

# EB-PVD设备逆变电源研制\*

许海鹰, 桑兴华, 邢一思, 左从进, 崔向中, 姜春竹

(航空工业北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024)

**[摘要]** 为了提高 EB-PVD 设备性能、增强其工作灵活性, 基于三级 AC-DC 拓扑电路、多路逆变电路串并联技术、双闭环控制策略分别设计制造了加速电源、灯丝加热电源, 并将所研制加速电源、灯丝加热电源与两极电子枪、真空系统、控制系统等进行集成, 组成 EB-PVD 试验装置, 分别测试了该装置输出的高压、最大束流、灯丝加热电流、功率变压器输入波形等。试验结果表明: 所研制的逆变电源输出高压达到  $-30\text{kV}$ , 束流输出时逆变电源输出特性为恒压特性; 灯丝加热电流最大  $150\text{A}$ , 最大束流达到  $2000\text{mA}$ 。这表明所研制的逆变电源满足 EB-PVD 设备工作需求。

**关键词:** EB-PVD 设备; 逆变电源; 灯丝加热电源; 控制电路; 束流

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2018.08.016



许海鹰

工学博士、高级工程师, 研究方向为高能束设备技术, 发表论文 20 余篇, 申请发明专利 10 余项。

目前, 航空工业发达的国家已普遍采用热障涂层(TBCs)技术来提升高推重比航空发动机性能, 发动机叶片采用 TBCs 后可以提高发动机功率和热效率、降低燃油损耗、延长

\* 基金项目: 中国航空工业集团有限公司创新基金项目(2013E62519)。

使用寿命<sup>[1-4]</sup>。常用的 TBCs 制备技术有等离子喷涂技术和电子束物理气相沉积(EB-PVD)技术, 一般等离子喷涂技术制备的热障涂层由于基体与涂层之间的结合力低, 难以适应高推重比航空发动机叶片涂层质量的需求。EB-PVD 是在真空环境下, 涂层材料受热蒸发, 以原子、分子的形式涂覆在叶片表面, 涂层和基体之间以化学键形式结合, 强度高、涂层表面光洁度好, 几乎无须后续工艺处理。

国内早期制备 TBCs 的 EB-PVD 设备从乌克兰引进, 通常采用“四或六枪一电源”模式, 即所有的电子枪共用一个电源, 电源体积庞大、设计制造难度大、控制复杂, 而且容易造成电子枪在使用时相互干扰。

为了提高国产化 EB-PVD 设备技术水平, 国内采用了“一枪一电源”模式, 该模式可以在任一电源或电子枪出现故障时, 其他电源—电子枪系统依然能正常工作。

本文基于三级 AC-DC 拓扑电路、电流与电压双闭环控制策略, 为每一把电子枪研制了基于 IGBT 逆

变的  $30\text{kV}/60\text{kW}$  新型 EB-PVD 设备逆变电源。将所研制的三组逆变电源分别与 EB-PVD 两极电子枪连接, 配套真空系统和控制系统等, 组成 EB-PVD 设备系统, 对各个逆变电源输出波形进行检测分析。此研究为自主知识产权的多源蒸发 EB-PVD 设备的研制奠定了技术基础。

## EB-PVD 设备束源结构

EB-PVD 设备系统包括电源、电子枪、真空室、工件运动控制系统、靶材进给系统等, 其中电源和电子枪构成的电子束源是所有 EB-PVD 设备系统的核心部件。

目前, EB-PVD 设备所用热阴极电子枪通常是包括阴极、阳极的两极电子枪, 阴极通常是基体材质为钨的灯丝, 阳极是能够产生静电汇聚效应的轴对称结构<sup>[5]</sup>, 电子束流通过调整灯丝加热电流大小来调节, 通常灯丝、阳极沿着电子束轴线位置从上到下依次安装。

为了获得稳定的可控电子束流输出, 所研制的  $30\text{kV}/60\text{kW}$  逆变电源中除了包括  $30\text{kV}$  加速电源外, 还

