

角钢塔连接螺栓考虑预紧力的 拉剪计算方法研究

鄢秀庆, 龚涛, 刘翔云, 蒲凡, 李钟

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

摘要:角钢塔普通螺栓施工过程中规定了其施工紧固扭矩的下限值,但在抗剪设计时没有考虑施工紧固扭矩所产生的预紧力对其抗剪承载力的影响,计算表明目前的紧固扭矩值会使得设计偏于不安全。结合钢结构基本原理推导了输电塔普通受剪螺栓在预紧力作用下的抗剪剩余承载力比的计算方法,并结合精细化数值模拟论证了预紧力对普通螺栓抗剪承载力的影响。研究表明,预紧力越大,螺栓的抗剪承载力削弱越明显,近似呈二次抛物线关系;最终依据预紧力和抗剪承载力之间的关系,推荐了输电塔普通抗剪螺栓的紧固扭矩值,为工程设计提供了设计依据。

关键词:输电塔; 抗剪螺栓; 预紧力; 计算方法; 数值模拟

中图分类号: TM 753 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)05-0051-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230508

Research on Calculation Method of Connecting Bolts Used in Angle Steel Tower under Tension and Shear Action with Pre-tightening Force

YAN Xiuqing, GONG Tao, LIU Xiangyun, PU Fan, LI Zhong

(Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: During the construction of angle steel towers, the lower limit value of tightening torque of bolts is specified, but the influence on its shear bearing capacity caused by tightening torque is not considered. The calculation shows that the current tightening torque value will reduce the shear bearing capacity. Combined with the basic principle of steel structure, the calculation method of residual shear bearing capacity ratio of common shearing bolts under pre-tightening force is deduced, which is proved by refined numerical simulation. The research shows that the larger the pre-tightening force is, the lower the shear bearing capacity is, which is approximate quadratic parabolic relationship. Finally, according to the relationship between pre-tightening force and shear bearing capacity, the tightening torque value of common shearing bolts for transmission towers is recommended, which provides a reference for the project design.

Key words: transmission tower; shearing bolts; pre-tightening force; calculation method; numerical simulation

0 引言

角钢塔一般采用螺栓连接,螺栓主要承受剪力作用。但 GB 50233—2014《110 kV~750 kV 架空输电线路施工及验收规范》^[1] 基于拧紧及防松的目的,要求在施工时施加一定的扭矩,该扭矩将在螺杆内形成一定的拉力,在叠加剪力后使得螺栓处于拉剪受力状态。DL/T 5486—2020《架空输电线路杆

塔结构设计技术规程》^[2] 未要求对螺栓进行拉剪受力的复核,仅给出了纯剪力的计算公式,导致计算结果偏于冒进。

民用钢结构领域的 JGJ 82—2011《钢结构高强度螺栓连接技术规程》^[3] 仅规定了高强度螺栓的紧固扭矩值,对普通螺栓的紧固扭矩值并没有作明确规定;文献[4-7]主要针对高强度螺栓预紧力对其受剪影响进行了系统研究。计算表明,目前规范规定的紧固扭矩值会使得设计偏于不安全,主要是依

靠螺栓强度的安全系数进行抵抗。因此,很有必要研究紧固扭矩对普通螺栓受剪的影响。

下面结合钢结构设计原理^[8]理论推导了输电塔普通受剪螺栓在预紧力作用下的抗剪剩余承载力比的计算方法,并结合有限元分析对该方法进行了论证。同时采用有限元精细化数值模拟分析了预紧力对普通螺栓抗剪承载力的影响,验证了理论推导结论;最终依据预紧力和抗剪承载力之间的关系,推荐了输电塔普通抗剪螺栓的紧固扭矩值,为工程设计提供了设计依据。

1 紧固扭矩对普通螺栓受剪的影响

1.1 紧固扭矩的取值

GB 50233—2014、DL/T 5486—2020 给出了受剪螺栓紧固扭矩的最小值,并注明了 M24 为 8.8 级螺栓,如表 1 所示。

表 1 常见规格螺栓的施工紧固扭矩值

螺栓规格	扭矩值/(N·m)
M16	80
M20	100
M24	250

国家电网公司企业标准 Q/GDW 10115—2022《110 kV~1000 kV 架空输电线路施工及验收规范》^[8]第 9.1.7 条给出了 4.8 级、6.8 级角钢塔螺栓的最小紧固扭矩,如表 2 所示。

