

点堆中子动力学方程组曲率权重法的解

李明芮 黎浩峰 陈文振 郝建立

Curvature weight method of solving the point reactor neutron kinetic equations

Li Ming-Rui Li Hao-Feng Chen Wen-Zhen Hao Jian-Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 220201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.220201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.220201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I22>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

耦合高压斯特林制冷效应的复合磁制冷循环的数值模拟

Numerical simulation of a hybrid magnetic refrigeration combined with high pressure Stirling regenerative refrigeration effect

物理学报.2015, 64(21): 210201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.210201>

水平温差对环形浅液池内 Marangoni-热毛细对流的影响

Effect of horizontal temperature difference on Marangoni-thermocapillary convection in a shallow annular pool

物理学报.2015, 64(14): 140202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.140202>

轴对称构件受力分析的插值粒子法

Interpolating particle method for mechanical analysis of space axisymmetric components

物理学报.2015, 64(10): 100204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.100204>

大气风场和温度对无线电声波探测系统探测高度影响的数值研究

A numerical study of effects on detection height of a radio acoustic sounding system influenced by atmospheric wind and temperature

物理学报.2015, 64(10): 100205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.100205>

镁基合金自由枝晶生长的相场模拟研究

Phase-field modeling of free dendritic growth of magnesium based alloy

物理学报.2015, 64(6): 060201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.060201>

点堆中子动力学方程组曲率权重法的解*

李明芮¹⁾ 黎浩峰¹⁾²⁾ 陈文振^{1)†} 郝建立¹⁾¹⁾(海军工程大学核能科学与工程系, 武汉 430033)²⁾(海司核安全部, 北京 100841)

(2015年5月26日收到; 2015年7月10日收到修改稿)

针对核反应堆安全工程对某些数值计算结果要求较高的精度和正的误差, 以及舰船核反应堆机动性对计算速度的要求, 需要从数学上寻找一种新的数值计算方法, 以满足实际曲线向上凸或向下凹时计算值总是略高于真实值, 且误差不大于欧拉法和改进的欧拉法所得值. 本文研究曲率权重法求解点堆中子动力学方程组, 该方法是在曲率圆法的基础上引入权重的思想来衡量间隔步长上两个曲率对该步长曲率平均值的贡献. 与欧拉法和改进的欧拉法比较, 曲率权重法的计算结果总是能够高于真实值或有正的误差, 且精度和计算速度得到明显提升. 将该方法用于次临界堆阶跃和线性引入反应性时中子密度的求解, 能够快速得到满足计算要求和高精度的数值结果.

关键词: 曲率权重法, 中子动力学, 点堆, 次临界堆**PACS:** 02.60.Cb, 25.85.Ec, 28.20.-v**DOI:** 10.7498/aps.64.220201

1 引言

随着计算机硬件和数值模型的发展, 微分方程高精度、高效率的计算方法逐渐受到重视. 近几年来, 针对不同条件下提出的傅里叶拟谱法^[1]、双线性插值算法、改进的复变量无单元 Galerkin 方法、离散单元法和格子 Boltzmann 方法等大量先进的计算方法和数值模型, 能够为核反应堆工程中的计算方法研究提供理论基础. 但是, 中子动力学方程是一刚性常微分方程组, 在反应堆内瞬发中子与缓发中子寿命存在若干个数量级之差, 导致解的快与慢变化成分的时间常数也有数量级之差^[2], 在某些约束条件下对其进行数值计算时, 效率较低, 计算时间通常比物理时间长, 给实际应用带来不利的影响^[3]. 另外, 反应堆工程还要求某些数值计算结果具有较高的精度, 且只能取正的误差^[4,5]. 为求解刚性方程组, 国内外学者开展了大量的研究. 文献^[6]利用高阶泰勒展开式求解微分

