

航天器太阳能电池阵电性能测试技术

刘 民^{1,2}, 杨亦强¹, 袁亚飞¹

(1. 北京东方计量测试研究所, 北京 100086; 2. 北京航空航天大学 自动化学院, 北京 100191)

摘要: 文章介绍了航天器太阳能电池阵电性能技术指标, 分析了影响测试的技术条件, 如光谱、光照强度、温度、标准太阳电池、光照均匀度、光照稳定度、测试系统等。文章还介绍了脉冲式太阳模拟器的工作原理, 提出了在航天器太阳能电池电性能测试方面的发展方向和今后要解决的技术问题。

关键词: 太阳电池阵; 电性能; 脉冲式太阳模拟器; 空间太阳电池

中图分类号: V423.4'4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2010)02-0153-04

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2010.02.005

1 前言

航天任务中使用的一次性电源系统有太阳能光伏发电系统、太阳能热动力发电系统、热电式放射性同位素发电系统、核反应堆、一次性化学电池和燃料电池等^[1]。而航天器太阳能电池阵就是太阳能光伏发电系统, 利用太阳电池将光能转换为电能。除了远离太阳的深空探测任务因太阳辐照弱而不采用太阳电池阵供电外, 其他绝大部分航天器都采用太阳电池阵的供电方式。目前, 一般的太阳电池阵可输出0.2~25 kW的功率, 可满足于大部分航天器飞行任务的需要^[2]。未来太阳能发电卫星(Solar Power Satellite, SPS)的专门太阳电池阵可输出达GW的功率。太阳电池阵在空间应用中是非常重要的供电手段。由于太阳能是清洁环保的能源, 地面用太阳电池正得到蓬勃发展。

具体太阳电池电源的设计需要准确的数据, 研究改进电源的设计方案需要准确的测试数据, 而生产环节中质量控制、航天器产品出厂和航天器的发射架上的电测都需要准确的太阳电池阵测试数据。因此, 太阳电池阵的电性能测试是一项意义重大的基础工作, 是航天任务顺利完成的重要保证。下面将介绍空间用太阳电池阵电性能测试的要求、内容以及测试相关的技术问题。

2 电性能测试的必要性与测试内容

太阳电池阵的电性能包含哪些参数呢? 测试

准确度的要求依据什么? 怎样才能保证测试准确呢? 本文将细致地分析太阳电池阵电性能测试内在原因和外在影响因素。首先来看看由测量不准确所带来的负面影响。用计算的方法来估计太阳电池阵的电性能往往与实际情况差异较大, 太阳电池阵的电性能并不等于单片太阳电池的串联与并联简单叠加, 单片太阳电池的测试数据也不能反映批量产品实际情况, 因为从单片太阳电池到电池阵之间经历了许多工序, 如贴片、焊接、连线以及包装运输等等。一般通过增大安全系数来提高设计的可靠性; 而增大安全系数必然增加航天器质量, 也必然增加运载发射的成本。不仅如此, 过剩的电能还会导致负载过热, 使热控系统的负荷增大。为了避免过热, 太阳电池阵需要频繁地调整角度, 姿态的调整会增加推进剂的消耗, 从而降低任务寿命。太阳电池阵电性能的准确测试对设计工作至关重要。太阳电池阵在进行了噪声振动试验和热真空试验后, 需要测试其工作是否正常。并联结构中, 测试太阳电池阵的并联数量应超过10个支路, 要求测试不准确度必须小于10%, 否则可能就有一个并联支路的问题不能被发现, 更何况每一个并联支路上又串联了几十个单片电池, 只要有一个电池出现故障, 整个支路就不能正常工作并呈现高阻状态或者变成负载发热。也就是说测量的准确度对于发现太阳电池阵的细微故障至关重要。所以太阳电池阵电性能测试在产品质量保障中也发挥着重要的作用。

收稿日期: 2009-10-19; 修回日期: 2010-02-03

基金项目: 国防科技工业计量基础科研项目

作者简介: 刘 民(1969-), 男, 研究员, 从事电磁测量与计量技术研究。E-mail: run_low@sina.com。

太阳能电池阵电性能参数反映了电源特性^[3]。在一定光源条件和温度条件下,太阳电池的电性能参数有开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 、工作点电压 V_{lst} 、工作点电流 I_{lst} 、最大功率 P_{max} 、最大功率点电压 V_{pm} 、最大功率点电流 I_{pm} 、填充因子 F_F 、内阻抗、转换效率等,以伏-安特性曲线(I - V 特性图)的形式可以表示各个参数, T_{amb} 为实测环境温度, T_{out} 为输出温度,见图1。太阳电池阵由单只太阳电池经过多级串、并联而成的,它的电源特性并不是简单叠加的关系,因为每块电池之间有差别,如光谱响应特性、光电转换效率以及受光照均匀程度等的差异,所以需要对太阳电池阵进行整体测试,才能得到准确的实际测试结果。

