

# The Design of Filament Heating Power Supply for EB-PVD Machine

Xinghua Sang<sup>1\*</sup>, Haiying Xu<sup>1,2</sup>, Yisi Xing<sup>1</sup>, Chunzhu Jiang<sup>1</sup>, Wei Zhang<sup>3</sup>, Yong Peng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing

<sup>2</sup>Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu

<sup>3</sup>Beihang University, Beijing

Email: xhyxhy@126.com

Received: Aug. 8<sup>th</sup>, 2018; accepted: Aug. 20<sup>th</sup>, 2018; published: Aug. 27<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

In order to enhance the performance and flexibility of EB-PVD machine, the topology circuit of three parts of AC-DC circuits, low leakage inductance transformer, double closed loop control have been adopted to design the filament heating power supply. The filament heating power supply, EB-PVD gun, vacuum system and other control system were assembled to establish a set of EB-PVD test equipment. The maximal output current of filament heating power supply and the voltage waves at the primary winding of filament heating transformer had been tested, and the EB current output corresponding the current of filament also had been measured. These test results show that the filament heating power supply has fine applicability for EB-PVD machine.

## Keywords

EB-PVD Machine, Filament Heating Power Supply, Transformer

---

# EB-PVD设备灯丝加热电源的研制

桑兴华<sup>1\*</sup>, 许海鹰<sup>1,2</sup>, 邢一思<sup>1</sup>, 姜春竹<sup>1</sup>, 张伟<sup>3</sup>, 彭勇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国航空制造技术研究院, 北京

<sup>2</sup>南京理工大学, 江苏 南京

<sup>3</sup>北京航空航天大学, 北京

Email: xhyxhy@126.com

收稿日期: 2018年8月8日; 录用日期: 2018年8月20日; 发布日期: 2018年8月27日

---

\*第一作者。

文章引用: 桑兴华, 许海鹰, 邢一思, 姜春竹, 张伟, 彭勇. EB-PVD 设备灯丝加热电源的研制[J]. 电路与系统, 2018, 7(3): 67-74. DOI: 10.12677/ojcs.2018.73009

## 摘要

稳定可靠的灯丝加热电源是保障EB-PVD设备长期稳定工作的关键部件之一,采用三级AC-DC拓扑、低漏感的灯丝变压器、双闭环控制策略设计制造了灯丝加热电源。并将所研制灯丝加热电源与EB-PVD设备其它部件等进行系统集成,组成EB-PVD试验装置,对所研制灯丝加热变压器输入电压波形和最大输出电流进行检测,灯丝加热电流达到150 A以上;并且在此装置上测试了灯丝加热电流与输出电子束流的对应关系。试验结果表明:所研制的灯丝加热电源能够满足EB-PVD设备工作需求。

## 关键词

EB-PVD设备, 灯丝加热电源, 变压器

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 序言

随着航空发动机性能的不不断提升,国内外一些在研的或已经批产的航空发动机涡轮前进口温度已经达到或超过 1860℃,高耐热、高稳定的发动机叶片涂层制备技术对于新型发动机的研制极其迫切。电子束物理气相沉积(EB-PVD)技术[1][2][3]是在真空环境下,用一束或多束电子束加热一个或多个坩埚内的涂层材料,使其受热蒸发,涂层材料以原子、分子的形式涂覆在叶片表面,涂层和叶片基体之间以化学键形式结合,强度高,涂层表面光洁度好。

国内早期制备 TBCs 的 EB-PVD 设备从乌克兰引进,所有的电子枪均配置有一个灯丝加热电源,但是灯丝加热电源工作频率较低、变压器结构极其复杂、设计制造难度大,调节精度差,难以适用于 EB-PVD 设备长期稳定工作的需求。

基于三级 AC-DC 拓扑电路、低漏感灯丝变压器、双闭环控制策略,设计了 EB-PVD 设备灯丝加热电源。将所研制的灯丝加热电源分别与其它 EB-PVD 设备部件进行系统集成,组成 EB-PVD 设备系统,对灯丝加热电源变压器输入端波形、输出端电流、输出束流等进行检测分析。结果表明:所研制灯丝加热电源最大输出电流达到了 150 A 以上,输出电流稳定,最大灯丝加热电流输出时,能够满足最大电子束流输出的要求。

