

场分析法——计算速调管输出回路特性参数的一种新方法

王进华^{①②} 丁耀根^① 王树忠^① 耿志辉^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 该文结合三维电磁场模拟计算软件 ISFEL3D, 以电磁场分量为研究对象, 通过适当的假设和简单等效, 提出了计算速调管输出回路特性参数的场分析法。经理论分析和举例计算表明, 场分析法在速调管输出回路计算和设计中可提供间隙阻抗、耦合度、输出腔效率、谐振点及特性阻抗等特性参数。冷测结果与计算结果在趋势上吻合较好, 初步验证了场分析法的可靠性。

关键词 速调管, 场分析法, 输出回路, 间隙阻抗, 耦合度, 输出腔效率

中图分类号: TN122

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)12-2402-03

Field Analysis Method—A New Method for Calculating the Characteristic Parameters of the Output Circuit in the Klystron

Wang Jin-hua^{①②} Ding Yao-gen^① Wang Shu-zhong^① Geng Zhi-hui^①

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

^②(Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract In this paper, the field analysis method for calculating the characteristic parameters of the output circuit in the klystron is presented. The electromagnetic component under proper assumptions and the simple equivalence is studied by three-dimension electromagnetic simulation software ISFEL3D. The theoretical analysis and the calculation show that the field analysis method can provide the calculation of characteristic parameters such as gap-impedance, coupling degree, efficiency of output cavity, resonance frequency, characteristic impedance and so on in the output circuit of the klystron. The coincidence between the cold test data and the calculation result to a certain extent preliminarily verified the reliability of the field analysis method.

Key words Klystron, Field analysis method, Output circuit, Gap-impedance, Coupling degree, Efficiency of output cavity

1 引言

速调管输出回路的设计是速调管整管设计中的重要部分。为了缩短设计周期和节省加工经费, 广泛使用了软件模拟计算, 这要求选择适当的计算模型, 以便于在计算机中应用。传统的计算模型是将输出腔等效为一个并联 LC 回路, 将耦合机构等效为一个理想变压器。这种模型的弊端在于: (1) 将分布参数的微波器件等效为集中参数的 LC 回路, 本身就是一种近似方法, 不能全面考虑输出回路中的具体场形分布。实际上谐振腔与其他附属结构耦合(如加载耦合谐振腔等)后, 振荡场不局限于谐振腔内部。(2) 对于高次模和具有复杂耦合结构的输出回路, 由于具有多个场分布集中区, 在较宽计算频带内很难用固定的等效回路进行建模。鉴于以上两点原因, 传统计算方法比较适合应用于结构简单的基模输出回路, 且限于在较小的频带内计算, 以保证等效回路的单一性和准确性。

目前, 基于上述传统模型的计算速调管输出回路的方法有^[1-3]: 反射相位法和等效间隙阻抗法等。这两种方法已经得

到了很好的应用。但是在发展高次模腔体和各种复杂腔体输出回路的时候, 前一种方法在外观品质因数较大时经常失效^[1]。后一种方法适用面广, 但需要进行比较复杂的等效^[1], 难度较大。为了适应速调管输出回路的发展, 配合输出回路的设计和加工, 使能够在各种结构、各种模式和各种耦合条件下得到特性参数, 迫切需要新的、更加有效的模拟计算手段出现^[4]。本文的场分析法就是为解决此问题而提出。文中计算均基于俄罗斯三维电磁场模拟计算软件 ISFEL3D。

2 场分析法基本理论

由于计算过程中总是涉及对场量的提取和计算, 故将此方法命名为“场分析法”。使用 ISFEL3D 对输出腔扫频计算后, 对每个频率点做如下后处理。

由电磁场理论可知, 在输出波导中的平均输出功率为

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\iint_p \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \cdot d\mathbf{S} \right] \quad (1a)$$

当输出波导为矩形波导时, 式(1)化为

$$P_e = \frac{1}{2Z_{TE_{10}}} \iint_p (\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^*) dS \quad (1b)$$

