

# Parametric Modeling and Analysis of Cup Type Transmission Tower Based on APDL

Tizong Guo<sup>1</sup>, Lei Yang<sup>2,3</sup>, Dada Wang<sup>2</sup>, Xiaoming Rui<sup>3</sup>, Shaoquan Zhang<sup>2</sup>, Junyu Liang<sup>2</sup>, Qingjun Peng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Yunnan International Co., Ltd., China Southern Power Grid, Kunming

<sup>2</sup>Graduate Workstation of Yunnan Power Grid Corporation, Kunming

<sup>3</sup>Energy Power and Mechanical Engineering Department, North China Electric Power University, NCEPU, Beijing

Email: daiactive@163.com

Received: Nov. 12<sup>th</sup>, 2013; revised: Nov. 18<sup>th</sup>, 2013; accepted: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2013

Copyright © 2013 Tizong Guo et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** With the increasing of transmission lines voltage grade, the transmission line-towers system needs higher static and dynamic stability. But it is difficult to meet the demands of design for the new transmission line-towers in traditional way. In order to improve the design quality on condition of shortening the design lifecycle, the parametric finite element method is applied to model the overhead transmission tower. The parametric template of each basic structure is created by setting the characteristic parameters in APDL environment. Then tower is completed by assembling the basic structure according to their relationship and constraint. In this paper, the LuZ5 tangent cup type tower of 220 kV Gan-Zhen line in Yunnan province is modeled and analyzed. The results show that the parametric modeling is feasible and effective; it can effectively reflect the mechanical properties of the transmission tower, highly increase the rate of creating and modifying the model, and consequently shorten the designing cycle and improve the efficiency.

**Keywords:** Transmission Towers; Parametric Modeling; APDL (ANSYS Parametric Design Language); Dynamic Analysis; Static Analysis

## 基于 APDL 的酒杯型输电杆塔 参数化建模与分析

郭体宗<sup>1</sup>, 杨磊<sup>2,3</sup>, 王达达<sup>2</sup>, 芮晓明<sup>3</sup>, 张少泉<sup>2</sup>, 梁俊宇<sup>2</sup>, 彭庆军<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国南方电网云南国际公司, 昆明

<sup>2</sup>云南电网公司研究生工作站, 昆明

<sup>3</sup>华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京

Email: daiactive@163.com

收稿日期: 2013 年 11 月 12 日; 修回日期: 2013 年 11 月 18 日; 录用日期: 2013 年 11 月 22 日

**摘要:** 输电线路电压等级的提高, 对输电线路杆塔系统的静态和动态稳定性提出了更高的要求。由于传统的设计方法难于满足新的输电线路的要求。为了在缩短设计周期的前提下, 提高设计质量, 本文运用参数化有限元方法对架空输电杆塔进行建模, 利用 APDL 参数化语言, 通过设定特征参数生成输电塔各基本结构的参数化模板, 根据模块之间的关联或约束关系进行模块的组合, 完成输电杆塔结构的参数化建模。通过对云南 220 kV 甘镇线 LuZ5 型直线酒杯塔的有限元建模和分析, 证明了该参数化有限元方法的可行性和有效性, 能有效地反映输电杆塔的力学性能, 大大提高了模型生成和修改的速度, 提高了设计质量, 缩短设计周期, 提高了设计效率。

**关键词:** 输电杆塔; 参数化建模; ANSYS 参数化设计语言; 动力特性分析; 静力特性分析

## 1. 引言

输电线路作为电网重要的生命线工程<sup>[1]</sup>，在电力系统中起着对电能进行传输、调节和分配的重要作用，输电线路的破坏会导致供电系统的瘫痪，严重影响电力系统的安全稳定运行。在我国，有 13 个省份存在很多输电塔架倒塌现象，造成输电线路系统停止工作，这对于人们的生产建设和生活秩序是一种严重的危害。因此，建立一个架空输电塔的力学模型，研究它的静动力特性，对于保证输电线路的安全运行具有重要的意义。

