

微波管中离子张弛振荡的混沌现象^{*}

巩华荣¹⁾ 宫玉彬¹⁾ 唐昌建²⁾ 王文祥¹⁾ 魏彦玉¹⁾ 黄民智¹⁾

¹⁾ 电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

²⁾ 四川大学应用物理学院, 成都 610051)

(2004 年 1 月 31 日收到, 2004 年 2 月 27 日收到修改稿)

微波管中离子张弛振荡引起的噪声对其工作性能有很大影响, 已成为微波管领域研究的焦点之一. 用包络方程描述电子束特性, 用离散的宏粒子模型描述离子特性, 在此基础上编写了一维粒子模拟程序, 对行波管与速调管模拟, 得到张弛振荡的时间序列. 将振荡看作是一个复杂非线性动力学系统的响应, 分析了离子张弛振荡时间序列的功率谱、重构相图及 Lyapunov 指数, 指出离子张弛振荡具有混沌性质, 为研究离子张弛振荡的控制与带有离子振荡噪声信号的处理提供了参考.

关键词: 张弛振荡, 粒子模拟, 微波管, 混沌

PACC: 5150, 6120J, 0545

1. 引言

微波管作为高功率微波源, 广泛应用于雷达、通讯与电子对抗领域, 但是和所有真空器件一样, 不可能工作于绝对的真空中, 电子束与管子中的残余气体碰撞产生的正离子与电子束互作用, 会产生张弛振荡, 这种振荡会调制到微波管载波上, 形成边带噪声, 极大地影响器件的工作性能. 从微波管发明之时, 离子张弛振荡产生的噪声就是影响管子性能的重要因素, 后来随着管子真空度的提高, 这一影响逐渐得到缓解, 但近来随着雷达探测灵敏度要求的提高和通讯系统数据传输速率的提高, 以及填充等离子体微波管的实用化, 离子张弛振荡重新引起了人们的关注, 成为微波管领域研究的焦点之一^[1-3].

早期对离子张弛振荡的研究大多采用解析的方法, 受求解能力的限制, 往往要做许多假设. 随着计算机技术的发展, 目前研究的主要方法是粒子模拟. Manheimer 等人采用混合一维模型^[2], 分析了影响离子张弛振荡的主要因素, 并提出抑制和降低离子张弛振荡的方法. Birdsall^[3]采用二维粒子模拟软件, 研究了离子张弛振荡形成的过程. 但是对离子张弛振荡行为本身的特性研究目前还很少. 本文采用 Manheimer 等人提出的混合一维模型^[1], 以速调管与

行波管这两种现代微波管的重要管种为研究对象, 计算出张弛振荡的时间序列, 对时间序列作功率谱、重构相图与最大 Lyapunov 指数分析, 发现离子张弛振荡具有混沌特性.

2. 张弛振荡产生原理及研究方法

在微波管设计中, 为了达到电子注的良好聚焦, 聚焦磁场往往远大于获得平衡电子束所需的布里渊聚焦磁场, 这样就会使电子束包络沿轴向产生脉动, 由于空间电荷效应, 电子束包络的脉动产生了沿轴向分布的静电势阱, 电子束电离残余气体产生的离子就会集聚在势阱中. 随着势阱中离子的增加, 势阱逐渐被填平, 电子束包络也会相应发生变化, 当正离子增加到一定程度, 电子束中的势阱会消失, 正离子沿轴线逃逸出势阱, 打向阴极或收集极, 然后再重新集聚、逃逸, 周而复始, 形成了离子的张弛振荡^[2]. 离子被势阱俘获, 逸出, 再俘获的过程中会改变沿轴线的电位, 使电子束的速度随时间发生变化, 这种影响将被调制到载波上, 使输出信号相位产生畸变, 形成噪声.

离子张弛振荡可看作是一复杂非线性系统的响应, 但这种振荡具有自律性. 由于电子束、电磁场、正离子的行为耦合在一起, 使用解析的方法研究这个

^{*} 霍英东基金(批准号 81007)和国家自然科学基金(批准号 60271001)资助的课题.