式(1b)中的 $Z_{\text{TE}_{10}} = 120\pi / \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}$ 是矩形波导 TE_{10} 模的波阻抗, a 是矩形波导宽边长度。当输出波导为同轴线波导时, 式(1a)化为

$$P_e = \left(\iint_p (\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^*) dS \right) / (2Z_{\text{TEM}}) \quad (1c)$$

式(1c)中的 $Z_{\text{TEM}} = (\eta_0/\epsilon_0)^{1/2}$ 是同轴线波导的 TEM 模的波阻抗。由式(1b)和式(1c)可知, 只要找到波导中电场极大值(电场的幅值)处的平面 p , 即可以在此平面上应用式(1b)和式(1c), 求得平均输出功率, 而在 ISFEL3D 后处理部分中很容易找到电场极大值平面, 故 P_e 可求。

在漂移管间隙处, 假设调制电子注为恒流源, 通过一个间隙阻抗, 将能量转换到谐振腔, 忽略腔壁损耗, 能量全部馈出。根据下式求得其间隙阻抗实部:

$$R^* = V^2 / 2P_e \quad (2)$$

这里 P_e 为输出功率, 由式(1)给出; 而 V 为等效电压之幅值, 定义为

$$V = \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (3)$$

式(3)中 $\mathbf{E}$ 为积分路径 ab 上的高频电场幅值, 通常在速调管中选取电子注通过的路径作为线积分的路径。

由电磁场理论, 谐振腔内总能量 W 为电场能量平均值和磁场能量平均值之和。由软件计算出电场和磁场的幅值, 可得到电场和磁场能量的最大值, 再分别乘以 1/2 得到它们的平均值, 将二者相加, 即得谐振腔内总能量 W

$$W = W_e + W_m = \iiint_V \left(\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \epsilon_0 (\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^*) + \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \mu_0 (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^*) \right) dV \quad (4)$$

根据谐振的定义, 当单位输入功率下的腔内储能 W/P_e 出现极大值时, 判定为发生谐振。

对谐振腔内壁计算以下面积分, 求得谐振腔内壁损耗的平均功率:

$$P_c = \frac{1}{2} R_s \iint_S \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^* dS \quad (5)$$

其中 R_s 是铜的表面电阻率 $R_s = (\pi f \mu_0 / \sigma)^{1/2}$, f 为频率, σ 为铜电导率。损耗功率是腔体的重要参数, 但由于影响其大小的因素多且复杂, 对它的计算一般只是数量级的估算。ISFEL3D 是以理想的铜表面来计算, 计算结果偏小。但是结合实际的经验^[5], 经简单修正, 仍可很好地和实际相符。本文采用文献[6]中的修正方法, 即将式(5)的计算损耗增加一倍, 下文均使用此类修正后的结果。

由式(1)和式(5)可得谐振腔与输出波导的耦合度为

$$\beta = P_e / P_c \quad (6)$$

输出腔效率为

$$\eta_c = P_e / (P_e + P_c) = \beta / (1 + \beta) \quad (7)$$

由以上计算, 还可求得固有品质因数 Q_0 , 外观品质因数 Q_e 和间隙特性阻抗 R/Q 等参数, 本文不再赘述。

由上可知, 场分析法的优点在于:

(1) 在 ISFEL3D 中的场积分模块中可以选择任意的积分区域, 所以各场量积分的提取不受限制, 计算的灵活性强。

(2) 计算中不涉及整个谐振系统的等效并联 LC 回路问题, 巧妙避开了引言中提到的传统计算模型的弊端, 计算频带的宽度不受限制。

3 场分析法计算示例

为进一步阐述场分析法, 下面用此方法计算一个带有矩形均匀波导的 C 波段大功率速调管加载滤波器输出腔的输出特性。扫频计算的中间结果见表 1, 最终计算结果见图 1, 计算过程略。

