

# 华中科技大学创新创业训练计划

## 项目中期检查表

项目编号	S202310487074
项目名称	关于远洋海岛群储换电船舶的优化调度和航线的动态调整策略
项目负责人	杨子赫
所在院（系）	电气与电子工程学院
实施时间	2023. 2. 28-2024. 2. 28
联系电话	17334334689
填表时间	2023. 10. 16

华中科技大学本科生院制

## 一、项目研究进展情况说明（条文列述）

1. 搜集资料，小组成员分工阅读了项目相关文献及书籍，其中包括 6 篇论文、2 本运筹学和数学建模书籍（2023. 4-2023. 7）
2. 经组会讨论确定任务，复现代码任务中，小组负责人杨子赫负责“基于共享公交电力船舶的远洋海岛群能量收集转运策略的研究路径”和“计及共享全电船舶参与的海岛电网日前调度的研究路径”两大研究要点，小组成员詹智杰负责“储换电船舶日前优化调度策略的研究路径”，小组成员吴炳旭负责“面向生态友好型远洋海岛群的储电概念船舶及其供能路径优化策略的研究路径”，复现代码主要熟悉项目流程，并积累本项目所需的知识与技能。（2023. 7）
3. 完成了对相关文献的理论研究，包括场景分析、公式推导、数学计算（2023. 7）
4. 运用 matlab+yalmip+cplex 的工具组合，完成了对论文代码的复现，实现了在约束方程下对目标函数的求解（2023. 8-2023. 10）
5. 截至目前，项目进展平稳顺利，符合预期规划，并且小组通过讨论对下一阶段研究的开展有了清晰规划和充分信心

## 二、已取得的阶段性成果（条文列述）

1. 通过阅读相关文献和书籍，提高了文献检索和中英文文献阅读能力
2. 通过开展论文复现工作，掌握了 matlab 编程、getdata 数据提取、cplex 优化求解等工具的使用方法，学习了运筹学、启发式算法等相关知识，加深了对模型构建的理解
3. 理论上完成了对“基于共享公交电力船舶的远洋海岛群能量收集转运策略的研究路径”的模型构建，建立了仿真场景，完成了模型参数的确定，构建了目标函数和约束方程，并运用 cplex 求解器在 matlab 中的调用完成了对相关论文的代码复现
4. 代码程序编写了通过改进粒子群优化算法求解模型的 matlab 程序，该程序实现了对简化场景下共享储能船舶路径规划的求解，是以搜集能量最大化为目标进行的求解
5. 在老师和学长学姐的指导下，通过对于项目所需知识和技能的积累，已经对论文的主题思路和创新方向有了大致构思
6. 有了一个初步的仿真结果，获得了简化场景下船舶调度的路径结果，并且完成了对结果的简略文字分析

### 三、目前存在问题

1. 目前只是简化场景下的结果，下一阶段研究需要通过增加约束方程、增加参数等提高模型复杂度以实现模型对真实场景的映射
2. 缺乏对意外场景（极端天气下船舶无法航行、船舶故障）的考虑
3. 需要对代码进行补充，以确保模型的正确性
4. 当前是以搜集能量最大化为目标函数，不排除随着项目推进，会进行目标函数更换和多目标函数的复合求解
5. 针对大创申报书中的预期成果：
  - （1）获得多个基于现实的概念模型
  - （2）运用 MATLAB 编写具有功能性的算法，获得仿真结果
  - （3）将多个方案仿真结果进行对比得出最优化的储换电船舶调度方案和行之有效的船舶航行策略
  - （4）运用可视化功能强大的 MATLAB，产出 1-2 篇论文我们还需要进行多方案的对比和论文的写作从而系统的阐述共享船舶理论的优越性，也就是继续推进（3）、（4）部分的工作。

### 四、经费使用情况说明

已获资助 经费	1000
已使用经 费	94.1
经费使用 明细	资料费： 《MATLAB 在电力系统中的应用》 23.6 元 《MATLAB 建模与仿真》 70.5 元

## 五、下阶段研究计划及主要措施

1. 继续优化模型，增加对意外场景（极端天气下船舶无法航行、船舶故障）、季节性、是否接入电网等多因素的考虑，通过增加约束方程、增加参数等提高模型复杂度以实现模型对真实场景的映射
2. 设计对比仿真实验，将多个方案仿真结果进行对比得出最优化的储换电船舶调度方案和行之有效的船舶航行策略
3. 继续运用 MATLAB 编辑代码求解仿真模型
4. 完成一篇论文，系统地阐述模型的理论构建过程和仿真算例的生成分析，并对模型的有效性进行对比论证

