

带有缆流限制电缆敷设问题的算法研究

带有缆流限制的电缆敷设，其敷设结果与电缆的敷设次序密切相关，如何快速找到最优敷设次序是进行电缆敷设时需要解决的一个主要问题。根据缆流限制点数量的不同给出两种优化算法：对于单缆流限制点的电缆敷设，采用电缆的次优敷设结果进行排序可以直接得到最优敷设结果；对于多缆流限制点的电缆敷设，采用以遗传算法为基础的搜索算法可以快速地改善敷设结果。仿真结果表明，上述方法能够快速而有效地优化电缆的敷设次序，改善敷设结果。

杨亚伟/山东电力工程咨询院有限公司



杨亚伟/工程师

电缆敷设是电厂设计过程中一项重要而又复杂的工作。随着机组容量的不断增加，电厂中电缆的数量以及分布都变得越来越复杂。为了提高设计工作的效率与准确度，利用计算机辅助电缆敷设软件来进行电缆敷设的设计，已经成为近年来常用的一种设计手段。

在利用电缆敷设软件进行电缆敷设的设计时，为了防止某些桥架或电缆沟的缆流量超过其能承载的最大容量，通常会在这些缆流量较高的地方设置一个缆流量限制。对于带有缆流量限制的电缆敷设问题，目前一些常用的电缆敷设软件仅仅是简单地按照默认次序依次对电缆进行敷设，当某处的缆流量达到其允许的最大值后，则将此处的电缆路径视为断路，而后继续进行后面的

敷设。然而在很多情况下，这种算法得到的并不是最优敷设结果，其敷设结果与电缆的敷设次序是密切相关的。如何快速地找到最优敷设次序、改善敷设结果，对于降低电厂的建造成本有着重要意义。

带缆流限制的电缆敷设问题

如图1所示，abcdef之间是一组桥架，现有4根电缆Q、R、S和T，分别连接设备Q₁和Q₂、R₁和R₂、S₁和S₂以及T₁和T₂。路径长度ab=cd=ef=10，ac=ce=bd=df=20，设备的位置分别为Q₁c=Q₂d=19，R₁c=R₂d=9，S₁c=S₂d=4，T₁c=T₂d=1，假设桥架ab和cd的最大缆流量分别为1，当采用不同的次序进行电缆敷设时，结果如下表所示。通过表中的数据可以看出，对于带有缆流限制的电缆敷设问题，敷设次序对敷设结果有着直接影响。

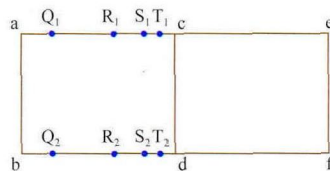


图1 电缆敷设模型

对于带有缆流限制的电缆敷设问

关键词/Keywords

缆流限制·
电缆敷设·
遗传算法·

表 敷设结果

敷设次序	敷设结果								总长度
	路径	长度	路径	长度	路径	长度	路径	长度	
QRST	Q ₁ abQ ₂	12	R ₁ cdR ₂	28	S ₁ cefdS ₂	58	T ₁ cefdT ₂	52	150
RSQT	R ₁ cdR ₂	28	S ₁ abS ₂	42	Q ₁ cefdQ ₂	88	T ₁ cefdT ₂	52	210
RTQS	R ₁ cdR ₂	28	T ₁ abT ₂	48	Q ₁ cefdQ ₂	88	S ₁ cefdS ₂	58	222
SRQT	S ₁ cdS ₂	18	R ₁ abR ₂	32	Q ₁ cefdQ ₂	88	T ₁ cefdT ₂	52	190

题, 想要得到最短的敷设路径, 最直接的办法就是遍历所有的敷设次序, 然后取其最小值。然而, 在电缆量较多的情况下, 该方法计算量过大, 不易实现。针对这种情况本文给出了一种解决方法, 该方法依据缆流限制点的数量采用两种不同的优化算法: 对于单缆流限制点的电缆敷设, 采用对电缆的次优敷设结果进行排序的方法直接得到问题的最优解; 而对于具有多个缆流限制点的电缆敷设, 则采用以遗传算法为基础的搜索算法, 在结果中快速地查找最优解。

