

文章编号: 1001-4322(2004)04-0493-03

热阴极微波电子枪功率自洽过程分析*

杨兴繁, 刘锡三, 卢和平, 程 云

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所,四川 绵阳 621900)

摘 要: 用等效电路法分析了热阴极微波电子枪的功率自洽过程,给出了微波功率、无载耦合度、束流负载、加速腔参数之间的解析关系式和最佳耦合度的计算公式,阐明了无载耦合度与有载耦合度的关系,分析了枪宏脉冲内微波耦合状态的变化过程,并与实验结果进行了对比,对高占空因子热阴极微波电子枪调束实验中微波反射波形发生较大变化的实验现象进行了分析。

关键词: 微波耦合; 最佳耦合度; 等效电路法; 高占空因子

中图分类号: TL503 文献标识码: A

加速器设计中,微波功率耦合是需要仔细考虑的物理过程,通过对这一过程的分析,可以指导我们计算最佳耦合度,提高微波功率的利用效率。对于热阴极微波电子枪,尤其在高占空因子工作情况下,束流负载重,而且存在较严重的电子反轰现象^[1],电子反轰使束流负载不断变化,这使得微波功率的耦合状态随之改变,因此热阴极微波电子枪的功率耦合过程较为复杂。

1 微波功率耦合过程分析

射频加速器主要由微波源、环行器、传输波导、微波耦合结构、加速腔等几部分组成,当束负载存在时,将负载电流等效成恒流源。激励源—波导—耦合器—加速腔—束负载的等效电路如图 1 所示^[2]:图中, i_g 是微波源等效的恒流源, Z_0 为传输波导阻抗,加速腔等效成 C, R_c 和 L 并联电路,微波耦合孔相当于一个变比为 $1:n$ 的变压器, i_b 为负载电流的等效恒流源。通常所称波导与腔之间的耦合度是在无束流情况下定义的,称为无载耦合度 c 。

$$c = P_{ex} / P_c = Q_0 / Q_{ex} \quad (1)$$

式中: P_{ex} 为加速腔之外消耗的功率; P_c 为腔壁损耗; Q_0 为腔的固有品质因数; Q_{ex} 为外回路的品质因数。

在有束流负载情况下,我们按同样的方式来定义有载耦合度

$$L = Q_0 / Q_{ex} \quad (2)$$

式中: Q_0 为有束流负载时腔的品质因数, $Q_0 = \omega U / (P_b + P_c)$, P_b 为束流功率。于是

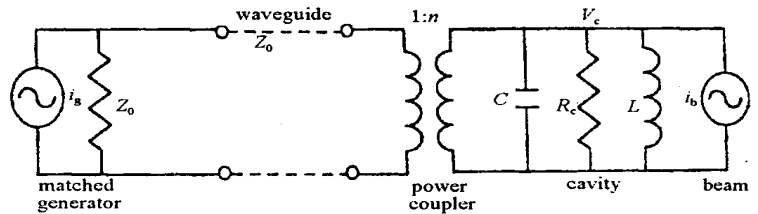


Fig. 1 Equivalent circuit of RF system

图 1 加速器系统等效电路图

$$L = \omega U / (1 + P_b / P_c) \quad (3)$$

公式表明:如果要使有束流情况的 $L = 1$,以实现最佳耦合,使全部微波功率进入腔内,无载耦合度必须满足

$$Q_0 = 1 + P_b / P_c \quad (4)$$

此时, Q_0 称为最佳耦合度,其物理含义是当腔壁损耗为 P_c ,束流功率为 P_b 时, $L = 1$,微波功率不会出现反射现象,全部被束流和腔壁吸收了。因此无束流状态下,把加速管耦合度调整为 Q_0 ,这样,在有束流负载时就可以实现 $L = 1$,达到微波功率利用率最高。

实际设计加速腔时,根据(4)式设计耦合度。加速腔一旦加工完成后,无载耦合度就确定了。最佳耦合度的计算是在假设一定的微波源功率和束流强度下得到的,但实际实验条件常常由于微波源或束流的原因, P_b 或 P_c 不等于预先设定值。微波的进腔功率将由实际实验条件决定,进腔功率在束流功率和腔壁消耗功率之

* 收稿日期:2003-06-26; 修订日期:2003-10-13

基金项目:国家 863 计划项目资助课题

作者简介:杨兴繁(1969—),男,博士,副研究员,主要从事加速器物理研究,绵阳 919 信箱 1014 分箱。

间分配,而且加速腔的腔壁损耗功率决定了加速腔中能够建立起来的场强。微波进腔功率、束流功率、腔壁损耗功率、加速腔中的场强在加速腔参数确定后,是一个自洽的分配过程,对这个过程的分析将有助于指导 RF-gun 的设计与调试。

