

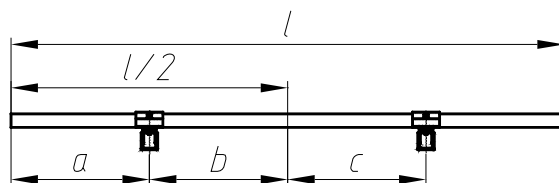
一、 系统参数设定

1. 太阳能板规格: 1640×990×40
2. 太阳能板阵列及数量: $20 \times 2 = 40PCS$
3. 太阳能板重量: 20kg/PCS
4. 安装角度: 35°
5. 基本风载: $0.75kN/m^2$
6. 基本雪载: $0.8kN/m^2$
7. 安装条件: 地面粗糙度为 B 类
8. 计算标准: 《建筑结构荷载规范 GB50009-2012》
9. 设计产品年限: 25 年

二、 方阵立面结构分析及优化

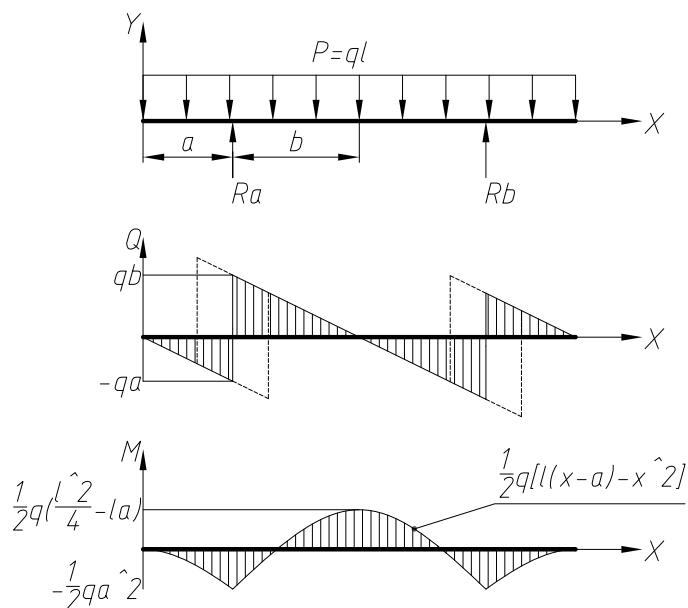
1. 光伏组件支点即横梁分布的结构分析及优化

光伏组件由两根横梁支撑，横梁间距影响光伏组件的受力状态，如图所示。作用在两根横梁上支反力分别为：



$$\begin{cases} R_a = P\left(\frac{c}{b+c}\right) \\ R_b = P\left(\frac{b}{b+c}\right) \end{cases}$$

由上式可以看出，当 $b=c$ 时，支反力 R_a 、 R_b 的极值最小，为 $0.5P$ 。因此两根横梁应对称分布。下图为光伏组件的受力简图，剪力图与弯距图。



由剪力图可以得出：当 $a=b$ 时，剪力 Q 取最小极值，为 qa 。即横梁间距等于光伏组件长度的一半。

由弯距图可以看出：当 $a=b$ 时，弯距 M 极值为 $[0, -0.0625ql^2]$ ；

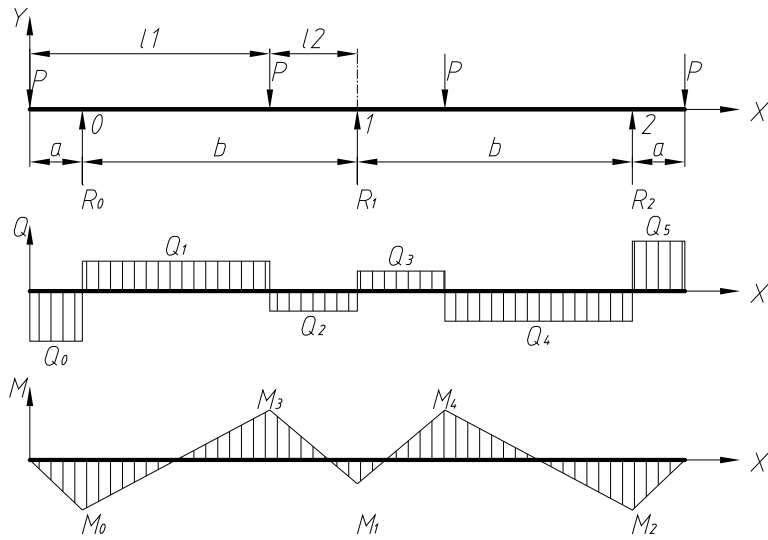
当 $\frac{1}{2}q\left(\frac{l^2}{4} - la\right) = \frac{1}{2}qa^2$ 时，即 $a = \frac{\sqrt{2}-1}{2}l$ 时，弯距 M 极值为 $[0.0215ql^2, -0.0215ql^2]$ ，因此当

