

等离子切割电源磁性元件的优化设计

斩波式等离子切割电源需要采用移相变压器和直流电抗器，且因功率大，磁性元件损耗会达到几千瓦以上，严重影响着转换效率的提升，为此需要通过选择高效的磁性材料和优化设计方法制作低损耗的磁性元件。比较了不同磁性材料的磁心损耗，分析了变压器结构、绕组排列方式和导线结构对磁性元件特性的影响，优先选取合适的磁材料、磁性元件结构和导线，以减少磁性元件的损耗和体积。在此基础上，提出了斩波式等离子切割电源中移相变压器和直流电抗器的优化设计流程，并给出了多种方案，通过比较分析确定最优方案，减小这两种磁性元件的体积和损耗，提高等离子切割电源的转换效率。

江剑峰 朱彬若/国网上海市电力公司电力科学研究院
赵维娜 杨喜军 唐厚君/上海交通大学电气工程系

0 引言

“切割与焊接”素有钢铁裁缝之称，已成为桥梁、建筑、机械、船舶、航母、铁道、冶金和发电设备等行业的关键制造技术之一，现代工业的发展离不开切割装置。随着国民经济发展，国家大力推行贯彻“以焊代铸”的方针，使得金属管板切割材料的总量逐年增加，对切割质量和切割效率的要求也越来越高^[1]。目前金属热切割方法主要有火焰切割、等离子切割和激光切割三种，其中火焰切割速度慢，切割面粗糙度一般，切割准确度较差；激光切割速度快、切割质量极好，但是成本很高；等离子切割可以实现较快的切割速度和较好的切割质量，且成本较激光切割低^[2-4]。

从20世纪60年代开始，等离子切割技术随电力电子半导体器件的发展而不断进步，从硅整流电源、晶闸管整流电源，发展到如今的斩波式等离子切割电

源和逆变式大功率等离子切割电源^[5]。其中，斩波式等离子切割电源具有控制电路简单、开关频率高、控制特性好和可靠性高等优点，常用于制作20 kW以上等离子切割电源，是当前大功率等离子切割电源的理想选择^[6]。在斩波式等离子切割电源中，需要使用工频变压器和直流电抗器。由于切割电源功率大、电流等级高，使用的磁性元件损耗可能会达到几千瓦以上，严重影响着功率变换效率的提升。在进行直流电抗器设计时，其损耗主要由磁心材料和导线种类决定；在进行变压器设计时，除了考虑磁心材料和导线种类外，还需考虑变压器的接线方式及绕组的排列结构。

本文基于45 kW斩波式等离子切割电源实际的运行参数来优化设计移相变压器和直流电抗器，减小两种磁性元件的体积和损耗，降低发热，提高等离子电源产品的效率。

1 斩波式等离子切割电源原理

斩波式等离子切割电源拓扑结构如图1所示。三相交流电经工频变压器降压后进行整流和滤波，再经过功率开关斩波得到脉冲电压，并通过LC滤波后输出平稳的直流电流，形成等离子弧柱。由于斩波式等离子切割电源具有控制电路简单、开关频率高、控制特性好和可靠性高等优点，常用于20 kW以上等离子切割电源中，是当前大功率等离子切割电源的理想选择。图1中，IGBT S₁与续流二极管VD₁可以采用含有一个桥臂的IGBT功率模块，使用时始终封锁高端IGBT。



江剑峰/工程师

关键词/Keywords

等离子切割机 ·
斩波式直流电源 ·
磁性元件 ·
降压变压器 ·
直流电抗器 ·

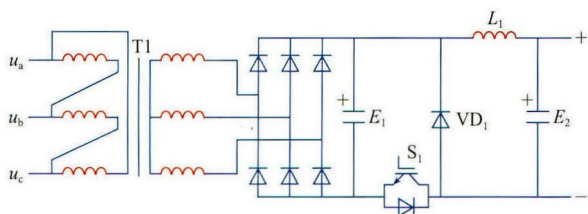


图1 斩波式等离子切割电源

文中等离子切割电源功率为45 kW，由于系统功率和电流均较大，采用两路Buck DC-DC变

换器输出端并联运行的方式，在分担系统容量的同时，能够减小开关器件的电流应力，提高系统的稳定性。两路并联折波式等离子切割电源如图2所示，当等离子切割机需要的输出电流小于130 A时，只采用一路Buck DC-DC变换器输出，允许两路变换器一用一备；当等离子切割所需要的电流大于130 A时，采用两路变换器输出并联、共同均流的方式。

