

基于粒子群算法的LCLC谐振变换器优化设计

赵 斌^① 王 刚^{*①②} 宋婧妍^{①②} 刘雅琳^①

^①(中国科学院空天信息创新研究院高功率微波源与技术重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院大学 北京 100039)

摘 要: LCLC谐振变换器广泛应用在空间行波管放大器(TWTA)中,起到升压的作用。在LCLC谐振变换器中,具有多个谐振参数,即变压器漏感、串联谐振电容、励磁电感以及并联谐振电容。多个谐振参数增加了LCLC谐振变换器总损耗优化的难度。该文提出一种基于粒子群优化算法的LCLC谐振变换器优化设计方法,解决LCLC谐振变换器由于多个谐振参数造成的总损耗优化困难的问题。首先,推导了LCLC谐振变换器的总损耗公式;其次,采用粒子群优化算法,对LCLC谐振变换器的总损耗进行了优化,得到了总损耗最小时的谐振变换器参数;最后,基于优化的LCLC谐振变换器参数,搭建了LCLC谐振变换器,并进行了一系列实验。实验结果证明了该优化设计方法的有效性。

关键词: 空间行波管放大器; 粒子群优化算法; LCLC谐振变换器; 总损耗

中图分类号: TN124, TN86

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)06-1622-08

DOI: 10.11999/JEIT190337

Optimal Design Method of the LCLC Resonant Converter Based on Particle-Swarm-Optimization Algorithm

ZHAO Bin^① WANG Gang^{①②} SONG Jingyan^{①②} LIU Yalin^①

^①(Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The LCLC resonant converters are universally applied to the space Travelling-Wave Tube Amplifiers (TWTA), to boost the input voltage. In an LCLC resonant converter, several resonant components, including the leakage inductance, the serial resonant capacitor, the magnetizing inductance and the parallel resonant capacitor, are included in the resonant tank, which complicates the optimal design of total power loss in the LCLC resonant converter. In order to solve this problem, in this paper, a Particle-Swarm-Optimization (PSO) algorithm based, optimal design method of the LCLC resonant converter is proposed. At first, the total power loss of the LCLC resonant converter is derived based on the circuit analysis; After that, the total power loss of the LCLC resonant converter is optimized by the Particle-Swarm-Optimization algorithm and the optimal resonant parameters are calculated. Finally, based on the optimal resonant parameters, the optimal LCLC resonant converter is built. The proposed optimal design method is validated by experiments.

Key words: Space Travelling-Wave Tube Amplifier (TWTA); Particle-Swarm-Optimization (PSO) algorithm; LCLC resonant converter; Total power loss

1 引言

空间行波管放大器(Traveling-Wave Tube Amplifier, TWTA)广泛应用于雷达、电子对抗以及卫星导航等应用中,起到微波功率放大的作用^[1]。空间行波管放大器由两部分构成:电子功率调节器和空间行波管。电子功率调节器为空间行波管的正

常工作提供合适的高电压^[2],因此,电子功率调节器的效率将直接影响整个空间行波管放大器的效率^[3,4]。提高电子功率调节器的效率,对于降低卫星上太阳能电池板的数量,降低发射重量,具有重要的意义。

当前,如图1所示,电子功率调节器普遍采用2级结构:第1级为Buck变换器^[5],第2级为LCLC谐振变换器^[6]。目前,由于Buck变换器已经得到了广泛的研究,因此,本文主要研究LCLC谐振变换

器^[7,8]。第2级LCLC谐振变换器,将Buck变换器的输出电压,升压为行波管所需要的高电压,并提供电气隔离的功能。然而,如图1所示,LCLC谐振变换器具有4个谐振参数, L_r 为变压器漏感; C_s 为串联谐振电容; L_m 为变压器励磁电感; C_p 为并联谐振电容(即变压器寄生电容),增加了LCLC谐振变换器总损耗优化的难度。因此,当前,LCLC谐振变换器的设计主要依赖经验,无法对LCLC谐振变换器的总损耗进行优化。

近年来,粒子群优化设计算法在功率变换优化设计中得到了广泛的应用^[9]。粒子群优化算法从随机解出发,通过适应度评价解的品质,并通过多次迭代搜索最优值求得最优解^[10,11],具有精度高优化以及收敛快等优点^[12,13]。本文将粒子群优化设计算法应用到LCLC谐振变换器中,提出了一种基于粒子群优化设计算法的LCLC谐振变换器优化设计方法。该优化设计方法以LCLC谐振变换器的总损耗为优化设计的目标函数,通过粒子群优化算法,求得总损耗最低时的LCLC谐振变换器的谐振参数(L_r , C_s , L_m 和 C_p)。基于总损耗最低时的谐振参数,搭建LCLC谐振变换器,最终实现LCLC谐振变换器的高效率。