设实际微波源功率为 P_g ,无载时传输波导与加速腔之间的耦合度为 c ,加速腔的有效分路阻抗为 R_a ,为简便起见下面只分析电子处于最大加速相位 $\theta = 0$ 的情况, $\theta = 0$ 的分析方法相同,它们满足关系式^[2]

$$P_g = [(1 + c)^2/4c](V_c + V_{br})^2/R_a \tag{5}$$

式中: V_c 为加速腔上的电压; V_{br} 为谐振时的束感应电压。

平衡状态,进腔功率 P_{in} 等于束流功率 P_b 与腔壁损耗功率 P_c 之和,可得到

$$P_{in} = P_c + P_b = P_c + IV_c, \quad P_c = V_c/R_a \tag{6}$$

由方程(6)解出

$$V_c = [-IR_a + \sqrt{(IR_a)^2 + 4P_{in}R_a}]/2 \tag{7}$$

将(7)式代入(5)式得到微波源功率、进腔功率、耦合度、束流强度、加速腔有效分路阻抗之间满足的解析表达式

$$\frac{4P_g c R_a}{(1 + c)^2} = \left[\frac{-IR_a + \sqrt{(IR_a)^2 + 4P_{in}R_a}}{2} + \frac{IR_a}{1 + c} \right]^2 \tag{8}$$

$$P_{in} = P_c + P_b = P_0(\bar{E}/E_0)^2 + I\bar{E}I \tag{9}$$

式中: P_0 为加速腔中轴向平均场强等于 1MV/m 时加速腔壁上的功率损耗; \bar{E} 为实际加速腔轴上平均场强; $E_0 = 1MV/m$ 。(5)~(9)式描述了加速腔功率的自洽关系,当其中某一参数值改变时,其它参量的数值相应改变。在实际实验条件下,加速腔参数、无载耦合度 c 、微波源功率是一定的,在这种条件下,从公式(8)可以得到进腔功率与束流之间的解析关系式

$$P_{in} = \frac{4cP_g + 8\frac{2}{c}P_g + 4\frac{3}{c}P_g + 2(-1 + c)\sqrt{c(1 + c)^2I\sqrt{P_g}\sqrt{R_a} - cI^2R_a - 2\frac{2}{c}I^2R_a - \frac{3}{c}I^2R_a}}{1 + 4c + 6\frac{2}{c} + 4\frac{3}{c} + \frac{4}{c}} \tag{10}$$

根据(10)式,在微波源功率 3MW,加速腔有效分路阻抗 8M Ω ,无载耦合度 $c = 5.24$ 条件下,进腔功率与束流的关系如图 2 所示。从图 2 可以看到,不同的束流决定了不同的进腔功率:无束流负载时,进腔功率为 1.61×10^6W 。随着负载加重,进腔功率增加。在束流约等于 1.15A 时,进腔功率达到最大。接着随着负载加重,进腔功率减小。图 2 描绘了微波耦合的三种状态,即欠耦合、临界耦合和过耦合。

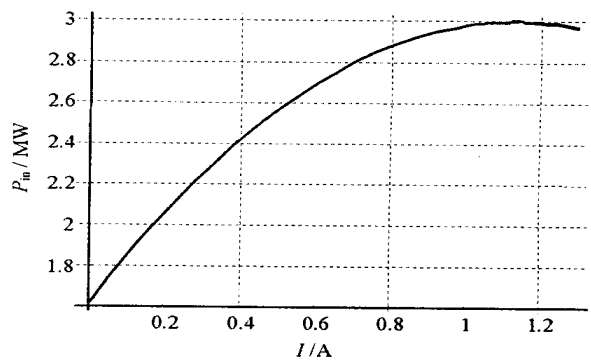


Fig. 2 Relation of input power and beam current

图 2 进腔功率与束流关系曲线

2 微波电子枪功率自洽过程

与普通高压注入型电子枪相比,电子反轰较为严重,电子反轰使阴极加热功率增加,束流负载有较大变化,在每个宏脉冲内,微波耦合可能经历欠耦合、临界耦合和过耦合三个阶段。

阴极电子发射密度满足 Richardson 公式^[3]

$$J_0 = AT^2 \exp(-e\phi/kT) \tag{11}$$

式中: J_0 是热阴极电流密度(A/cm²); A 是 Richardson 常数,对于 LaB₆ 阴极 $A = 29A/(cm^2 \cdot K^2)$; $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K 是 Boltzman 常数; T 为阴极热力学温度; ϕ 是逸出功($\phi = 2.6eV$)。

每个宏脉冲是由许多微脉冲组成的,微脉冲的数目由宏脉冲的长度和微波工作频率决定。每个微脉冲内都有电子反轰,宏脉冲内阴极的温度升高是微脉冲电子反轰叠加的结果,因此宏脉冲电子束波形会出现斜升,此时 Richardson 公式可以表示为

$$J_0 = A(T + T/n)^2 \exp\{-e\phi/[k(T + T/n)]\} \tag{12}$$

宏脉冲内的温升为 T ; n 表示宏脉冲内的微脉冲数目,它由宏脉冲的长度决定,我们的加速器宏脉冲长度为 5 μs 。流强为

$$I = r^2 J \tag{13}$$

r 为阴极半径。加速腔内功率自洽满足方程 (10), 结合 (13) 式, 计算宏脉冲内进腔功率 P_{in} 变化情况, 计算条件为微波源功率 3MW, 加速腔有效分路阻抗 20M, 无载耦合度 $c = 5.24$, $r = 0.25\text{cm}$, 阴极温度 1750K, 当 $T =$

