

# 空间太阳能电站经济性分析

赵秋艳 侯欣宾

(中国空间技术研究院,北京,100094)

**摘要:**空间太阳能电站作为一项在空间进行大规模太阳能收集、转化并通过无线方式将电能传输到地面电网的宏伟航天工程,其经济可行性是决定其能否大规模发展的主要因素之一。本文基于多旋转关节空间太阳能电站方案,提出空间太阳能电站全生命周期阶段划分和成本分析流程,初步分析得到空间太阳能电站的全部成本大约为 2 500 亿元,对应全寿命周期的发电量约为 2 400 亿度电,得到的单位电量的成本约为 1 元/度电。

**关键词:**空间太阳能电站;成本;空间段;地面段

**中图分类号:** TN958 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2018)S2-0109-08

## Economic Analysis for Space Solar Power System

ZHAO Qiuyan, HOU Xinbin

(China Academy of Space Technology, Beijing, 100094, China)

**Abstract:** Space solar power system (SSPS) is a grand space engineering, in which solar power is massively collected and converted in space, and the electric energy is transmitted to the ground grid by wireless mode. The economic feasibility of SSPS is one of main factors determining whether it can develop on a large scale. Based on multi-rotary solar power satellite(MR-SPS) scheme, a whole life cycle phase division and a cost analysis flow for SSPS are proposed. The preliminary analysis shows that the total cost of SSPS is about 2 500 billion RMB, and corresponding to the life cycle generation of 240 billion degree electricity, the cost of unit electricity is about RMB 1 yuan.

**Key words:** space solar power system (SSPS); cost; space segment; ground segment

空间太阳能电站(Solar power satellite, SPS), 也被称为太空发电站(Space solar power system, SSPS), 是一种在空间将太阳光转化为电力, 再通过无线能量传输方式将能量传输到地面的超大型发电系统。与地面太阳能电站相比, 其独特优势是能够为人类提供不受昼夜与天气变化影响的可持续清洁能源。这一概念由美国的 Peter Glaser 博士于 1968 年首先提出<sup>[1]</sup>。国际上在空间太阳能电站领域开展的研究工作已经持续了 50 年, 目前多个国家和组织已提出了几十种概念方案<sup>[2-3]</sup>, 包括中国提出的 SSPS-OMEGA 和多旋转关节空间太阳能电站(Multi-rotary joints solar power satellite, MR-SPS)方案<sup>[4-5]</sup>。

随着人类航天技术的不断进步, 特别是空间超大功率能量转化与管理、远距离无线能量传输、空间大型结构构建以及在轨服务等关键技术的快速发展, 空间太阳能电站在技术上越来越具备可行性, 在国际航天、新能源以及商业投资等领域受到广泛关注。空间太阳能电站作为一项在空间进行大规模太阳能收集、转化并通过无线方式将电能传输到地面电网的宏伟航天工程, 其经济可行性是决定其能否大规模发展的主要因素之一。在空间太阳能电站的发展研究中, 各国都将电站的发电成本目标定位于与地面火电或者新能源供电价格相当的水平, 甚至要优于地面发电价格。虽然空间太阳能电站仅仅利用太阳能便能实现稳定的电力供给, 理论

收稿日期: 2018-03-23; 修订日期: 2018-05-30

通信作者: 赵秋艳, 女, 高级工程师, E-mail: greensatzhao@sina.com。

引用格式: 赵秋艳, 侯欣宾. 空间太阳能电站经济性分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(S2): 109-116. ZHAO Qiuyan, HOU Xinbin. Economic analysis for space solar power system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(S2): 109-116.

上在整个寿命期间不需要消耗其他的能源,可以节约大量的燃料成本。但由于空间太阳能电站系统规模庞大,特别是空间段规模巨大、运输、建造和维护难度也非常大,因此其经济性也是备受争议的一个方面。目前这方面较为系统的研究工作还非常少。

本文基于 MR-SPS 方案,提出空间太阳能电站全生命周期阶段划分和成本分析流程。在顶层输入参数和假设成本参数的基础上,对于空间太阳能电站全生命周期的成本进行了分析,初步分析得到空间太阳能电站的全部成本大约为 2500 亿元,对应全寿命周期的发电量约为 2400 亿度电,得到的单位电量的成本约为 1 元/度电。该分析方法和分析结果可作为后续空间太阳能电站详细研究的参考。

