ICS 27.100
P 60
备案号：J2652—2019

NB

中华人民共和国能源行业标准

P

NB/T 10115—2018

光伏支架结构设计规程

Code for design of photovoltaic modules support structures

2018-12-25 发布　　2019-05-01 实施

国家能源局　发布

中华人民共和国能源行业标准

光伏支架结构设计规程

Code for design of photovoltaic modules support structures

NB/T 10115—2018

主编部门：电力规划设计总院
批准部门：国 家 能 源 局
施行日期：2019年5月1日

中国计划出版社

2018 北 京

国家能源局

公告

2018年 第16号

依据《国家能源局关于印发〈能源领域行业标准化管理办法（试行）〉及实施细则的通知》（国能局科技〔2009〕52号）有关规定，经审查，国家能源局批准《光伏发电工程地质勘察规范》等204项行业标准，其中能源标准（NB）32项、电力标准（DL）172项，现予以发布。

附件：行业标准目录

国家能源局

2018年12月25日

附件：

行业标准目录

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	出版机构	批准日期	实施日期
……							
16	NB/T 10115—2018	光伏支架结构设计规程			中国计划出版社	2018-12-25	2019-05-01
……							

前　言

根据《国家能源局关于下达2011年第二批能源领域行业标准制(修)订计划的通知》(国能科技〔2011〕252号)的要求，编制组在认真总结光伏支架结构设计实践经验的基础上，通过广泛调查研究，参考有关国际标准和国外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准主要技术内容有：总则、术语、基本规定、荷载和作用组合、结构体系、构件设计、连接和节点、地基基础设计及防腐等。

本标准由国家能源局负责管理，由电力规划设计总院提出，由能源行业发电设计标准化技术委员会负责日常管理，由内蒙古电力勘测设计院有限责任公司负责具体内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送电力规划设计标准化管理中心(地址：北京市西城区安德路65号，邮政编码：100120，邮箱：bz_zhongxin@eppei.com)。

本标准主编单位、参编单位、主要起草人和主要审查人：

主 编 单 位：内蒙古电力勘测设计院有限责任公司

参 编 单 位：中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司
中国能源建设集团新疆电力设计院有限公司
中国电建集团河北省电力勘测设计研究院有限公司
同济大学

主要起草人：卢利和　赵宪忠　谢艳丽　赵　红　邢克勇
李镜培　郭小农　秦晓平　张国飞　白强强
弓建新　白秀梅　李红星　马国宏　徐　庆
王　伟　王　冉　荆　雷

主要审查人：贾　成　王文雅　胡仕林　陈守祥　陈其春
万　红　刘学新　夏　岩　吉春明　李飞舟
张所庆　白春丽　张林俊　王振尧　李淑芳

目　　次

1　总　　则 …… (1)
2　术　　语 …… (2)
3　基本规定 …… (3)
3.1　设计原则 …… (3)
3.2　变形规定 …… (3)
4　荷载和作用组合 …… (5)
4.1　风荷载 …… (5)
4.2　雪荷载 …… (7)
4.3　作用组合 …… (8)
5　结构体系 …… (11)
5.1　一般规定 …… (11)
5.2　结构体系 …… (12)
5.3　结构分析原则 …… (16)
6　构件设计 …… (17)
6.1　一般规定 …… (17)
6.2　支架柱设计 …… (17)
6.3　支架梁设计 …… (20)
6.4　檩条设计 …… (21)
6.5　支撑设计 …… (22)
7　连接和节点 …… (23)
7.1　一般规定 …… (23)
7.2　梁柱连接 …… (23)
7.3　节点 …… (23)

8 地基基础设计 …… (25)
8.1 一般规定 …… (25)
8.2 地基 …… (26)
8.3 基础 …… (28)
8.4 屋面光伏支架结构基础 …… (37)
9 防 腐 …… (39)
9.1 支架防腐 …… (39)
9.2 支架基础防腐 …… (39)
附录A 光伏组件相关技术参数 …… (41)
附录B 特殊截面特性 …… (48)
附录C 金属光伏支架柱的计算长度系数 …… (50)
本标准用词说明 …… (54)
引用标准名录 …… (55)
附:条文说明 …… (57)

Contents

1 General provisions ····· (1)

2 Terms ····· (2)

3 Basic requirements ····· (3)

3.1 Design pinciples ····· (3)

3.2 Allowable values for deformation ····· (3)

4 Actions and action effect combinations ····· (5)

4.1 Wind load ····· (5)

4.2 Snow load ····· (7)

4.3 Combination of loads and action effect ····· (8)

5 Structure system ····· (11)

5.1 General requirements ····· (11)

5.2 Structure system ····· (12)

5.3 Principles of structural analysis ····· (16)

6 Design of members ····· (17)

6.1 General requirements ····· (17)

6.2 Columns design ····· (17)

6.3 Beams design ····· (20)

6.4 Purlins design ····· (21)

6.5 Brace systems design ····· (22)

7 Connections and joints ····· (23)

7.1 General requirements ····· (23)

7.2 Connection of beam and column ····· (23)

7.3 Joints ····· (23)

8 Ground and foundations design ····· (25)

8.1 General requirements ····· (25)
8.2 Subgrade ····· (26)
8.3 Foundations ····· (28)
8.4 Foundations of roofing photovoltaic structures ····· (37)
9 Anticorrosion ····· (39)
9.1 Anticorrosion for support structures ····· (39)
9.2 Anticorrosion for fundations ····· (39)
Appendix A Relevant technical parameters of PV module ····· (41)
Appendix B Properties of special section ····· (48)
Appendix C Effective length coefficient for columns of photovoltaic modules support structures ····· (50)
Explanation of wording in this code ····· (54)
List of quoted standards ····· (55)
Addition: Explanation of provisions ····· (57)

1 总　　则

1.0.1　为了在光伏支架结构设计中贯彻执行国家的技术经济政策，做到安全适用、技术先进、经济合理、确保质量，制定本标准。

1.0.2　本标准适用于光伏支架的结构设计。

1.0.3　光伏支架结构设计除应符合本标准的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术　　语

2.0.1 光伏支架结构　　photovoltaic modules support structures

光伏系统中支承各种光伏组件的结构，包括横向抗侧力体系和纵向抗侧力体系。

2.0.2 微型桩基础　　micro pile foundation

设置于岩土中，长度小于3m的钢或混凝土等柱状结构构件。

2.0.3 刚性支架　　rigid support structures

支架节点能够有效地传递弯矩和剪力。受力变形过程中梁柱夹角保持不变，或变形微量，相对整个结构可忽略不计。

2.0.4 柔性支架　　flexible support structures

支架节点具有一定的抵抗弯矩的能力。受力变形过程中梁柱夹角可能表现出一定的柔性反应特性。

3 基本规定

3.1 设计原则

3.1.1 光伏支架结构设计除应满足承载力极限状态和正常使用极限状态外，还应满足耐久性和防腐等要求。

3.1.2 光伏电站的光伏支架设计使用年限应为25年，建筑光伏一体化的光伏支架设计使用年限应与一体化建筑主体结构一致。

3.1.3 光伏电站的光伏支架结构安全等级应为三级，建筑光伏一体化的光伏支架结构安全等级应与一体化建筑主体结构一致。

3.1.4 光伏支架结构地基基础设计使用年限应为50年，设计等级应为丙级。

3.1.5 光伏电站的光伏支架结构抗震设防类别应为丁类，建筑光伏一体化的光伏支架结构抗震设防类别应与一体化建筑主体结构一致。

3.1.6 在既有建(构)筑物上设计光伏支架结构时，应鉴定既有建(构)筑物结构的承载能力。

3.2 变形规定

3.2.1 为了不影响结构或构件的正常使用和观感，设计时应对光伏支架结构或构件挠度或侧移的变形规定相应的限值。

3.2.2 在风荷载标准值作用下，光伏支架结构柱顶的水平位移容许值应满足下列规定，且应满足工艺组件安全运行位移要求。

1 单层钢支架结构的柱顶位移不应大于柱高的1/60；

2 单层铝合金支架结构的柱顶位移不应大于柱高的1/60；

3 单层混凝土支架结构的柱顶位移不应大于柱高的1/300。

3.2.3 钢、铝合金结构或构件中受弯构件的挠度计算值宜符合表3.2.3的规定。

表3.2.3 受弯构件挠度容许值

项次	构件类别	挠度容许值
1	支架结构	$L/250$
2	檩条	$L/250$

注：1 表中 L 为构件跨度；

2 对悬臂梁，可按悬臂长度的2倍计算受弯构件的跨度；

3 混凝土受弯构件的挠度限值宜符合现行国家标准的相关规定。

3.2.4 光伏支架结构宜采用预先起拱措施控制挠度值。

4 荷载和作用组合

4.1 风 荷 载

4.1.1 光伏支架基本风压的确定应符合现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的有关规定，且不应小于 0.30kPa。重现期应按下列原则确定：

1 地面光伏支架设计时，应按 25 年重现期确定基本风压；

2 地基基础设计时，应按 50 年重现期确定基本风压；

3 建筑光伏一体化设计时，基本风压重现期应与主体结构一致。

4.1.2 垂直作用于光伏支架结构或光伏组件表面的风荷载标准值应按下列规定确定：

1 计算结构构件时，风荷载标准值应按下式计算：

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \tag{4.1.2-1}$$

式中：w_k——风荷载标准值(kN/m^2)；

β_z——高度 z 处的风振系数，对于双列或多列单坡支架结构体系，可取 1.0；对于单列单坡支架结构体系，可按照现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 计算风振系数；

μ_s——风荷载整体体型系数，可按表 4.1.3-1 的规定选用；

μ_z——风压高度变化系数，可按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 取值；对于地面光伏支架可取光伏板顶端高度；

w_0——基本风压(kN/m^2)。

2 计算非结构构件时，风荷载标准值可按下式计算：

$$w_k = \beta_{gz} \mu_{s1} \mu_z w_0 \tag{4.1.2-2}$$

式中：β_{gz}——高度 z 处的阵风系数，可按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的规定选用，对于地面光伏支架可取光伏板顶端高度；

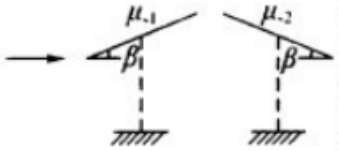
μ_{sl}——风荷载局部体型系数，可按表 4.1.3-2 的规定选用。

3 对于处在山坡上的光伏支架，风压高度变化系数除应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 中平坦地面的粗糙度类别确定外，尚应进行地形条件的修正；

4 对于建筑光伏一体化的光伏支架结构，风荷载计算应与一体化建筑主体结构一致。

4.1.3 光伏电站的光伏支架结构风荷载整体体型系数和局部体型系数宜按表 4.1.3-1、表 4.1.3-2 的规定选用。

表 4.1.3-1 风荷载整体体型系数表

类型	体型及体型系数						
整体体型系数		体型系数 \ β	≤15°	20°	30°	40°	55°
		μ_{s1}	0.8	0.85	1.0	1.3	1.3
		μ_{s2}	−0.95	−1.0	−1.3	−1.6	−1.6

注：1 中间值按线性插值法计算；

2 当光伏板阵列布置，阵列数大于 7 排时，可对两端第 2 列、第 4 行以内支架体型系数进行折减，折减系数可取 0.85；折减后的正压体型系数平均值不应小于 0.6，负压体型系数平均值不应大于 −0.9。

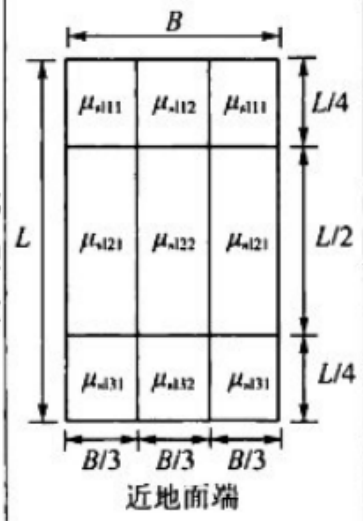
4.1.4 纵向风荷载对支架所引起的总水平力应按下列规定取值：

1 当 α 不小于 30°时，为 $0.05Aw_h$；

2 当 α 小于 30°时，为 $0.10Aw_h$。

其中，α 为光伏面板的坡度，A 为光伏面板的水平投影面积，w_h 为光伏面板高度 h 处的风压。

表 4.1.3-2　风荷载局部体型系数表

类型	体型及体型系数						
局部体型系数		体型系数 \ β	≤15°	20°	30°	40°	55°
		μ_{sl11}	−1.3	−2.1	−2.3	−2.7	−1.8
		μ_{sl12}	−1.3	−1.7	−2.2	−2.7	−1.8
		μ_{sl21}	−1.2	−1.5	−1.7	−2.1	−1.6
		μ_{sl22}	−1.0	−1.0	−1.5	−1.7	−1.6
		μ_{sl31}	−1.0	−1.0	−1.0	−1.1	−1.1
		μ_{sl32}	−1.0	−1.0	−1.0	−1.1	−1.1

注：中间值按线性插值法计算。

4.2　雪　荷　载

4.2.1　作用于光伏支架水平投影面上的雪荷载标准值应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的规定确定。

4.2.2　光伏电站的光伏支架雪荷载应按 25 年重现期确定基本雪压。当雪荷载重现期取 25 年时，基本雪压应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 附录 E.1 中规定的方法进行计算。

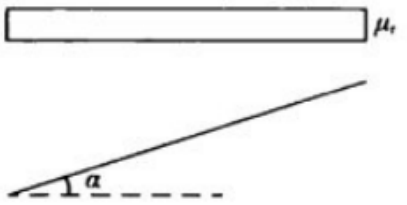
4.2.3　地基基础设计时，雪荷载应按 50 年重现期确定。

4.2.4　对于建筑光伏一体化的光伏支架结构，其基本雪压重现期应与一体化建筑主体结构一致。

4.2.5　光伏组件顶面积雪分布系数应符合下列规定：

1　单坡顶面积雪分布系数应按表 4.2.5 的规定选择；

表 4.2.5　光伏组件单坡顶面积雪分布系数

类别	光伏组件顶面形式及积雪分布系数 μ_r						
单坡顶面							
	α	≤25°	30°	35°	40°	45°	≥50°
	μ_r	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0
	中间值按线性插入法计算						

2　对于安装在建(构)筑物屋面上的光伏组件顶面积雪分布系数，尚应考虑迎风面、背风面、遮挡物等影响造成的积雪不均匀分布系数。

4.3　作 用 组 合

4.3.1　光伏支架结构设计时，应按承载能力极限状态计算结构和结构构件的强度、稳定性以及连接强度；按正常使用极限状态计算结构和结构构件的变形。

4.3.2　结构或结构构件按承载能力极限状态设计时，应采用荷载的基本组合或偶然组合计算荷载组合的效应设计值，并应按式(4.3.2)进行设计。

$$\gamma_0 S_d \leqslant R_d \tag{4.3.2}$$

式中：γ_0—　结构重要性系数，可取 1.0；

S_d—　作用组合的效应设计值；

R_d—　结构或结构构件的抗力设计值；在抗震设计时应除以承载力抗震调整系数 γ_{RE}，γ_{RE} 应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的规定取值。

4.3.3　结构或结构构件按正常使用极限状态设计时，应符合下式要求：

$$S_d \leqslant C \tag{4.3.3}$$

式中：S_d——作用组合的效应标准值，如变形、裂缝等；

C——设计对变形、裂缝等规定的相应限值，应符合现行国家标准结构设计的有关规定。

4.3.4 非抗震设计时，荷载效应的基本组合应按下式计算，取其不利值：

$$S_d = \gamma_G S_{GK} + \gamma_w \psi_w S_{WK} + \gamma_s \psi_s S_{SK} \tag{4.3.4}$$

式中：S_d——荷载组合的效应设计值；

γ_G——永久荷载的分项系数，应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的有关规定采用；

S_{GK}——永久荷载标准值的效应；光伏组件荷载技术参数可按本标准附录 A 的规定选择；

S_{WK}——风荷载标准值的效应；

S_{SK}——雪荷载标准值的效应；

γ_w、γ_s——风荷载、雪荷载的分项系数，可取 1.4；

ψ_w、ψ_s——风荷载、雪荷载的组合值系数，风荷载为主导可变荷载时，风荷载组合值系数可取 1.0，雪荷载组合值系数可取 0.7；雪荷载为主导可变荷载时，雪荷载组合值系数可取 1.0，风荷载组合值系数可取 0.6。

4.3.5 抗震设计时，结构构件的地震作用效应和其他荷载效应的基本组合应按下式计算：

$$S_d = \gamma_G S_{GE} + \gamma_{Eh} S_{EhK} + \gamma_w \psi_w S_{WK} \tag{4.3.5}$$

式中：S_d——地震组合的效应设计值；

γ_G——重力荷载的分项系数，宜取 1.2；当重力荷载效应对构件承载能力有利时，不应大于 1.0，当验算结构抗倾覆或抗滑时，不应大于 0.9；

S_{GE}——重力荷载代表值的效应，应按现行国家标准《构筑物抗震设计规范》GB 50191 的有关规定确定；

γ_{Eh}——水平地震作用分项系数，可取 1.3；

S_{EhK}——水平地震作用标准值的效应，应按现行国家标准《构

筑物抗震设计规范》GB 50191 的有关规定确定；

γ_w——风荷载作用分项系数，可取 1.4；

ψ_w——风荷载的组合值系数，宜取 0.2。

4.3.6 结构或结构构件按正常使用极限状态设计时，荷载效应采用标准组合，可按本标准式(4.3.4)计算，各荷载分项系数宜取 1.0；计算地基变形时，传至基础底面上的荷载效应应按正常使用极限状态下荷载效应的准永久值组合。

4.3.7 光伏支架设计时，宜对施工阶段进行验算，并应符合下列规定：

1 施工检修荷载宜取 1kN，也可按实际荷载取用并作用于支架最不利位置；

2 进行光伏支架构件施工检修荷载承载力验算时，荷载组合应取永久荷载和施工检修荷载进行组合；永久荷载分项系数可取 1.2，施工检修荷载的分项系数可取 1.4；

3 变形验算时，荷载组合应取永久荷载和施工检修荷载进行组合，永久荷载分项系数均取 1.0。

5 结构体系

5.1 一般规定

5.1.1 光伏支架结构体系可采用单列柱单坡结构体系、双(多)列柱单坡结构体系、独立柱结构体系，以及以平面桁架、立体桁架、空腹桁架等整体受弯为主的结构体系和以实腹钢拱、平面或立体桁架形式的拱形结构等整体受压为主的结构体系。

5.1.2 支架结构体系的支撑设置应符合下列规定：

1 在每个支架结构结构单元或温度区段应分别设置能独立构成空间稳定结构的支撑体系；在设置柱间支撑的开间宜同时设置顶面横向或水平支撑，以组成几何不变体系；当柱间支撑与顶面横向或水平支撑无法位于同一开间时，应设置可靠的内力传递构件，且不宜错开两个以上开间；

2 柱间支撑宜采用十字交叉形、人字形、八字形等型式，顶面横向或水平支撑宜采用十字形交叉支撑。当采用带张紧装置的圆钢十字形交叉支撑时，圆钢与构件的夹角应在30°～60°范围内；

3 十字形交叉支撑和柔性系杆可按拉杆设计，非十字形交叉支撑中的受压杆件及刚性系杆应按压杆设计；采用柔性支撑时，只考虑受拉支撑参与工作；

4 当对支架结构刚度有较大的要求时，可采用十字形交叉型钢支撑，十字形交叉型钢支撑的角度应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的规定；

5 柱间支撑的间距应根据支架结构纵向长度、受力情况和安装条件确定；在其柱列的柱顶应沿支架结构纵向全长设置刚性系杆；刚性系杆可由檩条兼作，此时檩条应满足对压弯杆件的刚度和承载力要求。

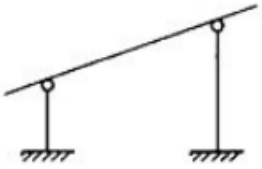
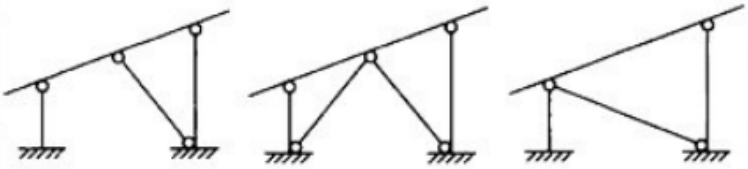
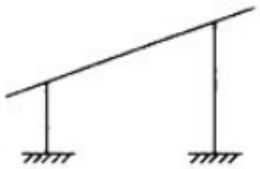
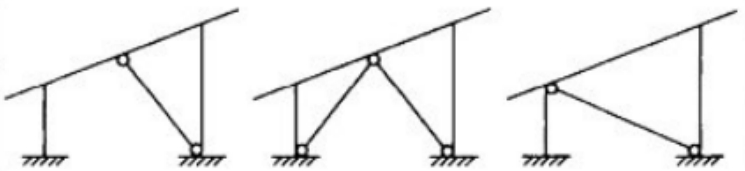
5.1.3 实腹式檩条跨度大于4m时，宜在檩条跨中位置设置拉条或撑杆，并通过斜拉条与立柱相连。拉条和撑杆的截面应按计算确定。圆钢拉条直径不宜小于10mm，撑杆的长细比不得大于200。