表 2 常见规格螺栓的施工紧固扭矩值

螺栓规格	4.8 级扭矩值/(N·m)	6.8 级扭矩值/(N·m)
M16	80	80
M20	100	160
M24	250	280

特高压钢管杆塔法兰螺栓的最小紧固扭矩,如表 3 所示。

表 3 特高压工程推荐的施工紧固扭矩值

螺栓规格	6.8 级扭矩值/(N·m)	8.8 级扭矩值/(N·m)
M16	80	110
M20	160	220
M24	280	380

表 1 至表 3 表明,对于 6.8 级 M16 螺栓,工程中规定的紧固扭矩值为 80 N·m;对于 6.8 级 M20 螺栓,工程中规定的紧固扭矩值为 100~160 N·m;对于 8.8 级 M24 螺栓,工程中规定的紧固扭矩值为 250~380 N·m。

1.2 施工预紧力的计算方法

依据《机械设计手册》^[9],普通螺栓预紧力 P 的计算方法为

$$P = \frac{T}{K \cdot d} \quad (1)$$

式中: K 为拧紧力矩系数,计算表明可近似取 0.2; d 为螺栓公称直径,mm; T 为紧固扭矩。

根据各规范紧固扭矩取值,反算预紧力如表 4 所示。

表 4 紧固扭矩的预紧力计算值

螺栓规格	T /(N·m)	P /kN	η_t
M16(6.8 级)	80	25.0	0.53
M20(6.8 级)	100~160	25.0~40.0	0.34~0.54
M24(8.8 级)	250~380	52.1~79.2	0.37~0.56

注: η_t 为预紧力与螺栓抗拉承载力设计值的比值, $\eta_t = P/N_t^b$; N_t^b 为螺栓抗拉承载力设计值。

假定预紧力在输电塔普通螺栓的服役过程中一直存在,此时螺栓会承受拉剪耦合效应,这一定程度削弱了螺栓的抗剪作用,根据 GB 50014—2017《钢结构设计标准》^[10]第 11.4.1 条规定,承受拉剪耦合作用时,普通螺栓的承载力应满足式(2)要求。

$$\sqrt{\left(\frac{V}{N_v^b}\right)^2 + \left(\frac{N}{N_t^b}\right)^2} \leq 1.0 \quad (2)$$

式中: V 为螺栓承受的剪力设计值; N 为螺栓承受的轴拉力设计值; N_v^b 为螺栓的抗剪承载力设计值; N_t^b 为螺栓的抗拉承载力设计值。

由式(2)可以推导出抗剪螺栓考虑预紧力后的剩余承载力比为

$$\beta_v = \frac{V}{N_v^b} \leq \sqrt{1.0 - \left(\frac{P}{N_t^b}\right)^2} \quad (3)$$

根据式(3)计算得到考虑预紧力后的抗剪剩余承载力比如表 5 所示。

表 5 考虑预紧力后的抗剪剩余承载力比

螺栓规格	P /kN	η_t	β_v
M16(6.8 级)	25.0	0.53	0.85
M20(6.8 级)	25.0~40.0	0.34~0.54	0.84~0.94
M24(8.8 级)	52.1~79.2	0.37~0.56	0.83~0.93

表 5 表明,由于预紧力的影响,受剪螺栓的抗剪剩余承载力比在 0.83~0.94 区间,承载力较纯剪时下降了 6%~17%,紧固扭矩越大,其抗剪剩余承载力越小。螺栓在实际受力时,由于连接板面镀锌与螺栓连接面存在摩擦。螺栓抗剪滑移时是一个缓慢

运动的过程,可以假定这种由于预紧力产生的摩擦力是一直存在,分担了一部分外部剪力,使得螺栓螺杆实际承载的剪切力减小了。镀锌连接面的摩擦系数 μ 近似取 0.15,结合 GB 50014—2017 高强度摩擦型螺栓的抗剪承载力计算形式,可以假定预紧力产生的摩擦力为

$$V_{\mu} = 0.9\mu P \quad (4)$$

考虑摩擦力后的抗剪剩余承载力比为

$$\beta_{\mu V} = \frac{V + V_{\mu}}{N_v^{rb}} = \sqrt{1.0 - \left(\frac{P}{N_t^{rb}}\right)^2} + \frac{0.9\mu P}{N_v^{rb}} \leq 1.0 \quad (5)$$

