

双渐变技术减小 AM-PM 转换系数的初步研究*

周文表 宋培德
(中国科学院电子学研究所)

提 要

行波管欠压工作能减小 AM-PM 转换系数。因此在行波管中加入一段工作于该状态的慢波线应能改善 AM-PM 转换特性。由此引出了所谓“双渐变技术”。

本文对该技术作了初步分析,实际制管证明了该技术不仅能提高电子效率,而且能改善 AM-PM 转换特性。并且还具有多电平工作、降压效果好等优点。本文还总结了一套小信号设计方法。

一、引 言

近代的通信行波管不仅要求效率高,还要求调幅-调相 (AM-PM) 转换系数小。一般说来电子效率与 AM-PM 转换系数是矛盾的,因此只能寻求折衷方案。

对于均匀螺旋线行波管,为了提高效率要工作在过压的状态下^[1],而为了减小 AM-PM 转换系数,则希望工作在欠压状态下^[2],因此二者不能兼顾。

提高电子效率的有效方法是采用速度再同步技术。文献[3]报道了采用所谓“双渐变技术”既可提高效率,又可减小非线性。

我们采用双渐变技术试制的螺旋线行波管,既提高了电子效率又减小了 AM-PM 转换系数。

二、双渐变技术改善 AM-PM 转换特性

所谓双渐变 (double taper helix) 技术就是让相速先变大再线性变小。相速 v_{ϕ}/c 随管长的分布如图 1 所示。

整个相速分布曲线共分为四段,各段的作用为:

1. 第一段是恒定螺距段,工作在最大的小信号增益状态下。紧接着是相速 v_{ϕ}/c 快变化的过渡段。(在后面的试验中,改为跳变,没有这一快变化段。)
2. 第二段是相位补偿区,其变化的深度和长度决定了引入的相位补偿量。

* 1980年7月28日收到。

3. 第三段是相速斜率恒定的区段,螺距线性减小.

4. 最后是一小段恒定螺距段,长为慢波波长的 2—3 倍,它能获得最大的转换效率.

我们对该技术作了初步的分析与研究. 文献[4]详细研究了行波管中非线性的机理,特别是非线性相位畸变产生的原因;并得出结论:非线性相位畸变主要是由电荷密度的相位偏离线性特性引起的.虽然电荷密度的相位偏离起因于相互作用后电子动能的损失,但它并不直接对应于电子速度的减小,它还受到其它因素,特别是沿管子电路波相速的影响.例如,行波管工作于不同的 b 值时,电路波偏离线性特性的相移就可以有很大的变动.

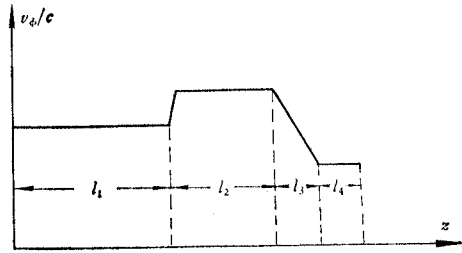


图 1 双渐变螺旋线相速分布图
Fig. 1 The phase velocity distribution of the double taper helix

图 2 是对不同的 b 值,电路波偏离线性特性的相位值随归一化距离 y 的变动情况.图 3 是不同 b 值下,AM-PM 转换系数与管子归一化距离的关系.由该两图可知, $b \approx 0$ 或略小于零时,可得到相反的相移,或使 AM-PM 转换系数为负值.因此在行波管中组合入上述相速渐变段,可望补偿相位畸变.

以上是大信号的计算结果.我们又对某一恒定螺距行波管测量了饱和相移与螺旋线工作电压的关系,结果如图 4 所示.该管相速对应于 1530V 左右,因此也是 $b \approx 0$ 时饱和

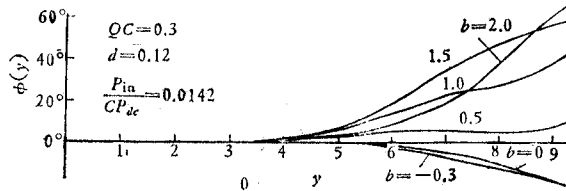


图 2 电路波相移随归一化距离 y 的变化^[4]
Fig. 2 Phase deviations of the circuit wave from linear behaviour versus normalized distance

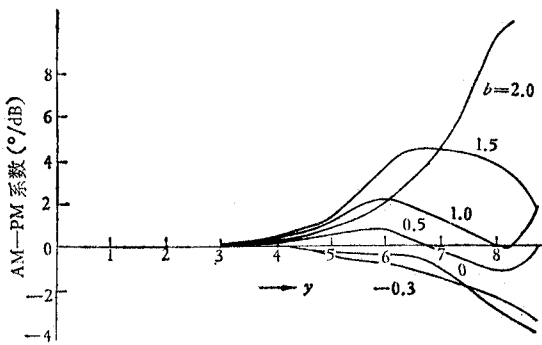


图 3 以 b 为参数,AM-PM 系数随 y 变化情况^[4]
Fig. 3 AM-PM conversion coefficient versus normalized distance for velocity parameter