## 1 多旋转关节空间太阳能电站概念方案

多旋转关节空间太阳能电站概念方案示意图见图 1。其主要的技术特点是利用持续对日定向的多个相互独立旋转的太阳电池子阵接收太阳能并转化成为电能,电能通过多个独立的较低功率的导电旋转关节传输到电力传输母线。综合考虑传输能量的功率密度、大气透过性以及波束控制精度的要求,选择微波作为无线能量传输的介质。电池阵发出的电能通过电力传输母线传输到微波发射天线的微波源转化为微波,之后利用巨大的微波发射天线以微波无线能量传输的方式向位于地面相对位置固定的接收天线进行大功率的能量传输,实现连续的供电,供电功率按 1 GW 考虑。整个电站由太阳能收集与转换分系统、电力传输与管理分系统、微波无线能量传输分系统、结构分系统、姿态与轨道控制分系统、热控分系统、以及信息与系统运行管理等 7 个分系统组成。



图 1 多旋转关节空间太阳能电站概念方案示意图

Fig. 1 Multi-rotary joints SSPS conceptual design

多旋转关节空间太阳能电站从构型上分为 3 大部分:太阳电池阵(南、北)、微波发射天线和主结

构。电站的相关服务设备安装在太阳电池阵、微波发射天线和主结构的结构框架上。太阳电池阵由 50 个太阳电池分阵组成(南北各 25 个),每一个分阵的尺寸为 200 m×600 m,由 12 个电池子阵组成。为了防止微波发射天线对于太阳电池阵的遮挡,并考虑到黄道夹角的影响,南北电池阵之间的距离为 1 310 m。因此,太阳电池阵结构的总长度约为 11 800 m。考虑大气透过率因素,选取的微波无线能量传输的频率为 5.8 GHz。对于地球静止轨道,微波的传输距离约为 36 000 km,综合考虑多种因素,采用一个直径为 1 km 的微波发射天线,对应的地面接收天线尺寸约为 5 km。1 GW 级的多旋转关节空间太阳能电站的详细方案见文献[5],主要参数见表 1。

整个电站考虑采用重型可重复运载与轨道间往返转移器将所有部件运输到地球静止轨道(Geosationary orbit, GEO)进行在轨组装。

表 1 1GW 多旋转关节空间太阳能电站主要参数

Tab. 1 Parameters summary of a 1GW MR-SPS

Tab. 1 Parameters summary of a 1GW MR-SPS		
系统参数	轨道	GEO
	地面供电功率/GW	~1
	系统效率/%	~13
	总质量/t	~10 000
太阳能收集与转换分系统	太阳电池类型	薄膜 GaAs
	发电效率/%	~40
	电池阵面积/km <sup>2</sup>	~6
	输出功率/GW	~2.4
	电池子阵输出电压/V	~500
	电池子阵数量/个	600
	总质量/t	~1 800
微波无线能量传输分系统	微波频率/GHz	5.8
	无线能量传输效率/%	~54
	发射天线直径/m	1 000
	天线模块数量/个	128 000
	总质量/t	4 000
电力传输与管理分系统	接收天线直径/km	5
	电池子阵电压/kV	5
	传输母线电压/kV	20
	导电旋转关节数量/个	100
结构分系统	质量/t	2 500
	模块形式	展开桁架
姿态与轨道控制分系统	质量/t	1 200
	推力器	1 N 电推力器
其他	质量/t	100
	热控分系统质量/t	200
	信息与系统运行管理分系统质量/t	50

## 2 空间太阳能电站成本分析流程

### 2.1 空间太阳能电站全生命周期阶段划分

空间太阳能电站经济性分析主要考虑从规划

开始一直到寿命终了的全过程的直接成本,但不包括为了发展空间太阳能电站所进行的前期技术研发和系统验证所产生的费用,也不包括运载、发射场、空间构建及支持、地面运行控制等大系统的研发和基础建设成本。全生命周期主要包括规划设计、研制建造、发射部署、组装测试、运行维护、以及系统关闭及再利用等 6 个阶段。

(1)规划、设计阶段

指空间太阳能电站立项前所进行的建设规划、系统设计阶段。该阶段的主要工作以设计、管理为主,不涉及到具体的研制工作。

(2)研制、建造阶段

指空间太阳能电站立项后正式开始建设所进行的空间和地面各分系统部件的地面研制、组件建造测试阶段。该阶段的主要工作以部组件详细设计、研制、测试为主,是空间太阳能电站研制的主要阶段。