## 2. EB-PVD 设备灯丝加热电源拓扑

### 2.1. EB-PVD 设备灯丝加热电源拓扑

图 1 所示的是灯丝加热电源拓扑电路,包括灯丝加热逆变器、灯丝加热变压器、悬浮在负高压上的整流滤波电路。其中灯丝加热变压器及其整流滤波电路安装在高压油箱中。

灯丝加热逆变器输出 250 V/20 kHz 交流电,主要包括 AC/DC 隔离电路和半桥逆变电路。

AC380 V 交流电经 AC/DC 隔离电路与半桥逆变电路的电压变换过程:AC380 V 交流电经 AC/DC 隔离电路后,获得电压 0~500 V 连续可调的直流电,再经半桥逆变电路变换后输出 250 V/20 kHz 的交流方波。

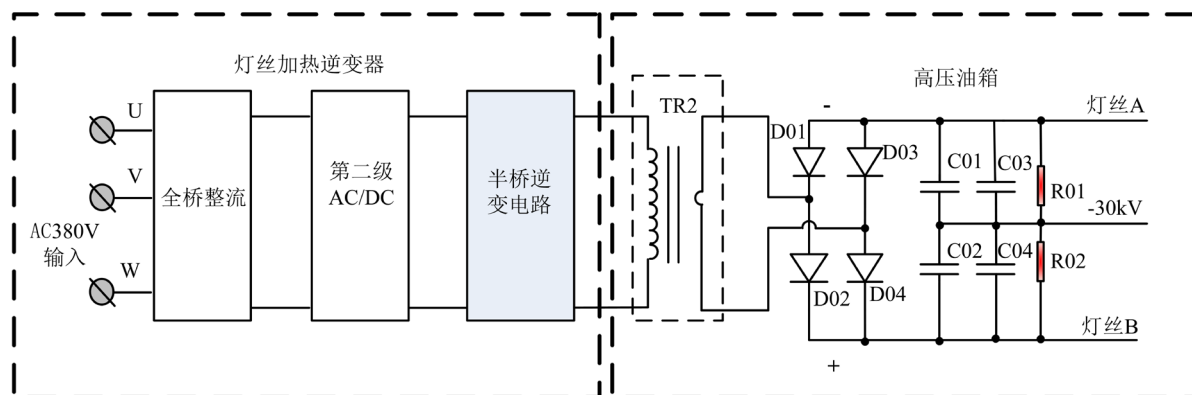


Figure 1. Topology circuit of filament heating power supply of EB-PVD equipment

图 1. EB-PVD 设备灯丝加热逆变电源拓扑

灯丝加热电源安装于高压油箱的部分，灯丝加热变压器的输入为半桥逆变电路输出的 20 kHz 左右的交流方波，灯丝加热变压器的原副边变比为 30:1，将输入的 0~250 V 变化的交流电转化成频率相同的交流电；再经过 D01、D02、D03、D04 组成的全桥整流电路整流后，再经过 C01、C02、C03、C04 电容滤波变成直流电；-30 kV 的负高压通过阻值相同的电阻连接到灯丝加热电源的两个输出端，将灯丝加热电源输出悬浮在负高压上。

所采用的灯丝加热电源拓扑电路从 AC380 V 交流电开始到灯丝加热直流电输出，电压变化经历了三级 AC-DC 变换，第一级 AC-DC 变换是从 AC380 V 交流电经过全桥整流后变成直流 500 V；第二级 AC-DC 变换是将所述直流 500 V 经过全桥逆变整流后变成 0~500 V 可调的直流；第三级 AC-DC 变换是将半桥逆变电路输出 0~250 V/20 kHz 可调的交流电经灯丝加热变压器降压及后续整流、滤波电路后，变成灯丝加热直流电压输出。

采用三级 AC-DC 拓扑电路，是为了减少工作过程中由于电子枪放电或高压油箱内部放电产生电流或电压脉冲尖峰耦合到电网，干扰其它设备正常工作。所研制电源的 AC/DC 隔离电路均采用隔离逆变拓扑，详细电路设计可参阅文献[4]。