考虑螺栓摩擦力后抗剪剩余承载力比如表 6 所示。

表 6 螺栓考虑摩擦力后抗剪剩余承载力比

螺栓规格	P/kN	η_t	V_{μ}/kN	$\beta_{\mu V}$
M16(6.8 级)	25.0	0.53	3.75	0.92
M20(6.8 级)	25.0~40.0	0.34~0.54	3.75~6.00	0.92~0.99
M24(8.8 级)	52.1~79.2	0.37~0.56	7.81~11.88	0.92~0.98

表 6 表明,考虑螺栓摩擦力后,剪切螺栓的抗剪剩余承载力比在 0.92~0.99 区间,仍小于 1.0,表明按照规范规定的紧固扭矩进行螺栓紧固后,所产生的预紧力对螺栓的抗剪承载力具有较大削减作用。而这种影响在结构设计中并没有考虑,主要是通过材料的分项系数来抵抗,从设计上来讲,这是偏于不安全的,降低了螺栓的可靠度。

2 数值模型验证

为进一步研究预紧力状态下受剪螺栓的抗剪性能,采用数值模型进行验证。采用板式双剪模型进行数值分析,为了避免螺栓的承压破坏,板件材料强度为 Q420,加载板厚度取 30 mm,固定板厚度取 15 mm,螺栓采用 8.8 级 M24,屈服强度取 640 MPa^[11],预紧力在螺杆中部截面对称施加,摩擦系数取 0.15,模型构造见图 1 所示。

2.1 数值模型

为了精确模拟螺栓的受力,螺栓与板之间采用接触约束,采用实体单元模拟;材料采用理想弹塑性本构;约束住约束板的左端,在板的右端施加拉伸荷载,进行几何非线性分析。数值模型如图 2 所示。

按照屈服强度计算出单颗螺栓的全截面塑性抗剪承载力为 289.5kN,由此得到双剪模型的抗剪极

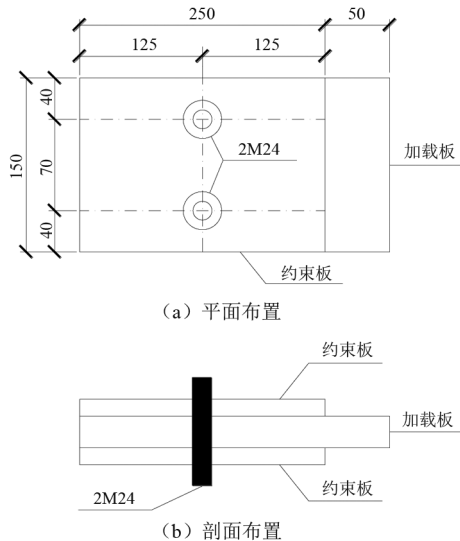


图 1 板式双剪模型构造

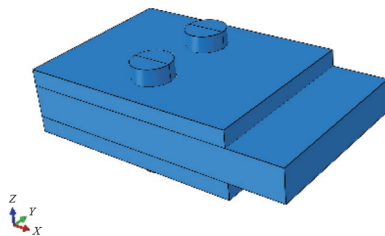


图 2 板式双剪模型

限承载力为 1158 kN,为了研究预紧力对螺栓抗剪承载力的影响,设计了 4 种加载工况,如表 7 所示。

表 7 工况信息

工况	加载工况	预紧力/kN	摩擦系数	加载荷载/kN
工况 1	无预紧力摩擦	0	0.15	1500
工况 2	预紧力摩擦	10	0.15	1500
工况 3	预紧力摩擦	60	0.15	1500
工况 4	预紧力摩擦	120	0.15	1500

2.2 应力云图

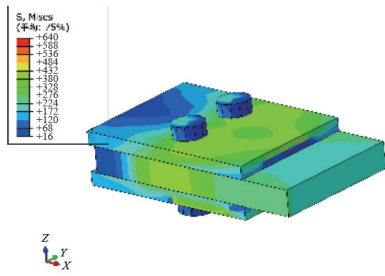
在极限破坏状态下,双剪模型的整体应力云图如图 3 所示。

图 3 表明,极限破坏状态下,螺栓附近板的应力已经进入了塑性,螺杆大部分区域也进入了塑性,存在明显的剪切变形,螺栓最终被剪坏。

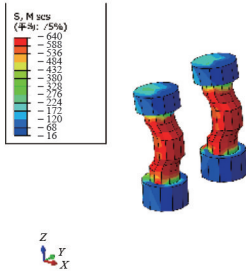
2.3 预紧力对螺栓抗剪承载力的影响

数值计算得到了所设计的 4 种加载工况下双剪模型抗剪承载力,如表 8 所示。

由表 8 可知,预紧力为 0 时,抗剪承载力为 1 005.28 kN;随着预紧力的增加,双剪模型的抗剪承载力逐渐减小,预紧力越大,这种减小趋势越明显,近似呈二次抛物线减小,如图 4 所示。