5.2 结构体系

Ⅰ 双列单坡支架

5.2.1 双(多)列单坡支架结构体系主要由横向抗侧力体系和纵向抗侧力体系组成。横向抗侧力体系的典型结构型式宜按表5.2.1-1的规定采用，纵向抗侧力体系的典型结构型式宜按表5.2.1-2的规定采用。

表5.2.1-1 单坡支架结构的横向抗侧力体系

序号	结构体系		具体型式	计算简图
1	排架	无支撑纯排架	单层、单跨、单坡、带悬挑梁	
		有支撑排架		
2	框架	无支撑纯框架		
		有支撑框架		

续表 5.2.1-1

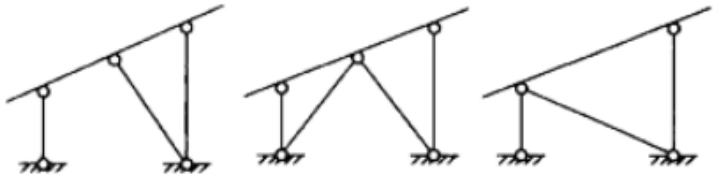
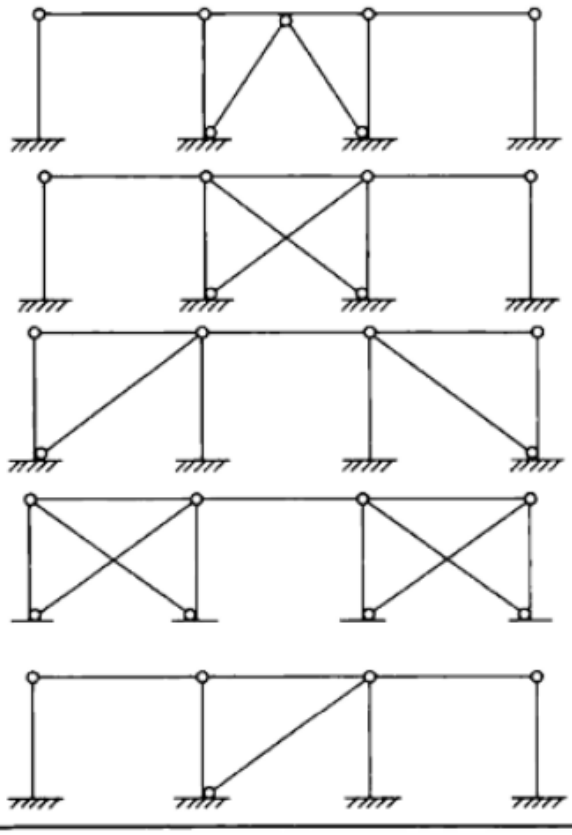
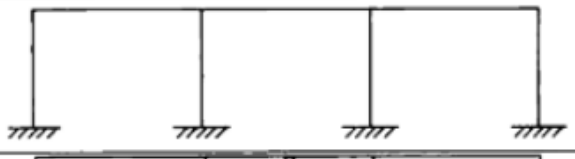
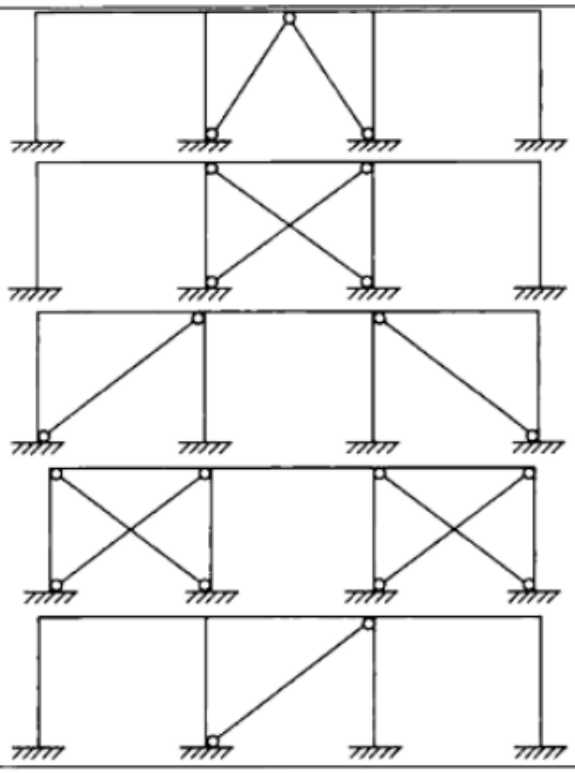
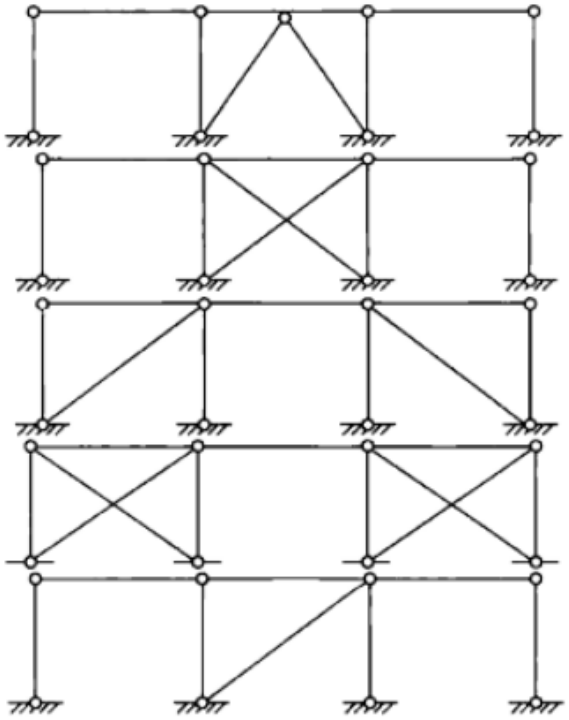
序号	结构体系		具体型式	计算简图
3	桁架式	常见类型	单层、单跨、单坡、带悬挑梁	
		三角型		

表 5.2.1-2 单坡支架结构的纵向抗侧力体系

序号	结构体系		具体型式	计算简图
1	排架	无支撑纯排架	单层、多跨	
		有支撑排架		

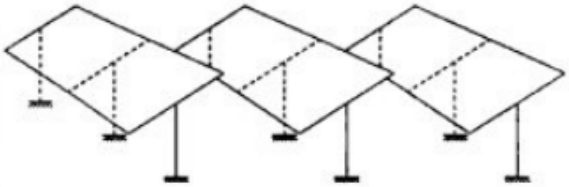
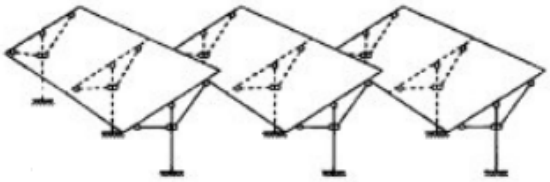
续表 5.2.1-2

序号	结构体系		具体型式	计算简图
2	框架	无支撑纯框架	单层、多跨	
		有支撑框架		
3	桁架式结构			

Ⅱ 单列单坡支架

5.2.2 单列单坡支架结构体系主要由横向抗侧力体系和纵向抗侧力体系组成。横向抗侧力体系的典型结构型式宜按表5.2.2的规定采用，纵向抗侧力体系的典型结构型式宜采用本标准表5.2.1-2中的排架体系和框架体系。

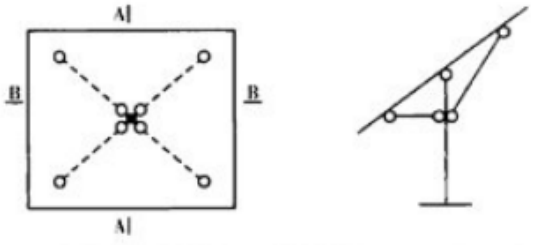
表5.2.2 单列单坡支架结构横向抗侧力体系

序号	结构体系		具体型式	计算简图
1	横向	单杆悬臂柱	单层、单列、单坡、带梁	
		多杆悬臂柱		

Ⅲ 独 立 柱

5.2.3 独立柱支架结构体系由单根立柱及其撑杆(梁)组成，宜按表5.2.3的规定采用。

表5.2.3 独立柱支架结构体系

序号	结构体系		具体型式	计算简图
1	横向 纵向	独立柱	单杆、单坡、带梁	

5.2.4 独立柱支架结构体系的设计原则应符合下列规定：

1 独立柱结构形式应与顶面光伏组件布置相协调；

2 计算简图应符合结构的连接构造和受力情况。

5.3 结构分析原则

5.3.1 光伏支架结构宜按空间杆系结构进行整体分析，也可简化为平面结构进行计算。结构分析模型和基本假定应与构件连接的实际构造相符合。

5.3.2 光伏支架的地震作用效应宜采用振型分解反应谱法计算；对于可近似于单质点体系的支架结构，也可以采用底部剪力法计算。

5.3.3 建(构)物筑顶部光伏支架应考虑建筑物高度对地震效应的放大作用。

6 构件设计

6.1 一般规定

6.1.1 光伏支架结构的构件应进行强度、稳定和变形计算，除应符合本标准外，尚应符合现行国家标准的有关规定。

6.1.2 光伏支架结构的构件及其连接件可采用冷弯薄壁型钢、铝合金、热轧钢材和钢筋混凝土等材料。材料及连接设计指标应符合现行国家标准的有关规定。

6.1.3 光伏支架结构宜按空间结构进行内力分析。

6.1.4 光伏支架结构构件材料选用冷弯薄壁型钢时，宜符合下列规定：

1 支架柱选用冷弯薄壁型钢时，可采用圆管、矩形管及槽形截面等；

2 支架梁选用冷弯薄壁型钢时，可采用矩形管、槽形、卷边U形截面或卷边槽钢截面；卷边槽钢截面特性应符合本标准附录B的规定；

3 檩条选用冷弯薄壁型钢时，可采用槽形、Z形或卷边U形截面；

4 支撑宜采用张紧的圆钢或冷弯薄壁型钢截面构件。

6.2 支架柱设计

Ⅰ 金属结构支架柱

6.2.1 金属支架柱应按偏心受压构件进行强度、整体稳定、局部稳定计算，并应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017、《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018、《铝合金结构设计规范》GB 50429的有关规定。

6.2.2 金属支架柱强度计算时，计算长度应符合下列规定：

1 在支架结构平面内，当采用单柱时应按悬臂柱确定计算长度，当采用支架结构体系时应按现行国家标准的有关规定执行；

2 在支架结构平面外，应符合下列规定：

1）沿纵向为单柱时，柱的计算长度可按下式计算：

$$H_0=\mu H \tag{6.2.2-1}$$

式中：H ——金属支架柱的高度，取支架柱顶面至基础顶面的距离；

μ——计算长度系数，应符合表 6.2.2 的规定。

表 6.2.2 沿纵向为单柱时柱的计算长度系数

支架类型	刚性支架	柔性支架	带支撑铰接支架
μ	1.5	1.25	1.0

2）沿纵向为支架结构体系时，柱的计算长度应按现行国家标准的有关规定执行。

3 柱间支撑的计算长度应符合下列规定：

1）单斜杆计算长度应按下式计算：

$$l_0=l_s \tag{6.2.2-2}$$

2）交叉连接斜杆平面内计算长度应按下式计算：

$$l_0=0.5l_s \tag{6.2.2-3}$$

式中：l_0——计算长度；

l_s— 节点中心距离、交叉点不作为节点。

3）交叉连接斜杆平面外计算长度应按下式计算：

$$l_0=\mu l_s \tag{6.2.2-4}$$

式中：μ 计算长度系数，拉杆取 1；两杆均不中断压杆的取 0.5，两杆中有一杆中断并以节点板搭接的取 0.7。

6.2.3 金属支架柱整体稳定验算时，其计算长度可遵循下列规定：

1 支架结构平面内的计算长度可遵循下列规定：

1）对于单列单坡和独立柱光伏支架结构的支架柱，其计算

长度系数可取 2.0；

2）对于无侧移双列或多列单坡光伏支架结构的支架柱，其计算长度系数可选取下列数值：当柱与基础刚接时，可取 0.7；当柱与基础铰接时，可取 1.0；

3）对于有侧移双列或多列单坡金属光伏支架结构的支架柱，其计算长度系数可按本标准附录 C 的规定确定。

2 支架结构平面外的计算长度可取侧向支撑点间的距离。

Ⅱ 钢筋混凝土结构支架柱

6.2.4 钢筋混凝土光伏支架柱应按偏心受压（拉）构件进行受压（拉）承载力、斜截面抗剪承载力计算，受扭时还应进行截面扭曲承载力计算，并应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

6.2.5 光伏支架柱计算长度可按下式计算：

$$H_0 = \mu H_1 \tag{6.2.5}$$

式中：H_1——光伏支架柱的层高度（m）；

μ——计算长度系数，可按表 6.2.5-1 和表 6.2.5-2 的规定选取。

表 6.2.5-1 支架柱与横梁铰接时支架柱计算长度系数（μ）

支架类型	支架名称	层数	单跨		双跨	
			纵向	横向	纵向	横向
单片形式	刚性支架	单层	1.5	1.5	1.5	1.5
	柔性支架		1.25	1.5	—	—
	铰接支架		1.00	1.5	—	—
空间形式	纵梁式	单层	1.00	1.5	1.00	1.5
	四柱式		1.5	1.5	—	—
	桁架式		1.00	1.00	—	—
	A 型		1.00	1.00	—	—

表 6.2.5-2　支架柱与横梁刚接时支架柱计算长度系数(μ)

支架类型	支架名称	层数	单跨		单柱		双跨	
			纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
单片形式	刚性支架	单层	1.5	1.5	1.5	2.00	1.5	1.25
	柔性支架		1.25	1.5	1.25	2.00		—
	铰接支架		1.00	1.5	1.25	2.00	-	—
空间形式	纵梁式	单层	1.00	1.5			1.00	1.25
	四柱式		1.5	1.5	—	—	—	-
	桁架式		1.00	1.00	—	—	—	—
	Λ型		1.00	1.00	—	—	—	—

6.3　支架梁设计

6.3.1　金属支架梁应按受弯构件进行强度、整体稳定、局部稳定及变形计算，必要时尚应按压弯构件进行复核，并应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017、《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018、《铝合金结构设计规范》GB 50429 的有关规定。

6.3.2　金属支架梁按压弯构件进行整体稳定性验算时，其计算长度应符合下列规定：

1　弯矩作用平面内的计算长度应取光伏支架柱及刚性支撑杆等竖向支承点间的距离；

2　弯矩作用平面外的计算长度应取檩条等侧向支承点间的距离；当支架梁两翼缘侧向支承点间的距离不等时，应取最大受压翼缘侧向支承点间的最大距离。

6.3.3　钢筋混凝土支架梁应按受弯构件进行抗弯承载力、斜截面抗剪承载力计算，受扭时还应进行截面抗扭承载力计算，并应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

6.4 檩条设计

6.4.1 光伏支架的檩条宜选用冷弯薄壁型钢，并应按照受弯构件进行截面强度和构件稳定性的验算。

6.4.2 檩条宜设计成连续构件，跨度较小时也可设计成简支构件。

6.4.3 檩条的强度计算应符合下列规定：

1 当光伏组件能阻止檩条侧向位移和扭转时，可仅按式(6.4.3-1)计算檩条在风荷载效应参与组合时的强度，而整体稳定性可不做计算：

$$\frac{M_x}{W_{enx}}+\frac{M_y}{W_{eny}}\leqslant f \tag{6.4.3-1}$$

式中：M_x、M_y——对截面主轴 x、y 轴的弯矩(kN·m)；

W_{enx}——对截面主轴 x 轴的较小有效净截面模量(cm^3)；

W_{eny}——对截面主轴 y 轴的有效净截面模量(cm^3)；

f——钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值(N/mm^2)。

2 当光伏组件不能阻止檩条侧向位移和扭转时，尚应按式(6.4.3-2)计算檩条的稳定性。

$$\frac{M_x}{\varphi_{bx}W_{ex}}+\frac{M_y}{W_{ey}}\leqslant f \tag{6.4.3-2}$$

式中：φ_{bx}——受弯构件的整体稳定系数；

W_{ex}、W_{ey}——对主轴 x 和主轴 y 的受压翼缘侧的有效截面模量(cm^3)。

6.4.4 檩条构件中受压板件的局部稳定验算应按现行国家标准《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018 的规定计算。

6.4.5 开口截面檩条构件符合下列情况之一时，可不考虑畸变屈曲对构件承载力的影响：

1 构件受压翼缘有可靠的限制畸变屈曲变形的约束；

2 构件自由长度小于构件畸变屈曲半波长 λ。畸变屈曲半波长 λ 可按下列公式计算：

1）对轴压卷边槽形截面，λ 可按下列公式计算：

$$\lambda = 4.8\left(\frac{I_x h_w b^2}{t^3}\right)^{0.25} \tag{6.4.5-1}$$

$$I_x = a^3 t(1 + 4b/a)/[12(1 + b/a)] \tag{6.4.5-2}$$

2）对受弯卷边槽型和 Z 形截面，λ 可按下式计算：

$$\lambda = 4.8\left(\frac{I_x h_w b^2}{2t^3}\right)^{0.25} \tag{6.4.5-3}$$

式中：λ——畸变屈曲半波长；

I_x——对 x 轴的毛截面惯性矩（cm^4）；

h_w——高度（mm）；

b——翼缘宽度（mm）；

t——壁厚（mm）；

a——卷边高度（mm）。

3 构件截面采取了其他有效抑制畸变屈曲发生的措施。

6.4.6 当檩条兼作撑杆，或在计算光伏支架梁柱构件中考虑光伏组件的蒙皮效应时，檩条应按压弯构件进行截面强度和构件稳定性的验算。

6.5 支撑设计

6.5.1 光伏支架结构中的交叉支撑和柔性系杆可按轴心受拉构件设计，非交叉支撑的受压杆件及刚性系杆应按轴心受压构件设计。

6.5.2 光伏支架斜梁上横向水平支撑的内力应根据该柱列所受纵向风荷载，按支承于柱顶的水平桁架计算，对于交叉支撑可不计压杆的受力。

6.5.3 按平面结构进行计算时，光伏支架柱间支撑的内力可根据该柱列所受纵向风荷载按支承于柱脚基础上的竖向悬臂桁架计算，对于交叉支撑可不计压杆的受力。当同一柱列设有多道柱间支撑且柱顶设有通长刚性系杆时，纵向力可按刚度分配至每道柱间支撑。

7 连接和节点

7.1 一般规定

7.1.1 光伏支架结构的连接和节点应满足承载力要求，其构造形式应保证传力简捷明确、构造合理、安全可靠。

7.1.2 光伏支架主体结构构件之间的连接宜采用螺栓连接。

7.1.3 有抗震设防要求时，节点的承载力应大于构件的承载力。

7.1.4 光伏组件与光伏支架之间的连接宜采用定型的铝合金压块标准件、轨槽插入式或螺栓固定形式。

7.2 梁柱连接

7.2.1 梁与柱的连接宜采用柱贯通型连接方式。

7.2.2 梁与柱连接可采用螺栓连接、焊接连接、栓焊混合连接。

7.2.3 梁与柱的连接应按现行国家标准的有关规定进行下列验算：

1 连接焊缝和螺栓的强度验算；

2 柱腹板的抗压承载力验算；

3 柱翼缘的抗拉承载力验算；

4 柱腹板的抗拉承载力验算；

5 梁柱节点域承载力验算。

7.2.4 装配式钢筋混凝土结构支架梁柱节点应进行强度验算。

7.3 节　　点

7.3.1 节点设计应根据结构的重要性与受力特点、荷载情况、工作环境和材料截面型式等因素选用适当的节点连接形式。节点构造应符合结构计算假定，传力可靠，减小应力集中。

7.3.2 节点设计应满足承载力极限状态要求，防止节点因强度破坏、局部失稳、变形过大、连接开裂等引起节点失效。当有抗震设防要求时，尚应按照相关规定进行地震作用组合验算。

7.3.3 节点设计宜采用螺栓连接，且连接螺栓对称布置。

7.3.4 檩条与檩条相连接时，其搭接长度或连接件长度及其连接螺栓的直径应按连续檩条处承受的弯矩确定，且连接螺栓的个数不宜少于3个。

7.3.5 檩条与支架梁连接处可采用简支连接或连续连接，连接方式宜采用有檩托板的螺栓连接。

7.3.6 圆钢支撑与光伏支架柱连接可用连接板连接，也可直接与柱腹板连接。当和柱腹板直接连接时，应设置角钢垫块或楔形垫块。圆钢端部应设丝扣或采用花篮螺栓，待校正定位后应张紧圆钢支撑。计算圆钢支撑受拉承载力时，应采用螺纹处的有效截面面积。

