



团 体 标 准

T/CSPSTC XXX—202X

光伏柔性支架系统设计规程

Design Regulations of Photovoltaic Flexible Support Systems

（征求意见稿）

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国科技产业化促进会 发 布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 基本规定 2

 4.1 设计原则 2

 4.2 材料选用 2

5 结构设计 3

 5.1 荷载与作用组合 3

 5.2 结构体系 5

 5.3 构件设计 6

 5.4 基础设计 6

6 连接和节点设计 10

 6.1 一般规定 10

 6.2 节点设计及构造 11

7 布置分析 11

 7.1 布置原则 11

 7.2 光伏柔性支架布置 11

8 防腐设计 11

 8.1 支架部分防腐 12

 8.2 支架基础防腐 12

9 安全监测 12

 9.1 一般规定 12

 9.2 现场检查 12

参 考 文 献 14

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由长江勘测规划设计研究有限责任公司提出。

本文件由中国科技产业化促进会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

光伏柔性支架设计规程

1 范围

本文件规定了光伏柔性支架的术语和定义、基本规定、结构及节点设计、布置方法、防腐、运行监测等。

本文件适用于新建、扩建或改建光伏发电系统的光伏柔性支架的设计。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 699 优质碳素结构钢
GB/T 700 碳素结构钢
GB/T 1591 低合金高强度结构钢
GB/T 5224 预应力混凝土用钢绞线
GB/T 9944 不锈钢丝绳
GB/T 14370 预应力筋用锚具、夹具和连接器
GB/T 19879 建筑结构用钢板
GB/T 20118 钢丝绳通用技术条件
GB/T 20934 钢拉杆
GB/T 21839 预应力混凝土用钢材试验方法
GB/T 25821 不锈钢钢绞线
GB/T 33026 建筑结构用高强度钢绞线
GB 50007 建筑地基基础设计规范
GB 50009 建筑结构荷载规范
GB 50017 钢结构设计标准
GB 50018 冷弯薄壁型钢结构技术规范
GB 50021 岩土工程勘察规范
GB 50025 湿陷性黄土地区建筑标准
GB 50046 工业建筑防腐蚀设计标准
GB 50086 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范
GB 50797 光伏发电站设计规范
GB 50112 膨胀土地区建筑技术规范
GB 50191 构筑物抗震设计规范
GB 51101 太阳能发电站支架基础技术规范
GB 55001 工程结构通用规范
GB 55003 建筑与市政地基基础通用规范
GJ 118 冻土地区建筑地基基础设计规范
B/T 50476 混凝土结构耐久性设计标准
CJ/T 504 高密度聚乙烯护套钢丝拉索
DL/T 5219 架空输电线路基础设计规程
JGJ 94 建筑桩基技术规范
JGJ 118 冻土地区建筑地基基础设计规范
JGJ/T 251 建筑钢结构防腐蚀技术规程
JGJ 257 索结构技术规程
JGJ/T 282 高压喷射扩大头锚杆技术规程
NB/T 10100 光伏发电工程地质勘察规范
NB/T 10115 光伏支架结构设计规程
NB/T 10642 光伏发电站支架技术要求
YB/T 152 高强度低松弛预应力热镀锌钢绞线

YB/T 5004 镀锌钢绞线

YB/T 5295 密封钢丝绳

3 术语和定义

3.1

光伏柔性支架 flexible support structure for photovoltaic modules

预应力拉索支撑光伏组件的支撑结构，包括承重索、抗风结构和拉索支承结构。

3.2

拉索 tension cable

由索体和锚具组成的受拉构件。

3.3

索体 cable body

拉索受力的主要部分，可为钢丝束、钢绞线、钢丝绳或钢拉杆。

3.4

锚具 anchorage

用于保持预应力索体的拉力并将其传递到结构上所用的永久性锚固装置。

3.5

承重索 load-bearing cable

主要用于承受光伏组件自重及其所受荷载的预应力拉索。

3.6

抗风结构 wind resistant structure

由若干拉索及索间杆件组成的空间结构。

3.7

自重状态 self-weight state

光伏柔性支架张拉并安装光伏组件后，在自重作用下的自然几何形态。

3.8

设计荷载状态 design loading state

光伏柔性支架在设计荷载作用下的平衡状态。

4 基本规定

4.1 设计原则

4.1.1 光伏柔性支架结构设计应包括下列内容：

- 结构方案设计，包括结构设计、材料选用、截面选择；
- 结构自重状态、设计荷载状态验算；
- 结构、构件及连接的构造；
- 防腐要求。

4.1.2 光伏柔性支架设计使用年限应不低于25年，地基基础设计使用年限应不低于50年，基础设计等级应不低于丙级，场地和地基条件复杂时应为乙级。

4.1.3 光伏柔性支架结构安全等级应为二级，结构重要性系数不应小于1.0。

4.1.4 光伏柔性支架结构抗震设防类别应为丁类，纵向地震作用由两端的支承结构承受，横向地震作用由柱间支撑承担，在抗震设防烈度为6度的地区，光伏柔性支架结构可不进行抗震验算。

4.1.5 自重状态下，预应力拉索的挠度宜不大于跨度的1/200；设计荷载状态下，预应力拉索的挠度宜不大于跨度的1/70，且组件的变形应在机械荷载试验允许的弹性范围内。

4.2 材料选用

4.2.1 拉索应采取可靠的密封防水、防腐蚀、耐老化和隔热措施。

4.2.2 钢绞线的选用符合下列规定：

- 钢绞线的质量、性能应符合《建筑结构用高强度钢绞线》GB/T 33026、《预应力混凝土用钢绞线》GB/T 5224、《预应力热镀锌钢绞线》GB/T 33363，《高强度低松弛预应力热镀锌钢绞线》YB/T 152、《镀锌钢绞线》YB/T 5004 的规定；

