

基于 GaN-HEMT 并联的航空电机驱动系统设计研究^{*}

张 亮^{1,2}, 花 婷¹, 朱纪洪², 杨 婷¹, 陈国栋³, 马 超⁴

(1. 南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167;

2. 清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084;

3. 上海电气集团输配股份有限公司, 上海 200240;

4. 江苏南自通华电力自动化股份有限公司, 江苏 南京 211102)

摘 要: 在深入了解宽禁带电力电子器件的发展现状和开关特性基础上, 提出了一种基于 GaN-HEMT 并联的航空电机驱动系统, 开展了 GaN-HEMT 并联的驱动电路及数字控制器平台设计与实践。搭建了试验系统, 进行了相关测试。试验结果验证了设计的正确性。

关键词: 航空电机驱动器; 宽禁带器件; 数字控制器

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)05-0025-06

Design and Research of High Frequency Aircraft Motor Drive System Based on GaN-HEMT Paralleling^{*}

ZHANG Liang^{1,2}, HUA Ting¹, ZHU Jihong², YANG Ting¹, CHEN Guodong³, MA Chao⁴

(1. School of Power Electric Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Technology Center, Shanghai Electric Power Transmission & Distribution Group, Shanghai 200240, China;

4. Jiangsu Nicetown Electric Power Automation Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: A motor drive system based on GaN-HEMT paralleling was proposed for an unmanned aerial vehicle. The characters of GaN-HEMT were described in details. The main circuit, drive circuit and digital control system were designed. A prototype was established and experiments were carried out.

Key words: aircraft motor driver; wide band gap devices; digital controller

0 引 言

随着载人航天、深空探测等前沿技术的发展, 未来航天器的功能越来越强大, 任务越来越复杂, 对动力系统的设计要求也不断提高, 轻质化和高功率密度一直是努力的方向。高频电力电子变换器是实现系统高功率密度的有效方法, 可带来诸

多优点(如被动滤波元件体积和重量的减小等), 进而提高了飞行器的续航时间。

在传统航空电机驱动控制应用场合, 基于硅(Si)材料器件的变换器, 其开关频率通常局限在几十 kHz 以下, 主要原因在于: 高频工作条件下, 硅材料器件会产生较大的功率损耗, 不仅降低了变换器效率, 同时还会影响系统的散热设计; 现有

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51607084); 国家重点研发计划(2017YFB0903504); 江苏省重点研发计划(BE2017169); 江苏六大高峰人才计划(2015-ZNDW-008)

作者简介: 张 亮(1982—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为大功率电力电子技术。

花 婷(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为大功率电力电子技术。

朱纪洪(1968—), 男, 教授, 研究方向为航空驱动及控制。

封装技术在一定程度上也限制了 Si 材料器件的开关频率提高。

继 Si 和砷化镓 (GaAs) 之后, 半导体材料出现了第三代以氮化镓 (GaN) 为代表的宽禁带半导体材料, 具有临界击穿电场高、饱和电子速度高、电子密度高、电子迁移率高及导热率高等特点, 适用于高频、高压、高温、大功率的抗辐射等级高的半导体材料^[1-4]。然而, 由于现有 GaN 器件的额定容量有限, 在高压大容量航空电机驱动器中探索应用 GaN 器件, 还需采用器件并联的方式。

以航空用多相永磁同步电机 (Multi-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor, M-PMSM) 作为研究对象, 开展基于 GaN-HEMT 并联的电机驱动器设计研究。主要工作包括: 器件选型、主电路设计、驱动电路设计、数字控制系统的硬件与软件设计等。最后, 构建了样机试验平台, 开展了相关试验验证。

1 GaN-HEMT 器件的工作特性分析

图 1 所示为 Si-MOSFET 与 GaN-FET 内部结构以及图形符号。GaN-FET 与传统的 Si-MOSFET 相比, 采用水平结构, 体内没有形成 PN 结, 即体内不存在二极管, 无反向恢复问题。DS 间的导体是通过中间电子层导通, 因此理论上可实现双向导通。

