

10 MeV 加速腔轴上平均电场的调整

罗紫华 王书鸿

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

本文叙述北京质子直线加速器(简称 BPL)的 10 MeV 加速腔轴上平均电场的调整,并将调整结果与国外一些加速器进行了比较。在 10 MeV 腔的束流传输效率试验中已证明,腔的场分布调整结果相当令人满意。

一、引 言

北京质子直线加速器的 10 MeV 加速腔内的漂移管尺寸及其安装位置,是根据预先给定的轴上平均电场的理论值经计算而确定的^[1]。由于加速腔的加工和安装误差,以及由于实际上的需要,如安置高频功率耦合环、真空泵及其它调节元件等,在腔壁上开一些孔,并在腔内装入必要元件。这样,实际的加速腔与计算的理想加速腔必有较大差别。因此,加速腔初装后,其轴上平均电场分布与理论上要求的分布也会有很大差别(参见图 2 的 (a) 及文献 [2])。在加速腔投入运行之前,必须先进行腔内场分布的测量,将测量结果与理论要求值进行比较后再进行场分布的调整。

二、调整原理

微波电磁场的微扰理论^[3]指出,金属微扰体引入谐振腔内所引起的腔谐振频率的变化为

$$\frac{\Delta f}{f_0} = - \left[\frac{\epsilon}{\mu} \int E^2 dV - \int H^2 dV \right] / 2 \int H^2 dV, \quad (1)$$

式中 E 和 H 分别是腔处于谐振时,金属球所在位置上的电场和磁场, μ 和 ϵ 为真空中的磁导率和介电常数,分母是对整个腔的体积分,分子是对微扰体的体积分。

质子直线加速器的加速腔工作在类 TM_{010} 模式,其场分布的特点是:在轴上的电场最强而磁场为零,近轴区的电场较强而磁场很弱。因此,当金属微扰体位于腔的轴上时,上式将变成

$$\frac{\Delta f}{f_0} \approx - \frac{\epsilon}{\mu} V_{*} E_z^2 / 2 \int H^2 dV, \quad (2)$$

式中 $V_{\text{微}}$ 表示微扰球体的体积, f_0 为腔的谐振频率, Δf 为微扰体引起的谐振频率变化. 由(2)式可知,轴上电场的平方与微扰体引起的谐振频率变化成正比. 因此,可通过测量 $\Delta f/f_0$ 间接测出腔内的电场分布.

将测到的每个加速单元(即相邻漂移管中心之间的区段)上的场分布,按照各自单元长度 L_c 进行平均,则为该单元的轴上平均电场 E_0 ,

$$E_0 = \int_{-\frac{L_c}{2}}^{\frac{L_c}{2}} E_x dz / L_c. \quad (3)$$

加速腔可看成由一系列加速单元组成. 每个加速单元都有它所对应的“谐振频率”. 当加速单元的“谐振频率”与整个腔的谐振频率发生偏离时,由波导理论导出的加速腔的轴上平均电场的相对变化为^[4]

$$\frac{d^2}{dz^2} \left(\frac{\delta E_0(z)}{E_0} \right) = \frac{8\pi^2}{\lambda^2} \frac{\delta f(z)}{f_0}, \quad (4)$$

式中 λ 为高频场波长, $\delta f(z) = f(z) - f_0$ 为加速单元的“谐振频率” $f(z)$ 与整个腔的谐振频率 f_0 的偏离, $\delta E_0(z)/E_0$ 为轴上平均电场的相对偏离. 由(4)式可知,轴上平均场的相对偏离的二阶导数与 $\delta f(z)$ 成正比.

根据理想导体表面电场的切向分量为零,便得到加速腔两端应满足的关系式:

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{\delta E_0(z)}{E_0} \right) = 0. \quad (5)$$

将(4)式按整个腔的长度积分,再用(5)式得到整个腔的谐振频率为:

$$f_0 = \sum_i L_i f_i / L_T, \quad (6)$$

式中 L_i 和 f_i 分别是第 i 个加速单元的长度和“谐振频率”, L_T 为腔的总长度.

对(4)式进行二次积分,便得到腔内轴上平均电场与 $\delta f/f_0$ 的关系式:

$$\frac{\delta E_0(z)}{E_0} = \frac{8\pi^2}{\lambda^2} \iint \frac{\delta f(z')}{f_0} dz dz'. \quad (7)$$

(7)式表明:某处轴上平均电场的相对偏离与腔内所有加速单元的“谐振频率”相对偏离有关. 当 $\delta f(z)$ 改变时, $\delta E_0(z)$ 亦随之改变,故可通过改变 $\delta f(z)$ 来调整场分布. 为此,在 10MeV 加速腔上装有 11 个活塞式调谐器,一个矩形截面的粗调块,28 个带有偏心片的耦合杆,以及把腔两端的半漂移管长度做成可以调节的.

