◇ 研究报告 ◇

小型化相控参量阵声呐发射系统设计与实现*

孟新宝^{1,2,3} 周 天^{1,2,3,4} 朱建军^{1,2,3,4†} 李 静^{1,2,3} 孙世博⁴

(1 哈尔滨工程大学水声技术全国重点实验室 哈尔滨 150001)

(2 工业和信息化部海洋信息获取与安全工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工程大学) 哈尔滨 150001)

(3 哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

(4 哈尔滨工程大学三亚南海创新发展基地 三亚 572000)

摘要:针对相控参量阵声呐发射系统体积和质量大,难以搭载于水下小平台使用的问题,重点研究相控参量阵声呐发射系统的小型化、高集成度设计技术,设计并实现一种小型相控参量阵声呐发射系统。首先,基于发明问题解决理论中的剪裁思想,简化设计D类发射机功率放大电路的结构,减小多通道发射系统的体积。其次,联合磁芯几何常数法和脉冲变压器设计技术设计微型变压器,减小变压器体积的同时提升系统功率密度。与传统设计方法相比,系统电路整体体积缩小了24.6%,功率密度提升了27.3%。实测相控角度误差不超过0.3°,参量阵原频声源级可达236.7 dB,差频声源级可达200.5 dB,以小型化发射系统实现了相控参量阵的精准相控发射和高原频声源级输出。

关键词:相控参量阵;声呐发射机;微型变压器;小型化;D类功放

中图法分类号: TB565; TB566; TN722 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2024)06-1265-07 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2024.06.009

Design and implementation of a miniaturized phased parametric array sonar emission system

MENG Xinbao^{1,2,3} ZHOU Tian^{1,2,3,4} ZHU Jianjun^{1,2,3,4} LI Jing^{1,2,3} SUN Shibo⁴

(1 National Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

(2 Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security (Harbin Engineering University),

Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150001, China)

(3 College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

(4 Sanya Nanhai Innovation and Development Base, Harbin Engineering University, Sanya 572000, China)

Abstract: In order to solve the problem of large volume and high weight of phased parametric array sonar emission system, which is difficult to carry a small underwater platform, this paper focuses on the miniaturization and high integration design method of phased parametric array sonar emission system. A small phased parametric array sonar emission system is designed and implemented. Firstly, based on the tailoring idea in the theory of inventive problem solving(TRIZ), the structure of the power amplifier circuit of class D transmitter is simplified and the volume of the multi-channel transmitter system is reduced. Secondly, the miniature transformer is designed by combining the core geometric constant method and the pulse transformer design technology to reduce the transformer volume and improve the power density of the system. Compared with the traditional design method, the overall volume of the system circuit is reduced by 24.6%, and the power

²⁰²³⁻⁰⁸⁻¹³ 收稿; 2023-10-31 定稿

^{*}国家自然科学基金面上项目 (42176188), 海南省自然科学基金项目 (421CXTD442)

作者简介: 孟新宝 (1996-), 男, 内蒙古赤峰人, 博士研究生, 研究方向: 非线性声呐技术, 海底掩埋目标探测。

[†]通信作者 E-mail: zhujianjun@hrbeu.edu.cn

density is increased by 27.3%. The measured phase control angle error is less than 0.3° , and the original frequency sound source level of the parametric array can reach 236.7 dB the differential frequency source level can reach 200.5 dB. The accurate phase-controlled emission and high original frequency sound source level output ability of the phased parameter array are realized by a miniaturized transmission system.

Keywords: Phased parametric array; Sonar transmitter; Miniature transformer; Miniaturization; Class D power amplifier

0 引言

近年来,近海底声学观测与测绘对小型水下移 动平台的需求越来越大,相应的对平台声学载荷的 体积和质量指标也提出了更高要求^[1-7]。参量阵 声呐具有小孔径基阵可相控发射低频、宽带、无旁 瓣高指向性探测声束的特点^[8-11],能以优越的便 携性实现海洋环境及掩埋目标物的高分辨探测,水 下小平台搭载使用潜力巨大。目前,国内外均研制 了适用于水下无人航行器的参量阵声呐,如德国 Innomar 公司的standard-rov型、英国Tritech 公司 的SeaKing、中国科学院声学研究所的PLS 系列参 量阵声呐。而这些声呐的相控探测能力较弱,商用 参量阵声呐系统仍存在体积和质量较大、不适用于 小平台搭载的问题。如standard-rov型系统的电子 舱直径 28 cm、长75 cm、质量 58 kg,换能器直径 47 cm、厚度 6 cm、质量 32 kg。

