

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.02.016

基于电容阵列 I-V 测试仪的光伏 STC 曲线拟合研究*

颜 奕¹ 黄 宇¹ 陈 鸣¹ 王自鑫²

(1. 中山大学 物理学院 广州 510275; 2. 中山大学 电子与信息工程学院 广州 510006)

摘要:现有的光伏组件在标准条件(STC)下I-V曲线的拟合算法存在计算过于复杂或准确度不足的问题。为提高曲线在偏离STC环境下的拟合精度,提出了一种依据太阳电池四参数结构,通过选取曲线最大功率点(MPP)附近6个点作为拟合点,计算组件I-V数学模型从而实现曲线拟合的拟合算法。不同光伏组件的最优拟合点间隔不同,为提高拟合精度,进一步提出了自适应拟合点选取方法,同时设计了以电容阵列为负载的I-V测试仪结构并研制了一套完整仪器。该测试仪可通过增加MPP附近数据点的密度,提升拟合点的选取精度。经过MATLAB仿真与实际验证表明,模型拟合算法的拟合结果在各种测试环境下的准确度均高于多项式拟合算法;所设计的I-V测试仪性能优越,适用于工程测量之中。

关键词:光伏组件;STC曲线;曲线拟合;I-V测试仪;电容阵列**中图分类号:** TM933;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on photovoltaic STC curves fitting based on capacitors array I-V tracer

Yan Yi¹ Huang Yu¹ Chen Ming¹ Wang Zixin²

(1. School of physics, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;

2. School of electronic and information technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Existing fitting algorithms for photovoltaic (PV) module correction I-V curve under standard condition suffer from several problems, such as over-complicated calculation and lack of accuracy. To improve fitting accuracy under condition deviated from STC, a fitting algorithm based on solar cell four-parameter model was proposed. The module's I-V mathematical model for curves fitting is calculated by the algorithm through selecting six points as fitting points near the maximum power point. A self-adaption fitting point selection method also was presented for accuracy improvement because different PV modules have different optimal interval among fitting points. Moreover, a type of I-V tracer employing capacitors array as load to increase number of data points near the MPP was developed to improve fitting point's accuracy. Several MATLAB simulations and actual measurement were carried out, which show that the proposed algorithm fitting results were superior to that of polynomial fitting algorithm. And the designed I-V tracer not only has excellent performance but is suitable for engineering surveying.

Keywords: photovoltaic module; STC curve; curve fitting; I-V tracer; capacitors array

1 引言

光伏发电是利用太阳电池吸收太阳辐射能,并将其转化为电能的直接方式,是当今太阳能发电的主流方式,

也是利用太阳能的有效手段^[1]。光伏组件由一定数目的太阳电池串联而成。组件由于长期工作于室外,容易出现包括隐裂、弯曲、旁路二极管失效等异常及阴影遮挡和老化等问题^[2-4],导致性能不稳定、可靠性下降。故而在使用前需要对其性能进行评估、检查。

光伏组件的性能可以用短路电流 I_{sc} 、开路电压 V_{oc} 、最大功率 P_{max} 和填充因子 (fill factor, FF) 等关键参数及其 I-V 特性曲线进行评估^[5-7]。光伏组件电流电压曲线测试仪 (简称 I-V 测试仪) 是用于提取光伏组件的关键参数, 绘制其 I-V 特性曲线的一种精密仪器。由于光伏组件的自身特性, 以上参数值会因光照强度 S 与温度 T 等环境参量的不同而变化。为了衡量不同环境下测得光伏组件的优劣, 当前测试条件 (operative condition, OPC) 下获得的参数及曲线需要被修正为标准测试条件 (standard condition, STC) (AM1.5 光谱分布, $S = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$)^[7-8] 下进行对比与分析。

传统 I-V 测试仪采用多项式拟合算法^[9]对 STC 修正曲线拟合, 这种算法精度受限于拟合点数目和多项式次数, 足够高的精度对微控制器 (micro-control unit, MCU) 的运算速度有一定要求。另一种较普遍的拟合算法是太阳电池的指数模型拟合^[9], 但此算法运算量大、过程复杂, 难以植入一般的 MCU 中。本文提出了一种基于太阳电池四参数模型的 STC 曲线拟合算法, 并针对算法需求设计了一种以电容阵列作为负载的 I-V 测试仪, 简化拟合运算与操作步骤的同时增加了拟合曲线的精确度。

2 算法原理

2.1 STC 修正曲线

依照 IEC60891 标准^[10], 光伏组件 I-V 曲线的 STC 修正表达式为:

$$I_{n,STC} = I_{n,OPC} + I_{sc,OPC} \times \left(\frac{1000}{S} - 1 \right) + \alpha \times I_{sc,STC} \times (25 - T) \quad (1)$$

$$V_{n,STC} = V_{n,OPC} + \beta \times V_{oc,STC} \times (25 - T) \quad (2)$$

式中: α 为短路电流温度修正系数, β 为开路电压温度修正系数, $I_{sc,STC}$ 和 $V_{oc,STC}$ 分别为标准条件下的标称短路电流和开路电压。其中, α 通常较小 (小于 0.1%)^[8], 温度影响所占比重很小, 故光伏组件输出电流主要受光照 S 影响, 而输出电压主要受温度 T 影响。以上几个固定参数与光伏组件的制造工艺和制造材料有关, 其数值由光伏组件制造商提供。