单缆流限制点电缆敷设问题的优化算法

当电缆敷设路径中只有一个缆流限制点时, 可以采用对电缆的次优敷设结果进行排序的方法直接得到最优结果。该算法的具体描述如下: 假设整个电缆敷设路径上只有一个缆流限制点P, P点处允许通过的最大缆流量为 m ; 电缆 C_i ($i=1, 2, \dots, N$) 是所有敷设电缆中最优路径通过点P的 N 根电缆, 其最优路径长度为 F_i ; 将P点断开后, 重新将电缆 C_i 敷设得到次优路径长度 S_i ; 假设电缆 C_i 按其下标顺序由小到大进行敷设, 当 $i \leq m \leq j$ 时, 如果对于任意的 i 和 j 都有

$$(S_i - F_i) \geq (S_j - F_j) \quad (1)$$

那么, 该敷设次序即为最优敷设次序。

然后利用反证法给出该算法的证明过程: 当电缆 C_i 按其下标次序由小到大进行敷设且敷设结果为最优解时, 假设电缆 C_i 之间不满足式(1)的要求, 即至少存在一对电缆 C_a 和 C_b , 有

$$(S_a - F_a) \leq (S_b - F_b) \quad (2)$$

式中, $a \leq m \leq b$ 。

现将电缆 C_a 和 C_b 的敷设次序进行交换, 即先敷设电缆 C_b , 再敷设电缆 C_a 。由于 $a \leq m \leq b$, 因此电缆 C_a 的路径长度由最优路径长度 F_a 变为次优路径长度 S_a , 电缆 C_b 的路径长度由次优路径长度 S_b 变为最优路径长度 F_b 。交换顺序后, 电缆 C_a 和 C_b 的总路径长度增量为 $(S_a - F_a) + (F_b - S_b)$, 根据式(2)可以得到

$$(S_a - F_a) + (F_b - S_b) \leq 0 \quad (3)$$

即电缆 C_a 和 C_b 的敷设次序交换后, 电缆总长度

与交换前相比减少了, 这与交换前其敷设结果为最优解相矛盾, 因此假设不成立。

多缆流限制点电缆敷设问题的优化算法

当整个电缆敷设路径上有多个缆流限制点时, 如果这些限制点之间完全独立, 互不影响, 则可将多缆流限制点的电缆敷设问题分解为多个单缆流限制点的电缆敷设问题, 然后依次求解。而当缆流限制点之间不是完全独立, 而是相互影响时, 该方法则不再适用, 此时很难找到一种有效的方法来直接获得最优解。这种情况下, 在所有可能的敷设次序中进行随机搜索是获得最优解的一种可行方式。然而, 当电缆数量较多、桥架布局较为复杂时, 将会产生多种可能的敷设次序, 采用随机搜索法将会消耗大量的时间, 不利于在实际中应用。针对这种情况, 本文给出了一种基于遗传算法的最优敷设次序搜索算法, 该算法利用遗传算法良好的收敛性, 在所有可能的敷设次序中进行搜索, 以便缩短搜索时间, 提高算法的运行效率。

1. 遗传算法介绍

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 是一种以自然选择和遗传理论为基础, 将生物进化过程中适者生存规则与种群内部染色体的随机信息交换机制相结合的随机化搜索算法, 它是由美国Michigan大学的J. Holland教授于1975年首先提出的。遗传算法采用简单的编码方式来表示各种不同问题的复杂结构, 群体表示了搜索空间, 通过复制、杂交和变异等遗传算子来确定群体的搜索方向, 是一种有向的随机搜索。遗传算法利用群体进行有向随机搜索, 具有全局收敛性和并行性, 同时遗传算法具有简单、易操作和鲁棒性等特点, 近年来得到了广泛的应用。