$a = \frac{\sqrt{2}-1}{2}l$ 时，弯距 M 取最小极值为 $0.0215ql^2$ 。在本案例中，光伏组件长度 $l = 1640\text{mm}$ ，所以

$a = 0.207l = 340\text{mm}$ 。

2. 斜梁支点布的结构分析及优化

斜梁由前立柱、后立柱和斜支撑三个支点支撑，其受力简图如下。



求解得：

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{1}{2} Pl_2(l_1 - a) \\ \omega_2 = \frac{1}{2} Pl_2(b - l_2) \end{cases} \quad \begin{cases} a_1 = \frac{b + l_1 - a}{3} \\ b_2 = \frac{b + l_1 - a}{3} \end{cases} \quad \begin{cases} M_0 = -Pa \\ M_2 = -Pa \end{cases}$$

代入三弯矩方程：

$$M_{n-1}l_n + 2M_n(l_n + l_{n+1}) + M_{n+1}l_{n+1} = -\frac{6\omega_n a_n}{l_n} - \frac{6\omega_{n+1} b_{n+1}}{l_{n+1}}$$

式中 l_n 为跨距， $l_n = l_{n+1} = b$

解得：

$$\begin{cases} M_0 = M_2 = -Pa \\ M_1 = \frac{1}{2} P(l_1 - l_2 - b - \frac{l_2^3}{b^2} + \frac{3l_2^2}{b}) \end{cases} \quad \begin{cases} R_0 = R_2 = \frac{1}{2} P(1 + \frac{l_1 + 5l_2}{b} - \frac{3l_2^2}{b^2} + \frac{l_2^3}{b^3}) \\ R_1 = P(3 - \frac{l_1 + 5l_2}{b} + \frac{3l_2^2}{b^2} - \frac{l_2^3}{b^3}) \end{cases}$$

由剪力图中可以看出斜梁中分布了 6 个峰值，分别为：

当 $0 < b < l_2$ 时

$$\begin{cases} Q_0 = -Q_5 = -P \\ Q_1 = -Q_4 = -2P \\ Q_2 = -Q_3 = R_0 - 2P \end{cases} \quad \text{剪力极值 } Q_{\max} > P$$

当 $b = l_2$ 时 $R_1 = -2.74P$ ， $R_0 = R_2 = 3.37P$ ，则剪力极值 $Q_{\max} = 1.37P$

当 $l_2 < b < l_2 + l_1$ 时

$$\begin{cases} Q_0 = -Q_5 = -P \\ Q_1 = -Q_4 = R_0 - P \text{ 剪力极值 } Q_{\max} = P \\ Q_2 = -Q_3 = R_0 - 2P \end{cases}$$

当 $b=768$ 时, $R_1 = 0, R_0 = R_2 = 2P$, 则剪力极值 $Q_{\max} = P$

当 $b = l_2 + l_1$ 时, $R_1 = 1.12P, R_0 = R_2 = 1.44P$, 则剪力极值 $Q_{\max} = 0.56P$

当 $l_2 + l_1 < b < 2574$ 时

$$\begin{cases} Q_0 = -Q_5 = R_0 \\ Q_1 = -Q_4 = R_0 - P \text{ 剪力极值 } Q_{\max} > P \\ Q_2 = -Q_3 = R_0 - 2P \end{cases}$$

