

ANSYS 在气体探测器电场分布计算中的应用

来永芳^{1,3} 郭勇¹ 李元景² 李金^{2,3;1)}

1 (军事医学科学院 北京 100850)

2 (清华大学工程物理系 北京 100084)

3 (中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 介绍了气体探测器电场分布的计算方法,以计算 MSGC 探测器单元电场分布为例说明了如何用 ANSYS 软件包来计算结构较复杂的气体探测器内部电场分布,同时讨论了电场分布对气体探测器性能的影响。

关键词 电场强度 气体探测器 微条气体探测器(MSGC) 微间隙气体探测器(MGC) 漂移速度

1 引言

气体探测器是由气体作为介质,通过入射粒子与其发生电离效应而产生电信号来获取核事件信息的一种核辐射探测器。从传统意义讲,根据工作电压不同,气体探测器可分为电离室、正比计数器、G-M 计数管等^[1]。随着核技术发展,先后出现了多丝正比室、漂移室及自淬灭流光室(SQS)等。而微电子技术所取得的巨大成果,又使制作微单元结构气体探测器成为现实,二十世纪 80 年代后期,国外一些科研机构相继研制出了 MSGC, MGC, CAT, GEM 和 MICROME GAS 等微单元结构气体探测器^[2],并将之用于粒子物理实验中。尽管气体探测器与半导体探测器、闪烁体探测器相似,都需外加工作电压,但对气体探测器而言,电场分布直接影响电子、离子的收集和放大,对其性能影响更强烈,因此,无论制作何种类型气体探测器,了解清楚探测器内部电场分布是十分必要的。

2 气体探测器内部电磁场分布计算方法简介

气体探测器内部电场强弱分布主要决定于其几何结构和所加工作电压,对于同轴圆柱型和平板型

结构的探测器,可直接用电磁学理论推出的公式计算^[3],计算公式分别为

$$E_r = \frac{V}{r \ln \frac{b}{a}}, \quad (1)$$

$$E = \frac{V}{D}, \quad (2)$$

其中 E_r 为同轴圆柱型探测器内 r 处电场强度, V 为所加工作电压, r 为 r 处到阳极丝中心距离, a 为阳极丝半径, b 为阴极管壳半径, E 为平板型探测器两电极板中电场强度, D 为两电极板间距离。对于多丝正比室与新型微单元结构的气体探测器,却很难用电磁学理论直接推出计算公式,尽管 Erskine 推导出了 MWPC 在阳极丝无限细、面积无限大时电位的计算公式^[4]

$$V = q \ln \left[\sin^2 \left(\frac{\pi x}{s} \right) + \sinh^2 \left(\frac{\pi y}{s} \right) \right], \quad (3)$$

其中 q 为阳极丝电荷密度, s 为阳极丝间距离, x 为以阳极丝圆心为坐标原点,沿阳极丝方向的距离变量, y 为垂直于阳极丝方向的距离变量,但从公式(3)可见,要算出 MWPC 内部各点电场强度和电位,运算量大且复杂,更何况气体探测器的发展已有百年历史,几何形状和电极结构多种多样,仅依赖麦氏方程组来计算电场分布显然是不现实的。目前国外一些软件公司相继推出了几种计算电磁场的专用软

2002-12-12 收稿

1) E-mail: lij@mail.ihep.ac.cn

件包如: ANSYS^[5], MAXWELL^[6], EMAS^[7]等, 都可计算电磁场, 但却各有侧重, 如 EMAS 主要用于计算高频电磁场、MAXWELL 主要用于计算静电磁场, 而 ANSYS 是一个应用范围较广的大型软件包, 不仅能计算不同器件和设备静态和动态电磁场分布, 而且可对其结构稳定性进行静态分析, 同时也能动态分析不同力的作用情况. 本文主要探讨如何用 ANSYS 软件包计算结构较复杂的气体探测器内部电场分布.

