
15.7	0.64	2.32	51.81
14.5	0.52	2.00	41.74
13.8	0.39	2.79	40.09
16.8	0.55	2.95	59.76

2.3 Kriging 模型的构建

Kriging 模型由回归函数和高斯过程构成,对于样本点 $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 及其对应的响应 $Y=[y_1, y_2, \dots, y_n]^T$, Kriging 模型的表达式为

$$y(x) = \beta^T f(x) + \delta(x) \quad (4)$$

式中: $y(x)$ 是未知点 x 的预测值,等号右侧第一项为高斯过程的平均值,由回归系数 β 和基函数 $f(x)$ 组成。第二项是均值为 0, 方差为 σ^2 的平稳高斯过程。 $\delta(x)$ 在不同点的相关性表示为

$$\text{cov}[\delta(x_i), \delta(x_j)] = \sigma^2 R(x_i, x_j) \quad (5)$$

式中: $R(x_i, x_j)$ 是关于 x_i 和 x_j 的相关函数,可表示为

$$R(x_i, x_j) = \exp\left(\sum_{k=1}^n [-\theta_k (x_i^k - x_j^k)^p]\right) \quad (6)$$

式中: θ_k 为模型待定参数向量,可以以标量 θ 代替, n 为变量维度, p 一般取值为 2^[23]。因此式(6)可以简化为

$$R(x_i, x_j) = \exp\left(\sum_{k=1}^n [-\theta (x_i^k - x_j^k)^2]\right) \quad (7)$$

定义 F 为已知样本点组成的基函数矩阵, R 为样本点之间的相关矩阵, r 为预测点 x 和样本点之间的相关向量

$$F = \begin{bmatrix} f_1(x_1) & \cdots & f_m(x_1) \\ \vdots & & \vdots \\ f_1(x_n) & \cdots & f_m(x_n) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R = \begin{bmatrix} R(x_1, x_1) & \cdots & R(x_1, x_n) \\ \vdots & & \vdots \\ R(x_n, x_1) & \cdots & R(x_n, x_n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$r = \begin{bmatrix} R(x_1, x) \\ \vdots \\ R(x_n, x) \end{bmatrix} \quad (10)$$

回归系数 β 的最小二乘估计可以表示为

$$\hat{\beta} = (F^T R^{-1} F)^{-1} F^T R^{-1} Y \quad (11)$$

$\delta(x)$ 的方差 σ^2 的最小二乘估计为

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n}(\mathbf{Y} - \mathbf{F}^T \hat{\boldsymbol{\beta}})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{Y} - \mathbf{F}^T \hat{\boldsymbol{\beta}}) \quad (12)$$

平稳高斯过程 $\delta(x)$ 可以表示为

$$\delta(x) = \mathbf{r}^T(x) \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{F} \hat{\boldsymbol{\beta}}) \quad (13)$$

显然, $\boldsymbol{\beta}$ 和 $\delta(x)$ 都是关于 θ 的函数, 模型未知参数 θ , 可通过求极大似然估计的最大值得到, 即

$$\max\{\varphi(\theta) = -\frac{1}{2}[n \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln|\mathbf{R}|]\} \quad (14)$$

将通过式(14)求得的 θ 代入式(11)和式(13), 则模型的表达式(4)可确定。

2.4 Kriging 模型的检验

为评估代理模型预测的准确性, 对该模型进行误差分析。以均方根误差 (R_{MSE}) 作为模型预测精度的评价指标, 均方根误差越接近于零, 代理模型的准确性越高。一个较为准确的模型, 其均方根误差的值应小于 10%^[22]。对于 n 个样本点, 预测值 y_i 和实际值 y_i^* 之间均方根误差的计算为

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (y_i^* - y_i)^2}{n}} \quad (15)$$

此处采用交叉验证的方法计算模型的均方根误差, 交叉验证是一种评估模型预测性能的统计分析方法^[24]。其具体过程为: 将 20 组实验样本数据分为 5 份, 每 4 组样本数据作为一份, 每次不重复的选择其中一份作为测试集, 用以评估模型误差, 剩余 4 份作为训练集构建模型, 按图 7 中的交叉验证计算过程, 依次进行 5 次计算, 求出每次的 R_{MSE} 值, 取 5 次计算结果的平均值作为最终结果。通过交叉验证方法得到了基于 20 组初始样本点构建的 Kriging 模型的 R_{MSE} 为 10.69%, 高于 10%。为了提高模型的精度, 需要进一步通过实验增加样本点, 以减小 R_{MSE} 的值。