为了满足 EB-PVD 电子枪 60 kW 的功率输出，要求灯丝加热电源的最大输出电流达到 150 A 以上；而且由于灯丝加热电源输出端悬浮在 -30 kV 以上，要求变压器原边、和副边的耐压等级大于 30 kV。但是灯丝加热变压器副边的整流滤波器件可以采用常规整流二极管和滤波电容即可满足要求，所设计的灯丝加热电源输出整流采用 400 V/300 A 的 DW 快恢复二极管模块 DS1F300N4S，滤波电容采用 10,000  $\mu$ F/35 V 的电解电容。

灯丝加热电源设计制造的难点和关键在于灯丝加热变压器的设计制造。

## 2.2 .EB-PVD 设备灯丝加热变压器

常用耐高压变压器设计需要对原边绕组、副边绕组及磁芯进行绝缘处理，一般是原边绕组直接绕制在磁芯上，副边绕组绕制在绝缘骨架上。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。由于采用两个磁芯接触面很难达到最理想的接触状态，变压器工作时漏感增大，变压器功率工作效率较低。

所研制 EB-PVD 设备灯丝加热变压器原、副边绕组的变比为 30:1。由于灯丝加热变压器输出电流高达上百安，采用常规导线或者铜带绕制副边，绕组截面积至少需要 30 mm<sup>2</sup> 以上的才能满足要求，副边绕组加工极其困难。

所研制的灯丝加热变压器采用多重绝缘方式、环形非晶磁芯、独特的副边结构解决上述技术难题。所设计的灯丝加热变压器结构如图 2 所示。

如图 2 所示，采用有机玻璃固定骨架 1 和固定骨架 2、聚四氟乙烯壳体等作为原边绕组和副边绕组之间的绝缘骨架。磁芯绕制副边绕组后与壳体之间还存在间隙，用于填充 25 号变压器油，因此绝缘骨架、25 号变压器油为原边绕组和副边绕组之间设置了多重绝缘，隔离原、副边绕组。设计凹槽状聚四氟壳体，将绕制了原边绕组的磁芯放置在壳体内，再用聚四氟盖板封闭；在壳体两侧安装有机玻璃固定骨架 1 和固定骨架 2，副边绕组仅为一匝，由铜极板 1、环形铜极板、多根紫铜杆组、铜棒、固定螺母闭合回路形成一匝。灯丝加热变压器的实物如图 3 所示。

由于副边绕组结构环绕整个磁芯和原边绕组，这样不仅可大幅减小变压器漏感，还可降低变压器压器漏感，还可降低变压器谐振电流[5]。

灯丝加热变压器安装在充满 25 号变压器油的高压油箱内部，绕制原边绕组的磁芯与聚四氟壳体内侧有 2 mm 间隙，副边绕组结构与聚四氟壳体间隔 5 mm 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，聚四氟壳体厚度大于 3 mm 以上，每 1 mm 绝缘层耐压至少 10 kV，使得灯丝加热变压器原、副边耐压强度足够大，这将能保障灯丝加热电源稳定工作。

### 3. 灯丝加热电源控制电路

所研制的 EB-PVD 设备需要通过调节灯丝加热电流来调整电子枪的束流大小，因此对灯丝加热电源工作稳定性要求较高，设计的 EB-PVD 设备灯丝加热逆变电源控制电路框图如图 4 所示。