本文按照如下的思路展开:第2节通过对LCLC谐振变换器工作原理的分析,推导了LCLC谐振变换器总损耗的公式;第3节基于LCLC谐振变换器的总损耗公式,提出了基于粒子群优化算法的LCLC谐振变换器优化设计方法,并给出了例子;第4节基于第3节中的例子,搭建了优化设计的LCLC谐振变换器,并进行了一系列实验,用于验证本文提出的优化设计方法;第5节对本文进行了总结。

2 LCLC谐振变换器总损耗分析与计算

在本节中,基于LCLC谐振变换器的工作原理^[14],对LCLC谐振变换器的总损耗进行了计算。在空间行波管放大器的应用中,由于LCLC谐振变换器工作在零电流、零电压条件下,因此,开关管无开通和关断损耗。LCLC谐振变换器的损耗包含开关管

驱动损耗、开关管的导通损耗、串联谐振电容损耗、变压器铜损、变压器铁损、变压器介质损耗以及整流二极管损耗。下面将分别对各部分损耗进行计算,并推导得到LCLC谐振变换器的总损耗公式。

2.1 高压整流二极管损耗

在LCLC谐振变换器中,为降低整流二极管损耗,采用碳化硅二极管,因此,反向恢复损耗可以忽略。高压整流二极管的损耗为导通损耗,即

$$P_D = \frac{2V_O V_D}{R_O} \quad (1)$$

其中, P_D 为高压整流二极管损耗, V_O 为LCLC谐振变换器的输出电压, V_D 为高压整流二极管的管压降, R_O 为变换器负载。

2.2 主开关管驱动损耗

主开关管的驱动损耗为

$$P_{dr} = 4Q_g V_{dr} f_s \quad (2)$$

其中, Q_g 为门极驱动电荷, V_{dr} 为开关管的驱动电压, f_s 为LCLC谐振变换器的谐振频率。

2.3 主开关管的导通损耗

由于在空间行波管放大器应用中,主开关管实现了零电压、零电流导通和关断,导通损耗和关断损耗降为0。导通损耗为

$$P_{on} = 2I_{rms}^2 R_{on} \quad (3)$$

其中, I_{rms} 为谐振电流有效值, R_{on} 为主开关管的导通电阻。

结合谐振电流有效值的计算公式^[14],主开关管的导通损耗为

$$P_{on} = \frac{\pi^2 V_O^2 R_{on} T_s}{a^2 R_O^2 T_{rs}} \quad (4)$$

其中, V_O 为LCLC谐振变换器输出电压, T_s 为开关周期, T_{rs} 为 L_r 和 C_s 的谐振周期, R_O 为负载, a 为变压器变比。

2.4 主变压器铜损

由于LCLC谐振变换器工作在高频条件下,引起变压器绕组的邻近效应和趋肤效应,从而加剧了变压器的铜损。变压器的铜损为

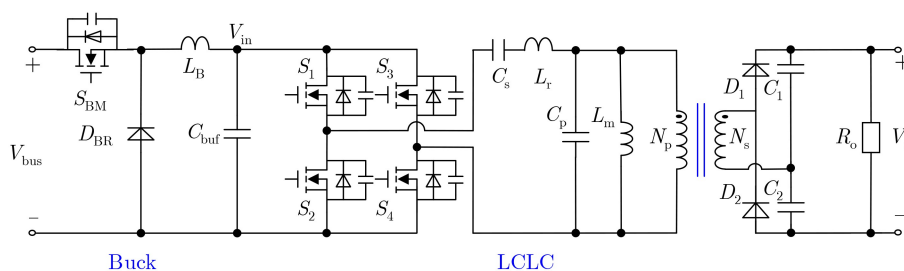


图1 电子功率调节器的两级结构

$$P_{Cu} = \frac{\pi^2 V_o^2 R_{ac} T_s}{a^2 R_o^2 T_{rs}} \quad (5)$$

其中, R_{ac} 为变压器的交流电阻。

2.5 主变压器介质损耗

在空间行波管放大器的应用中, 输出电压从数千伏到一万多伏不等; 此外, LCLC谐振变换器工作在高频条件下, 变压器的寄生电容在每个开关周期都要进行充放电, 从而引起介质损耗。主变压器的介质损耗为^[13]

$$P_{Die} = \frac{4\pi^3 \tan \delta C_p V_{in}^2 T_{rs}^2}{4T_{rp}^4 + \pi^2 T_{rp}^2 T_{rs}^2} \int_0^{T_d} \sin^2 \left[\frac{2\pi}{T_{rp}} t + \varphi \right] dt \quad (6)$$