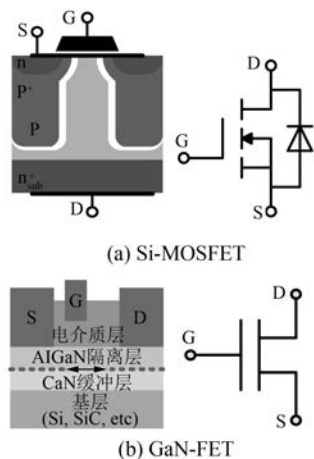


图 1 GaN 和 Si 材料器件结构对比

另外, GaN 晶体管是基于耗尽型技术, 即无驱动时处于常通状态, 高压 GaN 器件通常采用组合式结构, 即由 1 个低压 Si-MOSFET 和 1 个高压 GaN 晶体管级联组成, 通过级联方式将常通型器

件转变为常断型器件^[5-8], 称为 GaN 氮化镓功率高电子迁移率晶体管 (GaN High Electron Mobility Transistor, GaN-HEMT), 如图 2(a) 所示。其中, Si-MOSFET 的漏极 D 与高压 GaN 晶体管的源极 S 短接, Si-MOSFET 的源极 S 与 GaN 晶体管的栅极 G 短接。控制 Si-MOSFET 的电压即可控制 GaN 晶体管驱动电压的负值, 实现对 GaN 晶体管的驱动。其伏安特性如图 2(b) 所示。

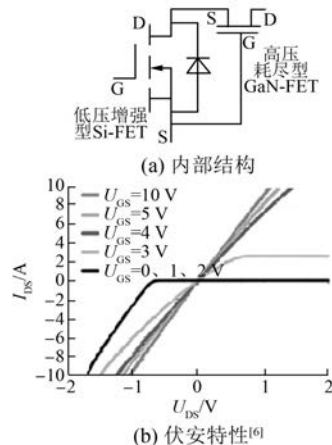


图 2 高压 GaN HEMT 伏安特性

与低压 GaN 晶体管 (低压 GaN 晶体管驱动电压为 $-5 \sim -6$ V, 约 -5 V 时完全导通) 不同, 高压 GaN 耗尽型晶体管的驱动电压范围为 $-30 \sim -2$ V (低于 -5 V 时完全导通), 驱动窗口将有足够的裕量^[9-11]。

高压 GaN-HEMT 的工作原理概括如下:

(1) 导通时, 低压 Si-MOSFET 的输入电容 C_{iss} 充电至门槛电压, Si-MOSFET 导通, 其漏源极电压减小, 当低压 Si-MOSFET 的漏源极电压超过常通型 GaN 晶体管的门槛电压时, 氮化镓器件导通。

(2) 关断时, 低压 Si-MOSFET 先关断, 其漏源极电容及常通型 GaN 晶体管的源极-栅极电压上升, 当 GaN 晶体管的驱动电压低于门槛电压时, GaN 晶体管关断。

表 1 给出了额定工作电压电流相近条件下典型 Si 材料器件和 GaN 器件的参数对比, 其中, Si-MOSFET 为英飞凌公司的 IPA60R160C6, GaN-HEMT 为 Transphorm 的 TPH3006PS^[12]。

从表 1 可以看出, 两种器件具有相似的导通损耗 R_{DS} , 然而由于 GaN-HEMT 栅极电荷 Q_g 少, 栅漏极电荷少以及反向恢复电荷 Q_{rr} 也较少, 因此

表 1 Si-MOSFET 与 GaN-HEMT 参数对比

参数	IPA60R160C6	TPH3006PS
U_{DS}/V	600	600
R_{DS}/Ω	0.14	0.15
Q_g/nC	75	6.2
Q_{gd}/nC	38	2.2
$C_{o(er)}/pF$	66	56
$C_{o(tr)}/pF$	314	110
Q_{rr}/nC	8 200	54
t_{rr}/ns	460	30

可降低半导体器件损耗,提高变换器转换效率^[16]。另外,由于寄生电容容量小,GaN-HEMT 的开通和关断时间被缩短,因此高压 GaN-HEMT 比起高压 Si-MOSFET 更适合应用于高频场合。在一些微小功率场合,GaN-HEMT 的开关频率可达到约 1 GHz^[8]。

