

文章编号: 1007-4627(2001)01-0060-05

# 用于洁净核能源的 ADS-EA 方案\*

李浩虎, 唐靖宇

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

P. Mandrillon

(Laboratoire du Cyclotron, 227 Avenue de la Lanterne, 06200 Nice, France)

**摘 要:** 加速器驱动系统(ADS)是一种新型的洁净能源装置, 它采用加速器提供的强流高能质子束驱动次临界的核反应堆, 既有安全可靠和产生核废料少的优点, 还可以处理传统反应堆留下的核废料. 能量放大器是一个基于回旋加速器组合的 ADS 方案, 由三级回旋加速器组成的加速器系统可以产生流强为 12 mA 和能量为 1.2 GeV 的质子束(束流功率 14.4 MW), 用以驱动 1500 MW 的核反应堆.

**关键词:** 洁净核能; 加速器驱动系统; 能量放大器

**中图分类号:** TM613      **文献标识码:** A

## 1 引言

能源短缺目前已经成为大多数发展中国家所面临的主要问题之一, 对于发达国家, 尽管无能源短缺的问题, 但是传统燃料的使用带来的负面效应(如 CO<sub>2</sub>造成的地球温度升高, 环境污染, 核废料等)也成为其深感头痛的问题之一. 因此, 能否找到一种新的洁净能源就成为各国的主要研究课题之一.

毫无疑问, 核能应该是这一研究课题的一个重要组成部分. 但现有的核能利用方法却受到越来越多的公众的反对, 其原因主要有: (1) 同军事的联系及对核武器的恐惧; (2) 对核事故的恐惧; (3) 核废料的处理等. 如果消除了这些原因, 核能显然是较为理想的能源之一, 因为它不会生成 CO<sub>2</sub>、化学污染、粉尘污染、甚至于一些放射性颗粒. 自 50 年代末建成了世界上第一座核电站至今, 人们为了提高其安全性做了大量的技术改进, 然而我们已经看到, 这些改进并非是最佳的解决方案.

采用加速器产生的强流高能质子束驱动次临界反应堆, 即加速器驱动系统 ADS (Accelerator Driving System), 可能是在现有的核能生产基础上解

决上面问题的一条重要途径. 对于发达国家而言, ADS 的主要用途是消除核废料; 而对于发展中国家而言, 它同时也可以用作一种新的能源装置. 能量放大器方案是众多 ADS 方案中的一种.

## 2 ADS 的基本工作原理

ADS 是一个次临界系统, 由加速器提供的强流高能质子束轰击反应堆中的重靶, 产生高通量的快中子, 从而使反应堆达到临界状态<sup>[1]</sup>. 反应堆发电除小部分供给加速器运行外, 绝大部分可供民用电网. 重靶采用熔化铅或铅-铋共熔体, 同时起到几个方面的作用: (1) 高能质子束使铅核裂变并产生 30 个以上的快中子; (2) 用作中子的减速剂; (3) 作为冷却剂, 通过自然对流的方式传输热量; (4) 用作辐射防护罩.

高能质子束产生的快中子除了慢化后作为支持链式反应达到临界值外, 它还可以将普通核反应堆不能燃烧而作为核废料留下的一些超铀元素和长寿命裂变产物进行燃烧或嬗变为短寿命的同位素, 即可以进行核燃料的更彻底燃烧, 并可以用来处理常规反应堆留下的核废料. 快中子的作用还可以使反

收稿日期: 2000-08-14

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10075065)

作者简介: 李浩虎(1974-), 男(汉族), 河南安阳人, 在读博士, 从事加速器物理及应用研究.

应堆的燃料范围扩大, 使地球上的可用资源大量增加. ADS 提供的中子占临界状态所需比例为 0.02—0.10, 即反应堆的自持系数为  $k=0.90-0.98$ .

### 3 能量放大器方案

#### 3.1 ADS 中加速器系统的选择

为了驱动热功率为 GW 级的核反应堆, 所要求的加速器系统应能提供 10 MW 或更高的束流功率, 考虑到快中子产生率和造价等方面因素, 加速器的最终能量选择在 1 GeV 左右比较合适, 这就要求平均束流流强达到 10 mA 或更高. 如此高的束流功率是对现有加速器技术的挑战. 目前加速器系统方案的选择主要有两种, 一是主加速器采用直线加速器 (LINAC), 另一种是主加速器采用回旋加速器. 两种方案各有优缺点, 对于 LINAC 而言, 技术上相对比较成熟, 然而其造价和运行费要远高于相同功率的回旋加速器; 对于回旋加速器而言, 尽管有造价上的优势, 但技术实现上还具有很大的难度, 需要在今后的若干年内取得重大进展.

本文所介绍的 EA 方案 (见图 1), 反应堆中子自持系数为  $k=0.98$ , 由三级回旋加速器组成的驱动装置提供能量为 1—1.2 GeV、流强为 10 mA、束流功率为 10 MW 的质子束, 所驱动的反应堆产生 1 500 MW 的热功率, 考虑到加速器的电功率-束流功率转换效率及反应堆中的热功率-电功率转换效率 (图 1 中均用  $\eta_a$  表示), 最终送往电网的功率为 625 MW.

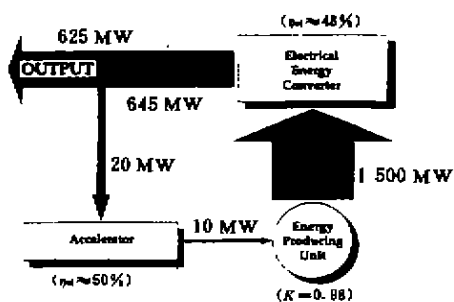


图 1 能量放大器工作原理示意图

#### 3.2 回旋加速器作为驱动装置的主要优势

回旋加速器驱动装置的优势在于: (1) 回旋加速器运行功率消耗的主要部分高频功率有较大部分转换为束流功率 (约 70%), 总的加速器的功率损失

相对较小 (约 60%); (2) 由于使用了比较少的控制元件, 可靠性可能要强于采用 LINAC 的情况; (3) 如果 ADS 的设计目的是为了消除核电站的放射性废料, 那么回旋加速器较小的尺寸就是一个很明显的优点, 不需要增加核电站的占地面积, 同时加速器的控制及安全性也较好; (4) 不需要超导高频腔; (5) 造价比 LINAC 低很多倍, 具有很大的商业优势.

#### 3.3 设计强流质子回旋加速器时考虑的主要因素

强流回旋加速器在设计过程中, 其主要困难在于注入时的轴向聚焦力和束流引出效率等方面, 下面将一一予以讨论.

##### 3.3.1 第一级加速器中心区的轴向聚焦力

在一般紧凑型回旋加速器中, 由于其中心区的磁场结构不具有较强的轴向聚焦作用, 而在注入螺旋式静电偏转镜的出口处, 束流的轴向动量又相对较大, 同时由于注入时的能量较低, 当束流强度较高时, 空间电荷效应的影响也不容忽略. 综合上述原因, 怎样在中心区得到一定的轴向聚焦力就成为提高回旋加速器流强的关键因素之一.

在回旋加速器的中心区提高轴向聚焦力的方法, 只有改变电场的形状及粒子通过加速间隙的相位. 由于粒子在进入加速间隙时受到电场的聚焦作用, 离开加速间隙时则相反, 而粒子在中心区的能量较低, 通过加速间隙的时间较长, 因此控制粒子通过加速间隙的相位可以使粒子受到的轴向聚焦作用高于其受到的散焦作用. 同时通过减小加速电极进入端的高度, 可以进一步增加粒子受到的电场聚焦力.

此外, 快速通过中心区也可以减小粒子所受的轴向散焦作用. 这可以通过改变等时场的形状及增加高频腔的加速电压来实现.

##### 3.3.2 引出效率

束流的引出效率是强流回旋加速器能否实现的最关键的因素之一. 这是因为引出时的束流功率很高, 即使很小的束流损失也会导致加速器元件的损坏. 为了达到很高的引出效率, 通常考虑的方法有单圈引出和通过剥离膜引出两种<sup>[4]</sup>.

###### (1) 单圈引出

束流在引出半径处的圈间距由下式给出:

$$d = \frac{RNVY}{[E_0(\gamma^2 - 1)]^2}, \quad (2)$$

其中,  $R$  为平均引出半径,  $N$  为加速间隙数量,  $V$  为加速电压幅值,  $\gamma = E/E_0$ ,  $E_0$  为质子的静止能量,  $E = E_0 + E_k$ ,  $E_k$  为质子的动能,  $\nu_r$  为径向自由振荡频率. 由式(2)可以看出, 引出半径越大, 加速电压越高和加速腔数量越多, 圈间距也就越大. 只有在圈间距  $d > 5$  mm 时, 才能达到较好的单圈引出. 为了保证设备的安全运行, 通常要将引出束流损失率控制在  $10^{-4}$  以下. 此外, 在磁场的边缘, 由于磁场的下降导致  $\nu_r$  的降低, 也有助于提高引出效率.

采用这种引出方式, 由于纵向空间电荷效应的影响及径向-纵向相空间的耦合作用, 束流的径向宽度随能量的增高也不断增加, 因此加速束流的最大流强受到了一定的限制. 假设束团的纵向长度远大于其径向和轴向的宽度, 其径向和轴向的宽度相等, 束团内部的电荷为均匀分布, 并且忽略相邻束团及镜像电荷的影响, 此时, 可得最高束流的限制由下式给出:

$$I_{lim} = \frac{E_0 \epsilon_0 \delta \Delta\phi F_{RF}}{1.23 N^2}, \quad (3)$$

其中,  $E_0$  为引出能量,  $\epsilon_0$  为真空的介电常数,  $\delta$  为束

团的径向和轴向半宽度,  $\Delta\phi$  为束团的相宽,  $F_{RF}$  为高频频率,  $N$  为加速的总圈数. 对于 380 MeV 和 70.4 MHz 的分离扇回旋加速器 (ISSC, 参数见表 1) 而言, 其最大束流强度约为 16 mA, 同样通过计算机模拟得到其最大束流的限制约为 15—20 mA.

(2) 通过剥离膜引出

这种引出方式适用于负离子 ( $H^-$ ) 或非全剥离的正离子 ( $H_2^+$  和其它的非全剥离重离子), 这种引出方式可以达到几乎 100% 的引出效率. 这时, 轴向空间电荷效应对回旋加速器最高束流流强的影响就要远高于束团的纵向空间电荷效应. 而轴向空间电荷效应对最大束流强度的限制由下式给出:

$$I_{lim} = H \nu_z^2 \bar{\omega}_{RF} \epsilon_0 (\Delta\Phi/2\pi) E_0, \quad (4)$$

其中,  $H$  为束流高度,  $\nu_z$  为轴向自由振荡频率,  $\bar{\omega}_{RF} = 2\pi F_{RF}$  为高频腔频率,  $\Delta\Phi/2\pi$  为相位接收度 (约为 10%),  $E_0$  为圈能量增益. 当  $\nu_z \approx 0.3$  时, 对于高度为 2 cm 的束流, 最大束流强度可以达到 30 mA.

表 1 C. Rubbia 及其小组提出的用于清洁核能的加速器驱动系统的主要参数<sup>①</sup>

		注入器	ISSC <sup>①</sup>	增能器	
加速粒子主要参数	粒子种类	H <sub>2</sub> <sup>+</sup>	H <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	
	束流强度 (mA)	6	12	12	
	注入能量 (MeV)	~0.06	25	380	
	引出能量 (MeV)	50	380	1 200	
	引出方式	剥离引出	单圈引出	单圈引出	
	最大引出圈间距 (mm)	—	~18	~12	
	扇块数	4	6	12	
	注入/引出方向与中心平面夹角 (°)	—	—	8/15	
	磁铁系统	最大螺旋角 (°)	0	4.0	14
		磁极半径 (m)	2.5	14	18
总重量 (t)		—	1 920	2 700	
扇区内最大磁场 (T)		—	1.6	1.8	
磁铁总功率 (MW)		—	0.48	3.24	
频率 (MHz)		70.4	70.4	70.4	
高频腔个数		4	4	8	
高频系统	注入/引出高频电压 (kV)	60	200/600	550/1 100	
	高频腔损耗 (kW)	—	4×325	8×300	
	束流获得的高功率 (kW)	300	4 260	9 840	
	总的高功率 (kW)	—	5 560	12 240	
	总效率 <sup>②</sup>	—	~40%	~40%	

① 中间级分离扇回旋加速器

② 总效率包括高频腔的效率 (约 70%) 以及磁铁系统和束流传输线的效率.

### 3.3.3 其它应考虑的因素

在设计加速器系统时,除了上面的两条主要影响因素外,还应当考虑到其它的能够导致束流损失或影响加速器运行可靠性的因素,如各级加速器间的匹配、高束流功率时高频腔的束流加载、加速器运行安全所要求的可靠的计算机系统以及可能用到的平顶波高频腔等问题,这里不再做详细说明。

### 3.4 能量放大器方案中的加速器设计参数

1993年第一次提出能量放大器方案后<sup>[5]</sup>,经过了多次方案调整,图2给出了该方案的加速器系统构造示意图。该方案由 ECR 离子源及一个三级回旋加速器系统构成,3台回旋加速器的高频频率均为70.4 MHz。系统的第一级加速器为一台4扇的小型超导扇聚焦回旋加速器,用来加速6 mA 的  $H_2^+$  至 50 MeV,然后通过剥离膜引出束流,可以得到12

mA 的质子束。ECR 源的引出电压(即注入电压)约为60 kV,轴向注入方式,4个高频腔,高频电压为80 kV,最大单圈能量增益为  $80 \text{ keV} \times 8 = 640 \text{ keV}$ 。第一级加速器中采用加速  $H_2^+$  的主要考虑是在同样空间电荷效应限制条件下可以得到双倍流强的质子束,还有采用超导磁铁和剥离引出等优点。第二级加速器为一台由6扇组成的分离扇回旋加速器,4个高频腔,注入区高频电压为200 kV,引出区高频电压为600 kV,引出方式为单圈引出,引出能量为380 MeV。第三级加速器为一台12扇的增能器,8个高频腔,注入区和引出区的高频电压分别为550和1100 kV,引出能量为1200 MeV。12扇带螺旋角的磁铁是1000 MeV 的质子轴向聚焦所必须的,8个高频腔和相应的高加速电压是为了在引出半径处有较大的圈间距,从而减小束流在静电偏转板上的损失率。这3台加速器的主要参数如表1所示。

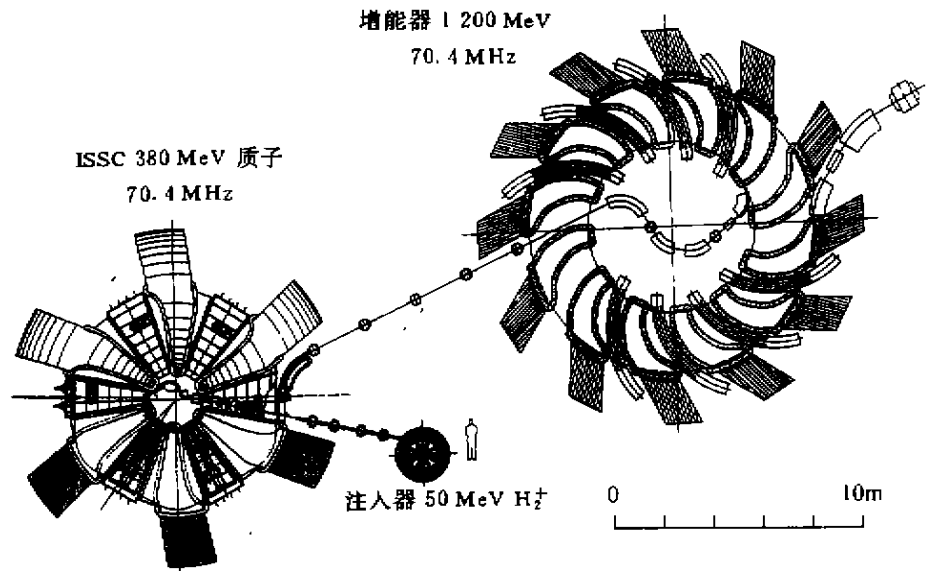
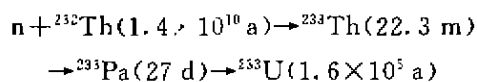


