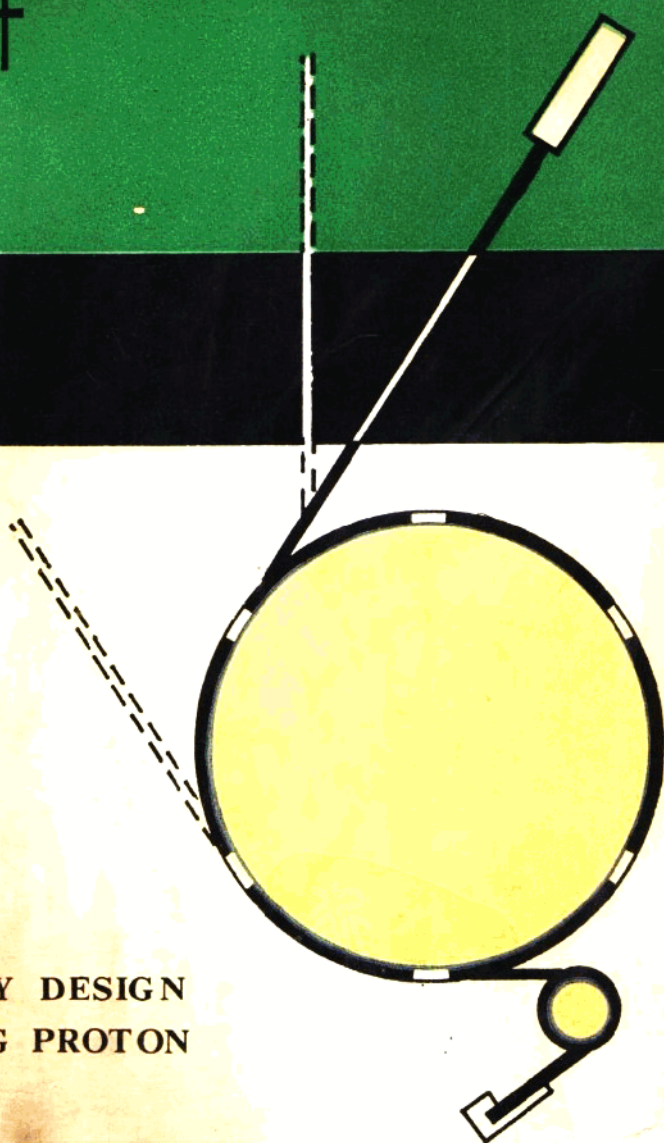


五百亿电子伏

北京质子同步加速器

初步设计



32

THE PRELIMINARY DESIGN
STUDY OF BEIJING PROTON
SYNCHROTRON

北京 BEIJING

500 亿电子伏质子同步加速器

初步设计书

中国科学院高能物理研究所编

一九八〇年六月

目 录

第一章 总论	1
第一节 序言	1
第二节 概述	2
第三节 予注入器	2
第四节 直线加速器	2
第五节 第一段中能输运段	3
第六节 增强器	4
第七节 第二段中能输运段	7
第八节 主加速器	7
第九节 计算机控制系统	11
第二章 750 千伏预注入器	12
第一节 总体设计	12
第二节 负氢离子源	14
第三节 加速管	16
第四节 750 千伏高压发生器	19
第五节 用水用电总量	22
第三章 93兆电子伏质子直接加速器	23
第一节 引言	23
第二节 物理设计	23
第三节 低能输运系统结构	26
第四节 加速腔结构	29
第五节 高频功率源	32
第六节 高频控制	35
第七节 磁铁设计	37
第八节 磁铁电源	40
第九节 束流测量	42
第十节 真空系统	46
第十一节 水冷系统	49
第十二节 建筑说明	52
第四章 20亿电子伏质子同步加速器 (增强器)	54
第一节 引言	54
第二节 物理设计	55
第三节 磁铁系统	60

第四节	电源系统	63
第五节	高频加速系统	70
第六节	注入及引出系统	80
第七节	真空系统	84
第八节	建筑说明	87
第五章	500 亿电子伏质子同步加速器	91
第一节	物理设计	91
第二节	磁铁系统	100
第三节	磁铁电源	108
第四节	高频系统	116
第五节	注入及引出系统	120
第六节	真空系统	122
第七节	建筑说明	126
第六章	中能束流输运段	129
第一节	总体布局 and 理论参数	129
第二节	总体元件布局初步考虑及磁铁的初步设计	136
第三节	磁铁电源	142
第七章	束流监视系统	147
第一节	总的设计考虑	147
第二节	束流探头的种类	147
第三节	束流测量用的数据收集系统	149
第八章	计算机控制系统	153
第一节	总述	153
第二节	20 亿电子伏增强器建成时的计算机控制系统	153
第三节	500 亿电子伏主环建成时的计算机控制系统	156
第四节	建筑说明	158
第九章	辐射防护和剂量监测	159
第一节	引言	159
第二节	辐射防护的安全标准	159
第三节	辐射的屏蔽计算	160
第四节	辐射活化计算	171
第五节	加速器部件、材料的辐射损伤	176
第六节	辐射剂量监测	178
第十章	加速器总体布置	184
第一节	场地概述	184
第二节	加速器布置原则	184
第三节	加速器布置说明	184
第四节	加速器水冷系统	187

