

文章编号: 1000-4750(2009)12-0181-08

基于离散变量的大跨越输电塔架构 不同优化方法研究

*郭惠勇, 李正良, 罗 乐

(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 为了解决大跨越输电塔结构的优化问题, 提出了基于离散变量的拓扑组合优化方案和复杂构型组合优化方案, 并采用自适应遗传算法进行结构的优化分析。首先采用罚函数形式确定遗传算法的适应度函数, 然后确定遗传编码的转换方案以及自适应交叉和变异算子, 在此基础上研究了四种优化方案, 即截面尺寸优化方案、形状组合优化方案、拓扑组合优化方案、复杂构型组合优化方案。并对于拓扑组合优化提出了拓扑优化准则, 对于复杂构型组合优化提出了层次化优化方法。优化结果表明: 拓扑组合优化方案与复杂构型组合优化方案的优化效果明显好于截面尺寸优化方案和形状组合优化方案, 由于复杂构型组合优化方案本身包含有拓扑的改变, 其对原始构造改变较大, 故优化结果最好。

关键词: 输电塔; 自适应遗传算法; 结构优化; 拓扑优化准则; 层次优化准则

中图分类号: TU 761.3 **文献标识码:** A

INVESTIGATION ON STRUCTURAL OPTIMIZATION OF LONG-SPAN TRANSMISSION TOWER BASED ON DISCRETE VARIABLES

*GUO Hui-yong, LI Zheng-liang, LUO Le

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In order to solve the structural optimization problem of long-span transmission tower, topology combination optimization (TCO) method and configuration combination optimization (CCO) method based on discrete variables are presented respectively. The adaptive genetic algorithm (AGA) is used to search optimization solution. Firstly the fitness function of AGA is obtained by using the penalty function. Then the change schemes of genetic coding are proposed and the adaptive crossover and mutation operators are acquired. Finally, four optimization methods are discussed using the AGA, including rod cross-section optimization (RCSO) method, shape combination optimization (SCO) method, TCO method and CCO method. The topology optimization rules are presented for the TCO method, and the layering optimization rules are presented for the CCO method. The simulation results demonstrate that the optimization results of the proposed TCO method and CCO method are obviously better than those of the RCSO method and SCO method. Complex change in the configuration of tower is permitted by The CCO method, thus the optimization result is the best in these methods.

Key words: transmission tower; adaptive genetic algorithm; structural optimization; topology optimization rule; layering optimization rule

收稿日期: 2008-07-28; 修改日期: 2009-07-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(50678181/E0805)

作者简介: *郭惠勇(1971—), 男, 陕西西安人, 副教授, 博士, 从事结构损伤诊断与结构优化研究(E-mail: ghy267@tom.com);

李正良(1963—), 男, 江苏江阴人, 教授, 博士, 博导, 从事结构工程和工程力学研究(E-mail: lizhengli@hotmail.com);

罗 乐(1984—), 女, 重庆人, 硕士生, 从事工程结构优化研究(E-mail: luoyt_123@163.com).

随着我国在高压输电线路建设的步伐加快以及电网向特高压升级,对大跨越输电塔的结构设计、钢材强度提出了更高要求。为了使输电塔建造经济、合理,钢材强度就必须大幅提高,而钢材强度和结构构型的改变,则需对现有设计进行优化。国内苏国柱^[1]等基于 ANSYS 有限元软件,采用搜索准则优化法对异型塔架结构的形状和杆件截面尺寸进行了优化研究,王藏柱^[2]等则采用了广义变量近似方法研究了塔架结构的形状优化问题,原问题解则由近似问题解的序列逐步逼近。这些方法主要是基于连续变量进行优化研究。王坤^[3]等则采用简单遗传算法对输电塔结构进行了离散优化研究,但该方法主要是在输电塔构型已经确定情况下,仅对杆件的截面尺寸进行了优化研究。国外 Natarajan K^[4]和 Viswesara R G^[5]等基于连续变量对输电塔结构的杆件截面尺寸和形状优化进行了研究,而 Sivakumar P^[6]等则采用遗传算法并基于离散变量对结构的形状和截面尺寸进行了优化分析,这些研究主要是在风荷载作用下进行结构的优化分析,但是很少涉及到输电塔结构拓扑及复杂构型的改变。故本文提出了基于离散变量和自适应遗传算法的输电塔结构拓扑及构型优化准则,并编制相应的有限元计算程序,以解决输电塔的拓扑构型优化问题。

