

基于准最小二乘法的光伏阵列模型 鲁棒参数估计方法

朱香如, 史毅, 洪智慧, 张正江, 胡文

(温州大学 电气数字化设计技术国家地方联合工程研究中心, 浙江 温州 325035)

摘要: 光伏阵列的模型参数估计在光伏发电系统的仿真、输出功率预测、最大功率点跟踪等方面有重要意义; 当测量数据中只含随机误差时, 以加权最小二乘 (WLS) 为优化函数的参数估计方法有较好的辨识效果; 但是当测量数据中含有显著误差时, WLS 参数辨识的效果较差; 为解决此问题, 提出了一种以准加权最小二乘法 (QWLS) 为优化函数的参数估计方法来减小显著误差的影响, 采用了赤池信息量准则 (AIC) 设计 QWLS 最优参数, 将该方法应用于光伏阵列中构造模型鲁棒参数估计问题; 最后将 WLS 和 QWLS 分别结合序列二次规划 (SQP) 算法, 进行光伏阵列模型的参数估计仿真与实验测试; 测试结果显示 QWLS 参数估计结果更准确, 验证了准最小二乘法的鲁棒性与有效性。

关键词: 光伏模型; 参数估计; 最小二乘法; 准最小二乘法

Robust Parameter Identification Method of Photovoltaic Array Model Based on Quasi-least Squares

ZHU Xiangru, SHI Yi, HONG Zhihui, ZHANG Zhengjinag, HU Wen

(National-Local Joint Engineering Research Center of Electrical Digital Design Technology,
Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract: The parameter identification of photovoltaic array model is of great significance in the simulation, the output power prediction and maximum power point tracking of the photovoltaic array in a photovoltaic power generation system. Weighted least squares (WLS), as a commonly used parameter identification optimization function, has a good recognition effect when the measurement data only contains random errors. When there are obvious errors in the measurement data, the effect of parameter identification with the WLS is poor. To solve this problem, a quasi-weighted least squares (QWLS) method as an optimization function is proposed to reduce the influence of obvious errors, Akaike information criterion is used to design the optimal parameter of the QWLS, and the method is applied in the model of photovoltaic arrays to construct the robust parameter estimation problem. Finally, the WLS and QWLS are combined with the sequential quadratic programming (SQP) algorithm to carry out the simulation and experimental testing of parameter identification of the photovoltaic array model. The results show that the parameter estimation of the QWLS is more accurate, which further verifies the robustness and effectiveness of the quasi-least squares method.

Keywords: photovoltaic model; parameter estimation; WLS; QWLS

0 引言

中国在能源供应和绿色发展方面面临巨大挑战, 因经济快速发展, 人民生活水平不断提高, 能源消耗量逐年上升, 气候问题越来越严重。为解决能源危机, 新能源产业纷纷兴起。可再生能源, 其利用过程不排放二氧化碳, 在一定程度上又上缓解世界气候问题。其中太阳能作为一种充

足且分布广泛的资源, 受到国内外众多学者的极大关注^[1-15]。李艳坤与周荣斌阐述了光伏发电的现状和发展前景^[1]。孔凡太与戴松元分析了世界能源基本状况和发展趋势^[2], 说明了新能源产业发展对我国经济发展的战略性意义。李宗鉴对有限测量信息的光伏模组参数辨识方法进行了研究^[3]。张海龙论述了太阳能将成为我国可再生能源的

收稿日期: 2023-01-07; 修回日期: 2023-03-02。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61703309); 温州市基础性科研项目(H20220006, H20220007); 工业控制技术国家重点实验室(浙江大学)开放课题(ICT2022B65)。

作者简介: 朱香如(2001-), 女, 大学本科。

通讯作者: 洪智慧(1983-), 女, 博士, 讲师。

引用格式: 朱香如, 史毅, 洪智慧, 等. 基于准最小二乘法的光伏阵列模型鲁棒参数估计方法[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 180-187.

重点发展对象^[4]。利用太阳能进行光伏发电不消耗燃料, 不排放有害气体, 其安全性又有保障。为了更好地提高资源利用率, 需要对光伏阵列模型进行参数估计。光伏阵列模型的参数估计对研究光伏发电系统的仿真、光伏阵列的输出功率预测、最大功率跟踪^[5]意义重大。王波提出使用常规的加权最小二乘法 (WLS) 来进行参数估计^[6]。常规的加权最小二乘法对测量含有随机误差情况下参数估计效果较好。但 WLS 受测量数据中显著误差的影响较大, 会导致参数估计出现偏差, 效果不好。为了使参数估计的方法更加具有鲁棒性。程泽等提出了基于自适应混沌粒子群算法的光伏阵列参数估计的方法^[7]。郑宁军阐述了一种基于分子动理论改进算法进行光伏阵列参数估计的方法^[8]。李春菊提出了基于参数估计的双积分滑模变结构 MPPT 算法^[9]。上述 3 种方法都可以较好地解决显著误差影响的问题, 但是所涉及算法比较复杂。为了使参数估计方法更加简洁, 同时保证方法的鲁棒性。目前, 科研机构 and 高校将科研力量集中在改进光伏模型参数辨识上。比如: 利用基于折射学习机制的蝠鲮觅食优化算法的三二极管光伏组件参数辨识模型^[10], 此模型可提高收敛速度和全局搜索能力。本文提出了一种基于准最小二乘 (QWLS) 参数估计方法进行光伏阵列的参数估计。将 WLS 和 QWLS 结合序列二次规划 (SQP) 算法, 分别进行光伏阵列模型的参数估计仿真与实验测试。结果显示 QWLS 参数估计方法效果更好, 进一步验证了准最小二乘法的鲁棒性与有效性。

1 光伏阵列建模

1.1 理想状态下的光伏电池模型

理想的光伏电池模型可表示为一个电流源并联一个二极管。已知电流源的电流 I_{ph} 与太阳的辐照强度呈正比。但在实际使用时, 由于硅和电极表面之间存在接触电阻的损耗, 此时就需考虑硅材料的电流流阻和电极电阻, 即在光伏模型上串联一个电阻 R_s 。这个模型被称为单二极管光伏电池模型, 如图 1 所示。

