

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2010.01.020

大跨越输电塔的结构优化分析

郭惠勇, 李小晶, 李正良

(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 为了研究和解决大跨越输电塔的优化设计问题, 以结构截面、根开和腰部尺寸为设计变量, 以结构质量为经济性优化目标, 以结构各构件应力比差的平方和为等强度优化目标, 提出了经济性等强度优化设计方案, 建立了优化目标函数, 并采用 APDL 语言编制了相应的优化程序, 利用基于共轭梯度法的一阶优化算法对优化目标函数进行了求解。优化计算结果表明, 经济性优化设计方案侧重于节省钢材, 等强度优化设计方案则侧重于结构的等可靠性, 而经济性等强度优化设计方案既可以满足工程的经济性要求, 又可以适当提高结构的整体安全性。

关键词: 大跨越输电塔 结构 经济性优化设计 等强度优化设计 经济性等强度优化设计

中图分类号: TU761.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2010)01-0093-05

随着大型高压输电线路建设步伐的加快和电网向特高压的升级, 对输电塔结构优化设计会提出更高的要求^[1-5]。特别是对于 1000 kV 特高压跨越江河的大跨越输电塔, 不仅要考虑其经济性要求, 更要考虑其强度要求。为了使输电塔的建造经济、合理, 钢材强度就必须大幅度提高, 而改变钢材强度和结构构型, 则需对现有设计进行优化。国内苏国柱等^[6]基于 ANSYS 有限元软件, 采用搜索准则优化方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, 王藏柱等^[7]采用广义变量近似方法, 即原问题的解由近似问题解来逐步逼近的方法研究了塔架结构的形状优化问题, 王坤等^[8]采用简单遗传算法对输电塔结构进行了优化研究。国外 Natarajan 等^[9-10]也对输电塔结构的优化问题进行了研究。这些研究主要基于经济性指标。本文首先分析了现有结构的经济性优化设计方案, 然后以结构各杆件应力比差的平方和为优化目标, 提出了输电塔结构的等强度优化设计方案, 并以此为基础, 提出了一种新的组合优化设计方案, 即经济性等强度优化设计方案。

1 塔架结构的优化理论

1.1 优化的设计变量和状态变量

输电塔结构优化是基于结构有限元模型进行优化的, 优化结果与设计变量的选取有很大关系。输电塔结构优化的设计变量可分为结构截面尺寸设计变量和结构节点位移产生的形状设计变量。根据输电塔结构所采用的型钢(包括各种塔体主材、斜材、腹杆以及辅材中所有的不同截面尺寸的型钢)种类, 可将结构截面尺寸设计变量设为多个设计变量, 即将输电塔结构所采用的型钢种类归纳为多种截面尺寸的钢材。根据输电塔结构根开和腰部尺寸等各个节点的位移, 可确定出结构节点位移产生的形状设计变量。状态变量包括结构的应力、稳定等效应力以及相应的位移, 可选取状态变量作为约束变量。根据输电塔结构优化的设计变量和状态变量, 本文提出如下 3 种优化设计方案。

1.2 优化设计方案

1.2.1 经济性优化设计方案

1.2.1.1 优化目标函数

经济性优化设计方案为最常用的优化设计方案, 该方案以结构的质量为优化目标, 其优化目标函数为

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

式中: M ——结构的质量; L_j, A_j, ρ_j ——第 j 个杆单元的长度、截面面积和材料密度; n ——结构中单元的数目。

收稿日期: 2008-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(50678181/E0805)

作者简介: 郭惠勇(1971—), 男, 陕西西安人, 副教授, 博士, 主要从事损伤识别和风工程研究。E-mail: ghy267@tom.com

1.2.1.2 约束条件

应力约束条件

$$\sigma_j = \frac{N_j}{A_j} \leq f \quad (2)$$

式中: N_j ——第 j 个杆单元的轴心拉力或压力; σ_j ——第 j 个杆单元的拉压应力; f ——抗拉或抗压强度设计值.

受压局部稳定约束条件

$$\sigma_{j,st} = \frac{N_j}{\varphi_j A_j} \leq f \quad (3)$$

式中: $\sigma_{j,st}$ ——第 j 个杆单元的的稳定等效应力; φ_j ——第 j 个杆单元的轴心受压杆件稳定系数.