(3)发射、部署阶段

指空间太阳能电站卫星部组件研制完成后,所进行的从地面到 GEO 轨道的运输部署阶段,主要包括地面到近地轨道(Low earth orbit,LEO)的运输以及 LEO 到 GEO 的运输,是空间太阳能电站构建的主要阶段。

(4)组装、测试阶段

指空间太阳能电站部组件运输到 GEO 轨道后,所进行的从部组件到太阳能电站系统的组装以及建成后的系统测试阶段,同时包括地面接收天线

的安装和测试,是空间太阳能电站构建的主要阶段。

(5)运行、维护阶段

指空间太阳能电站部系统测试完毕后,正式进入系统稳定运行阶段,也包括了运行过程所需要的系统维护和系统补给,是空间太阳能电站运行的主要阶段。

(6)关闭、再利用阶段

空间太阳能电站系统达到寿命终了后,需要进行的关闭处理以及部分部组件的再利用阶段,是空间太阳能电站全生命周期的最后阶段。

2.2 成本分析流程

空间太阳能电站系统主要包括两大部分:空间段和地面段。空间段包括太阳能收集与转换分系统、电力传输与管理分系统、微波无线能量传输分系统、结构分系统、姿态与轨道控制分系统、热控分系统和信息与系统运行管理分系统;地面段又包括整流天线、连接电网和地面控制中心。

空间太阳能电站系统的成本分析流程见图 2。首先需要明确系统顶层输入参数,之后根据设计方案确定地面段和空间段相关参数,在相关参数基础上确定主要部件和分系统的研制成本;根据运输输入参数确定主要部件和分系统的发射成本,根据组装输入参数确定空间太阳能电站的组装成本,之后确定 SPS 的建造成本;根据在轨运行、维护以及报废处理的复杂程度确定整个系统的运行维护处理成本。以上几项成本之和就是空间太阳能电站的

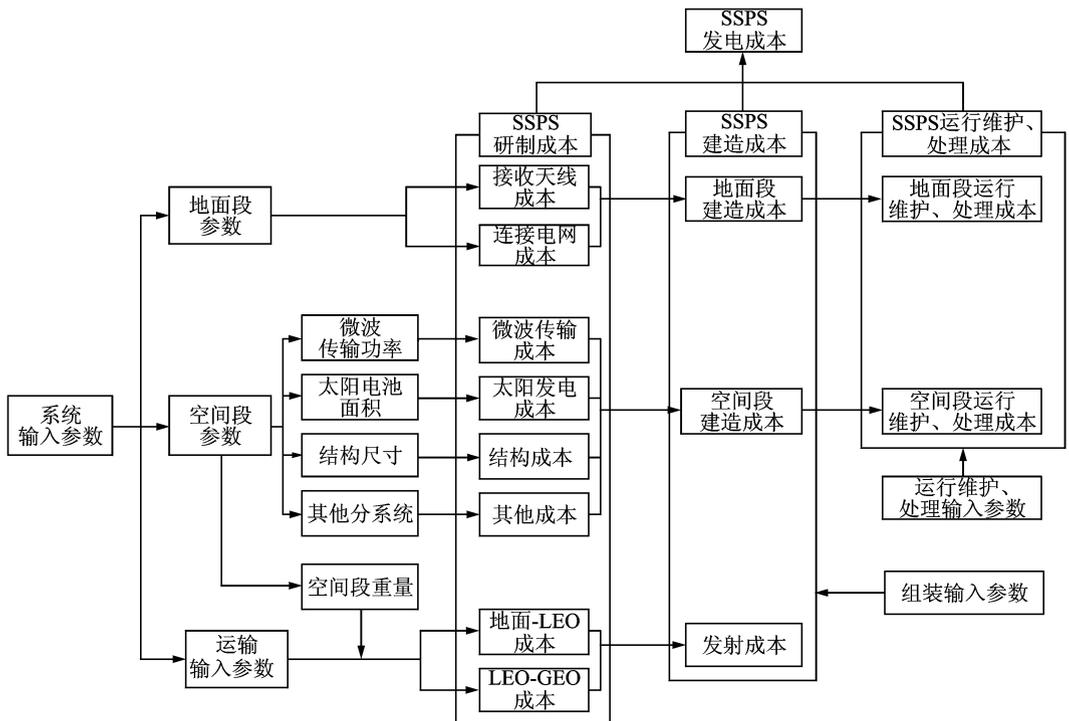


图 2 SSPS 成本分析流程

Fig. 2 Cost analysis flow of SSPS

全周期成本,结合寿命期内的总发电量,即可得到空间太阳能电站的发电成本。

对应全生命周期的六阶段,各主要组成部分对应的成本分类如表2所示,主要包括主要成本( $\Delta$ )、次要成本( $\circ$ )、无成本( $\square$ )和负成本( $\diamond$ )。其中,负成本指相关部分可以再利用,增加价值。