3 用 ANSYS 计算电磁场分布的方法和步骤

ANSYS 是美国一家专业软件开发公司, 主要从事各种工程应用软件开发, 应用其软件产品可模拟工程结构、电磁、热、流体及耦合场或多物理场, 也可分析模拟结果并根据使用者的技术要求对物理参数进行优化. 用户只需建立几何模型并给出边界条件, 用 ANSYS 的电磁分析软件 (EMAG) 就能够计算出所设计器件或设备的静态电磁场和动态电磁场分布, 磁通量密度、磁场密度、磁力矩和电流密度、电荷密度及电场分布等物理参数.

EMAG 主要采用有限元法 (FEA 即利用数学近似的方法对真实物理系统进行模拟) 来模拟电磁场. 根据电磁场理论 (如麦氏方程组), FEA 首先通过对有限、简单并相互作用元素 (或单元) 的定量分析来获得有限量的未知量, 进而来逼近无限未知量的真实系统. 例如计算平行板电容器内部的电场分布, 不能直接用公式 $V = Ed$, 而是先将两电极板内部的空间分成若干个单元 (一般情况下所分单元数越多, 所得结果越接近真实值, 但所需时间也较长), 然后给一些单元节点加上已知物理参数作为载荷 (或边界条件). 对平板型电容器, 就需给两电极板相连的所有单元节点赋予电压值作为载荷, 这样 EMAG 就能算出电极板内部空间的电场和电位分布. EMAG 的数学算法主要有: 稀疏直接算法、正面直接算法、Jacobi 共轭梯度算法 (JCG)、部分 Cholesky 共轭梯度算法 (ICCG)、预值共轭梯度算法 (PCG) 等 5 种, 每种算法都有自动迭代选择. 在将 ANSYS 用于并行运算模式时, EMAG 还有两个多处理器算法: 代数多网格算法 (AMG) 和分布域算法 (DDS). 这 7 种算法各自适用于解决不同问题, 一般对于电磁场二维分布问题, EMAG 自动采用稀疏直接算法 (其迭代误差小于 10^{-6}), 但对于三维问题或单元数较大时, 用户应

选 PCG 或 JCG 算法, 因为这两种算法的存储量较大 (允许 50,000 到 1,000,000 个自由度, 1 个三维单元至少有 3 个自由度), 算法的选择主要取决于所求电磁场大小和用户对结果精度的要求.

用 EMAG 计算器件或设备电磁场的基本步骤是: (1) 分析问题、提出求解问题方案并作出合理假设、设计出符合实际情况的几何体和边界条件; (2) 选择单元类型和物理单位、给不同材料赋予必需的物理参量、建立几何模型; (3) 将所建几何模型网格化、对网格化的单元进行必要优化以满足对所求结果的精度要求; (4) 根据已知条件, 给单元节点添加载荷; (5) 选择合适算法求解问题; (6) 对所得结果进行分析.

4 用 EMAG 计算气体探测器 MSGC 电场分布

微条气体探测器 (MSGC) 是 A. Oed 于 1988 年研制出的一种最早的微单元结构气体探测器^[8], 目前已被用于高能物理实验的粒子定位中. 其截面结构如图 1 示. 一般地, 阴极条宽度约为 $90\mu\text{m}$ 、阳极条宽度为 $9\mu\text{m}$. 整个电极板可做得很大 (达几十 cm^2).

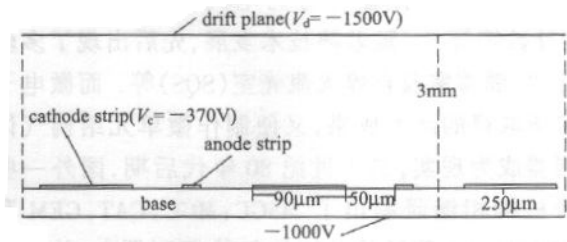


图 1 MSGC 截面结构

用 EMAG 计算 MSGC 内部电场分布为:

