

行波管电子枪热状态模拟和分析

赵兴群, 张国兴, 谢 锴, 孙小菡

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

[摘要] 建立行波管电子枪区热状态分析模型, 利用 ANSYS 软件对行波管电子枪的热状态进行了模拟和分析。通过改变电子枪内部的一些结构参数和工作环境参数, 特别是栅控行波管的栅极结构尺寸和加载功率的变化, 由模拟得到不同条件下电子枪热状态分布, 为电子枪的优化设计和合理使用提供了参考。

[关键词] 行波管; 电子枪; 热分析; 数值模拟

[中图分类号] TN124 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)01-0033-05

1 引言

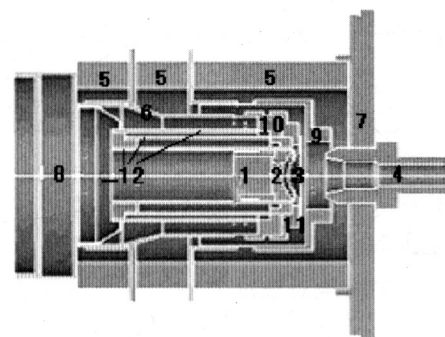
大功率行波管是微波接力通讯、雷达、电子对抗和卫星通讯等领域中的重要电子器件^[1]。行波管的结构分为电子枪区、输入输出区、电子束与场相互作用区和收集区。场相互作用区的热分析陆续出现报道^[2], 而对电子枪区热状态分析报道所见甚少。在电子枪的工作过程中, 阴极受到高温加热发射出电子, 在阴极、控制栅网和阳极 3 个电极产生的静电场和电子注本身空间电荷力的作用下, 形成一束高速细电子注, 并从阳极孔射出。

一般情况下, 电子器件的寿命分布为其工作温度的指数函数^[3]。对于电子枪而言, 既要有一定的工作温度, 以便产生电子流, 又不能使温度过高, 避免电子枪烧毁。温度对行波管工作的可靠性与稳定性的影响很大。定性和定量地研究温度对电子枪的影响, 是解决电子枪的稳定性和可靠性的有效途径。特别是栅控电子枪, 控制栅的热变形导致栅阴短路、打火, 直接损坏行波管。由于电子枪的结构比较复杂, 其内部的热传递方式交错混杂, 以前几乎无法对所建立的模型进行求解, 因而很难进行有效的热分析。而且, 实验测量同样十分困难,

测量成本也较高。现代计算机技术发展为模拟和分析电子枪的热状态提供了可能。

2 电子枪分析模型和热传导、辐射方程

电子枪的结构主要由阴极、阴极支座、控制栅极框、控制栅极环、控制栅网、阴极支座、支撑筒、挡圈、封接环、底盖、瓷环以及阳极等部件构成, 见图 1。



1—阴极; 2—阴极支座; 3—控制栅极网; 4—阳极; 5—瓷环;
6—支撑筒; 7—磁屏; 8—底盖; 9—阴极栅极框; 10—控制栅极环; 11—控制栅极框; 12—栅极组合

图 1 电子枪结构图

Fig.1 The structure of an electron gun

[收稿日期] 2003-12-18; **修回日期** 2004-02-10

[基金项目] 电子元器件可靠性物理及应用技术国家重点实验室资助项目 (51433010201JW0601)

[作者简介] 赵兴群 (1964-), 男, 江苏泰州市人, 东南大学教授, 博士研究生

2.1 稳态温度场方程

电子枪外部和空气接触，存在对流，而且为了降低管壳温度，有的高功率行波管采用强制风冷。电子枪的内部是真空的，各部件间热的传递方式只有辐射和传导。传导存在于接触界面；而辐射主要考虑是发生在阴极支座和控制栅网两部分相对的面上。对于阴极支座和控制栅网之外的其他部分，由于热辐射影响小，可以忽略不计。

三维瞬态温度场的场变量 $T(x, y, z, t)$ 在直角坐标系中应满足微分方程^[4]

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho Q = 0 \text{ (在 } \Omega \text{ 内)} \quad (1)$$