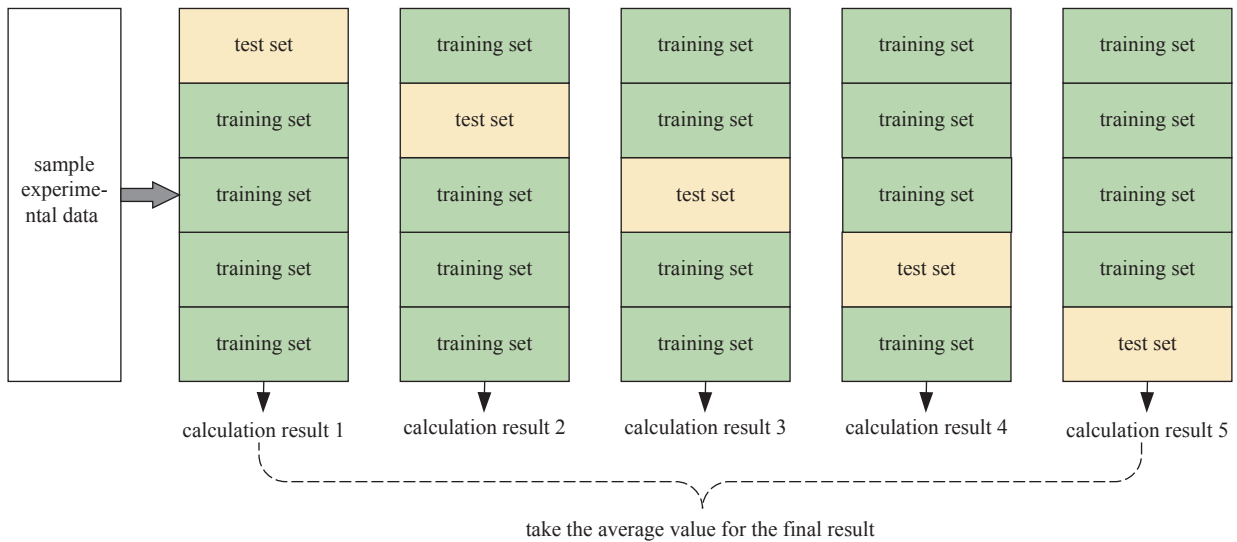


Fig. 7 Cross-validation of the computational process

图 7 交叉验证计算过程

2.5 基于 Kriging 模型的序列加点

最大改善期望准则即 EI 加点准则^[25]是最常用的序列加点方法, 它的原理是将目标改善期望作为全局搜索算法的目标函数, 将 EI 值最大时对应的数据点作为新增样本点, 更新样本空间和模型。改善期望的计算方法如下: 假设当前样本最优响应值为 y_{\min} , 任意未知点 x 对应的预测值为 $y(x)$, 则 $y(x)$ 的相较于当前最优响应值的改善 y_{\min} 为

$$I(x) = \max\{y_{\min} - y(x), 0\} \quad (16)$$

通过一阶矩公式得到这一改善量的期望为

$$E[I(x)] = (y_{\min} - y(x)) \Phi\left(\frac{y_{\min} - y(x)}{\sigma(x)}\right) + \sigma(x) \phi\left(\frac{y_{\min} - y(x)}{\sigma(x)}\right) \quad (17)$$

式中, Φ 和 ϕ 分别为标准正态累积分布函数及标准正态概率分布函数, 均为大于零的值, $\sigma(x)$ 为标准差。

将式(17)分别对 $y(x)$ 和 $\sigma(x)$ 求偏导得

$$\frac{\partial E[I(x)]}{\partial y(x)} = -\Phi\left(\frac{y_{\min} - y(x)}{\sigma(x)}\right) < 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial E[I(x)]}{\partial \sigma(x)} = \phi\left(\frac{y_{\min} - y(x)}{\sigma(x)}\right) > 0 \quad (19)$$

根据式(18), $E[I(x)]$ 是 $y(x)$ 的单调减函数, 当 $y(x)$ 减小时, $E[I(x)]$ 增大, 此时新增点在当前最小值的邻域内产生, 加点后此区域的方差 $\sigma^2(x)$ 减小, 其他未加点区域的方差 $\sigma^2(x)$ 仍较大; 根据式(19), $E[I(x)]$ 是 $\sigma(x)$ 的单调增函数, 当 $\sigma(x)$ 增加时, $E[I(x)]$ 增加, 新增点在当前误差较大的区域产生, 逐步挖掘出全局预测误差较大的点。