表2 不同阶段主要组成部分对应的成本分类

表.2 Cost classification of different sub systems

		规划设计	研制建造	发射部署	组装测试	运行维护	关闭再利用
地面段	整流天线	$\circ$	$\Delta$	$\square$	$\circ$	$\circ$	$\diamond$
	连接电网	$\circ$	$\Delta$	$\square$	$\circ$	$\circ$	$\diamond$
	地面控制中心	$\circ$	$\circ$	$\square$	$\circ$	$\circ$	$\diamond$
空间段	太阳能收集与转换分系统	$\circ$	$\Delta$	$\Delta$	$\Delta$	$\Delta$	$\circ$
	电力传输与管理分系统	$\circ$	$\Delta$	$\Delta$	$\Delta$	$\Delta$	$\circ$
	微波无线能量传输分系统	$\circ$	$\Delta$	$\Delta$	$\Delta$	$\Delta$	$\circ$
	结构分系统	$\circ$	$\Delta$	$\Delta$	$\Delta$	$\circ$	$\diamond$
	姿态与轨道控制分系统	$\circ$	$\Delta$	$\circ$	$\Delta$	$\Delta$	$\circ$
	热控分系统	$\circ$	$\Delta$	$\circ$	$\circ$	$\circ$	$\circ$
	信息与系统运行管理分系统	$\circ$	$\Delta$	$\circ$	$\Delta$	$\Delta$	$\circ$

### 3 多旋转关节空间太阳能电站成本分析

#### 3.1 顶层输入参数

发电功率:1 GW(平均功率);

系统效率:13%;

系统运行寿命:30年;

运输轨道:地面-LEO;LEO-GEO;运行轨道:GEO;

发射能力:地面-LEO:100 t(最大);LEO-GEO:100 t(最大);

运输成本:地面-LEO:5亿元/次;LEO-GEO:1亿元/次(包括轨道转移器的折价成本);

发射及组装周期:1年;

接收天线尺寸:5 km。

#### 3.2 空间段

空间太阳能电站地面段主要由太阳能收集与转换分系统、电力传输与管理分系统、微波无线能量传输分系统、结构分系统、姿态与轨道控制分系统、热控分系统、信息与系统运行管理分系统组成,主要的相关成本包括设计成本、研制成本、运输成本、安装成本和运行维护成本。由于空间太阳能电

站空间段的部分设备在任务结束后可用于后续的空间太阳能电站项目,所以具有一定的残值,但是其他设备的报废处理需要消耗一定的成本。

##### 3.2.1 太阳能收集与转换分系统

###### (1)系统描述

太阳能收集与转换分系统的主要功能是高效收集空间太阳能,并将其转换成电能,为微波传输系统提供2 GW左右的电能输入。选择柔性薄膜太阳电池阵,以满足大面积、轻质量、小包络、高效率和高可靠的设计要求。太阳能收集与转换分系统主要包括桁架支撑结构、薄膜太阳电池阵面和展开控制机构。

###### (2)输入参数

太阳电池转化效率:40%;

太阳能收集与转换分系统面积:6 km<sup>2</sup>;

子阵数目数量:600个;

单个子阵质量:3 t;

分系统质量:1 800 t;

单次发射运输子阵数量:20个。

(3)设计成本:1亿元;

(4)研制成本

单位质量研制成本为1 000万元/t,平均每个单元3 000万元,研制总成本约为180亿元。

(5)运输成本

运输能力:60 t/次;

运输次数:30次;

运输总成本:180亿元;

(6)安装成本

安装次数:600次;

单次安装成本:1 000万元;

安装总成本:60亿元;

(7)运行维护成本

年平均维护次数:10次;

单次维护成本:500万元;

30年维护成本:15亿元;

(8)处理成本

处理成本:100万元/t;