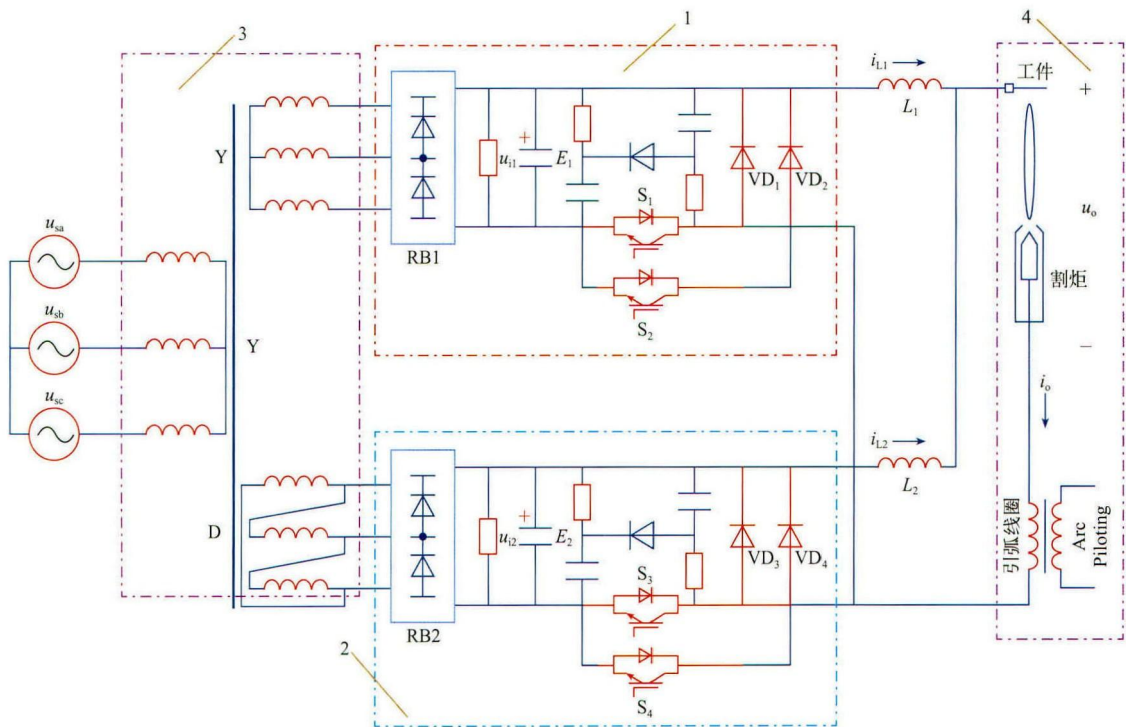


图2 两路并联斩波式等离子切割电源

图2中，“1”代表第一级Buck DC-DC变换器，包括两组中间相互连接的并联斩波IGBT和续流二极管，即 S_1 与 VD_1 、 S_2 与 VD_2 输入直流电压 u_{i1} ，输出直流电流 i_{L1} ；“2”代表第二级Buck DC-DC变换器，包括两组中间相互连接的并联斩波IGBT和续流二极管，即 S_3 与 VD_3 、 S_4 与 VD_4 输入直流电压 u_{i2} ，输出直流电流 i_{L2} ； i_{L1} 与 i_{L2} 合成输出切割电流 i_o ，根据切割工件 i_{L2} 种类和厚度，在几十安培到260 A间连续可调；“3”代表降压变压器和双二次绕组；“4”代表切割工件、割炬以及引弧装置。

鉴于斩波式等离子切割电源输入直流电压在空载时为300 V左右，输出直流电压为150 V左右，则最大占空比约为0.5。等离子切割电源采用梯形

载波和移相驱动的调制算法，如图3所示。 S_1 与 S_2 交错半个开关周期， S_3 与 S_4 交错半个开关周期， S_1 与 S_3 交错1/4个开关周期。在稳态时，即使 S_1 、 S_2 、 S_3 与 S_4 占空比等于1/2，此时总输出电流纹波频率仍然可以实现四倍频，降低了直流电抗器尺寸，提高了输出电流的准确度。

等离子切割电源采用电流闭环PI控制策略和民主均流策略，如图4所示。两级Buck DC-DC变换器输出电流的参考值均为1/2总输出电流参考值。为了消除静差和改善动态性能，采用了变速PI调节器，根据电流误差大小和方向，动态改变比例系数和积分系数，较好地适应了等离子切割电源的输出特性。驱动脉冲形成环节采用了变速PI调节器输出控制量与梯形载波相比较后，根据极性正负