位移约束条件. 一般以限制某个节点的位移作为位移约束条件, 即

$$u_i \leq u^* \quad (4)$$

$$u_i = \sum_{j=1}^m \frac{N_j N'_j}{(E_j A_j / l_j)} \quad (5)$$

式中: u_i, u^* ——结构自由度 i 上的位移和相应的约束值; N'_j ——第 j 个杆单元在第 i 自由度上单位虚载作用下的内力; m ——结构的总自由度数目.

1.2.2 等强度优化设计方案

等强度优化设计方案的目的是使结构的各种构件具有等可靠性, 即使等强度指标 I_{es} (equal-strength index) 值最小, 相应的目标函数为

$$\min I_{es} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (\xi_i - \xi_j)^2} \quad (6)$$

式中: ξ_i ——第 i 种型钢的应力比; N ——型钢种类的数目.

设某一输电塔中包含有 N 种型钢, 这 N 种型钢由 k 种材料组成, 则第 i 种型钢的应力比可定义为

$$\xi_i = \frac{\sigma_{i,max}}{f_i} \quad (i = 1, \dots, N) \quad (7)$$

式中: $\sigma_{i,max}$ ——第 i 种型钢的最大等效应力; f_i ——第 i 种型钢材料的抗拉或抗压强度设计值.

1.2.3 经济性等强度优化设计方案

工程实践和理论分析表明, 当输电塔结构截面尺寸不变且宽高比在一合适的范围内时, 其根开和腰部尺寸的改变对结构内力的影响往往要超过对结构质量的影响, 即改变根开及腰部尺寸, 结构质量改变较小, 而结构的主承力杆件的内力改变较大. 因此, 本文提出了经济性等强度优化设计方案. 该优化设计方案的基本步骤为: (a) 采用经济性优化设计方案进行初次优化, 以获得截面设计变量以及根开和腰部尺寸等形状设计变量的优化初值; (b) 在主要考虑形状设计变量的情况下, 利用随机搜索方法对优化初值进行调整和筛选; (c) 利用调整后的初值和式(6), 在主要考虑形状设计变量的情况下, 采用一阶优化算法进行二次优化. 其中, (b) 步骤是为了避免出现局部最优解. 因为进行二次优化时, 如果直接采用初次优化的形状设计值作为优化初值, 则由于其本身是优化结果, 虽然目标函数不同, 但是仍极易陷入局部优化解, 故利用随机搜索方法对初值进行调整和筛选.

1.3 参数化有限元模型

要进行优化问题研究, 则需要参数化建模, 即用设计变量作为参数建立模型. 在构造参数化有限元模型时, 需将各种截面尺寸型钢的截面变量构造为相应截面尺寸设计变量的函数, 将塔身各个节点的坐标构造为形状设计变量的函数, 以形成参数化的几何模型. 设计变量可以初始化设定. 初始化设定的设计变量可以根据现有输电塔结构的实际情况选取, 也可以根据输电塔的初始设计选取或定义. 这些设计变量的初值只是在优化计算开始时使用, 在优化循环过程中会被改变. 采用参数化建模后计算的结果应赋值给相应的参数. 这些参数一般为状态变量. 对于设计变量和状态变量, 可以定义其最大值和最小值.

1.4 一阶优化算法

本文采用一阶优化算法对截面尺寸和结构节点位移设计变量进行优化分析. 该算法的每一步迭代都具有目标函数优化搜索和梯度计算的子迭代过程, 所以该算法具有精度高但耗时长特点. 该算法对于多设计变量问题比较有效. 其具体步骤如下:

a. 选取初值, 进行有限元计算, 得到目标函数和状态变量的初始值, 构造搜索方向矢量 p_0 :

$$p_0 = -\nabla Q(x_0) \quad (8)$$

式中： Q ——目标函数； x_0 ——一组设计变量初值。

b. 利用差分法求解函数梯度,即利用 Polak-Ribiere 的递归公式^[11]来构造搜索方向矢量 p_j ,进行一维搜索求解搜索步长 t_j ,求解新的迭代点 x_{j+1} . 相应量的表达式为

$$p_j = - \nabla Q(x_j) + r_{j-1}p_{j-1}$$

(9)

$$Q(x_j + t_j p_j) = \min_t Q(x_j + t p_j)$$

(10)

$$x_{j+1} = x_j + t_j p_j$$

(11)