某光照与温度环境下一块光伏组件 ($I_{sc,STC} = 8.02 \text{ A}$, $V_{oc,STC} = 37.6 \text{ V}$, $\alpha = 0.053\%$, $\beta = -0.32\%$, 存在少许阴影遮挡) 的 I-V 特性曲线, 以及根据式(1)、(2) 计算得到的修正后 STC 下的 I-V 曲线如图 1 所示。仅通过 STC 修正曲线, 无法直观获得 STC 下的 I_{sc} 和 V_{oc} 的数值, 因此需要对 STC 修正曲线拟合计算, 使其两端延伸至与横纵坐标轴相交。

太阳电池的 I-V 曲线可被大致分为图 1 所示的两个区域。在区域 1 光伏组件可被视为线性源, 而区域 2 的

I-V 特性与太阳电池的特殊结构有关^[11]。所以 STC 修正曲线区域 1 可直接线性拟合延伸至与纵坐标轴相交, 拟合算法主要用于拟合区域 2 使曲线延伸至与横坐标轴相交。

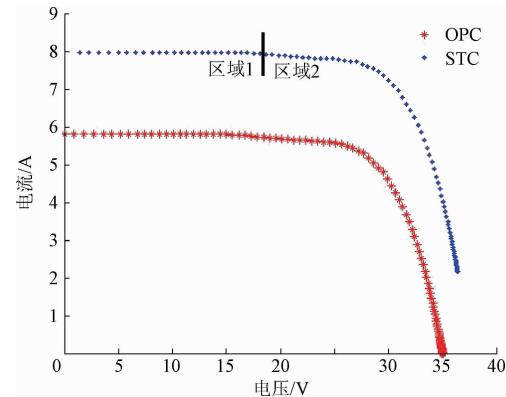


图 1 光伏组件 OPC 及 STC 下的 I-V 曲线

($S = 722.8 \text{ W/m}^2$, $T = 36.5^\circ\text{C}$)

Fig. 1 I-V curves of PV module under OPC and STC

2.2 太阳电池等效模型

由于半导体 PN 结复合机制^[11], 太阳电池的 I-V 特性呈非线性, 其内部结构等效模型如图 2 所示。

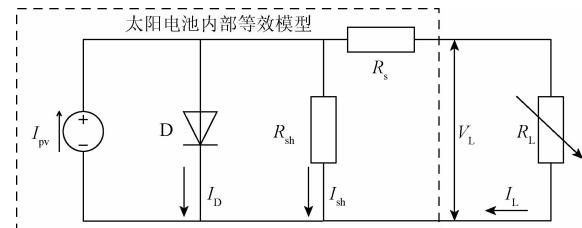


图 2 太阳电池等效模型结构

Fig. 2 Structure of solar cell equivalent model

太阳电池上的半导体结构受光激发后, 内部由于光生伏特效应, 可以等效于恒流源、正偏二极管 D 和并联电阻 R_{sh} 并联后与串联电阻 R_s 串联^[9]。

根据基尔霍夫电流定律, 太阳电池的输出电流

$$I_L = I_{pv} - I_D - I_{sh} = I_{pv} - I_0 \left(e^{\frac{q(V_L + I_L R_s)}{A K T}} - 1 \right) - \frac{I_L R_s + V_L}{R_{sh}} \quad (3)$$

式(3)被称为太阳电池的单指数模型, 其中 I_{pv} 表示光电流, I_0 表示二极管饱和电流, A 表示二极管 D 的品质因子, q 为电子电荷 ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$), k 为玻尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)。 I_{pv} 、 I_0 、 R_{sh} 、 R_s 、 A 被称为太阳电池的初始五参数^[5], 该模型也可称作太阳电池五参数等效模型。

式(3)属于超越方程^[9], 无法得到解析解, 不利于建

立电流与电压的解析数学模型。考虑到太阳电池的内部并联电阻 R_{sh} 为数百欧姆而串联电阻 $R_s < 1 \Omega$, 通过并联电阻的电流 $I_{sh} = (I_L R_s + V_L) / R_{sh}$ 较小, 因此可以忽略 I_{sh} 建立太阳电池四参数等效模型^[12], 即:

$$I_L = I_{pv} - I_0 \left(e^{\frac{q(V_L + I_L R_s)}{AKT}} - 1 \right) \quad (4)$$

2.3 STC 四参数模型拟合算法

本文提出的 STC 拟合算法主要基于上述太阳电池四参数等效模型, 称其为“STC 四参数模型拟合算法”。对太阳电池的 I-V 曲线而言, 其特征可以由开路电压、短路电流、最大功率点 (maximum power point, MPP)、短路电流点处斜率、开路电压点处斜率 5 个参数说明^[13]。在缺乏 I_{sc} 、 V_{oc} 的情况下, 可以通过选取一定数目 STC 修正曲线上的数据点, 计算四参数等效模型的数学解析式。