当 $b=1490$ 时, $R_1 = R_0 = R_2 = 1.33P$, 则剪力极值 $Q_{\max} = 1.33P$

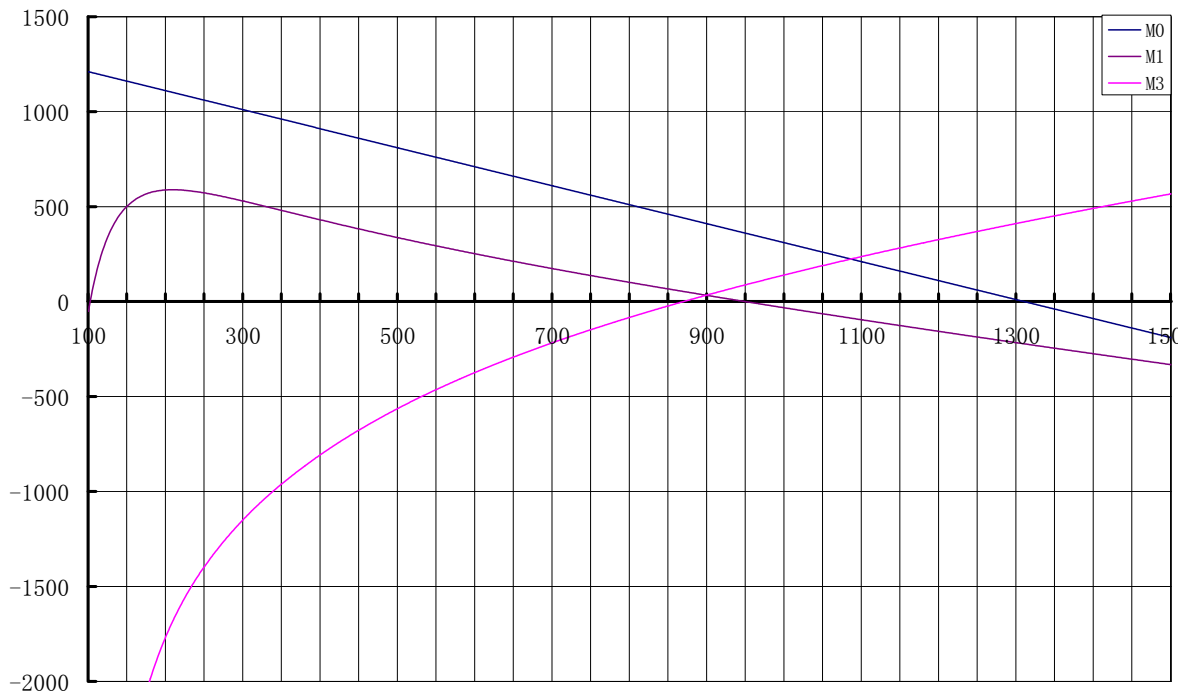
当 $b=2574$ 时, $R_1 = 2P, R_0 = R_2 = P$, 则剪力极值 $Q_{\max} = P$

当 $b > 2574$ 时, 剪力极值 $Q_{\max} > P$

综上所述, 当 $b = l_2 + l_1$ 时, $R_1 = 1.12P, R_0 = R_2 = 1.44P$, 则剪力极值 $Q_{\max} = 0.56P$, 可取得取小值。

由弯矩图中可以看出斜梁中分布了 5 个峰值, 分别为:

$$\begin{cases} M_0 = M_2 = -Pa \\ M_1 = \frac{1}{2}P(l_1 - l_2 - b - \frac{l_2^3}{b^2} + \frac{3l_2^2}{b}) \\ M_3 = M_4 = R_0(b - l_2) - Pl_1 \end{cases}$$



由弯矩曲线图可以看出, 当 $b=1086$ 时, 即 $M_0 = M_3$ 时, 弯矩 $M_{\max} = 224P$, 可取得最小值。

三、 设计计算书

1. 载荷条件

根据系统安装条件及要求，载荷条件的计算以单方阵为基本单位。

(1) 恒载 G :

恒载包含太阳能板的重量和支架的自重。其中太阳能板总重量:

$$G1 = 40P \times 20kg/P \times 9.8N/s^2 = 7840N$$

支架自重根据计算不同的梁时分别施加。

(2) 风载 W :

根据《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)中对风荷载的规定如下(按承重结构设计):

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0$$

式中: w_k ——风荷载标准值 (kN/m^2);

β_z ——高度 z 处的风振系数;

μ_s ——风荷载体型系数;

μ_z ——风压高度变化系数;

w_0 ——基本风压。

根据工程安装地理位置,查《建筑结构荷载规范》表 8.2.1 查得风压高度变化系数 μ_z 取值为 1.0, 如下:

表8.2.1 风压高度变化系数

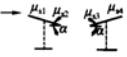


离地面或海平面高度(m)	地面粗糙度类别			
	A	B	C	D
5	1.09	1.00	0.65	0.51
10	1.28	1.00	0.65	0.51
15	1.42	1.13	0.65	0.51
20	1.52	1.23	0.74	0.51
30	1.67	1.39	0.88	0.51
40	1.79	1.52	1.00	0.60
50	1.89	1.62	1.10	0.69
60	1.97	1.71	1.20	0.77
70	2.05	1.79	1.28	0.84
80	2.12	1.87	1.36	0.91
90	2.18	1.93	1.43	0.98
100	2.23	2.00	1.50	1.04