其中, δ 为介质的损耗角, T_{rp} 为 L_m 和 C_p 的谐振周期, T_d 为死区时间, φ 为一常数。

2.6 变压器磁芯损耗

变压器在工作中, 除具有铜损和介质损耗之外, 磁芯也将产生损耗。在LCLC谐振变换器中, 磁芯损耗为

$$P_{Fe} = k_c f_s^\alpha \left(\frac{V_{in}}{2N_p A_e} \sqrt{\frac{T_{rs}^2}{4} + \frac{T_{rp}^2}{\pi^2}} \right)^\beta V_e \quad (7)$$

其中, k_c , α , β 为磁芯材料损耗参数, V_e 为磁芯体积。

2.7 LCLC谐振变换器总损耗

结合式(1)—式(7), 得到变换器的总损耗为

$$P_{tot} = \frac{2V_o V_D}{R_o} + 4Q_g V_{dr} f_s + \frac{\pi^2 V_o^2 R_{on} T_s}{a^2 R_o^2 T_{rs}} + \frac{\pi^2 V_o^2 R_{ac} T_s}{a^2 R_o^2 T_{rs}} + \frac{4\pi^3 \tan \delta C_p V_{in}^2 T_{rs}^2}{4T_{rp}^4 + \pi^2 T_{rp}^2 T_{rs}^2} \int_0^{T_d} \sin^2 \left[\left(\frac{2\pi}{T_{rp}} t + \varphi \right) \right] dt + k_c f_s^\alpha \left(\frac{V_{in}}{2N_p A_e} \sqrt{\frac{T_{rs}^2}{4} + \frac{T_{rp}^2}{\pi^2}} \right)^\beta V_e \quad (8)$$

在接下来的优化设计中, 将式(8)作为优化目标, 进行LCLC谐振变换器的优化设计。

3 基于粒子群优化算法的LCLC变换器优化设计

由于在LCLC谐振变换器中具有4个谐振参数, 即漏感、串联谐振电容、变压器励磁电感以及变压器寄生电容, 因此, LCLC谐振变换器的优化设计比较困难。本文结合当前的人工智能算法和粒子群优化算法, 提出了基于粒子群优化算法的LCLC变换器优化设计方法。

3.1 LCLC谐振变换器优化设计方法

基于粒子群优化算法的LCLC变换器优化设计

方法的流程图如图2所示。优化设计算法分为以下几步:

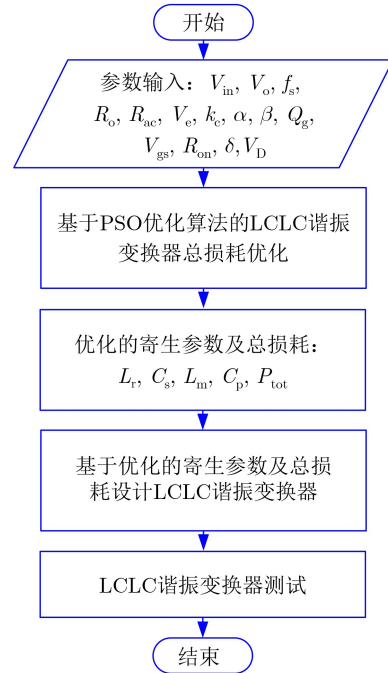


图2 基于粒子群优化算法的LCLC谐振变换器优化设计

步骤1 在LCLC变换器优化设计开始之前, 根据LCLC谐振变换器的输入电压、输出电压、工作频率, 确定主开关管、整流二极管型号, 并选定磁芯形状和材料。并根据主开关管的参数、整流二极管参数、磁芯的参数, 代入变换器总损耗公式中。

步骤2 采用粒子群优化设计算法, 对LCLC谐振变换器的总损耗进行优化, 计算得到优化的谐振参数以及优化的总损耗。粒子群优化算法将在3.2节中详细阐述。

步骤3 基于步骤2中的优化的寄生参数, 搭建LCLC谐振变换器。

步骤4 对LCLC谐振变换器进行测试。

3.2 用于LCLC谐振变换器优化设计的粒子群优化设计算法

用于LCLC谐振变换器优化设计的粒子群优化设计算法流程图如图3所示, 包含以下几步:

步骤1 粒子群优化算法初始化。粒子群优化算法的参数, 包含Weight.start, Weight.end, kind和Vel.max被初始化。其中, 粒子的个数 N_{pa} 为20, 最大的迭代次数Max.Iteration是100。

每一个粒子被赋予任意的 L_r , C_s , L_m 和 C_p 值。LCLC谐振变换器的参数输入到粒子群优化设计算法中, 变换器总损耗作为粒子群优化算法的目标函数。