方程的方法, 得到了点堆中子动力学方程组的近似解; 文献^[7—10]提出分数阶的点堆动力学模型法, 通过引入分数阶指数来降低变化成分的时间差, 从而降低方程组的刚性; Patra 和 Ray^[11,12]利用 Haar 小波运算法得到了中子动力学方程组的近似解, 但受到设置配置点数的限制, 误差相对较大; 文献^[13]则采用指数函数和周期函数提出基函数法得到了点堆方程组的有效数值解; 而文献^[3]利用同伦分析法得到了阶跃反应性输入下六组点堆动力学方程组的分析解等. 但现有的求解方法还无法同时满足对正的误差、速度与精度的要求. 为此, 本文提出一种新的数值解法——曲率权重法, 将该方法运用到点堆次临界的启动和运行中, 结合去耦合的方法消除方程组的刚性^[5], 求解中子动力学方程组, 并与欧拉法^[14,15]、改进的欧拉法^[16,17]和龙格-库塔法^[18]计算结果进行比较. 结果表明, 该方法能够满足舰船核动力装置实际运行在计算上对安全、速度与精度的需要.

* 国家自然科学基金(批准号: 11301540)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: cwz2@21cn.com

2 曲率权重法

在计算微分方程的解时, 欧拉法采用切线段代替曲线段, 当曲线向下凹时, 计算值总低于实际值, 而曲率圆弧段代替切线段的数值计算方法则是一个新的方法, 能够使计算值在满足精度要求内略大于真实值.

图1给出了向下凹与向上凸的曲线, 过 $M(x, y)$ 点做曲线的曲率圆. 曲率圆方程为

$$(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 = R^2. \quad (1)$$

由(1)式可得曲线方程为

$$y = \beta \pm \sqrt{R^2 - (x - \alpha)^2}, \quad (2)$$

其中 (α, β) 为曲率圆心的坐标. 当曲线为下凹时, (2)式取“-”, 当曲线为上凸时, (2)式取“+”.

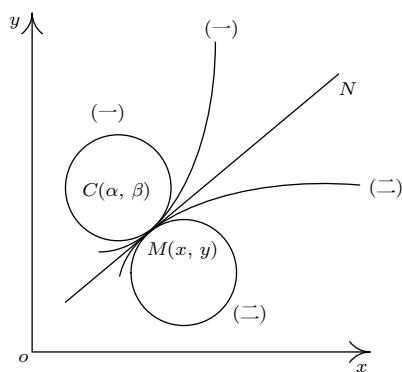


图1 曲率圆示意图

Fig. 1. Curvature circle diagram.

由数学知识可以得到曲率的表达式为

$$K_M = \frac{1}{R} = \left| \frac{y''}{(1 + y'^2)^{3/2}} \right|. \quad (3)$$

又由于半径 MC 与切线 MN 垂直, 即

$$y' = -\frac{x - \alpha}{y - \beta}. \quad (4)$$

联立(1), (3)和(4)式, 整理得

$$\alpha = x - \frac{y'(1 + y'^2)}{y''}, \quad (5)$$

$$\beta = y + \frac{1 + y'^2}{y''}. \quad (6)$$

曲率能够描述曲线的弯曲程度, 在用循环迭代解微分方程时, 需要利用(3)式计算曲率. 以往曲率圆法^[5]的作法是直接利用第 i 个步长的曲率作为计算第 $i+1$ 个步长的计算值, 这样就增加了计算误差, 而且当实际曲线向下凹时, 曲率圆法计算值能

够略高于真实值, 但当实际曲线向上凸时, 不能满足计算值略高于真实值的要求. 本文提出曲率权重法来减小引入的误差, 增大步长, 提高计算速度, 并能够适用向下凹或向上凸的各种类型的曲线.

由(3)式可以看出, 曲线的曲率表达式有两个变量 y' 和 y'' , 为实现快速、准确的需要, 定义如下导数权重和曲率权重参数:

$$y'_{iav} = y'_i \frac{y'_i}{y'_i + y'_{i+1}} + y'_{i+1} \frac{y'_{i+1}}{y'_i + y'_{i+1}}, \quad (7)$$

$$m_i = \frac{R'_i}{(R'_i + R_i^*)^2}, \quad (8)$$

$$n_i = \frac{R_i^*}{(R'_i + R_i^*)^2}, \quad (9)$$

$$R_i = R'_i + kh(R'_i m_i + R_i^* n_i), \quad (10)$$

其中, y'_{iav} 为利用导数权重参数计算的一阶导数值; R'_i 和 R_i^* 分别为(3)式计算的第 $i, i+1$ 步长末曲率半径; h 为计算时间步长; k 为权重系数, 一般情况下, 上凸曲线 k 取负值, 下凹曲线 k 取正值, 通过大量计算示例, k 数值范围在 0.001—0.01 区间, 计算精度最高.

