



·高功率微波技术·

# 铁磁性加载复合管壳电子注聚焦性能的研究\*

刘 洋, 魏义学, 史雪春, 费 娜, 邱 立, 王严梅

(中国电子科技集团公司第十二研究所, 北京 100015)

**摘 要:** 大功率行波管通常利用复合管壳提升高频系统的集成度和散热特性。宽带行波管采用复合管壳高频制造工艺时, 由于加载翼片含有铁磁性材料(纯铁)使得聚焦系统的横向磁场分量变大, 径向和角向磁场分量呈非均匀性, 电子注聚焦困难。本文研究了周期永磁聚焦系统横向磁场产生的原因并建立理论模型, 并对磁场分量和其对电子注形态的影响进行了仿真, 仿真结果与理论计算结果一致。根据横向磁场分布模型对加载翼片的形状和数量进行优化仿真, 结果表明 9 片齿形加载翼片方案可在保持慢波电路参数的同时, 降低聚焦系统的横向磁场分量, 改善电子注聚焦效果。

**关键词:** 行波管; 铁磁性; 复合管壳; 周期永磁聚焦系统; 横向磁场; 电子注

中图分类号: TN124

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220344

## Study of electron beam focusing performance of ferromagnetic material loaded compound pipe shell

Liu Yang, Wei Yixue, Shi Xuechun, Fei Na, Qiu Li, Wang Yanmei

(The 12th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

**Abstract:** High power traveling wave tubes (TWTs) usually use compound pipe shells to enhance the integration and heat dissipation characteristics of high frequency system. When broadband TWT adopts the compound pipe shell high frequency manufacturing process, the vane load contains ferromagnetic material (pure iron), which makes the transverse magnetic field component of the focusing system become larger, radial and angular magnetic field components being non-homogeneous, resulting in the difficulty of electron beam focusing. This paper studies the causes of transverse magnetic field generation in periodic permanent magnet (PPM) focusing system and establishes theoretical model and simulates the transverse magnetic field component's effect on the morphology of electron beam. The simulation results are consistent with the theoretical model. The optimized combination of shape and number of vanes based on the theoretical model shows that the 9 tooth-shaped loaded vanes can maintain slow-wave circuit parameters while reducing transverse magnetic field component of the focusing system, improving the focusing performance of electron beam.

**Key words:** traveling wave tubes, ferromagnetic, compound pipe shell, periodic permanent magnet focusing system, transverse magnetic field, electron beam

宽带行波管是电子对抗系统的核心功率器件<sup>[1-5]</sup>, 输出功率是其最重要的技术指标之一。为实现稳定的大功率输出, 行波管需要具有良好的散热能力, 复合管壳高频工艺可以有效提升行波管的散热能力。复合管壳高频工艺<sup>[6]</sup>是将极靴和垫环依次排列焊接成管壳, 高频部件集成度得到提高; 通过二次加工形成所需要的管壳内部结构, 电子注和磁场同心度提高, 电子注聚焦能力增强; 通过螺旋线—夹持杆组件与管壳之间的过盈配合降低散热路径上的接触热阻, 实现散热能力的提升。宽带行波管为了拓展带宽, 在管壳内增加了金属翼片, 采用复合管壳高频工艺时翼片不再是单一的镍铜合金材质, 而是变成了纯铁—镍铜复合材料, 纯铁作为软磁性材料会影响 PPM 聚焦系统的磁场均匀性, 产生不规则的横向磁场, 影响电子注聚焦。

聚焦系统横向磁场对电子注聚焦效果影响的报道多见于耦合腔行波管, 研究表明当 PPM 聚焦系统中横向磁

\* 收稿日期: 2022-10-14; 修订日期: 2022-12-09  
联系方式: 刘 洋, 2210563517@qq.com。

场幅值超过轴向磁场峰值的 1.5% 时, 横向磁场对电子注轨迹的影响将不可忽略<sup>[7-9]</sup>, 此结果可以作为 PPM 聚焦系统横向磁场调整的标准。本文针对采用复合管壳高频工艺的大功率宽带行波管的聚焦系统, 从理论上分析横向磁场的变化对电子注运动的影响, 利用静磁场分析软件进行仿真计算, 通过对加载翼片形状和数量的优化组合降低横向磁场分量, 并最终确定相互作用效果和电子注聚焦效果满足要求的加载形式。

