

自持化光伏空调系统平衡计算

1. 负载耗电量计算

输入冷指标为 $q(W/m^2)$ ，输入建筑层数为 z ，计算单位建筑基底面积最大月总冷负荷 $Q_{max}(W \cdot h/m^2)$:

$$Q_{max} = q \times z \times h \times 30 \times k$$

式中： k 为空调计算冷负荷指标折算成日平均计算冷负荷指标的系数。按空调负荷视为起始、终止值非零的正弦波，因此其平均值 0.60 ~ 0.75； h 为日空调开启时长；

计算其余各月总冷负荷 $Q_i = Q_{max} \times k_i$

输入 k_i ，（如下所示）

$$Q_4 = Q_{max} \times k_4$$

$$Q_5 = Q_{max} \times k_5$$

$$Q_6 = Q_{max} \times k_6$$

$$Q_7 = Q_{max} \times k_7$$

$$Q_8 = Q_{max} \times k_8$$

$$Q_9 = Q_{max} \times k_9$$

$$Q_{10} = Q_{max} \times k_{10}$$

建议系数 k_i 取值如下：

表格

输入制冷机组性能系数 COP ，求得单位建筑面积空调系统各月耗电量 $Q_c(A \cdot h/m^2)$ ，计入光伏系统的辅助设备如控制器、逆变器等耗电量，选择蓄电池工作电压 U ，并输入蓄电池维持天数 n ；输入系数 ζ ；

$$Q_c = \frac{Q_i}{COP \times U \times \zeta}$$

式中，考虑由水泵和风机组成的输配系统以及末端风机盘管耗电量的存在，除以系数 ζ ， ζ 为制冷机组能耗占整个空调系统能耗的比例。

其中制冷机组性能系数 COP 取自《公共建筑节能设计标准》GB50189-2015 第 4.2.10 条 COP 限值标准。单位建筑面积空调机组各月耗电量 Q_c 应根据负载使用时长进行计算。

COP 取值表

风冷	水冷		
活塞/涡旋/螺杆	活塞/涡旋	螺杆	离心
COP	COP	COP	COP
2.9	4.4	5.3	5.7

计算单位建筑面积空调系统年日均耗电量 $Q_L(A \cdot h/d/m^2)$ 应根据全年负载开启时间以及每天负载开启时长进行计算，避免出现耗电量计算小的情况。**注：本设计为 4 月-10 月。**

$$Q_L = \frac{\sum Q_c}{\sum N_i}$$

式中： N_i 为各月天数。

2. 计算方阵面上的太阳辐照量

根据当地地理及气象资料，先任意设定某一倾角 β （若建筑屋面为坡屋面，则方阵倾角等于屋面倾角。若光伏阵列安装方式为平屋面平铺安装，则 $\beta = 0$ ，根据 8.1 节光伏阵列安装方式），计算出该倾斜面上的太阳月平均辐照量 $H_t(kW \cdot h/(m^2 \cdot d))$ ，并得出全年平均太阳日总辐照量 $H_m(kW \cdot h/(m^2 \cdot d))$ 。注意此时计算的太阳辐照量月份是负载全年运行月份，不包含负载未运行月份。

计算倾斜面上各月日均太阳辐射量 H_t ：

$$H_t = \bar{R} \bar{H}$$

全年平均太阳日总辐照量 H_m ：

$$H_m = \frac{\sum (H_t \times N_i)}{\sum N_i}$$

式中：\$N_i\$为各月天数

Klein 和 Thcilacker 提出的计算倾斜面上月均太阳辐照量的计算方法是目前国际公认的最合理的计算方法：

$$\bar{R} = D + \frac{\bar{H}_d}{2\bar{H}}(1 + \cos\beta) + \frac{\rho'}{2}(1 - \cos\beta)$$

式中，\$\bar{R}\$为倾斜面上各月平均太阳辐照量与水平面上月平均太阳辐照量的比值；\$\bar{H}_d\$为水平面上月平均太阳散射辐照量；\$\bar{H}\$为水平面上各月平均太阳总辐照量；\$\beta\$为方阵倾角；\$\rho'\$为地面反射率，一般情况下，\$\rho' = 0.2\$。

$$D = \begin{cases} \max[0, G(\omega_{ss}, \omega_{sr})], & \omega_{ss} \geq \omega_{sr} \\ \max[0, G(\omega_{ss}, -\omega_s) + G(\omega_s, \omega_{sr})], & \omega_{sr} > \omega_{ss} \end{cases}$$