注: 节选自《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)第 31 页

按照《建筑结构荷载规范》表 8.3.1 中第 29 项中单坡及双坡顶盖 35° 时, 风荷载体

型系数 μ_s 取平均值 1.3:

表 8.3.1 风荷载体型系数

项次	类别	体型及体型系数 μ_s	备注																								
29	单坡及双坡顶盖	<p>(a) </p> <table border="1" data-bbox="670 448 909 548"> <thead> <tr> <th>α</th> <th>μ_{s1}</th> <th>μ_{s2}</th> <th>μ_{s3}</th> <th>μ_{s4}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$\leq 10^\circ$</td> <td>-1.3</td> <td>-0.5</td> <td>+1.3</td> <td>+0.5</td> </tr> <tr> <td>30°</td> <td>-1.4</td> <td>-0.6</td> <td>+1.4</td> <td>+0.6</td> </tr> </tbody> </table> <p>(b) </p> <p>(c) </p> <table border="1" data-bbox="694 750 885 851"> <thead> <tr> <th>α</th> <th>μ_{s1}</th> <th>μ_{s2}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$\leq 10^\circ$</td> <td>+1.0</td> <td>+0.7</td> </tr> <tr> <td>30°</td> <td>-1.6</td> <td>-0.4</td> </tr> </tbody> </table>	α	μ_{s1}	μ_{s2}	μ_{s3}	μ_{s4}	$\leq 10^\circ$	-1.3	-0.5	+1.3	+0.5	30°	-1.4	-0.6	+1.4	+0.6	α	μ_{s1}	μ_{s2}	$\leq 10^\circ$	+1.0	+0.7	30°	-1.6	-0.4	<p>1. 中间值按线性插值法计算</p> <p>2. (b) 项体型系数按第27项采用</p> <p>3. (b)、(c) 应考虑第27项注2 和注3</p>
α	μ_{s1}	μ_{s2}	μ_{s3}	μ_{s4}																							
$\leq 10^\circ$	-1.3	-0.5	+1.3	+0.5																							
30°	-1.4	-0.6	+1.4	+0.6																							
α	μ_{s1}	μ_{s2}																									
$\leq 10^\circ$	+1.0	+0.7																									
30°	-1.6	-0.4																									

注：节选自《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)第 44 页

按照《建筑结构荷载规范》中风振系数 β_z 取 1。

基本风压： $w_0=0.75kN/m^2$

至此所有参数计算完成，则

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 = 1 \times 1.3 \times 1.0 \times 0.75 = 0.975 \text{ kN/m}^2$$

(3) 雪载 S

根据《建筑结构荷载规范》(GB50009-2012)中规定的雪压公式：

$$S_k = \mu_r S_0$$

系数取 0.5

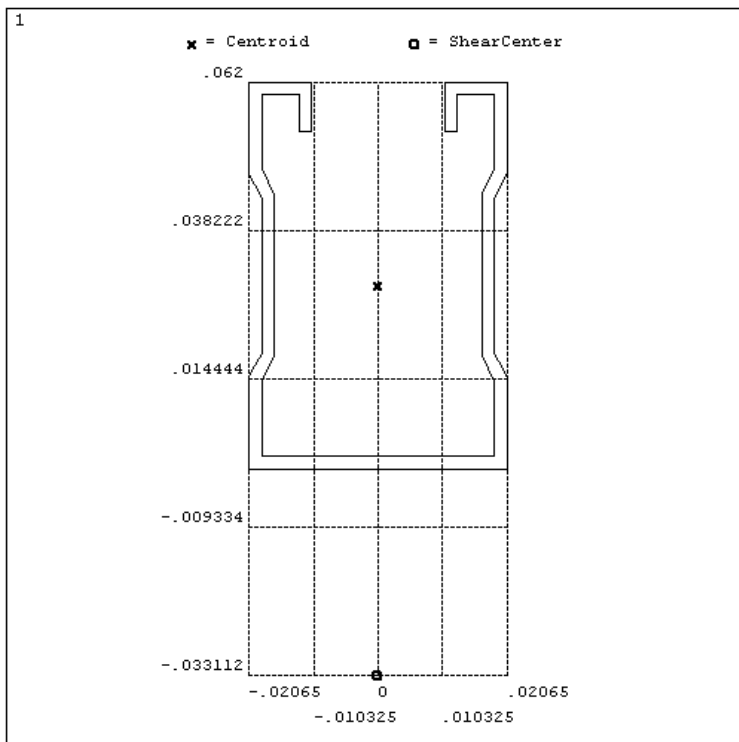
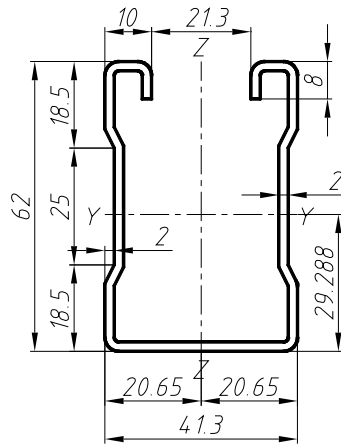
基本雪压： $S_0=0.8kN/m^2$

