

中国原子能科学研究院科学技术丛书

中子飞行时间方法 及其应用

沈冠仁 编著

原子能出版社

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》

出版委员会

主 任 赵志祥

副主任 舒卫国 柳卫平

委 员 (按姓氏笔画为序)

万 钢	王 楠	王阿凤	王国保	尹忠红	石永康
叶宏生	叶国安	刘森林	许谨诚	李林虎	李和香
李树源	杨丙凡	杨河涛	张昌明	张和平	张锦荣
张静波	陈建欣	邵焕会	罗志福	赵崇德	姜兴东
夏海鸿	强家华	薛小刚			

编审委员会

顾 问 (按姓氏笔画为序)

王乃彦	王方定	方守贤	阮可强	汪德熙	张焕乔
周永茂	钱绍钧	黄胜年	樊明武		

主 任 赵志祥

副主任 柳卫平 许谨诚

委 员 (按姓氏笔画为序)

勾 成	卢玉楷	叶国安	吕忠诚	朱升云	刘一兵
关遐令	李吉根	杨启法	肖雪夫	张万昌	张天爵
张先业	张伟国	张应超	陈玉宙	陈永寿	陈钟麟
范显华	林灿生	罗上庚	罗志福	竺礼华	金小海
金华晋	周祖英	单玉生	姜 山	贺佑丰	袁履正
顾忠茂	党淑琴	徐 铎	浦胜娣	容超凡	谢建伦
裴鹿成					

办公室

主 任 尹忠红

副主任 李来霞

成 员 (按姓氏笔画为序)

马英霞	王丽英	王宝金	伍险峰	张小庆	竺 琳
韩翠娥					

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》

编辑工作委员会

主 任 侯惠群

副主任 杨树录

委 员 (按姓氏笔画为序)

丁怀兰 李 宁 李盈安 杨树录 张 辉 张关铭
张铨清 赵守林 赵志军 侯惠群 黄厚坤

编辑工作小组

组 长 杨树录

副组长 张铨清 赵志军

成 员 (按姓氏笔画为序)

丁怀兰 李 宁 杨树录 张铨清 赵志军

总 序

中国原子能科学研究院创建于 1950 年,是我国核科学技术的发祥地和先导性、基础性、前瞻性的综合性核科学技术研究基地。

在党中央和上级部门的关怀和指导下,中国原子能科学研究院为我国的国防建设、国民经济建设和核科学技术的发展做出了重要贡献,造就了 7 位“两弹一星”功勋科学家和 60 多位两院院士,培养了大批科技人才,在核物理、核化学与放射化学、反应堆工程技术、加速器工程技术、同位素技术、核电子学与核探测技术、辐射防护、放射性计量等学科形成了自己的特色和优势,并拥有核科学与技术 and 物理学两个一级学科硕士、博士学位授予权。

为了系统地总结原子能院在核科学技术相关优势学科积累的知识和经验,吸收和借鉴国内外核科学技术最新成果,促进我国核科技事业的发展,我院决定组织出版《中国原子能科学研究院科学技术丛书》,并选定王淦昌、肖伦、丁大钊、王乃彦、阮可强等院士编著的《惯性约束核聚变》、《放射性同位素技术》、《中子物理学——原理、方法与应用》、《新兴的强激光》、《核临界安全》5 本专著首批出版,今后还将组织撰写更多的学术专著纳入本丛书系列。

谨以此套丛书献给为我国核科技事业献身的人们!