(1) 分析 MSGC 实际结构、建立 MSGC 的物理模型. 尽管 MSGC 面积很大, 但其电极结构具有对称性和重复性, 因此无需将整个探测器内部电场分布都计算出, 只计算出一个探测器单元的电场分布, 然后对计算结果做必要处理就可得到整个探测器的电场分布. 由于 MSGC 漂移区和基底相对电子雪崩区而言显得过大, 而这两个区域的电场分布对分析探测器性能影响不大, 故可将这两个区域做假想压缩以减少运算量, 同时也需修改漂移电极板和基底电极板的电压以符合实际漂移场的电场分布. 利用平板型电容器电场强度计算公式可求得漂移场电场强度 $E = 1783\text{V/cm}$, 如将漂移区空间高度改为 $250\mu\text{m}$ 、基底厚度取 $50\mu\text{m}$ 、基底相对介电常数取 4.6 (基底一

般用环氧树脂纤维材料),可算出要保证漂移场电场强度在压缩前后不变,此时漂移电极板和基底电极板的电压应分别取 -100V 和 -53.487V ,图2表示计算探测器单元的截面结构。

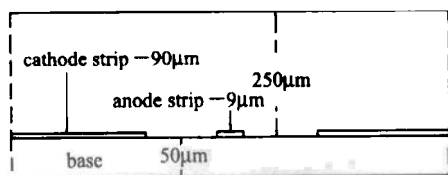


图2 MSGC探测器单元截面结构

(2) 在 EMAG 中选择计算 MSGC 电场所用的单元类型、物理单位、给不同材料赋予必需的物理参数、建立几何模型。EMAG 提供了 3 种单元类型: 2DQuad 121, 3DBrick 122 和 3DTet 123, 其中 2DQuad 121 适用于自由度为二维的单元类型, 其他两种适用于三维自由度的单元类型, 所加边界条件都是电压。由于 MSGC 的电极条长度远大于其宽度, 因此可忽略电场沿电极条方向变化, 这样可选取单元类型 2DQuad 121。EMAG 默认的物理单位都是国际单位, 建立几何模型时, 为防止因变换单位而带来混乱, 最好都采用国际单位。MSGC 中涉及计算电场的材料参数有: 工作气体和基底的相对介电常数, 对气体可取 1、对基底取 4.6。EMAG 提供了许多建立几何模型的绘图工具, 完全能够满足建立 MSGC 单元几何模型需要, MSGC 电极条厚度极薄(不到 $1\mu\text{m}$), 可将电极条与基底上表面视为同一平面。

(3) 给各个几何单元赋材料参数、将几何体网格化。EMAG 提供了多种网格化方法以满足用户不同需要。制作 MSGC 的技术人员最关心的是电极条附近的电场分布, 故在网格化时, 可将电极条附近区域细分成非常小的单元, 而远离电极条的区域划分成较大的单元。

(4) 添加边界条件。分别选取漂移电极、阴极条、阳极条和基底底部的节点分别加电压: -100V , -53.487V , -370V 和 0V 。

(5) 计算。对计算类似 MSGC 这样的二维电场分布, 只需默认 EMAG 算法就可得到很好的结果。图3表示水平方向电极条附近电场强度随距离变化曲线。

(6) 分析结果。从图3可看出, 在 MSGC 中, 条边缘附近场强最大, 可预见阳极条边缘的电子雪崩极其强烈; 阴极条边缘场强大于阳极条边缘场强, 从所得结果可知, 阴极条边缘附近的场强最大, 可达

$300\text{kV}/\text{cm}$, 可预见在 MSGC 中, 如不对条边缘做钝化处理, 就很难避免阴极光电效应, 工作电压范围不会大, 较易发生放电; 尽管阳极条附近场强很大, 但电子雪崩区范围较小, 因此电子倍增数不会大于相同场强下阳极丝的电子倍增数; 由于电极间距离较小(大约 $50\mu\text{m}$)且场强较大(大于 $46\text{kV}/\text{cm}$), 因此正离子向阴极运动的漂移速度很快, MSGC 的计数率较高。