7.3.7 柱脚可采用埋入式柱脚、插入式柱脚及外包式柱脚，也可采用外露式柱脚。柱脚宜采用埋入式柱脚或外露式柱脚。

7.3.8 外露式柱脚锚栓不宜用以承受柱脚底部的水平反力，此水平反力由底板与混凝土基础间的摩擦力或设置抗剪键承受。抗剪键与柱脚底板的焊缝应等强焊接，其埋深可按下式计算：

$$h \geqslant 1.45 \frac{V}{f_c b} \tag{7.3.8}$$

式中：h——抗剪键埋深(mm)；

V——柱脚剪力(N)；

f_c——混凝土轴心抗压强度设计值(N/mm²)；

b——抗剪键宽度(mm)。

注：外露式柱脚底板与混凝土基础间摩擦力的摩擦系数可取0.4。

8 地基基础设计

8.1 一般规定

8.1.1 光伏支架结构基础的形式可分为柱下独立基础、条形基础、微型桩基础及岩石锚杆基础等。

8.1.2 光伏支架基础应进行承载力验算和稳定性验算，包括竖向承载力验算、基础结构强度验算、地基变形验算及稳定性验算等。

8.1.3 地基主要受力层范围内不存在软弱黏性土层的单层光伏支架结构，可不进行天然地基及基础的抗震承载力验算。

注：软弱黏性土层指设防烈度为7度、8度和9度时地基承载力特征值分别小于80kPa、100kPa和120kPa的土层。

8.1.4 微型桩基础宜选择有代表性的场地进行原位试验。微型工程桩进行单桩竖向承载力和桩身完整性试验检测时，应符合下列规定：

1 微型桩竖向承载力检测数量不应少于同一条件下分项工程总桩数的1‰，且不应少于3根；

2 微型桩桩身完整性检测数量不应少于同一条件下分项工程总桩数的2%，且不应少于10根；

3 有经验时微型桩检测可采用动测法，动测法检测应符合现行行业标准《基桩动测仪》JG/T 518的有关规定。

8.1.5 微型桩单桩水平承载力特征值通过微型工程桩水平静载试验确定时，试验可采用单向多循环加载法、慢速维持荷载法或快速维持荷载法。慢速维持荷载法标准应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007的有关规定。

8.1.6 微型桩单桩竖向抗拔静载试验可采用多循环加载方法、慢

速维持荷载法或多循环卸载方法。试验标准应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定。

8.2 地　　基

Ⅰ 地基计算

8.2.1 地基基础设计时，应根据地基与基础结构条件分别进行承载力计算。当符合下列情况之一时，应进行地基变形验算：

1 在基础上及其附近有地面堆载，可能引起地基产生过大的不均匀沉降时；

2 地基内有厚度较大或厚薄不均的填土，其自重固结未完成时；

3 同一阵列基础位于性质差异较大的土层，可能产生过大的不均匀沉降时。

8.2.2 地基基础的变形计算值应满足上部光伏支架及其光伏组件正常安全运行对变形的要求，宜符合表 8.2.2 的规定。

表 8.2.2 光伏支架结构地基变形允许值

支架结构形式	相邻基础的沉降差	基础的沉降量(mm)
框架结构	0.003l	120
当基础不均匀沉降时不产生附加应力的结构	0.005l	
单层排架结构	—	

注：1 l 为相邻柱基的中心距离(mm)；

2 当有可靠经验时可适当调整允许值；

3 对表中未包括的光伏支架结构，其地基变形允许值可根据结构对地基变形的适应能力和使用上的要求确定。

8.2.3 建造在斜坡场地上和软土地基上有大面积堆载场地的光伏支架结构，除应满足地基承载力和地基变形要求外，尚应验算地基稳定性；地基稳定性计算除应符合本标准外，尚应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定。

8.2.4 计算地基沉降时，传至基础底面上的荷载效应应按正常使用极限状态下荷载效应的准永久组合，不计入风荷载和地震作用。

8.2.5 地基的最终沉降量宜按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 或地区规范的有关规定计算，并应考虑相邻基础的影响。沉降计算经验系数宜根据地区沉降观测资料及类似工程经验确定，或按地区规范采用，当无地区经验时，可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的规定采用。

Ⅱ 软弱地基

8.2.6 当光伏支架场地存在软弱地基时，应采取如下措施控制光伏支架结构地基的变形和不均匀沉降：

1 对单层光伏支架结构可采用排架或三铰拱架等静定结构；

2 对预估沉降量较大的光伏支架结构，应适当提高光伏支架结构设计地坪和有关部位的标高；

3 应加强基础的刚度和强度。根据地基软弱程度和上部结构情况，采用条形、十字交叉条形或联合基础。

Ⅲ 山区地基

8.2.7 光伏支架场地应避开有潜在威胁或直接危害的滑坡、泥石流、崩塌或危石滚石以及岩溶、土洞发育程度高的地段。

8.2.8 山区建设中应采取措施防止地面水对地基的不良影响，以及导致建设场地滑坡、溶蚀等不良地质现象。

8.2.9 对山地厂区在平整场地前，应根据结构类型、填料种类、性能和现场施工条件，对压实填土提出质量要求，对未经检验及不符合质量要求的压实填土，均不得作为建筑工程的地基持力层。

8.2.10 山区建设中暗沟(槽)、暗塘、冲沟等欠固结的地基不宜采用天然地基。当建设场地采用压实填土地基时，地基设计应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定。

Ⅳ 湿陷性黄土地基

8.2.11 单层光伏支架地基基础可按现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》GB 50025 中丁类建筑的有关规定进行设计。

Ⅴ 膨胀土地基

8.2.12 光伏支架地基基础可按现行国家标准《膨胀土地区建筑技术规范》GB 50112 中设计等级为丙级的有关规定进行设计。

Ⅵ 冻土地基

8.2.13 光伏支架地基基础可按现行行业标准《冻土地区建筑地基基础设计规范》JGJ 118 的有关规定进行设计。

8.3 基 础

8.3.1 光伏支架结构基础的形式应依据地基变形量、地基承载力以及布置情况，并结合上部结构特点和使用要求合理确定。

Ⅰ 微型桩基础

8.3.2 光伏支架结构微型桩基础可采用单根或单排无承台形式，按材料可分为微型混凝土桩基础和微型钢桩基础。微型钢桩宜采用冷弯薄壁钢管桩、普通钢管桩或螺旋钢管桩等，按受力情况可分为摩擦型和摩擦承压型微型桩基础。

8.3.3 微型桩基础竖向承载力计算应符合下列规定：

1 按荷载效应标准组合时，在轴心竖向力作用下应满足式(8.3.3-1)的要求：

$$N_{Mk} \leqslant R \tag{8.3.3-1}$$

在偏心竖向力作用下，除应符合式(8.3.3-1)外，尚应满足式(8.3.3-2)的要求：

$$N_{Mkmax} \leqslant 1.2R \tag{8.3.3-2}$$

2 按地震作用效应和荷载效应标准组合时，在轴心竖向力作用下，应符合式(8.3.3-3)的要求：

$$N_{MEk} \leqslant 1.25R \tag{8.3.3-3}$$

在偏心竖向力作用下，除应符合式(8.3.3-3)外，尚应符合式(8.3.3-4)的要求：

$$N_{MEkmax} \leqslant 1.5R \tag{8.3.3-4}$$

式中：N_{Mk}——荷载效应标准组合轴心竖向力作用下微型桩顶平

均竖向力(kN)；

N_{Mkmax}——荷载效应标准组合偏心竖向力作用下微型桩顶最大竖向力(kN)；

N_{MEk}——地震作用效应和荷载效应标准组合下微型桩顶平均竖向力(kN)；

N_{MEkmax} 地震作用效应和荷载效应标准组合下微型桩顶最大竖向力(kN)；

R 微型桩的竖向承载力特征值(kN)。

8.3.4 微型桩竖向承载力特征值 R 应按下式计算：

$$R=Q_{Muk}/K \tag{8.3.4}$$

式中：Q_{Muk} —— 微型单桩竖向极限承载力标准值(kN)；

K 安全系数，可取 2。

8.3.5 当根据土的物理指标与承载力参数之间的经验关系确定微型单桩竖向极限承载力标准值时，宜按下列公式估算：

$$Q_{Muk}=Q_{Msk}+Q_{Mpk} \tag{8.3.5-1}$$

$$Q_{Msk}=u\sum q_{sik}l_i \tag{8.3.5-2}$$

$$Q_{Mpk}=q_{pk}A_p \tag{8.3.5-3}$$

式中：Q_{Muk}——微型单桩竖向极限承载力标准值(kN)；

Q_{Msk}、Q_{Mpk}——微型单桩总极限侧阻力、总极限端阻力标准值(kN)；

u——微型桩身周长(m)；

q_{sik}——微型单桩第 i 层土的桩侧极限侧阻力标准值(kPa)，如无当地经验时可按现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94—2008 表 5.3.5-1 的规定取值；微型钢桩桩侧极限侧阻力标准值(kPa)可取混凝土预制桩相同值；

l_i——桩侧第 i 层土的厚度(m)；

q_{pk}——微型单桩极限端阻力标准值(kPa)，如无当地经验时可按现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94

的规定取值；微型钢桩极限端阻力标准值（kPa）可取混凝土预制桩相同值。

8.3.6 当微型桩桩端支承在岩石上时可按端承桩考虑，此时桩的承载力主要由桩身材料强度控制。桩身材料强度可按现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 的相关规定进行计算。

8.3.7 受水平荷载的微型单桩基础应满足下式要求：

$$H_{Mik} \leqslant R_{Ha} \tag{8.3.7}$$

式中：H_{Mik}——相应于作用的标准组合时作用于任一微型单桩顶处的水平力（kN）；

R_{Ha}——微型单桩水平承载力特征值（kN）。

8.3.8 微型桩基础的水平承载力特征值的确定应符合下列规定：

1 对于微型钢筋混凝土预制桩、钢桩、桩身配筋不小于0.65%的灌注桩，可根据静载试验结果取地面水平处位移为10mm所对应的荷载的75%为微型单桩基础水平承载力特征值；

2 对于桩身配筋小于0.65%的微型灌注桩，可取微型单桩水平静载荷试验的临界荷载的75%为微型单桩基础水平承载力特征值；

3 当微型桩的水平承载力由水平位移控制，且缺少微型单桩水平静载荷试验资料时，对于微型预制桩、钢桩、桩身配筋不小于0.65%的灌注桩单桩水平承载力特征值，可按现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 的相关规定进行估算。

8.3.9 微型桩基础设计与构造应符合下列规定：

1 所有微型桩基础均应进行承载力和桩身强度计算，对微型混凝土预制桩基础尚应进行施工等过程中的强度和抗裂验算；

2 微型桩基础沉降验算时，最终沉降量宜按单向压缩分层总和法计算；

3 微型桩基础的抗震承载力验算除应符合本标准外，尚应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定；

4 位于坡地、岸边的微型桩基础应进行基础的整体稳定验算；

5 微型桩基础端部进入持力层的深度不宜小于微型桩边长或直径的3倍；

6 微型混凝土桩基础采用的材料、最小水泥用量、水胶比、抗渗等级等应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010、《工业建筑防腐蚀设计规范》GB 50046、《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476的有关规定；

7 微型混凝土桩基础的主筋配置应经计算确定；微型混凝土预制桩基础的最小配筋率不宜小于0.6%（静压沉桩）、0.8%（锤击沉桩），微型混凝土预制桩基础的最小配筋率不宜小于0.5%；微型混凝土灌注桩基础的最小配筋率不宜小于0.65%；

8 腐蚀环境中的微型混凝土灌注桩基础主筋直径不宜小于16mm，非腐蚀环境中微型混凝土灌注桩基础主筋直径不应小于12mm；

9 微型混凝土灌注桩基础主筋保护层不应小于50mm，微型混凝土预制桩基础不应小于45mm，微型混凝土预应力管桩基础不应小于35mm，腐蚀环境中的微型混凝土灌注桩基础不应小于55mm；

10 微型混凝土灌注桩基础浇筑应一次完毕，不允许留设施工缝；微型桩基础的质量控制应保证达到设计要求深度。

8.3.10 微型桩基础的检验、监测与质量验收除应符合本标准外，尚应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007、《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB 50202的有关规定。

Ⅱ 岩石锚杆基础

8.3.11 岩石锚杆基础设计时，应符合国家现行标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007、《岩土锚杆（索）技术规程》CECS 22的有关规定。

Ⅲ 稳定性计算

8.3.12 当光伏支架结构承受的水平荷载较大、竖向荷载相对较小时，应按下式进行基础抗滑移验算：

$$H_k \leqslant (F_k + G_k) \cdot \mu_m / K_h \tag{8.3.12}$$

式中：H_k——相应于作用的标准组合时，上部结构作用于基础底面的水平力(kN)；

F_k——相应于作用的标准组合时，上部结构作用于基础的竖向力(kN)，当为竖向拔力时取负值；

G_k——基础自重及其上的土重标准值(kN)；

K_h——基础抗滑移稳定系数，可取 1.3；

μ_m——基础底面对地基的摩擦系数，由试验确定；无试验数据时，可按表 8.3.12 的规定采用。

表 8.3.12 基础底面对地基的摩擦系数 μ_m

土的类别		摩擦系数
黏性土	可塑	0.25～0.30
	硬塑	0.30～0.35
	坚硬	0.35～0.40
粉土	饱和度 $S \leqslant 0.5$	0.30～0.40
中砂、粗砂、砾砂		0.40～0.50
碎石土		0.40～0.60
软质岩		0.40～0.60
表面粗糙的硬质岩石		0.65～0.75

注：1 对易风化的软质岩和塑性指数 I_P 大于 22 的黏性土，其 μ_m 值应通过试验确定。

2 对碎石，可根据其密实度、填充物状况、风化程度等确定。

8.3.13 光伏支架基础应按下式进行抗拔稳定性验算：

$$N_k \leqslant G_k / K_t \tag{8.3.13}$$

式中：N_k——相应于作用的标准组合时，基础所承受的上拔力(kN)；

K_b——上拔设计稳定系数，可取 1.6。

8.3.14 独立基础、条形基础的抗倾覆稳定性应按下列公式验算：

$$M_{kX} \leqslant (F_k + G_k) \cdot e_X / K_q \qquad (8.3.14\text{-}1)$$

$$M_{kY} \leqslant (F_k + G_k) \cdot e_Y / K_q \qquad (8.3.14\text{-}2)$$

式中：M_{kX}——相应于作用的标准组合时，基础底面的 X 方向外力矩(kN·m)；

M_{kY}——相应于作用的标准组合时，基础底面的 Y 方向外力矩(kN·m)；

e_X——竖向合力(F_k+G_k)对基础 X 方向基础边缘倾覆点的距离(m)；

e_Y——竖向合力(F_k+G_k)对基础 Y 方向基础边缘倾覆点的距离(m)；

K_q——抗倾覆设计稳定系数，可取 1.6。

8.3.15 微型桩基础的整体稳定性验算(图 8.3.15)应符合下列规定：

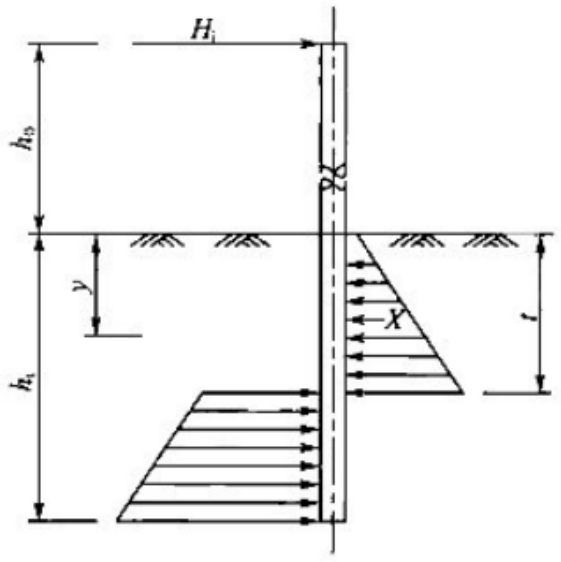


图 8.3.15 微型桩基础整体稳定性计算简图

注：1 微型桩基础在达到水平抗力或极限倾覆力时，假定微型桩基础侧向土壤达到极限平衡状态，此时依靠微型桩基础侧面的被动土压力 X 平衡；

2 被动土压力的分布假定沿深度线性变化，被动土压力 $X(y) = my$。

1　验算应满足式(8.3.15-1)的要求：

$$R_H \geqslant K_{M_w} H_i \tag{8.3.15-1}$$

式中：R_H——微型桩基础整体稳定性验算水平抗力(kN)；

H_i——相应于作用的标准组合时，作用于微型桩基础顶部的水平力(kN)；

K_{Mw}——微型桩基础整体稳定系数，可取 1.1。

2　微型桩基础整体稳定性验算水平抗力应按下式计算：

$$R_H = m b_0 h_i^2 / \eta \mu_{cm} \tag{8.3.15-2}$$

$$\eta = h_0 / h_i \tag{8.3.15-3}$$

$$\mu_{cm} = 3/(1 - 2\theta^3) \tag{8.3.15-4}$$

$$\theta = t/h_i \tag{8.3.15-5}$$

式中：m——土压力参数(kN/m³)；

b_0——微型桩基础的计算宽度(m)；

h_i——微型桩基础的埋置深度(m)；

η——桩顶水平作用力距设计地面高度与微型桩基础的埋置深度比值；

μ_{cm}——微型桩基础与土接触面积间的摩阻系数；

h_0——H_i作用点至设计地面处的距离(m)；

θ——地基压力扩散线与垂直线的夹角，可按表 8.3.15-4 确定；

t——微型桩基础土压力反弯点深度(m)。

3　土对微型桩基础的外摩擦角应按下式计算：

$$m = \gamma_s \tan^2\left(45° + \frac{\beta}{2}\right) \tag{8.3.15-6}$$

式中：γ_s——基础底面以上土的加权平均重度(kN/m³)，按表 8.3.15-1确定；

β——等代内摩擦角(°)，可按表 8.3.15-1 确定。

表 8.3.15-1　土参数、等代内摩擦角

土名 / 参数	坚硬、硬塑黏土、粉质黏土、密实粉土	可塑黏土、粉质黏土、中密粉土	软塑黏土、粉质黏土、稍密粉土	粗砂、中砂	细砂、粉砂
γ_s(kN/m³)	17	16	15	17	15
β(°)	35	30	15	35	30

4　微型桩基础的计算宽度 b_0 应按下式计算：

$$b_0 = bK_0 \tag{8.3.15-7}$$

$$K_0 = 1 + \frac{2h}{3b}\xi\cos\left(45° + \frac{\beta}{2}\right)\tan\beta \tag{8.3.15-8}$$

式中：b——微型桩基础的实际宽度(m)；

K_0——空间增大系数，可按式(8.3.15-8)或表 8.3.15-2 确定；

ξ——土的侧压力系数，可按表 8.3.15-3 的规定取值。

表 8.3.15-2　空间增大系数 K_0 值

β		15°	30°	30°	35°		
土名		黏土、粉质黏土、粉土		粉砂、细砂	黏土	粉质黏土、粉土	粗砂、中砂
h/b	11	1.72	2.28	1.81	2.71	2.41	1.90
	10	1.65	2.16	1.73	2.56	2.28	1.82
	9	1.59	2.05	1.66	2.40	2.15	1.74
	8	1.52	1.93	1.58	2.23	2.02	1.66
	7	1.46	1.81	1.51	2.08	1.90	1.57
	6	1.39	1.70	1.44	1.93	1.77	1.49
	5	1.33	1.58	1.37	1.78	1.63	1.41
	4	1.26	1.46	1.29	1.62	1.51	1.33
	3	1.20	1.35	1.22	1.46	1.38	1.25
	2	1.13	1.23	1.15	1.31	1.25	1.16
	1	1.07	1.12	1.08	1.15	1.13	1.08
	0.8	1.05	1.09	1.06	1.12	1.10	1.07
	0.6	1.04	1.07	1.05	1.09	1.08	1.05

表 8.3.15-3　土的侧压力系数 ξ

土的名称	黏性土	粉质黏土、粉土	砂土
侧压力系数 ξ	0.72	0.6	0.38

5　地基压力扩散线与垂直线的夹角 θ 可由下式求得，式中 η 值、θ 值见表 8.3.15-4。

$$\theta^3+\frac{3}{2}\theta^2\eta-\frac{3}{4}\eta-\frac{1}{2}=0 \qquad (8.3.15\text{-}9)$$

表 8.3.15-4　比值 η 及夹角 θ 值

η	θ	η	θ
0.10	0.784	5.00	0.720
0.25	0.774	6.00	0.718
0.50	0.761	7.00	0.716
1.00	0.746	8.00	0.715
2.00	0.732	9.00	0.714
3.00	0.725	10.00	0.713
4.00	0.722		

8.3.16　微型钢桩基础的压屈稳定性验算宜满足下列要求：

$$N_{Mmax}\leqslant P_a \qquad (8.3.16\text{-}1)$$

$$P_{cr}=\pi^4 EI/l^2+E_{sp\,y}l^2/\pi^2 \qquad (8.3.16\text{-}2)$$

式中：N_{Mmax}——地震作用效应和荷载效应标准组合下，微型钢桩桩顶最大竖向力(kN)；

P_a——微型钢桩的压曲临界荷载(kN)；

E——微型钢桩横截面弹性模量(MPa)；

I——微型钢桩横截面最小惯性矩(m^4)；

l——微型钢桩侧向约束长度（m)；

$E_{sp\,y}$——土侧向弹性模量(MPa)，即微型钢桩 p-y 曲线的斜率。

8.4 屋面光伏支架结构基础

8.4.1 屋面光伏支架结构基础设计应与工艺和建筑专业配合；柱基础在屋面上的布置应合理确定，且应符合下列规定：

1 基础布置不应跨越屋面变形缝；

2 基础布置不应影响所在屋面部位的建筑防水、排水和雨水排放；

3 基础结构形式应满足系统的检修、更新与维护要求。

8.4.2 在既有建筑屋面上设置光伏支架时，支架立柱架宜设在屋面梁上。与屋面坡度相同时，支架梁与屋面板的连接设计应满足承载力的要求，同时支架梁的受力点宜作用在能承受额外组件支架重量的次梁、檩条或主梁上，不宜以彩钢板屋面作为受力点。