2 航空用 M-PMSM 驱动器主电路设计

M-PMSM 具有使用寿命长、体积小、质量轻、转速高、可靠性高、散热容易、出力大、转动惯量小、余度控制方便等诸多优点,目前正向超高速、大转矩、高功率、微型化、多功能方向发展,在航空电气上应用得到了高度重视。一些国家的军用无人飞机,如法国的“美洲豹”、美国的“捕食者”、“全球鹰”等,采用了基于无刷直流电机的电动舵机;美国国家航空航天局先后在 C141 运输机和 F16 等新型战斗机上试验新型电动舵机,英国国防部也计划在该国的先进军用飞机上考虑使用新型永磁电机及驱动系统;此外,美国的波音公司、欧洲的空客公司等企业也正在联合相关科研机构研究新一代大型民用飞机用新型永磁电机^[13-14]。

目前,航空系统中的飞控动作器、油泵以及环控等系统均需要电机驱动器,且功率需求日趋增加。但是,受限于供电电压等级,提升电流才能够输出足够的功率。然而,电流的增大会带来更大的耗散功率和发热量,间接增加了航空设备整个系统的无效载荷,缩短了航程与航时^[9]。GaN-HEMT 所具有的耐高温、反向恢复电流几乎为零的特性,可极大地提高电机驱动器的开关频率性能,减小耗散功率、体积和重量。

2.1 主电路拓扑设计

在工业领域,电机驱动器的电路拓扑主要为三相全桥电路,如图 3 所示。

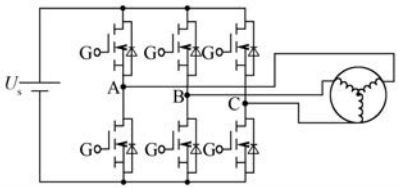


图 3 全桥型主电路拓扑

考虑到通用性和容错设计,本文所设计的航空用 M-PMSM 主电路采用模块化结构,即每相用一个 H 桥独立供电。另外,由于 GaN-HEMT 的容量限制,采取器件并联的方式,如图 4 所示。

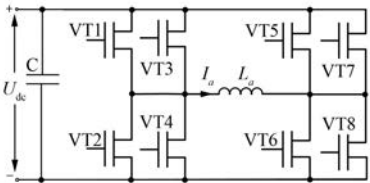


图 4 每相 H 桥独立供电拓扑

忽略器件导通压降,开关损耗以及线路损耗等,作如下定义。

开关函数 S_k :

$$S_k = \begin{cases} 1, & \text{上管导通,下管关断} \\ 0, & \text{下管导通,上管关断} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $k=a,b,c$ 。

电机驱动器输出电压电流方程可简单描述如下:

$$\begin{cases} U_k = S_k U_{dc} \\ L_k \frac{dI_k}{dt} = U_k \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_k ——输出电压;
 U_{dc} ——直流侧电压;
 L_k ——电机绕组电感;
 I_k ——输出电流亦即控制对象。

2.2 主电路参数设计

本文设计的电机驱动器样机额定功率为 15 kW,母线电压按某系统的实际需求选为 110 V 而非 270 V,同时直流环节主要由外部储能电池供电,故直流侧电容容量不必取值过大,根据式(3)来计算^[15]:

$$C_{DC} \geq \frac{T_{SW} S_n}{2U_{dc} (\Delta U_{dc})^2} \tag{3}$$

式中： U_{dc} ——直流侧电压，取 110 V；
 ΔU_{dc} ——纹波电压，取 10%；
 S_n ——额定容量，取 15 kW；
 T_{SW} ——开关周期。

开关频率取 100 kHz，开关周期即为 10 μ s，计算得到电容容量约为 5.6 mF。

选用 Transphorm 公司的氮化镓功率器件 TPH3205WS^[15]，相关参数如表 2、表 3 所示。

表 2 中， U_{DS} 表示氮化镓场效应管漏极和源极两端所能承受的最大安全直流电压， I_{DM} 表示漏极安全范围内的最大直流电流， $R_{DS(on)}$ 表示开关管开通后，漏极和源极两端之间的最大阻值， Q_{rr} 表示开关管反向恢复电荷（更小的反向恢复损耗）。

