

# 输电铁塔有限元分析软件设计

陈永强, 鲍务均

(武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 应用VB与Fortran语言,采用混合编程的方法,编制了一个输电铁塔有限元分析软件,其前处理简单,计算结果准确,能满足设计与验算的要求。

**关键词:** 有限元法; 输电铁塔; 混合编程; VB; Fortran

中图分类号: TM753

文献标识码: A

文章编号: 1006-8449(2003)04-0055-03

## 1 引言

目前,进行有限元分析的大型软件无一不是通用性极强,内容包罗万象。对不同的分析对象而言,其前处理可能很简单,也可能很复杂。自立塔作为架空输电铁塔的一种重要类型,由于适应能力强,得到了广泛的应用。自立塔为桁架式结构,随着自立塔结构的复杂化和大型化,要对铁塔进行受力分析,运用通用软件,前处理将是一个繁琐的过程并容易出错和难于检查。目前国内专门计算铁塔的有限元软件并不多见。

鉴于目前的情况,本文应用VB与Fortran语言,结合工程实际的需要,采用混合编程的方法,开发了一个前处理简单、计算准确的输电铁塔有限元分析的软件。

## 2 模型的建立

自立塔为桁架式结构,所用的材料基本上是角钢,在偏心载荷和侧向风载荷的作用下,杆件所受的弯矩不大,所以将自立塔的杆件视为理想的三维桁架,在结构中杆件所承受的力均为轴向力,不承受弯矩。

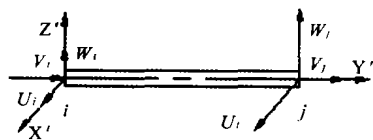


图1 空间桁架杆单元示意图

对于空间桁架,节点的线位移应有三个分量,在整体坐标内可取为沿坐标轴方向的三个位移 $u$ 、 $v$ 、 $w$ ,见图1。任意杆单元 $e$ 如有 $i$ 、 $j$ 两节点,则此单元的节点位移应有6个分量,记为:

$$\{\delta\}^e = [u_i \quad v_i \quad w_i \quad u_j \quad v_j \quad w_j]^T$$

在各种载荷的作用下,自立塔的变形为大位移,小应变,属于几何非线性问题。应用虚功原理,用修正的拉格朗日(Updated Lagrange Formulation)描述法,可得到从 $t$ 时刻到 $t + \Delta t$ 的增量形式的修正的拉格朗日形式的非线性增量有限元基本方程<sup>[1]</sup>:

$$([\mathit{K}]_L + [\mathit{K}]_{NL})\{u\} = \{F\} - \{F\}^0$$

$$[\mathit{K}]_L = \sum_I \int_{V_I} [B]_L^T [D] [B]_L dV_I$$

$$[\mathit{K}]_{NL} = \sum_I \int_{V_I} [B]_{NL}^T [{}^t\tau] [B]_{NL} dV_I$$

$$\{F\} = \sum_I \int_{V_I} [B]_L^T [{}^t\tau] dV_I$$

式中 $[\mathit{K}]_L$ —线性部分刚度矩阵;

$[\mathit{K}]_{NL}$ —非线性部分刚度矩阵;

$\{u\}$ — $t$ 时刻的位移增量列阵;

$\{F\}$ —作用在节点上的集中力列阵;

$\{F\}^0$ —与初应力相当的等效节点力阵;

$[B]_L^T$ ,  $[B]_{NL}^T$ —分别是线性应变和非线性应变与位移的转换矩阵;

$[D]$ —材料的本构矩阵;

