

准周期边界条件法在耦合腔结构高频特性研究中的应用

陆德坚^{①②} 王自成^① 刘濮鲲^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文指出准周期边界条件法在耦合腔高频特性研究的应用中会出现伪解, 提出了相移法和能量法对伪解进行辨别, 并初步探讨产生伪解的原因, 然后提出了去除伪解的理论分析法和相移法, 其中相移法具有普遍性。最后给出了该方法在休斯型耦合腔结构中的应用算例。

关键词: 耦合腔慢波结构; 准周期边界条件; 计算机模拟; 行波管; 色散

中图分类号: TN124

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)11-2780-04

The Application of Quasi-period Boundary Method to the Study of RF Characteristics of Coupled-cavity Structure

Lu De-jian^{①②} Wang Zi-cheng^① Liu Pu-kun^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: This paper points out that the fake solutions appear when the quasi-period boundary condition method is applied to the coupled-cavity structure. Phase method and energy method are presented to identify the fake solutions. Then, the cause of fake solutions is made out. Theory analysis and phase method is presented to eliminate the fake solutions. Finally, the application of the method on Huges coupled-cavity structure is carried out as an example.

Key words: Coupled-cavity slow-wave structure; Quasi-period boundary condition; Computer simulation; TWT; Dispersion

1 引言

三维电磁仿真软件 HFSS 和 CST MWS 的准周期边界条件在螺旋线慢波系统高频特性的研究中得到了广泛的应用, 相对于传统的谐振法, 准周期边界条件法更加接近于实际行波管冷测中的行波法, 计算的精度比谐振法的要高, 求解的效率也要高得多, 这已为前人的工作所证明^[1, 2]。然而在耦合腔慢波结构高频特性的研究中, 应用得最多的还是谐振法, 理论上准周期边界条件法对耦合腔结构也是适用的, 但目前关于该方法在耦合腔结构高频特性研究中的应用的报道尚未多见, 有限的报道中对这一方法的应用也缺乏全面的说明。

本文深入研究准周期边界条件法在耦合腔结构高频特性研究中的应用, 指出了该方法在求解过程中会出现伪解, 从相移和能量两方面证明了伪解的存在, 并初步探讨了产生伪解的原因, 然后从理论分析和相移两方面提出辨别伪解的方法, 其中相移法有普遍性, 为该法在耦合腔结构高频特性

研究中的应用铺平了道路。最后以休斯型耦合腔慢波结构为例, 证明了去除伪解后, 该方法能成功应用于耦合腔结构高频特性的研究。

2 存在问题

耦合腔结构在应用准周期边界条件法的过程中, 出现了下述一些问题。以文献[3]中给出的休斯型耦合腔结构为例, 该慢波结构的参数如表 1 所示。

在 HFSS 中建模两个腔如图 1 所示。

应用准周期边界条件法和谐振法得到的结果如表 2 所示, 其中电磁边界条件 ME 指 Magnetic/Electronic 边界,

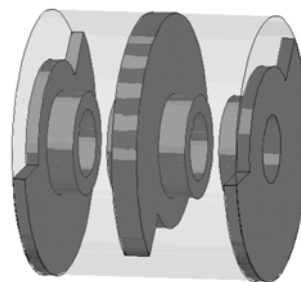


图 1 休斯结构建模

2007-05-11 收到, 2007-11-08 改回

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

表 1 休斯型耦合腔慢波结构尺寸表(mm)

r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	g	h	t	L	θ
0.2794	0.4318	0.6858	1.1049	1.1049	0.2921	0.7518	0.2159	0.9677	140°

表 2 准周期边界条件法和谐振法得到的谐振频率比较

准周期边界条件法		谐振法(实测)		
单腔相移(rad)	最低两谐振频率(GHz)	腔数	边界条件	最低的谐振频率(GHz)
π	53.07, 74.76	2	ME	55.53, 69.41
$7/6 \pi$	54.02, 71.66	3	ME	54.34, 61.36, 72.12
$5/4 \pi$	55.19, 68.99	3	EE	57.13, 66.60, 75.47
$4/3 \pi$	56.78, 66.22	谐振法(仿真)		
$3/2 \pi$	60.99, 61.01	腔数	边界条件	最低的谐振频率(GHz)
$5/3 \pi$	56.78, 66.22	1	MM	53.07
$7/4 \pi$	55.19, 68.99	2	ME	55.20, 69.00
$11/6 \pi$	54.02, 71.66	3	ME	54.03, 61.01, 71.66
2π	53.07, 74.76	3	EE	56.79, 66.23, 74.76