- b) 钢绞线索体可分别采用镀锌钢绞线、高强度低松弛预应力热镀锌钢绞线;
 - c) 钢绞线的抗拉强度可选用 1570 MPa、1670 MPa、1720 MPa、1770 MPa、1860 MPa 或 1960 MPa 等级别;
 - d) 不锈钢钢绞线的质量、性能、公称抗拉强度应符合《不锈钢钢绞线》GB/T 25821 的规定。
- 4.2.3 钢丝绳索体的选用符合下列规定。
- a) 钢丝绳的质量、性能应符合《钢丝绳通用技术条件》GB/T 20118 的规定, 密封钢丝绳的质量、性能应符合 YB/T 5295 的规定。
 - b) 钢丝绳索体宜采用密封钢丝绳、单股钢丝绳、多股钢丝绳截面形式。钢丝绳索体应由绳芯和钢丝股组成, 结构用钢丝绳应采用无油镀锌钢芯钢丝绳。
 - c) 钢丝绳的抗拉强度可选用 1570 MPa、1720 MPa、1770 MPa、1860 MPa 或 1960 MPa 等级别。
 - d) 不锈钢钢丝绳的质量、性能、公称抗拉强度应符合 GB/T 9944 的规定。
- 4.2.4 钢拉杆索体的选用满足下列要求:
- a) 钢拉杆的质量、性能应符合《钢拉杆》GB/T 20934 的规定;
 - b) 钢拉杆杆体的屈服强度可选用 345 MPa、460 MPa、550 MPa 或 650 MPa 等级别。
- 4.2.5 拉索两端锚具的构造应由索体、索力、施工安装、索力调整等多种因素确定。热铸锚具和冷铸锚具的质量、性能、检验和验收应符合《高密度聚乙烯护套钢丝拉索》CJ/T 504 的规定。
- 4.2.6 钢材选用符合下列规定:
- a) 用于承重的冷弯薄壁型钢、热轧型钢, 应采用《碳素结构钢》GB/T 700 规定的 Q235 和《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 规定的 Q355 钢材;
 - b) 承重的梁、柱等构件宜采用 Q235、Q355、Q390、Q420、Q460 钢, 其质量应分别符合《碳素结构钢》GB/T 700、《低合金高强度结构钢》GB/T 1591 和《建筑结构用钢板》GB/T 19879 的规定, 当有根据时可采用其他牌号的钢材;
 - c) 钢拉杆的质量、性能应符合《钢拉杆》GB/T 20934 的规定, 可采用低碳钢或热处理高强度钢。

5 结构设计

5.1 荷载与作用组合

5.1.1 风荷载

5.1.1.1 光伏支架基本风压的确定应符合 GB 50009 的有关规定, 且不应小于 0.30 kPa, 重现期应按下列原则确定:

- a) 柔性光伏支架设计时, 应按 25 年重现期确定基本风压;
- b) 柔性光伏支架地基基础设计时, 应按 50 年重现期确定基本风压。

5.1.1.2 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: 计算结构构件时, 风荷载标准值应按式 (1) 计算:

$$\omega_k = \beta_z \mu_s \mu_z \omega_0 \quad (1)$$

式中:

ω_k ——风荷载标准值, 单位为千牛每平方米 (kN/m^2);

β_z ——高度 z 处的风振系数, 对于结构简单的中小跨度柔性支架, 可采用对平均风荷载乘风振系数的方法近似考虑结构的风动力效应。风振系数可取为: 单层索 1.2~1.5; 双层索系 1.6~1.9; 其中, 柔性支架结构跨度较大或自振频率较低者取较大值; 采用了地锚索、抗风桁架、阻尼器等减小风致动力效应措施的光伏柔性支架, 在有试验结果或者动力计算作为依据的前提下, 风振系数可在此基础上适当减小。

μ_s ——风荷载整体体型系数, 可按 NB/T 10115 进行取值;

μ_z ——风压高度变化系数, 可按 GB 50009 取值;

ω_0 ——基本风压, 单位为千牛每平方米 (kN/m^2)。

5.1.1.3 对于满足下列条件之一的索结构, 应通过风振响应分析确定风动力效应:

- a) 跨度大于 60 m 的其他类型索结构;
- b) 索结构的基本自振周期大于 1.0 s。

5.1.2 雪荷载

5.1.2.1 作用于光伏柔性支架水平投影面上的雪荷载标准值应按 GB 50009 的规定确定。

5.1.2.2 应考虑钢结构、预应力索和光伏组件在使用年限内可能遭遇的覆冰荷载。

5.1.3 温度荷载

5.1.3.1 柔性光伏支架结构的基本气温应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》规定的方法确定。
 5.1.3.2 结构的最大升温 and 降温应根据结构合拢温度或形成约束的时间确定，或根据施工周期内最不利的温度确定。

5.1.4 地震荷载

5.1.4.1 对于抗震设防烈度为 7 度及 7 度以上地区，柔性光伏支架结构应进行多遇地震作用效应分析。
 5.1.4.2 对于抗震设防烈度为 7 度及 7 度以上地区，中小跨度结构可采用振型分解反应谱法进行地震效应分析；对于其他跨度，应考虑索结构几何非线性，采用时程分析法进行单维地震作用抗震计算，并宜进行多维地震效应时程分析。

5.1.5.3 在进行地震效应分析时，对于计算模型中仅含索的结构阻尼比值宜取 0.01；对于由索与其他构件单元组成的结构体系的阻尼比值应进行调整。

5.1.4.4 柔性光伏支架结构的地震荷载应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》规定的方法确定。

5.1.5 作用组合

5.1.5.1 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。

5.1.5.2 光伏柔性支架及支架基础设计时，荷载组合的效应设计值应符合下列规定：

a) 正常使用极限状态下，标准组合的效应设计值 S_k 应按式（2）确定：

$$S_k = S_{Gk} + \psi_W S_{Wk} + \psi_S S_{Sk} + \psi_T S_{Tk} + \psi_{Eh} S_{Ehk} + \psi_M S_{Mk} \quad (2)$$