假设:

$$A = I_{pv}, B = I_0, C = e^{q/ATK}, D = e^{Rq/ATK}, K = A + B \quad (5)$$

式(4)可变形为电压 V 随电流 I 变化的函数^[14]:

$$I = A - B(C^V D' - 1) \quad (6)$$

$$V(I) = \frac{\ln(K-1) - \ln(B) - I\ln(D)}{\ln(C)} \quad (7)$$

式(7)的 1 次导数和 2 次导数分别为:

$$V'(I) = \frac{1}{\ln(C)} \left[\frac{-1}{K-I} - \ln(D) \right] \quad (8)$$

$$V''(I) = \frac{1}{\ln(C)} \left[\frac{-1}{(K-1)^2} \right] \quad (9)$$

此时太阳电池的 I-V 特性由电路模型转化为数学解析式形式, 其特征取决于 A 、 B 、 C 、 D 这 4 个参数。

本文提出的拟合算法选取了图 3 中 STC 修正曲线 MPP 附近的 6 个点 (V_1, I_1) 、 (V_2, I_2) 、 (V_3, I_3) 、 (V_4, I_4) 、 (V_5, I_5) 、 (V_6, I_6) 拟合 I-V 曲线。这 6 个点被称为“拟合点”, 分为两个组, 每个组内的 3 个点必须相距足够近以保证两点之间的斜率近似等于该点处曲线切线, 且必须满足:

$$V_1 < V_2 < V_3 < V_{mpp} < V_4 < V_5 < V_6 \quad (10)$$

$$I_1 > I_2 > I_3 > I_{mpp} > I_4 > I_5 > I_6 \quad (11)$$

式中: V_{mpp} 和 I_{mpp} 分别是 MPP 处的电压与电流。

每组内相邻两点电压的 1 次导数及每组的 2 次导数为:

$$V'_{12} = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1}, V'_{23} = \frac{V_3 - V_2}{I_3 - I_2}, V'_{45} = \frac{V_5 - V_4}{I_5 - I_4}, V'_{56} = \frac{V_6 - V_5}{I_6 - I_5} \quad (12)$$

$$V''_{123} = \frac{V'_{23} - V'_{12}}{I_{23} - I_{12}}, V''_{456} = \frac{V'_{56} - V'_{45}}{I_{56} - I_{45}} \quad (13)$$

其值必须满足:

$$V'_{12} < V'_{23} < V'_{45} < V'_{56} \quad (14)$$

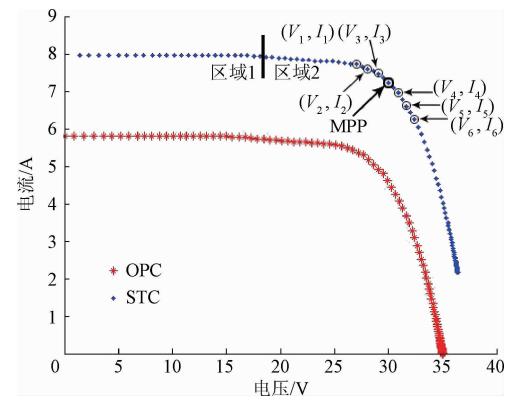


图 3 STC 模型拟合算法拟合点位置
Fig. 3 Positions of fitting points for STC model fitting algorithm

$$V''_{123} < V'_{456} \quad (15)$$

对应的电流为:

$$I_{12} = \frac{I_1 + I_2}{2}, I_{23} = \frac{I_2 + I_3}{2}, I_{45} = \frac{I_4 + I_5}{2}, I_{56} = \frac{I_5 + I_6}{2} \quad (16)$$

$$I_{123} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}, I_{456} = \frac{I_4 + I_5 + I_6}{3} \quad (17)$$

将式(12)、(13)、(16)、(17)代入式(5)~(7), 计算得到:

$$K = \frac{I_{456} - I_{123} \sqrt{V''_{123}/V''_{456}}}{1 - \sqrt{V''_{123}/V''_{456}}} \quad (18)$$

$$C = \frac{-1}{e^{V''_{123}} (K - I_{123})^2}, D = \frac{-1}{e^{K - I_{mpp}}} - V'_{56} \ln C, \quad (19)$$

$$B = \frac{K - I_6}{C^{V''_{123}}}, A = K - B$$

进而可以求得太阳电池四参数等效模型的数学表达式。

另一方面, 模型拟合算法的精确度还取决于所选拟合点的组内间隔和与 MPP 的间隔, 使用 MATLAB 对表 1 中不同间隔的拟合点进行算法仿真, 其中 MPP 为 (29.12, 7.47), 并与图 1 中 STC 测量得到的曲线对比, 其结果如图 4 所示, 相应的拟合开路电压 $V_{oc,fit}$ 见表 2。

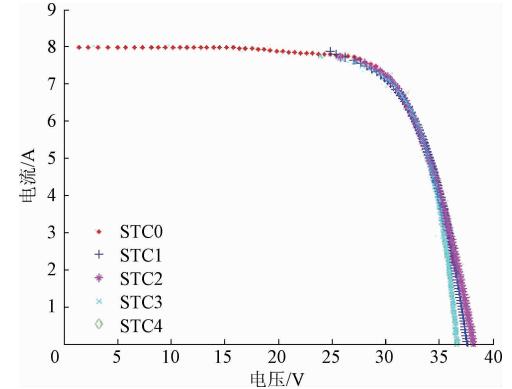


图 4 不同间隔拟合点的 I-V 仿真 STC 曲线
Fig. 4 I-V simulated STC curves of different interval fitting points

表 1 STC 模型拟合算法拟合点选取数据
Table 1 Data of fitting points for STC model fitting algorithm

