

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201811063



柔性光伏支架结构特性分析 及其优化设计

唐俊福, 林建平, 霍静思

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对采用不同形式的水平力承载构件的柔性光伏支架进行模拟计算, 对比 3 种水平力承载构件结构形式的受力特点, 并研究水平力承载构件与地面倾角 θ 的变化对结构力学行为的影响. 结果表明: 当拉索加钢立柱和单侧钢斜柱结构形式的场地不受限制时, 水平力承载构件与水平倾角可取偏小值; 而八字形钢斜柱结构形式的倾角处于合理范围时, 钢斜柱长度和竖向分力相对较小, 且结构失稳临界荷载较大; 当地质条件良好或场地有合适的锚固位置时, 采用斜拉索作为水平力承载构件比采用单侧钢斜柱或八字形钢斜柱更合理; 当地质条件不良时, 采用八字形钢斜柱的柔性光伏支架, 下部基础结构易于设计, 结构受力更为合理.

关键词: 柔性光伏支架结构; 水平力承载构件; 拉索; 倾角; 非线性

中图分类号: TU 318 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)03-0331-07

Structural Characteristic Analysis and Optimal Design of Flexible Photovoltaic Support Structure

TANG Junfu, LIN Jianping, HUO Jingsi

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Flexible photovoltaic support with different types of horizontal load-bearing components is calculated. The mechanical characteristics of three types of horizontal load-bearing components are compared with each other, the mechanical effect of component horizontal angle θ is investigated. The results show that: for the structure types with stay cable or single side inclined steel column, small values of θ could be used. While for the structure type with splayed inclined steel columns, reasonable value of θ could result in short lengths and small force of columns, and high critical load of the structure. For benign geological conditions and or available location of anchorage, it is more reasonable to use cable as horizontal bearing member than to use single side inclined steel column or splayed inclined steel columns. For poor geological conditions, the foundation structure of flexible photovoltaic support with splayed inclined steel columns can be designed easily with reasonable structural performance.

Keywords: flexible photovoltaic support structure; horizontal bearing member; cable; incline angle; nonlinearity

随着社会能源日益枯竭, 太阳能等新能源的利用倍受关注^[1-3]. 近年来, 我国的光伏太阳能产业不断发展. 其中, 分布式光伏发电能够因地制宜, 充分发挥太阳能资源, 具有较高的经济性和投资价值^[4], 所

收稿日期: 2018-11-22

通信作者: 林建平(1985-), 男, 副教授, 博士, 主要从事组合结构的研究. E-mail: linjianping@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51608211); 福建省自然科学基金资助项目(2017J05083); 华侨大学科研基金资助项目(16BS403); 华侨大学研究生科研创新基金资助项目(17013086033)

以,分布式光伏太阳能发电项目在国内蓬勃发展.在优质土地资源日益紧张的情况下,传统光伏支架因占地面积大、场地平整度要求高、土地无法二次利用^[5-6]等原因,建设发展受到限制.而柔性光伏支架仅支撑结构占用土地面积,对场地面积要求较低,能广泛应用于各类复杂地形.该支架采用索进行承重,索承重结构拥有较好的力学性能^[7-8],能够进行大跨度张拉.目前,索承重的结构较多应用于桥梁结构中^[9-11],对索承重结构的研究也日益成熟^[12-17],如果选择采用承重索的单层钢结构,承重索可以跨越山川、荒漠等复杂地形,在索上铺设光伏太阳能设备.柔性光伏支架造价相对较低,且能充分利用空间资源和太阳能资源,因此,具有良好的经济效益.该支架结构与传统的结构受力特点不同,由于需要对承重索进行预应力张拉,以形成大跨度索承重柔性支架,因此,钢梁除了需要承受竖向荷载还需要承受较大的水平荷载.目前,已有学者对此类结构进行研究^[18-19].然而,我国采用柔性支架的光伏发电项目还处于起步阶段,实际的案例不多,还未大规模应用于水塘、林地等复杂地形.因此,本文研究 3 种不同水平力承载构件结构形式的力学特性,并探讨水平力承载构件与地面倾角的变化对结构受力性能的影响.

1 柔性光伏支架结构特性分析

柔性光伏支架指的是由柔性承重索、钢立柱、钢斜柱或斜拉索、钢梁及基础组成的一种支架,具有结构简单、材料使用较少、质量轻、建设周期短等传统支架所缺乏的优点^[20].柔性光伏支架的承重索采用钢绞线等柔性组件,此类柔性组件具有弹性模量大、松弛率低、强度高等优点,能够进行大跨度张拉,从而规避场地的起伏等不利因素.因而,柔性光伏支架能因地制宜,受地形地貌的限制条件少.