第一章 总 论

第一节 序 言

高能物理是研究物质的微观结构及其运动规律的一门科学,是当代自然科学基础研究的前沿。高能粒子加速器是人工产生高能粒子以便进行高能物理实验的庞大装备。研究的对象愈深入、愈精细(当前实验高能物理一般研究约几万亿分之一厘米范围的微观现象),所需粒子的能量就愈高,设备就愈庞大(世界上已运行的质子加速器能量最高达四、五千亿电子伏,直径约两公里)。高能物理实验中心的建造,已成为当代最庞大、最复杂的综合性科学工程之一。

毛泽东主席早在一九五六年提出的“基本粒子”也是无限可分思想,指引着我国高能物理研究的发展,周恩来总理和党中央历来关注高能物理事业的发展。早在五十年代后期,就派出科学家、工程技术人员到国外工作、培训,筹划我国自己的高能基地的建设。文化大革命中,由于林彪、“四人帮”的干扰破坏,使这项工作停顿了近十年。

一九七二年,周恩来总理亲笔指示:“这件事不能再延迟了,科学院必须把基础科学和理论研究抓起来,同时又要要把理论研究和科学实验结合起来。高能物理和高能加速器的预制研究,应该成为科学院要抓的主要项目之一。”此后,经过两年多的酝酿,一九七五年三月,周恩来总理又在病中批准了根据华国锋同志指示报送的关于经过预制研究、进而建造一台能量约400亿电子伏的质子同步加速器的报告。但是,由于“四人帮”的阻挠和破坏,这项工程无法起步。

粉碎“四人帮”以后,以华国锋主席为首的党中央继承毛泽东主席、周恩来总理的遗志,对发展我国高能事业做了一系列重要指示。1977年11月,党中央、华主席批准了加快建设高能物理实验中心的计划,要求十年左右建成北京高能物理实验中心。

1978年3月,中央批准建造的500亿电子伏质子同步加速器原定1982年建成。当时为了及时建成,决定选用比较简单的布局方案,即用200兆电子伏直线加速器直接注入到主加速器,而不采用增强器。为了达到流强 1×10^{13} 质子/脉冲,主加速器弯转磁铁磁极间隙选用8.6厘米。这一方案的初步设计已由八七工程指挥部领导的包括中国科学院和有关工业、建筑等部门的专家所组成的联合设计处于1978年底完成。

从1979年开始,根据国民经济调整、改革、整顿、提高的方针,国务院将这一工程的完成期限推迟到1987年前并于1980年正式下文批复了任务要求。这样,就有了较长的预制研究时间。经过讨论并经领导决定在直线加速器和主加速器之间增设一台增强器,提高主加速器的入射能量,减小它的磁极间隙,以降低主加速器的功率消耗和运行费用,并增加进一步提高流强的可能性。此外,还将提供有应用和实验价值的中能束流。在工程指挥部和高能所总工程师、加速器总设计师领导下,在原初步设计基础上,进行了补充和修定。设计的依据为:主加速器设计能量为500亿电子伏,相应的弯转磁铁磁场强度约为17000高斯,设计流强为 1×10^{13} 质子/脉冲。

按照上述要求,于1979年8月完成了初步设计草案,在该草案中,曾分别对能量为15亿电子伏及20亿电子伏的两个增强器方案作了比较,作为进一步讨论的基础。

1979年底,增强器考察小组就上述设计方案中有关的重要问题与美国费米实验室及其它实验室有关专家,进行了多次讨论,并作了实际的调查。回国后他们对草案作了相应的修改,增强器能量确定为20亿电子伏,在这一基础上完成了本初步设计。由于设计中有许多部分尚在进一步深入,因此,目前的初步设计不可能十分完善,将来适当时候仍需作相应的调整及补充,现将初步设计的主要结果概述于后。

第二节 概 述

本加速器的设计能量为500亿电子伏,设计流强每脉冲 1×10^{13} 质子。脉冲循环周期约5秒。整个加速器系统的布局见图1-2-1。它由以下几个主要部分组成。

一、予注入器,它产生750千电子伏的负氢离子束。

二、直线加速器,包括低能输运段和直线加速器本体,它把负氢离子加速到93兆电子伏,共有四个加速腔。

三、第一段中能输运段,把直线加速器输出的离子束引导到增强器注入点,并进行性能匹配,全长44.5米。并有一条测量支线对束流进行动量测量,还可把束流从支线引到中能应用厅。

四、增强器,负离子进入增强器后,经剥离膜剥除电子,转变为质子束,继续加速到20亿电子伏。增强器平均半径为22.345米。有一个快引出系统,把质子束从环形真空室引出。

五、第二段中能输运段,把质子束从增强器引出口引导到主加速器注入点,并进行性能匹配,全长60.5米。

六、主加速器,把注入的质子束加速到最终能量500亿电子伏,其平均半径223米。根据物理实验提出的要求,质子加速到需要能量,可进行慢引出或快引出,快慢引出共用一条孔道。通过高能输运段,将束流引入实验厅,进行物理实验。高能输运段在将来设计时还应考虑分出快引出束流到中微子实验厅的可能性。主加速器设计中还考虑自另一超周期引出束流,注入下一级加速器的可能。

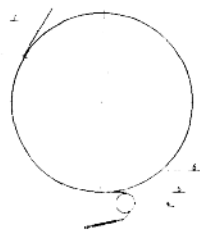


图1-2-1 加速器系统布局

1. 予注入器 2. 直线加速器
3. 第一段中能输运段 4. 增强器
5. 第二段中能输运段 6. 主加速器
7. 高能输运段

22
陵
1
反

第三节 予 注 入 器

予注入器由850千伏高压直流电源,负氢离子源,高梯度加速管及控制系统组成。它的主要参数见表1-2-1。

表1-2-1 予注入器主要参数

能 量	千 电 子 伏	750
束流强度	毫安	50~100
束流脉冲宽度	微秒	<130可调
重复频率	次/秒	1, 2, 5, 12.5
归一化发射度	毫米·毫弧度	28π

第四节 直线加速器

它是增强器的入射器,能产生30~50毫安的负氢离子流,脉冲宽度50~150微秒,重复频率

可达到12.5次/秒,能量为93兆电子伏。由四个加速腔组成。每个腔有一台高频功率源,额定输出脉冲功率为5兆瓦,可加速100毫安的脉冲离子流。加速电压频率为201.25兆赫。表1-3-1给出直线加速器的主要参数。

表1-3-1 直线加速器主要参数

腔 序			1	2	3	4
出口质子能量		兆电子伏	9.68	37.05	67.02	93.02
腔 长		米	7.273	18.675	17.016	16.170
腔 直 径		米	0.94	0.90	0.88	0.88
漂 移 管 直 径		厘米	18	16	16	16
漂 移 管 内 孔 径		厘米	2~2.5	3	3	3
单元长度	第一单元	厘米	6.0	21.3	40.8	53.6
	末尾单元	厘米	21.0	40.5	53.3	61.6
间隙长度	第一单元	厘米	1.31	4.15	12.13	19.73
	末尾单元	厘米	6.43	12.63	19.52	25.20
腔 后 漂 移 长 度		米	0.21	0.60	1.20	1.00
单 元 数 目			56	60	36	28
透 镜 数 目			57	61	37	29
平 均 轴 上 电 场		兆伏/米	1.55~2.08	1.93	2.45	2.46
腔 激 励 功 率		兆瓦	0.44	1.30	2.17	2.24
每腔总功率	流强100毫安	兆瓦	1.33	4.04	5.17	4.84
	流强50毫安	兆瓦	0.89	2.67	3.67	3.54

第五节 第一段中能输运系统

负氢离子束从直线加速器出来后,由输运系统输运到增强器入射点,整个输运系统由主线和一条支线组成。主线全长44.62米,第一段由两个 π 节组成,共有四对四极磁铁,对束流的发射度椭圆是么变换。每个 π 节长11.2米,双间隙散束器放在第二个 π 节后面,散束距离22米,以降低束流的能散度。第二段由偏转磁铁 BM_1 入口到增强器的剥离膜,中心轨道长21.02米,用来调束流横向发射度的匹配,并使束流色散特性具有一定调节范围,入射到增强器去。

支线从开关磁铁分出去,通过分析磁铁,到探测靶总长23.8米。它用于动量测量,其动量分辨率为 2×10^{-4} 。也可从此线引到中能应用厅,进行应用或实验研究。

系统的主要参数列于表1-4-1。

23个四极透镜的内切圆半径为5厘米,长30厘米,外形尺寸40×40厘米,最高磁场梯度约700高斯/厘米。

表 1-4-1 第一段中能输运系统元件主要参数

磁 铁 种 类	气 隙 厘米	磁 极 宽 厘米	长 度 厘米	磁 场 高斯	外 形 尺 寸 厘米×厘米×厘米
主线偏转磁铁 BM_1	5	22	100	7139	75×63×100
主线偏转磁铁 BM_2	5	22	50	1903	69×53×50
测量线偏转磁铁 BM_3	5	22	50	4992	57×77×50
开关磁铁 SM	5	22	50	4992	57×77×50
分析磁铁 AM	5	22	150	6640	65×78×150

第六节 增 强 器

负氢离子入射到增强器，经剥离膜剥除电子，转换成质子束，进一步加速到20亿电子伏，由快引出系统引出后，入射到主加速器。增强器上还留有相邻的三个长直线将来可用以安装慢引出元件，进行毫微秒级的慢引出，供实验用。

20亿电子伏的增强器主要参数见表1-5-1。

表 1-5-1 增强器主要参数

最高能量	亿电子伏	20	入射束水平发射度	毫米毫弧度	92π
最高磁场	高 斯	9412	入射束垂直发射度	毫米毫弧度	40π
入射能量	兆电子伏	93	入射束动量散度		2×10^{-3}
入射磁场	高 斯	1447	聚焦磁铁磁场梯度	高斯/厘米	277.9
轨道曲率半径	米	9.868	散焦磁铁磁场梯度	高斯/厘米	-277.9
平均半径	米	22.345	最大水平自由振荡振幅	厘米	3.7
小周期	$FO_2DO_1C.F.$		最大垂直自由振荡振幅	厘米	2.4
周期数目		16	闭合轨道最大水平畸变	厘米	0.6
磁铁块数		32	闭合轨道最大垂直畸变	厘米	0.4
F铁长度	米	1.9677	最大闭合轨道分散	厘米	0.7
D铁长度	米	1.9075	聚焦磁铁中束流截面	厘米×厘米	10.0×3.4
长直线节 O_1 长度	米	4.100	散焦磁铁中束流截面	厘米×厘米	6.0×5.6
短直线节 O_2 长度	米	0.800	最大水平 β 函数	米	14.74
水平自由振荡频率 Q_H		4.73	最大垂直 β 函数	米	14.52
垂直自由振荡频率 Q_V		4.80	跳相总能量/静止能量		3.91

一般快脉冲磁铁磁场分布畸变较大，最高磁场不宜选用太高。在本设计中，最高磁场为9412高斯，待进一步研究后，可能略加调整。

按主加速器输出流强每脉冲 1×10^{13} 质子考虑，增强器脉冲次数选为12.5次/秒，脉冲流强约 2×10^{12} /脉冲。因为主环约五秒一次脉冲，每次脉冲入射时间约占0.8秒。因此，增强器约有80%的时间可用于中能实验或应用研究。

为了减少磁铁种类，免去不同的磁铁励磁电流跟踪的技术困难，并减少增强器的周长，采用了等孔径、组合作用强聚焦系统。又为了注入和引出可以利用D铁的径向富余孔径，并减低磁场梯度，周期结构选用 FO_2DO_1 均匀结构，并把长直线节放在D铁后面。

长直线节的分配是一个注入，二个快引出，七个高频加速站。除注入和引出磁铁占用的长直线节外，其他长直线节还可安装束流检测探头及校正磁铁。短直线节供安装真空泵用。

校正元件初步考虑有微调四极透镜和去偶四极透镜，以调节工作点和校正差共振线。另外还有校正色散的六极透镜组和校正不稳定性的八极透镜组。根据需要，可能还要安装校正闭合轨道的二极校正磁铁组。

磁铁拟采用0.5毫米厚的 H_{10} 冷轧硅铁片制造，磁铁为框形结构。各铁片用环氧树脂粘合，外包不锈钢真空室。磁极间不再设真空室，以减小气隙。磁铁的主要参数见表1-5-2。

表 1-5-2 增强器磁铁主要参数

最高能量	亿电子伏	20	有效电流值	安	1146.9
最高磁场	高斯	9412	线圈铜管尺寸	毫米×毫米	14×14
入射磁场	高斯	1447	铜管中心水孔直径	毫米 ²	5.5
最大梯度 (F)	高斯/厘米	277.5	最大电流密度	安/毫米 ²	5.2
最大梯度 (D)	高斯/厘米	-277.5	均方根电流密度	安/毫米 ²	3.4
中心轨道磁极间隙	厘米	5.6	磁铁截面尺寸	厘米×厘米	61×46
好场区半宽度	厘米	5.0	铜重	公斤	364
长度	米 { F 铁 D 铁	1.9677 1.9075	铁重	吨	4.13
曲率半径	米	9.868	直流损耗	千瓦	6.5
最大励磁安匝数		42384	交流损耗	千瓦	2.66
总匝数		48	铁中损耗	千瓦	1.45
并联电路数		2	总损耗	千瓦	10.7
最大电流	安	1766	最大交流电压	伏	411.7
最小电流	安	269	直流电压	伏	6.45
直流电流	安	1017.4	冷却水压	公斤/厘米 ²	6
交流电流幅值	安	748.6	并联水路数		4
交流电流有效值	安	529.3	冷却水量	吨/小时	0.64
电流波形	1017.4—748.6cos25 π t		温升		12.3℃

为了减少电网峰值负载功率，并减小励磁电源峰值功率和电压，和大多数快脉冲同步加速器一样，励磁回路为偏置串联谐振回路。每一个F铁及D铁和一组储能电容的旁路电抗Lch组成一个谐振单元。谐振频率为12.5周/秒。各谐振单元串联，用一套励磁电源供电。励磁电源拟采用偏置正弦波（矩形波）电源。由点火线路控制桥式整流电路中的可控硅的点火角来产生正弦波（或矩形波）。

每个谐振单元的主要参数见表1-5-3。

表 1-5-3 增强器励磁回路每个谐振单元主要参数

磁铁电感	毫亨	14	最大交流电压	伏	823.4
扼流圈电感	毫亨	28	总损耗	千瓦	39.8
直流电阻	毫欧	25.2	电容值	微法	17325
交流等效电阻	毫欧	48	电容最大电压	伏	836.3
直流电流	安	1017.4			

磁铁系统和它的励磁电源的总参数见表1-5-4。

高频加速系统包括加速站和高频控制系统。加速系统主要参数见表1-5-5。

表 1-5-4 增强器磁铁和它的电源总参数

磁铁块数	32	励磁系统总损耗	千瓦	637
总铜重	吨 11.65	对地最高电压	伏	705.5
总铁重	吨 132.16	电源空载电压	伏	1195
总铁功率消耗	千瓦 341.6	电源最大电流	安	1766
磁铁冷却水流量	吨/小时 20.48	电源有效电流	安	1146.9
谐振单元数	16	峰值功率	兆瓦	1.915

表 1-5-5 增强器加速系统主要参数

每周能量增益	千电子伏	41.7
峰值加速电压	千 伏	80
加速站数目		7
谐波次数		3
频率范围	兆 赫	2.658~6.075

每一个加速站有两个铁氧体加载的同轴谐振腔，每个腔的加速电压为 8 千伏。每一加速站由一台高频机激励。每一加速站有自动频率调谐装置，调谐铁氧体的偏置电流，以调节加速腔的谐振频率。在高频控制系统中，一个计算机控制的频率函数发生器，控制高频机频率。并有相位环和径向位置环，利用束流信号对频率进行精调。在加速快终了时，还要进行束团向主加速器的同步输送。使增强器的 10 个脉冲的束团，依次入射到主加速器相稳定区的中心。

注入系统包括一块偏转磁铁和四块相同的凸轨磁铁及一个剥离膜，剥离膜尺寸为 40×50 毫米²，厚度是 70—100 微克/厘米²。

表 1-5-6 入射元件的主要参数

	偏 转 磁 铁	凸 轨 磁 铁		偏 转 磁 铁	凸 轨 磁 铁
偏转角 (毫弧度)	433.3	78.6	极面宽度 (毫米) ²	40	170
长度 (米)	0.9	0.4	励磁绕组匝数	2 × 35	1
磁场强度 (高斯)	6800	2800	磁场下降时间 (微秒)		30
束流孔径 (毫米 ²) (宽 × 高)	30 × 20	80 × 40	最大励磁电流 (安)	250	12500 × 2
气隙高度 (毫米) ²	35	56	铁片厚度 (毫米)		0.15 - 0.20

表 1-5-7 增强器引出元件主要参数

冲击磁铁			偏转磁铁		
孔 径	毫米 ²	120 × 50	块数		3
总冲击量 (BL)	高斯米	1200	每块长度	毫米	800
上升时间	毫微秒	100	磁场强度	高斯	5400
阻抗	欧	14	束流孔径 (宽 × 高)	毫米 × 毫米	42 × 23
节数		6	切割板厚度	毫米	10
每节长度	毫米	350	气隙高度	毫米	30
总机械长度	毫米	2600	极面宽度	毫米	60
励磁电流	安	2500	最大励磁电流	安	13000
励磁电压	千伏	72	最大电流密度	安/毫米 ²	50
磁场强度	高斯	650			

快引出系统由冲击磁铁和偏转磁铁组成，这两种元件安放在相邻的两个长直线节里。引出系统元件主要参数列于表1-5-7。

第七节 第二段中能输运系统

把质子束从增强器引出口输送到主加速器入射点（MSI入口）。并进行性能匹配。总长度60.5米，由13个四极磁铁，一块开关磁铁，三块偏转磁铁组成。

这段输运系统可分成三段，第一段由二个四极磁铁和两块偏转磁铁组成消色差系统。第二段由5个四极透镜及一个开关磁铁组成，完成横向相空间的匹配。第三段由六个四极透镜和一个偏转磁铁组成，是一个 π 节并完成色差匹配。开关磁铁可把束流偏开，以便引入中能实验厅。

表1-6-1 给出这段输运系统主要元件性能参数。

表 1-6-1 第二段中能输运系统主要元件参数

	气隙或内切圆半径 (厘米)	磁场强度或梯度 (高斯或高斯/厘米)	铁 长 (厘米)	外 形 尺 寸 (厘米×厘米×厘米)
偏转磁铁 BM ₁	6	8106	100	69×83×100
偏转磁铁 BM ₂	6	7130	100	69×83×100
开关磁铁	6	8001	120	69×83×100
四极透镜	6	100~500	70	40×40×70

第八节 主 加 速 器

增强器输出的质子束，入射到主加速器后，继续加速到最高能量500亿电子伏。在最高能量下弯转磁场约为17000高斯。

主加速器由它的磁铁系统、励磁电源、高频加速系统、注入、引出系统、真空系统、自动控制系统等组成。

聚焦结构采用分离作用强聚焦结构。因为这种结构工作点能灵活调节，磁铁系统也较为经济。有些弯转磁铁被抽掉，形成长直线节，供安装注入、引出及高频加速站。为了有足够长的长直线节，小周期数选为60。由于抽掉一些弯转磁铁，形成了超周期，整个加速器共分为六个超周期。每个正常小周期包括四块弯转磁铁（B）和两块四极磁铁（QF，QD）。聚焦系统的主要参数见表1-7-1。

表 1-7-1 主加速器聚焦系统主要参数

最大能量	亿电子伏	500	超周期数	6	
最大弯转磁场	高 斯	16988	一个超周期中弯转磁铁的	$(2/2)^3 0/2 0/00/02/20/2$	
入射能量	亿电子伏	20	安排	$(2/2)^2$	
入射磁场	高 斯	928.8	聚焦磁铁数	120	
脉冲流强	质子/脉冲	1×10^{13}	弯转磁铁块数	168	
弯转半径	米	100.00	聚焦磁铁长度	米	1.50
平均半径	米	223.071	弯转磁铁长度	米	3.74
结构类型	FODO 分离型		长直线节长度	米	10.18
周期数			短直线节长度	米	2.0

磁铁之间间隙长	米	0.4/0.3	最大垂直自由振荡振幅	厘米	2.29
正常周期长度	米	23.36	最大水平自由振荡振幅	厘米	3.45
水平自由振荡频率 Q_H		13.75	最大水平闭轨畸变振幅	厘米	0.6
垂直自由振荡频率 Q_V		13.75	最大垂直闭轨畸变振幅	厘米	0.4
水平接受度	毫米毫弧度	31.0π	最大闭合轨道分散	厘米	0.83
垂直接受度	毫米毫弧度	13.5π	弦弧差	厘米	1.75
注入动量散度		$\pm 2 \times 10^{-3}$	聚焦磁铁束流截面	厘米	9.8×2.6
聚焦磁铁最大梯度	高斯/厘米	1335	散焦磁铁束流截面	厘米	4.7×5.4
散焦磁铁最大梯度	高斯/厘米	-1328	弯转磁铁 B_F 中束流截面	厘米 $\times$ 厘米	9.3×3.9
水平最大 β 函数	米	38.44	弯转磁铁 B_D 中束流截面	厘米 $\times$ 厘米	7.1×5.1
垂直最大 β 函数	米	38.95	循环时间	秒	4~5
水平最小 β 函数	米	8.15	磁场上升时间	秒	1.5
垂直最小 β 函数	米	8.06	平顶时间	秒	1.0
最大动量收缩函数	米	3.59	磁场下降及恢复时间	秒	1.5
最小动量收缩函数	米	0.013	注入时间	秒	0.72
相对临界能量		11.49			

磁铁系统由168块弯转磁铁(B)和60块聚焦磁铁(Q_F)和60块散焦磁铁(Q_D)组成。这些磁铁都用1.0(或1.5)毫米厚的超低碳纯铁片迭装而成。

在 Q_F 和 Q_D 中束流截面不同,因而在 Q_F 两旁的弯转铁(B_F)和 Q_D 两旁的弯转铁(B_D)可以采用不同的孔径,以节省材料和功率。经估计,采用不同孔径的B铁比同一孔径的B铁功率可省10%,材料节省不到10%。

在引出系统及其他超周期对应地点的一些四极磁,铁有效孔径半宽度要求扩大到8厘米。(正常四极磁铁有效孔径半宽为6厘米)。需要扩大孔径的磁铁共36块。四极磁铁可全部扩大孔径,或只36块扩大。其余84块按孔径半宽6厘米设计,则后一方案可省功率1/4,材料约省1/5。

但是,为了保证不同孔径的磁铁性能相同,在设计和制造上都增加不少困难。工、夹、模具也增多。而功率和材料节省不多(四极磁铁虽可省1/4-1/5,但它总消耗功率和材料较少)。所以决定采用同一孔径的弯转磁铁和四极磁铁。

弯转磁铁为方矩形结构,采用内绕组的平面磁极的二极磁铁。四极磁铁为双曲线极面。它们的主要参数分见表1-7-2,1-7-3。磁铁系统的总参数见表1-7-4。

表 1-7-2 弯转磁铁参数

最高磁场	高斯	16988	温升	℃	12
磁极间隙	厘米	5.6	最大励磁电流	安	4974
好场区半宽度	厘米	6	均方根电流	安	3258
铁心长	米	3.74	内绕组最大电流密度	安/毫米 ²	7.097
铁毛重	吨	9.6	外绕组最大电流密度	安/毫米 ²	5.65
励磁绕组匝数(内+外)		4+12	内绕组均方根电流密度	安/毫米 ²	4.65
线规(内绕组)	毫米	$24.5 \times 31/\phi 8.5$	外绕组均方根电流密度	安/毫米 ²	3.70
线规(外绕组)	毫米	$31.0 \times 31/\phi 10$	损耗功率	千瓦	32.2
铜重	吨	1.07	最大励磁功率	千瓦	165.4
冷却水压	公斤/厘米 ²	6	外形尺寸	毫米 $\times$ 毫米	780×440
冷却水量	吨/小时	2.47			

表 1-7-3 四极磁铁主要参数

磁长度	米	1.5	冷却水压	公斤/厘米 ²	6
最大梯度 (Q_F)	高斯/厘米	1335	冷却水流量	吨/小时	0.93
最大梯度 (Q_D)	高斯/厘米	-1328	铜 重	吨	0.39
内接圆半径	厘米	5.6	最大励磁电流	安	2022.6
好场区半宽度	厘米	6(引出区8)	均方根励磁电流	安	1324.7
铁心长	米	1.332	最大电流密度	安/毫米 ²	5.81
铁心毛重	吨	5	均方根电流密度	安/毫米 ²	3.8
每极线圈匝数		9	损耗功率	千瓦	11
线 规	毫米	17×22, ϕ 5.5	最大励磁功率	千瓦	45.9

表 1-7-4 磁铁系统总参数

		B 铁	Q 铁	总 量
铁 重	吨	1612.8	600	2212.8
铜 重	吨	180	46.8	246.8
冷 却 水 量	吨/小时	415	111.6	526.6

励磁电源不采用中间储能装置,直接接到电网。弯转磁铁用6台, Q_F 和 Q_D 各用3台电源,各电源独立控制调节。十二台电源分装在三个电源房内,每个电源房安放二台B铁和 Q_F 及 Q_D 各一台电源。每台电源由十二相可控硅整流器、点火线路和滤波器组成。表1-7-5给出励磁电源的总参数,表1-7-6是励磁电流及其纹波电流公差要求。

表 1-7-5 励磁电源总参数

		B 铁	Q 铁			B 铁	Q 铁
磁铁总电阻	欧	0.51	0.39	均方根电流	安	3258	1324.7
电缆电阻	欧	0.05	0.07	最大电压	伏	6131	1591.6
总负载电阻	欧	0.56	0.46	最大有功功率	兆瓦	29.82	3.15
总负载电感	亨	0.92	0.45	最大无功功率	兆伏安	18.07	2.38
最大电流	安	4974	2022.6	损耗功率	兆瓦	5.95	0.81
最小电流	安	268.82	109.31				

表 1-7-6 励磁电流和纹波电流公差要求

	电 流 公 差		纹 波 公 差	
	B 铁	Q 铁	B 铁	Q 铁
注入段	$\pm 2 \times 10^{-4}$	$\pm 2 \times 10^{-4}$	$\pm 2 \times 10^{-4}$	$\pm 2 \times 10^{-4}$
上升段	$\pm 1 \times 10^{-3}$	$\pm 1 \times 10^{-3}$		
平顶段	$\pm 1 \times 10^{-4}$	$\pm 1 \times 10^{-5}$	$\pm 1 \times 10^{-4}$	$\pm 1 \times 10^{-6}$

高频加速系统向粒子提供能量,把粒子加速到最终能量。这一系统的工作原理和增强器的高频加速系统相同,高频加速系统的主要参数见表1-7-7。

由于主加速器的加速系统的调频范围只有6%，因此，除了采用铁氧体加载的同轴谐振腔外。也有不用铁氧体加载，以缩短腔长，而采用1/4波长空腔的可能性。

采用铁氧体加载的谐振腔时，由于工作频率在6兆周附近，铁氧体拟采用类似日本的M₄B20。铁氧体环外径450毫米，内径200毫米，厚25毫米。调谐用的偏流源，最大电流只须500安培。表1-7-8给出采用这种加速站时不同间隙电压下的主要参数。估计可以采用10或12千伏的间隙电压。

表 1-7-7 高频加速系统主要参数

每圈能量增益	千电子伏/圈	155
峰值加速电压	千 伏	310
同步相角		30°
倍频系数		30
频率范围	兆 赫	6.085~6.420

表 1-7-8 铁氧体加载的加速站的主要参数

间隙电压	千伏	8	10	12	15
铁氧体耗/每站	千瓦	4.65	7.27	10.46	16.53
束耗/每站	千瓦	2.65	3.31	3.785	4.8
每站功耗	千瓦	7.78	11.13	14.92	20.04
站数		20(+4)	16(+4)	14(+4)	11(+4)
发射机台数		20	16	14	11
占用长直线节数		6	5	5	4
共用铁氧体片数		864	720	648	540

如果采用空腔做加速站时，采用折叠结构，单腔长度约3—4米。腔外加调感器耦合，以调节腔的谐振频率。如果品质因数Q可达到800，那么用50千瓦高频机，即能使每个腔建立64千伏的加速电压。整个加速器只要用5台高频机推动5个空腔。可节省高频机十多台。调谐用的铁氧体估计只要100片，也可节省600—700片。这一加速结构是否能满足要求，须待模型试验后确定。

注入系统由切割磁铁和冲击磁铁组成，注入系统元件主要参数列于表1-7-9。快慢引出共用一条通道。由5块凸轨磁铁，两套冲击磁铁，静电切割器薄切割磁铁和厚切割磁铁组成。表1-7-10给出引出系统元件参数。

表 1-7-9 主加速器注入系统元件参数

		切割磁铁	冲击磁铁			切割磁铁	冲击磁铁
有效长度	米	1	2	最大励磁电流	安	21100	2576
磁场强度	高 斯		460	极面宽	毫 米	133	65
束流截面	毫米×毫米	40×113	53×64	外廓尺寸	毫米×毫米	270×260	
切割板厚	毫 米	15		磁场上升时间	毫微秒		100
气隙高度	毫 米	40	56				

主加速器的真空室用2毫米厚的奥氏体316LN不锈钢制成，导磁率应不大于1.003~1.004。弯转磁铁中的真空室为5.54×16厘米²准矩形。四极磁铁中的真空室为7×16厘米²的准椭圆形。真空室与磁极面间有厚0.3毫米的绝缘层。整个环形分成十二个区段。每段配30升/秒的离子泵十台，

表 1-7-10 主加速器引出系统元件主要参数

	冲击 磁铁	引出 磁铁	薄切割 磁铁	静电 切割器	凸轨 1	凸轨 2	凸轨 3	凸轨 5	凸轨 6
块数	2	4	3	2	1	1	1	1	1
每块长度 (米)	1.68	1.20	1.0	3.0	0.5	0.2	0.8	0.5	0.2
束团截面 (毫米×毫米)	44×98	16×21	12×26		35×90	35×100	50×70	35×90	35×90
切割板厚度 (毫米)		30	5	0.15					
磁场强度 (高斯)	620	13000	3000	60千 伏/厘米	2894	3296	2936	3493	2701
气隙高度 (毫米)	46	24	24		36	36	56	36	36
磁极宽度 (毫米)	100	60	60	15	150	150	120	150	150
弧弦差 (厘米)		1.5	0.9						
励磁电流 (安)	2800	6120	5730		1040	1180	1310	1250	970

450升/秒的分子泵予抽机一台。工作真空度为 3×10^{-7} 托。分子泵装在二米长的短直线节上, 离子泵接在 0.4 米长的磁铁间隙中, 高频加速站和注入引出处加装 600 升/秒的大离子泵并加设分子泵。

第九节 计算机控制系统

控制系统的功能为, 进行加速器各系统的数据采集、处理及警报监督。进行束流监测及控制台屏幕显示。闭轨校正、磁铁电源、高频加速系统及真空系统等控制。一切控制操作都可以在中央控制室完成。这一系统的设计, 尚在进一步研究中。

表 2-1-1 是这两台预注入器与国外几台同类型预注入器主要参数比较。

三、总体布局

高压发生器、高压舱及加速管与低能输运段在同一直线上；从加速管引出的束流无须偏转，可直接进入直线加速器中。

高压舱外形尺寸为 $2.5 \times 3 \times 2.5$ (米³)，把高压舱的门安排在通向控制室方向。高压舱在加速管侧与墙的距离定为 2 米。

加速管接地端固定在墙内的框架上，高压端用尼龙绳悬在顶棚，并拉到墙的一侧加配重。

阻容分压器横放在高压舱与控制室墙上，距离为 2.8 米，此侧设有观察窗及光通道。

高压发生器及高压舱的总高度分别为 5.8 米和 6.8 米，高压大屏蔽罩直径为 1.8 米。

预注入器大厅内有 2 吨梁式吊车和升降平台。升降平台采用可移式，载重 200 公斤。

预注入器大厅配有空调设备，以保证高压可靠运行，室内相对湿度保持 $55 \pm 10\%$ ，温度保持 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ 。

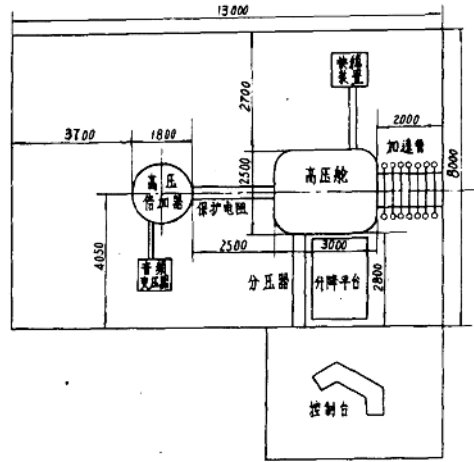


图 2-1-2 预注入器位置布置图

要求接地电阻在 0.5 欧姆以下，为了屏蔽电磁场对外的干扰，预注入器大厅内六面都用 0.5 毫米厚镀锌铁板屏蔽。

四、设计上的原则考虑

考虑国外预注入器实际运行情况，采用一台预注入器，而准备易损部件便于更换，保证运行可靠性。考虑到 FNAL 的负氢离子预注入器较为成功，故负氢离子源采用 FNAL 的结构及参数，加速管结构基本参考 FNAL 的方案。

在规划“八·七”工程总平面布置时留有增加另一台极化束预注入器的余地。

(一) 高压发生器

瑞士 Haefely 公司生产高压发生器经国外几家加速器实验室使用并改进，近年来的产品较为合理，可作参考，并结合国内实际情况确定指标如下：

额定电压	750 千伏
最高工作电压	850 千伏
极性	负
输出脉冲电流	200 毫安
输出平均电流	4 毫安
脉冲宽度	< 130 微秒(可调)
脉冲次数	1、2、5、12.5 次/秒
高压稳定度	5×10^{-4}

(二) 负氢离子源