



质子直线加速器设计研究*

郁庆长

中国科学院高能物理研究所, 北京, 100039

摘要 当前质子直线加速器发展的两个重要方向是强流质子直线加速器和小型质子直线加速器。前者主要用于核能领域, 后者主要用于质子治疗。两类加速器有着共同的特点: (1) 采用一些新型加速结构, 它们是传统结构的组合和发展; (2) 加速小发射度的质子束; (3) 加速器应有高度的可靠性。但前者的建造难度远大于后者, 它还要求具有很低的束流损失率和尽可能高的能量利用效率。该文研究了两类加速器设计中的一些重要问题, 并提出了一些设计方案。

关键词 质子直线加速器 强流加速器 小型加速器 加速结构

1 质子直线加速器的两个重要发展方向

直线加速器是粒子加速器家庭的重要成员。它的优点是束流强度高; 粒子注入和引出容易; 可以分期分段建造, 逐步提高最终能量。电子直线加速器除了用于科学研究外, 还在工业、医疗等领域获得广泛的应用。与其相比, 质子直线加速器由于价格较贵, 它的应用受到限制。近年来由于科学技术的发展, 人们对质子直线加速器的兴趣日益增加, 特别是对强流质子直线加速器和小型质子直线加速器。这也是质子直线加速器发展的两个重要方向。

强流质子直线加速器按其束流时间结构可分为连续束和脉冲束两类。连续束强流质子直线加速器主要用于核能领域, 如嬗变核废料、增殖核燃料、提供洁净核能等, 建造难度极大。目前, 美国、西欧和日本都在对其进行研究工作^[1~3]。脉冲束强流质子直线加速器主要用于高通量脉冲散裂中子源。它是有重要价值的科学研究装置, 主要利用中子散射研究凝聚态物理。目前美国准备建造的NSNS (National Spallation Neutron Source) 和西欧计划建造的ESS (European Spallation Source) 均属此类^[4]。为了获得几十安培的窄脉冲束, 需要在直线加速器后设置一个积聚环 (Accumulator)。从直线加速器引出的负氢离子束被注入积聚环, 在注入时负氢离子被剥离为

*国家攀登计划和国家自然科学基金 (19835070) 项目。

质子。直线加速器束流脉冲宽度约1 ms, 可以注入约一千圈, 然后一次引出送到重核靶上。

强流质子直线加速器还可用于其它方面。例如利用质子束打靶时产生的 π 介子及其衰变产物 μ 介子和中微子进行粒子物理和核物理的研究(如中微子振荡等), 在武器研究方面也有多种用途^[5]。

小型质子直线加速器主要用于质子治疗。20世纪90年代初美国Hamm, Crandall等人首先提出利用S波段直线加速器进行质子治疗的建议^[6]。利用S波段边耦合直线加速器获得毫米质子束, 可以使用医用电子直线加速器现成的高频技术, 我们也对此进行了研究^[7~9]。除质子治疗外, 这种加速器还可用于材料科学和生命科学研究。

强流质子直线加速器和小型质子直线加速器看起来完全相反, 实际上有着不少共同点。

(1) 两者都要采用一些新的加速结构, 特别是中能区。

(2) 两者都要求加速高质量质子束(规一化发射度 $0.1 \sim 0.2 \pi \text{ mm-mrad}$ 左右)。对于强流加速器这是为了尽量减少束流损失以避免产生较强的放射性。而对于束流通道很细的S波段直线加速器, 发射度较大的质子束根本不可能通过。

(3) 用于核能和医疗的加速器一旦发生故障会造成重大损失, 因此, 它们应该具有较高的可靠性、可利用率、可维修性和可检测性。

为了科学研究和医疗事业的发展, 我国需要建造脉冲束强流质子加速器和质子治疗加速器, 并在今后条件成熟时建造洁净核能用连续束强流质子加速器。为此, 我们在国家攀登计划和国家自然科学基金支持下开展了这两类加速器的设计研究。本文讨论设计中的一些重要问题, 涉及三台加速器: 洁净核能用连续束强流质子直线加速器, 多用途脉冲束强流质子直线加速器和质子治疗直线加速器。