组	V_1 ,	V_2 ,	V_3 ,	V_4 ,	V_5 ,	V_6 ,	V'_{12} ,	V'_{23} ,	V'_{45} ,	V'_{56} ,	V''_{123} ,	V''_{456} ,
	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_{12}	I_{23}	I_{45}	I_{56}	I_{123}	I_{456}
1	23.75,	25.42,	27.06,	30.93,	32.06,	33.01,	-41.75,	-32.80,	-2.09,	-1.64,	-198.89,	-0.81,
	7.81	7.77	7.72	6.96	6.42	5.84	7.79	7.75	6.69	6.13	7.77	6.41
2	25.42,	26.51,	27.58,	30.48,	31.31,	32.06,	-27.25,	-15.29,	-2.68,	-2.08,	-217.53,	-1.77,
	7.77	7.73	7.66	7.09	6.78	6.42	7.75	7.70	6.94	6.60	7.72	6.76
3	23.20,	24.87,	26.51,	31.31,	32.43,	33.30,	-83.5,	-27.33,	-2.07,	-1.45,	-1404.17,	-1.09,
	7.81	7.79	7.73	6.78	6.24	5.64	7.80	7.76	6.54	5.94	7.78	6.22
4	27.06,	27.58,	28.09,	30.03,	30.48,	30.93,	-8.67,	-3.92,	-3.46,	-3.46,	-49.93,	0,
	7.72	7.66	7.53	7.22	7.09	6.96	7.69	7.60	7.16	7.03	7.64	7.09

表 2 STC 模型拟合算法仿真结果

Table 2 Simulation results of STC model fitting algorithm

组	1	2	3	4
$V_{oc,fit}$	37.62	38.24	36.78	无法计算

STC0 表示 STC 修正曲线, STC1 ~ STC4 分别表示根据各组拟合点拟合得到的曲线。当拟合点间隔选取过小时, 使用模型拟合算法计算得到的 $V_{OC,FIT}$ 偏大, 例如第 2 组; 当拟合点间隔选取过大时, 计算得到的 $V_{OC,FIT}$ 偏小,

例如第3组;当拟合点选取不满足式(10)、(11)、(14)、(15)其中一个条件时(原因包括光伏组件缺陷或阴影遮挡导致I-V曲线畸形^[3],选取的拟合点在曲线畸形区域内;测量过程中的偶然误差等),无法进行拟合,如第4组不满足式(14)。

仿真表明,拟合点的最佳间隔因测试对象参数的不同而不同,因此不能凭借固定的间隔拟合所有光伏组件STC曲线,为此本文进一步提出了自适应拟合点间隔选取的模型拟合算法,算法步骤流程如图5所示。