现举例说明(7)式在场分布调整中的应用. 为了计算简便,假设原先加速腔的轴上平均电场分布是平的,腔的第 1 单元和第 56 单元(它们分别记为低能端和高能端所在加速单元)的长度分别为 l_1 和 l_2 , 其比值 $m_0 = l_2/l_1$. 当第 1 和第 56 单元的“谐振频率”分别增高 $(m_0/(1+m_0))\Delta f_0$ 和降低 $(1/(1+m_0))\Delta f_0$ (参见图 1 的(a)), 由(7)式求得轴上平均电场分布将不再是平的(见图 1 的(b)), 其相应的表达式为:

$$\frac{\delta E_0(z)}{E_0} = \begin{cases} \frac{m_0}{1+m_0} \cdot \frac{\Delta f_0}{f_0} \cdot \frac{8\pi^2}{\lambda^2} \cdot \frac{1}{2} z^2, & \text{(I 区)} \\ \frac{m_0}{1+m_0} \frac{\Delta f_0}{f_0} \frac{8\pi^2}{\lambda^2} l_1 \left(z - \frac{l_1}{2} \right), & \text{(II 区)} \end{cases} \quad (8)$$

$$\left[\frac{1}{1+m_0} \frac{\Delta f_0}{f_0} \frac{8\pi^2}{\lambda^2} \left[L_T z - \frac{z^2}{2} + l_2(L_T - l_2) + \frac{1}{2}(l_2^2 - L_T^2 - l_1 l_2) \right] \right]. \quad (\text{III 区})$$

由此求得在加速腔两端轴上平均电场的最大偏离

$$\left(\frac{\delta E_0}{E_0} \right)_{\max} = \frac{1}{1+m_0} \frac{\Delta f_0}{f_0} \frac{8\pi^2}{\lambda^2} \left[L_T l_2 - \frac{1}{2}(l_2^2 + l_1 l_2) \right]. \quad (9)$$

由图 1 可知: 在 II 区中平均场沿 z 是线性增加的, 即从低能端到高能端平均场分布是上升倾斜的; 如果将低能端和高能端的所在加速单元的“谐振频率”分别降低和增高, 则将出现相反结果, 即从低能端到高能端平均场分布是下降倾斜. 因此, 可通过调节腔两端半漂移管长度, 即相当于改变第 1 和第 56 单元的加速间隙长度, 使这两个单元的“谐振频率”发生变化, 从而使腔内原先平的场分布变成倾斜的分布. 此时半漂移管长度的调节量可用 (9) 式估算. 例如: BPL 的 10 MeV 腔, $L_T = 7.28\text{m}$, $\lambda = 1.49\text{m}$, $l_1 = 0.06\text{m}$, $l_2 = 0.21\text{m}$, $m_0 = 3.5$,

第 1 和第 56 单元的加速间隙长度 g 的变化所引起的“谐振频率”的变化 df/dg 分别为 33.8 MHz/cm 和 7.88 MHz/cm^[5]. 如果原先场是平的, 要求调成往高能端向上倾斜的场, 其对应的 $\left(\frac{\delta E_0}{E_0} \right)_{\max} = 0.292$, 则由 (9) 式可估算出低能端和高能端的半漂移管长度应分别缩短 0.111cm 和增长 0.137cm.

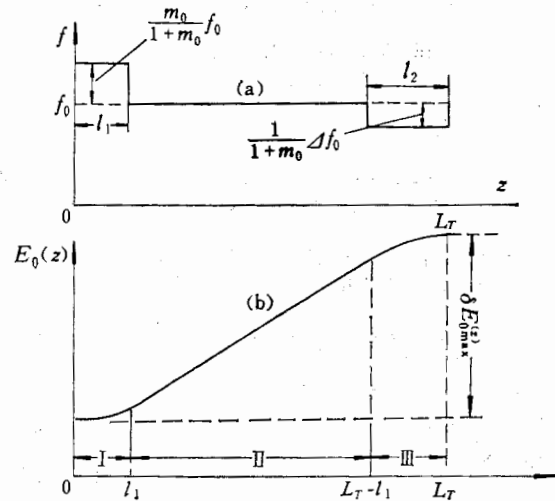


图 1 (a) “谐振频率”分布曲线
(b) 平均电场分布曲线

三、调整结果与比较

由于实际加速腔初装后的轴上平均场分布不是平的, 显然, 仅仅调节腔两端的半漂移管长度是不可能将平均场调到所要的倾斜度和不平度. 在实际的场分布的调整中, 除了要调节腔两端的半漂移管长度外, 还要使用其它调节元件, 如调节调谐器和耦合杆进入腔内的深度, 转动耦合杆的偏心片方向, 改变粗调块的尺寸等.