## 1 磁场基本理论分析

行波管聚焦系统的作用是对电子枪发射的电子注进行聚焦, 维持电子注的形状和直径。为减小行波管的体积和重量, 螺旋线行波管多使用周期永磁聚焦系统<sup>[10]</sup>。

### 1.1 磁场分量分析

对聚焦系统静磁场的分析主要根据磁场的边界条件

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{1n} &= \mathbf{B}_{2n} \\ \mathbf{H}_{1t} &= \mathbf{H}_{2t} \end{aligned} \quad (1)$$

在圆柱坐标系中对聚焦系统磁场进行分析, 轴向磁场为  $\mathbf{B}_z$ , 横向磁场分为  $\mathbf{B}_r$  和  $\mathbf{B}_\theta$ 。传统管壳 PPM 聚焦系统中管壳内部翼片为不导磁的镍铜合金, 磁场边界为圆周, 为轴对称边界, 如图 1(a) 所示, 横向磁场仅含  $\mathbf{B}_r$ ,  $\mathbf{B}_\theta=0$ 。根据这一边界条件可以近似地给出轴对称 PPM 聚焦系统近轴区磁场分布, 其中  $\mathbf{B}_z$  分布为

$$\mathbf{B}_z = B_p \cos \frac{2\pi z}{L} \quad (2)$$

$\mathbf{B}_r$  分布为

$$\mathbf{B}_r = -\frac{r}{2} \frac{\partial \mathbf{B}_z}{\partial z} = \frac{\pi r B_p}{L} \sin \frac{2\pi z}{L} \quad (3)$$

轴对称聚焦系统中半径  $r$  的边界条件为管壳内径, 由式(3)可知, 横向磁场  $\mathbf{B}_r$  会随管壳内径  $r$  变化而明显变化。



Fig. 1 Inner boundary condition of pipe shell

图 1 管壳内部边界条件

复合管壳加载翼片为纯铁—镍铜复合材料, 管壳内部边界条件改变。T 形翼片加载可以得到反常色散, 且有较大的耦合阻抗和较小的衰减常数, 宽带大功率行波管常用 T 形翼片加载<sup>[11-14]</sup>。对 T 形翼片结构的复合管壳 PPM 聚焦系统进行仿真分析, 边界条件不再对称, 如图 1(b) 所示, 可以看出加载翼片含铁使管壳内部磁场出现  $r$  和  $\theta$  方向的边界, 导致  $\mathbf{B}_\theta$  不再为 0。

聚焦系统中的轴向和横向磁场分布可用正余弦函数表示, 非对称的磁场都可以看作由不同比例成分的各极矩磁场的合成<sup>[15]</sup>, 其横向磁场分量可以表示为

$$\begin{cases} B_r(r, \theta) = \sum_1^k \frac{b_{kS}}{(k-1)!} r^{(k-1)} \cos k\theta + \sum_1^k \frac{b_{kN}}{(k-1)!} r^{(k-1)} \sin k\theta \\ B_\theta(r, \theta) = \sum_1^k \frac{b_{kN}}{(k-1)!} r^{(k-1)} \cos k\theta - \sum_1^k \frac{b_{kS}}{(k-1)!} r^{(k-1)} \sin k\theta \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $k$  为谐波次数,  $b_{kS}$  为斜  $n$  极矩磁场分量,  $b_{kN}$  为垂直  $n$  极矩磁场分量。式(4)可以看出, 非对称磁场中的磁场分量一定是  $\theta$  的周期函数, 磁场的分布随内径  $r$  和角度  $\theta$  的变化而明显变化,  $r$  方向的边界条件由管壳内径  $r_1$  和加载翼片内径  $r_2$  共同决定;  $\theta$  方向的边界条件则由加载翼片形状和数量决定, 加载翼片圆周方向对称度越高,  $\mathbf{B}_\theta$  越小。