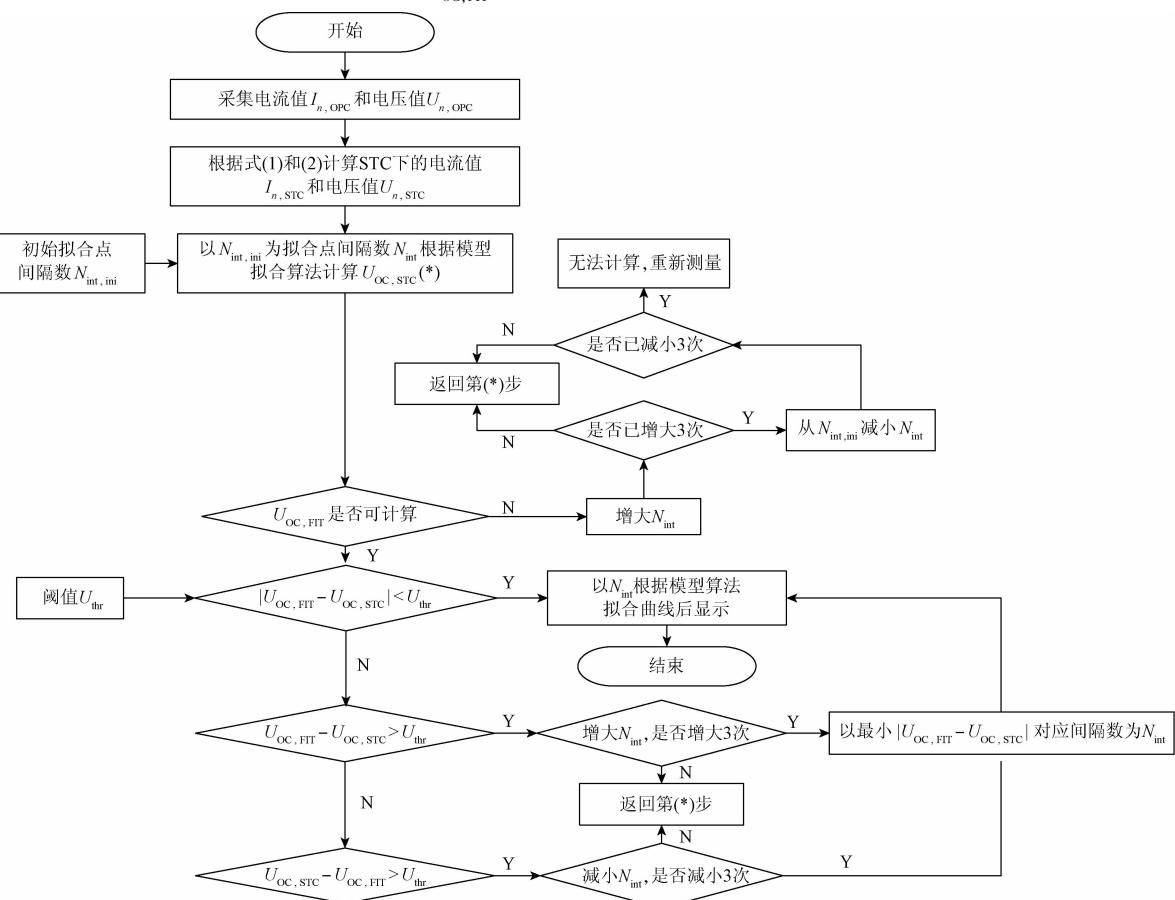


图 5 自适应模型拟合算法流程

Fig. 5 Flow chart of self-adaption model fitting algorithm

算法的精度与 MPP 附近数据点的密度相关, 数据点越多(至少 200 个)拟合点的选取越精确。因作为可变负载的电容的充电时间短, 往往只有数毫秒甚至更短^[15], 若以 1 ms 充电时间为标准, 则须保证模数转换芯片(analog-to-digital chip, ADC)的采样率最低为 200 kHz 且具备多通道同时采样功能。目前已有的 I-V 测试仪通过增大 ADC 采样率或者增大负载电容容量延长电容充电时间以保证每次电流电压采样获得的数据点足够多。但这种措施势必会提高仪器对存储容量的需求, 且带来选用的 ADC 价格增长和电容体积增大等不利因素。

I-V 曲线测试仪在区域 1 呈线性, 故允许区域 1 使用相对稀疏的数据点线性拟合得到拟合短路电流 $I_{SC, FIT}$, 从而使曲线上的数据点大部分集中于区域 2。本文设计了一种电容阵列 I-V 曲线测试仪以增加拟合点选取的精确度。

3 电容阵列 I-V 曲线测试仪

电容阵列 I-V 测试仪的负载 R_L 是由数个相同规格的电容串并联而成的阵列, 如图 6 所示双电容并联 I-V 测试仪连接太阳电池的拓扑图作为代表进行说明。其中, S_A 为测量总开关、 $S_1 \sim S_n$ 为各个电容支路的开关, S_d 为放电开关, R_d 为放电电阻。

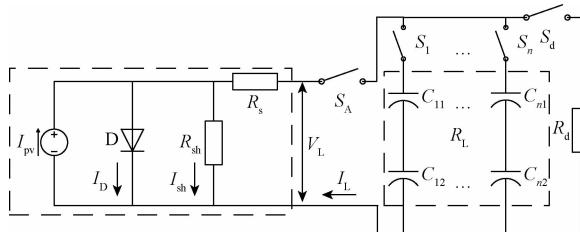


图 6 电容阵列 I-V 测试仪电流电压测量电路拓扑

Fig. 6 Topological structure of current-voltage measurement circuit in capacitors array I-V tracer

根据太阳电池对电容的充电特性^[15], 以双并联电容 I-V 测试仪为电容阵列 I-V 测试仪简化代表完成一次测试的具体步骤与过程分析如下。

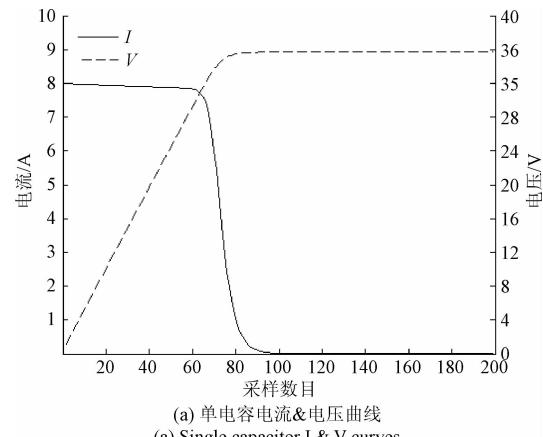
1) S_A 与 S_1 闭合, 此时太阳电池的负载仅有 C_{11} , 太阳电池向 C_{11} 充电, 并开始对电流 I_L 与电压 V_L 的采集。

2) 对太阳电池而言, 其电压曲线随时间线性递增^[12], 当电压超过 MPP 一定数值时(约 90% V_{oc}), 闭合 S_2 , 此时负载电容总容值为 $C_A = C_{11} + C_{21}$ 。

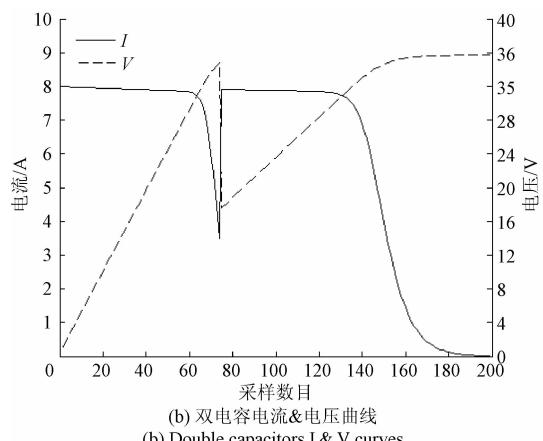
3) 在 C_{21} 接入电路瞬间, 负载电路相当于短路, 导致负载电流 I_L 突然增大, 同时 C_{11} 向 C_{21} 充电, 电压突然减小。一段时间后, 两电容的电荷平衡, 太阳电池以总电容 C_A 为负载继续充电。