项目负责人（签名）\_\_\_\_\_

年 月 日

## 六、项目指导教师意见

指导教师（签名）

年 月 日

## 七、项目负责人所在院（系）审核意见

审核人（签名）\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_年\_\_\_\_\_月\_\_\_\_\_日

注：请用 A4 纸，双面打印。

## 支撑材料：

### 一、STEV 能量搜集优化目标：

以两艘 STEV 搜集总电量最大作为优化目标，其表达式为：

$$\max E_t = \sum_{i=1}^{n_1} \left( E_{c1}(i) - P_v t_{c1}(I_1(i-1), I_1(i)) \right) + \sum_{j=1}^{n_2} \left( E_{c2}(j) - P_v t_{c2}(I_2(j-1), I_2(j)) \right)$$

### 二、STEV 能量搜集约束条件

#### 1. 返回时间约束

必须在每晚从负荷中心岛出发返程前返回此负荷中心岛，对应的约束表达式为：

$$t_{a1}(n_1) \leq t_e \quad (1)$$

$$t_{a2}(n_2) \leq t_e \quad (2)$$

$$I_1(n_{t1}) = I_1(0) \quad (3)$$

$$I_2(n_2) = I_2(0) \quad (4)$$

式中， $t_e$ 表示非客运时段的终止时刻（即 STEV 从负荷中心岛出发返程接客的時刻）； $t_{a1}(n_1)$ 表示船 1 到达第  $n_1$ 个岛（即回到岛 1）的時刻； $t_{a2}(n_2)$ 表示船 2 到达第  $n_2$ 个岛（即回到岛 8）的時刻。而式 3 和式 4 表明两艘 STEV 最后应分别回到其初始出发的负荷中心岛（即对应于图 1 所示场景，船 1 从岛 1 出发最后应回到岛 1，船 2 从岛 8 出发最后应回到岛 8）

#### 2. 储能电池容量约束

为尽量减小频繁充放电过程对储能电池寿命的影响，应限制其过充及过放，对应的约束表达式为：

$$SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max} \quad (5)$$

式中，SOC 为 STEV 自身储能电池的荷电状态（State of Charge）， $\max SOC$ 、 $\min SOC$  分别为 SOC 的上下限。

#### 3. 不同在同一资源富集岛约束

在能量搜集过程中，可能会出现两艘 STEV 同一时间在一个岛的情况。其中，两艘 STEV 同时在同一个负荷中心岛放电是可行的，而对于资源富集岛，在各资源富集岛最大风光总出力与一艘 STEV 慢充功率相当的情况下，两艘 STEV 同时在岛会降低每艘 STEV 的充电功率，其搜集电量小于两艘 STEV 分别在不同的岛充电的电量；另一方面，两艘 STEV 同时在岛时还需考虑充电功率如何分配，使得问题复杂化。因此，没有必要让两艘 STEV 同时在岛，应限制两艘 STEV 在能量搜集过程中不同在同一资源富集岛，对应的约束表达式为：

$$T_{s1}(k) \cap T_{s2}(k) = \emptyset, k = 2, 3, \dots, 7. \quad (6)$$

式中， $k$  表示岛屿编号； $T_s$ 为在岛时间段集合（每艘 STEV 去岛  $k$  可能会不止一次，因此每艘 STEV 在每个岛可能存在多个在岛时间段）； $T_{s1}(k)$ 表示船 1 在岛  $k$  的停留时间段； $T_{s2}(k)$ 表示船 2 在岛  $k$  的停留时间段。由于此约束仅对于资源富集岛成立，因此  $k$  的取值范围为 2—7 之间的整数。

