

双盘斩波器的设计与优化

李新喜 黄朝强 王 燕 陈 波

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 绵阳 621900)

摘要 中子双盘位相斩波器目前广泛地应用于中子散射设备上,其作用是将连续中子束斩成脉冲中子束。本文结合拟建飞行时间模式中子反射谱仪,详细介绍了中子双盘位相斩波器的设计,并从原理上对斩波器主要物理参数进行了优化,采用 McStas 程序对其子注量率情况进行了模拟计算,为斩波器设计制造提供参考。

关键词 斩波器, 设计, 优化

中图分类号 TL817.8

在稳态反应堆上获取飞行时间(Time of Flight, TOF)方法所需的脉冲中子束流,通常采用斩波器(Chopper)将连续中子束切割为一系列宽度相等的中子脉冲束^[1]。斩波器一般为中子吸收材料做成的高速旋转柱状体或圆盘,上有一条或多条可让中子通过的狭缝。常见的斩波器有转盘式、直缝 Fermi 转子、曲缝 Fermi 转子等类型^[2]。随着材料研究的快速发展,一大批 TOF 模式的中子反射谱仪相继建成^[3-5],对作为谱仪的关键部件的中子斩波器的精度要求也越来越高。目前,多数 TOF 中子散射谱仪采用转盘式中子斩波器,本文对双盘位相中子斩波器进行了理论探讨和优化设计。

1 基本原理与设计优化

双盘斩波器第一斩盘将连续中子束斩成脉冲中子束,由第二斩盘选择一定的中子波段。斩出脉冲的宽度及波长等参数与第一斩盘和第二斩盘的间距、狭缝宽度以及相对位相和转速有着密切关系。斩波器的设计需根据基本的输入参数,将相关物理参数匹配起来。

1.1 斩盘的窗口形状

斩盘窗口常见的有矩形窗口(图 1a)和扇形窗口(图 1b)。矩形窗口斩盘有束流起始信号不同步引起的起始信号测量误差,故通常采用扇形窗口,其切边各点出入束流同步,减小了起始时间偏差。

1.2 双斩盘间距的初步考虑

图 2 为双盘位相斩波器示意图。圆盘半径为 r ,刚性连接,1[#]斩盘与 2[#]斩盘间的距离为 L 。1[#]和 2[#]

斩盘上分别开有张角为 ϕ_1 和 ϕ_2 的扇形狭缝,两狭缝之间的位相差为 ϕ 。狭缝进入中子束流的时间先后顺序依次为 A、B、C 和 D。由图 2,在斩波器中飞行时间最长($t_{\max}$)的中子是依次经过 A 点到达 D 点的中子,对应速度 $v_{\min}$ 。同样,依次经过 B 点到达 C 点的中子飞行时间最短($t_{\min}$),对应速度 $v_{\max}$ 。速度 v 与波长 λ 之间的关系为:

$$v = \frac{h}{m_n \lambda} \quad (1)$$

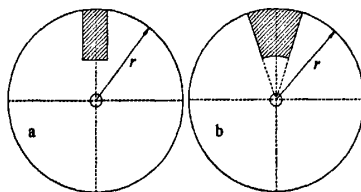


图 1 斩波器通常的窗口设计
Fig.1 General window design of a disk chopper

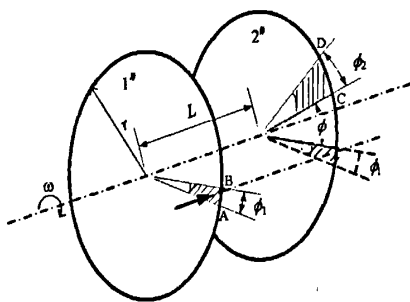


图 2 双盘位相斩波器示意图
Fig.2 Schematic diagram of double disk chopper

其中, m_n 为中子质量, h 为普朗克常数。可以求得波长范围:

$$\lambda_{\min} = \frac{h\phi}{m_n L \omega}, \quad \lambda_{\max} = \frac{h(\phi_1 + \phi_2 + \phi)}{m_n L \omega} \quad (2)$$