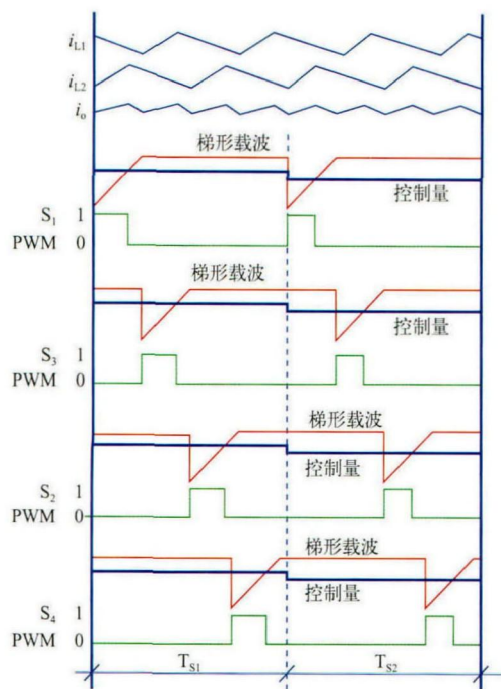


图3 四只功率开关的驱动时序

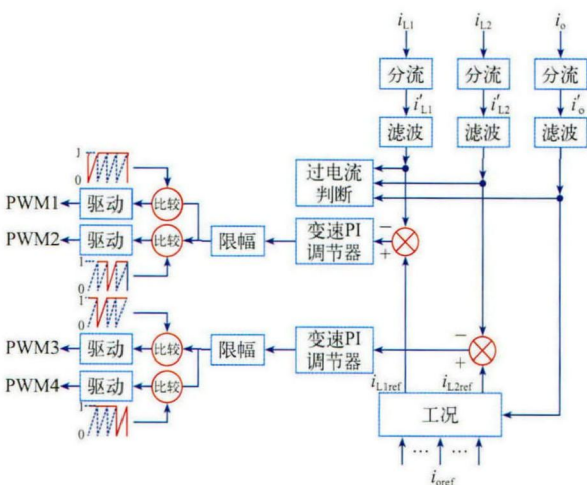


图4 等离子切割电源控制框图

产生原始PWM脉冲信号。

2 磁性材料和结构的优化选取

2.1 磁性材料

对于大功率电源，磁性元件是必不可少的关键器件，承担着能量的传递、储存以及滤波作用，其体积和重量一般占到整个电源的20%~30%，损耗占总损耗的约30%^[7]。磁心损耗 P 由磁滞损耗 P_h 、涡流损耗 P_e 和剩余损耗 P_c 共同组成，主要受磁心材料、工作频率、交流磁通密度和波形等因素的影响。

正弦励磁下的磁心损耗可以采用Steinmetz经验公式进行计算，即

$$P = Kf_s \beta \alpha^N$$

式中， α 、 β 为磁心系数，与磁心工作条件有关，可以通过磁心生产厂商查询获得，也可以通过自行测试并拟合获得^[8]。非正弦励磁下的磁心损耗计算可以通过对上述经验公式分离修正或基于傅里叶级数分解获得。

对于等离子切割电源中的直流电抗器，按磁心种类可以分为单一磁性材料电抗器和混合磁性材料电抗器两种。其中前者磁心材料可采用高磁导率材料加气隙或磁粉心，后者磁心材料可采用高、低磁导率混合或高磁导率和永磁材料混合。上述四种结构下直流电抗器的体积、成本、损耗和电感量对比如表1所示。在本文直流电抗器的设计中，综合考虑各因素选取高磁导率磁性材料加气隙的磁心结构。

表1 磁心结构设计方法对比

磁心结构	高磁导率 磁材加气隙	磁粉心	高、低磁导率 磁材混合	高磁导率磁材 加永磁材料
体积	小	大	中	小
成本	小	中	中	极大
损耗	中	中	小	大
电感量	线性	非线性	非线性	线性

2.2 移相变压器结构

斩波式等离子切割电源中使用三相整流桥，整流电路带有很强的非线性和时变性，会产生大量谐波电流污染电网系统，并且降低电网的功率因数，导致电网电压、电流发生畸变，并给其他用电用户带来不利的影响。移相变压器可以通过增加脉波数使一次电流叠加的阶梯数增多，以达到降低网侧电流谐波含量的目的，其结构简单，可靠性高，适合于大电流电源、高压变频器和高压直流输电系统^[9]。

等离子切割电源中移相变压器的设计方案可以分为12脉移相变压器和24脉移相变压器两种，如图5所示。12脉移相变压器结构和制作都很简单，网侧电流谐波畸变率大，THD_i为15.22%，功率因数为0.988 6cos α ，其中0.988 6为畸变因数，

$\cos \alpha$ 为位移因数；24脉移相变压器绕组绕制和接线复杂，网侧电流谐波畸变率小， THD_i 为7.5%，功率因数为0.997 $1\cos \alpha$ ，其中0.997 1为畸变因数， $\cos \alpha$ 为位移因数。两种方案导线规格一样，绕组和磁心用量一样，但是24脉移相变压器绕制成本较高，综合比较选取12脉移相变压器。