$$S_k = \mu_r S_0 = 0.5 \times 0.8 = 0.4kN/m^2$$

2. 选用梁截面形状及参数

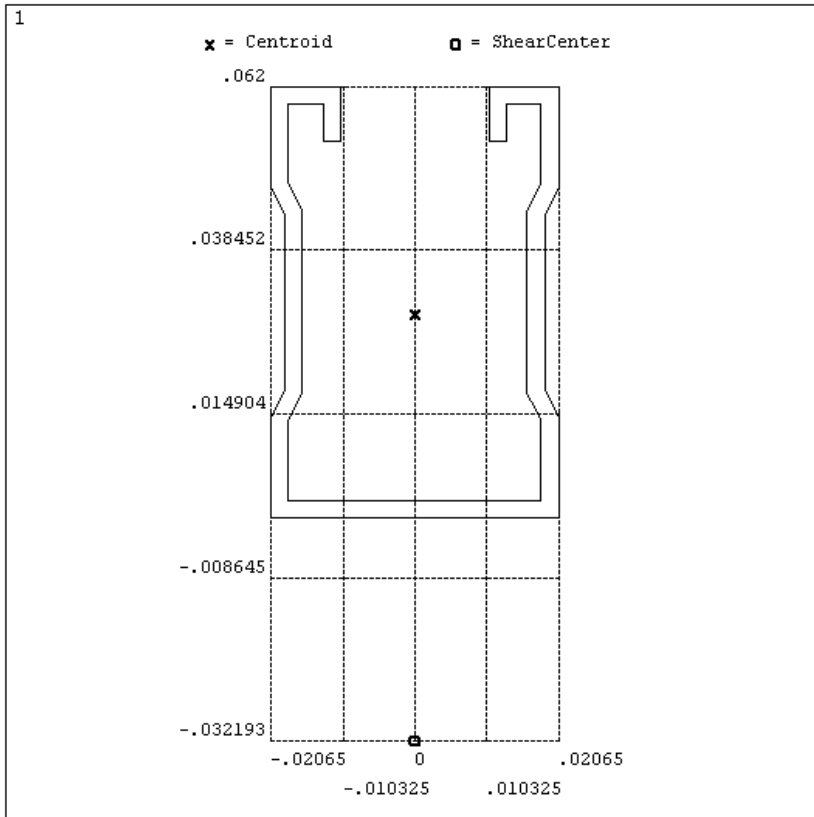
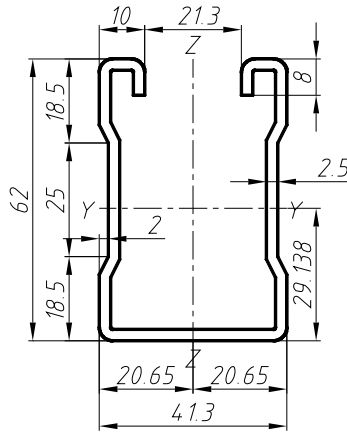
(1) 横梁及斜支撑: $U62 \times 41.3 \times 2$

项目	数值	单位	项目	数值	单位
材质	Q235B	-	屈服极限 σ_s	235	Mpa
面积 A	3.82	cm ²	弹性横量 E	210	Gpa
对 y 轴惯性矩 I_y	19.121	cm ⁴	对 y 轴惯性半径 i_y	22.37296892	mm
对 z 轴惯性矩 I_z	10.733	cm ⁴	对 z 轴惯性半径 i_z	16.7621176	mm
极惯性积 I_p	29.854	cm ⁴	极惯性半径 i_p	27.95564924	mm
上端离质心距离	32.712	mm	左端离质心距离	20.65	mm
下端离质心距离	29.288	mm	右端离质心距离	20.65	mm
抗弯截面系数 W_y (上)	5.845255564	cm ³	抗弯截面系数 W_z (左)	5.197578692	cm ³
抗弯截面系数 W_y (下)	6.528612401	cm ³	抗弯截面系数 W_z (右)	5.197578692	cm ³



