

## 毫米波行波管返波振荡的仿真研究

陆德坚<sup>①②</sup> 王自成<sup>①</sup> 刘濮鲲<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 该文利用 HFSS 仿真了工作在 Ka 波段的螺旋线、反绕双螺旋线及耦合腔等慢波系统, 通过傅里叶分析得到空间谐波, 进而分析和比较了上述慢波系统的返波振荡特性。结果表明: 螺旋线慢波系统中出现明显的角向谐波次数和轴向谐波次数不相等的空间谐波分量, 在  $\pi$  模附近, 有产生返波振荡的危险; 而反绕双螺旋线通过提高基波耦合阻抗及可工作的归一化频率来提高了抑制返波振荡的能力; 为了避免返波振荡, 耦合腔工作频带的选择应尽可能远离单腔相移为  $\pi, 2\pi$  的频点。

**关键词:** 毫米波行波管; 返波振荡; 慢波系统; 反绕双螺旋线; 耦合腔结构

中图分类号: TN124

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)10-2520-05

## Simulation Investigation of Backward Wave Oscillation of Millimeter-wave TWT

Lu De-jian<sup>①②</sup> Wang Zi-cheng<sup>①</sup> Liu Pu-kun<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** HFSS is used to simulate helical, contrawound helix and coupled-cavity Slow-Wave Structures(SWS), which work in Ka-band, to investigate the backward-wave oscillation of millimeter-wave TWT. The results show that, space harmonics, which axial space harmonic number and azimuth space harmonic number are unequal, are evident in helical SWS, the SWS runs a risk of backward oscillation near the  $\pi$  mode. Relatively, contrawound helix shows excellent ability in restraining backward oscillation by improving interaction impedance and the normalized frequency which can work without backward oscillation. And coupled-cavity should avoid working around those frequencies where phase shifts per cavity are  $\pi$  or  $2\pi$ .

**Key words:** Millimeter-wave TWT; Backward oscillation; SWS; Contrawound helix; Coupled cavity

### 1 引言

行波管向毫米波段发展需要解决的主要问题是提高输出功率。提高输出功率的途径有: (1)提高耦合阻抗, 但这通常会导致慢波结构的尺寸变小; (2)加大工作电压, 这一般要求慢波结构的尺寸做得较大, 这时基波耦合阻抗降低, 而返波阻抗增大, 返波振荡的危险增加。(3)加大注电流, 但注电流超过起振电流就会产生返波振荡, 注电流大是功率行波管特别容易受返波振荡影响的主要原因<sup>[1]</sup>。返波振荡出现时, 在所需的工作频带内会产生功率的跌落, 甚至不能正常工作。此外, 返波振荡信号还会引起其它振荡或与主信号产生交叉调制, 在管子的工作频带内形成许多寄生信号。

正由于返波振荡对行波管的稳定性有着根本性的影响, 对返波振荡的研究在行波管诞生之初就备受关注, 前期的理论分析和实验都证明了返波振荡的存在, 为了从慢波结构上

解决螺旋线慢波系统工作于高功率的振荡问题, Chodorow 和 Chu 提出了反绕双螺旋线慢波系统, 后来演变为环杆结构<sup>[2]</sup>。最近的研究集中在如何抑制返波振荡这方面, 一般通过在慢波系统中引入衰减器或螺距分段改变结构来抑制返波振荡, 以稳定行波管的工作, 但这些措施的引入会导致增益和效率的下降, 另外非线性的影响也将增大<sup>[3]</sup>。由于理论分析的不精确性, 而实验研究又耗时耗力, 效率不高, 目前国内外有关慢波系统返波振荡特性研究的报道并不多, 如文献<sup>[4]</sup>仿真讨论了螺旋线中空间谐波的特性, 但没有讨论返波振荡, 对返波振荡尤为显著的毫米波段研究更是少见, 对这一问题缺乏深入而具体的认识未能对工程实现提供有效的指导。因此用三维电磁软件对毫米波行波管慢波系统进行高效的仿真分析, 深入研究其返波振荡的特性, 对加深对返波振荡的理解及指导工程实现很有意义。

本文利用 HFSS 分别仿真了典型的工作在 Ka 波段的螺旋线、反绕双螺旋线及 Ferruleless 型耦合腔等慢波系统, 通过傅里叶分析得到空间谐波, 进而分析和比较了上述慢波系