曲率权重法具体计算步骤如下: 第一步, 以 (x_i, y_i) 为起点, 由给定要求解的微分方程式计算初始点的 y'_i 和 y''_i ; 第二步, 将 x_i, y_i, y'_i 和 y''_i 代入(3), (5)和(6)式, 得到第 i 步长 α_i, β_i 和 R'_i 的值; 第三步, 取步长为 h , 将 $x_{i+1} = x_i + h, \alpha_i, \beta_i$ 和 R'_i 的值代入(2)式, 得到 y_{i+1}^* ; 第四步, 将 y_{i+1}^* 代入微分方程, 计算 y'_{i+1} 值, 然后将 y'_{i+1} 代入(7)式, 计算 y'_{iav} 值作为计算第 i 步长末 y_{i+1} 的导数值, 再代入微分方程, 求出 y''_{i+1} ; 第五步, 将 x_i, y_{i+1}^*, y'_{iav} 和 y''_{i+1} 代入(3)式, 得到新的曲率半径 R_i^* ; 第六步, 通过(8), (9)和(10)式, 计算得到 R_i ; 第七步, 将 α_i, β_i 和 R_i 的值代入(2)式, 得到第 i 个步长末的 y_{i+1} 值.

3 次临界堆中子动力学方程组

反应堆次临界状态下, 只考虑单组缓发中子效应时, 点堆中子动力学方程组为^[1]

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta}{l} n(t) + \lambda C(t) + q, \quad (11)$$

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{\beta}{l} n(t) - \lambda C(t), \quad (12)$$

$$\rho(t) = \rho_s + rt, \quad (13)$$

式中, $n(t)$ 和 $C(t)$ 分别为 t 时刻的中子密度和缓发中子先驱核浓度, 单位为 cm^{-3} ; ρ 为反应堆反应性;

β 为缓发中子总份额; l 为瞬发中子平均寿命, 单位为 s; λ 为缓发中子先驱核衰变常数, 单位为 s^{-1} ; q 为外中子源源强, 单位为 $(s \cdot cm^3)^{-1}$; r 为反应性引入速率, 单位为 s^{-1} ; t 为提棒时间, 单位为 s; ρ_s 为反应堆停堆深度.

当控制棒连续提棒时, 反应堆线性引入反应性^[19,20], 由(13)式可知, $d\rho(t)/dt = r$. 利用去耦合法, (11)式对时间 t 求导消去 $dC(t)/dt$, 可得

$$l \frac{d^2 n(t)}{dt^2} + (\lambda l + \beta - \rho) \frac{dn(t)}{dt} - (\lambda \rho + r) n(t) = \lambda l q. \quad (14)$$

根据参考文献[21,22], 上式满足瞬跳近似要求, 故(14)式对应的方程的 $l \frac{d^2 n(t)}{dt^2}$ 项可以忽略. 将(14)式化简为

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\lambda(\rho_s + rt) + r}{\lambda l + \beta - (\rho_s + rt)} n(t) + \frac{\lambda l q}{\lambda l + \beta - (\rho_s + rt)}. \quad (15)$$

用曲率权重法计算曲率表达式的过程中, 函数的二阶导是由一阶导求导得到, 故在使用该方法计算中子密度数值解时, 中子密度二阶导不能用(14)式, 这是由于(15)式是由(14)式省略二阶导数项得到, 两个表达式的误差来源和大小不同. 对(15)式两边同时求导, 得

$$\begin{aligned} \frac{d^2 n(t)}{dt^2} = & \frac{\lambda(\rho_s + rt) + r}{\lambda l + \beta - (\rho_s + rt)} \frac{dn(t)}{dt} \\ & + \left\{ \frac{\lambda r}{\lambda l + \beta - (\rho_s + rt)} \right. \\ & + \left. \frac{\lambda r(\rho_s + rt) + r^2}{[\lambda l + \beta - (\rho_s + rt)]^2} \right\} n(t) \\ & + \frac{\lambda l q r}{[\lambda l + \beta - (\rho_s + rt)]^2}. \end{aligned} \quad (16)$$