需要为灯丝加热的电源。所研制逆变电源与EB-PVD电子枪连接示意图如图1所示。所研制逆变电源电压调节范围为0~30kV;灯丝加热电源的输出电流0~150A可调。

### EB-PVD 电源拓扑及控制电路

#### 1 加速电源拓扑电路

如图2所示,加速电源由两部分组成,一部分是提供500V/20kHz交流电的逆变器部分,另一部分是输出负高压的高压油箱部分。在逆变器部分,包括两组同等功率、相同拓扑电路的AC/DC隔离电路和全桥逆变电路;高压部分是由两组同等功率、相同拓扑结构的升压整流滤波电路串联而成。

三相380V交流电经AC/DC隔离电路1与全桥逆变电路1的电压变换过程为:三相380V交流电经AC/DC隔离电路1后,获得电压0~500V连续可调的直流电,再经全桥逆变电路1变换后输出20kHz的交流方波。三相380V交流电经AC/DC隔离电路2与全桥逆变电路2的电压变换过程与上述相同。

在高压油箱部分,高压逆变功率变压器Ba<sub>1</sub>、Ba<sub>2</sub>的同名端一致,输入均为全桥逆变电路1输出的20kHz左右的交流方波,高压功率变压器Ba<sub>1</sub>、Ba<sub>2</sub>的原副边变比均为1:16,将输入的0~500V变化的低压交流电转化成0~8000V频率相同的高压交流电;经高压功率变压器Ba<sub>1</sub>、Ba<sub>2</sub>的输出端串联,变成0~16000V交流电,再经过D<sub>11</sub>、D<sub>12</sub>、D<sub>13</sub>、D<sub>14</sub>组成的全桥整流电路A整流,变成一组负高压直流电;高压逆变功率变压器Bb<sub>1</sub>、Bb<sub>2</sub>与Ba<sub>1</sub>、Ba<sub>2</sub>的原副边变比相同,经过高压逆变功率变压器Bb<sub>1</sub>、Bb<sub>2</sub>升压,再由相应全桥整流电路整流后获得另外一组负高压,两组负高压串联后获得0~-32000V的负高压输出。D<sub>11</sub>、D<sub>12</sub>、D<sub>13</sub>、D<sub>14</sub>组成的全

桥整流电路A输出的负端经过限流电阻后联接灯丝加热电源;D<sub>11</sub>、D<sub>12</sub>、D<sub>13</sub>、D<sub>14</sub>组成的全桥整流电路的正端连接D<sub>21</sub>、D<sub>22</sub>、D<sub>23</sub>、D<sub>24</sub>组成的全桥整流电路的负端,该全桥整流电路的正端通过束流采样电阻R<sub>11</sub>后接地。

所采用的逆变加速电源拓扑电路从三相380V交流电开始到-30kV电压输出,电压变化经历了三级AC-DC变换,第一级AC-DC变换是从三相380V交流电经过全桥整流后变成直流500V;第二级AC-DC变换是将上述直流500V经过全桥逆变整流后变成0~500V可调的直流;第三级AC-DC变换是将0~500V可调的直流电经全桥逆变升压整流后变成负高压输出。

采用三级AC-DC拓扑电路,是为了减少由于电子枪放电产生高压脉冲尖峰通过电源线路耦合到电网对其他设备造成的损害,所研制电源的AC/DC隔离电路均采用隔离逆变拓扑电路,详细设计电路在文献[6]中进行了描述。

为了满足60kW的功率输出,逆变器采用2组30kW全桥逆变电源并联的方案,每个桥路驱动一组变压器,每组变压器包括两个升压变压器,每组变压器中的2个变压器原边并联、副边串联;可将电压最高升压到16000V;然后再将两组升压变压器的输出端进行全桥整流之后串联,使最高输出电压达到-32000V。