处理总成本:18亿元。

##### 3.2.2 电力传输与管理分系统

###### (1)系统描述

电力传输与管理分系统接收太阳阵输出的电功率,进行功率组合、变换、分配和传输,通过旋转关节,为微波转化与传输系统提供电力输入。同时,部分功率经过必要的电压转换为整个太阳能电站服务系统设备提供电力支持。空间太阳能电站配备储能装置,主要用于在地影期间、卫星故障期间太阳阵无法对日定向时、卫星故障维修期间为太

阳电站服务系统供电,以维持除微波发射以外的系统的基本运行。电力传输与管理分系统的主要组成包括:电力调节设备、电压变换设备、电力传输设备和电力存储设备。

#### (2)输入参数

主母线质量:1 960 t;

电力变换及存储设备质量:380 t。

(3)设计成本:1 亿元;

(4)研制成本

母线成本:200 万元/t,总成本 39 亿元;

电力变换及存储设备成本:2 000 万元/t,总成本 76 亿元。

(5)运输成本

运输能力:80 t/次;

运输次数:30 次;

运输总成本:180 亿元。

(6)安装成本

安装次数:1 000 次;

单次安装成本:500 万元;

安装成本:50 亿元。

(7)运行维护成本

年平均维护次数:50 次;

单次维护成本:200 万元;

每年设备更换成本:5 000 万元;

30 年维护成本:45 亿元。

(8)处理成本

处理成本:100 万元/t;

处理总成本:25 亿元。

### 3.2.3 微波无线能量传输分系统

#### (1)系统描述

微波无线能量传输分系统空间微波功率发射系统可以分为微波发射天线、波导功分馈电系统、大功率微波源、相位控制 4 个部分。由太阳能转化成的电力供给微波发射天线系统中的大功率微波源。通过波导微波馈电系统将辐射出来的微波功率分布后馈入到天线上。相位控制系统保障天线单元模块之间具有相同的相位,保证发射的微波波束的指向性及精度。微波发射天线系统将微波波束高定向性地传输到地面。

#### (2)输入参数

天线组装模块数量:320 个;

总质量:3 600 t。

(3)设计成本:2 亿元;

(4)研制成本

单位质量成本 1 000 万/t,总成本 360 亿元;

(5)运输成本

运输能力:60 t/次;

运输次数:60 次;

运输总成本:360 亿元。

(6)安装成本

安装次数:400 次;

单次安装成本:800 万元;

安装成本:32 亿元。

(7)运行维护成本

年平均维护次数:20 次;

单次维护成本:500 万元;

每年设备更换成本:5 000 万元;

30 年维护成本:45 亿元。

(8)处理成本

处理成本:100 万/t;

处理总成本:36 亿元。

### 3.2.4 结构分系统

#### (1)系统描述

由于空间太阳能电站主要由太阳能电池阵和微波发射天线组成,结构分系统的主要功能是为两大结构体提供主结构支撑、实现两大结构体的连接,同时保证和维持二者所需要的形状,并为其他分系统提供结构安装面和支撑。

#### (2)输入参数

主桁架模块(3 m)数量:325 个;

主桁架模块(3 m)单质量:2 t;

主桁架模块(2 m)数量:400 个;

主桁架模块(2 m)单质量:1 t;

天线阵次桁架模块数量:180 个;

天线阵次桁架模块单质量:0.5 t;

连接模块数量:169 个;

连接模块单重:0.2 t;

总质量:1 174 t。

(3)设计成本:1 亿元;

(4)研制成本

单位质量成本 500 万元/t,总成本 58.7 亿元。

(5)运输成本

运输能力:50 t/次;

运输次数:24 次;

运输总成本:144 亿元。

(6)安装成本

安装次数:1 000 次;

单次安装成本:500 万元;

安装总成本:50 亿元。

(7)运行维护成本

年平均维护次数:4 次;

单次维护成本:500万元;

30年维护成本:6亿元。

(8)处理成本

处理成本:100万元/t;

处理总成本:11.7亿元。

### 3.2.5 姿态与轨道控制分系统

(1)系统描述

姿态与轨道控制分系统承担的主要功能包括在空间太阳能电站建造阶段完成主结构的姿态调整与轨道修正;空间太阳能电站建造完成后,姿态与轨道控制分系统要完成从组装模式转化到工作模式;空间太阳能电站运行过程中,姿态与轨道控制分系统要满足空间太阳能电站工作模式的保持以及轨道维持工作。

(2)输入参数

电推力器组件数量:472;

