

晶硅光伏组件在典型气候环境下的性能研究*

曾湘安, 冯江涛, 揭敢新, 冯皓, 陈心欣, 李慧

(中国电器科学研究院有限公司//工业产品环境适应性国家重点实验室, 广东 广州 510300)

摘要: 选取海南琼海湿热气候环境试验场和广州花都亚湿热气候环境试验场作为典型气候环境试验基地, 将多晶硅光伏组件直接固定电阻负载投试到这两个典型气候环境试验场, 研究晶硅组件在真实典型气候环境应用的性能变化规律。利用户外 $I-V$ 测试仪、实验室 $I-V$ 测试仪对不同的组件的 $I-V$ 特性参数进行测试以及利用热电偶对组件的表面温度进行实时记录。结果表明: 投试在湿热气候环境试验场的光伏组件, 其短路电流 I_{sc} 、最大功率 P_{max} 等 $I-V$ 特性参数值的衰减较投试在亚湿热气候环境试验场的光伏组件多, 且在组件整个实验过程中, 湿热试验场投试的光伏组件的表面温度也高于亚湿热试验场投试的光伏组件的表面温度。

关键词: 光伏组件; 典型气候环境; 组件表面温度; 光伏组件性能衰减

中图分类号: TM914.4⁺1 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2016)06-0086-06

Performance of crystalline silicon PV modules applied in the typical climate

ZENG Xiang'an, FENG Jiangtao, JIE Ganxin, FENG Hao, CHEN Xinxin, LI Hui

(China National Electric Apparatus Research Institute (CEI) //

State Key Laboratory of Environmental Adaptability for Industrial Products, Guangzhou 510300, China)

Abstract: Based on the hot and humid climate outdoor testing site (Located in Qionghai) and sub-humid climate outdoor testing site (located in Guangzhou), the polycrystalline silicon photovoltaic modules fixed with resistive load were tested for studying performance changes in the real applications weather. The outdoor $I-V$ tester and laboratory $I-V$ tester were used to characterized the $I-V$ parameters of various modules, the surface temperature of PV modules was recorded by the thermocouple in situ. The results showed that degradation of I_{sc} , P_{max} of PV modules were much higher applied in the hot and humid climate compared to the modules in sub-humid climate. The surface temperature of modules deployed in hot-humid climate was also higher than those in sub-humid climate.

Key words: PV modules; typical climate; module surface temperature; PV modules performance degradation

目前光伏组件的性能保证中提到其在各种恶劣的环境条件下均能正常工作, 且提供 10 a 的产品质量保证和 10 ~ 25 a 的产品功率保证, 但光伏组件性能通常是在室内通过太阳模拟器在标准测试条

件下 (STC) 下给出的^[1-4], 而光伏组件在户外的实际工作情况与 STC 条件有很大的差别^[5-7], 实际工作效率可能比期望的 STC 条件下的低 20%, 甚至更低^[6-8]。实际应用中影响光伏组件实际工作

* 收稿日期: 2016-01-06

基金项目: 国家科技部国际合作专项资助项目 (2014DFA61960); 广州市科学研究专项资助项目 (201504010026)

作者简介: 曾湘安 (1988 年生), 女; 研究方向: 光伏组件及其材料的可靠耐久性; E-mail: zeng_xiangan@126.com

性能的主要环境因素：组件工作温度，太阳辐射度，组件光学损失，太阳光谱变化等^[8-9]，这些因素在组件实际户外工作时都是时刻变化的。因此为了让组件性能保证更加可靠，也同时为实验室测试提供实证依据，应该测试组件在不同户外典型环境的实际工作性能，得到组件在不同户外环境实际使用的实证性能。

自从 2011 年 7 月在美国旧金山召开国际光伏组件质量保证论坛（International PV Module Quality Assurance Forum, Environment-Specific Module Durability Testing, July 15 - 16, 2011, San Francisco, CA, USA）以来，国际光伏领域已经开始重视特殊环境下组件耐久性问题研究，但目前对光伏组件的在不同户外典型气候环境（特别在国内的典型气候环境）应用的性能进行研究分析的论文尚不多见。本文将常规多晶硅光伏组件分别放置在海南琼海湿热气候环境试验场以及广州花都亚湿热气候环境试验场两地（试验场为经过 CNAS 认可且符合 ASTM 标准的试验场），组件固定电阻负载，45°固定倾斜角向南且下端离地 50 cm 安装进行系统的户外实证试验^[9-12]，利用户外 $I-V$ 测试仪、实验室 $I-V$ 测试系统对这些组件的 $I-V$ 特性参数进行测试，利用热电偶对这些组件的表面温度进行实时监控，记录这些参数随投试时间的变化情况，分析得到这些光伏组件在不同户外典型气候环境的性能变化规律。该实验对组件的性能进行进一步验证，为开发适应不同气候环境的光伏组件提供参考依据。实验和结论对生产和理论研究，均具有较强的指导作用。