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》出版委员会

2005 年 9 月 1 日

前 言

中子飞行时间方法是中子物理实验研究工作中使用的最重要的实验技术之一。它始于 20 世纪 40~50 年代,主要用于慢中子能谱实验测量。随着核电子学和粒子探测技术,特别是纳秒脉冲技术和快响应闪烁探测技术的发展,在 20 世纪 50 年代中期,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL) L. Cranberg 和 J. S. Levin 最早成功地把脉冲束飞行时间方法用于快中子物理实验研究工作。20 世纪 50 年代后期和 60 年代初,美国的洛斯阿拉莫斯(Los Alamos)、布鲁克海文(Brookhaven)、阿贡(Argonne)和利弗莫尔劳伦斯(Livermore Lawrence)国家实验室以及英国、法国、德国、前苏联等国家开始快速发展加速器束流脉冲化和伴随粒子快中子飞行时间技术。70 年代在美国的部分大学,80 年代在日本以及部分发展中国家相继在回旋、静电、串列式静电、高压倍加器和强流纳秒脉冲中子发生器上建立高水平的脉冲中子源及飞行时间谱仪的实验装置,开展高水平快中子物理实验工作,并用于核反应和核结构的研究、高精度中子核数据测量。由于高水平实验研究工作的需要,又推动了核电子学和加速器束流脉冲化技术的发展,同时在美国及英、法等国家,将加速器、核电子学仪器、探测器等形成了一个产业链,这为飞行时间技术不断地改进,进一步的提高和发展,提供了技术基础。20 世纪 70 年代后,长飞行距离、高能量分辨率、低本底水平的快中子飞行时间谱仪广泛地应用于核反应、核结构实验研究和中子核数据测量中,取得了非常重要的实验研究成果。飞行时间方法已经成为核物理和中子物理实验中最常用的实验研究手段之一,同时飞行时间技术也扩展到用于带电粒子实验研究工作,而且也取得了非常好的实验成果。

回顾快中子飞行时间方法几十年来的发展和使用过程,特别是它在核反应产生的初级中子能谱和角分布、中子核反应的全截面、弹性和非弹性次级中子角分布、能谱的实验研究、评价中子核数据库数据的基准

检验和核工程宏观实验研究中的重要作用,是其他实验方法不能替代的。它对核物理基础研究及核技术的应用,特别是核武器的研制和发展发挥了重要的作用。

中国建立快中子飞行时间谱仪并开展快中子物理实验研究工作,首先是在中国原子能科学研究院进行的。20 世纪 50 年代末在钱三强和何泽慧先生的领导和支持下,成立了以顾以藩教授为首的快中子飞行时间方法研究组,同时在 1.2 m 的回旋加速器和高压倍加器上进行脉冲束和伴随粒子型快中子飞行时间谱仪的研制及快中子物理的研究工作。20 世纪 60 年代初,顾以藩教授等研制的快中子飞行时间谱仪达到了与当时国际上同步的先进水平。1966 年,顾以藩教授在亚洲物理讨论会上作的快中子物理研究工作报告,受到与会专家、教授的一致好评。20 世纪 80 年代,该组的部分研究工作者调到四川大学低能核物理研究所工作,在 2.5 MeV 的静电加速器上建立了用 Mobley 磁铁型聚束器产生脉冲束型的方法,在高压倍加器上伴随粒子型快中子飞行时间方法开展了快中子物理研究工作。20 世纪 90 年代,北京大学重离子物理研究所在 4.5 MV 静电加速器上建成用速调管聚束的纳秒脉冲中子源和快中子飞行时间谱仪,并用于次级中子能谱的实验研究工作。同时温琛林教授在北京师范大学低能核物理研究所和清华大学近代物理系也开展过有关的实验研究工作。

作者在 20 世纪 60 年代中期,大学毕业后分配到中国原子能科学研究院快中子飞行时间方法研究组。先后参与和负责在回旋加速器、高压倍加器、静电加速器、串列静电加速器和强流纳秒脉冲中子发生器上的快中子飞行时间谱仪的改进和建设,用伴随粒子型、双闪烁体型和脉冲束型谱仪,进行快中子物理的实验研究工作。本书即是作者根据当前国内外还没有全面详细地介绍中子飞行时间方法书籍的现实,及对国际上快中子飞行时间方法和中子物理研究工作状况的了解,并结合几十年研究工作经验和体会的总结,编写而成的。书中较全面和详细的介绍了快中子飞行时间方法的各个组成部分;建立各类快中子飞行时间谱仪中的主要设计思想和使用的技术;国内外各个阶段的发展状况;用于开展各类实验研究工作中思考问题的方法;对谱仪不同的技术要求和一些实验细节问题。同时,收入和编制了实验研究工作中常用的部分技术数

据和资料等。本书可为大学核物理专业学生或研究生,及准备从事用中子飞行时间方法进行实验研究的工作者初步了解和掌握飞行时间方法和应用,提供入门的学习资料,也为实验工作者提供一部分常用的主要技术资料。