### 1.2 横向磁场对电子运动的影响

复合管壳聚焦系统中电子在极靴平面受力和产生的速度分量如图 2 所示, 极靴平面处的  $\mathbf{B}_\theta$  使得电子在极靴内部  $A$  位置处因洛伦兹力产生了沿径向向外的速度分量, 经过该位置的电子在沿轴运动时沿径向发散。下一个极

靴  $B$  位置处的电子也产生了径向发散, 电子注半径因为这些电子的运动而迅速扩大, 在前几个聚焦周期内便产生截获。

传统管壳 PPM 聚焦系统聚焦电子注时, 同一半径上的电子在相同的  $B_r$  作用下保持相同的旋转速度, 当电子离开极靴进入磁钢处时, 在  $B_z$  的作用下产生汇聚, 出现周期性的径向脉动, 电子在径向上的速度与  $r$  成正比, 电子注具有层流性<sup>[16]</sup>。电子注脉动可以由电子注归一化半径方程表示

$$\begin{cases} \frac{d^2\sigma}{dT^2} + \alpha(1 + \cos 2T)\sigma - \frac{\beta}{\sigma} = 0 \\ \alpha = 2.8 \times 10^8 \frac{L^2 B_0^2}{V_0}, \\ \beta = 1.53 \times 10^3 P \left(\frac{L}{2r_0}\right)^2 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  为磁场参量,  $\beta$  为空间电荷参量,  $B_0$  为周期磁场峰值。

在 T 形翼片结构的复合管壳 PPM 聚焦系统中,  $B_r$  沿圆周分布呈非轴对称性, 同一半径圆周上的电子在不同位置处产生不同的旋转速度, 当  $B_z$  逐渐增加, 不同旋转速度的电子会产生不同的径向速度, 电子注层流性将明显减弱, 电子注聚焦效果将恶化。

## 2 仿真实验

使用 OPERA3D 软件对传统管壳镍铜材质 T 形翼片 PPM 聚焦系统和复合管壳纯铁—镍铜复合材料 T 形翼片 PPM 聚焦系统进行建模仿真<sup>[17-18]</sup>, 得到静磁场分布后对同一电子注进行聚焦, 对比聚焦效果验证理论分析。

### 2.1 磁场分量对比

对两种聚焦系统的磁场进行分析, 表 1 为聚焦系统结构尺寸参数。

表 1 聚焦系统结构尺寸参数

Table 1 Focusing system structure parameters

	inner radius/mm	outer radius/mm	thickness/mm
pole piece	1.9	6	1
magnet	2.8	6.5	2.6

图 3 为静磁场仿真结果。图 3(a) 可以看出, 传统管壳 PPM 聚焦系统轴向磁场峰值为 0.196 0 T, 复合管壳 PPM 聚焦系统轴向磁场峰值为 0.255 0 T, 增加了 30%。图 3(b) 和图 3(c) 为在两种聚焦系统中横向磁场在极靴中心平面内沿  $\theta$  的分布, 可以看出传统 PPM 聚焦系统中  $B_\theta$  最大为 0.0013 T,  $B_r$  为 0.055 4 T 左右。复合管壳 PPM 聚焦系统中  $B_\theta$  和  $B_r$  随着角度的变化而变化,  $B_\theta$  最大为 0.033 6 T,  $B_r$  最大为 0.111 8 T, 最小为 0.047 3 T。