8.4.3 屋面光伏支架结构基础设计应进行抗拔、抗滑移和抗倾覆等稳定性验算。

8.4.4 在新建或既有建筑屋面上布置柔性光伏支架结构时，光伏支架结构可按单层结构计算。

8.4.5 对于布置支架结构基础的新建或既有建筑屋面结构设计，应根据使用过程中作用在新建或既有建筑上的支架基础荷载，按承载能力极限状态和正常使用极限状态分别进行荷载组合。

8.4.6 在既有建筑上的支架基础布置时，应对既有建筑的结构设计、结构材料、耐久性、布置基础部位的屋面的构造及承载力等进行复核验算，并应满足建筑结构及其他相应的安全性能要求。

8.4.7 布置在新建建筑上的屋面光伏支架基础应考虑其传递的荷载效应。基础设计应符合下列规定：

1 设置钢筋混凝土支墩时，支墩的主筋应锚固在主体结构内，支墩顶预留埋件或地脚螺栓与支架连接，否则应埋设预埋件或其他连接件；

2 连接件与主体结构的锚固承载力设计值应大于连接件本身的承载力设计值。

8.4.8 在既有混凝土结构建筑屋面增设光伏支架时，宜采用化学锚栓连接，也可采用预制混凝土基础。当采用化学锚栓连接时，其构造要求应符合下列规定：

1 每个连接节点锚栓数量不应少于2个，直径不应小于10mm；

2 承载力设计值不应大于其选用材料极限承载力的50%；

3 化学锚栓的设计应符合现行行业标准《混凝土结构后锚固技术规程》JGJ 145的有关规定，并且在基础下部应增设附加防水层。

9 防　　腐

9.1 支架防腐

9.1.1 支架结构防腐根据材质应按照现行国家标准《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476、《工业建筑防腐蚀设计规范》GB 50046、《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018、《铝合金建筑型材》GB/T 5237 和现行行业标准《建筑钢结构防腐蚀技术规程》JGJ/T 251 等的相关规定设计。

9.1.2 光伏组件表面进行水清洗维护时，应采用对支架结构无腐蚀作用的清洗液，水质应满足清洁水的要求。

9.2 支架基础防腐

9.2.1 支架基础腐蚀性等级的划分和防腐措施应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 和《工业建筑防腐蚀设计规范》GB 50046 的有关规定。

9.2.2 支架基础应根据所处环境的腐蚀性等级采取合理的结构型式和适宜的防腐措施。

9.2.3 设计使用年限不少于 50 年时，混凝土微型桩基础的强度等级应符合下列规定：

1 非腐蚀环境中预制微型桩基础的混凝土强度等级不应低于 C30，预应力微型墩桩基础不应低于 C40，灌注微型墩桩基础的混凝土强度等级不应低于 C25；

2 二 b 类、三类及四类、五类微腐蚀环境中不应低于 C30；

3 腐蚀环境中的微型墩桩基础，其自身混凝土的强度等级应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定。

9.2.4 微型钢桩防腐处理应符合下列规定：

1　当无实测资料时，微型钢管桩的腐蚀速率可按表 9.2.4 的规定选取。

表 9.2.4　微型钢管桩年腐蚀速率

微型钢管桩所处环境		腐蚀速率(mm/a)
地面以上	无腐蚀性气体或腐蚀性挥发介质	0.05 ～ 0.1
地面以下	水位以上	0.05
	水位以下	0.03
	水位波动区	0.1 ～ 0.3

2　微型钢管桩防腐处理可采用外表面涂防腐层、增加腐蚀余量及阴极保护；当钢管螺旋微型桩内壁同外界隔绝时，可不考虑内壁防腐。

9.2.5　支架基础应根据所处环境的类别、腐蚀情况加强定期维护。

附录 A　光伏组件相关技术参数

表 A.0.1　CGS 型光伏组件技术参数表

型号	规格				
	电池	峰瓦值 P_m(Wp)	组件尺寸 (mm)	质量 (kg)	组件层结构
CGS-40H/1245×35	非晶硅	46	1245×635×7	12.4	超白玻璃(3)+EVA(0.36)+普通玻璃(3)
CGS-NB33	非晶硅	117	1245×1910×10	57	超白玻璃(3)+EVA(0.6)+非晶硅光电玻璃(3)+EVA(0.6)+钢化玻璃(3)
CGS-NB34	非晶硅	115	1245×1910×12	69	超白玻璃(4)+EVA(0.6)+非晶硅光电玻璃(3)+EVA(0.6)+钢化玻璃(4)
CGS-NB25	非晶硅	76	1245×1275×14	56	超白玻璃(5)+EVA(0.6)+非晶硅光电玻璃(3)+EVA(0.6)+钢化玻璃(5)
CGS-NB26	非晶硅	75	1245×1275×16	65	超白玻璃(6)+EVA(0.6)+非晶硅光电玻璃(3)+EVA(0.6)+钢化玻璃(6)
CGS-NB-G160NB	非晶硅	72	1300×2200×14	102	超白玻璃(5)+EVA(0.6)+非晶硅光电玻璃(3.2)+EVA(0.6)+钢化玻璃(5)
CGS-NB-G170B	非晶硅	108	2600×1100×14	102	超白玻璃(5)+EVA(0.6)+非晶硅光电玻璃(3.2)+EVA(0.6)+钢化玻璃(5)

表 A.0.2　RX/RXJP/RXZK 型光伏组件技术参数表

型号	规格				
	电池	峰瓦值 P_m(Wp)	组件尺寸 (mm)	质量 (kg)	组件层结构
RX-DBF90	单晶硅	90	1198×553×35	8.5	钢化玻璃(3.2)+EVA(0.5)+单晶电池片(0.2)+EVA(0.5)+TPT(0.35)
RX-DBG180	单晶硅	180	1579×807×35	15.5	钢化玻璃(3.2)+EVA(0.5)+单晶电池片(0.2)+EVA(0.5)+TPT(0.35)
RX-MBF70	多晶硅	70	780×670×35	6.2	钢化玻璃(3.2)+EVA(0.5)+多晶电池片(0.2)+EVA(0.5)+TPT(0.35)
RX-MBF140	多晶硅	140	1490×670×35	12	钢化玻璃(3.2)+EVA(0.5)+多晶电池片(0.2)+EVA(0.5)+ TPT(0.35)
RX-MBM230	多晶硅	230	1651×995×50	23.5	钢化玻璃(3.2)+EVA(0.5)+多晶电池片(0.2)+EVA(0.5)+ TPT(0.35)
RXJP-ABS95	非晶硅	95	1308×1108×38	28	薄膜电池片(3.2)+PVB(0.76)+钢化玻璃(3.2)
RXZK-ABS90	非晶硅	90	1300×1100×23	50	钢化玻璃(5)+A(9)+薄膜电池片(3.2)+PVB(0.76)+钢化玻璃(5)

表 A.0.3　SY-PS/PD 型光伏组件技术参数表

型号	规格				
	电池	峰瓦值 P_m(Wp)	组件尺寸 (mm)	质量 (kg)	组件层结构
SY-PS80	多晶硅	80	755×677×35	7.2	超白钢化玻璃(3.2)+EVA(0.5)+电池片(0.19)+EVA(0.5)+TPT(0.35)
SY-PS105	多晶硅	105	989×677×35	9.4	超白钢化玻璃(3.2)+EVA(0.5)+电池片(0.19)+EVA(0.5)+TPT(0.35)
SY-PS145	多晶硅	145	1457×677×35	13.6	超白钢化玻璃(3.2)+EVA(0.5)+电池片(0.19)+EVA(0.5)+TPT(0.35)
SY-PD80	多晶硅	80	1552×677×35	15.2	超白钢化玻璃(3.2)+EVA(0.5)+电池片(0.19)+EVA(0.5)+普通半钢化玻璃(3)
SY-PD105	多晶硅	105	1084×677×35	10.2	超白钢化玻璃(3.2)+EVA(0.5)+电池片(0.19)+EVA(0.5)+普通半钢化玻璃(3)
SY-PD145	多晶硅	145	830×677×35	7.8	超白钢化玻璃(3.2)+EVA(0.5)+电池片(0.19)+EVA(0.5)+普通半钢化玻璃(3)

表 A.0.4　STP/PLUT 型光伏组件技术参数表

型号	规格				
	电池	峰瓦值 P_m(Wp)	组件尺寸 (mm)	质量 (kg)	组件层结构
STP180S-24/Ad	单晶硅	180	1580×808×35	15.5	超白钢化玻璃(3.2)+EVA(0.5)+单晶电池片(0.19)+EVA(0.5)+TPT(0.35)
STP200-18/Ud	多晶硅	210	1482×992×35	16.8	超白钢化玻璃(3.2)+EVA(0.5)+多晶电池片(0.19)+EVA(0.5)+TPT(0.36)
PLUT200-Ada	单晶硅	200	1956×992×35	15.5	超白钢化玻璃(3.2)+EVA(0.5)+单晶电池片(0.19)+EVA(0.5)+TPT(0.38)
夹层组件	多晶硅	280	1580×808×35	78	超白钢化玻璃(5)+PVB(0.78)+多晶电池片(0.19)+PVB(0.78)+普通钢化玻璃(5)
中空组件	多晶硅	280	1500×2000×12	117	超白钢化玻璃(5)+EVA(0.5)+多晶电池片(0.19)+EVA(0.5)+普通钢化玻璃(5)+Alr nrcn(6)+普通钢化玻璃(5)
丸式组件	多晶硅	50	1195×443×32	6.35	超白钢化玻璃(3.2)+EVA(0.5)+多晶电池片(0.19)+EVA(0.5)+TPT(0.35)
薄膜组件	非晶硅	50	980×995×14	30	平板玻璃(5)+非晶硅电池片+PVB(0.76)+钢化玻璃(8)

表 A.0.5　TSM/TSI 型光伏组件技术参数表

型号	规格				
	电池	峰瓦值 P_m(Wp)	组件尺寸 (mm)	质量 (kg)	组件层结构
TSM-185DC01	单晶硅	185	1581×809×40	15.6	超白钢化玻璃(3.2)+EVA(0.5)+单晶电池片(0.2)+EVA(0.5)+TPT(0.35)
TSM-190PC03	多晶硅	190	1316×992×46	16	超白钢化玻璃(3.2)+EVA(0.5)+多晶电池片(0.2)+EVA(0.5)+TPT(0.35)
TSM-235DC05	单晶硅	235	1650×992×46	21	超白钢化玻璃(3.2)+EVA(0.5)+单晶电池片(0.2)+EVA(0.5)+TPT(0.35)
TSM-290DC14	单晶硅	290	1956×992×46	21	超白钢化玻璃(3.2)+EVA(0.5)+单晶电池片(0.2)+EVA(0.5)+TPT(0.35)
TSM-290PC14	多晶硅	290	1956×992×46	21	钢化玻璃(3.2)+EVA(0.5)+多晶电池片(0.2)+EVA(0.5)+TPT(0.35)
TSI-175DC31	单晶硅	175	1795×950×28.5	70	超白钢化玻璃(5)+PVB(0.76)+单晶电池片(0.2)+PVB(0.76)+钢化玻璃(5)+12A+钢化玻璃(5)
TSI-220PC33	非晶硅	220	1815×1091×28.5	81.5	超白钢化玻璃(5)+PVB(0.76)+非晶电池片(0.2)+PVB(0.76)+钢化玻璃(5)+12A+钢化玻璃(5)

表 A.0.6 TRBQ/TRBY 型光伏组件技术参数表

型号	规格				
	电池	峰瓦值 P_m(Wp)	组件尺寸 (mm)	质量 (kg)	组件层结构
TRBQ-(D/X/Y)01	非晶硅	50	707×1640	29	玻璃(4)+PVB(0.76)+非晶硅电池片(3)+PVB(0.76)+玻璃(4)
TRBQ-(D/X/Y)02	非晶硅	95	1655×1400	58	玻璃(4)+PVB(0.76)+非晶硅电池片(3)+PVB(0.76)+玻璃(4)
TRBQ-(D/X/Y)03	非晶硅	142	1655×2080	119	玻璃(6)+PVB(1.52)+非晶硅电池片(3)+PVB(1.52)+玻璃(6)
TRBQ-(D/X/Y)04	非晶硅	50	707×1640	47	玻璃(4)+PVB(0.76)+非晶硅电池片(3)+PVB(0.76)+玻璃(4)+12A+玻璃(6)
TRBQ-(D/X/Y)05	非晶硅	95	1655×1400	92	玻璃(4)+PVB(0.76)+非晶硅电池片(3)+PVB(0.76)+12A+玻璃(6)
TRBQ-(D/X/Y)06	非晶硅	142	1655×2080	185	玻璃(6)+PVB(1.52)+非晶硅电池片(3)+PVB(1.52)+玻璃(6)+12A+玻璃(8)
TRBY07	非晶硅	30	1640×707	35	玻璃(6)+12A(内置电池倾角 0°)+玻璃(6)

续表 A.0.6

型号	规格				
	电池	峰瓦值 P_m(Wp)	组件尺寸 (mm)	质量 (kg)	组件层结构
TRBY08	非晶硅	95	1640×707	115	玻璃(6)+12A(内置电池倾角 0°)+玻璃(6)
TRBY09	非晶硅	30	1640×707	37	玻璃(6)+12A(内置电池倾角 30°)+玻璃(6)
TRBY10	非晶硅	95	1640×707	118	玻璃(6)+12A(内置电池倾角 30°)+玻璃(6)

附录 B　特殊截面特性

表 B.0.1　单面卷边槽钢

尺寸(mm)				截面面积 (mm²)	每米长质量	e_1 (mm)	e_2 (mm)	x-x				y-y		
h	b	a	t					I_x (cm⁴)	i_x (cm)	W_{x1} (cm³)	W_{x2} (cm³)	I_x (cm⁴)	i_x (cm)	W_y (cm³)
20.6	41.3	7.5	2.0	165.3	1.48	10.84	9.76	0.92	0.74	0.85	0.94	4.39	1.63	2.13
31	41.3	7.5	2.0	204.9	1.76	16.01	14.99	2.60	1.13	1.62	1.73	5.83	1.69	2.82
41.3	41.3	7.5	2.0	245.1	2.13	21.13	20.17	5.37	1.48	2.54	2.66	7.33	1.73	3.55
41.3	41.3	7.5	3.0	348.4	2.91	21.52	19.78	7.02	1.42	3.26	3.55	10.44	1.73	5.06
52	41.3	7.5	2.5	352.1	3.01	26.67	25.33	11.41	1.80	4.28	4.50	10.79	1.75	5.23
72	41.3	7.5	2.75	492.8	4.2	36.79	35.22	28.70	2.41	7.80	8.15	15.40	1.77	7.46

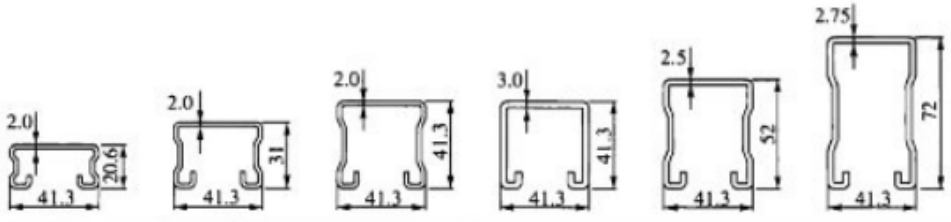
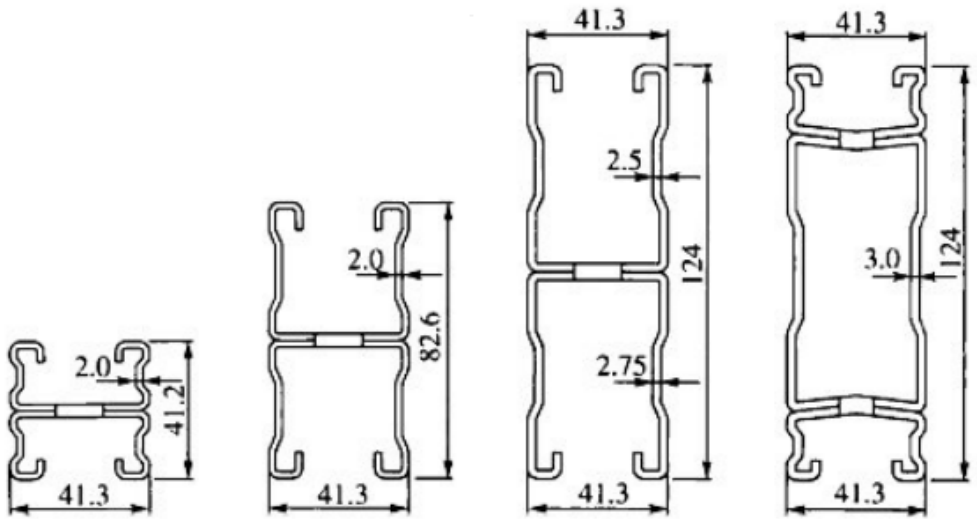


表 B.0.2　双拼卷边槽钢

尺寸(mm)				截面面积 (mm²)	每米长质量 (kg/m)	e_1 (mm)	e_2 (mm)	x-x				y-y		
h	b	a	t					I_x (cm⁴)	i_x (cm)	W_{x1} (cm³)	W_{x2} (cm³)	I_x (cm⁴)	i_x (cm)	W_y (cm³)
41.2	41.3	7.5	2.0	330.6	2.97	20.60	20.60	4.98	1.23	2.42	—	8.78	1.63	4.25
82.6	41.3	7.5	2.0	490.3	4.29	41.3	41.3	30.69	2.50	7.43	—	14.67	1.73	7.10
124	41.3	7.5	2.5/2.75	884.9	7.26	62.02	61.99	115.41	3.70	18.61	18.62	26.13	1.76	12.65
124	41.3	7.5	3.0	1237.2	10.09	62.00	62.00	188.04	3.90	30.33	—	31.62	1.60	15.31



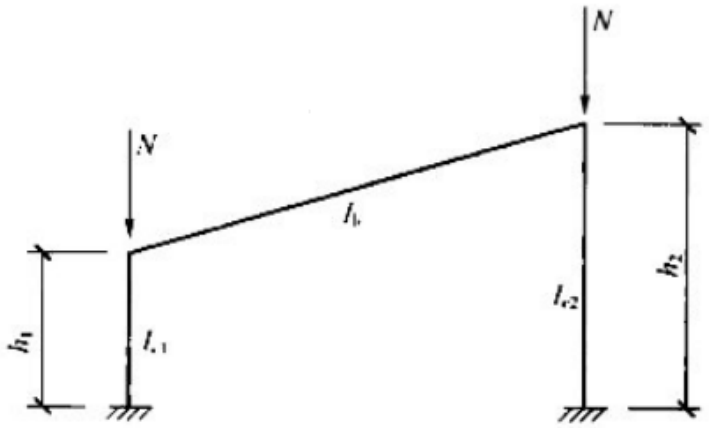
附录C　金属光伏支架柱的计算长度系数

C.0.1　有侧移光伏支架结构的支架柱中，短柱的平面内计算长度系数 μ_1 可按表C.0.1的规定取用(图C.0.1)。

C.0.2　有侧移光伏支架结构的支架柱中，长柱的平面内计算长度系数 μ_2 可按式C.0.2计算：

$$\mu_2 = \beta\mu_1/\sqrt{\gamma} \tag{C.0.2}$$

式中：μ_1　　对应短柱的计算长度系数。



图C.0.1　有侧移光伏支架柱平面内计算长度系数

表 C.0.1　有侧移光伏支架柱平面内计算长度系数

	γ \ K_1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.75	1	2	3	4	5	≥10
$\beta=0.3$	0.1	2.025	1.728	1.567	1.465	1.394	1.343	1.259	1.209	1.120	1.086	1.069	1.058	1.035
	0.2	2.143	1.802	1.623	1.513	1.437	1.383	1.297	1.247	1.163	1.133	1.118	1.108	1.090
	0.3	2.191	1.832	1.646	1.533	1.456	1.401	1.315	1.266	1.184	1.155	1.141	1.132	1.114
	0.4	2.220	1.849	1.660	1.546	1.469	1.414	1.328	1.280	1.199	1.170	1.155	1.146	1.128
	0.5	2.242	1.864	1.673	1.558	1.481	1.427	1.342	1.296	1.210	1.179	1.167	1.158	1.140
	0.6	2.264	1.880	1.691	1.581	1.515	1.475	1.421	1.298	1.220	1.192	1.177	1.169	1.150
	0.7	2.290	1.906	1.733	1.648	1.599	1.566	1.517	1.308	1.231	1.204	1.189	1.181	1.163
	0.8	2.325	1.954	1.807	1.733	1.687	1.655	1.607	1.319	1.245	1.218	1.204	1.196	1.179
	0.9	2.376	2.026	1.890	1.817	1.771	1.739	1.692	1.332	1.262	1.238	1.225	1.218	1.203
	1.0	2.446	2.106	1.970	1.896	1.850	1.819	1.773	1.349	1.286	1.265	1.254	1.248	1.235
$\beta=0.4$	0.1	1.849	1.614	1.479	1.390	1.327	1.280	1.201	1.152	1.061	1.022	1.001	0.987	0.958
	0.2	2.060	1.753	1.586	1.481	1.408	1.355	1.269	1.219	1.131	1.099	1.082	1.072	1.051
	0.3	2.150	1.809	1.629	1.518	1.442	1.388	1.301	1.251	1.167	1.130	1.122	1.112	1.094
	0.4	2.201	1.840	1.653	1.539	1.462	1.408	1.321	1.272	1.190	1.161	1.146	1.137	1.119
	0.5	2.235	1.860	1.669	1.554	1.477	1.422	1.336	1.288	1.207	1.178	1.163	1.154	1.136
	0.6	2.259	1.874	1.681	1.565	1.488	1.433	1.348	1.300	1.219	1.190	1.176	1.167	1.148
	0.7	2.279	1.885	1.690	1.574	1.497	1.443	1.358	1.310	1.230	1.201	1.186	1.177	1.158
	0.8	2.295	1.895	1.699	1.582	1.505	1.451	1.367	1.319	1.238	1.209	1.194	1.185	1.167
	0.9	2.310	1.903	1.706	1.589	1.513	1.459	1.375	1.327	1.246	1.217	1.208	1.193	1.174
	1.0	2.324	1.911	1.713	1.596	1.520	1.466	1.383	1.337	1.251	1.224	1.209	1.200	1.181

