

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.05.003

螺栓预紧力对输电杆塔强度的影响

严波¹, 刘力宇¹, 毕承财¹, 吴天宝², 刘凡², 曹永兴²

(1. 重庆大学 航空航天学院, 重庆 400044; 2. 四川电力科学研究所, 成都 610071)

摘要: 针对实际线路段, 利用 ABAQUS 软件建立塔线耦合体系有限元模型, 数值模拟该塔线体系在典型荷载作用下的应力和变形。根据现场倒塔情况, 建立杆塔破坏局部区域三维实体模型, 并与其它部分杆梁模型连接得到杆塔整体有限元模型。三维局部区域模型考虑了螺栓和连接板之间的连接细节、螺栓预紧力、螺杆和螺孔之间的间隙等。进而数值模拟研究螺栓预紧力大小对螺栓的滑移和杆塔构件应力的影响。结果表明, 过小的预紧力会导致螺栓产生明显滑移, 增大螺栓和杆塔构件的应力, 因而螺栓预紧力不足可能是导致杆塔破坏的主要原因之一。

关键词: 输电杆塔; 螺栓预紧力; 螺栓滑移; 强度; 数值模拟

中图分类号: TM75; O39

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2016)05-017-09

Effect of bolt pre-tightening force on the strength of transmission line tower

YAN Bo¹, LIU Liyu¹, BI Chengcai¹, WU Tianbao², LIU fan², CAO Yongxing²

(1. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China;

2. Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610071, P.R.China)

Abstract: By means of ABAQUS software, the finite element model of a section of a real transmission line was set up, and the stresses and the deformations of the line under typical cases were numerically analyzed. According to collapsing details of the tower, a three dimensional solid finite element model of the local structure, in which the details of the structural link, bolt pre-tightening force and the clearance between bolts and screw holes were considered, was established, and the model was connected with the other portion of the tower discretized by beam and truss elements to obtain the integrity of tower. Moreover, the effects of the bolt pre-tightening force on the slipping of the bolt and structural stress were numerically investigated. It is concluded that insufficient bolt pre-tightening force gives rise to obvious slipping and large structural stress. Therefore, insufficient bolt pre-tightening force is probably one of the main reasons leading to tower collapse.

Keywords: transmission line tower; bolt pre-tightening force; bolt slipping; strength; numerical simulation

近年来, 输电线路由于覆冰、脱冰和断线等引起的倒塔事故时有发生, 严重影响输电线路的安全运行。输电杆塔破坏原因的分析是改进杆塔设计, 确保其运行安全的关键。

收稿日期: 2016-02-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277186); 国家电网公司科技资助项目。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51277186) and the Science Foundation of the State Grid Corporation of China.

作者简介: 严波(1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事固体力学和工程力学方向研究, (E-mail) boyan@cqu.edu.cn。

在研究输电线路脱冰跳跃高度时,一般忽略杆塔的变形^[1-2]。近年来,不同载荷下输电线路杆塔的安全分析已受到广泛关注。陆佳政等^[3]利用塔线体系空间梁有限元模型,研究了导线上不同厚度覆冰时作用于杆塔上的非平衡力,但未对杆塔的应力和强度进行分析。杨风利等^[4]利用塔线体系有限元模型,模拟研究了各种脱冰工况下猫头直线杆塔的杆件内力变化规律。李雪等^[5]模拟研究了输电杆塔在覆冰载荷作用下的非线性屈曲,并分析了覆冰不均匀系数下杆塔的极限承载能力。刘春城等^[6]利用模型实验研究了特高压大跨越塔线体系在覆冰断线作用下的响应。胡位勇等^[7]利用塔线体系有限元模型,模拟了断线过程中杆塔的破坏。这些研究工作中,均将杆塔简化为空间梁模型或杆梁混合模型,没有考虑杆塔中螺栓连接的影响。

另一方面,Al-Bermani 和 Kitipornchai^[8]推导了非对称薄壁梁一柱单元的变形刚度矩阵,考虑了轴向、横向和扭转变形的耦合,可用以研究输电杆塔的非线性大变形行为。Kitipornchai 等^[9]提出了 2 种模拟螺栓滑移的模型,研究了螺栓的滑移对结构极限强度的影响。最近,江文强^[10]、齐立忠等^[11]以及高康等^[12]研究了螺栓滑移对杆塔变形和承载能力的影响,这些工作都是以空间杆梁模型为基础,在杆件的连接处通过引入连接单元来模拟螺栓的滑移,没有考虑杆塔螺栓连接的细节。Prasad Rao 等^[13]利用实验研究了塔腿、支撑杆和冗余杆件破坏、细节设计和连接结构破坏、材料缺陷和制造误差等的影响。建立了梁柱单元和板单元离散有限元模型,并利用梁单元来模拟螺栓,对杆塔进行了大变形弹塑性分析及失效分析。Xie 等^[14]利用试验方法对 500 kV 输电杆塔 2 个子结构在模拟冰荷载作用下的破坏机制进行了研究。汪楚清等^[15]通过引入约束方程,建立了包含塔腿局部模型的特高压钢管塔多尺度有限元模型,并重点分析了杆塔在 90°大风工况下塔腿区域的应力和变形。