由于最大输出束流需达到

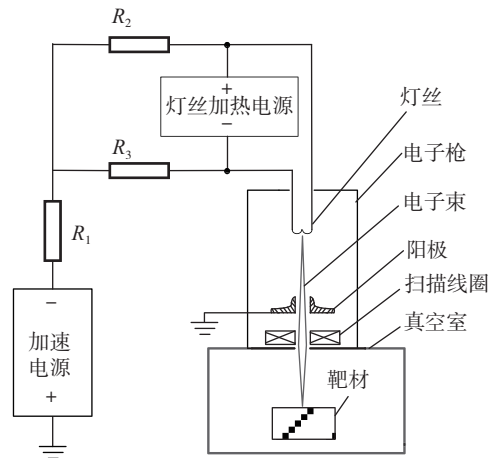


图1 电源与EB-PVD电子枪连接示意图

Fig.1 Connecting sketch about inverter power source and EB-PVD electron beam gun

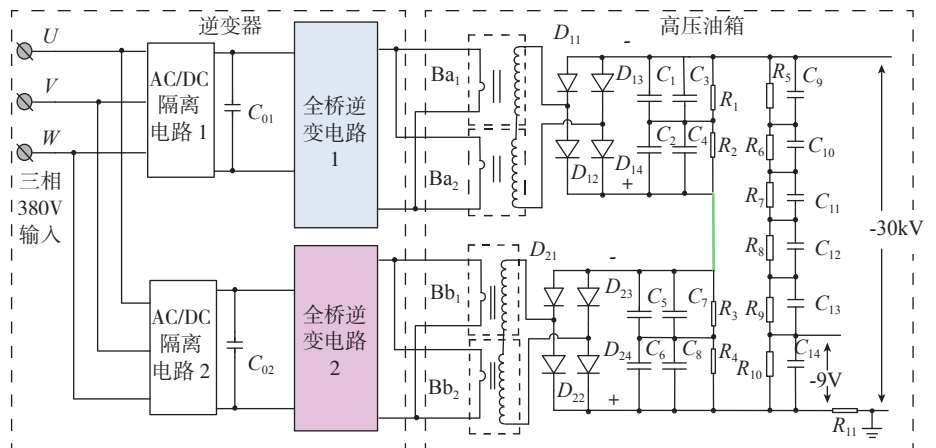


图2 EB-PVD设备加速电源拓扑电路

Fig.2 Topology circuit of inverter accelerating power supply of EB-PVD equipment

2000mA, 拓扑电路采用两组变压器在副边串联的模式, 则每个变压器副边电流均需达到 2000mA, 单只变压器的功率应该不小于 15kW。为保障设备长期稳定工作, 将每只变压器的功率设计成 17.5kW, 预留了足够功率裕量。

在图 2 所示的 EB-PVD 加速电源拓扑电路中, 功率升压变压器副边整流的二极管选用耐压 40kV、最大电流 5A 的高压高频二极管, 滤波电容选用耐压 30kV 的高压薄膜电容。在滤波电容两端并联同样规格的高压电阻, 组成均压电路, 均衡滤波电容两端承受电压, 并可在电源关闭时, 泄放掉电容上存储的电荷。为了精确控制高压输出, 在负高压输出端和地之间并联了由电阻  $R_5$ 、 $R_6$ 、 $R_7$ 、 $R_8$ 、 $R_9$ 、 $R_{10}$  串联组成的高压采样电路, 所串联电阻的总耐压大于 60kV, 高压采样电路输出电压信号 0~9V, 对应 0~30kV 输出。

在图 2 所示的逆变加速电源拓扑电路中,  $R_{11}$  为束流采样电阻, 由 4 只 18Ω/50W 功率电阻并联组成。

采用多路逆变电源并联, 变压器串、并联的技术不但可降低变压器的设计难度<sup>[7]</sup>, 还可将每个逆变电路及控制系统设计成模块, 高压油箱中的每个变压器及整流电路也设计成模块, 这样可根据电源的功率需要, 通过增加或减少功率模块达到设计要求。

为了提高所研制电源的工作稳定性, 加速电源和灯丝加热电源都采用三级 AC-DC 拓扑电路结构。灯丝加热电源设计制造的难点在于第三级 AC-DC 所用变压器。

## 2 灯丝加热变压器设计

由于灯丝加热变压器悬浮在 -30kV 电压之上, 变压器原边绕组和副边绕组之间要有足够高的耐压强度, 需要在原边绕组和副边绕组之间加入绝缘骨架。常用的绝缘骨架是带环形凸台的套筒状结构, “U” 形或

“C” 形磁芯在套筒中对接, 原边绕组绕制在套筒内部的磁芯上。由于采用两个磁芯对接方式, 磁芯接触面很难达到最理想的接触状态, 使得变压器工作时漏感增大, 变压器功率难以大幅提高。

