

应用高等分析理论分析人字形电力构架

李 天 , 袁 征 , 郑德乾 , 马哲芳

(郑州大学土木工程学院 , 河南 郑州 450002)

摘 要 :应用有限元分析软件 ,实现了对一人字形变电构架的高等分析 ,论述了高等分析的过程 .通过对高等分析和统一一阶弹性分析的计算结果的分析对比 ,初步讨论了统一一阶弹性计算中的缺陷 ,以及对人字形电力构架进行高等分析中几个主要因素对结果的影响 .计算结果表明 :几何非线性对于人字形结构影响比较大 ,在用高等分析选取杆件单元时 ,应充分考虑较大轴力的杆件单元 ;二阶效应对内力的影响由下向上逐渐减少 .

关键词 :高等分析 ;电力构架 ;一阶弹性分析 ;初始缺陷 ;二阶弹塑性分析

中图分类号 :TU 323.1 文献标识码 :A

0 概述

对钢结构进行结构分析时 ,根据分析时所采用的材料本构关系以及其所基于的计算假定 ,常采用的计算方法有 :①一阶弹性分析 ;②二阶弹性分析 ;③一阶弹塑性分析 ;④二阶弹塑性分析 .我国《钢结构设计规范》GB50017 - 2003^[1]规定结构设计中的结构分析方法就是一阶分析方法 ,在 2003 年修订中也提出了可以用弹性二阶分析方法 .一阶弹性分析方法的缺点是^[2] :在对结构的内力计算过程中 ,没有考虑构件受力变形对结构内力的影响(在二阶分析方法中可以考虑) ,没有考虑材料弹塑性对结构内力的影响 ,也没有考虑各种初始缺陷的影响 .结构分析与构件的设计是不协调的 ,因此不能准确反应结构的实际受力状态 ,不能准确地预测结构体系的破坏模式和极限承载力 ,而且对不同结构 ,其整体承载力极限状态可靠度水平也不一致 .

近年来国外学者提出了钢结构的高等分析方法 ,这种方法在结构分析中采用二阶分析方法 ,但同时要充分考虑结构系统的各种影响因素 ,并进行结构的整体强度和稳定性计算^[3-4] .引起的这种方法彻底摒弃构件计算长度和构件相关方程的概念 ,免除构件验算的步骤 ,使结构可靠度更为统一 .目前国内的一些学者也开始进行了一些高等

分析的研究^[2-4] .笔者运用塑性铰方法 ,采用大型分析软件对人字形变电构架进行高等分析 ,以研究应用高等分析的方法与传统分析方法的差别 .

1 分析模型

图 1 为一电力构架中较常见的两跨人字式变电构架 .图中 $A_1A_2 = 2.4\text{ m}$, $A_3A_4 = 1.194\text{ m}$. A_3A_4 离地面高度为 6.03 m ,横梁高 12 m ,跨度为 12 m .斜柱为直径 500 mm ,壁厚 10 mm 的圆钢管 ,横梁根据抗弯刚度和抗压刚度等效为圆钢管 .电力构架主要承受导线张力 ,电线张力和大风荷载 .根据《变电构架设计手册》 ,横梁上的荷载可等价转化为两个方向上的均布荷载 ,取 $q_1 = 4.429\text{ kN/m}$, $q_2 = 2\text{ kN/m}$.

2 计算过程

在对人字形变电构架进行高等分析过程中 ,需要考虑的因素包括 :材料非线性、几何非线性、几何缺陷、残余应力等 .而在对钢框架在进行高等分析的过程中 ,把所有因素均考虑进去是非常困难的 ,有时也是没有必要的 .本文主要对对变电构架内力和变形影响较大的因素 ,包括几何非线性、材料非线性、几何缺陷进行计算分析 .

在借助 ANSYS 软件进行结构建模和分析时 ,考虑几何非线性及材料非线性的影响 ,选用其材

料库中的 BEAM188 单元模拟变电构架的各个杆件.分析中通过采用命令 NLGEOM,ON 将单元的几何刚度矩阵加到主刚度矩阵(原始一阶刚度矩阵)上来考虑几何非线性影响^[5].对于钢材的材料非线性,选用双线等向强化模型(BISO)来模拟其弹塑性性能.塑性发展仅限定在一个截面,即塑性铰.几何缺陷包括安装杆件不垂直造成的几何缺陷和加工杆件初挠曲造成的几何缺陷.参照我国《钢结构工程质量验收规范》和美国规范 AISC 规定,缺陷值如图 2 所示, Ψ 最大值为 $L/500$, δ 最大值为 $L/1\,000$.