根据现场考查发现,杆塔破坏大多发生在螺栓连接区域,螺栓预紧力的大小可能是影响杆塔强度的重要因素。最近,吴天宝等^[16]通过建立杆塔危险区域局部三维实体有限元模型,将由塔线体系模型计算得到的危险区域边界的力施加于三维局部模型上,模拟研究了导线脱冰过程中连接螺栓预紧力不同的情况下危险区域的应力和变形,这种简化方式不能准确反映杆塔其它构件对局部区域的影响,同时没有考虑螺栓和螺孔之间的间隙,因而不能反映滑移的影响。

文中以四川 500 kV 月普双回线路 61#~66# 线路段 65# 杆塔破坏事故为背景,建立该杆塔三维实体和杆梁混合有限元模型,考虑螺栓和螺孔连接之间的间隙和螺栓预紧力等细节,利用杆塔整体模型研究在不同载荷工况下,螺栓预紧力大小对杆塔安全性的影响。

1 线路段及其有限元模型

1.1 实际线路及杆塔破坏情况

500 kV 月普双回线起于西昌 500 kV 月城站,止于昭觉 500 kV 普提站。2011 年 12 月 9 日,受低温冰冻天气影响,月城—普提 500 kV 双回线路发生倒塔断线事故。事故区段为 500 kV 月普一、二线 61#~66#。该区段为同塔双回架设,其中 61#、65# 和 66# 为耐张杆塔,塔型为 SJ613,呼称高度分别为 29、35、30 m。62#~64# 为直线杆塔,塔型为 SZ 643,呼称高度为 40.5、36、47 m。其中 61#~65# 耐张段长 1 122 m,65#~66# 耐张段长 732 m。该事故区段的 65# 塔发生了倒塌事故,破坏现场如图 1 所示,从图中可见,该塔在离地约 9 m 的塔身瓶口下端螺栓连接区域主材发生了折断。

1.2 塔线体系有限元模型

首先,根据实际线路段的受损情况,以事故区段的 500 kV 月普双回线路 61#~66# 线路段为研究对象,在 ABAQUS/CAE 中建立六塔七档的塔线耦合体系有限元模型。这些杆塔均由角钢组成,包含 Q235、Q345 和 Q420 3 种不同类型的材料,四分裂导线的型号为 4×LJG-630/45,地线型号为 GJ80,光缆型号为 OPGW100。导线、地线、光缆及角钢的物理力学性能如表 1 所示。

塔线耦合体系有限元模型中,杆塔简化为空间杆梁有限元模型;绝缘子串采用空间梁单元模拟;间隔棒简化为框架,用空间梁单元模型;覆冰导线、地线和光缆均采用索单元模拟,在 ABAQUS 中可通过将杆单元的材料性质设置为不可压缩来模拟索单元。采用严波等^[17]提出的一种无需迭代的方法确定导线、地线和光缆在自重作用下的初始构形。

各杆塔塔腿根部施加固定约束,线路段两端的导线施加固定约束。导线与绝缘子串之间,导线与间隔棒之间定义 Beam 连接关系;绝缘子串与输电线塔之间定义 U-joint 连接关系。整个模型共划分 140 445 个单

元,建立的塔线体系有限元模型如图 2 所示。

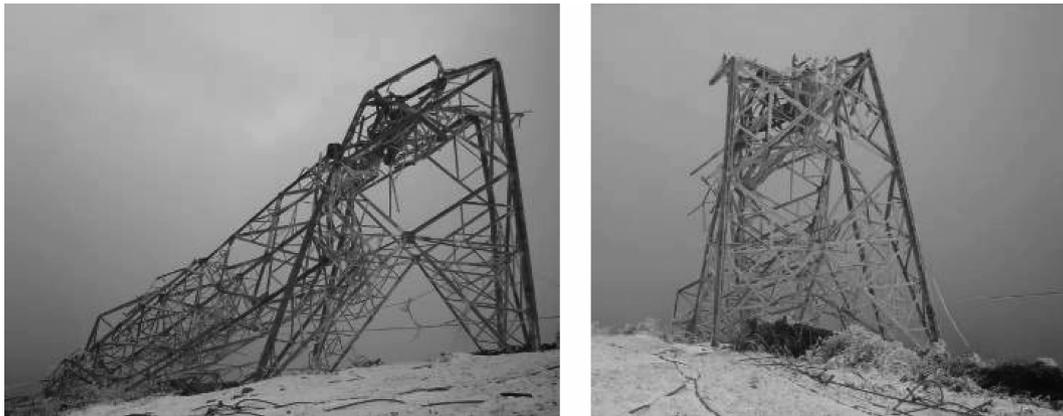


图 1 65#耐张塔破坏现场

Fig. 1 Collapsing of dead end tower No. 65

表 1 杆塔构件及导地线的物理力学性能参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of tower structure and conductors