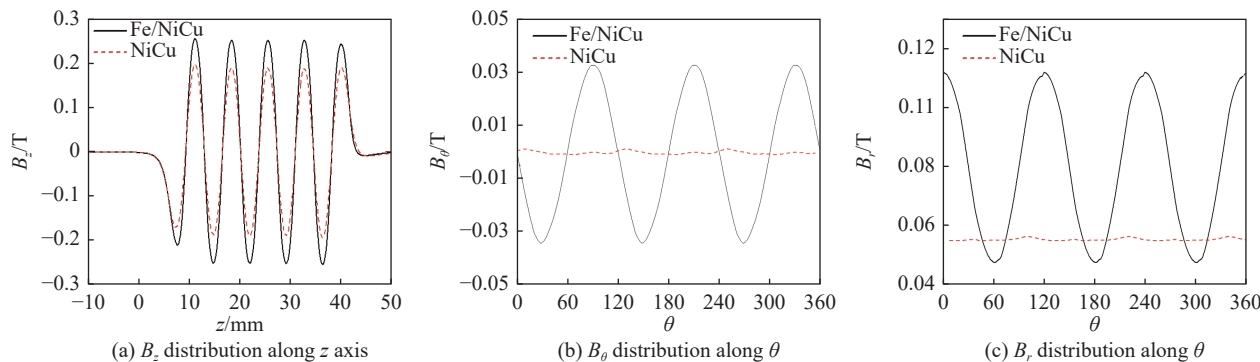


Fig. 3 Distribution of magnetic field of 2 focusing system

图 3 两种聚焦系统磁场分布

### 2.2 横向磁场对聚焦效果的影响

T 形翼片结构的复合管壳 PPM 聚焦系统中前三块极靴出口位置的平面电子注分布如图 4 所示, 图中可明显观察到电子注不再呈轴对称圆形分布, 电子注外轮廓有明显的三个发散尖角, 随着电子注向前运动, 电子注外径迅速

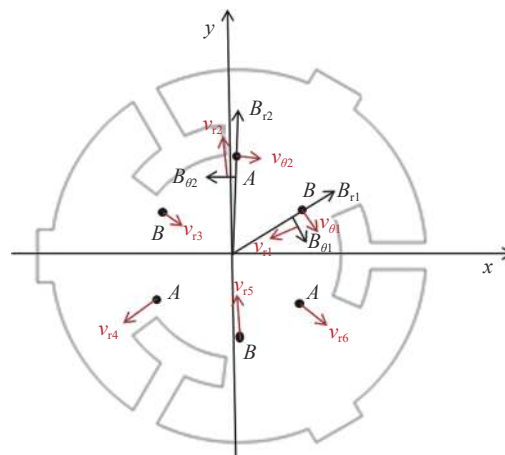


Fig. 2 Force and velocity of the electron in the plane of pole piece

图 2 电子在极靴平面的受力和速度

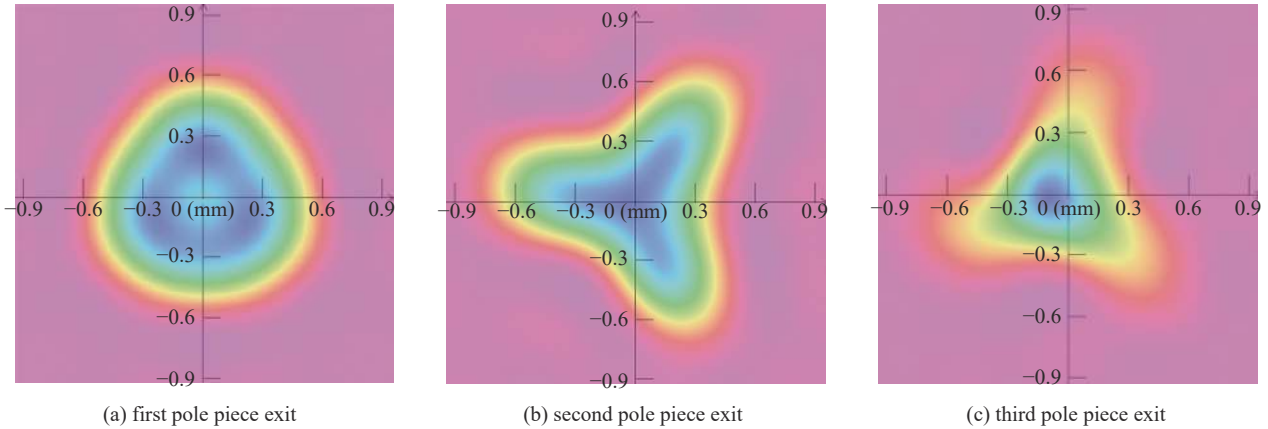


Fig. 4 Distribution of electron at the pole piece exit

图 4 极靴出口处电子分布

扩大,在第三块极靴出口处产生大量截获。

高频内电子注轨迹仿真结果如图 5 所示,可以看出横向磁场的干扰使电子注无法良好聚焦,电子注相对脉动 28%,半径最大达 0.7 mm,产生明显截获,电子注层流性很差。