$[{}^t\tau]$ ,  $[{}^t\tau']$ —分别为Cauchy应力矩阵和向量。

所有这些矩阵或向量的元素都是对应时间 $t$ 的位形,并参考同一位移确定的。

对于有限元方程的求解,采用修正Newton-Raphson迭代,可以避免由于系统非线性性质而作线性化处理时带来的误差,即可防止方程解的漂移或不稳定。

### 3 前处理

#### 3.1 结构的离散

桁架式的自立塔结构如图2所示。在对铁塔进行离散

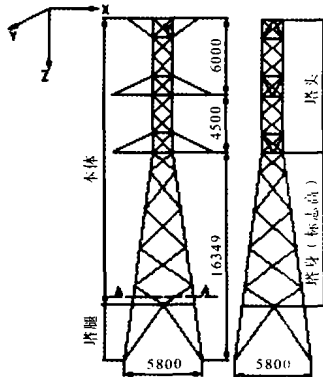


图2 自立塔结构示意图 (单位 mm)

时, 结构中杆件的转折点、汇交点、支承点、受力点等均作为单元的节点。

#### 3.2 数据的输入

在前处理中数据的输入包括总体信息 (Total Information) 的输入、节点 (Node)、单元 (Element) 信息的输入、载荷 (Load) 信息的输入, 还可以对材料库进行编辑, 添加角钢类型。同时, 在前处理模块中, 还对输入的信息进行分析处理, 生成可在计算模块中被读取的各种数据。

从实际工程应用中可以看出, 一个自立塔结构中存在大量的杆件, 因此, 在前处理中输入的节点和单元的数量是庞大的。但我们注意到自立塔的结构是一个对称的结构, 所以在输入时, 充分利用了铁塔结构的对称性。

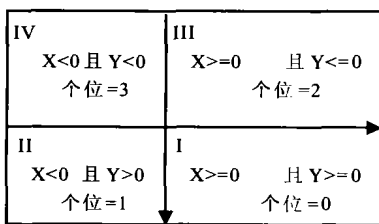


图3 铁塔结构象限的划分

采用图2所示的坐标系, 将铁塔划分为4个象限, 见图3。在数据输入时, 每一个节点都要指定一个数字号, 称为节点编号。节点号的个位数必须是0至3, 如图3所示。输入某一象限的节点, 利用对称性可得其他象限的节点号。当然, 还应当遵守适当地稀疏原则, 节点号应

有一定的间隔, 以便有遗留节点没有编号易于补上。

在每一个水平面上的一对节点的对称关系可能有三种: 关于X轴对称; 关于Y轴对称; 关于Z轴对称。利用以下公式, 可求得已知点的相应对称点。

设已输入节点的坐标为(x, y, z), 待求对称节点坐标为(x', y', z'), 则:

$$(x', y', z')^T = T \cdot (x, y, z)^T$$

式中 T—相应的三个对称转换矩阵  $T_x, T_y, T_z$ , 如下式:

$$T_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_z = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

在单元输入时, 如果单元也存在对称的单元时, 在单元信息输入时输入相应的对称信息, 根据输入的对称信息, 得到对称单元的相应的信息。

在利用对称性输入节点和单元, 与全部输入相比, 可减少约70%的输入量。

### 4 后处理

在后处理模块中, 主要是对在计算模块中计算的结果进行验算和整理, 生成结果文件并显示出来。

由于自立塔的杆件连接大多是螺栓连接, 考虑到工程的实际需要, 综合稳定性、安全性、经济性等因素, 因此要对在计算模块中计算出来的杆件应力进行检验。在应力验算中, 主要是进行受拉、压杆件的强度验算, 受压杆件的稳定性验算。

受压杆件的强度计算:

$$\sigma = N / (mA_j) \leq [\sigma]$$

受拉杆件的强度计算:

$$\sigma = N / (mA - ndt) \leq [\sigma]$$

受压杆件的稳定性计算:

$$\sigma = N / \varphi mA \leq [\sigma]$$

式中 N—杆件所受的轴向力, N;

d—螺孔直径, mm;

A—杆件的横截面毛面积 mm<sup>2</sup>;

n—同一横截面的螺孔数;

A<sub>j</sub>—杆件的横截面净面积 mm<sup>2</sup>;

t—角钢肢厚或钢板厚, mm;