利用 EI 加点准则, 提升基于 20 组初始样本数据构建的 Kriging 模型的预测精度, 部分新增样本点及对应的沉积能量实验结果如表 3 所示。经过 16 次加点, 模型的预测误差随着加点次数的变化趋势如图 8 所示, 随着加点次数的增加, 模型误差整体上呈现递减趋势, 经过 16 次 EI 加点, 模型的均方根误差降至 6.95%, 相比于加点前降低了 34.6%, 考虑到水下放电随机性的影响, 这一误差已经可以证明模型具有较高的准确性。

表 3 反归一化后的部分新增点及对应的实验结果

Table 3 After the normalization of some of the new points and the corresponding experimental results

voltage/kV	conductivity/(mS·cm ⁻¹)	electrode spacing/mm	deposited energy/J
17	0.331	2.28	67.41
17	0.425	2	66.78
17	0.2	2.04	66.51
17	0.8	3.5	65.6
17	0.65	2.19	66.93

3 Kriging 代理模型结果分析与实验验证

3.1 Kriging 代理模型结果分析

图 9 所示为 17 kV 外加电压条件下, 沉积能量随电极间距和电导率的变化曲面, 受电导率和电极间距的共同影响, 沉积能量呈现多峰值特性。

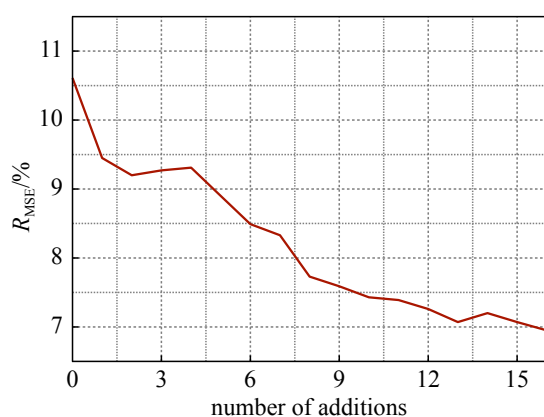


Fig. 8 Variation of root mean square error with the number of additions

图 8 均方根误差随加点次数的变化

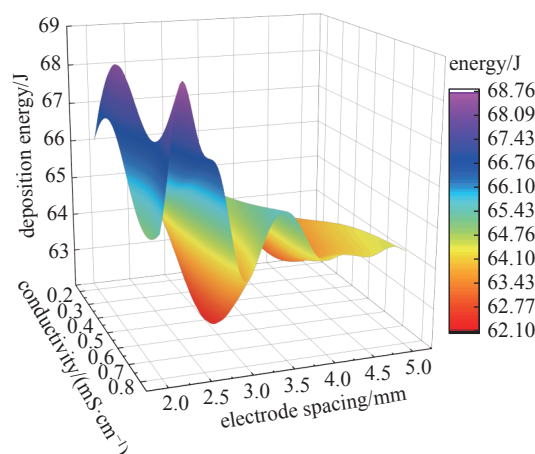


Fig. 9 Multi-peak characteristics of deposited energy

图 9 沉积能量的多峰值特性

在外加电压 16 kV 时, 改变电导率在 0.2 mS/cm 到 1.0 mS/cm 范围内变化, 不同电导率条件下, 电极间距变化相同大小, 均从 2 mm 增加到 6 mm, 得到的该范围内的沉积能量变化值如表 4 所示。从表中数据可以看出, 不同电导率条件下, 间距变化对沉积能量的影响是不同的。在一定电导率范围内, 电导率的增加会促进电极间距变化对沉积能量的影响; 而超出这一范围, 电导率的增加又会削弱电极间距变化对沉积能量的影响。因此也就造成了沉积

表 4 不同电导率下, 电极间距变化对沉积能量的影响

Table 4 Effect of electrode spacing variation on deposited energy at different conductivities

conductivity/(mS·cm ⁻¹)	spacing variation Δd/mm	deposited energy variation/J
0.2	4	17.59
0.4	4	5.04
0.6	4	8.96
0.8	4	13.56
1	4	11.4