系统很困难,因此我们采用混合一维模型^[2]进行粒子模拟分析.在这个模型中,电子束由包络方程描述,离子看成是宏粒子,在一维方向(轴向)运动.二次电子被忽略,模拟过程可简要描述为:初始的沿轴向分布电位由电子束包络方程(无离子)的解确定,然后根据残余气体的种类(空气)和气压及电离率引入离子,离子自身产生的电位由泊松方程解得,离子运动由总电位产生的场决定,然后再求解含离子的电子束包络方程,求得新的沿轴向分布电位,再计算上次及此次产生的离子分布及其电位,依次类推,得到离子电量随时间变化的序列及其沿轴向的静电势阱.由于电子束包络产生的势阱远远小于管壁到轴线上的电势,而离子能量与势阱相当,这就保证了离子不会飞到管壁.

模拟计算中,离子被看成是一维的宏粒子,沿径向均匀分布在电子束分布区域,忽略其径向运动.电子束与残余气体碰撞表示为

$$\frac{dn_i}{dt} = \frac{\sigma_i}{e} J_b N_g, \quad (1)$$

其中 e 是电子电荷, σ_i 是电离截面, J_b 是电子束流密度, N_g 是中性气体密度.

离子与电子束是通过包络方程耦合的,如果是磁聚焦,包络方程可写为

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{\eta B^2}{8V} \left(1 - \frac{B_k^2}{B^2} \frac{r_k^4}{r^4} \right) r - \frac{I_b}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{2}\eta V^{3/2} r} + \frac{e\Delta_i}{4\pi\epsilon_0 m_e \eta V} = 0, \quad (2)$$

其中 η 为电子荷质比, B 为磁场, V 为电子束电压, ϵ_0 为真空介电常数, B_k 为阴极区磁场, r_k 为阴极工作半径, m_e 为电子质量, Δ_i 为离子电荷密度.

受空间电荷效应影响,沿轴向电位下垂由以下公式求得:

$$V_0(z) = V_{\text{wall}} - \left(1 + 2\ln\left(\frac{R_{\text{wall}}}{r(z)}\right) \right) \frac{I_b}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{2}\eta V} \quad (3)$$

其中 V_{wall} 为微波管管壁电压.

粒子的运动方程表示为

$$\frac{dp_z}{dt} = q \frac{d}{dz} [V_0(z) + \varphi_i(z)], \quad (4)$$

其中 p_z 为离子沿轴向运动的动量, q 为离子电荷, $\varphi_i(z)$ 为离子空间电荷位,求解离子空间电荷位的泊松方程为

$$\frac{d^2 \varphi(z)}{dz^2} = - \frac{\rho_i(z, t)}{\epsilon_0}, \quad (5)$$

ρ_i 为沿轴离子电荷密度.

在计算中,将离子电荷密度以 cloud-in-cell (CIC) 方式^[4]分配到相邻的计算网格点.在这个模型中,不含高频场,为了得到张弛振荡引起的相位噪声,可根据微波管小信号模型,得到相位畸变信息, Birdsall 与 Lao 均证明管内离子电量的变化与相位变化呈线性比例关系^[3-5],因此可用管内离子电量的变化表示离子张弛振荡噪声引起的相位变化.

3. 计算结果

我们应用上述混合模型,编制了粒子模拟程序,对一只速调管进行分析,主要参数^[1]如下:电压 17.5kV, 电流 3A, 平均束半径 1cm, 电子注与行波相互作用区长度 88cm, 为了减少计算量,只计算了 50cm, 阳极半径 1.25cm, 电子束入口半径 1cm. 磁场强度 $4 \times 10^{-2} \text{ T}$, 真空度为 $1.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$.

管内离子电量随时间的变化与时间序列的功率谱如图 1 和图 2 所示,图中只画了系统长时间运行后的部分时间序列.