$m$ —工作条件系数;

$\varphi$ —稳定系数;

$[\sigma]$ —钢材容许应力,  $N/mm^2$ 。

与传统的铁塔设计方法即满应力设计方法相比,我们对铁塔进行组材时,并不是每一根杆件都进行受力分析,而是将铁塔杆件进行分组,以组来进行受力分析组材。选取杆件组中的最大、最小轴力进行验算,并在此基础上进行组材,这一组材料应满足上面的条件。当然,在对杆件进行分组时,应注意这一组杆件的受力情况应是相同的,最大、最小力应该相差不大。应用这一种方法可以大大的减少计算量,而计算结果也是比较合理的。

## 5 软件的实现

Microsoft Visual Basic(简称VB)是在Windows操作平台下设计应用程序的最迅速,最简捷的工具之一,可以轻松方便地开发应用程序。而Fortran语言是世界上广泛流行的,最适用于数值计算的一种高级计算机语言。应用这两种语言进行混合编程正是充分地利用了它们的各自优势。用这两种语言开发科学计算软件的一般方法是:用VB设计界面和控制程序,将Fortran语言编写的计算程序编译成动态链接库(Dynamic Link Libraries),并由VB程序调用。数据的交换由参数和文件传递实现。在应用VB与Fortran进行混合语言编程要注意的问题是变量和过程的命名,堆栈使用和函数调用过程中的参数传递。

本软件用VB设计出Windows风格的友好输入界面, Fortran语言编写计算程序。启动VB应用程序,调用Fortran程序进行计算,计算结束后,最终结果显示在VB界面上。在整个运行过程中, Fortran应用程序均在后台运行,VB与Fortran间的所有数据交换均通过参数和文件实现。其中参数传递控制变量,文件则传递铁塔的模型数据。

为了更好地适应工程的要求和拥有更好的通用性,软件不仅就自立塔的受力分析设计了桁架线性、桁架非线性两种分析模型,可以进行单塔或多塔腿多工况的受力计算,具有自动组材的功能。在对自立塔进行桁架线性选材之后,可采用桁架非线性模式对组材进行验算。软件从总体上设计成三大模块,见图4。

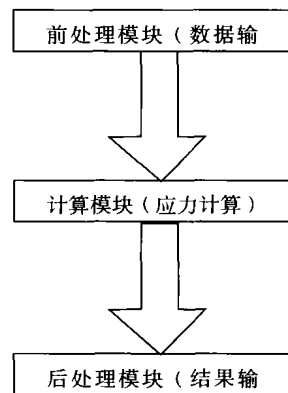


图4 软件模块

## 6 算例及结果

算例一,单塔计算:选用实际应用的一种自立塔(图2),载荷作用节点6个,每个节点载荷均为(25, 10, 25),单位为kN。主要的力学参数:弹性模量 $E=2.1 \times 10^{11} Pa$ ,泊松比 $\mu=0.3$ ,通过计算最大轴力均发生在塔腿段,大小为: -444.238。负号表示杆件受压,单位为kN。

算例二,多塔计算:在算例一的基础上增加一个塔,进行两个塔计算。其余相同。最大轴力同样发生在塔腿段,塔一的数据同前,塔二的数据为: -480.242kN。

从整个结果来看,基本上是符合实际情况,与大型通用有限元软件比较计算结果一致。

## 7 结语

自立塔作为输电铁塔的一种重要类型,在电力建设中发挥着重要作用,而对自立塔的受力分析很大一部分仍然停留在手动计算上。本文对自立塔受力分析进行了有益的探索,并实现了对铁塔有限元分析。与以往的程序相比,本程序利用了铁塔的对称性,大大减少了输入量。在后处理模块中,对计算结果进行了验算,并在此基础上进行了组材。本程序可以对各种截面的自立塔进行静力分析,对铁塔的设计和验算有一定的指导作用。

### 参考文献:

- [1] 王勖成,邵敏.有限单元法基本原理和数值方法[M].清华大学出版社,1997.
- [2] 刘尔烈.有限单元法及程序设计[M].天津大学出版社,1999.