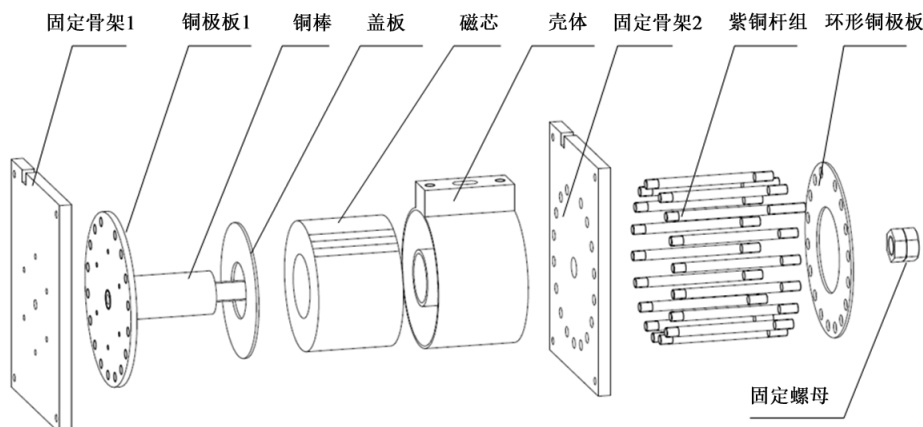


Figure 2. The structure of filament heating transformer

图 2. 灯丝加热变压器结构

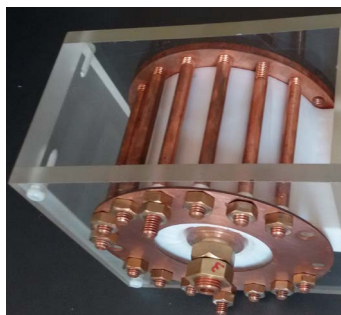
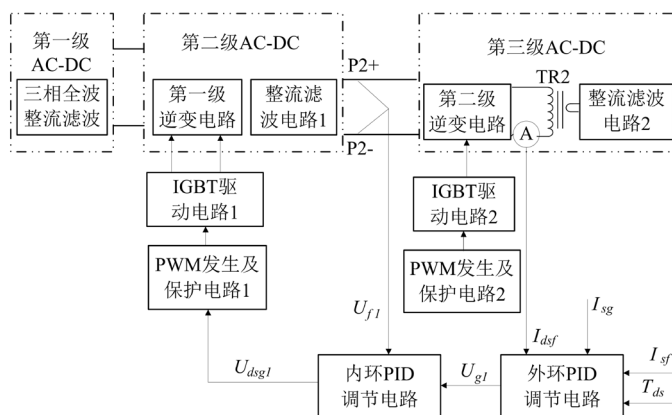


Figure 3. Practicality of filament heating transformer

图 3. 灯丝加热变压器实物



**Figure 4.** Schematic diagram of closed loop control for filament heating power supply  
**图 4.** EB-PVD 设备灯丝加热电源控制电路框图

在图 4 中, 将束流给定信号  $I_{sg}$  与束流反馈信号  $I_{sf}$  引入灯丝加热逆变电源外环 PID 调节电路, 经过处理后输出  $U_{g1}$  作为灯丝加热电源内环控制 PID 调节电路的输入,  $U_{g1}$  与灯丝加热电源第二级 AC-DC 输出电压反馈信号  $U_{f1}$  经过内环 PID 调节电路比较后, 输出信号  $U_{dsg1}$ , 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电压得到调节, 继而使灯丝加热电源输出电流得到调整, 达到调整束流大小的目的。

由于灯丝加热电源的输出端悬浮于负高压上, 从输出端采样灯丝输出电流比较困难, 设计的控制系统, 从灯丝加热电源的第三级 AC-DC 的变压器 TR2 原边取样, 通过比例换算电路处理, 将其作为电流的反馈信号  $I_{dsf}$ 。

由于 EB-PVD 设备工作时会产生强烈的电磁干扰信号, 在检测灯丝加热电流、束流等信号时发现, 直接采集信号耦合很多高次谐波, 干扰信号很大, 容易导致闭环控制系统失效。为获得稳定束流, 采用差动放大电路采集灯丝加热电流、束流信号, 所用的采样电路如图 5 所示。

## 4. 试验结果

所研制灯丝加热电源的参数如表 1 所示。

将所研制的灯丝加热电源与 EB-PVD 电子枪、加速电源、真空系统等进行集成, 检测灯丝加热变压器原边电压、电流波形, 并检测灯丝加热电流变化对应束流输出大小的影响, 分析束流控制精度和适用性。