G 函数由下列方法求出：

$$G(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{2d} \left[\left(\frac{bA}{2} - a'B \right) (\omega_1 - \omega_2) \frac{\pi}{180} + (a'A - bB)(\sin\omega_1 - \sin\omega_2) - a'C(\cos\omega_1 - \cos\omega_2) + \frac{bA}{2}(\sin\omega_1 \cos\omega_2 - \sin\omega_2 \cos\omega_1) + \frac{bC}{2}(\sin^2\omega_1 - \sin^2\omega_2) \right]$$

其中，

$$A = \cos\beta + \tan\varphi \cos\gamma \sin\beta$$

$$B = \cos\omega_s \cos\beta + \tan\delta \sin\beta \cos\gamma$$

$$C = \frac{\sin\beta \sin\gamma}{\cos\varphi}$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60)$$

$$d = \sin\omega_s - \frac{\pi}{180} \omega_s \cos\omega_s$$

$$a' = a - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$$

式中，\$\gamma\$为倾斜面方位角，朝向正南为\$0^\circ\$，朝向正北为\$180^\circ\$，偏东为负，偏西为正；\$\delta\$为太阳赤纬角；\$\omega_s\$为水平面上的日落时角，\$\omega_s = \cos^{-1}[-\tan\varphi \tan\delta]\$；\$\varphi\$为当地纬度；\$\omega_{sr}\$为倾斜面上日出时角，有

$$|\omega_{sr}| = \min \left[\omega_s, \arccos \frac{AB + C\sqrt{A^2 - B^2 + C^2}}{A^2 + C^2} \right]$$

$$\omega_{sr} = \begin{cases} -|\omega_{sr}| & A > 0 \text{ 且 } B > 0 \text{ 或 } A \geq B \\ |\omega_{sr}| & \text{其他} \end{cases}$$

\$\omega_{ss}\$为倾斜面上日落时角，有

$$|\omega_{ss}| = \min \left[\omega_s, \arccos \frac{AB - C\sqrt{A^2 - B^2 + C^2}}{A^2 + C^2} \right]$$

$$\omega_{ss} = \begin{cases} |\omega_{ss}| & A > 0 \text{ 且 } B > 0 \text{ 或 } A \geq B \\ -|\omega_{ss}| & \text{其他} \end{cases}$$

太阳赤纬角\$\delta\$的计算方法如下：

$$\delta = 23.45 \sin \left[360 \times \frac{284 + n}{365} \right]$$

式中，\$n\$为一年中的日期序号，如1月1日\$n = 1\$，12月31日\$n = 365\$。

需要输入的参数值：水平面上各月平均太阳总辐照量\$\bar{H}\$；水平面上各月平均太阳散射辐照量\$\bar{H}_d\$；

方阵倾角 β ；倾斜面方位角 γ ；地面反射率 ρ' ；当地纬度 φ ；以及各月 15 日的日期序号 n ；

将 H_t 的单位用 $\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 表示，再除以标准辐照度 $1000\text{W}/\text{m}^2$ ，即

$$T_t = \frac{H_t}{1000\text{W}/\text{m}^2} = H_t (\text{单位: h/d})$$

这样 H_t 在数值上就等于当月平均每天峰值日照时数 T_t ，以后就用以 $\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 为单位的 H_t 来代替 T_t 。

3. 计算各月发电盈亏量

对于某个确定的倾角，单位建筑面积方阵输出的最小电流应为：

$$I_{\min} = \frac{Q_L}{H_m \eta_1 \eta_2}$$

式中， η_1 为从方阵到蓄电池输入回路效率，包括方阵面上的灰尘遮蔽损失、性能失配、组件老化损失、防反充二极管及线路损耗、蓄电池充电效率等； η_2 为由蓄电池到负载的输出回路效率，包括蓄电池放电效率、控制器和逆变器的效率及线路损耗等。 η_1 取 0.9， η_2 取 0.9。

同样，也可由方阵面上负载使用月份中平均太阳辐照量的最小值 $H_{t\cdot\min}$ 得出单位建筑面积方阵所需输出的最大电流为：

$$I_{\max} = \frac{Q_L}{H_{t\cdot\min} \eta_1 \eta_2}$$

式中： $H_{t\cdot\min}$ 为 H_t 中最小值。

输入 I ， $I_{\min} < I < I_{\max}$ 。

单位建筑面积方阵实际工作电流应在 I_{\min} 和 I_{\max} 之间，可先任意选取中间值 I ，则单位建筑面积方阵各月发电量为：

$$Q_g = N_i I H_t \eta_1 \eta_2$$

式中， N_i 为当月天数； H_t 为该月倾斜面上的太阳辐照量， $\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