与主要承受竖向荷载的普通刚性支架受力特点不同,柔性光伏支架采用的承重索需要进行预应力张拉,形成一定的刚度以铺设光伏组件.张拉的承重索索力会对支架产生较大的水平荷载.此外,承重索传给柱顶的水平拉力会使基础产生较大的剪力和拉拔力.因此,考虑采用何种类型的水平力承载构件承担水平力,以达到受力合理且对基础要求最低,是设计的要点.

水平力承载构件有 3 种形式:在柱顶处配备斜拉索;在柱顶单侧处设置钢斜柱;在柱顶处设置八字形钢斜柱.不同形式的柔性光伏支架结构受力图,如图 1 所示.图 1 中: L 为水平力承载构件的长度.

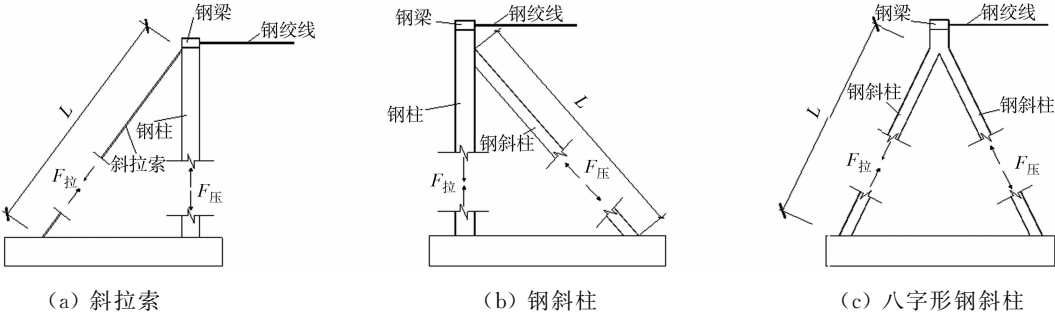


图 1 不同形式的柔性光伏支架结构受力示意图

Fig. 1 Mechanical diagrams of different types of flexible photovoltaic support structure

2 柔性光伏支架结构参数分析及优化

2.1 结构参数

模型结构跨度为 71.30 m,柱高为 2.95 m,边跨柱距为 3.95 m,中跨分别为 4.25,4.10 m;承重索采用直径 20 mm 的镀锌钢绞线,其强度为 1 670 MPa;钢梁采用尺寸为 300 mm×10 mm 的方钢管,材质为 Q235-B;钢梁下方钢柱采用尺寸为 250 mm×10 mm 的方钢管,材质为 Q235-B;柱顶采用加劲肋进行局部加强.结构的荷载考虑了结构的自重,并由程序自动计算,承重索张拉力为 88 kN.有限元计算模型中,承重索采用桁架单元进行模拟,并通过施加初张力模拟承重索的张拉力,计算模型中,考虑了几何非线性.在自重作用下,承重索的张拉力确实不是水平作用,由于存在垂度,柱顶承重索的拉力与水平线有一定的角度.实际光伏支架结构承重索张拉之后,垂度较小,索与水平线的夹角很小,因此,文中忽略该夹角对计算结果的影响.根据模型计算结果进行分析,从而得出不同结构形式及承载水平力的构件与地面倾角变化对水平力承载构件受力情况的影响规律,以达到对结构最优选型.

2.2 斜拉索倾斜度变化对斜拉索内力的影响

采用斜拉索的柔性光伏支架结构及其有限元模型,如图 2 所示. 图 2 中: θ 为倾角. 在钢立柱外侧采用斜拉索,以保证钢柱的侧向稳定性. 有限元模型中,考虑承重索张拉施工过程的影响,承重索从中间往两边对称张拉.