2007-03-30 收到, 2007-06-05 改回

国家自然科学基金(60571039)与国家杰出青年科学基金(60125104)资助课题

统的返波振荡特性。

## 2 理论分析

### 2.1 场方程

根据弗洛奎理论, 在  $0 \leq r \leq a$  的区域内, 周期慢波系统的轴向电场分量可以表示<sup>[4]</sup>

$$E_z(r, \theta, z) = \sum_{\nu, n=-\infty}^{\infty} E_{z\nu n} I_{\nu}(\gamma_{\nu n} r) e^{j\nu\theta} e^{-j\beta_n z} \quad (1)$$

式中  $a$  为慢波线内半径,  $\beta_n = \beta_0 + 2n\pi/L$  为  $n$  次谐波的轴向传播常数,  $\beta_0$  为基波的轴向传播常数,  $\nu$  为角向展开系数,  $n$  为轴向展开系数,  $E_{z\nu n}$  为  $(\nu, n)$  次空间谐波的轴向上轴向电场的幅度。

对于螺旋线慢波系统, 根据自由带状螺旋线理论, 由于系统的螺旋对称性, 可有  $\nu = n$ <sup>[2]</sup>, 但在实际的螺旋线慢波系统中, 由于夹持杆和纵向翼片加载的影响, 螺旋对称性并不严格成立, 结果就是会出现其他空间谐波。对于反绕双螺旋线, 由于其特殊的对称性, 可有  $\nu + n = 2m$ <sup>[3]</sup>, 同样, 由于夹持杆等的影响, 也会出现其他空间谐波, 在现有的理论中, 通常认为其可忽略不计, 本文将考虑这些空间谐波。对于耦合腔结构, 现有的耦合腔理论分析多使用等效电路法, 尚无法得到一个普遍的场方程表达式<sup>[1, 2]</sup>, 故本文仅分析典型的 Ferruleless 耦合腔慢波结构轴向上的空间谐波。

### 2.2 返波振荡

自由周期慢波系统的典型色散曲线如图 1 所示, 在实际的周期慢波系统中, 相应的禁区存在快波<sup>[2]</sup>。在电子注速度没有太大离散的情况下, 发生返波振荡的 3 个重要条件是: (1)在工作频率附近, 返波阻抗和工作谐波的耦合阻抗可比拟; (2)返波的相速度接近于工作谐波的相速度, 即和电子注速度相接近; (3)第 1(或第 2)作用段的行波增益(BCN)值足够大<sup>[3]</sup>。行波管工作时, 场对电子注的速度调制会产生很大的速度离散, 相速度与工作谐波的相速度相近的谐波也可能发生返波振荡。

对于工作在基波的慢波系统, 从图 1 可见, 条件(1)、条件(2)容易在  $\beta L = \pi$  附近得到满足, 也称  $\pi$  模振荡。在该处, 基波和负一次返波的频率和相速度接近, 群速相反, 电子注可以和这两个波同时作用, 耦合阻抗也接近, 很容易发生返波振荡<sup>[3]</sup>。一般来说,  $\pi$  模对应的归一化频率 ( $ka$ ) 值是行波

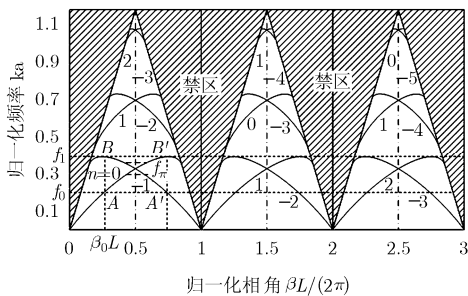


图 1 典型周期慢波系统的色散曲线

管工作频率的上限,  $ka$  越大表明可以工作的频率上限越大, 或慢波线的内半径越大。

文献[3]给出返波振荡开始对应的 BCN 值与  $ka$  的关系曲线如图 2 所示。可见, 返波振荡开始所对应的 BCN 值随  $ka$  的增大而减小, 随电子注填充半径  $r_0$  的增大而减小。为了减小返波振荡的可能性, 在设计行波管时, 通常要选择较小的  $ka$  值和较小的  $r_0/a$ 。但是随着行波管向毫米波段及高功率的方向发展, 不得不选用较大的  $ka$  和  $r_0/a$ , 这时抑制返波振荡就成为必须解决的问题<sup>[3]</sup>。