表 1 场分析法计算中间结果
Tab.1 Intermediate results of field analysis method

$f(\text{MHz})$	$R_s(\Omega/\text{m})$	$W(\text{J})$	$P_e(\text{W})$	$P_c(\text{W})$	$V(\text{V})$
5540	0.0194187	2.52E-16	4.06E-07	2.50E-09	3.94E-02
5550	0.0194362	2.86E-16	3.89E-07	2.79E-09	4.21E-02
5560	0.0194537	3.33E-16	3.85E-07	3.20E-09	4.56E-02
5570	0.0194712	4.00E-16	4.06E-07	3.79E-09	5.02E-02
5580	0.0194887	5.01E-16	4.45E-07	4.69E-09	5.64E-02
5590	0.0195062	6.60E-16	5.17E-07	6.10E-09	6.49E-02
5600	0.0195236	9.32E-16	6.77E-07	8.52E-09	7.74E-02
5610	0.019541	1.45E-15	9.99E-07	1.32E-08	9.71E-02
5620	0.0195584	2.68E-15	1.80E-06	2.41E-08	1.32E-01
5630	0.0195758	6.87E-15	4.73E-06	6.13E-08	2.12E-01
5640	0.0195932	4.91E-14	3.62E-05	4.36E-07	5.69E-01
5650	0.0196106	9.07E-14	7.41E-05	8.02E-07	7.76E-01
5660	0.0196279	7.68E-15	7.14E-06	6.78E-08	2.26E-01
5670	0.0196452	2.57E-15	2.82E-06	2.27E-08	1.31E-01
5680	0.0196626	1.26E-15	1.60E-06	1.11E-08	9.19E-02
5690	0.0196799	7.37E-16	1.09E-06	6.55E-09	7.05E-02
5700	0.0196971	4.82E-16	8.47E-07	4.31E-09	5.70E-02

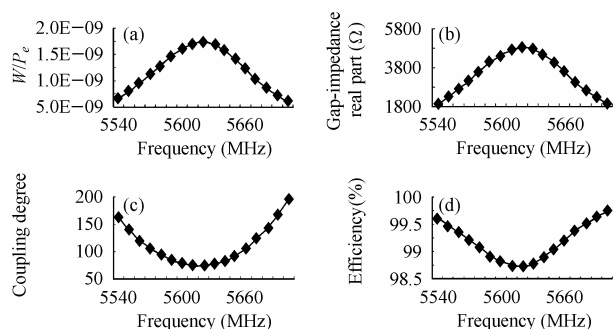


图1 滤波器加载输出腔各主要特性参数的频率特性曲线图
(a)输出腔内能量比的频率特性 (b)输出腔间隙阻抗实部频率特性
(c)输出腔与波导耦合度的频率特性 (d)输出腔效率的频率特性

Fig.1 Frequency characteristic of main parameters in the output cavity with loaded filter

- (a) Frequency characteristic of W/P_e
(b) Frequency characteristic of Gap-impedance real part
(c) Frequency characteristic of coupling degree
(d) Frequency characteristic of efficiency

从图1(a)可以看出,在频率为5620MHz的位置输出腔内能量比最大,故此处为谐振点。根据外观品质因数的能量定义式和图1(a),求得外观品质因数为 $Q_e = \omega_0 W/P_e = 53.36$ 。

图1(b)为输出腔间隙阻抗实部的频率特性曲线,从图1(b)中可以看到,恰好在谐振点处间隙阻抗实部达到极大值 $R_0^* = 4859.978 \Omega$ 。将电子注等效为恒流源,由式(2)可知,间隙阻抗实部与输出功率成正比。故图1(b)中谐振点处的间隙阻抗实部 R_0^* 对应于最大输出功率点,而间隙阻抗实部最大值一半 $R_0^*/2$ 处的两个频率点对应于两个半输出功率点,由此即可以求出半功率带宽 $\Delta f = 130\text{MHz}$ 和外观品质因数 $Q_e = f_0/\Delta f = 5620/130 = 43.23$ 。此外外观品质因数与上面计算的有差异,这是由于外观品质因数的定义源于集中参数LC回路的引申。由引言可知,谐振腔开耦合口后,并非严格符合集中参数LC回路,所以两种计算结果存在差异。从实际应用的角度考虑,取图1(b)计算出的 $Q_e = 43.23$ 更能反映带宽特性,而由图1(a)计算出的 $Q_e = 53.36$ 则侧重于反映能量耦合程度。