在时间-距离的一维坐标系内, 中子的运动可用下式描述:

$$t(z) = c\lambda z + t(0) \quad (3)$$

式中, c 为常数($c=m_n/h=2527.77 \mu\text{s}/\text{nm}\cdot\text{m}$)。 z 是波长为 λ 的中子在 t 时刻的位置。不同波长、不同时间的中子在斩波器中的位置如图 3 所示。

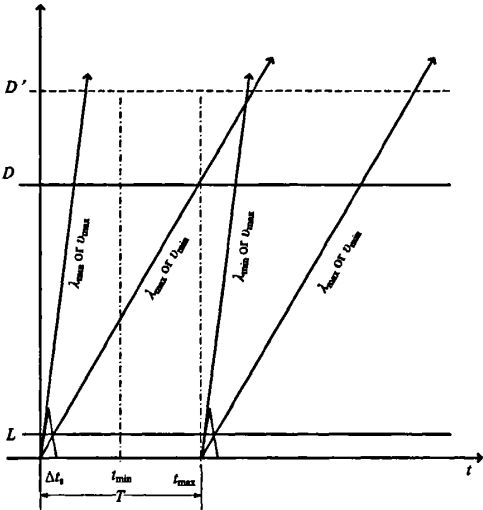


图 3 不同波长中子的飞行示意图
Fig.3 Flight of neutrons in different wavelengths

中子经过斩盘 1*后形成脉冲宽度 Δt_s 与 ϕ_1 的关系为:

$$\Delta t_s = \phi_1 / \omega \quad (4)$$

波长分辨可表示为:

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{\partial \lambda}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial \phi}\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial L}\right)^2} \quad (5)$$

式中, 时间误差包括起始信号误差 δt_b 和由于测量时间道宽引起的误差 δt_c , δL 为双盘间距测量误差。

由图 2, 假设第一斩盘窗口张角 ϕ_1 相对应的弧线宽为 w_1 , 第二斩盘的窗口张角 ϕ_2 相对应的弧线宽

为 w_2 , 双盘窗口位相差 ϕ 相对应的弧线宽 Δl , 斩盘的旋转角速度为 ω 。则相应的关系式可表示为:

$$t_i = \frac{L}{v(\lambda_i)} \quad (6)$$

$$t_{\min} = \frac{\Delta l}{\omega r}, \quad t_{\max} = \frac{\Delta l + w_1 + w_2}{\omega r} \quad (7)$$

式中, v 是中子速度($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

由式(1)~(7)式, 不难求得:

$$\lambda_{\max} - \lambda_{\min} = \frac{w_1 + w_2}{c \omega r L} \quad (8)$$

最小波长 $\lambda_{\min}$ 由 Δl 和 ω 确定。除这两个参数外, $\lambda_{\max}$ 还受第一斩盘窗口宽度 w_1 限制。而 w_1 和 ω 又直接影响波长分辨, 狭缝越窄, 转速越快, 分辨相应就好, 由式(8)可知, 这样中子波段就越窄, 通过的中子也就越少, 从而中子通量越小。因此, 斩波器的设计需要根据客观需要将相关参数自洽起来。

斩波器的物理参数间是相互关联的, 设计通常根据客观条件固定一些参数。考虑表 1 中给出参数情况, 为了考察盘间距与斩盘间关系, 计算了双盘间距与斩盘转速间关系(图 4)。由图可知, 双盘间距 L 大致应该所取的数值范围应当在 80~240 mm。

表 1 斩波器设计的客观物理参数
Table 1 The objective physical parameters for chopper design

w_1/mm	w_2/mm	$\Delta l/\text{mm}$	$\lambda_{\min}/\text{nm}$	$\lambda_{\max}/\text{nm}$	r/mm
2~4	13.44	4.36	0.25	1.25	250

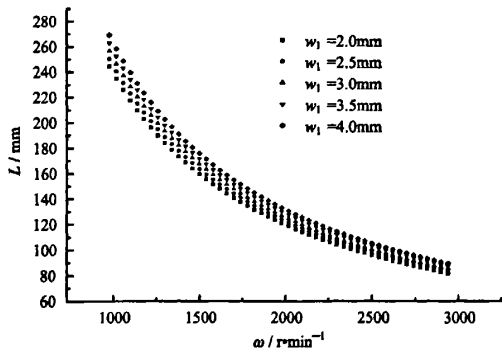


图 4 双盘间距与斩盘转速的关系
Fig.4 Length between two-disks vs rotation frequency

1.3 双斩盘的速度及间距选择

电动机转速不可能过大, $\lambda_{\min}$ 也受限制, 转速宜选择在图 5 的平滑区($1900\sim 2200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)。电动机会有有一定的转动偏差, 若转频偏差 $<1\%$, 计算主要