4) 完成电容充电后, S_A 断开, S_d 闭合, 电容向 R_d 放电释放电荷; 释放完毕后, 断开所有开关, 一次 I-V 曲线测试完成。

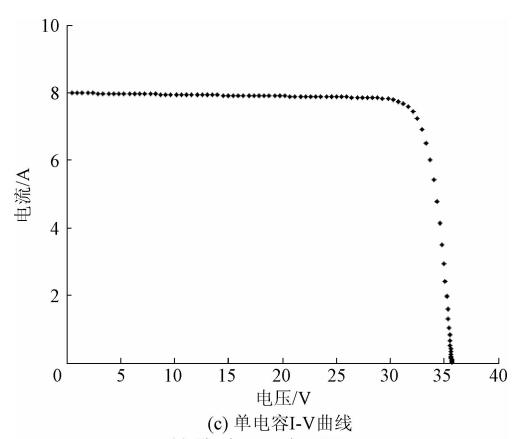
单电容(330 μ F)负载 I-V 测试仪与双并联电容(330 μ F + 330 μ F)I-V 测试仪所测同一组光伏组件的 MATLAB 仿真电流电压相关曲线如图 7 所示。图 7(a)、(b) 分别表示单电容与双电容充电过程中电流 I_L 与电压 V_L 随采样点的变化曲线。图 7(c)、(d) 分别显示了两种电容负载的 I-V 特性曲线。两条曲线采集的数据点相等, 前者数据点均匀, 但大部分数据点集中于近 X 轴即



(a) 单电容电流&电压曲线
(a) Single capacitor I & V curves



(b) 双电容电流&电压曲线
(b) Double capacitors I & V curves



(c) 单电容 I-V 曲线
(c) Single capacitor I-V curve

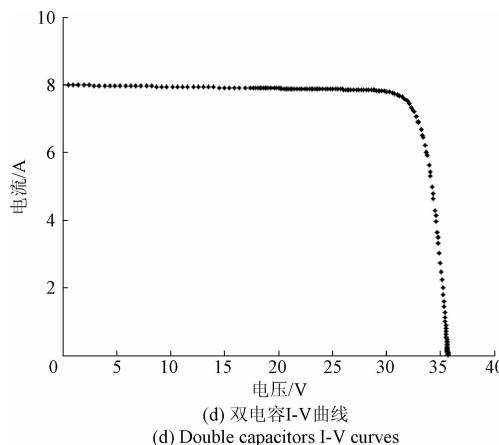


图 7 电容阵列 I-V 测试仪一次测试相关电流电压曲线

Fig. 7 Curves about current and voltage during a test using capacitors array I-V tracer

V_{oc} 附近,此部分的数据点未能有效利用;后者的数据点集中于I-V 曲线区域2,只有少数数据点集中于 V_{oc} 附近,因此提升了STC 曲线模型拟合算法拟合点间隔的选取精度与数据点的利用率。

依据双并联电容 I-V 测试仪的测试原理与步骤,若继续增加并联电容为多电容并联,可以进一步增加曲线区域2 数据点的数目,并可以适当减小所使用电容的容量,节省 I-V 测试仪中电容所占空间;若在并联支路上串联电容,形成电容阵列,则可以增加测试仪的耐压值,增大其测量动态范围。

图 8 所示为根据图 6 拓扑结构设计的电容阵列 I-V 曲线测试仪的原理图,其结构说明如下。

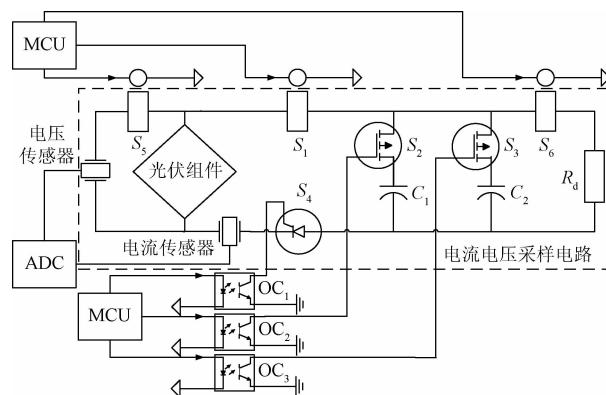


图 8 电容阵列 I-V 测试仪原理

Fig. 8 Schematic diagram of capacitors array I-V tracer

1) 测试仪有4个接口采用四线制与光伏组件连接,其中两端接入电压测量支路,另外两端接入电流测量支路。

2) 根据测试需求,测试仪负载电容的个数可变,例如

两个容值 $330 \mu\text{F}$ 、耐压值 330 V 的电解电容 C_1 和 C_2 。

3) S_1 、 S_5 和 S_6 为功率继电器开关,分别用于控制电压测量支路、电流测量支路和电容放电支路的通断;但继电器在开闭时容易产生电磁纹波,因此电流测量支路添加了 S_4 晶闸管开关,在 S_1 闭合一段时间后再闭合 S_4 , S_4 闭合瞬间 ADC 开始电流电压采样,避免继电器闭合时的纹波干扰; S_2 和 S_3 是功率 MOSFET 开关,其通断响应时间远远低于继电器,能够在接收到控制信号后立刻开启或关断,适用于控制电容支路在采样过程中的开闭。

4) 除了继电器开关具有隔离功能外,其他3个开关需要连接光电耦合器(opticalcoupler, OC)与控制模块隔离,以防采样电路对 MCU 产生干扰;

5) 电流传感器是一个霍尔传感器,根据霍尔效应原理将电流信号转化为电压信号;电压传感器是一个信号调理电路,通过运算放大器与电阻的组合把光伏组件电压信号比例衰减为满足 ADC 输入范围的幅值。

6) 电流与电压信号输入 ADC 后经模数转换转变为数字信号传输至 MCU 后完成数值运算、显示、存储等操作。

测试仪内部还包含光照强度、温度的测量模块及串口通信模块,并嵌入了 STC 模型拟合算法以及 2 次与 3 次 STC 多项式拟合算法软件程序于 MCU 中进行拟合结果对比分析。