1 实验方法

选取常规背板型标准 A 级多晶硅光伏组件为样品，组件额定功率 240 W，组件尺寸：1 650 mm × 992 mm × 40 mm；将这些多晶硅光伏组件分别投试在广州花都亚湿热和海南琼海湿热户外气候环境试验场进行户外暴晒实验，组件采用固定电阻负载安装，电阻阻值为 4 Ω、功率 500 W 陶瓷芯电阻，组件安装角均为南向 45°。

每隔一段时间，用 EKO-MP170 户外 $I-V$ 测试仪对组件进行户外现场 $I-V$ 测试；将组件在试验场投试一段时间后，将组件回样到实验室用 AAA 瞬态光伏组件模拟器 $I-V$ 测试系统（halm，型号：cetisPV-XF2-M）进行 STC 状态下的 $I-V$ 测试，此外在实验中，采用 T 型热电偶对组件表面温度进行实时监控，并用 KT800 中长图彩屏无纸记录仪对热电偶采集数据进行记录。

2 结果与讨论

按照对试验组件进行的不同测试将测试结果分为户外现场 $I-V$ 测试、实验室 STC 状态下的 $I-V$ 测试以及组件表面温度实时测试 3 个方面，并分别对其进行分析与讨论。

组件投试期间海南试验场和广州试验场的气象参数平均值如表 1 所示，由表 1 可知海南试验场的年均空气温度、年均相对湿度、年降雨量、年辐射量均较广州试验场高。

光伏组件的 $I-V$ 特性曲线具有很强的实时性，非常容易受环境因素的影响，对于光照、温度的变化敏感，因此在测试户外 $I-V$ 时需同时记录组件表面接收的辐射度以及组件表面温度。而为了便于分析，本实验将每次户外测试的组件表面温度控制在一定范围内，得到每次户外测试的 $I-V$ 特性参数包括短路电流（ I_{sc} ）、开路电压（ V_{oc} ）、最大功率（ P_m ）以及组件效率（ η ）跟测试时辐射度的关系曲线如图 1、图 2 所示。

图 1 为广州试验组件的户外测试 $I-V$ 特性参数与测试时辐射度的关系图，其中（a）为短路电流，（b）为开路电压，（c）是最大功率，（d）表示组件效率，图 2 为海南试验组件的户外测试 $I-V$ 特性参数与测试时辐射度的关系图。在图 1、图 2 中 1A 表示试验场组件 A 的第一次户外 $I-V$ 测试。

由图 1、图 2 可知在图中辐射度范围内，无论是广州试验组件还是海南试验场组件，其组件 A 和组件 B 的短路电流、最大功率随着辐射度均基本呈现线性增长，开路电压随辐射度变化不明显，而组件效率随辐射度的增加有略微的下降趋势。

表 1 海南试验场和广州试验场组件投试两年间的气象参数平均值

Table 1 The average meteorological parameters of HaiNan and Guangzhou testing grounds

试验场地	气候特点	纬度	年均温度/°C	年均相对湿度/%	年降雨量/mm	45°年辐照量/(MJ·m ⁻²)
海南琼海	湿热内陆	19°14'	25.1	80.3	2 422.50	5 271.69
广州花都	亚湿热城市	23°08'	22.5	73.8	1 765.99	3 985.01