式中： x_j ——设计变量的第 j 步迭代值； r_{j-1} ——递归系数,表达式为 Polak-Ribiere 公式。

c. 收敛判别. 每一优化迭代循环结束时,都要进行收敛判别. 优化迭代满足收敛准则的要求时,则终止一阶优化迭代. 收敛准则为

$$|Q_j - Q_{j-1}| \leq \tau$$

(12)

式中 τ 为收敛误差。

2 优化结果分析

以晋东南—南阳—荆门线路上的某一跨江特高压输电塔为研究对象. 该输电塔塔高 181.8 m,根开尺寸为 39.06 m,塔架由钢管组成,模型如图 1 所示,主支撑构件采用高强度 Q345 钢,辅材采用 Q235 钢,两塔间跨距为 1 650 m,跨越塔与耐张塔间距为 800 m. 优化时考虑钢管截面的厚度不变,半径减小. 采用有限元软件中的 APDL 语言编制输电塔结构的参数化有限元程序,按照以上方法编制有限元程序. 3 种优化设计方案的计算结果如表 1 所示。

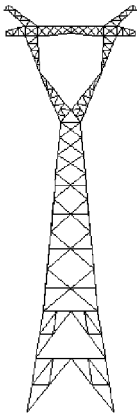


图 1 跨越塔结构模型

Fig. 1 Structural model of transmission tower

表 1 3 种方案的优化结果

Table 1 Optimized results for 3 schemes

优化设计方案	质量			等强度指标 I_{es}		最大等效应力比(Q345 钢)/%	
	初值/kg	优化后质量/kg	优化率/%	初值	优化后	初值	优化后
经济性	594 650	536 410	9.79	1.144 6	0.921 27	99.06	96.52
等强度	594 650	582 221	2.09	1.144 6	0.568 72	99.06	97.34
经济性等强度	594 650	556 298	6.45	1.144 6	0.577 04	99.06	96.52

优化设计方案	最大等效应力比(Q235 钢)/%		主支撑材最大应力比/%	
	初值	优化后	初值	优化后
经济性	96.03	90.70	76.54	96.52
等强度	96.03	88.15	76.54	88.66
经济性等强度	96.03	90.56	76.54	85.78

2.1 经济性优化设计方案优化结果分析

图 2 给出了经济性优化设计方案结构质量的优化曲线. 由图 2 可知,经 35 次迭代后目标函数的解收敛. 从表 1 可以看出,该方案优化后的结构质量为 536 410 kg,质量优化率为 9.79%,这说明结构质量的优化效果相当明显. 从表 1 还可以看出,结构的等强度指标偏大,特别是其主支撑材的最大应力比为 96.52%,这说明结构支柱的应力储备较低. 对塔架结构来说,主支撑材的破坏是致命的,常常会引起倒塔等严重事故,故结构主材应具有相对较高的应力储备,即主支撑材的最大等效应力比应相对较低。

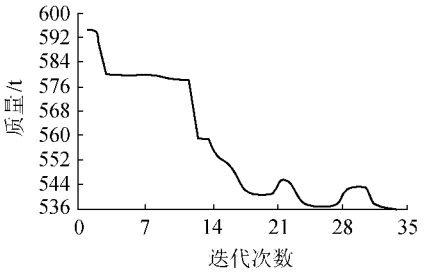


图 2 经济性优化设计方案结构质量的优化曲线

Fig. 2 Optimum curve for structural mass from economic optimum design scheme

2.2 等强度优化设计方案优化结果分析

图 3 给出了等强度优化设计方案等强度指标的优化曲线,图 4 给出了该方案结构质量的优化曲线. 由图 3 和图 4 可知,经 51 次迭代后目标函数的解收敛. 从表 1 可以看出,该方案优化后的结构质量为 582 221 kg,质量的优化率为 2.09%,结构质量的优化效果较差,而优化后的等强度指标 I_{es} 则有了较大的降低. 从表 1 还可以看出,结构主支撑材的最大应力比为 88.66%,对主支撑材来说,

其优化结果也较好.