能量随电极间距和电导率变化的多峰值特性。

水中微秒高压脉冲放电, 通常认为其击穿机理是气泡击穿^[26], 即放电过程在气泡内部产生。气泡的产生与单位体积的焦耳热密切相关, 单位体积焦耳热功率表示为

$$P = \sigma E^2 = \sigma \left(\frac{U}{d}\right)^2 \quad (20)$$

其中: σ 为液体介质的电导率, E 为电场强度, U 为施加电压, d 为电极间距。

提高电压和电导率, 使得焦耳热功率增加, 促进气泡的产生, 减少预击穿时间及能量耗散。但在一定电压和电极间距下, 电导率过高, 会使得预击穿阶段能量耗散加快, 沉积能量减少。电极间距越小, 焦耳热功率越大, 越有助于气泡的产生, 但电极间距过小, 能够沉积的能量越小^[13]。因此, 在最大电压处, 存在最佳电导率和电极间距组合使得放电效果最佳, 从而获得最大沉积能量。图 9 表明, 电压为 17 kV 时, 沉积能量全局最大值位于电导率 0.7 mS/cm 至 0.8 mS/cm, 电极间距 2 mm 至 2.5 mm 的范围内。为确定最佳点, 需进一步结合全局寻优算法进行搜索。

本文选择遗传算法进行全局寻优, 寻优流程如图 10 所示:

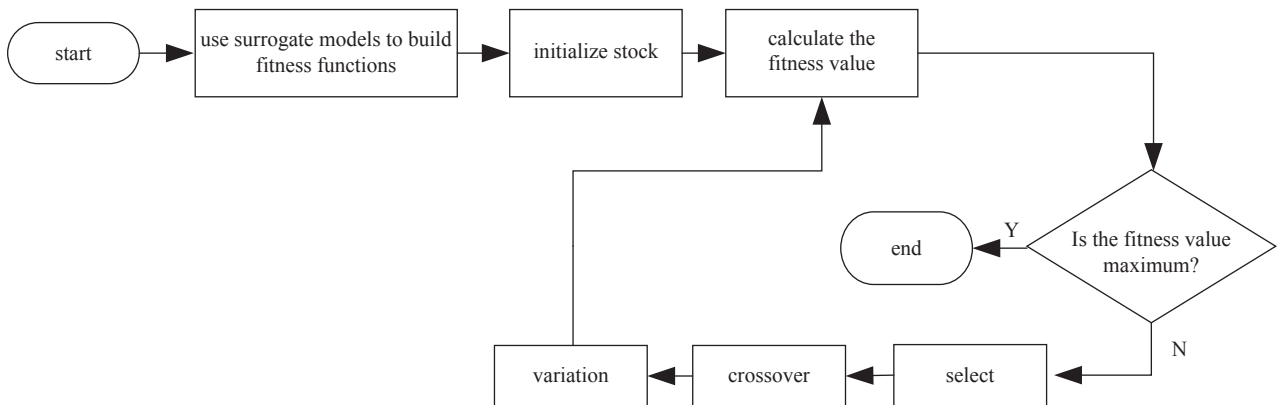


Fig. 10 Global optimization search flow chart

图 10 全局寻优流程图

以沉积能量最大为优化目标, 影响沉积能量的三种放电参数, 电压、电极间距以及电导率为优化变量, 利用遗传算法, 对代理模型进行全局寻优得到最佳放电参数组合及对应的沉积能量如表 5 所示。优化结果表明, 在放电参数的可行域内, 沉积能量随电压的增加而加大, 最大值出现在最大电压处; 电极间距在可行域内存在一个最佳值; 在最佳电极间距下存在一个最佳电导率, 使得沉积能量最大。这一结果与图 9 中三维曲面的变化趋势是吻合的。

表 5 模型的全局最优解

Table 5 Global optimal solution of the model

voltage/kV	conductivity/(mS·cm ⁻¹)	electrode spacing/mm	optimal deposited energy/J
17	0.8	2.28	68.73

3.2 实验验证

根据 3.1 节的优化结果, 在表 5 所示的最佳参数组合下进行多次实验, 得到的实验结果如图 11 所示, 从散点图中可以看出, 绝大多数实验结果都在模型预测的最优值上下, 不超过 8% 的误差内变化, 考虑到水下放电较强的随机性, 这一误差是满足精度要求的, 因此本文建立的模型是有效的。