EE 指 Electronic/Electronic 边界, MM 指 Magnetic/Magnetic 边界。

可见若按经典的色散特性分析方法, 准周期边界条件法将得到图 2(a)所示的色散曲线。

对一个腔长度的轴线上的轴向电场按下式

$$E_{zn}(0) = \frac{1}{L} \int_0^L [E_{zn}(0, z) + iE_{zi}(0, z)] e^{j\beta_n z} dz \quad (1)$$

做傅里叶分析后得到轴线上各空间谐波的耦合阻抗如图 2(b)所示。需要注意的是, 必须是对一个腔长做傅里叶分析, 若对两个腔长做傅里叶分析会出现错误的结果。

这与熟知的图 3 所示的休斯型耦合腔结构的色散特性有明显不同, 图 2(a)中多了 $n = 0, -2, 2$ 次空间谐波。

图 2(a)所给出的色散特性具有很大的迷惑性: (1)是用准周期边界条件法求解得到的解, 必满足所设定的周期相移条件; (2)图 2(a)与我们熟知的螺旋线慢波系统的色散特性非常相似, 能够依螺旋线那样有对应的 $n = \dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$ 次空间谐波, 周期为 π 也能够解释为休斯结构为双腔周

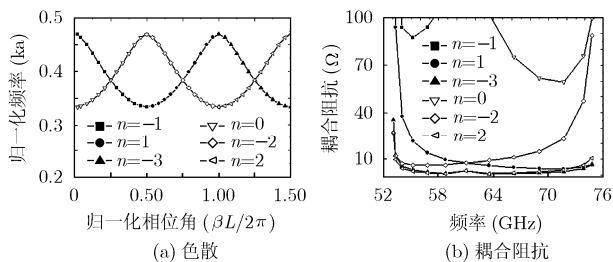


图 2 去除伪解前准周期边界条件法得到的色散特性及耦合阻抗特性

期结构, 故单腔的相移只有原先的一半, 即 π 。(3)对轴向电场做傅里叶分析可得到相应的 $n = 0, -2, 2$ 次空间谐波的耦合阻抗似乎更加印证了其正确性。而图 3 的经典色散特性为长期的理论和实践所证明, 正确性不容置疑。下面我们将从相移和能量两个方面对该法得到的解进行甄别, 证明图 2 中的 $n = 0, -2, 2$ 次空间谐波为伪解。

3 伪解的辨别

3.1 相移法

为方便解释, 将图 2(a)的耦合腔色散曲线表示为图 4, 图 4 是在图 3 基础上多了曲线 2。分别取单腔相移 $\varphi_0 = \pi/3, 2\pi/3, 4\pi/3, 5\pi/3$ 。用准周期边界条件法仿真得到的最低两

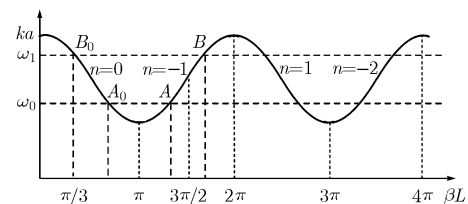


图 3 休斯结构的经典色散特性

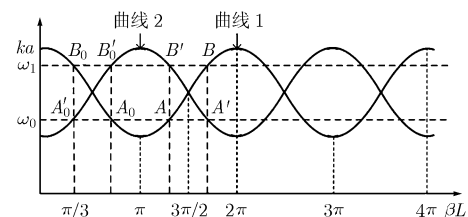


图 4 准周期边界条件法得到的休斯结构色散特性

表3 准周期边界条件法得到的单腔相移与频率关系

单腔相移(rad)	$\pi/3$	$2\pi/3$	$4\pi/3$	$5\pi/3$
第1频率(GHz)	56.776(A'_0)	56.776(A_0)	56.776(A)	56.776(A')
第2频率(GHz)	66.221(B_0)	66.221(B'_0)	66.221(B')	66.221(B)

个频点及其在图4中对应点如表3所示。

可见,对应的第1频点和第2频点都相等,根据弗洛奎定理可知, A 点对应于基波中 A_0 点的负一次空间谐波,同样, A' , B' , B 分别对应于 A'_0 , B'_0 和 B_0 。仿真后,提取出耦合腔轴线上各点的相位,得到 $\varphi_0 = \pi/3, 2\pi/3, 4\pi/3, 5\pi/3$ 对应的沿轴线分布相位特性分别如图5的(a),(b),(c),(d)所示。