考虑引起测量误差较大的 $\lambda_{\min}$ 波动^[4]。结合谱仪的波长最佳分辨, 将波长波动限定在 $\delta\lambda_{\min}\leq 0.0025$ nm, 经计算, 在限定波动范围内, 双盘间距 $L=120$ mm 较易与其它物理参数匹配。

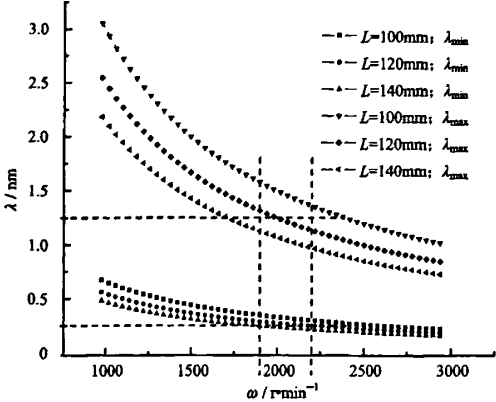


图 5 波长范围与转速的关系
Fig.5 Range of wavelength vs rotation frequency, $w_1=2$ mm

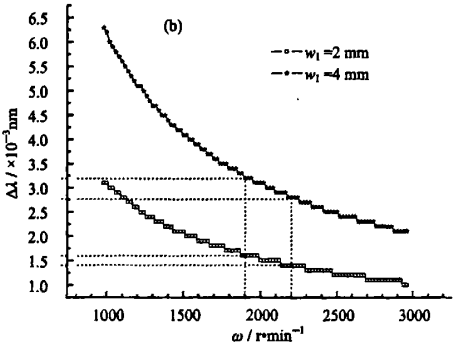
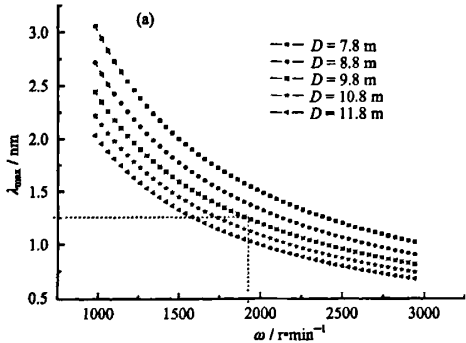


图 6 最大波长(a)、斩波器分辨(b)与斩盘转速的关系
Fig.6 Maximal wavelength (a) and chopper resolution (b) at different rotation frequencies

2 斩波器的波长分辨

由(4)式和 $v=1/c\lambda=D/t$, 第一斩盘狭缝宽度和转速与波长分辨关系为:

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta t}{cD} \approx \frac{w_1}{cD\omega r} \tag{10}$$

图 6(b)给出了斩波器分辨与斩盘转速之间的函数关系曲线。

3 斩波器后中子注量与第一斩盘狭缝宽度间的关系

第一狭缝宽 2~4 mm, 其它参数见表 2, 用 McStas^[6]程序对斩波器后的注量率进行了模拟计

1.4 斩波器距探测器之间距离选择

实际使用中, 相邻中子到达探测器的时间间隔非常短, 探测器无法将不同波长的中子区分开来, 故需配备时间甄别器加以区分。由图 3, 为确保脉冲不交叠(overlap), 通常在前一中子脉冲的最慢中子到达探测器后, 后一中子脉冲才发出, 此时间间隔利于时间甄别器进行区分, 斩波器至探测器的距离 D 最好满足^[7]:

$$D \leq \frac{2\pi h}{m_n \omega \lambda_{\max}} - L \tag{9}$$

实际的中子能谱的波长范围为 0.25~1.25 nm (图 6(a)), 由式(9), 最低转速为 1900 r·min⁻¹时, $D=9.8$ m 恰好能保证最大波长 ≤ 1.25 nm, 故第二斩盘距探测器的距离最好不超过 9.8 m。