所设计的灯丝加热变压器原边绕组和副边绕组之比是 30 : 1。由于灯丝加热变压器输出电流高达上百安, 采用的常规导线至少需要 30mm<sup>2</sup> 以上的截面积, 副边绕组绕制极其困难, 为了解决技术难题, 基于多重绝缘方式采用环形非晶磁芯, 设计了一种如图 3 所示的全新结构的灯丝加热变压器。

采用聚四氟、有机玻璃、变压器油设计多重绝缘结构来隔离原边、副边绕组。设计凹槽状聚四氟骨架, 将绕制了原边绕组的磁芯放置在凹槽内, 再用聚四氟盖板封闭; 然后将其安装在聚四氟基座上, 在基座两侧安装有机玻璃板, 副边绕组仅为一匝, 由两块环形紫铜板、多根紫铜杆组成闭合回路形成一匝。副边绕组结构环绕整个磁芯和原边绕组, 这样不仅可大幅度减小变压器漏感, 还可降低变压器谐振电流<sup>[8]</sup>。

由于灯丝加热变压器安装在高压油箱内部, 高压油箱内部充满 25 号变压器油, 绕制原边绕组的磁芯与聚四氟骨架内侧有 2mm 间隙, 副边绕组结构与聚四氟骨架隔离 5mm 以上, 在原边绕组和副边绕组之间便形成了变压器油—聚四氟—变压器油的多重绝缘层, 每 1mm 绝缘层耐压至少 10kV, 使得灯丝加热变压器耐压强度足够大, 为灯丝加热电源稳定工作提供技术保障。

## 3 控制电路

### 3.1 加速电源控制电路

逆变加速电源中第二级 AC-DC 与第三级 AC-DC 变换拓扑电路中的第一逆变电路与第二逆变电路分别采用不同的控制模式, 其中第一逆变电路通过 PWM 调节来改变加速电

源的输出电压, 第二逆变电路采用定频满脉宽的控制方式。为了提高加速电源的输出稳定度, 第一级逆变电路采用了内、外环控制相结合的方式进行调节。

图 4 为加速电源的电压闭环控制电路原理框图。其中, 采用高压采样隔离电路从加速电源输出端获得高压反馈信号  $U_{HVF}$ , 所设计的  $U_{HVF}$  最大反馈信号为 -9V。

外部高压给定信号  $U_{HVg}$  作为外环 PID 调节电路的输入, 其输出值  $U_g$  与第二级 AC-DC 输出电压的反馈信号  $U_f$  作为内环 PID 调节电路的输入, 内环 PID 调节电路输出  $U_{gg}$ , 再调节 PWM 发生及保护电路 1 所产生的 PWM 脉冲宽度, 从而改变第一级逆变电路中 IGBT 的开通时间, 继而导致第二级 AC-DC 输出的直流电压改变, 从而使高压输出得到调节。因此, 当闭环调节电路稳定时, 加速电源的输出高压就与设定值相等。

为了保障逆变电路  $A_1$  与逆变电路  $B_1$  经过整流调节后输出电压相同, 分别采样整流电路  $A_{01}$  与整流电路  $B_{01}$  输出的直流电压后取平均值作为第二级 AC-DC 输出电压的反馈信号  $U_f$ , 经 PWM 发生及保护电路 1 输出的 PWM 信号分成相同频率、占空比的两组信号, 分别经过 IGBT 驱动电路 1 和 IGBT 驱动电路 3 驱动逆变电路  $B_1$  和逆变电路  $A_1$  中的

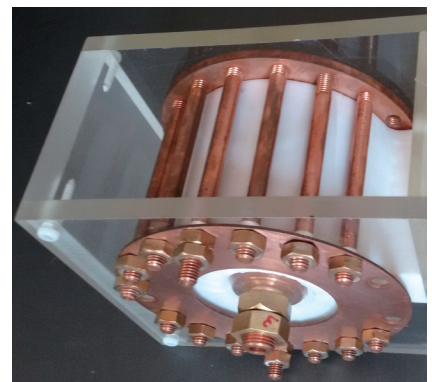


图3 灯丝加热变压器实物  
Fig.3 Practicality of filament heating transformer

IGBT。

高压反馈信号  $U_{HVF}$  同时输入到 PWM 发生及保护电路 2, 当出现不可恢复的过压信号时, PWM 发生及保护电路 2 输出关断逆变输出的信号, 关闭逆变电路  $A_2$ 、 $B_2$  中的 IGBT。正常工作时, 由 PWM 发生及保护电路 2 输出 PWM 信号频率为 20kHz、占空比 45%, 分别经过 IGBT 驱动电路 2 和 IGBT 驱动电路 4, 控制逆变

