Dec. 2020

Vol. 15 No. 6

网络首发地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20201028.1314.004.html

期刊网址:www.ship-research.com

引用格式:徐亮,李玮,王良,等.基于改进模拟退火算法的船舶照明三相平衡优化设计[J].中国舰船研究,2020,15(6): 55-59,65.

XU L, LI W, WANG L, et al. Three-phase balance optimal design of power distribution for ship lightning system based on the improved simulated annealing algorithm[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(6): 55–59, 65.

基于改进模拟退火算法的船舶 照明三相平衡优化设计



徐亮*,李玮,王良,郭冰 中国舰船研究设计中心,上海 201108

摘 要: [目的]船舶照明配电三相平衡设计是照明系统设计中的重要工作,为提高三相平衡设计的效率和 精度,提出基于改进模拟退火(SA)算法的三相平衡优化设计方法。[方法]首先,归纳下级照明分配电箱和 上级配电板这 2 个级别的三相平衡设计最优化模型;然后,对模拟退火算法产生新解的过程进行改进,进而将 其用于求解船舶照明分配电箱和配电板的三相平衡设计;最后,采用 Matlab 平台进行实船验证。[结果]结 果表明,采用该方法可以在 1 s 以内完成 4 个分配电箱及上级配电板的三相平衡优化设计。[结论]所提方 法可用于代替传统照明配电设计中负载三相分配的繁重工作,提高照明系统设计效率。

关键词:照明配电; 三相平衡; 改进模拟退火算法; 组合优化 **中图分类号:** U665.14 **文献标志码:** A

Three-phase balance optimal design of power distribution for ship lightning system based on the improved simulated annealing algorithm

XU Liang^{*}, LI Wei, WANG Liang, GUO Bing

Shanghai Division, China Ship Development and Design Center, Shanghai 201108, China

Abstract: **[Objectives]** The three-phase balance optimization is of importance to the power distribution of ship lighting system design. For enhancing the design efficiency and accuracy, an optimal approach is presented based on a simulated annealing (SA) algorithm. **[Methods]** Firstly, two optimal models are established for the upper-level distribution board and lower-level distribution box, respectively. Then, the SA algorithm is improved and applied to solve the problem of three-phase balance optimal design. Ultimately, a real case is tested based on the Matlab platform. **[Results]** The test shows the presented approach can solve the three-phase balance of four power distribution boxes and one upper-level distribution board within one second. **[Conclusions]** The presented approach can help relieve the excessive burden of three-phase load distribution for the lighting system by traditional design method and improve the design efficiency.

Key words: power distribution of lightning system; three-phase balance; improved simulated annealing algorithm; combinatorial optimization

0 引 言

船舶照明系统设计^[1-2]是电力系统设计的重 要组成部分。船舶照明及日用电器以单相负载为 主,一般采取如下配电方式:3相交流380 V船电 经变压器转换为3相交流220 V电制后,由配电 板220 V屏分路供电给若干分配电箱,再由分配 电箱进行单相220 V配电。作为船舶照明系统设

收稿日期: 2019–11–30 修回日期: 2020–06–28 作者简介: 徐亮, 男, 1988 年生, 博士, 工程师。 计中重要的环节,遵循设计规范完成照明系统各 负载支路的灯点设计之后,还需要对分配电箱及 其上级配电板进行负载三相平衡设计^[1-3],以尽可 能减小照明系统的三相不平衡度。

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01837

对于照明分配电箱及其上级配电板,三相不 平衡会造成某相电流偏大,而如果忽略不平衡 度,仍按照三相平衡负载计算电流和各级开关整 定值,可能会导致单相电流偏大的回路其断路器

网络首发时间: 2020-10-28 15:18

^{*}通信作者: 徐亮

因过载而无法正常使用,进而影响照明系统正常 工作。另外,某相电流偏大还会导致总的线损并 增大压降;同时,也会引起上级照明变压器损耗 增加,导致因单相负载偏大而限制变压器无法达 到其额定容量^{153]}。可见,开展照明配电系统三相 平衡的精细化设计具有重要意义。