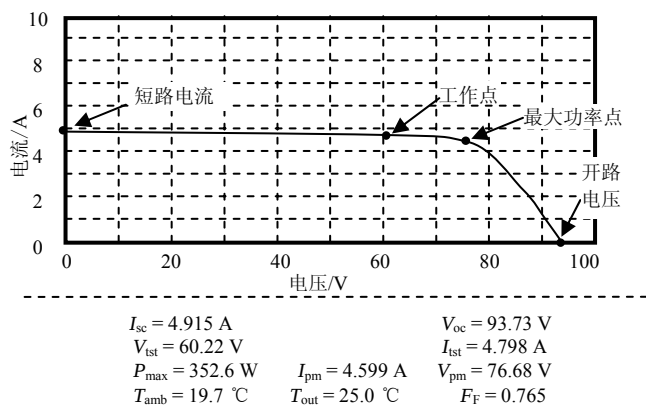


图1 太阳电池阵电特性 (I - V 曲线)

Fig. 1 The electrical performances of solar cell array (I - V curve)

3 测试条件分析

为准确测试空间用太阳电池阵的电性能,应注意以下几个测试条件:

(1) 光源的光谱

太阳电池的光谱响应曲线见图2。由图2可知太阳电池对不同波长的光具有选择性,光源的光谱分布可直接影响太阳电池的输出。有关标准所规定的空间用太阳电池测试的标准阳光光谱为AM0光谱^[4],地面用太阳电池测试的标准阳光光谱为AM1.5光谱^[5]。空间用太阳电池利用地面自然阳光测试时,需要经过光谱修正,相关标准中给出了修正公式。氙灯的光谱近似于AM0光谱,所以大多采用氙灯作为太阳模拟光源。为了准确模拟大气层外的太阳光谱,仅靠氙灯是不够的,对于光谱选择性很强的多结太阳电池,每个PN结光谱敏感度不同,又因为串联电路的相互影响,所以光源光谱的不同

会使电池的输出结果相差很大。现在正在研制的双光源或多光源太阳模拟器,正朝着更接近AM0光谱的方向努力。单结太阳电池的测试可以使用非标准AM0光谱的光源,只要标准太阳电池与被测电池阵的光谱响应、材料和结构基本相同,可以通过标准太阳电池的定标值(短路电流值)来修正测试结果。

(2) 光照强度(辐照度)

空间用和地面用太阳电池阵的测试应分别在 $1\,367 \text{ W/m}^2$ 和 $1\,000 \text{ W/m}^2$ 的辐照度下进行。若光源条件达不到标准要求,还需要经过公式修正。1个太阳常数的辐照度定义为 $1\,367 \text{ W/m}^2$ 。一般由标准太阳电池的短路电流定标值来调整光源的辐照度。

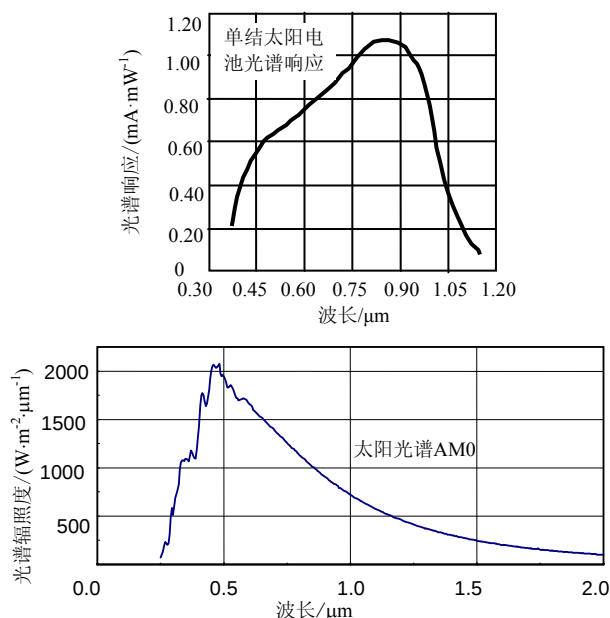


图2 太阳电池光谱响应与AM0光谱对照

Fig. 2 A comparison between the spectrum of solar cell and the spectrum of AM0

(3) 被测太阳电池阵的温度

太阳电池是半导体器件,温度对其性能影响较大。温度增高,开路电压显著下降,短路电流略有增加,转换效率明显下降,功率系数为负值,如硅电池约 $-0.4\%/^{\circ}\text{C}$,砷化镓电池约 $-0.3\%/^{\circ}\text{C}$ 。按标准规定测试时,温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,单片电池的允许温度差为 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,电池阵不同点之间的温度差小于 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为了保证在测量过程中温度基本保持不变并和环境温度一致,一般采用脉冲式太阳模拟器,或被测太阳电池阵在试验前、后进行遮光处理,仅在测试周期内受光,尽可能缩短测试时间。