(a) 整体应力



(b) 螺栓应力

图 3 双剪模型的应力云图

表 8 各工况的极限抗剪承载力

工况	预紧力/kN	有限元计算抗剪承载力/kN
工况 1	0	1 005.28
工况 2	10	985.74
工况 3	60	886.31
工况 4	120	698.71

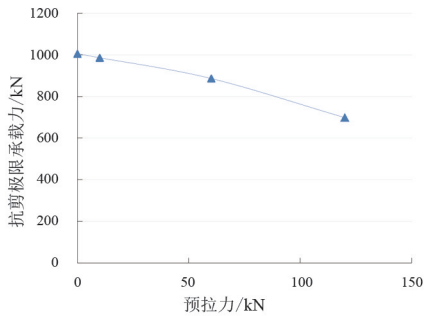


图 4 预紧力对螺栓抗剪承载力的影响

数值分析表明,随着预紧力增大,螺栓的抗剪承载力是减小的,这与第 1.2 节理论分析结论是一致的,且预紧力越大,螺栓抗剪承载力减小越明显。因此,工程设计中需要考虑预紧力对普通螺栓的抗剪承载力影响。

2.4 参数分析论证

为了综合对比理论计算公式的有效性和可靠性,进行参数分析,如表 9 所示。参数分析的变量包括螺栓型号、预紧力及摩擦系数,共计 36 组。

改变有限元模型的部分参数,进而计算 M16、M20及M24螺栓在各工况下的抗剪剩余承载力比,

表 9 各工况的抗剪剩余承载力比

螺栓	摩擦系数	预紧力/kN	抗剪剩余承载力比		γ	工况序号
			理论计算	有限元计算		
M16	0.1	0	1.00	1.00	1.00	1
		10	1.00	0.99	1.01	2
		20	0.94	0.96	0.98	3
		30	0.83	0.86	0.96	4
	0.15	0	1.00	1.00	1.00	5
		10	1.00	1.00	1.00	6
		20	0.96	0.97	0.99	7
		30	0.85	0.89	0.96	8
	0.2	0	1.00	1.00	1.00	9
		10	1.00	1.00	1.00	10
		20	0.98	0.98	1.00	11
		30	0.88	0.91	0.97	12
M20	0.1	0	1.00	1.00	1.00	13
		20	0.99	0.99	1.00	14
		40	0.89	0.92	0.96	15
		60	0.65	0.71	0.91	16
	0.15	0	1.00	1.00	1.00	17
		20	1.00	1.00	1.00	18
		40	0.91	0.94	0.97	19
		60	0.69	0.73	0.94	20
	0.2	0	1.00	1.00	1.00	21
		20	1.00	1.00	1.00	22
		40	0.93	0.96	0.97	23
		60	0.72	0.76	0.95	24
0.1	0	1.00	1.00	1.00	25	
	40	0.98	0.99	0.99	26	
	80	0.87	0.92	0.95	27	
	120	0.60	0.66	0.91	28	
0.15	0	1.00	1.00	1.00	29	
	40	1.00	1.00	1.00	30	
	80	0.90	0.95	0.95	31	
	120	0.64	0.72	0.89	32	
0.2	0	1.00	1.00	1.00	33	
	40	1.00	1.00	1.00	34	
	80	0.92	0.97	0.95	35	
	120	0.68	0.75	0.90	36	

并定义 γ 为理论计算与有限元计算抗剪剩余承载力比的比值,作出各工况下的 γ 如图 5 所示。可以看出:理论计算抗剪剩余承载力比略大于有限元计算抗剪剩余承载力比,且保证率约为 97%,整体吻合良好。

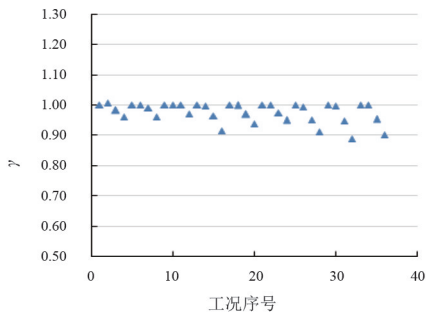


图 5 各工况的理论计算与有限元计算抗剪剩余承载力比的比值

3 普通螺栓紧固扭矩取值推荐

理论推导和数值研究结论表明,预紧力对普通螺栓抗剪承载力存在一定的影响,预紧力越大,其抗剪承载力削弱越明显。目前输电塔普通螺栓在抗剪设计时,并没有考虑紧固扭矩所产生的预紧力影响。计算表明,按照现有标准规定的紧固扭矩进行螺栓拧紧,其产生的预紧力对设计来说是偏于不安全的,因此有必要重新推荐普通螺栓的紧固扭矩值,保证设计的可靠性。