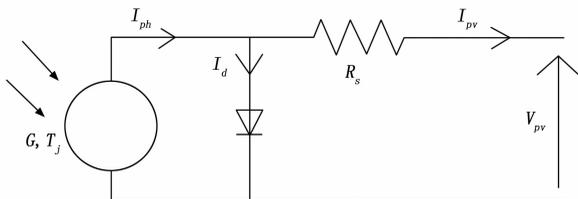


图 1 单二极管光伏电池模型

根据二极管的特性以及基尔霍夫电压电流定律可得光伏电池的输出电流表达式:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_0 (e^{q(V_{pv} + I_{pv} R_s) / (AKT)} - 1) \quad (1)$$

式 (1) 中, I_{pv} 为光伏电池的输出电流; I_d 是流过内部二极管的电流; I_{ph} 为光伏电池光生电流, 其大小受环境温

度和光照强度影响; I_0 为二极管反向饱和电流; V_{pv} 为光伏电池单元的输出电压; A 是理想二极管品质因数; 常数 q 是电子电荷的绝对值, $q = 1.629 \times 10^{-19} \text{C}$; k 为 Boltzman 系数, $k = 1.3819 \times 10^{-23} \text{J/K}$; T_j 为光伏模块的结温; R_s 为等效电阻。如果电路出现短路, 则此时二极管的电流可忽略。在辐照强度为 G 、温度为 T_j (一般标准情况下光照强度 G 为 1000W/m^2 , T 为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$) 下的光伏电池参数可用下式求得:

$$I_{ph-ref} = I_{sc-ref} \quad (2)$$

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} [I_{ph-ref} + \alpha_{sc} (T_j - T_{ref})] \quad (3)$$

$$I_0 = I_{oref} \left[\frac{T_j}{T_{ref}} \right]^{3/A} \exp(-qV_g / Ak \left(\frac{1}{T_j} - \frac{1}{T_{ref}} \right)) \quad (4)$$

$$X_a = I_{oref} q \exp(qV_{ocref} / AkT_{ref}) / AkT_{ref} \quad (5)$$

式 (2) ~ (5) 中, I_{sc-ref} 为参数表给出的标准情况下短路电流值; I_{ph-ref} 为标准情况下光伏电池光生电流; K_0 为光生电流与温度的变化对应关系值; T_j 为光伏电池板的温度; I_{oref} 为标准情况下二极管饱和电流; V_{oc-ref} 为标准情况下开路电压; V_g 为带隙电压; 开路时, $I-V$ 曲线的斜率是 dV/dI_{oc} ; X_a 为等效电导。当负载为 0 时, 光生电流值等于短路电流, 即 $I_{sc} = I_{ph}$ 。

1.2 光伏阵列

光伏电池是光伏并网发电系统的重要组成部分, 其主要作用是把太阳能转化为电能。光伏组件是光伏电池板最基本的组成单元。因单个光伏电池容量较小, 不能单独作为电源使用。所以根据实际的需要, 通常将一定数目的太阳能电池单体按照一定的要求串并联连接, 并通过封装组成光伏组件; 多个光伏组件经过串并联形成光伏阵列。同一工况的光伏单体组成的光伏模块称为子串, 如图 2 (a) 所示; 先串联后并联的两个子串可构成如图 2 (b) 的子串阵列; 无遮挡的理想条件下的光伏阵列如图 2 (c) 所示; 在理想情况下, 根据电路的串并联原理可知: 串联的太阳能电池输出相同的电流, 其输出的电压是单个电池板的电压之和; 并联的太阳能电池输出相同的电压, 其电流是多个电池板输出电流之和。因此, $N_s \times N_p$ 个太阳能电池组成的光伏阵列的输出特性表示如下:

$$V_A = N_s V \quad (6)$$

$$I_A = N_p I \quad (7)$$

$$P_A = N_s N_p P \quad (8)$$

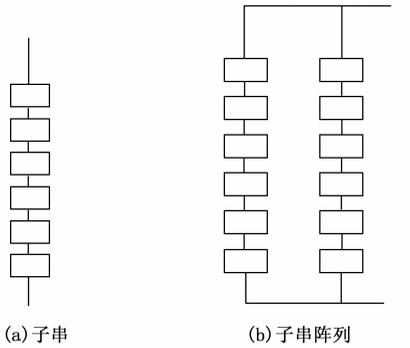
式 (6) ~ (8) 中, N_s 为光伏电池板串联数目; N_p 为电池板并联数目; V_A 、 I_A 、 P_A 分别为光伏阵列的输出电压、输出电流和输出功率; V 、 I 和 P 则为光伏电池板的输出电压、输出电流以及输出功率。

综上所述, 光伏阵列的输出电流 I_A 可由式 (9) 表示:

$$I_A = N_p (I_{ph} - I_0 (e^{q(V_A/N_s + I_A/N_p R_s) / (AKT(G))} - 1)) \quad (9)$$

1.3 局部阴影的光伏阵列模型

光伏电池板被周围高大建筑物、树木、云层和鸟禽排泄物等物体局部遮挡时, 会接收到不均匀的光照, 光伏阵



(c) 理想条件下的光伏阵列
图 2 光伏阵列图

列的输出特性将改变，光伏发电系统的发电效率将受到极大影响。对于同一个光伏串而言，其中所有的光伏电池都应该输出相同的电流，该电流受限于遮蔽组件的短路电路；而遮蔽的组件会降低总体的电流，从而降低整串的输出功率。由于局部阴影的产生，光伏系统将产生失配效应^[11]，甚至在严重的情况下会形成热斑现象^[12]。为了防止光伏组件在局部遮挡情况下发生热斑效应，通常会在串联的电池组上并联数个旁路二极管。因此，需要在阴影条件下构建新的光伏模型。