1 输电塔架构优化理论

输电塔的架构优化通常是基于结构的有限元模型进行优化分析^[7-8]。输电塔的架构优化理论应包括设计变量、设计方案及其数学描述以及优化原理。设计变量为自变量,优化目标的获取就是通过改变设计变量的数值来实现的。每个设计变量都有上下限,它定义了设计变量的变化范围。对于输电塔的架构优化问题,其设计变量应包括截面尺寸和形状,以及拓扑和构型改变量。目标函数是设计变量的函数。输电塔的架构体系在受到外载荷作用时,通常以结构的重量为优化目标:

$$W = \sum_{j=1}^n L_j \rho_j A_j \quad (1)$$

式中: W 为结构的重量; L_j 、 A_j 和 ρ_j 分别为第 j 个杆单元的长度、截面面积和材料密度; n 表示塔结构中单元的数目。其约束条件如下:

1) 等效应力约束:

$$\sigma_{st} = \begin{cases} \frac{N_j}{A_j} \leq f, & N_j \text{ 为拉力} \\ \frac{P_j}{\varphi_j A_j} \leq f, & P_j \text{ 为压力} \end{cases} \quad (2)$$

2) 杆件长细比约束:

$$\begin{cases} \lambda_j - \lambda_{\text{压}} \leq 0, & \lambda_{\text{压}} \text{ 压缩许用长细比} \\ \lambda_j - \lambda_{\text{拉}} \leq 0, & \lambda_{\text{拉}} \text{ 拉伸许用长细比} \end{cases} \quad (3)$$

3) 杆件夹角:

$$\theta_{ij} - \theta_{\min} \geq 0, \quad \theta_{ij} \text{ 两联结杆的夹角} \quad (4)$$

4) 塔腿斜率范围:

$$\beta_{\min} \leq \beta_j \leq \beta_{\max}, \quad \beta_j \text{ 塔腿倾斜角} \quad (5)$$

5) 杆件长度范围:

$$l_{\min} \leq l_j \leq l_{\max}, \quad l_j \text{ 单杆长度} \quad (6)$$

其中, 1)–5) 中 j 的取值范围为 $j=1, \dots, n$ 。上式中: σ_{st} 为等效应力值; φ_j 为稳定系数; λ_j 为第 j 杆的长细比。约束条件第 1) 项为受拉应力约束和受压局部稳定约束, 第 2) 项是防止过大长细比杆件的出现, 第 3) 项约束是为了防止在拓扑优化中两联结杆件的夹角过小, 第 4) 项约束主要是针对主支撑的 4 个塔腿杆件, 其倾斜角过小则塔腿受力性能较差, 而倾斜角过大则会使塔身重量的影响过大而且不易施工, 具体值由工程经验确定。第 5) 项约束主要是防止单杆过长。这些约束将影响具体的形状和拓扑优化结果。

2 基于自适应遗传算法的优化实现

2.1 采用罚函数建立适应度函数

遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种全局优化概率搜索方法^[9]。如果直接采用结构重量为适应度函数, 即使初始群体都满足约束条件, 经过交叉和变异操作后生成的染色体也可能违背约束条件, 这将导致普通的遗传算法和结构重量适应度函数难于求解这类问题。本文对于输电塔优化问题, 将通过罚函数法来处理约束问题并建立较为合适的适应度函数。具体主要对第一种约束条件即等效应力采用罚函数形式进行处理, 对第 2)–第 5) 约束条件则在遗传算法的编码转换和具体优化方案确定时进行控制以满足约束条件。则适应度函数为:

$$G_f = W + \sum_{i=1}^m r_i \max[0, ((\sigma_{st})_{i \max} - f_i)] \quad (7)$$

式中： m 表示具有不同强度设计值的钢材种类数目； r_i 表示具有第 i 类强度设计值钢材种类的罚参数，该值是一很大的数； $(\sigma_{st})_{i \max}$ 表示具有第 i 类强度设计值的所有钢构件中最大等效应力值； f_i 表示第 i 类强度设计值。这样当最大等效应力值超过强度设计值时，通过最大值选择以及罚参数的放大作用，该计算出的适应度值将远远大于结构的重量。而本研究优化问题是最小化问题，故可以将不满足约束的解通过罚函数形式过滤掉。

2.2 编码

遗传算法主要对染色体进行遗传操作，因此将输电塔优化问题的解空间映射到遗传算法的搜索空间。本研究采用简单、直观的二进制编码方式，将各个设计变量转化为具有一定长度的二进制位串，建立位串与实际变量之间的一一对应关系，每一个染色体就表示问题的一个解。