2. 基于遗传算法的多缆流限制点电缆敷设问题优化算法

(1) 编码

编码方式作为遗传算法应用的第一步, 决定了遗传算法的设计方式和复杂性。常用的编码方式有二进制编码、实数编码和矩阵编码等。其中

二进制编码是遗传算法中应用最早和最为广泛的一种编码方式。然而对于电缆敷设次序问题,如果采用二进制编码,则会遇到较多问题。首先,在算法运行过程中需要在二进制数字和电缆敷设次序之间频繁地进行解码操作,计算量大大增加;其次,当利用二进制数字对敷设次序进行编码时,很容易产生大量的非法编码,从而需要付出额外的计算量来消除这些非法编码。

为了提高算法的运行效率,本文采用实数编码方式来对电缆敷设次序进行编码。实数编码是将个体的每个基因用某一范围内的一个实数来表示,其编码长度取决于个体的基因数。对于电缆敷设次序问题,当电缆数为 n 时,其编码格式为

$$(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) \quad (4)$$

其中, $a_1 \sim a_n$ 是两两不相等的实数,且有 $0 \leq a_i < 1$ ($1 \leq i \leq n$)。按照升序对 $a_1 \sim a_n$ 进行排序,排序后实数 a_i 的位次即代表第 i 根电缆的敷设次序。

与二进制编码相比,在电缆敷设次序问题中应用实数编码有较多优势。首先,编码意义明确,实数编码中,每根电缆分别用一个实数表示,该实数大小的变化直接反映了该电缆在敷设次序中的变化;其次,实数编码只需对所有实数进行简单的排序,即可得到对应的电缆敷设次序,无须进行复杂的解码操作,从而使计算量大大降低;最后,实数编码中,无论各个实数如何编码,总能找到对应的电缆敷设次序,不会产生非法编码。

(2) 产生初始群体

当产生初始群体时,需要设置群体的规模。群体的规模是遗传算法中一个重要的参数,群体规模越大,搜索范围越大,也就越容易获得全局最优解;然而群体越大,每次迭代的时间也就越长。对于电缆敷设问题,算法的运行时间也是需要考虑的一个重要因素,因此群体规模并不是越大越好,而是要根据电缆数量在一个合理的范围内取值。

(3) 复制

遗传算法在搜索过程中,一方面要选择优良个体,实现优胜劣汰,使搜索收敛于全局最优

解;另一方面,在搜索过程中要保持群体的多样性,使搜索范围不断加大,避免收敛于局部最优解。因此,选择力度与群体多样性是遗传算法的一对矛盾。加大选择力度能够提高收敛速度,但缺乏群体多样性;反之,减少选择力度能够保持群体的多样性,但收敛速度减慢。遗传算法中常用的复制方法有三种:适应度比例选择法、分级选择法和竞技选择法。上述三种方法中,适应度比例选择法选择力度最小,收敛速度慢,但群体多样性最好;竞技选择法选择力度最大,收敛速度快,但群体多样性较差;分级选择法位于两者中间。

为了在实际应用中测试上述复制方法的性能,本文以酒钢集团铝电一期工程的实际电缆敷设为基础,建立了一个测试模型,如图2所示。该模型选取了汽机房零米层中的部分桥架,并进行了适当的简化。

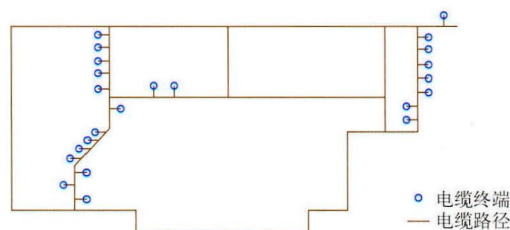


图2 酒钢集团铝电一期部分桥架简化

在其他条件完全相同的情况下,适用度比例选择法和竞技选择法在图2所示模型中的实际运行结果如图3所示。在图3中,横坐标代表算法的迭代次数,纵坐标代表当前迭代次数下得到的最优结果。由图3可知,在迭代次数有限的情况下,竞