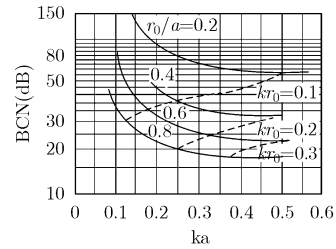


图 2 返波振荡开始时对应的 BCN 值

从理论上分析, 螺旋线和反绕双螺旋线一般工作于基波, 返波一般指  $n = -1$  次空间谐波。螺旋线慢波系统的工作带宽可达两倍频程。而反绕双螺旋线具有结构对称性, 有利于增强偶次空间谐波, 抑制奇次空间谐波, 提高抑制返波振荡的能力, 但工作带宽较窄, 通常不超过 15%。Ferruleless 型耦合腔工作于  $n = 1$  次空间谐波, 返波的耦合阻抗较大,  $\pi$  模和  $2\pi$  模对应的频率分别是工作频率的下限和上限, 工作带宽较窄。

## 3 模拟分析

本文利用三维电磁软件 HFSS 分别对上述慢波系统进行仿真分析和研究, HFSS 在慢波系统的仿真方面的可靠性和高效性已经得到充分的证明<sup>[5]</sup>。

对螺旋线、反绕双螺旋线及 Ferruleless 型耦合腔分别建模一个周期, 周期长度为  $L$ 。利用 HFSS 的准周期边界条件, 指定周期相移  $\varphi_0 = \beta_0 L$ , 计算出最低的两个谐振频率  $f = f_0, f_1$ , 得到相速度:

$$v_p = 2\pi f L / \varphi_0 \quad (2)$$

慢波系统的第  $(\nu, n)$  次空间谐波在半径  $r$  处的耦合阻抗按下式计算

$$K_{\nu n}(r) = \frac{[E_{z\nu n}(r)]^2}{2\beta_n^2 P} \quad (3)$$

其中  $P$  为时间上平均的高频功率, 定义为  $P = v_g W_T / L$ , 其中  $v_g$  为群速度,  $W_T$  为总的行波储能, 在准周期边界条件下 HFSS 得到的是行波解, 其中场值均对最大值进行归一化。

假设电子注的填充率为 60%, 并假设电子注的面电流密度分布均匀。在提取出  $r_0 = 0.6a$  的圆柱面上的轴向电场后, 可按下式进行傅里叶变换求得  $r_0$  处各次空间谐波:

$$E_{zm}(r_0) = E_{zm} I_v(\gamma_n r_0) = \frac{1}{2\pi L} \int_0^L \int_0^{2\pi} E_z(r_0, \theta, z) e^{-jv\theta} e^{j\beta_n z} d\theta dz \quad (4)$$

按式(3)计算出  $r_0$  处的耦合阻抗  $K_{vm}(r_0)$  后, 由式(1)、式(3)可得总耦合阻抗为

$$K_{vm} = K_{vm}(r_0) [1 - I_{v-1}(\gamma_n r_0) I_{v+1}(\gamma_n r_0) / I_v(\gamma_n r_0)^2] \quad (5)$$

对于 Ferruleless 型耦合腔, 由于无法得到普遍的场方程, 但作为周期慢波结构仍然满足弗洛奎定理, 故可对轴线上的轴向电场按下式作傅里叶分析得到空间谐波:

$$E_{zn} = \frac{1}{L} \int_0^L E_z(0, z) e^{j\beta_n z} dz \quad (6)$$

式中  $L$  为腔长,  $\varphi_0$  为单腔相移。对于耦合腔结构, 只需对一个腔长的轴向电场作傅里叶分析即可。

### 4 仿真结果及分析

螺旋线和反绕双螺旋线慢波系统的设计参数见表 1, 两者设计的工作带宽都是 34-35GHz, 其中夹持杆统一使用 3 条矩形氧化铍, 高度和宽度分别为 0.75mm 和 0.5mm, 相对介电常数为 6.5。

#### 4.1 螺旋线慢波系统

螺旋线尺寸如表 1。仿真后, 提取出  $r_0 = 0.24\text{mm}$  处的轴向电场, 按式(4)做傅里叶分析得到 (0,0)、(1,0)、(0,-1)、(1,-1) 次空间谐波, 色散曲线和耦合阻抗曲线见图 3。