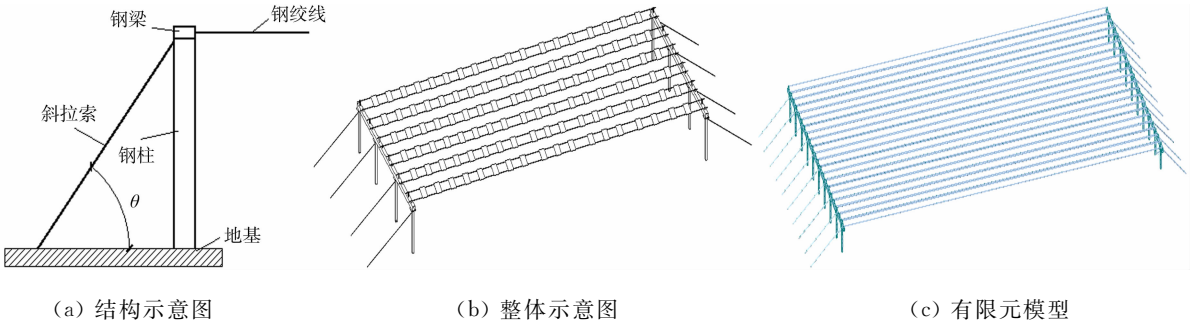
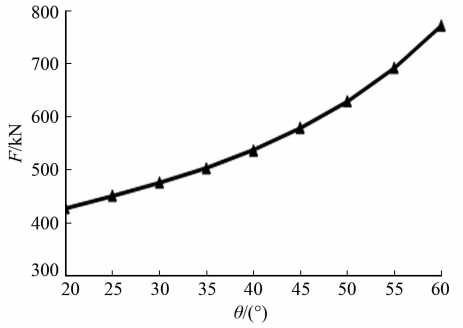


图 2 采用斜拉索的柔性光伏支架结构及其有限元模型

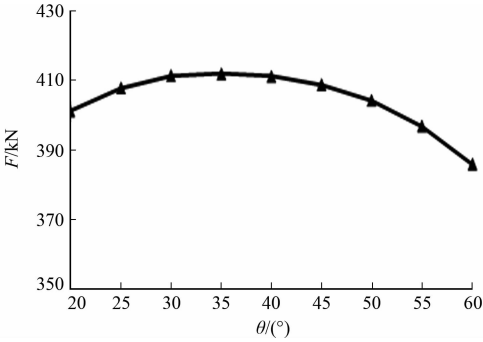
Fig. 2 Flexible photovoltaic support structure with cable and its finite element model

斜拉索截面直径为 45 mm,在其他条件不变的情况下,通过调整斜拉索与地面的倾角,分析结构受力的变化,如图 3 所示. 图 3 中: F 为水平力承载构件内力.

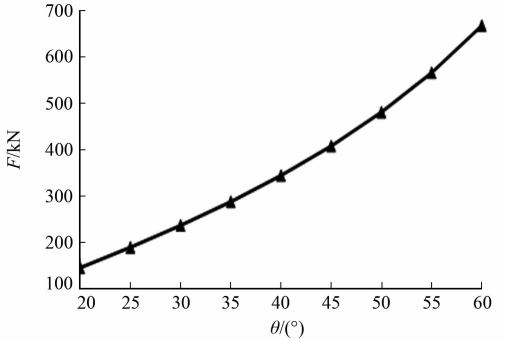
由图 3(a)可知:随着斜拉索倾角的增大,斜拉索内力逐渐增大;当倾角 θ 为 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 时,斜拉索内力随着倾角的增大而逐渐增大,增大的幅值不到 1.0%,变化数值较小;当 $\theta > 40^{\circ}$ 时,倾角越大,斜拉索内力增加明显,每增大 5° ,内力增量越大,已超过 1.0%. 由于考虑了承重索张拉施工顺序的影响,后张拉索力会对已张拉承重索的索力产生影响,使承重索的预张力发生损失. 当斜拉索与水平向倾角较小时,随着倾角的减小,斜拉索长度变长,斜拉索的总伸长量增加,柱顶的侧向变



(a) 内力变化



(b) 水平分力变化



(c) 竖向分力变化

图 3 不同倾角下斜拉索的应力变化

Fig. 3 Stress variation of stay cables at different angles

形增大,导致承重索的预应力损失增大,所以承重索的水平力减小,故而斜拉索的水平分力随着倾角减小而减小;当斜拉索与水平向倾角增大到一定程度时,随着倾角的增加,钢立柱和斜拉索的抗侧刚度减小,柱顶侧向位移增大,承重索的预应力损失增大,而斜拉索的水平分力随着倾角的增大而减小.

由图 3(b)可知:斜拉索的水平分力出现先增大、后减小的现象. 由图 3(c)可知:当倾角 θ 为 60° 时,斜拉索产生的竖向荷载比 25° 斜拉索产生的竖向荷载增加 3 倍,杆件内力的竖向分力显著增加.