### 4.1. 灯丝加热变压器原边波形检测分析

不加高压时, 在灯丝加热电源输出端采用变比为 1:500 电流霍尔传感器检测输出端电流, 采样电阻 50  $\Omega$ ; 用 TPS2024 检测灯丝加热变压器原边电压波形, 在第二级 AC-DC 输出的直流电压达到 500 V 时, 灯丝加热变压器原边输入电压波形如图 6 中的 CH1 所示; 灯丝加热电源输出端波形如图 6 中 CH2 所示, 电流达到 150 A 以上。从图 6 中还可以看出, 灯丝加热变压器原边为标准方波, 频率 21.55 kHz, 灯丝加热电源输出的直流电流稳定。

### 4.2. 灯丝加热电源电流输出对束流调节

灯丝加热电流的输出与第二级 AC-DC 输出的直流电压  $U_{dc2}$  密切相关, 当  $U_{dc2}$  逐渐增大时, 相应的灯丝加热电流会逐渐增大。在不施加高压的情况下, 在灯丝加热电源输出端用 FLUKE337 钳形电流表直接检测灯丝加热电流,  $U_{dc2}$  每增加 20 V 记录一次灯丝加热电流值, 将所采集数据绘制成如图 7 所示曲线。

如图 7 所示, 随着在  $U_{dc2}$  增大, 灯丝加热电源输出呈线性增大趋势; 在  $U_{dc2}$  给定 400 V 时, 灯丝加热电源输出达到 150 A 以上, 满足设计要求。

灯丝阴极发射电子处于温度限制发射状态, 灯丝能够通过的最大加热电流与灯丝发射的饱和电流密度[6]有关。

$$j_s = AT^2 \exp\left(-\frac{11610u}{T}\right) \quad (1)$$

其中  $j_s$  为灯丝电流密度,  $A/cm^2$ ;

$A$  为里查逊常数,  $A = 120A / (cm^2 \cdot K)$ ;

$T$  为阴极热力学温度, K;

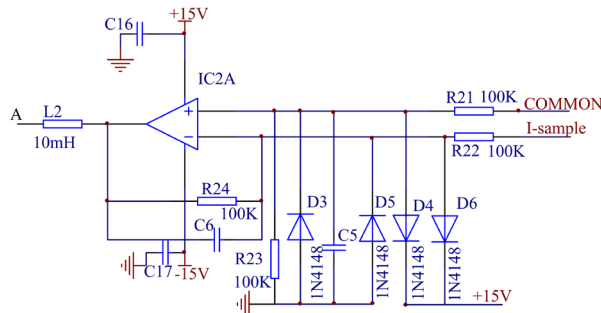
$u$  为阴极材料的逸出功, 钨为 4.55 eV。

所用灯丝为钨, 发射面积为  $66 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。所设计的 EB-PVD 电子枪采用灯丝加热电流闭环调节束流, 在控制系统中直接将  $U_{dc2}$  的电压值换算成灯丝加热电流, 加测灯丝加热电流与电子枪输出束流的对应关系。

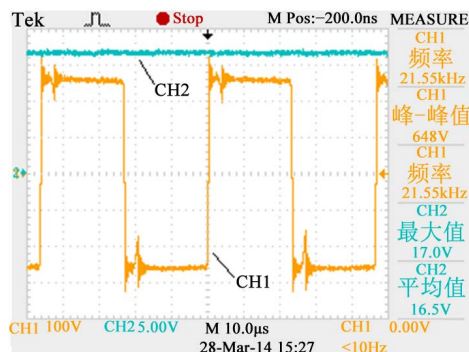
灯丝加热电流每增加 10 A, 记录一次电子束流, 将所采集数据, 绘制成图 8 所示灯丝加热电流与束流输出对应关系曲线。

**Table 1.** Main technical parameters of filament heating power supply for EB-PVD equipment  
**表 1.** EB-PVD 设备灯丝加热电源主要技术参数