构件	弹性模量/GPa	Poisson 比	密度/(kg · m ⁻³)	许用应力/MPa
螺栓(6.8 级)	206	0.3	7 800	300
Q235 构件	206	0.3	7 800	215
Q345 构件	206	0.3	7 800	310
Q420 构件	206	0.3	7 800	380
导线	63	0.3	3 090.54	223
地线	181.4	0.3	7 960.48	1 270
光缆	162	0.3	6 787.47	680

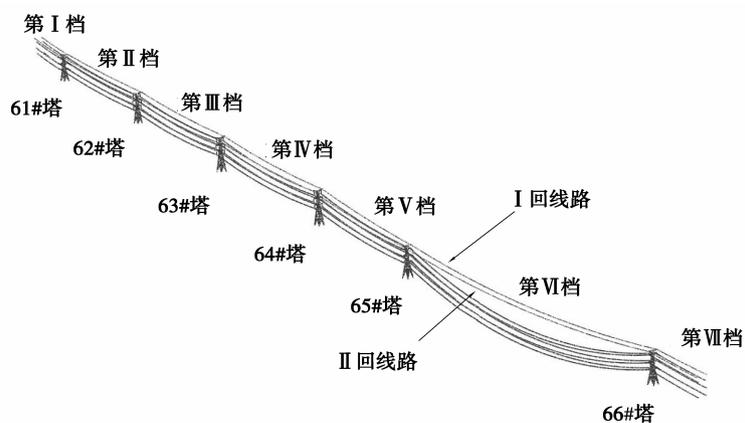


图 2 塔线耦合体系有限元模型

Fig. 2 Finite element model of tower—line system

1.3 杆塔实体和杆梁混合模型

根据事故现场调研,65#耐张塔发生了倒塌事故,如图 1 所示。要研究螺栓预紧力和螺栓滑移对杆塔强度的影响,理想的情况是建立整体的三维实体有限元模型进行计算,但受计算机硬件的限制,尚存在困难。为此,根据杆塔的实际破坏情况,对破坏区域建立三维实体模型,考虑所有连接板及螺栓连接的细节,其它区

域则采用空间杆梁模型。三维实体模型和其它区域之间通过定义耦合关系连接在一起。

杆塔破坏区域的杆件、连接板和螺栓等均采用三维六面体实体单元来进行离散。杆件与连接板及螺栓之间均采用接触定义。作用于杆塔上的载荷根据载荷工况,由塔线体系耦合模型计算分析得到,然后将这些载荷施加到绝缘子串与杆塔的连接点处。杆塔塔腿根部施加固定约束。最终建立的杆塔实体和杆梁混合有限元模型如图 3 所示,整个模型共划分 638 406 个单元。

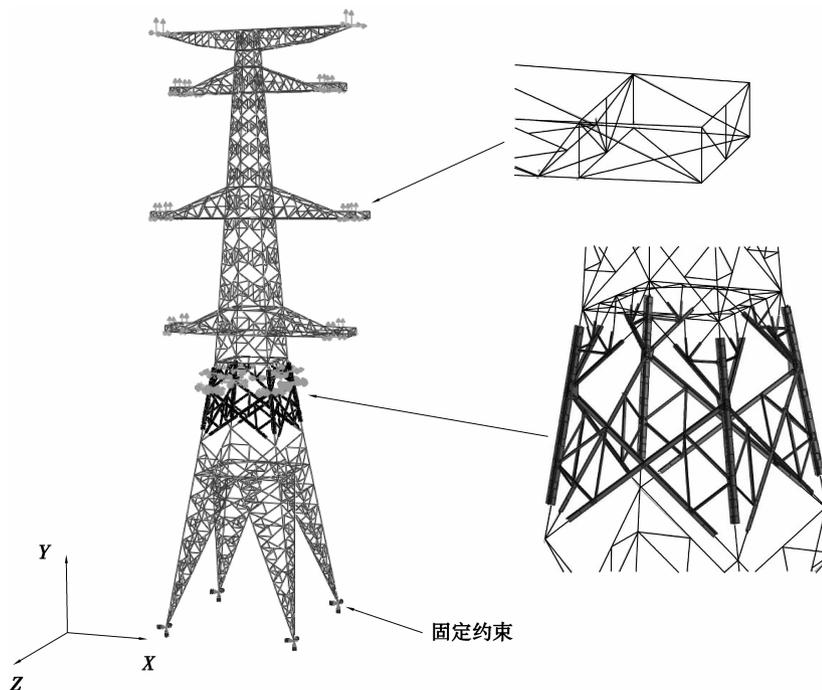


图 3 杆塔三维实体和杆梁混合模型

Fig.3 Finite element model of tower discretized by 3D solid, truss and beam elements