因此,当现场斜拉索锚固条件不受约束时,可以选择较小的倾角. 设计时,除了要合理设计水平力承载构件,还要综合考虑水平力承载构件产生的竖向荷载对基础的影响.

2.3 钢斜柱倾斜度变化对钢斜柱内力的影响

柔性光伏支架的水平力承载构件由斜拉索改为钢斜柱,钢斜柱采用 $\text{HM}194\times 150\times 6\times 9$ 型钢,其余条件保持不变,其结构示意图,如图 4 所示.

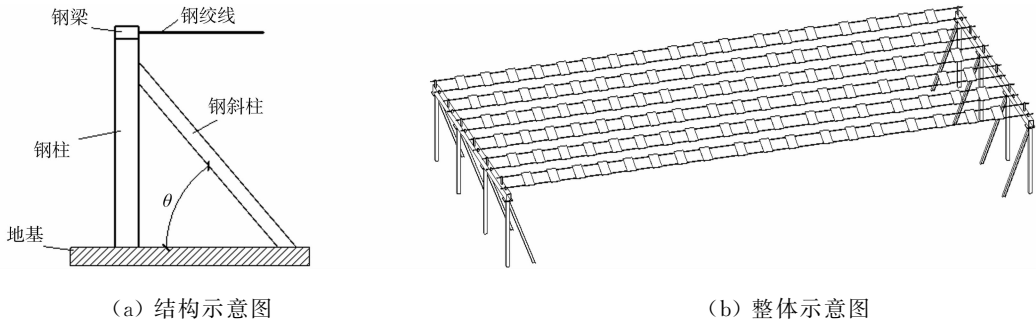


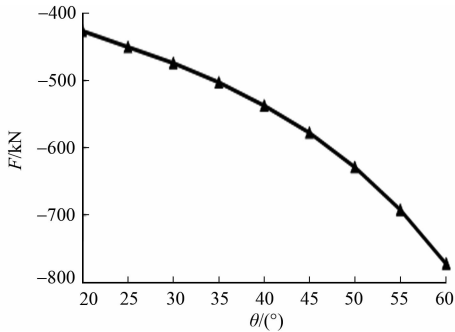
图 4 采用钢斜柱的柔性光伏支架结构和整体示意图

Fig. 4 Structural and whole diagram of flexible photovoltaic support structure with inclined steel column

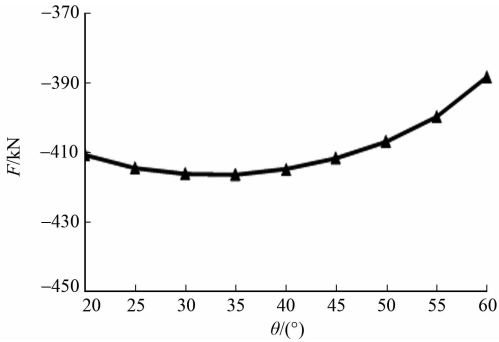
通过调整钢斜柱与水平面的倾角 θ , 分析结构的内力变化, 结果如图 5 所示. 不同倾角下钢立柱的轴向拉力变化, 如图 6 所示. 不同倾角下钢斜柱的临界荷载系数(μ)变化, 如图 7 所示.

对于采用单侧钢斜柱的柔性光伏支架结构, 钢斜柱与水平倾角 θ 的变化会使结构内力也产生较大的变化. 由图 5(a)可知: 水平力承载构件钢斜柱的内力随着倾角的增加, 内力的数值从 437 kN 增大到 776 kN, 增大近一倍. 由图 5(b)可知: 倾角的变化对钢斜柱的水平分力影响不明显. 结合图 5(a), (c)可知: 钢斜柱与地面的倾角变化对钢斜柱竖向分力的影响明显, 钢斜柱竖向分力在数值上从开始的 149 kN 增长到 672 kN, 增加了 3.5 倍.