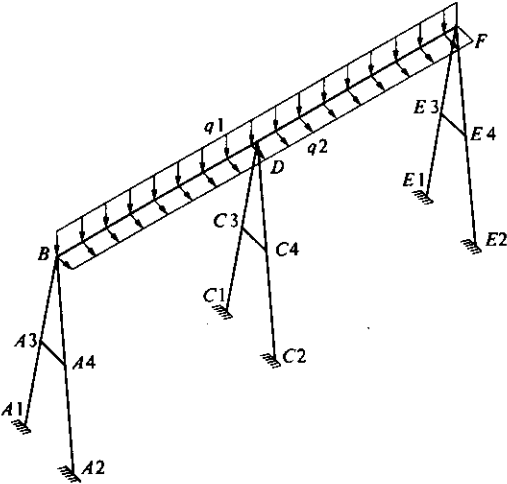


图 1 人字形变电构架模型
Fig.1 The model of character shaped power-transmission frame

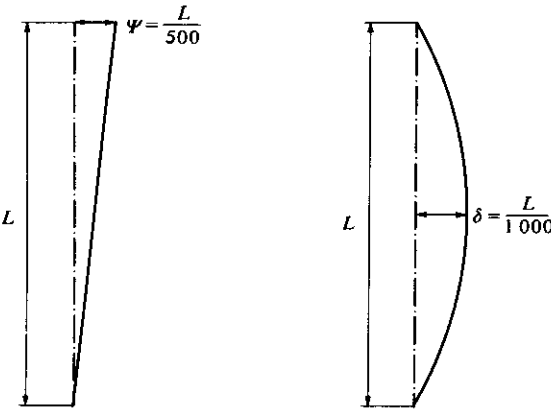


图 2 几何缺陷

Fig.2 Geometrical imperfections

在 ANSYS 软件中,初始几何缺陷的模拟可以通过施加偏心荷载或者弯矩来实现,也可采用 accord 命令或者改变柱子上每个节点的几何坐标来实现.本文采用施加偏心荷载来模拟杆件的初始几何缺陷.对于电力构架这种无支撑的侧移框架,在模型中应该考虑的是不垂直的几何缺陷而不是

杆件初挠曲的几何缺陷,这是因为由于杆件不垂直而引起的 $P-\delta$ 效应是主要的因素.在施加偏心荷载时,假设所有缺陷都朝着杆件受力最不利方向.在 ANSYS 分析计算过程中,采用两步加载:第一步加初偏心荷载来模拟杆件的初始几何缺陷,第二步施加变电构架所承受的外荷载,如图 3 4 所示.