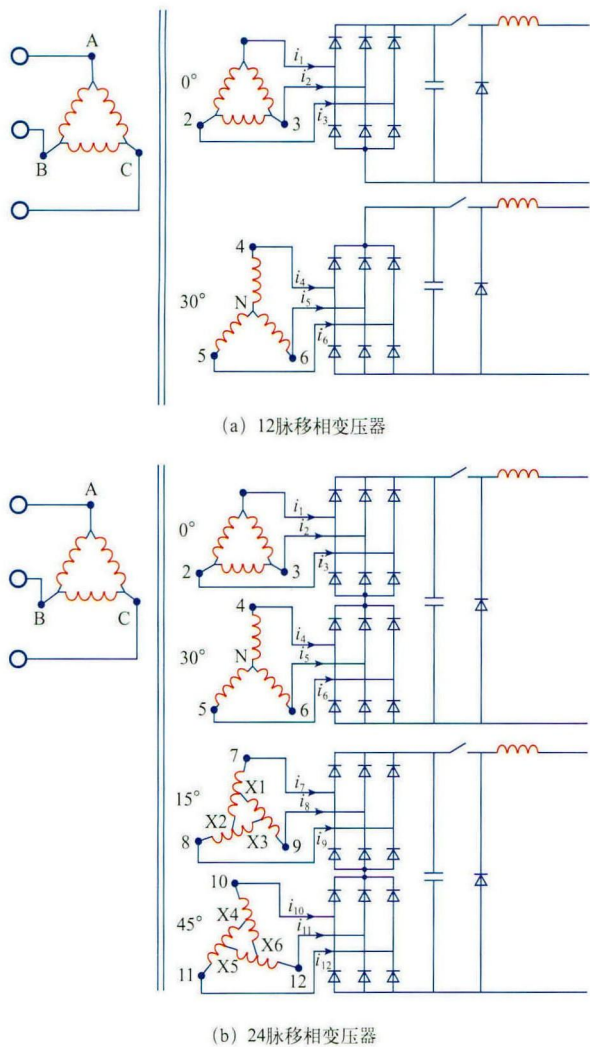


图5 移相变压器的设计方案

2.3 变压器绕组排列结构

图6为变压器绕组排列结构。图中，P表示一次绕组；S表示二次绕组；“×”表示垂直流入电流的方向；“·”表示垂直流出电流的方向；H表示磁场强度。图6a为传统结构，一次绕组的磁场强度随着绕组匝数的增加而增大，一、二次绕组交界处达到最大磁场强度，然后在二次绕组处逐渐减小到零，这种传统结构在绕组中产生很大的邻近效应和漏感。图6b为三明治结构，下绕组中的

磁场强度为传统结构的1/2，该结构可以明显减小绕组邻近效应和漏感的大小，达到合适的漏感和绕组损耗的要求。图6c、d都是交错排列绕法，均可大幅度减小一、二次绕组间的漏感和绕组邻近效应。图6d为不均匀交错排列绕法，此结构使绕组磁场强度达到传统绕组结构的1/3，改善效果比图6c更为明显。同理，也可以根据相似的原理增加交错排列的次数以及交错排列的每层绕组匝数，更加降低绕组磁场强度，改善绕组邻近效应和漏感，但是交错排列的次数越多，绕组绕制工艺也越复杂，寄生电容越大，所以在设计时需要充分考虑制作工艺和成本问题。

