

CSNS 带宽限制中子斩波器系统的设计方法

蔡伟亮^{1,2} 王 平^{1,2} 张 清^{1,2} 耿艳胜^{1,2} 张文翔^{1,2}

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2 (东莞中子科学中心 东莞 523803)

摘要 带宽限制中子斩波器是中国散裂中子源上飞行时间中子散射谱仪不可缺少的关键设备之一,谱仪获得的中子能谱波段范围由带宽斩波器决定,其主要原理是通过转盘的机械式阻挡来对中子束流进行斩波,选择到达样品的中子波长范围,从而起到降低背底、提高信噪比的作用。本文介绍了带宽限制中子斩波器的基本原理及其设计要求,重点阐述了带宽限制中子斩波器系统的设计方法,提出了斩波器系统配置布局的基本原则,并给出了带宽斩波器各物理参数的计算公式。带宽斩波器的配置数量应满足谱仪背底要求,去除背底的斩波器应放置在束线前端并使谱仪所需波段的中子无损失通过,带宽选取的斩波器则尽可能放置在束线后端。另外,满足同相位、同转速、同开口角和转动方向相反等条件的双盘斩波器可以在一定程度上提高中子通量。本文的工作可为中国散裂中子源二十台中子散射谱仪斩波器系统的物理设计提供指导和参考。

关键词 中子斩波器, 带宽斩波器系统, 带宽限制, 转盘

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.120202

Design method of bandwidth limiting neutron chopper system in CSNS

CAI Weiliang^{1,2} WANG Ping^{1,2} ZHANG Qing^{1,2}

GENG Yansheng^{1,2} ZHANG Wenxiang^{1,2}

1(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

2(Dongguan Neutron Science Center, Dongguan 523803, China)

Abstract [Background] Bandwidth-limited neutron chopper (BWL choppers) is one of the indispensable key equipments in the time-of-flight neutron scatter of China spallation neutron source (CSNS), which decide the neutron energy spectrum obtained by detectors. The main principle is to chop the neutron beam to limit the neutron wavelength bandwidth at the neutron detector, so as to reduce the background and improve the signal-to-noise ratio. [Purpose] This study aims to design BWL chopper system reasonably and reduce faults. [Methods] The basis principle of BWL chopper was reviewed, Design method, basis configuration principle of BWL chopper and system layout were put forward. The formulas for calculating the physical parameters of BWL chopper were given. [Results] The configuration numbers of bandwidth chopper should meet the requirement of neutron scatter. The background removing chopper should be inserted in the front end of the beam line so that the neutrons in the required band of the spectrometer could pass through without loss, while the bandwidth selecting chopper should be placed at the back end as far as possible. In addition, the flux can be increased by double disk chopper that satisfies same phase, same speed, same slit angle but counter-rotating. [Conclusion] The work can guide the physical design of twenty neutron instruments of CSNS.

Key words Neutron chopper, Bandwidth limiting chopper system, Bandwidth limiting, Disk

中国科学院青年创新促进会(No.2016014)资助

第一作者: 蔡伟亮, 男, 1986 年出生, 2012 年毕业于华南农业大学, 现为硕士研究生, 研究领域为中子斩波器

通信作者: 王平, E-mail: wangping@ihep.ac.cn

收稿日期: 2018-08-07, 修回日期: 2018-10-16

Supported by Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (No.2016014)

First author: CAI Weiliang, male, born in 1986, graduated from South China Agricultural University in 2012, master student, focusing on neutron chopper

Corresponding author: WANG Ping, E-mail: wangping@ihep.ac.cn

Received date: 2018-08-07, revised date: 2018-10-16

中国散裂中子源(China Spallation Neutron Source, CSNS)是我国“十二五”期间重点建设的国家大科学装置,未来将成为世界四大散裂中子源之一,并成为世界一流的中子科学中心,为国内外科学家的基础科学研究和新材料研发提供高科技、多学科应用的大型研究平台^[1-3],CSNS规划建设二十台各具特色的中子散射谱仪。