全书共分9章:第1章为总体结构,介绍了飞行时间方法的工作原理;第2到第7章为建立快中子飞行时间谱仪各个部分的工作原理、思考方法和技术要点;第8章和第9章叙述了中子飞行时间方法的应用。

由于作者水平有限,书中存在缺点和错误在所难免,敬请读者指正。

北京大学陈金象教授、北京师范大学温琛林教授、中国科学院高能物理研究所顾以藩教授、中国原子能科学研究院周德邻教授和黄糖仔高级工程师对本书书稿进行了认真的审阅,提出很多真知灼见,作者在这里表示最诚挚的感谢。在写作过程中,还得到了李霞等同志、院科技信息部尹忠红主任和李来霞副主任的很多帮助,作者在此表示衷心的感谢!

作 者

2007年6月于北京

目 录

第 1 章 中子飞行时间方法的工作原理	(1)
1.1 中子飞行时间方法的工作原理	(1)
1.2 中子飞行时间方法的特征和所用技术	(3)
第 2 章 与中子飞行时间方法相关的核电子学技术	(4)
2.1 定时技术	(4)
2.2 时间分析技术	(13)
2.3 快放大器	(22)
2.4 电子学线路及核电子仪器	(24)
参考文献	(27)
第 3 章 核粒子探测技术	(28)
3.1 热中子和低能中子(≤ 1 MeV)的探测技术	(28)
3.2 快中子探测技术	(29)
3.3 带电粒子探测技术	(41)
3.4 快中子探测器	(42)
参考文献	(65)
第 4 章 飞行时间方法中应用的中子源	(67)
4.1 中子源的基本要求和加速器	(67)
4.2 直流连续中子源	(68)
4.3 脉冲束中子源	(69)
4.4 白光中子源	(82)
4.5 中子靶	(82)
参考文献	(89)
第 5 章 中子飞行时间谱仪的实验装置	(91)
5.1 中子靶室	(91)
5.2 样品架	(94)
5.3 阴影锥	(94)
5.4 准直器	(98)

5.5	中子探测器屏蔽准直系统	(100)
5.6	角分布仪	(102)
	参考文献	(107)
第 6 章	快中子飞行时间谱仪分类及其特点	(108)
6.1	谱仪的主要技术指标	(108)
6.2	直流束中子源的快中子飞行时间谱仪	(109)
6.3	脉冲束快中子飞行时间谱仪	(114)
	参考文献	(124)
第 7 章	飞行时间方法实验研究工作中的几个技术问题	(126)
7.1	制订实验研究工作方案	(126)
7.2	飞行时间谱刻度	(129)
7.3	飞行时间谱的检验和分析	(131)
7.4	飞行时间谱的处理及其修正	(132)
第 8 章	飞行时间方法在核反应实验研究中的应用	(141)
8.1	全截面 σ_t 的实验研究	(141)
8.2	微分截面	(145)
8.3	中子能谱	(161)
8.4	其他反应截面在测量中的应用	(176)
	参考文献	(182)
第 9 章	核数据的宏观检验实验研究	(186)
9.1	核数据宏观实验研究的重要性和主要内容	(186)
9.2	评价中子核数据库	(188)
9.3	评价中子核数据库数据的宏观基准检验	(190)
9.4	专项截面和宏观积分量实验测量	(198)
9.5	面向聚变装置设计的宏观检验和宏观参量测量	(201)
	参考文献	(202)
附录 1		(204)
附录 2		(218)
附录 3		(223)
附录 4		(227)

第 1 章 中子飞行时间方法的工作原理

中子飞行时间方法是通过测量中子飞过一段固定距离的时间,确定中子的能量、数量及其空间分布,达到各种不同实验研究工作的目的。

中子飞行时间方法是在早期中子研究工作中使用的核乳胶法、阈探测器激活法、反冲质子闪烁法等实验技术的基础上,在 20 世纪 50 年代中期,随着中子研究工作的不断深入,发展起来并被广泛应用的一项基本实验技术。