任意阴影条件下的光伏阵列由不同遮挡情况的子串阵列并联组成，如图 3 所示。

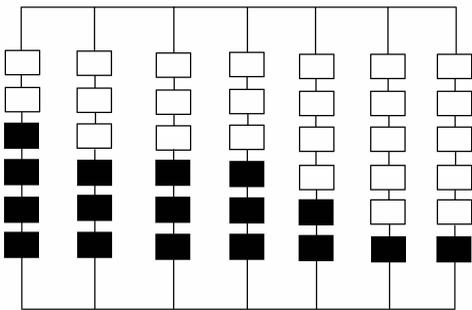


图 3 阴影条件下的光伏阵列

在局部遮挡条件下，光伏阵列由多个具有不同遮挡模式的子串阵列并联而成。光伏阵列的输出电压一般取每个分支电压的最大值。

在光伏电池光照不均匀情况下，电池板的输出功率与外界负载大小有关。可分为以下两种情况。

当外接负载很小时，电流较大且大于遮蔽组件的光生电流，正常光照下的组件会使遮蔽组件受到反向电压。此时旁路二极管导通，可对遮蔽组件起到保护作用，未遮蔽组件输出功率。

当外接负载渐渐增大时，电流将减小，光伏组件电流不大于遮蔽组件产生的光生电流，故旁路二极管发生反向偏置，该电流被阻断。此时遮蔽组件与正常光照组件输出功率，不断负载提供能量。

如图 4 所示，旁路二极管可看作可变电阻^[13]，对其建模如下：

$$R_{by}(V_m) = \begin{cases} 10^6 \text{ m}\Omega & V_m \leq 0 \\ 0.1 \text{ m}\Omega & V_m > 0 \end{cases}$$

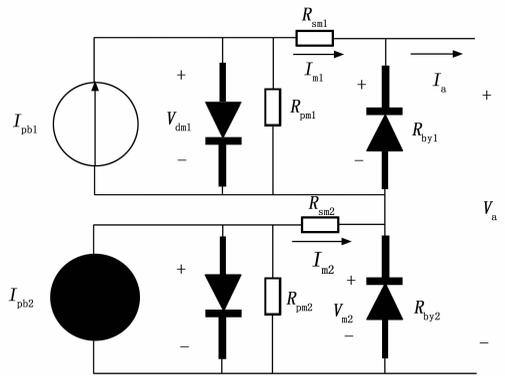


图 4 两光伏电池串联成光伏阵列的等效电路模型

设光伏阵列的电压为 V_a ，若遮蔽光伏电池板的板 M_2 ，板 M_1 不遮蔽；板 M_1 光照度为 G_1 ，板 M_2 光照度为 G_2 。阴影条件下光伏阵列的输出方程及约束条件如下：

$$\begin{cases} I_a = \sum_{x=1}^{N_s} I_x \\ V_a = \max\{V_x\} \end{cases} \quad (10)$$

$$f_1 = (I_{m1,j}, V_{m1,j}, G_1) = I_m - \left\{ I_1(G_1) - I_0(G_1) \times \left[\exp\left(\frac{q(V_1 + I_m R_{s1})}{n_1 k T_c(G_1)}\right) - 1 \right] - \frac{V_1 + I_m R_{s1}}{R_{p1}} \right\} = 0 \quad (11)$$

$$f_2 = (I_{m2,j}, V_{m2,j}, G_2) = I_m - \left\{ I_1(G_2) - I_0(G_2) \times \left[\exp\left(\frac{q(V_2 + I_m R_{s2})}{n_1 k T_c(G_2)}\right) - 1 \right] - \frac{V_2 + I_m R_{s2}}{R_{p2}} \right\} = 0 \quad (12)$$

$$V_{m1,j} + V_{m2,j} - V_a = 0 \quad (13)$$

$$\left(I_{m1,j} - \frac{V_{m1,j}}{R_{by}(-V_{m1,j})} \right) - \left(I_{m2,j} - \frac{V_{m2,j}}{R_{by}(-V_{m2,j})} \right) = 0 \quad (14)$$

$$I_a - \left(I_{m1,j} - \frac{V_{m1,j}}{R_{by}(-V_{m1,j})} \right) = 0 \quad (15)$$

$$I_{m1,j} + I_{m2,j} = I_a \quad (16)$$

式 (10) ~ (16) 中， I_x 为各子串阵列的电流，为旁路二极管电压， $R_{by}(V_m)$ 为旁路二极管的管电压， V_x 为各子串阵列的电压。 I_a 和 V_a 分别为光伏阵列的输出电流和输出电压。该模型中需要辨识的参数有二极管的品质因数、串联

电阻值, 电池板的结温和光照强度。

$$\beta = \frac{\beta^j + \beta^l}{2} \tag{25}$$

2 QWLS 估计算法

最小二乘法 (WLS) 作为一种广泛的参数估计的目标函数, 其表达式如下:

$$\min \sum_{i=1}^m \rho(e_i) = \min \sum_{i=1}^m \frac{e_i^2}{2} \tag{17}$$

式中, e 表示测量误差。而测量误差又可以分为随机误差与显著误差两种。随机误差是指测量人员在测量过程中由于各种环境条件的不稳定, 以及仪器仪表运行中的微小差异等各种不稳定的随机因素的影响产生的误差。而显著误差则是测量仪器自身出现故障, 测量人员的重大失误等原因所致。

由式 (21) 可知, $d\rho(e)/de = e$ 。当 $e \rightarrow \infty$ 时, $\rho(e) \rightarrow \infty$ 。说明利用 WLS 进行参数估计时易受到显著误差的影响。如果存在较大的显著误差, 那么 WLS 将导致不正确的估计结果。因此, 它并不是一个鲁棒估计器。为了提高在测量数据有显著误差的情况下, 参数估计的准确性。本文提出利用准最小二乘 (QWLS) 来进行参数估计。

QWLS 的表达式如下所示:

$$\text{目标函数: } \min \sum_{i=1}^m \rho(e_i) \tag{18}$$

$$\rho(e) = \frac{e^2}{2 + \beta |e|} \tag{19}$$

由于

$$\frac{d\rho(e)}{de} = \begin{cases} \frac{4e - \beta e^2}{(2 - \beta e)^2} & e < 0 \\ \frac{4e + \beta e^2}{(2 + \beta e)^2} & e \geq 0 \end{cases} \tag{20}$$