电路  $B_2$ 、 $A_2$  中 IGBT 开关。

### 3.2 灯丝加热电源控制电路

为了提高 EB-PVD 电子枪灯丝使用寿命, 提高灯丝加热电源工作稳定性, 设计了如图 5 所示的灯丝加热电源闭环控制电路。

在图 5 中, 将束流给定信号  $I_{sg}$  与束流反馈信号  $I_{sf}$  引入灯丝加热电源外环 PID 调节电路, 它的输出  $U_{gl}$  作为灯丝加热电源内环 PID 调节电

路的输入,  $U_{gl}$  与灯丝加热电源的第二级 AC-DC 输出电压反馈电压信号  $U_{fl}$  经过内环 PID 调节电路比较后, 输出电压调节信号  $U_{dsg1}$ , 改变灯丝加热电源第二级 AC-DC 中 IGBT 的导通时间, 从而使得灯丝加热电源输出的直流电压得到调节, 继而使灯丝加热电流得到调整<sup>[6,9]</sup>, 最后使束流得到调节。

灯丝加热电流的反馈信号  $I_{dsf}$  从第三级 AC-DC 的变压器  $TR_2$  原边取样, 用于检测灯丝通过电流, 为灯丝加热电源保护提供参考依据。

### 试验结果与讨论

将所研制的逆变电源与 30kV/60kW 电子枪、真空系统、控制系统等进行集成, 组成 EB-PVD 试验装置, 通过检测加速电源功率变压器原边电流与电压波形、灯丝加热变压器原边电压波形等分析逆变电源输出特性。

#### 1 输出负高压及最大束流检测分析

空载时, 逐渐增加输出电压给定值, 采用两只经过标定的万用表分别检测加速电源的第二级 AC-DC 输出的直流电压及其对应高压采样电阻上的电压信号  $U_{HVF}$ , 高压逆变电源输出加速压  $U_{HV}$  (单位: kV) 可通过公式(1)计算获得。

$$U_{HV} = \frac{-30}{9} \times U_{HVF} \quad (1)$$

当给定高压信号达到 9V, 检测到加速电源第二级 AC-DC 输出的直流电压达到 350V 左右时, 高压采样电阻上的电压达到 -9V, 根据式(1)计算结果, 表明高压逆变电源空载电压达到 -30kV。