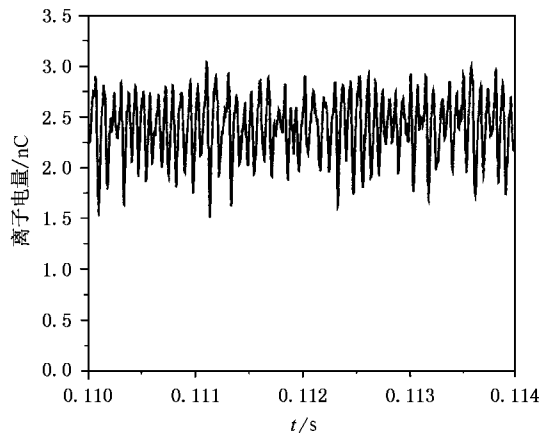


图 1 管内离子电量随时间的变化

由图可知,管内离子电量在一定范围内上下波动,但波动幅度变化很大,功率谱在 15kHz 处有一宽带峰,但无明显的线峰.进一步分析系统的动态特性与系统对初值的敏感性,我们对上述的系统响应作重构相图(赝相图,如图 3)与 Lyapunov 指数谱(图 4)^[6].

重构相图为奇异吸引子,为在某一特定区域内具有一定分布形式的点,并且最大 Lyapunov 指数为正,因此可以判定上述过程具有混沌行为,离子张弛振荡是一个混沌序列^[7].

