

螺旋线行波管速度再同步 的理论和计算(二)*

周文表、宋培德、宋文淼
(中国科学院电子学研究所)

提 要

在文献[1]中我们从理论上导出了速度再同步的大信号工作方程。本文提出了双阶相速跳变的计算程序和计算结果。计算结果与实验比较符合。证明该程序可用来设计并优选相速跳变行波管。

一、双阶相速跳变的大信号计算

由文献[1],速度再同步的大信号工作方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 A(y)}{dy^2} - A(y) \left[\left(\frac{d\theta(y)}{dy} - \frac{1}{c_0} \right)^2 - \left(\frac{1 + c_0 b}{c_0} \right)^2 \right] \\ &= - \left(\frac{1 + c_0 b}{\pi c_0} \right) \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{1/2} \left[\int_0^{2\pi} \frac{\cos \phi(y, \phi'_0) d\phi'_0}{1 + 2c_0 u(y, \phi'_0)} + 2c_0 d \int_0^{2\pi} \frac{\sin \phi(y, \phi'_0) d\phi'_0}{1 + 2c_0 u(y, \phi'_0)} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & A(y) \left[\frac{d^2 \theta(y)}{dy^2} - \frac{2d}{c_0} (1 + c_0 b)^2 \right] + 2 \left(\frac{d\theta(y)}{dy} - \frac{1}{c_0} \right) \frac{dA(y)}{dy} \\ &= - \left(\frac{1 + c_0 b}{\pi c_0} \right) \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{1/2} \left[\int_0^{2\pi} \frac{\sin \phi(y, \phi'_0) d\phi'_0}{1 + 2c_0 u(y, \phi'_0)} - 2C_0 d \int_0^{2\pi} \frac{\cos \phi(y, \phi'_0) d\phi'_0}{1 + 2c_0 u(y, \phi'_0)} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} [1 + 2c_0 u(y, \phi_0)] \frac{\partial u(y, \phi_0)}{\partial y} &= \left(\frac{Z}{Z_0} \right)^{1/2} \left[-A(y) \left(1 - c_0 \frac{d\theta(y)}{dy} \right) \sin \phi(y, \phi_0) \right. \\ & \left. + c_0 \frac{dA(y)}{dy} \cos \phi(y, \phi_0) \right] + \frac{1}{4} \left(\frac{\omega_p}{\omega C} \right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \exp \\ & \left\{ -\frac{1.25}{r b'} |\phi - \phi'| [1 + 2c_0 u(y, \phi'_0)] \right\} \operatorname{sgn}(\phi - \phi') d\phi' \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{d\theta(y)}{dy} + \frac{\partial \phi(y, \phi_0)}{\partial y} = \frac{2u(y, \phi_0)}{1 + 2c_0 u(y, \phi_0)} \quad (4)$$

对于图1所示的相速跳变的方案,我们也可以把它看作三个均匀螺距“行波管”的级联。但对后两个“行波管”而言,输入处是预调制的电子注。这时对于每个行波管,大信号工作方程为:

* 1980年7月28日收到。

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 A_i(y)}{dy^2} - A_i(y) \left[\left(\frac{d\theta_i(y)}{dy} - \frac{1}{c_i} \right)^2 - \left(\frac{1 + c_i b_i}{c_i} \right)^2 \right] \\ &= -\frac{1 + b_i c_i}{\pi c_i} \left[\int_0^{2\pi} \frac{\cos \phi_i(y, \phi'_0) d\phi'_0}{1 + 2c_i u_i(y, \phi'_0)} + 2c_i d_i \int_0^{2\pi} \frac{\sin \phi_i(y, \phi'_0) d\phi'_0}{1 + 2c_i u_i(y, \phi'_0)} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & A_i(y) \left[\frac{d^2 \theta_i(y)}{dy^2} - \frac{2d_i}{c_i} (1 + c_i b_i)^2 \right] + 2 \left(\frac{d\theta_i(y)}{dy} - \frac{1}{c_i} \right) \frac{dA_i(y)}{dy} \\ &= -\frac{1 + c_i b_i}{\pi c_i} \left[\int_0^{2\pi} \frac{\sin \phi_i(y, \phi'_0) d\phi'_0}{1 + 2c_i u_i(y, \phi'_0)} - 2c_i d_i \int_0^{2\pi} \frac{\cos \phi_i(y, \phi'_0) d\phi'_0}{1 + 2c_i u_i(y, \phi'_0)} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} [1 + 2c_i u_i(y, \phi_0)] \frac{\partial u_i(y, \phi_0)}{\partial y} &= -A_i(y) \left[1 - c_i \frac{d\theta_i(y)}{dy} \right] \sin \phi_i(y, \phi_0) \\ &+ c_i \frac{dA_i(y)}{dy} \cos \phi_i(y, \phi_0) + \frac{1}{4} \left(\frac{\omega_p}{\omega C} \right)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \exp \\ &\left\{ -\frac{1.25}{r b'} |\phi_i - \phi'_i| [1 + 2c_i u_i(y, \phi'_0)] \right\} \operatorname{sgn}(\phi_i - \phi'_i) d\phi'_i \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi_i(y, \phi_0)}{\partial y} + \frac{d\theta_i(y)}{dy} = \frac{2u_i(y, \phi_0)}{1 + 2c_i u_i(y, \phi_0)} \quad (8)$$