输电杆塔中螺栓预紧力的大小与螺栓规格和强度等级有关。在模拟分析的杆塔局部区域中,连接螺栓有 M20 和 M24 2 种规格,其中全部 M20 和部分 M24 螺栓的强度等级为 6.8 级,部分 M24 螺栓为 8.8 级。根据送电线路施工规范^[18],6.8 级螺栓施加 25 kN 的预紧力,8.8 级螺栓施加 52 kN 的预紧力。根据钢结构设计规范^[19],螺栓孔径一般都要比螺栓直径大 1.5~3.0 mm,在此取 2 mm;螺栓与连接件之间的摩擦系数取 0.40。螺栓与其连接件之间定义接触关系,如图 4 所示。在 ABAQUS 有限元软件中螺栓预紧力的施加和接触定义方法等详见文献^[20]。

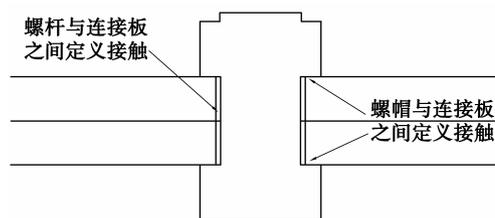


图 4 螺栓与连接板及杆件的接触关系定义
Fig.4 Definition of contact relation between a bolt and connecting plates

2 典型工况下杆塔的应力和变形

2.1 塔线体系有限元分析

为了分析螺栓预紧力对杆塔安全性的影响,首先利用 1.2 节中建立的塔线体系有限元模型,计算脱冰和断线 2 种工况下塔线体系的应力和变形,在此基础上再利用 1.3 节建立的 65 # 塔的实体和杆梁混合有限元模型进一步分析其应力和变形。脱冰工况假设整档线路均匀覆冰 20 mm,第 VI 档 I 回中相导线发生 100% 脱冰;断线工况假设整档线路均匀覆冰 20 mm,第 V 档 I 回中相导线与 65 # 塔横担连接处发生断线。

利用 ABAQUS 有限元软件计算得到该 2 种工况下塔线体系的应力和变形,进一步可以得到 65 # 杆塔上各挂点处的载荷,用于该杆塔实体和杆梁混合有限元模型的计算分析。

2.2 杆塔应力和变形

为了研究螺栓连接细节等对杆塔的影响,利用 1.3 节建立的杆塔实体和杆梁混合有限元模型计算分析前述 2 种工况下的应力和变形。

现对 65 # 塔在脱冰工况下的计算结果进行分析。图 5 所示为杆塔整体结构和典型构件局部的 Mises 应力分布。可见,在此工况下,65 # 塔受到弯扭组合作用,整体结构向第 VI 档方向发生弯曲,同时发生了扭转变形。最大应力出现在螺栓上,其最大值为 281.3 MPa,如图 5(b)所示。分析表明,在脱冰前,由于施加了螺栓预紧力,该螺栓的最大应力为 218.1 MPa,可见断线前后该螺栓的应力变化较大。此外,连接板和杆件的最大应力均出现在螺孔边缘,分别为 160.2 MPa 和 155.3 MPa。结合表 1 可知,考虑螺栓预紧力和结构细节后分析得到的 65 # 塔中的螺栓、杆件和连接板的应力均未超过其强度值,杆塔满足安全性要求。