2.3 型钢参数及形状拓扑等设计变量的转换

每个设计变量用一定的二进制串表示，将该二进制串解码时，依照型钢规格数据库以及形状和拓扑变化规则将其解码为恰当的设计变量值。

2.4 选择

采用比例选择法，使染色体被遗传到下一代的概率与其适应度成比例；同时，在每一代中保留最佳染色体，保证遗传算法的收敛性。

2.5 自适应交叉和变异

采用自适应交叉和变异算子^[10]，即交叉概率 p_c 与变异概率 p_m 能够随适应度自动改变。当群体各个染色体适应度趋于一致或者趋于局部最优时，使 p_c 和 p_m 增加，而当群体适应度比较分散时，使 p_c 和 p_m 减少。自适应遗传算法在保持染色体多样性的同时，保证了遗传算法的收敛性。具体按下列两式进行自适应调整：

$$p_c = \begin{cases} \frac{f_{avg} f_{max} (k_1 - k_2) + f' (k_2 f_{max} - k_1 f_{avg})}{f' (f_{max} - f_{avg})}, & f' \geq f_{avg} \\ k_2, & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (8)$$

$$p_m = \begin{cases} \frac{f_{avg} f_{max} (k_3 - k_4) + f' (k_4 f_{max} - k_3 f_{avg})}{f' (f_{max} - f_{avg})}, & f' \geq f_{avg} \\ k_4, & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (9)$$

式中： f_{max} 为群体中最大的适应度值； f_{avg} 为每代群体的平均适应度值； f' 当交叉时为要交叉的两个染色体中较大的适应度值，当变异时为变异染色体的适应度值。 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 取(0,1)区间的不同的值，会取得不同的自适应效果。

3 四种不同优化方法

采用了四种优化方法，即截面尺寸优化、形状组合优化、拓扑组合优化、复杂构型组合优化方法，其中前两种为目前输电塔结构优化中常用的两种方法，而拓扑组合优化和复杂构型组合优化方法则为本文提出的优化改进方法。为了方便说明起见，以晋东南-南阳-荆门线路上的某 1000kV 跨江特高压跨越塔为研究对象，塔高 181.8m，根开尺寸为 39.06m，该结构为圆管杆件所组成塔架，最大管材为 $\phi 1100 \times 22$ ，其主承力构件采用高强度 Q345 钢，其辅材采用 Q235 钢。两塔间跨距为 1650m，跨越塔与耐张塔间距为 800m，每跨间有 6 分裂导线 3 个，地线两根，考虑特高压铁塔安全系数为 1.1，具体结构如图 1 所示。由于输电塔塔头部分的设计往往取决于电气性能，而非单纯的力学性能，故对塔头只研究构件截面尺寸的改变，不考虑塔头的形状和拓扑的改变，对塔身和塔基则考虑构造的改变。

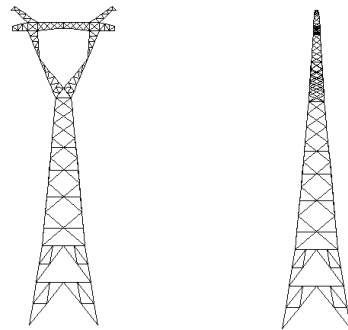


图 1 输电塔结构图

Fig.1 Elevation of transmission tower

3.1 截面尺寸优化法

截面尺寸优化指在一定的约束条件下，使结构单元截面最小尺寸尽量达到满应力状态。拉压理想状态下，第 j 号杆单元截面尺寸的下限按下式确定：

$$A'_j = \frac{\sigma_j}{f} A_j \quad (10)$$

输电塔结构的构件在外荷载作用下常常会发生局部失稳破坏，则考虑失稳后截面尺寸下限为：

$$A'_j = \frac{\sigma_j}{\varphi_j f} A_j \quad (11)$$

受压杆件截面尺寸下限应按式(10)、式(11)计算结果的最大值选取。

3.2 形状组合优化法

形状组合优化考虑了两类设计变量，即截面尺寸和结构形状的改变量。其中结构形状优化通常采用渐进节点移动法。通过灵敏度分析确定所要移动的节点及其移动方向。根据优化准则调整节点位置，使结构形状逐渐达到最优。优化准则来优化设计状态必须满足库恩-塔克(Kuhn—Tucker)条件：

$$\begin{cases} \nabla_X W(X) + \lambda \nabla_X (u_i - u_i^*) = 0 \\ u_i - u_i^* \leq 0 \\ \lambda \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中： X 代表由形状设计变量组成的矢量； λ 是拉格朗日乘子； u_i 和 u_i^* 为结构 i 自由度上的位移和相应约束值。