由图1(c)可知,在谐振点处的耦合度有最小值 $\beta = 74.7$,整个计算频带内耦合度都远大于1,故为强耦合输出回路。图1(d)为输出腔效率 η_c 的频率特性,从图1(d)中可看出,在整个计算频带内 η_c 均大于98%。

从图1的4幅图中可以看到各参数在谐振点处都出现极值,亦即所列参数均具有明显的频率响应特性。

4 冷测结果与场分析法计算结果对比

为验证这种模拟计算方法的可靠性,加工测试了一个输出腔的间隙阻抗频率特性,并将计算结果与冷测结果作比较。具体冷测数据见图2。由图2可见,在频率等于5620MHz时,间隙阻抗虚部(与横轴相交的曲线)为零,故输出腔冷测谐振点也为5620MHz,验证了计算结果。其谐振点处间隙阻抗实部为4148.53 Ω ,比计算结果偏低。

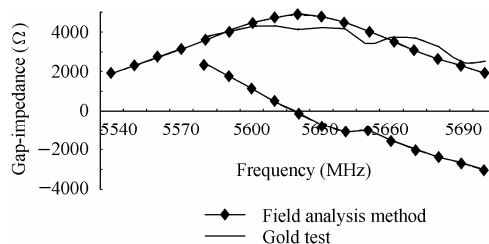


图2 滤波器加载输出腔的间隙阻抗的频率特性曲线对比图

Fig.2 Frequency characteristic contrast of gap-impedance in the output cavity with loaded filter

从图2还可以看到,间隙阻抗实部计算曲线与冷测结果曲线总体趋势比较吻合,冷测曲线围绕计算曲线波动。计算结果与冷测结果存在差异是必然的,这主要有两个原因:(1)场分析法计算值是纯粹的理论值,有必要根据实际情况进行修正。(2)冷测存在误差,其中包括加工和测试误差等。

5 结束语

经过理论分析、举例计算和冷测验证表明,场分析法能够比较准确、全面地计算出各种速调管输出回路的间隙阻抗实部、耦合度、输出腔效率和谐振点等特性参数。场分析法利用一系列最原始的定义和公式,以各种场量为研究对象,对电磁场进行严格的分析,可信度高,适用面广。

目前,场分析法还处在起步探索阶段,下一步的主要工作是研究输出间隙阻抗虚部的计算方法。

参考文献

- [1] 林福民. 大功率宽带多注速调管输出段的研究, [博士论文], 中国科学院电子学研究所, 2003.5, 第三章.
- [2] Silaev S. Isoparametric finite element analysis of time-harmonic electromagnetic fields in three-dimensions. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., 1993, A328: 535-541.
- [3] Silaev S. Computer simulation of electromagnetic fields in the Tritron cavities. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., 1994, A342: 348-352.
- [4] 丁耀根, 朱允淑. 宽带速调管滤波器型输出回路设计方法的修正和间隙作用阻抗的计算, 电子学通讯, 1982, 4(6): 354-364.
- [5] Kamigaito O, Goto A, et al.. Beam matching section in the new injector for RILAC. RIKEN Accel. Prog. Rep., 1997, 30: 191-192.
- [6] 李智慧, 唐靖宇, 张伦, 有限积分理论(FIT)及其在腔体计算中的应用, 强激光与粒子束, 2002, 14(1): 156-160.

- 王进华: 男, 1977年生, 博士生, 研究方向为高功率微波器件.
丁耀根: 男, 1942年生, 研究员, 研究方向为高功率微波器件、微波器件与电路的计算机模拟.
王树忠: 男, 1973年生, 博士生, 研究方向为高功率微波器件.
耿志辉: 男, 1975年生, 助理研究员, 研究方向为毫米波微波器件.