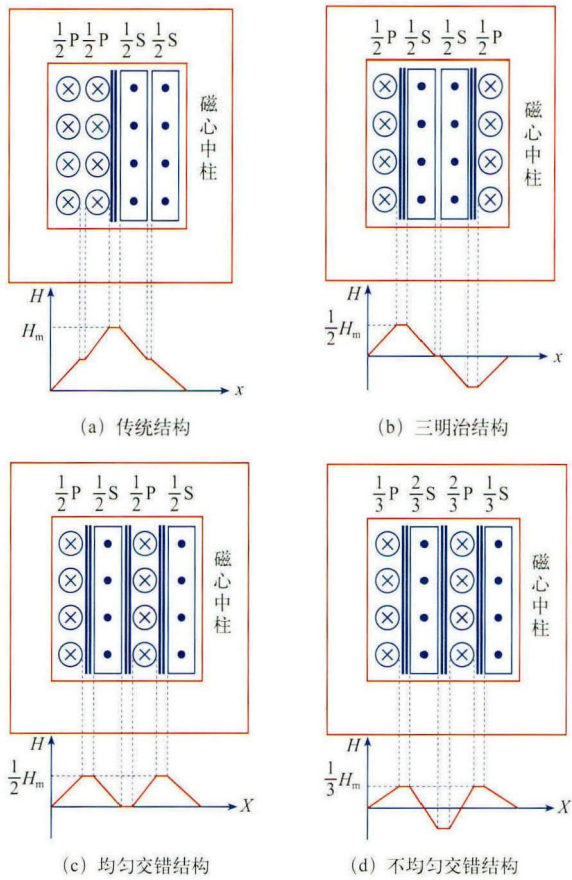


图6 变压器绕组排列结构

2.4 导线结构

绕组损耗是电流流过绕组导体所产生的欧姆损耗，通常也称为铜损。在低频时，绕组损耗可以用直流电阻和流过绕组的电流有效值进行计算，但是随着频率增大，绕组内的趋肤效应、邻近效应等高频效应带来的交流损耗快速增大，这

时交流损耗的计算就变得复杂，需要借助电磁场有限元仿真软件进行分析和计算。工作频率、绕组与气隙之间的距离以及分布气隙的数量、导线线规等因素都会对绕组损耗产生直接影响，选择一个合适的绕组导线可以大幅降低绕组损耗。常用的导线有圆线、扁线、铜箔和绞线，如图7所示。

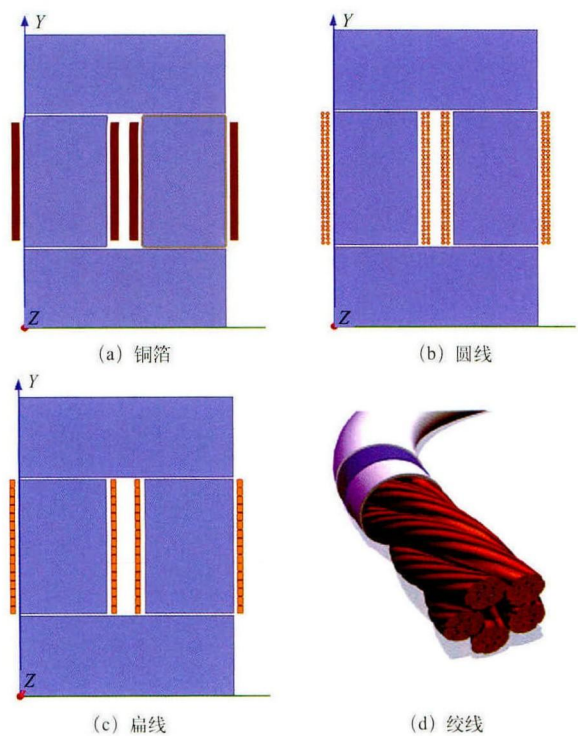


图7 导线的结构

表2是通过电磁仿真软件MAXWELL有限元辅助仿真得到的导线交流电阻和直流电阻的关系。其中绞线结构过于复杂，仿真建模和计算难度较高，所以绞线的电阻参数以实验测量代替仿真结果。绞线是交流损耗最小的导线，因为其线径细小，且绞线工艺可以有效对抗趋肤效应和邻近效应，极大地降低了交流损耗，应用频率范围宽，但其加工复杂成本高，是最贵的一种导线。铜箔薄相对于扁线有着较小的趋肤效应，在一定的分布气隙和匝数下有很低的交流损耗，但是邻近效应明显，如果铜箔的匝数增大，交流损耗会快速上升，适合低匝数的磁性元件设计。圆线交流损耗适中，绕制简单，成本低，受制于最大线径和趋肤效应的影响，对于大电流电抗器通用性不强。扁线交流损耗大，绕制简单，成本低，散热差。综合评估后，文中等离子电源直流电抗器选用铜箔作

为导线，成本适中，交流损耗小，散热较好。

表2 导线交流电阻与直流电阻的关系

导线	直流损耗/W	交流损耗/W	总损耗/W	R_{ac}/R_{dc}
铜箔	296.3	2.6	298.9	28.4
圆线	298.9	6.5	305.4	69.4
扁线	289.0	13.7	302.7	152.1
绞线	293.4	0.9	294.3	10 (估)

3 磁性元件设计及验证

3.1 直流电抗器设计

直流电抗器的计算方法主要采用AP法，但是直流电抗器具有很大的直流偏置量，设计时还要求短时最大电流运行条件下感量不能下降。在AP法计算公式中代入的电流选择额定电流或最大电流都会导致设计误差。如果代入额定电流，则设计出的直流电抗器无法满足短时最大电流情况下的电感量要求；如果代入最大电流，则会出现直流电抗器尺寸大、成本高的情况。直流电抗器设计流程如图8所示。