传统设计采用的方法是利用 Excel 等软件编 制三相不平衡度计算表,然后据此开展离线开环 设计^[67]。对于某一分配电箱,当初次分配的三相 不平衡度大于 15% 时^[12],通过手动试凑来使分配 电箱的不平衡度减小,如此迭代进行,直至最终 满足阈值要求。该计算过程较为繁琐、粗糙,当 支路数增多时,解空间维数会迅速增大,单纯依 靠开环试凑容易顾此失彼,难以得到最优或次优 解;而且对于不同的船舶对象,其分配电箱负载 支路数及分电箱个数等均有变化,导致在计算之 前需要对表格进行较大调整,难以实现一表通用。

为此,赵建立等¹⁸提出了基于组合生成的穷 举法和基于遗传算法的优化方法,解决了单个分 配电箱的优化问题,但没有进一步研究上级配电 板的三相平衡设计问题。其中,穷举法只适用于 维数较低的情况,而传统的遗传算法由于采用二 进制编码,其长度较长、解空间维数大,容易产生 非可行解。

模拟退火算法^[8-11] 与遗传算法均属启发式算 法的一种,其中模拟退火算法相比而言步骤更清 晰,调节参数少,易于实现。因此,本文拟着重研 究将模拟退火算法用于求解船舶照明配电三相平 衡设计优化的问题,首先归纳出配电板和分配电 箱的三相平衡设计最优化模型,并对模拟退火算 法进行改进,以便提高搜索效率,然后再结合实 例对该方法进行验证。

1 照明配电三相平衡设计模型

确定分配电箱总个数、分配电箱支路数量以 及各支路的功率后,就可以开展照明系统分配电 板、分配电箱的三相平衡设计工作。首先,需要 建立分配电箱及其上级配电板这2个级别的三相 平衡设计优化模型。

1.1 分配电箱的三相平衡设计模型

设上级配电板供电的照明分配电箱总个数 为 N, 以其中某分配电箱 i 为例, 设该分配电箱有 M个负载支路, 支路功率记作向量 $P=[P_1, \dots, P_M]^T$, 其中 $P_j(j = 1, \dots, M)$ 表示支路 j 的负载功率。每个 支路只能分配于 UV, VW, UW 中的某一相, 且必 须分配于其中一相, 每相的分配结果用 3 个 M 维 若某一支路 P_j分配于 UV 相,则令向量 a 中 第 j 个元素 a_j=1, 否则, 令 a_j=0;

若某一支路 *P_j*分配于 VW 相,则令向量 *b* 中 第 *j* 个元素 *b_j*=1, 否则, 令 *b_j*=0;

若某一支路 *P_j*分配于 UW 相, 则令向量 *c* 中 第 *j* 个元素 *c_i*=1, 否则, 令 *c_i*=0。

这样, UV, VW 和 UW 相的总功率可以分别 表示为 **P**^T**a**, **P**^T**b**, **P**^T**c**。

因此,对于该分配电箱,三相平衡设计的不平 衡度最小问题可以归纳为

$$J_{1} = \min_{a,b,c} \left\{ \frac{\max(\boldsymbol{P}^{\mathsf{T}}\boldsymbol{a}, \boldsymbol{P}^{\mathsf{T}}\boldsymbol{b}, \boldsymbol{P}^{\mathsf{T}}\boldsymbol{c}) - \min(\boldsymbol{P}^{\mathsf{T}}\boldsymbol{a}, \boldsymbol{P}^{\mathsf{T}}\boldsymbol{b}, \boldsymbol{P}^{\mathsf{T}}\boldsymbol{c})}{\operatorname{ave}(\boldsymbol{P}^{\mathsf{T}}\boldsymbol{a}, \boldsymbol{P}^{\mathsf{T}}\boldsymbol{b}, \boldsymbol{P}^{\mathsf{T}}\boldsymbol{c})} \right\}$$
(1)

s.t.
$$\begin{cases} a_{j}, b_{j}, c_{j} = 0 \text{ or } 1\\ a_{j} + b_{j} + c_{j} = 1\\ j = 1, \cdots, M\\ a_{1} = 1 \end{cases}$$
 (2)