当 $|e| \rightarrow \infty$

$$\frac{d\rho(e)}{de} \propto e \approx 0 \tag{21}$$

若 $e \rightarrow \infty$

$$\lim_{e \rightarrow -\infty} \frac{4e - \beta e^2}{(2 - \beta e)^2} = -\frac{1}{\beta} \tag{22}$$

若 $e \rightarrow +\infty$

$$\lim_{e \rightarrow +\infty} \frac{4e + \beta e^2}{(2 + \beta e)^2} = \frac{1}{\beta} \tag{23}$$

由式 (21) ~ (23) 可知, 与 WLS 相比, 分母中增加的 $\beta |e|$ 这一因子可以有效降低显著误差的干扰。当测量数据不含显著误差时, QWLS 的参数估计结果几乎与 WLS 相同; 当测量数据出现显著误差时, QWLS 算法可以通过 $\beta |e|$ 这一因子来减少 $\rho(e)$, 从而降低了显著误差对最终参数估计的影响, 保证了参数估计的准确性。

β 参数的选取方式:

首先粗略设置 β 的取值范围, 再通过式 (24) 计算 AIC 的最小值 (AIC 的值越小, 数据拟合效果越好), 然后基于此 AIC 最小值, 选择 β 的上限 β^U 和下限 β^L ; 最后由式 (25) 可得 β 的最佳值。

$$AIC = \sum_{i=1}^M \left(\frac{X_i^r - X_i^m}{\delta_i} - \frac{b_i}{\delta_i} \right) + 2 \sum_{i=1}^M y_i \tag{24}$$

式 (25) 中, M 为测量变量数目, x_i^r 为预测值, x_i^m 为测量值, δ_i 为 x_i^m 的标准差, y_i 为; b_i 为显著误差的估计大小, 其作用是把误差比较大的数据那部分误差补偿掉。如果数据中只含有随机误差, 则 $b_i = 0, y_i = 0$ 。如果既有随机误差也有显著误差, 则 b_i 是第 i 个测量变量, $y_i = 1$ 。 β 的具体选取流程如图 5 所示。

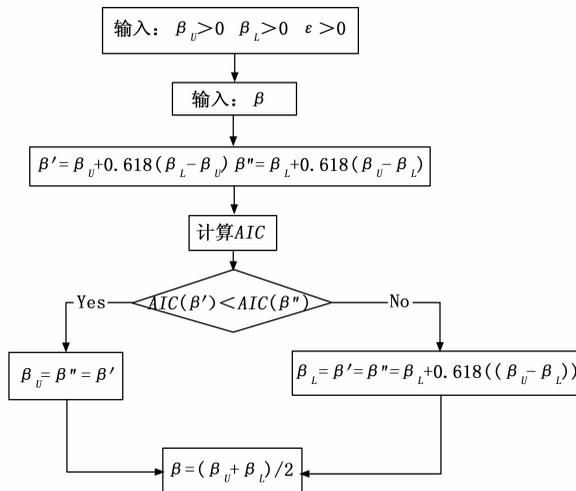


图 5 参数的具体选取流程

为了进一步说明 QWLS 相较于 WLS 的优越性。本文采用均方根误差 (RMSE) 作为 QWLS 与 WLS 比较的依据。RMSE 的定义为预测值与真实值的偏差的平方与观测次数 n 比值的平方根, 如式 (26) 所示。其作用为衡量预测值与真实值之间的偏差, 并且对数据中的异常值较为敏感。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Y_i - f(X_i))^2} \tag{26}$$

本文以此为基础, 提出式 (27) 作为比较函数。

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (I_i - I_{true})^2} + \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (U_i - U_{true})^2} \tag{27}$$

式中, I_i, U_i 分别表示参数估计后模型输出的电流值与电压值。 I_{true}, U_{true} 表示真实的电流电压测量值, 即无显著误差。

3 仿真比较

根据上文第 2 节的内容, 建立有不同遮蔽条件下, 2×2 光伏组件构成的光伏阵列的输出电流、电压的 $N_s = 0$ 理论数学模型。基于所建立的数学模型, 每次产生二十多组测量电压和测量电流, 进行了两组仿真实验。第一组被遮蔽的板子分别为板 1。第二组则为板 1、2。

初始光伏阵列遮挡可得 $N_s, qty, Group$ 。 N_s 为光伏电池板串联数目, $Group$ 表示光伏阵列的子阵列个数, qty 表示单串阵列子串个数, k 表示子阵列下标, i 表示子串下标, N_s 表示遮蔽条件下光伏电池的个数。图 6 中光伏阵列输出电流函数分别是在均匀光照, 旁路二极管导通, 旁路