在传统声呐发射系统设计中,研究人员普遍采 用匹配或滤波技术手段对发射电路与发射换能器 进行匹配,以获得更高质量的输出信号波形[12-20]。 虽然这些方法对高质量、大功率、高效发射技术具 有重要意义,但由于实现相控发射需要多通道发射 机,发射系统体积和质量会随通道数量的增加而等 比例增大。且发射机(尤其是高电压输出发射机)的 匹配电路、滤波电路占用体积大,不利于发射系统的 小型化设计。另外,变压器是发射机电路的核心部 件,其体积和质量对发射系统的整体规模也影响较 大。目前常用的变压器设计方法有磁芯面积积 (A_p) 法、磁芯几何常数(K_a)法等,在具体设计时也需充 分考虑变压器类型,如高频变压器、脉冲变压器、声 频变压器等[21-24]。尽管这些方法在声呐变压器设 计领域得到了广泛应用,但进行相控参量阵声呐发 射机设计时,为满足水下小平台对高性能、轻小型 载荷的高要求,仍需进一步优化设计以缩小发射机 变压器的体积。

针对相控参量阵声呐发射系统的小型化、高集 成度设计问题,本文引入发明问题解决理论(Theory of inventive problem solving, TRIZ)中的剪裁 思想[25],结合相控参量阵声呐发射系统的工作特点 以及设计指标,提出一种简化的D类声呐发射机电 路结构。充分利用发射换能器频率特性整合实现滤 波功能,进而有效减小多通道电路规模,实现多通 道参量阵声呐功放电路的小型化、紧凑型设计;同 时,联合Ka法和脉冲变压器设计技术,研究微型变 压器设计方法。通过优化变压器设计方法进一步控 制多通道发射机整体体积和质量,提高系统整体功 率密度。此外,开展高集成度电路装配研究,论证分 析储能电容紧凑布局方案,提高声呐电子舱空间的 利用率。实测试验验证了设计的小型相控参量阵发 射系统的精准相控发射和高原频声源级输出能力。 本文设计的D类声呐发射机电路简化结构以及提 出的微型变压器设计方法,可为包括超高频相控阵 声呐发射机在内的相关发射机系统的小型化设计 提供借鉴与参考。

1 小型化相控发射系统设计

1.1 相控发射系统构成

设计小型相控参量阵声呐发射系统的构成框 图如图1所示。多通道发射机采用D类推挽功放电 路形式。在优化相控参量阵设计的基础上,以剪裁 思想简化传统发射机的滤波电路与匹配电路,以声 学基阵的带通特性实现功放输出信号滤波,电路结 构更加简单,元件数量更少,体积和质量更小。设 计的发射系统具体由相控数字信号源、40通道小型 功率放大电路、系统电源、相控参量阵四部分构成。 系统中心频率200 kHz,工作带宽20 kHz,相控角度 -60°~60°(步距为5°),相控角度偏差不超过0.5°, 原频声源级不低于230 dB。其中,为实现参量阵相 控发射功能,支撑整机小型化、功能集成化设计, 设计相控数字信号源采用了 ZYNQ 7000 系列的现 场可编程门阵列(Field programmable gate array, FPGA)芯片,既实现相控信号源功能又可用于数字 信号处理。





Fig. 1 Block diagram of small-sized phased parametric array sonar emission system

1.2 相控数字信号源设计

如图1所示,相控数字信号源的系统时钟模块 为整个信号源提供所需的时钟,且既能够响应外部 同步信号工作,也能产生本地同步信号并输出给外 部设备。信号源可通过通信接口模块接收控制指令 并实时输出系统状态信息,指令解算模块解算信号 频率、脉冲宽度、相控角度等参数并传输给其他功 能模块。状态监测与响应模块通过监测各模块的 状态标志位以及温度传感器的回传信息,实现对系 统工作状态的监测与响应。信号产生模块根据参 数配置产生40通道相控发射控制信号,相控角度 -60°~60°(步距为5°),相控功能主要用于波束稳 定和相控发射,可有效减小水下小平台姿态变化的 影响,满足大角度范围高效探测的需求。