当基于离散变量进行遗传优化时，不需要考虑以上梯度信息，但需考虑实际约束条件。输电塔形状优化往往依赖于一些结点的移动。由于输电塔结构往往是对称的，则其形状改变也应是对称的。在实际应用中不应超过一些限值，例如两腰部节点位移的改变有最大和最小限值，如图 2 所示。由该图可知对于形状优化时需考虑结点位移的限制。

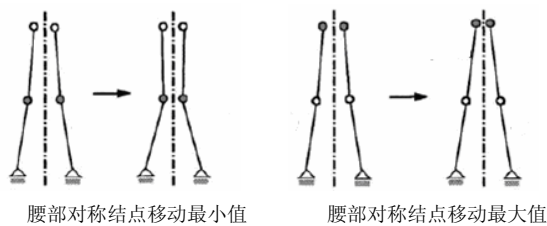


图 2 形状约束限制

Fig.2 Limitation of shape constraint

3.3 拓扑组合优化法

拓扑组合优化包含三类设计变量，即截面尺寸、形状和拓扑这三类变量。结构拓扑优化仍可采用渐进节点移动法进行。最常用的拓扑优化方法是先在结构上加上所有可能的杆件形成基结构，然后通过灵敏度分析识别并删除杆件，过程反复迭代，直到达到拓扑最优。其相应的优化准则描述如下：优化问题对应的拉格朗日增广函数为：

$$L(\tau, X) = W(\tau, X) + \lambda(u_i(\tau, X) - u_i^*) \quad (13)$$

由库恩-塔克条件可得：

$$\begin{cases} \nabla_\tau L(\tau^*, X^*, \lambda) = \nabla_\tau W(\tau^*, X^*) + \lambda \nabla_\tau L(u_i - u_i^*) = 0 \\ \nabla_X L(\tau^*, X^*, \lambda) = \nabla_X W(\tau^*, X^*) + \lambda \nabla_X L(u_i - u_i^*) = 0 \\ u_i - u_i^* \leq 0 \\ \lambda \geq 0 \\ \lambda(u_i - u_i^*) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中： τ^* 、 X^* 为拓扑变量最优值组成的向量和形状设计变量最优值向量； λ 为拉格朗日乘子。

采用遗传算法优化时，不需要考虑梯度信息，但需满足约束条件 2)—约束条件 5)，故提出了新的输电塔拓扑优化规则。为了简便起见，本文主要对塔身的拓扑构形进行优化，如图 3 所示。以原结构为优化的初值，通过对塔身主材上除去横撑的 6 个节点进行自动寻找最优位置来实现拓扑优化，具体实现方法为：设定 6 个变量 Δd_1 、 Δd_2 、 Δd_3 、 Δd_4 、 Δd_5 、 Δd_6 ，每个变量均对应一个变化区间，则 6 处节点的垂直方向位移在这 6 个变量基础上改变。每个节点的移动都对应着该层面所有节点的同时移动，通过这 6 个层面节点的移动和拓扑优化规则进行拓扑改变。

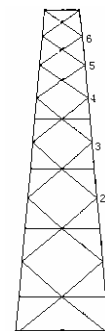


图 3 塔身

Fig.3 Elevation of tower body

由于主材上节点的移动使得相邻节点间距发生改变，根据节点间距来和拓扑规则判定拓扑构型的改变。拓扑规则如下，并详见图 4。

1) 拓扑规则 1。当两相邻节点间距大于所设最大节点间距值 d_{max} 时，斜撑由一叉变为两叉，再判定新斜撑的两节点间距是否大于应该添加横隔的间距 d_h ，如果大于则应添加横隔。参见图 4。

