

变周期慢波系统内同步问题的研究^{*}

徐 翱[†] 王文祥 魏彦玉 宫玉彬 王战亮 付成芳 殷海荣

(电子科技大学物理电子学院, 大功率微波电真空器件技术重点实验室, 成都 610054)

(2008 年 10 月 9 日收到, 2008 年 11 月 17 日收到修改稿)

由于行波管的工作依赖于其慢波系统中的电子注与沿轴传输交变电磁场之间的相互作用而完成, 而这样的相互作用要求沿轴传输的交变电磁场必须与电子注有着近乎同步的速度, 所以慢波系统内的同步问题就成了研究行波管的一个很重要的问题. 而变周期慢波系统是将一般慢波系统的周期进行变化而形成的, 它可以比原周期慢波系统有着更宽的带宽, 更高的相互作用效率, 还可以选择空间谐波. 本文分析了变周期慢波系统内的空间谐波, 提出了使慢波系统内的一次空间谐波一直与电子注同步所需要满足的原则, 最后以变周期折叠波导为例, 证明了这个原则.

关键词: 变周期, 慢波系统, 空间谐波, 同步

PACC: 7870G, 8760F

1. 引 言

提高行波管的效率, 长期以来都是一个重要的研究课题. 在行波管中, 电子注与线路行波场之间的能量交换属于动能和电磁能的交换. 因而电子注把相当一部分能量转移给行波场后, 电子注的平均速度将变慢, 从而电子注与行波就不能继续维持同步状态, 因此也就不能继续进行有效的正向能量转换, 甚至发生反向能量转换, 即电子注又从行波场吸收能量. 这就是限制行波管的效率的根本原因之一. 由这一物理机理的分析, 可以想到, 如果能设法保持电子注与行波长期同步, 那么, 行波管的效率必然能得到显著改善. 而要使注-波相互作用一直保持同步, 不外乎有两种方法: 一种方法是使行波管的相速逐渐变慢, 称之为相速渐变; 另一种方法是设法使电子注的速度增大, 称之为电压跳变. 而相速渐变是比较常用的一种方法, 研究人员对其进行了广泛的研究^[1-7].

将一般的周期慢波系统的周期由固定改为可变, 就形成了变周期慢波系统, 而这种变周期慢波系统就是达到相速渐变的一个主要手段. 因为慢波系统中传输的电磁波的相速主要是由慢波系统的结构所决定的. 在一般的周期慢波系统中, 由于每个周期的

结构都是一样的, 所以电磁波的相速也一样, 但是在变周期慢波系统中, 可以对每个“周期”的结构进行调整, 使得电磁波的相速随着“周期”的增加而变慢, 从而一直与电子注同步. 所以变周期慢波系统就成了提高行波管效率的一种有效的方法. 另外, 变周期慢波系统还可以选择空间谐波, 并且有着更宽的带宽^[8,9], 因而具有广泛的用途.

本文从研究空间谐波的角度出发, 分析了变周期慢波系统内的空间谐波, 讨论了各次空间谐波在变周期慢波系统的各个“周期”内的相位常数变化情况, 提出了若使变周期慢波系统内有一次空间谐波一直与电子注同步, 该系统的结构参数应满足的原则. 最后本文将提出的原则与应用于变周期折叠波导的同步条件进行了验证.

2. 变周期慢波系统的同步原则

假设某周期慢波系统是无耗系统, 与电子注互作用的只有 z 方向的行波场, 则该慢波系统的纵向电场可以表示为

$$E_z(z) = f(z)E_0 e^{-j\beta_0 z}, \quad (1)$$

其中 $f(z)$ 表示电场的幅值分布, 它是 z 的周期函数, 其周期等于系统的空间周期 L , E_0 是幅值常数, β_0 是相位常数.

^{*} 国家自然科学基金重点项目(批准号: 60532010, 60401005)资助的课题.

[†] E-mail: xuao@uestc.edu.cn 或 xuao@vip.sohu.com

将 $f(z)E_0$ 沿 z 轴展开成 Fourier 级数,可以得到

$$f(z)E_0 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_n(\beta_n) e^{-jn\frac{2\pi}{L}z},$$

$$E_n(\beta_n) = \frac{1}{L} \int_{z_1}^{z_1+L} f(z)E_0 e^{jn\frac{2\pi}{L}z} dz. \quad (2)$$

利用弗洛奎定理^[10],电场分量就可以写成

$$E_z(z) = f(z)E_0 e^{-j\beta_0 z}$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_n(\beta_n) e^{-j(\beta_0 + \frac{2n\pi}{L})z}. \quad (3)$$

令

$$\beta_n = \beta_0 + \frac{2n\pi}{L}, \quad (4)$$

则有

$$E_z(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_n(\beta_n) e^{-j\beta_n z}. \quad (5)$$

可以发现,周期慢波系统中传输的电磁波可以分解为无数个空间谐波,而这些空间谐波是由于系统结构的周期性,使电场的幅值沿 z 轴分布呈周期性非简谐变化而引起的,各次空间谐波有着相同的频率 ω 和不同的传播常数 β_n .