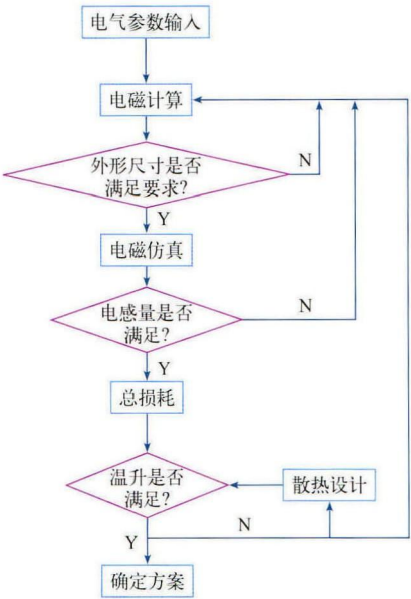


图8 直流电抗器的设计流程

直流电抗器输入电气参数有电压等级、最大电流、额定电流、纹波电流、工作频率和电感量等；设计程序中选取的结构参数有匝数、导线线径、磁心片宽、磁心片厚和气隙长度等。同时添加计算的边界条件（即机柜内安装尺寸限制和温升限制），通过对变量全扫描计算寻找满足条件

的最低损耗方案和最低成本方案，如果需要同时考虑，可以设置损耗和成本目标占比，取折中方案。直流电抗器的电感量与等离子切割电源的纹波电流和工作频率有关，电感量与纹波电流幅值和工作频率均成反比关系，现分别从等离子切割电源纹波系数和工作频率两方面分析直流电抗器的优化设计。

在保持工作频率不变的情况下，纹波电流与直流电抗器电感量成反比关系。理论上，其值越

小，电源工作特性越好。假设等离子切割电源工作频率保持10 kHz不变，分析纹波电流改变时对直流电抗器重量、损耗和外形尺寸的影响，如表3所示。纹波电流越大，电感量越小，直流电抗器重量越轻，损耗越小，外形尺寸越小。综合评估后，在保证直流电源稳定运行的情况下，适当增大纹波电流，可以有效降低直流电抗器的重量、体积、损耗和成本，本文等离子切割电源纹波电流系数选取5.0%。

表3 定频率方案对比

纹波系数(%)	电感量/mH	线圈重量/kg	磁心重量/kg	总重量/kg	线圈损耗/W	磁心损耗/W	总损耗/W	外形尺寸/(mm×mm×mm)
0.5	20	10.4	512.7	523.2	1 046.3	0.3	1 046.6	416×404×498
1.0	10	6.5	264.1	270.7	655.7	6.8	662.4	328×342×384
2.0	5.0	4.3	133.0	137.3	433.2	11.4	444.6	242×302×305
3.0	3.33	3.8	72.2	76.0	387.1	12.6	399.7	182×288×245
5.0	2.0	3.0	37.7	40.7	298.9	16.0	314.9	164×196×224

在保持纹波电流幅值不变的情况下，直流电抗器电感量与频率成反比关系：工作频率高时，电感量可以减小，电抗器体积小，磁心损耗大，同时由于高频效应导致绕组损耗大；工作频率低时，电感量较大，电抗器体积大，磁心损耗小，同时由于高频效应导致的绕组损耗小。

保持纹波电流5.0%不变，增大工作频率，减小电感量，分析工作频率改变时对直流电抗器的重量、损耗和外形尺寸的影响，如表4所示。工作频率越高，电感量越小，直流电抗器重量越轻，损耗越低，外形尺寸越小。开关频率受制于功率等级（开关损耗和导通损耗）、IGBT 的开关速度等，因此开关频率取值范围为5~20 kHz。综合评

估后，选取优化设计结果：开关频率20 kHz，电感量1.0 mH，线圈重量1.6 kg，磁心重量27.1 kg，线圈直流损耗163.3 W，交流损耗1.7 W，磁心损耗32.5 W，外形尺寸（不含机构件）156 mm×144 mm×222 mm。对比2 mH和10 kHz的方案，损耗降低37.2%，总重量降低29.5%，成本降低29.2%。

3.2 移相变压器设计

移相变压器的设计流程如图9所示。移相变压器输入电气参数有电压等级（决定了一、二次绕组间的电气绝缘距离）、电压比、额定电流和漏感等；设计程序中选取的结构参数有匝数、磁心片宽、叠厚、导线线径、气道距离和气道数量等。同时添加计算的边界条件（即机柜内安装尺

