

## 电源调制器电路对脉冲行波管功率放大器相位稳定性影响研究

董戈<sup>\*①</sup> 胡波雄<sup>②</sup> 肖曦<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(清华大学航天航空学院 北京 100084)

<sup>②</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>③</sup>(清华大学电机工程与应用电子技术系 北京 100084)

**摘要:** 行波管放大器(TWTA)广泛应用在雷达、通讯等领域。相位稳定性影响传输信号质量、目标参数检测精度、电磁兼容性等指标。该文在定量分析电源调制器(EPC)电路参数对 TWTA 相位稳定性影响的基础上, 提出提高 TWTA 相位稳定性的 EPC 电路的几种设计方案: 选择合理的供电电路, 利用低压储能高频高压电源提高阴极电压的稳定性, 利用调节控制脉冲幅度补偿阴极电压脉冲顶降造成的相位不稳定性。该文成果为研制体积小、功率大、相位稳定性高的 TWTA 提供了依据。

**关键词:** 行波管放大器; 电源调制器; 相位稳定性

中图分类号: TN124

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)02-0504-05

DOI: 10.11999/JEIT160876

## Study on Influence of Electric Power Conductor Circuits on Traveling Wave Tube Amplifier Phase Stability

DONG Ge<sup>①</sup> HU Boxiong<sup>②</sup> XIAO Xi<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

<sup>②</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>③</sup>(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Traveling Wave Tube Amplifier (TWTA) is used extensively in the fields of radars and communication. And its phase stability could exert influence upon the quality of transmission signals, the detection accuracy of target parameters and the electromagnetic compatibility. This paper quantitatively analyses the effects of Electric Power Conductor (EPC)'s circuit parameters upon the phase stability of TWTA, and proposes further advanced three designing schemes on the EPC to improve the phase stability of TWTA, *i.e.* selecting a reasonable power supply circuit; adopting low-voltage-charging, high-frequency, high-voltage source to raise the stability of high-cathode voltage; compensating the phase instability from the cathode voltage pulse top fall effect through the adjusting of the amplitude of control pulse. This paper provides theoretical basis for the researching of TWTAs with compact size, high power, and high phase stability.

**Key words:** Traveling Wave Tube Amplifier (TWTA); Electric Power Conductor (EPC); Phase stability

### 1 引言

微波和毫米波大功率发射机中广泛地应用行波管功率放大器(Traveling Wave Tube Amplifier, TWTA)。随着信号相干处理方法的普遍运用, 对发射机相位稳定性的要求也不断地提高<sup>[1,2]</sup>。此外, 发射机相位稳定性的提高可以提高传输信号的质量, 提高目标参数确定的精度, 亦会促进日趋重要的电

磁兼容性问题的解决<sup>[1]</sup>。对影响 TWTA 输出信号相位稳定性的电源调制器(Electric Power Conductor, EPC)电路参数进行定量分析, 提出提高 TWTA 相位稳定性的 EPC 工程解决方案具有重要的工程应用意义。

行波管各电极电压的不稳定性、输入功率的不稳定性、负载阻抗的变化等是造成行 TWTA 输出信号相位不稳定的主要因素。此外, 工作环境的变化、机械作用等因素同样会造成 TWTA 输出信号相位的不稳定性。但是, 目前行波管及其功率放大器的设计、生产工艺水平使它们的影响微乎其微。在功率放大器的设计过程中可以不考虑这些因素<sup>[3-5]</sup>。

收稿日期: 2016-08-24; 改回日期: 2016-11-07; 网络出版: 2016-12-29

\*通信作者: 董戈 dongge@tsinghua.edu.cn

基金项目: 中国科技部政府间科技合作项目(CR20-09)

Foundation Item: Program of International Science and Technology Cooperation (CR20-09)

## 2 影响行波管放大器输出相位稳定性主要因素的分析

根据行波管线性理论，对于大多数大功率行波管，由于加速电压(或阴极电压)  $U_h$  不稳定性  $\Delta U_h$  造成 TWTA 相位增量的变化  $\Delta\phi_h$  和由于控制极电压  $U_g$  不稳定性  $\Delta U_g$  造成 TWTA 相位增量的变化  $\Delta\phi_g$  工程估算公式表示为<sup>[6]</sup>

$$\Delta\phi_h \approx -104N \left( \frac{\Delta U_h}{U_h} \right) \quad (1)$$

$$\Delta\phi_g \approx 90NC \left( \frac{\Delta U_g}{U_g} \right) \quad (2)$$

其中， $N$  为慢波线的电长度， $C$  为皮尔斯(Pierce)增益系数。

不失一般性，文献[3]以输出功率 10 kW，增益 60 dB，带宽 5% 的 TWTA 为例，给出了 TWTA 输出信号相位稳定性表主要影响因素的计算值和实际值，见表 1。