输电杆塔的有限元法分析流程可以被描述为设计 - 建模 - 分析 - 修改设计 - 修改结构 - 再分析的循环周期<sup>[2,3]</sup>。在有限元建模和后处理中存在大量的重复性工作，增加了出错的可能性和降低设计分析效率。输电杆塔虽然分为不同的塔型，但同一类型的杆塔结构基本相似，只是尺寸大小不同；而且不同类型杆塔的结构也具有一定相似性和继承性<sup>[4]</sup>。因此，运用参数化有限元方法建立架空输电杆塔模型是很有必要的，只要输入建立模型所需的一些特征参数，就会自动生成杆塔的结构模型。然后，通过预先施加覆冰载荷、风载荷、自重载荷、导线张力等，而我们只需要修改荷载类型和大小，就可以很快地完成杆塔的有限元分析，极大地减少工作量，缩短设计周期，提高了工作效率。

## 2. 输电杆塔的参数化有限元建模

### 2.1. 参数化建模

参数化建模是通过使用可变参数(变量)而不是数字来建立模型，只需通过简单的改变模型中的参数值就能建立和分析新的模型<sup>[5]</sup>。为了提高建模效率，在建模过程中，采用了 ANSYS 的参数化设计语言 APDL (ANSYS Parametric Design Language)。该语言可以用来完成一些通用性强的任务，也可以根据具体要求来建立模型。它是优化设计和自适应网格划分等 ANSYS 经典特性的实现基础，运用它可以完全实现脱离菜单操作。

有限元分析的标准过程包括，定义模型及其载荷、求解和解释结果，假如求解结果表明有必要修改设计，那么就必须要改变模型的几何结构或载荷并重复

上述步骤。特别是当模型较复杂或修改较多时，这个过程可能很昂贵和浪费时间。APDL 用建立智能分析的手段为用户提供了自动完成上述循环的功能，为用户控制任何复杂计算的过程提供了极大的方便。借助于 ANSYS 平台和 APDL 语言，我们基于 APDL 命令流，运用参数化有限元方法完成输电杆塔的几何建模、网格划分、载荷施加、求解计算以及定义单元类型和材料属性，通过输入参数，完成架空输电塔的参数化建模和分析。

### 2.2. 参数化有限元建模步骤

由于输电杆塔结构主要由角钢杆件通过螺栓、法兰等连接构成，具有较强的相似性和规则性，本文采用模块化建模方法，将杆塔分解为不同的基本模块，提取模块的特征参数，利用 APDL 语言逐一生成各基本模块的参数化模板，通过选取模块进行组合最终完成输电杆塔结构的参数化建模。以上输电杆塔的参数化有限元建模思路如图 1 所示。

参数化有限元建模的具体实施步骤如下：

- 1) 根据输电杆塔的结构类型特征将其进行分类，在不影响精确度的前提下对杆塔模型进行简化，并将其分解为不同的基本结构模块；
- 2) 应用参数化设计理念，根据输电塔模块结构特征，提取并定义输电杆塔的特征参数；
- 3) 基于 ANSYS 命令流文件，根据特征参数，利用 APDL 参数化语言，采用直接法在每个工作平面内对称建立节点，运用循环语句连接节点形成单元建立

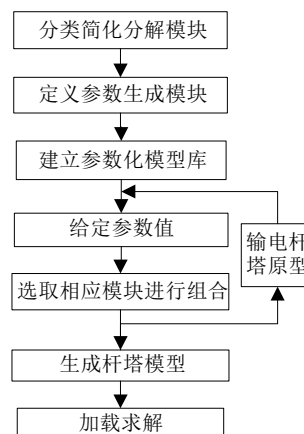


Figure 1. Flow chart of the parametric finite element modeling of transmission tower  
图 1. 输电杆塔的参数化有限元建模流程图

各个杆件，并对每一杆件单元的单元类型和材料属性进行定义，从而逐一生成各基本结构模块的参数化模板，建立杆塔参数化模型库；

4) 根据输电杆塔的原型，对特征参数赋以具体数值，从模型库中选取相应的模块，根据模块中节点和杆件的布置形式确定模块之间的关联或约束关系，进行模块组合得到输电杆塔结构的整体模型。

5) 分析应用于输电线路上的作用力，利用 APDL 语言在 ANSYS 命令流中，对输电杆塔模型施加约束和载荷，给出数值分析的参数值，就可以快速获得输电杆塔的静力学和动力学分析的结果。