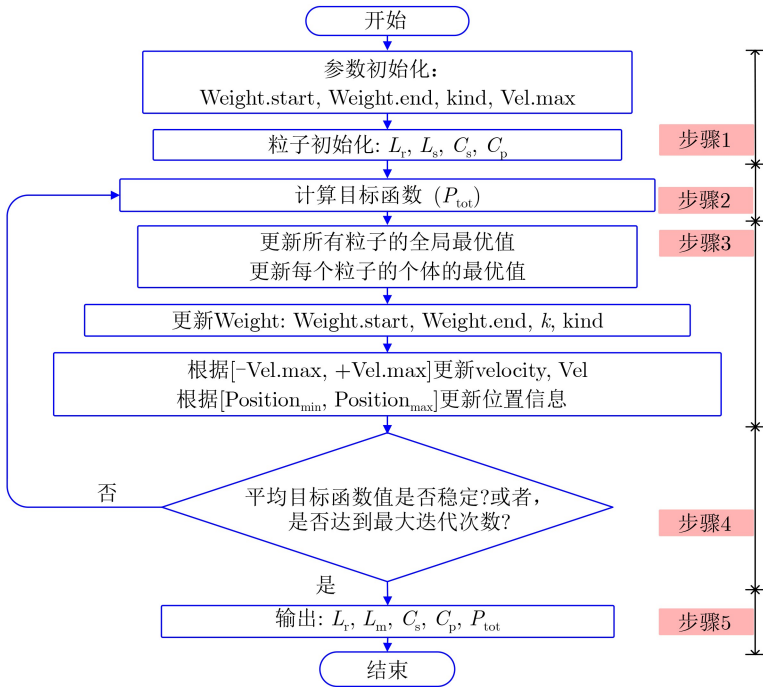


图 3 用于LCLC谐振变换器优化设计的粒子群优化设计算法

步骤 2 总损耗计算。在这步中，计算每个粒子的目标函数值及变换器总损耗。目标函数值将用于评价每个粒子的适应度。

步骤 3 更新全局最优值、个体最优值、Weight和Vel。基于步骤2中计算的总损耗，所有粒子的全局最优值，每个粒子的个体最优值，Weight和Vel将被更新。

步骤 4 重复步骤2和步骤3，直到满足循环结束条件。如果平均目标函数值稳定，或者达到最大迭代次数，循环过程将被终止。否则，将重复步骤2和步骤3的过程。

步骤 5 输出优化的谐振参数值以及优化的总损耗。当步骤2和步骤3的循环终止条件满足之后，粒子群优化算法将输出优化的谐振参数值以及总损耗。

至此，粒子群优化算法结束。当粒子群优化算法结束之后，将得到优化的谐振参数，包含 L_r 、 C_s 、 L_m 和 C_p 。接下来，将利用优化的谐振参数，搭建LCLC谐振变换器，并进行实验测试。

3.3 粒子群优化算法验证

在3.1节和3.2节中，分别针对基于粒子群算法的LCLC谐振变换器优化设计方法以及粒子群优化算法进行了阐述。本节将采用基于粒子群算法的LCLC谐振变换器优化设计方法，进行LCLC谐振变换器的优化设计，以此验证本文提出的优化设计方法。

LCLC谐振变换器的参数如表1所示。输入电

表 1 LCLC谐振变换器参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
V_{in}	40 V	V_e	10200 mm ³
V_{out}	4800 V	A_e	190 mm ²
f_s	300 kHz	k_c	3.716×10^{-24}
R_o	80 kΩ	α	4.823
V_{gs}	10 V	β	5.521
Q_g	40 nC	R_{on}	4.5 mΩ
C_{oss}	660 pF	R_{ac}	20.0 mΩ

压为40 V，输出电压为4800 V，开关频率为300 kHz，输出功率为300 W。基于LCLC谐振变换器的输入、输出电压以及开关频率，磁芯选择TDK公司的FEE38/16/25，磁芯材料为N87，适于工作在500 kHz以下的开关频率。此外，主开关管选择RJK6505PBF。

基于表1的参数，采用本文提出的基于粒子群算法的LCLC谐振变换器优化设计方法，对LCLC谐振变换器的总损耗进行了优化设计。LCLC谐振变换器的总损耗，随迭代次数的变化如图4所示。

由图4可以看出，随着迭代次数的增加，变换器总损耗逐渐稳定，最终优化得到的总损耗为8.9 W，对应的谐振参数为 $L_r = 0.09 \mu H$ ， $C_s = 1 \mu F$ ， $L_m = 8.0 \mu H$ ， $C_p = 13.2 nF$ 。当LCLC谐振变换器的优化过程完成之后，第4节将基于优化结果，搭建LCLC谐振变换器并进行实验测试。