式中：

S_{Gk} ——永久荷载作用标准值 G_k 的效应；

S_{Wk} 、 ψ_W ——风荷载作用标准值 Q_{Wk} 的效应和其组合值系数；

S_{Sk} 、 ψ_S ——雪荷载作用标准值 Q_{Sk} 的效应和其组合值系数；

S_{Tk} 、 ψ_T ——温度作用标准值 Q_{Tk} 的效应和其组合值系数；

S_{Ehk} 、 ψ_{Eh} ——水平地震作用标准值 Q_{Ehk} 的效应和其组合值系数；

S_{Mk} 、 ψ_{Mk} ——施工检修荷载作用标准值 Q_{Mk} 的效应和其组合值系数。

b) 承载能力极限状态下，基本组合效应设计值 S_d 应按式（3）确定：

$$S_d = \gamma_G S_{Gk} + \gamma_W \psi_W S_{Wk} + \gamma_S \psi_S S_{Sk} + \gamma_T \psi_T S_{Tk} + \gamma_{Eh} \psi_{Eh} S_{Ehk} + \gamma_M \psi_M S_{Mk} \quad (3)$$

式中：

γ_G ——永久荷载作用的分项系数，一般情况下应取 1.3，当永久荷载对结构有利时，不应大于 1.0；

γ_W ——风荷载作用的分项系数，应取 1.5；

γ_S ——雪荷载作用的分项系数，应取 1.5；

γ_T ——温度作用的分项系数，应取 1.5；

γ_{Eh} ——水平地震作用的分项系数，应取 1.4；

γ_M ——施工检修荷载作用的分项系数，应取 1.5。

c) 各种组合工况下的可变荷载组合值系数应符合表 1 的规定。

表1 各种组合工况下的可变荷载组合值系数

荷载作用组合工况	ψ_W	ψ_S	ψ_T	ψ_{Eh}	ψ_M
永久荷载+负风荷载	1.0	—	—	—	—
永久荷载+正风荷载+雪荷载（含覆冰荷载）+温度作用	1.0	0.7	0.6	—	—
永久荷载+雪荷载（含覆冰荷载）+正风荷载+温度作用	0.6	1.0	0.6	—	—
永久荷载+温度作用+雪荷载（含覆冰荷载）+正（负）风荷载	0.6	0.7	1.0	—	—
永久荷载+水平地震作用+正（负）风荷载	0.2	—	—	1.0	—
永久荷载+施工检修荷载	—	—	—	—	1.0
表中“—”号表示组合中不考虑该项荷载或作用效应。 水平地震作用应计入雪荷载的影响，永久荷载标准值为重力荷载代表值，按 GB 50191 的有关规定确定。 正风荷载指组件正面为受荷面时的风荷载，负风荷载指组件背面为受荷面时的风荷载。 施工检修荷载按实际荷载取用并作用于支架最不利位置，并不宜小于 1 kN					

- d) 风荷载、地震作用与施工检修荷载的准永久值系数均取 0。
 - e) 永久荷载应包含安装在索结构上组件、压块、电缆、檩条等所有物品的重量。
- 5.1.5.3 光伏柔性支架及支架基础设计时,荷载的频遇值系数和准永久值系数宜按下列数值选取:

表2 可变荷载的频遇值系数和永久值系数

	频遇值系数	准永久值系数
风荷载	0.4	0
雪荷载(含覆冰荷载)	0.6	根据气候条件,分别取 0.5、0.2 和 0

5.2 结构体系

5.2.1 一般规定

5.2.1.1 光伏柔性支架结构体系可采用单层索系、多层索系等整体受拉为主的预应力索结构体系。

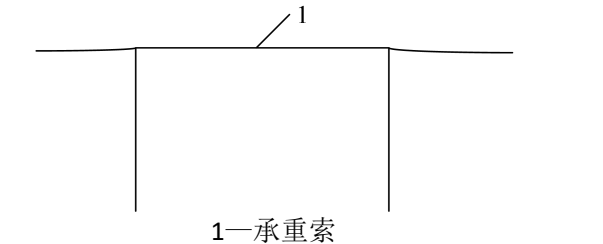


图 1 单层索系结构示意图

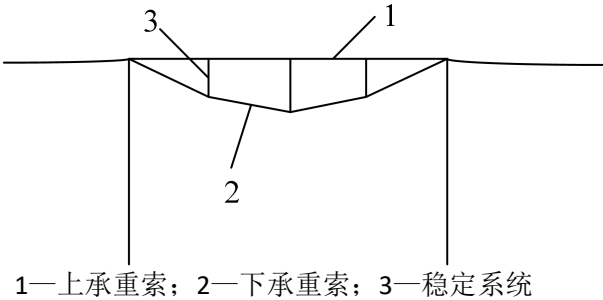


图 2 双层索系结构示意图

- 5.2.1.2 柔性光伏支架结构选型应根据光伏发电场的布置要求,综合考虑地形地貌的特点,选择合理的布置和结构形式,且保证结构的整体刚度和稳定性。
- 5.2.1.3 柔性光伏支架结构在水平方向上应有明确、可靠的传力体系,可通过设置柱间支撑承担水平荷载,水平荷载应按各支撑的刚度进行分配。
- 5.2.1.4 柔性光伏支架结构应同时设置有抵抗风压和风吸荷载的索结构或其他结构。
- 5.2.1.5 柔性光伏支架节点设计不宜出现预应力索出现弯折的情况。

5.2.2 结构分析原则

- 5.2.2.1 应分别进行初始预拉力及荷载作用下的计算分析,计算中均应考虑几何非线性影响。
- 5.2.2.2 光伏柔性支架结构的荷载状态分析应在初始预应力状态的基础上考虑永久荷载与活荷载、雪荷载、风荷载、地震作用、温度作用的组合,并应根据具体情况考虑施工安装荷载。拉索截面及节点设计应采用荷载的基本组合,位移计算应采用荷载的标准组合。
- 5.2.2.3 索结构计算时,应考虑其与支承结构的相互影响,宜采用包含支承结构的整体模型进行分析。支承结构规则布置时,可减少分析模型规模,但应保证支承结构和索结构能真实反映实际场区力学特征;支承结构因地形、已有建筑物或其他因素不规则布置时,应对全场光伏支架进行分析。
- 5.2.2.4 在永久荷载控制的荷载组合作用下,用于抵抗竖向下荷载的预应力索不应松弛;在可变荷载控制的荷载组合作用下,不应因个别索的松弛而导致整体结构失效。
- 5.2.2.5 静力分析应在初始预应力状态的基础上对结构在永久荷载与可变荷载组合作用下的内力、位移进行分析;当计算结果不能满足要求时,应重新确定初始预应力状态。
- 5.2.2.6 设计时应考虑风荷载的静力和动力效应。