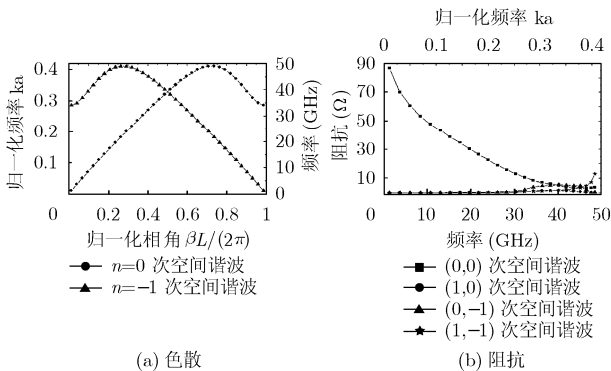


图3 螺旋线慢波系统空间谐波的色散曲线和耦合阻抗曲线

由图 3(a)可见,  $\pi$  模对应的  $ka$  约为 0.33, 基波的色散曲线平坦。从图 3(b)可见, 由于夹持杆及纵向翼片加载的影响, 螺旋对称性不再满足,  $ka$  较大时, 出现了明显的 (0,-1), (1,-1) 和 (1,0) 次空间谐波, 其中又以 (0,-1) 次谐波最为明显。随着频率升高, 基波耦合阻抗下降, 而 (0,-1)、(1,-1) 次返波阻抗增大, 当  $ka = 0.34$  时,  $K_{(0,-1)}/K_{(0,0)}$  甚至大于 1。在工

作频带 34-35GHz,  $K_{(0,-1)}/K_{(0,0)} \approx 0.47$ , 此时基波与返波的相速度之差约为 20%, 考虑到电子注经过高频调制后, 速度有较大的离散, 有发生返波振荡的危险, 应当引起注意。随着频率增高到 37.5GHz 时,  $K_{(0,-1)}/K_{(0,0)} \approx 0.76$ , 而基波返波相速度之差约为 8%, 若不加必要的抑制措施, 发生返波振荡的可能性很大。另外, (0,-1) 和 (1,-1) 次谐波都属于负一次返波, 相速度又相等, 总的负一次返波阻抗比 (0,-1) 次谐波的还要大。

在  $\pi$  模附近出现明显的 (1,0)、(0,-1) 次空间谐波, 说明以往理论分析所作的这些谐波可忽略不计的假设会带来较大的误差, 文献[6]和文献[7]中计算耦合阻抗所采用的介质夹持杆径向分层方法在  $\pi$  模附近也受到了挑战, 因为该方法没有体现介质的角向不均匀性, 无法预见角向谐波数和轴向谐波数不相等的空间谐波的出现。

#### 4.2 反绕双螺旋线慢波系统

反绕双螺旋线慢波系统结构参数见表 1, 建模仿真后, 提取出  $r_0 = 0.3\text{mm}$  处圆柱面上的轴向电场, 按式(4)做傅里叶变换得到 (0,0)、(1,0)、(0,-1)、(1,-1) 次空间谐波, 色散曲线和耦合阻抗曲线见图 4。

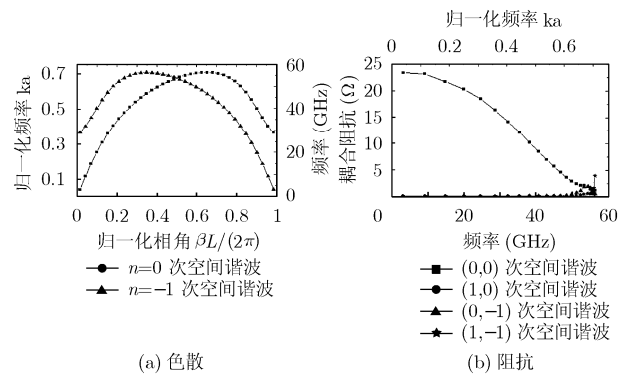


图4 反绕双螺旋线慢波系统空间谐波的色散曲线和耦合阻抗曲线

由图 4(a)可见,  $\pi$  模对应的  $ka$  约为 0.67, 比上述螺旋线慢波系统的大得多, 但色散特性比较陡峭, 工作带宽较窄。由图 4(b)可见, 相对于上述的螺旋线慢波系统, 反绕双螺旋线的谐波抑制能力大大增强, 在  $ka = 0.64$  时,  $K_{(0,-1)}/K_{(0,0)} \approx 0.29$ 。从返波振荡的角度来看, 无需额外的返波抑制措施, 工作的频率就可以高达 50GHz ( $K_{(0,-1)}/K_{(0,0)} \approx 0.12$ )。

在设计工作的 34-35GHz 的频带内, 色散约为 1.7%, 耦合阻抗约为 12.6Ω, 约为上述螺旋线慢波系统的 1.54 倍,

表 1 螺旋线、反绕双螺旋线慢波系统参数(mm)