带宽限制中子斩波器(以下简称带宽斩波器)是CSNS飞行时间型中子散射谱仪不可缺少的关键设备之一,主要原理是通过转盘的机械式阻挡来对中子束流进行斩波,选择到达样品的中子波长范围,起到降低背底、提高信噪比的作用^[4-7]。考虑到周期重叠(Frame Overlap)的影响,每台中子散射谱仪一般需要配置2~3台带宽斩波器,组成带宽斩波器系统,才能将背底降低到可接受的水平^[8-10]。CSNS属于短脉冲中子源(脉冲宽度440 ns,脉冲周期40 ms),根据中子源的特点,不同的中子散射谱仪进行带宽斩波器系统的物理设计时,在设计方法上有类似之处。

本文系统地介绍了带宽斩波器的基本原理,重点阐述了带宽限制中子斩波器系统的设计方法,提出了带宽斩波器系统配置布局的基本原则,并给出了设计实例。

1 基本原理

CSNS上的中子散射谱仪均采用飞行时间技术,即通过测量中子从慢化器飞行到探测器的飞行时间来得到中子能量(波长),散裂源产生的中子束流是脉冲式的,频率为25 Hz,飞行时间测量技术要求每个测量周期(如40 ms)内测量到的不同能量中子的飞行时间展宽必须小于或等于测量周期,否则会产生波长重叠,即上一个周期的慢中子可能会被探测器认为是这个周期的快中子,产生背底。

带宽斩波器安装在中子的飞行路径上,其转盘上带扇形开口,转动频率与CSNS频率相等或是分频、倍频关系,通过对转盘进行精密的同步相位控制(相位等于所需波段的中点波长中子从慢化器飞行到斩波器的飞行时间),使得只有在转盘扇形开口时间窗内(与所需波段带宽的时间展宽对应)的中子束才能通过(限制了能通过并到达样品的波段带宽),否则就被转盘上的中子吸收材料挡住吸收,最终使通过的中子束在探测器上的时间展宽不大于测量周期^[11-13]。如图1所示为带宽斩波器系统图, $\Delta\lambda$ 为最终到达样品位置的中子波长范围,亦即是单独通过各个斩波器中子波长范围的交集。谱仪的最大可用波段带宽由飞行距离和测量周期决定,不能改

变,通过调节各个带宽斩波器的相位,可以实现截取波段的平移,从而实现不同波段的测量(带宽不变)。

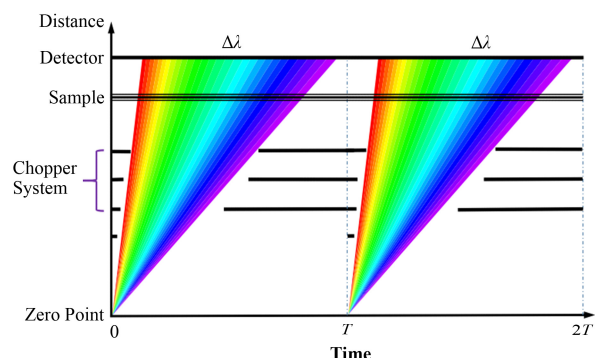


图1 带宽斩波器系统原理示意图
Fig.1 Schematic diagram of bandwidth chopper system

在设计带宽斩波器系统时,有以下几个方面需要着重考虑:1) 实现目标波段带宽的精确截取;2) 满足谱仪去除长波背底的要求;3) 尽量减少中子通量的损失;4) 经济适用性,如使用最少的斩波器数量满足谱仪的最小背底波长要求;5) 兼容性要求,即可以满足多种功能和工作模式的需求,如带宽加倍等。这既包含了对谱仪斩波器的功能性要求,也包含了经济性要求,但二者往往存在矛盾,需要寻求合适的平衡。评价一个谱仪斩波器系统设计的优劣,可以从上述几个方面加以比较,从而选出最符合谱仪要求的设计方案。