5.3 构件设计

5.3.1 一般规定

5.3.1.1 构件的钢材及节点材料应按 GB 50017 的规定选用。节点采用锻造、锻压、铸造或其他加工方法进行制作时，其材质应按 GB/T 1591、GB/T 699 的有关规定选用。

5.3.1.2 构件的承载力和刚度应按 GB 50017 的规定进行验算。

5.3.1.3 主要构件的焊缝质量等级应为二级，其他的焊缝质量等级不应低于三级，构造设计应考虑施加预应力的方式、结构安装偏差及进行二次张拉的可能性。

5.3.1.4 构件应采取可靠、有效的构造措施，保证传力可靠、减少预应力损失及施工便利。

5.3.2 索结构设计

5.3.2.1 索结构的荷载状态分析应在初始预应力状态的基础上考虑永久荷载与活荷载、雪荷载、风荷载、地震作用、温度作用的组合，并根据具体情况考虑施工安装荷载，索截面及节点设计应采用荷载的基本组合，位移计算应采用荷载的标准组合。

5.3.2.2 拉索的抗拉力设计值应按式(4)计算：

$$F = \frac{F_{tk}}{\gamma_R} \quad (4)$$

式中：

F ——拉索的抗拉力设计值，单位为千牛（kN）；

F_{tk} ——拉索的极限抗拉力标准值，单位为千牛（kN）；

γ_R ——预应力索抗力分项系数，取2.0。

5.3.2.3 拉索的承载力应按式（5）验算：

$$\gamma_0 N_d \leq F \quad (5)$$

式中：

N_d ——拉索承受的最大轴向拉力设计值，单位为千牛（kN）；

γ_0 ——结构的重要性系数。

5.3.3 抗风结构设计

5.3.3.1 柔性支架常用的抗风措施包括地锚索、刚性桁架等措施。

5.3.3.2 抗风系统设计时应考虑其与支撑结构的相互影响，宜采用包含基础支撑结构的整体模型进行分析。

5.3.3.3 地锚索可采用钢丝绳，其设计应依据光伏柔性支架结构整体建模的分析结果。

5.3.3.4 刚性桁架可由桁架或刚性杆组成，应进行设计计算，保证构件的强度和稳定。

5.4 基础设计

5.4.1 基本规定

5.4.1.1 支架基础设计前应获得场地的岩土工程勘察文件、阵列总平面布置图、支架结构类型、使用条件及对基础承载力和变形的要求、施工条件、施工周期等资料。

5.4.1.2 支架基础应按承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计。

5.4.1.3 支架基础设计安全等级不应小于上部支架结构设计安全等级，结构重要性系数对于柔性支架基础不应小于 1.0。

5.4.1.4 支架基础设计使用年限不应小于电站设计使用年限，且不应小于 50 年。基础设计等级应不低于丙级，场地和地基条件复杂时应为乙级。

5.4.1.5 支架基础设计和施工应考虑电站全寿命周期对环境的影响，符合当地环境保护和水土保持要求，应减少土石方挖填，减少对地表植被和表层土的破坏。

5.4.1.6 支架基础的设计和施工在满足安全性和可靠性的同时，宜采用新技术、新工艺、新材料。当场地地形起伏大、不宜大规模挖填、对生态恢复要求高或当冬季施工、施工工期紧时宜采用管桩、型钢桩、锚杆等基础。

5.4.1.7 对于桩基础、锚杆基础宜选择有代表性的区域进行现场试验，确定施工工艺的可行性和设计参数的可靠性。

5.4.1.8 支架基础结构混凝土强度等级不应低于 C30；结构钢筋宜选用 HRB400 钢筋，也可选用 HPB300 钢筋；结构钢材宜选用 Q235 钢、Q355 钢。

5.4.1.9 支架基础结构所用的原材料及成品构件进场时应应对品种、规格、外观和尺寸进行验收，应有产品合格证书及相关性能的检验报告，并应对必要的性能指标现场取样进行复验。原材料和成品构件进场后应分类保管，钢材、水泥等材料应储存在干燥场所，并应做好防护措施。

5.4.2 一般规定

5.4.2.1 支架基础应按下列规定进行承载力计算和稳定性验算：

- a) 各类型基础均应进行竖向承载力计算；
- b) 桩基础应进行水平承载力计算；
- c) 扩展式基础应进行抗滑移、抗倾覆验算；
- d) 桩基础应进行整体稳定性验算；
- e) 对单立柱单桩基础应进行抗弯承载力验算；
- f) 承受荷载较大的支架基础应对基础结构承载力和裂缝宽度进行验算。

5.4.2.2 支架基础有下列情况之一时应做变形验算：

- a) 基底持力层地基承载力特征值小于 100 kPa，或桩端持力层地基承载力特征值小于 120 kPa；
- b) 在基础上及附近有地面堆载，可能引起地基产生过大的不均匀沉降；
- c) 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；
- d) 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；
- e) 支架基础变形可能引起上部柔性支架系统出现结构失效的情况；
- f) 其他对支架基础变形有特殊要求的情况。