4 结 论

本文应用 Kriging 代理模型, 研究分析了水中脉冲放电不同电压等级下, 电导率和电极间距对沉积能量的影响。结合全局寻优算法, 得到了变量可行域内的最佳放电参数组合, 使得沉积能量最大, 实验验证了结果的正确性。通过交叉验证方法评估得到, 实验样本条件下, Kriging 模型的均方根误差为 6.95%, 通过实验验证, 该模型的预测值与最终实验结果偏差在 8% 以内, 说明了模型结果的准确性, 为水下脉冲放电能量优化设计提供了参考。在电导率和电极间距的相互作用下, 沉积能量的变化呈现多峰值特性。在变量的可行域内, 存在使沉积能量最大的放电参数组合, 对应参数值分别是电压 17 kV、电极间距 2.28 mm 及电导率 0.8 mS/cm, 该参数组合对应的最大沉积能量为 68.73 J。

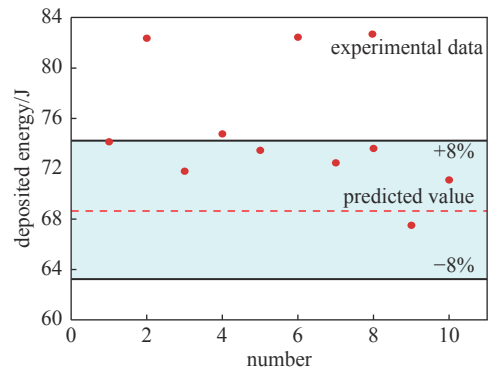


Fig. 11 Comparison between experimental results and optimal deposited energy

图 11 实验结果与最优值的对比

参考文献:

- [1] 尤特金. 液电效应[M]. 北京: 科学出版社, 1962: 1-2. (Yutkin. Electro-hydraulic effect[M]. Beijing: Science Press, 1962: 1-2)
- [2] 于海平, 郑秋丽, 安云雷. 电液成形技术研究现状及发展趋势[J]. 精密成形工程, 2017, 9(3): 65-72. (Yu Haiping, Zheng Qiuli, An Yunlei. Research status and development tendency of electrohydraulic forming (EHF) technology[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(3): 65-72)
- [3] 王志强, 曹云霄, 邢政伟, 等. 高压脉冲放电破碎菱镁矿石的实验研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 863-870. (Wang Zhiqiang, Cao Yunxiao, Xing Zhengwei, et al. Experimental study on fragmentation of magnesite ores by pulsed high-voltage discharge[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 863-870)
- [4] 李沼萱, 闫铁, 侯兆凯, 等. 液相高压脉冲放电致裂岩石技术研究进展[J]. 特种油气藏, 2021, 28(4): 1-9. (Li Zhaoxuan, Yan Tie, Hou Zhaokai, et al. Study progress of rock fracturing technology with high-voltage pulse discharge in liquid[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(4): 1-9)
- [5] 付荣耀, 孙鹞鸿, 樊爱龙, 等. 高压电脉冲在页岩气开采中的压裂实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 079001. (Fu Rongyao, Sun Yaohong, Fan Ailong, et al. Research of rock fracturing based on high voltage pulse in shale gas drilling[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 079001)
- [6] Li Xiangdong, Liu Yi, Liu Siwei, et al. Influence of deposited energy on shock wave induced by underwater pulsed current discharge[J]. Physics of Plasmas, 2016, 23: 103104.
- [7] 刘毅, 李志远, 李显东, 等. 水中大电流脉冲放电激波影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2741-2749. (Liu Yi, Li Zhiyuan, Li Xiangdong, et al. Effect factors of the characteristics of shock waves induced by underwater high current pulsed discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2741-2749)
- [8] 童得恩, 朱鑫磊, 邹晓兵, 等. 水中放电预加热过程的数值模拟研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1461-1467. (Tong De'en, Zhu Xinlei, Zou Xiaobing, et al. Numerical simulation of the preheating process of pulse discharge in water[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1461-1467)
- [9] 卞文娟, 周明华, 雷乐成. 高压脉冲液相放电降解水中邻氯苯酚[J]. 化工学报, 2005, 56(1): 152-156. (Bian Wenjuan, Zhou Minghua, Lei Lecheng. Degradation of *o*-CP by pulsed high voltage discharge in water[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2005, 56(1): 152-156)
- [10] Rond C, Desse J M, Fagnon N, et al. Influence of applied voltage and electrical conductivity on underwater pin-to-pin pulsed discharge[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52: 025202.
- [11] Zingerman Z. Pressure on the shockwave front from the slope impulse energy in an electric discharge[J]. Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki (Journal of Technical Physics), 1956, 26(11): 2539-2540.
- [12] Liu Yi, Li Zhiyuan, Li Xiangdong, et al. Intensity improvement of shock waves induced by liquid electrical discharges[J]. Physics of Plasmas, 2017, 24: 043510.
- [13] 喻越, 朱鑫磊, 黄昆, 等. 应用于石油解堵增产的水中脉冲放电特性实验研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2951-2959. (Yu Yue, Zhu Xinlei, Huang Kun, et al. Experimental study on pulse discharge characteristics in water applied to oil plugging and increasing production[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2951-2959)
- [14] 吴敏干, 刘毅, 林福昌, 等. 液电脉冲激波特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 045002. (Wu Min'gan, Liu Yi, Lin Fuchang, et al. Characteristics analysis of electrohydraulic shockwave[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 045002)
- [15] 黄海, 雷开卓, 黄建国. 水下等离子体声源的正交试验设计与分析[J]. 声学技术, 2012, 31(4): 381-384. (Huang Hai, Lei Kaizhuo, Huang Jianguo. The orthogonal experimental design and analysis of underwater plasma sound source[J]. Technical Acoustics, 2012, 31(4): 381-384)
- [16] 李元, 温嘉焯, 李林波, 等. 液体介质微/纳秒脉冲放电的特性与机理: 现状及进展[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33: 065001. (Li Yuan, Wen Jiaye, Li Linbo, et al. Characteristics and mechanisms of streamer discharge in liquids under micro/nano-second pulsed voltages: status and advances[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33: 065001)
- [17] Li Bin, Xue Sheng, Yuan Liang. Experimental study on pressure wave characteristics of high-voltage discharge in water with hemispherical electrodes[J]. IEEE Access, 2021, 9: 87173-87181.