续表 C.0.1

	γ \ K_1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.75	1	2	3	4	5	≥10
β=0.5	0.1	1.636	1.462	1.355	1.282	1.229	1.189	1.118	1.073	0.981	0.940	0.915	0.899	0.862
	0.2	1.922	1.662	1.514	1.418	1.351	1.300	1.217	1.167	1.076	1.041	1.022	1.010	0.986
	0.3	2.058	1.750	1.582	1.476	1.403	1.350	1.265	1.214	1.128	1.096	1.079	1.069	1.049
	0.4	2.139	1.800	1.621	1.510	1.435	1.381	1.295	1.245	1.161	1.131	1.116	1.107	1.088
	0.5	2.193	1.833	1.647	1.533	1.457	1.403	1.317	1.268	1.186	1.157	1.142	1.133	1.115
	0.6	2.232	1.856	1.666	1.551	1.474	1.419	1.334	1.286	1.205	1.176	1.161	1.152	1.134
	0.7	2.262	1.874	1.680	1.564	1.488	1.433	1.348	1.300	1.220	1.191	1.176	1.167	1.149
	0.8	2.285	1.888	1.692	1.576	1.499	1.445	1.360	1.312	1.232	1.203	1.189	1.180	1.161
	0.9	2.305	1.899	1.702	1.585	1.509	1.454	1.370	1.323	1.243	1.214	1.199	1.190	1.171
	1.0	2.322	1.908	1.711	1.594	1.517	1.463	1.379	1.332	2.252	1.222	1.207	1.198	1.180
β=0.6	0.1	1.429	1.303	1.222	1.164	1.120	1.086	1.025	0.984	0.896	0.853	0.827	0.810	0.768
	0.2	1.755	1.545	1.418	1.334	1.273	1.227	1.149	1.100	1.008	0.970	0.949	0.936	0.908
	0.3	1.929	1.662	1.511	1.413	1.345	1.293	1.211	1.161	1.072	1.038	1.021	1.010	0.987
	0.4	2.039	1.732	1.566	1.461	1.388	1.336	1.251	1.201	1.116	1.085	1.069	1.059	1.039
	0.5	2.115	1.780	1.603	1.493	1.419	1.365	1.280	1.231	1.148	1.119	1.104	1.094	1.076
	0.6	2.171	1.814	1.630	1.518	1.442	1.388	1.304	1.255	1.174	1.145	1.130	1.121	1.103
	0.7	2.214	1.840	1.651	1.537	1.461	1.407	1.323	1.274	1.194	1.166	1.151	1.143	1.125
	0.8	2.248	1.861	1.668	1.553	1.477	1.423	1.339	1.291	1.212	1.183	1.169	1.160	1.142
	0.9	2.276	1.877	1.682	1.566	1.490	1.436	1.352	1.305	1.226	1.198	1.183	1.174	1.156
	1.0	2.300	1.891	1.694	1.578	1.502	1.448	1.364	1.317	1.238	1.210	1.195	1.186	1.168

续表 C.0.1

	γ \ K_1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.75	1	2	3	4	5	≥10
β=0.7	0.1	1.248	1.156	1.094	1.048	1.012	0.984	0.932	0.896	0.814	0.772	0.746	0.727	0.683
	0.2	1.585	1.418	1.313	1.240	1.187	1.144	1.074	1.027	0.936	0.897	0.874	0.859	0.828
	0.3	1.782	1.557	1.425	1.336	1.273	1.226	1.147	1.098	1.008	0.972	0.953	0.942	0.917
	0.4	1.914	1.646	1.494	1.396	1.318	1.277	1.195	1.146	1.059	1.027	1.010	0.999	0.978
	0.5	2.008	1.706	1.542	1.438	1.366	1.315	1.231	1.182	1.099	1.068	1.052	1.043	1.024
	0.6	2.080	1.751	1.577	1.469	1.396	1.343	1.260	1.211	1.130	1.101	1.086	1.077	1.058
	0.7	2.137	1.786	1.605	1.494	1.420	1.367	1.283	1.236	1.156	1.127	1.113	1.104	1.086
	0.8	2.183	1.813	1.627	1.515	1.440	1.387	1.304	1.256	1.177	1.149	1.135	1.126	1.109
	0.9	2.221	1.836	1.646	1.532	1.457	1.404	1.321	1.274	1.196	1.168	1.154	1.145	1.128
	1.0	2.253	1.855	1.662	1.547	1.472	1.419	1.336	1.290	1.212	1.184	1.170	1.161	1.144

注：1 表中，立柱长度比 $\beta = h_1/h_2$，立柱抗弯刚度比 $\gamma = \frac{I_{c1}}{I_{c2}}$，相交于短柱上端的横梁线刚度与柱线刚度之比 $K_1 = \frac{I_b/l_b}{I_{c1}/h_1}$。当梁远端为铰接时，应将横梁线刚度乘以 1.5。

2 当横梁与柱铰接时，取横梁线刚度为零。

本标准用词说明

1　为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1）表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2）表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3）表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4）表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2　条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

《建筑地基基础设计规范》GB 50007
《建筑结构荷载规范》GB 50009
《混凝土结构设计规范》GB 50010
《建筑抗震设计规范》GB 50011
《钢结构设计标准》GB 50017
《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018
《岩土工程勘察规范》GB 50021
《湿陷性黄土地区建筑规范》GB 50025
《工业建筑防腐蚀设计规范》GB 50046
《膨胀土地区建筑技术规范》GB 50112
《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153
《构筑物抗震设计规范》GB 50191
《建筑地基基础工程施工质量验收标准》GB 50202
《铝合金结构设计规范》GB 50429
《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476
《铝合金建筑型材》GB 5237
《建筑桩基技术规范》JGJ 94
《冻土地区建筑地基基础设计规范》JGJ 118
《混凝土结构后锚固技术规程》JGJ 145
《建筑钢结构防腐蚀技术规程》JGJ/T 251
《基桩动测仪》JG/T 518
《岩土锚杆(索)技术规程》CECS 22

中华人民共和国能源行业标准

光伏支架结构设计规程

NB/T 10115—2018

条 文 说 明

制 定 说 明

《光伏支架结构设计规程》NB/T 10115—2018，经国家能源局2018年12月25日以第16号公告批准发布。

本标准制定过程中，编制组进行了广泛的调查和研究，完成了《光伏支架结构设计、型式、使用状况调研报告》和《光伏支架风荷载体型系数研究专题报告》，总结了近年来国内光伏支架结构的实际应用经验，同时参考了国内外先进技术标准。

为便于广大设计、施工、科研、工程质量监督、使用方等有关单位在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，对条文编制的目的、依据以及执行中需要注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目　　次

1　总　　则 …… (63)
2　术　　语 …… (64)
3　基本规定 …… (65)
3.1　设计原则 …… (65)
3.2　变形规定 …… (66)
4　荷载与作用组合 …… (67)
4.1　风荷载 …… (67)
4.2　雪荷载 …… (70)
4.3　作用组合 …… (71)
5　结构体系 …… (73)
5.1　一般规定 …… (73)
5.2　结构体系 …… (75)
5.3　结构分析原则 …… (79)
6　构件设计 …… (81)
6.1　一般规定 …… (81)
6.2　支架柱设计 …… (81)
6.3　支架梁设计 …… (83)
6.4　檩条设计 …… (84)
6.5　支撑设计 …… (84)
7　连接和节点 …… (85)
7.1　一般规定 …… (85)
7.2　梁柱连接 …… (86)
7.3　节点 …… (87)
8　地基基础设计 …… (90)

8.1 一般规定 …… (90)
8.2 地基 …… (91)
8.3 基础 …… (94)
8.4 屋面光伏支架结构基础 …… (100)
9 防 腐 …… (101)
9.1 支架防腐 …… (101)
9.2 支架基础防腐 …… (102)

1 总　　则

1.0.1 本条是光伏支架结构设计时遵循的原则。选择结构方案时，需要同时考虑钢（铝合金）结构制作、运输、安装和混凝土浇筑、施工以及维护保养等问题。推荐采用定型的和标准化的构件及节点型式，配套的各种建筑材料与光伏支架结构相适应。

1.0.2 光伏支架结构设计需保证结构满足承载力、刚度、耐久性和其他使用要求。以下内容在光伏支架结构设计中应准备资料，并予以明确：

（1）光伏组件平剖面布置图、光伏组件规格及工艺对支架的要求；

（2）光伏组件重量、光伏组件上的活荷载等；

（3）总图场平资料、岩土工程勘察资料等；

（4）支架结构设计使用年限；

（5）支架结构方案设计，包括结构选型、构件布置；

（6）材料牌号、连接材料型号与质量等级；

（7）作用及作用效应分析；

（8）支架结构的极限状态验算；

（9）支架结构、构件及连接的构造；

（10）制作、安装、防腐等要求；

（11）满足特殊要求结构的专门性能设计。

1.0.3 本标准是根据现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153、《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068、《建筑结构荷载规范》GB 50009、《钢结构设计标准》GB 50017、《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018、《铝合金结构设计规范》GB 50492、《建筑抗震设计规范》GB 50011 以及《光伏发电站设计规范》GB 50797 等的有关条文，结合光伏支架结构的特点制定的。

2 术　　语

本章所用的术语是参照现行国家标准《工程结构设计基本术语标准》GB/T 50083 和《工程结构设计通用符号标准》GB/T 50132 的规定，并根据本标准的内容及特点进行编写的。本标准给出了 4 个有关光伏支架结构设计方面的专用术语，所给出的英文译名是参考国内相关标准拟定的。

2.0.2 传统意义上的桩基础是由设置于岩土中的桩和连接于桩顶的承台组成。微型桩基础一般不设置桩顶承台。

3 基本规定

3.1 设计原则

3.1.1 承载力极限状态是指构件或连接的强度破坏、脆性断裂、因过度变形而不适用于继续承载、支架结构或构件丧失稳定、支架结构转变为机动体系和结构倾覆。正常使用极限状态是指影响支架结构、构件或非支架结构构件正常使用或外观的变形、影响正常使用的振动、影响正常使用或耐久性能的局部损坏(包括混凝土裂缝)。

3.1.2 设计使用年限是指设计规定的结构或结构构件不需进行大修即可按预定目的使用的年限。本标准设计使用年限的规定考虑了以下因素:

(1)现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068—2001 第 1.0.3 条:制定建筑结构荷载规范以及钢结构、薄壁型钢结构、混凝土结构、砌体结构、木结构等设计规范应遵守本标准的规定;制定建筑地基基础和建筑抗震等设计规范宜遵守本标准规定的原则;

(2)设计使用年限与现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068—2001、《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153—2008 等保持一致。

3.1.3 光伏支架结构或结构构件的安全等级需要调整时,调整后的安全等级、重要性系数 γ_0 等内容,还需要遵守现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068—2001 的有关规定。

3.1.4 光伏支架结构属轻型建(构)筑物,对地基基础的要求条件相对简单,故将其设计等级确定为丙级。对光伏建筑一体化中的光伏支架结构基础,地基基础设计等级与建筑一体化建筑主体结

构一致；其设计等级、设计使用年限及结构重要性系数等与主体结构设计标准相同。

3.1.5 抗震设防类别丁类一般属适度设防类，其抗震设防标准按本地区抗震设防烈度确定其抗震措施和地震作用；达到在遭遇高于当地抗震设防烈度的预估罕遇地震影响时不致倒塌，或发生危及生命安全的严重破坏的抗震设防目标。

3.2 变形规定

3.2.2 光伏支架结构柱顶的水平位移限值，目前现行国家标准并没有明确规定。本条中金属支架结构柱顶水平位移限值取值$H/60$，是根据近年来国内已建金属支架结构的实践经验确定。限值控制主要考虑以下因素：

(1)防止光伏组件在较大水平位移出现损坏；

(2)避免风荷载作用下支架结构产生较大声响。

3.2.3 一般情况下，结构或构件变形的容许值见本条规定。当有实践经验或有特殊要求时，根据不影响正常使用和观感的原则可对本条规定的限值进行适当的调整。

4 荷载与作用组合

4.1 风 荷 载

4.1.1 不同重现期的基本风压取值，现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 附录 E 给出了相应的换算公式。现行国家标准 GB 50009—2012 第 8.1.2 条规定“对于高层建筑、高耸结构以及对风荷载比较敏感的其他结构，基本风压应适当提高，并应由有关的结构设计规范具体规定”。当光伏支架结构或结构构件的体型或周围环境特别复杂，且无参考资料可以借鉴时，一般需要由风洞试验确定。

4.1.2 结构是指能承受作用并具有适当刚度的由各连接部件有机组合而成的系统，结构构件是指结构在物理上可以区分出的部件。风荷载标准值计算需考虑以下因素：

(1)根据现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 规定：周期大于 0.25s 的结构应考虑风振影响。对于常用的支架结构体系动力特性分析，双(多)列单坡支架体系的自振周期一般小于 0.15s，其风振系数可取 1。对于单列单坡支架体系的支架自振周期，与支架高度、支架刚度有很大关系；如采用钢支柱自振周期有可能大于 0.25s 时，按现行国家标准规定考虑风振影响。

(2)根据现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 规定：围护结构应考虑阵风影响。连接及其非结构构件计算时，连接件的风荷载需考虑阵风系数，其风荷载局部体型系数等内容除满足本标准外，还需要遵守现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 第 8.3 节的有关规定。

(3)光伏支架结构的构件截面主要是 U 型钢、方管等截面，也

有部分采用圆管截面。各类截面的杆件体型及体型系数还需要遵守现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 第 8.3 节的有关规定。

(4)光伏支架的安装环境较为复杂,同等高度的光伏支架,处于山顶与在山底的风压变化差别较大,风压高度变化系数需进行修正。对于考虑山峰、山坡、山间盆地、谷底、谷口和山口等地形条件的修正时,调整系数还需要遵守现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 第 8.2.2 条的有关规定。

(5)建筑光伏一体化的光伏支架,风荷载计算需与一体化建筑主体结构一致。对于兼作幕墙的光伏支架,风荷载计算还需要遵守现行行业标准《玻璃幕墙工程技术规范》JGJ 102 的有关规定。

(6)平屋面上的光伏支架结构的风荷载体型及局部系数等内容,还需要遵守现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 第 8.3 节的有关规定。

4.1.3 本标准风荷载体型系数的提出,是本标准编制组的研究成果,并结合现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 表 8.3.1 中第 29 项、美国金属房屋制造商协会(MBMA)《低层房屋金属结构》、日本太阳光发电协会编制的《太阳能光伏发电系统的设计与施工》的结果。关于风荷载体型系数的规定如下:

(1)光伏支架体型由支架和光伏板组成,不同区域的光伏板支架倾角不同;支架距地面距离不同,有的达 2.0m、有的紧贴地面,在现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 中不能查到对应的体型系数。为此中国电建集团河北省电力勘测设计研究院有限公司委托石家庄铁道大学风工程研究中心进行了"光伏支架风荷载体型系数"的研究,共进行了 720 组不同倾角、支架距地高度等工况的风洞试验和数值模拟分析。研究结论推荐风荷载体型系数见表 1、表 2。

表 1　均匀分布风荷载体型系数取值

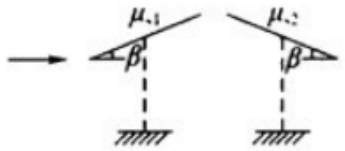
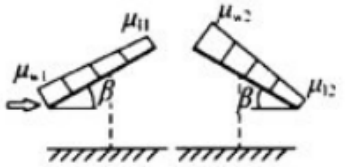
	体型系数 \ β	5°	10°	20°	30°	40°	55°
	μ_{s1}	0.10	0.25	0.60	1.0	1.3	1.3
	μ_{s2}	−0.50	−0.65	−1.0	−1.3	−1.6	−1.6

表 2　光伏板梯形分布风荷载体型系数取值

	体型系数 \ β	5°	10°	20°	30°	40°	55°
	μ_{w1}	0.00	0.33	0.81	1.54	1.80	1.71
	μ_{l1}	0.12	0.07	0.21	0.21	0.37	0.79
	μ_{w2}	−0.74	−1.00	−1.61	−2.29	−2.80	−1.79
	μ_{l2}	0.31	0.23	0.14	−0.13	−0.30	−0.81

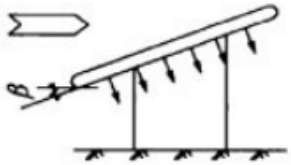
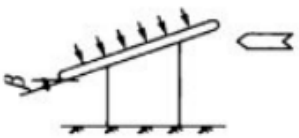
(2)中国电建集团河北省电力勘测设计研究院有限公司还对地面光伏支架阵列布置进行了风洞试验和数值模拟分析，光伏板离地高度 0.5m，每组光伏支架长 19.84m、宽 6.48m，倾角分别为 20°、30°、35°和 40°，阵列为 10 行 9 列共 90 组光伏支架。研究成果表明：上游光伏板对下游光伏板存在明显的干扰效应。从体型系数来看，这种干扰效应主要表现为遮挡效应，即由于上游光伏板的存在，下游光伏板体型系数会有一定程度的减小，这种遮挡效应会随着上游光伏板数量的增加而趋于稳定。从数据看，第 3 排后干扰度趋于平稳。折减的区域是指阵列两端第 4 排以内。

(3)调研光伏板运行情况，被撕裂、刮飞的案例很多，大多数是连接件被拔出，究其原因是风荷载取值偏小。中国电建集团河北省电力勘测设计研究院有限公司“光伏支架风荷载体型系数”研究成果表明：一组阵列不同区域体型系数差别很大。另外现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 条文说明第 8.3.3 条指出：通常情况下，作用于建筑物表面的风压分布并不均匀，在角隅、檐口、边棱处和在附属结构的部位(如阳台、雨棚等外挑构件)，

局部风压会超过按本规范表 8.3.3 所得的平均风压。局部风压体型系数是考虑建筑物表面风压分布不均匀而导致局部部位的风压超过全表面平均风压的实际情况做出的调整。另外，考虑局部体型系数主要用于连接件计算，表中数值是在试验基础上进行了调整，低于 1.0 的部分按 1.0 考虑。

(4)日本太阳光发电协会编制的《太阳能光伏发电系统的设计与施工》中相关风荷载体型系数的取值见表 3。

表 3 《太阳能光伏发电系统的设计与施工》中体型系数取值

安装形式	风力系数		
	顺　风		逆　风
地面单独			
	C_w(正压)	β	C_w(负压)
	0.79	15°	0.94
	0.87	30°	1.18
	1.05	45°	1.43

注：1　支架为数个的场合，周围部分的风力系数按表取，中央部位的风力系数推荐按表的 1/2 取；

2　表中没有标注的 β 角和 C_w 的按下式计算：正压：$0.65+0.009\beta$；负压：$0.71+0.016\beta$，其中 $15°\leqslant\beta\leqslant45°$。

4.2 雪　荷　载

4.2.5　光伏支架的积雪分布系数。

1　本条参考现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 中表 7.2.1 中第 1 项制定；

2　安装在建(构)筑物屋面上的光伏组件，需要综合考虑建筑物对积雪分布系数的影响。

4.3 作 用 组 合

4.3.1 光伏支架结构构件设计时，除本标准另有规定外，荷载标准值、荷载分项系数、荷载组合值系数的取值均需要按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 的规定采用。

现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010 对结构构件的设计规定如下：

(1)合理控制钢结构构件的尺寸，避免局部失稳或整个构件失稳；

(2)控制混凝土结构构件截面尺寸和受力钢筋、箍筋的设置，防止剪切破坏先于弯曲破坏、混凝土的压溃先于钢筋的屈服、钢筋的锚固黏结破坏先于钢筋破坏；

(3)预应力混凝土构件配有足够的非预应钢筋。

4.3.2 重要性系数的选取需符合现行国家标准《工程结构可靠性设计统一标准》GB 50153—2008 的规定。设计基准期采用 25 年时，荷载分项系数或荷载组合值系数是与 25 年基准期相匹配的。本标准重要性系数取 1.0 是考虑了风荷载、雪荷载是光伏支架的主要可变荷载因素。抗震设计中，由于考虑了抗震承载力调整系数，因此不再同时考虑 0.95 的重要性系数。

4.3.4 依据现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 的有关规定，结合光伏支架结构的荷载及其结构设计特点，光伏支架上的荷载与作用一般分为下列三类：