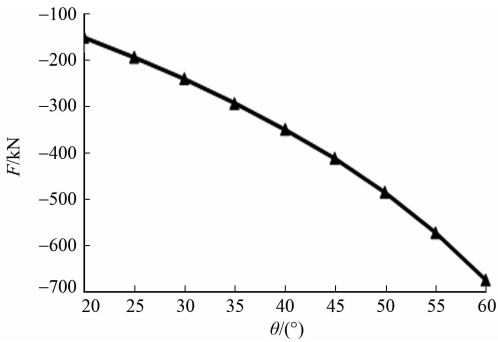
由图 6 可知: 钢斜柱产生的竖向分力由钢立柱的竖向内力平衡, 由于钢斜柱产生的竖向分力较大, 此时的钢立柱产生轴向拉力; 当钢立柱竖向承载构件的轴向拉力过大时, 对下部基础产生拉拔作用, 不利于结构受力.



(a) 内力变化



(b) 水平分力变化



(c) 竖向分力变化

图 5 不同倾角下钢斜柱的应力变化

Fig. 5 Stress variation of steel inclined columns at different angles

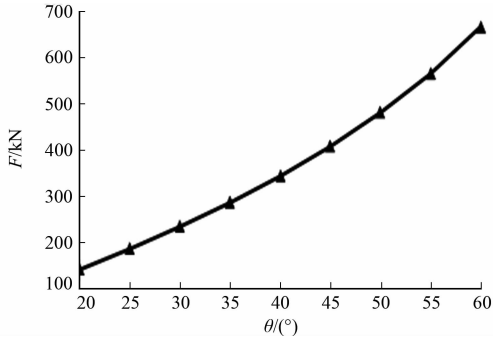


图 6 不同钢斜柱倾角下钢立柱的轴力变化

Fig. 6 Variation of axial tension of steel column at different angles

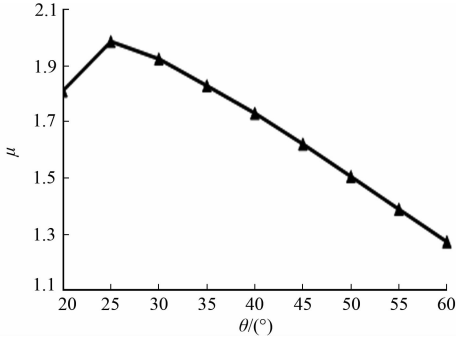


图 7 不同倾角下钢斜柱的临界荷载系数变化

Fig. 7 Variation of critical load coefficient of inclined columns at different angles

由图 7 可知:当倾角 θ 过小时,如小于 25° ,因钢斜柱的长度增大而失稳临界荷载会降低。
综上可知,在场地不受限制时,钢斜柱与水平倾角 θ 可取偏小值,钢斜柱能承担较大水平分力,且竖向分力较小,结构失稳临界荷载较大,结构较为合理。

2.4 八字型钢斜柱倾斜度变化对钢斜柱内力的影响

柔性光伏支架水平力承载构件采用八字形钢斜柱,外侧钢斜柱受拉,内受压,内、外侧的钢斜柱均采用 HM194×150×6×9 型钢,其余条件不变,其结构示意图,如图 8 所示。

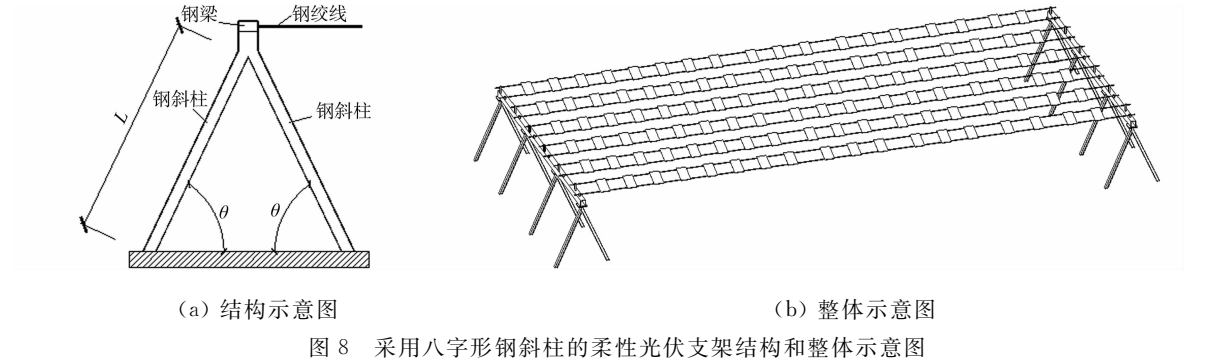


Fig. 8 Structural and whole diagram of flexible photovoltaic support with splayed inclined steel columns