2) 拓扑规则 2。当两相邻节点间距小于应该添加横隔的间距 d_h 时，则删除原有横隔，参见图 4。

3) 拓扑规则 3。当两相邻节点间距大于应该添加横隔的间距 d_h 时，则添加横隔，参见图 4。

4) 拓扑规则 4。当斜撑两叉端节点间距小于最

小间距 d_{min} ，则斜撑的两叉变为一叉，再判断新斜撑的两节点间距，当大于应该添加横隔的间距 d_h 时，则添加横隔，参见图 4。

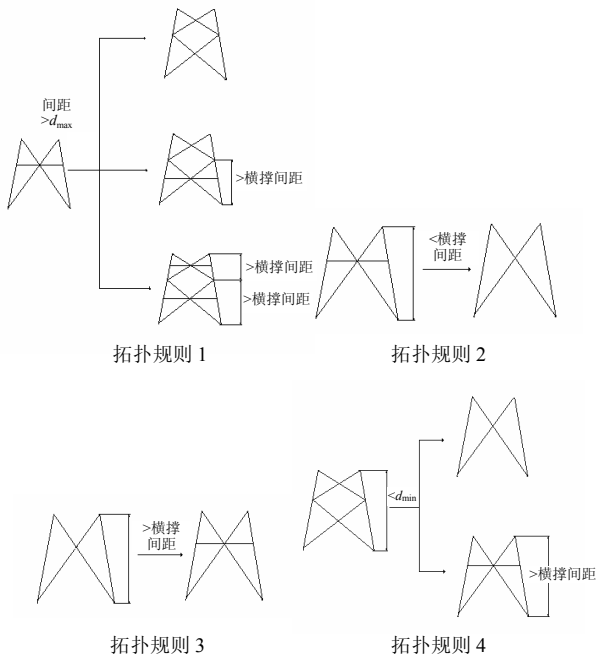


图 4 拓扑优化规则

Fig.4 Topology optimization rules

3.4 复杂构型组合优化法

由于结构的拓扑组合优化往往是利用杆件删除和节点移动以获得新的构型，因此，一般只能获得与原构型相似或相近的构型，不能获得差异显著的复杂构型。故本文提出了构型的层次化优化方法，其原理主要是将塔身和塔基分成一定的层次部分，每个层次备选以不同的局部结构构型，然后采用遗传算法对不同的构造组合进行优化，以获得优化解。

对于图 1 结构的塔基和塔身可分为 5 层—9 层，这里选择较为简单的 6 层进行优化。将原塔架的塔身和塔基分为 6 层，每一层有两种可选择构型，当遗传算法采用二进制编码时，0 对应第一种构型，1 则对应第二种构型。使每层的不同构型自由组合，从而选择出最优构型组合。并考虑构型优化与截面、形状优化的耦合，将构型优化与截面优化、形状优化统一编码，实现最终的组合优化。每层的可选构型如图 5 所示。

如果每层有 3 种或 4 种构型可供选择时，可采用 2 位的二进制编码，分别用 00、01、10、11 依次表示该 4 种或 3 种构型，如有更多的可选构型，

则以此类推，即用更多位数二进制编码表示。

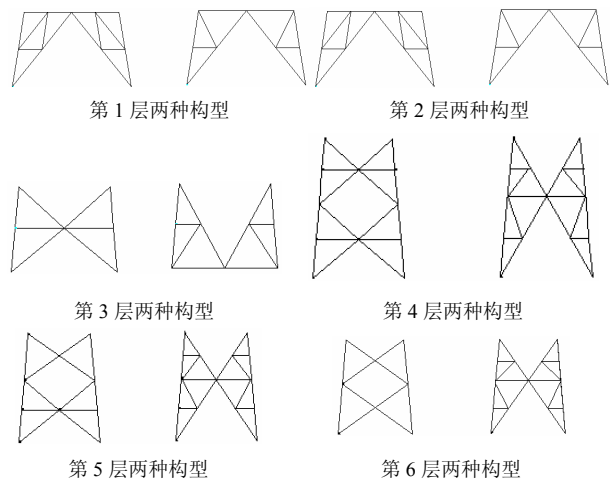


图 5 层次优化构型

Fig.5 Layering optimization configurations

4 优化计算与结果分析

首先采用 Matlab 程序设计语言编制通用的输电塔受力分析计算程序，通过本文输电塔结构以及其它多个算例的验证，都得到与 ANSYS 有限元软件计算完全一致的结果，即验证了程序的正确性。然后再编制自适应遗传算法程序，实现基于离散变量的优化研究。本研究具体以图 1 中的输电塔作为优化对象，主要设计荷载为风荷载，设计风速为 30m/s，并根据相应规范施加风荷载。具体优化如下。