- [18] 邢政伟, 王志强, 曹云霄, 等. 水中脉冲电弧放电等离子体通道直接冲击压力特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 832-838. (Xing Zhengwei, Wang Zhiqiang, Cao Yunxiao, et al. Direct impact pressure characteristics of pulsed arc discharge plasma channel in water[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 832-838)
- [19] 刘毅, 吴敏干, 林福昌, 等. 液电脉冲激波碎煤能量转换效率分析[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(12): 217-224. (Liu Yi, Wu Min'gan, Lin Fuchang, et al. Analysis of energy conversion efficiency of coal crushed by hydroelectric pulse shock wave[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(12): 217-224)
- [20] 李显东, 刘毅, 李志远, 等. 不均匀电场下水中脉冲放电观测及沉积能量对激波的影响[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 3028-3036. (Li Xiandong, Liu Yi, Li Zhiyuan, et al. Observation of underwater pulse discharge and influence of deposited energy on shock wave in non-uniform electric field[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 3028-3036)
- [21] 王林涛, 栾鹏龙, 孙伟, 等. 盾构推进液压系统参数优化[J]. 机械设计与制造, 2021(7): 54-57. (Wang Lintao, Luan Penglong, Sun Wei, et al. Parameter optimization of shield propulsion hydraulic system[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(7): 54-57)
- [22] Forrester A I J, Sóbester A, Keane A J. Engineering design via surrogate modelling: a practical guide[M]. Southern Gate: John Wiley & Sons Ltd., 2008: 37-104.
- [23] Lv Zhaoyan, Lu Zhenzhou, Wang Pan. A new learning function for Kriging and its applications to solve reliability problems in engineering[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2015, 70(5): 1182-1197.
- [24] 汪学清, 刘爽, 李秋燕, 等. 基于K折交叉验证的SVM隧道围岩分级判别[J]. 矿冶工程, 2021, 41(6): 126-128,133. (Wang Xueqing, Liu Shuang, Li Qiuyan, et al. Classification and discrimination of surrounding rock of tunnel based on SVM of K-fold cross validation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(6): 126-128,133)
- [25] Zhan Dawei, Xing Huanlai. Expected improvement for expensive optimization: a review[J]. Journal of Global Optimization, 2020, 78(3): 507-544.
- [26] 李显东. 不均匀电场下水中微秒脉冲放电过程及机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018: 8-10. (Li Xiandong. Research on process and mechanism of underwater microsecond pulsed discharges under nonuniform electric fields[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018: 8-10)