(下转第69页)

## (2) 工作效率

在改造过程中,我们通过对PLC软件的最优化设计,在严格遵守翻车机卸车线工艺过程的前提下,最大限度地提高了卸车效率,每节列车的卸车时间从原来的200s缩短到了180s。

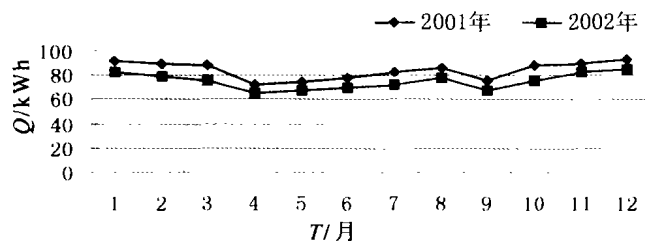


图2 变频改造前后耗电量情况对比

## (3) 节能效果

经过变频改造后的翻车机系统除了卸车效率有所提高外,通过变频器的调节,进一步扩大了节能的效果,节能效果从图2中可以明显看出。统计数字表明:改造后年节约15万kWh,节省费用约6万元;加上每年节省维护件费用7.6万元,共可节约费用13.6万元,且维护工作量大大降低,系统可靠性大大提高。

### 参考文献:

- [1] 威英杰. 交流电机变频调速[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1993.
- [2] 刁叔钧, 吴勇华. 变频调速器在矿井主扇节能中的应用分析[J]. 矿山机械, 1999(6): 18~19.

收稿日期: 2003-04-21

## Application of VVVF in Wagon Tipper System of Thermal Power Plant

ZHOU Wen-jun<sup>1</sup>, BAI Yong-xin<sup>2</sup>, WU Zheng<sup>1</sup>

(1. Huaneng Beijing Thermal Power Plant, Beijing 100023, China; 2. Dalian Heavy Industries LTD, Dalian 116022, China)

**Abstract:** In view of the problems existing in variable speed system of wagon tipper of Huaneng Beijing Thermal Power Plant regarding poor safety, low working efficiency and large energy consumption, reformation of VVVF are carried out, so that the safety and reliability of wagon tipper operation greatly improved, percentage of variable speed system failure number in overall failure ones are reduced from 55% in the year of 2001 to 2% in 2002, unloading period of each wagon tipper are shortened form the original 200s to 180s, energy saving every year is about 150000kWh.

**Key words:** Car dumper; VVVF; energy saving; reliability; thermal power plant

**作者简介:** 周文军(1968-), 男, 天津人, 工学学士, 工程师, 从事电厂生产工作;  
白永昕, 男, 汉族, 吉林人, 工学学士, 工程师。

(上接第57页)

- [3] 张殿生, 等. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 水利电力出版社, 1996.
- [4] 库克 R D. 有限元分析的概念和应用[M]. 程耿东, 等(译). 北京: 科学出版社, 1989.

- [5] 桂良进, 等. Fortran PowerStation 4.0 使用与编程[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 1999.
- [6] DAVID JUNG, 等. Visual Basic 6 开发人员参考手册[M]. 机械工业出版社, 1999.

收稿日期: 2003-05-12

## Finite Element Analysis Software of Steel Tower for Transferring Electric

CHEN Yong-qiang, BAO Wu-jun

(College of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Applying the mixed programming method using VB and Fortran language, the software about the finite element analysis of the steel tower was programmed. Its pre-process is simple and computive results not only are exact but also can satisfy demand of design and cheking computations of the steel tower.

**Key words:** finite element; the steel tower; mixed programming; VB; Fortran

**作者简介:** 陈永强(1977-), 男, 广东云浮人, 硕士研究生, 主要研究方向:  
机械结构强度及智能 CAD。