5.4.2.3 支架基础设计时，采用的作用效应与相应的抗力限值应符合下列规定。

- a) 除应考虑永久荷载外，还应根据建设地点、使用情况考虑风荷载、雪荷载、温度作用和施工检修荷载，必要时应考虑地震作用。根据支架结构上可能同时出现的荷载，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，并应取各自最不利的组合进行设计。
- b) 确定支架基础底面积、桩、锚杆数量时，应采用作用的标准组合，相应的抗力应采用地基承载力特征值或单桩、单根锚杆承载力特征值；计算支架基础结构承载力时，应采用作用的基本组合，采用相应的分项系数；计算地基基础变形时，应采用正常使用极限状态下荷载效应的准永久组合值，不应计入风荷载和地震作用，相应的限值应为地基基础沉降、变形的允许值；验算支架基础的稳定和裂缝宽度时，应采用作用的标准组合。

5.4.2.4 支架基础设计时，荷载组合的效应设计值详见 5.1.5 作用组合。

5.4.2.5 对于新近填土、湿陷性土、季节性冻土、膨胀土，应考虑负摩阻力、冻胀力、胀切力对基础承载力和稳定性的影响，地基基础的设计除应满足本标准的相关规定外，尚应符合 GB 50007、JGJ 94、GB 50025、JGJ 118、GB 50112 的规定。

5.4.3 地基

5.4.3.1 场地评价

根据柔性支架布置场区场地的复杂程度，可按 NB / T 10100 将场地等级、地基等级及勘察等级进行划分。

5.4.3.2 岩土勘察

5.4.3.2.1 项目岩土勘察可按 GB 51101 与 NB / T 10100 的要求执行。

5.4.3.2.2 项目详细勘察阶段勘探点的间距和数量应根据支架阵列平面布置特点和场地岩土工程条件综合确定，并符合下列规定。

- a) 勘探点位置、间距宜按支架基础布置点位与场区场地的复杂程度确定。简单场地勘探点间距应为 100 m~150 m；中等复杂场地勘探点间距应为 50 m~100 m，复杂场地勘探点间距应不大于 25 m。
- b) 勘探点应在场区内按柔性支架阵列布置的每排基础点位布置，并应涵盖场区内的各类地貌、地质单元，局部岩土层变化较大区域，应加密勘探点。
- c) 采取土试样和进行原位测试勘探点的数量应按地基岩土的复杂程度确定，不应少于勘探点总数的 1 / 2，取土试样勘探点数量不应少于勘探点总数的 1 / 3，且应均匀布置，有代表性，每一主要土层的原状土试样或原位测试数据不应少于 6 件(组)。

5.4.3.2.3 勘探孔深度应根据支架基础类型和地基岩土性质确定，并符合下列要求：

- a) 勘探孔的深度应能控制地基主要受力层，不应小于扩展式基础基底基础底面宽度的 3 倍或桩式基础预计桩端平面以下 3 m，且不应小于 5 m，对于软土应加深或穿透软土层；

- b) 需验算基础的沉降变形时，应布置不小于 1 / 2 总勘探孔数的控制性勘探孔，勘探孔的深度应超过基础底面以下的地基压缩层计算深度；
- c) 当存在特殊性土或为查明不良地质作用时，勘探孔的深度尚应满足 GB 50021 的相关规定；
- d) 对需要进行场地平整的场地，应按最终场平标高确定勘探孔深度；
- e) 在预定深度内遇到基岩或厚层碎石土等稳定地层时，可减少勘探孔深度，但不应小于 3 m。

5.4.3.3 地基计算

5.4.3.3.1 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，应符合表 3 的规定。

表3 光伏柔性支架地基变形允许值

柔性支架结构形式	相邻基础的沉降差	倾斜/‰	基础的沉降量/mm
单层悬索结构	0.002 l	3	50
多层索桁架结构、张弦结构	0.003 l	3	
l 为相邻柱基的中心距离，单位为毫米（mm）。 当有可靠经验时可适当调整允许值。 对表中未包括的柔性光伏支架系统，其地基变形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			

5.4.3.4.2 建造在斜坡场地上和软土地基上有大面积堆载场地的柔性光伏支架结构，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 GB 50007 的有关规定。

5.4.3.4.3 地基的最终沉降量宜按 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 GB 50007 的规定采用。

5.4.3.4.4 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。

- a) 上部支架采用冗余度较高的结构形式。
- b) 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。
- c) 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、筏形基础、联合承台基础或多向连系梁等加强措施。