2 加速结构、工作频率和加速电场梯度

较早建造的质子直线加速器是漂移管直线加速器DTL, 它适于加速几兆伏到几十兆伏的质子。以后出现了腔耦合直线加速器CCL和射频四极加速器RFQ。前者可加速100 MeV以上的质子, 后者适于加速低能质子。RFQ-DTL-CCL构成一套从低能到高能完整的加速结构。

高频工作频率越高, 加速腔径向尺寸越小。DTL的漂移管内部要安装磁四极透镜, 结构比较复杂, 尺寸很难缩小, 在加速连续束(以及占空比较大的脉冲束)时漂移管的冷却又相当困难, 只能采用较低的工作频率。CCL

没有漂移管，四极透镜在加速腔外，可以采用很高频率（直到S波段）以缩小径向尺寸。RFQ的径向尺寸也比DTL小。因此改造加速结构的重点是在中能区。近年来出现的新常温加速结构主要有以下三类。

(1) 短腔DTL，又称分离型DTL，简称SDTL。每个腔包含2~8个加速隙，磁四极透镜组放在腔之间。日本、美国、法国和意大利都提出过这类加速结构，有的方案还在腔之间采用了边腔耦合或桥耦合（称为SCDTL与BCDTL）^[10~14]。

(2) 这类加速结构的特性与传统DTL相似。虽然DTL腔的有效分路阻抗随腔长度变短而减少，但由于漂移管不含透镜而外径减小，SDTL的有效分路阻抗往往还高于传统DTL。这类结构可用于很高频率（直到S波段）。一般来说在20 MeV以上多使用包含较多加速隙（5个以上）的SDTL。而在20 MeV以下，考虑了空间电荷效应等问题，聚焦周期不宜过长，应使用包含较少加速隙的SDTL。

(3) 在CCL中加上漂移管构成了腔耦合漂移管直线加速器CCDTL。这是美国Los Alamos国家实验室提出的^[15]。这种结构是CCL和DTL的结合，腔之间放置单个磁四极透镜。目前此结构的试验遇到很大困难。

(4) 将DTL的漂移管改造成射频电四极透镜，成为射频聚焦漂移管直线加速器RFD。美国和俄国都提出过这种方案^[16, 17]，它是DTL和RFQ的结合，适用于800 MHz以下。这种加速结构在0.5~50 MeV间具有较高的有效分路阻抗。缺点是加工较复杂，而且聚焦不可调。

三种结构的共同特点是：（1）都有漂移管；（2）漂移管内不再有磁四极透镜。

超导腔不仅能降低功率消耗，还具有孔径大和加速梯度高的优点，有利于减少束流损失和缩短加速器长度。连续束强流质子直线加速器高能区一般都使用超导管。目前，人们也在探索中能区使用超导腔的可能性，正在研究的spoke超导腔就很有希望^[18]。我国建造这种加速器是十几年后的事。考虑到超导管技术的发展，应有可能在中高能区采用超导腔。

至于脉冲束强流质子直线加速器和质子治疗直线加速器，我们仍选用常温腔。美国人过去偏爱CCDTL^[15]，而西欧倾向采用SDTL^[12, 13]。我们认为：CCDTL既是CCL和DTL结合的产物，而CCL适用于高能区，因此CCDTL必然在中能区偏高能一侧占上风。国外发表的计算结果已证明了这一点^[12, 15]。我们也利用程序SUPERFISH进行了初步计算。由图1可看出，当 $\beta > 0.33$ CCDTL的有效分路阻抗 ZT^2 高于SDTL，而当 $\beta < 0.33$ ，带多个加速隙的SDTL就更胜一筹。在 $\beta < 0.2$ 时，带3个加速隙的SDTL的 ZT^2 也高于双漂移管。