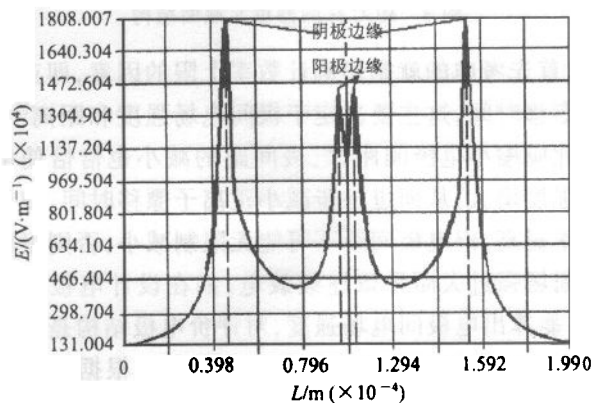


图3 水平方向电极条附近电场强度随距离变化关系

5 电场分布计算在气体探测器设计中的应用

设计气体探测器时, 除要分析工艺可行性和制作难易度外, 主要考虑的因素就是探测器内电场分布、气体成分与压强和电极材料。对于气体探测器电场, 原则上, 希望电离室和漂移室漂移区的电场分布均匀, 强度适中、既不能过大而引起电子雪崩, 也不能太小而降低电子-离子对漂移速度造成较大时滞和分辨时间或发生电子复合或俘获效应而降低探测效率; 有放大作用的探测器内电场强度大于发生电子雪崩阈值, 同时尽可能消除场强过大区域, 以避免尖端放电; 在满足信号幅度要求条件下, 探测器在尽可能低的工作电压下工作(即探测器能在较低工作电压下产生较强电场); 多丝室和微单元结构气体探测器的各探测单元电场分布一致性要好。一般在研制新气体探测器之前, 为了满足核工程和粒子实验要求, 先要设计探测器结构, 而探测器结构又决定了其内部电场分布, 进而影响探测器性能。因此如能在设计探测器结构同时, 计算出探测器电场分布, 对设计探测器结构并优化其性能将会有很好的指导作用。

例如在设计高计数率位置灵敏气体探测器结构

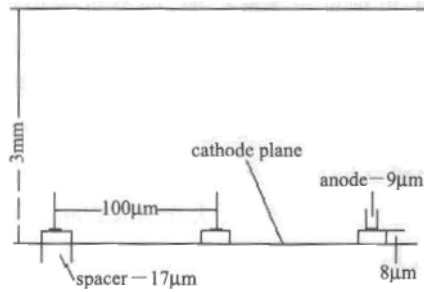


图 4 MGC 探测器单元截面结构

时,首先考虑的就是影响计数率上限的因素,即正离子漂移时间,这主要决定于极间电场强度和距离^[1],因此应缩小电极间距,电极间距的减小也恰恰使电场强度增大,从而进一步减小正离子漂移时间,使计数率提高,但电极间距不可能无限制减小,否则很容易因场强过大而导致连续放电,如在设计电极结构时,能算出电极间电场强度,对评价电极结构是否合理和改进电极结构会有较好参考价值. 根据不同形状电极产生电场强度大小和分布结果^[9],如对探测器位置分辨率要求不高、工艺技术条件允许,应尽可能避免采用电极条以消除条边缘过强电场而导致探测器连续放电. 对探测器位置分辨率要求较高(mm量级以下)、只有通过印刷板电路或微电子技术实现时,如能使阴、阳极不在同一平面也可在减小电极间距的同时,消除阴极边缘过强电场,并使工作电压降低. 例如微间隙气体探测器 MGC^[9],其探测器单元电极截面结构如图 4 所示,电极间距只有 8 μm(MSGC 的电极间距为 50 μm 左右),电极条不在同一平面. 利用 EMAG 算出探测器单元阳极条附近电场分布和阳极条边缘附近、垂直于阳极条方向电场强度随距离变化曲线如图 5,6 所示,可见,尽管阳极条边缘出现了过强电场(如所加电压仍为 370V,边缘场强可达 600kV/cm 以上),但消除了阴极条边缘的过

强电场区(所加电压仍为 370V,最大值为 350kV/cm 左右,是阳极条边缘的一半). 实验也表明 MGC 的计数率较 MSGC 有所提高,起始电压降低,工作电压范围也得到扩大.