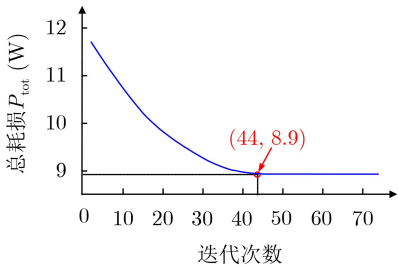


图 4 总损耗随迭代次数的变化

4 实验验证

在本节中，首先，基于第3节的优化设计结果，搭建了优化的LCLC谐振变换器；其次，在优

化的LCLC谐振变换器搭建完成之后，进行了一系列实验，验证了本文提出的优化设计方法的有效性；最后，在改变输入电压和输出功率的情况下，测试了LCLC谐振变换器的效率。

4.1 LCLC谐振变换器

基于第3节优化设计得到的谐振参数，搭建了LCLC谐振变换器。由于改进用于高压平面变压器的部分交错绕组结构具有低漏感、低寄生电容以及低交流电阻的优势，本文的高压变压器采用了这种结构^[15]。改进的用于高压变压器的部分交错绕组结构如图5所示。

变压器以及绕组的尺寸如表2所示。

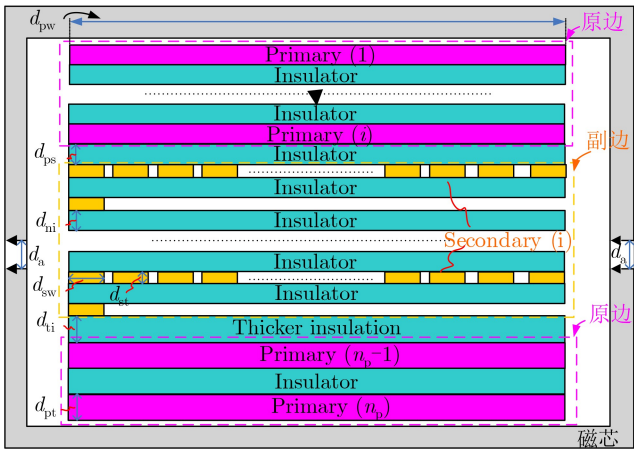


图 5 改进的用于高压平面变压器的部分交错绕组结构

根据表2所示的尺寸，在Ansys Maxwell中搭建了高压变压器模型，并进行了有限元仿真。仿真得到的漏感、励磁电感以及寄生电容如表3所示。

表 2 高压平面变压器参数

参数名称	描述	参数值
d_{ps}	变压器原边和副边之间的距离	0.13 mm
d_{pt}	初级绕组厚度	0.2 mm
d_{st}	次级绕组厚度	70 μm
d_a	气隙厚度	63 μm
d_{pw}	初级绕组宽度	9.6 mm
d_{sw}	次级绕组宽度	0.28 mm
d_{ti}	加厚绝缘层厚度	1.6 mm
d_{ni}	常规绝缘层厚度	0.3 mm

表 3 仿真结果与优化结果的对比

参数名称	仿真结果	优化设计结果
L_r	0.09 μH	0.09 μH
L_m	8.1 μH	8.0 μH
C_p	13.0 nF	13.2 nF

由表3可以看出，与优化的谐振参数相比，仿真结果的误差可以接受。因此，LCLC谐振变换器的优化设计结果得以实现。需要指出的是，由于 C_s 为分立器件，优化的串联谐振的电容 C_s 值，可以直接通过选择分立电容实现。

4.2 基于粒子群算法的LCLC谐振变换器优化设计方法验证

LCLC谐振变换器的测试波形如图6所示。其中， $v_{ds1}(t)$ 为开关管 S_1 的漏源极电压， $i_r(t)$ 为谐振电流， $v_{gs1}(t)$ 为主开关管 S_1 的驱动电压， $v_{d1}(t)$ 为倍压整流二极管 D_1 的电压， $i_{d1}(t)$ 为倍压整流二极管 D_1 的电流。

主开关管 S_1 的实验波形如图6(a)所示。由图6(a)可以看出，在主开关管开通时，谐振电流 $i_r(t)$ 为零，同时，开关管 S_1 上的电压 $v_{ds1}(t)$ 也为零，因此，主开关管实现了零电压、零电流开通。同理，当主开关管关断时，谐振电流 $i_r(t)$ 为零，同时，开关管 S_1 上的电压 $v_{ds1}(t)$ 也为零，因此，主开关管实现了零电压、零电流关断。综合上述讨论，主开关管 S_1 实现了零电压、零电流开通和关断。