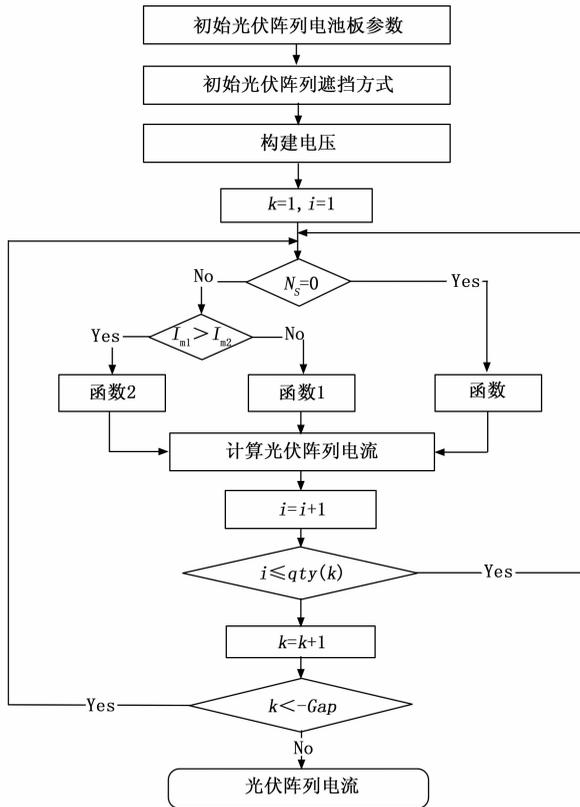


图 6 产生测量数据的流程图

二极管阻断的条件下得出的。

表 1 板 1 遮蔽时输出电压与输出电流的测量数据

| 测量电压/V | 测量电流/A | 测量电压/V | 测量电流/A |
|--------|----------|--------|---------|
| 38.36 | -0.000 2 | 34.16 | 0.736 8 |
| 38.03 | 0.136 9 | 32.01 | 0.842 1 |
| 37.99 | 0.151 4 | 27.93 | 0.931 1 |
| 37.94 | 0.169 1 | 22.95 | 0.965 5 |
| 37.89 | 0.186 2 | 21 | 0.970 8 |
| 37.79 | 0.218 6 | 20 | 0.972 6 |
| 37.71 | 0.243 1 | 19 | 1.043 2 |
| 37.61 | 0.272 1 | 18.27 | 1.287 3 |
| 37.52 | 0.296 6 | 17 | 1.523 0 |
| 37.38 | 0.332 1 | 16.03 | 1.618 4 |
| 37.23 | 0.367 1 | 14.18 | 1.707 2 |
| 37.07 | 0.401 2 | 10.37 | 1.755 6 |
| 36.75 | 0.461 3 | 7.32 | 1.762 2 |
| 36.5 | 0.502 0 | 1.35 | 1.764 |
| 36.14 | 0.553 0 | 0.98 | 1.764 1 |
| 35.32 | 0.644 7 | 0.57 | 1.764 1 |

表 2 板 1 遮蔽且测量不含显著误差时, WLS 与 QWLS 参数估计的 RMSE 结果

| 参数估计方法 | RMSE 的大小 |
|--------|----------|
| QWLS | 1.164 85 |
| WLS | 1.1652 |

第一组实验时设置参数如下：正常光照组的电池板结板温度为 36.5 ℃，光照度为 232 W/m²；遮蔽组件的结板温度为 22.2 ℃，光照度为 28 W/m²。正常光照部分二极管的品质因数为 73，阴影部分二极管的品质因数为 38，串联等效电阻 R_s 为 0.1 Ω。

在考虑测量误差包含显著误差与随机误差的情况下，运用 QWLS 与 WLS 进行参数识别。参数识别的对象包括未遮蔽、遮蔽组的结板温度，光照度，理想二极管的品质因数 A，串联等效电阻 R_s。

利用第三节中提到的的选取方法。选取 β 的范围为 [0, 30]，当 β 为 24 时，AIC 的值达到了最小，为 0.108 7。故此时选用的 β 为 24。从图 7 中看出，在测量数据仅含随机误差时，用 WLS 与 QWLS 进行参数估计后的模型输出值基本与测量数据吻合，即 WLS 与 QWLS 此时的参数估计能力相同。用 WLS 进行参数估计，得到的正常部分的结板温度为 36.15 ℃，光照度为 232.85 W/m²；遮蔽部分的结板温度为 21.54 ℃，光照度为 24.26 W/m²。正常光照部分二极管的品质因数为 72.96，阴影部分二极管的品质因数为 37.95，串联等效电阻 R_s 为 0.100 4 Ω，其 RMSE 的大小为 1.165 2；用 QWLS 进行参数识别后，得到的正常部分的结板温度为 36.16 ℃，光照度为 232.85 W/m²；遮蔽部分的结板温度为 21.54 ℃，光照度为 24.27 W/m²。正常光照部分二极管的品质因数为 72.94，阴影部分二极管的品质因数为 37.90，串联等效电阻 R_s 为 0.101 2 Ω，其 RMSE 的大小为 1.164 85。两者的辨识结果非常接近，且与实际的光照度和结板温度的偏差也比较小。说明只含随机误差时，WLS 与 QLWS 两种参数估计方法都是有效的。

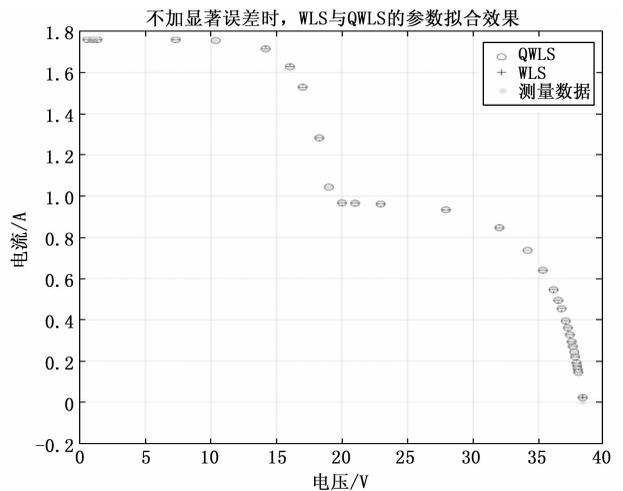


图 7 板 1 遮蔽且测量不含显著误差时, WLS 与 QWLS 辨识结果

在产生的 32 组测量数据中，随机抽取 6 组数据，加入显著误差。显著误差的大小约为测量数据的 15%~30%。QWLS 与 WLS 的参数估计后的模型输出如图 8 和 9 所示。