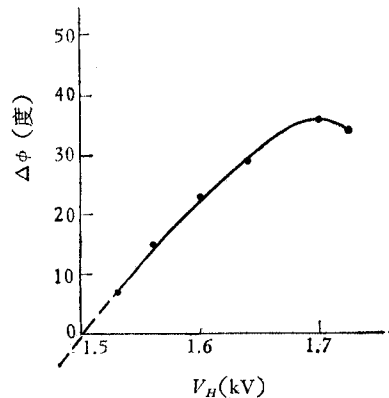


图 4 某行波管的饱和相移与螺线电压的关系
Fig. 4 The typical relation between saturated phase shift and helix voltage

相移为零度。证实了上述结论。

因此我们初步确定相位补偿段应工作于 $b \approx 0$ 或略小于零的状态。该相位补偿段应离输出端足够远, 以免影响效率; 但又得位于大信号区, 因为相移是由非线性效应引起的。

第一段工作在 $b \approx b_{opt}$ 的状态, 其长度为不使电子注形成明显的群聚, 而仍处于准小信号状态。据此来选择 l_1 和 l_2 。

对于效率改善段, 我们除考虑效率外, 还考虑了总管长度和绕栅机条件等实际因素, 选定螺距的变动斜率。

最后一段恒定螺距段的长度 l_4 , 根据以往单级跳变的经验, 选为 $l_4 \approx (2-3)\lambda_g$ 。

三、双渐变行波管的小信号设计

根据前一节的分析, 得出小信号设计步骤如下:

1. 根据用户给定的频率 f 、输出功率 P_{out} 、螺旋线电压 V_H , 估计电子效率 η_e , 求出电子注电流 I_0 。

2. 选定相位补偿段的 γa_2 , 求出螺旋线平均半径 a 。

3. 选择管壳直径、介质杆材料和夹持形式, 选定螺旋线导丝的直径或带的尺寸, 根据文献 [5] 作出中心频率下相速 V_s 、互作用阻抗 K 、慢波波长 λ_g 和 γa 随螺距 p 变化的曲线, 如图 5 所示。

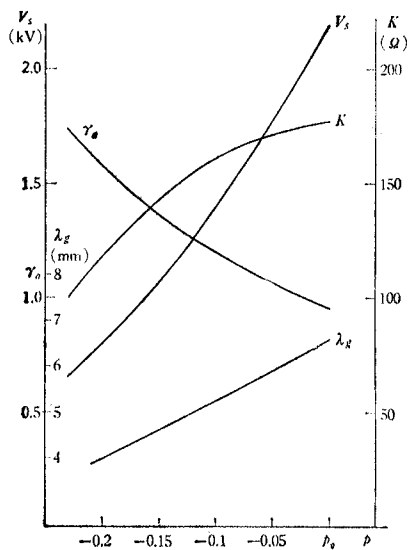


图 5 双渐变螺旋线的设计参数曲线

Fig. 5 The design parameter curves of the double taper helix

4. 由图 5 查出螺距 p_2 。

5. 由 $1 + b_1 c = 1 + 0.095 \sqrt{\frac{P_u}{\gamma b}}$, 求出 V_{s1} 。

6. 由图 5 查得螺距 p_1 。

7. 选择效率改善段的相速跳变量, 由此求出 V_{s4} 。

8. 由图 5 查得螺距 p_4 。

9. 选定线性渐变段的螺距变化斜率。

10. 选定 $l_4 = 2\lambda_{g4}$ 。

11. 由增益要求决定 l_1 和 l_2 。

这样就定出一个双渐变螺旋线行波管的全部尺寸。

四、双渐变行波管的实验结果

根据前节的方法, 设计了一支 C 波段瓦级行波管, 并实际制管, 一次成功。在预定的螺旋线电压附近获得了最大的功率输出。电子效率达到 21.5—24%, 饱和时的 AM-PM 转换系数约 $2.2^\circ/\text{dB}$; 低于饱和时, 最大的 AM-PM 转换系数仅 $3.8^\circ/\text{dB}$; 与均匀螺旋线行波管的相比, 减小了 $1^\circ/\text{dB}$ 以上。

图 6 给出了该管典型的输出功率和电子效率的曲线。由于采用双渐变技术, 电子效

率由均匀螺旋线行波管的 19% 提高到 24%。

图 7 给出了均匀螺旋线行波管、双阶相速跳变行波管和双渐变行波管的 AM-PM 特性曲线。图中还给出了大超压行波管的曲线，对比这些曲线，可知双渐变技术显著减小了行波管的 AM-PM 转换系数。

