



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 104376217 B

(45) 授权公告日 2016. 05. 18

(21) 申请号 201410668296. 4

(22) 申请日 2014. 11. 20

(73) 专利权人 中国科学院合肥物质科学研究院  
地址 230031 安徽省合肥市蜀山湖路 350 号

(72) 发明人 郑华庆 宋婧 孙光耀 郝丽娟  
吴宜灿

(74) 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责  
任公司 11251

代理人 成金玉 孟卜娟

(51) Int. Cl.

G06F 19/00(2011. 01)

(56) 对比文件

CN 103106301 A, 2013. 05. 15,  
唐凤平等. 《300# 研究堆安全棒中子注量率  
计算中的减方差方法对比及应用》. 《原子能科学

技术》. 2014, 第 48 卷

郑华庆等. 《蒙特卡罗粒子输运权窗减方差  
方法研究及在 INTER 屏蔽分析中应用》. 《核科学  
与工程》. 2014, 第 34 卷 (第 3 期),

王娟. 《蒙特卡罗方法在辐射防护中的应  
用》. 《科技信息》. 2007,

审查员 石志昕

权利要求书1页 说明书5页 附图1页

(54) 发明名称

一种基于蒙特卡罗自适应降低方差的辐射屏  
蔽计算方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于蒙特卡罗自适应降低  
方差的辐射屏蔽计算方法, 在传统的基于权窗减  
方差的蒙特卡罗方法的基础上, 根据其确定论方  
法伴随通量计算结果的具体情况, 进而计算得到  
重要性参数, 将这些参数写入基于蒙特卡罗的辐  
射屏蔽计算程序的输入文件中, 再进行辐射屏蔽  
计算。在基于蒙特卡罗的辐射屏蔽计算过程中, 在  
根据前一步得到的重要性参数对粒子进行偏倚输  
运的同时, 对粒子径迹进行保存, 即给出每一个粒  
子经过的栅元, 帮助用户在模拟过程中自动干预  
调整几何区域重要性参数的设置, 并在后续计算  
中使用新的栅元重要性参数, 实现自动偏倚。本发  
明避免了传统的基于经验式权窗减方差的蒙特卡  
罗方法的使用, 达到精确快速进行辐射屏蔽计算  
的效果。



1. 一种基于蒙特卡罗自适应降低方差的辐射屏蔽计算方法,其特征包括以下步骤:

(1)初始减方差参数获取:

a)根据需计算的基于蒙特卡罗的辐射屏蔽计算问题,建立确定论方法伴随计算的计算模型;

b)根据确定论方法粒子输运伴随计算的结果,生成基于蒙特卡罗的辐射屏蔽计算的减方差参数,包括:源偏倚参数和权窗参数;

(2)基于蒙特卡罗的辐射屏蔽计算中粒子径迹跟踪及减方差参数调节:

a)分批进行基于蒙特卡罗的辐射屏蔽计算,首批用于辐射屏蔽计算的粒子模拟使用步骤(1)获得的减方差参数;

b)在粒子模拟的过程中,对每一个粒子的径迹进行跟踪,保留对目标计数有贡献的粒子径迹信息,包括:粒子穿过栅元的编号,粒子在目标计数栅元中的权重;

c)在该批粒子模拟结束后,根据公式栅元重要性 =  $\frac{\text{进入该栅元粒子对计数的贡献}}{\text{进入该栅元的总权重}}$ , 计算每个栅元的重要性,并按照重要性的倒数,重新定义各栅元的权窗参数,用于下批粒子模拟;

d)重复步骤(2)中的b)、c)部分,直至所有的分批粒子模拟结束,最后统计得到辐射屏蔽计算的结果。

2. 根据权利要求1所述的一种基于蒙特卡罗自适应降低方差的辐射屏蔽计算方法,其特征是:所述步骤(2)中的c)中当计算栅元重要性时,当计算得到的栅元重要性小于0.01时,则定义栅元的权窗参数为0;当计算得到的栅元重要性小于0.0001时,则定义栅元的权窗参数为-1,减小对目标计数栅元贡献较小的粒子输运的时间。