### 3 加载翼片优化

由前文铁磁性加载聚焦系统横向磁场分布模式式(4)可知,加载翼片的结构、数量会直接改变非对称磁场边界条件,进而引起横向磁场  $B_r$  和  $B_\theta$  的改变,对电子注聚焦影响很大。因此,本文从加载翼片数量和结构出发,对加载翼片进行了优化。

#### 3.1 加载翼片数量优化

对 T 形翼片数量进行优化,考虑到翼片间需放置介质杆对螺旋慢波线进行夹持,因此翼片数量不能无限增加。分别建立翼片数量为 3、6 和 9 的复合管壳 PPM 聚焦系统模型,对静磁场进行对比。

T 形翼片的数量增加等效于聚焦系统的内径减小,极靴内径更靠近螺旋线,电子注所在区域内轴向磁场更强。当加载数量由 3 增加至 6 时,轴线上的  $B_z$  由 0.255 0 T 增加至 0.280 0 T,增加了 9.8%;当加载数量增加至 9 时,对轴向磁场的增强作用减弱,  $B_z$  增至 0.285 0 T。

随着加载翼片数量的增加,横向磁场的分布逐渐变得均匀,  $B_r$  的非轴对称性逐渐减弱,当加载数量为 3 时,  $B_{rmax}$  与  $B_{rmin}$  的差值为 0.064 5 T;当加载数量为 9 时,差值下降为 0.002 1 T。  $B_\theta$  也随加载数量的增加而减小,  $B_\theta$  最大值由 0.033 6 T 减小至 0.001 3 T。图 6 为复合管壳 PPM 聚焦系统磁场值随翼片数量变化的曲线图。翼片数量为 6 时聚焦的电子注仍有明显的发散尖角,当翼片数量增加至 9 时,电子注截面分布为圆形,此时聚焦效果良好。

#### 3.2 加载翼片结构优化

##### 3.2.1 齿形翼片参数优化

翼片间需放置介质杆对螺旋慢波线进行夹持,结合工程实际,需对 9 片 T 形翼片加载进行进一步优化,将翼片角度缩小并简化翼片形状得到齿形翼片加载。铁磁性加载翼片同时影响电子注聚焦效果和慢波电路参数,需综合考虑两种效果选择翼片尺寸,如图 7 所示。

由图 7(b)可以看出,齿形翼片结构参数主要为内半径 ( $R_L$ ) 和宽度 ( $v_n$ )。齿形翼片结构参数的改变对电子注聚焦效果影响较小,电子注都能良好聚焦。齿形翼片宽度对慢波电路参数影响很小,齿形翼片内半径  $R_L$  对慢波电路参数有显著影响。

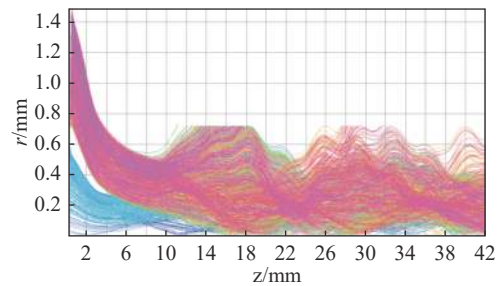


Fig. 5 Electron beam projection focused by T-shaped loaded vane compound pipe shell PPM focusing system