4 实验与结果分析

根据图 8 测试仪的原理图,本文研制了图 9 所示实验整机并选用两块不同规格的光伏组件,分别在 5 组不同光照与温度下开展实验。3 种算法拟合得到的 $V_{oc,fit}$ 结果见表 3,其中一组数据的拟合曲线如图 10 所示。

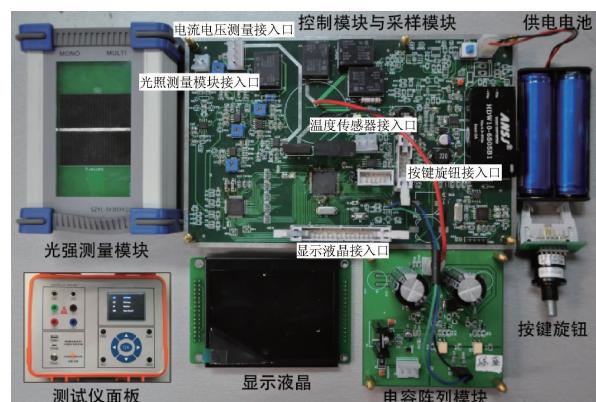


图 9 电容阵列 I-V 测试仪实验整机

Fig. 9 The prototype of capacitors array I-V tracer

表3 不同环境下两块光伏组件拟合STC下 $V_{OC,FIT}$ Table 3 Fitting STC $V_{OC,FIT}$ of two photovoltaic modules under different conditions

温度/ ℃	光强/ $(W \cdot m^{-2})$	本文算		拟合误 差/%		二次拟 合/V		拟合误 差/%		三次拟 合/V		拟合误 差/%	
		法/V	拟合误 差/%	合/V	差/%	合/V	差/%	合/V	差/%	合/V	差/%	合/V	差/%
光伏组件1 ($V_{OC,STC} = 37.6$ V)													
36.5	722.8	37.6	0	37.7	0.27	37.5	0.27						
33.3	546.5	37.7	0.27	37.7	0.27	37.5	0.27						
29.7	336.8	37.8	0.53	38.8	3.19	38.3	1.86						
29.6	264.0	38.2	1.60	39.5	5.05	Error	Error						
29.8	197.4	38.6	2.66	39.9	6.12	Error	Error						
光伏组件2 ($V_{OC,STC} = 21.6$ V)													
36.2	753.4	21.6	0	21.7	0.46	21.6	0						
34.0	558.7	21.6	0	21.7	0.46	21.6	0						
30.1	385.9	21.8	0.93	23.1	6.94	23.0	6.48						
30.6	244.6	21.9	1.39	23.4	8.33	Error	Error						
30.4	178.0	22.6	4.63	26.5	22.7	Error	Error						

由表3可以看出,光强偏离STC即 $1000 W/m^2$ 越多,3种算法的拟合误差越大,拟合准确度越低。其中3次拟合算法在高光强($>700 W/m^2$)下的拟合结果准确度大于2次拟合的结果,但在低光强($300 W/m^2$)下会产生图10(b)所示由3次函数自身特点引入的错误,导致无

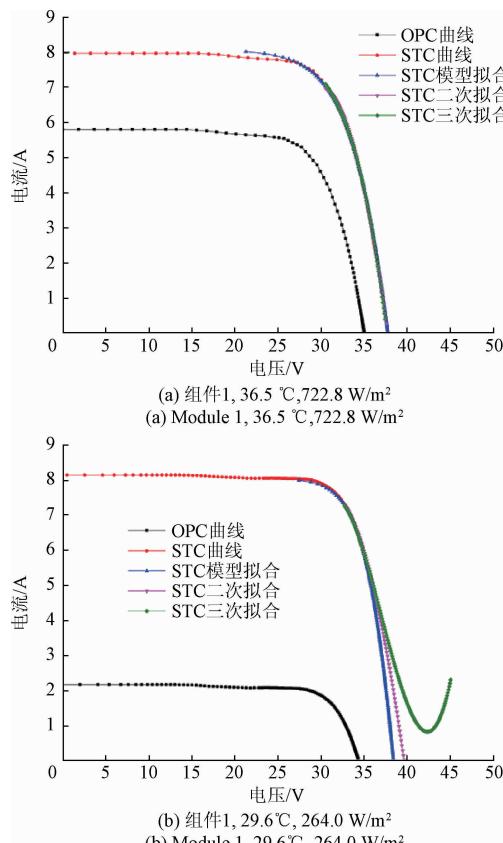


图10 STC拟合算法结果对比曲线

Fig. 10 Comparison curves of STC fitting algorithm results

法正常计算 $V_{OC,FIT}$;2次拟合算法在高光强下较准确,但低光强下拟合误差大于3%,甚至超过10%。相较于多项式拟合算法,本文提出的拟合算法在低光强下仍能保持低于3%的拟合误差。说明在STC曲线拟合方面,本文提出的算法相比传统算法更加准确、优秀。

I-V测试仪工作于低光强环境下时,模型拟合算法的自适应拟合间隔选取过程基本需要重复5次,且对于阴影遮挡光伏组件的情况,拟合点选取有时无法同时满足式(10)、(11)、(14)、(15),因此需要花费比多项式算法更长的时间计算。拟合时间与MCU的运算速率有关。对于本机所用MCU,其完成拟合的最长时间不超过20 ms,人体几乎感觉不到,属于可接受范围,而在高光强环境下拟合时间甚至少于多项式拟合算法。

除此之外,本文还进行了光强相等($>700 W/m^2$)、温度不同环境下的实验,实验结果表明3种算法都能很好地拟合STC曲线。但因地点和时间的约束,实验温度与STC温度(25 °C)不超过10 °C,不具备代表性。受篇幅限制,不给出具体结果。