4.1 截面尺寸优化及结果分析

在该输电塔中归纳出 21 种截面尺寸型钢作为优化设计变量，在遗传操作中，采用 3 位数的二进制编码表示一个设计变量的值，即每种型钢具有 8 种可选择的截面型钢型号，因本问题为优化问题，故该 8 种可选择的型钢截面尺寸为原始型钢型号的依次递减。则一个长度为 63 位的二进制串表示一个染色体，每一个染色体表示一种设计方案或者设计类型。遗传算法参数为：适应度函数中的罚参数 r_i 均取 10^{10} ，群体规模 40、自适应交叉概率 p_c 中的 k_1 和 k_2 分别为 0.9 和 0.6，自适应变异 p_m 中 k_3 和 k_4 分别为 0.1 和 0.001。优化结果如图 6 和表 1 所示。从图 6 中可观察到输电塔的结构重量随着优化的迭代次数增加而逐渐下降并趋于稳定，最后根据收敛条件和最大迭代次数的规定收敛于一个较小值。而种群的平均值变化曲线显示了在开始阶段，其平均值有一个向上的突变，在 6 代以后逐渐趋于平缓，

这是由于罚函数的影响，使违背约束的染色体其重量计算值变得很大，故平均值变化曲线有向上突变。

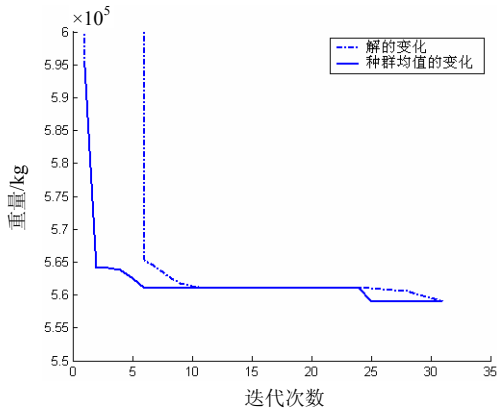


图6 截面尺寸法优化结果

Fig.6 Optimization results of the RCSO method

表1 四种优化方法计算结果

Table 1 Computational results of four optimization methods

优化法	优化前重量/kg	优化后重量/kg	优化率/(%)
截面优化	594650	558950	6.00
形状组合优化	594650	555680	6.55
拓扑组合优化	594650	545590	8.25
复杂构型组合优化	594650	536780	9.73

4.2 形状组合优化及结果分析

输电塔形状优化包含了截面尺寸和结构形状两类设计变量，截面尺寸优化主要增加了形状变量，即根开尺寸 B1 和腰部尺寸 B2，并且考虑到节点位移的限制，对这两个设计变量的变化范围限制为原始尺寸的±10%，遗传优化时分别采用 5 位的二进制编码串表示这两个形状变量，它表示了离散的形状变量选择范围。则一个长度为 73 位的染色体可表示一种设计方案，遗传参数与上节相同。优化结果如图 7 和表 1 所示。可观察到图 7 中种群的平均值变化曲线显示了在开始阶段至 14 代左右，其平均值有一个向上的突变，以后逐渐趋于平缓，这是由于罚函数的影响，经过大约 41 代遗传操作，计算结果趋于收敛。优化后根开半径 B1 与腰部半径 B2 为 17.96m 和 11.86m。

4.3 拓扑组合优化及结果分析

利用本文提出的拓扑优化准则，将塔身 6 个位移变量作为拓扑变量，并考虑拓扑优化与截面、形状优化的耦合。对于这 6 个拓扑位移变量中的每个变量均采用 4 位的二进制编码串表示。这样，在形状组合优化的 73 位编码基础上，增加该 6 个拓

变量的编码，则一个长度为 97 位的染色体可表示一种设计方案。由于单个染色体长度的增加，故增加群体规模增为 100，自适应变异 p_m 中 k_3 和 k_4 分别增加为 0.2 和 0.01，拓扑参数 d_{max} 、 d_{min} 、 d_h 分别为 19m、11.5m、11m。优化结果如图 8 和表 1 所示。可发现经过大约 30 代遗传操作后，计算结果趋于收敛。优化后的构型如图 9 所示。