表 2 TPH3205WS 相关参数

U_{DS}/V	I_{DM}/A	$R_{DS(on)}/m\Omega$	Q_{rr}/nC
600	140	63	138

表 3 TPH3205WS 开关时间

$t_{d(on)}/ns$	t_r/ns	$T_{d(off)}/ns$	t_f/ns
7.2	4.6	12	6.5

TPH3205WS 的开关时间如表 3 所示，由电压延迟时间 $t_{d(on)}$ 、电压上升时间 t_r 、电流下降时间 $T_{d(off)}$ 和过渡时间 t_f 组成，约为 30.2 ns。

2.3 驱动电路设计

本文针对 GaN-HEMT 并联设计了高频驱动电路，采用 Silicon Labs 公司的双隔离驱动芯片 Si8235，原理图如图 5 所示。

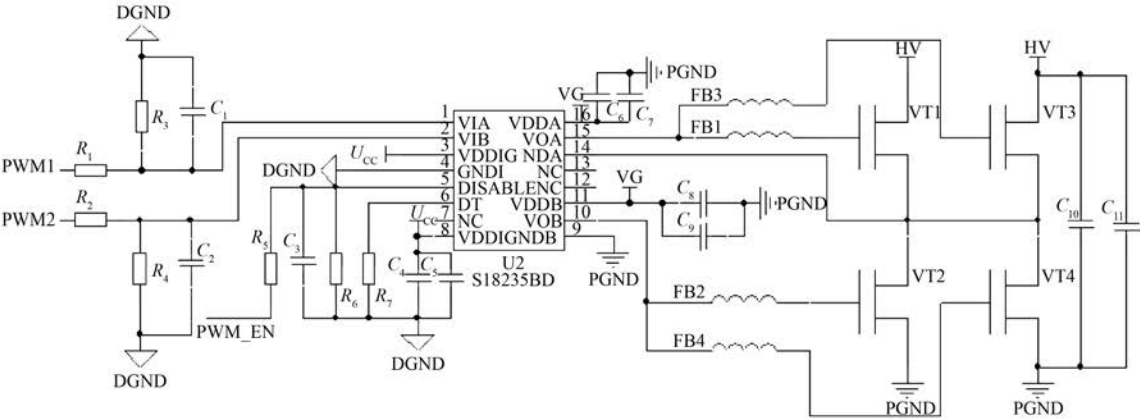


图 5 GaN-HEMT 驱动电路原理图

GaN-HEMT 功率管并联驱动电路设计注意事项如下：(1) 每个独立功率管 G 极需放置 80~120 Ω (100 MHz) 的磁珠，若 GS 间设有放电电阻，则必须位于该磁珠前；(2) 上下桥臂的功率管 DS 间设置至少 2 个约 100 nF 的去耦电容。

由于 GaN-HEMT 是 Si-MOSFET 与 GaN-FET 级联而成，相对 Si-MOSFET 的主要优势为更低的内部寄生电感及更高的开关速度。但是在开关过程中，在 PCB Layout 输入端和输出端的寄生电感会引起明显的过冲及振荡，会导致系统的稳定性降低。如图 6 所示，寄生电感被表示为 L_{s1} 、 L_{d1} 、 L_{s2} 和 L_{d2} 。

在 PCB 布线时应尽力降低电源与地连接线

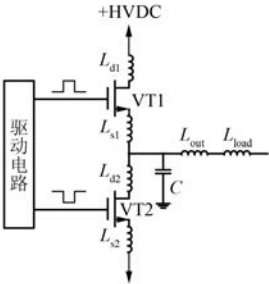


图 6 PCB Layout 的寄生参数

的阻抗，并使旁路电容尽可能接近功率管输出端，以提高功率管的高频特性。为保证 GaN-HEMT 并联功率管驱动波形的一致性，要求在布局布线时两个并联功率管的走线并列，并保证长度一致，PCB 尽量对称布局。