图 5 T 形翼片复合管壳 PPM 聚焦的电子注投影

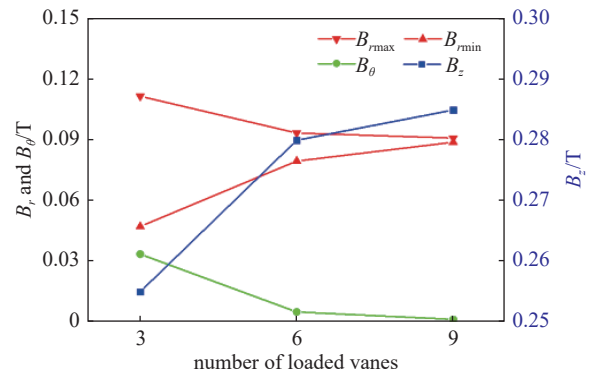


Fig. 6 Variation of magnetic field with the amount of loaded vanes

图 6 磁场随加载数量变化的变化

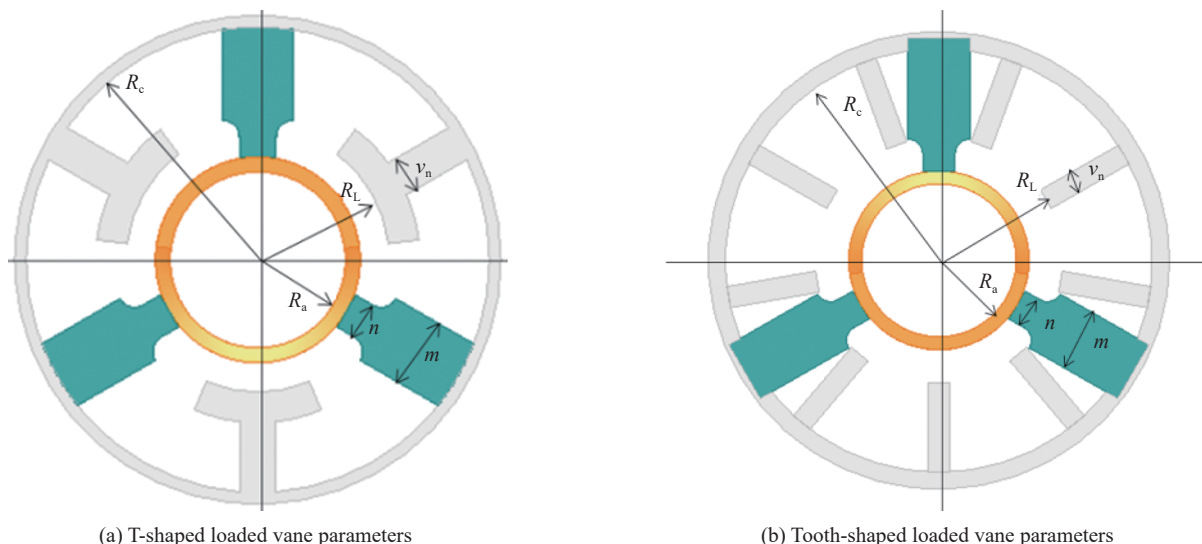


Fig. 7 Slow-wave structure parameters

图 7 慢波结构参数

传统管壳 T 型加载  $R_L$  为 1.08 mm, 考虑到  $R_L$  越小时齿间间距越小, 介质杆无法装配,  $R_L$  选为 1.08 mm、1.15 mm 和 1.22 mm, 分别仿真计算不同  $R_L$  下齿形翼片慢波电路的色散特性、耦合阻抗和衰减常数并与传统 T 型翼片进行对比, 两种高频的螺旋线, 夹持杆, 管壳内径采用相同参数。

翼片内径为 1.15 mm 时 9 片齿形翼片 PPM 系统轴向磁场  $B_z$  为 0.269 0 T,  $B_r$  最大值为 0.082 0 T,  $B_r$  最小值为 0.080 8 T,  $B_\theta$  最大值为 0.001 0 T。此时横向磁场分布基本可以看作均匀分布。

高频冷参数结果如图 8 所示。可以看出: 当翼片内径为 1.15 mm 时, 齿形翼片高频在 6 GHz 处相速为  $0.135c$ , 在 18 GHz 处相速为  $0.138c$ , 而 T 形翼片高频在 6 GHz 处相速为  $0.137c$ , 在 18 GHz 处相速为  $0.138c$ , 两种高频的相速差在全频段不超过 1.5%; 整个频段内 T 形翼片高频的耦合阻抗与齿形翼片高频相差不超过  $1 \Omega$ ; 齿形翼片慢波电路衰减常数比 T 形翼片更小, 在高频段比 T 形翼片高频小 13.9%。可保证良好的互作用效果。