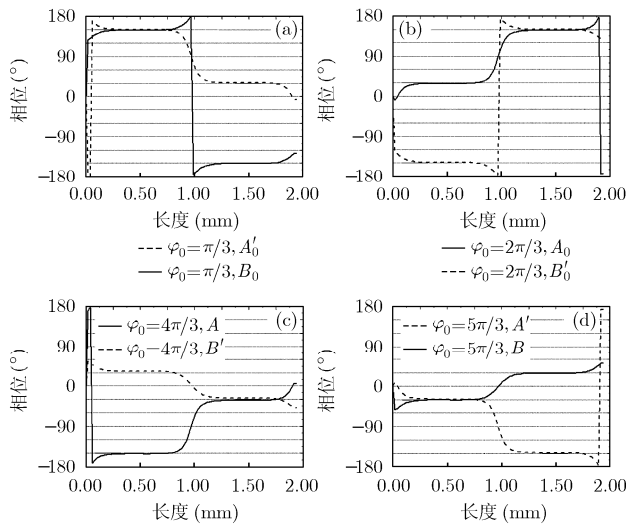


图5 $\varphi_0 = \pi/3, 2\pi/3, 4\pi/3, 5\pi/3$ 对应的沿轴线分布的体结构相位特性

可见各点对应的单腔相移, A_0, A 的为 $2\pi/3$, A'_0, A' 的为 $-2\pi/3$, B_0, B 的为 $\pi/3$, 而 B'_0, B' 的为 $-\pi/3$ 。曲线2上点的相移均为负,且不符合所设定的单腔相移,可初步判定其为伪解。

图5中 A 点单腔相移表现为 $2\pi/3$,而非所设的 $4\pi/3$,根据弗洛奎定理,周期慢波系统中轴向电场表示为

$$E_z(r, \theta, z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_{zn}(r, \theta) e^{-j\beta_n z} \quad (2)$$

其中 $\beta_n = \beta_0 + n\pi/L$ 。对于单一频点 ω_0 ,场分解为一系列的空间谐波,相移也必然是各次空间谐波相移的叠加,一般来说,基波的场最大,基波的相移居主导地位,表现出来的相移为基波的相移。故图5中 A 点求得的场解与 A_0 点求得的场解是完全一样的。

图6给出 A'_0 , A_0 及 A 点的轴线上轴向电场实部和虚部的分布图。可见除了相位不同外——与场的初相有关, A_0 与 A 两个相移点求得的场几乎一样。故 A 点的单腔相移仍表现为 $2\pi/3$, B 点的情况可以类推。另外, A'_0 和 A_0 对应的场

几乎完全吻合,进一步说明了 A'_0 为伪解。

假设图4中曲线2存在,则 A'_0 处所对应的 $n=0$ 次空间谐波分量必然占主导,则 A'_0 对应的相移应该是 $\pi/3$,而不是从图5中得到的 $2\pi/3$ 。曲线2上其他点类似,由此我们可以断定图4中的曲线2为伪解。

我们可以这样解释伪解产生的原因,图7给出正弦波电场的两个周期,当设定周期相移为 $2\pi/3$,即图中的 P 点,在模型左端面满足 O 点场条件,而在模型右端面满足 P 点场条件时,可认为周期相移为 $2\pi/3$,这对应于图5的 A_0 。而 O' 点场条件和 O 点场条件完全一样,则模型左端面为 O' 点场条件,而右端面仍为 P 点场条件时,完全满足准周期边界条件法所设定的边界条件,但周期相移却为 $-4\pi/3$,对应于图5的 A'_0 ,明显这是伪解,是准周期边界条件设定的不严格性带来的,同理可解释图4曲线2上的 B'_0, B', A' 均是伪解,应去除。

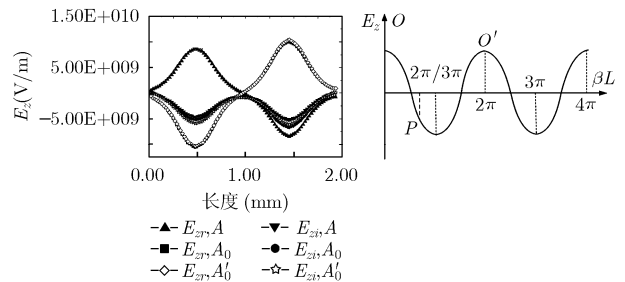


图6 图4中 A, A_0 及 A'_0 的轴线上轴向电场分布图

图7 正弦波电场相移示意图

3.2 能量法

由式(3)可知,轴线上轴向电场的总能量应等于轴向电场的各次空间谐波能量之和,即

$$\int_0^L |E_z|^2 dz = L \sum_{n=-\infty}^{\infty} |E_{zn}|^2 \quad (3)$$

假设图2(a)所给的色散特性是正确,则必然满足

$$\int_0^L |E_z|^2 dz > L \sum_{n=-3}^2 |E_{zn}|^2 \quad (4)$$

对图4中 A 点对应的轴向电场按上式计算可得

$$L \sum_{n=-1}^1 |E_{zn}|^2 = 3.12E16 < \int_0^L |E_z|^2 dz = 3.19E16 < L \sum_{n=-3}^2 |E_{zn}|^2 = 6.24E16 \quad (5)$$