一旦某个特定的输电杆塔需要进行有限元分析，只需给定特征参数数值，选取相应的模块，根据模块之间的关联或约束关系进行模块组合就可以快速生成输电杆塔有限元模型。之后只需分析应用于输电线路上的作用力，给出数值分析的载荷参数值，重复第五步就可以很容易地进行结构分析，得到新的分析结果。

### 3. 输电杆塔的实例分析

#### 3.1. 输电杆塔实体建模

以云南 220 kV 甘镇线 LuZ5 型直线酒杯塔作为研究对象，运用参数化有限元建模方法，建立架空输电塔的有限元模型，整个模型依据 LuZ5 直线跨越塔结构图，按照 1:1 的等比例建立输电塔原形的有限元模型，具体几何参数见表 1。

输电塔原形为角钢组合空间结构，主体材料全部使用 Q235 以及 Q345 型号的钢材，其物理参数如表 2 所示。

根据输电杆塔的结构和上文的建模方法与步骤，

Table 1. Geometric parameters of transmission tower  
表 1. 输电塔几何参数

塔体总高 /m	呼高 /m	根开宽度 /m	塔顶宽度 /m	横担宽度 /m	塔体总重 /t
31.5	28	5.355	0.2	0.8	6.013

Table 2. Physical parameters of transmission tower  
表 2. 输电塔物理参数

弹性模量/GPa	泊松比	密度/Kg/m <sup>3</sup>
206	0.3000	7900

对杆塔模型进行简化并将其分解为塔头、塔身、塔腿三大结构模块，再分解为不同的节间基本模块。通过定义特征参数，利用参数化语言，采用空间梁桁混合模型，将主材、斜材和横隔材作为梁单元，辅助材则视为杆单元，所有梁单元均选用可自定义截面形状的 BEAM188 单元模拟，杆单元选用 LINK8 单元模拟，利用 APDL 语言，通过建立杆件单元，并对每一杆件单元的单元类型和材料属性进行一一一定义，逐一生成各基本模块的参数化模板，然后根据各个模块中节点和杆件的布置形式确定模块之间的关联或约束关系，将各基本模块进行组合，就可以得到架空输电塔的有限元模型，如图 2 所示。

运用上述的参数化有限元建模方法，在对一个特定的输电杆塔进行有限元建模分析时，只需根据输电塔的原型，修改特征参数值，从模型库中选取相应的模块，根据模块之间的关联或约束关系进行模块组合就可以很快地生成输电杆塔有限元模型。此外，假若模型需要修改时，只需利用 APDL 语言在 ANSYS 命令流文件中对命令进行修改，就可以快速地完成模型几何结构的修改。这大大提高了模型生成和修改的速度，远远超过通过 GUI 菜单操作来完成模型生成和修改的速度，大大减少工作量，缩短设计周期，提高了设计效率。