根据检测的数据, 绘制出如图 6 所示的高压给定信号对应高压输出的特性曲线, 可以看出, 加速电源输出具有较好线性度。

逐渐加大灯丝加热电流, 束流逐渐增大, 加速电源第二级 AC-DC 输出的直流电压也逐渐增大, 检测高

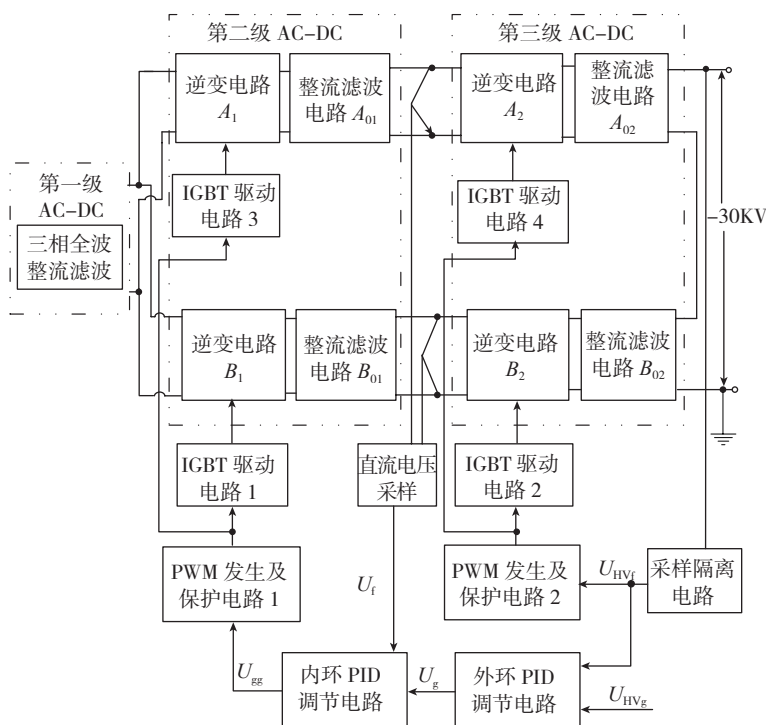


图4 加速电源控制电路框图

Fig.4 Schematic diagram of closed loop control circuit for accelerating power supply

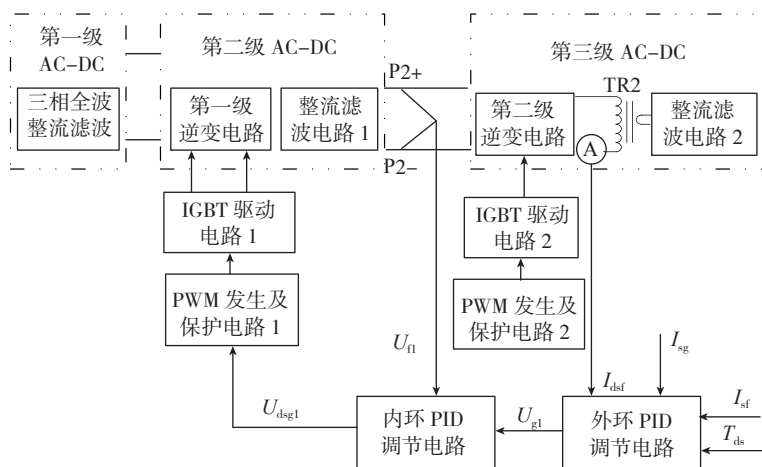


图5 灯丝加热电源闭环控制电路框图

Fig.5 Schematic diagram of closed loop control for filament heating power supply

压采样电阻上的电压和加速电源第二级 AC-DC 输出的直流电压,根据所采集数据,绘制出如图 7 所示的波形,可以看出加速电源的输出为恒压特性,高压稳定度小于 0.5%。

在灯丝加热电流 150A, 高压输出 -30kV 时,采用 TPS2024 示波器分别检测一组功率变压器原边电压与电流的波形,并在束流采样电阻  $R_{11}$  上检测到最大反馈信号为 9.05V, 实现了 30kW 额定功率和最大束流输出。

在一组功率变压器上所检测到的原边电压与电流的波形如图 8 所示。可以看到, CH2 是功率变压器初级绕组电压波形, CH4 是功率变压器初级绕组电流波形,电流电压的频率为 21.6kHz, 初级绕组电流传感器为变比 500 的交流霍尔传感器,采样电阻 24Ω, 计算得到的次级绕组电流为 2.6A, 能够满足最大束流输出的需求。

## 2 灯丝加热电流检测分析

灯丝加热电源第二级 AC-DC 输出的直流电流采样电阻 1kΩ, 电流霍尔传感器变比 1 : 500, 在给定灯丝加热电流 50A 时, 所采集到灯丝加热变压器原边电压波形 CH1 与采样电阻上的电压波形 CH2 如图 9 所示。可以看出, 灯丝加热变压器原边为标准方波, 频率 21.55kHz, 灯丝加热电源第二级 AC-DC 输出的直流电流稳定。

为了检测灯丝加热电流与束流输出对应的关系, 在所集成的 EB-PBD 试验装置中, 逐渐加大灯丝加热电流, 每隔 5A 记录一次束流值, 将所采集数据绘制成如图 10 所示曲线。

图 10 中, 在灯丝加热电流小于 100A 时, 没有束流输出; 灯丝加热电流超过 100A, 有束流输出, 随着灯丝加热电流增加而增大, 束流输出呈线性增大趋势; 灯丝加热电流大于 150A 以后, 再增加灯丝加热电流, 束