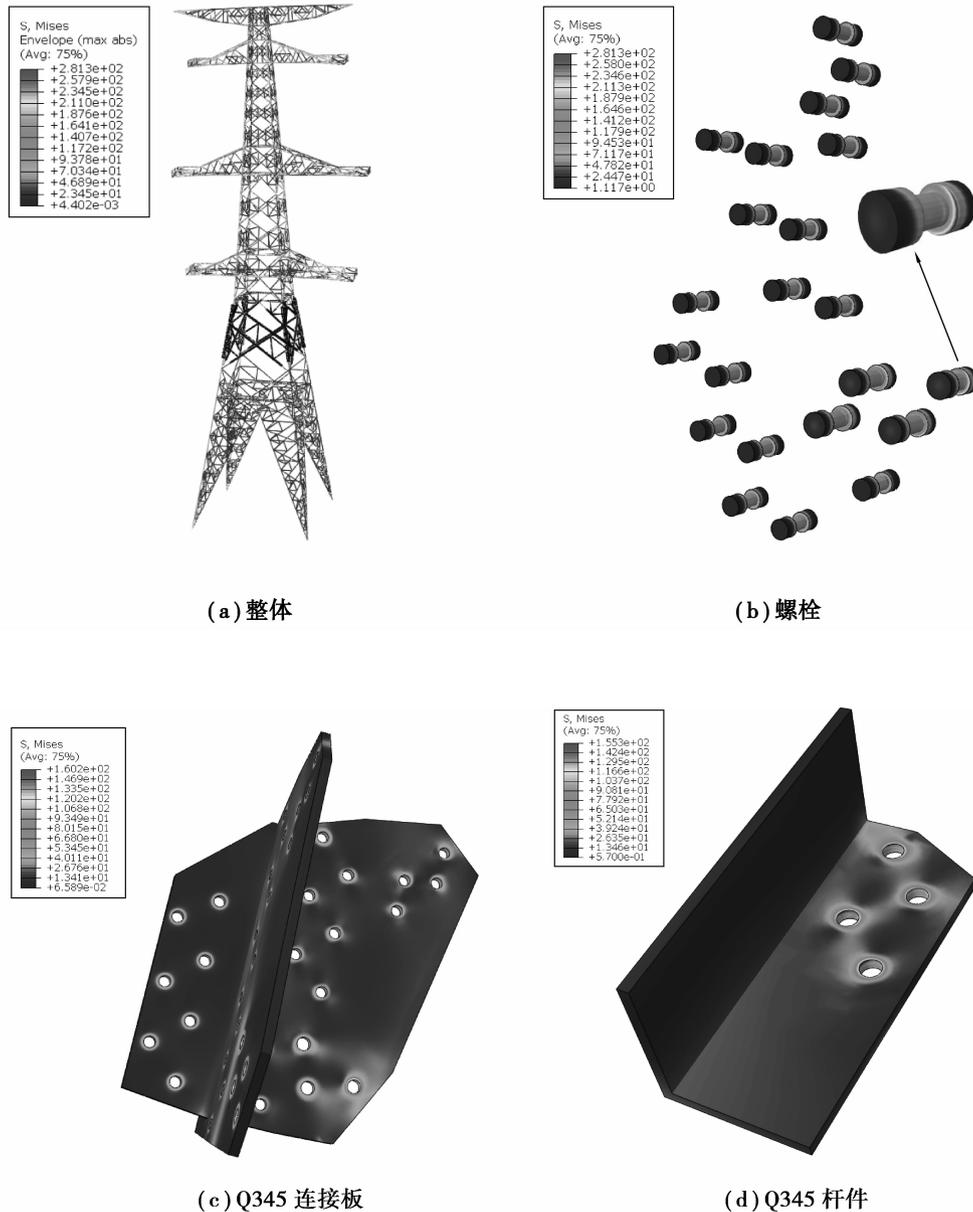


图 5 65 # 塔整体及局部应力分布

Fig.5 Global and local stress distribution of tower No. 65

此外,图 6 给出了该工况下最大应力螺栓的滑移,可见此时螺栓的滑移并不明显,其大小为 0.16 mm,螺杆菌未与螺孔内壁发生接触。为了清晰起见,图中去掉了连接板,可以看见螺杆菌与螺孔内壁之间的间隙。

表 2 给出了脱冰和断线工况下,利用塔线体系模型与实体和杆梁混合模型得到的 65 # 塔杆件的最大

Mises 应力比较。可见,由塔线体系模型计算得到的应力远小于实体和杆梁混合模型得到的结果。在对倒塔事故进行分析时发现,假如不考虑螺栓连接等细节,利用杆梁模型计算分析时,杆塔能满足强度要求;但在考虑螺栓连接细节后其相关连接构件的应力可能超过其强度极限,因而考虑螺栓连接的细节是必要的。

此外,由于螺栓施加了足够大的预紧力,这些工况下螺栓的最大滑移量仅为 0.16 mm,因而除了三维实体模型区域及其相邻区域外,2 种模型计算得到的其他位置的杆梁结构的应力几乎一致。

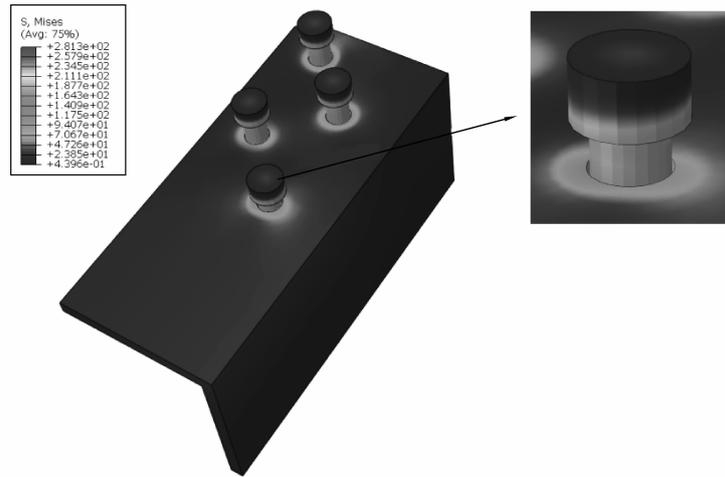


图 6 最大 Mises 应力螺栓的变形

Fig.6 Deformation of the bolt with maximum Mises stress

表 2 典型工况下 65 # 塔杆梁模型与实体和杆梁混合模型应力结果比较

Table 2 Stress comparison of tower No. 65 under typical cases with different models

