

一种新型超高压直流等离子体变换器研究*

张迪^{1,2}, 张东来³, 王子才¹, 张华², 张莹⁴

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 深圳航天科技创新研究院 电力电子所, 广东 深圳 518057;

3. 哈尔滨工业大学(深圳) 机电工程与自动化学院, 广东 深圳 518055;

4. 深圳航天东方红海特卫星有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要: 等离子体高压电源是等离子体发生系统中核心关键的组成部分, 直接决定等离子体发生器的性能。传统的高压等离子电源具有体积重量大、效率低的特点, 无法在航空飞行器有限的体积范围内装载, 这是超高压产生等离子体方式的难点之一。以超高压直流电源(UHVDC)为核心, 提出了一种新型的多倍压整流谐振变换器, 提高了等离子体电源系统的效率, 减少了电源系统的重量和体积, 同时解决了高压保护的问题, 最终通过 8 kW 输出功率实验验证了方案的有效性, 其效率达 90%。

关键词: 超高压直流电源; 多倍压整流; LCC; 等离子体电源

中图分类号: TM89

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200217

中文引用格式: 张迪, 张东来, 王子才, 等. 一种新型超高压直流等离子体变换器研究[J]. 电子技术应用, 2020, 46(7): 122-126.

英文引用格式: Zhang Di, Zhang Donglai, Wang Zicai, et al. A novel ultra-high voltage plasma power converter[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(7): 122-126.

A novel ultra-high voltage plasma power converter

Zhang Di^{1,2}, Zhang Donglai³, Wang Zicai¹, Zhang Hua², Zhang Ying⁴

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Power Electronic & Motion Control Center, Shenzhen Academy of Aerospace Technology, Shenzhen 518057, China;

3. Power Electronic & Motion Control Research Center, Harbin Institute of Technology Shenzhen, Shenzhen 518055, China;

4. Market & Strategy Department, Shenzhen Aerospace Dongfanghong HIT Satellite Ltd., Shenzhen 518057, China)

Abstract: High voltage plasma power supply is the key component of plasma generation system, which directly determines the performance. The traditional high voltage plasma power supply has the characteristics of large volume and weight, low efficiency, and cannot be loaded in the limited volume range of aerial vehicles, which is one of the difficulties for generating plasma. In this paper, ultra-high voltage DC power supply(UHVDC) is taken as the core problem, and a novel multi-voltage rectifier resonant converter is proposed, which improves the efficiency, reduces the weight and volume of the power supply system, and solves the problem of high voltage protection. Finally, the system is verified by 8 kW output power experiments, and its efficiency reaches 90%.

Key words: UHVDC; multi-voltage rectifier; LCC; plasma power supply

0 引言

等离子体的应用已经扩展到航空领域。美国、俄罗斯、欧盟等航天大国对等离子体在航空中的应用进行了广泛深入的研究, 等离子体在航空中的应用主要集中在飞机减阻、隐身和提高发动机性能上^[1-4]。

等离子体电源系统主要由等离子体发生器、电源系统、储供系统和控制系统组成。目前, 等离子体在航空应用中的研究主要集中在等离子体产生机理、等离子体特

征参数诊断与控制、等离子体发生器和等离子体电源系统小型化等方面。等离子体电源系统将一次电源转换为超高压直流电源和等离子体发生器所需的其他负偏置电源。与传统工业等离子电源不同, 航空等离子电源对效率和功率密度提出了极高的要求。面向超高压变换需求, 高升压比所需的变压器结构, 需要同时兼顾体积和绝缘强度^[5-8]。

在超高压等离子体电源系统中, 当等离子体电压达到几千伏以上时, 受到变压器绝缘绕组过程、半导体器件和整流电源电压应力的限制, 电压主要通过倍压整流

* 基金项目: 中国博士后科学基金(2019M653065)