CDTL虽然这些计算有的未考虑耦合，有的没有进行充分的优化，但已足以说明就总体而言SDTL不逊于CCDTL。由于CCDTL结构的可行性尚有问题，造价又高，所以决定中能区采用SDTL。考虑到在低能区SDTL聚焦周期太长，在RFQ之后先用DTL加速再接SDTL。

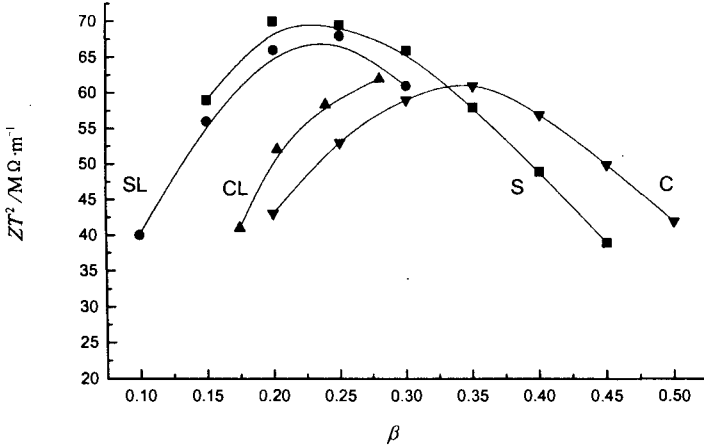


图1 SDTL 和 CCDTL 的有效分路阻抗

- C (单漂移管CCDTL, 700 MHz, 漂移管内径2 cm)
 CL (双漂移管CCDTL, 700 MHz, 漂移管内径1 cm)
 S (6加速隙SDTL, 350 MHz, 漂移管内径2 cm)
 SL (3加速隙SDTL, 350 MHz, 漂移管内径2 cm)

一般认为工作频率高可以提高效率，其实并不尽然。在束流通道直径（即漂移管内径）一定的情况下，提高工作频率虽然增加了分路阻抗 Z ，却减少了渡越时间因子 T ，因此 ZT^2 基本上保持不变。此外增加工作频率使径向尺寸缩小，对冷却反而不利。工作频率高也不一定能提高加速电场梯度。高梯度将导致高腔耗，这将受到冷却条件的限制。因此对于强流质子直线加速器工作频率一般不应过高。至于小型质子直线加速器，当然应当选用较高的工作频率。我们建议连续束强流质子直线加速器低中能区采用350 MHz的工作频率，高能区采用700 MHz，这和世界多数实验室一致。脉冲束强流质子直线加速器有可能工作在L波段。质子治疗直线加速器能工作在S波段，但在10 MeV以下，频率也不宜高于750 MHz。

加速电场梯度的选择除了考虑击穿场强外，对于占空比较大的质子直

线加速器必须考虑腔耗。在连续束情况下，常温腔加速梯度一般不能超过 1.5 MV/m。但如使用超导腔，加速梯度可以提高。我们拟选用 6 MV/m（对 spoke 超导腔）和 10 MV/m（对常规超导腔）的梯度。对于 L 波段脉冲束强流质子直线加速器和 S 波段质子治疗直线加速器则选择了较高的梯度。

3 束流损失率和能量利用效率

为了保证加速器维护人员的安全，加速器的束流损失必须控制在一定限度之内，以免在加速器附近产生过大的剂量。美国 Los Alamos 国家实验室介子工厂 LAMPF 平均束流强度为 1 mA，加速器高能区的束流损失约为 0.2 nA/m，加速器附近剂量为 4×10^{-5} Sv/h。对于强流质子直线加速器，一般可以限制加速器高能区束流损失不超过 1 nA/m。虽然存在困难，但由于近年来加速器技术已有很大发展，这一要求还是能做到的^[19]。

