

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-06

微波光子输电精密载运器

陈丁跃^{1*}, 张永辉², 周仁魁³, 杨 励¹, 官永玉¹, 尹连杰¹, 赵陈闯¹

(1. 长安大学, 陕西 西安 710064;

2. 西安航空学院, 陕西 西安 710077;

3. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710068)

摘要:开展了微波光子输电精密载运器的研发工作。介绍了微波光子输电原理及优势;建立了基于远程无线微波光子输电系统原理结构和能量转换数学算法模型;分析了微波光子输电发射端与接收端能量转换之间的关系。在 ADVISOR 环境下,对精密载运器电能荷电状态进行了研究,并对微波光子输电系统进行了功率容量测试。实验结果显示,微波光子输电系统的设计和参数匹配较合理,供电能力达到微波光子输电精密载运器的动力要求。本项目的研究有助于丰富和发展微波光子输电科学,对新能源精密载运器研究与发展有重要参考价值。

关键词:微波光子输电;精密载运器;能量转换

中图分类号:TM724.1;TN62 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20152313.0000

Precision conveyance of microwave photon transmit electricity

CHEN Ding-yue^{1*}, ZHANG Yong-hui², ZHOU Ren-kui³, YANG Li¹,
GONG Yong-yu¹, YIN Lian-jie¹, ZHAO Chen-chuang¹

(1. Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Xi'an Aviation College, Xi'an 710077, China;

3. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China)

* Corresponding author, E-mail: cdy868@163.com

Abstract: A precision conveyance of microwave photon transmit electricity was researched. The principle of microwave photo transmit electricity and its advantages were introduced. Then, a element configuration and mathematical algorithm models of energy conversion based on the system of remote microwave photon transmit electricity were established. The energy conversion relationships between the blast-off carry and the take-over carry in microwave photon transmit electricity were analyzed. The power SOC (State of Charge) of precision conveyance was researched under ADVISOR software, and power capability was tested on the system of microwave photon transmit electricity. Experimental results show that the system of microwave photon transmit electricity designed and parameter matching are relatively rational, thus the efficient operation of precision conveyance of the purely dynamoelectric type has been achieved. The research helps to enrich and develop the science of microwave photon transmit electricity, and plays an important role in the research and development for

收稿日期:2015-05-16;修订日期:2015-06-10.

基金项目:陕西省科学技术研究发展计划资助项目(N. 2015GY053)

new energy precision conveyances.

Key words: microwave photon transmit electricity; precision conveyance; energy conversion

1 引言

随着光学技术与微波技术的发展,一种将两者结合起来、以光与微波作用为基础的光与微波技术的交叉领域应运而生。该领域包括微波场对光和电的传输,光对微波能量的产生、放大、变换和控制作用,并由此派生出了微波光子。微波光子广义上被定义在光能量和高频(大于 1 GHz)电能量之间。微波光子无线输电对于太空发电、地面向卫星和飞机等飞行器输电、军事定向能武器、星际探测、密载运载工具以及新能源的开发和利用等具有特殊的意义。

微波光子输电主要集中在美国、加拿大、日本和欧洲。1899 年,Nikola Tesla 通过实验验证了用无线电传输能量的理论,并实现了人类第一次 MPT。20 世纪初期,美国就开始系统地研究用微波及光子传送能量。微波光子输电主要研究和应用领域是太阳能卫星发电站和飞机接收无线电力等。美国空军从 20 世纪 60 年代初期开始资助一些探索性的研究,并于 1964 年成功地演示了微波功率驱动的直升飞机,该飞机从天线中获得了 200 W 的功率,这是微波光子输电史上的一个重要里程碑。1975 年加州理工学院在实验室演示了所建立的微波光子输电系统,该系统的交流到直流的转换效率达到 54%,整流天线输出的直流功率是 600 W。同年,他们还演示了收发两端相距 1 609 km 的微波电力传输系统,该系统接收天线所截获能量的 84% 被转换成直流功率,整流天线的直流输出功率达 30 kW^[1-2]。而微波光子输电精密载运器的研究甚少,本文基于远程无线微波光子输电系统原理和能量转换的数学模型建立了微波光子输电精密载运器。该研究对未来高性能、低成本增程式载运工具的设计与运用具有重要意义。