1.1 中子飞行时间方法的工作原理

已知一束速度为 v 的粒子,非相对论性近似下,其动能 E 由式(1.1)确定:

$$E = \frac{1}{2}m_0 v^2 \quad (1.1)$$

式中, m_0 为粒子的静质量。因此,速度为 v 的粒子飞行一定距离 l 所需的时间 t 由式(1.2)确定:

$$t = l \sqrt{m_0} / \sqrt{2E} \quad (1.2)$$

对于中子,用 $c=2.997\,929 \times 10^8$ m/s, $m_0=939.552 \cdot C^{-2}$ MeV 代入时,中子的飞行时间由式(1.3)确定:

$$t_n = l \sqrt{939.552} / \sqrt{2E} \times 2.997\,929 \times 10^8 \cong \frac{72.306l}{\sqrt{E}} \text{ ns} \quad (1.3)$$

对于质子时,用 $c=2.997\,929 \times 10^8$ m/s, $m_0=938.279\,6 \cdot C^{-2}$ MeV 代入时,质子的飞行时间由式(1.4)确定:

$$t_p = l \sqrt{938.279\,6} / \sqrt{2E} \times 2.997\,929 \times 10^8 \cong \frac{72.248\,6\,l}{\sqrt{E}} \text{ ns} \quad (1.4)$$

式中参量单位分别为 m, MeV 和 ns。

在考虑相对论效应修正时,则有:

$$m = m_0 / \sqrt{1 - \beta^2} \quad \beta = v/c$$

$$E = mc^2 - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right] = m_0 c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{l}{tc} \right)^2}} - 1 \right]$$

$$t = [E + m_0 c^2] l / c \sqrt{E(E + 2m_0 c^2)}$$

对于中子,则有式(1.5):

$$\begin{aligned} t_n &= 3.3356 \times (E + 939.552)l / \sqrt{E(E + 1879.1462)} \text{ ns} \\ &= \frac{72.306l}{\sqrt{E}} (1 + 1.0643 \times 10^{-3} E) \text{ ns} \end{aligned} \quad (1.5)$$

对于质子,则有式(1.6):

$$\begin{aligned} t_p &= 3.3356 \times (E + 938.2796)l / \sqrt{E(E + 1876.5592)} \text{ ns} \\ &= \frac{72.2486l}{\sqrt{E}} (1 + 1.0659 \times 10^{-3} E) \text{ ns} \end{aligned} \quad (1.6)$$

从 0.00~100 MeV 能区中子飞行 1 m, 用式(1.3)计算的飞行时间表详见附录 1。

由式(1.3)得到在非相对论情况下,中子能量可表示为式(1.7):

$$E_n = 5228.157 l^2 / t_n^2 \quad (1.7)$$

式(1.7)中,飞行距离 l 可以用常规方法精确地确定,只要测量得到飞行时间 t_n , 便可确定中子的能量。图 1.1 显示了 15.2 MeV 中子在 C 核上核反应产生的次级中子飞行时间谱。图中的道数代表飞行时间轴,可通过 γ 射线峰的位置,确定时间轴上各道代表的飞行时间 t_n 。由式(1.7)得到各道的能量 E_n , 把时间转换成能量,图中道数代表的飞行时间轴变成中子能量轴,得到测量中

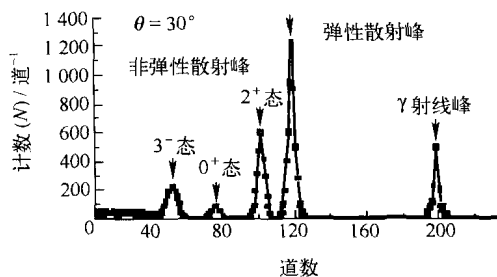


图 1.1 15.2 MeV 中子在 C 核上的飞行时间谱

子的能量分布;各道的计数 N 代表各能量中子的强度;中子能量 E 、测量时间 t 和强度 N 的微分间隔 dE , dt 和 dN 的关系可用式(1.8)表示:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dE(E)} \cdot dE &= \frac{dN}{dt(t)} \cdot dt \\ \frac{dN}{dE(E)} &= \frac{dN}{dt(t)} \cdot \frac{dt}{dE} \end{aligned} \quad (1.8)$$