当把周期慢波系统的周期由固定改为可变时,慢波系统的结构仍然是周期变化的,只是它的变化周期不再固定不变,所以,这样的变周期慢波系统中仍然存在空间谐波,这些空间谐波还是会有着相同的频率但不同的传播常数.考虑到变周期慢波系统的“周期”是变化的,所以其空间谐波不能再用 Fourier 级数表示,而应该用 Fourier 变换表示.

仍然可以用(1)式来表示变周期慢波系统中的纵向电场,但是其电场幅值分布 $f(x)$ 就不再是 z 的周期函数,其他参量的定义不变.

将 $f(x)E_0$ 沿 z 轴作 Fourier 变换,可以得到

$$E_z(z) = f(z)E_0 e^{-j\beta_0 z} = \frac{L_{\text{sum}}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} E(\beta) e^{-j\beta z} d\beta,$$

$$E(\beta) = \frac{1}{L_{\text{sum}}} \int_0^{L_{\text{sum}}} f(z)E_0 e^{j\beta z} dz, \quad (6)$$

其中

$$\beta' = \beta_0 + \beta. \quad (7)$$

L_{sum} 是系统的 z 向总长度, β' 是各次空间谐波的传播常数,而 β 是由于系统结构沿 z 向变化而形成的空间谐波分量,类似于(4)式中的 $2n\pi/L$. 可以发现,在一般的等周期慢波系统中,某一次空间谐波就是

指 n 为某一个固定值时, β_n 所对应的空间谐波.而在变周期慢波系统中,某一次空间谐波就应该是指 β 为某一个固定值时, β' 所对应的空间谐波.

而在慢波系统中,所谓的电磁场与电子注同步实际上就是指电子注的速度与某一次空间谐波的相速几乎相同^[10],即

$$v_e = v_p = \frac{\omega}{\beta_{\text{sp}}}, \quad (8)$$

其中 v_e 是电子注的速度, v_p 是与电子注同步的那次空间谐波的相速, ω 是电磁波的角频率, β_{sp} 是与电子注同步的那次空间谐波对应的相位常数.由前面的分析可以得到,在一般的等周期慢波系统中 $\beta_{\text{sp}} = \beta_n$,但在变周期慢波系统中 $\beta_{\text{sp}} = \beta'$. 值得注意的是,如果要使某一次空间谐波一直与电子注同步,那么这次空间谐波在一般的等周期慢波系统中对应的 n 在每个周期都是相同的(即 $2n\pi/L$ 不变),相应的在变周期慢波系统中就应该是 β 在每个“周期”中也是相同的.

变周期慢波系统的一个很重要的作用就是通过保持电磁波与电子注一直同步来提高效率,那么在考虑变周期慢波系统中与电子注同步的那次空间谐波的相速时,就必须考虑到电子注速度的变化.通过对已有等周期慢波系统的分析就可以得到该慢波系统中经过注-波相互作用后的电子注速度的变化规律,我们近似可以假设在该系统基础上进行变化而形成的变周期慢波系统中电子注速度具有同样的变化规律.即假设电子注的初始速度为 v_0 ,在每个“周期”的速度为 $A(q)v_0$,其中 q 是周期号, $0 < A(q+1) < A(q) < A(1) = 1$. 那么要使某一次空间谐波一直与电子注同步,则在每个“周期”都应该有

$$A(q)v_0 = \frac{\omega}{\beta_0 + \beta}. \quad (9)$$

从上式可以发现,电子注速度随“周期”变化而变化,但对于同一次空间谐波, ω 代表频率,是常数,而且根据上面分析, β 应该保持不变,所以在变周期慢波系统中 β_0 就不再是常数,而是随着“周期”的变化而变化的.这是由于在不考虑电子注的影响时,电磁波的相位常数本身就是由传输电磁波的结构和电磁波的频率所决定.而变周期慢波系统的每个“周期”的结构有所不同,所以 β_0 也就不同.