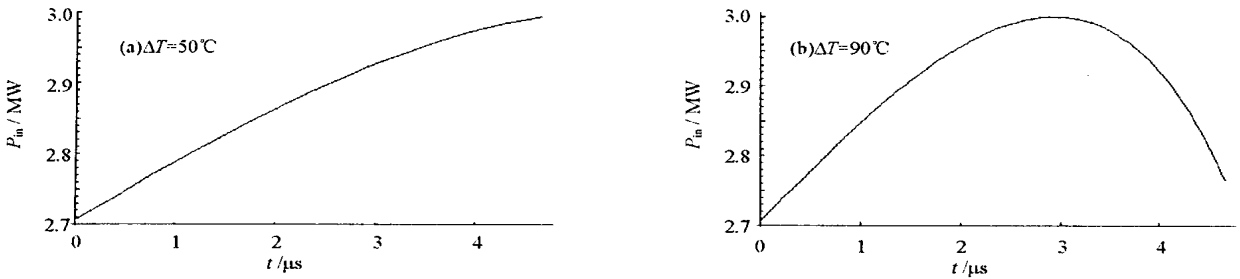


Fig. 3 Variance of calculated input power during macropulse

图 3 宏脉冲内进腔功率变化曲线

50 时, 计算结果如图 3(a) 所示。从图 3(a) 可以看出, 当宏脉冲重复频率较低, 反轰电子的功率使阴极的平均温升较小时, 加速腔可工作在欠耦合或临界耦合状态。宏脉冲重复频率较高时, 宏脉冲内温度升高较大, 当达到 90 时, 进腔功率如图 3(b) 所示。从图 4 看出, 宏脉冲内进腔功率将经过增加, 到达最大, 再减少的过程, 微波耦合经历欠耦合、临界耦合和过耦合三个阶段。实验过程中, 随着宏脉冲频率的提高, 电子反轰效应增强, 观察到的微波耦合波形如图 4 所示, 与理论分析结果吻合。

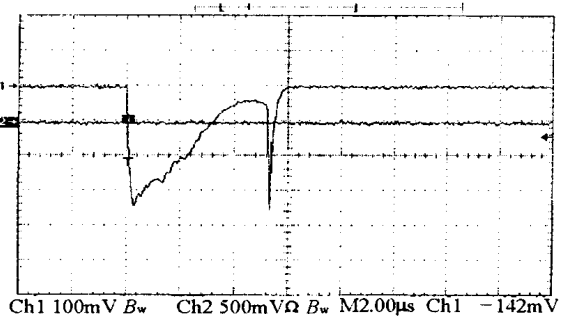


Fig. 4 Variance of measured input power during macropulse

图 4 实测宏脉冲内微波耦合曲线

3 分析讨论

通过上面的分析可以看到在每个宏脉冲内微波耦合可能经历欠耦合、临界耦合、过耦合三个阶段, 微波反射波形和束流波形可能发生畸变。热阴极微波电子枪调试实验过程中, 我们逐渐增加宏脉冲的重复频率, 同时降低电子枪灯丝的功率, 最高重复频率达到 200Hz, 并实现了完全利用反轰功率加热阴极^[4]。随着宏脉冲重复频率由低到高, 微波反射波形会发生剧烈变化, 说明微波耦合状态发生着变化, 这验证了上面的理论分析。实验过程中, 可以根据微波反射波形判断微波耦合状态。

参考文献:

- [1] 许州, 胡克松, 刘锡三, 等. 热阴极微波电子枪反轰现象研究[J]. 强激光与粒子束, 1996, 8(3): 383—386. (Xu Z, Hu K S, Liu X S, et al. Research on back bombardment of electrons in thermionic RF-gun. *High Power Laser and Particle Beams*, 1996, 8(3): 383—386)
- [2] Thomas P Wangler. Principles of RF linear accelerators[M]. A Wiley-Interscience Publication, 1998.
- [3] Martin Reiser. Theory and design of charged particle beams[M]. A Wiley-Interscience Publication, 1994.
- [4] 杨兴繁, 许州, 刘锡三, 等. 高工作比热阴极微波电子枪调试出束[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(6): 741—744. (Yang X F, Xu Z, Liu X S, et al. Commissioning of a thermionic cathode microwave electron gun with high duty factor. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(6): 741—744)

Consistent theory of microwave power in RF-gun

YANG Xing-fan, LIU Xi-san, LU He-ping, CHENG Yun

(Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1014, Mianyang 621900, China)

Abstract: The consistent theory of microwave power coupling and the optimism coupling factor are analyzed in detail by equivalent circuit method in this paper. The relationship among the microwave power, coupling factor, beam loading and parameters of the accelerating cavity is presented with analytical formula. The microwave coupling progress during the macropulse of thermionic cathode RF-gun is discussed and the explanation of experimental phenomena such as the deformation of microwave coupling mode is given.

Key words: Microwave power coupling; Optimism coupling factor; Equivalent circuit method; High duty factor