电源管理 Power Management

方式实现,利用增加串联倍压的级数来补偿元件的电压应力^[9-12]。

电压倍增技术广泛应用于激光、离子加速器、超高压电子显微镜以及医用 X 射线等高压小电流的应用场合。在变换器内部充入 SF6 实现高压绝缘,利用单相 Cockroft Walton 电压倍增器可实现 600 kV/10 mA 的超高压直流输出,而随着输出功率的进一步提高,容易导致输出电压纹波和输出电压跌落,而改进型全波 Cockroft Walton 电压倍增器实现了 600 kV/15 mA 的超高压直流输出,实现了极高的电压稳定度与极低的输出电压纹波^[13]。

为了提高电源的输出功率并降低系统的体积,本文提出了一种带有多倍压整流的新型超高压谐振功率变换器。

1 超高压直流(UHVDC)变换器分析

改进的超高压直流等离子电源包含低压侧和高压侧两部分,在低压侧,采用高频谐振功率变换器和高频变压器,转换为高频交流中间母线电压,使其具备基本升压能力,同时实现隔离作用。在高压侧采用双电压多倍压整流电路,通过合理地配置级数以产生所需的输出电压。

1.1 低压侧

为了提高超高压直流变换器的效率,谐振方式将极大地降低变换器损耗。LLC 和 LCC 是近年来串联和并联谐振软开关拓扑中应用最广泛的两种。两种拓扑同时具有串联谐振和并联谐振特点,有效克服了单一串联谐振或并联谐振的缺点。

面向高压大功率应用领域,尽管 LLC 变换器存在诸多优点,随着输出电压进一步升高,高压变压器的匝比也将随之升高,即变压器次级匝数升高,从而导致匝间电容和层间电容组成的变压器分布电容随之不断增大。由于 LLC 谐振变换器所需变压器的励磁电感相对较小,过大的分布电容使得谐振频率与工作频率相近,故分布电容对 LLC 谐振电路的影响较大,即 LLC 谐振变换器对高频变压器的分布电容提出了非常苛刻的要求,提高了高压变压器的设计难度。

此外,传统高压输出应用中,通常采用 LC 低通滤波器,而为实现高压绝缘,电感的体积也会随之增大。而整流二极管有可能处于硬关断,从而产生较高的损耗,考虑到系统的高集成度和可靠度,损耗易导致过热而损坏二极管。

相比 LLC 变换器,LCC 谐振变换器可充分利用高压变压器的分布电容,并使得分布电容成为谐振变换器必不可少的组成部分,LCC 变换器具有良好的电压增益特性和抵抗负载开路或短路能力的优点。由于谐振元件由三个无源器件构成,高频变压器的漏电感和寄生电容均可以参与变换器的工作过程中,该特点使其非常适用于高压直流电源场合。

LCC 变换器输出可直接采用单个电容的滤波结构,省去了滤波电感,同时采用全桥整流或倍压整流的整流二极管均工作在 ZCS 状态,降低在高压输出场合对二极管的耐压、功耗要求。

图 1 所示为全桥 LCC 谐振拓扑图,LCC 谐振变换器的谐振单元主要由三个谐振元件组成,包括串联谐振电感 L_s 、 C_s 和并联分布电容 C_p 。

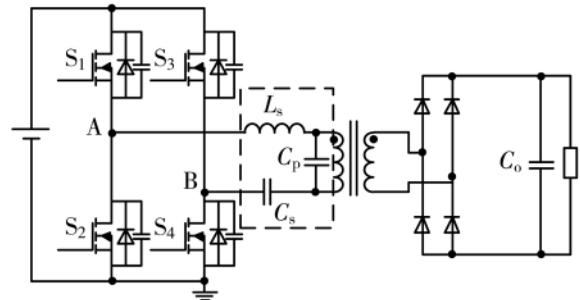


图 1 全桥 LCC 电路原理图

1.2 高压侧

通过 LCC 变换器和高压变压器,可实现初步的升压,而为进一步提高系统的输出电压,如前文所述,常用的倍压整流电路的基本结构主要包括 Cockroft Walton 倍压整流电路和 Scheakel 倍压整流电路等。考虑到超高压直流输出的需求,Scheakel 倍压电路对滤波电容的耐压值要求较高。因此,本文在设计中基于基本的 Cockroft Walton 倍压整流电路,采用了双电压 Cockroft Walton 倍压整流电路,如图 2 所示,构成了超高压直流变换器的基本结构。其中低压侧的两路 LCC 变换器作为第一级升压,高压侧的多级倍压整流作为第二级升压,最终电压输出 V_{out} 是变压器比和倍压整流器级数的乘积。