表4 定纹波电流方案对比

频率/kHz	感量/mH	线圈重量/kg	磁心重量/kg	总重量/kg	线圈损耗/W	磁心损耗/W	总损耗/W	外形尺寸/(mm×mm×mm)
5.0	4.0	4.2	87.7	91.9	422.3	13.1	435.3	204×285×262
7.5	2.67	3.3	57.8	61.1	331.1	25.2	356.3	182×234×242
10.0	2.0	3.0	37.7	40.7	298.9	16.0	314.9	164×196×224
12.5	1.6	2.4	36.8	39.1	238.3	21.9	260.2	160×191×222
15.0	1.33	2.0	35.9	37.8	197.7	28.8	226.6	156×186×222
17.5	1.14	1.8	30.9	32.6	179.0	36.2	215.2	156×162×222
20.0	1.0	1.6	27.1	28.7	165.0	32.5	197.5	156×144×222
22.5	0.89	1.6	21.2	22.8	163.8	30.6	194.4	148×130×222
25.0	0.8	1.5	19.1	20.7	154.4	32.2	186.6	148×119×222

寸限制、温升限制等），通过对变量全扫描计算寻找满足条件的最低损耗和最低成本方案，如果需要同时考虑，可以设置损耗和成本目标占比，做一个折中方案。

磁心可以采用无取向硅钢片、有取向硅钢片和非晶合金三种磁性材料；导线可以采用铝线和铜线，都会对成本和损耗产生影响。通过三种磁性材料和两种导线进行组合，并分别计算重量、外形尺寸和成本，其分析比较结果如表5所示。通过表5的数据对比分析可知，非晶合金在磁心损耗方面有巨大优势，但是非晶合金磁心的叠片系数和磁饱和都低于硅钢片，导致非晶合金移相变压器外形尺寸大，而且磁心成本高；有取向硅钢片与无取向硅钢片移相变压器整体相比，20%的成本

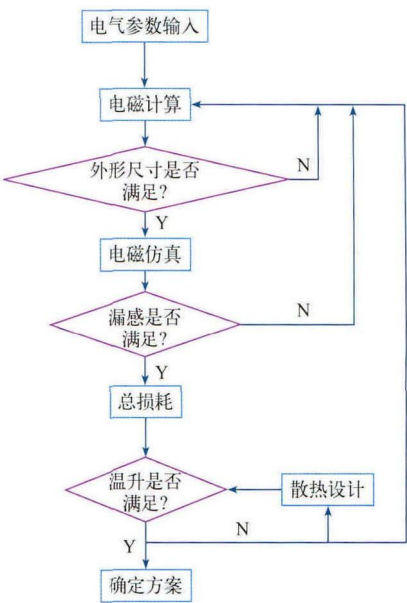


图9 移相变压器设计流程

表5 铝线和铜线移相变压器方案对比

导线材质		铝线			铜线		
磁心材质		无取向硅钢片	有取向硅钢片	非晶合金	无取向硅钢片	有取向硅钢片	非晶合金
重量/kg	线圈	45	42	48	57	53	85
	磁心	191	143	169	204	158	154
	总重量	286	231	264	319	253	286
线圈损耗/W		1 422	1 340	1 535	1 397	1 361	1 618
磁心损耗/W		300	143	28	278	146	23
总损耗/W		1 723	1 483	1 562	1 675	1 507	1 641
外形尺寸/mm×mm×mm		580×410×590	550×410×560	610×430×600	550×440×550	520×410×530	570×410×590
铜铁成本/元		3 403	4 092	12 584	4 081	4 858	13 475

换取10%~15%的损耗和10%~15%的体积；铜线与铝线移相变压器整体相比，20%的成本换取小于5%的损耗和5%~10%体积；综合评估后，铝线有取向硅钢片移相变压器比较平衡。

4 实验结果

根据本文的优化设计方法设计完成的等离子切割电源如图10a所示，等离子切割电源部分功率电路如图10b所示，直流电抗器如图10c所示，移相变压器如图10d所示。

等离子切割电源采用两路Buck DC-DC变换器并联，电路参数如下：三相输入交流电压380 V，移相变压器380 V/220 V+220 V，每级Buck变换器最大输出直流电流130 A，整体最大输出直流电流260 A，输出直流电压150 V，纹波电流峰峰值不