按照式(5)计算 6.8 级 M16、6.8 级 M20 和 8.8 级 M24 螺栓在不同预紧力下的螺栓抗剪剩余承载力比,如图 6 所示。

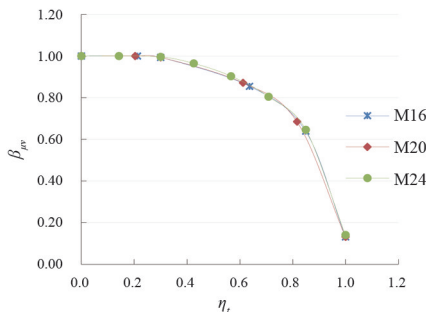


图 6 预紧力对螺栓抗剪剩余承载力比的影响

图 6 表明,预紧力越大,螺栓抗剪剩余承载力比越低,近似呈二次抛物线关系。 η_i 不大于 0.3 时,可不考虑预紧力对螺栓受剪力的影响。同时,文献[3]中关于承压型螺栓,将其分为适度拧紧型和完全预紧型,适度拧紧型为采用扳手拧紧达到连接面紧密结合的目的,主要用于受拉或拉剪组合螺栓,与输电塔受剪普通螺栓受力一致。因此,对于输电塔受剪普通螺栓,建议结合文献[3]的规定,以观察为主,同时施加扭矩时的预紧力不超过设计抗拉承载力的 30%。推荐施工紧固扭矩如表 10 所示,施工过程中

紧固扭矩值应不大于表 10 中的值。

表 10 输电塔普通螺栓紧固扭矩推荐值

螺栓规格	扭矩/ (N·m)	预紧力/ kN	预紧力/抗 拉强度	剪力/螺栓 抗剪力
M16(6.8 级)	35	10.9	0.23	1.00
M20(6.8 级)	70	17.5	0.24	1.00
M24(8.8 级)	180	37.5	0.27	1.00

4 结 论

上面结合钢结构基本原理推导了输电塔普通受剪螺栓在预紧力作用下的抗剪剩余承载力比计算方法,并结合有限元分析对该方法进行了论证;结合精细化数值模拟论证了预紧力对普通螺栓抗剪承载力的影响,验证了理论分析的结果;最终依据预紧力和抗剪承载力之间的关系,推荐了输电塔普通抗剪螺栓的紧固扭矩值,为工程设计提供了设计依据,具有一定的工程价值。主要研究结论如下:

1)总结了目前各标准对于普通螺栓紧固扭矩的相关规定。各标准对于 M20、M24 要求差异较大,产生的预紧力占螺栓抗拉承载力比例较高。分析并提出了预紧力对普通螺栓抗剪承载力的影响。

2)结合钢结构设计原理推导了普通螺栓在预紧力作用下的抗剪剩余承载力比计算方法。结果表明,考虑预紧力及板件表面摩擦力后,剪切螺栓的抗剪剩余承载力比在 0.92~0.99 区间,采用有限元参数分析,论证了这一分析结论。

3)结合精细数值模拟分析论证了预紧力对普通螺栓抗剪承载力的影响。研究表明,预紧力会影响普通螺栓的抗剪承载力,预紧力越大,抗剪承载力减小越明显,近似呈二次抛物线关系。

4)计算表明, η_i 不大于 0.3 时,可不考虑预紧力对螺栓抗剪承载力的影响。

5)基于研究结论和文献[3]关于螺栓的相关紧固要求,推荐了输电塔施工过程中普通螺栓紧固扭矩值。

参考文献

[1] 中国电力企业联合会.110 kV~750 kV 架空输电线路施工及验收规范:GB 50233—2014[S].北京:中国计划出版社,2015.
 [2] 能源行业电网设计标准化技术委员会.架空输电线路杆塔结构设计技术规程:DL/T 5486—2020[S].北京:中国计划出版社,2021. (下转第 67 页)