3 数字控制系统设计

本文采用 DSP+FPGA 作为控制系统的核处理器^[16],其中 DSP 采用 TMS320F28335 芯片,主要负责控制算法;FPGA 采用 Altera 公司 Cyclone 系列 EP4CE6F17C6N,主要实现 PWM 驱动、死区逻辑、故障保护等功能。DSP 与 FPGA 之间采用高速并行总线进行信息的实时交互。DSP 芯片选取,考虑能简化部分外围数字逻辑电路,并且能保证系统的实时性和高控制精度,FPGA 芯片选取,需要考虑可扩展引脚数目以及可编程逻辑资源容量。控制系统的整体框图如图 7 所示。

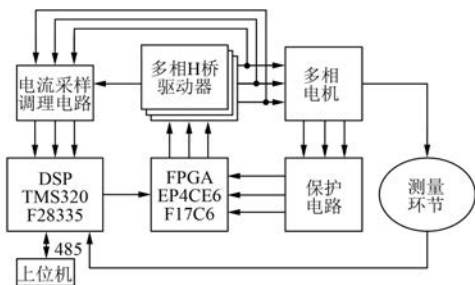


图 7 控制系统整体框图

根据电动舵机系统的工作原理,控制系统相关功能按照图 8 进行合理划分。其中,DSP 芯片主要承担的控制功能有:数据采集、转子位置检测、舵机控制、通信、故障数据存储、心跳监视等;FPGA 芯片主要承担的控制功能有:接口扩展、保护逻辑、死区逻辑、心跳监视等。DSP 芯片与 FPGA 芯片通过高速并行总线进行信息交互,协调其他外部设备完成控制工作。

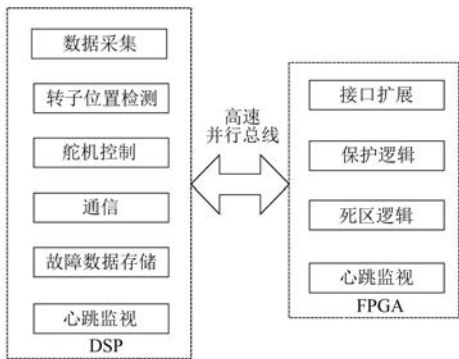


图 8 控制软件功能划分

各功能模块采用模块化设计,DSP 主程序通过分时调用各子模块,驱动电动舵机按照预期目

标进行响应。

DSP 芯片中设置 MAIN 函数,依据驱动系统控制需求,按照如图 9 所示流程进行分步骤控制和对子模块的调用。对 DSP 进行外设、中断、控制参数进行初始化,然后进行系统控制流程。

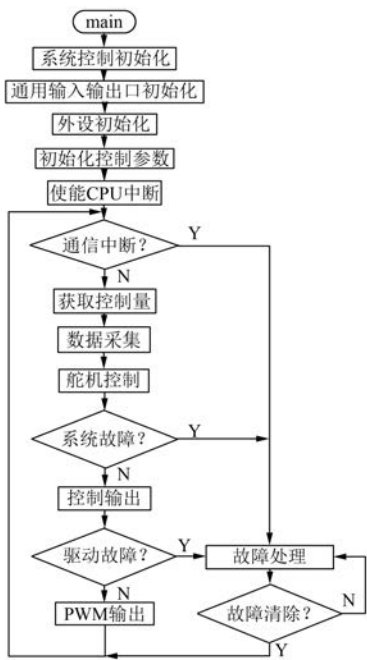


图 9 DSP 主程序流程图

4 试验研究

为了验证本文设计的基于 GaN-HEMT 并联的电机驱动系统,实验室搭建了额定功率 15 kW、直流母线电压 110 V、功率管并联的 H 桥电路及其控制系统物理试验平台,如图 10 所示,其中直流部分采用 CHROMA 公司的可编程直流电源来模拟。