质子直线加速器的束流损失主要来源于束晕的扩展。在束流的核心部分周围存在着一个束流密度很低的弥散区域，称为束晕，其半径远大于束半径。在束流匹配良好的情况下束晕是稳定的，如果束流通道半径足够大，束流损失就会很小。如果束流不能恰当地匹配束晕将会扩展（包括横向扩展和纵向扩展），造成较多的束流损失^[20, 21]。在研制加速器时，首先应尽量改善从离子源引出的束流质量并在加速过程（特别是低能段）中加以保持。根据离子源等离子体中离子温度推算出的束流发射度远小于目前获得的实验结果，这主要归咎于引出过程中的非线性，这方面还有不少工作可做。其次应尽量避免在加速过程中（特别是在中、高能区）加速结构、工作频率、加速梯度和聚焦结构的突变。做好这两点，束流损失将会有较大的减少¹⁾。我们的设计就遵循了这两点。

对于脉冲束强流质子直线加速器，除束晕外束流损失还来源于脉冲前后沿的过渡过程。它包含两个主要部分：一是束团的空间电荷及束流通道壁上的感生电荷的变化过程，其时间长度约为 10 个高频周期；二是束团空间电荷中和状况的变化过程，过程持续时间从几 μs 到几十 μs 。采用静电输

¹⁾ 对于散裂中子源，除了减少直线加速器的束流损失外，还要防止积聚环的束流损失。引出冲击磁铁的磁场脉冲上升需要 0.2 μs 左右的时间，如果束在这一时间内通过磁铁，将不可避免地打到真空室壁上产生严重的放射性。为此，必须在直线加速器低能端对束流进行切割。以 NSNS 为例，质子绕积聚环一周时间约为 0.85 μs 。这就需要将束流切割为宽度 0.6 μs 的脉冲，脉冲间隙为 0.25 μs 。在注入时所有脉冲精确地重迭在一起，使积聚环保持 0.25 μs 的无粒子区。在引出冲击磁铁磁场脉冲上升时间内让无粒子区通过冲击磁铁，这就能避免引出过程中束流的大量损失。

运系统阻止空间电荷中和可以消除第二个过程，而第一个过程则是不可能消除的，因此它必然导致束流损失。设加速器某一区域单位时间的束流损失为 ΔI ，其中脉冲平顶区域的束流损失为 ΔI_1 ，脉冲前后沿过渡的束流损失为 ΔI_2 。前者与平均束流强度 \bar{I} 成正比，后者与脉冲束流强度 I_p 和脉冲频率 f 成正比。

$$\Delta I = \Delta I_1 + \Delta I_2 = A_1 \bar{I} + A_2 I_p f = A_1 \bar{I} \left(1 + \frac{C}{\tau}\right), \quad C = \frac{A_2}{A_1}$$

A_1, A_2 为比例系数， τ 为脉冲宽度。显然 τ 越小束流损失越严重。在控制束流损失不超过允许限度的情况下，连续束有可能超过 100 mA，而脉冲束（脉宽约 1 ms）平均流强恐怕难于超过 10 mA。我们的洁净核能用连续束强流质子直线加速器束流强度为 30 mA，多用途脉冲束质子直线加速器平均束流强度为 1 mA，这是现实可行的。一些人提出利用现有的北京质子直线加速器（脉宽 0.2 ms）进行连续束质子直线加速器束晕试验，而由以上讨论可知，北京质子直线加速器中束晕损失不是主要的，不能用于束晕实验。

强流加速器另一个重要问题是尽可能提高能量利用效率。美国设计的生产氙的连续束强流质子直线加速器 APT 能量 1.3 GeV，流强 100 mA，束流功率 130 MW，射频系统输入功率为 360 MW，加上磁铁、水冷等系统消耗功率 66 MW，总输入功率应为 426 MW，总效率为 30%^[9]。