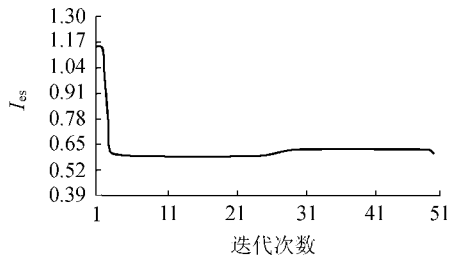


图 3 等强度优化设计方案等强度指标的优化曲线

Fig. 3 Optimum curve for ESI from equal-strength optimum design scheme

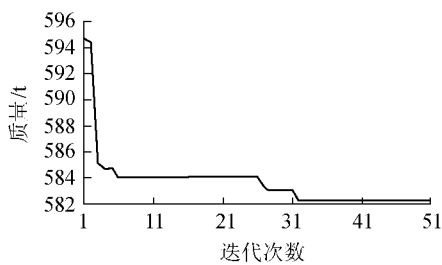


图 4 等强度优化设计方案结构质量优化曲线

Fig. 4 Optimum curve for structural mass from equal-strength optimum design scheme

2.3 经济性等强度优化设计方案优化结果分析

该方案首先以经济性优化设计方案的计算结果作为初值,并采用随机搜索法对该初值进行调整,然后采用一阶方法进行二次优化,并选取等强度目标函数的最小值作为二次优化的初值.图 5 给出了该方案目标函数随机搜索曲线,该曲线反映了随机搜索过程.图 6 给出了该方案等强度指标的二次优化曲线,图 7 给出了该方案结构质量的二次优化曲线.由图 6 和图 7 可知,二次优化经 7 次迭代后就已收敛.从表 1 可以看出,该方案优化后的结构质量为 556 298 kg,质量的优化率为 6.45%,结构质量的优化结果相对较好,而优化后的等强度指标 I_{es} 也有了较大改善.从表 1 还可以看出,结构主支撑材的最大应力比为 85.78%,说明结构主支撑材的优化结果也较好.

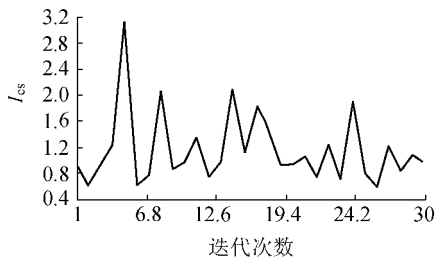


图 5 经济性等强度优化设计方案目标函数随机搜索曲线

Fig. 5 Random search curve of objective function for equal-strength optimum design scheme based on economic optimization model

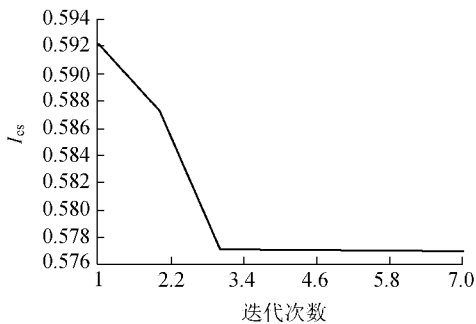


图 6 经济性等强度优化设计方案等强度指标二次优化曲线

Fig. 6 ESI curve of secondary optimization for equal-strength optimum design scheme based on economic optimization model

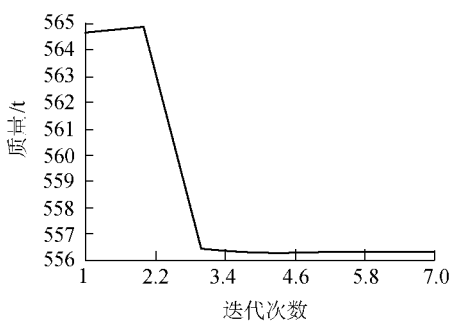


图 7 经济性等强度优化设计方案结构质量二次优化曲线

Fig. 7 Mass curve of secondary optimization for equal-strength optimum design scheme based on economic optimization model

2.4 3 种方案优化结果对比分析

从以上 3 种方案的优化结果可以看出 经济性优化设计方案更侧重于节省钢材,但其主支撑材的应力储备较低 等强度优化设计方案则侧重于结构构件的等可靠性,但其结构质量的优化结果较差 本文所提出的经济性等强度优化设计方案不仅对结构质量的优化结果较好,而且可使结构主材具有较好的安全可靠性能.