当反应堆阶跃引入反应性, 即 $r = 0$, 由(15)和(16)式得

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\lambda \rho}{\lambda l + \beta - \rho} n(t) + \frac{\lambda l q}{\lambda l + \beta - \rho}, \quad (17)$$

$$\frac{dn^2(t)}{dt^2} = \frac{\lambda \rho}{\lambda l + \beta - \rho} \frac{dn(t)}{dt}. \quad (18)$$

4 计算实例和分析

为了验证曲率权重法计算点堆中子动力学方程组数值解的有效性, 以 ^{235}U 作燃料的热堆中, 取 $\lambda = 0.0774 s^{-1}$, $l = 10^{-4} s$, $\beta = 0.0065$, $q = 10^8 (s \cdot cm^3)^{-1}$, $n(0) = 10^5 cm^{-3}$, 根据不同的

反应性引入方式, 计算中子动力方程组的解, 并与欧拉法和改进的欧拉法的计算结果进行比较.

实例1 反应堆连续提棒时. 取停堆深度 $\rho_s = -0.02$, 反应性引入速率 $r = 0.0001 s^{-1}$, 计算 10 s 以内连续提棒时, 反应堆内的中子密度. 在计算过程中发现, 中子密度随时间变化曲线的曲率变化很小, 所以曲率变化对微分方程组的计算精度的影响很小. 采用曲率圆法计算也能满足计算要求, 但是在曲率变化较大的情况下, 具有局限性. 故需要采用本文曲率权重法进行计算分析, 系数 k 取值为 -0.001 . 其中选取步长 $h = 0.0001 s$ 的四阶龙格-库塔法的计算结果作为精确解, 比较各种不同的数值计算方法, 计算结果如表1所列.

在计算过程中发现, 使用曲率权重法、欧拉法和改进的欧拉法的计算时间比为 1 : 25 : 27, 使用曲率圆法计算速度得到很大程度的提高, 这对舰船核动力运行现场要求提高计算速度具有重要意义.

从表1计算数据可以看出: 欧拉法计算结果随着步长的增大, 计算精度快速下降, 虽然计算结果高于精确解, 但是精度低, 不能满足某些反应堆安全工程计算精度在千分之五以内的要求; 曲率权重法增大计算步长时, 精度下降较慢, 而且从计算结果可以看出, 计算值在满足高于精确解的情况下, 计算精度在千分之五以内, 满足实际计算精度要求; 改进的欧拉法虽然精度高, 但计算速度慢, 计算值低于精确解.

实例2 反应性 $\rho = -0.02$ 阶跃输入. 同样选取步长 $h = 0.0001 s$ 的四阶龙格-库塔法的计算结果作为精确解, 利用曲率权重法求解反应堆中子密度, 并与欧拉法和改进的欧拉法的计算结果进行比较, 在计算过程中发现系数 k 取值为 -0.001 时计算结果比较好, 如表2所列.

结果表明: 曲率权重法、欧拉法和改进的欧拉法的计算时间为 7 : 35 : 40, 使用曲率权重法计算速度得到明显提高; 在使用曲率权重法计算时, 提高步长对结果精度影响不大, 与精确解比较, 相对误差在千分之五以内, 满足反应堆工程计算精度的要求; 与欧拉法比较, 曲率权重法计算精度明显高于欧拉法, 而且提高步长后, 欧拉法精度快速下降, 不能满足反应堆工程计算精度与正误差的要求; 与改进的欧拉法比较, 曲率权重法计算值总是高于精确解, 而改进的欧拉法计算值低于精确解.

表1 线性引入反应性时堆内中子密度变化 (单位: 10^5 cm^{-3})Table 1. Neutron density change of linear introduced reactivity in reactor (unit: 10^5 cm^{-3}).