通过调整不同侧的钢斜柱与地面倾角分析钢斜柱的内力变化情况,结果如图 9,10 所示. 受压钢斜柱不同倾角下的临界荷载系数变化,如图 11 所示。

由图 9(a),10(a)可知:对于八字形的钢斜柱,不论是受压钢斜柱还是受拉钢斜柱,其内力都会随着钢斜柱与地面夹角 θ 的增大而增加,但起始阶段增加平缓;随着钢斜柱倾角进一步增大,其内力增加越迅速. 由图 9(b)可知:当倾角从 30° 增大到 50° 时,受压钢斜柱的水平分力在数值上随倾角近似线性增加,而在该范围外变化平缓。

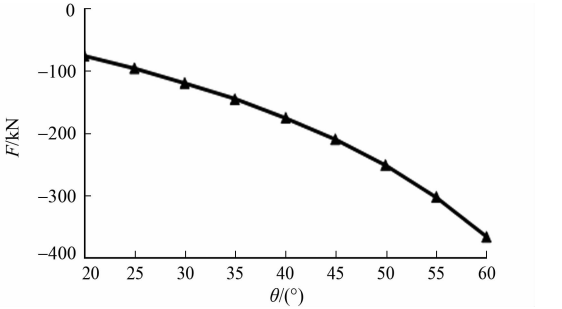
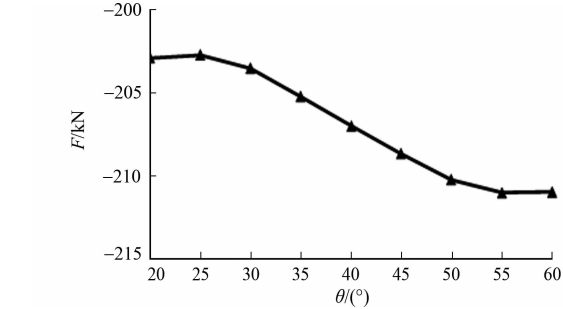
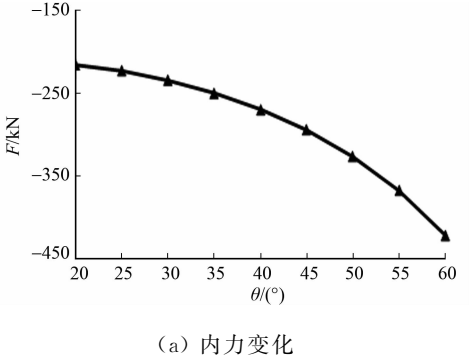


图 9 不同倾角下受压钢斜柱的内力变化

Fig. 9 Internal force variation of compressed steel inclined columns at different angles

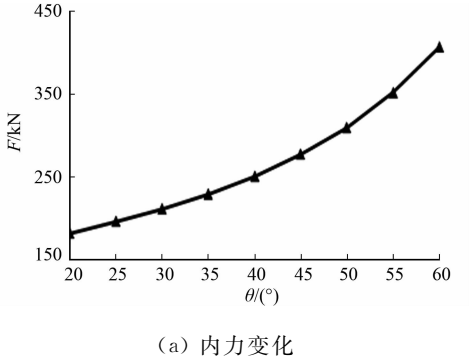
结合图 9,10 可知:当倾角 θ 从 20° 增大到 60° 时,水平力承载构件内力的变化明显,增加量接近一倍,但并没有明显增大构件对水平力的承担,而构件的竖向分力却大幅增加。

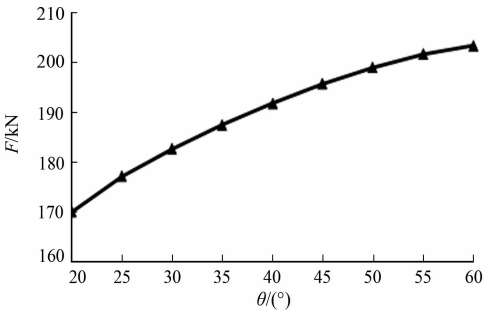
由图 11 可知:当倾角 θ 过小时,钢斜柱内力较小;当长度过长时,构件的失稳临界荷载降低。