3 结 论

a. 经济性优化设计方案更侧重于结构的经济性能,即可节省更多的钢材,但优化后结构主材的应力储备较低,故可靠性能一般.

b. 等强度优化设计方案则侧重于结构构件的等可靠性,即大多数杆件具有等强度性能,但其结构质量的优化结果较差.

c. 本文所提出的经济性等强度优化设计方案对结构质量的优化结果较好,且该方案可使结构具有较好

的安全可靠性能.由于该方案不仅可以满足工程的经济性要求,还可以适当提高结构的整体安全性能,故推荐采用该方案进行输电塔结构的优化设计和分析.

参考文献：

[1] 邓洪洲,朱松晔,王肇民.大跨越输电塔线体系动力特性及风振响应[J].建筑结构,2004,34(7):25-28. (DENG Hong-zhou, ZHU Song-ye,WANG Zhao-ming.Study on dynamic behavior and wind induced vibration response of long span transmission line system [J]. Building Structure,2004,34(7):25-28. (in Chinese)).

[2] HIROSHI K. Wind tunnel test on 500 kV transmission tower with solid web brackets[J]. Journal of Wind Engineering,1994,58:54-60.

[3] 龚靖,贾瑞庆.薄壁钢管输电塔架风载响应研究[J].东北电力学院学报,1998,18(4):76-84. (GONG Jing,JIA Rui-qing. Study of wind load response to thin-walled steel tube transmission tower[J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 1998,18(4):76-84. (in Chinese)).

[4] 郭绍宗.国内外输电线铁塔的发展及展望[J].特种结构,1998,15(3):43-46. (GUO Shao-zong. Development and prospects of electric transmission tower both home and abroad[J]. Special Structure,1998,15(3):43-46. (in Chinese)).

[5] 郭惠勇,李正良.大跨越高压输电塔线体系风致振动的研究与进展[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(1):106-111. (GUO Hui-yong,LI Zheng-liang. Advances in wind-induced vibration of long-span high-voltage transmission line system[J]. Journal of Hohai University Natural Sciences,2008,36(1):106-111. (in Chinese)).

[6] 苏国柱,王永焕,徐海翔,等.异型高耸塔架结构优化设计[J].工业建筑,2005,35(2):57-59. (SU Guo-zhu,WANG Yong-huan, XU Hai-xiang,et al. Structural optimum design of allotype high-tower[J]. Industrial Construction,2005,35(2):57-59. (in Chinese)).

[7] 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 Cang-zhu,DONG Gui-xi. Investigation on shape optimization of transmission tower[J]. Journal of North China Electric Power University,2001,28(2):100-104. (in Chinese)).

[8] 王坤,梁波.基于遗传算法的输电铁塔结构优化[C]//第十一届全国结构工程会议论文集.第II卷.长沙:[s.n.],2002:694-697.

[9] NATARAJAN K,SANTHAKUMAR A R. Reliability-based optimization of transmission line towers[J]. Computers and Structures,1995,55(3):387-403.

[10] VISWESARA R G. Optimum designs for transmission line towers[J]. Computers and Structures,1995,57(1):81-92.

[11] 谢正,李建平,汤泽滢.非线性最优化[M].长沙:国防科技大学出版社,2003.

Structural optimization of large-scale transmission towers

GUO Hui-yong, LI Xiao-jing, LI Zheng-liang

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045)

Abstract：For the structural optimization of large-scale transmission towers, the dimensions of rods, bases and waists were regarded as the design variables, the structural mass was considered the objective of the economic optimization, and the quadratic sum of stress ratio differences of various structural components was regarded as the objective of equal-strength optimization. Accordingly, an equal-strength improved method based on the economic optimization model was proposed, and the relevant optimum objective function was established. The corresponding optimum program was compiled using the ANSYS parametric design language (APDL), and the optimum objective function was solved by the first order algorithm based on the conjugate gradient method. The calculated results indicate that the economic optimum design scheme highlights saving of steels, and the equal-strength optimum design scheme emphasizes the equal reliability of structures. The proposed equal-strength improved method based on the economic optimization model can satisfy the economic requirements of projects and improve the safety and reliability of structures.

Key words：large-scale transmission tower；structure；economic optimum design；equal-strength optimum design；economic optimization-based equal-strength optimum design