从而得到单位建筑面积各月发电盈亏量：

$$\Delta Q = Q_g - Q_c$$

4. 确定累计亏欠量 $\sum |-\Delta Q_i|$

当出现 1 个月份 $\Delta Q < 0$ ，则累计亏欠量为该月亏欠量；当出现 2 个及以上连续亏欠月份，则累计亏欠量为该连续月份亏欠量之和；当出现 2 个及以上不连续亏欠期，则累计亏欠量为不连续亏欠期中各亏欠期亏欠量之和最大的值，其中亏欠期的计算原则为：若两个不连续亏欠期之间的 ΔQ_i 为正的月份的盈余量之和大于前一个亏欠期亏欠量，则两个亏欠期分开计算；若两个不连续亏欠期之间的 ΔQ_i 为正的月份的盈余量之和小于前一个亏欠期亏欠量，则两个亏欠期合并为一个亏欠期，其亏欠量应扣除盈余量部分；

5. 决定方阵输出电流

将累计亏欠量 $\sum |-\Delta Q_i|$ 代入下式：

$$n_1 = \frac{\sum |-\Delta Q_i|}{Q_L}$$

得到的 n_1 与指定的蓄电池维持天数 n 相比较，若 $n_1 > n$ ，表示所考虑的电流太小，以致亏欠量太大，所以应该增大电流 I ，重新计算；反之亦然，直到 $n_1 \approx n$ ，即得出单位建筑面积方阵输出电流 I_m 。

6. 求出方阵最佳倾角

若建筑屋面为坡屋面，则光伏方阵倾角为坡屋面倾角；直接输出方阵倾角及单位建筑面积方阵输出电流 I_m ；并进行步骤 7，计算蓄电池及方阵容量；

若建筑屋面为平屋面，则进行方阵最佳倾角计算：

平屋面的单位建筑面积方阵输出电流 I_m 是在某一倾角 β 时能满足蓄电池维持天数 n 的输出电流，但是此倾角并不一定是最佳倾角，接着应当改变倾角为 $\beta + 1$ 及 $\beta - 1$ ，重复以上计算，得到相应的单位建筑面积方阵输出电流 I_{m+1} 以及 I_{m-1} ，反复进行比较计算，得出最小的方阵输出电流 I_m 值，这时相应的倾角即为方阵最佳倾角 β ，单位建筑面积方阵输出电流即为 I_m 。

7. 计算蓄电池及方阵容量

这样可以求出单位建筑面积蓄电池容量为：

$$B_n = \frac{\sum |-\Delta Q_i|}{DOD\eta_2} = \frac{nQ_L}{DOD\eta_2}$$

式中, B_n 为单位建筑面积蓄电池容量, $A \cdot h/m^2$; DOD 为蓄电池的放电深度, 通常取 0.3-0.8。注: DOD 取 0.8;

单位面积方阵容量为:

$$P_n = \mu I_m (U_b + U_d)$$

式中, P_n 为单位建筑面积方阵容量, W/m^2 ; μ 为安全系数, 通常取 1.05-1.3, 可根据负载的重要程度、参数的不确定性、负载在白天还是晚上工作、温度的影响以及其他所需考虑的因素而定; U_b 为蓄电池充电电压; U_d 为防反充二极管及线路等的电压降, U_d 取为 1。

$$U_b = U \times 1.2$$

8. 光伏阵列最大安装容量 P_m 计算

太阳能光伏方阵最大容量的计算是依据光伏方阵屋面安装条件以及单片光伏组件功率而得。根据光伏组件屋面安装条件得到屋面安装的最大光伏面积, 结合光伏组件功率, 则可得到屋面光伏组件最大安装容量。

8.1 光伏组件屋面安装方式

根据屋顶形式的不同, 光伏组件的安装方式不同。通常在平屋面的安装方式有倾斜支架安装、平行架空安装以及平铺安装几种; 在坡屋面的安装方式有顺坡平行架空安装、顺坡镶嵌式安装、光伏瓦安装。

(1) 平屋面安装

在平屋面的安装方式中, 倾斜支架安装是将光伏组件固定在支架上, 再通过基座固定在屋面上, 可以根据当地太阳辐射情况调节支架倾角。这种安装方式影响上人屋面的使用, 并需要留出检修、疏散等通道。且需要根据组件倾角留出前后排间距, 避免遮挡, 可利用前后排间距检修疏散。平行架空安装时在平屋面上设置架空的框架, 在框架上通过支架安装光伏组件, 并通过支架调节倾角。这种安装方式不影响上人屋面的使用, 检修可以在架空空间完成, 安装面积大。平铺式安装时将光伏组件平铺在平屋面上, 这种安装方式不会造成前后遮挡, 安装面积大, 但倾角不可调节, 组件效率低。且平铺式安装也需要留出检修、疏散通道。