- [9] 许强. 四川省8·13特大泥石流灾害特点、成因与启示[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 596-608.
- [10] 谭炳炎. 泥石流沟严重程度的数量化综合评判[J]. 水土保持通报, 1986, 6(1): 51-57.
- [11] 高桥保, 中川一, 佐藤宏章. 扇状地における土砂泛滥灾害危険度の评价[J]. 京都大学防灾研究所年报, 1988, 31(B-2): 655-676.
- [12] 唐川. 汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测[J]. 山地学报, 2010, 28(3): 341-349.
- [13] TANG C, ZHU J, CHANG M, et al. An empirical-statistical model for predicting debris-flow runout zones in the Wenchuan earthquake area [J]. Quaternary International, 2012(250): 63-73.
- [14] ZHANG Wen, CHEN Jian-ping, WANG Qing, et al. Susceptibility analysis of large-scale debris flows based on combination weighting and extension methods [J]. Nat Hazards, 2013, 66: 1073-1100.
- [15] CHEVALIER G G, MEDINA V, HÜRLIMANN M, et al. Debris-flow susceptibility analysis using fluvio-morphological parameters and data mining: application to the Central-Eastern Pyrenees [J]. Nat Hazards, 2013, 67: 213-238.
- [16] CHANG Ming, TANG Chuan, ZHANG Dan-dan, et al. Debris Flow Susceptibility Assessment Using a Probabilistic Approach: A Case Study in the Longchi Area, Sichuan Province, China [J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(4): 1001-1014
- [17] CHEN Xingzhang, CHEN Hui, YOU Yong, et al. Susceptibility assessment of debris flows using the analytic hierarchy process method-A case study in Subao river valley, China [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015(4): 1-7.
- [18] JAKOB M, FRIELE P. Frequency and magnitude of debris flows on Cheekye River, British Columbia [J]. Geomorphology, 2010, 114(3): 382-395.
- [19] 匡乐红, 刘宝琛. 基于模糊可拓方法的泥石流危险度区划研究 [J]. 灾害学, 2006, 21(1): 68-72.
- [20] 孟凡奇, 李广杰, 李明, 等. 逐步判别分析法在筛选泥石流评价因子中的应用 [J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2925-2929.
- [21] LI H B, FU X F, VAN DER WOERD J, et al. Co-seismic surface rupture and dextral-slip oblique thrusting of the Ms 8.0 Wenchuan earthquake [J]. Acta Geol Sin, 2008, 82(1): 1623-1643.
- [22] BURCHFIEL B C, CHEN Z L, LIU Y P, et al. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions central China [J]. International Geology Review, 1995, 37(8): 661-735.
- [23] TANG Chuan, ZHU Jing, DING Jun. Catastrophic debris flows triggered by a 14 August 2010 rainfall at the epicenter of the Wenchuan earthquake [J]. Landslides, 2011, 8: 485-497.
- [24] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method [J]. Computers & operations Research, 1995, 22(7): 763-770.
- [25] LIN P S, LIN J Y, HUANG J C, et al. Assessing debris-flow hazard in a watershed in Taiwan [J]. Engineering Geology, 2002, 66(3-4): 295-313.
- [26] 郭晓军, 苏鹏程, 崔鹏. 7月3日茂县棉簇沟特大泥石流成因和特征分析 [J]. 水利学报, 2012, 43(2): 140-146.

作者简介:

卜祥航(1987),男,高级工程师,研究电网地震及地质灾害防御工作。

(收稿日期:2023-01-31)

(上接第55页)

- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构高强度螺栓连接技术规程: JGJ 82—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [4] 徐建设, 陈以一, 韩琳, 等. 普通螺栓和承压型高强螺栓抗剪连接滑移过程 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 510-514.
- [5] 杜运兴, 欧阳卿. 高强螺栓承压型连接抗剪承载力计算 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2013, 40(3): 21-25.
- [6] 刘素丽, 陈传新, 魏文辉, 等. 承压型高强螺栓受力性能试验研究 [J]. 安徽建筑, 2013, 20(2): 211-212.
- [7] 陈绍蕃. 钢结构设计原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [8] 国家电网有限公司科技创新部. 110 kV~1000 kV 架空输电线路施工及验收规范: Q/GDW 10115—2022 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2022.
- [9] 汝元功, 唐照民. 机械设计手册 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [11] 全国架空线路标准化技术委员会. 输电线路杆塔及电力金具用热浸镀锌螺栓与螺母: DL/T 284—2021 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.

作者简介:

鄯秀庆(1984),男,硕士,高级工程师,从事输电线路工程设计及管理工作。

(收稿日期:2023-02-05)