#### 4. 充电功率约束

由于各资源富集岛各时刻的风光总出力不同，此时，会出现其风光总出力大于或小于 STEV 的最大

慢充功率两种情况，其实际的充电功率会有所不同，下面分别 对这两种情况进行讨论：当资源富集岛的风光总出力大于 STEV 的最大慢充功率时，相比于给资源富集 岛上的储能消纳设备充电，优先给 STEV 的储能电池充电更为合适。这是因为前者 需经过风光→消纳设备→专用储电船舶→负荷中心岛总共 3 次充放电过程，而后者仅需经过风光→STEV→负荷中心岛总共 2 次充放电过程，其电能转换效率更高（电能损耗更小）。此外，后者还能及时将电能运往负荷中心岛。此时，STEV 的充电功率应等于其最大慢充功率，即：

$$P_c = P_{s,max}(P_g > P_{s,max}) \quad (7)$$

当资源富集岛的风光总出力小于（或等于）STEV 的最大慢充功率时，在所有资源富集岛上的储能消纳设备及到达的专用储换电船舶能保证其风光出力完全消纳的情况下，无需考虑利用消纳设备给 STEV 充电。这是因为通过消纳设备给 STEV 充电依然会经过风光→消纳设备→STEV→负荷中心岛总共 3 次充放电过程，此时便没有了电能转换效率的优势，故没有必要让消纳设备给 STEV 充电。因此，STEV 的充电功率应等于风光出力的实时功率，即：

$$P_c = P_{s,max}(P_g \leq P_{s,max}) \quad (8)$$

综上，在资源富集岛上任意时刻 STEV 的充电功率约束为：

$$P_c(t) = \begin{cases} P_{s,max} & \text{if } P_g(k,t) > P_{s,max} \\ P_g(k,t) & \text{if } P_g(k,t) \leq P_{s,max} \end{cases} \quad (9)$$

式中， $P_c(t)$ 表示 STEV 在 t 时刻的实际充电功率； $P_g$ 为资源富集岛的风光总出力矩 阵； $P_g(k,t)$ 表示资源富集岛 k 在 t 时刻的风光总出力； $P_{s,max}$ 表示 STEV 的最大慢充功率。

式（9）可统一表达为：

$$P_c(t) = \min(P_{s,max}, P_g(k,t)) \quad (10)$$

### 三、Stev 仿真算例分析：

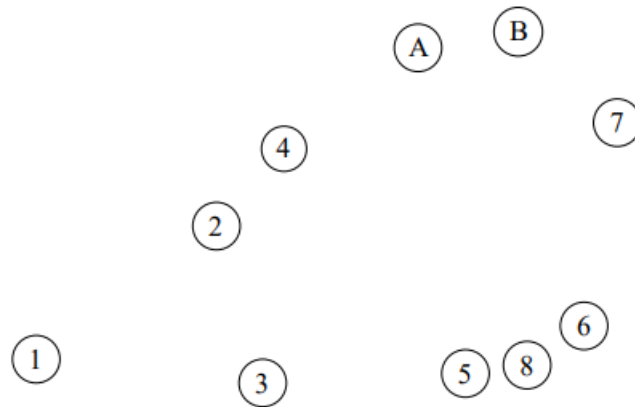


图 1 西沙群岛中永乐群岛各岛地理位置拓扑图

仿真场景中以我国南海西沙群岛的永乐群岛的实际地 理数据为依托，其地理位置拓扑图如图 1 所示。以 1 号岛屿作为坐标原点，根据 实际的岛屿特点及空间距离，可以得到如表 1 所示的永乐群岛各岛屿类型及地理 坐标信息：

表 1 永乐群岛各岛屿类型及地理相对坐标位置

岛屿编号	岛屿名称	岛屿类型
1	金银岛	负荷中心岛

2	甘泉岛	资源富集岛
3	羚羊礁	资源富集岛
4	珊瑚岛	资源富集岛
5	广金岛	资源富集岛
6	普卿岛	资源富集岛
7	石屿	资源富集岛
8	琛航岛	负荷中心岛
A	鸭公岛	旅游岛
B	银屿	旅游岛

在不考虑洋流、风向、天气等对 STEV 航行的影响且 STEV 均按照经济航速匀速直线前进的情况下，结合目前客运船舶的实际运营情况，经济航速设定为 30 km/h，则根据表 1 中的信息，可得到 STEV 客运时段单向航行（即 1→A→B→8）的时长为：

$$t_p = \frac{d_{1A} + d_{AB} + d_{B8}}{30} = 1.27h$$

同样，也可以得到除旅游岛之外的其它各岛间的 STEV 航行时长如表 2 所示。

表 2 各岛（除旅游岛）间 STEV 航行时长情况（单位：分钟）

岛屿编号	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	17	16	26	33	43	51	38
2	17	0	14	10	25	33	36	30
3	16	14	0	21	18	29	38	23
4	26	10	21	0	26	30	29	28
5	33	25	18	26	0	11	25	6
6	43	33	29	30	11	0	18	6
7	51	36	38	29	25	18	0	22
8	38	30	23	28	6	6	22	0