时间/s	精确解	曲率权重法		欧拉法		改进的欧拉法	
	$h = 0.0001 \text{ s}$	$h = 0.1 \text{ s}$	$h = 1 \text{ s}$	$h = 0.1 \text{ s}$	$h = 1 \text{ s}$	$h = 0.1 \text{ s}$	$h = 1 \text{ s}$
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
1	1.231589	1.231704	1.231864	1.232148	1.237365	1.231588	1.231488
2	1.452070	1.452286	1.452588	1.453125	1.462976	1.452068	1.451878
3	1.662077	1.662385	1.662810	1.663573	1.677523	1.662075	1.661807
4	1.862212	1.862601	1.863132	1.864096	1.881657	1.862209	1.861871
5	2.053039	2.053501	2.054123	2.055265	2.075991	2.053035	2.052637
6	2.235093	2.235620	2.236319	2.237617	2.261102	2.235089	2.234638
7	2.408879	2.409462	2.410227	2.411662	2.437533	2.408874	2.408378
8	2.574871	2.575504	2.576323	2.577877	2.605797	2.574866	2.574331
9	2.733520	2.734197	2.735058	2.736715	2.766377	2.733514	2.732946
10	2.885249	2.885965	2.886860	2.888605	2.919729	2.885243	2.884648

表2 阶跃引入反应性时堆内中子密度变化 (单位: 10^5 cm^{-3})Table 2. Neutron density change of step introduced reactivity in reactor (unit: 10^5 cm^{-3}).

时间/s	精确解	曲率权重法		欧拉法		改进欧拉法	
	$h = 0.01 \text{ s}$	$h = 0.1 \text{ s}$	$h = 1 \text{ s}$	$h = 0.1 \text{ s}$	$h = 1 \text{ s}$	$h = 0.1 \text{ s}$	$h = 1 \text{ s}$
0	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
1	1.226902	1.227013	1.227253	1.227548	1.233592	1.226901	1.226771
2	1.440934	1.441143	1.441596	1.442152	1.453543	1.440931	1.440687
3	1.642824	1.643121	1.643761	1.644547	1.660649	1.642820	1.642474
4	1.833261	1.833636	1.834440	1.835429	1.855661	1.833257	1.832822
5	2.012897	2.013338	2.014286	2.015452	2.039284	2.012892	2.012379
6	2.182342	2.182841	2.183915	2.185234	2.212184	2.182336	2.181755
7	2.342175	2.342724	2.343907	2.345358	2.374987	2.342169	2.341530
8	2.492942	2.493535	2.494808	2.496373	2.528283	2.492935	2.492246
9	2.635156	2.635787	2.637137	2.638797	2.672626	2.635149	2.634418
10	2.769303	2.769965	2.771379	2.773119	2.808540	2.769296	2.768529

5 结 论

本文研究曲率权重法来计算点堆中子动力学方程组的数值解, 通过验证表明该方法能够满足计算结果只能取正相对误差、较高的计算精度和较短的计算时间的要求. 与欧拉法和改进的欧拉法计算结果相比较: 曲率权重法的计算值总是高于真实值, 计算精度高于欧拉法和改进的欧拉法; 提高计算步长后, 精度的降低明显低于这两种计算方法, 这就能够大幅降低计算时间, 满足舰船核动力机动性对计算速度的要求. 曲率权重法在应用到次临界

堆线性和阶跃引入反应性时, 提高了计算速度和精度, 得到了满意的结果.

参考文献

- [1] Lü Z Q, Zhang L M, Wang Y S 2014 *Chin. Phys. B* **23** 120203
- [2] Huang Z Q 2007 *Kinetics Base of Nuclear Reactor* (Beijing: Peaking University Press) p174 (in Chinese) [黄祖洽 2007 核反应堆动力学基础 (北京: 北京大学出版社) 第174页]
- [3] Zhu Q, Shang X L, Chen W Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 070201 (in Chinese) [朱倩, 商学利, 陈文振 2012 物理学报 **61** 070201]