5 结论

光伏组件的STC曲线能够直接反映光伏组件的性能,因此曲线的修正与拟合算法尤为重要。另一方面,I-V曲线测试仪需要工作于复杂的室外环境,因此I-V曲线测试仪在实际工作过程中必须具备安全准确、快速同步采集数据的能力并方便携带和操作。

本文通过简化太阳电池指数模型,提出了自适应STC四参数模型拟合算法。与多项式拟合算法相比,该算法针对不同的光伏组件选择6个MPP附近的拟合点进行拟合计算,步骤简单快速且拟合结果精确,适用于移植至大多数MCU,为算法的通用性提供了保障。同时,本文设计的电容阵列I-V曲线测试仪结构相较于传统的I-V曲线测试仪提升了光伏组件最大功率点的测量精度,为进一步提升本文STC拟合算法准确度提供了保证。实验结果表明,相较于STC多项式拟合算法,本文所提算法在各个不同的环境参数下都能保持较高拟合准确度,满足户外光伏组件I-V测试的基本要求,具有较好的工程应用价值。

参考文献

- [1] 韦世宽,雷加,谈恩民,等.光伏系统最大功率点跟踪技术研究[J].电子测量与仪器学报,2011,25(6):490-494.
- WEI SH K, LEI J, TAN EN M, et al. Study on maximum power point tracking control techniques in PV system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(6): 490-494.

- [2] 余荣斌, 刘桂雄, 徐欢. 基于 β 分布统示法的光伏组件性能退化可靠度估算 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11): 2586-2593.
YU R B, LIU G X, XU H. β -distribution uniform expression based photovoltaic modules reliability evaluation with degradation data distribution [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11): 2586-2593.
- [3] 郑海兴, 舒碧芬, 沈辉, 等. 晶体硅组件长期运行后性能及衰退原因分析 [J]. 太阳能学报, 2012, 33(4): 614-617.
ZHENG H X, SHU B F, SHEN H, et al. Analysis of performance and degatadation of silicon Pv modules after long term operation [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(11): 2586-2593.
- [4] 王欢, 徐小力. 一种新型光伏阵列在线故障检测方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12): 2765-2772.
WANG H, XU X L. Research on an online fault detection method for photovoltaic array [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (12): 2765-2772.
- [5] 张鹏, 周碧英. 光伏电池精确工程模型及输出特性研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30 (1): 151-158.
ZHANG P, ZHOU B Y. Research on accurate engineering model and output characteristics of photovoltaic cell [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(1): 151-158.
- [6] YANDT M D, COOK J P D, KELLY M, et al. Dynamic real-time I-V curve measurement system for indoor/outdoor characterization of photovoltaic cells and modules [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2015, 5(1): 337-343.
- [7] SPERTINO F, SUMAILI J, ANDREI H, et al. PV module parameter characterization from the transient charge of an external capacitor [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2013, 3(4): 1325-1333.
- [8] 袁明翰, 刘文祥, 徐正元, 等. 太阳电池 I-V 曲线修正参数的确定方法 [J]. 电源技术, 2013, 37 (1): 58-61.
YUAN M H, LIU W X, XU ZH Y, et al. A method of I-V curves correction parameters determination for PV modules [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(1): 58-61.
- [9] 胡克满, 柳桂国, 胡海燕. 太阳电池 I-V 曲线的拟合方法及应用研究 [J]. 电源技术, 2013, 37 (12): 2141-2143.
HU K M, LIU G G, HU H Y. Fitting method of I-V curve of solar cell and its application [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(12): 2141-2143.
- [10] IEC. IEC60891: Photovoltaic devices-procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics [S]. Geneva: IEC, 2009: 6-7.
- [11] VILLALVA M G, J GAZOLI J R, FILHO E R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(5): 1198-1206.
- [12] TOLEDO F J, BLANES J M, GARRIGÓS A, et al. Analytical resolution of the electrical four-parameters model of a photovoltaic module using small perturbation around the operating point [C]. Renewable Energy, 2012, 43: 83-89.
- [13] WANG J C, SU Y L, SHIEH J C, et al. High-accuracy maximum power point estimation for photovoltaic array [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2011, 95(3): 843-851.
- [14] BLANES J M, TOLEDO F J, MONTERO S, et al. In-site real-time photovoltaic I-V curves and maximum power point estimator [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2013, 28(3): 1234-1240.
- [15] SPERTINO F, AHMAD J, CIOCIA A, et al. Capacitor charging method for I-V curve tracer and MPPT in photovoltaic systems [C]. Solar Energy, 2015, 119: 461-473.

作者简介



颜奕, 2014 年于中山大学获得学士学位, 现为中山大学硕士研究生, 主要研究方向为电力电子和电子系统设计。

E-mail: yanyi6@mail2.sysu.edu.cn



Yan Yi received B. Sc. from Sun Yat-sen University in 2014. Now he is a M. Sc. candidate in Sun Yat-sen University. His main research interest includes power electronics and electronic system design.

王自鑫(通讯作者), 2006 年于中山大学获博士学位, 现为中山大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为电子系统设计和微弱信号检测。

E-mail: wangzix@mail.sysu.edu.cn

Wang Zixin (Corresponding author) received Ph. D. from Sun Yat-sen University in 2006. Now he is an associate professor and M. Sc. supervisor in Sun Yat-sen University. His main research interests include electronic system design and weak signal detection.