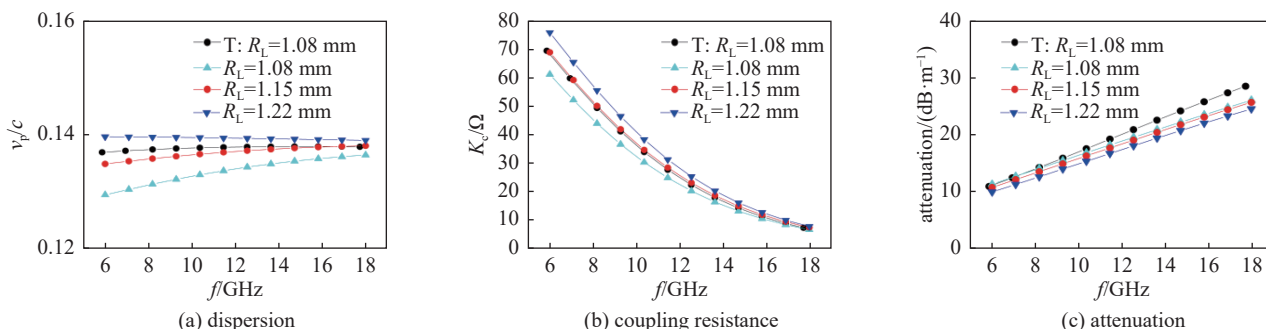


Fig. 8 Variation of cooling parameters with  $R_L$

图 8 冷参数随  $R_L$  变化的变化

用该 PPM 聚焦系统对高频段内电子注进行聚焦分析, 仿真结果如图 9 所示, 可以看出齿形翼片结构的复合管壳 PPM 聚焦系统聚焦的电子注在整个相互作用长度内都没有产生截获, 电子注脉动较小, 半径不超过 0.6 mm, 电子注静态通过率为 100%。

#### 4 结 论

铁磁性加载复合管壳行波管中, 加载翼片为纯铁—镍铜复合材料, 而传统管壳高频加载翼片为镍铜材料。通过理论分析和模拟仿真发现, 复合管壳 PPM 系统轴向磁场

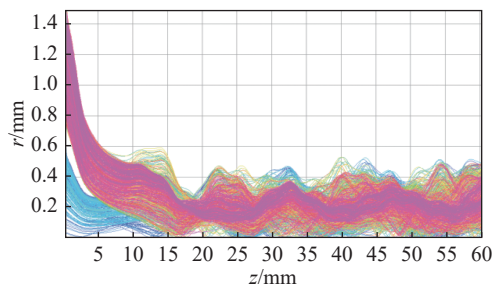


Fig. 9 Electron beam projection focused by tooth-shaped loaded vane PPM focusing system

图 9 齿形加载聚焦的电子注投影

$B_z$  比传统管壳大 30%, 有利于实现行波管的小型化; 复合管壳翼片角向不均匀, PPM 系统横向磁场分量较大,  $B_r$  呈非轴对称性分布电子产生不同的旋转速度, 电子注层流性差, 脉动明显;  $B_\theta$  使电子在极靴处产生径向发散, 导致电子注外轮廓有明显的三个发散尖角, 在第三块极靴出口位置便会产生大量截获, 电子注无法实现良好聚焦。

增加翼片数量可以显著减弱复合管壳横向磁场的非均匀性, 当翼片增至 9 片时, PPM 系统的  $B_r$  仅有 2% 的起伏,  $B_\theta$  与轴向磁场的比值不足 0.5%, 接近轴对称分布, 对电子注运动的干扰可以忽略。考虑到翼片间需放置介质杆对螺旋慢波线进行夹持, 进一步对加载翼片结构进行优化得到 9 片齿形翼片复合管壳高频结构, 该结构可在保持慢波电路参数, 保证良好的互作用效果的同时, 显著改善电子注聚焦效果。