具体采用时延波束形成方法实现相控发射^[26]。 工作原理如图2所示, θ 为相控角度,d为相邻阵元 间距,根据水中声速c可以得到相邻两个阵元间的 时延 Δt :



图2 时延波束形成相控发射原理

Fig. 2 Principle of phased emission of time-delay beamforming

为了保证相控精度和相控信号输出速率,同时简化FPGA逻辑模块设计,在信号产生模块中特

别引入坐标旋转数字计算机 (Coordinate rotation digital computer, CORDIC) 算法 [27-29],该方法计算相控角度时仅需采用加减、移位运算,易于 FPGA 实现。具体采用 CORDIC 算法的圆周旋转方式,以如下迭代方程组表示相控角度 θ 及其余弦值x和正弦值y:

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i - d_i y_i 2^{-i}, \\ y_{i+1} = y_i + d_i x_i 2^{-i}, \\ \theta_{i+1} = \theta_i - d_i \tan^{-1} 2^{-i}, \end{cases}$$
(2)

其中,*d_i*代表旋转方向,+1表示逆时针旋转,-1表示顺时针旋转。*d_i*取值如下:

$$d_i = \begin{cases} +1, & \theta_i \ge 0, \\ -1, & \theta_i < 0. \end{cases}$$
(3)

1.3 小型功率放大电路设计

1.3.1 高集成度开关电路设计

为了减小多通道发射电路的整体体积,本文 在剪裁思想指导下,以更加简化的瞬态电压抑制 二极管电路实现金属氧化物半导体场效应晶体管 (Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET)保护电路,同时选用利于小型化设计的 小封装 MOSFET,提升功放电路集成度。在印制电 路板 (Printed circuit board, PCB)设计时,将不同 发热量元器件合理布局,并根据不同元器件的电气 特性设计元器件间距,得到高集成度开关电路原理 图如图3所示。其中,MOSFET为IRFH5015,长宽 为5 mm×6 mm,厚度不超过1 mm,其驱动电路芯 片为隔离型的ADuM3220。



图 3 高集成度开关电路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of highly integrated switch circuit

1.3.2 微型变压器设计

联合 K_g 法和脉冲变压器设计技术,提出一种 微型变压器设计方法。具体基于 K_g 法计算 A_p^[22], 见公式 (4),结合变压器工作频率、视在功率等参数 确定磁芯型号。

$$A_p = K_p K_g^{0.8} = K_p \left(\frac{1.35P_t}{2K_e \times 100\alpha}\right)^{0.8}$$
$$= K_p \left(\frac{1.35P_t}{2 \cdot 0.145K_f^2 f^2 B_{\rm AC}^2 \cdot 10^{-4} \cdot 100\alpha}\right)^{0.8}, \quad (4)$$

其中, K_p 为常系数,选择罐形磁芯时 K_p 取8.9; α 为 电压调整率,用百分数表示,高频变压器初选时可取 0.5%, K_f 为波形系数,方波对应取值为4.0^[22];f为 变压器工作频率,单位为Hz; B_{AC} 为交流磁通密度, 单位为T; P_t 为变压器输入功率 P_{in} 与输出功率 P_o 之和,称为变压器视在功率,单位为W。

根据 A_p 计算公式,分析工作频段内不同视在 功率条件下的 A_p 曲线,如图 4 所示。分析得出,随频 率增加和视在功率减小,所需 A_p 变小。本文变压器 设计 P_t 为 429 W,工作频率 190~210 kHz,根据理 论计算并考虑变压器工作频率,选用的 A_p 应不低 于 0.087 cm⁴。

根据绕组所需电感L得出对应绕组的匝数N:

$$N = \sqrt{\frac{Ll_e \times 10^9}{0.4\pi\mu_e A_e}},\tag{5}$$

其中,L单位为H; l_e 为磁芯有效磁路长度,单位为 mm; μ_e 为磁芯有效磁导率; A_e 为磁芯有效截面积, 单位为mm²。

基于脉冲变压器设计技术计算变压器线径^[24], 根据最大有效电流 *I*_e和电流密度 *J* 得到导线总横 截面积 A_{wire}:

$$A_{\text{wire}} = \frac{\pi}{4} \left(1.13 \sqrt{\frac{I_e}{J}} \right)^2$$
$$= \frac{\pi}{4} \left(1.13 \sqrt{\frac{I_e K_f K_u B_{\text{AC}} f A_p}{P_t \times 10^4}} \right)^2, \qquad (6)$$