算, 计算结果(图 7)表明, 中子注量率呈线性增长。这与文献[7]的函数关系一致。

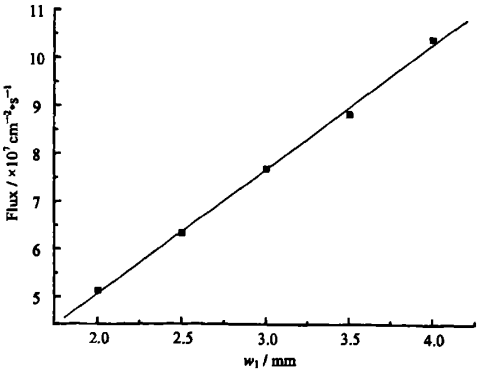


图 7 斩波器后中子通量与斩波器第一窗口线宽的模拟结果
Fig.7 Simulated neutron flux with the chopper vs widow width of Disk 1

表 2 模拟计算的主要输入参数
Table 2 Parameters for the neutron flux simulation with the McStas codes

注量率 Flux /cm ² ·s ⁻¹	ω / r·min ⁻¹	w ₂ /mm	Δl /mm	L /mm	r /mm	D /m
1.4×10 ¹¹	1900	13.44	4.36	120	250	4.0

4 讨论与结论

由式(8)，转速越大，选择的波段就越窄，相应的中子通量就低。本文结合实际的中子输入谱，转速选择于图 5 和图 6 的平滑区较低部分，以减小波段波动影响。为提高中子通量，在客观条件限定

下，选择的参数斩速为 ω = 1900~2200 r·min⁻¹，双盘间距 L = 120 mm，飞行距离 D = 9800 mm。

提高 TOF 模式中子反射谱仪的整体分辨涉及一系列参数的选择^[4]，表 3 给出了两组设计参数下的最佳分辨 Δλ_{opt}。但由于马达转动的不稳定性及测量误差等，实际的斩波分辨低于最佳分辨。

表 3 优化设计后的双盘位相斩波器的最佳波长分辨(Δλ_{opt})
Table 3 Optimal wavelength resolution of double-disk chopper

Δλ _{opt} /nm	w ₁ /mm	w ₂ /mm	L /mm	ω / r·min ⁻¹	r /mm	D /mm
1.6×10 ⁻³	2	13.44	120	1900	250	9800
2.8×10 ⁻³	4	13.44	120	2200	250	9800

针对中子斩波器的注量损失及其随斩盘间距的变化，采用 Mcstas 进行了模拟计算。然而，该模拟计算模型较为粗糙，同时中子飞到探测器距离较远，由图 7 的计算结果，此设计中子注量率损失在 3~4 个量级，略大于通常的中子斩波器通量损失率。但注量率与第一斩盘窗口线宽基本呈线性关系，说明斩波器相关物理参数的设计能够自洽。

参考文献

1 VanWell A A. Physica B, 1992, 180: 959–961

2 丁大钊, 叶春堂, 赵志祥, 等. 中子物理学. 北京: 原子能出版社, 2005. 584

3 DING Dazhao, YE Chuntang, ZHAO Zhixiang, *et al.* Neutron physics. Beijing: Atom Energy Press, 2005. 584

4 Kearley G J. Physica B, 1992, 180: 911–913

5 Penfold J. Physica B, 1991, 173: 1–10

6 Lechner R E. Physica B, 1992, 180: 973–977

7 <http://www.mcstas.org>

8 Mergia K, Apostolopoulos G. Neutron reflectometry-A probe for Materials Surfaces Austria: IAEA, 2006, 109

Design and optimization of a double-disk chopper

LI Xinxi HUANG Chaoqiang WANG Yan CHEN Bo

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract Double disk chopper is widely used in neutron scattering spectrometers, its main function is to cut the sequential neutrons into neutron pulses. Aiming at a time of flight neutron reflectometer under construction, we introduce the design of double disk chopper in detail. The resolution is optimized through theoretical calculation, and the neutron flux after the chopper is estimated using the McStas codes. The results can be a reference for double disk chopper design and production.

Key words Chopper, Design, Optimization

CLC TL817*.8