对于各资源富集岛的风光出力情况，各岛间的距离相对较近，同一时间的风速及光照等差别甚微，因此，影响各岛风光出力的主要是各岛可再生能源机组的容量配置，其具体情况如表 3 所示：

表 3 各资源富集岛可再生能源机组配置

岛屿编号	风电装机(kW)	光伏装机(kW)
2	400	450
3	240	550
4	800	0
5	560	250
6	640	125
7	0	750

选取永乐群岛在某典型日情况下的风速及光照数据，并结合表 3，可得到各资源富集岛 8：00—20：

00 时段的风光总出力曲线如图 2 所示：

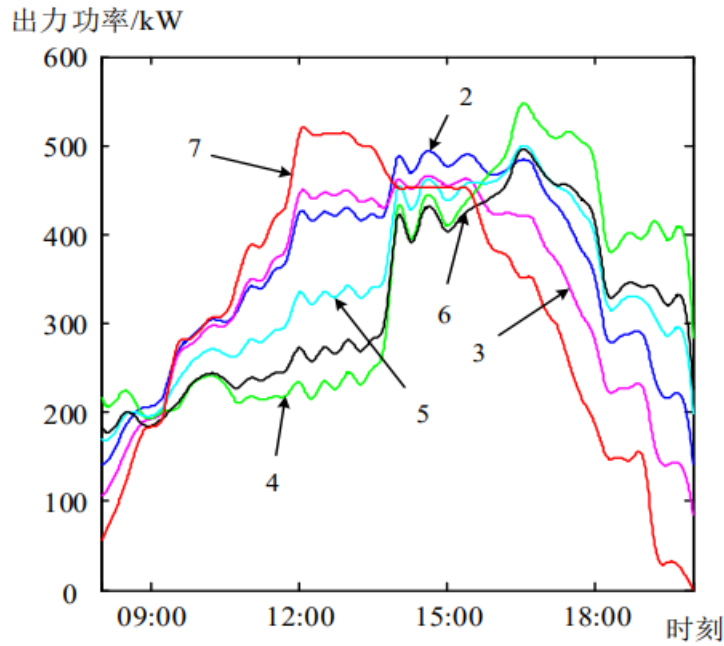


图 2 各资源富集岛风光总出力曲线

根据目前常规的客运班次计划情况，设定 STEV 每天早上 8：00 从负荷中心岛 出发，历经两旅游岛 A、B 到达另一负荷中心岛，晚上以相反线路于 20：00 返回原负荷中心岛，结合上面计算出的单向航行时长为 1.27 h，考虑到 STEV 在旅游岛上下客的停留时间，将 STEV 客运时段单向运营的时长设置为 1.5 h，则 STEV 每日的非 客运时段为 9：30-18：30，这段时间便是利用 STEV 进行能量搜集的时间。具体为： 船 1 早上 8：00 从岛 8 出发沿 8→B→A→1 航行，9：30 从岛 1 出发进行能量搜集并于 18：30 之前再度返回岛 1，然后沿 1→A→B→8 于 20：00 返回岛 8；船 2 早上 8：00 从岛 1 出发沿 1→A→B→8 航行，9：30 从岛 8 出发进行能量搜集并于 18：30 之前再度返回岛 8，然后沿 8→B→A→1 于 20：00 返回岛 1。

仿真中各参数设置如下：STEV 的储能电池容量为 3000 kWh；储能电池 SOC 上限为 90%（即 2700 kWh），下限为 10%（即 300 kWh），初始值为 10%；STEV 的动力电池航行耗电功率为 60 kW；STEV 慢充最大功率为 500 kW，快放功率为 1500 kW；每艘 STEV 最大探岛次数  $N=10$ ；粒子群算法中种群规模  $M=100$ ；粒子维度  $DN=440$ ；粒子最大位置  $\max X=1$ ，最小位置  $\min X=0$ ；粒子最大运动速度  $\max V=1$ ，最小运动速度  $\min V=-1$ ；惯性权重  $W=0.8$ ；全局学习因子  $1C=1.5$ ，局部学习因子  $2C=1.5$ ；单次运行最大迭代次数  $T=500$ 。