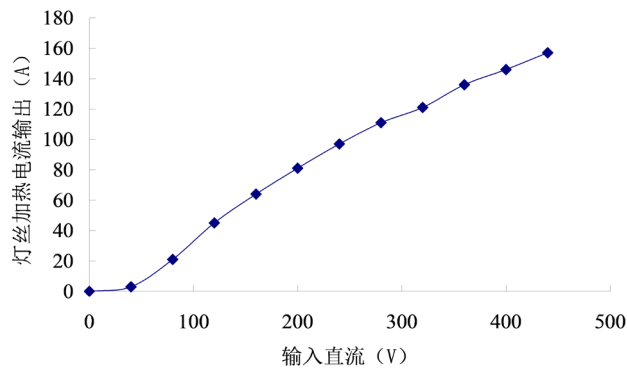
输入电压(V)	输出电压(V)	逆变频率(kHz)	输出电流(A)	工作电压(kV)
AC380	0~8	$\geq 20$	0~150	$\leq 30$



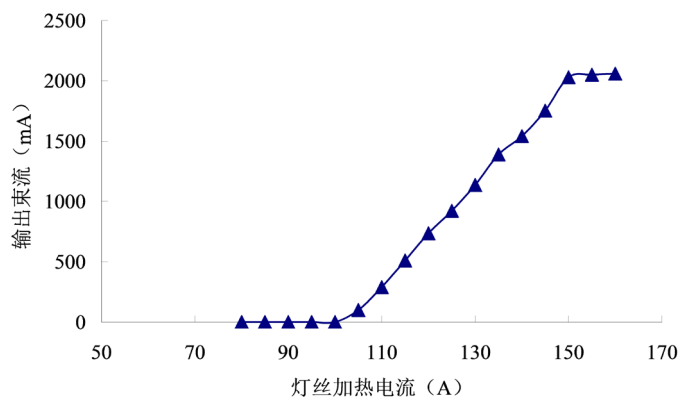
**Figure 5.** The sampling circuit based differential amplifier circuit  
**图 5.** 基于差动放大的采样电路



**Figure 6.** The wave at the primary winding of filament heating transformer and output current wave  
**图 6.** 灯丝加热变压器原边电压及输出电流波形



**Figure 7.** The curve of heating current corresponding DC voltage of the filament heating power supply  
**图 7.** 灯丝加热电源直流电压对应的加热电流曲线



**Figure 8.** The relation curve of the output electron beam and the current of filament  
**图 8.** 灯丝加热电流与束流输出对应关系曲线

如图 8 所示, 灯丝加热电流小于 100 A, 没有束流输出; 说明存在束流输出的死区, 灯丝热发射电子的能力较弱; 灯丝加热电流超过 100 A, 有束流输出, 电子束流随着灯丝加热电流增加而增大, 在 100 A 到 150 A 灯丝加热电流变化区间, 束流输出具有良好的线性增大趋势, 最大束流达到 2000 mA; 在灯丝加热电流大于 150 A 以后, 灯丝加热电流再增加, 电子束流几乎不增加。这与灯丝热发射电子的固有特性[7]密切相关。

## 5. 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-PVD 设备灯丝加热电源;
- 2) 基于多重绝缘结构、小漏感副边绕组结构研制出灯丝加热变压器, 将灯丝工作时间引入双闭环控制电路, 修正控制参数, 提高灯丝加热电源长期工作的可靠性。

## 基金项目

中国航空工业集团创新基金资助项目(2013E62519)。

## 参考文献

- [1] 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.
- [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): 53-57.
- [3] 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.

- 
- [4] 张伟, 杜慧聪, 齐铂金, 等. 150 kV/30 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.
- [5] 杨波, 许海鹰, 桑兴华, 等. 高压大电流灯丝加热用变压器[P]. 中国专利, ZL201510983008.9. 2017-07-21.
- [6] 倪士勇, 黄以平, 刘春东. 高压电子束焊机中电子束发生系统的设计计算[J]. 机械工程与自动化, 2007(4): 126-128.
- [7] Iqbal, M., Rafiq, M., Bhatti, S.A., *et al.* (2004) The Electron Beam Gun with Thermionic Hairpin-Like Cathode for Welding and Surface Modifications. *Vacuum*, 77, 19-26. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2004.07.066>

**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2327-0853, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ojcs@hanspub.org](mailto:ojcs@hanspub.org)