2 设计方法

2.1 最大可用波段带宽和波长分辨率

飞行时间型中子散射谱仪的最大可用波段带宽和波长分辨率分别由式(1)、(2)给出。

$$T \geq \frac{m \times L_{\max} \times \Delta\lambda_{\max}}{\hbar} \quad (1)$$

$$\delta\lambda = \frac{\hbar \times \delta t}{m \times L_{\max}} \quad (2)$$

式中: $\hbar$ 为普朗克常量; m 为中子质量; $L_{\max}$ 为从慢化器到探测器的总飞行距离; $\Delta\lambda_{\max}$ 为最大可用波段带宽(即带宽斩波器所截取的波段带宽); T 为散裂源飞行时间测量周期; δt 表示探测器的时间分辨率; $\delta\lambda$ 表示谱仪的波长分辨率。

从式(1)可以看出,谱仪最大可用的波段带宽 $\Delta\lambda_{\max}$ 在束线上的时间展宽不得超过测量周期 T ,亦即在测量周期 T 一定时,总飞行距离 $L_{\max}$ 越短,则最大可用波段带宽 $\Delta\lambda_{\max}$ 越大,可利用的中子通量越高,一般来说,为尽可能地利用更多的中子,谱

仪会使用整个测量周期内的波段带宽。但同时从式(2)可以看出,在探测器的时间分辨率 δt 一定时,较远的总飞行距离 $L_{\max}$ 有助于提高谱仪的波长分辨率 $\delta\lambda$,二者是互相矛盾的,因此在设计谱仪总飞行距离时,需要在最大可用波段带宽(即中子通量)和波长分辨率之间做取舍。

2.2 单个带宽斩波器的斩波计算

带宽斩波器的核心部件是转盘,转盘的几何尺寸设计将直接影响斩波效果。图2为带宽斩波器转盘示意图,其为一个边缘上开有扇形开口角 θ 的薄圆盘,转动中心距离束流中心距离为 R ,工作转速为 ω ,对应截取的波段范围为: $\lambda_0 - \Delta\lambda/2 \sim \lambda_0 + \Delta\lambda/2$ (其中: λ_0 为中点波长, $\Delta\lambda$ 为该斩波器所截取的波段带宽),该波段中子束流正好从扇形开口角通过,其他波长中子则会被转盘上的中子吸收材料所吸收。由于束流并不是理想的点,而是有一定尺寸($w \times h$)的截面,因此,转盘开口角在扫过束流截面时,存在有部分通过的时间,即带宽斩波器开口角内的中子通过率曲线并非理想的矩形波曲线,而是梯形曲线,其上升和下降曲线是有一定角度的斜线,如图3实线所示。

单盘斩波器的束流可通过时间可表示为:

$$\Delta t = \frac{\theta + \alpha}{\omega} \quad (3)$$

式中: α 为束流截面对应转盘上的圆心角,

$$\alpha = 2 \tan^{-1} \left(\frac{w/2}{R - h/2} \right), \quad \theta + \alpha \text{ 为束流可通过角度。}$$

单个带宽斩波器所能截取的波段范围可表示为:

$$\lambda_0 = \frac{h \times t_0}{m \times L} \quad (4)$$

$$\Delta\lambda = \frac{h \times \Delta t}{m \times L} = \frac{h \times (\theta + \alpha)}{m \times \omega \times L} \quad (5)$$

式中: L 为从慢化器到斩波器的距离,即斩波器的安装位置; t_0 为中点波长 λ_0 从慢化器飞行到斩波器的飞行时间(即斩波器相位)。

由式(4)和(5)可以看出,单个带宽斩波器截取 $\lambda_0 - \Delta\lambda/2 \sim \lambda_0 + \Delta\lambda/2$ 波段范围的中子,其中 λ_0 由斩波器相位 t_0 、斩波器与慢化器的距离 L 决定, $\Delta\lambda$ 则由斩波器工作转速 ω 、转盘开口角 θ 、斩波器与慢化器的距离 L 决定,与斩波器相位 t_0 无关。对安装在谱仪线上的带宽斩波器来说,调节斩波器相位 t_0 可以改变 λ_0 ,在斩波器角速度 ω 不改变时, $\Delta\lambda$ 也不可调。多个斩波器去截取同一波长范围的中子,在转速不变的情况下,各个斩波器的通过角度与安装位