图2 能量放大器所用的加速器驱动系统

### 3.5 能量放大器方案的燃料选择

能量放大器方案的主要裂变材料为 $^{233}\text{U}$ ,实际的燃料组成则为 $^{232}\text{ThO}_2 + 0.1\%^{233}\text{UO}_2$ ,由反应式



可以看出, $^{232}\text{Th}$ 通过俘获中子及 $\beta$ 衰变可以转化为 $^{233}\text{U}$ ,而在自然界中 $^{232}\text{Th}$ 的含量要远远高于现有

核反应堆所用的 $^{235}\text{U}$ 。

## 4 结论

从上面的简单介绍可以看到,加速器驱动系统作为一个新的洁净能源装置,因其安全、洁净、原料丰富等特点,无疑具有很好的应用前景。而回旋加速器又因其价格便宜、占地面积小、效率高及可靠性较好等原因具有很强的吸引力。当然采用回旋

加速器得到 10 mA 和 1 GeV 的质子束有很大的难度, 也许需要在技术上有突破性的进展才能实现, 但如果能够做到, 对加速器发展、能源以及技术等

领域所带来的好处也是无法估量的。无论如何, EA 方案对在我国开展类似的可行性研究工作是一个很好的借鉴例子。

### 参 考 文 献:

- [1] Jean-Pierre Revol. Energy Concepts for the 21st Century [R]. CERN Academic Training.
- [2] Jean-Pierre Revol. Particle Physics Contribution to the Elimination of Nuclear Waste [C]. CERN-SL/89-067(EET).
- [3] 郭俊盛. 加速器驱动的嬗变技术及应用——一个关于核能发展的热门话题[J]. 原子核物理评论, 1999, 16: 267—272.
- [4] Fiétier N, Mandrillon P. A Three-stage Cyclotron for Driving the Energy Amplifier [C]. CERN/AT/95-03(ET) (Revised).
- [5] Carminati F, Gelès C, Klapisch R, *et al.* An Energy Amplifier for Cleaner and Inexhaustible Nuclear Energy Production Driven by a Particle Beam Accelerator [C]. CERN/AT/93-47(ET).
- [6] Mandrillon P, Donadey D, Di Carlo J F, *et al.* High Intensity Cyclotron Drivers for the Energy Amplifier [Z]. Dec 15, 1999, CERN/PS-Seminar.

## ADS-EA Proposal for Clean Nuclear Energy\*

LI Hao-hu, TANG Jing-yu

(Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China)

P. Mandrillon

(Laboratoire du Cyclotron, 227 Avenue de la Lanterne, 06200 Nice, France)

**Abstract:** Accelerator Driving System (ADS) is a new device for cleaning energy. A high intensity, high power proton beam provided by accelerators is used to drive a sub-critical nuclear reactor. It is safe, reliable and can produce less nuclear waste, and also can be used to treat the nuclear waste from the classical reactor. An Energy Amplifier (EA), which is composed of three cyclotrons, is one type of ADS. It will be used to produce 14.4 MW proton beam (12 mA, 1.2 GeV) and to operate a 1 500 MW nuclear reactor.

**Key words:** nuclear energy; accelerator driving system; energy amplifier

\* Foundation item: NSFC(10075065)