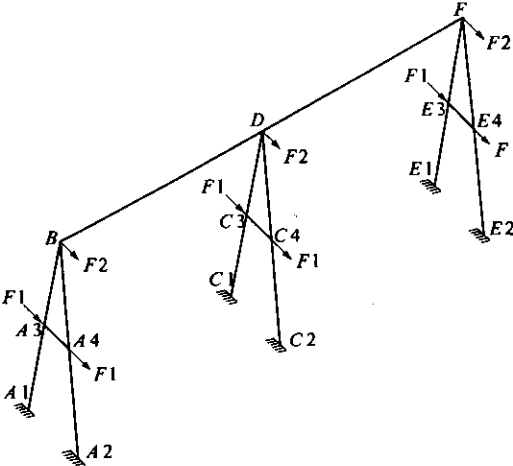


图 3 第一步加载
Fig.3 The first load step

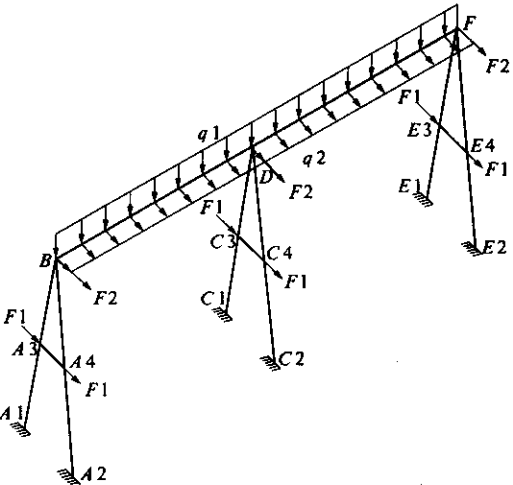


图 4 第二步加载
Fig.4 The second load step

3 结果分析

在设计荷载作用下,考虑初始缺陷影响因素及非线性因素,得出变电构架的高等分析结果.表 1、表 2 和表 3 分别列出了主要接点位移、主要杆件端弯矩和主要杆件承载力.作为对比,同时采用传统的一阶分析方法,并按照《钢结构设计规范》,在已知各个杆件一阶弹性内力时,确定杆件稳定应力(名义应力)并由此得到各个杆件的稳定承载力.计算时首先确定杆件的名义应力:

即

$$\sigma=\frac{N}{\varphi A}=\frac{\sigma_0}{\varphi}.$$

稳定承载能力： $N=\sigma A$.

式中： σ 为杆件的名义应力； σ_0 为杆件的一阶弹性应力； φ 为杆件的稳定系数， φ 由 λ 根据截面形式按规范查表确定. $\lambda_{ox}=l_{ox}/i_x$ ， $\lambda_{oy}=l_{oy}/i_x$. 本例中考虑主要受力方向的稳定系数. 在主要受力方向上，按无侧移的框架结构来计算^[6]. 根据规范规定，框架结构中柱的计算长度是由柱上端和下端各个梁柱交接处梁柱线刚度比值来确定. 经计算人字形变电构架上层柱的上下端梁柱线刚度比值分别为 $K_1=1$ ， $K_2=1.2$ ，下层柱上下梁端的线刚

度比值分别为 $K_1=1.2$ ， $K_2=10$. 查表得上层柱计算长度系数 $\mu=0.76$ ，下层柱的计算长度系数为 $\mu=0.64$. 由此就可算出上层柱的稳定系数 $\varphi_1=0.959$ ，下层柱稳定系数 $\varphi_2=0.967$.

表 1 主要节点位移
Tab.1 Displacement of main joints

节点	位移/m		误差/%
	一阶弹性	高等分析	
3	5.60E-04	6.60E-04	17.90
4	5.60E-04	6.60E-04	17.90
5	2.82E-03	3.08E-03	9.39
8	1.05E-03	1.15E-03	9.42
10	4.99E-03	5.26E-03	5.29

表 2 主要杆件杆端弯矩
Tab.2 End moment of main elements

杆件	节点	弯矩/(kN·m)		误差 /%	杆件	节点	弯矩/(kN·m)		误差 /%
		一阶弹性	高等分析				一阶弹性	高等分析	
1	1	-2 515.01	-3 780.16	50.31	6	6	-5 359.01	-6 610.52	23.36
	3	2 203.30	1 405.92	36.20		8	2 885.51	2 100.56	2.72
2	2	-2 427.04	-3 691.63	52.14	7	7	-5 183.03	-6 434.31	24.15
	4	2 255.17	1 458.28	35.30		9	2 988.61	2 204.92	26.22
3	3	-7 623.03	-8 066.23	5.82	8	8	-14 184.01	-14 630.11	3.14
	5	712.48	712.86	0.06		10	-1 585.01	-1 584.21	0.03
4	4	-7 579.07	-8 023.81	5.86	9	9	-14 097.03	-14 546.11	3.18
	5	792.52	792.41	0.01		10	-1 425.18	-1 426.11	0.08
5	3	5 419.33	6 660.40	2.29	10	8	11 298.02	12 529.09	10.90
	4	5 324.36	6 565.53	23.31		9	11 109.02	12 341.12	11.09
16	5	-1 505.02	-1 505.22	0.03	17	10	1 504.87	1 505.13	0.02
	10	1 504.83	1 505.11	0.02		15	-1 505.43	-1 505.24	0.03