表 1 影响 TWTA 相位稳定性的主要因素

参数	参数变化量	相位变化量估算值(°)	相位变化量实际值(°)
阴极电压	1%	41.6	30
控制极电压	1%	6	7
收集极电压	1%	-	0.5
输入功率	1 dB(相对饱和增益-1 dB 点)	-	2.2
输出功率	驻波系数 1.5	-	<1
灯丝电压	1%	-	0.001

由表 1 可以看到影响 TWTA 输出信号相位稳定性的最主要因素是供电(阴极、控制极)电压的不稳定性、输入和输出功率的不稳定性<sup>[7-9]</sup>。为保证 1° 的相位稳定性，行波管微波输出端和负载的驻波系数应该控制在 1.5 以内。输入功率的稳定度要求也并不是非常苛刻，这些在 TWTA 设计中相对容易实现。

而为了保证 1° 的相位稳定性，根据式(1)和式(2)，阴极(加速)电压应保证  $10^{-5}$  数量级的稳定性，控制电压应保持  $10^{-3}$  数量级的稳定性。特别是阴极电压，对于大功率脉冲 TWTA，它往往是  $10^4 \sim 10^5$  V 的高压，在这样高的电压水平上保持  $10^{-5}$  数量级的电压稳定性以达到 1° 的相位稳定度，不但会造成电源体积和质量不可接受的增大，而且会因为保证行波管不被击穿的考虑而难以实现。

综上所述，保证 TWTA 输出信号相位稳定性的关键是保证供电电压的稳定性，特别是阴极和控制电压的稳定性。下面进一步研究 EPC 电路对 TWTA 微波输出信号相位稳定性的影响。

## 3 EPC 电路对 TWTA 微波输出信号相位稳定性的影响

### 3.1 选择合理的 EPC 供电电源电路

TWTA 的 EPC 包括供电电源电路和调制器两个部分<sup>[10-12]</sup>。电源电路又由灯丝电源、阴极电源和收集极电源组成。由表 1 可知，灯丝电压对相位稳定性影响较小，所以可以采用直流或交流低压电源，

无需特殊的稳压处理。采用交流电源只会一定程度地影响相位稳定性。

供电电源电路可分为两大类：阴极和收集极电源串联和并联电路<sup>[13-15]</sup>。从保证脉冲 TWTA 相位稳定性的角度，并联电路具有优越性。这是由于虽然收集极电压并不影响相位稳定性，但是串联电路阴极电源的等效负载小于并联电路，储能电容的放电时间常数小，加速电压脉冲内顶降大，相位稳定性差。在相同的条件下，采用并联电路可以将相位稳定性提高一个数量级。为了提高功率放大器的效率，可以采用降压收集极的方案，也就是说收集极电压在数值上低于阴极电压。图 1 是考虑到供电电路影响，推荐采用的 EPC 电原理框图。

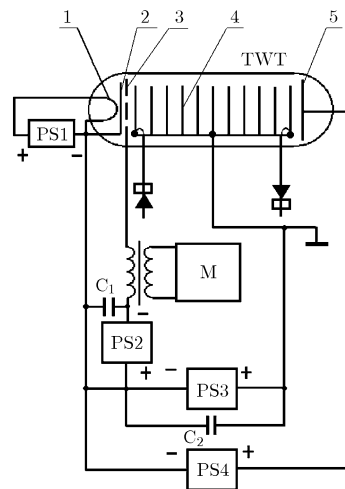


图 1 并联供电电路 EPC 电原理框图

图中 1~5 分别表示行波管的灯丝、阴极、控制极(栅极)、慢波系统和收集极。PS1 是灯丝电源; PS2 提供控制极的截止电压电源;  $C_1$  是旁路电容; M 为调制器; PS3 是阴极电源, 大功率脉冲 TWTA 中通常是  $10^4 \sim 10^5$  V 高压,  $C_2$  是 PS3 的储能电容; PS4 为收集极电源。选取相应的收集极电压可以提高行波管的电效率。收集极可以采取多级降压技术。由于这并不是问题所在, 所以这里给出简化的电原理框图。