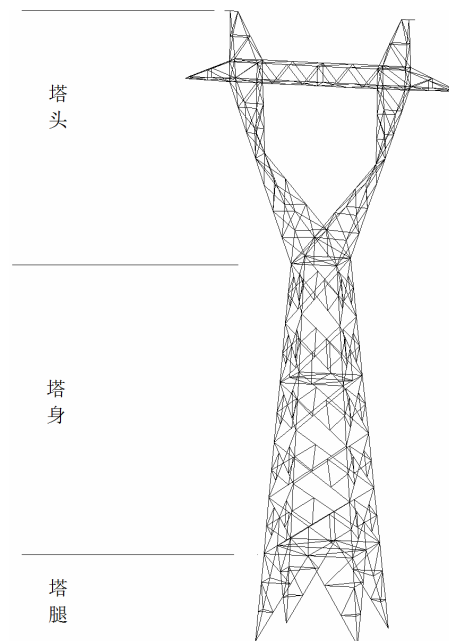


Figure 2. The whole model of transmission tower  
图 2. 输电塔整体模型

### 3.2. 输电杆塔的动力特性分析

#### 3.2.1. 模态分析

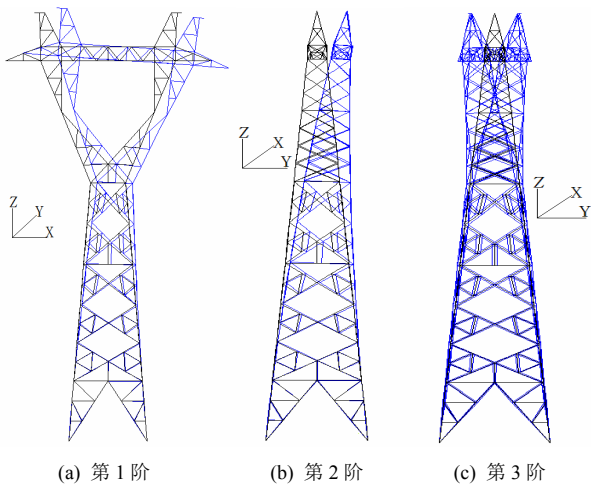
塔架刚度和质量决定了其动力特性。刚度主要是通过单元类型及单元特性来反应，而质量则要通过单元截面和材料密度来反应。在实际杆塔结构中，杆塔质量不仅包括塔材的质量，还应考虑杆件连接板、连接螺栓及辅助材的质量，因此需对模型进行质量修正。本文采用密度增大系数法<sup>[5]</sup>，将输入的密度值乘以质量增大系数，把质量缺失量用集中质量单元平均分配到各层的结点。

通过参数化语言对模型施加约束，修改参数化命令流中的载荷值，选用 Block Lanczos 法<sup>[6]</sup>对杆塔模型进行模态分析，提取该模型的前 5 阶频率和前 3 阶振型。模态分析获得的模型前 5 阶固有频率和周期如表 3 所示，前 3 阶振型如图 3 所示。

《建筑抗震设计规范》<sup>[7]</sup>规定了结构在两个主轴方向的动力特性(周期和振型)宜相近，表明结构的第

**Table 3. Natural vibration frequency and cycle of the top five order of transmission tower**  
**表 3. 输电塔的前 5 阶自振频率和周期**

模态阶数	频率/Hz	周期/s
1	2.4448	0.4090
2	2.6061	0.3837
3	5.0727	0.1971
4	6.6168	0.1511
5	7.5954	0.1317



**Figure 3. Vibration mode of the top three order of transmission tower**  
**图 3. 输电杆塔的前三阶振型**

一、第二振型宜为平动，扭转周期宜出现在第三振型及以后。由图 3 可看出，该输电杆塔的第一阶振型为绕 X 轴(垂线路方向)的整体偏移，第二阶振型为绕 Y 轴(顺线路方向)的整体偏移，第三阶振型为绕 Z 轴的扭转，符合《建筑抗震设计规范》的规定。

#### 3.2.2. 模态分析结果对比分析

目前，我国电力部门普遍采用通过输电杆塔实测研究得到的如下经验公式<sup>[8]</sup>近似计算输电杆塔结构的自振周期：

$$T_1 = 0.034 \frac{H}{\sqrt{b+B}} \quad (1)$$

其中： $H$  为全塔高度， $b$  为塔顶宽度， $B$  为根开宽度。

按该公式计算该酒杯塔的自振周期  $T_1 = 0.454$  s，与 ANSYS 模态分析计算结果的第一阶周期 0.409 相比，模态分析计算结果比经验公式的计算结果小 9.9%。两者存在一定差距，这是因为经验公式是在输电塔架质量沿塔高方向均匀分布的假设下得出的，而有限元分析考虑了塔架横担杆件的质量，使得沿塔高方向质量分布不均匀，致使输电杆塔的刚度增大，从而使输电杆塔自振周期减小。

另外，《建筑结构荷载规范》<sup>[9]</sup>也规定了塔架结构的自振周期应在  $0.007H \sim 0.013H$  ( $H$  为塔架总高)，对于钢结构塔架需取高值。按此规范，该酒杯塔的自振周期应在  $0.2205 \sim 0.4095$  s，与模态分析结果相比，模态分析结果在此周期范围内，与自振周期最大值非常接近。由此可见，本文所采用的参数化建模方法搭建的杆塔模型较为合理，可以满足工程应用的要求。