倍压整流二极管 D_1 的实验波形如图6(b)所示。由图6(b)可以看出,在倍压整流二极管 D_1 开通时,谐振电流 $i_{d1}(t)$ 为零,同时,倍压整流二极管 D_1 上的电压 $v_{d1}(t)$ 也为零,因此,倍压整流二极管 D_1 实现了零电压、零电流开通。同理,当倍压整流二极管 D_1 关断时,谐振电流 $i_{d1}(t)$ 为零,同时,倍压整流二极管 D_1 上的电压 $v_{d1}(t)$ 也为零,因此,倍压整流二极管 D_1 实现了零电压、零电流关断。综合上述讨论,倍压整流二极管 D_1 实现了零电压、零电流开通和关断。

基于上述实验结果可以看出,主开关管和倍压整流二极管都实现了零电压、零电流开通和关断。

为进一步测试本文提出的优化设计方法的有效性,分别测试了当励磁电感 L_m 和串联谐振电容 C_s 改变时的波形效率。

改变励磁电感得到的实验波形如图7所示。如图7(a)和图7(b)对应的励磁电感分别为29.3 μH 以及4.0 μH 。测试得到的效率如图7(c)所示。

由图7可以看出,当励磁电感 L_m 偏离优化值之后,LCLC谐振变换器的零电压、零电流开通和关断特性将消失:当励磁电感大于优化值时,主开关管无法实现零电压开通,此时将引起开通损耗;当励磁电感值小于优化值时,主开关管将无法实现零电流关断,此时将引起关断损耗。由效率对比的结

果可以看到,在励磁电感的优化点,LCLC谐振变换器的效率最高,从而证实了本文所提的优化设计方法的有效性。

改变串联谐振电容得到的实验波形如图8所示。如图8(a)和图8(b)对应的串联谐振电容分别为0.3 μF 和1.6 μF 。测试得到的效率如图8(c)所示。

由图8可以看出,当串联谐振电容 C_s 偏离优化值之后,LCLC谐振变换器的零电压、零电流开通和关断特性将消失:当串联谐振电容 C_s 小于优化值时,主开关管无法实现零电压开通,此时将引起开通损耗;当串联谐振电容 C_s 大于优化值时,主开关管将无法实现零电流关断,此时将引起关断损耗。由效率对比的结果可以看到,在串联谐振电容的优化点,LCLC谐振变换器的效率最高,从而证实了本文所提的优化设计方法的有效性。

由上述实验可以看出,采用本文提出的基于粒子群算法的LCLC谐振变换器优化设计算法,主开关管和整流二极管都实现了零电压、零电流开通和关断。此外,与非优化的参数相比,优化的LCLC谐振变换器可以实现更高的效率,从而验证了优化设计方法的有效性。