由于三相分配结果对于不平衡度计算具有对称性,因此,约束条件中令 *a*₁=1,表示限定 *P*₁ 分配入 UV 相,有助于降低维度。

1.2 配电板的三相平衡设计模型

各分配电箱的最优三相分配,就上级配电板 的负载三相分配而言,往往并不是最优的,这就 需要进一步对上级配电板各相的负载平衡进行优 化。需要说明的是,在优化过程中,应保持1.1节 中最优分配的分配电箱各负载支路分组不变,而 只调整各组对应的相序,以使上级配电板的三相 负载尽可能平衡。

将各分电箱最优三相分配后得到的分配电箱 各相负载功率汇总,表示为矩阵 **Q**。这里 **Q**为N行 3 列矩阵, **Q**_{ij} 为初次分配的配电板第 *i* 个分配电 箱第 *j* 相的负载功率,其中 *j* 为相序编号, *j*=1 代 表 UV 相, *j*=2 代表 VW 相, *j*=3 代表 UW 相。

设优化分配后,第*i*个分配电箱在 UV 相的功率位于初次分配矩阵 Q第*i*行的相序编号为 d_i ,则优化分配后配电板在 UV 相的总功率为 $\sum_{i=1}^{N} Q_{id_i}$ 。同样地,设优化分配后,第*i*个分配电箱在 VW,UW 相的最优分配功率位于初次分配矩阵 Q第*i*行的相序编号为 e_{i}, f_{i} ,则配电板在 VW,UW 相的总功率为 $\sum_{i=1}^{N} Q_{ie_i}$ 和 $\sum_{i=1}^{N} Q_{if_i}$ 。

令 $d=[d_1, \dots, d_N]^{\mathsf{T}}$, $e=[e_1, \dots, e_N]^{\mathsf{T}}$, $f=[f_1, \dots, f_N]^{\mathsf{T}}$, 于是 上级配电板三相平衡设计的不平衡度最小问题可 以归纳为



步骤 3: 若 $\Delta h \leq 0$, 即新解对应的目标值更优, 则接受新解, 令 *x=x'*, *h*(*x*)=*h*(*x'*); 否则, 按照一定的 概率 *p* 接受。通常选择 Metropolis 准则, 高温下 接受概率大, 低温下接受概率小, 即 *p*=exp(- $\Delta h/T$)。

步骤 4: 判断迭代次数是否达到预设阈值 K, 若是,则停止迭代,进入步骤 5; 否则,进入步骤 2 继续进行当前退火温度下的迭代寻优。

步骤 5: 判断当前退火温度 T 是否低于终止 温度 T_{min}, 若是, 则终止退火进程, 将当前解输出; 否则, 继续对退火过程进行降温, 降温系数为 R, 即将当前退火温度 T 更新为T = RT, 并重新初始 化迭代次数变量为1, 然后进入步骤2进行迭代寻优。

在其他条件相当的情况下,模拟退火算法计算的精度和速度与退火降温系数 R、初始温度 T₀和终止温度 T_{min}等参数的选取,以及生成新解 的方式有较大关系,参数的选取需要经过多次仿 真才能得到。按照规范,照明系统分配电箱支路 上的灯点数一般不超过 24 点,因此,每个支路的 总功率基本处于同一量级,可见调试好的参数具 有一定的适应性。这里,主要对生成新解的方式 进行改进。

在分配电箱的三相平衡设计优化中,放弃了 完全随机产生新解的方法,而是借鉴遗传算法中 的交叉思想,随机确定一个支路序号,然后进行 交叉循环,产生新解。这样产生的解将必定是可 行解,而且必然为一个邻近的不同解,同时,局部 的随机还确保了解空间在理论上的完全遍历。例 如:以四支路分配电箱为例,一组可行解为:

 $\boldsymbol{a} = [1, 1, 0, 0]^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{b} = [0, 0, 1, 0]^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{c} = [0, 0, 0, 1]^{\mathrm{T}}$

基于该可行解,随机产生位于 [1,4] 之间的整数点。例如,随机数为2时,将*a*,*b*,*c* 三者的第2个元素进行循环交叉,得到新可行解为:

 $\boldsymbol{a} = [1, 0, 0, 0]^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{b} = [0, 1, 1, 0]^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{c} = [0, 0, 0, 1]^{\mathrm{T}}$

同理,对于上级分配电板的三相平衡设计优 化,采取类似的新解生成方式:随机确定一个分 配电箱序号,并随机确定其2个相序编号,进行对 应元素的交叉互换,产生新解。这样产生的解也 必定是可行解,而且也必然为一个邻近的不同

由于三相分配结果对于不平衡度计算具有对称性,因此,约束条件中令 *d*_i=1, *e*₁=2, *f*_i=3, 表示限定第1个分配电箱的三相结果不必调整,这样有助于降低维度。

求得配电板的三相分配优化解之后,需要按 照配电板的分配结果对 1.1 节中各分配电箱的相 序进行相应的调整。

1.3 优化问题的求解思路

由式 (1)~式 (4) 可见, 分配电箱(0-1 规划) 和 配电板(整数规划) 的三相平衡设计优化均属组 合优化问题。当维数较低时, 组合优化问题可以 通过枚举法、分支定界法等这类精确算法得到最 优解, 但随着维数的增加, 计算量呈指数级增加, 带来的时间与资源开销很大, 无法满足快速设计 的需要。

对于负载支路数为 M 的分配电箱,其优化问题可行解组数为 3^{™1}组; 对于包含 N 个分配电箱 的配电板,其优化问题可行解组数为 (3!)^{№1}组,即 6^{№1}组。随着维数 M, N 的增加,带来的时间开销 和计算开销呈指数级增加,例如,当 M=12, N=5 时,其优化问题可行解组数分别达 177 147 组和 1 296 组。可见,采用枚举法等精确算法难以实现快速 计算。

而启发式算法结合经验模型可以缩小搜索空间,使得在相对较短的时间内即可找到较优解。 启发式算法解的精度和运算速度与参数的选取有 一定的关系,常见的算法有遗传算法、模拟退火、 神经网络及粒子群算法等,本文将着重研究模拟 退火算法在三相分配中的改进与应用。

2 模拟退火算法的改进与应用

模拟退火算法的一般流程^[11]如下:

步骤 1:随机生成初始解 x并代入目标函数 h(x),然后计算目标值,并初始化当前退火温度 $T=T_0(T$ 为当前退火温度, T_0 为初始温度),将迭代 次数变量初始化为 1。

解,同样保证了新解在理论上能够遍历整个解空 间。例如:以带有4个分配电箱的配电板为例,一 组可行解为:

 $d = [1, 1, 2, 2]^{\mathrm{T}}, e = [2, 3, 3, 1]^{\mathrm{T}}, f = [3, 2, 1, 3]^{\mathrm{T}}$

随机产生位于[1,4]之间的分配电箱序号。 若随机数为2,则从{1,2,3}中随机产生2个用于 交叉的相序,例如1和3。这样,将第2个分配电 箱的 UV 相和 UW 相元素进行交叉互换,即得到 的新可行解为:

 $d = [1, 2, 2, 2]^{\mathrm{T}}, e = [2, 3, 3, 1]^{\mathrm{T}}, f = [3, 1, 1, 3]^{\mathrm{T}}$

