

输电杆塔结构受力线性及非线性设计分析

Linear and Non-linear Design Analysis of Power Transmission Tower Structure

(430072)武汉水利电力大学 曾明志 龙小乐 鲍务均 TM753

摘要 根据输电线路铁塔结构受力特点,运用有限元方法,采用满应力设计准则,分析了铁塔中常用的钢结构及拉索两类线性及非线性单元的受力情况,提出了设计这类专用软件的有效方法。

关键词 有限元 非线性 空间桁架 内力分析

Abstract This paper analyzed the steel tower and cable tower linear and non-linear stress state according to their structure feature, together with adoption the full-stress design principle and finite element theory, and it also provided an efficient resolution to design the special software used in the transmission tower stress state analysis.

Key Words Finite Element Theory Nonlinear Stress Analysis Three Dimensional Truss

1 问题的提出

用有限元方法分析输电线路塔是分析铁塔在六种荷载情况作用下的内力,并根据分析结果提出输电铁塔的最优结构。它是目前在工程实际中使用的一种有效方法。但由于输电铁塔的结构特点及其它受力的复杂性,现在使用的这类专用软件存在着输入数据量大和处理具有非线性单元的结构不准确的问题。尤其对于小应变大变形这类几何非线性单元的处理,有时还要依靠人工协助完成。这就增加了设计分析的不确定性因素及人的工作量。因而设计一个具有分析线性与非线性结构单元以及良好的输入输出界面的工程软件是很有实际意义的。基于这些考虑,设计一个具有简单明了的前处理部分以及具有完全的线性与非线性分析的结构设计分析软件是本课题的关键。本文针对问题的重点及难点提出了设计这种专用软件的行之有效的方法。

2 设计方法与非线性设计数学模型

2.1 输电塔结构分析软件特点

由于自立式或拉线式铁塔受结构偏心荷载、及杆件上的侧向风荷载等因素引起的弯

矩是不大的,因此将铁塔作为理想的桁架进行分析,即认为铁塔由笔直的杆件或拉索组成,节点为铰接,在荷载作用下仅产生节点位移,以及杆件的拉力或压力和拉索的张力。因而,在实际分析设计中将输电线路塔处理为空间桁架结构。根据软件处理对象的不同,一般可以将它划分这三个部分,也即三个模块。因此,软件按模块化设计方法,设计为三大模块,每个模块均可独立运算,它们之间通过文件系统结合为一个系统。如图1所示。

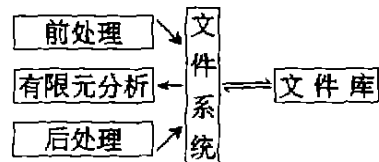


图1

2.2 前处理的设计特点

根据有限元设计分析要求,前处理由四大信息部分组成,即(1)结构信息,包括节点单元坐标信息;(2)材料信息;(3)荷载信息;(4)边界条件信息。由于铁塔结构具有很好的对称性,因此,本软件根据常用铁塔的结构划分为塔腿输入、塔身输入、塔臂输入三种情况。利用各自的特点建立相应的文件库。通过输入少量的控制信息,程序即能自动对铁塔的节点进行编号,并同时生成各节点的空

间坐标及杆件的几何数据。对于输电杆塔的两类常用材料(16Mn 钢和 A3 钢),将各自的弹性模量、长细比、截面面积等组成顺序文件。通过输入材料代号,即可与各杆件的材料相对应,从而自动完成材料信息准备工作。通过以上改进工作,可以大大减少数据准备工作,且准确度高。

2.2.1 自动生成节点设计方法

由于铁塔具有一定的对称性,因此通过几个横断面,几个纵断面和几个横隔面就可以描述整个铁塔结构。利用它的对称性,我们可以给出一些基准节点和基准节点坐标来由程序生成一些节点和单元,然后由程序根据所输入的信息自动连成杆件,从而减少了数据的直接输入工作量。

2.3 处理非线性单元的数学模型及各自特点

由于铁塔结构一般由角钢组成的桁架结构,或由拉线和角钢组成,因此一般铁塔结构设计中遇到的问题主要是小应变大变形的非线性问题。当然在拉线塔中也存在仅受拉力作用的柔性杆的材料非线性问题。下面即对在本程序有限元分析计算中所用数学模型作一简要介绍。

对于几何非线性问题主要是由应变一位移关系的非线性引起,其有限元方程为由结构总应变能方程得:

$$\Pi_p = U - (D)^T (R) = U_L + U_{NL} - (D)^T (R) \quad (1)$$

U —应变能 (D) —位移 (R) —荷载
 U_L —线性变形引起的应变能
 U_{NL} —非线性变形引起的应变能

又由系统稳定可知 $(\frac{\partial \Pi_p}{\partial D}) = 0 \quad (2)$

从应变能方程,我们可得:

$$(\frac{\partial U_L}{\partial D}) = [K_L](D) \quad (3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial D_i \partial D_j} = K_{Lij} = K_{Lji} \quad (4)$$