在空间行波管放大器中,由于输入电压和负载在变化,因此,需要进一步研究LCLC谐振变换器在不同输入电压和负载时的变换器效率。

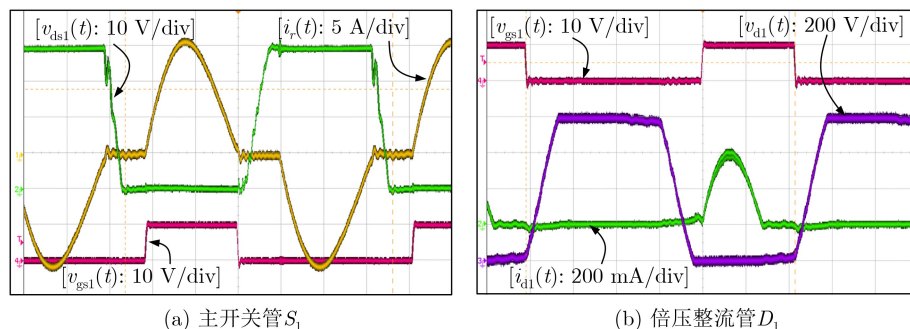


图6 优化的LCLC谐振变换器的实验波形

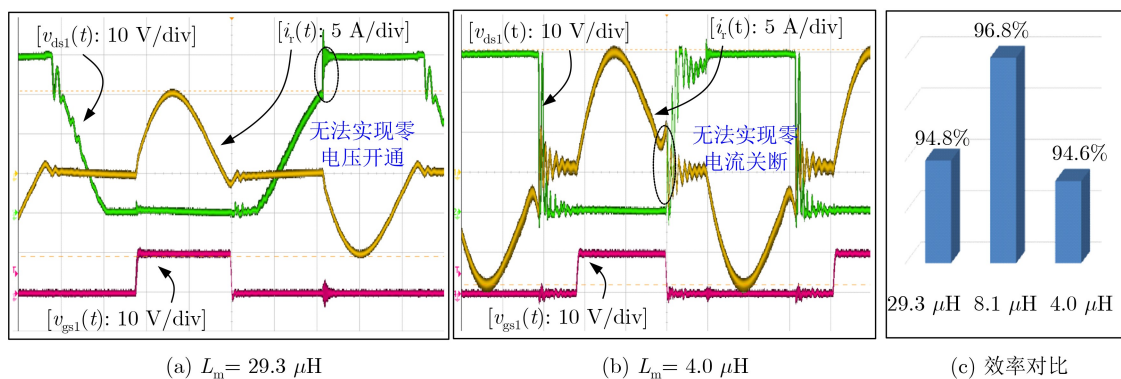


图7 改变励磁电感时的测试波形

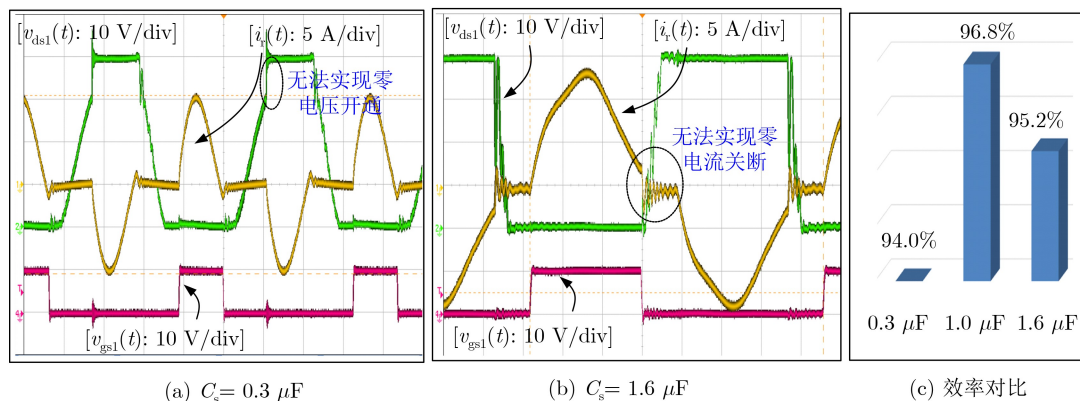


图8 改变励磁电容时的测试波形

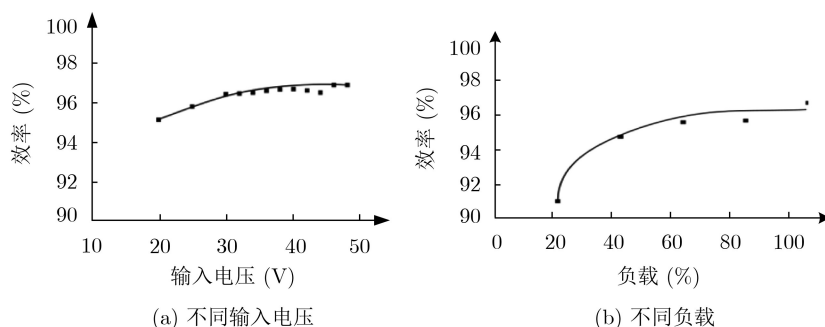


图9 效率测试

4.3 优化的LCLC谐振变换器在不同输入电压和负载时的性能

在空间行波管放大器中, 由于输入电压和负载在变化, 因此, 需要进一步研究LCLC谐振变换器在不同输入电压和负载时的变换器效率。

优化的LCLC谐振变换器在不同输入电压条件下的效率如图9(a)所示。在额定输入电压40 V条件下, 变换器总损耗为9.2 W, 效率为96.8%。本文提出的优化设计方法计算得到的总损耗为8.9 W, 这与实验测试结果高度一致。变换器效率随着负载的变化如图9(b)所示, 由图9(b)可以看出, 在宽负载范围内, LCLC谐振变换器都可以实现高效率。

5 结论

本文提出了一种用于空间行波管放大器的基于粒子群算法的LCLC谐振变换器优化设计方法。这种优化设计方法的目标, 是实现LCLC谐振变换器的低损耗、高效率。首先, 推导了LCLC谐振变换器的总损耗公式; 然后, 以该总损耗公式为目标函数, 基于粒子群算法进行优化设计, 得到了优化的谐振参数以及优化的总损耗; 最后, 基于优化的谐振参数以及优化的总损耗, 搭建优化的LCLC谐振变换器, 并进行实验测试。理论分析以及实验结果均表明, 基于粒子群算法的LCLC谐振变换器优化设计方法, 能够用于LCLC谐振变换器的优化设