### 3.2 采用低压储能高频高压电源保证阴极电压的稳定性

上述分析表明, 提高 TWTA 相位稳定性的关键是保证 EPC 阴极输出电压的稳定性。优化设计 EPC 的阴极电源是整个 EPC 设计的核心之一。

图 2 给出了低压储能高频高压 EPC 阴极电源电原理框图。其主要特点在于将高压储能电容器  $C_2''$  移至电压较低的输入端  $C_2'$ 。图 2 中 1 为输入模块。它的作用是保证电源与供电网的隔离, 提供高频交流转换器 2 输入电压及其初步稳压。这一电压值应保证 400 V 左右, 这样  $C_2'$  可以使用廉价电解质电容器。谐振高频交流变换器 2、滤波电路 3、高频高压变压器 4 和桥式高压整流器 5 共同完成输入电压的高频高压转换。输出频率应在  $10^5$  Hz 数量级。这样可以降低输出端滤波电容容值。电源有稳压回路。它包括分压器 6 和反馈回路模块 7。它们与模块 2~5 以及  $C_2'$  和高压滤波电容器  $C_3$  共同完成稳定输出电压的任务。图 2 中 R 是阴极电源的等效电阻。K 是等效开关。

低压储能电容  $C_2'$  与高压储能电容  $C_2''$  的关系和取值方法由式(3)确定:

$$C_2' \geq C_2'' \left( \frac{U_h}{U_{in}} \right)^2 = K_U^2 \frac{\tau}{R_h (\Delta U_h / U_h)} \quad (3)$$

其中,  $K_U$  为升压系数, 即阴极电路输出  $U_h$  和输入端电压和  $U_{in}$  之比,  $R_h$  为行波管阴极电路的等效电阻,  $\Delta U_h / U_h$  为行波管阴极输出电压的相对稳定性,  $\tau$  为脉冲宽度。

利用低压储能电容的另一优势在于低压储能电容的能量不会在打火时通过输出回路释放, 从而不会对行波管造成破坏。这是由于当输出回路出现打火现象的瞬间, 输出回路瞬态电流很大, 由于电源

$$u(t) = \begin{cases} E_M - \frac{1.2}{C} \frac{E_M}{\tau_1} (t - nT), & nT \leq t \leq nT + \tau \\ -E_2, & nT + \tau \leq t \leq (n+1)T \end{cases}, \quad \tau \ll \tau_1, \quad n = 0, 1, \dots, N \quad (4)$$

其中,  $u(t)$  为控制极  $t$  时刻的电压,  $E_M$  为控制极行波管的导通电压,  $E_2$  为控制极行波管的截止电压,

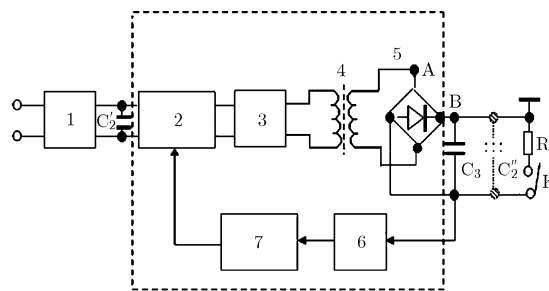


图 2 低压储能高频高压阴极电源的电原理框图

内阻图 2 中 A 点的电压下降, 而 B 点的电压由于滤波电容的作用仍然维持在标称输出电压, 也就是说 B 点电压高于 A 点, 这样整流二极管电桥开路电源变压器原边的能量不能传输到输出端, 从而起到了保护行波管的作用。虽然储能电容的储能往往远大于电真空管的击穿能量, 但是采用图 2 的设计使  $C_2'$  的能量在行波管火花放电时由 5 截止, 形成了对行波管的保护, 避免了真空放电器件的使用, 缩小了放大器体积, 提高了可靠性, 工艺更为简单。除此以外, 低压电容  $C_2'$  虽然在数值上大于高压电容  $C_2''$ , 但其体积和价格均远小于  $C_2''$ 。这些都为研制小体积、高电压稳定性和高可靠性的全固态高压电源奠定了基础。