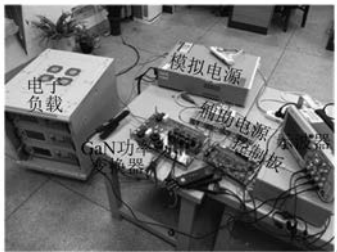


图 10 基于 GaN-HEMT 并联的高频变流器试验系统

测量高频波形时,应尽量减少测量过程中可能引入的电感对开关波形的影响,示波器探头的尖端与地端应直接连接到测试点以缩短测试路径。可以将示波器探头的尖端直接与测量点焊

接,用一个较短的接地导线将示波器地端焊接到PCB板的接地平面,示波器测试高频开关波形的方方法如图11所示。

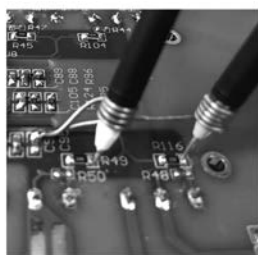


图11 示波器测试高频开关波形的方方法

控制系统输出频率为100 kHz的PWM驱动波形,占空比为50%,上、下桥臂功率管死区设置为200 ns,波形如图12所示。

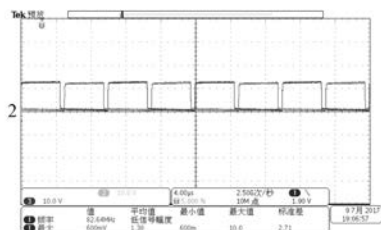


图12 高频方波下的 GaN-HEMT 驱动波形

为测试并联功率管开关波形的一致性,通过可编程序电源给定母线电压110 V,控制系统输出100 kHz、占空比为50%的方波,并联功率管开关波形如图13所示,可以看到,开关波形一致性较好。

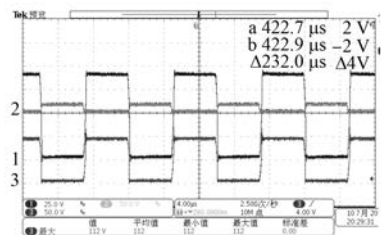


图13 并联功率管开关波形

5 结 语

本文探索了 GaN-HEMT 在航空电机驱动上的应用,提出了一种基于 GaN-HEMT 并联的每相 H 桥独立供电电路设计,选用 Transphorm 公司的 GaN 器件 TPH3205WS 作为主功率管,完成了驱动电路设计和数字控制系统开发。最后,搭建了试验系统,开展了相关测试研究。

【参 考 文 献】

- [1] 张波,邓小川,陈万军,等.宽禁带功率半导体器件技术[J].电子科技大学学报,2009,38(5): 618-623.
- [2] KHAN M A. High electron mobility transistor based on a GaN-AlGaIn heterojunction[J]. Applied Physics Letters, 1993, 63(9): 1214-1215.
- [3] 张金凤,郝跃. GaN 高电子迁移率晶体管的研究进展[J]. 电力电子技术, 2008, 42(12): 63-66.
- [4] 孙彤. 氮化镓功率晶体管应用技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [5] LIDOW A, STRYDOM J, ROOIJ M D, et al. GaN transistors for efficient power conversion; second edition[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.
- [6] HUANG X C, LIU Z Y, LI Q, et al. Evaluation and application of 600 V GaN HEMT in cascode structure [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(5): 2453-2461.
- [7] 崔梅婷. GaN 器件的特性及应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [8] 赵正平. GaN 高频开关电力电子学的新进展[J]. 半导体技术, 2016, 41(1): 1-9.
- [9] HUANG X C, LI Q, LIU Z Y, et al. Analytical loss model of high voltage GaN HEMT in cascode configuration [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(5): 2208-2219.
- [10] 秦海鸿,荀倩,聂新,等. SiC 器件在航空二次电源中的应用分析及展望[C] // 第七届中国高校电力电子与电力传动学术年会 (SPEED2013) 论文集, 2013.
- [11] 任小永, David Reusch, 季澍, 等. 氮化镓功率晶体管三电平驱动技术[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 202-207.
- [12] TPH3205WS Data Sheet[Z]. Transphorm Preliminary Data, 2014.
- [13] 荀倩. 飞行器永磁同步电动舵机控制系统研究与设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [14] 苏翀. 飞行器电动舵机设计与研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [15] BUENO E J, COBRECES S, FRANCISCO J. Calculation of the DC-bus capacitors of the back to-back NPC converters [C] // International Power Electronics & Motion Control Conference, 2009: 137-142.
- [16] 秦文甫. 基于 DSP 的数字化舵机系统设计与实现[D]. 北京: 清华大学, 2004.

收稿日期: 2017-11-20