综上可知,当 θ 约为 45° 时,钢斜柱长度和竖向分力相对较小,且结构失稳临界荷载较大,结构较为合理。

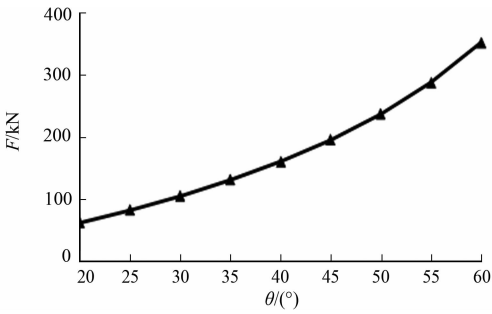
2.5 讨论与分析

3 种不同结构形式的水平力承载构件的内力都随着构件





(b) 水平分力变化



(c) 竖向分力变化

图 10 不同倾角下受拉钢斜柱的内力变化

Fig. 10 Internal force variation of tensile steel inclined columns at different angles

与地面的倾角 θ 的增大而增大,且倾角越大,在相同角度增量的情况下,内力的增加量越大.但对于水平力承载构件承担的水平力,仅在一定的角度范围内平缓增加,而构件内力的竖向分力随着倾角的增大而增加,且增幅明显.当现场斜拉索锚固条件不受约束时,斜拉索加钢立柱结构形式的水平力承载构件与地面的倾角 θ 越小,受力越合理.结合图 3,5 可知:在倾角相同的情况下,对于采用斜拉索和单侧采用钢斜柱的柔性光伏支架,其水平力承载构件的内力在数值上相近,斜拉索从结构外侧以拉力的形式承担水平力,而钢斜柱是在结构内侧以构件受压的形式承担水平力.

八字形的钢斜柱能以两根斜柱的形式分别承担水平力,此时,八字形钢斜柱在结构外侧的钢斜柱产生拉力,在内侧的另一根钢斜柱产生压力,内、外两侧杆件的内力数值相近.产生不同内力数值的原因是在模拟时,考虑了结构的自身重力,自重的竖向荷载会降低受拉钢斜柱的拉力,增大受压钢斜柱的压力.所以,在数值上,受压钢斜柱的内力会比受拉钢斜柱的内力更大.由于采用八字形钢斜柱的柔性光伏支架是从结构内、外两侧钢斜柱平衡水平力,所以,八字形钢斜柱的内力约为斜拉索和单侧采用钢斜柱内力的一半.八字形的两根钢斜柱能够较均匀的分担张拉承重索所产生的水平力,且受拉钢斜柱的竖向分力相对单侧采用钢斜柱的结构形式小,因此,结构受力更为合理.

从对下部结构的受力影响情况分析可知,单侧采用钢斜柱的结构形式的钢斜柱是以受压的形式承担水平力,而斜拉索是以索拉力的形式承担,所以,钢斜柱会对基础产生压力,而采用斜拉索作为水平力承载构件的结构则会对基础产生拉力.在相同的地质条件下,基础的受压性能比受拉性能好,所以,采用钢斜柱的柔性光伏支架比采用斜拉索的柔性光伏支架对基础要求更低.而采用八字形钢斜柱的柔性光伏支架的单根柱在内力数值上约为采用斜拉索和单侧采用钢斜柱的一半,所以,对基础的要求最低.

3 结论

针对采用不同形式的水平力承载构件的柔性光伏支架进行分析,对比 3 种不同水平力承载结构形式的受力特点,研究水平力承载构件与地面倾角的变化对结构力学行为的影响,得到以下 2 个结论.

1) 当水平力承载构件与水平倾角在 $20^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 范围内,在场地拉索锚固条件不受限制时,斜拉索加钢立柱结构形式的倾角越小,结构受力越合理.单侧采用钢斜柱的结构形式,当场地空间不受限制时,钢斜柱与水平倾角 θ 可取偏小值,此时,钢斜柱和钢立柱竖向分力较小,结构失稳临界荷载较大.八字形钢斜柱结构形式的倾角 θ 存在合理的范围,如文中分析的算例,当 θ 约为 45° 时,钢斜柱长度和竖向分力相对较小,且结构失稳临界荷载较大,结构较为合理.