其中, K_u为窗口利用系数, 对于绕线式变压器可取 0.4^[22]。最大有效电流 I_e:

$$I_e = m \frac{V_s}{R_{\rm L_min}} \sqrt{\tau_{\rm max}},\tag{7}$$

其中, m 为系数, 初级绕组对应 m = 1.05n, n 为匝数 比, 次级绕组对应 m = 1; V_s 为变压器输出电压, 单 位为 V; $R_{\text{L}_{\min}}$ 为最小负载电阻, 单位为 Ω ; τ_{\max} 为 每秒发射脉冲信号的总时长, 单位为 s。

通过上述微型变压器的设计,与采用传统变压器设计方法相比,单个变压器体积减小了38.1%。





Fig. 4 A_p curve under different P_t conditions

2 发射系统整体装配

为了提高声呐电子舱的空间利用率和整机功 率密度,在高集成度PCB布局设计基础上,将部分 储能电容置于功放电路PCB板背面,以充分利用功 放电路变压器高度产生的富余空间。同时将其余大 部储能电容置于功放电路PCB板侧面,并推导了双 排布放条件下的电容占位公式:

$$2R_c \left[1 + (N_c - 1)\sin\theta_c\right] = A,\tag{8}$$

$$2R_c \left(1 + \cos \theta_c\right) = B,\tag{9}$$

其中,占位区域长度为A,宽度为B,电容半径为 R_c , 总个数为 N_c ,两电容轴心连线与宽度方向夹角为 θ_c ,要求 $2R_c \leq B$, $0^\circ \leq \theta_c \leq 90^\circ$,具体几何关系见 图 5。

在设计指标所限定的占位区域内(A = 120 mm、B = 35 mm),根据电容占位公式得出 电容个数 N_c 、电容半径 R_c 与夹角 θ_c 间的关系曲 线。如图6所示,图中虚线对应公式(8),实线对应



图5 PCB板侧面储能电容布局图

Fig. 5 Layout diagram of energy storage capacitor on the side of PCB



图 6 不同 N_c条件下储能电容最佳半径与装配夹 角关系曲线

Fig. 6 Relationship between optimal radius and assembly angle of energy storage capacitor under different N_c conditions 公式(9),点划线对应可选择的最大半径,虚线与 实线交点处即为当前 N_c 值对应的最佳电容半径及 装配夹角。最终设计选择发射机单块PCB板侧面 储能电容10个,半径为9 mm,最佳装配夹角 θ_c 为 35.5°。

图 7 为 40 通道相控参量阵发射机装舱实物照 片,装配后的发射系统电路整体尺寸为 200 mm× 140 mm×135 mm。



图 7 40 通道相控参量阵发射机装舱实物照片 Fig. 7 Physical photos of 40-channel phased parametric array transmitter assembly

3 试验结果与讨论

3.1 相控发射功能测试

在-60°~60°、步长5°的各相控角度下,对40 通道相控数字信号源相邻通道间输出信号的时延 值进行计算和测试分析,测试结果如图8所示。设 计指标要求相控角度偏差不超0.5°,对应时延误差 应不超0.047 μs。实测最大时延偏差为0.015 μs,对 应最大角度偏差为0.3°,实测相控精度满足设计指 标要求。



图 8 相邻通道时延理论值与实测值曲线

Fig. 8 Theoretical value and measured value curve of adjacent channel delay

3.2 声源级测试

为了对相控参量阵声呐发射系统的整体性 能进行评价,在45 m×6 m×5 m的信道水池中将 TC4038标准水听器与发射参量阵均放置于2.5 m 水深处,水平间距8.3 m。采集不同频率下的原频差 频信号,按式(10)计算声源级^[15]:

$$SL = 20 \lg e_0 - M - G_a + 20 \lg L,$$

$$p_{ref} = 1 \ \mu Pa,$$
(10)

其中, G_a 为前置放大器增益,M为水听器灵敏度级 (单位:dB), e_0 为L距离处水听器输出电压有效值 (单位:V)。

实测参量阵原频和差频声源级曲线如图9所示。工作带宽内原频声源级不低于231.5 dB,最高可达236.7 dB;差频声源级不低于183.7 dB,最高可达200.5 dB。同时,还进行了发射系统长时间工作拷机,验证了发射系统工作的稳定性和可靠性。