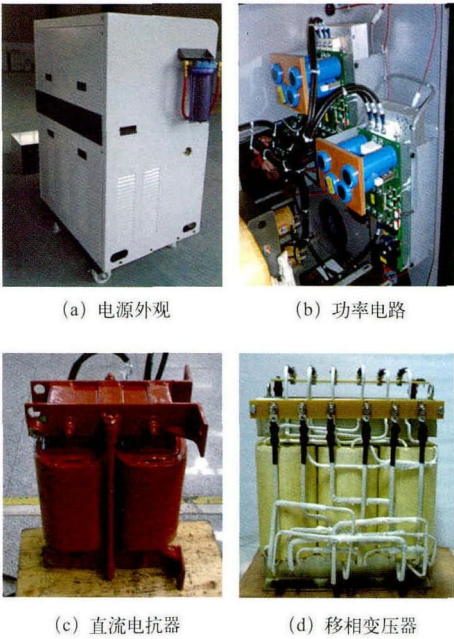


图10 等离子切割电源实物

大于10 A，开关频率20 kHz，直流电抗器1 mH，网侧输入电抗器为0.5 mH，网侧电容为2.2 μ F，整流滤波电解电容为4 $\times$ 6 800 μ F/450 V。IGBT功率模块采用SKM300GB063D，驱动器采用HCPL-316J，控制器采用F28335。等离子切割电源内部加设三台风扇强冷，因此移相变压器和直流电抗器温升较低。

引弧时输出电压与输出电流波形如图11所示，起动时输出电压与输出电流波形如图12所示，切割时输出电压与输出电流波形如图13所示。实验结果可以反映出等离子切割电源磁性元件设计是成功的。

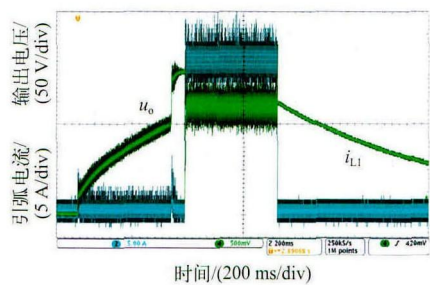


图11 引弧时输出电压与输出电流波形

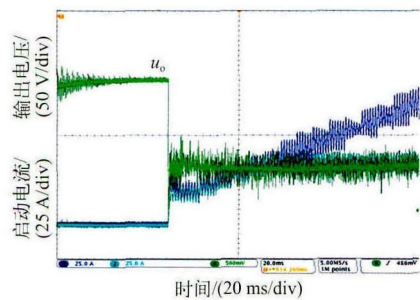


图12 起动时输出电压与输出电流波形

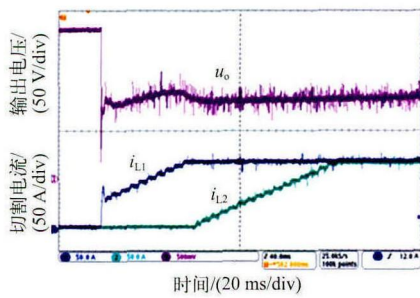


图13 切割时输出电压与输出电流波形

5 结束语

在理论分析斩波式等离子切割电源中两级Buck DC-DC变换器的调制算法和控制策略后，

分析了直流电抗器和移相变压器的优化设计方法，给出了设计流程和实验结果，得出以下几点可参考结论：

1) 两级Buck DC-DC变换器可以采用梯形载波移相驱动的调制方式，可以在任何占空比的情况下实现总输出电流4倍频，提高了电流准确度，改善了切割质量。

2) 对于直流电抗器，需要在确保纹波电流指标和切割质量的前提下，适当提高开关频率，以便降低电感取值，减少体积和重量，开关频率可选范围为10~20 kHz，电感取值1 mH左右，可以采用平面电感设计，同时可以进一步降低铜耗。

3) 对于工频移相变压器，需要综合评估成本、体积和功耗，磁心材料可以采用较薄的有取向硅钢片，导线可以采用扁铝线，绕线层间隔留出空隙，用于通风散热。

参考文献

[1] 李浩. 基于第三代等离子切割技术的系统分析 [J]. 船舶标准化工程师, 2011 (5): 63-68.

[2] 王永飞. 等离子切割技术概况及应用 [C]. 第十六次全国焊接学术会议论文摘要集, 2011: 966-970.

[3] 王连仲, 崔永元. 国内外数控等离子切割技术的发展趋势 [J]. 机械工人, 2002 (5): 15-16, 21.

[4] 杭争翔, 马学智, 马钰钧, 等. 等离子切割在热切割中的地位 [J]. 沈阳工业大学学报, 1999 (6): 479-481.

[5] 贾德利, 尤波, 任文波, 等. 大功率IGBT逆变式空气等离子切割电源的关键技术 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2008 (2): 109-112.

[6] 邓禹, 钟和清, 林磊. 大功率等离子切割电源研制 [J]. 电焊机, 2013 (9): 17-19.

[7] 陈为, 何建农. 电力电子高频磁件的研究内容和发展趋势 [J]. 电工电能新技术, 2000 (2): 30-34.

[8] Chas, Proteus Steinmetz. On the law of hysteresis [J]. Proc. IEEE, 1984, 72 (2): 197-221.

[9] 高蕾. 多相整流变压器输出电压不平衡及影响的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

(收稿日期: 2016-10-10) EA