置的比值为定值。

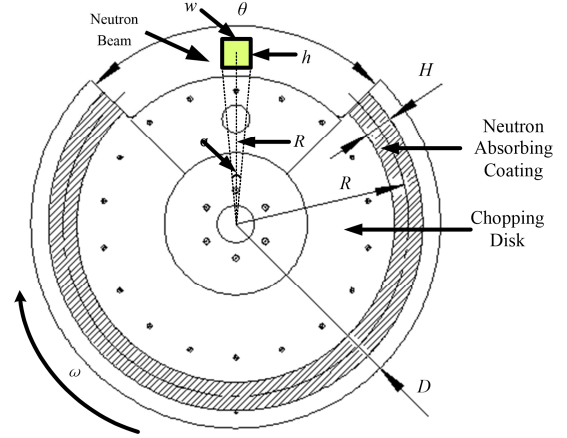


图2 带宽斩波器转盘

Fig.2 The disk of bandwidth chopper

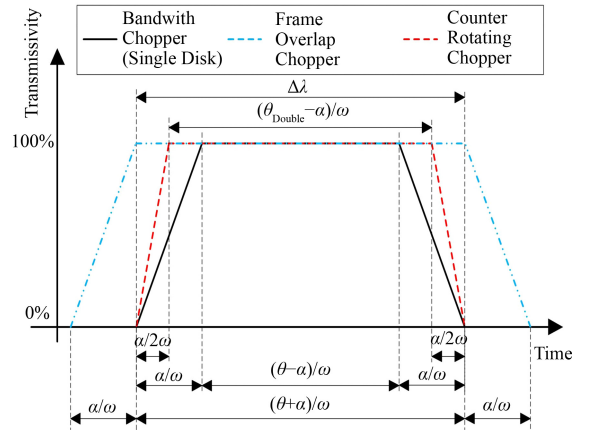


图3 带宽斩波器中子通过率曲线

Fig.3 Transmission percentage curve of BWL

在忽略束流强度随时间/波长变化的前提下,单个带宽斩波器截取波段束流的损失率可以用式(6)来表示:

$$S = \frac{\alpha}{\theta + \alpha} \quad (6)$$

从式(6)看出,在束流尺寸一定时,要减少束流的损失率 S ,就必须减小 α 或增大 θ 。减小 α ,也就是尽可能去增大带宽斩波器转轴中心到束流中心的距离 R 。另外一种方法是增大 θ 。从式(5)看,要在截取波段 $\Delta\lambda$ 不变的情况下增大 θ ,就必须增大 ω 或 L ,即提高斩波器的工作转速或者将斩波器放置在谱仪束线后端,这样能有效减少束流损失,提高谱仪中子通量。

2.3 多斩波器系统

飞行时间技术存在周期重叠(Frame Overlap)的问题,即对单个带宽斩波器来说,飞行时间为斩波器开口时间窗加上整数倍测量周期的慢中子也能通

过斩波器,形成长波中子背底,对探测器的测量结果造成影响。因此,中子散射谱仪通常需要多个带宽斩波器,各斩波器的位置需要进行合理配置。带宽斩波器在谱仪中所起到的作用有两种,分别是决定谱仪最终使用的波段带宽(带宽选择)和去除周期重叠背底(去除背底)。

在单个周期 T 内,安装在谱仪上距离慢化器 L 处的带宽斩波器所能截取的最大带宽 $\Delta\lambda_{\max}$ 可以由式(5)得出。多个带宽斩波器所组成斩波器系统的可选带宽最大值为各个单独斩波器的可选最大带宽的最小值,即:

$$\Delta\lambda_{\max} = \min_{j=1-N} \{\Delta\lambda_{i\max}\} \quad (7)$$

假设单个带宽斩波器选择的波长范围为 $\lambda_0 - \Delta\lambda/2 \sim \lambda_0 + \Delta\lambda/2$, 对应的飞行时间为 $t_0 - \Delta t/2 \sim t_0 + \Delta t/2$, 则满足到达斩波器的飞行时间为 $NT + t_0 - \Delta t/2 \sim NT + t_0 + \Delta t/2$ 的中子亦能通过斩波器,造成背底。则通过斩波器的波长范围为:

$$\lambda_0 + N\lambda_T - \frac{\Delta\lambda}{2} \sim \lambda_0 + N\lambda_T + \frac{\Delta\lambda}{2} \quad (8)$$