其他设备数量:332;

总质量:95 t;

年消耗燃料量:30 t。

(3)设计成本:1亿元;

(4)研制成本

电推力器:1 000万元/套,总成本47.2亿元;

其他设备:平均200万元/套,总成本6.64亿元;

总成本:53.84亿元。

(5)运输成本

运输能力:60 t/次;

运输次数:2次;

地面-GEO:12亿元。

(6)安装成本

安装次数:约500次;

单次安装成本:500万元,合计25亿元。

(7)运行维护成本

年平均补给燃料30 t,燃料成本50万元/t,总成本1 500万元;

运输成本(地面-LEO-GEO):0.5次,6亿元/次,共3亿元;

年均维护补给次数:10次;

单次维护成本:2 000万元;

维护成本:2亿元;

每年设备更换成本:2 000万元;

30年补给维护成本:160.5亿元。

(8)处理

处理成本:100万元/t;

处理总成本:1亿元。

### 3.2.6 热控分系统

(1)系统描述

空间太阳能电站卫星采用分模块发射,在空间组装的方式。热控分系统的工作包括两个方面,一方面是保证每个发射单元模块从发射到在轨组装过程的温度控制,另一方面是保证整个空间太阳能电站在轨正常运行期、阴影期和维修期间的温度控制。目前主要考虑整个空间太阳能电站装配后的温度控制。

(2)输入参数

系统总质量:200 t;

(3)设计成本:1亿元;

(4)研制成本

单位质量成本200万元/t(平均),总成本40亿元。

(5)运输成本

运输次数:3次;

地面-LEO-GEO:18亿元。

(6)安装成本

不考虑热控的空间安装;

(7)运行维护成本

年维护次数:10次;

单次维护成本:500万元;

30年补给维护成本:15亿元。

(8)处理成本

不考虑热控的处理。

### 3.2.7 信息与系统运行管理分系统

(1)系统描述

信息与系统运行管理分系统实现空间太阳能电站遥测遥控、系统信息管理、自主运行控制与管理等功能,实现对各设备的工作状态控制和状态检测,协调空间太阳能电站全系统的工作,确保各分系统的正常运行及遥测、遥控信号的正常传输,确保空间太阳能电站运行正常。

(2)输入参数

系统总质量:50 t。

(3)设计成本:1.5亿元。

(4)研制成本

1 000万元/t(平均),总成本50亿。

(5)运输成本

运输次数:1次;

地面-GEO:6亿元。

(6)安装成本

安装次数:约100次;单次安装成本:500万元;合计5亿元。

## (7)运行维护成本

年均维护次数:20次;

单次维护成本:200万元;

每年设备更换成本:1 000万元;

30年补给维护成本:15亿。

## (8)处理成本

处理成本:100万元/t;

处理总成本:0.6亿。

### 3.3 地面段

空间太阳能电站地面段主要由整流天线、连接电网和地面控制中心组成,主要的相关成本包括设计成本、研制成本、安装成本和运行维护成本。由于空间太阳能电站地面段在任务结束后部分设备可用于后续的空间太阳能电站项目,所以具有一定的残值。

#### 3.3.1 整流天线

## (1)系统描述

地面微波功率接收系统分为整流天线、直流合成及DC-DC变换、波束反向控制3部分。

## (2)输入参数

发电功率:1 GW(平均功率);

整流天线直径:5 000 m;

面积: $2 \times 10^7 \text{ m}^2$ ;

平均维修周期(整流二极管替换及连接电缆替换):15年。

(3)设计成本:2 000万元。

## (4)研制成本

整流天线单位面积研制成本500元/ $\text{m}^2$ ,对应研制成本为100亿元;

波束反向控制系统,研制成本2 000万元。

## (5)安装成本

单位面积安装成本100元/ $\text{m}^2$ ,对应安装成本为20亿元。

## (6)运行维护成本

正常维护成本2 000万元/年,30年维护成本6亿元;假设需要定期替换的部件为整流二极管替换及连接电缆,其研制成本为接收天线总研制成本的1/2,则更换一次的成本为50亿元。

## (7)处理成本

整流天线在经过部件更换和维修后可用于后续的空间太阳能电站,假设系统残值约为25亿元。

#### 3.3.2 连接电网

## (1)系统描述

连接电网用于将整流天线接收转化的电能经

过适当的电压变换和调整,传输并接入到主干电网。

## (2)输入参数

发电功率:1 GW(平均功率);