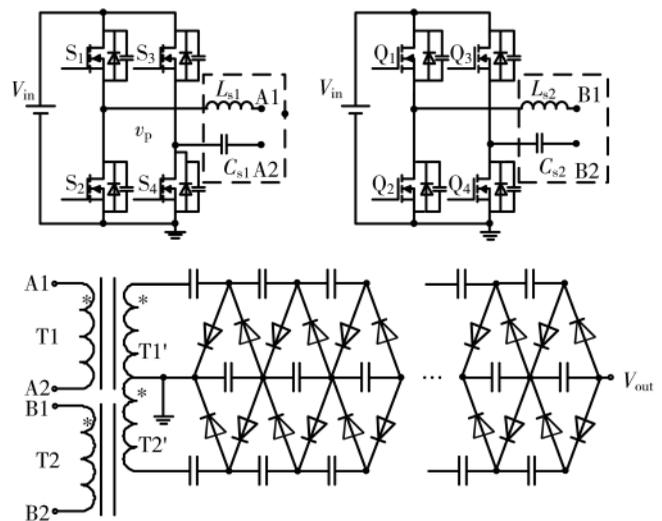


图 2 超高压直流变换器基本结构

2 超高压直流(UHVDC)变换器设计

2.1 超高压直流变换器原理设计

分析前,先做以下假设:(1)所有功率开关和二极

电源管理 Power Management

均为理想器件;(2)所有电感、电容和变压器均为理想元件;(3)输出电容 C_o 足够大,变压器匝比 N 为定值;(4)变换器采用变频控制策略,两个功率开关互补,对角线上的两个开关同时开关;(5)开关频率高于谐振频率。

简化后的 LCC 等效电路如图 3 所示。图 3 中 v_p 为经过逆变后得到的单相电压, R_e 为变换器的交流等效阻抗,采用基于傅里叶变换的基波分析法(FHA)对变换器的稳态特性进行分析。变压器原边端口电压为 V_N , 输出电流为 I_s , 相位相同,则等效变压器、整流电路和负载如式(1)所示, $R_e = v_N / i_s$ 。

$$\begin{cases} i_s = \frac{2I_o}{N\pi} \sin\omega t \\ v_N = \frac{N\pi}{\sqrt{2}} v_o \\ R_e = N^2 \pi^2 R_L / 2 \end{cases} \quad (1)$$

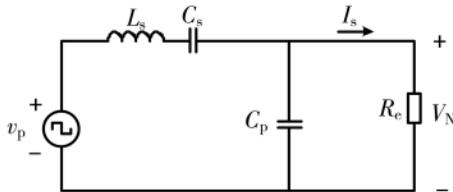


图 3 简化后的 LCC 等效电路

采用正弦稳态分析方法,在等效交流电路中,从功率平衡、电容器充放电过程的基本关系来看,LCC 功率的基本关系满足式(2)所示的关系。

$$\begin{cases} I_{L_s,P} = \frac{\pi V_o I_o}{2V_{in} \cos\varphi} \\ C_s = \frac{I_{L_s,P}}{\omega_s V_{C_s,P}} \\ C_p = \frac{N(1+\cos\theta)I_{L_s,P}}{2\omega_s V_o} \\ N = \frac{V_o \sin^2(\theta/2)}{V_{in} \cos\varphi} \\ R_e = \frac{[1+0.27\sin(\theta/2)]^2 R_o}{2N^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $I_{L_s,P}$ 是串联电感 L_s 的峰值电流, φ 是 i_{L_s} 和 v_{AB} 之间的滞后角, N 是变压器的比, ω_s 是开关角频率, θ 是二次整流的导通角。通过对高频功率变压器的迭代设计以及谐振法测量方式,得到变压器的原边、副边等效分布式电容参数,即 C_p 和 C_s ,从而进一步等效至谐振参数中,进而利用分布式电容实现高效变换。