通过(9)式可以得到

$$\beta_{(q+1)} - \beta_{0q} = \frac{\omega}{v_0} \left[\frac{1}{A(q+1)} - \frac{1}{A(q)} \right], \quad (10)$$

其中 $\beta_{\alpha_{q+1}}$ 和 β_{0q} 分别是第 $q+1$ 个“周期”和第 q 个“周期”的电磁波相位常数。

由于 β_0 是由不同“周期”的结构和电磁波频率所决定的,那么 $\beta_{\alpha_{q+1}} - \beta_{0q}$ 就应该是一个关于结构尺寸参数和频率的函数,可以表示为 $g(s, f)$, 其中 s 表示结构的各个尺寸参数, f 表示频率. 那么(10)式就可以表示为

$$g(s, f) = \frac{\omega}{v_0} \left[\frac{1}{A(q+1)} - \frac{1}{A(q)} \right]. \quad (11)$$

也就是说,只要变周期慢波系统的各个“周期”的尺寸参数都满足(11)式,那么这个变周期慢波系统就存在某一次空间谐波一直与电子注同步。

3. 变周期折叠波导慢波系统的分析

折叠波导慢波系统作为行波管的高频相互作用电

路与其他的慢波系统相比有很多独特的优点,比如电路结构简单容易加工,全金属结构,强度高,散热能力好,输入输出电路简单容易做到匹配,色散特性平坦,有一定的耦合阻抗,具有宽频带大功率的特性,特别适合在毫米波、亚毫米波段工作^[11-14]。

为了研究变周期慢波系统的同步原则,可以将等周期折叠波导的周期进行变化,从而得到变周期折叠波导慢波系统,如图1所示。

图1中, b 是波导横截面的宽, L_{sum} 是变周期折叠波导的纵向总长, Q 是总“周期”数, L_q 是第 q 个“周期”的长, p_q 是第 q 个“周期”沿波导的长,即 $p_q = L_q + h_q + h_{q-1}$, 其中 $q = 1, 2, \dots, Q$ 。

在图1中可以看出,每经过一个“周期” L_q ,电场的方向就要改变一次,因此,电子注经过第 q 个周期距离 L_q 后所感受到的电磁场相位变量为

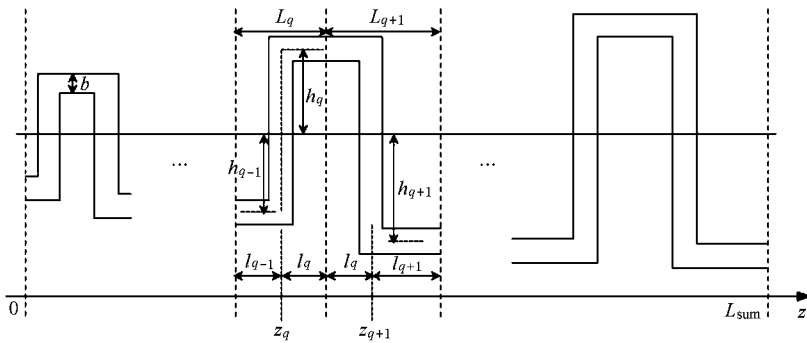


图1 变周期折叠波导慢波系统

$$\beta_{0q} L_q = \frac{2\pi f p_q}{c} \sqrt{1 - \left(\frac{c}{2af}\right)^2} + \pi, \quad q = 1, 2, \dots, Q, \quad (12)$$

其中 a 是波导横截面的长, f 是电磁波的频率。

由(11)式和(12)式,经过简单处理就可以得到

$$4 \left\{ \left[\frac{1}{A(q+1)v_0} - \frac{1}{A(q)v_0} \right]^2 - \frac{1}{c^2} \left(\frac{p_{q+1}}{L_{q+1}} - \frac{p_q}{L_q} \right)^2 \right\} f^2 - 4 \left[\frac{1}{A(q+1)v_0} - \frac{1}{A(q)v_0} \right] \times \left(\frac{1}{L_{q+1}} - \frac{1}{L_q} \right) f + \left(\frac{1}{L_{q+1}} - \frac{1}{L_q} \right)^2 + \frac{1}{a^2} \left(\frac{p_{q+1}}{L_{q+1}} - \frac{p_q}{L_q} \right)^2 = 0, \quad q = 1, 2, \dots, Q. \quad (13)$$