流几乎不会变化。这与灯丝热发射电子的固有特性<sup>[10]</sup>有关。

灯丝加热电流大于某一值后, 若再增加, 灯丝加热电流与束流输出对应的关系曲线与其他热阴极电子枪依靠灯丝加热电流调节束流方式类

似, 束流的变化经历死区、线性增大区和恒流区。

## 结论

(1) 分别采用三级 AC-DC 拓扑电路、双闭环控制电路, 研制了 EB-

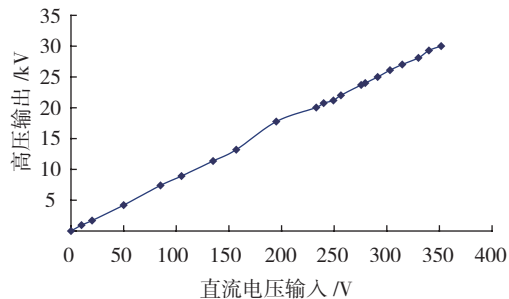


图6 空载时加速电源输出曲线

Fig.6 Curve of accelerating power supply output without loading

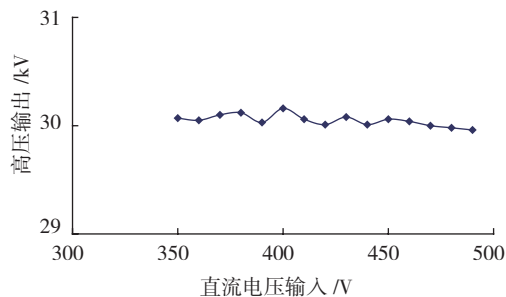


图7 带载时加速电源输出特性曲线

Fig.7 Curve of accelerating power supply at loading

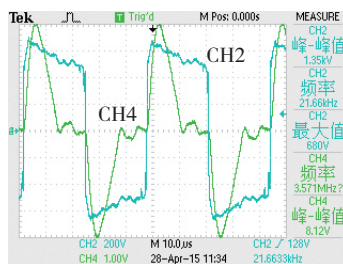


图8 功率变压器初级绕组电压与电流波形  
Fig.8 Waves of voltage and current at original coils of power transformer

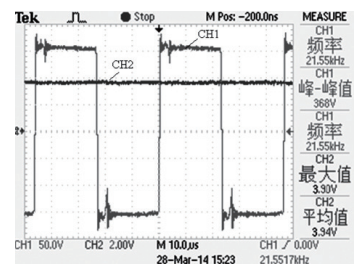


图9 灯丝加热电源波形  
Fig.9 Waves of filament heating power supply

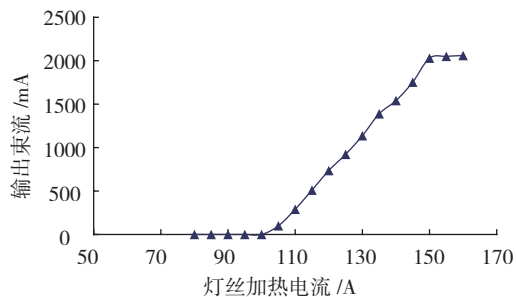


图10 灯丝加热电流与束流输出对应关系曲线  
Fig.10 Relation curve of electron beam and current of filament

PVD 设备加速电源和灯丝加热电源, 实现了稳定的高压、灯丝加热电流输出。

(2) 所研制的加速电源输出电压的线性度良好, 最大电压达到  $-30\text{kV}$ ; 束流输出时, 加速电源保持良好的恒压输出特性。

(3) 基于多重绝缘结构、小漏感副边绕组结构设计的灯丝加热变压器, 引入灯丝加热时间补偿方法参与的双闭环控制电路设计灯丝加热电源, 其最大输出电流  $150\text{A}$ , 可以通过调整灯丝电流调节束流输出, 并在加速电压最大时获得  $2000\text{mA}$  束流输出。