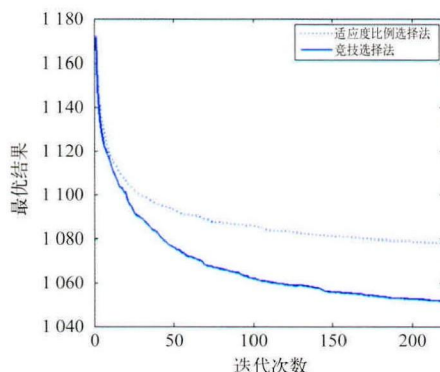


图3 适应度比例选择法和竞技选择法的对比

技选择法能够更快地逼近最优结果。

(4) 杂交

需要进行杂交的个体从复制后产生的新群体中随机抽取,抽取的数量由杂交概率 P_c 来决定,即

$$M_c = P_c M_1 \quad (5)$$

式中, M_1 为群体中个体的数目; M_c 为进行杂交的个体数目。若 M_c 为奇数,则要增加或减少一个个体,使杂交对象成对出现。

当采用实数编码时,可以通过将个体中某些基因对应的实数编码与杂交对象中对应的实数编码相交换的方法来实现杂交过程。

(5) 变异

变异的对象是个体基因,每代群体中进行变异的基因数量 B 由变异概率 P_m 来决定,即

$$P_m = \frac{B}{M_2 L} \quad (6)$$

式中, M_2 为当前群体中个体的数量; L 为单个个体所携带的基因数量。

变异概率是一个敏感参数,其值对算法的运行结果有较大的影响。增大变异概率,能够增强物种的多样性,但变异概率过大,会降低算法的收敛速度;减小变异概率,则会影响算法的搜索范围,不利于得到全局最优解。尤其是当选择竞技选择法作为复制手段时,复制后群体的多样性较差,此时变异概率应适当增大。

图2所示模型中,不同变异概率对结果的影响如图4所示。由图4可知,变异概率不能过大或过小,而是应当在一个适当的范围内取值。

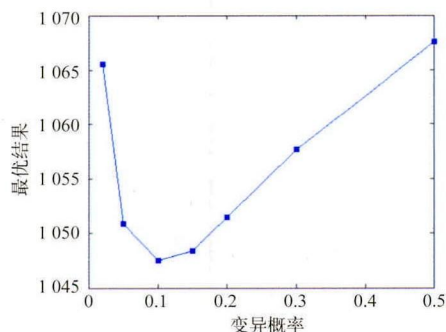


图4 变异概率对结果的影响

(6) 终止条件

遗传算法是一个反复迭代的过程,每次迭代

期间都要执行适应度计算、复制、杂交和变异等操作,直至满足终止条件。遗传算法常用的三种终止方法有:最大迭代次数设定法、最小方差设定法以及适应度变化趋势观察法。对于带有缆流限制的电缆敷设问题,算法的运行时间必须控制在一个可以接受的范围内,因此宜选用最大迭代次数设定法作为终止方法。

仿真结果

以图2所示模型为基础,敷设电缆总数为22根,编码方式采用实数编码,复制方式采用竞技选择法,种群规模设置为10,杂交概率设置为0.2,变异概率设置为0.1。将所得结果与普通的随机搜索法相比较,仿真结果如图5所示。

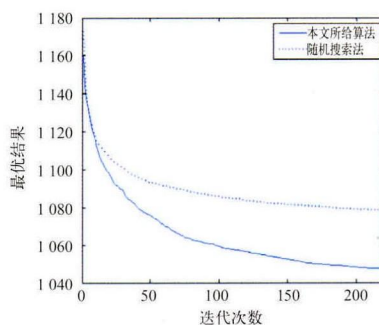


图5 仿真结果

通过图5可以看出,随着搜索范围的不断增大,所得结果相比于初始结果有了明显的改善。同时,与随机搜索法相比,本文所给出的基于遗传算法的电缆敷设优化算法性能更优,能够在相同的时间内获得更好的结果。

结束语

针对带有缆流限制的电缆敷设问题,分别从单缆流限制点和多缆流限制点两个方面对该问题进行了分析。对于单缆流限制点的电缆敷设,可以通过对电缆的次优敷设结果进行排序直接得到最优结果;对于多缆流限制点的电缆敷设,可以利用遗传算法良好的收敛性,在所有可能的敷设次序中进行搜索,使其能够在有限的时间内更好地逼近最优结果。

(收稿日期:2014-03-21) EA