(1)永久荷载：包括光伏支架结构自重、光伏组件荷载、固定的设备荷载等。

(2)可变荷载：包括风荷载、雪(冰)荷载、地震作用、温度作用、地基变形作用、积灰荷载、施工检修荷载等。

1)光伏面板的积灰荷载目前统计数据尚不充分，因此对于可能存在积灰荷载的情况，按实际情况进行考虑。当光伏面板坡度小于 45°、组件表面污染较严重且无自洁能力时，考虑积灰荷载。

2)当温度区段满足现行国家标准的有关规定时,不考虑温度作用;否则,计算温度作用及其效应。计算温度为当地历年冬季(或夏季)最冷(或最热)的月平均气温,初始温度为安装调试完成时的月平均气温,正负温差均应验算。

3)当施工荷载有可能超过上述荷载时,根据实际情况采用。

(3)偶然荷载:包括撞击、罕遇地震作用等。光伏支架的偶然荷载如撞击荷载出现的概率较小且后果一般不涉及人员伤亡,如无特殊要求,一般可不予考虑。

4.3.5 地震作用计算等内容参考国家现行标准《构筑物抗震设计规范》GB 50191—2012、《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010 的有关规定。

5 结构体系

5.1 一般规定

5.1.1 单坡结构体系分别由横向抗侧力体系和纵向抗侧力体系构成。各类结构体系均需满足不同荷载工况作用下的承载力和刚度要求。光伏支架结构进行稳定分析一般有以下要求：

(1)选用结构体系时通常按下列原则考虑：

1)综合考虑结构合理性、工艺需求、资源耗费、节省造价、环境条件(包括地质条件等)、荷载特性、材料供应、制作安装便利等因素；

2)光伏支架结构体系成熟；当采用新型结构体系时，需充分论证设计计算的准确性，必要时进行结构试验。

(2)结构体系选择时通常需要考虑下列要求：

1)采用轻质材料；

2)具备合理的竖向和水平荷载传递途径；

3)同一结构单元中采用同一种结构型式，当不同结构型式混合采用时充分考虑变形不均衡对结构的影响；

4)具有必要的强度和刚度、良好的构件稳定性和结构整体稳定性；

5)各柱列的横向侧移水平均匀；

6)具有足够的冗余度，避免因部分结构或构件破坏导致整个结构体系丧失承载力。

5.1.2 根据光伏支架结构的受力特点，对设置柱间支撑的光伏支架结构一般不进行温度应力计算。为保证安全，在安装过程中刚性系杆除了承受压力和传递纵向水平力外，还增加刚架的侧向刚度。

光伏支架结构柱网布置需要满足光伏组件的工艺要求和使用要求，结构体系的设计布置一般从以下三个方面考虑：

(1)支架的跨度应取为立柱轴线间的距离，且需要光伏组件和檩条的布置要求；支架的间距，即柱网轴线间的纵向距离为光伏组件长度或宽度的整数倍。

(2)横向抗侧力体系的设置：

1)横向抗侧力体系一般根据柱脚和柱顶连接构造划分为排架式、框架式和桁架式(本标准表 5.2.1-1)三类，亦可用以上三种结构型式的混合型式；

2)结构柱包括等截面柱、单阶柱和双阶柱等型式；

3)当有较高侧向刚度要求时，推荐采用柱脚与基础刚接的结构型式。

(3)纵向抗侧力体系的设置：

1)纵向抗侧力体系一般根据柱脚、柱顶(在横向框架平面外的)连接构造划分为排架式、框架式和桁架式(本标准表 5.2.1-2)三类；

2)结构柱采用插入式(埋入式)柱脚时，纵向抗侧力体系一般简化为排架式或框架式体系；

3)结构柱采用单列锚栓(等面外转动刚度较小)的平板式柱脚时，纵向抗侧力体系一般简化为桁架式结构体系。

5.1.3 由于坡面上的檩条承受较大的平面外作用力，为提高其承载能力一般设置拉条或撑杆，此时需在刚性系杆处设置斜拉条或斜撑杆，并在刚架内力分析时考虑此作用力。设计时需要注意不同设计标准的差异：

(1)现行国家标准《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018—2002 墙梁的构造第 8.4.2 条规定：当墙梁跨度大于 4m 时，宜在跨中设置一道拉条。当墙梁跨度大于 6m 时，可在跨间三分点处各设置一道拉条。

(2)现行国家标准《门式刚架轻型房屋钢结构技术规范》GB

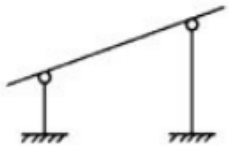
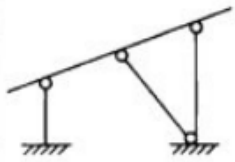
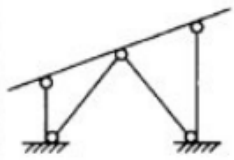
51022—2015 规定：当檩条跨度大于 4m 时，宜在檩条间跨中位置设置拉条或撑杆。当檩条跨度大于 6m 时，应在檩条跨度三分点处各设一道拉条或撑杆。斜拉条应与刚性檩条连接。

5.2 结构体系

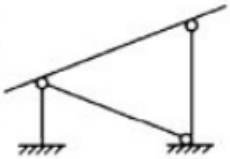
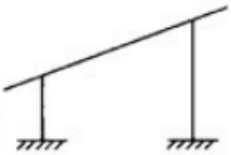
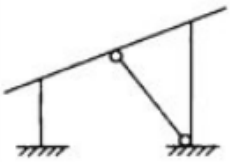
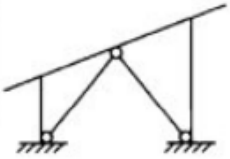
1 双列单坡支架

5.2.1 对本标准表 5.2.1-1 中各类横向抗侧力结构体系进行了不同地域的风荷载和地震作用的系列参数分析，其强度、刚度性态和抗侧机制在设计过程中参考表 4。

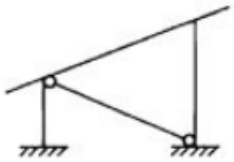
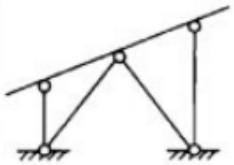
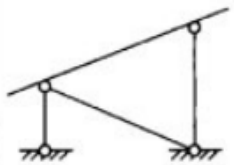
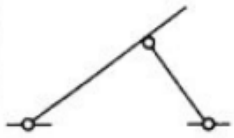
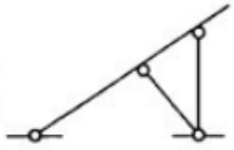
表 4 各类横向抗侧力结构体系强度、刚度性态和抗侧机制

编号	对象	强度设计	刚度分析	柱顶抗侧机制
1		立柱柱脚弯矩较大； 前柱受力更为不利； 横梁跨度相对较大	结构整体抗侧刚度较弱； 刚度控制，前柱截面利用不充分； 前柱抗弯刚度控制最终设计	前、后柱：悬臂柱抗弯（前柱为主）
2		前柱柱脚弯矩控制强度设计； 后柱以受轴力为主； 横梁设计较为有利、计算跨度小	支撑不能提供整体抗侧能力； 柱顶侧移主要受前柱抗弯刚度影响； 前柱抗弯刚度控制最终设计	前、后柱：悬臂柱抗弯（前柱为主）
3		整体结构形式最为合理； 各构件以受轴力为主； 横梁设计最为有利，强度控制	构件长细比控制设计； 柱顶侧移自然满足最严格限值要求	前、后柱：两支撑形成二元体（支撑轴向刚度）； 横梁拉结两柱柱顶（横梁轴向刚度）

续表 4

编号	对象	强度设计	刚度分析	柱顶抗侧机制
4		前柱受力有利，以轴力为主； 后柱设计不利，以弯矩为主； 横梁计算跨度相对较大； 构件强度控制设计	柱顶侧移自然满足最严格限值要求	前柱：前柱与支撑形成二元体（前柱、支撑轴向刚度） 后柱：横梁通过前柱柱顶拉结后柱柱顶（横梁轴向刚度）
5		前柱受力较大，截面很大	后柱柱顶侧移较小； 前柱柱顶侧移较大； 前柱抗弯刚度控制最终设计	前、后柱：悬臂柱抗弯（前柱为主）
6		前柱柱脚弯矩控制强度设计； 后柱以受轴力为主； 横梁设计较为有利、计算跨度小	支撑不能提供整体抗侧能力； 柱顶侧移主要受前柱抗弯刚度影响； 前柱抗弯刚度控制最终设计	前、后柱：悬臂柱抗弯（前柱为主）
7		各构件以受轴力为主； 横梁设计最为有利，强度控制	构件长细比控制设计； 柱顶侧移自然满足最严格限值要求	前、后柱：两支撑形成二元体（支撑轴向刚度）； 横梁拉结两柱柱顶（横梁轴向刚度）

续表 4

编号	对象	强度设计	刚度分析	柱顶抗侧机制
8		前柱强度控制设计； 支撑构件受力较大； 横梁计算跨度相对较大	柱顶侧移自然满足最严格限值要求	前柱：前柱与支撑形成二元体（前柱、支撑轴向刚度） 后柱：横梁通过前柱柱顶拉结后柱柱顶（横梁轴向刚度）
9		立柱受力以轴力为主； 支撑杆件设计由强度控制； 横梁设计最为有利	立柱截面由长细比控制； 柱顶侧移自然满足最严格限值要求	前、后柱：两支撑形成二元体（支撑轴向刚度）； 横梁拉结两柱柱顶（横梁轴向刚度）
10		后柱强度控制设计； 支撑构件受力较大，强度控制； 横梁计算跨度相对较大	前柱长细比控制设计； 柱顶侧移自然满足最严格限值要求	前柱：前柱与支撑形成二元体（前柱、支撑轴向刚度） 后柱：横梁通过前柱柱顶拉结后柱柱顶（横梁轴向刚度）
11		横梁计算跨度较大； 支撑：强度不起控制作用	支撑：长细比控制； 支撑顶端侧移自然满足最严格限值要求	横梁与支撑形成二元体
12		横梁计算跨度较小； 立柱与支撑：强度不起控制作用	立柱与支撑：长细比控制； 柱顶侧移自然满足最严格限值要求	横梁与支撑形成二元体

以上各类横向结构体系中，按照整体抗侧刚度强弱程度不同，可以大致划分为以下五类：

(1)含有两根支撑杆件的排架、框架、桁架体系(表 4 中图 3、7、9)抗侧刚度最强,其抗侧刚度主要由两支撑形成的二元体结构提供,在此类结构设计中可以不必考虑柱顶侧移限制,立柱构件只需按照强度进行设计;

(2)三角形桁架结构(表 4 中图 11、12)抗侧刚度亦很强,其抗侧刚度由支撑(或立柱)与横梁构成的二元体提供,在此类结构设计中同样不需要考虑柱顶侧移的限制,仅立柱构件需按照强度进行设计;

(3)含有单根支撑且支撑杆件连接前柱柱顶与后柱柱脚的横向结构体系(表 4 中图 4、8、10)的结构抗侧刚度较强,其抗侧刚度主要由前柱及支撑形成的二元体结构提供,在该类结构设计中同样不需要考虑柱顶侧移的限值;

(4)含有单根支撑且支撑杆件连接横梁跨中与后柱柱脚的横向抗侧力体系(表 4 中图 2、6)的结构抗侧刚度弱于前面三种情况,其抗侧刚度主要由前后两立柱的截面抗弯刚度提供,在该类结构设计中要注意考虑柱顶侧移的限值;

(5)以不含支撑的纯排架、纯框架(表 4 中图 1、5)作为横向抗侧力体系的结构抗侧刚度最弱,其抗侧刚度完全由前后两立柱的截面抗弯刚度提供,在该类结构设计中要特别注意考虑柱顶侧移的限值。

跨中支撑的桁架式结构形式见图 1,其横梁抗弯刚度影响柱顶侧移;为保证其抗侧刚度,横梁截面尺寸大、材料利用率很低。因此,不建议采用此类结构型式。

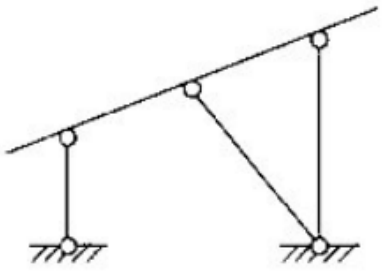


图1　跨中支撑桁架结构简图

5.3 结构分析原则

5.3.1 光伏支架结构设计时，一般根据结构的节点形式、构件类型、荷载特点，并综合考虑上部结构与下部支承结构的相互影响，建立合理的计算分析模型，进行协同分析。计算分析模型一般需要考虑下列因素：

(1)单层单跨单坡光伏支架一般建立整体分析模型进行侧移计算。

(2)单层单列和单层独立柱型光伏支架结构采用平面结构等简化模型进行侧移计算。

(3)设有十字形交叉刚性支撑支架结构体系的平面框架，按图 2(a)所示计算简图进行分析；采用柔性支撑时，只考虑受拉支撑参与工作，采用图 2(b)所示计算简图进行分析。

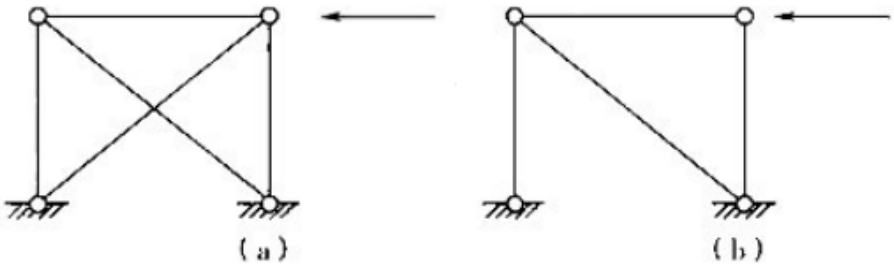


图 2 平面框架计算简图

(4)伏支架结构构件通常用得很薄，截面发展塑性的潜力不大，故规定内力计算采用弹性分析方法确定各种内力和位移。约束条件和节点铰接、刚接的简化需符合节点的实际构造。塑性设计要求某些截面形成塑性铰并能产生所需的转动，使结构形成机构，当对构件中的板件宽厚比严加控制时，构件截面允许有限塑性发展，以避免由于板件局部失稳而降低构件的承载能力。

(5)类蒙皮效应。同济大学进行的系列光伏组件抗剪性能试验、压块节点受力性能试验、整体结构剪切性能试验、光伏组件与支架结构共同作用效应分析等结果表明：光伏组件的类蒙皮效应

对支架结构的横向受力性能基本没有影响，在较大风荷载的情况下对纵向受力性能有较大影响，此时对节点连接构造有严格要求。

光伏支架结构设计中，光伏组件产生的应力类蒙皮效应一般不考虑。当支架结构顶面光伏组件的连接件固定于结构横向框架上或横向框架和纵向联系构件上时，需要在光伏支架结构的设计中考虑类蒙皮作用，设计中需要从以下三个方面进行措施完善：

1）类蒙皮效应组合体的强度和刚度参数由试验和可靠的分析方法获得，并对支架结构进行整体分析和设计；

2）进行顶面檐口等关键部位的檩条及其连接的承载力验算时，除了考虑直接作用的荷载产生的内力外，还需考虑由整体分析算得的附加内力；

3）在建成的光伏支架结构显著位置处设置永久性标牌，标明在使用和维护过程中不得随意拆卸光伏组件，只有设置临时支撑后方可拆换光伏组件。设计文件中也需对此加以规定。

6 构件设计

6.1 一般规定

6.1.1 构件的变形和各种稳定系数分别按净截面、有效截面或有效净截面计算，但为了简化计算而采用毛截面计算时，其精度需要在允许范围内。

6.1.2 光伏支架结构构件设计时，除要求符合本标准外，尚需要遵守的现行国家标准有：《钢结构设计标准》GB 50017—2017、《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018—2002、《铝合金结构设计规范》GB 50429—2007 及《混凝土结构设计规范》GB 50429—2010 等。

6.1.4 在技术经济合理的条件下，光伏支架结构通常采用冷弯薄壁型钢，实际工程中常用的截面有圆管、矩形管、槽形或卷边 U 形截面，其中支架柱以圆管形截面应用最为广泛。

6.2 支架柱设计

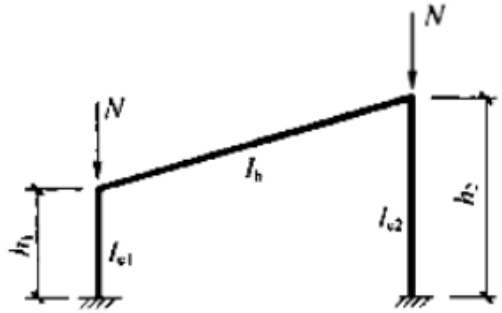
Ⅰ 金属结构支架柱

6.2.1 光伏支架柱构件通常采用冷弯薄壁型钢，近年来采用铝合金支架柱也逐渐成为常态。

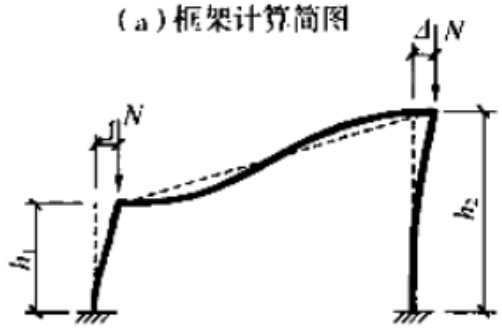
6.2.2 光伏支架结构柱的计算长度一般需要考虑下列因素：

(1)有支撑双(多)列单坡光伏支架柱，相当于无侧移柱，可以认为横梁与立柱间铰接。

(2)无支撑双(多)列单坡光伏支架柱，是典型的不等高框架，其计算长度系数一般按本标准附录 C 采用。附录 C 是根据平面内有侧移不等高框架的假定推导得到的。光伏支架结构的计算简图如图 3(a)所示。图中，h_1 为短柱高度，h_2 为长柱高度；短柱刚



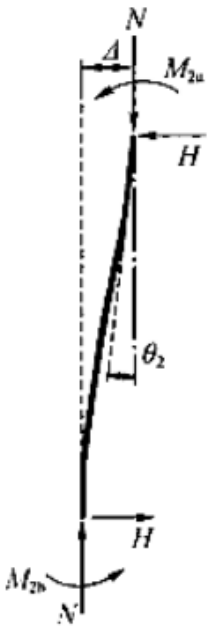
(a)框架计算简图



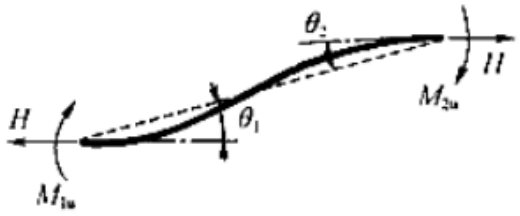
(b)框架变形图



(c)短柱受力分析图



(d)长柱受力分析图



(e)横梁受力分析图

图 3　光伏支架受力分析图

度为 I_{c1}，长柱刚度为 I_{c2}，横梁刚度为 I_b；柱顶压力为 N。结构有侧移失稳后的变形图如图 3(b)所示，Δ 为框架侧移。图 3(c)～图 3(e)分别给出了立柱和横梁的隔离体受力分析图。图中，H 为横梁轴力，M_{1b} 和 M_{1u} 分别为短柱柱底和柱顶的端弯矩，M_{2b} 和 M_{2u} 分别为长柱柱底和柱顶的端弯矩；θ_1 为短柱柱顶、梁左端转角，θ_2 为长柱柱顶、梁右端转角。

在推导中采用了如下假定：①框架杆件均为弹性等截面；②不考虑剪力对柱子计算长度的不利影响；③光伏支架左右两柱上作用的荷载相等；④左右光伏支架柱的侧移相等，横梁的轴向变形忽略不计；⑤光伏支架柱的底端为理想刚接。

根据上述假定，可以推导得出关于短柱计算长度系数 μ_1 的柱屈曲方程：

$$(C_1+6K_1)\{(\beta C_2+6\gamma K_1)[\gamma\pi^2(1+\beta)/\mu_1^2-2(\beta^3\alpha_2+\gamma\alpha_1)]+(\beta^2\alpha_2)^2\}+\gamma\alpha_1^2(\beta C_2+6\gamma K_1)=0 \tag{1}$$

式(1)是一个超越方程，采用数值方法可以求解得到方程的解。求得 μ_1 后，可按下式计算得到 μ_2：

$$\mu_2=\beta\mu_1/\sqrt{\gamma} \tag{2}$$

以上各式中：β——柱高度比，$\beta=h_1/h_2$；

γ——柱刚度比，$\gamma=I_{c1}/I_{c2}$；

α_1,α_2——参数，$\alpha_1=C_1+S_1$，$\alpha_2=C_2+S_2$；

C,S——抗弯刚度系数，按下式计算：

$$C=\frac{kl\sin kl-(kl)^2\cos kl}{2-2\cos kl-kl\sin kl},S=\frac{(kl)^2-kl\sin kl}{2-2\cos kl-kl\sin kl} \tag{3}$$