式中 $i = 0, 1, 2$, 分别代表推动段和第一、二跳变。在级联处 (例如 $y = y_1$) 的边界条件为:

$$A_{i+1}(y_1) = \left(\frac{c_i}{c_{i+1}} \right)^{1/2} A_i(y_1) \quad (9)$$

$$\left. \frac{dA_i(y)}{dy} \right|_{y=y_1} = \left. \frac{dA_{i+1}(y)}{dy} \right|_{y=y_1} \quad (10)$$

$$\theta_i(y_1) = \theta_{i+1}(y_1) \quad (11)$$

$$c_i \left. \frac{d\theta_i(y)}{dy} \right|_{y=y_1} = c_{i+1} \left. \frac{d\theta_{i+1}(y)}{dy} \right|_{y=y_1} \quad (12)$$

由于电子注速度在级联处是连续变化的,因此 $\phi_i(y, \phi_0)$ 及 $1 + 2c_i u_i(y, \phi_0)$ 也必须连续。

根据上述物理考虑,计算模型和流图如图 2 及图 3 所示。

程序中考虑了集中衰减器和螺旋线切断。该程序与一般程序不同,以管子的各种几何尺寸和频率等量作为原始输入量。 c, Qc 等量均由程序本身计算,更便于实际使用。计算分两段进行,首先对于选定的几何尺寸,对于各种不同的螺距 p 由文献[2]的方法和程

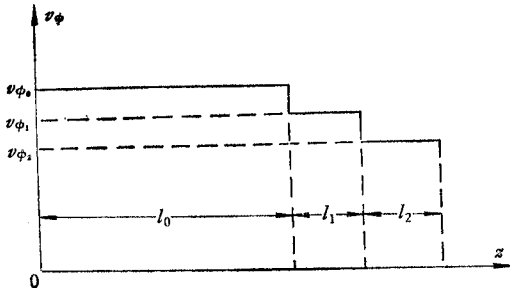


图 1 二阶跳变的相速变化图
Fig. 1 The phase velocity distribution of double velocity-jump TWT

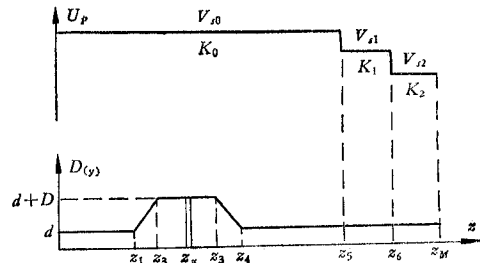


图 2 二阶相速跳变的分析模型
Fig. 2 Calculation model for double velocity-jump TWT

序计算相速 V_s , 相互作用阻抗 K 及 γa_0 与螺距 p 的关系, 典型曲线如图 4 所示. 其次根据这些 $V_s, K, \gamma a_0, f$, 电压、电流等量进行相速跳变的大信号计算.

具体计算程序此处从略. 全部计算在 DJS-6 机上进行.

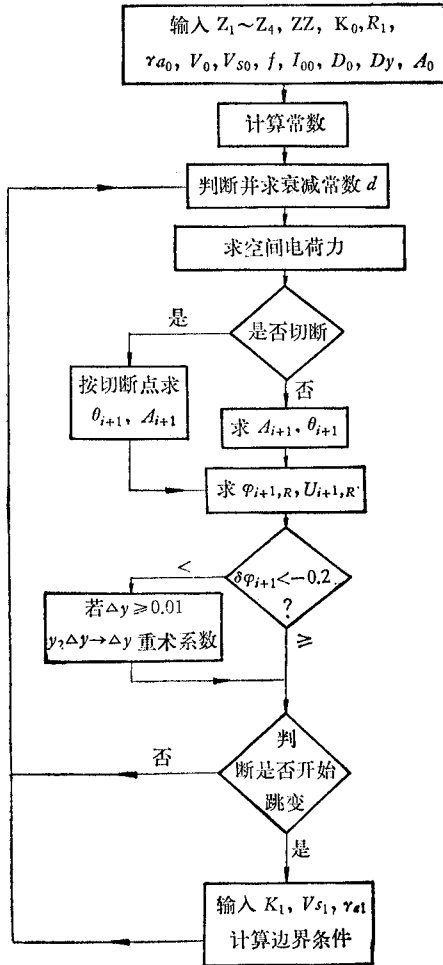


图 3 相速跳变的大信号计算流程图
Fig. 3 The flow diagram for large signal calculation of phase velocity-jump TWT