式中 ρ 为材料密度， c 为材料比热， t 为时间， k_x, k_y, k_z 为材料沿 x, y, z 方向的热传导系数， $Q = Q(x, y, z, t)$ 为物体内部的热源密度，第 1 项是微体升温需要的热量，第 2 项至第 4 项分别为 x, y, z 方向传入微体的热量，第 5 项是微体内热源产生的热量。热平衡方程式 (1) 表明，微体升温所需的热量应与传入微体的热量以及微体内热源产生的热量相平衡。如果边界上的边界条件及内部的 Q 不随时间变化，则经过一定时间的热交换后，物体各点的温度不随时间而变，即

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

这时瞬态热传导方程就退化为稳态热传导方程了。得到三维问题的稳态热传导方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho Q = 0 \text{ (在 } \Omega \text{ 内)} \quad (3)$$

2.2 热辐射平衡方程^[4]

辐射热传递是通过电磁波传递热能的方式，它不像其他热传递方式需要介质，两平面间的辐射热传递与它们平面绝对温度差的四次方成正比： $Q_{i-j} \propto (T_i^4 - T_j^4)$ 。

在计算平面间辐射热能之前，需要考虑形状因子 F_{ij} ，定义为从一个平面 i 发射的辐射能施加到另一个平面 j 上而得到 (见图 2)

$$F_{ij} = \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} d(A_i) d(A_j) \quad (4)$$

式中 A_i, A_j 是平面 i 和平面 j 的面积， r 为两表面间距离， θ_i, θ_j 为辐射方向与法向方向夹角。

对于有 n 个小平面的系统，形状因子矩阵由

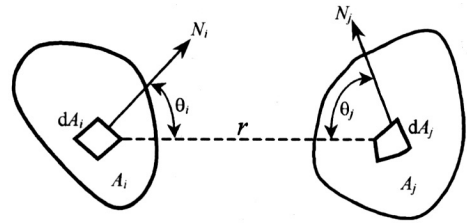


图 2 平面辐射示意图

Fig.2 Heat radiation between two planes

n^2 个元素组成：

$$F = (F_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & \cdots & F_{1n} \\ F_{21} & F_{22} & \cdots & F_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{n1} & F_{n2} & \cdots & F_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

要计算从平面 i 到平面 j 的热传递，使用相互作用法则和施蒂芬-波斯曼法则得到：

$$\left. \begin{aligned} Q_{i-j} &= A_i F_{ij} \epsilon \sigma (T_i^4 - T_j^4) \\ Q_{i-j} &= K'(T_i - T_j) \\ K' &= A_i F_{ij} \epsilon \sigma (T_i^2 + T_j^2) (T_i + T_j) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由于 K' 是 T^3 的函数，方程不能直接求解，必须使用迭代方法。生成多平面问题系统的矩阵为 $K'T^3 = Q$ 。对于具有高度非线性现象辐射，使用牛顿-拉夫森迭代求解。

有限单元法是随着电子计算机的发展而迅速发展起来的一种现代计算方法。它广泛地应用于求解热传导、电磁场、流体力学等连续性问题。ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场等分析于一体的大型通用有限元分析软件^[5]。ANSYS 热分析可分为 3 个步骤：前处理，建立模型并对其进行网格化；求解，施加载荷并计算得出结果；后处理，查看并分析计算结果。

3 电子枪热状态分析结果和讨论

电子枪的内部结构比较复杂，整体是圆柱形对称结构，因而可以简化模型，减少计算量。通过建立电子枪的四分之一结构模型，其得出的结果可以达到模拟和分析整个电子枪工作情况的目的。

电子枪的各个部件结合得很紧密，而且各个结构部分的表面也比较光滑，可以忽略热阻，直接把电子枪的各个相连部件结合起来。根据电子枪的特点，采用三体积型元素建立分析模型。采用 ANSYS 自带的自由网格化功能，建立分析单元^[5]。图 3 为网格化后电子枪四分之一模型。