慢波结构类型	慢波线内半径	慢波线厚度	金属筒内半径	慢波线宽度	螺距	翼片宽度	翼片内半径
螺旋线	0.4	0.1	1.25	0.3	0.68	0.5	0.65
反绕双螺旋线	0.6	0.1	1.45	0.12	0.5	0.6	0.9

返波阻抗几乎为零, 而且内半径明显要大得多, 为电子光学系统设计及提高功率带来了很大的便利。可见, 相对于螺旋线, 反绕双螺旋线的基波得到增强, 而其他次空间谐波抑制得比较好, 除了  $\pi$  模附近的很窄频段内, 基波都远大于其他次谐波, 证明了反绕螺旋线具有的结构对称性有效地提高了抑制返波振荡的能力。

### 4.3 Ferruleless 型耦合腔结构

耦合腔结构分析文献[8]中给出的 Ferruleless 型耦合腔, 结构示意图见图 5, 设计工作带宽为 29-30GHz, 表 2 给出结构参数。由于该结构两个腔才形成一个完整的周期, 故需建模两个腔。仿真后提取出轴线上的轴向电场, 按式(6)作傅里叶分析得到  $n=0,1,2$  次空间谐波。图 6 给出色散曲线和耦合阻抗曲线, 可见, 计算结果与实测吻合得很好。

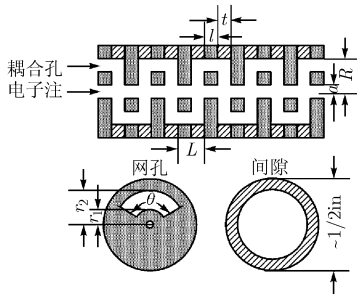


图 5 Ferruleless 型耦合腔结构示意图

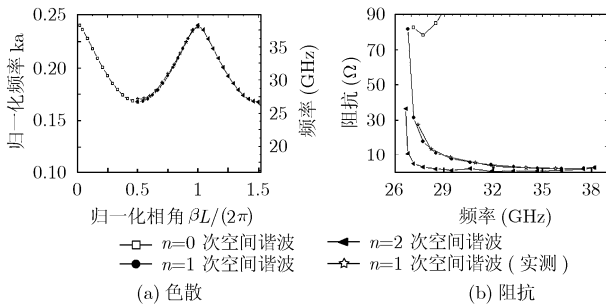


图 6 Ferruleless 型耦合腔结构空间谐波的色散和耦合阻抗曲线

由图 6(a)可见, 单腔相移的周期为  $\pi$ 。Ferruleless 型耦合腔结构工作在  $n=1$  次空间谐波, 工作频率的下限和上限分别受到  $\pi$  模和  $2\pi$  模的限制, 从图 6(b)来看, 在这两个模附近, 返波阻抗都比  $n=1$  次空间谐波的耦合阻抗大得多, 容易产生返波振荡, 只能通过增加相速度之差来抑制, 故应避免工作在这两个单腔相移相应的频率点附近。

在设计的工作频段 29-30GHz, 虽然作为返波的基波的耦合阻抗远大于工作谐波的, 但相速度相差较大, 该慢波系

统发生返波振荡的危险并不大。Ferruleless 型耦合腔是耦合腔结构的一个特例, 其分析对其它工作于一次空间谐波的耦合腔也基本适用。可见, 耦合腔结构的返波振荡抑制主要靠不同谐波间的相速度之差, 由于工作的一次空间谐波的相速度只在低频端和高频段才与返波的相接近, 没有螺旋线那样的在  $\pi$  模附近基波和负一次返波色散曲线相交的问题, 故在毫米波段, 耦合腔工作频带的选择受返波振荡的制约要比螺旋线的少一些, 这无疑使其工作频带的选择更具灵活性。

## 5 结论

随着行波管向毫米波段及高功率发展, 限制行波管工作频率的上限和峰值功率的主要因素是返波振荡。针对毫米波行波管的返波振荡问题, 本文利用 HFSS 仿真了 Ka 波段毫米波行波管的螺旋线、反绕双螺旋线及 Ferruleless 型耦合腔等典型慢波系统, 提取出轴向电场后, 通过傅里叶分析得到空间谐波, 进而比较分析了上述慢波系统的返波振荡特性。仿真分析发现了这些慢波系统如下独特的返波振荡特性: (1) 由于夹持杆和纵向翼片加载的影响, 螺旋对称性受到破坏, 螺旋线慢波系统中出现非常明显的角向谐波次数和轴向谐波次数不相等的空间谐波分量; (2) 螺旋线慢波系统  $\pi$  模对应的  $ka$  较小, 在  $\pi$  模附近,  $(0,-1)$ 、 $(1,-1)$  次等谐波的阻抗与基波的耦合阻抗相当, 相速度接近, 有产生返波振荡的危险; (3) 由于结构的对称性, 相对螺旋线慢波系统, 反绕双螺旋线慢波系统抑制返波振荡的能力大大增强, 在 Ka 波段基波耦合阻抗提高约 54%, 负一次返波阻抗减小, 可以工作的归一化频率更是提高了约一倍; (4) 为了避免返波振荡, Ferruleless 型耦合腔慢波结构工作频带的选择应尽量远离单腔相移为  $\pi, 2\pi$  对应的频点。