(4) 标准太阳电池^[6]

空间用标准太阳电池的短路电流定标值定义为在AM0光谱、1个太阳常数、25 °C $\pm$ 1 °C条件下测得的短路电流。用标准太阳电池调整测试光源或修正测试结果,只要选用的标准电池与被测太阳电池阵具有基本相同的光谱响应,则根据在自然阳光或太阳模拟器下所测得的电性能,就能得到标准测试条件下的电池阵的电性能。我国空间用的太阳电池(单晶硅)地面标定方法已经列入ISO国际标准(ISO 15387)^[7],是我国在航天领域第一个被写入ISO国际标准的测试方法。1996年,北京东方计量测试研究所研究制定了空间用太阳电池标准,它奠定了我国空间太阳电池计量测试的基础,经过国际测试比对,与美国测试数据相比不确定度在1%以内。

(5) 光照均匀性

对于电池阵来说,不均匀的光照会引入较大的测量误差。实验证明局部的辐照度偏差可以造成整体电池阵的数据偏差,该偏差不容忽视。标准对不

均匀度的要求是 $\pm 3\%$ 。对于太阳模拟器来说,面积越大,均匀性控制越难以实现。光路合理性和测试环境遮光布置对均匀性影响很大,在测试中必须重点考虑。

(6) 光照稳定性

虽然通过对标准太阳电池短路电流的实时测量可以修正辐照度变化带来的影响,但是,测试太阳电池的伏安特性曲线需要在负载变化时电源输出稳定,标准文件规定在测试过程中光照变化应在 $\pm 3\%$ 范围内。

(7) 电性能测试系统

要研制大面积太阳电池阵的测试系统技术难度高,投资非常大。测试系统由光源、标准太阳电池、电子负载、电压记录仪、标准电阻、温度测量仪等组成。为了获得标准条件,还需要配置辅助测量仪器,如光谱测量仪、辐照度测量仪、太阳电池光谱响应测量系统、均匀性测量系统、闪光脉冲记录系统等,见图3。

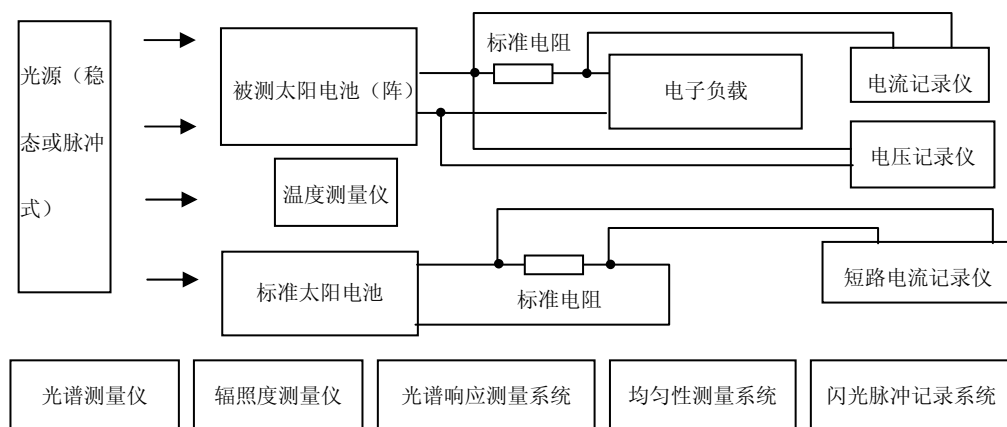


图3 太阳电池电性能测试系统

Fig. 3 The electrical performance test system for solar cell array

目前国内外普遍使用氙灯作为太阳模拟光源。用氙灯产生接近AM0光谱和辐照度连续稳定的光源的模拟器称为稳态太阳模拟器^[8],这种模拟器的特点是光源稳定可调,光照集中,受光面积小,功率大,功率电源需要配备复杂的冷却装置,被照射的太阳电池温升较快,也需要配备复杂的冷却装置。用脉冲式氙灯做光源的模拟器称为脉冲式太阳模拟器,1个光脉冲可持续1~3 ms,在光脉冲比较平稳的时间段内,快速调节电子负载完成电压和电流的测试,这种模拟器的特点是