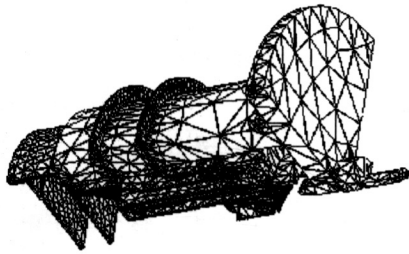


图 3 网格化后的电子枪模型
Fig.3 The model after meshing

3.1 稳态加载求解

对电子枪加载热负荷，模拟其从启动到正常的工作状态。分析目的在于考察电子枪在不同工作条件下的最终运行状态。采用稳态分析，可以节省计算时间。

假设电子枪的初始温度和工作时外部环境温度为室温 293 K。热源只有镶嵌在阴极中的螺旋状钨丝，为了方便计算，把整个阴极下的内腔设为热源。灯丝工作电压为 6.3 V，电流为 3 A，转换为热功率约为 19 W。阴极支座、控制栅网、内瓷环、封接环是受热最强的部分，而瓷环和底座这些外表面，在自然导热冷却并考虑底座热传导下，其散热系数为 186 W/m^2 。

在工作过程中电子枪内部辐射的传递主要是在阴极和控制栅网相对的 2 个面之间进行的。因为阴极和控制栅网之间的距离比较近，并且又在一个封闭的环境中，可以忽略热损失，所以设定 2 个辐射面之间的黑度为 1。

根据以上的参数，经过计算后电子枪的温度分布见图 4，可以清楚地看到电子枪内部的温度分布情况：除了热源阴极之外，阴极支座、控制栅网、内瓷环、封接环确是受热最强的部分，这和实际情况一致。在电子枪模型中，选取有代表性的亮点，一点为热源阴极中心点，另一点为控制栅网的中心点。阴极的温度约 1270 K，保证热电子产生，亦说明上述的散热系数、黑度的设定值是合理的。

控制栅网是电子枪的一个重要部件。它的作用是使电子流聚束并控制其形状、尺寸、强弱与速度大小，是受热最强的部分之一，很薄（只有 0.05 mm），很容易被烧坏、形变，产生短路、打火等非正常现象。它和电子枪的稳定性和可靠性密切相关。为了考察它的可靠性和稳定性，通过调整控制栅网上的加载功率，模拟和考察在恶劣的条件下控制栅网的工作状态。在一般的工作条件下（控制栅

网上加载 1 W），调整控制栅网和底座之间的距离，调整控制栅网的厚度，模拟和考察在不同的生产工艺条件下控制栅网的工作状态。从得到的一系列数据中，可以全面地考察控制栅网的可靠性与稳定性，从而为电子枪的设计和和生产提供可靠参考。

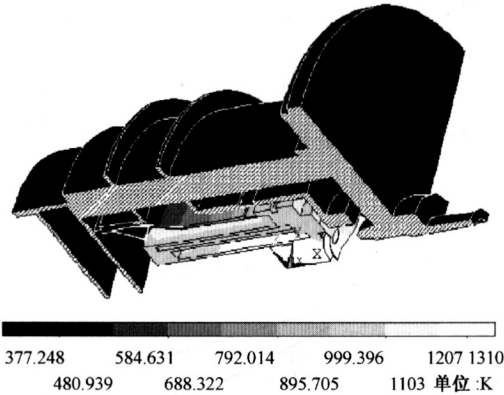


图 4 控制栅网加载 1 W 负荷时的温度分布
Fig.4 The temperature distribution at the load of 1 W on the grid

从图 5 可以看出，调整控制栅网上的负荷对控制栅网的影响比较大。当负荷增大到 5 W 时，控制栅网的温度比阴极高很多，但是温度仍然在 1150~1450 K（阴极工作温度范围）之间。因此，在运行情况下，要注意控制栅网上的热负荷，防止烧坏控制栅网而使整个电子枪乃至行波管不能工作。而在一般情况下，控制栅网上的功率不可能达到 5 W，所以电子枪设计可靠。

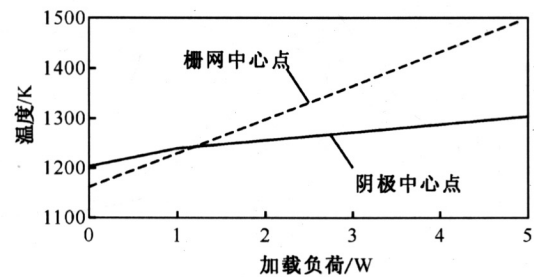


图 5 控制栅网负荷对阴极和栅极的温度影响
Fig.5 The temperature on the cathode and grid at different grid's load