用第三节提到的 AIC 准则，β 此时选用 125.68。从图 9

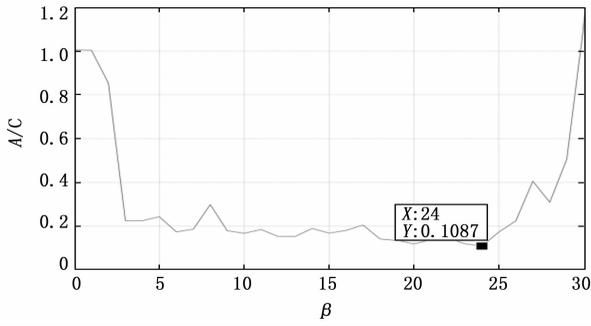


图 8 板 1 遮蔽且测量不含显著误差时, QWLS 的 AIC 值与 β 的关系曲线

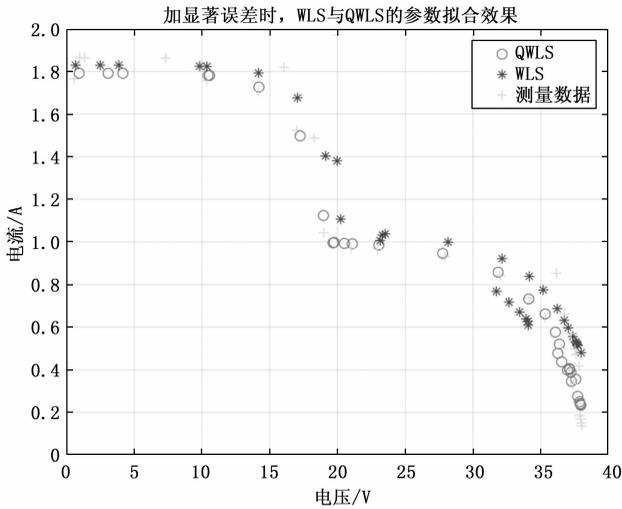


图 9 板 1 遮蔽有显著误差时, WLS 与 QWLS 辨识结果

中看出, 在测量数据包含了含显著误差后, 用 WLS 与 QWLS 进行参数估计后的模型输出值就会产生较大差别。

表 3 板 1 遮蔽有显著误差时, WLS 与 QWLS 参数估计的 RMSE 值

| 参数估计方法 | RMSE 的大小 |
|--------|----------|
| QWLS | 1.574 |
| WLS | 3.374 |

用 WLS 进行参数估计, 得到的正常部分的结板温度为 $151.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 光照度为 236.2 W/m^2 ; 遮蔽部分的结板温度为 $61.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 光照度为 29.9 W/m^2 , 正常光照部分二极管的品质因数为 67.47, 阴影部分二极管的品质因数为 121.45, 串联等效电阻 R_s 为 $0.1104\text{ }\Omega$, 模型的输出曲线会向异常值靠近; 而用 QWLS 进行参数识别后, 得到的正常部分的结板温度为 $45.096\text{ }^{\circ}\text{C}$, 光照度 234.9 W/m^2 ; 遮蔽部分的结板温度为 $26.59\text{ }^{\circ}\text{C}$, 光照度为 27.94 W/m^2 。其辨识的正常光照部分二极管的品质因数为 69.37, 阴影部分二极管的品质因数为 35.44, 串联等效电阻 R_s 为 $0.1504\text{ }\Omega$ 。QWLS 的 RMSE 的值只有 1.574, 而 WLS 的 RMSE 值为 3.374。QWLS、WLS 两种参数估计方法, 在此时辨识得到的参数

都会与实际参数有些偏差。但相比之下, 由 QWLS 辨识参数后得到的模型更加精准, 受显著误差的影响较小, 更加契合真实模型。

第二组实验时设置参数如下: 正常光照组的电池板结板温度为 $42.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 光照度为 246 W/m^2 ; 遮蔽组件的结板温度为 $22.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 光照度为 16 W/m^2 。正常光照部分二极管的品质因数为 93, 阴影部分二极管的品质因数为 32, 串联等效电阻 R_s 为 $0.1\text{ }\Omega$ 。

在考虑测量误差包含显著误差与随机误差的情况下, 运用 QWLS 与 WLS 两种参数估计器, 进行参数识别。参数识别的对象包括未遮蔽和遮蔽组的结板温度、光照度、理想二极管的品质因数 A 及串联等效电阻 R_s 。

表 4 两板遮蔽时输出电压与输出电流的测量数据

| 测量电压/V | 测量电流/A | 测量电压/V | 测量电流/A |
|--------|--------|--------|--------|
| 38.36 | 0 | 36.14 | 0.439 |
| 38.03 | 0.077 | 35.32 | 0.553 |
| 37.99 | 0.084 | 34.16 | 0.662 |
| 37.94 | 0.092 | 32.01 | 0.793 |
| 37.89 | 0.102 | 27.93 | 0.915 |
| 37.79 | 0.124 | 22.95 | 0.949 |
| 37.71 | 0.143 | 18.27 | 0.959 |
| 37.61 | 0.164 | 17 | 1.132 |
| 37.52 | 0.181 | 16.03 | 1.346 |
| 37.38 | 0.212 | 14.18 | 1.614 |
| 37.23 | 0.245 | 10.37 | 1.746 |
| 37.07 | 0.276 | 7.32 | 1.751 |
| 36.75 | 0.335 | 1.35 | 1.754 |
| 36.5 | 0.38 | 0.98 | 1.782 |