飞行时间方法首先把要测量中子能量谱变为测量飞行时间谱,再把测量到的飞行时间谱转换成中子能谱。改变测量角度,则得到强度的空间分布。图 1.1 上所示弹性和非弹性散射的各个单能中子峰,代表各反应道核反应产生的次级中子能量和强度。再通过处理和分析这些数据,得到进行这些实验研究工作所需要的结果。

上面的描述,突出了中子飞行时间方法的主要优点是:(1) 式(1.3), (1.7)和

(1.8)充分显示了工作原理简单,易学易懂。(2)图1.1反映了测量结果显示直接,易于观察和分析,能及时发现实验工作出现的问题,提出解决问题的办法和应采取的措施。(3)数据处理相对而言较为简单。(4)与反冲质子望远镜法相比,有较高的测量效率,约高两个数量级。(5)能用于宽广的中子能区,能量分辨率较高。当前国际上高水平的飞行时间谱仪,能量分辨率达到1%~2%。(6)效应-本底比好,能满足不同实验的要求,特别是对中子能谱研究,能精确地给出中子能量和强度的空间分布(即双微分截面)。

1.2 中子飞行时间方法的特征和所用技术

从0.00~100 MeV能区中子飞行1 m的飞行时间表可见,中子在飞行几米至几十米的情况下,飞行时间在 $10^{-5} \sim 10^{-8}$ s,可以清楚地看到中子飞行时间方法的主要特征是在 μs 到ns量级的短时间测量,因此不能用常规的时间测量工具(如时钟、秒表等),而必须用核电子学方法进行测量。这又显示了飞行时间方法的另一个特征(或者说是缺点)就是测量使用的技术面广而且比较复杂。从中子能量上可分为属于keV的慢中子区—— μs 级区,MeV的快中子区——ns量级区,两个区域使用的中子飞行时间方法在技术上有较大的差别。20世纪40~50年代,中子飞行时间方法首先用于进行慢中子能谱实验研究工作。它使用机械转子获得起始时间,慢中子探测器给出停止信号。随着ns脉冲技术的发展,20世纪50年代中期,才使用到快中子区域。因此使用ns脉冲技术是快中子飞行时间方法的前提和关键。它包括:(1)ns脉冲技术电子学仪器;(2)能给出ns脉冲信号的快中子探测器;(3)能给出ns起始脉冲信号的加速器。经过几十年的发展,到现在为止,已经有比较成熟的专门研究者和生产厂家进行研究和生产。此外为了实验工作中能取得高精度数据和提高实验结果的效应-本底比,对本底中子和 γ 射线采用强有力的屏蔽措施,是十分必要的。同时,为了提高能量分辨率,延长中子飞行距离,有一个大的实验大厅则成为必要条件。本书第2至第7章将分别对快中子飞行时间方法的各个部分进行详细论述和介绍。

第2章 与中子飞行时间方法相关的核电子学技术

核电子学技术是核科学研究工作中因对电子学技术的需求而发展起来的一门实用性很强的应用技术。即在核科学研究中利用核电子学技术进行记录和分析核粒子在各个不同空间、时间范围内的数量、能量、质量和位置等,来达到各种不同核科学研究的目的。在中子飞行时间方法中,主要使用核电子学技术中的 μs 和 ns 脉冲技术。它的电子学线路一般都采用快慢路符合测量。快路部分用于得到中子飞行时间信息,要求必须使用 ns 脉冲技术,脉冲上升时间响应在 ns 或亚 ns 量级,才能达到中子测量时间信息的精确度。例如快放大器、快定时甄别器、时间分析器(时间-幅度转换器)、脉冲形状甄别器等。慢路部分用于确定中子能量的测量范围即卡阈和降低本底的措施等。经常使用的通用的核电子学仪器,上升时间在 μs 级的甄别、放大、延时和符合电路等。几十年来,脉冲电子学线路从电子管发展到半导体晶体,由分离元件组合到集成电路,脉冲的上升时间由几十到几 ns 级再到亚 ns 级,线路本身时间分辨达到 ps 级。而且现在已经有了系列化专业化的核电子学产品可供选择,例如国际上的 NIM 系列和 CAMAC 系列等。在中子飞行时间方法使用的不同领域要求也不完全相同。本书仅对中子飞行时间方法中,常使用的几个专用仪器的要求做一些原理性介绍。