在完成初步升压和高效谐振变换后,所得到的高频交流中间母线电压,需要通过进一步的倍压整流方式,实现多级倍压,以满足最终的超高压输出能力。如图 2 所示,利用双电压的平衡式倍压整流方式,可有效地改善输出纹波,防止电压过大跌落。

以单边的倍压整流电路为例,如图 4 所示。电路输出空载情况下,每经过一级电压可以升高一倍,其输出电压可近似等于 $2MV_m$,而负载接入后,电压会随纹波、频

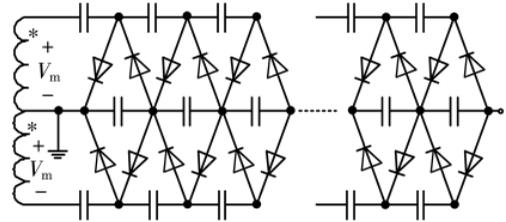


图 4 M 级对称式倍压整流电路

率、整流电容容量和倍压级数变化而变化。由于前级为 LCC, 占空比为 50%, 其输出电压和纹波满足式(3)。

$$\begin{cases} V_{out} = 2MV_m - \frac{I_o}{Cf_s} \left(\frac{1}{6} M^3 + \frac{3}{8} M^2 + \frac{M}{12} \right) \\ \Delta V_{out} = \frac{I_o}{Cf_s} \left(\frac{1}{16} M^2 + \frac{M}{8} \right) \end{cases} \quad (3)$$

通过分析可知,对称是倍压整流方式,相比于单边倍压整流方式,虽然器件数量增加,但是电压跌落和输出纹波都会得到较大改善,考虑到电源系统的输出性能,最终采用了对称式倍压整流方式。

2.2 超高压直流变换器器件设计

航空领域应用的超高压设备对体积和重量提出了非常严格的要求,全波对称式倍压整流结构主要由二极管和电容器按一定顺序连接,为了显著提高超高压直流电源的功率密度,本文从以下两个方面对倍增整流器件进行设计:

(1)由式(3)可知,通过增加倍压整流电路的工作频率,可以降低选用整流电容的容值,使整流二极管工作在软关断模式下,从而降低二极管的电压应力和热耗,提高效率。

(2)将倍压整流器中的二极管和电容根据具体的体积和连接方式进行集成,从而显著降低体积和重量。图 5 为实际设计所用的集成化器件及功率变压器。图 5(a)为定制化高集成高压电容器;图 5(b)为定制化集成的高压二极管;图 5(c)为实验设计的高频功率变压器。

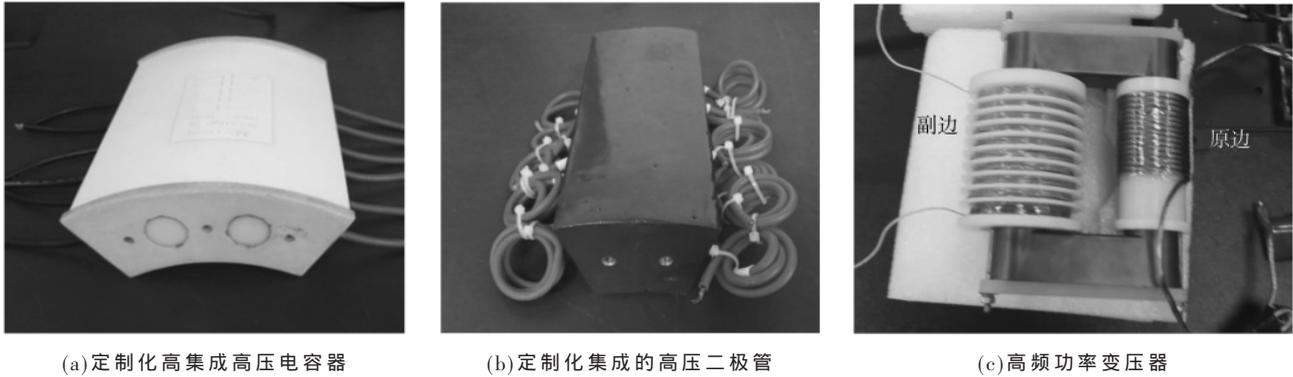
在整个超高压直流等离子电源系统中,包含了一些其他的电源。由于直流电源叠加在超高压直流输出上,高压电源的正输出端与大地相连,以提高系统的安全性。根据超高压直流等离子电源系统的基本要求,结构的空间距离极其有限,因此一般采用高压绝缘油或 SF6 气体进行绝缘。