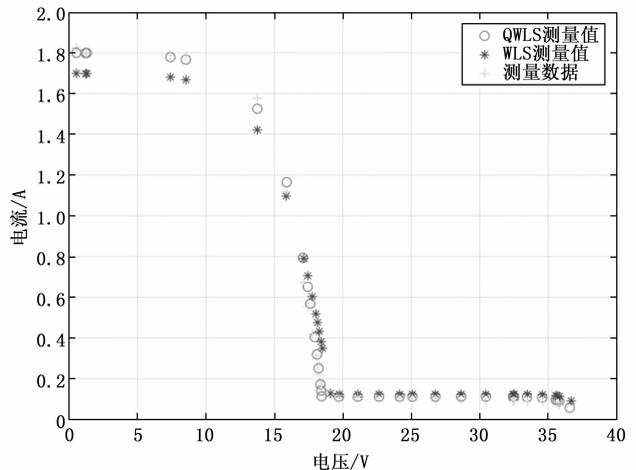


图 10 两板遮蔽不含显著误差时, WLS 与 QWLS 测量值

表 5 两板遮蔽不含显著误差时, WLS 与 QWLS 参数估计的 RMSE 值

| 参数估计方法 | RMSE 的大小 |
|--------|----------|
| QWLS | 1.1279 |
| WLS | 1.2457 |

此时 β 选用 19.8。在测量数据仅含随机误差时，用 WLS 进行参数估计，得到的正常部分的结板温度为 51.29 °C，光照度为 221.55 W/m²；遮蔽部分的结板温度为 21.54 °C，光照度为 16.7 W/m²。正常光照部分二极管的品质因数为 82.17，阴影部分二极管的品质因数为 26.69，串联等效电阻 R_s 为 2.01 Ω ；用 QWLS 进行参数识别后，得到的正常部分的结板温度为 44.42 °C，光照度为 234.85 W/m²；遮蔽部分的结板温度为 21.97 °C，光照度为 17.5 W/m²。正常光照部分二极管的品质因数为 89.72，阴影部分二极管的品质因数为 30.68，串联等效电阻 R_s 为 0.218 Ω ，用 WLS 估计参数后得到的电流电压的输出曲线在第一个拐点前会略低于实际的输出。QWLS 的 RMSE 值为 1.127 9，而 WLS 的 RMSE 值为 1.245 7，高于 QWLS。说明在板 1、2 遮蔽的情况下，当测量数据中只含随机误差时，QWLS 更精准一些。

在产生的测量数据中，随机抽取 6 组数据，加入显著误差。显著误差的大小约为测量数据的 15% ~ 30%。QWLS 与 WLS 的参数估计后的模型输出如图 11 所示。

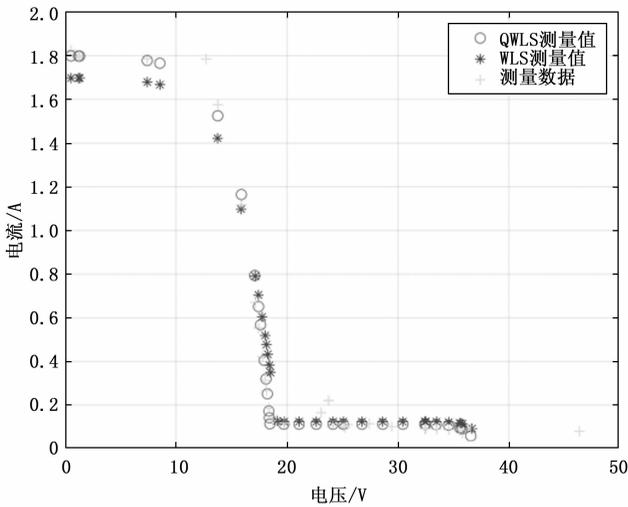


图 11 两板遮蔽含显著误差时，WLS 与 QWLS 测量值

表 6 两板遮蔽含显著误差时，WLS 与 QWLS 参数估计的 RMSE 值

| 参数估计方法 | RMSE 的大小 |
|--------|----------|
| QWLS | 2.225 |
| WLS | 4.329 |

此时选择 β 为 43.67。用 WLS 进行参数估计，得到的正常部分的结板温度为 51.29 °C，光照度为 221.6 W/m²；遮蔽部分的结板温度为 21.31 °C，光照度为 16.73 W/m²。正常光照部分二极管的品质因数为 82.17，阴影部分二极管的品质因数为 26.69，串联等效电阻 R_s 为 2.019 Ω ；而用 QWLS 进行参数识别后，得到的正常部分的结板温度为 44.7 °C，光照度为 233.6 W/m²；遮蔽部分的结板温度为

22.24 °C，光照度为 16.93 W/m²。正常光照部分二极管的品质因数为 89.45，阴影部分二极管的品质因数为 30.98，串联等效电阻 R_s 为 0.256 7 Ω 。对比所设的实验模型参数，发现 QWLS 辨识后得到的参数更加贴近实际数据，受显著误差影响更小。且 QWLS 的 RMSE 值为 2.225 低于 WLS 的 4.329。说明 QWLS 辨识模型参数的效果比 WLS 更加精准。

4 实测数据检验

为了进一步验证 QWLS 对光伏阵列参数估计的有效性。本文又利用实验室中 STR-SUN 3000 型号的太阳能板（如图 12 所示），获得表一中 2×2 光伏组件的光伏阵列在其中 3 个光伏组件被遮蔽条件下的实验数据。该太阳能板的参考数据如下：开路电压为 38 V，短路电流为 8.88 A，参考绝对温度为 25 °C 和参考的光照度为 1 000 W/m²。



图 12 小型光伏发电系统

由于实际测量中可能会包含显著误差，此时计算 WLS 与 QWLS 的 RMSE 值前，需利用“3 σ 准则”剔除误差较大的测量值。“3 σ 准则”处理的流程如图 13 所示，处理之后的数据如表 7 所示。

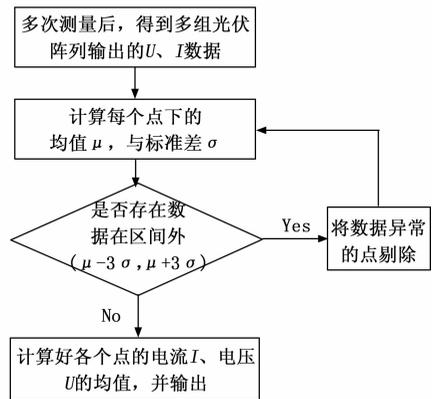


图 13 “3 σ 准则”处理数据流程

此时 β 取值为 46.2。与仿真时的 β 取值差异较大，可能原因时板 1、2、3 均遮蔽时，模型复杂度增加，为了让拟合曲线更加贴近真实输出曲线， β 不得不更大一些。得到的 QWLS