5.4.3.4.5 当光伏支架场地处于山区时，应满足 NB/T 10115 的有关规定。

5.4.3.4.6 当光伏支架场地处于湿陷性黄土地区时，光伏支架地基基础可按 GB 50025 中丙类建筑的有关规定进行设计。

5.4.3.4.7 当光伏支架场地处于膨胀土地区时，光伏支架地基基础可按 GB 50112 中设计等级为乙级的有关规定进行设计。

5.4.3.4.8 当光伏支架场地处于地区时，光伏支架地基基础可按 GJ118 的有关规定进行设计。

5.4.4 基础

5.4.4.1 基础分类和选型

5.4.4.1.1 支架基础可根据承载性状分为桩基础、扩展基础、锚杆基础和复合桩基础。

5.4.4.1.2 柔性支架拉索可直接采用地下锚锭系统，根据具体情况可采用重力锚、盘形锚、蘑菇形锚、摩擦桩、抗拔桩、阻力墙、扩孔锚杆等类型，如下图 3 所示。

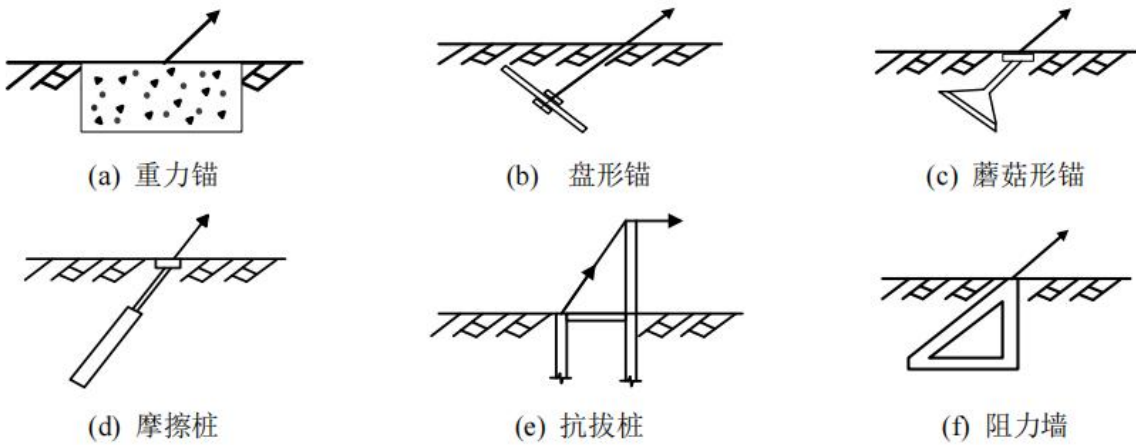


图3 拉索锚锭系统

- 5.4.4.1.3 桩基础可分为预制桩基础和灌注桩基础。预制桩可分为钢桩、混凝土预制桩和预应力混凝土桩。钢桩按施工方式为锤击(静压)型钢桩。混凝土预制桩和预应力混凝土桩的分类应按JGJ 94的相关规定执行。
- 5.4.4.1.4 扩展式基础宜采用混凝土独立基础和条形基础，均应采用配筋扩展式基础。
- 5.4.4.1.5 支架基础及锚锭系统的选型应根据下列因素综合确定：
- a) 支架、锚锭结构形式和所承受荷载的特征；
 - b) 土的性状及地下水条件；
 - c) 施工工艺的可行性；
 - d) 施工场地条件及施工季节；
 - e) 经济指标、环保性能和施工工期。
- 5.4.4.1.6 支架基础类型的选择可按表4执行。

表4 支架基础类型

		型钢桩	混凝土 预制桩	预应力 混凝土 管桩	灌注桩	混凝土 独立基 础	混凝土 条形基 础	锚杆基 础	复合桩
岩石	残积土	○	△	△	△	△	△	×	△
	全风化	○	△	△	△	△	△	×	△
	强风化	×	×	×	○	△	△	×	△
	中风化～未风化	×	×	×	○	×	×	○	△
碎石土	漂石、块石	×	×	×	○	△	△	×	△
	卵石、碎石	×	×	×	○	△	△	×	△
	圆砾、角砾	△	×	×	△	△	△	×	△
砂土	密实程度 松散～稍密	○	△	△	△	△	△	△	△
	中密～密实	○	×	×	△	△	△	×	△
粉土	稍密～密实	○	△	△	△	△	△	×	○
黏土	流塑～软塑	×	○	○	×	×	×	×	○
	可塑～坚硬	○	△	△	△	△	△	×	○
地下水	有	—	—	—	—	×	×	×	—
	无	—	—	—	—	○	○	○	—
表中符号“○”表示适用，“△”表示可以采用，“×”表示不适用，“—”表示此项无影响。 表中基础桩指的是微型短桩，其他基础桩应按 JGJ 94 的相关规定进行选择。 对于锚杆基础尚应要求岩石的完整程度为较完整～完整，且适用于岩石埋深线或直接出露的场区。 寒冷、严寒地区冬季施工不宜采用现浇施工工艺									

- 5.4.4.1.6 同一阵列支架基础宜采用同类型基础形式。
- 5.4.4.1.7 对于承受水平力较大的桩基础，可在桩顶处加设混凝土护墩或侧向支撑来提高基础的抗水平和抗弯承载力。

5.4.4.2 基础设计

5.4.4.2.1 柔性光伏支架结构的基础设计应按下列规定进行承载力计算和稳定性验算。

- a) 各类基础均应按 GB 55003、GB 50007、GB 51101、JGJ 94 和 NB/T 10115 的有关规定进行竖向地基承载力和桩身承载力计算。
- b) 受水平荷载的桩基础，应按 GB 50007、JGJ 94 和 NB/T 10115 的有关规定进行水平承载力计算、桩身受弯承载力计算和整体稳定性验算，钢桩基础应按 NB/T 10115 的有关规定进行压屈稳定性验算。受水平荷载的扩展基础应按 GB 51101 和 NB/T 10115 的有关规定进行抗滑移和抗倾覆稳定验算。
- c) 受上拔荷载的桩基础，应按 JGJ 94 的有关规定进行抗拔稳定验算，钢筋混凝土抗拔桩尚应进行正截面受拉承载力及裂缝控制计算。桩基础在竖向荷载作用下地基承载力或抗拔承载力不能满足要求时，可考虑将桩基础端部扩大。埋入地下的扩展基础和端部扩大的桩基础，其上拔稳定应按 DL/T 5219 中规定的土重法或剪切法进行验算；复合桩基础承台配筋计算中应考虑上拔力的不利影响。
- d) 锚杆的间距和长度应满足锚杆所锚固的结构物及地层整体稳定性的要求，锚杆锚固段的间距不应小于 1.5 m。锚杆结构设计时，应对锚杆的抗拉承载力、锚杆锚固段注浆体与锚杆之间以及注浆体与地基之间的抗拔承载力进行计算，且应符合 GB 50086 的有关规定。
- e) 拉索锚锭系统可采用扩孔锚杆，其安全等级为 II 级。扩孔锚杆间距和长度应满足锚杆所锚固的结构物及地层整体稳定性的要求，锚杆水平间距不应小于 1.8 m，竖向间距不应小于 3 m。扩大头的水平净距不应小于扩大头直径的 1 倍，且不应小于 1 m，竖向净距不应小于扩大头直径的 2 倍。扩孔锚杆结构设计时，应对锚杆的抗拉承载力、锚杆扩大头锚固段注浆体与锚杆之间的粘结强度安全要求、锚杆杆体的截面面积进行计算，且应符合 JGJ/T 282 的有关规定。

5.4.4.2.2 重力锚和摩擦桩的上拔稳定应按 JGJ 94 中抗拔桩基承载力的相关规定进行验算；盘形锚、蘑菇形锚和阻力墙的上拔稳定应按 DL/T 5219 中拉线盘上拔稳定的相关规定进行验算。