2 微波光子输电原理及优势

微波是频率介于 300 MHz ~ 300 GHz 无线电波和红外线辐射间的高频电磁波,其波长为 100

~ 0.1 cm。它不同于无线电中波和短波,能顺利通过电离层而不反射,具有波粒二象性,微波光子的能量为 $199 \times 10^{-23} \sim 1.99 \times 10^{-22}$ J,具有很好的穿透性,微波光子的输出功率随时可调。微波光子的输电系统包括发射端与接收端。微波光子的输电原理是:由电源送出的电力先通过微波转换器将工频交流电变换成微波光子,经过多级功率放大器将微波光子功率放大后通过微波光子发射天线辐射至自由空间,再由整流器(整流天线)接收微波光子能量并整流,为负载(如空中 TDIC-CD 探测器、地面载运工具)提供电能^[3-4]。

微波光子输电的优势如下:

(1) 在宇宙空间,微波光子是理想的传输媒介,它通过地球大气层时损耗很低,仅为 2% 左右。微波光子输电使电力发、送、供、用的结构变得简单。

(2) 它能改变因能源分布不均衡造成的输电不经济、不合理的状况,弥补地面电站、电网的分布不足,能减少二氧化碳排放,有利于环境保护。

(3) 微波光子输电具有全天时和全天候的工作能力,在遥感、侦查、导航和载运工具供电等领域发挥着重要作用。

(4) 微波光子输电是一种解决空对空或空对地电功率传输的重要技术,在卫星太阳能电站、空间站、高山、岛屿之间电力输送等无线输电工程中具有广阔的应用前景。

3 微波光子输电精密载运器结构

本文设计的远程无线微波光子输电精密载运器系统的原理结构如图 1 和图 2 所示。远程无线微波光子输电与传统的微波光子产生、发射、接收是一个相反的物理过程,微波光子输电为精密载运器(空中 TDICCD 探测器、星球探测车、汽车)提供高增程电能。所建立的精密载运器远程无线微波光子输电系统主要包括微波光子输电的发射端和接收端(精密载运器)。其中,发射端包括国家电网、同轴电缆、调配器、微波光子功率源(内置多级功率放大器)、波导管和微波光子发射阵列天线;接收端包括硅整流电能接收天线(高频

微波电能转化接收器)、精密承运器。调配器通过同轴电缆连接国家电网,硅整流电能接收天线连接承运器的电源;发射端的微波光子发射阵列天线与接收端的硅整流电能接收天线通过无线网络进行远距离电能传输。图 3 为二种型号的硅整流二极管天线,图 4 为内置多级功率放大器的喇叭型微波光子发射天线。

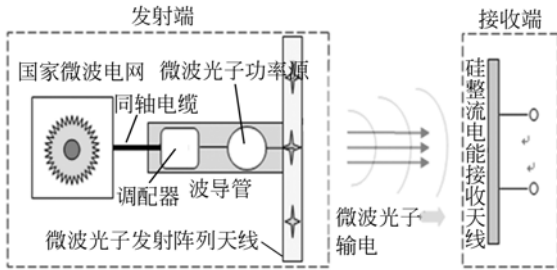


图 1 远程无线微波光子输电系统结构

Fig. 1 Systemic configuration of remote microwave photon electricity transmission