(2) 斜梁: $U62 \times 41.3 \times 2.5$

项目	数值	单位	项目	数值	单位
材质	Q235B	-	屈服极限 σ_s	235	Mpa
面积 A	4.705	cm ²	弹性横量 E	210	Gpa
对 y 轴惯性矩 I_y	23.059	cm ⁴	对 y 轴惯性半径 i_y	22.13810387	mm
对 z 轴惯性矩 I_z	12.935	cm ⁴	对 z 轴惯性半径 i_z	16.58072066	mm
极惯性积 I_p	35.994	cm ⁴	极惯性半径 i_p	27.65892154	mm
上端离质心距离	32.862	mm	左端离质心距离	20.65	mm
下端离质心距离	29.138	mm	右端离质心距离	20.65	mm
抗弯截面系数 W_y (上)	7.016919238	cm ³	抗弯截面系数 W_z (左)	6.263922518	cm ³
抗弯截面系数 W_y (下)	7.913720914	cm ³	抗弯截面系数 W_z (右)	6.263922518	cm ³



SECTION ID 3
DATA SUMMARY

Section Name
= 2.5

Area
= .470E-03

Iyy
= .231E-06

Iyz
= 0

Izz
= .129E-06

Warping Constant
= .102E-09

Torsion Constant
= .108E-08

Centroid Y
= -.466E-17

Centroid Z
= .029138

Shear Center Y
= -.129E-05

Shear Center Z
= -.032193

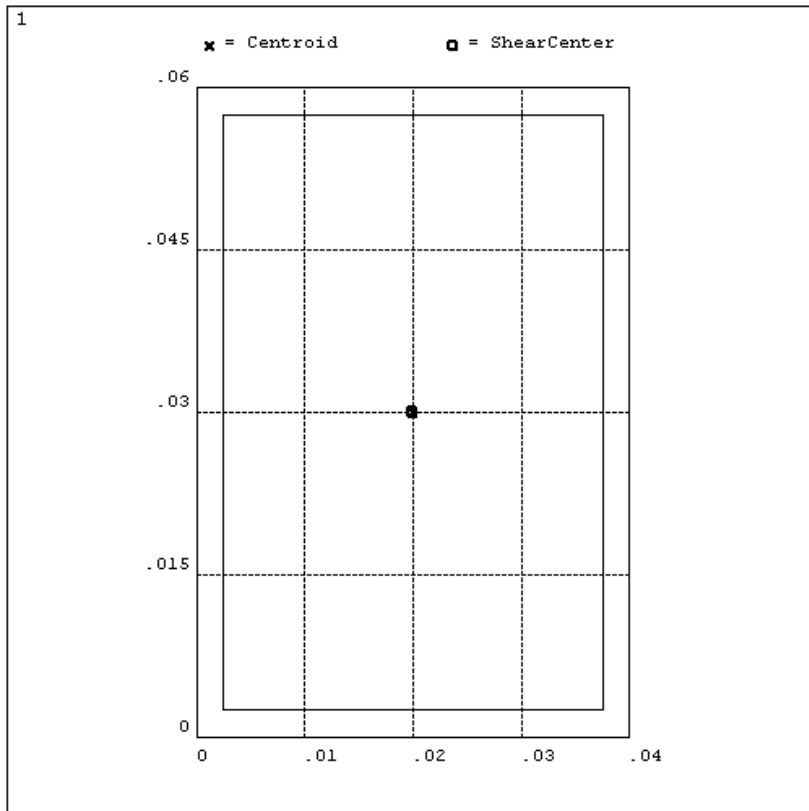
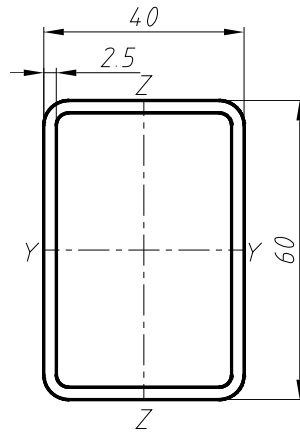
Shear Corr. YY
= .095487