式中: λ_T 为该斩波器的安装位置对应的飞行距离和飞行时间测量周期决定的波长周期, $\lambda_T = hT/mL$; N 为正整数或 0, 对应带宽斩波器各阶通过波段。

带宽斩波器的周期性转动使得除了谱仪所需要的波长范围可通过外,某些长波中子也能通过斩波器到达探测器,形成背底。考虑到从慢化器引出的中子会随着波长的增大,通量急剧减少,使背底尽可能地偏向长波段,将有利于背底的降低。从式(8)看出,在飞行时间测量周期不变的前提下,要使通过斩波器的波长往长波段偏,就要尽量增大 λ_T , 也就是要减小 L , 即尽可能靠近慢化器放置。

考虑中子能谱的波长特性,带宽限制斩波器的数量设置只需将周期重叠背底的中子波长控制在可接受的一定范围外即可。在配置多斩波器系统时,首先需要根据谱仪对背底的要求,对谱仪所需的带宽斩波器数量 N_{chopper} 进行大致估算。考虑到散裂中子源靶站屏蔽体空间限制,第一个斩波器的安装位置最近只能安装在靶站外围屏蔽体处(中子到此斩波器的飞行距离最短),按照用第 n 个带宽斩波器来滤除第一个斩波器(飞行距离最短)第 n 个转动周期的泄露波长的原则,有以下斩波器数量估算公式:

$$N_{\text{chopper}} \approx \frac{\lambda_f}{\lambda_T} \quad (9)$$

式中: λ_f 为谱仪可接受的最短周期重叠背底波长。

以任意两个带宽斩波器组成的系统为例,来说

明斩波器的布局设计,代号分别为 T1 和 T2 (不妨设斩波器 T1 的安装位置 L_1 小于斩波器 T2 的安装位置 L_2 , 且 L_1 根据现场情况取最小值)。通过 T1 斩波器的波长范围分为: $\lambda_{01} + N_1\lambda_{T1} - \Delta\lambda_1/2 \sim \lambda_{01} + N_1\lambda_{T1} + \Delta\lambda_1/2$, 通过 T2 斩波器的波长范围为: $\lambda_{02} + N_2\lambda_{T2} - \Delta\lambda_2/2 \sim \lambda_{02} + N_2\lambda_{T2} + \Delta\lambda_2/2$, 其中, N_1 、 N_2 为 0 或正整数。T1 和 T2 斩波器的通过波长范围均包括了目标波段 $\lambda_0 - \Delta\lambda/2 \sim \lambda_0 + \Delta\lambda/2$, 同时,假设用 T2 斩波器来滤除 T1 斩波器的泄露背底波段(主要是针对 T1 第 2 个转动周期所泄露的波段),即除所需的目标波段外,其他能通过 T1 的波长范围完全不落入 T2 的波长范围内,代入 λ_T 公式,整理可得:

$$\frac{\frac{N_2 h T}{m}}{\frac{N_1 h T}{mL} + \lambda_{01} - \lambda_{02} - \frac{\Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2}{2}} < L_2 < \frac{\frac{(N_2 + 1) h T}{m}}{\frac{N_1 h T}{mL} + \lambda_{01} - \lambda_{02} - \frac{\Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2}{2}} \quad (10)$$

式中: N_1 和 N_2 为正整数或 0, 取 0 时对应所需波长范围,取正整数时对应各阶背底波长; λ_{01} 和 λ_{02} 对应各斩波器截取波段范围的中点波长; $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 对应各斩波器所截波段带宽; L_1 和 L_2 对应各斩波器的安装距离。