2.1 定时技术

精确地确定中子飞过一段固定距离 l 的时间 t ,首先要定出中子飞过这段距离的起飞时刻(即起始时刻)和飞过这段距离的时刻(即停止时刻)。飞行时间中用于确定这些时刻的方法称为定时技术。在中子飞行的起始和停止时刻都给出一个脉冲信号,利用脉冲信号的前沿作起始和停止时刻,确定中子的飞行时间。给定起始和停止时刻的精确度将直接影响测量到的飞行时间的准确度。由起始和停止时刻的不准确而造成测量时间的偏差时间 Δt_1 和时间分析器造成时间分散 Δt_2 (一般在 ps 量级,可以忽视不计)组成的时间分散 Δt 称为飞行时间谱仪的时间分辨,它是飞行时间谱仪的主要技术性能指标。 Δt 主要由下列因素构成。

2.1.1 起始时刻

(1) 初级中子发射时刻的差异

核反应产生的初级中子束,由于核反应发生的时间很短,不构成起始时刻的时间差异,但由于核反应发生时刻的不同,造成初级中子发射时刻的差异,这是起始时刻差异的主要来源。例如脉冲束产生的源中子,在脉冲束束宽 $\Delta t_{\text{束宽}}$ 的时间范围内,任何时间产生核反应发射的源中子都用同一个发射时刻,脉冲束的束宽造成的偏差时间为 $\Delta t_{\text{束宽}}$ 。因为产生核反应的靶室有一定的长度,所以核反应可能在靶室的不同位置上发生,使源中子发射的时刻不同。造成起始时刻的最大差异是束飞过靶室的时间 $\Delta t_{\text{靶长}}$ 。

(2) 次级中子发射时刻的差异

由于靶核样品本身的大小和初级中子发射张角的不同,初级中子在样品的不同位置上发生相互作用时,都会造成发射次级中子的时刻不同,形成时间分散 $\Delta t_{\text{样品}}$ 。

2.1.2 停止时刻

停止时刻由探测飞行中子的探测器给出。当探测器探测到一个中子时,按照中子的能量给出相应大小幅度的脉冲快信号,作为停止信号,探测到中子的时刻即为停止时刻。由于探测器有一定的厚度,同样能量的中子在探测器的不同厚度上被探测时,给出的停止时刻会不同,所以最大的停止时刻的时间差是中子飞过探测器整个厚度的时间 $\Delta t_{\text{探测器}}$ 。

探测器使用的光电倍增管等电子器件带来的时间分散 $\Delta t_{\text{电子器件}}$,一般很小,可以忽略。

2.1.3 定时时间误差 $\Delta t_{\text{定时方法}}$

由定时方法给出的定时时间误差 $\Delta t_{\text{定时方法}}$,包括了定时器的噪声、探测器输出信号波形变化和幅度的统计涨落引起的时间晃动(time walk),仪器电子元件老化和温度变化的时间漂移(time drift)等。

2.1.4 定时方法

由定时甄别器利用脉冲信号前沿确定起始和停止时刻。当不同幅度的信号输入甄别器后,输出一个单一幅度的成形脉冲,该脉冲将成为时间-幅度变换器的起始或停止输入的信号,完成中子飞行时间的测量。随定时甄别器的类型不同,将给出不同时间晃动 $\Delta t_{\text{定时}}$,时间晃动将直接增加中子飞行时间的偏差。下面介绍几种

定时方法的工作原理,来探讨定时甄别器给出时间晃动的差别,以及在实验工作中对定时甄别器的选择。

(1) 固定阈值定时法,也称前沿定时法(LEM)

这是最早在飞行时间方法中使用的定时甄别器,设定一个固定的阈值,输入脉冲的示意波形如图 2.1 所示。甄别器设定的在黑线位置上的阈值,当输入脉冲的幅度达到阈值时,甄别器工作输出一个定时信号。在输入脉冲具有相同的上升时间、不同幅度的情况下,由于达到阈值时刻不一样,确定的定时时刻就不同。当脉冲幅度与阈值相同时,达到最大幅度的定时时刻差别为 $\Delta t_{\text{上升}}$ 。