### 参考文献

- [1] 徐惠彬, 宫声凯, 刘福顺. 航空发动机热障涂层材料体系的研究 [J]. 航空学报, 2000, 21(1): 7-12.
- XU Huibin, GONG Shengkai, LIU Fushun. Recent development in materials design of thermal barrier coatings for gas turbine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(1): 7-12.
- [2] 孙福波, 涂泉. 氧化锆热障涂层在航空发动机上的应用和发展 [J]. 航空发动机, 2010, 36(6): 54-57.
- SUN Fubo, TU Quan. Application and development of zirconium oxide thermal barrier coating on aeroengine[J]. Aeroengine, 2010, 36(6): 54-57.
- [3] 于海涛, 宋希文, 牟仁德. 电子束物理气相沉积 YSZ 热障涂层恒温氧化实验研究 [J]. 稀土, 2010, 32(6): 72-75.
- YU Haitao, SONG Xiwen, MU Rende. Isothermal oxidation behavior of YSZ TBCs deposited by EB-PVD[J]. Chinese Rare Earths, 2010, 32(6): 72-75.
- [4] 郭洪波, 宫声凯, 徐惠彬. 先进航空发动机热障涂层技术研究进展 [J]. 中国材料进展, 2009, 28(9/10): 18-26.
- GUO Hongbo, GONG Shengkai, XU Huibin. Progress in thermal barrier coatings for advanced aeroengines[J]. Materials China, 2009, 28(9/10): 18-26.
- [5] 杜秉初. 电子光学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- DU Bingchu. Electron optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [6] 张伟, 杜慧聪, 齐铂金, 等.  $150\text{kV}/30\text{kW}$  逆变式电子束焊接高压电源设计 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(11): 1531-1536.
- ZHANG Wei, DU Huicong, QI Bojin, et al.  $150\text{kV}/30\text{kW}$  inverter for electron beam welding power supply design[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(11): 1531-1536.
- [7] 许海鹰. 一种用于大功率气体放电电子枪的逆变电源装置: ZL201410778975.7[P]. 2016-11-09.
- XU Haiying. The inverter power supply for high power gas-discharge electron beam gun: ZL201410778975.7[P]. 2016-11-09.
- [8] 杨波, 许海鹰, 桑兴华, 等. 高压大电流灯丝加热用变压器: ZL201510983008.9[P]. 2017-07-21.
- YANG Bo, XU Haiying, SANG Xinghua, et al. High voltage and larger current transformer for heating filament: ZL201510983008.9[P]. 2017-07-21.
- [9] 许海鹰, 桑兴华, 齐铂金, 等.  $150\text{kV}$  逆变电源性能优化及其束源特性 [J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(8): 1550-1558.
- XU Haiying, SANG Xinghua, QI Bojin, et al. Performance optimization about  $150\text{kV}/30\text{kW}$  inverter power supply and the study of the output trait about the electron beam supply[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(8): 1550-1558.
- [10] IQBAL M, RAFIQ M, BHATTI S A, et al. The electron beam gun with thermionic hairpin-like cathode for welding and surface modifications[J]. Vacuum, 2004, 77(1): 19-26.

通讯作者: 许海鹰, E-mail: xhyxy@126.com。

## Design of Inverter Power Supply for EB-PVD Machine

XU Haiying, SANG Xinghua, XING Yisi, ZUO Congjin, CUI Xiangzhong, JIANG Chunzhu  
(Science and Technology on Power Beam Processes Laboratory, AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

**[ABSTRACT]** In order to enhance the performance and flexibility of EB-PVD machine, the topology circuit of three parts of AC-DC circuits, the technology of several circuits in series and parallel connection, and double closed loop control have been adopted to design high voltage power supply and filament heating power supply. The inverter power supply, filament heating power supply, EB-PVD gun, vacuum system and others control system were assembled to establish a set of EB-PVD test equipment. Besides the high voltage and the maximal EB current output have been detected, the current of filament heating power supply and the input waves of power transformers also have been measured. Through the series of tests, the results show that not only the maximum high voltage output is up to  $-30\text{kV}$ , but also the inverter power supply has a good constant voltage character during electron beam output. The maximum electron beam current is up to  $2000\text{mA}$  at  $150\text{A}$  filament heating current. These test results show that the inverter power supply has fine applicability for EB-PVD machine.

**Keywords:** EB-PVD machine; Inverter power supply; Filament heating power supply; Control circuit; Beam flow

(责编 逸飞)