Shear Corr. YZ
= -.718E-06

Shear Corr. ZZ
= .577226

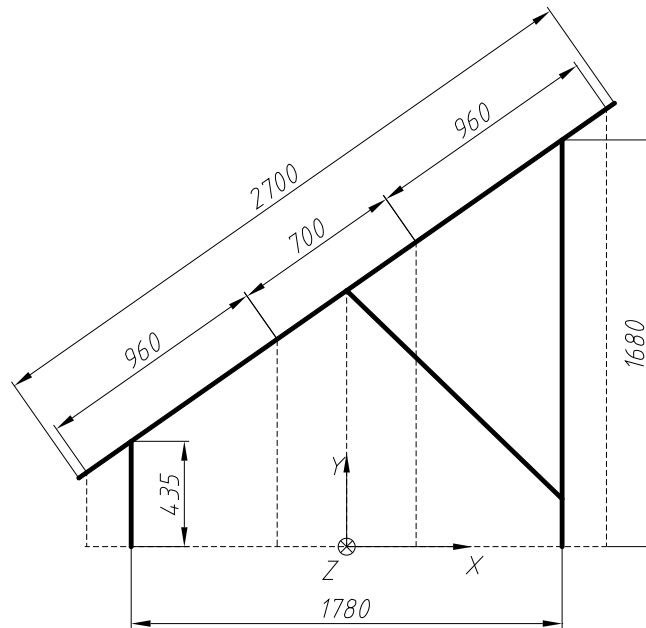
(3) 后立柱: 方管 60×40×2.5

项目	数值	单位	项目	数值	单位
材质	Q235B	-	屈服极限 σ_s	235	Mpa
面积 A	4.75	cm ²	弹性横量 E	210	Gpa
对 y 轴惯性矩 I_y	23.474	cm ⁴	对 y 轴惯性半径 i_y	22.23037277	mm
对 z 轴惯性矩 I_z	12.349	cm ⁴	对 z 轴惯性半径 i_z	16.12386267	mm
极惯性积 I_p	35.823	cm ⁴	极惯性半径 i_p	27.46212703	mm
上端离质心距离	30	mm	左端离质心距离	20	mm
下端离质心距离	30	mm	右端离质心距离	20	mm
抗弯截面系数 W_y (上)	7.824666667	cm ³	抗弯截面系数 W_z (左)	6.1745	cm ³
抗弯截面系数 W_y (下)	7.824666667	cm ³	抗弯截面系数 W_z (右)	6.1745	cm ³