其中 $kl=\pi\sqrt{N/N_E}$，N_E 为两端铰接构件的欧拉荷载。

更为详细的推导过程可以参考文献《光伏支架柱有侧移失稳计算长度系数研究》(郭小农等，力学季刊，2015 年第 36 卷第 3 期，第 503～508 页)。

6.3 支架梁设计

6.3.1 由于光伏组件的功能要求，其坡度通常较大，故光伏支架

梁中除了承受弯矩外，还承受较大的轴力。因此，光伏支架梁宜按压弯构件进行验算。

6.3.2 光伏支架梁的计算长度一般需要满足下列要求：

(1)支撑杆的刚度需要满足作为支承点的需求；

(2)试验和分析结果表明，光伏组件与檩条可共同作用，约束支架梁的行为，因此光伏支架梁的平面外计算长度可以取为檩条间距。

6.4 檩条设计

6.4.1 当不考虑光伏组件的蒙皮效应时，檩条可以按受弯构件设计；当考虑光伏组件的蒙皮效应时，檩条会传递光伏面板平面内的剪力，因此需要按压弯构件进行设计。

6.4.2 目前，光伏电站光伏组件的支承檩条(或构件)通常采用连续方式，该方式增加了材料的用量，加大了主受力件上的荷载，建筑工程投资费用增加，同时也使光伏电站投产运行后投资回收难度加大。内蒙古电力勘测设计院卢利和等人2011年向国家知识产权局申请的实用新型专利(专利证书第2026110号)：一种光伏电站光伏组件的托臂支承结构。该实用新型解决的技术问题是提供一种即具有可靠支承结构性能，又能通过优化组件支承结构，降低建筑工程投资的一种托臂支承结构方式。作为一种技术改进，托臂支承结构采用非通长(或非连续)支承檩条(或构件)，从而降低了前面所提到的通长(或连续)组件支承檩条(或构件)的材料用量偏高，主受力件上荷载偏大，建筑工程投资回收期偏长等问题。

6.5 支撑设计

6.5.3 分析表明，若柱顶未设置通长刚性系杆，或部分设置柔性系杆时，将纵向力分配给端部第1道柱间支撑与计算结果大致相符，且偏安全。

7 连接和节点

7.1 一般规定

7.1.1 光伏支架结构连接节点的传力特点需要与整体结构的分析模型相匹配，并要满足建筑物使用期间对产品的结构性能要求。结构的连接一般采用传力可靠、制作方便、安装简单、便于调整的构造形式，并考虑临时定位措施。

7.1.2 螺栓连接节点主要分为支架结构螺栓连接节点和光伏组件螺栓连接节点两大类。其中支架结构螺栓连接节点设计内容等需遵守现行国家标准《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018 和现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017；光伏组件连接节点螺栓连接节点设计内容等需遵守现行国家标准《铝合金结构设计规范》GB 50429。

7.1.4 压块连接分为单侧压块和双侧压块，实际工程中广泛采用铝合金压块将光伏组件与檩条相连接，是应用最为广泛的节点形式之一。压块连接需要考虑下列因素：

(1)当采用压块连接时，压块需具备性能参数和承载力等相应证明资料；

(2)当压块无相应证明资料时，需按下列要求对其验算。图 4 用于将光伏组件安装在檩条上的压块分为单侧压块，图 5 用于将光伏组件安装在檩条上的双侧压块。

正应力：
$$\sigma=q\frac{b_1}{t_4}\left(3\frac{b_1}{t_4}+1\right)\leqslant f \tag{4}$$

剪应力：
$$\tau=\frac{3qb_1}{2t_{\min}}\leqslant f_v \tag{5}$$

刚度：
$$\frac{6qb_1^2}{E}\left(\frac{b_1}{t_2^3}+\frac{2h_1}{t_4^3}\right)\leqslant 1 \tag{6}$$

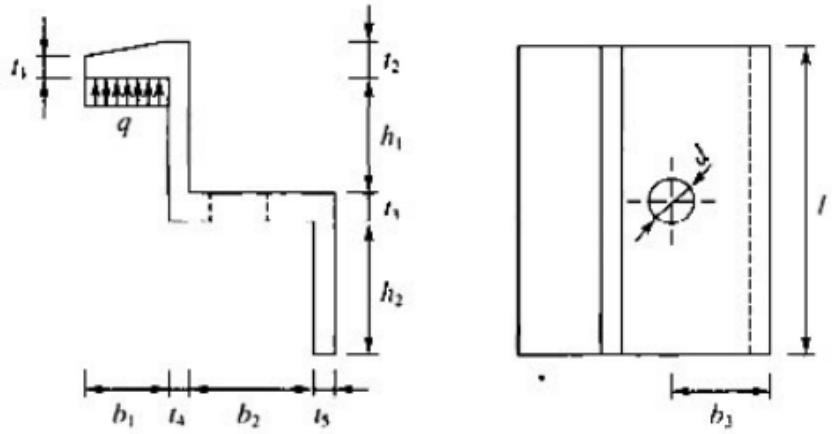


图 4　单侧压块及其尺寸示意

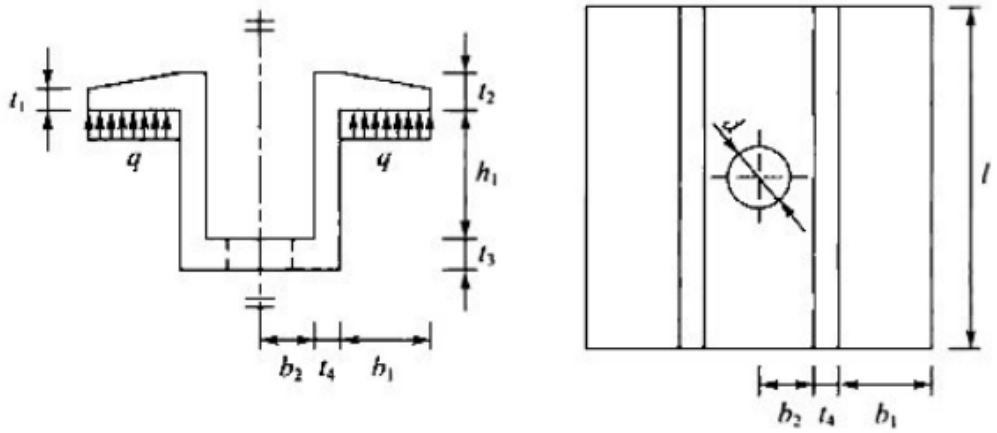


图 5　双侧压块及其尺寸示意

式中：q——均布线荷载，由式 $q = F/lb_1$ 计算得到，其中 F 是由光伏组件传递至单个压块的集中力；

t_{min}——t_2、t_3 中的较小者；

E——材料的弹性模量；

f——材料的抗拉强度设计值；

f_v——材料的抗剪强度设计值。

7.2　梁柱连接

7.2.2　螺栓连接主要用于现场拼接与立装，焊缝连接主要用于工厂加工制作。

7.3 节　　点

7.3.3　采用高强度螺栓连接时，直径一般为 M10～M18 螺栓。

7.3.4　檩条选用 U 形卷边型钢时，檩条与檩条连接处采用 C 形连接件见图 6。

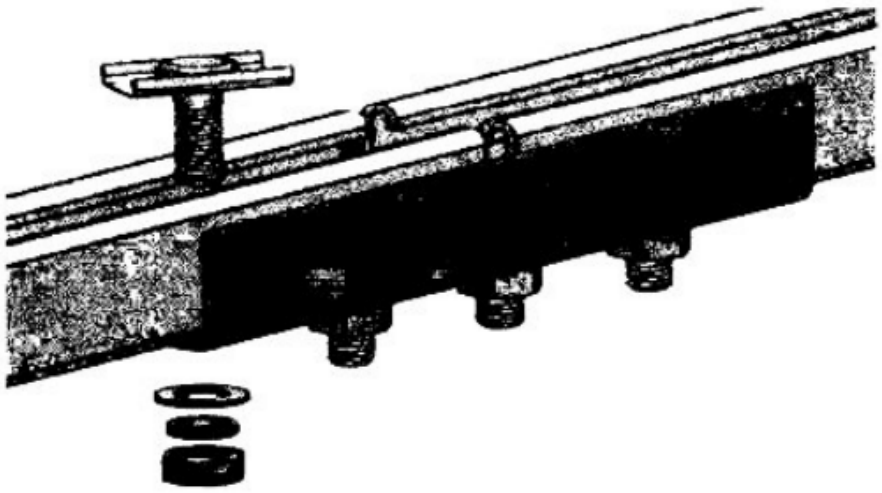
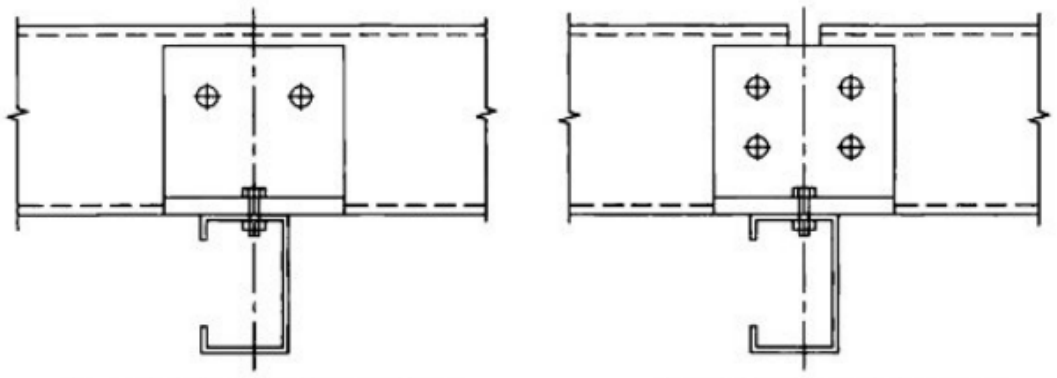


图 6　U 形檩条的 C 形连接件示意图

7.3.5　檩条与支架梁简支或连续连接节点见图 7；檩条与檩托板连接节点见图 8；当檩条与支架梁均采用 U 形卷边型钢时，连接节点见图 9。



（a）当次梁在支座处不截断时　　（b）当次梁在支座处截断时

图 7　简支或连续连接节点示意图

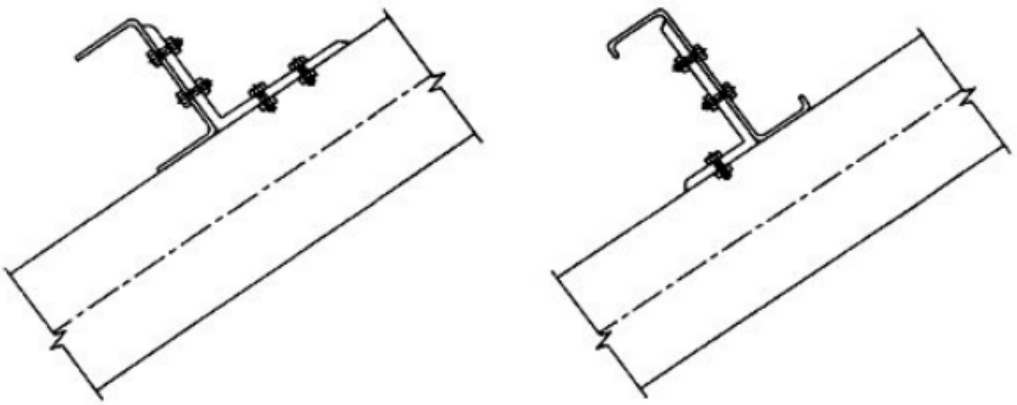


图 8　檩条和檩托板连接节点示意图

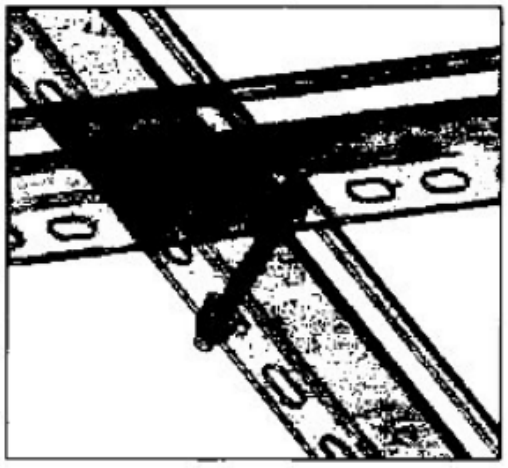
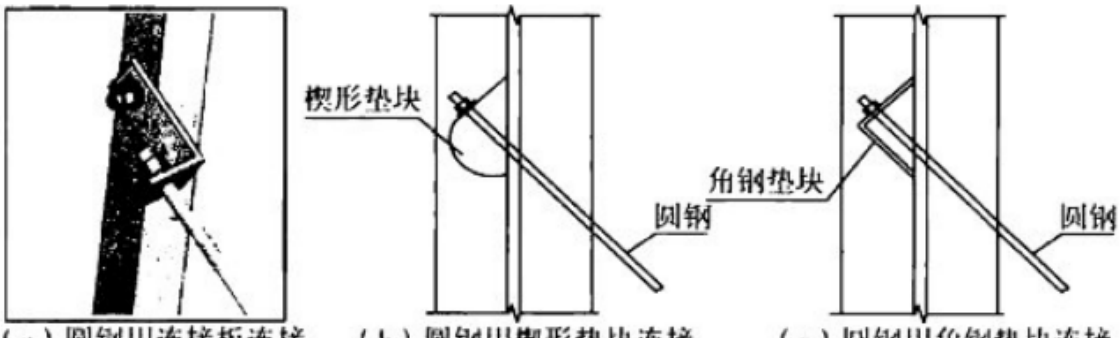


图 9　U 形卷边型钢主梁和檩条连接节点示意图

7.3.6　圆钢支撑与光伏支架柱腹板直接连接时，设置的角钢垫块或楔形垫块见图 10；当柱采用方钢管或圆钢管时，圆钢支撑可采用抱箍式连接见图 11。



（a）圆钢用连接板连接　（b）圆钢用楔形垫块连接　（c）圆钢用角钢垫块连接

图 10　角钢垫块或楔形垫块示意图

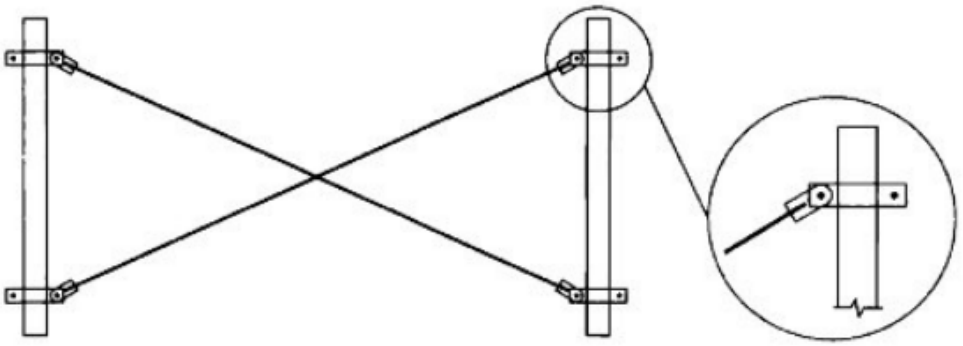
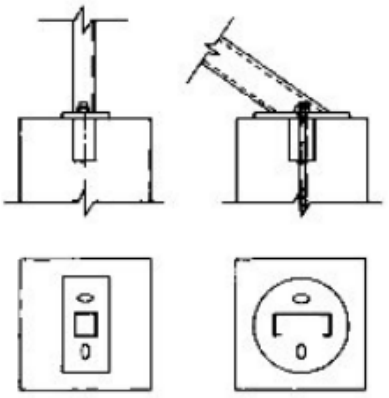
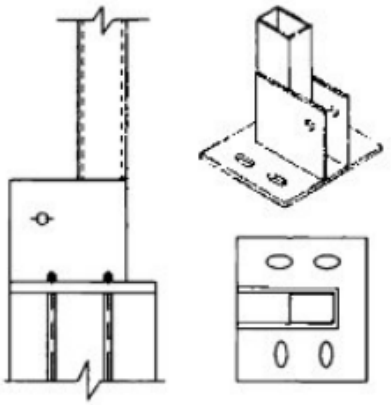


图 11　抱箍式连接示意图

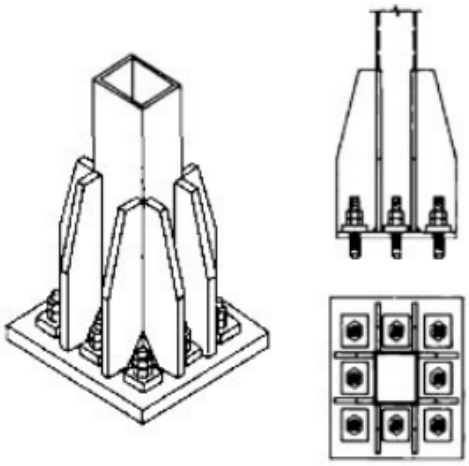
7.3.7　柱脚节点设计需满足现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017的相关规定。柱脚常见节点型式见图 12。



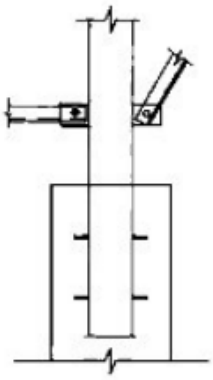
（a）铰接外露式柱脚



（b）铰接外露式柱脚



（c）刚接外露式柱脚



（d）插入式或埋入式柱脚

图 12　柱脚常见节点型式示意图

8 地基基础设计

8.1 一般规定

8.1.3 地基基础的抗震承载力验算除符合本标准的规定外，还应符合现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007、《建筑抗震设计规范》GB 50011 及《构筑物抗震设计规范》GB 50191 等的有关规定。

(1)现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 第 4.2.4 条：验算天然地基地震作用下的竖向承载力时，地震作用效应标准组合的基础底面平均压力和边缘最大压力要求：

$$p \leqslant f_{aE} \tag{7}$$

$$p_{max} \leqslant 1.2 f_{aE} \tag{8}$$

式中：p—— 地震作用效应标准组合的基础底面平均压力；

p_{max}—— 地震作用效应标准组合的基础边缘的最大压力。

在风荷载和地震作用下，基础底面允许局部脱开地基土，独立支架、可调支架等柱脚固接的支架基础脱开地基土的面积控制在底面全面积的 15%内；联合支架、固定支架等柱脚铰接的支架基础脱开地基土的面积控制在底面全面积的 25%内。

(2)根据现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 第 4.2.1 的规定，对地基主要受力层范围内不存在软弱黏性土层的建筑，以及不超过 8 层且高度在 24m 以下的一般民用框架建筑，可不进行天然地基及基础的抗震承载力验算。

8.1.4 当设计有要求或有下列情况之一时，一般需要进行微型桩试验检测并确定微型单型极限承载力：

(1)设计等级为甲级的微型桩基础；

(2)无相关试桩资料参考的设计等级为乙级的微型桩基础；

(3)地基条件复杂,微型基桩施工质量可靠性低;

(4)本地区采用的新型微型桩或采用新工艺成桩的微型桩基础。

8.2 地　　基

Ⅰ 地基计算

8.2.1 地基基础设计等级为丙级的光伏支架,采用静力触探及标贯试验参数,结合工程经验能够确定地基承载力特征值和微型桩竖向承载力特征值。同时提供触探及必要的钻探和土工试验资料。

Ⅱ 软弱地基

8.2.6 软弱地基需要根据各地区经验选择适宜的浅层地基处理方案。当存在液化土层的地基时,根据支架结构的抗震设防类别、地基的液化等级,结合具体情况采取的措施有:

(1)设防烈度为6度时,除黄土地基外,一般情况下不需要进行砂土液化判别和处理;

(2)浅埋天然地基的支架结构,当上覆盖非液化土层厚度和地下水位深度符合下列条件之一时,一般不考虑液化影响;

$$d_u > d_0 + d_b - 2 \tag{9}$$

$$d_w > d_0 + d_b - 2 \tag{10}$$

$$d_u + d_w > 1.5d_0 + 2d_b - 4.5 \tag{11}$$

式中:d_u——上覆盖非液化土层厚度(m),计算时宜将淤泥和淤泥质土层扣除;

d_w——地下水位深度(m),宜按设计基准期内年平均最高水位采用,也可按近期内年最高水位采用;

d_0——液化土特征深度(m),按表5采用;

d_b——基础埋置深度(m),不超过2m时按2m计算。

(3)当液化砂土土层、粉土层较平坦且均匀时,按表6选用地基抗液化措施。

表 5　液化土特征深度 d_0(m)

饱和土类别	7 度	8 度	9 度
粉土	6	7	8
砂土	7	8	9

注：当区域的地下水位处于变动状态时，应按不利的情况考虑。

表 6　地基抗液化措施

建筑抗震设防类别	地基的液化等级		
	轻微	中等	严重
丁类	可不采取措施	可不采取措施	基础和上部结构处理，或其他经济的措施

注：乙、丙类支架结构的地基抗液化措施，需要符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011、《构筑物抗震设计规范》GB 50191 的相应要求。

(4)抗震设防类别丁类构筑物，属于次要构筑物，地震破坏一般不会产生次生灾害和较大经济损失。一般情况下，地震作用仍需要符合本地区抗震设防烈度的要求；抗震措施允许比本地区抗震设防烈度的要求适当降低，但 6 度时不应降低。

Ⅳ　湿陷性黄土地基

8.2.11　现行国家标准《湿陷性黄土地区建筑规范》GB 50025 中明确规定：拟建在湿陷性黄土场地上的建筑物，应根据其重要性、地基受水浸湿可能性的大小和在使用期间对不均匀沉降限制的严格程度，分为甲、乙、丙、丁四类，并应符合该标准表 3.0.1 的规定。