5.4.4.2.3 桩基础的水平承载力特征值的确定符合下列规定：

- a) 对于钢筋混凝土预制桩、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 10 mm 所对应的荷载的 75% 为微型单桩基础水平承载力特征值；
- b) 对于桩身配筋小于 0.65% 的灌注桩，可取单桩水平静载荷试验的临界荷载的 75% 为单桩基础水平承载力特征值；
- c) 当桩的水平承载力由水平位移控制，且缺少单桩水平静载荷试验资料时，对于预制桩、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 JGJ 94 的相关规定进行估算。

5.4.4.2.4 对工程桩应进行桩身质量检验，检验数量不应少于总桩数的 20%，且不应少于 10 根。场地和地基条件简单，施工工艺成熟，地基基础设计等级为丙级的微型桩，检验数量不应少于同一条件下总桩数的 2%，且不应少于 10 根。

5.4.4.2.5 工程桩应进行竖向抗压承载力、抗拔承载力和水平承载力检验，当采用单桩静载试验时，检验数量不应少于同一条件下总桩数的 1%，且不应少于 3 根；当总桩数小于 50 根时，检测数量不应小于 2 根。预制桩和满足高应变法适用范围的灌注桩，可采用高应变法检测单桩竖向抗压承载力，检测数量不宜少于总桩数的 5%，且不得少于 5 根。场地和地基条件简单，施工工艺成熟，地基基础设计等级为丙级，当采用单桩静载试验时，检验数量不应少于同一条件下总桩数的 0.1%，且不应少于 3 根。

5.4.4.2.6 锚杆基础应进行抗拔承载力检验，检验数量不应少于工程锚杆总数的 5% 且不应少于 3 根。锚杆验收试验出现不合格锚杆时，应增加锚杆试验数量，增加的锚杆试验数量应为不合格锚杆的 3 倍。

5.4.4.2.7 支架基础宜以原状土或压实填土作为地基持力层，未经检验查明以及不符合质量要求的填土不应作为支架基础的地基持力层。

5.4.4.2.8 当利用压实填土作为支架基础的地基持力层时，应符合 GB 51101 的有关规定。

5.4.4.2.9 位于塘、沟、积水洼地等地区的填土地基，应符合 GB 51101 的有关规定。

5.5.4.3 构造规定

基础构造规定应符合 GB 51101 和 NB/T 10115 的有关规定。

6 连接和节点设计

6.1 一般规定

- 6.1.1 根据光伏柔性支架结构的特点和拉索节点的连接功能,节点可分为锚固节点、索杆连接节点、索梁连接节点、钢结构连接节点、索与檩条连接节点等主要类型。
- 6.1.2 光伏柔性支架各构件拼接或节点连接通常采用焊缝连接、螺栓(销栓)连接或栓焊混合连接。各种连接的计算及其构造要求应按 GB 50017 的规定执行
- 6.1.3 光伏柔性支架系统的连接及节点构造应符合计算假定,应做到传力路线明确、确保安全并便于制作和安装。
- 6.1.4 支架结构节点的承载力和变形应按 GB 50017 的规定进行验算。根据节点的重要性、受力大小和复杂程度,节点的承载力设计值应为构件承载力设计值的 1.25~1.5 倍。

6.2 节点设计及构造

- 6.2.1 索体连接节点的构造设计应考虑施加预应力的方式、结构和基础安装偏差及进行二次张拉的可能性。
- 6.2.2 索体转折节点应设置滑槽或孔道,滑槽或孔道内可涂润滑剂或加衬垫,或采用摩擦系数低材料;应验算转折节点处的局部承压及索体的抗拉强度,并采取加强措施。
- 6.2.3 拉索常用锚具及连接的构造形式应满足安装和调节索力的需要。钢绞线索体可采用夹片锚具,也可采用挤压锚具或压接锚具。
- 6.2.4 光伏组件与索体连接的,光伏组件与索体之间的连接节点应设置压块等有效构造措施,确保光伏组件与拉索之间的可靠连接。
- 6.2.5 光伏组件通过檩条与索体连接的,檩条与索体之间的连接节点应设置 U 形夹具、螺栓夹板等有效构造措施,确保两者之间的可靠连接。
- 6.2.6 索体在夹具中不应滑移,夹具与索体之间的摩擦力应大于夹具两侧索体的索力之差,并应采取措施保证索体防护层不被挤压或者剪切损坏。
- 6.2.7 拉索存在弯折使用的情况时,应根据偏斜拉伸试验结果,对钢索极限抗拉力标准值降额使用。偏斜拉伸试验按 GB/T 21839 的有关规定进行。
- 6.2.8 当节点形状复杂或采用新型节点时,应对节点进行平面或空间有限元分析,全面掌握节点的应力大小和应力分布状况。
- 6.2.9 对重要、复杂的节点,根据设计需要,宜进行足尺或缩尺模型的承载力试验,且节点模型试验的荷载工况应尽量与节点的实际受力状态一致。

7 布置分析

7.1 布置原则

- 7.1.1 光伏柔性支架布置应贯彻节约用地的原则,通过优化,控制用地的面积。
- 7.1.2 光伏柔性支架方阵应根据场区地形、设备特点和施工条件等因素合理布置。
- 7.1.3 光伏柔性支架方阵内(含索体、抱箍、檩条等)的荷载作用下最低点距地面或水面的距离不宜低于 300 mm,并应考虑以下因素:
- 当地的最大积雪深度;
 - 项目地渔光互补及养殖要求;
 - 相关用地政策要求;
 - 当地的洪水水位;
 - 植被高度;
 - 当地支架方阵底部过人过车的要求。
- 7.1.4 光伏柔性支架方阵各排、列的布置间距应保证每天 9:00~15:00(当地真太阳时)时段内前、后、左、右互不遮挡。

7.2 光伏柔性支架布置

- 7.2.1 柔性支架布置的光伏方阵、光伏组件安装方位角宜优先采用正南方向。
- 7.2.2 光伏柔性支架方阵布置应结合太阳辐照度、风速、雨水、积雪等气候条件及地形坡度、地块朝向、端支座数量等因素进行设计,经技术经济比较后确定方位角、倾角和阵列行距。
- 7.2.3 光伏柔性支架阵列行距应满足最小桩间距的要求。