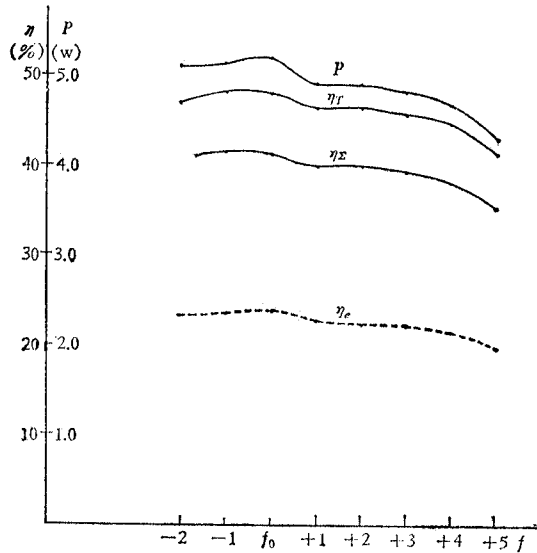


图 6 双渐变行波管的典型输出功率及效率
Fig. 6 Output and efficiency of a typical double taper helix TWT

由实际测量还发现双渐变行波管可双电平工作，且有较好的特性。例如减小电子注电流使输出功率减小一半时，仍能保持同样的电子效率；而均匀螺旋线行波管在此情况下

表 1 双渐变行波管的典型降压特性

Tab. 1 The depressed collector characteristics of a typical double taper helix TWT

螺旋线电压 $V_H(V)$	1820
收集极电压	
第一级 $V_{C1}(V)$	890
第二级 $V_{C2}(V)$	720
第三级 $V_{C3}(V)$	0
螺旋线电流 $I_H(mA)$	0.65
收集极电流	
第一级 $I_{C1}(mA)$	3.2
第二级 $I_{C2}(mA)$	8.0
第三级 $I_{C3}(mA)$	~0
管子效率 $\eta_r(\%)$	50
收集极效率 $\eta_c(\%)$	74

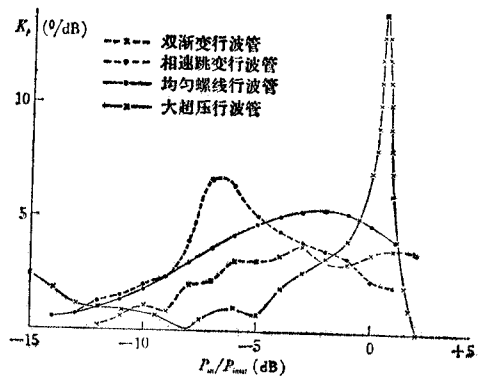


图 7 各种行波管的 AM-PM 转换系数的比较
Fig. 7 Comparison of AM-PM conversion coefficient among the different kinds of helix TWT

电子效率则有明显减小，增益下降亦较均匀螺旋线行波管为小。

表 1 给出了双渐变行波管结合双级降压收集极的典型降压特性，第一级收集极电压

仅为螺旋线电压的 49%，这说明双渐变虽提高了电子效率，但最慢的电子并未增加多少。而是使相互作用后的电子注的速度分散曲线更陡。

五、讨 论

通过上述初步分析和制管实践，得到初步结论：

1. 相速分布如图 1 的双渐变行波管不仅提高了电子效率，而且改善了 AM-PM 特性。
2. 本文的初步分析和小信号设计方法结合相速和阻抗计算程序^[5]可比较准确地一次设计成功高效率、低 AM-PM 转换系数的行波管。
3. 双渐变行波管有良好的双电平工作特性。
4. 经初步试验，增大线性段的相速改变量可进一步提高效率。
5. 相应的大信号分析正在进行，容后报道。

本工作得到卞彭、黄国祥先生的指导帮助；刘涌铨、颜永平同志协助测试了管子的非线性特性；本实验室有关同志作了大量制管工作；在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] 周文表，过压提高均匀螺距行波管效率的大信号计算，中国科学院电子学研究所内部报告，1979 年。
- [2] S. Wallander, *AD* 694092, April, 1969.
- [3] R. Strauss et al., *P. IEEE*, **65** (1977), 387.
- [4] E. Ezura, *8th International conference on microwaves and Optical Generation and Amplification*, (1970), p. 1—16.
- [5] 周文表，*电子学通讯*，**2**(1980)，72.

AN INVESTIGATION INTO REDUCING AM-PM CONVERSION COEFFICIENT BY THE DOUBLE TAPER HELIX TECHNIQUE

Zhou Wen-biao, Song Pei-de

(*Institute of Electronics, Academia Sinica*)

The conversion coefficient of a TWT can be reduced, when it works at under-voltage condition. Therefore if a section of helix which works at under-voltage condition is added to a TWT, the improvement of AM-PM conversion coefficient can be expected, then a "double taper helix technique" is developed.

This paper describes the double taper helix technique and presents a small signal design method. The actual TWT which uses the double taper helix proves that it not only raises the electron efficiency, but also improves the AM-PM conversion coefficient. Further experiment shows that this technique has other advantages, such as operation at two or three power levels and good depressed collector characteristics.