工况	模型	最大 Mises 应力/MPa		
		Q235 杆	Q345 杆	Q420 杆
脱冰	杆梁模型	18.09	89.35	72.06
	实体和杆梁混合模型	203.10	155.30	182.80
断线	杆梁模型	33.24	166.0	107.1
	实体和杆梁混合模型	390.30	279.7	323.3

3 螺栓预紧力的影响

实际杆塔中,螺栓的预紧力可能小于施工规范要求值。一方面,在杆塔建设施工过程中,由于人工操作不当可能导致螺栓预紧力不足;另一方面,在杆塔的运行过程中,由于螺栓松弛,其预紧力也可能随着时间的增长而减小。螺栓预紧力的减小会直接影响到螺栓在杆塔受载过程中的滑移量,如果滑移过大,螺栓的螺杆将会与杆件或连接板直接发生接触,螺栓、杆件和连接板的应力可能都会增大。因此,研究螺栓预紧力对螺栓滑移和杆塔构件应力的影响对分析杆塔破坏的原因具有重要意义。

3.1 螺栓滑移分析

图 7 给出了 2 种工况下螺栓预紧力对螺栓滑移量的影响。图中滑移距离是杆塔结构中出现最大 Mises 应力螺栓的滑移量,螺栓预紧力表示施工要求值的百分比。从图中可以看出,在脱冰工况下,当螺栓预紧力减小到施工要求值的 45% 时,螺栓滑移量达到 1 mm,由于初始状态时螺杆与螺孔内壁间隙为 1 mm,此时螺杆与螺孔内壁发生了接触。值得一提的是,当螺栓预紧力从施工要求值减小到 50% 时,螺栓的滑移量有所减小,这可能是由于局部区域的结构和变形复杂,导致其滑移方向随螺栓预紧力变化而改变所致。而在断线工