8 防腐设计

8.1 支架部分防腐

8.1.1 一般规定

8.1.1.1 柔性支架结构防腐根据材质应按照 GB 50017、GB/T 50476、GB 50046、GB 50018、GB/T 5237、GB/T 20934 和 JGJ 257、YB/T 5004、JGJ/T 251 等的相关规定设计。

8.1.1.2 光伏柔性支架防腐设计应保证支架使用寿命不小于 25 年。

8.1.1.3 光伏柔性支架的防腐设计应综合考虑使用环境、使用年限、施工和维修条件等因素。

8.1.1.4 光伏柔性支架紧固件防腐性能不应低于支架防腐要求。

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

8.1.2 结构防腐

钢结构防腐要求应满足 NB/T 10642 的有关规定。

8.1.3 铝合金防腐

铝合金防腐要求应满足 NB/T 10642 的有关规定。

8.1.4 索体防腐

8.1.4.1 大气腐蚀环境 C1-C3 地区索体宜采用镀锌钢绞线，钢绞线内拆股钢丝的镀层重量不小于 110g/m²，其具体性能满足 YB / T 5004 的规定，并根据 GB/T 19292.1 确定特定外部暴露环境的腐蚀类别，依据腐蚀类别在 GB/T 19355.1 中找到特定大气暴露环境下热浸镀锌涂层耐腐蚀性能的指南确定镀锌层厚度及重量。

8.1.4.2 钢拉杆防腐应符合 GB / T 20934 的规定。

8.1.4.3 施工现场易受外界物体磨损及碰撞或采用组件滑移安装法时，索体应采取多层防护，对高强钢丝和钢绞线应经防腐处理后在索体外包裹护套。

8.1.4.4 大气腐蚀环境 C4 及以上地区（如沿海高盐雾地区、水上光伏高湿热地区、污水处理厂等），索体宜采用热镀锌铝稀土合金涂层或环氧树脂涂层等加强保护。

8.1.4.5 锚具应采取可靠的封闭防锈蚀措施，并保障防锈蚀措施的耐候性能。

8.2 支架基础防腐

支架基础防腐要求应符合 GB 51101 和 NB/T 10115 的有关规定。

9 安全监测

9.1 一般规定

9.1.1 根据光伏柔性支架工程的规模、环境荷载条件可对柔性支架结构体系设置必要的监测项目，对结构安全性状进行系统监测。

9.1.2 柔性支架结构监测应根据光伏场区的外界环境条件和结构型式分区块设计，应覆盖光伏支架工程各种最不利环境荷载条件和结构区域。

9.1.3 光伏柔性支架结构安全监测包括现场检查与运行监测。

9.1.4 光伏柔性支架结构的运行监测内容宜包括：索体振动监测、索体变形监测、索体内力监测等。

9.1.5 光伏柔性支架结构的监测仪器设备配置应结合结构体系设计情况和施工情况综合考虑，其量程、精度、灵敏度、步长应与结构运行过程中环境条件和荷载水平相匹配。

9.1.6 新建和已建光伏柔性支架工程内均宜进行光伏柔性支架结构安全监测。

9.2 现场检查

9.2.1 现场检查形式

9.2.1.1 日常检查。应由专职并经过培训的柔性支架场区运行维护人员对光伏柔性支架结构进行日常巡视检查，次数宜每月 1 次。

9.2.1.2 年度检查。光伏电站运营单位应组织维护人员对光伏柔性支架结构进行全面详细的现场检查。

9.2.1.3 定期检查。在运行期内，业主单位应定期组织设计、施工、运维、科研等单位的人员对柔性支架运行状况进行全面检查和评估，宜每 5 年一次。

9.2.1.4 应急检查。在光伏场区内或周边发生大风、暴雨、大雪等恶劣天气过程中及过程后，业主单位应组织安全人员及时进行应急检查，必要时还应派专人进行连续监测。

9.2.2 现场检查内容

支架结构检查应包括下列内容。

- a) 索体检查。钢绞线及钢丝绳等索体是否有断丝、磨损、腐蚀情况，防护涂层是否完好，及时更换受损索体，对出现损伤的索和防护涂层应及时修复；检查索体预应力状态，包括索的张紧度、钢丝绳张紧度。
- b) 锚具检查。对索体两端锚具、连接节点螺栓螺母等进行检查，是否出现松动及锈蚀现象。
- c) 檩条及钢结构。钢结构表面镀锌防腐层是否出现破坏；是否出现明显的变形。
- d) 焊缝检查。焊缝是否出现锈蚀。

9.2.3 现场检查方法

9.2.3.1 直观检查法，主要依靠眼视、手摸等直观方法，可辅以锤、量尺、照相摄像设备等工（器）具，也可利用视频监控系统辅助现场检查。

9.2.3.2 仪器检查法，采用便携式设备对螺栓、索体等进行抽样检测。

9.2.3.3 每次检查应及时整理现场记录，发现异常情况应分析原因，并上报提交检查报告。

参 考 文 献

- [1] GB/T 882 销轴
- [2] GB/T 13912 金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层技术要求及试验方法
- [3] GB/T 14370 预应力筋用锚具、夹具和连接器
- [4] GB/T 18365 斜拉桥用热挤聚乙烯高强钢丝拉索
- [5] GB/T 20118 钢丝绳通用技术条件
- [6] GB 20492 锌-5%铝-混合稀土合金镀层钢丝、钢绞线
- [7] GB/T 25823 单丝涂覆环氧涂层预应力钢绞线
- [8] GB 50011 建筑抗震设计规范
- [9] GB 50429 铝合金结构设计规范
- [10] GB 50797 光伏电站设计规范
- [11] JG/T 330 建筑工程用索
- [12] YB/T 4543 建筑工程用锌-5%铝-混合稀土合金镀层拉索