采用此电路的优点是高频纹波的性能好; 避免高压储能电路中必须使用的保护行波管的真空放电器; 大大缩小了电源的体积和质量。

### 3.3 利用调节控制极电压补偿阴极电压脉冲内顶降造成的相位不稳定性

脉冲 TWTA 中 EPC 的调制器由控制极的截止电压电源和保证行波管导通的正偏压调制器组成, 它提供具有相应幅度和宽度的脉冲电压以开关 TWTA。

仔细研究式(1)和式(2)可以发现, 阴极和控制极电压的变化会造成符号相反, 数值相差一个数量级的输出信号相位变化。脉冲式 TWTA 脉冲时储能电容放电造成的阴极电压的不稳定性是遵循幂指数函数规律变化。因此可以利用脉冲内控制极电压相应的调节对阴极电压脉冲内顶降造成的相位不稳定性进行补偿。这一变化规律可近似的表示为

$T$  为脉冲重复频率,  $\tau$  为脉冲宽度,  $\tau_1$  为储能电容充电电路时间常数,  $C$  为行波管皮尔斯增益系数。

实现这一思路的调制器 M 电路见图 3。输出端 1 接行波管的控制极，输出端 2 接行波管的阴极。在脉冲行波管两个脉冲间隔期间变压器将控制脉冲形成两路，一路控制 VT4，其栅极电压高于源极电压，VT4 导通。另一路控制 VT1，其栅极电压低于源极电压，VT1 截止。VT2 和 VT3 也处于截止状态。此时，调制器 M 输出端电压  $u(t) = -E_2$ ，保障脉冲行波管处于截止状态。当调制器 M 输入处于脉冲期间，VT1~VT3 导通，而 VT4 截止。此时，调制器 M 输出端电压  $u(t) = E_M + u_M(t)$ 。改变 VT3 栅极电压可以实现对  $u_M(t)$  的调整。这一调整由 VT2 和电阻  $R_3 \sim R_8$  实现，其中  $R_3$  远远大于  $R_4 \sim R_8$  的阻值。当 K 处于滑动电阻的上半部分时，电容  $C_2$  的放电将造成 VT2 基极电流下降，通过  $R_{10}$  的电流也下降，VT3 栅极的电压也下降，其规律遵循指数变化，时间常数  $\tau'_M = C_2 \frac{R_6 R_8}{R_6 + R_8}$ ，当脉冲宽度  $\tau > (3 \sim 5)$

$\tau'_M$  时，脉冲末期，调制器 M 输出端电压值为

$$U'_g = E_M - (\tau'_M / \tau) \cdot E_M \quad (5)$$

当 K 处于滑动电阻的下半部分时，电容  $C_1$  放电将造成 VT2 基极电流增加，通过  $R_{10}$  的电流也增加，VT3 栅极的电压也增加，其规律遵循指数变化，时间常数  $\tau''_M = C_1 \frac{R_6 R_8}{R_6 + R_8}$ ，当脉冲宽度  $\tau > (3 \sim 5)$

$\tau''_M$  时，脉冲末期，调制器 M 输出端电压值为

$$U''_g = E_M + (\tau''_M / \tau) \cdot E_M \quad (6)$$

这一电路优点在于对脉冲内控制极电压的调整，实现功率放大器输出信号的相位稳定。需要说明的是这一方案有一定的局限性，控制极电压调整应在  $(1\% \sim 10\%) E_M$  的范围内，过大的调整会影响行波管的正常工作。过小的调整会由于控制极电压纹波的原因难以实现。因此，可以补偿的相位不稳定性对应阴极电压的不稳定性有一定的范围，它由 Pierce 放大系数  $C$  确定。