为了便于比较腔内各调节元件对平均场调整的影响, 现将大量的调整方案中择取五种不同情况下的调整结果列于表 1 和图 2.

对 10 MeV 加速腔各单元内的轴上电场分布也做过测量, 这里只画出有代表性的第 1、28、56 号加速单元的轴上电场的相对分布, 见图 3. 其电场分布形态与 LAC^[1] 程序算得的十分一致.

10 MeV 腔的场分布调整表明: 1. 由原先下降倾斜的场分布图 2(a) 变成腔两端平均

表 1 五种不同情况下的轴上平均电场分布说明

方案编号	情 况 说 明	场分布曲线
1	加速腔初装后, $\Delta g_1 = 0.48\text{mm}$, $\Delta g_2 = 0.25\text{mm}$, 调谐器处于行程中央, 耦合杆均在腔外, $f_0 = 201.175\text{MHz}$	图 2(a)
2	在方案 1 的基础上, 将第 12 号耦合杆进入腔内, 并调节腔两端的半漂移管, 使 $\Delta g_1 = 2.48\text{mm}$, $\Delta g_2 = -2.15\text{mm}$ $f_0 = 201.094\text{MHz}$	图 2(b)
3	在方案 2 的基础上, 调节调谐器位置, 并继续调半漂移管, 使 $\Delta g_1 = 1.18\text{mm}$, $\Delta g_2 = -2.15\text{mm}$, $f_0 = 201.056\text{MHz}$	图 2(c)
4	在方案 3 的基础上, 将所有耦合杆进入腔内, $f_0 = 201.125\text{MHz}$	图 2(d)
5	在方案 4 的基础上, 在第 27 单元附近加一段半圆形粗调块, 重新调节调谐器及半漂移管, 使 $\Delta g_1 = 0.68\text{mm}$, $\Delta g_2 = -1.74\text{mm}$ $f_0 = 201.190\text{MHz}$	图 2(e)

注: ① Δg_1 , Δg_2 分别表示第 1 和第 56 加速间隙, 长度的实际值与理论设计值之差。

② 所有场分布调整均在大气下进行。

电场相差较小的场分布图 2(b), 主要是因为调节了两端的半漂移管长度。这样, 从实验

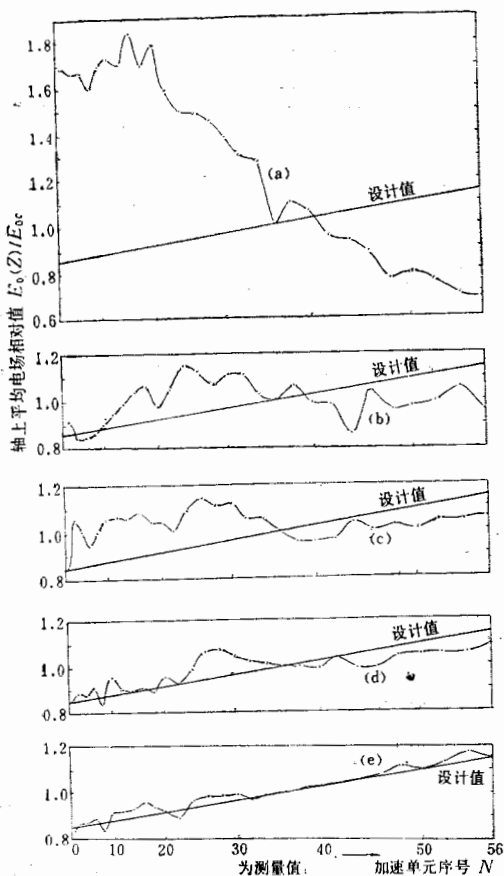


图 2 五种不同情况下的轴上平均场分布 (a), (b), (c), (d), (e) 均为测量曲线 $E_0(z)/E_{0c}$ 为轴上平均电场相对值, N 为单元序号 E_{0c} 为腔的中心处的轴上平均电场

上证实了上面有关通过调节腔两端半漂移管长度, 使腔两端所在加速单元“谐振频率”的变化来达到平均场分布的倾斜度调整的分析是正确的。2. 由图 2(c) 变成图 2(d) 的分布, 是仅仅将耦合杆伸入腔内的结果。由于耦合杆沿腔轴的分布不是均匀的, 因而它们对场分布的倾斜度亦有较大影响。3. 通过调节腔两端的半漂移管长度以及调节调谐器和耦合杆进入腔内的深度, 轴上平均电场分布已得到较大改善, 但在第 27 单元附近仍有较大偏离(见图 2(d))。为了消除这一鼓包, 我们在这个单元附近再加一段半圆形粗调块, 此后的场分布见图 2(e)。