## 一种基于蒙特卡罗自适应降低方差的辐射屏蔽计算方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于蒙特卡罗自适应降低方差的辐射屏蔽计算方法,属于核物理、核技术应用等领域中的辐射屏蔽计算分析方向。

### 背景技术

[0002] 辐射屏蔽分析是核装置物理设计与分析的关键环节。蒙特卡罗方法具备处理复杂几何和模拟精细的物理过程的能力,因而在屏蔽分析方面应用越来越广泛。对于厚屏蔽与结构复杂问题,由于模拟的粒子难以穿透介质继续运输,难以统计到有效的粒子,不仅计算效率难以接受且难以得到收敛的解。减方差方法可以加快蒙特卡罗方法的收敛速度,因此在应用蒙特卡罗方法解决屏蔽计算问题的过程中,有效地使用减方差方法是必不可少的。但是传统减方差方法需要使用者具备丰富的经验和反复的试算,才能得到比较好的效果。如何避免经验式的减方差方法使用,如何更高效的发挥减方差方法的使用,是基于蒙特卡罗辐射屏蔽计算方法的关键技术之一。

[0003] 减方差不仅仅是蒙特卡罗粒子运输模拟问题加速的一种技巧,并且是得到答案所完全必须的条件。比如深穿透问题和管探测器问题,若不使用足够的减方差技巧,将会因为许多因素而运行的很慢。因此,这就要求用户必须很熟练的使用蒙特卡罗粒子运输程序中的减方差技巧。

[0004] 现有的蒙特卡罗粒子运输程序中有四类减方差技术:截断技术(能量截断和时间截断)、总体控制方法(几何分裂与轮盘赌,能量分裂与轮盘赌,时间分裂与轮盘赌,权截断和权窗)、修正抽样方法(指数变换,隐俘获,强迫碰撞,源偏倚)、部分确定性方法(点探测器,DXTRAN和相关抽样)。其中权窗是应用最为广泛的技术之一。

[0005] 权窗是相空间的分裂和俄罗斯轮盘赌技巧,相空间可以是空间-能量、空间-时间或者空间。作为能量、几何位置或者两者的一部分,低权重粒子通过俄罗斯轮盘赌淘汰,高权重粒子分裂。这项技术可以使得权重分布保持在一个合理的界限内。

[0006] 传统的权窗减方差方法在使用的过程中,虽然实践证明它的有效性和可用性,但它决不是解决所有重要抽样问题的万金油。多数情况下,用户还要判断计算出的权窗是否合理。用户需牢记,产生的参数是统计结果,有可能带很大误差,除非在设置的相空间中已充分抽样。为此,用户应在使用权窗时预先给相空间粗略设置比较合理的重要性,经过计算-设置-再计算的多次过程才能得到较好的权窗;要对计算结果加以判断,对那些值得怀疑的参数重新设置。对于使用经验不足的用户,反复调试权窗参数极为耗时。

### 发明内容

[0007] 本发明的目的在于:克服传统权窗减方差方法在操作中的不足(权窗减方差方法在操作中的不足是不行的,没有与技术领域相结合,提供一种自适应降低方差的方法,使得用于基于蒙特卡罗的辐射屏蔽计算的粒子自动从源区域向计数区域进行偏倚,避免了传统的基于经验式权窗减方差的蒙特卡罗方法的使用,达到精确快速进行辐射屏蔽计算的效