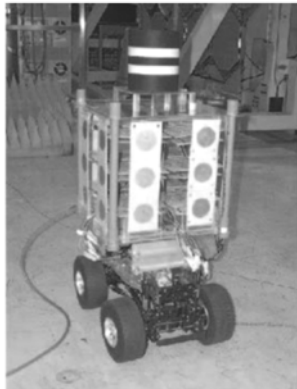


图 2 内置整流器的精密承运器

Fig. 2 Precision conveyance with rectifier circuit

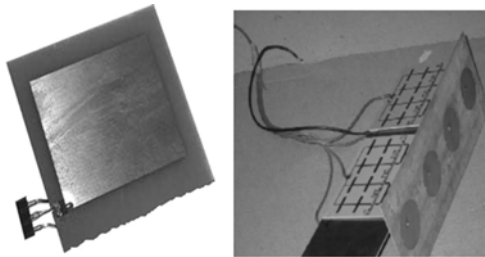


图 3 二种型号的硅整流二极管天线

Fig. 3 Two kinds of rectifier circuit antennae

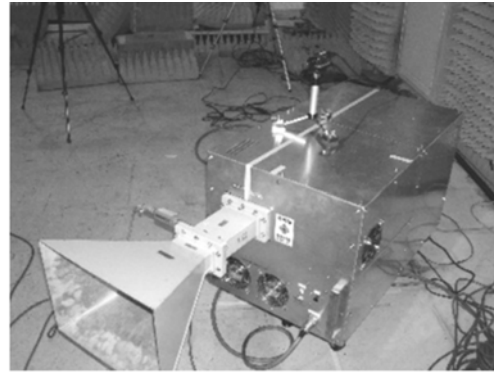


图 4 内置多级功率放大器的喇叭型微波光子发射天线

Fig. 4 Trumpet model microwave photon transmission antenna with multi-class power amplifier

4 精密承运器能量转换算法

微波光子远程无线输电方式在纯电动型精密承运器增程方面具有无可比拟的优势,远程微波光子能量向精密承运器中的硅整流接收天线辐射电能量,通过硅整流天线将电流汇集到精密承运器电源分配控制器,为精密承运器提供电能,带动精密承运器运行。微波光子输电的能量转换效率是衡量输电性能的重要指标。设微波光子辐射频率为 f_m 的微波光子产生的传输电压为 $V_m \cos(2\pi f_m t)$, 由电光效应^[5-7], 在精密承运器中的硅整流电能接收器接收到的微波光子相位为:

$$\Delta\varphi(t) = \pi(V_m \cos(2\pi f_m t)/V_\pi) = m \cos(\omega_m t), \quad (1)$$

式中 V_π 表示微波光子功率源的电压。由发射阵列天线发出的微波光子功率 P_m 与调制峰值电压 V_m 和承运器阻抗 Z_1 的关系为 $P_m = V_m^2/(2Z_1)$, 可得调制系数 $m = \pi V_m/V_\pi = \pi \sqrt{2P_m Z_1}/V_\pi$ 。

对于相位型微波光子功率源,假设微波光子功率源输入电场的振幅为 E_i , 角频率为 Ω_0 , 则发射端微波光子发射阵列天线发出的微波光子电场可表示为:

$$E_0 = E_i \exp(j\omega_0 t + j\Delta\varphi(t)) = E_i \exp(j\omega_0 t + jm \cos(\omega_m t)). \quad (2)$$

对式(2)采用 Jacobi-Anger 级数展开可得:

$$E_0 = E_i \exp(j\omega_0 t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n J_n(m) \exp(jn\omega_m t) = E_i \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n J_n(m) \exp(j(\omega_0 t + n\omega_m t)), \quad (3)$$

式中 J_n 是 n 阶 1 类 Bessel 函数。由式(3)可得微波光子功率源从发射阵列天线发出的微波光子各频率分量的功率为:

$$P(\omega_0 + n\omega_m) = P_i J_n^2(m), n = 0, \pm 1, \dots, \quad (4)$$

式中 P_i 表示微波光子功率源输入给微波光子发射阵列天线的功率。由于微波光子输电的传输电压小于 V_π , 可以使用 Bessel 函数的近似, 即当 $m \leq 1$ 时, $J_1(m) \approx m/2$ 。考虑微波光子发射阵列天线在远程传输中存在衰减, 接收端硅整流电能接收器接收到的转换电功率可近似为:

$$P_F \approx C_m P_i \left[\frac{m}{2} \right]^2 = C_m P_i \left[\frac{\pi^2 Z_1 P_m}{2V_\pi^2} \right]^2 = \eta_m(m) P_i P_m, \quad (5)$$