光照面积大,均匀性高,能量集中释放,光强能达到或超过1个太阳常数,功耗小,对电源功率要求低。由于光照时间极短,不会造成被测太阳电池阵的温升,因此不需要进行温度控制,用于航天太阳电池阵测试的脉冲式太阳模拟器的测量不确定度在3%以内。国外这种脉冲式太阳模拟器已广泛应用在航空、航天、计量测试等许多领域。北京东方计量测试研究所是国防科技工业电学计量一级站,保存着空间用标准太阳电池,拥有国际先进的卫星太阳电池阵电性能测试系统,在对我国多

个卫星型号的太阳电池阵测试中取得了有价值的数据和成果。

4 技术发展方向和未来要解决的问题

随着太阳电池技术的发展,新型太阳电池逐步在航天器上推广使用,如何开展新型太阳电池的电性能测试成为国内外研究的热门课题。我国太阳电池测试标准编制于20世纪80~90年代,测试技术框架基本完善,但是在测试设备和测试方法研究方面与国外差距很大,针对新型太阳电池的测试还需要增添新的内容。

(1) 标准太阳电池的标定

如何在AM0光谱和1个太阳常数条件下获得标准太阳电池的短路电流值?各国都有不同的方法,美国利用航天飞机、高空气球和高空飞机进行标定,欧洲也采用高空气球进行标定^[9]。我国采用地面测试数据,然后通过光谱修正计算进行标定。对于光谱选择性强的多结太阳电池地面方法难以获得准确的标定值,需要开展卫星搭载或高空气球直接标定的研究以获得准确的测试结果。

(2) 多结太阳电池的测试^[10]

国外已有大量卫星使用了多结太阳电池,国际标准化组织正在编制标准多结太阳电池标定方法。我国多结太阳电池生产进入了产品化阶段,多结太阳电池标定方法的标准研究工作刚刚起步。应研制能够更加近似地模拟AM0光谱的多光源太阳模拟器,并利用该装置在地面开展各种型号的多结太阳电池测试,建立相关的测试标准。

(3) 空间用太阳电池阵的热斑效应测试

如果太阳电池阵局部受到遮挡或单片电池性能下降,则会在局部出现功率吸收和发热现象,即产生局部热斑效应。地面用的太阳电池阵有测试热斑效应的技术手段和方法,而空间用的太阳电池阵没有相应的测试手段。

(4) 脉冲式太阳模拟器与太阳电池响应的矛盾

对于响应速度慢的太阳电池,如果脉冲式太阳

模拟器的脉冲宽度和测试时间不够,则会影响测量准确度。如何延长脉冲宽度是当前要解决的问题之一。我国最新研制出了长达10 ms的长脉宽太阳模拟器,但是在输出功率方面有待继续提高。

(5) 稳态太阳模拟器的温度控制

稳态太阳模拟器照射到太阳电池阵上,会使其温度快速升高。在没有空间辐射散热模拟环境的条件下,地面测试如何在大面积的太阳电池阵上均匀地控制温度是技术难题。由于稳态太阳模拟器功率非常大,所以其自身电源散热和光路系统散热都是难题。

5 结束语

电性能测试在航天器太阳电池阵的设计、生产和检验中发挥着重要作用,太阳电池阵的测试数据能大大提高精细化设计水平。单结太阳电池阵的测试技术比较成熟,脉冲式太阳模拟器被广泛地应用在航天器太阳电池阵电性能测试中。而多结太阳电池阵的测试还面临着许多问题,有待今后研究解决。

参考文献 (References)

- [1] Wertz J R, Larson W J. 航天任务的分析与设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992
- [2] Serge Habraken. Space solar array and concentrators[C]//51st International Astronautical Congress, 2000-10
- [3] GB/T 18210—2000, 晶体硅光伏方阵I-V特性的现场测量[S]
- [4] GB6494—1986, 航天用太阳电池电性能测试方法[S]
- [5] GB6495—1986, 地面用太阳电池电性能测试方法[S]
- [6] GB2297—1989, 太阳光伏能源系统术语[S]
- [7] ISO15387—2005, Space system single-junction solar sells measurement and calibration procedures[S]
- [8] GB/T 12637—1990, 太阳模拟器通用规范[S]
- [9] 杨亦强. 高空气球搭载AM0太阳电池标定试验初步结果[C]//2006中国宇航学会计量与测试技术学术交流会论文集
- [10] 杨亦强, 刘民. 航天用多结太阳电池的测试与双光源太阳模拟器[C]//第八届全国光伏会. 上海, 2004-11