图 2(e) 的曲线是 BPL 10 MeV 腔轴上平均场分布的初步调整中调到的最好结果。在沿腔长度的很大范围内, 轴上平均电场都已调到接近于设计值, 仅仅个别点上的最大偏离为 6%。它比日本 KEK 20 MeV 加速腔^[6]的场分布调整结果好, 与美国 Fermilab 的 200 MeV 质子直线加速器的 10 MeV 加速腔^[7]场分布的调整结果较接近。它们的场分布与设计值的最大偏离分别为 10% 和 4.2%, 而且偏差较大的区域都宽一些。

按照已调到的图 2(e) 的轴上平均场分

布进行 10 MeV 加速腔的束流传输效率(即加速腔出口与入口束流强度之比)试验, 结果表明: 在聚束腔不工作的情况下, 传输效率可达 22%~35%, 而国外同类加速器一般为 25% 左右^[7,8]. 这也说明, BPL 10 MeV 腔场分布的调整结果已符合实际要求, 相当令人满意.

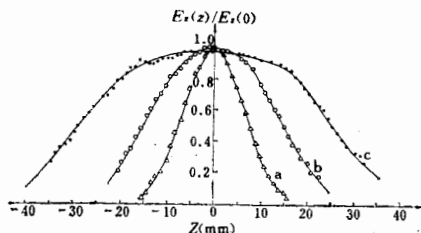


图 3 加速单元的轴上电场相对分布

(a), (b), (c) 分别是第 1、28、56 单元上的分布 $E_x(z)/E_x(0)$ 为轴上电场相对值, z 为离加速间隙中心的轴向距离, $E_x(0)$ 为间隙中心电场值.

四、小 结

(1) (7) 式给我们提供了场分布的调整原理. 由于加速腔的各加速单元实际上是相串通的, 而不是封闭的单元腔. 各调节元件对各加速单元的“谐振频率”都应有影响, 但难以准确计算. 因此, 场分布的调整中, 只能边测量边调整, 即每改变调节元件位置, 就要测量并计算出相应的平均场分布, 直到场分布满足要求为止.

(2) 一般情况下, 哪里的平均场比设计值偏大, 就应设法将那里附近单元的“谐振频率”变高. 这样, 就可使那里偏大的平均场变小.

(3) 在 BPL 的 10 MeV 腔的具体情况下, 尽管在调整之前实际场分布与理论上要求的场分布有较大差别, 但通过各调节元件可将场分布调到所要求的斜率和较小的不平度.

在场分布的调整过程中, 场分布的测量工作是由赵永界、邓燕平、王兰芬同志进行的, 他们以及张亦勤同志均参加了调整过程, 并进行过有益的讨论, 在此一并致谢.

参 考 文 献

- [1] Shu-Hung Wang, Tzu-Hua Lo, Yi-Jin Chang and Ying-Hsong Lo, Design study of the Beijing 200 MeV Proton Linac, Proc. of the 1979 Linear Accelerator Conf., p. 5.
- [2] V. G. Kul'man, V. M. Pirozhenko and V. B. Chistov, Tuning of the cavities of a proton linear accelerator, Soviet Conference on Charge-particle Accelerators, Moscow, 9—16 October Vol. 2 1968, 86.
- [3] 沈致远主编“微波技术”国防工业出版社, 1980 年, 第 240 页.
- [4] P. M. Lapostolle, Linear Accelerators, North-Holland Publishing Company-Amsterdam, p. 593.
- [5] G. Pazen, Perturbation and tolerances in a 200 MeV Proton Linac, Proc. of the Sixth high energy accelerator national conference PA-34, 1967.
- [6] Jiro Tanaka, etc., Synchronous phase law experiment in the KEK Linac, KEK-77-3 May 1977.
- [7] C. D. Curtis, etc., The operation of the first section of the NAL Linear Accelerator, Particle Accelerators, Vol. 1 1970. 93.
- [8] D. A. Swenson, Operation of the first Tank of LAMPF, Proc. of 1970 Proton Linear Accelerator Conf., p. 175.

ADJUSTMENT OF THE MEAN AXIAL ELECTRIC FIELD IN THE 10 MEV ACCELERATING CAVITY

LUO ZI-HUA WANG SHU-HONG

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The adjustment of the mean axial electric field in the 10 MeV cavity of Beijing Proton Linac is described. The comparison of the adjusting results with those of some foreign proton linacs is presented. It is demonstrated that adjusting result of the mean axial electric field is satisfactory in the beam transmissive experiment of the 10 MeV cavity.