(2) 坡屋面安装

在坡屋面的安装方式中, 顺坡平行架空安装时将光伏组件通过支架架空在坡屋面上, 组件与支架的倾角与屋面坡度相同。这种安装方式对便于组件的接线与背板的通风, 但对屋面的外观影响较大。顺坡镶嵌式安装时将光伏组件镶嵌在屋面中, 组件表面与屋面瓦平齐。这种安装方式对屋面外观影响较小, 但组件周边防水面积大, 背板通风散热不好。光伏瓦安装是用光伏瓦替代传统的瓦片, 但目前技术不成熟。

8.2 光伏阵列容量计算

(1) 平屋面倾斜支架安装

光伏阵列前后排间距 D 按下式计算: [《太阳能光伏发电应用技术》]

$$D = L \cos \beta + L \sin \beta \frac{0.707 \tan \varphi + 0.4338}{0.707 - 0.4338 \tan \varphi}$$

式中, D 为方阵前后排间距, m ; L 为太阳能电池组件高度, m ; φ 为当地纬度; β 为光伏阵列倾角; 光伏组件投影面积 S_{PV} 按下式计算:

$$S_{PV} = LW \cos \beta$$

式中, S_{PV} 为光伏组件投影面积, m^2 ; L 为太阳能电池组件高度, m ; W 为太阳能电池组件宽度, m ; β 为光伏阵列倾角;

屋面光伏组件间距系数 γ 是考虑方阵前后排间的屋面面积 x 无法使用, 可按下式计算:

$$\gamma = \frac{2L \cos \beta}{2L \cos \beta + D}$$

单位建筑面积光伏组件最大容量 P_m 按下式计算:

$$P_m = \frac{W_p}{S_{PV}} \times \gamma \times \rho$$

式中, P_m 为单位建筑面积光伏组件最大容量, W/m^2 ; W_p 为单片太阳能电池组件功率, W ; ρ 为

光伏组件有效面积系数，是考虑屋面检修疏散通道占用屋面面积，且屋面不能完全安装光伏组件时的系数；考虑平屋面倾斜支架安装光伏方阵前后间距可作为检修疏散通道，因此 ρ 取 0.9；

(2) 平屋面平行架空安装

单位建筑面积光伏组件最大容量 P_m 按下式计算：

$$P_m = \frac{W_p}{S_{PV}} \times \rho$$

考虑平屋面平行架空安装检修疏散通道可在架空层完成，因此 ρ 取 0.9；

(3) 平屋面平铺安装

单位建筑面积光伏组件最大容量 P_m 按下式计算：

$$P_m = \frac{W_p}{S_{PV}} \times \rho = \frac{W_p}{LW} \times \rho$$

考虑平屋面平铺安装需设置检修疏散通道，因此 ρ 取 0.8；平屋面平铺安装方阵倾角 $\beta = 0^\circ$ ，则 $S_{PV} = LW$ 。

(4) 坡屋面平行架空安装

单位建筑面积光伏组件最大容量 P_m 按下式计算：

$$P_m = \frac{W_p}{S_{PV}} \times \rho \times \frac{1}{2}$$

式中，1/2是考虑坡屋面只在南向屋面安装光伏组件；考虑坡屋面平行架空安装需设置检修疏散通道，因此 ρ 取 0.9；

(5) 坡屋面顺坡镶嵌安装

单位建筑面积光伏组件最大容量 P_m 按下式计算：

$$P_m = \frac{W_p}{S_{PV}} \times \rho \times \frac{1}{2} \times \mu$$

式中，1/2是考虑坡屋面只在南向屋面安装光伏组件； μ 为温度修正系数，是考虑坡屋面顺坡镶嵌安装光伏板背板通风散热不好对光伏组件效率的影响，取 0.9；考虑坡屋面平行架空安装需设置检修疏散通道，因此 ρ 取 0.85；

9. 最终决定最佳搭配

将步骤 7 求得的单位建筑面积光伏方阵容量 P_n 和步骤 8 求得的单位建筑面积光伏方阵最大容量 P_m 进行比较。

若 $P_n \leq P_m$ ，则屋面光伏方阵发电量可以满足建筑空调系统用电量需求；

若 $P_n > P_m$ ，则屋面光伏方阵发电量不能满足建筑空调系统用电量需求，需要对建筑进行节能改造，降低建筑冷负荷，或选择性能系数更高的制冷机组，重新计算，直至 $P_n \leq P_m$ ；

当光伏方阵发电量可以满足空调系统用电量需求时，可以得出自持化光伏空调建筑光伏方阵容量和蓄电池容量如下：

$$B = B_n F$$

$$P = P_n F$$

式中， F 为建筑面积， m^2 ；

设计逻辑框图如下：