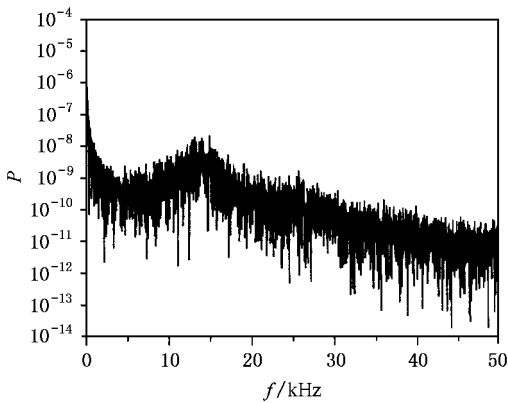


图 2 管内离子电量随时间的变化的功率谱

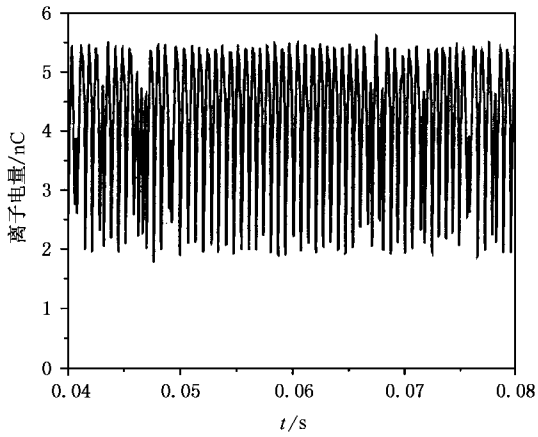


图 5 管内离子电量随时间的变化

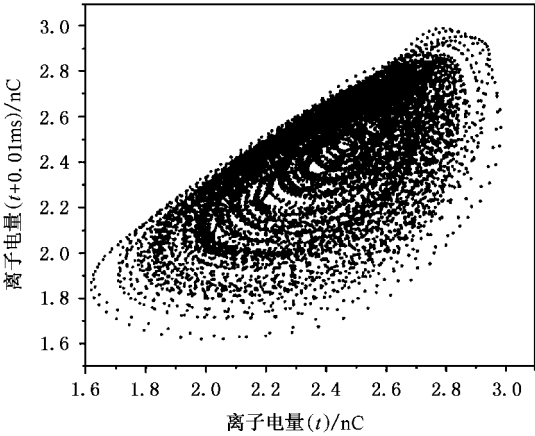


图 3 管内离子电量随时间变化的重构相图

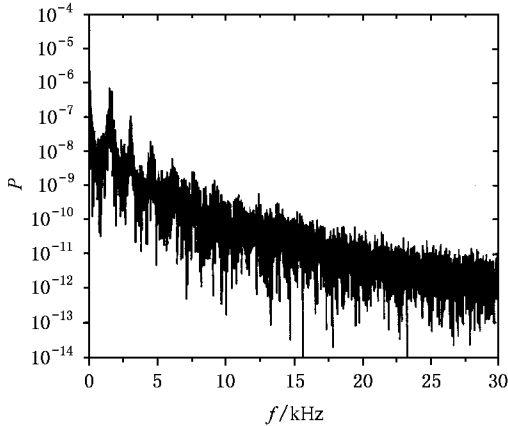


图 6 管内离子电量随时间变化的功率谱

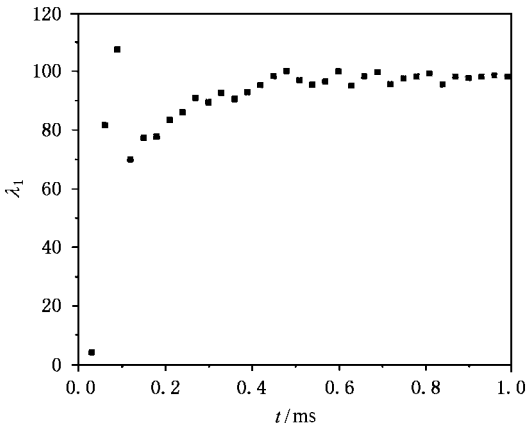


图 4 管内离子电量随时间变化重构相图的最大 Lyapunov 指数谱

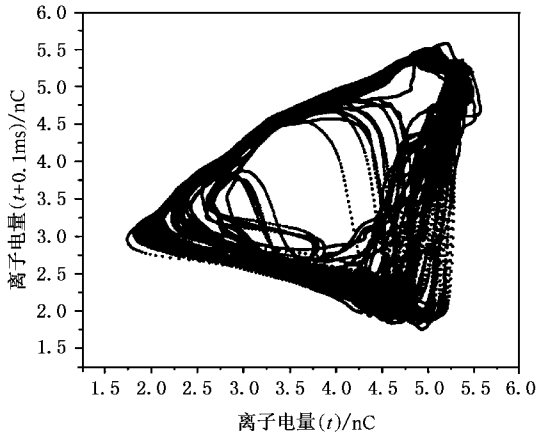


图 7 管内离子电量随时间变化的重构相图

对另一管种耦合腔行波管进行分析,管子主要参数如下:电压 20.5kV,电流 2.86A,平均束半径 0.14cm,磁场 0.263T,电子注与行波相互作用区长度 14cm,阳极半径 0.254cm,电子束入口半径 0.14cm.

下面是管内离子随时间变化的图与功率谱(图 5 和图 6).

管内的离子电量波动也是在一定范围内上下波动,但是除偶尔隔一段时间有波动幅度的跳变外,波动有一定的周期.功率谱也显示有一主频及其一系

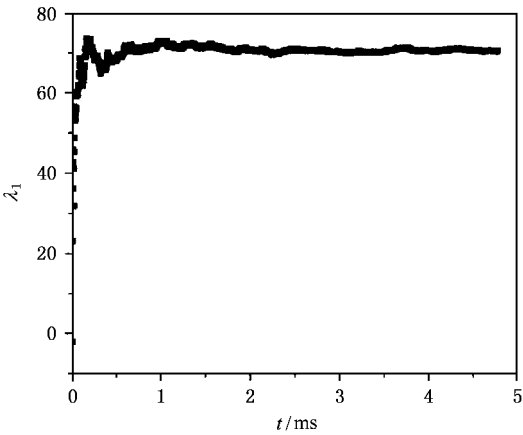


图 8 管内离子电量随时间变化重构相图的最大 Lyapunov 指数谱

列谐波,但主频不是线峰,仍有一定带宽,说明振荡的周期不是精确固定值,而是有一定的波动,下面是上述时间序列重构相图(图 7)与最大 Lyapunov 指数谱(图 8)。