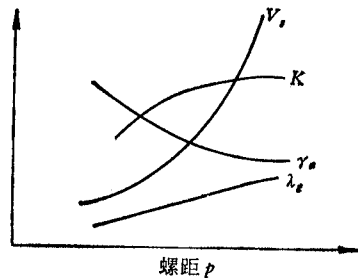


图 4 典型设计参数曲线
Fig. 4 Typical curves of design parameters

二、计算结果与实验的对照

根据文献[3]的小信号设计方法, 设计了一支 c 波段 8W 二阶相速跳变的行波管. 设计参数如表 1 所示.

实测的功率、效率、增益特性如表 2 所示. 对该管用上节所述的大信号程序作了计算. 典型的 $A(y)$ 随归一化距离 y 变化的情况如图 5 所示. 效率及增益的大信号计算结果亦列于表 2 中. 计算结果与实测对比可知, 效率的计算结果与实测符合的比较好, 对设

计管子有一定的指导意义。增益的计算结果比实测值偏高 6—7dB。

表 1 双阶相速跳变行波管的设计参数
Tab. 1 The design parameters of double velocity-jump TWT

| $V_H(\text{kV})$ | γa_0 | γa_1 | γa_2 | V_{s1}/V_{s0} | V_{s2}/V_{s0} | $l_1(\text{mm})$ | $l_2(\text{mm})$ | $I_0(\text{mA})$ |
|------------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| 2.18 | 0.95 | 1.06 | 1.22 | 0.82 | 0.60 | 12 | 12 | 16.2 |

表 2 效率、增益的实测值与大信号计算结果的比较
Tab. 2 Comparison of efficiency and gain between calculated and experimental results

| | $V_H(\text{kV})$ | $I_0(\text{mA})$ | $P_{out}(\text{W})$ | $\eta_e(\%)$ | $G_{sat}(\text{dB})$ |
|-----|------------------|------------------|---------------------|--------------|----------------------|
| 实 测 | 2.13 | 16.5 | 8.5 | 24.6 | 37 |
| 计 算 | 2.13 | 16.5 | | 24.5—28.75 | ~42.5 |

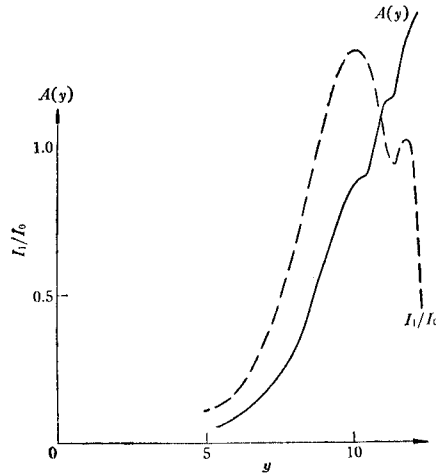


图 5 双阶相速跳变行波管中 $A(y)$ 及 I_1/I_0 随归一化距离 y 的变化
Fig. 5 RF voltage $A(y)$ and fundamental RF beam current I_1/I_0 of double velocity-jump TWT versus normalized distance y

三、结 论

1. 由于理论计算结果与实测有一定程度的符合, 说明文献[1]的大信号工作方程, 本文的计算模型和程序能反映双阶相速跳变行波管工作的主要物理过程。

2. 对跳变处的边界条件(9)改为

$$A_{i+1}(y_1) = \left(\frac{c_i}{c_{i+1}}\right)^2 A_i(y_1)$$

亦作了计算, 结果几乎无变化。

3. 本程序已经修改成设计程序, 可用来设计并优选最佳相速跳变方案。

4. 利用该程序和模型可对速度再同步的机理进行理论研究。

本项工作得到卞彭、黄国祥先生的指导和帮助,得到所、室各级领导和袁海波、李宝林等同志的支持,特此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 宋文淼、周文表,电子学通讯, **2**(1980), 181.
- [2] 周文表,电子学通讯, **2**(1980), 72.
- [3] 陈培龙,电子学通讯, **1**(1979), 64.

THE THEORY AND CALCULATION OF VELOCITY RESYNCHRONISM OF HELIX TYPE TWT

Zhou Wen-biao, Song Pei-de, Song Wen-miao

(Institute of Electronics, Academia Sinica)

In the first part^[1], the working equations of velocity tapered TWT are deduced theoretically. This paper presents a computer program for TWT with double velocity jump and describes the calculated results and comparison of them with experimental data. The comparison shows that they are rather close. Therefore this program can be used for the design and selection of the TWT with the double velocity jump.