基于上述局部随机方法产生的新可行解,既 能确保新解在理论上对整个解空间的遍历,同时 又能提高产生新可行解的效率,有助于更快地寻 得全局最优。

对照明配电系统来说,由于负载离散、有限, 在大部分情况不可能做到100%的三相平衡。因 此,在设计时,建议按照功率最大的相序计算相 电流,并以此为基准按平衡负载方式折算到线电 流,这样可以避免某相负载的实际电流超出对应 开关的脱扣电流整定值。在下文的 Matlab 程序 中,也将输出此计算结果,以供照明配电开关整 定核算。

方法验证 3

Table 3

tion board

参数

UV相功率/W

VW相功率/W

UW相功率/W

不平衡度/%

本文以某民用船舶为例进行验证。该船的照 明系统包含1个照明分配电板,连接4个照明分 配电箱,其各支路功率分别为:

L-1: **P**=[300, 160, 800, 400, 600, 900, 900, 1 350,

200, 800, 1550, 1100, 600, 800, 1000, 2000, 1500^T; L-2: **P**=[396, 470, 404, 446, 180, 260, 470, 651, $506, 584, 584, 478]^{T};$

L-3: **P**=[900, 192, 356, 584, 584, 310, 190, 268, $412, 780, 272, 620, 160]^{T};$

L-4: **P**=[456, 220, 660, 404, 320, 142, 356, 300, 234, 144, 260, 200]^T_o

利用 Matlab (R2007a) 平台实现基于改进模拟 退火算法的三相平衡设计优化方法,并利用 cell 元胞及 xlswrite 函数将分配结果格式化输出。计 算用 PC 机处理器为 Inter Core(TM) i5-4590, 内存 容量4G,运行操作系统为Windows XP。

表1所示为改进模拟退火算法设置的参数。 对该案例运行20次,均得到了三相不平衡度最优 或次优解。限于篇幅,本文仅随机选取了其中一 组优化结果进行展示,分配电箱及其上级配电板 的三相平衡优化结果分别如表2和表3所示。可 见,经过优化,各分配电箱的三相不平衡度分别 降低至 1.2%, 1.21%, 0.64%, 0.97%, 上级配电板的 三相不平衡度降低至 0.26%。表 4 反映了三相平 衡设计优化方法各模块的计算时间。

表1 算法参数设置 Table 1 Setting of algorithm parameters

		•
参数	分配电箱三相 平衡优化模块	配电板三相 平衡优化模块
T_0/K	10	0.1
$T_{\rm min}/{ m K}$	0.001	0.001
R	0.95	0.8
Κ	50	20

表 2	配电箱的三相平衡优化结果
-----	--------------

Table 2	Optimal	three-phase	balance	results of	distribution	boxes
---------	---------	-------------	---------	------------	--------------	-------

八面市效出口	UV相		VW相		UW相		天 亚海府(0)
⑦ 阳 电相11、5	支路序号	功率/W	支路序号	功率/W	支路序号	功率/W	小丁侽/灸/%
L-1	1, 4, 6, 13, 14, 16	5 000	2, 3, 5, 7, 9, 10, 11	5 010	9, 13, 16, 18	4 950	1.20
L-2	1, 5, 8, 11	1 811	2, 3, 4, 12	1 798	6, 7, 9, 10	1 820	1.21
L-3	1, 2, 10	1 872	3, 4, 6, 7, 11, 13	1 872	5, 8, 9, 12	1 884	0.64
L-4	4, 5, 7, 10	1 224	1, 2, 8, 11	1 236	3, 6, 9, 12	1 236	0.97

表 3 LSB 配电板的三相平衡优化结果

Optimal three-phase balance results of LSB distribu-

数值

9 907

9 9 1 6

9 890

0.26

表 4 三相平衡优化计算用时

```
Table 4 Time consuming of three-phase balance algorithm
```

模块	耗时/s
分配电箱优化模块	0.68
单个分配电箱模块	0.17(平均值)
配电板优化模块	0.01
文件输出模块	2.22

图 1 所示为分配电箱(以 L-4 为例)及其上级 配电板三相平衡设计优化求解过程中目标函数的 收敛过程。从图中可以直观地看出,在寻优过程 中,模拟退火算法并没有如贪婪算法一样始终接 受较优的解,而是以一定的概率接受了相对差的 解,这样避免了优化过程陷入局部最优解。