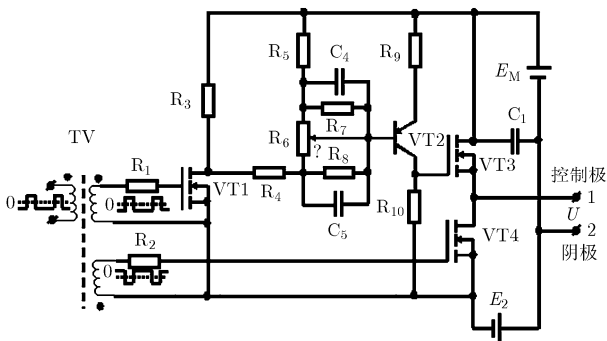


图 3 可实现控制极电压调节的 EPC 脉冲调制器电原理图

### 4 实验验证

利用上述理论完成脉冲行波管 EPC 的电路方案设计。行波管工作频段为 S 波段，频带宽度不小于 62 MHz，输出峰值功率不小于 2400 W，最大脉冲宽度 40  $\mu s$ ，最大工作比 12.5%，效率不小于 28.5%。行波管阴极电压  $U_h = -10$  kV，慢波线平均电流  $I_h = 25$  mA，根据输出信号相位稳定性小于  $5^\circ$  的要求，电压稳定性  $\Delta U_h / U_h$  达到  $10^{-4}$  数量级，2 级降压收集极一次电源电压标称值 42 V，总功耗  $P_{in} \leq 1200$  W。脉冲行波管 EPC 的照片见图 4。

由已知条件，阴极回路等效电阻  $R_h = \frac{U_h}{I_h} = \frac{10 \times 10^3}{25 \times 10^{-3}} = 400$  k $\Omega$ ；升压系数  $K_U = \frac{10 \times 10^3}{42} = 238.1$ ，根据式(3)慢波线电路输入端  $C'_2 = 1.13 \times 10^4$   $\mu F$ ，最终使用了  $2.00 \times 10^4$   $\mu F$  的储能电容，高压端只采用了 0.1  $\mu F$  的滤波电容。

主要参数的测试结果见表 2。采用本方案的 EPC 阴极电压稳定性  $\frac{\Delta U_h}{U_h} \leq 5 \times 10^{-4}$ ，纹波小于 3 V，相位稳定性  $5^\circ$ 。同时大大降低了电源体积、重量和研制成本，具备很好的打火保护功能，提高了 TWA 的可靠性。

### 5 结论

本文在定量分析 EPC 电路参数对 TWTA 相位稳定性影响的基础上，提出了保证 TWTA 相位稳定性的 EPC 设计方案。通过 EPC 研制验证了所提方案的有效性。本文提出的提高相位稳定性的方法为研制体积小、功率大、相位稳定性高的 TWTA 提供了依据。微波技术的发展还需要我们对 TWTA 输出信号相位稳定性作进一步的研究，尤其是相位不稳定性与其因素解析关系的理论研究。此外，本文提到的稳定 TWTA 相位的方法也可以应用在行波管相控阵天线系统各单元相位的控制过程中。

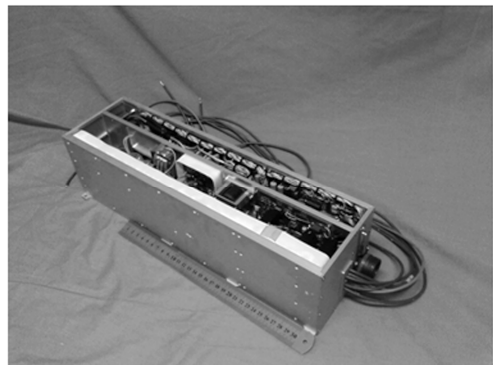


图 4 脉冲行波管 EPC 照片

表 2 EPC 主要参数测试结果

参数名称	设计值	实测值
阴极电压	-10 kV	-10.015 kV
阴极电压稳定性	$5 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-4}$
阴极电压纹波	5 V	3 V
慢波线电流	25 mA	25.2 mA
收集极 1 电压/电流	7.5 kV/40 mA	
收集极 2 电压/电流	5.0 kV/90 mA	
灯丝电压/电流	8.5 V/3.6 A	
正偏压/负偏压	+660 V/-1500 V	
钛泵电压	3.5 kV	
效率	89.2%	
功耗	1178 W/42 V	
体积	425×120×120 (mm)	