在根据谱仪现场情况确定第一个带宽斩波器的位置后,可依据式(10)依次计算出其他带宽斩波器的合适位置。当各个带宽限制斩波器的位置确定后,亦可计算出单独通过每个带宽斩波器时的波长范围,然后取交集,得到通过带宽斩波器系统的波长范围,背底长波中子数量越少越好。综合前面的公式计算,带宽斩波器系统的布局原则是滤除周期重叠背底的带宽斩波器尽量靠近慢化器放置,以使长波背底偏向更远波段,考虑到斩波器扇形开口两端扫过束流截面时存在部分通过引起的中子通量损失,去除背底的斩波器开口角可以略大一些,使得谱仪所需波长范围内的中子束流可以无损失通过,同时考虑背底的问题,开口角可不过大,应取可接受的极小值,如图 3 点划线所示,在不考虑空间效应的前提下,此类斩波器的开口角加宽 2α 角。而选择最终所需波段范围的带宽斩波器则尽量放置在离慢化器较远位置,其开口角大小应等于谱仪所需波段带宽所对应的角度。

2.4 双盘斩波器

前面提到的带宽斩波器都是指的单转盘斩波器,实际上,可以将两个转盘放置在同一个带宽斩

波器内，组成双盘斩波器。双盘斩波器的物理计算也符合前面所述的公式，但双盘斩波器的应用有特殊的要求。一般来说，使用双盘斩波器的主要是为了降低斩波器效应的影响，以达到减少中子通量损失的目的，如图 3 中虚线。要达到此目的，双盘斩波器的两个转盘必须采用同转速对转的方式，如图 4 所示，同时两转盘相位必须同步且开口角近似相等，否则只能起到两个独立的单盘斩波器的作用。双盘斩波器的两个转盘可以采用左右、前后或上下的摆放方式，斩波器效果基本相同，但对谱仪束线的空间尺寸要求有所不同，具体可根据实际情况进行选择。

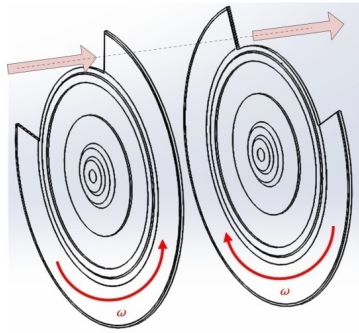


图 4 双盘对转
Fig.4 Counter-rotating double-disks

在相同的条件（同转速、同安装位置、截取相同的波段带宽）下，双盘斩波器与单盘斩波器相比较，容易得到以下关系：

$$\theta_{\text{Double}} = \theta_{\text{Single}} + \alpha \quad (11)$$

式中： θ_{Single} 为单盘斩波器的转盘开口角； θ_{Double} 为双盘斩波器的转盘开口角。

双盘对转模式下，中子束流的有效通过时间变为：

$$\Delta t = \frac{\theta_{\text{Double}}}{\omega} \quad (12)$$

表 1 带宽斩波器物理参数的计算

Table 1 Calculation of the physical parameters for disk choppers

参数 Parameter	结果 Results
时间展宽要求 Bandwidth requirement	$\Delta\lambda_{\text{max}} = hT/mL_{\text{max}} = 48.7 \text{ nm}$
配置数量 Quantity	$\lambda_T = 211 \text{ nm}$, $N_{\text{chopper}} \approx 3$
T1 斩波器	转速 Speed f_1
T1 Choper	位置 Distance L_1
	开口角 Aperture θ_1
T2 斩波器	转速 Speed f_2
T2 Choper	位置 Distance L_2
	开口角 Aperture θ_2
T3 斩波器	转速 Speed f_3
T3 Choper	位置 Distance L_3
	开口角 Aperture θ_3