3 超高压直流(UHVDC)变换器实验验证

通过原理性实验验证了超高压直流变换器输出特性。以 25 号变压器油作为绝缘介质,超高压直流原理功率实验采用等效负载完成,输入电压 330~365 V, 输出最大功率 7.2 kW, 最大输出电压 70.3 kV, 最大效率 90%, 如表 1 所示。实验设备如图 6 所示,输出电压为 70.3 kV 时测试输出电压波形,如图 7 所示。

4 结论

本文提出了一种新型的超高压直流变换器结构,通



(a) 定制化高集成高压电容器

(b) 定制化集成的高压二极管

(c) 高频功率变压器

图5 设计所用的集成化器件及功率变压器

表1 输出特性测试

输入电压/V	输出电压/kV	原边电流/A	输出功率/W	输出纹波/V	输出纹波率/%
331	60.3	14.5	4 500	1 500	2.49
365	70.3	16.8	6 900	1 880	2.67



图6 超高压直流变换器功率实验平台

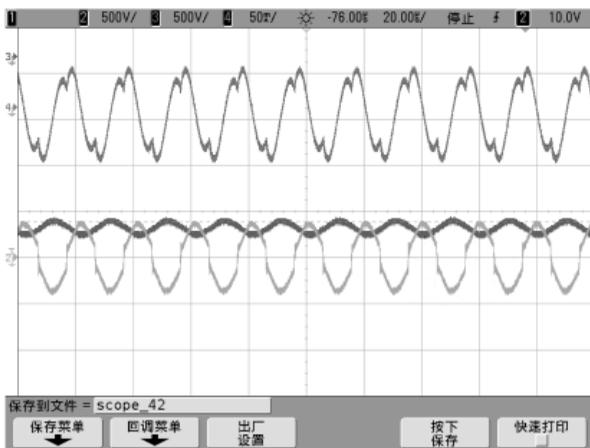


图7 输出70.3 kV测试波形

过将LCC和全波对称性多倍压整流结构相结合,可以提高传统的高功率密度超高压直流结构的性能,利用高频功率变压器的分布式电容,可以有效地改善变换器性

能,同时结合定制化的高压器件,有效地实现高功率密度特性,通过实验验证,输出满足设计要求,新型变换器的最大效率可达90%。

参考文献

- [1] MATSUNO T, KAWAZOE H, NELSON R. Aerodynamic control of high-performance aircraft using pulsed plasma actuators[C]. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2009: 697.
- [2] KANAZAKI M, MATSUNO T, MAEDA K, et al. Wind tunnel experiment based multi-variable aerodynamic design for drag reduction around cylinder using plasma actuators[C]. 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation(CEC) IEEE, 2015: 589-595.
- [3] XU J, BAI B, DONG C, et al. Evaluations of plasma stealth effectiveness based on the probability of radar detection[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(6): 938-944.
- [4] LIU Y, WANG J, MIAO L, et al. Analysis on electromagnetic characteristics and military application of non-magnetized discharge plasma[C]. Selected Proceedings of the Photoelectronic Technology Committee Conferences, 2015.
- [5] BELLAR M D, WATANABE E H, MESQUITA A C. Analysis of the dynamic and steady-state performance of Cockcroft-Walton cascade rectifiers[C]. 21st Annual IEEE Conference on Power Electronics Specialists, 1990: 477-484.
- [6] BHASKAR M S, SANJEEVIKUMAR P, BLAABJERG F, et al. Non isolated and non-inverting Cockcroft-Walton multiplier based hybrid 2Nx interleaved boost converter for renewable energy applications[C]. 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), 2016: 146-151.
- [7] CUNHA J, PINTO S, SILVA J F. Cockcroft-Walton based HVDC system[C]. 2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2017: 1-6.
- [8] LI L, UTTAMCHANDANI D. Design and implementation of MEMS Cockcroft-Walton voltage multiplier[J]. Electronics

电源管理 Power Management

Letters, 2009, 45(1): 36-37.