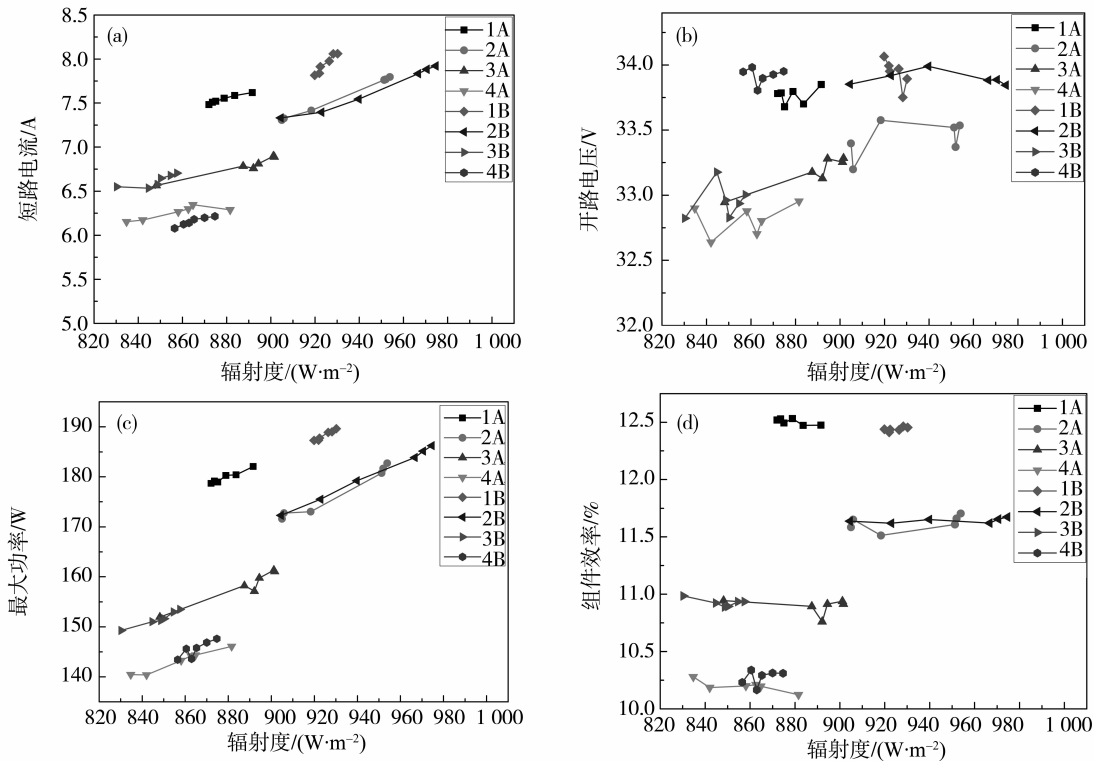


图 1 广州试验组件的户外测试 $I-V$ 特性参数与测试时辐射度曲线

Fig. 1 The relationship between outdoor $I-V$ characteristic parameters of Guangzhou test PV Modules with radiation