在不考虑中子波谱特性的情况下，与同等条件下的单盘斩波器相比，双盘斩波器在上升/下降段的中子通量可增加 50%，总中子通量的增加比例由式 (13) 给出：

$$P = \frac{\alpha}{2\theta_{\text{Single}}} \quad (13)$$

3 设计实例

以 CSNS（源频率为 25 Hz、40 ms）上某谱仪束线作为设计实例，来详细说明前面章节中物理设计方法的应用。假定谱仪线最大飞行距离为 32.5 m，使用的波段带宽为 48 nm，可调节的波长范围在 1~100 nm，背底波长 λ_f 要求大于 600 nm，导管采用矩形直线导管，截面尺寸为 40 mm×80 mm。带宽斩波器的转动中心距离束流中心的距离 R 为 300 mm，工作转速为 25 Hz，可安装位置从 7.5 m 处开始，最远距离不超过 20 m。

首先应验证谱仪设计的波段带宽是否符合时间展宽公式，然后再估算所需配置的带宽斩波器最小数量，如表 1 所示。谱仪无特殊要求，则带宽斩波器的工作频率应与源频率一致。如前面所述，为最大程度减少中子通量的损失以及更好地去除长波背底，该谱仪位置靠前的两个带宽斩波器主要承担滤除长波背底的任务，谱仪所需的波段范围应让其全部通过，故这两个带宽斩波器的开口角应在理论计算的开口角大小的基础上开宽 2α 角，以使束流无损通过的同时不致于泄露过多的背底。同时，出于去除背底的考虑，在安装位置可选择的范围内，该类斩波器应该尽量往前设置。该谱仪最后一个带宽斩波器最终决定到达样品的波段带宽，因此其开口角大小是确定的，由谱仪所需波段带宽决定。根据上述条件，依次代入式(10)，可计算得到一组带宽斩波器系统的物理设计参数，结果如表 1 所示。

在计算得到各带宽斩波器物理参数后, 还需要对谱仪斩波器的配置做进一步的校验, 如图 5 所示为根据斩波器参数计算得到的飞行时间—距离图。从图 5 中可以直观地看到, 只有谱仪所需要的波段范围中子(如 20~68 nm)可以到达样品探测器, 其余该周期内不需要的中子会被带宽斩波器系统所阻挡, 背底波长达到了 660 nm 以上, 符合谱仪设计要求。

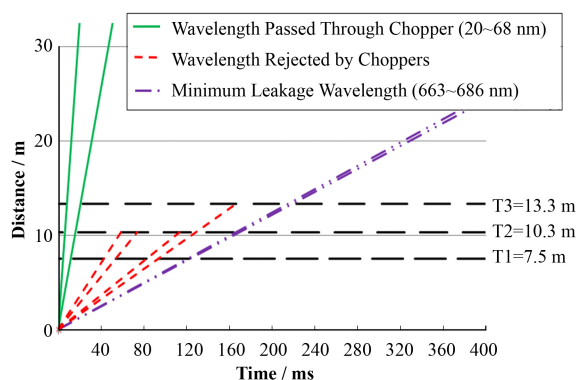


图 5 飞行时间—距离图

Fig.5 Diagram of distance corresponding to flight time

4 结语

本文介绍了带宽斩波器系统的基本原理和设计方法, 带宽斩波器系统的设计应满足飞行时间技术的要求, 系统配置应兼容不同的工作模式, 才能起到降低背底、提高信噪比的作用。本文有助于加深对带宽斩波器物理原理的理解, 可为中国散裂中子源二十台中子散射谱仪斩波器系统的物理设计提供指导和参考:

1) 单个带宽斩波器的截波范围由工作转速 ω 、转盘开口角 θ 、安装位置 L 和相位 t_0 等参数决定, 多斩波器系统所能截取的最大波段带宽不超过各带宽斩波器最大带宽的最小值, 是单独通过各个斩波器中子波长范围的交集。

2) 带宽斩波器的配置数量应满足谱仪背底要求, 布局时应遵循“去除背底的斩波器应放置在束线前端, 开口角大小应满足谱仪所需波长范围内的中子束流可以无损通过, 带宽选取的斩波器放置在束线后端, 开口角大小应等于谱仪所需波段带宽所对应的角度”的原则, 利用公式计算各个斩波器的合理安装位置, 并根据实际情况进行选择。