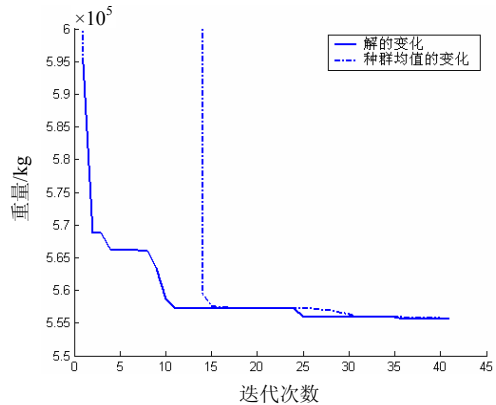


图7 形状组合法优化结果

Fig.7 Optimization results of the SCO method

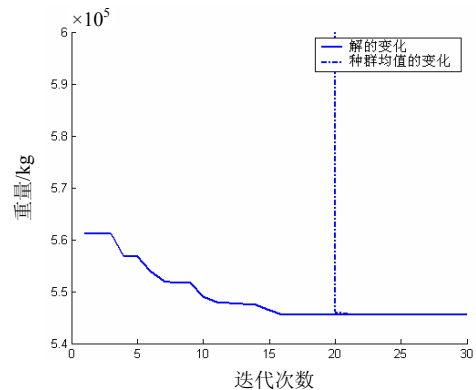


图8 拓扑组合法优化结果

Fig.8 Optimization results of the TCO method

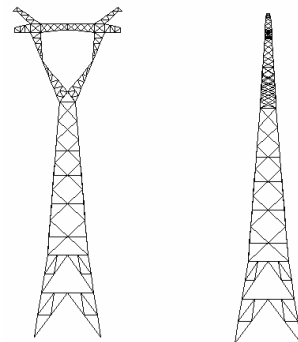


图9 拓扑组合优化后结构图

Fig.9 Optimal tower structure by using the TCO method

由优化结果图可发现，其拓扑优化后少了一个

叉形腹杆,则优化结果较好。因该方法考虑了结构截面尺寸、形状及拓扑三类变量的耦合优化,故其优化效果有了较大的改善,达到了 8.25%。

4.4 复杂构型组合优化及结果分析

由于每层构型有两种选择,并分为 6 层,故遗传算法中一个 6 位的二进制串就可以表示所有可能构型。考虑构型优化与截面、形状优化的耦合,这样,在形状组合优化的 73 位二进制编码基础上,增加一个 6 位的编码,则一个长度为 79 位的染色体可表示一种设计方案,遗传参数只增加群体规模为 100,其余不变。优化结果如图 10 和表 1 所示。可发现经过大约 30 代遗传操作后,计算结果趋于收敛。优化后的构型如图 11 所示。

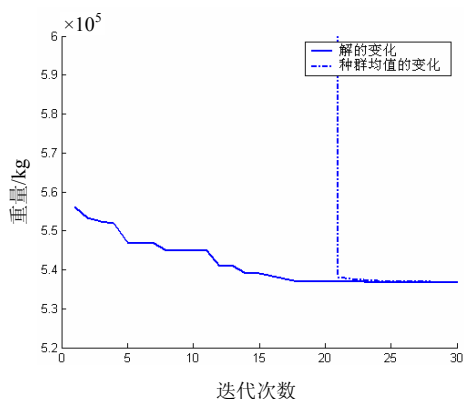


图 10 复杂构型组合法优化结果

Fig.10 Optimization results of the CCO method

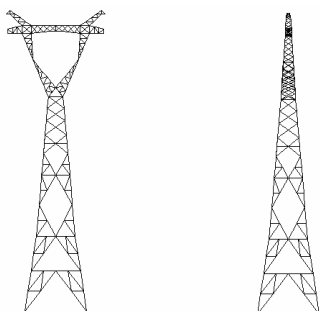


图 11 复杂构型组合优化后结构图

Fig.11 Optimal tower structure by using the CCO method

四种方法的优化结果对比分析如表 1 所示。显然,本文提出的后两种方法,即拓扑组合优化法和复杂构型组合优化法的优化效果较好,主要是因为这两种方法都包含了三种设计变量的组合优化,拓扑组合优化法包含了截面尺寸、形状和拓扑的优化,复杂构型优化法包含了截面尺寸、形状和构型的优化。由于复杂构型优化本身包含有复杂拓扑的改变,其对原始构造改变较大,故其优化效果最好,达到了 9.73%。