2) 在地质条件良好的条件下或场地有合适的锚固位置时,采用斜拉索作为水平力承载构件比单侧采用钢斜柱或八字形钢斜柱结构形式更为合适.在地质条件不良时,采用八字形钢斜柱的柔性光伏支

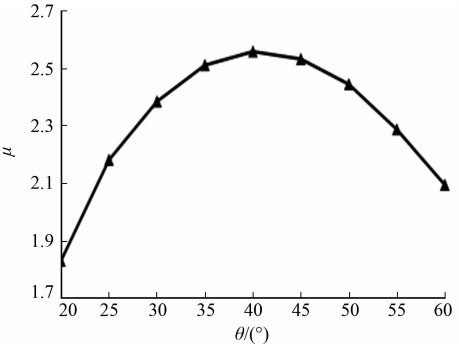


图 11 受压钢斜柱不同倾角下的临界荷载系数变化

Fig. 11 Variation of critical load of compressive inclined column at different angles

架,对地质的要求最低,下部基础结构容易设计,结构受力最为合理,整体结构较为经济.

参考文献:

[1] 韩国鹏,李明,张秋敏. 太阳能光伏发电在新能源城轨车辆上应用现状研究[J]. 新材料产业,2018(9):50-55. DOI: CNKI:SUN:XCLY.0.2018-09-012.

[2] 马文勇,柴晓兵,刘庆宽,等. 底部阻塞对太阳能光伏板风荷载的影响研究[J]. 建筑结构,2019,49(2):129-134. DOI:19701/j.jzjg.2019.02.023.

[3] 吴迎新,田李剑. 太阳能光伏发电现状研究及问题分析[J]. 技术与市场,2019,26(1):115-116.

[4] 邵汉桥,张籍,张维. 分布式光伏发电经济性及政策分析[J]. 电力建设,2014,35(7):51-57. DOI:10.3969/j.issn.1000-7229.2014.07.009.

[5] 龙慧. 屋顶分布式光伏发电支架结构设计浅析[J]. 科技创新导报,2015(34):6-8. DOI:10.16660/j.cnki.1674-098X.2015.34.006.

[6] 张梅,张恬,汪婷婷. 光伏支架结构整体性能的研究[C]//第12届中国光伏大会暨国际光伏展览会(CPVC12). 北京:中国可再生能源学会,2012:1-5.

[7] 周云岗,肖汝诚. 大跨径三塔缆索承重桥力学与经济性能[J]. 同济大学学报(自然科学版),2012,40(7):982-991. DOI:10.3969/j.issn.0253-374x.2012.07.004.

[8] 胡松,何艳丽,王肇民. 大挠度索结构的非线性有限元分析[J]. 工程力学,2000,17(2):36-43. DOI:10.3969/j.issn.1000-4750.2000.02.006.

[9] GIMSING N J,严国敏. 缆索承重桥的最近发展及展望[J]. 国外桥梁,1988(1):1-13.

[10] 陈开利. 介绍几座造型别致的缆索承重人行桥[J]. 国外桥梁,1995(2):87-92.

[11] 高宗余. 多塔缆索承重桥梁[C]//第二十届全国桥梁学术会议. 武汉:人民交通出版社,2012:18-22.

[12] LI Xinke,GAO Chao,GUO Yongcai,et al. Cable surface damage detection in cable-stayed bridges using optical techniques and image mosaicking[J]. Optics and Laser Technology,2019,110:36-43. DOI:10.1016/j.optlastec.2018.07.012.

[13] SONG Chaolin,XIAO Rucheng,SUN Bin. Optimization of cable pre-tension forces in long-span cable-stayed bridges considering the counterweight[J]. Engineering Structures,2018,172:919-928. DOI:10.1016/j.engstruct.2018.06.061.

[14] 郑亚青. 含弹性索的绳牵引并联机构的动力学和末端轨迹控制[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2018,39(6):794-800. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201808001.

[15] 晁春峰,项贻强,林建平. 基于流固耦合的锚索涡激振动抑制方法研究[J]. 力学与实践,2015,37(6):725-730. DOI:10.6052/1000-0879-15-060.

[16] 张世江,陈海,刘阳,等. 预压比对预应力钢绞线-聚合物砂浆加固 RC 板受弯性能的影响[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2018,39(2):186-191. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201611071.

[17] 徐荣桥,管羽飞,林建平. 考虑滑移的体外预应力筋的分析理论[J]. 工程力学,2017,34(5):198-204. DOI:CNKI:SUN:GCLX.0.2017-05-022.

[18] 王雨. 光伏组件柔性支架技术方案[J]. 太阳能,2018(3):37-40.

[19] 牛斌. 大跨度预应力索桁架光伏支承结构的设计[J]. 太阳能,2018(7):19-22.

[20] 郭剑飞. 大跨度预应力悬索钢结构施工技术[J]. 施工技术,2009(增刊1):513-517.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)