### 3.3. 静载荷下输电杆塔的特性分析

本文选取的酒杯塔上装有在线监测系统，可实时获得拉力、倾角的监测数据，通过计算就可得到导地线的载荷值，并将加载在杆塔挂线节点上。综合输电杆塔安全因素，选取云南电网曾对甘镇线启动除冰应急预案的时间内，历史监测数据中拉力值和倾斜角都较大的一组数据进行分析，如表 4 所示。

**Table 4. Data of historical monitoring**  
**表 4. 历史监测数据**

拉力/N	风偏角/度	倾斜角/度	覆冰厚度/cm	覆冰重量/Kg
8633	-11.4	31.3	11.1	286.4

对于作用在输电杆塔迎风面的静态风载荷, 根据《架空送电线路杆塔结构设计技术规范》<sup>[10]</sup>的规定, 按公式(2)计算:

$$W_s = W_0 \cdot \mu_z \cdot \mu_s \cdot B_2 \cdot A_s \cdot \beta_z \quad (2)$$

其中,  $W_s$  为输电塔风荷载标准值(KN);  $W_0$  为基准风压标准值(KN/m<sup>2</sup>), 且  $W_0 = V^2/1600$ ;  $\mu_s$  为构件体型系数, 塔架取  $1.3(1 + \eta)$ ,  $\eta$  为塔架背风面荷载降低系数;  $B_2$  为杆塔构件覆冰风荷载增大系数, 20 mm 冰区取 1.8;  $\mu_z$  为风压高度变化系数;  $\beta_z$  为输电塔风荷载调整系数;  $A_s$  为承受风压面积计算值(m<sup>2</sup>)。

计算风载荷时, 先根据输电杆塔结构将杆塔分为 10 段, 分别计算每一段的风荷载, 再将每一段的风荷载加在这一段的主材节点上。根据式(2)计算得到风速方向垂直线路方向下各段模块的风荷载值与风速  $v$  的关系, 如表 5 所示。本文采用模块化建模方法, 在建模过程中利用 APDL 语言就对每一个模块施加参数化载荷, 在进行塔架风荷载分析时, 只需给定载荷参数值就可以很快完成载荷的施加。

应用上述参数化建模和载荷快速评估技术, 可依据输电线路冰风负载条件下监测数据, 实时完成输电杆塔冰风负载条件的载荷快速评估, 评估输电杆塔结构可靠性和极限承载能力, 从而定位线路结构的危险环节。根据历史监测数据和塔架风荷载计算公式, 取风速  $v = 25 \text{ m/s}$ , 计算得到输电杆塔载荷值, 将计算值赋值给载荷参数, 得到输电杆塔的静力学分析分析结果, 分析得到的位移图和应力云图如图 4 所示。

Table 5. Load reduction coefficient  $\eta$  of tower's leeward side  
表 5. 输电杆塔各段风载荷

输电塔分割段	荷载施加点高度/m	风荷载大小/N
1	4.4	$8.46 v^2$
2	7.2	$5.75 v^2$
3	10	$4.97 v^2$
4	13	$6.45 v^2$
5	16	$6.23 v^2$
6	19	$7.06 v^2$
7	24.2	$8.27 v^2$
8	28	$5.46 v^2$
9	29	$2.93 v^2$
10	31.5	$2.36 v^2$