其中左边求和区间指图3的 $n = -1, 0, 1$ 次空间谐波,即图4

中的 $n = -1, 1, -3$ 次空间谐波。可见上式右边出现了部分空间谐波分量能量之和大于总能量的矛盾, 说明图 4 中确实存在伪解, 且根据上一小节相移法的判断, 伪解就是曲线 2。在去除伪解后, 式(5)左边不等式表明结果很好地满足了式(4)所给的条件。

4 伪解的去除

在运用准周期边界条件法过程中, 有以下两种方法辨别并去除伪解:

(1)理论分析法: 对一些常用的耦合腔结构, 人们已经总结出其色散曲线, 一般来说, 耦合腔第 1 通带的基波为负色散, 第 2 通带基波为正色散^[4]。可以根据这些经验判断, 也可以根据等效电路得到的色散公式进行判断, 然后去除异常的色散曲线, 具体结构具体分析, 并没有通用的方法。

(2)相移法: 用准周期边界条件法计算出谐振频率后, 观察轴向电场的相位变化, 对于基波区间 $([0, \pi])$, 周期相位变化为所设定的周期相移为真解, 不符合的为伪解。而对于空间谐波区间, 同一频率点所对应的周期相移 φ 和基波相移 φ_0 应满足 $\varphi = 2n\pi \pm \varphi_0$ 的关系, 不符合的为伪解。该方法具有普遍性, 可应用于所有耦合腔结构。

5 应用算例

以表 1 所给的休斯型耦合腔结构为例^[5], 图 8 给出了去除伪解后的准周期边界条件法得到的色散特性曲线和耦合阻抗特性曲线, 由图可见与我们所熟悉的耦合腔色散特性很一致, 对应的 $n=-1$ 次空间谐波的色散及耦合阻抗与实测的结果吻合得很好, 实测结果是用谐振法求得的, 这很好地说明了准周期边界条件法的准确性。这个算例证明了, 去除伪解后, 准周期边界条件法能够成功地应用于耦合腔结构高频特性的研究。

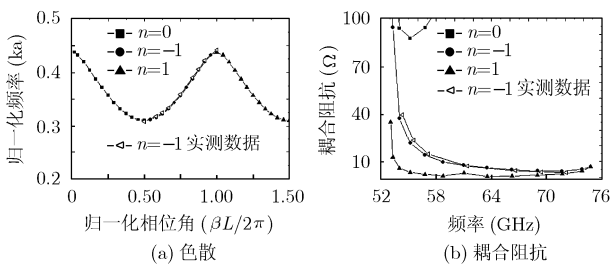


图 8 去除伪解后准周期边界条件法得到的色散特性和耦合阻抗特性

6 结束语

一直以来, 准周期边界条件法在耦合腔高频特性的研究中得不到有效的应用, 其原因就是本文所提出的该方法会出

现迷惑性很大的伪解。本文提出了准周期边界条件法在耦合腔高频特性研究中会出现的伪解, 并用相移法和能量法对伪解进行辨别, 初步探讨了产生伪解的原因, 最后提出了去除伪解的两种方法, 其中相移法具有普遍性。休斯型耦合腔的算例证明了去除伪解后, 准周期边界条件法能够成功应用于耦合腔慢波结构高频特性的研究。

前人的研究已证明准周期边界条件法求解的精度要高于谐振法, 本文的研究有助于加深对准周期边界条件法的理解, 为该方法在耦合腔慢波结构高频特性研究中的应用铺平了道路。

参考文献

- [1] 雷文强, 杨中海, 廖莉等. 螺旋慢波电路高频特性的三维计算模拟. 强激光与粒子束, 2002, 14(6): 892-896.
Lei W Q, Yang Z H, and Liao L, et al. Three-dimension computational simulation for high-frequency characteristic of helical slow-wave circuit. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(6): 892-896.
- [2] 韩博. 高效率螺旋线行波管慢波系统的研究. [硕士论文], 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
Han B. Research on helical slow-wave structures of high efficiency TWTs. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Science, 2006.
- [3] Kory C L and Wilson J D. Three-dimensional simulation of traveling-wave tube cold-test characteristics using MAFIA. NASA Technical Paper, 1995, 3515.
- [4] 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: 286-323.
Liu S G, Li H F, and Wang W X, et al. Introduction of Microwave Electronics. Beijing: National Defense Industry Press, 1985: 286-323.
- [5] 李实, 刘韦, 苏小保等. 耦合腔慢波结构冷测特性的计算方法. 强激光与粒子束, 2005, 17(8): 1149-1152.
Li S, Liu W, and Su X B, et al. Method of simulation on coupled cavity slow wave structure cold-test characteristic. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(8): 1149-1152.

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、大功率微波与信息对抗技术的研究。