果。

[0008] 本发明的技术方案如下：

[0009] 本发明根据确定论方法伴随通量计算结果的具体情况，进而计算得到蒙特卡罗正向模拟的重要性参数（源偏倚和权窗）；在正向粒子输运模拟过程中，在根据上一步得到的重要性参数对粒子进行偏倚输运的同时，对粒子径迹进行保存，即给出每一个粒子经过的栅元（包括目标计算栅元，判断粒子是否对目标计数有贡献），帮助用户在模拟过程中自动干预调整几何区域重要性参数的设置，并在后续计算中使用新的栅元重要性参数，在粒子输运物理过程实现自动偏倚。

[0010] 本发明所采用的技术方案实现如下：一种基于蒙特卡罗自适应降低方差的辐射屏蔽计算方法，包含如下步骤：

[0011] (1) 基于蒙特卡罗的辐射屏蔽计算方法中初始减方差参数获取：

[0012] a) 根据需计算的基于蒙特卡罗的辐射屏蔽计算问题，建立其确定论方法伴随计算的计算模型：
$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \iint \Sigma(\vec{r}, E') f(r, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \Phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}', t) d\vec{\Omega}' dE' + Q + S - \vec{\Omega} \cdot \nabla \Phi - \Sigma(\vec{r}, E) \Phi$$

[0013] 其中：

[0014] ➤  $\Phi$  表示  $\Phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t)$ ，为中子角通量；

[0015] ➤  $\Sigma(\vec{r}, E)$  为位置  $\vec{r}$  处能量为  $E$  的中子与核发生反应的宏观截面；

[0016] ➤  $\Sigma(\vec{r}, E')$  为位置  $\vec{r}$  处能量为  $E'$  的中子与核发生反应的宏观截面；

[0017] ➤  $f(r, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega})$ ，为  $\vec{r}$  处发生某种类型的核反应后，中子由能量为  $E'$  和方向为  $\vec{\Omega}'$  变为能量为  $E$  方向为  $\vec{\Omega}$  在能量为  $dE'$  范围内方向为  $d\vec{\Omega}'$  范围内的几率；

[0018] ➤  $Q$  表示  $Q(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t)$ ，为单位时间、单位体积和单位立体角内在  $\vec{r}$  处  $t$  时刻，一个能量为  $E$  方向为  $\vec{\Omega}$  的中子出现的几率；

[0019] ➤  $S$  表示  $S(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t)$ ，为独立中子源。

[0020] b) 根据确定论方法粒子输运伴随计算的结果，生成基于蒙特卡罗的辐射屏蔽计算的减方差参数，包括：源偏倚参数和权窗参数；

[0021] 源偏倚参数：
$$S^*(p) = \frac{\varphi^*(p)S(p)}{\int_p \varphi^*(p)S(p)dp} = \frac{\varphi^*(p)S(p)}{R}$$

[0022] 其中， $S^*(p)$  为正向计算时源在位置  $p$  处的源偏倚参数， $S(p)$  为正向计算时源在位置  $p$  处的初始重要性， $\varphi^*(p)$  为位置  $p$  处的伴随通量， $R$  为伴随计算的响应值，

[0023] 权窗参数：
$$W_L(r, E) = \frac{1}{S} \frac{W}{\left(\frac{C_u+1}{2}\right)} = \frac{1}{S} \frac{R}{\varphi^*(r, E)} \frac{1}{\left(\frac{C_u+1}{2}\right)}$$

[0024] 其中， $E$  是模拟粒子的能量， $r$  是模拟粒子的位置， $W_L(r, E)$  是模拟粒子所在的能量  $E$ ，位置  $r$  处的权窗下限， $S$  为正向计算源强， $C_u$  是权窗上限与权窗下限的比值，一般为 5， $W$  是模拟粒子的权重， $\varphi^*(r, E)$  为粒子所在的能量  $E$ ，位置  $r$  处的伴随通量， $R$  为伴随计算的响应值；

[0025] (2)基于蒙特卡罗的辐射屏蔽计算中粒子径迹跟踪及减方差参数调节:

[0026] a)分批进行基于蒙特卡罗的辐射屏蔽计算,首批用于辐射屏蔽计算的粒子模拟使用步骤(1)获得的减方差参数;

$$[0027] \quad F = \frac{WT_1E}{V}$$

[0028] 其中,F是模拟粒子在计数栅元的通量,W是模拟粒子在计数栅元的权重, $T_1$ 是模拟粒子在计数栅元的径迹长度,E是模拟粒子在计数栅元的能量,V是模拟粒子在计数栅元的体积;

[0029] b)在粒子模拟的过程中,对每一个粒子的径迹进行跟踪,保留对目标计数有贡献的粒子径迹信息,包括:粒子穿过栅元的编号,粒子在目标计数栅元中的权重;

[0030] c)在该批粒子模拟结束后,根据公式  
栅元重要性 =  $\frac{\text{进入该栅元粒子对计数的贡献}}{\text{进入该栅元的总权重}}$ , 计算每个栅元的重要性,并按照重要性的

倒数,重新定义各栅元的权窗参数,用于下批粒子模拟;

[0031] 重复步骤(2)中的b、c部分,直至所有的分批粒子模拟结束,最后统计得到辐射屏蔽计算的结果。

$$[0032] \quad F = \frac{WT_1E}{V}$$

[0033] 其中,F是模拟粒子在计数栅元的通量,W是模拟粒子在计数栅元的权重, $T_1$ 是模拟粒子在计数栅元的径迹长度,E是模拟粒子在计数栅元的能量,V是模拟粒子在计数栅元的体积;

[0034] 步骤(2)中的c)部分计算栅元重要性时,根据公式  
栅元重要性 =  $\frac{\text{进入该栅元粒子对计数的贡献}}{\text{进入该栅元的总权重}}$  计算时,当计算得到的栅元重要性小于0.01

时,则定义栅元的权窗参数为0;当计算得到的栅元重要性小于0.0001时,则定义栅元的权窗参数为-1,减小对目标计数栅元贡献较小的粒子输运的时间。

[0035] 本发明与现有技术具有如下优点:

[0036] (1)根据伴随计算结果自适应减小蒙特卡罗模拟的计算方差,无需用户反复调试减方差的参数;避免了传统的基于经验式权窗减方差的蒙特卡罗方法的使用,达到精确快速进行辐射屏蔽计算的效果。

[0037] (2)在蒙特卡罗模拟计算中根据粒子标识,对减方差参数进行二次优化,进一步提高计算的效率;

[0038] (3)当计算得到的栅元重要性小于0.01时,则定义栅元的权窗参数为0;当计算得到的栅元重要性小于0.0001时,则定义栅元的权窗参数为-1,减小对目标计数栅元贡献较小的粒子输运的时间,达到进一步精确快速进行辐射屏蔽计算的效果。

## 附图说明

[0039] 图1为本发明的实现流程图。

### 具体实施方式

[0040] 国际热核聚变实验堆ITER是目前全球规模最大的国际科研项目之一,ITER装置是一个能产生大规模核聚变反应的超导托卡马克。本专利选用ITER-T426例题作为应用例题。该例题基于FNG(Frascati neutron generator)装置,设计一个由不锈钢和有机玻璃组成的屏蔽结构,模拟ITER真空室。放射源是位于底层栅元( $X=0\text{cm}; Y=0.001\text{cm}; Z=0\text{cm}$ )处,单能(14MeV)、单方向(0,1,0)的中子点源。计数区域是中心点位于( $X=0\text{cm}; Y=74.93\text{cm}; Z=0\text{cm}$ ),半径为1.5cm,高度为5cm的不锈钢圆柱,计数类型为体通量计算。

[0041] (1)蒙特卡罗粒子输运正向计算初始减方差参数获取:

[0042] a)根据需计算ITER-T426例题的蒙特卡罗粒子程序(例如:MCNP等)输运正向计算问题,建立确定论方法粒子输运伴随计算的计算模型(例如:三维离散纵标程序TORT的输入文件),补充TORT输入文件中材料信息、放射源信息、计数信息,调用TORT进行伴随计算。需要说明的是,在补充材料信息之前,需要使用GIP(橡树岭国家实验室开发的多群截面处理程序)生成TORT伴随计算的截面数据。另外,伴随计算的放射源的空间分布对应正向计算时的计数区域,伴随计算的能谱为响应能谱。而伴随计算的计数区的空间分布对应正向计算时的放射源区域,能谱对应正向计算时的放射源能群;

[0043] b)根据ITER-T426例题确定论方法粒子输运伴随计算的结果 $\varphi^*(p)$ ,根据TORT伴随计算结果,得到不同网格、不同能群的伴随通量,将与该位置、该能群的正向计算实际源强的乘积求和,就得到了响应量R。根据以下公式计算MCNP正向计算时源偏倚参数和权窗参数:

$$[0044] \quad S^*(p) = \frac{\varphi^*(p)S(p)}{\int_p \varphi^*(p)S(p)dp} = \frac{\varphi^*(p)S(p)}{R}$$

$$[0045] \quad W_L(r,E) = \frac{1}{S} \frac{W}{(C_u+1)} = \frac{1}{S} \frac{R}{\varphi^*(r,E)} \frac{1}{(C_u+1)}$$

[0046] 其中,S为正向计算源强, $\varphi^*$ 为伴随通量, $C_u$ 一般为5。E是模拟粒子的能量,r是模拟粒子的位置,W是模拟粒子的权重, $W_L$ 是模拟粒子所在的能量E,位置r处的权窗下限。

[0047] (2)使用蒙特卡罗粒子输运模拟计算程序(例如:MCNP等)进行蒙特卡罗粒子输运正向计算,在计算的过程中对粒子径迹跟踪及减方差参数调节:

[0048] a)分批进行蒙特卡罗粒子输运正向计算,首批粒子模拟使用步骤(1)获得的减方差参数;

[0049] b)在粒子模拟的过程中,对每一个粒子NPS的径迹进行跟踪,保留对目标计数有贡献的粒子径迹信息,包括:粒子穿过栅元的编号CELLnum,粒子在目标计数栅元中的权重 $W_{NPS}$ ;

[0050] b)在该批粒子模拟结束后,根据公式“栅元重要性 =  $\frac{\text{进入该栅元粒子对计数的贡献}}{\text{进入该栅元的总权重}}$ ”,

计算每个栅元的重要性,并按照重要性的倒数,重新定义各栅元的权窗参数 $W_L$ ,用于下批粒子模拟;

[0051] d)重复步骤(2)中的b、c部分,直至所有的分批粒子模拟结束。

[0052] (3)通过比较含有自适应减方差方法的蒙特卡罗正向模拟计算结果和直接蒙特卡罗正向模拟的计算结果,自适应减方差方法达到加快计算收敛,避免了传统的基于经验式权窗减方差的蒙特卡罗方法的使用,达到精确快速进行辐射屏蔽计算的效果。

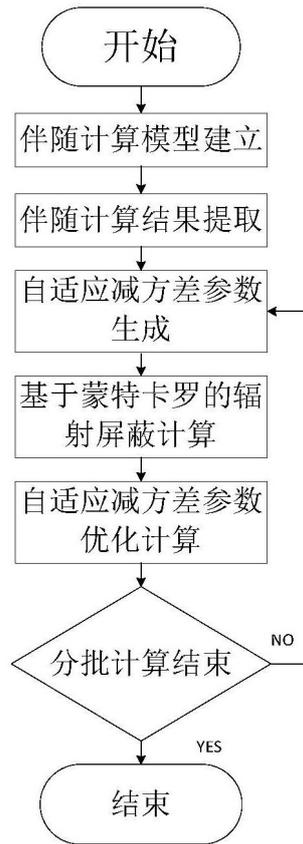


图1