- [4] Cai Z S, Cai Z M, Chen L S 2001 *Nucl. Power Engng.* **22** 390 (in Chinese) [蔡章生, 蔡志明, 陈力生 2001 核动力工程 **22** 390]
- [5] Cai Z S 2005 *Nuclear Power Reactor Neutron Dynamics* (Beijing: National Industry Press) pp171–177 (in Chinese) [蔡章生 2005 核动力反应堆中子动力学 (北京: 国防工业出版社) 第 171—177 页]
- [6] Li H F, Chen W Z, Zhu Q, Luo L 2008 *Atom. Energy Sci. Technol.* **42**(sl) 162 (in Chinese) [黎浩峰, 陈文振, 朱倩, 罗磊 2008 原子能科学技术 **42**(sl) 162]
- [7] Vyawahare V A, Nataraj P S V 2013 *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat.* **18** 1840
- [8] Nowak T K, Duzinkiewica K, Riotrowski P 2014 *Ann. Nucl. Energ.* **73** 317
- [9] Chakraverty S, Tapaswini S 2014 *Chin. Phys. B* **23** 120202
- [10] Ray S S, Patra A 2013 *Ann. Nucl. Energ.* **54** 154
- [11] Patra A, Ray S S 2014 *Ann. Nucl. Energ.* **68** 112
- [12] Patra A, Ray S S 2014 *Ann. Nucl. Energ.* **73** 408
- [13] Chen W Z, Xiao H G, Li H F, Chen L 2015 *Ann. Nucl. Energ.* **75** 353
- [14] Tasic B, Mattheij R M 2004 *Appl. Math. Comput.* **156** 633
- [15] Butcher J C 2000 *J. Comput. Appl. Math.* **125** 1
- [16] Wu X Y 1998 *Comput. Math. Appl.* **35** 59
- [17] Wu X, Xia J 2000 *Comput. Math. Appl.* **39** 247
- [18] Sánchez J 1989 *Nucl. Sci. Eng.* **103** 94
- [19] Zhang F, Chen W Z, Gui X W 2008 *Ann. Nucl. Energ.* **35** 746
- [20] Li H F, Chen W Z, Luo L, Zhu Q 2009 *Ann. Nucl. Energ.* **36** 427
- [21] Li H F, Chen W Z, Zhang F, Chen Z Y 2010 *Prog. Nucl. Energ.* **52** 321
- [22] Li H F, Chen W Z, Zhang F, Shang X L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2375 (in Chinese) [黎浩峰, 陈文振, 张帆, 商学利 2010 物理学报 **59** 2375]

Curvature weight method of solving the point reactor neutron kinetic equations*

Li Ming-Rui¹⁾ Li Hao-Feng¹⁾²⁾ Chen Wen-Zhen^{1)†} Hao Jian-Li¹⁾

1) (Department of Nuclear Energy Science and Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

2) (Naval Nuclear Safety Department, Beijing 100841, China)

(Received 26 May 2015; revised manuscript received 10 July 2015)

Abstract

The point kinetic equations are the system of a couple stiff ordinary differential equations. Many studies have focused on the development of more advanced and efficient methods of solving the equations, such as the high order Taylor polynomials method, the Haar wavelet operational method, the fractional point-neutron kinetic model method, the basis function method, the homotopy analysis method, and other methods. Most of these methods are successful in some specific problems, but still have, more or less, disadvantages. For example, the accuracy of the Haar wavelet operational method is limited by the collocation points, and it needs more computing time for a high precision. Aiming at the requirements that some numerical calculation results must have the higher precision and only the positive error in the nuclear reactor safety engineering and ship reactor for the maneuverability, in this paper we try to look for a new numerical method to satisfy that the calculation value is slightly higher than the real value when the actual curve is upward convex or downward concave, and the error is not greater than that by the Euler and improved Euler method. The new method is so-called the curvature weight (CW) method, which is based on the curvature circle method and considers the contributions of two curvatures at the interval step point to the average curvature inside the interval step. Using the decoupling method to remove the stiffness of equations and the instantaneous jump approximation to derive the neutron differential equations, the first and second derivative of neutron density are obtained. Then the CW method is used to solve the point reactor neutron kinetic equations, and thus obtaining the numerical solution. Compared with the results by the Euler and improved Euler method, the numerical calculation results by the CW method are always higher than the real value, and the calculation accuracy and speed are improved significantly. When this new method is used to solve the point reactor neutron differential equations with the step and linear reactivity inserted into the subcritical reactor, the numerical results which satisfy the requirements of positive calculation error and high precision can be obtained quickly. After improving the calculation step length, the precision reduction by the CW method is significantly lower than that by the Euler and improved Euler method. So the CW method can greatly shorten the total computing time, and it is also effective for most of differential equation systems.

Keywords: curvature weight method, neutron kinetics, point-reactor, subcritical reactor

PACS: 02.60.Cb, 25.85.Ec, 28.20.-v

DOI: 10.7498/aps.64.220201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11301540).

† Corresponding author. E-mail: cwz2@21cn.com