5 结论

本文采用自适应遗传算法研究了输电塔结构的离散优化问题,首先分析了输电塔结构优化中常用的截面尺寸和形状优化法,在此基础上提出了结构的拓扑组合优化法和复杂构型组合优化法。由以上优化计算结果和理论分析表明,采用输电塔结构的构件截面尺寸优化法和形状组合优化法可以适当的改善结构的经济性能,而采用本文所提出的结构拓扑组合优化法和复杂构型组合优化法,其优化结果要好于单纯的截面尺寸和形状组合优化法,这是因为拓扑组合优化法和复杂构型组合优化法均包含三种设计变量,这两种方法均考虑了三类变量的耦合优化,故其优化效果较好。由于复杂构型优化本身包含有复杂拓扑的改变,其对原始构造改变较大,故复杂构型组合优化法的优化效果更好。工程实际中,钢材的型号往往是离散的,则基于离散变量的优化更具有实际意义,故本研究具有较高的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 苏国柱,王永焕,徐海翔. 异型高耸塔架结构优化设计[J]. 工业建筑, 2005, 35(2): 57—59.
Su Guozhu, Wang Yonghuan, Xu Haixiang. Structural optimum design of allotype high tower [J]. Industrial Construction, 2005, 35(2): 57—59. (in Chinese)
- [2] 王藏柱,董桂西. 架空输电铁塔形状优化的研究[J]. 华北电力大学学报, 2001, 28(2): 100—104.
Wang Cangzhu, Dong Guixi. Investigation on shape optimization of transmission tower [J]. Journal of North China Electric Power University, 2001, 28(2): 100—104. (in Chinese)
- [3] 王坤,梁波. 基于遗传算法的输电铁塔结构优化[C]. 第 11 届全国结构工程学术会议论文集. 长沙, 2002, II: 694—697.
Wang Kun, Liang Bo. Optimization of transmission tower based on genetic algorithm [C]. Proceedings of the 11th National Conference on Structural Engineering. Changsha, 2002, II: 694—697. (in Chinese)
- [4] Natarajan K, Santhakumar A R. Reliability-based optimization of transmission line towers [J]. Computers and Structures, 1995, 55(3): 387—403.
- [5] Viswesara R G. Optimum designs for transmission line towers [J]. Computers and Structures, 1995, 57(1): 81—92.
- [6] Sivakumar P, Rajaraman A, Knight G M. Object-oriented optimization approach using genetic algorithms for lattice towers [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 2004, 18(2): 162—171.

- [7] Shehata A Y, El Damatty A A, Savory E. Finite element modeling of transmission line under downburst wind loading [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2005, 42: 71—89.
- [8] Battista R C, Rodrigues R S, Pfeil M S. Dynamic behavior and stability of transmission line towers under wind forces [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91: 1051—1067.
- [9] Hajela P, Yoo J. Constraint handling in genetic search using expression strategies [J]. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 1996, 34(12): 2414—2420.
- [10] Srinivas M, Patnaik L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in gas [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1994, 24(4): 656—667.

(上接第 180 页)

- [7] 王晓玲, 陈红超, 刘雪朋. 引水隧洞独头掘进工作面风流组织与 CO 扩散的模拟[J]. *水利学报*, 2008, 39(1): 121—127.
Wang Xiaoling, Chen Hongchao, Liu Xuepeng. Simulation on ventilation air flow and CO diffusion in leading face of excavation in tunnel [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(1): 121—127. (in Chinese)
- [8] 张静, 王晓玲, 陈红超. 引水隧洞独头掘进工作面风流和粉尘扩散的模拟[J]. *水力发电学报*, 2008, 27(1): 111—117.
Zhang Jing, Wang Xiaoling, Chen Hongchao. Simulation on ventilation and dust diffusion on heading face of the diversion tunnel [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2008, 27(1): 111—117. (in Chinese)
- [9] 周力行. 湍流气粒两相流动和燃烧的理论及数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
Zhou Lixing. Modeling theory and simulation of combustion for turbulent gas-particle flows [M]. Beijing: Science Press, 1994. (in Chinese)
- [10] Gosman A D, Issa R I, Lekakou C, Looney M K, Politis S. Multidimensional modeling of turbulent two-phase flows in stirred vessels [J]. *AIChE Journal*, 1992, 38(12): 1946—1956.
- [11] Lance M, Bataille J. Turbulence in liquid and phase of a uniform bubbly air-water flow [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, 222: 95—118.
- [12] Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows [J]. *Computer Methods and Engineering*, 1974, 3(2): 269—289.
- [13] Rodi W. Influence of buoyancy and rotation on equations for the turbulent length scale [C]// Karlsruhe. Proceedings of the 2nd Symposium on Turbulent Shear Flows, Imperial College of London, 1979.
- [14] 王海桥, 施式亮, 刘荣华. 独头巷道附壁射流通风流场数值模拟研究[J]. *煤炭学报*, 2004, 29(4): 425—428.
Wang Haiqiao, Shi Shiliang, Liu Ronghua. Numerical simulation study on ventilation flow field of wall-attached jet in heading face [J]. *Journal of China Coal Society*, 2004, 29(4): 425—428. (in Chinese)
- [15] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
Tao Wenquan. Numerical heat transfer [M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001. (in Chinese)
- [16] Cebeci T, Bradshaw P. Momentum transfer in boundary layers [M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1977.
- [17] Patankar S V. Numerical heat transfer and fluid flow [M]. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.