(a) 短路电流; (b) 开路电压; (c) 最大功率; (d) 组件效率

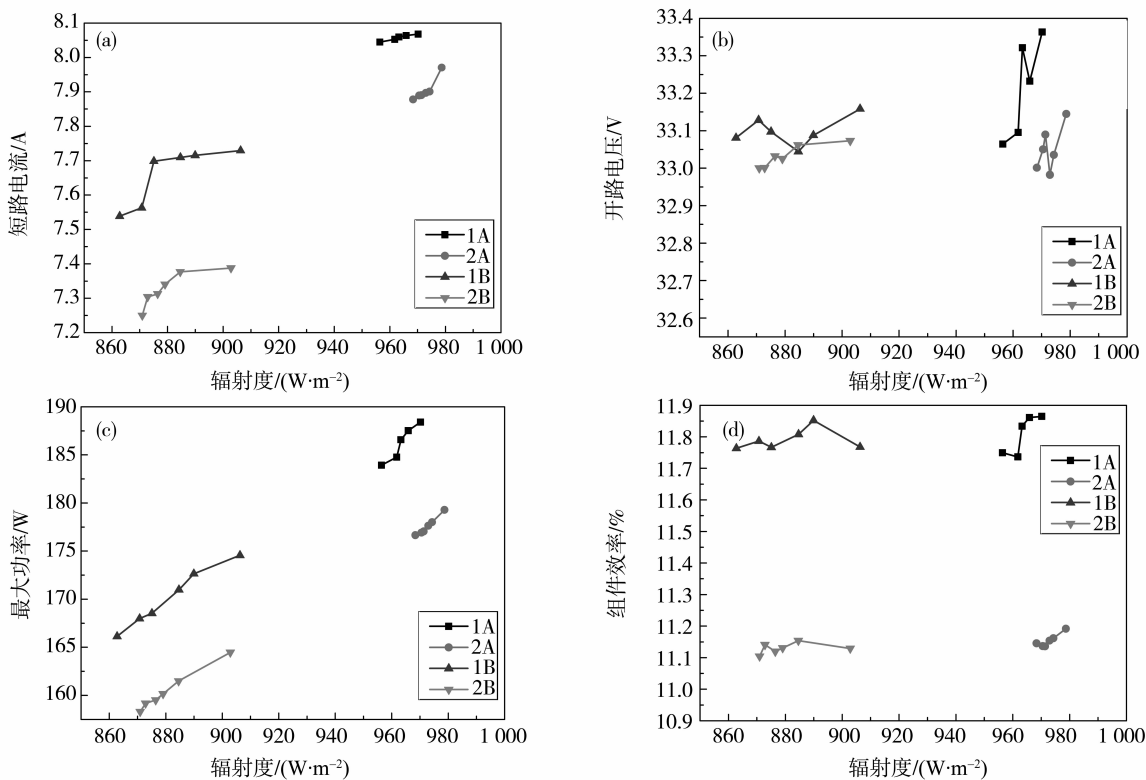


图 2 海南试验场组件的户外测试 $I-V$ 特性参数与测试时辐射度曲线

Fig. 2 The relationship between outdoor $I-V$ characteristic parameters of HaiNan test PV Modules with radiation

(a) 短路电流; (b) 开路电压; (c) 最大功率; (d) 组件效率

由图 1、图 2 中也可知所有试验组件后一次测量的短路电流、最大功率以及组件效率均较前一次测量的低，但开路电压的变化不明显。可见随着户外投试时间的增长，试验组件的短路电流、最大功率以及组件效率均有一定程度的衰减，而开路电压衰减不明显，这也表明组件户外应用时其功率的衰减主要是由于其光生电流的衰减引起的。

此外，在图 1 (a)、(c)、(d) 中可看出，其曲线 1A 和 1B、2A 和 2B、3A 和 3B、4A 和 4B 均呈现较好的一致性，可见广州试验组件 A 和组件 B

同一次测量时的短路电流、最大功率以及组件效率具有较好的一致性。同样，由图 2 (a)、(c)、(d) 可知海南试验组件 A 跟组件 B 同一次测量时的 $I-V$ 特性参数值也具有较好的一致性，这表明本实验中户外 $I-V$ 测试的稳定性以及准确性良好。

为了更准确地表征试验组件性能的变化情况，在试验组件投试一段时间后将试验组件回样至实验室进行 STC 状态下的 $I-V$ 测试，得到试验组件 STC 状态下的 $I-V$ 特性参数值随投试时间的变化关系如图 3 所示。