由(3),(4)可得:

$$[K_L] = [\frac{\partial U_L}{\partial D, \partial D_j}]$$

及: $[K_{NL}] = [\frac{\partial U_{NL}}{\partial D, \partial D_j}] \quad (5)$

$[K_{NL}]$ —由应变一位移关系中的非线性项引起,为 D 的函数。

由(1)、(2)、(3)、(4)可得到结构非线性平衡方程:

$$[K_L](D) + (\frac{\partial U_{NL}}{\partial D}) = (R) \quad (6)$$

对方程(6)采用修正的牛顿—纳费逊迭代解法即可求出相应的位移。也就可以解出对应杆件的内力值。在计算实现上,我们采用 FORTRAN 语言编的算法程序实现。

对于结构的几何非线性分析可以归结为外力与内力的平衡方程,它是关于节点位移的非线性方程。非线性分析也就是将系统的平衡方程根据系统的非线性特性不断地进行修正,然后求平衡方程的增量解,程序对几何

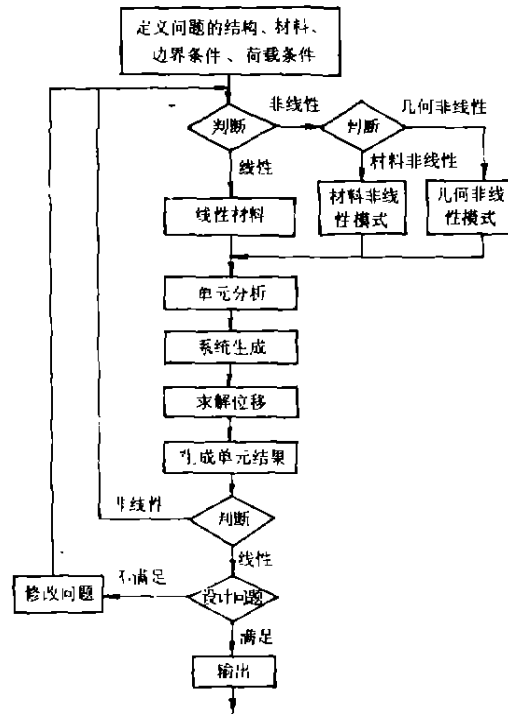


图2 有限元分析的静边问题算法程序框图

非线性的考虑可采用完全的拉格朗日公式或更新的拉格朗日公式(更新的拉格朗日公式)

$$([\mathbf{K}]_L + [\mathbf{K}]_{NL}) (\mathbf{U}^k) = (\mathbf{F} + \Delta \mathbf{R}) - (\mathbf{F})$$

几何非线性的基本特征是,平衡方程必须相对于变形过的几何位置写出,而变形过的几何位置预先并不知道。非线性效应并不要求大量修改适用于线性假定的公式,因而非线性问题通常是按一系列的线性段来求解的。

3 程序的结构

一个典型的迭代循环包括下列步骤。(设结构在一个特定外荷载作用下已经变形,但未平衡)

- (1)利用全局位移(D)建立局部坐标
- (2)计算单元畸变,即完成在局部坐标下单元节点自由度(d)的计算。
- (3)建立在局部坐标下的单元刚度 $[k]$ 和力 $(r) = -[k][d]$ 。
- (4)变换 $[k]$ 和 $[r]$ 到全局坐标。
- (5)对所有其它单元重复步骤1到4,并拼装结构数组 $[K] = \sum [k]$ 和 $[R] = \sum (r)$,矩阵 $[K]$ 就是当前位置的结构刚度阵。
- (6)计算不平衡荷载(ΔR),它就是外加

的荷载向量加上力(R)。

(7)求解结构方程式 $[K][\Delta D] = (R)$ 以得到位移增量(ΔD)。

(8)将位移增量(ΔD)加到在前边迭代中累积起来的总体位移(D)中去,这就给出了平衡位置修改后的估计值。

(9)检查收敛性,如果不满足,返回到步骤1。

上述步骤用方程总结为:

$$[K]_i(\Delta D)_{i+1} = (R) - \sum [K]_i(d)_i$$

$$[D]_{i+1} = (D)_i + (\Delta D)_{i+1}$$

(R) 表示外荷载(P)加上任何体力,初应变力等。

通过以上九个步骤反复迭代即可完成小应变大变形的几何非线性结构受力分析计算。□

参考文献

- (1)R. D 库克 《有限元分析的概念和应用》 科学出版社
- (2)林群 朱起定 《有限元的预处理和后处理》 上海科学技术出版社
- (3)龚尧南 王寿梅 《结构分析中的非线性元素法》 北京航空学院出版社
- (4)丁兆藩 《杆件结构信息化方法在铁塔计算中程序设计中的应用》 《电力建设》 1993(5)

(收稿日期:1997-09-29)

下期要目

- 燃煤锅炉乏气送粉系统控制方式探讨
- 运行中避雷器的红外热象检测
- 关于电能计量回路元件的优化配置
- 日本九州电力考察