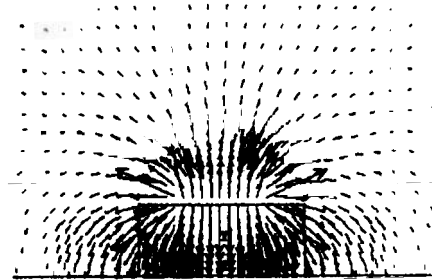


图 5 MGC 电极条附近电场分布

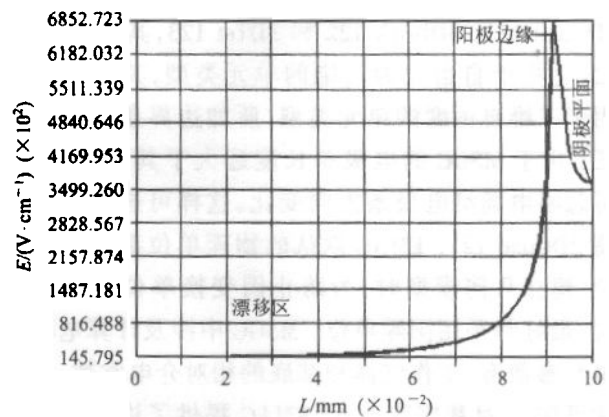


图 6 垂直于阳极条方向电场强度随距离变化曲线

综上所述,如在制作气体探测器之前能比较清楚地了解气体探测器内部电场分布,对设计探测器电极和预测其性能会有很好的参考作用. 另外探测器电场分布结果也可作为探测器设计者选择电极材料和工作气体的重要参考依据,例如 MSGC,由于该气体探测器内有过强电场,因此,应对条边缘做钝化等处理,并适当提高猝灭气体含量来吸收紫外光子.

参考文献 (References)

- 1 AN Ji-Gang. Ionizing Radiation Detector. Atomic Energy Publishing Company. 1995 (in Chinese)
(安继刚. 电离辐射探测器. 原子能出版社. 1995)
- 2 Oed A. Nucl. Instr. and Meth., 2001, **A471**:109
- 3 YANG Zhong-Qi et al. General Physics, Electromagnetics The People's Educational Publishing Company. 1980 (in Chinese)
(杨仲青等. 大学物理学,电磁学. 人民教育出版社. 1980)
- 4 Charpak G et al. Nucl. Instr. and Meth., 1970, **80**:13
- 5 ANSYS 6.1 Commercial Finite Element Computation Package, Ansys Inc. Canonsburg, PA
- 6 MAXWELL Commercial Finite Element Computation Package, Ansoft Co. Pittsburg, PA
- 7 EMAS Commercial Finite Element Computation Package, McNeal-Schwendler Co. Los Angeles
- 8 Oed A. Nucl. Instr. and Meth., 1988, **A263**:351
- 9 Christophel E et al. Nucl. Instr. and Meth., 1997, **A398**:195
- 10 Angelini F et al. Nucl. Instr. and Meth., 1995, **A362**:273

Application of ANSYS in Calculating the E-Field in Gas Detectors

LAI Yong-Fang^{1,2} GUO Yong¹ LI Yuan-Jing² LI Jin^{2,3,1)}

1 (Academy of Military Medical Sciences of PLA, Beijing 100850, China)

2 (Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

3 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract The methods for calculating the electrical field strength in gas detectors have been introduced in this paper. The process to calculate the electrical field in gas detectors with complex electrode structure based on ANSYS has been presented and the electrical field calculation of MSGC detector has been given as an example. The effect of electrical field on the performance of gas detector has also been discussed.

Key words electrical field strength, gas detectors, MSGC, MGC, drift velocity

Received 12 December 2002

1) E-mail: lj@mail.ihep.ac.cn