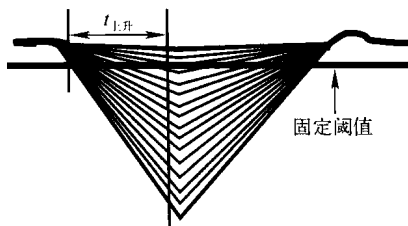


图 2.1 前沿定时示意图

前沿定时的优点是工作原理简单明确,电路上实现容易,稳定可靠。在脉冲信号幅度单色性好,或对时间分辨要求不高,能满足实验需要的场合仍可用前沿定时甄别器。

缺点是当被探测中子能量的动态范围大时,信号脉冲的幅度变化大,给出的定时时刻差别直接增加飞行时间的测量误差,而且随着脉冲上升时间的增加而加大。所以对要求高分辨率的实验就不能满足使用要求。例如,在快中子探测器中,得到广泛应用的 NE213 液体闪烁体的快响应退光时间为 3.8 ns,与光电倍增管 XP2041 组成快中子探测器时,阳极输出脉冲的上升时间约在 4.5~5 ns 之间,如用前沿定时,在一般要求达到的动态范围 100:1 的情况下,带来的时间分散可能达到 3~4 ns,因此不能满足具有高分辨率要求的实验。

(2) 恒比定时法(CFD)^[1~7]

为了消除前沿定时的缺点,发展了恒比定时技术。它的原理是对于具有相同上升时间,不同幅度的脉冲,在同一个幅度比例点上实现定时,如图 2.2 所示。图中黑线代表用于不同幅度脉冲实行定时的点,在可变幅度阈值 V_T ,相同时刻 t_f ,该点的幅度比值称为恒比点 f ,它随脉冲幅度 A 而变, $V_T = fA$ 。根据使用的需要,恒比点 f 可以进行调节。

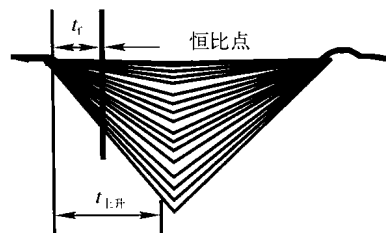


图 2.2 恒比定时示意图

为了解实现恒比定时的工作原理,举几个实例进行说明。

1) 隧道二极管过零电流型恒比定时^[1,2]

隧道二极管过零电流型恒比定时工作原理如图 2.3 所示。当脉冲信号输入甄别器后,分为三路分别输入衰减、延迟倒相和低阈甄别器。衰减和延迟倒相的输出

在相加器成为双极性脉冲,它的零点是输入脉冲的衰减比例点 f ,也就是恒比点 $P=f$,调节衰减比例即调节恒比点。另一路输入低阈甄别器,它的输出控制恒电流开关。当相加器输出的双极性脉冲传输到隧道二极管时,恒电流开关由低阈甄别器的输出信号关闭,恒流源输出的 9.5 mA 电流全部通过隧道二极管。当双极性脉冲相位达到零点时,脉冲电流值为 0.5 mA ,与恒流源电流相加等于 10 mA ,隧道二极管触发翻转,它的输出脉冲使触发器翻转,输出定时脉冲。

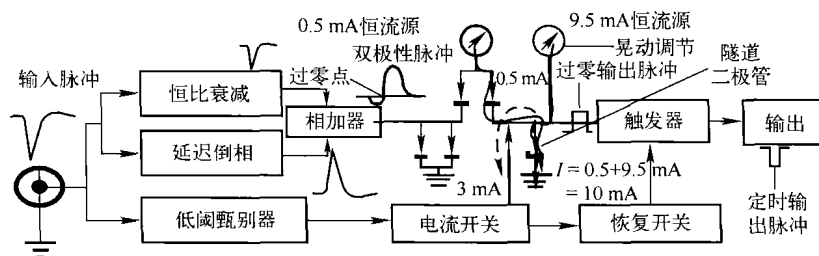


图 2.3 隧道二极管过零电流型恒比定时原理图

所有输入脉冲都在恒比点上使隧道二极管触发翻转,即实现了不同幅度脉冲在同一时刻定时的目的。原理图上几个要点的脉冲波形如图 2.4 所示。恒流源输出电流小于或大于 9.5 mA ,都不是恒比定时,必然会带来定时时间差异,即时间晃动。因此,调节恒流源即是仪器上的时间晃动调节。恒比定时的晃动时间是显示该仪器性能的重要技术指标。