由于频率 f 是表示与电子注同步的电磁波的频率,其必须为实数,则(13)式的判别式必须为 $\Delta = 0$, 故对其判别式进行分析可以得到^[15]。

如果

$$\frac{p_{q+1}}{L_{q+1}} = \frac{p_q}{L_q},$$

则

$$f = \frac{\frac{1}{L_{q+1}} - \frac{1}{L_q}}{2 \left[\frac{1}{A(q+1)v_0} - \frac{1}{A(q)v_0} \right]}. \quad (14)$$

如果

$$\frac{p_{q+1}}{L_{q+1}} \neq \frac{p_q}{L_q},$$

则

$$f = \frac{c^2 \left[\frac{1}{A(q+1)v_0} - \frac{1}{A(q)v_0} \right]}{2a^2 \left(\frac{1}{L_{q+1}} - \frac{1}{L_q} \right)}. \quad (15)$$

所以可以得出如下结论:如果某一个等周期慢波系统,其 β_0 可以由它的结构参数与电磁波频率的关系得出,那么对它的周期进行变化而得到的变周

期慢波系统只要满足(14)式或(15)式,就能够存在一次空间谐波一直与电子注同步,从而提高了该系统的注-波相互作用效率.

为了验证上述原则的正确性,本文使用了高频仿真软件 HFSS 对变周期折叠波导慢波系统进行了分析.

某一个具体结构的变周期折叠波导的“周期”数为 8,波导的横截面长 $a = 4.8 \text{ mm}$,宽 $b = 0.7 \text{ mm}$,电子注通道半径 $r = 0.6 \text{ mm}$,第一个“周期” $L_1 = 1.2 \text{ mm}$, $p_1 = 4.1 \text{ mm}$,假设 $v_0 = 6.0944 \times 10^7 \text{ m/s}$,为了使所举的例子能够符合实际的要求,就必须得到电子注的速度在等周期折叠波导中的真实变化情况,所以可以使用 magic 等三维粒子仿真软件对以上述第一个“周期”为周期的等周期折叠波导进行模拟,本文模拟了具有 81 个这样的周期,工作频率在 35 GHz (该频率在等周期折叠波导中的相速为 v_0)的等周期折叠波导,得出其电子在纵向上的能量通量如图 2 所示,通过这些数据就可以得出电子的能量在纵向上的变化规律,考虑到电子注能量的减小就是因为电子将其动能交给了电磁波,又因为电子能量的比应该等于电子速度的比的平方,所以这样就可以得出电子注在经过每个周期后速度的变化情况.本文为了简便,只选取了 8 个“周期”,但其电子注速度的变化规律却是以实际的电子注速度变化规律为基础,选择其变化较典型的部分来进行假设,所以可以假设电子注速度变化规律为 $A(q+1) = [A(q)^2 - 0.004e^{0.2q}]^{1/2}$,其中 $q = 1, \dots, 8$,与电子束同步的电磁波的频率为 $f = 35 \text{ GHz}$,而在第一个“周期”与电子注同步的是该电磁波的基波,则可以通过(14)式计算出该变周期折叠波导的尺寸参数,如表 1 所示.

表 1 尺寸参数

q	L/mm	p/mm
1	1.2	4.1
2	1.196	4.0862
3	1.191	4.0693
4	1.185	4.0487
5	1.1776	4.0235
6	1.1686	3.9926
7	1.1575	3.9549
8	1.144	3.9087