Fig. 9 Measured original frequency and difference frequency sound source level curve

3.3 系统体积与功率密度分析

为了对相控参量阵声呐发射系统的小型化设 计效果进行量化评估,对以往采用传统方法设计的 相控参量阵发射系统电路和采用本文设计方法得 到的发射系统电路的体积和功率密度进行了测量、 计算和对比,结果如表1所示。

从表1的结果可知,通过电路小型化设计以及 系统电路的紧凑装配设计,与传统方法设计的发射 系统相比,本文设计的小型化相控参量阵发射系统 电路的整体体积缩小了24.6%,整体功率密度提高 了27.3%,验证了本文小型化设计方法的有效性。此 外,测量该系统装舱后的整机质量为15.4 kg,更适 于水下小平台搭载使用。

表1 发射系统电路体积与功率密度对比表 Table 1 Comparison table of circuit volume and power density of transmitting system

设计方法	电路体积/cm ³	发射功率密度/(W·cm ⁻³)
传统方法	5016	1.1
本文方法	3780	1.4
提升率	-24.6%	+27.3%

4 结论

本文对相控参量阵声呐发射系统的小型化设 计技术进行了研究。基于剪裁思想设计并实现了 结构简化的多通道D类声呐发射机。通过微型变压 器设计、电路高集成度设计以及电路系统紧凑装配 设计,使相控参量阵发射系统电路整体体积缩小了 24.6%,整体功率密度提高了27.3%。实测相控角度 最大误差为0.3°,原频声源级不低于231.5 dB,最 高可达236.7 dB。研究实现的参量阵声呐相控发射 技术以及系统小型化设计方法,可推广至包括超高 频相控阵声呐发射机在内的发射系统小型化设计 使用。

参考文献

- Ma J, Li H, Zhu J, et al. Design and experiments of a portable seabed integrated detection sonar[J]. Sensors, 2021, 21(8): 2633.
- [2] Ghafoor H, Noh Y. An overview of next-generation underwater target detection and tracking: an integrated underwater architecture[J]. IEEE Access, 2019, 7: 98841–98853.
- [3] Teague J, Allen M J, Scott T B. The potential of lowcost ROV for use in deep-sea mineral, ore prospecting and monitoring[J]. Ocean Engineering, 2018, 147: 333–339.
- [4] Wu T, Tao C, Zhang J, et al. A hydrothermal investigation system for the Qianlong-II autonomous underwater vehicle[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2019, 38(3): 159–165.
- [5] 蔡巍,陶春辉,王渊,等. 自主水下机器人海底热液区应用综述
 述[J]. 机器人, 2023, 45(4): 483–495.
 Cai Wei, Tao Chunhui, Wang Yuan, et al. Applications of

autonomous underwater vehicle in submarine hydrothermal fields: a review[J]. Robot, 2023, 45(4): 483–495.

[6] 王润田.海底声学探测与底质识别技术的新进展 [J].声学技术, 2002, 21(1/2): 96-98.

Wang Runtian. Progress in detecting the geological formations and sediment properties by sound[J]. Technical Acoustics, 2002, 21(1/2): 96–98.