(1)对于湿陷性黄土地基一般采用地基处理、防水措施或结构措施三种处理措施。地基处理措施消除了地基的全部或部分湿陷量，或基础穿透全部湿陷性黄土层，或将基础设置在非湿陷性黄土层。防水措施中的基本防水措施使得在布置场地排水、地面防水、排水沟等方面防止了雨水的渗漏。结构措施减小或调整地基基础

的不均匀沉降，或使结构适应地基的变形。

(2)根据宁夏地区湿陷性黄土地区已建光伏电站微型桩基础等的运行经验，对Ⅰ级非自重轻微湿陷性黄土地区，微型桩基础可不必穿透湿陷性黄土层，可考虑在Ⅰ级非自重轻微湿陷性黄土层中有1/3桩长参与侧摩阻力计算。

Ⅴ 膨胀土地基

8.2.12 现行国家标准《膨胀土地区建筑技术规范》GB 50112中明确规定：膨胀土场地上的建筑物，根据其重要性、规模、功能要求和工程地质特征以及土中水分变化可能造成建筑物破坏或影响正常使用的程度，将地基基础分为甲、乙、丙三个设计等级。设计时，根据具体情况按该标准表3.0.2选用。

Ⅵ 冻土地基

8.2.13 对于建在多年冻土场地上的光伏支架结构，地基状态考虑保持冻结状态，地基基础设计内容等一般需要考虑下列因素：

(1)冻土场地上的基础埋置深度：

1)对强冻胀性土、特强冻胀性土，基础的埋置深度推荐大于设计冻深0.25m；

2)对不冻胀、弱冻胀和冻胀性地基土，基础埋置深度推荐不小于设计冻深；

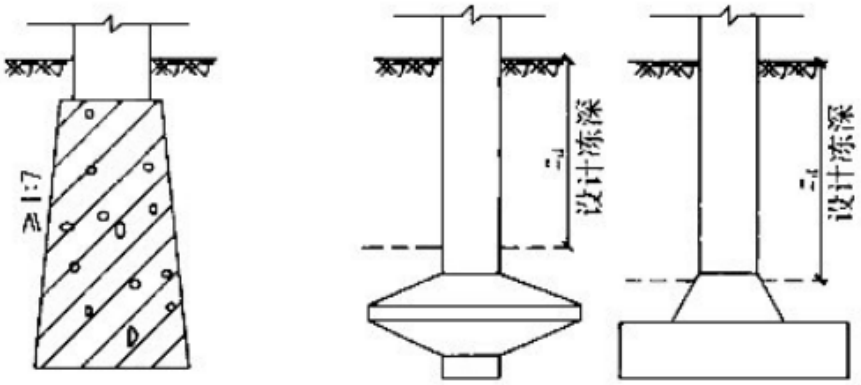
3)对深季节冻土，基础底面可埋置在设计冻深范围之内，基底允许冻土层最大厚度一般按现行行业标准《冻土地区建筑地基基础设计规范》JGJ 118—2011附录C的有关规定执行。

(2)拟建在冻胀性地基土场地上的各类光伏支架结构设计时，采取减小或消除冻胀力危害的结构措施：

1)增加结构整体刚度，设置钢筋混凝土基础梁；

2)推荐采用各类型独立基础；

3)采用正梯形斜面基础[图13(a)]、底部不带扩大部分的自锚式基础[图13(b)]。



（a）正梯形斜面基础　　（b）自锚式基础

图 13　基础形式

8.3　基　　础

8.3.1　建设场地存在震陷性、湿陷性、膨胀性、冻胀性或侵蚀性等不良土层时，或上覆土层为强度低、压缩性高的软弱土层，不能满足强度和变形要求时，或在抗震设防地区地基持力层范围内有可液化土层时，设计工程师选择的基础形式需与之相适应。

（1）在场地地下水位低、稳定持力层埋深大、冬季施工、地形起伏大或对场地生态恢复要求较高时，支架的基础一般采用微型桩基础。

（2）当支架基础底面尺寸较小时，一般采用无筋基础或无筋扩展基础；对软弱地基或相邻柱距较小时，一般采用联合钢筋混凝土基础或柱下条形基础。

Ⅰ　微型桩基础

8.3.3　近年来光伏支架结构基础大量采用了微型桩基础，而且几乎所有微型桩基础埋入持力层深度均没有满足现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 中的最小深度要求，且无承台结构。微型桩基础的出现适应光伏支架结构这种载荷较小，同时上部结构允许变形较大的特殊情况。

8.3.4、8.3.5　光伏上部支架竖向压力一般较小，在微型桩基础计

算中一般是上拔力和水平荷载对短桩基础设计起控制作用，尤其是季节性冻土和膨胀土地区的短桩基础设计，需要考虑地基土的冻胀、膨胀作用，对基础的上拔承载力进行验算。

(1)现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007、《建筑地基处理技术规范》JGJ 79 和《建筑桩基技术规范》JGJ 94 等相关规范中，均未有微型桩承载力的估算公式。

(2)微型桩基础承载力也由基础侧阻力和基础端阻力组成。采用桩基础的承载力经验公式估算微型桩基础竖向承载力，实践证明结果偏于安全。

(3)根据近年微型钢桩基础实践使用经验，在微型钢桩基础设计中需要重点注意有负摩阻力时的基础竖向承载力计算和水平承载力计算，以及上部支架的位移计算和微型钢管桩基础的防腐设计。

8.3.6 微型桩桩端持力层为一般土层时，一般不考虑桩端阻力。

8.3.9 在一些特别好的地基土地区，如新疆存在很多雨雪量较小并且场地较平坦的无冻胀性戈壁土地区，这些地区地基土较密实，不会有水流冲刷。在这些地区如通过了大量有代表性的微型桩基础试验，并通过计算满足最基本的承载力、稳定性和强度的要求，同时上部支架为联合支架(单坡支架结构)并满足基本的整体刚性要求，则微型桩基础的基本设计规定和构造要求可以适当放宽。

8.3.10 地基基础验收检验的抽检位置有以下几种：

(1)抽检点随机、均匀和有代表性分布；

(2)局部岩土特性复杂可能影响施工质量的部位；

(3)施工出现异常情况的部位；

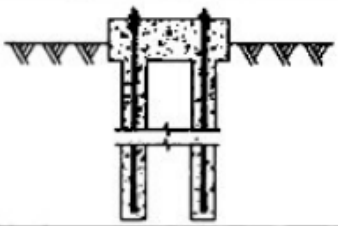
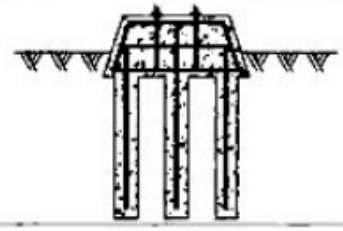
(4)对重要的部位需要增加检验数量；

(5)检验结果不满足设计要求时，需要分析原因，提出处理措施。

Ⅱ 岩石锚杆基础

8.3.11 岩石锚杆基础一般采用的几种型式见表 7。

表 7　岩石锚杆基础可采用型式

名称	外形图形	使用简要说明
直锚式		1　覆盖层薄或裸露的硬质微风化岩石； 2　常用钻机成孔； 3　塔腿地脚螺栓直接锚入
承台式		1　覆盖层较厚的中等风化岩石； 2　锚筋间距需要加大的基础； 3　可采用小直径锚筋的群锚型
嵌固式		1　风化岩石； 2　采用人工开挖或有控制的小爆破加人工修凿

(1)岩石锚杆基础承载力计算，由于采用的锚筋抗拉强度、钢筋与砂浆间的粘结强度、砂浆与岩石间的粘结强度等均为设计值，对应的锚杆的上拔力一般取设计值。

(2)风化程度分类和岩石的强度分类见表 8 和表 9。

表 8　风化程度分类

风化程度	特征	
	硬质岩石	软质岩石
未风化	岩质新鲜，未见风化痕迹	
微风化	组织结构基本未变，仅节理面有铁锰质渲染或矿物略有黄色；有少量风化裂隙	
中等风化	1　组织结构部分破坏，矿物成分未破坏，仅沿节理面出现次生矿物； 2　岩体被节理、裂隙分割成块(200mm～500mm)，裂隙中填充少量风化物，锤击声脆，且不易击碎； 3　用镐难挖掘，用岩心钻方可钻进	1　组织结构部分破坏，矿物成分发生变化，节理面附近的矿物已风化成土状； 2　岩体被节理、裂隙分割成岩块(200mm～500mm)，锤击易碎； 3　用镐难挖扭，用岩心钻方可钻进

续表 8

风化程度	特　征	
	硬质岩石	软质岩石
强风化	1　组织结构已大部分破坏，矿物成分已显著变化，长石、云母已风化成次生矿物； 2　岩体被节理、裂隙分割成碎石状，(20mm～200mm)，碎石用手可以折断； 3　用镐可以挖掘，手摇钻不易钻进	1　组织结构已大部分破坏，矿物成分已显著变化含大量黏土质黏土矿物，风化裂隙发育快； 2　岩体被切割成碎块，干时可用手折断或捏碎，浸水或干湿交替时可较迅速地软化或崩解； 3　用镐可以挖掘，干钻可钻进
全风化	1　组织结构已基本破坏，但尚可辨认，并且有微弱的残余结构强度； 2　可用镐挖，干钻可钻进	1　组织结构已基本破坏，但尚可辨认，并且有微弱的残余结构强度； 2　可用镐挖，干钻可钻进

注：只要具备表中特征之一，就被认为属该类风化。

表 9　岩石强度分类

岩石类别	代表性岩石
硬质岩石	花岗岩、花岗片麻岩、闪长岩、玄武岩、石灰岩、石英砂岩、石英岩、大理岩、硅质砾岩等
软质岩石	黏土岩、页岩、千枚岩、绿泥石片岩、云母片岩等

注：除表中所列代表性岩石外，凡新鲜岩石的饱和单轴抗压强度大于或等于 30 者，应按硬质岩石考虑；小于者可按软质岩石考虑。

Ⅲ　稳定性计算

8.3.13　据有关研究成果，在长期持续荷载作用下，位于黏性土地基中的基础其抗拔承载力会出现明显减小现象，而砂土地基中的基础抗拔承载力变化不大。因此，进行基础上拔和倾覆稳定验算时，对砂类土地基基础一般按短期荷载效应计算，对黏性土地基基础按长期持续荷载效应计算。

8.3.15　微型桩基础整体稳定性验算水平抗力(或极限倾覆力)

R_H，当稳定验算不满足要求时，一般采取如下措施增强微型桩基础的水平抗力：建议在基础埋深 1/3 处加设上卡盘，当不满足时采取相关增加措施增设下卡盘，计算简图见图 14 和图 15。当地基土为冻胀土时，不采取设卡盘或防冻胀措施。

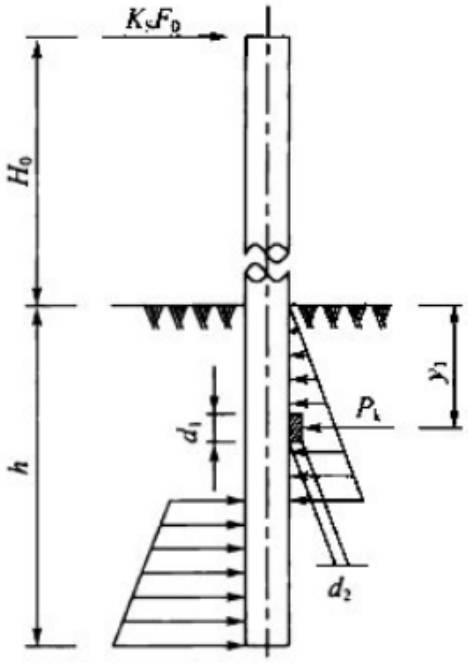


图 14　带上卡盘基础倾覆计算简图

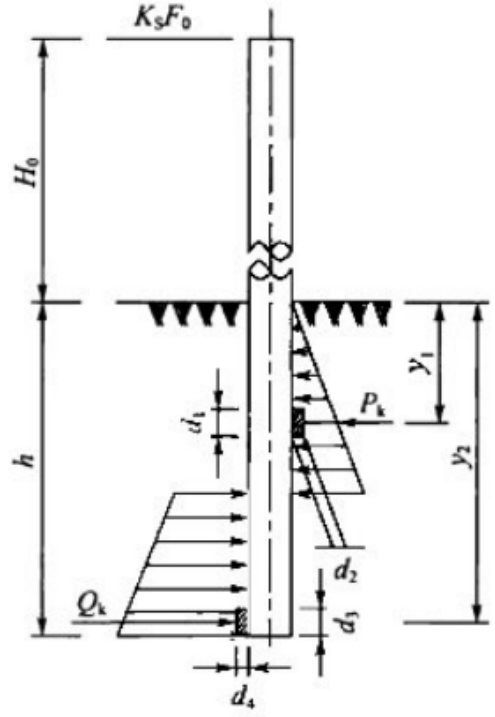


图 15　带上下卡盘基础倾覆计算简图

(1)计算带上卡盘的单桩短桩基础时，当基础埋深及上卡盘位置确定后，应按式(12)计算卡盘横向压力，按式(13)、式(14)确定卡盘长度。

$$P_k = K_1 F_0 - m b_0 h^2 \left(\theta^2 - \frac{1}{2}\right) \tag{12}$$

$$L_1 = \frac{P_k}{y_1 (m d_1 + 2\gamma d_2 \tan\beta)} \tag{13}$$

$$L_{上} = L_1 + b \tag{14}$$

式中：P_k —— 相应于作用的基本组合时，卡盘横向压力设计值(kN)；

K_f——基础附加分项系数；

F_0——上部结构水平作用力设计值(kN)；

b_0——计算宽度(m)；

L_1——上卡盘计算长度(m)；

y_1——设计地面至上卡盘的距离(m)；

d_1——上卡盘厚度(m)；

d_2——上卡盘宽度(m)；

γ——桩侧土的有效重度(kN/m³)；

$L_上$——上卡盘全长(m)。

(2)当采用带上、下卡盘的单桩基础时，应分别按式(16)、式(17)确定上、下卡盘压力值，按式(15)确定上卡盘长度，按式(12)、式(13)确定下卡盘长度。

$$P_k = \frac{(K_f F_0 - F_u)(H_0 + y_2)}{y_2 - y_1} \tag{15}$$

$$Q_k = \frac{(K_f F_0 - F_u)(H_0 + y_1)}{y_2 - y_1} \tag{16}$$

$$L_2 = \frac{Q_k}{y_2(md_3 + 2\gamma d_4 \tan\beta)} \tag{17}$$

$$L_下 = L_2 + b \tag{18}$$

式中：Q_k — 相应于作用的基本组合时，下卡盘横向压力设计值(kN)；

L_2— 下卡盘计算长度(m)；

y_2——设计地面至下卡盘的距离(m)；

d_3——下卡盘厚度(m)；

d_4——下卡盘宽度(m)；

$L_下$——下卡盘全长(m)。

8.3.16 由于微型钢桩属于细长桩，长径比很大，所以微型钢桩在竖向荷载下的稳定成为设计工程师关心的问题。但已有研究表明，除非在特别软弱的土层中，屈曲一般不控制微型钢桩的竖向抗压承载力。即使很软弱土也能提供微型钢桩足够的侧向支持，防

止微型桩压屈。

8.4 屋面光伏支架结构基础

8.4.1 混凝土结构屋面上现浇矩形基础，适合屋面承载力小、风荷载高的地区和屋面，矩形基础与屋面用化学锚栓连接；混凝土屋面上放置预制矩形基础，适合屋面承载力富余较大、风荷载小的屋面。

8.4.8 当风荷载不大时，对于安装在平屋顶上的支架，可采用预制压块固定支架。

9 防　　腐

9.1 支架防腐

9.1.1 防腐蚀设计是一项节约资源、降低能耗、保护环境的重要工作。防腐工作的开展离不开表面处理即化学清、喷砂除锈和涂料涂敷等，如不注意清洁文明生产，利用无污染材料、工艺及技术，会对环境造成极大的污染。

现行行业标准《建筑钢结构防腐蚀技术规程》JGJ/T 251 附录 A 对大气环境气体类型进行了划分。大气环境对光伏钢支架结构长期作用的腐蚀性等级见表 10。

表 10　大气环境对光伏钢支架结构长期作用的腐蚀性等级

腐蚀类型		腐蚀速率 (mm/a)	腐蚀环境		
腐蚀性等级	名称		大气环境气体类型	年平均环境相对湿度(%)	大气环境
Ⅰ	无腐蚀性	<0.001	A	<60	乡村大气
Ⅱ	弱腐蚀性	0.001～0.025	A	60～75	乡村大气
			B	<60	城市大气
Ⅲ	轻腐蚀性	0.025～0.050	A	>75	乡村大气
			B	60～75	城市大气
			C	<60	工业大气
Ⅳ	中等腐蚀性	0.050～0.200	B	>75	城市大气
			C	60～75	工业大气
			D	<60	海洋大气
Ⅴ	较强腐蚀性	0.200～1.000	C	>75	工业大气
			D	60～75	海洋大气
Ⅵ	强腐蚀性	1.000～5.000	D	>75	海洋大气

注：1　处于潮湿状态或不可避免结露的部位，环境相对湿度应取大于 75%；

2　在特殊场合与额外腐蚀负荷作用下，应将腐蚀类型提高等级。

9.2 支架基础防腐

9.2.3 混凝土结构暴露的环境类别划分见表 11。

表 11 混凝土结构的环境类别

环境类别	条　件	耐久性设计
一	室内干燥环境； 永久的无侵蚀性静水浸没环境	现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010、《混凝土结构耐久性设计规范》GB/T 50476 的有关规定
二 a	室内潮湿环境； 非严寒和非寒冷地区的露天环境； 非严寒和非寒冷地区与无侵蚀性的水或土直接接触的环境； 严寒冷和寒冷地区的冰冻线以下与无侵蚀性的水或土直接接触的环境	
二 b	干湿交替环境； 水位频频变动区环境； 严寒和寒冷地区的露天环境； 严寒和寒冷地区的冰冻线以上与无侵蚀性的水或土直接接触的环境	
三 a	严寒和寒冷地区冬季水位变动区环境； 受除冰盐影响环境； 海风环境	
三 b	盐渍土环境； 受除冰盐作用环境； 海岸环境	
四	海洋环境	现行国家标准有关规定
五	受人为或自然的侵蚀性物质影响的环境	

注：1 室内潮湿环境是指构件表面经常处于结露或湿润状态的环境；

2 严寒和寒冷地区的划分应符合现行国家标准《民用建筑热工设计规范》GB 50176 的有关规定；

3 海岸环境和海风环境宜根据当地情况，考虑主导风向及结构所处迎风、背风部位等因素的影响，由调查和工作经验确定；

4 受除冰盐影响环境是指受到除冰盐盐雾影响的环境，受除冰盐作用环境是指被除冰盐溶液溅射的环境以及使用除冰盐地区的洗车房、停车楼等建筑；

5 暴露环境是指混凝土结构表面所处的环境。

9.2.4 国际标准组织在1992年颁布了大气腐蚀性分类标准ISO 9223。按照标准金属试件的腐蚀率，综合润湿时间和大气中腐蚀介质(SO_2和Cl^-)含量进行大气腐蚀性分类。大气腐蚀性对金属光伏钢支架结构第一年的腐蚀速率见表12。钢结构防腐蚀定期检查的项目、内容和周期见表13。

表12 大气腐蚀性对金属光伏钢支架结构第一年腐蚀速率

序号	腐蚀类型		标准材料腐蚀速率 r_{corr}/（μm/a）			
			碳钢	锌	铜	铝
1	C1	很低	$r_{corr}\leqslant 1.3$	$r_{corr}\leqslant 0.1$	$r_{corr}\leqslant 0.1$	可忽略
2	C2	低	$1.3<r_{corr}\leqslant 25$	$0.1<r_{corr}\leqslant 0.7$	$0.1<r_{corr}\leqslant 0.6$	$r_{corr}\leqslant 0.6$
3	C3	中等	$25<r_{corr}\leqslant 50$	$0.7<r_{corr}\leqslant 2.1$	$0.6<r_{corr}\leqslant 1.3$	$0.6<r_{corr}\leqslant 1.2$
4	C4	高	$50<r_{corr}\leqslant 80$	$2.1<r_{corr}\leqslant 4.2$	$1.3<r_{corr}\leqslant 2.8$	$2<r_{corr}\leqslant 5$
5	C5	很高	$80<r_{corr}\leqslant 200$	$4.2<r_{corr}\leqslant 8.4$	$2.8<r_{corr}\leqslant 5.6$	$5<r_{corr}\leqslant 10$

表13 钢结构防腐蚀定期检查的项目、内容和周期

检查项目	检查内容	检查周期(a)
防腐蚀保护层外观检查	涂层破损情况	1
防腐蚀保护层的性能检查	鼓泡、剥落、锈蚀	5
腐蚀量检测	测定钢结构壁厚	5

S/N:155182·0464

9 155182 046405

中华人民共和国能源行业标准

光伏支架结构设计规程

NB/T 10115—2018

☆

中国计划出版社出版发行

网址：www.jhpress.com

地址：北京市西城区木樨地北里甲11号国宏大厦C座3层

邮政编码：100038　电话：(010)63906433(发行部)

北京市科星印刷有限责任公司印刷

850mm×1168mm　1/32　3.625印张　89千字

2019年4月第1版　2019年4月第1次印刷

印数1—3000册

☆

统一书号：155182·0464

定价：33.00元

版权所有　侵权必究

侵权举报电话：(010)63906404

如有印装质量问题，请寄本社出版部调换