况下,当螺栓预紧力减小到施工要求值的 80%时,螺栓滑移量即达到 1 mm,此时螺杆与螺孔内壁发生了接触。

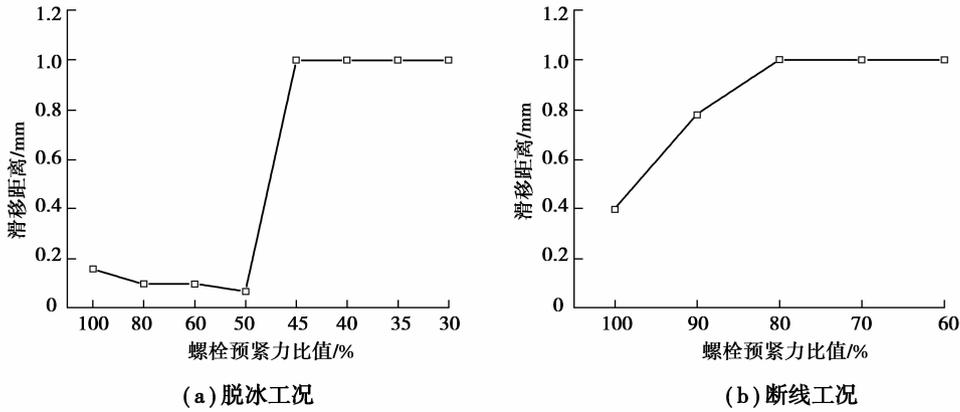


图 7 螺栓预紧力对滑移量的影响

Fig.7 Effect of pre-tightening force of bolts on slipping distance

图 8 所示为脱冰工况下,螺栓预紧力为施工要求值的 45%时最大应力螺栓的滑移和变形,可见螺杆与螺孔内壁接触,螺杆受剪切作用,出现了应力集中。

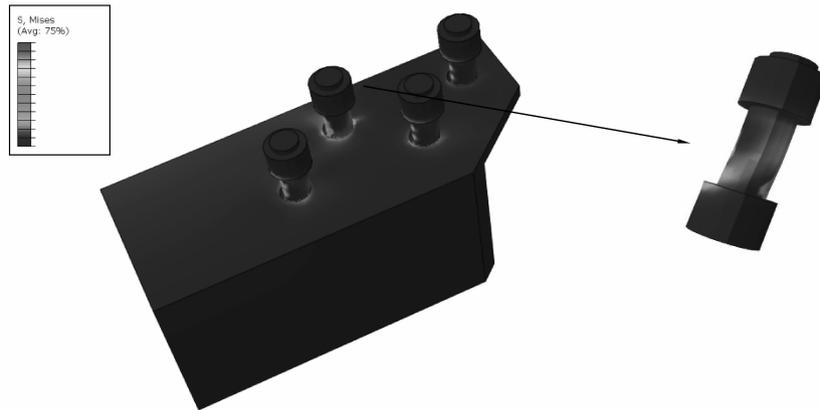


图 8 典型螺栓的滑移和变形

Fig.8 Slipping and deformation of typical bolts

3.2 局部应力分析

图 9 给出了 2 种工况下螺栓预紧力对杆塔不同构件最大 Mises 应力的影响。从图中可以看出,在脱冰工况下,当螺栓预紧力减小到施工要求值的 45%时,由于螺杆与螺孔内壁发生了接触,螺栓、Q345 杆件和 Q345 连接板的应力水平明显增大,且超过了材料的许用应力。由此可知,螺栓预紧力的减小导致的滑移是产生高应力水平的原因。类似地,在断线工况下,当螺栓预紧力减小到施工要求值的 80%时,螺杆与螺孔内壁发生了接触,螺栓和 Q345 杆件的应力明显增大。

总体来讲,随着螺栓预紧力的减小,杆塔各类构件的最大 Mises 应力呈增大的趋势。当螺栓预紧力减小到一定程度时,一些构件的应力水平会突然增大,从而导致杆塔破坏。

值得一提的是,当结构的应力超过材料的屈服极限时,要准确获得构件的应力,需进一步采用弹塑性分析。此外,对于实际输电线路,当载荷过大时,杆塔破坏以局部压杆失稳为主,文中关注的是连接区域螺栓预紧力大小对杆塔破坏的影响,旨在分析杆塔破坏的另一种可能性。

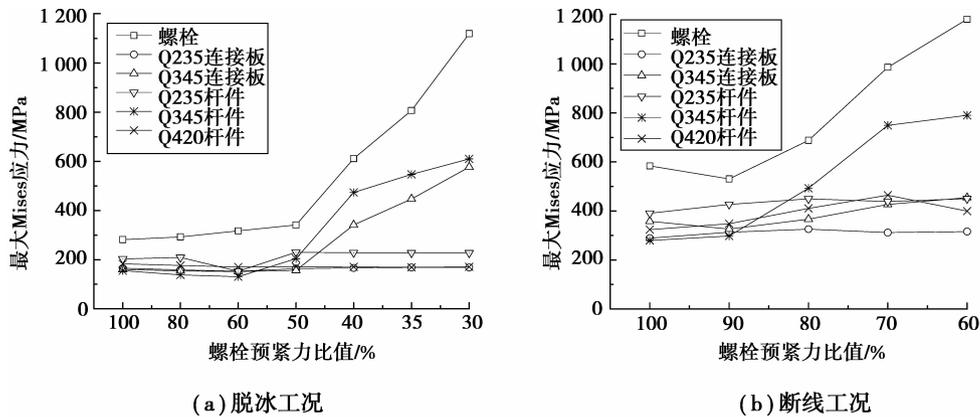


图 9 螺栓预紧力对杆塔各构件最大 Mises 应力的影响

Fig. 9 Effect of pre-tightening force of bolts on Maximum stresses of various structural elements

4 结 论

利用有限元数值模拟方法,建立输电塔线体系有限元模型与杆塔实体和杆梁混合有限元模型,针对典型工况,模拟研究了螺栓预紧力对杆塔应力和变形的影响,得到如下结论:1)利用考虑螺栓连接结构细节的实体和杆梁混合模型计算得到的杆塔构件的应力,明显大于杆梁模型的计算结果。2)当螺栓预紧力减小到一定程度时,螺栓会发生明显的滑移,螺杆与螺孔内壁相互接触,相关构件的应力水平明显增大,这可能是导致杆塔破坏的主要原因之一。3)为了确保杆塔的安全,一方面在杆塔建设过程中需要确保施加足够的螺栓预紧力;另一方面,应采取有效措施防止杆塔在运行过程中发生螺栓松动。4)现行杆塔设计方法可能存在不足,建议进一步研究在杆塔设计中如何考虑螺栓连接细节对杆塔强度的影响。

参考文献:

- [1] Kollar L E, Farzaneh M. Vibration of bundle conductors following ice shedding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 1097-1104.
- [2] Yan B, Chen K Q, Guo Y M, et al. Numerical simulation study on jump height of iced transmission lines after ice-shedding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 216-225.
- [3] 陆佳政,刘纯,陈红冬,等. 500kV 输电塔线覆冰有限元计算[J]. 高电压技术,2007,33(10):167-169.
LU Jiazheng, LIU Chun, CHEN Hongdong, et al. Finite element calculation of 500kv iced power transmission system [J]. High Voltage Engineering, 2007,33(10):167-169.(in Chinese)
- [4] 杨风利,杨靖波,付东杰,等. 塔线体系脱冰跳跃动力响应分析[J]. 振动工程学报,2010,23(1):86-93.
YANG Fengli, YANG Jingbo, FU Dongjie, et al. Analysis on dynamic responses of transmission tower-line system under ice shedding[J]. Journal of Vibration Engineering, 2010,23(1):86-93. (in Chinese)
- [5] 李雪,李宏男,黄连壮. 高压输电线路覆冰倒塔非线性屈曲分析[J]. 振动与冲击,2009,28(5):111-114.
LI Xue, LI Hongnan, HUANG Lianzhuang. Nonlinear buckling analysis of collapsed steel tower for high voltage iced transmission lines[J].Journal of Vibration and Shock,2009,28(5):111-114(in Chinese).
- [6] 刘春城,毛绪坤,刘法栋,等.大跨越输电塔-线体系覆冰断线模型试验[J].振动与冲击,2012,31(24):41-47.
LIU Chuncheng, MAO Xukun, LIU Fadong, et al. Model test for icing line disconnection on a long-span transmission tower-line system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012,31(24):41-47. (in Chinese)
- [7] 胡位勇,严波,程皓月,等.输电塔线体系断线动力响应及杆塔破坏模拟研究[J].应用力学学报,2012,29(4):431-436.
HU Weiyong, YAN Bo, CHEN Haoyue, et al. Simulation research on dynamic responses of transmission tower-line system and tower failure[J].Chinese Journal of Applied Mechanics, 2012,29(4):431-436. (in Chinese)
- [8] Al-Bermani F G A, Kitipornchai S. Nonlinear analysis of thin-walled structures using least element/member[J]. Journal of Structural Engineering, 1990, 116: 215-234.
- [9] Kitipornchai S, Al-Bermani F G A, Peyrot A H. Effect of bolt slippage on ultimate behavior of lattice structures[J].

- Journal of Structural Engineering, 1994, 120: 2281-2287.
- [10] 江文强.构造节点的精细模拟及其在输电铁塔结构分析中的应用[D].北京:华北电力大学博士学位论文,2011.
JIANG Wenqiang. Accurate modeling of structural joint and its application in lattice transmission tower analysis[D]. Beijing: Dissertation for the Doctoral Degree of North China Electric Power University, 2011. (in Chinese)
- [11] 齐立忠,江文强,陈大斌.螺栓连接滑移对输电铁塔力学性能的影响研究[J].电力科学与工程,2013,29(3):12-17.
WANG Lizhong, JIANG Wenqiang, CHEN Dabin. Influences of bolted joint slippage on the mechanical behaviour of transmission tower[J]. Electric Power Science and Engineering, 2013,29(3):12-17. (in Chinese)
- [12] 高康,陈海波,王朋,等.螺栓滑移对非均匀沉降输电塔承载能力的影响初探[J].中国科学技术大学学报,2012,42(12): 984-989.
GAO Kang, CHEN Haibo, WANG Peng, et al. Preliminary research of the effect of bolt slippage on the bearing capacity of transmission towers with base unequal settlement[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2012, 42(12):984-989. (in Chinese)
- [13] Prasad R N, Samuel K G M, Mohan S J, et al. Studies on failure of transmission line towers in testing[J]. Engineering Structures, 2012, 35: 55-77.
- [14] Xie Q, Sun L. Failure mechanism and retrofitting strategy of transmission tower structures under ice load[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 74: 26-36.
- [15] 汪楚清,王虎长,李亮,等.大跨越输电钢管结构多尺度有限元分析[J].工程力学,2013,30(7):147-152.
WANG Chuqing, WANG Huchang, LI Liang, et al. Multi-scale finite element analysis of steel tube tower for large crossing transmission lines[J]. Engineering Mechanics, 2013,30(7):147-152. (in Chinese)
- [16] 吴天宝,刘凡,严波,等.输电杆塔螺栓连接区域局部结构有限元分析[J].应用力学学报,2015,32(1):113-118.
WU Tianbao, LIU Fan, YAN Bo, et al. Finite element analysis of bolt connecting local structure of transmission line tower[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015,32(1):113-118. (in Chinese)
- [17] Yan B, Lin X S, Luo W, et al. Numerical study on dynamic swing of suspension insulator string in overhead transmission line under wind load[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 248-259.
- [18] 国家电网公司.GB50233-2005 110~500kV 架空送电线路施工及验收规范[S].北京:中国计划出版社,2005.
State Grid Corporation of China.GB50233-2005 Code for 110kV~500kV transmission lines[S].Beijing:China Planning Press,2005.(in Chinese).
- [19] 中国工程建设标准化协会. GB50017-2003 钢结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2006.
China Association for Engineering Construction Standardization. GB50017-2003 Code for steel structure design[S]. Beijing:China Planning Press,2006.(in Chinese).
- [20] 石亦平,周玉蓉.ABAQUS 有限元分析实例详解[M].北京:机械工业出版社,2006.6
SHI Yiping, ZHOU Yurong. Examples of finite element analysis by ABAQUS[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.(in Chinese).

(编辑 陈移峰)