

能量回收型直线加速器

王书鸿

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

能量回收型直线加速器 (Energy Recovering Linacs, 简称 ERL), 是一种新型的、发展中的加速器, 它具有直线加速器的优质束流性能, 具有接近环型加速器的高效率。已在自由电子激光等方面投入应用, 并具有多方面的发展和应用前景。

一、由来和优势

我们知道, 高频电子直线加速器是用高频电场加速沿直线轨道运动的电子束的装置。通常, 电子束只通过直线加速结构一次, 在达到要求的能量后, 即离开直线加速器, 或直接用于科学实验、医学放疗、材料辐照、自由电子激光驱动等; 或注入到环型加速器中继续加速和积累, 用于同步辐射光源或高能物理实验等。高频电子直线加速器的优点是, 其束流性能比电子环型加速器的好。所谓束流性能, 主要是指束流的能量散度(简称能散)和发射度, 后者描述了束流在垂直于前进方向的横向相平面(以横向位移和横向动量为坐标)中所占的面积。显然, 能散越小, 能量的一致性(单色性)越好; 发射度越小, 束流在横向的位置和动量的分散越小。而直线加速器的优点, 就在于它的能散小、发射度小和束团长度很短(如皮秒量级的时间长度)等, 因为直线加速器出口的束流性能, 主要取决于电子源(或称电子枪), 而在加速和输运过程中, 受别的干扰(如加速场的不稳定性, 加速结构和聚焦元件的安装误差等)的影响, 相对环型加速器较小。而在电子环型加速器中, 束流的能散和发射度取决于辐射阻尼和量子激发两个效应的平衡结果。所谓辐射阻尼, 是指电子束沿环运动时, 会在切线方向辐射光子, 被辐射光子的能量与电子能量的四次方成正比。能量越大的电子, 辐射的能量越多, 使束流的能量和发射度的振荡幅度受到阻尼; 所谓量子激发, 是指电子受被辐射光子的反作用, 使电子的轨道和能量突然变化, 并使束流的能量和发射度的振荡幅度增大。因此在电子环型加速器中, 束流的能散和发射度几乎与电子源的性能无关。

而电子环型加速器的优点是, 束流的平均流强可达安培量级, 远高于直线加速器(如毫安量级)。

这是因为直线加速结构中脉冲加速电场的幅度、脉冲宽度和脉冲重复频率等受现有高频功率源的限制。由于环型加速器的平均流强高, 所以加速器的整机效率也高。实际上, 单位束流功率(能量和流强的乘积)所需加速器的造价和运行费上, 直线加速器远高于环型加速器。

那么有没有一种新的加速模式, 能综合这两类加速器的优点, 使束流性能好, 加速器的效率又高呢? 答案是肯定的, 那就是人们提出的能量回收型直线加速器的新思想。它的基本原理是, 让已被直线加速器加速和使用过的电子束(如用于驱动自由电子激光等), 经过回转的束流输运通道, 再返回到直线加速器入口, 并进入直线加速器, 但让电子束受到高频电场力的方向与电子束前进的方向相反(而不是相同), 也就是说, 让电子束减速(而不是加速), 从而使电子束的能量以电磁波的形式返还给加速结构, 用于下一个新束团的加速。这样, 使加速器所需的高频功率几乎与束流强度无关。若加速结构是超导腔(如美国杰弗逊实验室的红外自由电子激光驱动器, Jefferson Lab, IR-FEL), 在结构上的高频损耗很小, 使能量的回收率可达 75% 左右, 也就是使加速器的高频功率节省了 75% 左右。结果是, 能量回收型直线加速器, 保留了直线加速器的束流性能好的优点, 又使整机效率趋近环型加速器。

二、历史与现状

能量回收的新概念, 最早是由美国加速器专家 Maury Tigner 教授于 1965 年提出的。在 1985~ 1995 年期间, 在许多加速器上做了原理性的实验验证, 如美国麻省理工学院的 Betas 加速器、斯坦福大学的超导加速器 SCA-FEL、洛斯阿拉莫斯实验室的能量回收型自由电子激光器、杰弗逊实验室的连续电子束加速装置(CEBAF)的注入器上的能量回收实验验证等。

目前已投入长期运行的能量回收型直线加速器, 有美国杰弗逊实验室的红外自由电子激光驱动器和日本原子能研究所的自由电子激光驱动器。前者是目前能量最高的能量回收型自由电子激光驱动

现代物理知识

器,它将流强为 5 毫安连续束流加速到 50 兆电子伏能量,并实行能量回收正常运行模式。

正在建造、调试或开始投入运行的能量回收型自由电子激光驱动装置,有韩国原子能所的自由电子激光装置、俄国新西伯利亚核物理研究所的加速器-复原器(Accelerator-Recuperator)自由电子激光装置等。近年来,美国杰弗逊实验室的红外自由电子激光驱动器已升级成 10 千瓦的红外和 1 千瓦的真空紫外自由电子激光装置。此外,还有 5 台以上的基于能量回收的自由电子激光驱动装置在设计和预研中。