(a) Three-phase balance optimal process of distribution box L-4



图 1 改进模拟退火算法的收敛过程

Fig. 1 Convergence process of the improved simulated annealing algorithm

图 2 所示为本次计算中采用 xlswrite 函数生成的结果文件 (.xls)示意图,其中分配电箱以 L-4为例,该计算结果可用于计算书的编写。此外,文件中还输出了最大线电流,用于辅助分配电箱和上级配电板的开关整定。

4 结 语

本文对基于改进模拟退火算法的船舶照明配 电三相平衡优化设计问题予以了研究,提出了包 含照明分配电箱、上级配电板这2个级别的三相 平衡优化模型,并利用局部随机的新解生成方法, 改进了模拟退火算法,最后通过实例进行了验证。

验证结果表明,本文提出的方法能够高效地 实现包含照明分配电箱、上级配电板这2个级别 的照明配电全局三相平衡优化设计,同时提高了 照明配电系统设计的精细程度,能够满足照明配

	A	В	С	D	
58	Branch4	UV (W)	VW (W)	UW (W)	
59	1	0	456	0	
60	2	0	220	0	
61	3	0	0	660	
62	4	404	0	0	
63	5	320	0	0	
64	6	0	0	142	
65	7	356	0	0	
66	8	0	300	0	
67	9	0	0	234	
68	10	144	0	0	
69	11	0	260	0	
70	12	0	0	200	
71	合计 (₩)	1224	1236	1236	
72	总功率(₩)	3696			
73	不平衡度(%)	0.974026			
74	最大线电流(A)	12.16336			

(a) Three-phase balance result of distribution box L-4

	A	В	С	D
75	所有支路合计(₩)	9907	9916	9890
76	所有支路总功率(₩)	29713		
77	总不平衡度(%)	0.262511		
78	总最大线电流(A)	97.58245		

(b) Three-phase balance result of distribution board

图 2 三相平衡设计优化文档输出

Fig. 2 Output documents of the three-phase balance optimal design

电系统离线设计需要。

参考文献:

 中国船级社. 钢质海船入级规范 [M]. 北京: 人民交通出 版社, 2015.

China Classification Society. Rules for classification of sea-going steel ships[M]. Beijing: China Communication Press, 2015 (in Chinese).

[2] 中国船级社.水面舰艇入级规范[M].北京:人民交通出 版社, 2015.

China Classification Society. Rules for classification of surface ships[M]. Beijing: China Communication Press, 2015 (in Chinese).

[3] 王代弟. 配电网三相不平衡问题的分析与研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2007.

WANG D D. Analysis and research of three-phase unbalance in distribution network[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2007 (in Chinese).

- [4] 周林,张有玉,刘强,等. 三相不平衡度算法的比较研究
 [J]. 华东电力, 2010, 38(2): 210–215.
 ZHOU L, ZHANG Y Y, LIU Q, et al. Comparative study of three-phase unbalance algorithm[J]. East China Electric Power, 2010, 38(2): 210–215 (in Chinese).
- [5] 杨云龙, 王凤清. 配电变压器三相不平衡运行带来的附加损耗、电压偏差及补偿方法 [J]. 电网技术, 2004, 28(8): 73-76.

YANG Y L, WANG F Q. Additional loss and voltage deviation caused by unbalanced operation of distribution transformer and countermeasures[J]. Power System Technology, 2004, 28(8): 73–76 (in Chinese).

[6] 孙亮,陈其翔,汤龙. 电气设计中 Excel 电子表格的应用 [J]. 电气应用, 2012(2): 29–32.
SUN L, CHEN Q X, TANG L. Usage of Excel in the electrical design[J]. Electrotechnical Application, 2012(2): 29–32 (in Chinese).