图 3 中,理论值表示由电子注速度变化规律得到的在各个“周期”内的电子注速度,即 $A(q)v_0$,模

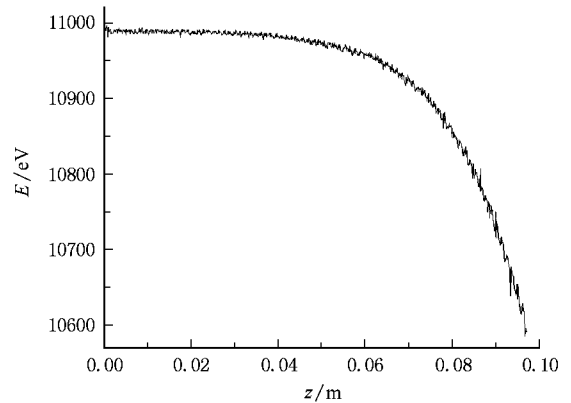


图 2 等周期折叠波导的纵向电子能量通量

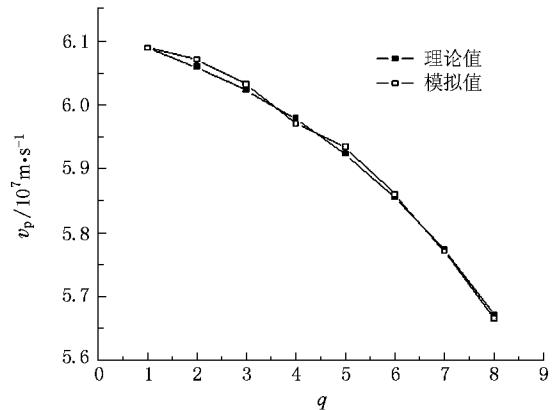


图 3 各个“周期”内的速度

拟值表示由仿真软件 HFSS 计算得到的各个“周期”内的基波的相速.从比较结果可以发现它们在变周期折叠波导慢波系统中几乎是相等的.所以,可以得到结论,变周期折叠波导慢波系统的结构参数只要满足本文所得出的原则,那么其必然存在有某一次空间谐波一直与电子注同步.

4. 结 论

在慢波系统中,随着电子注与电磁波不断的相互作用而交出能量,使得电子注与电磁波不再同步一直是限制行波管效率的一个重要问题,而变周期慢波系统就是解决这个问题一个非常有用的方法,但在已发表的文献中却没有能非常具体地指出“周期”应该怎样变化才比较好.因此,本文从分析空间谐波的角度出发,提出了使得变周期慢波系统能够有某一次空间谐波一直与电子注同步所应该满足的原则,而通过该原则就可以十分明确地确定“周

期”具体的变化情况 这就为以后进一步研究变周期 慢波系统打下了理论基础.

- [1] Jung S S , Soukhov A V , Jia B F *et al* 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 3000
- [2] Srivastava V , Carter R G , Ravinder B *et al* 2000 *IEEE Tran. Elec. Devi.* **47** 2438
- [3] Pond N H , Twiggs R 1966 *IEEE Tran. Elec. Devi.* **13** 956
- [4] Ghosh T , Challis A J , Jacob A *et al* 2008 *IEEE Tran. Elec. Devi.* **55** 668
- [5] Xu A , Wang W X , Wei Y Y *et al* 2009 *Chin. Phys. B* Accepted and to be published
- [6] Schachter L , Nation J 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 2441
- [7] Schachter L 1995 *Phys. Rev.* **52** 2037
- [8] Solntsev V 1998 *Journal of Communication Technology and Electronics* **43** 1285
- [9] Solntsev V 1994 *Journal of Communication Technology and Electronics* **39** 42
- [10] Lu Z Z 1962 *Traveling-wave Tubes* (Shanghai : Shanghai scientific and Technical Publishers) in Chinese [陆钟祚 1962 行波管 (上海 : 上海科学技术出版社)]
- [11] Booske J , Converse M C , Kory C L *et al* 2005 *IEEE Tran. Elec. Devi.* **52** 685
- [12] Chen G L , Owens T L , Whealton J H 1988 *IEEE Tran. Plas. Scie.* **16** 305
- [13] Wei Y Y , Wang W X , Sun J H *et al* 2002 *Chin. Phys. B* **11** 277
- [14] Lu Z G , Gong Y B , Wei Y Y *et al* 2006 *Chin. Phys. B* **15** 2661
- [15] Xu A , Wang W X , Wei Y Y , Gong Y B 2009 *PIERS* , Beijing , Accepted and to be published

Analysis of synchronization in the varying-period slow-wave structures *

Xu Ao[†] Wang Wen-Xiang Wei Yan-Yu Gong Yu-Bin Wang Zhan-Liang Fu Cheng-Fang Yin Hai-Rong
(National Key Laboratory of High Power Vacuum Electronics , School of Physical Electronics , University of Electronic Science and Technology of China , Chengdu 610054 , China)

(Received 9 October 2008 ; revised manuscript received 17 November 2008)

Abstract

To utilize the interaction between the field and the electron beam in a traveling wave tube (TWT) , the velocity of electrons and the longitudinal phase velocity of field should be made approximately equal . But when the electromagnetic energy increases , the electrons are slowed down and the synchronization condition is no longer satisfied in periodic structures . However , the varying-period slow-wave structure can be used to maintain the synchronization in the whole interaction section . This structure also has the advantages of space harmonic selectivity and wide bandwidth . The space harmonic in varying-period slow-wave structures is analyzed here . The synchronization condition of one space harmonic with the electron beam during the whole interaction process is presented in this paper . And the folded waveguide with varying period is analyzed as an example .

Keywords : varying-period , slow-wave structure , space harmonic , synchronization

PACC : 7870G , 7860F

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60532010 , 60401005) .

[†] E-mail : xuaao@uestc.edu.cn , xuaao@vip.sohu.com