式中: C_m 表示微波光子在精密载运器中的硅整流电能接收器的传输率, η_m 表示硅整流电能接收器的转换效率。

经过精密载运器的硅整流电能接收器整流之后, 载运器获得的电流为:

$$i_s = \beta R P_F = \beta \eta_m P_i P_m = \eta_d P_m, \quad (6)$$

式中: β 表示微波光子的传输率; R 表示硅整流电能接收器的响应度; η_d 表示微波光子功率与电流间的转换效率。

从上式可以看出, 接收端硅整流电能接收器接收到的转换电功率与发射端辐射的微波光子功率成正比, 精密载运器获得的电流与微波光子的传输率、硅整流电能接收器的响应度、微波光子功率与电流间的转换效率有关。影响微波光子功率到接收端电功率转换效率的主要因素为: 发射端微波光子发射阵列天线的载波功率和精密载运器的硅整流电能接收器接收的电压, 因此提高电能转换效率需增加发射端微波光子发射阵列天线的载波功率。

5 精密载运器电能 SOC 及实验测试

微波光子输电精密载运器的设计属于多变量非线性优化问题, 主要是通过调用 ADVISOR 软件的函数来计算其非线性的目标函数和约束函数值。精密载运器设计目标包括: 精密载运器的动能消耗量、精密载运器传动系统中电机和能源储存系统的功率以及精密载运器总质量的最小化; 无线电能荷电状态的最大化。精密载运器的约束

条件包括行驶的最长距离、加速性能、最高行驶速度、爬坡性能和驾驶循环^[8-9]。设计过程首先用 MATLAB 优化软件向 ADVISOR 软件传递优化问题的初始值、目标函数和约束函数的输入参数, 在设定好各项参数后, 通过 ADVISOR 软件对不同工况下精密载运器的各项性能进行目标函数和约束函数的计算。然后判断约束条件是否成立, 如果不成立, 则更新初始值; 循环上面的计算过程, 如果成立, 则计算结束, 其设计流程见图 5。



图 5 基于 ADVISOR 的精密载运器设计流程

Fig. 5 Design process of precision conveyance according to ADVISOR

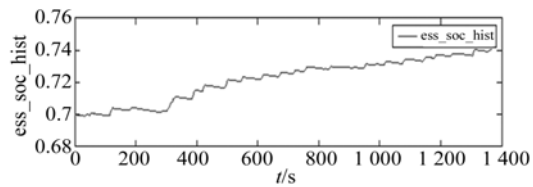


图 6 精密载运器电能荷电状态

Fig. 6 Power SOC of precision conveyance

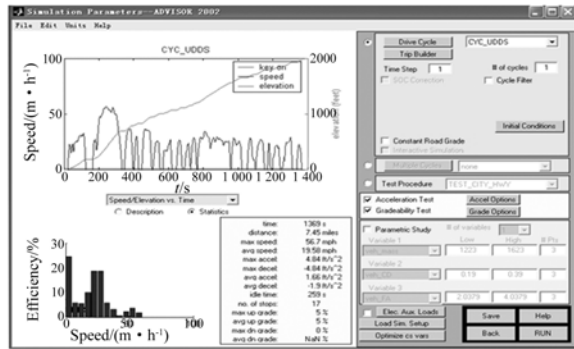


图 7 功率输出的结果

Fig. 7 Result of power outputs

在 ADVISOR 环境下, 精密载运器的电能荷电状态 (SOC) 对精密载运器的续驶里程有重要意义。无线微波光子输电的电能不间断供给内置硅整流电能接收器的精密载运器, 可提高精密载运器的荷电状态, 增加续驶里程, 这是设计的主要目标之一^[10-12]。在精密载运器的设计参数及控制参数不变的情况下, 通过 ADVISOR 模拟器在环境行驶工况下的运行, 判断精密载运器的电能