表 3 主要杆件轴向应力
Tab.3 Axial stress of main elements

杆件	轴向应力/Pa			误差 /%
	一阶弹性	一阶弹性 考虑稳定	高等分析	
1	3.19E+06	3.30E+06	3.62E+06	9.46
2	-4.93E+06	-5.10E+06	-5.36E+06	4.97
3	2.60E+06	2.71E+06	2.88E+06	6.27
4	-4.34E+06	-4.53E+06	-4.62E+06	2.12
6	5.27E+06	5.45E+06	5.69E+06	4.41
7	-8.73E+06	-9.03E+06	-9.16E+06	1.36
8	4.03E+06	4.21E+06	4.32E+06	2.60
9	-7.50E+06	-7.82E+06	-7.78E+06	4.96

由以上结果小结如下：

(1) 从位移计算结果可以看出，几何非线性对于人字形构架这种柔性钢结构影响还是比较大

的. 其中在点 A_3 和 A_4 处影响最为显著，位移误差达 15.20%. 且采用二阶弹塑性分析时，处于人字形电力构架横梁中间支点位置的位移增加了. 一阶弹性结果为 4.99 mm，二阶弹塑性结果为 5.26 mm，并且两种情况位移都是最大.

(2) 从内力计算结果可以看出，杆件 A_1A_3 和 A_2A_4 所受弯矩误差较大，最大达 50.31%. 由于杆件 A_1A_3 和杆件 A_2A_4 处于结构的最下端，属超静定柱，承受轴向压力较大，这时结构的二阶效应有显著的影响. 所以在高等分析选取杆件单元时，应充分考虑承受较大轴力的杆件单元.

(3) 二阶效应对内力的影响由下向上逐渐减小. 上表结果表明，下端柱的误差比上端明显大出许多. 同时应当注意：二阶效应不仅对柱有影响，对梁也有一定影响，对柱子影响比对梁的影响更

为显著.

(4) 初弯曲的存在,使得电力构架中大部分节点的内力和位移增大,特别是在考虑二阶效应的时候,变化更加显著.但由于初弯曲的随机性,初弯曲的方向和计算考查点的不同,可能会导致不同的结果,这也是初始缺陷对结构影响的一个特征.

(5) 在对结构承载力进行计算的时候,当采用一阶弹性分析时需要在计算出一阶弹性内力的基础上分别考虑各个杆件的稳定性,在考虑稳定性基础上计算各个杆件承载能力.而二阶弹塑性分析可以直接计算出结构的承载能力.

4 结语

笔者针对高等分析中较为重要方面(几何非线性、材料非线性及初始缺陷),用大型有限元分析软件对一人字形变电构架进行了高等分析.对于变电构架这种不规则结构,按目前的钢结构规范还不能进行二阶分析.从以上计算结果可以看

出,对于变电构架按传统的一阶弹性分析和按高等分析方法进行计算的结果内力和位移的偏差都比较大.变电构架属生命线工程中比较重要组成部分,有着较高可靠度要求,因此建议在对于这种结构进行设计时,应采用考虑二阶效应及结构缺陷影响的分析方法,即高等分析.

参考文献:

- [1] GB50017-2003 钢结构设计规范[S].
- [2] 张耀春,武振宇,张文元.值得探讨的若干钢结构稳定问题[J].钢结构,2002(增刊):223~230.
- [3] 舒赣平,孟宪德,陈绍礼.钢框架的高等分析与设计[J].建筑结构学报,2005,26(1):51~59.
- [4] 王连坤,郝际平,李文岭,等.钢结构高等分析理论研究综述[J].钢结构,2004(增刊):7~19.
- [5] 刘涛,杨凤鹏.精通ANSYS[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [6] 李天,张哲,刘朝宏.门式刚架轻钢结构平面内整体稳定分析的几个问题[J].郑州大学学报(工学版),2003,24(1):16~19.

Application of Advanced Analysis Theory in Character Shaped Power - transmission Frames

LI Tian, YUAN Zheng, ZHENG De-qian, MA Zhe-fang

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Finite element analysis software is used to realize the advanced analysis of character shaped power-transmission frame. And the process of advanced analysis is briefly discussed in this paper. The results based on advanced analysis and the first order elasticity analysis are compared, and by contrast, the shortcomings of the first order elasticity analysis are discussed primarily. And the influence on the result of the main factors in the advanced analysis for character shaped power-transmission frame is discussed.

Key words: advanced analysis; power-transmission frame; first order analysis; initial imperfection; second order elastic-plastic analysis