从图 6 可以看出，电子枪控制栅网厚度的增加对于阴极工作温度没有影响，但是控制栅网的工作温度却随着厚度增加而降低。这是由于随着控制栅网体积增加，热容也增加的缘故。阴极虽然受到栅极辐射的影响，但由于栅极温度下降不大，对其几乎不产生影响。适当保持控制栅网的厚度可以确保

其可靠和稳定地工作。

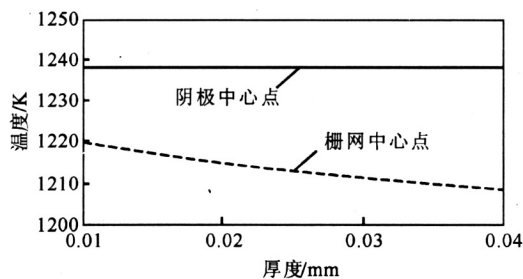


图6 控制栅网厚度对于电子枪中心部分的温度影响

Fig.6 The temperature on the cathode and grid at different grid's thickness

从图7可以看出,调整控制栅网和阴极支座之间的距离对热源阴极和栅网中心点的温度有影响。随着距离增大,控制栅网的温度开始升高,然后趋于平稳,而阴极的温度开始降低,然后趋于平稳。如果控制栅网和阴极支座之间的距离太远,电子注容易发散;距离太近,电子注不好控制。在设计和制造电子枪的过程中,找到一个适当的控制栅网和阴极支座之间的距离参数,保证电子注的通过和控制栅网工作的稳定性和可靠性。

相对于在控制栅网上加载负荷,改变控制栅网和阴极支座之间的距离以及改变控制栅网的厚度对于控制栅网的影响不大,这是因为电子枪的结构参数很小,体积小造成热容小的缘故。

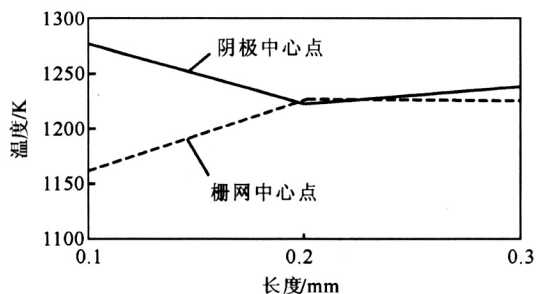


图7 阴极和栅极距离对它们温度的影响

Fig.7 The temperature on the cathode and grid at different distance between grid and cathode

当电子枪的外部工作条件变化时,即电子枪的唯一的散热途径——外表面的对流状况变化,可以通过变化模型的对流系数来模拟这些变化对电子枪工作情况的影响,从而得到电子枪在不同环境条件下的具体工作状态。

因为行波管可能在恶劣的环境中工作,计算了

对流系数从 186 W/m^2 到 1860 W/m^2 间管壳温度和阴极温度变化。从计算结果的温度分布云图得到,外界对流系数的改变对电子枪的温度场分布状态几乎没有影响。从图8可以看出,对流系数的变化对于电子枪的阴极温度影响和对电子枪外壳瓷环温度影响相似。对流系数大,整个电子枪单位时间对外散热就多,电子枪内部和外部的温度就低;对流系数小,整个电子枪单位时间对外散热就少,电子枪内部和外部的温度就高。当对流系数从 186 W/m^2 变化到 2100 W/m^2 时,管壳温度和阴极分别下降约 75 K 和 111 K 。而且当对流系数为 2100 W/m^2 时,管壳温度只比常温高出了 10 K 。从而可以发现,只要保证足够大的对流系数,既能够保证电子枪工作在较低温度下,又能够保证阴极的正常工作温度。