#### 参考文献:

- [1] VED IPP. Rethinking what we know about vacuum electronic devices[J]. The Journal of Electronic Defense, 2019, 42(2): 1-4.
- [2] Wong P, Zhang Peng, Luginsland J. Recent theory of traveling-wave tubes: a tutorial-review[J]. Plasma Research Express, 2020, 2: 023001.
- [3] 王斌, 王风岩, 周旭, 等. 微波功率行波管及模块的应用发展趋势[J]. 真空电子技术, 2019(2): 1-7. (Wang Bin, Wang Fengyan, Zhou Xu, et al. Application and development trend of TWTs and MPMs[J]. Vacuum Electronics, 2019(2): 1-7)
- [4] Luo Jirun, Feng Jinjun, Gong Yubin. A review of microwave vacuum devices in China: theory and device development including high-power klystrons, spaceborne TWTs, and gyro-TWTs[J]. IEEE Microwave Magazine, 2021, 22(4): 18-33.
- [5] 廖复疆. 真空电子技术—信息装备的心脏[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 51-55. (Liao Fujiang. Vacuum electronic technology-heart of information equipment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 51-55)
- [6] 李海波, 孟晓君, 魏义学, 等. 复合管壳在大功率连续波行波管中的应用[J]. 真空电子技术, 2014(4): 10-11. (Li Haibo, Meng Xiaojun, Wei Yixue, et al. The Application of compound pipe shell in high power continuous wave TWT[J]. Vacuum Electronics, 2014(4): 10-11)
- [7] 廖平, 杨中海, 雷文强, 等. 周期永磁聚焦电子注性能计算机模拟[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(1): 68-72. (Liao Ping, Yang Zhonghai, Lei Wenqiang, et al. Computer simulation of electron beam characteristics focused by periodic permanent magnets[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(1): 68-72)
- [8] 程玲莉, 王林梅, 王敬东, 等. 四注行波管周期永磁聚焦系统的优化设计[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31: 113005. (Cheng Lingli, Wang Linmei, Wang Jingdong, et al. Optimal design of periodic permanent magnetic focusing system for four-beam traveling wave tubes[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31: 113005)
- [9] 黎泽伦, 孟杰, 黄友均, 等. 多注行波管PPM聚焦系统横向磁场研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014, 37(1): 73-77. (Li Zelun, Meng Jie, Huang Youjun, et al. Study of transverse magnetic fields of multi-beam PPM focusing system[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2014, 37(1): 73-77)
- [10] Gilmour A S Jr. Principles of traveling wave tubes[M]. Boston: Artech House, 1994.
- [11] Paoloni C, Gamzina D, Letizia R, et al. Millimeter wave traveling wave tubes for the 21st Century[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2021, 35(5): 567-603.
- [12] 余金清, 胡玉禄, 李斌. 行波管中聚焦磁场对互作用影响的研究[J]. 真空电子技术, 2011(1): 21-25. (Yu Jinqing, Hu Yulu, Li Bin. Research of the focusing magnetic's impact on the interaction in TWT[J]. Vacuum Electronics, 2011(1): 21-25)
- [13] 郭倩琦. 行波管注波相互作用高效率研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014. (Guo Jiyu. Study of beam-wave interaction with high efficiency in TWTs[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014)
- [14] 赵新刚, 李庆绩, 赵士录. 几种典型翼片加载螺旋线行波管色散及返波特性研究[J]. 真空电子技术, 2006(6): 5-8. (Zhao Xingang, Li Qingji, Zhao Shilu. Investigation of characters of dispersion and backward wave in helix TWTs with several typical vane load[J]. Vacuum Electronics, 2006(6): 5-8)
- [15] 李泉凤. 电磁场数值计算与电磁铁设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. (Li Quanfeng. Numerical calculation of electromagnetic field and electromagnet design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002)
- [16] Carlsten B E, Earley L M, Krawczyk F L, et al. Stability of an emittance-dominated sheet-electron beam in planar wiggler and periodic permanent magnet structures with natural focusing[J]. Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams, 2005, 8: 062001.
- [17] Sharma R K, Choudhury A R, Arya S, et al. Design and experimental evaluation of dual-anode electron gun and PPM focusing of helix TWT[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2015, 62(10): 3419-3425.
- [18] Kumar M, Geetha M K, Kumar M V. Design of magnetic focusing system for a compact Ka band helix TWT[J]. Defence Science Journal, 2021, 71(3): 329-331.