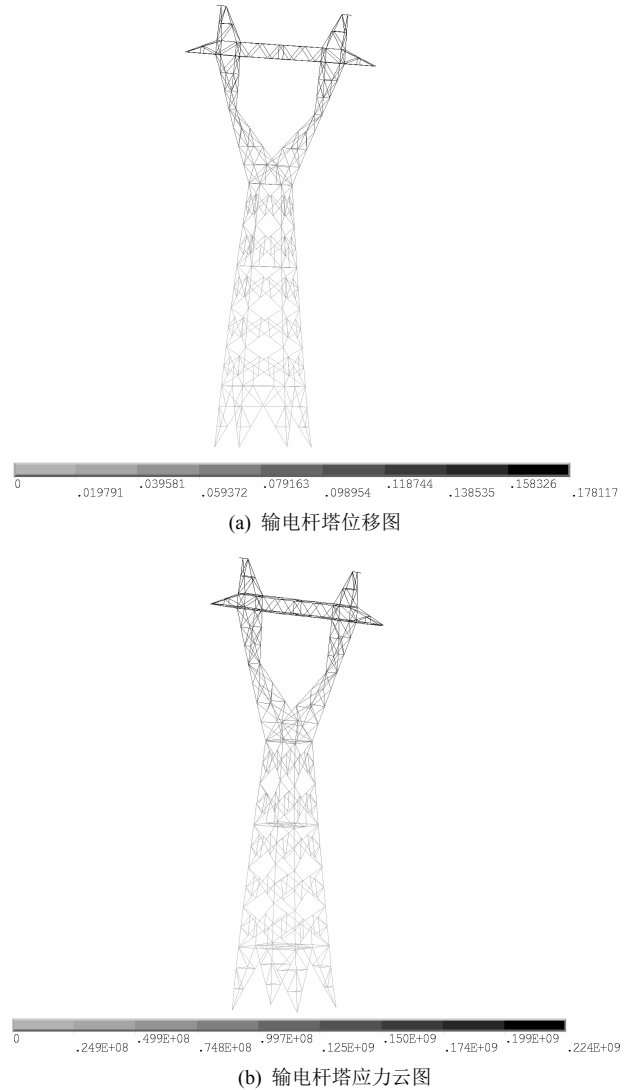


Figure 4. Displacement and stress of transmission tower under static load

图 4. 静载荷下输电杆塔的位移与应力

根据输电塔的静力特性分析结果可得, 塔架的最大位移为 178.2 mm, 最大应力为 224 MPa, 接近钢材的屈服极限, 如果覆冰量继续增加, 塔架有可能出现危险, 这与当时进行除冰的实际工况一致。通过修改载荷参数值, 可以快速获得新的分析结果。

#### 4. 结论

1) 本文运用参数化有限元方法, 对云南 220 kV 甘镇线上的 LuZ5 型直线酒杯塔进行了参数化实体建模和模态动力特性分析, 通过结果的对比分析, 证明了该参数化有限元建模方法的可行性和有效性。

2) 运用参数化有限元建模方法只需给定特征参

数值, 通过模块组合就可以很快地生成输电杆塔有限元模型; 当需要对模型进行修改时, 只需修改 APDL 命令流, 就可以快速地完成模型几何结构的修改。这大大提高了模型生成和修改的速度, 减少工作量, 缩短设计周期, 提高了设计效率。

3) 通过分析应用于输电线路上的作用力, 给定数值分析的参数值, 便可完成输电杆塔载荷快速评估, 快速获得输电杆塔的静力学和动力学分析的结果。

## 参考文献 (References)

- [1] 李杰 (2006) 生命线工程的研究进展与发展趋势. *土木工程学报*, **39**, 1-6.
- [2] Ghobarah, A., Aziz, T.S. and El-attar, M. (1996) Response of transmission lines to multiple support excitation. *Engineering Structures*, **18**, 936-946.
- [3] McClure, G. and Lapointe, M. (2003) Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines. *Computers & Structures*, **81**, 825-834.
- [4] 王璋奇, 孙燕, 安利强 (2007) 输电铁塔参数化建模方法及应用. *中国工程机械学报*, **5**, 272-276.
- [5] 刘伟, 高维成, 于广滨 (2010) ANSYS12.0 宝典. 电子工业出版社, 北京.
- [6] 汪江, 杜晓峰, 张会武 (2009) 淮蚌线淮河大跨越输电塔有限元建模和修正研究. *钢结构*, **24**, 21-24.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部 (2010) GB50011-2010 建筑抗震设计规范. 中国建筑工业出版社, 北京.
- [8] 肖琦, 周凌风, 蔡景素, 等 (2011) 紧凑型窄基输电塔 ANSYS 建模及动力特性分析. *水电能源科学*, **29**, 167-169.
- [9] 中华人民共和国建设部 (2006) GB50009-2001 建筑结构荷载规范. 中国建筑工业出版社, 北京.
- [10] DL/T5154-2002 (2002) 架空送电线路杆塔结构设计技术规范. 中国建筑出版社, 北京.