运用两次粒子群算法寻优，可得到两艘 STEV 的探岛次序和在岛时间如表 4 所示：

表 4 STEV 探岛次序及在岛时间（单位：分钟）

探岛次序 1	2	4	6	7	6	5	4	1
在岛时间 1	26	51	21	77	53	65	53	-
探岛次序 2	5	3	2	1	2	5	8	-
在岛时间 2	39	44	40	21	242	49	-	-

根据表 4 可以看出，两艘 STEV 的探岛个数相对较多，连续在岛时间普遍不算太长。探岛次数方面，两艘 STEV 探岛个数相当，船 1 共去了 8 个岛，船 2 共去了 7 个岛，且均重复去过部分岛屿，其中，只有船 2 中途去了负荷中心岛（岛 1）进行放电；在岛时间方面，两艘 STEV 在大部分岛屿的停留时间相当，且在 1 小时以内，只有在少数岛屿，尤其是船 2 在岛 2 的停留时间较长（长达 4 小时）。分析图 2 可知，由于每个资源富集岛在各时间段的风光出力大小在不断变化，且相互间有一定的差异，到



了某一时间点，其相对大小发生了改变，此时，STEV 转移到其它风光出力相对较高且距离又相对较近的资源富集岛，其多搜集的电量大于 转移时航行消耗的电量，因此 STEV 会选择进行转移。而各岛间的风光出力相对大小变动较为频繁，也就造成了 STEV 在各岛间的转移也相对频繁（即探岛次数较多）， 在每个岛屿的停留时间亦不会太长。结合表 2 中 STEV 在各岛间航行耗时的信息，可计算出 STEV 到达及离开各岛的时刻如表 5 所示：

表 5 STEV 能量搜集时刻表

船舶编号	历经岛屿	到岛时间	离岛时间	船舶编号	历经岛屿	到岛时间	离岛时间
1	2	9 : 47	10 : 13	2	5	9 : 36	10 : 15
	4	10 : 23	11 : 14		3	10 : 33	11 : 17
	6	11 : 44	12 : 05		2	11 : 31	12 : 11
	7	12 : 23	13 : 40		1	12 : 28	12 : 49
	6	13 : 58	14 : 51		2	13 : 06	17 : 08
	5	15 : 02	16 : 07		5	17 : 33	18 : 22
	4	16 : 33	17 : 26		8	18 : 28	18 : 30
	1	17 : 52	18 : 30		-	-	-

根据表 5 可知，两艘 STEV 均在当天 18：30 之前返回了出发时的负荷中心 岛，满足返程时间约束。同时，可以看出，两艘 STEV 也满足 4.3.2 节中提到的不同 时在岛约束。例如，对于两艘 STEV 均去过的岛 5，船 1 在 15：02—16：07 时间段 停留，而船 2 分别在 9：36—10：15 以及 17：33—18：22 时间段停留，两艘 STEV 停留的时间段并未重复。同样，对于两艘 STEV 均去过的岛 2 亦有相同结论。

将表 5 中各岛的停留时间对应到图 2 中所示的各资源富集岛风光总出力 曲线上，并考虑到充电功率上限 500 kW，可计算得到 STEV 在各岛的能量搜集情况 如表 6 所示。其中，正数表示充电，负数表示放电。

表 6 STEV 在各岛充放电量（单位：kWh）

岛屿编号	2	4	6	7	6	5	4
充电电量 1	132.7	189.9	96.6	648	373.5	508.2	450
岛屿编号	5	3	2	1	2	5	-
充电电量 2	173.2	249.9	269.3	-525	1906.5	323.9	-

根据 STEV 储能电池初始电量为 300 kWh，结合表 6 中 STEV 在各岛的充放 电情况，可以计算出两艘 STEV 储能电池在各时刻的电量。为了更直观地分析其电 量变化情况，将其绘制成如图 3 所示的变化曲线：