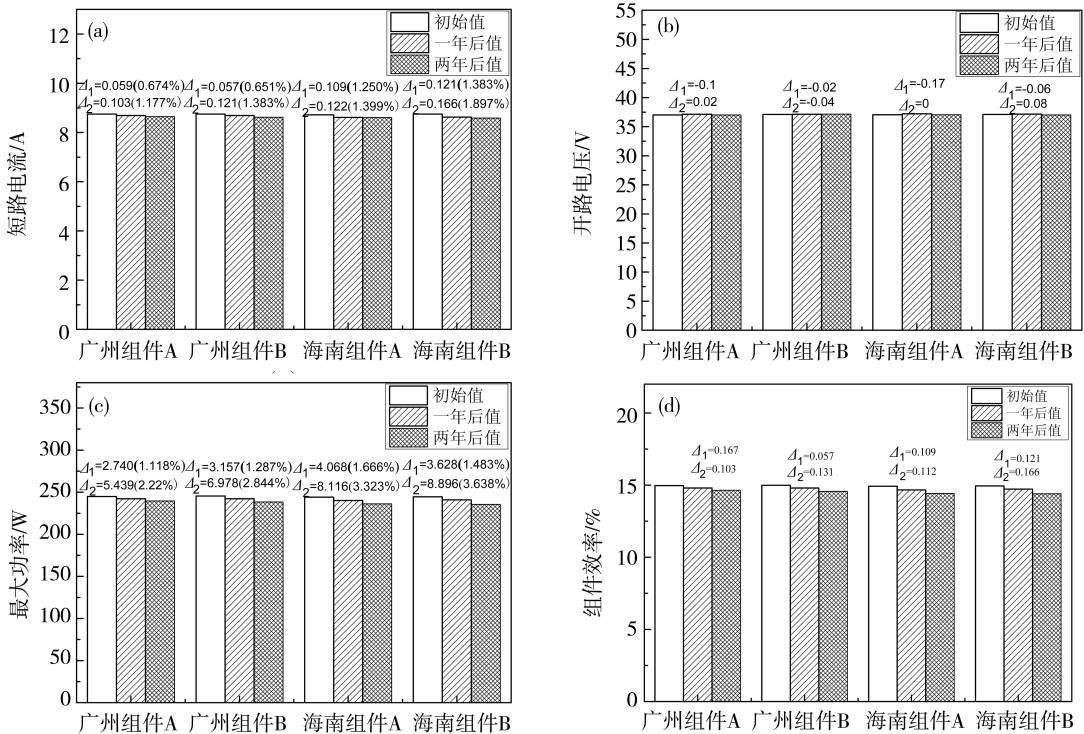


图 3 试验组件 STC 状态下的 $I-V$ 特性参数随投试时间的变化关系

Fig. 3 The relationship between STC condition $I-V$ characteristic parameters of all test PV Modules with test time

(a) 短路电流；(b) 开路电压；(c) 最大功率；(d) 转换效率

图 3 (a)、(b)、(c)、(d) 分别为试验组件 STC 状态下的短路电流、开路电压、最大功率、转换效率随投试时间的变化关系，图中 Δ 表示衰减绝对值，() 内为对应衰减率； $\Delta_1 =$ 初始值 - 一年后值； $\Delta_2 =$ 初始值 - 两年后值；一年衰减率 = $\Delta_1 /$ 初始值；两年衰减率 = $\Delta_2 /$ 初始值。由图可以看出随着投试时间的增长，试验组件的开路电压并无明显衰减，而短路电流、最大功率以及转换效率均呈现一定程度的衰减，这表明光伏组件功率的衰减主要是其光生电流的衰减引起的。从图 3 (a) 可知海南试验组件的短路电流衰减值均明显高于广州试

验组件，结合表 1 可知这是因为海南试验场地处湿热气候，年辐射总量以及年平均气温均较广州试验场高些。

由 3 (a) 还可看出试验组件的短路电流在投试第 1 年的衰减值明显高于第 2 年，这是因为光伏组件在刚开始使用时会出现初期光致衰减导致投试第一年衰减较大^[10-11]，图 3 (c)、(d) 可发现海南试验组件的最大功率、转换效率的衰减明显大于广州试验组件，其原因跟短路电流的衰减类似。但从图也能看出试验组件的最大功率、转换效率第 1 年的衰减值跟第 2 年的衰减值相差不大。

在广州试验场和海南试验场各取一个试验组件, 在其前后表面各取 4 个代表性监测点, 利用热电偶对组件进行表面温度实时监测, 试验组件的表面温度监测点分布图如图 4 所示, 其中 1、2、3、4 为试验组件前表面温度监测点, 分别是接线盒对应正面处、右上角处、中心处、左下角处; 5、6、7、8 为组件背板温度监测点, 分别对应接线盒旁边、右上角、中心、左下角。

将记录的试验组件表面温度进行处理分析得到试验组件 8 个表面温度监测点的月平均温度分布图如图 5 所示。

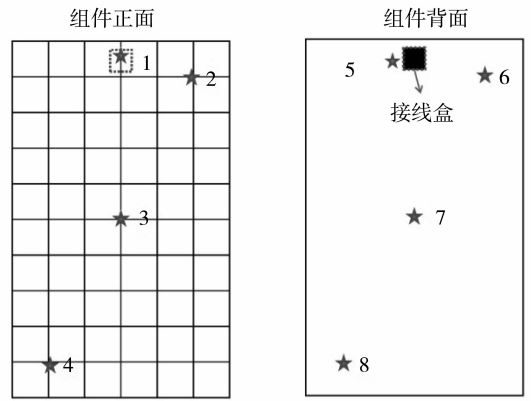


图 4 试验组件表面温度监测点分布图
Fig. 4 Distribution of temperature monitoring with test PV Modules