重构相图为分布在相平面上具有一定结构的离散点, Lyapunov 指数为正,结合时间序列图,我们认为这个振荡过程具有较弱的间歇混沌特性^[8]。

对于离子张弛振荡产生混沌现象的原因,我们认为应归结于系统的耗散性。离子张弛振荡是个开放的结构,离子由电子束碰撞始终不断的产生,进入系统,且带入一定的能量;不断的流向阴极或收集极,离开系统,能量随之带走。用于描述电子束包络形状的方程中,离子电荷密度在时间和空间的分布都不是常数,方程是非线性的,空间电位的变化也是非线性的。系统在随时间演化过程中,系统与外界存在物质和能量的交换,且没有相对稳定的平衡态,加之存在非线性互作用,因此张弛振荡产生的系统具有耗散性,而混沌在耗散系统中是普遍存在的^[9]。

4. 结 论

本文将离子张弛振荡看作是一个含激励源(离子定量连续产生)的复杂非线性系统的响应,用粒子模拟的方法,得到微波管离子张弛振荡的时间序列,对张弛振荡随时间变化的曲线作了分析,指出离子张弛振荡具有混沌性质,产生离子张弛振荡的系统是个不稳定系统。为研究离子张弛振荡噪声的控制与带有离子噪声信号的处理提供了参考。

[1] Manheimer W M 2001 *Physics of Plasmas* **8** 297

[2] Manheimer W M 1999 *IEEE Transactions on Plasma Science* **27** 1146

[3] Birdsall C K 1998 *Simulation of Low Frequency Noise in a CCTWT*

[4] Lao Y Y , Chernin D P and Manheimer W M 2000 *IEEE Transactions on Plasma Science* **28** 790

[5] Hockney R W and Eastwood J W 1980 *Computer simulation using particles*(Polytechnic of UK : Adam Hilger , Bristol and Philadelphia) p44

[6] Park T S and Chua L O 1989 *Practical numerical algorithms for chaotic systems*(New York : Springer-Verlag) p80

[7] Hao J H , Ding W and Zhang Z C 2003 *Acta Phys . Sin .* **52** 1979(in Chinese) [郝建红、丁 武、张治畴 **52** 2003 物理学报 **52** 1979]

[8] Guan X P *et al* 2003 *Acta Phys . Sin .* **52** 2718(in Chinese) [关新平等 2003 物理学报 **52** 2718]

[9] Li W *et al* 2001 *Acta Phys . Sin .* **50** 1862 (in Chinese) [李 伟等 2001 物理学报 **50** 1862]

The chaotic character of ion relaxation oscillation in microwave Tubes^{*}

Gong Hua-Rong¹⁾ Gong Yu-Bin¹⁾ Tang Chang-Jian²⁾ Wang Wen-Xiang¹⁾ Wei Yan-Yu¹⁾ Huang Min-Zhi¹⁾

¹⁾(College of Physical Electronics , University of Electronic Science and Technology of China , Chengdu 610054 ,China)

²⁾(College of Applied Physics , Sichuan University , Chengdu 610051 ,China)

(Received 31 January 2004 ; revised manuscript received 27 February 2004)

Abstract

The noise caused by ion relaxation oscillation becomes a research focus in the field of microwave tubes recently because of the improvement of radars and communications requirements. In this paper , electron beam is described by beam envelope equation , and ions generated from ionization of the background gas in microwave tubes are treated as discrete macro-particles. One dimensional Particle-in-Cell (PIC) simulation code was developed , and time series of ion relaxation oscillation are obtained by using the presented method. The ion relaxation oscillation is treated as the response of a complex nonlinear dynamical system , and the time series is analyzed by the power spectrum ; the phase diagram and Lyapunov exponent are restructured. From the analysis results we find that the ion relaxation oscillation has a chaotic character. The reason of chaos was attributed to the dissipative Structure of the system. This would be useful for depressing relaxation oscillation and processing signals with relaxation oscillation noise.

Keywords : relaxation oscillation , particle-in-cell , microwave tube , chaos

PACC : 5150 , 6120J , 0545

^{*} Project supported by Fok Ying-Tong Education Foundation , China (Grant No. 81007) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60271001).