## 参 考 文 献

- [1] SKOLNIK M. Radar Handbook[M]. HY: McGraw-Hill Book Company, 1970: 7-127.
- [2] 刘漾, 廖明亮, 刘国亮. 国外微波功率模块现状与发展[J]. 电子对抗技术, 2016, 31(1): 70-73.  
LIU Yang, LIAO Mingliang, and LIU Guoliang. The art state of the abroad microwave power module[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2016, 31(1): 70-73.
- [3] Sciece for Thechnology. High power electro-vacuum microwave devices[R]. Moscow, 1974.
- [4] Morden Radio. Electronics of microwave tubes[R]. Moscow, 1994.
- [5] 尚新文, 陈之亮, 金锋, 等. 脉冲空间行波管的研制[J]. 真空电子技术, 2014(3): 29-34. doi: 10.3969/j.issn.1002-8935.2014.03.008.  
SHANG Xinwen, CHEN Zhiliang, JIN Feng, et al. The development of pulsed space TWT[J]. *Vacuum Electronics*, 2014(3): 29-34. doi: 10.3969/j.issn.1002-8935.2014.03.008.
- [6] DONG Ge, CHEN Yu, CHEN Zhonglin, et al. An EPC circuit reducing high voltage storage capacitance in pulse TWTA[C]. International Conference on Electric Information and Control Engineering (ICEICE 2011), Wuhan, 2011: 3942-3945.
- [7] HU Boxiong and DONG Ge. Analysis and simulation of a higher amplitude expansion millimeter wave predistortion linearizer[C]. 9th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, Beijing, 2016: 123-125.
- [8] 刘洁, 胡波雄, 王刚, 等. 一种适用于Ku波段行波管放大器的预失真线性化器[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(10): 2515-2520. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01820.  
LIU Jie, HU Boxiong, WANG Gang, et al. Predistortion linearizer for Ku-band traveling wave tube amplifier[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(10): 2515-2520. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01820.
- [9] 朱元江, 曹雪梅, 王磊. 一种星载脉冲行波管放大器的设计[J]. 真空电子技术, 2015, 2: 82-85.  
ZHU Yuanjiang, CAO Xuemei, and WANG Lei. Design of a pulse traveling wave tube amplifier for spaceborne application[J]. *Vacuum Electronic*, 2015, 2: 82-85.
- [10] 瞿波, 梁晓峰, 赵青平, 等. Ka波段空间行波管技术研究[J]. 真空电子技术, 2015, 4: 80-82.  
QU Bo, LIANG Xiaofeng, ZHAO Qingping, et al. Research on Ka-band space TWTs[J]. *Vacuum Electronics*, 2015, 4: 80-82.
- [11] 郑新, 李文辉, 潘厚忠. 雷达发射机技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 45-106.  
ZHENG Xin, LI Wenhui, and PAN Houzhong. Radar Transmitters[M]. Beijing: Publishing Home of Electronics Industry, 2006: 45-106.
- [12] 徐成前, 董戈. 1kW 行波管高压开关电源设计与仿真[J]. 电源技术, 2008, 24(4): 219-221.  
XU Chengqian and DONG Ge. Design and computer simulation of a 1kW high voltage switching power supply in TWTA[J]. *Power Supply Technique*, 2008, 24(4): 219-221.
- [13] 魏智. 用于雷达发射机的140kW高压开关电源[J]. 现代雷达, 2000, 22(3): 56-60.  
WEI Zhi. A 140kW high voltage switching for radar transmitter[J]. *Modern Radar*, 2000, 22(3): 56-60.
- [14] 张之永, 韩博, 徐功潜. 24kW高压开关电源在雷达发射机中的应用[J]. 电力电子技术, 2003, 37(2): 7-8.  
ZHANG Zhiyong, HAN Bo, and XU Gongqian. Using of a 24kW high voltage switching power supply in radar transmitter[J]. *Power Electric Technique*, 2003, 37(2): 7-8.
- [15] 陈宇, 王刚, 苏小保. 空间行波管放大器高压电源设计研究[J]. 真空科学与技术, 2015, 35(7): 792-800. doi: 10.13922/j.cnki.cjovst.2015.07.02.  
CHEN Yu, WANG Gang, and SU Xiaobao. Development of high-voltage power converter for space traveling wave tube amplifier[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2015, 35(7): 792-800. doi: 10.13922/j.cnki.cjovst.2015.07.02.
- 董 戈: 男, 1971 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事航空航天电子技术、微波遥感技术和星载 TWTA 等方面的研究工作。
- 胡波雄: 男, 1979 年生, 工程师, 主要从事雷达发射机方面的研究工作。
- 肖 曦: 男, 1973 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事电机控制与电力电子方面的研究工作。