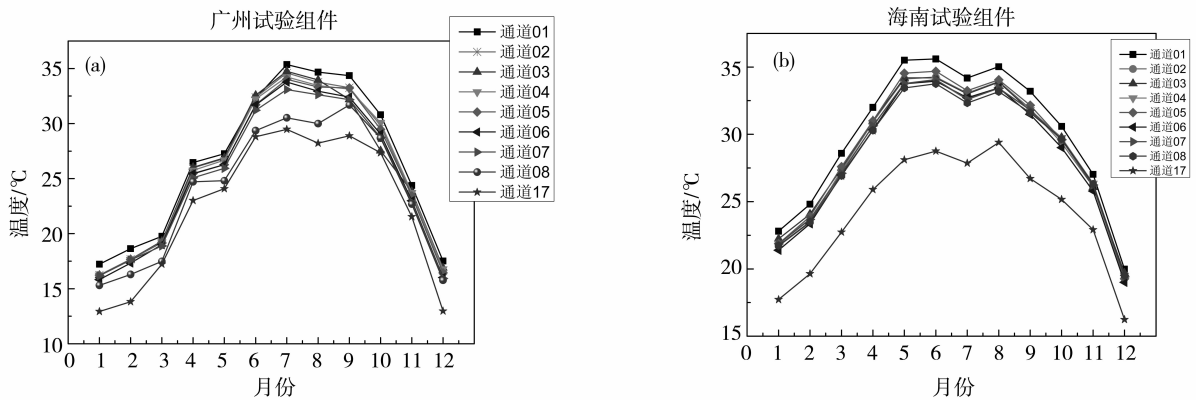


图 5 试验组件 8 个表面温度监测点的月平均温度值

Fig. 5 The monthly average temperature of Eight surface temperature monitoring with test PV Modules
(a) 为广州试验组件; (b) 为海南试验组件 (其中通道 17 为环境温度)

由图 5 可知无论是广州亚湿热试验场投试组件还是海南湿热试验场投试组件, 其所有监测点的月平均温度值均高于试验场环境月均温度, 且试验组件的月均表面温度最高值出现在接线盒对应的前表面处。由图 5 也可以看出试验组件前表面的温度较背面温度稍高一些, 特别是接线盒处对应前表面温度要较背面高出约 1°C , 其他几处前表面温度较背面也高出约 0.5°C 。

图 6 为广州试验组件跟海南试验组件的整体表面温度对比关系图, 其中 (a) 表示试验组件表面的每月月均温度, (b) 为月极大温度 (c) 为月极小温度, 由图 6 可知海南试验组件整体表面温度包

括月均温度、月极大温度、月极小温度均较广州试验组件的高, 全年平均海南试验组件表面温度要较广州试验组件高约 3.5°C , 这也可能是导致海南试验组件功率衰减较大的原因之一。此外, 由图 6 (a) 也可看出广州试验组件表面月均温度峰值出现在 7 月, 而海南试验组件表面的月均温度峰值出现在 6 月; 从图 6 (b) 中可看出广州试验组件表面的月极大温度峰值出现在 9 月, 而海南试验组件表面的月极大温度峰值出现在 6 月和 9 月; 从图 6 (c) 中能知道海南试验组件表面跟广州试验组件表面的月极小温度峰值均出现在 7 月。