SOC 变化。图 6 描述了 SOC 与时间的变化关系,图 7 描述了无线微波光子输电经硅整流电能接收器传给精密载运器后的功率输出效果,以及不同循环工况下精密载运器的速度和时间的变化关系。

利用内置多级功率放大器的微波光子发射阵列天线和硅整流电能接收器,进行微波光子输电中的微波光子发射阵列天线和硅整流电能接收器结构的功率考核实验。其中微波光子发射阵列天线源的输出指标为:微波光子脉宽 23 ns,中心频率 9.5 GHz,输出功率大于 1 GW。微波发射阵列天线采用喇叭型微波光子发射天线,硅整流电能接收器采用硅整流二极管接收天线。实验测试中,将电源、调配器、微波光子功率源、波导管接入到微波光子发射阵列天线,通过监测微波光子辐射场的微波波形是否出现相位变化和尾蚀来判断微波光子在输电过程中是否出现硅整流二极管天线被击穿的现象,从而考核硅整流二极管接收天线结构的电功率容量。辐射场微波光子波形采用开口波导加检波器来测量。图 8 显示考核实验中监测到的精密载运器硅整流电能接收器远程接收到的微波光子输电后相位的变化,图 9 显示了连续发射 500 个微波光子脉冲时的辐射场波形。

由精密载运器电能 SOC、功率输出结果及功

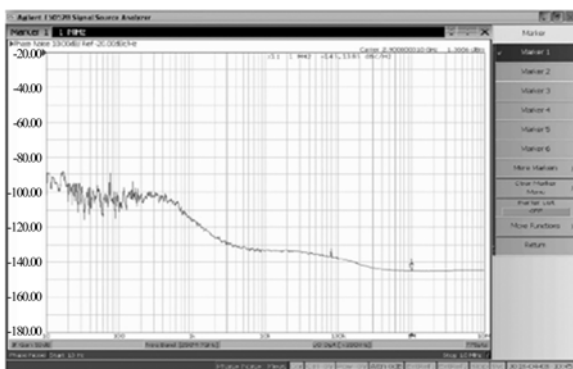


图 8 微波光子传输后接收端电能的相位变化

Fig. 8 Phase change of electric power of take-over after microwave photons transmission

参考文献:

[1] HASAR U C. Non-destructive testing of hardened cement specimens at microwave frequencies using a simple free-space method [J]. *NDT&E International*,

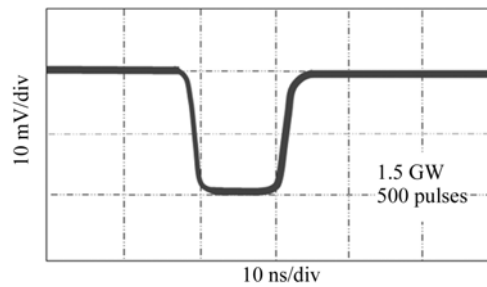


图 9 功率容量实验测试

Fig. 9 Experimental test of power capability

率容量测试结果可知,精密载运器的续航里程和 SOC 及功率输出成线性平缓上升,过 800 后基本维持在一定的水平上,说明精密载运器的微波光子供电具有持续性。从功率容量测试结果看,波形重复性很好且没有出现尾蚀现象,表明微波光子发射天线和硅整流二极管接收天线结构均可承受 1.1 GW 的微波光子功率,说明微波光子输电在纯电动型精密载运器中供电是可行的,能够达到微波光子输电精密载运器设计的动力性要求。

6 结 论

本文对微波光子输电精密载运器进行了介绍,在分析各组成部件之后,给出了微波光子输电的工作原理及结构示意图。建立了能量转换数学算法模型并进行了能量转换分析,通过 ADVISOR 模拟器在环境行驶工况下的运行,确定出精密载运器的电能 SOC 变化和功率输出状况。最后对系统进行了功率容量测试,测试结果表明,微波光子发射天线和硅整流电能接收天线结构均可承受 1.1 GW 的微波光子功率,微波光子输电在纯电动型精密载运器中供电是可行的,并且能够达到微波光子输电精密载运器的动力要求,本项研究对新能源精密载运器的开发与发展具有重要价值。

2009 (42):550-557.