[9] BELLAR M D, WATANABE E H, MESQUITA A C. Analysis of the dynamic and steady-state performance of Cockcroft-Walton cascade rectifiers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1992, 7(3): 526-534.

[10] REGINATO L L, SMITH B H. A 600-kV, 10-mA DC Cockcroft-Walton rectifier using silicon diodes at 100 kc[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1965, 12(3): 274-278.

[11] YOUNG C M, CHEN H L, CHEN M H. A Cockcroft-Walton voltage multiplier fed by a three-phase-to-single-phase matrix converter with PFC[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(3): 1994-2004.

[12] IQBAL S. A three-phase symmetrical multistage voltage multiplier[J]. Power Electronics Letters, IEEE, 2005, 3(1): 30-33.

[13] SU T L, ZHANG Y M, CHEN S W, et al. A 600 kV 15 mA Cockcroft - Walton high-voltage power supply with high stability and low-ripple voltage[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2006, 560(2): 613-616.

(收稿日期: 2020-03-22)

作者简介:

张迪(1985-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向: 高压高频变换器、电推进电源。

张东来(1973-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 航天器电源、建模与控制、无损检测。

王子才(1932-), 通信作者, 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 自动控制、系统仿真领域以及复杂大系统分布式仿真工程设计方法, E-mail: wzc@hit.edu.cn。

(上接第 117 页)

计算机应用, 2006(S2): 307-309.

[10] 张震波, 杨鹤标, 马振华. 基于 LRU 算法的 Web 系统缓存机制[J]. 计算机工程, 2006, 32(19): 68-70.

[11] 段翰聪, 卢显良, 宋杰. 基于 EPOLL 的单进程事件驱动通信服务器设计与分析[J]. 计算机应用, 2004, 24(10): 36-39.

[12] 潘圆圆, 李德华. C++ 中的原子操作及其使用[J]. 计算机与数字工程, 2013, 41(11): 1853-1855.

[13] 赵鲲鹏, 苏葆光. Linux 内存管理中的 Slab 分配机制[J]. 现代计算机, 2006(5): 91-93.

(收稿日期: 2019-10-08)

作者简介:

黄向平(1982-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 民航信息化技术。

彭明田(1967-), 男, 硕士研究生, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 民航信息化技术。

杨永凯(1977-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 民航信息化技术。

(上接第 121 页)

Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2008.

[5] 张登, 付寒瑜, 杨亮. 开关电源的过流保护[J]. 舰船电子对抗, 2008, 31(1): 115-117.

[6] 游江, 孟繁荣, 张敬南. 基于回路成形的并联 DC/DC 变换器均流控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 585-593.

(收稿日期: 2020-01-30)

作者简介:

贺啟峰(1987-), 通信作者, 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向: 混合集成抗辐照开关电源, E-mail: a9661355@163.com。

高东辉(1990-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 电力电子。

徐成宝(1966-), 男, 研究员级高级工程师, 主要研究方向: 开关电源控制与设计。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所