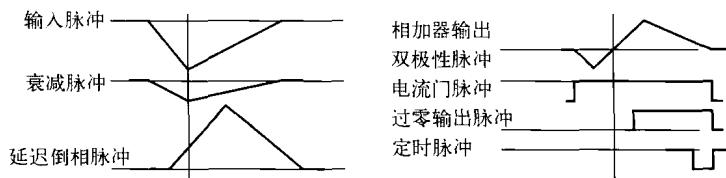


图 2.4 电流型恒比定时原理脉冲波形示意图

2) 电压比较型恒比定时^[3,4]

电压比较型恒比定时工作原理如图 2.5 所示,它与隧道二极管过零电流型恒比定时工作原理基本相同。但是它的过零电路用电压比较器代替隧道二极管,用电压过零翻转代替电流过零翻转。当衰减脉冲先在电压比较器的一端输入负电位,使比较器处于低电位时,调节倒相延迟的正电位脉冲;当从另一端输入电压比较器时,不断地与负电位比较,正负相等时,达到零电位,比较器翻转成高电位,输

出方脉冲,经成形输出为定时脉冲。这里电压比较器的过零点,也是衰减比例点,对所有不同幅度的输入脉冲在同一比例时刻给出定时脉冲,达到了恒比定时的目的。调节衰减比例点,即改变过零点,定时点只随衰减比例点变化,与输入脉冲的幅度大小无关。确保电压比较器两个输入端的零电位是实现恒比定时的关键,输入端具有正负电位都将直接影响恒比定时的实现,会出现定时晃动。所以调节比较器输入端的电位即是仪器的晃动调节。

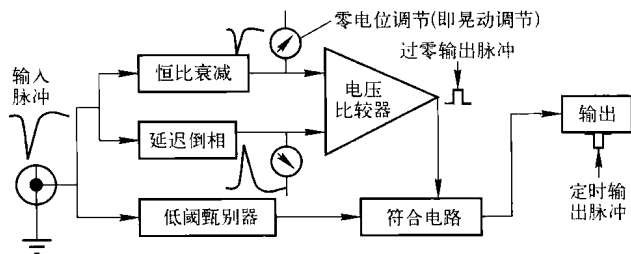


图 2.5 电压比较型恒比定时原理图

3) 电荷存储二极管型恒比定时^[5~7]

电荷存储二极管型恒比定时的工作原理如图 2.6 所示。输入脉冲信号一分为三,分别输入恒比衰减、延迟倒相和低阈甄别器。恒比衰减和延迟倒相的输出信号输入到相加恒比放大器成为双极性脉冲,再输入电荷存储二极管过零定时线路。由该线路输出定时信号。仔细地调节前沿低阈甄别器开门信号输出时间,确保电荷存储二极管线路输出信号时间的一致性,可保证恒比定时的实现。开门信号早晚都将出现定时晃动。

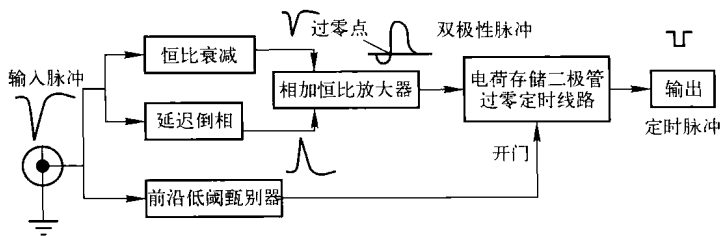


图 2.6 电荷存储二极管型恒比定时原理图

(3) 幅度和上升时间补偿定时法^[8~12] (ARCM)

恒比定时的一个主要条件是脉冲信号的前沿上升时间一致,阈值 $V_T = fA = PA$ 只随脉冲幅度而变。对于闪烁探测器,输出脉冲的上升时间取决于闪烁体快