可见, 在毫米波行波管设计中, 应当充分考虑返波振荡的问题: 窄带工作时, 反绕双螺旋线慢波系统具有出色的返波振荡抑制能力, 适用于对增益和返波振荡抑制的要求高的毫米波行波管; 宽带工作的螺旋线慢波系统应该在耦合阻抗、螺旋线内半径和电子注半径之间做折中以在避免返波振荡的前提下取得最大增益, 必要时应加入衰减器的返波抑制措施; 耦合腔结构返波振荡的抑制主要依靠不同谐波间相速度之差, 工作频带应尽量选择在远离单腔相移为  $\pi, 2\pi$  的地方。

前人对返波振荡的研究多集中在理论分析和对返波振荡的抑制上, 本文率先仿真研究了毫米波行波管典型慢波系统的返波振荡, 发现了其独特的返波振荡特性, 为工程设计提供了指导。本文的结果有助于加深对慢波系统返波振荡的

表 2 Ka 波段 Ferruleless 型耦合腔结构参数(mm)

单周期腔长 $L$	间隙厚度 $t$	网孔宽度 $l$	腔半径 $R$	通道半径 $a$	耦合槽内半径 $r_1$	耦合槽外半径 $r_2$	耦合槽角度 $\theta$
2.0828	1.0414	1.0414	1.25	0.3	0.68	0.5	141°

认识,对毫米波行波管慢波系统的研制及返波振荡的抑制有着指导意义。

### 参 考 文 献

- [1] Gilmour A S Jr. Principles of Traveling Wave Tubes [M]. Boston and London: Artech House, 1994: 211-213.
- [2] 刘盛纲,李宏福,王文祥等.微波电子学导论[M].北京:国防工业出版社,1985:161-202.
- Liu S G, Li H F, and Wang W X, *et al.* Introduction of Microwave Electronics. Beijing: National Defense Industry Press, 1985: 161-202.
- [3] 电子管设计手册编辑委员会.中小功率行波管设计手册[M].北京,1976:104-121.
- Editor Committee of Electronic Tube Design Handbook. Design Handbook of Middle and Small Power TWT. Beijing, 1976: 104-121.
- [4] Kory C L and Dayton J A Jr. Computational investigation of experimental interaction impedance obtained by perturbation of helical traveling-wave tube structures[J]. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1998, 50(9): 2063-2071.
- [5] 王莉,肖刘,王自成.翼片加载螺旋线慢波系统的特性测量和模拟[J].*强激光与粒子束*, 2006, 18(4): 618-622.
- Wang L, Xiao L, and Wang Z C. Measurements and simulations on dispersion and interaction characteristics of vane-loaded helical SWS. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(4): 618-622.
- [6] 肖刘,苏小保,刘濮鲲.螺旋带色散特性和耦合阻抗的精确计算[J].*电子与信息学报*, 2007, 29(3): 751-755.
- Xiao L, Su X B, Liu P K. Precise calculation of the dispersion and coupling impedance of tape helix. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(3): 751-755.
- [7] Chemin D, Antonsen T M Jr, and Levush B. Exact treatment of the dispersion and beam interaction impedance of a thin tape helix surrounded by a radially stratified dielectric [J]. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1999, 46(7): 1472-1483.
- [8] Schroeder D L and Wilson J D. Ferruleless coupled-cavity traveling-wave tube cold-test characteristics simulated with micro-SOS [J]. NASA Technical Papers 3306, 1993.
- 陆德坚: 男,1980年生,硕士生,从事毫米波行波管及计算电磁学的研究.
- 王自成: 男,1966年生,博士,研究员,硕士生导师,主要从事微波、毫米波器件的研究与设计工作.
- 刘濮鲲: 男,1965年生,博士,教授,研究员,博士生导师,主要从事大功率微波毫米波器件、高功率微波与信息对抗技术的研究.