[2] 李广凯,梁海峰,赵成勇,等. 几种特殊输电方式的分析比较和展望[J]. *中国电力*,2004,37(4):43-48.

LI G K, LIANG H F, ZHAO CH Y, et al. Comparison and prospect of several special technologies of power transmission[J]. *Electric Power*,2004,37(4):43-48.

- (in Chinese)
- [3] KEVIN R, HARVEY J W. Early commercial demonstration of space solar power using ultra-lightweight arrays[J]. *Acta Astronautica*, 2009 (65):1250-1260.
- [4] AKIRA O, HIROSHI N, JURO M, *et al.*. Development of a new type of electric off-road vehicle powered by microwaves transmitted through air[J]. *Journal of Terramechanics*, 2007, 44:329-338.
- [5] TUCKER C A, WARWICK K, HOLDERBAUM W. A contribution to the wireless transmission of power[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2013, 47: 235-242.
- [6] 王齐春,何建国. 微波光子研究动态[J]. *光电子技术*, 2002, 22(4):206-210.
WANG Q CH, HE J G. Development of research on microwave photonics [J]. *Optoelectronic Technology*, 2002, 22(4):206-210. (in Chinese)
- [7] 曹伟娜,潘炜,邹喜华,等. 光子型远程分布式微波信号接收码元速率估计[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(5):1-5.
CAO W N, PAN W, ZOU X H, *et al.*. Symbol rate estimation for remote distributed microwave signal reception using photonic technique [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(5):1-5. (in Chinese)
- [8] CHEN D Y, WANG L F, CHEN L H, *et al.*. The design method of extended range electric vehicles [J]. *Advanced Materials Research*, 2014(827):61-65.
- [9] CHEN D Y, WU H P, BAO J CH, *et al.*. Theory and technique on design of extended range in solar powered intellectual vehicles[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013(300-301): 199-202.
- [10] CHEN D Y, CHEN L H, GUO ZH, *et al.*. Research on electric vehicle using microwaves power [C]. 2013 *International Conference on Electrical, Control and Automation Engineering, Hong Kong*, 2013: 108-112.
- [11] CHEN D Y, CHEN L H, TIAN F, *et al.*. Study on photovoltaic array design for solar energy vehicle[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014 (494-495): 8-11.
- [12] CHEN D Y, CHEN L H, LI S S, *et al.*. Research on wireless power based on electric vehicle of extended range [C]. 2014 *International Conference on Mechanical Technology and Design, Manufacture and Automation Engineering*, 2014: 481-485.
- [13] 王耿,官春林,张小军,等. 应变式微型精密压电驱动器的一体化设计及其PID控制[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3):709-716.
WANG G, GUAN CH L, ZHANG X J, *et al.*. Design and control of miniature piezoelectric actuator based on strain gauge sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3):709-716. (in Chinese)
- [14] 张刚,刘品宽,张波,等. 直线电机精密运动平台轨迹跟踪控制器设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2):371-379.
GHANG G, LIU P K, ZHANG B, *et al.*. Design of trajectory tracking controller for precision positioning table driven by linear motor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2):371-379. (in Chinese)
- [15] 黑沫,范世殉,廖洪波,等. 精密谐波传动系统建模[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7):1842-1849.
HEI M, FAN SH X, LIAO H B, *et al.*. Modeling of precision harmonic drive system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7):1842-1849. (in Chinese)

作者简介:



陈丁跃(1960-),男,安徽安庆人,教授,主要从事微波光子输电、新能源精密载运工具设计制造及自动化、星载TDICCD抑振与控制等方面的研究。
Email: cdy868@163.com



张永辉(1982-),男,甘肃兰州人,硕士,讲师,主要从事精密载运工具电动助力转向特性仿真及台架检测设计的研究。Email: yonghuihappysky@163.com