三、发展与前景

由于能量回收型直线加速器的优势,国际加速器界正在进一步研究这类加速器的发展,开拓更广泛的应用前景。这些研究和发 展,大致有以下几个方面:

(1) 基于能量回收模式的 X 射线同步辐射光源。其典型的代表,是美国康奈尔大学与杰弗逊实验室的联合研究计划,如图 1 所示。它用 5~7GeV 的电子直线加速器及其能量回收模式,作为 X 射线同步辐射光源。在这里,用于电子束返航的束流输运环,兼作同步辐射环。此外,还有洛斯阿拉莫斯实验室飞秒级的同步辐射光源方案,将采用能量回收模式,使束流功率进一步升级。

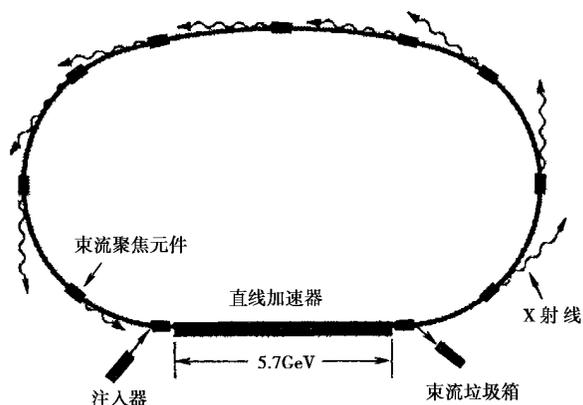


图 1 基于能量回收模式的 X 射线同步辐射光源示意图

(2) 基于能量回收模式的高能电子冷却装置。所谓电子冷却,是用低能强流的电子束与质量较大而能散、发射度很大的离子束在一段距离内相向碰撞运动,在碰撞过程中,由离子传给电子的能量和横向动量与离子原有的能量和横向动量成比例,多次碰撞的结果,使离子束的能散和发射度得到很大的改善,即被“冷却”。美国布鲁克海文实验室正与俄国新西伯利亚核物理研究所合作,研究用能量回收

型直线加速器提供 50 兆电子伏、100 毫安的高能强流电子束作为重离子对撞机 RHIC 中重离子的冷却装置,以提高重离子的束流性能和对撞亮度。

(3) 用能量回收型直线加速器提供的极化电子束,提供给极化电子和重离子的对撞机,用于高能物理与核物理的研究。如布鲁克海文实验室提出,来自能量回收型直线加速器的能量为 10GeV 的极化电子束与 RHIC 的重离子束对撞,称为 eRHIC,其优点是,相对环型对撞机,比较容易处理极化束运行的灵活性。

对基于能量回收模式的 X 射线同步辐射光源,要求电子束的能量达几百兆电子伏,平均流强达 10~100 毫安;而基于能量回收模式的电子-重离子对撞机,则要求电子束的能量达 3~10 吉电子伏,平均流强达 100~200 毫安。这些指标比目前实际达到的要高两个数量级,难度很大。为此这些实验室都相应提出了预制研究计划和样机方案。同时开展了强流加速器中各种束流不稳定性的研究等。例如,高流强、小发射度的产生和保持,要克服在低能段的电子与电子之间的相互作用(即空间电荷效应)对束流性能的破坏;在加速器和输运线中束流沿途在管道内激发的电磁场对束流的反作用(即尾场效应);在回转返航的路途上相干同步辐射导致的发射度增长;能量回收期间使减速中的电子束仍保持小动量散度,随后能顺利进入束流“垃圾箱”,避免在沿途的大量丢失等。上述(2)和(3)的研究计划,已列入 2003 年 11 月美国能源部公布的 20 年科学发展规划中。它们将与世界上众多国家在能量回收型直线加速器的发展研究一道,为这类新兴加速器的走向成熟和更广泛的应用做出贡献。

封面照片说明

北京时间 2004 年 1 月 3 日凌晨 3 时,美国“星尘号”彗星探测器经过近 5 年的飞行,终于与“怀德-2”彗星“亲密接触”,“星尘号”与“怀德-2”彗星接触了 8 分钟,实现了人类有史以来第一次收集到彗星样品。“星尘号”彗星探测器是美国宇航局 1999 年 2 月发射的,计划 2006 年返回地球。科学家们将对“星尘号”带回的样品进行一系列的物理与化学分析,从而进一步揭示太阳系诞生和地球生命起源的秘密。

(李博文)