计, 提高变换器效率。

参考文献

- [1] NICOL E F and ROBISON J M. TWTA on-orbit reliability for satellite industry[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(6): 2366–2370. doi: [10.1109/TED.2018.2802868](https://doi.org/10.1109/TED.2018.2802868).
- [2] ZHAO Bin, ZHANG Xin, and ZHANG Zhe. Sequential Offline-Online-Offline (SO³) measurement approach for high-frequency LCLC resonant converters in the TWTA applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(2): 1568–1579. doi: [10.1109/TIE.2019.2898601](https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2898601).
- [3] 赵斌, 王刚, 王东蕾, 等. 空间行波管用LCLC谐振变换器的研究[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(2): 482–488. doi: [10.11999/JEIT160334](https://doi.org/10.11999/JEIT160334).
ZHAO Bin, WANG Gang, WANG Donglei, et al. Application of LCLC resonant converters for space travelling-wave tube amplifiers[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(2): 482–488. doi: [10.11999/JEIT160334](https://doi.org/10.11999/JEIT160334).
- [4] 赵斌, 王刚, 王东蕾. LCLC谐振变换器谐振电流的研究[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(6): 1479–1486. doi: [10.11999/JEIT160752](https://doi.org/10.11999/JEIT160752).
ZHAO Bin, WANG Gang, and WANG Donglei. Research on the resonant current of the LCLC resonant converters[J].

- Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(6): 1479–1486. doi: [10.11999/JEIT160752](https://doi.org/10.11999/JEIT160752).
- [5] WANG Jianmin, TZENG L, HSU M T, *et al.* A simple control scheme to avoid the sensing noise for the DC–DC buck converter with synchronous rectifier[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(6): 5086–5091. doi: [10.1109/TIE.2017.2772195](https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2772195).
- [6] LU Weiguo, CHEN Weiming, RUAN Yixiao, *et al.* An auxiliary-parallel-inductor-based sequence switching control to improve the load transient response of buck converters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(4): 2776–2784. doi: [10.1109/TIE.2018.2844847](https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2844847).
- [7] VEERACHARY M. Analysis of minimum-phase fourth-order buck DC–DC converter[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(1): 144–154. doi: [10.1109/TIE.2015.2472525](https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2472525).
- [8] KHAN A A and CHA H. Dual-buck-structured high-reliability and high-efficiency single-stage buck–boost inverters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(4): 3176–3187. doi: [10.1109/TIE.2017.2752145](https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2752145).
- [9] DE LEÓN-ALDACO S E, CALLEJA H, and ALQUICIRA J A. Metaheuristic optimization methods applied to power converters: A review[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(12): 6791–6803. doi: [10.1109/TPEL.2015.2397311](https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2397311).
- [10] ZHAO Bin, ZHANG Xin, and HUANG Jingjing. AI algorithm-based two-stage optimal design methodology of high-efficiency CLLC resonant converters for the hybrid AC-DC microgrid applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(12): 9756–9767. doi: [10.1109/TIE.2019.2896235](https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2896235).
- [11] HEBALA O M, ABOUSHADY A A, AHMED K H, *et al.* Generic closed-loop controller for power regulation in dual active bridge DC–DC converter with current stress minimization[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(6): 4468–4478. doi: [10.1109/TIE.2018.2860535](https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2860535).
- [12] LEE J H, SONG J, KIM D W, *et al.* Particle swarm optimization algorithm with intelligent particle number control for optimal design of electric machines[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(2): 1791–1798. doi: [10.1109/TIE.2017.2760838](https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2760838).
- [13] BANERJEE S, GHOSH A, and RANA N. An improved interleaved boost converter with PSO-based optimal type-III controller[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2017, 5(1): 323–337. doi: [10.1109/JESTPE.2016.2608504](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2016.2608504).
- [14] ZHAO Bin, WANG Gang, and HURLEY G. Analysis and performance of LCLC resonant converters for high-voltage high-frequency applications[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2017, 5(3): 1272–1286. doi: [10.1109/JESTPE.2017.2687398](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2017.2687398).
- [15] ZHAO Bin, OUYANG Ziwei, DUFFY M C, *et al.* Andersen. An improved partially interleaved transformer structure for high-voltage high-frequency multiple-output applications[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(4): 2691–2702. doi: [10.1109/TIE.2018.2840499](https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2840499).
- 赵 斌: 男, 1988年生, 研究员, 研究方向为高压、高频变换器以及高频磁性元器件。
- 王 刚: 男, 1971年生, 研究员, 研究方向为高压电源技术。
- 宋婧妍: 女, 1995年生, 硕士生, 研究方向为高压电源技术以及数字环路控制。
- 刘雅琳: 女, 1993年生, 助理研究员, 研究方向为高压电源技术。

责任编辑: 马秀强