3. 方阵结构力学分析

根据对方阵立面结构的力学分析及优化，可得出方阵立面结构及尺寸为下图所示：



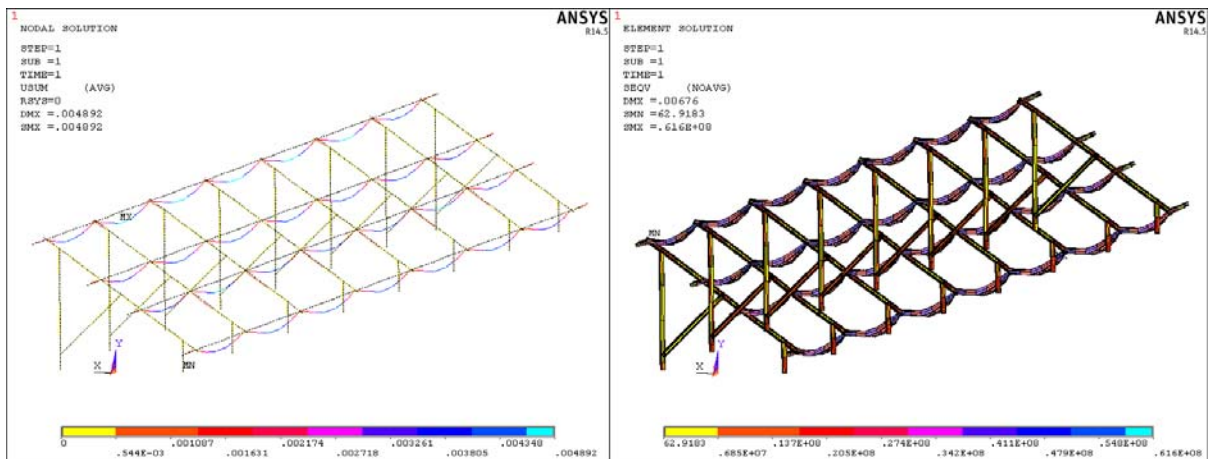
(1) 恒载加风载

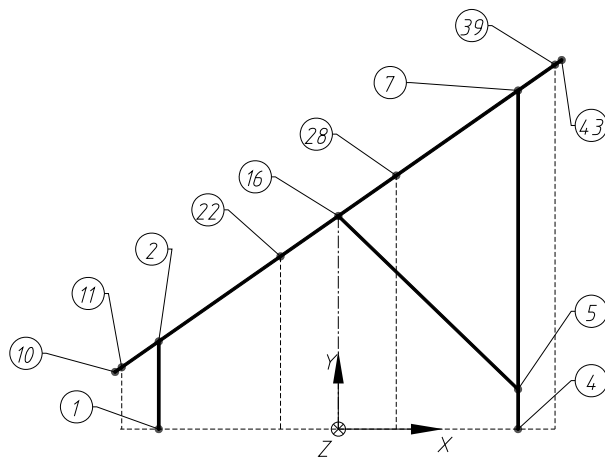
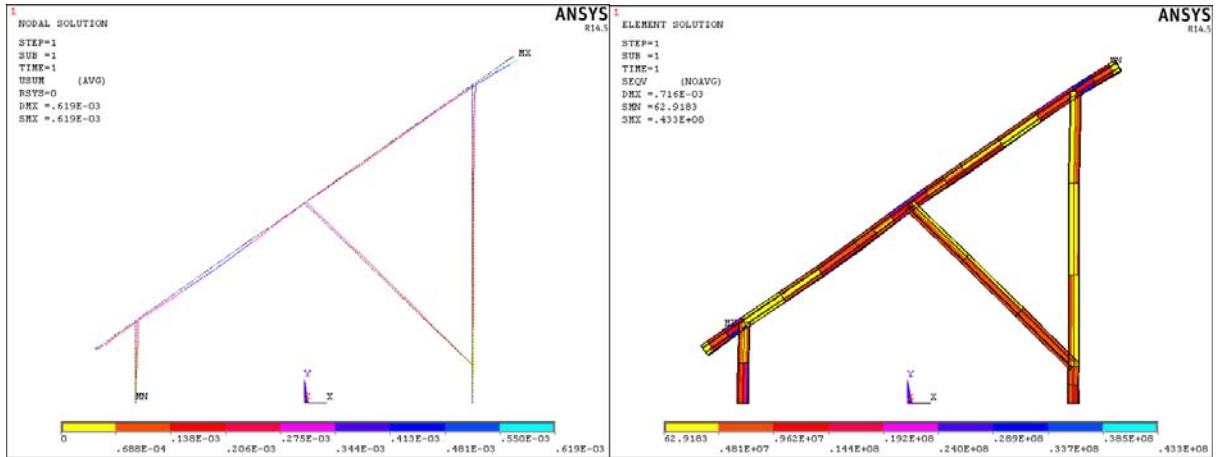
单组方阵恒载： $G = 7840N$

单组方阵风载： $W = W_k \times A = 0.975 \times 1.64 \times 0.99 \times 40 = 63.3204kN = 63320N$

$q_1 = G/4/20.4 = 96N/m$ (垂直向下)

$q_2 = W/4/20.4 = 776N/m$ (垂直于光伏组件)





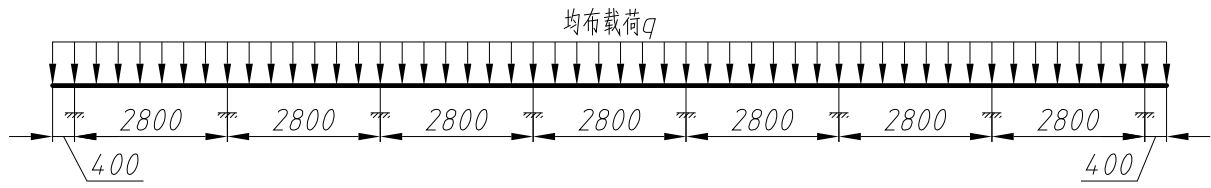
<i>NODE</i>	<i>FX(N)</i>	<i>FY(N)</i>	<i>FZ(N)</i>	<i>MX(Nm)</i>	<i>MY(Nm)</i>	<i>MZ(Nm)</i>
1	-1681.1	932.34	-299.87	-93.698	-17.381	430.8
4	-1513.6	3881.2	-13.776	-13.954	-5.5859	234.41
11	804.35	-1269	252.25	-13.366	-10.193	0.40187
16	796.63	-1267.4	54.505	-9.0402	4.8536	6.80E-02
28	796.54	-1264.8	-6.7869	-4.4433	4.8698	0.14668
39	797.23	-1266.2	13.673	-5.7481	4.3688	0.12007

(2) 恒载加雪载

单组方阵恒载: $G = 7840N$

单组方阵雪载: $S = S_k \times A = 0.4 \times 1.64 \times 0.99 \times 40 = 25.9776kN = 26000N$

$$q=S/4/20.4=318.35N/m$$



在 ANSYS 中建模计算结果如下: