

卷
设计
反应
模型

35MeV 北京质子直线加速器横向束流动力学的计算研究

罗紫华 王书鸿

(中国科学院高能物理研究所,北京)

摘 要

本文给出了 35MeV 北京质子直线加速器的横向束流动力学计算,其结果已在该加速器调试中得到应用,证明计算合理可靠,并对实际调试具有指导意义。

一、引 言

35 MeV 北京质子直线加速器是在不改变原 10MeV 加速器结构的前提下扩建而成的。但腔的轴上平均电场、同步粒子相位变化规律、横向聚焦透镜数目及组别等均与原 10MeV 加速器有所不同,其横向束流动力学计算有新的考虑。本文讨论了这个问题,给出该加速器的横向聚焦结构参数,透镜电源连结方式及束流横向匹配的磁场梯度值,为加速器透镜及其电源加工和加速器联调出束,提供了相应的理论参数。

二、横向聚焦结构与透镜分组

35MeV 加速器的横向聚焦选用 FD 结构。选择这种结构可达到较好的束流横向聚焦效果。这是因为它具有较大的横向稳定区,聚焦作用较强,束流包络变化较小,有利于克服空间电荷效应,束流不易横向丢失。

加速腔内的 105 个磁透镜分成五个等长组,以便加工、替换和保留较好的聚焦性能。这些透镜的主要参数见表 1。

表 1

组 别	序 号	透镜数	铁长度 (cm)	有效长度 (cm)	最大梯度 (Wb/m ³)	最大励磁电流 (A)	单位安匝梯 度值 (Wb/m ³ ·A)	透镜内孔径 (cm)
1	1—8	8	2.54	3.45	92	212	41.38×10^{-2}	2.2
2	9—18	10	3.17	4.09	72	166	41.88×10^{-2}	2.2
3	19—35	17	4.44	5.64	52	230	21.85×10^{-2}	2.9
4	36—56	21	6.98	8.20	34	151	21.84×10^{-2}	2.9
5	57—105	49	10.16	11.38	20	192	10.77×10^{-2}	3.4

1988.
538.
8.
rev.
0.
61.
10.

三、横向聚焦、散焦参数及工作点

FD 聚焦结构对应的粒子横向运动稳定图见图 1。图上的纵坐标和横坐标分别为横向聚焦参数 θ^2 和散焦参数 Δ_N 。它们分别为

$$\theta^2 = eH'L_c^2 / (m_0c\beta_s\gamma_s); \quad (1)$$

$$\Delta_N = \pi e E_1 T \sin \varphi_s L_c^2 / (m_0c^2\beta_s^3\gamma_s^3\lambda), \quad (2)$$

其中 H' 为透镜的磁场梯度 (Wb/m^3); L_c 为加速单元长度 (m); m_0c^2 为质子静止质量 (MeV); β_s 为同步粒子的相对速度; $\gamma_s = (1-\beta_s^2)^{-1/2}$; E_1 为轴上平均电场 (MV/m); T 为渡越时间因子; φ_s 为同步粒子到达加速间隙的高频相位 ($^\circ$); λ 为高频自由波长 (m)。

由式(2)可知: Δ_N 与 E_1 、 T 、 φ_s 等有关。图 2 给出 35MeV 加速器的这些参量随加速单元的变化。 T 在 $n_c = 18$ 及 $n_c = 57$ 处有突变, 这是由于相应的漂移管内径或外径, 或者腔内径有突变所致; E_1 随加速单元序号增大而增大, 腔的第一和最后一个加速单元的 E_1 分别为 1.65MV/m 和 2.6MV/m; 同步相位从第一单元的 -40° 逐渐变至最后单元的

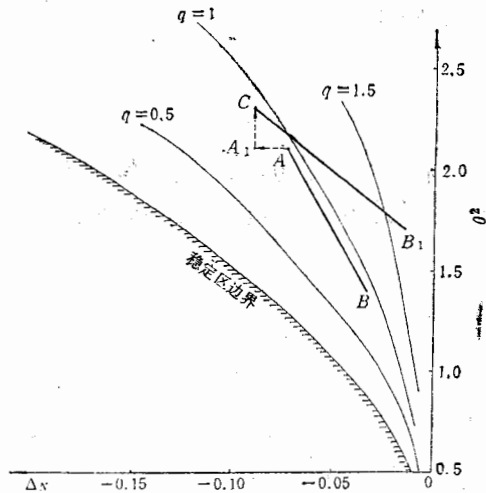


图 1 FD 聚焦结构稳定图及 35MeV 加速器的同步粒子工作路线

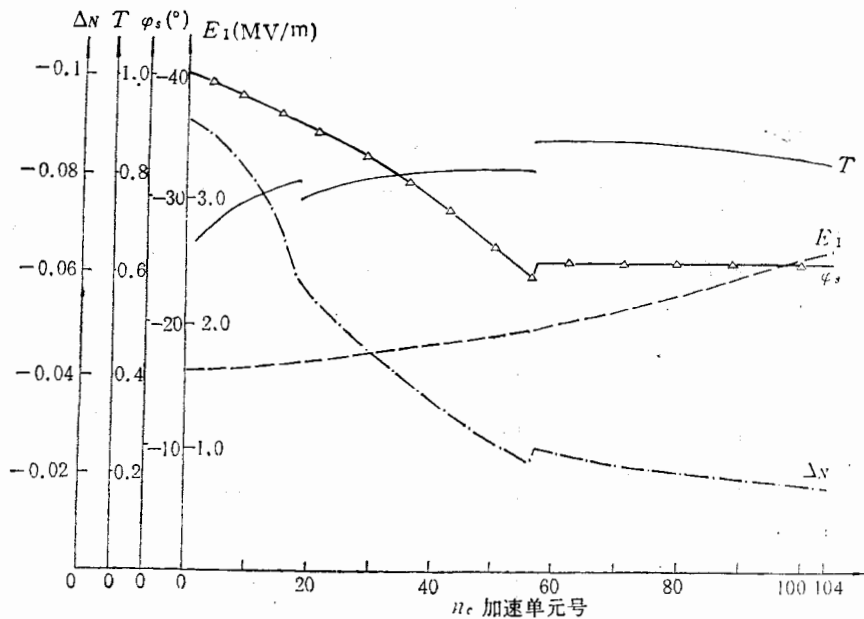


图 2 35MeV 加速器的一些参数随 n_c 的变化

-25° , 在第 54 单元处的 φ_s 为 -23.6° 。扩建后的 0.75—10MeV 段内 (即 $n_c \leq 57$), φ_s

的变化规律是在不改变该段内的结构, 并在新选的轴上平均电场规律下仍满足原同步加速条件来确定的. 这一相位变化规律, 对于加速 100mA 质子束是完全允许的^[1].

10MeV 加速器扩建成 35MeV 后, 腔入口的轴上平均电场及 $|\varphi_s|$ 都变大, 由式(2)可知它将导致高频横向散焦作用增大, Δ_N 从原来的 -0.076 变为 -0.091 . 如不改变聚焦磁场梯度, 同步粒子的工作点将从图 1 中的 A 点平移至 A_1 点, 即工作点向稳定边界方向移动. 图中 AB 是原 10MeV 加速器的同步粒子工作路线. 为了提高 35MeV 加速器的束流横向运动稳定性, 并让 $|\varphi_s|$ 增大后, 纵向稳定区 $3|\varphi_s|$ 内所有非同步粒子都能处在横向稳定区内, 宜将聚焦磁场梯度增大, 即工作点的起始点移至 C , 图中 CB_1 为 35MeV 加速器所选用的同步粒子的工作路线. 其特点是避开了最危险的横向与纵向运动耦合共振线(即图中的 $q = 0.5$ 线), 很快地穿过 $q = 1$ 及 1.5 共振线, 防止了粒子大量丢失. 这条工作路线所对应的磁场梯度值及励磁电流值较适中, 易于电源的制造和调节.

四、束流匹配、匹配位置及透镜电源分配

质子直线加速器的束流横向匹配, 是通过调节匹配透镜的磁场梯度, 使匹配位置上的射度椭圆参数与接受度椭圆参数一致. 其匹配计算方法可参见文献[2].

在 35MeV 加速器里, 由于透镜分成等长组, 透镜长度不是随加速单元长度变化而连续变化, 因此, θ^2 随加速单元变化也不连续. 同时, Δ_N 也不是光滑连续的(见图 2). 这些不连续都将引起束流横向失配. 为了实现匹配, 选择腔的入口处和出口处的若干透镜, 及透镜组的若干透镜为横向匹配透镜. 计算表明: 让水平方向和垂直方向的匹配位置分开, 并均选在聚焦结构的包络函数为极小处, 可使磁场梯度误差对束流匹配的影响不太敏感,

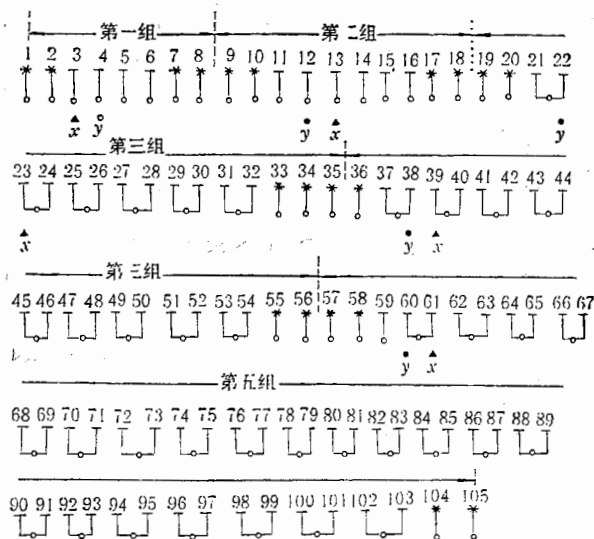


图 3 35MeV 加速器束流匹配位置及透镜电源分配

1, 2, ... 为腔内透镜的序号 ●, ▲分别是水平方向 * 及垂直方向 y 束流横向匹配点位置 组别为透镜组号 * 为匹配透镜 U 和 J 分别表示单透镜和双透镜电源供电

表 2

束流强度 $I_b = 60 \text{ mA}$

透镜序号	$H'(\text{Wb/m}^3)$	$Y_e(\text{mm})$	$X_e(\text{mm})$	透镜序号	$H'(\text{Wb/m}^3)$	$Y_e(\text{mm})$	$X_e(\text{mm})$
1	83.88	2.987	4.994	45	24.62	4.692	6.687
2	81.54	5.026	3.029	46	24.62	6.874	4.605
3	80.89	3.045	5.047	47	24.20	4.732	6.737
4	80.03	5.077	3.027	48	24.20	6.877	4.644
5	79.02	3.054	5.028	49	23.84	4.733	6.781
6	78.03	5.083	3.049	50	23.84	6.879	4.695
7	75.63	3.195	5.066	51	23.51	4.744	6.830
8	76.10	5.369	3.156	52	23.51	6.874	4.755
9	64.73	3.334	5.310	53	23.39	4.708	6.987
10	64.46	5.407	3.347	54	23.39	6.513	5.296
11	62.54	3.378	5.443	55	21.29	4.720	7.805
12	61.91	5.443	3.403	56	23.74	7.286	5.032
13	61.24	3.390	5.478	57	18.31	5.099	6.664
14	60.50	5.453	3.421	58	15.66	6.866	4.802
15	59.79	3.436	5.496	59	16.54	4.763	6.925
16	59.06	5.565	3.473	60	17.55	6.847	4.802
17	57.63	3.623	5.559	61	17.55	4.745	6.873
18	58.50	5.828	3.560	62	17.36	6.797	4.771
19	43.09	3.814	5.658	63	17.36	4.718	6.851
20	43.44	5.945	3.714	64	17.22	6.791	4.772
21	41.99	3.891	5.793	65	17.22	4.734	6.880
22	41.99	5.983	3.789	66	17.06	6.831	4.806
23	40.80	3.924	5.827	67	17.06	4.764	6.923
24	40.80	6.007	3.829	68	16.90	6.854	4.824
25	39.89	3.963	5.895	69	16.90	4.765	6.913
26	39.89	6.078	3.911	70	16.77	6.830	4.795
27	39.05	4.048	6.027	71	16.77	4.740	6.852
28	39.05	6.209	4.016	72	16.66	6.798	4.752
29	38.28	4.148	6.146	73	16.66	4.729	6.816
30	38.28	6.317	4.086	74	16.55	6.803	4.754
31	37.58	4.207	6.197	75	16.55	4.745	6.854
32	37.58	6.354	4.117	76	16.44	6.832	4.796
33	36.45	4.300	6.182	77	16.44	4.764	6.908
34	36.44	6.484	4.191	78	16.34	6.843	4.814
35	36.72	4.373	6.311	79	16.34	4.760	6.893
36	26.58	6.510	4.302	80	16.28	6.827	4.773
37	26.54	4.429	6.402	81	16.28	4.742	6.818
38	26.54	6.538	4.352	82	16.22	6.807	4.726
39	26.02	4.454	6.427	83	16.22	4.733	6.788
40	26.02	6.574	4.381	84	16.14	6.803	4.741
41	25.59	4.502	6.485	85	16.14	4.737	6.849
42	25.59	6.662	4.451	86	16.04	6.807	4.799
43	25.11	4.596	6.593	87	16.04	4.744	6.911
44	25.11	6.790	4.542	88	15.94	6.809	4.815

续表 2

束流强度 $I_b = 60\text{mA}$							
透镜序号	H' (Wb/m ³)	Y_c (mm)	X_c (mm)	透镜序号	H' (Wb/m ³)	Y_c (mm)	X_c (mm)
89	15.94	4.745	6.874	98	15.69	6.788	4.800
90	15.88	6.808	4.757	99	15.69	4.734	6.846
91	15.88	4.744	6.775	100	15.67	6.799	4.730
92	15.85	6.807	4.700	101	15.67	4.739	6.737
93	15.85	4.740	6.746	102	15.64	6.800	4.677
94	15.80	6.800	4.724	103	15.64	4.732	6.722
95	15.80	4.734	6.828	104	15.63	6.782	4.706
96	15.74	6.788	4.791	105	15.62	4.732	6.722
97	15.74	4.729	6.897				

注: H' 为束流匹配的磁场梯度值

X_c, Y_c 分别为透镜中心处 X 和 Y 方向的束流包络

容易实现束流匹配。

腔内透镜的供电分配方式有两类: 前 18 个以及匹配用透镜, 采用每个透镜有一个电源; 其余的采用两个透镜串用一个电源。这样既节省投资, 又便于匹配调节。

35MeV 加速器的束流匹配位置及透镜电源分配方式见图 3。

五、匹配计算结果及 PARMILA 检验

利用计入空间电荷效应的线性计算程序 LAM^[3], 对 35MeV 加速器在上述工作路线下的束流横向匹配进行了计算, 计算中匹配透镜的磁场梯度值, 是根据给定束流强度(即给定空间电荷力)和给定的匹配要求, 由计算机自动给出的。计算所得磁场梯度值及束流包络值见表 2。