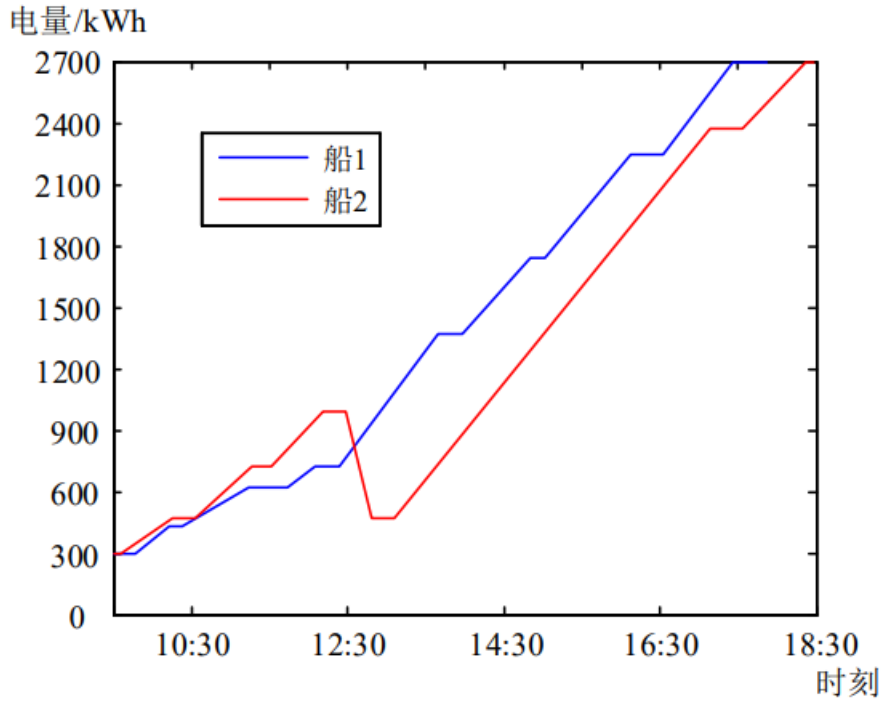


图3 储能电池电量变化情况

由图3可知，除船2中途在岛1进行放电，其储能电池电量有所下降之外，其余时段两艘 STEV 的储能电池电量均保持单调递增状态。其中，上升阶段表示船舶停留在资源富集岛，处于充电状态；持平阶段表示船舶正处于航行状态，因此储能电池电量并未变化。此外，还可以看出，两艘 STEV 的储能电池电量在整个能量搜集过程中均满足上下限约束（即 300 kWh—2700 kWh 之间），且在最后返程出发时刻 18:30 以前均已接近 SOC 上限，做到了储能电池的最大化利用。同时，结合图2、图3及表4、表5还可以得出以下两个结论：

（1）船2之所以第二次在岛2的停留时间较长，是因为之前刚刚在岛1进行了放电，此时储能电池电量处于相对较低的值（仅略高于 SOC 下限），而岛2在 13:06—17:08 时间段的风光出力均处于一个较高的状态，且岛2地理位置上距离岛1很近，在此期间没必要再转移到其他资源富集岛，因此船2在岛2停留了较长的时间进行充电。

（2）并非所有时间段 STEV 选择进行充电的资源富集岛都是此时间段风光出力最高或较高的岛。例如：对于 10:23—11:14 时间段，岛4的风光出力在所有资源富集岛中是最低的，而船1却选择在此时间段去岛4进行充电，主要有以下两方面的原因：一是从地理位置的因素考虑，岛4离船1去的前一个岛岛2较近，且后面要去在 12:23—13:40 时间段风光出力最高的岛7，岛4作为一个中间过度岛屿具有较强的合理性；另一方面，从整个能量搜集过程考虑，STEV 储能电池容量有限，船1在搜集过程结束后其储能电池 SOC 已达到上限（即搜集电量的最大能力），在这种情况下即便还有富余的电能亦已无法收集，因此便没有必要全程都只去风光出力最高或较高的资源富集岛。

整个 STEV 能量搜集过程中对于探岛次序和在岛时间的选取，实际上是在综合考虑各岛地理位置、各资源富集岛风光出力相对大小、以及船舶储能电池容量三方面的基础上确定的，也即是说 STEV 净搜集总电量的大小实际上是由以上三种因素共同决定的。

根据图3可以计算出两艘 STEV 所搜集的总电量，减去 STEV 在岛间转移过程中航行消耗的电量，即为两艘 STEV 的最大净搜集总电量。或直接根据粒子群算法迭代的运行结果，最终输出的 Gbestvalue 即为两艘 STEV 的最大净搜集总电量， $E_t = Gbestvalue$ 。运行得到  $Gbestvalue = 5062.8$ ，即最大净搜集总电量为 5062.8kWh。