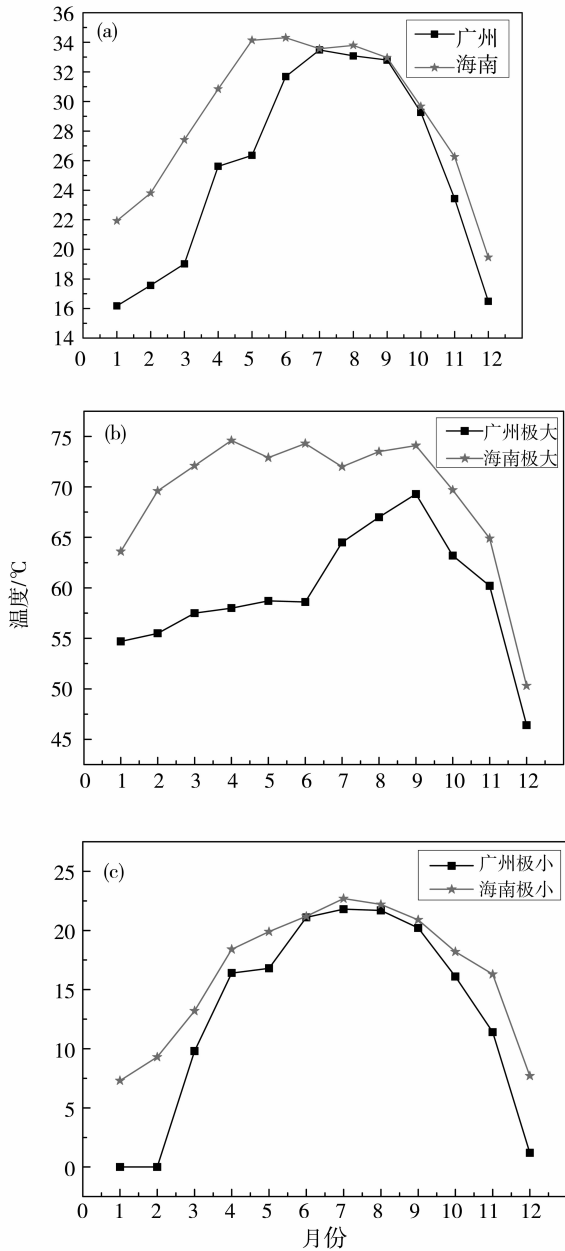


图 6 广州试验组件和海南试验组件整体表面温度对比关系图

Fig. 6 The contrast between Guangzhou test PV Modules' temperature and HaiNan test PV Modules temperature (a) 月均温度; (b) 月极大温度; (c) 月极小温度

3 结 论

本文研究分析了常规多晶硅光伏组件在湿热以及亚湿热两种典型气候环境中的应用的性能变化规律。最后得到结论：所有试验组件随着投试时间的增长其短路电流、最大功率、转换效率均有不同程度的衰减，而其开路电压均无明显变化，

海南试验组件的 $I-V$ 特性参数的衰减明显大于广州试验组件。所有试验组件在试验场应用时其前表面的温度较背面的高，整个组件表面的温度最高值出现在接线盒对应的前表面处，此外海南试验组件表面的整体平均温度比广州试验组件表面的高。

参考文献：

- [1] OSTERWALD C R, ANDERBERG A, RUMMEL S, et al. Degradation analysis of weathered crystalline-silicon PV modules[C] // Proceedings of 29th Photovoltaic Spec Conference, 2002;1392 – 1395.
- [2] van DYK E E, SCOTT B J, MEYER E L, et al. Temperature dependence of performance of crystalline silicon photovoltaic modules[J]. South African Journal of Science, 2000,96:198 – 200.
- [3] 沈辉,曾祖勤. 太阳能光伏发电技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [4] van DYK E E, MEYER E L, VORSTER F J. Long-term monitoring of photovoltaic devices[J]. Renewable Energy,2002,25:183 – 197.
- [5] 曾湘安,艾斌,邓幼俊,等. 硅片及其太阳能电池的光衰减规律研究[J]. 物理学报,2014,63:028803.
- [6] 陈镇光,邢涛,王学孟,等. 一种新型聚光光伏组件的光学设计[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2015, 54(1): 47 – 51.
- [7] JORGENSEN Y G J, MCMAHON T J. Accelerated and outdoor aging effects on photovoltaic module interfacial adhesion properties [J]. Prog Photovolt: Res Appl, 2008, 16:519 – 527.
- [8] 陈萼,孙韵琳,洪瑞江,等. 长期使用的多晶硅光伏组件发电性能分析与评估[J]. 太阳能学报,2013, 34(2): 227 – 232.
- [9] JORDAN D, KURTZ S. Photovoltaic degradation rates- An analytical review [C] // Progress in Photovoltaics: Research and Applications Publication Pending, NREL/ JA5200 – 51664,2012.
- [10] 曾湘安,冯江涛,揭敢新,等. 不同背板晶硅光伏组件在湿热环境下的性能研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2016, 55(4):63 – 67.
- [11] VA'ZQUEZL M, REY-STOLLE Y I. Photovoltaic module reliability model based on field degradation studies [J]. Prog Photovolt: Res Appl, 2008, 16:419 – 433.
- [12] SAMPLE T, OSSENBRINK H. The results of 12 years of module qualification testing to IEC61215[C] // Published in Proc, WCON3. Osaka, Japan, 2003.