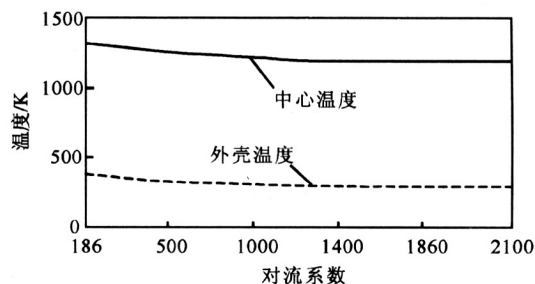


图8 对流系数改变对与电子枪外壳与阴极的影响

Fig.8 The temperature on cathode and shell at different convection coefficient

3.2 暂态分析加载

对于栅控电子枪,其工作状态是脉冲激励的。上面的稳态分析按工作比计算栅极平均加载功率为 1 W 。实际上在开始加载时,因为加载的速度很快,形成阶跃冲击。对于这种冲击激励情况的模拟,采用暂态分析来解决。加载条件为:对流系数为正常条件下 186 W/m^2 ,占空比为 5% ,周期为 0.1 s ,共计算 50 个周期,加载时间为 5 s ,栅网功率为 20 W 。图9为阴极中心点上温度在脉冲激励下随时间变化曲线,可以看出,在脉冲功率工作期间,温度上升,而在脉冲间歇期间,温度下降。在开始阶段,温度上升梯度大,经过 50 个周期后,温度曲线向动态平衡靠近,要达到完全的平衡态还需要较长的时间。通过 ANSYS 模拟计算,电子枪从启动到温升平衡时间约为是 240 s 。根据规定,要求行波管电子枪在 $3\sim 5 \text{ min}$ 内完成从启动到正

常的运行状态，因此符合规定要求。

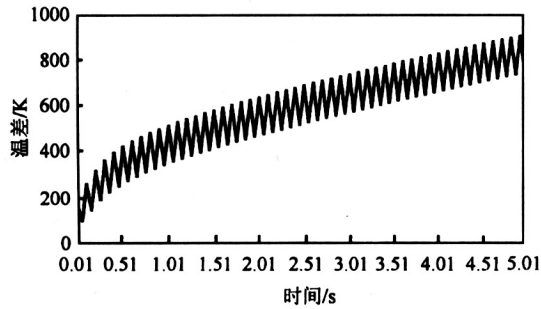


图 9 电子枪阴极暂态温度变化

Fig.9 The transient temperature on the cathode at the beginning

4 结论

通过建立电子枪热传导和热辐射平衡方程，用 ANSYS 软件可以模拟电子枪在正常工作状态下的热状态。在此基础上，通过改变栅极负载、改变栅极厚度、改变阴与栅极距离等，得到它们影响电子枪温度变化的规律。同时，通过改变环境对流系数

及加载方式，研究动态条件下电子枪的温度分布。这样可以方便地模拟和检验电子枪热设计和热分析，有助于行波管的设计，并为提高行波管电子枪的使用寿命提供一条有效途径。

参考文献

- [1] 廖复疆, 吴固基. 真空电子技术 - 信息装备的心脏 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000
- [2] Roberto Crivello. Thermal analysis of PPM-focused rod-supported TWT helix structures [J]. IEEE Transactions on Electron Deviece, 1988, 35 (10): 1701~1720
- [3] Xijin Tian, Olgierd A Palusinski. Reliability, thermal analysis and optimization wirability design of multi-layer PCB boards [A]. Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium [C]. 2002. 392~398
- [4] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社. 2002
- [5] 谭建国. 利用 ANSYS6.0 进行有限元分析 [M]. 北京: 北京大学出版社. 2001

The Analysis and Simulation for the Thermal Condition of Electron Gun of TWT

Zhao Xingqun, Zhang Guoxing, Xie Kai, Sun Xiaohan

(Department of electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

[Abstract] The model for thermal condition of an electron gun of TWT was established firstly. With ANSYS this thermal condition was simulated and analyzed. By changing some parameters of the electron gun's structure and working condition, especially the size of the grid and the working power, different temperature distributions were obtained. These results supply efficient reference to the optimizing design and reasonable use of electron guns in TWT.

[Key words] TWT (traveling wave tube); electron gun; thermal analysis; simulation