连接电网直径:6 000 m;

连接电网长度:40 km。

(3)设计成本:1 000万元。

## (4)研制成本

假设单位长度研制成本400万元/km,对应研制成本为1.6亿元。

## (5)安装成本

假设单位长度安装成本100万元/km,对应研制成本为4 000万元。

## (6)运行维护成本

正常维护成本500万元/年,30年维护成本1.5亿元。

## (7)处理成本

连接电网在经过部件更换和维修后可用于后续的空间太阳能电站,由此系统残值假设约为0.4亿元。

#### 3.3.3 地面控制中心

## (1)系统描述

地面运行控制系统包括两部分,一方面是支持空间太阳能电站模块发射、组装等的测控任务;另一方面是支持空间太阳能电站卫星的在轨运行和地面接收系统正常运行的测控任务,除了监测卫星和地面接收系统的各种工作状态、发送必要的控制指令,还需要为卫星系统提供波束导引信号。

## (2)输入参数

发电功率:1 GW(平均功率);

人员需求:20人。

(3)设计成本:1 000万元;

(4)研制成本:4 000万元;

(5)安装成本:1 000万元;

## (6)运行成本

正常运行成本2 000万元/年,30年维护成本6亿元。

## (7)处理成本

系统残值假设约为2 000万元。

### 3.4 总结

根据上述的空间太阳能电站成本初步分析,整个寿命周期内的研制、发射、建造和运行等成本总数约为2 520亿元,具体见表3。

表3 空间太阳能电站成本小结(亿元)

Tab.3 Cost summary of a 1 GW MR-SPS

亿元

	分系统分解	设计	研制	运输	安装	维护	处理	合计
空间段	太阳能收集与转换分系统	1	180	180	60	15	18	454
	电力传输与管理分系统	1	125	180	50	45	25	426
	微波无线能量传输分系统	2	360	360	32	45	36	835
	结构分系统	1	58.7	144	50	6	11.7	271.4
	姿态与轨道控制分系统	1	53.84	12	25	160.5	1	253.34
	热控分系统	1	40	18	0	15	0	74
	信息与系统运行管理分系统	1.5	50	6	5	15	0.6	78.1
	空间段合计	8.5	867.54	900	222	301.5	92.3	2 391.84
地面段	整流天线	0.2	100.2	0	20	56	-25	151.4
	连接电网	0.1	1.6	0	0.4	1.5	-0.4	3.2
	地面控制中心	0.1	0.4	0	0.1	6	-0.2	6.4
	地面段合计	0.4	102.2	0	20.5	63.5	-25.6	161
合计	8.9	969.74	900	242.5	365	66.7	2 552.84	

## 4 结束语

初步分析得到多旋转关节空间太阳能电站的全部成本大约为2 500亿元,对应全寿命周期的发电量约为2 400亿度电,得到的单位电量的成本约为1元/度电。该分析方法和分析结果可作为后续空间太阳能电站详细研究的参考。

### 参考文献:

- [1] PETER E G. Power from the sun:its Future [J]. Science, 1968,162:867-886.
- [2] 侯欣宾,王立,刘长军,等. 太阳能发电卫星白皮书——URSI SPS国际委中会工作组报告[M]. 北京:中国宇航出版社,2013.  
HOU Xinbin, WANG Li, LIU Changjun, et al. Space solar power satellite white paper—URSI SPS international communication workgroup [M]. Beijing:China Aerospace Publishing House,2013.
- [3] JOHN C M. SPS-ALPHA: The first practical solar power satellite via arbitrarily large phased array [R]. Artemis Innovation Management Solutions LLC, 2012.
- [4] 杨阳,段宝岩,黄进,等. OMEGA型空间太阳能电站聚光系统设计[J]. 中国空间科学技术, 2014,5:18-23.  
YANG Yang, DUAN Baoyan, HUANG Jin, et al. SSPS-OMEGA: A new concentrator system for SSPS [J]. Chinese Space Science and Technology, 2014,5: 18-23.
- [5] 侯欣宾,王立,张兴华,等. 多旋转关节空间太阳能电站概念方案设计[J]. 宇航学报, 2015,36(11):1332-1338.  
HOU Xinbin, WANG Li, ZHANG Xinghua, et al. Concept design on multi-rotary joints SPS[J]. Journal of Astronautics, 2015,36(11):1332-1338.

(编辑:王静)