- [7] 张同伟,秦升杰,王向鑫,等. 深海浅地层剖面探测系统现状 及展望 [J]. 工程地球物理学报, 2018, 15(5): 547-554. Zhang Tongwei, Qin Shengjie, Wang Xiangxin, et al. Technical status and development trend of deep sea subbottom profiler[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2018, 15(5): 547-554.
- [8] 邹彬彬,陈晶晶,王润田.宽带参量阵技术在近海探测中的研究[J]. 声学学报, 2016, 41(6): 797-803.
 Zou Binbin, Chen Jingjing, Wang Runtian. Research on wideband parametric acoustic arrays used in shallow water detection[J]. Acta Acustica, 2016, 41(6): 797-803.
- [9] 胡梦涛,李太春,廖荣发,等.参量阵浅剖探测技术在海底管线探测中的应用 [J].海洋测绘, 2019, 39(5): 3034.
 Hu Mengtao, Li Taichun, Liao Rongfa, et al. Application of parametric array sub-bottom profile detection technology in pipeline detection[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2019, 39(5): 30–34.
- [10] Zhou H, Li W, Huang S. Signal processing algorithm and system realization of broadband parametric array subbottom profiler[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(17): 17090–17102.
- [11] Yang Z, Liu B, Qi L, et al. Measurement of bistatic sea surface scattering with a parametric acoustic source[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2022, 151(4): 2474.
- [12] Agbossou K, Dion J L, Carignan S, et al. Class D amplifier for a power piezoelectric load[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2000, 47(4): 1036–1041.
- [13] Lee B, Baek J, Kim D, et al. Optimized design of a sonar transmitter for the high-power control of multichannel acoustic transducers[J]. Electronics, 2021, 10(21): 2682.
- [14] Song S, Kim I, Lee B, et al. Design of matching circuit transformer for high-power transmitter of active sonar[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2020, 15(5): 2145–2155.
- [15] 朱建军,陈宝伟,李海森. 宽带大功率声呐AM信号发射机的 设计与实现[J]. 应用声学, 2014, 33(6): 490-495.
 Zhu Jianjun, Chen Baowei, Li Haisen. Design and implementation of wideband and high power sonar AM signal transmitter[J]. Journal of Applied Acoustics, 2014, 33(6): 490-495.
- [16] 黎曙, 朱大非, 丁盛, 等. 一种低压大功率水声发射机的设计 与实现 [J]. 舰船电子工程, 2022, 42(9): 181–186.
 Li Shu, Zhu Dafei, Ding Sheng, et al. Design and implementation of a low voltage high power acoustic transmitter[J]. Ship Electronic Engineering, 2022, 42(9): 181–186.

- [17] Tian W, Wang L, Yu J, et al. A hybrid impedance matching network for underwater acoustic transducers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(6): 7622–7633.
- [18] Shin C, Lee Y, Ahn B, et al. Design and output control technique of sonar transmitter considering impedance variation of underwater acoustic transducer[J]. The Journal of the Acoustical Society of Korea, 2022, 41(5): 481–491.
- [19] 姚震, 莫毅强, 罗子伦, 等. 非线性工作状态压电换能器匹配 技术 [J]. 应用声学, 2023, 42(2): 379–385.
 Yao Zhen, Mo Yiqiang, Luo Zilun, et al. Matching technology of piezoelectric transducer in nonlinear working state[J]. Journal of Applied Acoustics, 2023, 42(2): 379–385.
- [20] 王露,杨靖,王登攀,等.大功率超声换能器匹配技术研究 [J]. 压电与声光, 2015, 37(2): 254–257.
 Wang Lu, Yang Jing, Wang Dengpan, et al. Research on matching technology of high power ultrasound transducer[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(2): 254–257.
- [21] 王佳宁, 邹强, 胡嘉汶, 等. 一种中压绝缘大功率中频变压器的 优化设计方法 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(12): 3048-3060.
 Wang Jianing, Zou Qiang, Hu Jiawen, et al. An optimal design method for medium-voltage insulated high-power medium-frequency transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(12): 3048-3060.
- [22] (美)卡罗尼尔·麦克莱曼.变压器与电感器设计手册 [M].第
 4版.周京华,龚邵文,译.北京:中国电力出版社,2014: 165-441.
- [23] 李子欣,高范强,赵聪,等. 电力电子变压器技术研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1274–1289.
 Li Zixin, Gao Fanqiang, Zhao Cong, et al. Research review of power electronic transformer technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1274–1289.
- [24] 王全保. 新编电子变压器手册 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版 社, 2007: 336-362.
- [25] 孙永伟, (美)谢尔盖·伊克万科. TRIZ: 打开创新之门的金钥
 匙: I[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 79–98.
- [26] 田坦. 声呐技术 [M]. 第2版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版 社, 2010: 78-79.
- [27] Fu W, Xia J, Lin X, et al. Low-latency hardware implementation of high-precision hyperbolic functions sinhx and coshx based on improved CORDIC algorithm[J]. Electronics, 2021, 10(20): 2533.
- [28] Xing X, Wang W. A new recursive trigonometric technique for FPGA-design implementation[J]. Sensors, 2023, 23(7): 3683.
- [29] 吴恒, 王淦泉, 陈桂林. CORDIC 算法在基于 FPGA 的 PMSM 控制器中的应用 [J]. 电机与控制学报, 2009, 13(S1): 113-118.

Wu Heng, Wang Ganquan, Chen Guilin. Application of CORDIC algorithm in FPGA based PMSM controller[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(S1): 113–118.