表 7 STR-SUN3000 设备三板遮蔽时输出电压与输出电流的实验测量数据

| 输出电压/V | 输出电流/A | 输出电压/V | 输出电流/A |
|--------|--------|--------|--------|
| 36.06 | 0.069 | 18.46 | 0.219 |
| 34.64 | 0.079 | 18.25 | 0.243 |
| 34.43 | 0.091 | 18.18 | 0.286 |
| 34.09 | 0.1 | 18.04 | 0.328 |
| 33.73 | 0.112 | 17.73 | 0.611 |
| 32.85 | 0.115 | 16.85 | 0.787 |
| 30.36 | 0.116 | 16.06 | 1.1 |
| 28.79 | 0.118 | 13.21 | 1.169 |
| 27.62 | 0.12 | 9.59 | 1.17 |
| 25.63 | 0.123 | 8.8 | 1.173 |
| 23.99 | 0.127 | 5.61 | 1.173 |
| 21.93 | 0.132 | 5.26 | 1.177 |
| 19.47 | 0.139 | 1.06 | 1.179 |
| 18.62 | 0.163 | 0.53 | 1.18 |

表 8 STR-SUN3000 设备三板遮蔽实验时, WLS 与 QWLS 参数估计后 RMSE 比较结果

| 参数估计方法 | RMSE 的大小 |
|--------|-----------|
| QWLS | 120.314 7 |
| WLS | 120.553 6 |

的 RMSE 值为 120.314 7, 而 WLS 的 RMSE 值为 120.553 6。两者相差不大的原因是在利用“ 3σ 准则”剔除测量数据中的显著误差之后, 测量数据仅剩下随机误差, 而 WLS 与 QWLS 的区别就在于是否对显著误差敏感。但从图 (14) 中可以看出, 利用 WLS 进行参数估计后, 电流电压的输出曲线仍会略微偏离实测输出曲线, 而利用 QWLS 参数估计后的电流电压输出曲线更贴近实际测试的输出曲线。因此可证明, QWLS 是一个鲁棒估计器, 可选用 QWLS 来进行光伏阵列的参数估计。

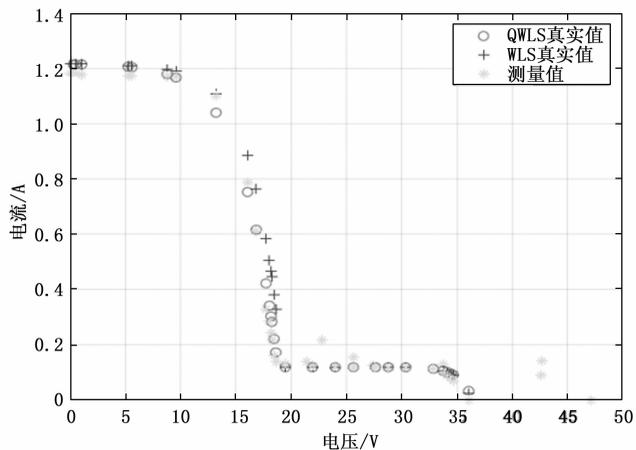


图 14 STR-SUN3000 设备三板遮蔽实验时, WLS 与 QWLS 辨识结果比较曲线

5 结束语

传统的参数估计方法直接利用厂商提供的测量数据来确定光伏阵列中的参数, 由于测量过程中存在误差且无法保证数据的准确性。因此, 利用一种新的参数估计方法对光伏电池模型参数进行快速、准确的辨识意义重大。本文基于准加权最小二乘法并结合 SQP 与 RMSE, 在光伏模型的理想状态和有板遮蔽的条件下, 分别进行了仿真实验。同时, 也进行了利用 STR-SUN 3000 型号的太阳能板在遮蔽三板板的条件下, 进行了实测实验数据的检验。通过 WLS 与 QWLS 之间的对比, 验证了引入 QWLS 算法可以降低显著误差的影响, 提高参数估计的准确性。最后用 RMES 的值衡量真实值与预测值的偏差, 进一步验证了 QWLS 参数估计的优越性。

参考文献:

- [1] 李艳坤, 周荣斌. 光伏发电的现状与发展前景 [J]. 现代工业经济和信息化, 2021, 11 (1): 53-54.
- [2] 孔凡太, 戴松元. 我国太阳能光伏产业现状及未来展望 [J]. 中国工程科学, 2016, 18 (4): 51-54.
- [3] 李宗鉴. 基于有限测量信息的光伏模组模型参数辨识方法研究 [C] //第三十三届中国控制会议论文集 (D 卷), 2014: 14351440.
- [4] 张海龙. 中国新能源发展研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [5] 谢国坤, 张培培, 郝森. 光伏发电系统最大功率点激光定位系统 [J]. 激光杂志, 2021, 42 (3): 184-187.
- [6] 王波. 我国城市发展新能源的评价指标体系和案例应用研究 [D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [7] 程泽, 董梦男, 杨添凯, 等. 基于自适应混沌粒子群算法的光伏电池模型参数估计 [J]. 电工技术学报, 2014, 29 (9): 245-252.
- [8] 郑宁军. 分子动理论改进算法及其在光伏电池模型参数估计中的应用 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2020.
- [9] 李春菊. 独立光伏系统中基于参数估计的双积分滑模变结构 MPPT 算法研究 [J]. 计算机应用与软件, 2022, 39 (1): 345-349.
- [10] 简献忠, 王鹏, 王如志. 基于改进蝠鲞优化算法的光伏组件参数辨识模型 [J]. 计量学报, 2023, 44 (1): 109-119.
- [11] 邹京希, 苏适, 曾欣, 等. 基于详细工程模型的光伏发电系统失效率研究 [J]. 可再生能源, 2016, 34 (7): 1003-1010.
- [12] 伊纪禄, 刘文祥, 马洪斌, 等. 太阳能电池热斑现象和成因的分析 [J]. 电源技术, 2012, 36 (6): 816-818.
- [13] 陈倩, 张正江, 胡桂廷, 等. 基于相关熵的光伏电池模型鲁棒参数估计法 [J]. 控制工程, 2019, 26 (1): 137-143.
- [14] 陈倩. 面向光伏阵列建模基于相关熵的鲁棒参数辨识方法 [D]. 温州: 温州大学, 2017.
- [15] 郑银燕, 胡桂廷, 张正江, 等. 基于遗传算法和非线性规划求解信息交互的光伏阵列模型鲁棒参数辨识方法 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (1): 189-193.