对上述计算结果, 我们利用计入外场和自场(空间电荷力)的非线性力及耦合力的多粒子程序 PARMILA 进行了模拟检验。即模拟粒子在上述匹配参数下沿 35MeV 加速器的发射度增长及束流丢失情况。经检验表明: 将 500 个有代表意义的粒子送入加速器后, 在 10MeV 处束流发射度将增长到入口的 2.2 倍, 见图 4。这个模拟结果与国外实验结果十分一致^[4]。而且, 500 个粒子毫无损失的全部通过 10MeV 段。实验和计算都表明, 质子直线加速器束流发射度增长及粒子丢失主要出现在 10MeV 段内。因此, 这个模拟结果表明: 35MeV 加速器的束流匹配计算是可靠的。

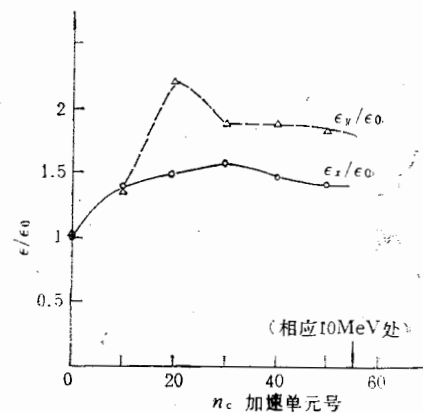


图 4 用 PARMILA 程序模拟 10MeV 段的束流发射度增长, ϵ_0 为腔入口的束流发射度

六、调试结果与分析

1985年8月35MeV北京质子直线加速器按照上述理论计算的匹配参数进行调试,首次出束成功. 在这基础上通过仔细调节腔内透镜的磁场梯度值及加速腔的激励功率,找到了实际运行的较佳参数. 同年11月,加速腔出口的脉冲流强度调到70mA,能量35.6MeV,在只用一个聚束腔时,腔的束流传输效率达60%以上,达到较高的水平.

从35MeV加速器聚焦透镜参数的实际调试中,可以总结以下几点:1)腔内透镜磁场梯度大小,对腔出口流强大小有极大影响,对10MeV段内透镜参数的调节尤为重要;2)加速器首次调试是按理论计算值进行的,并得到了束流,表明这个理论计算合理可靠,具有指导调试的实用意义;3)按理论计算调得束流后,还应逐个细调透镜电流,将腔出口束流调至最大,从而找到实际最佳工作状态. 这种调节十分必要. 这在于理论计算不可能包含所有实际的因素和条件;4)影响腔出口流强的大小有多种因素,除了透镜磁场梯度大小外,还有输入腔内功率多少、腔内的轴上平均电场分布、粒子注入能量等. 由于每次开机时,上述各因素的条件不可能完全重复,因此,每次重新开机时,相应的聚焦磁场梯度大小都会有所不同;5)对于总长达22m的加速腔,将其束流传输效率调达60%,是相当不容易的. 这是长腔加速器的困难和弱点.

在35MeV加速器的调试出束中,高能物理研究所质子直线加速器研究室的同志们做了大量工作;周清一教授在工作中曾给予指导,有过积极建议和帮助. 作者在此深表谢意.

参 考 文 献

- [1] 周清一等,高能物理与核物理,11(1987),85.
- [2] 王书鸿,罗紫华,罗应雄,“质子直线加速器原理”,原子能出版社,1986年版,第102页.
- [3] Shu-Hung Wang, Tzu-Hua Lo, Yi-Jin Chang and Ying-Hsong Lo, Proceedings of the 1979 Linear Accelerator Conference, p. 5.
- [4] 同文献[2],第125页.

COMPUTATION RESEARCH ON THE BEAM TRANSVERSE MOTION FOR THE 35 MeV BEIJING PROTON LINAC

LUO ZIHUA WANG SHUHONG

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing)

ABSTRACT

Some problems relating to the beam dynamics computation of the transverse motion for the 35 MeV Beijing Proton Linac are discussed. The computation results are used in the beam test of the linac and whereby the suitability and reliability of the computation are proved. These computations are useful in guiding the beam test of the linac.