3) 使用双盘斩波器可以在一定程度上降低斩波器效应的影响, 从而提高中子通量, 但必须满足同相位、同转速、同开口角和转动方向相反等条件。

参考文献

- 张杰. 中国散裂中子源(CSNS)——多学科应用的大科学平台[J]. 中国科学院院刊, 2006, 21(05): 415-417. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2006.05.017.
ZHANG Jie. CSNS: a large scientific facility for multidisciplinary purposes[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2006, 21(05): 415-417. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2006.05.017.
- 王芳卫, 贾学军, 梁天骄, 等. 散裂中子源靶站谱仪的物理设计[J]. 物理, 2008, 37(6): 449-453. DOI: 10.3321/j.issn:0379-4148.2008.06.016.
WANG Fangwei, JIA Xuejun, LIANG Tianjiao, *et al.* Physical design of target station and neutron scattering spectrometers for the Chinese spallation neutron source[J]. Physics, 2008, 37(6): 449-453. DOI: 10.3321/j.issn:0379-4148.2008.06.016.
- 陈和生. 中国散裂中子源[J]. 现代物理知识, 2016, 28(01): 3-10. DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2016.01.001.
CHEN Hesheng. China spallation neutron source[J]. Modern Physics, 2016, 28(01): 3-10. DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2016.01.001.
- 李新喜, 黄朝强, 王燕, 等. 双盘斩波器的设计与优化[J]. 核技术, 2008, 31(5): 392-395.
LI Xinxi, HUANG Chaoqiang, WANG Yan, *et al.* Design and optimization of a double-disk chopper[J]. Nuclear Techniques, 2008, 31(5): 392-395.
- 李新喜, 黄朝强, 王燕, 等. 水平散射几何中子反射谱仪的三盘斩波器设计[J]. 核技术, 2009, 32(7): 510-514.
LI Xinxi, HUANG Chaoqiang, WANG Yan, *et al.* Triple-disk chopper design of horizontal neutron scattering reflectometer[J]. Nuclear Techniques, 2009, 32(7): 510-514.
- 李新喜, 王燕, 黄朝强, 等. 盘间距可调斩波器设计及模拟[J]. 核技术, 2010, 33(3): 192-196.
LI Xinxi, WANG Yan, HUANG Chaoqiang, *et al.* Design and simulation of a space-adjustable chopper[J]. Nuclear Techniques, 2010, 33(3): 192-196.
- 杨博, 王平, 王芳卫. CSNS 中子带宽限制斩波器样机控制系统的设计与实现[J]. 核技术, 2012, 35(4): 305-308.
YANG Bo, WANG Ping, WANG Fangwei. Development of the bandwidth-limiting neutron chopper prototype control system for CSNS[J]. Nuclear Techniques, 2012, 35(4): 305-308.
- Jaksch S. Considerations about chopper configuration at a time-of-flight SANS instrument at a spallation source[J].

- Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2016, **835**: 61–65. DOI: 10.1016/j.nima.2016.07.041.
- 9 Bewley R I, Taylor J W, Bennington S M. LET, a cold neutron multi-disk chopper spectrometer at ISIS[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A, 2011, **637**(1): 128–134. DOI: 10.1016/j.nima.2011.01.173.
- 10 Ehlers G, Podlesnyak A A, Niedziela J L, *et al.* The new cold neutron chopper spectrometer at the spallation neutron source: design and performance[J]. Review of Scientific Instruments, 2011, **82**(8): 085108. DOI: 10.1063/1.3626935.
- 11 Wang P, Yang B, Cai W L. Development of a bandwidth limiting neutron chopper for CSNS[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics A, 2015, **792**: 56–60. DOI: 10.1016/j.nima.2015.04.047.
- 12 Mezei F, Russina M. Multiplexing chopper systems for pulsed neutron source instruments[J]. Advances in Neutron Scattering Instrumentation, 2002, **4785**: 24–33.
- 13 Mezei F. Multiplexing chopper systems for pulsed neutron sources: practical basics[J]. Journal of the Physical Society of Japan, 2013, **82**: 1–25. DOI: 10.7566/JPSJS.82SA.SA025.