由于交流-直流转换效率和射频传输效率已相当高（约 95%），提高总效率的主要途径是提高直流-射频转换效率和加速腔效率（APT 两者分别为 58% 和 68%）。采用新型射频器件如感应输出管（IOT）有可能提高射频功率源的效率。而要提高加速腔效率，就必须降低腔耗，使用超导腔（SCC）是一条有效的途径。对于我们的洁净核能用连续束强流直线质子加速器，束流功率为 30 MW，由于使用了超导腔和超导磁铁，总效率有可能达到 50%。

4 设计方案

这里列出加速器的布局 and 主要设计参数。

4.1 洁净核能系统连续束强流质子直线加速器

这台加速器能量 1 GeV，流强 30 mA，由离子源（IS），RFQ 和超导腔直线加速器组成（见图 2 上）。各部分的参数见表 1。图表中 SCC1 是 spoke 超导腔或其它低 β 超导腔，SCC2 是常规超导腔。这台加速器的特点一是大量应用超导技术，提高了能量利用效率。二是只有两处结构突变：第一处在

5 MeV, 由于能量很低, 少量束流损失危害不大; 第二处在200 MeV, 能量已经较高, 空间电荷效应较小, 而且超导腔孔径大, 因此束流损失将会很小。

表1 洁净核能系统连续束强流质子直线加速器参数

	RFQ	SCC1	SCC2
能量/ MeV	5	200	1000
工作频率/ MHz	350	350	700
长度/ m	≈5	≈80	≈190
束流孔径/ mm	4~7	40~60	80~100
加速腔数	1	46	76
速调管数	1	10	18
加速梯度/ $\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$	1 (平均)	≈6	≈10
能量增益/ $\text{MeV}\cdot\text{m}^{-1}$	1	2~3	≈4.3
腔耗/ MW	≈0.8	<0.1	<0.1
束流功率/ MW	0.15	5.85	24

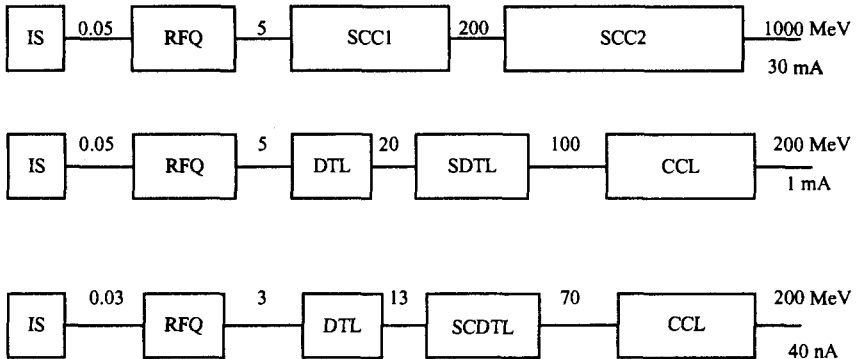


图2 洁净核能系统连续束强流质子直线加速器 (上)、
L波段多用途脉冲束强流质子直线加速器 (中) 和
S波段质子治疗直线加速器 (下)

4.2 L波段多用途脉冲束强流质子直线加速器

美国Los Alamos国家实验室设计的用于医用同位素生产的L波段脉冲束质子直线加速器平均流强为2 mA^[22], 难度似乎太大。但达到1 mA左右还是

可能的。我们的方案与其相似，能量为200 MeV，可用于多种用途：(1) 用作洁净核能系统加速器试验装置，(2) 生产放射性同位素，(3) 用作中子源(供中子治疗和材料研究)，(4) 用于质子治疗。

加速器由离子源、RFQ (433 MHz)、DTL (433 MHz)、SDTL (1300 MHz) 和CCL (1300 MHz) 组成，脉冲流强为50 mA (见图2中)。这台加速器的特点是SDTL和CCL采用较高的工作频率和加速电场梯度(约5 MV/m)，使装置紧凑，也降低了造价。为了降低腔耗，脉冲占空比取得较低(2%)，此时漂移管上功耗将不超过12 W/cm²。所用速调管也较少(如1个TH2118和3个TH2140U)。整个加速器长度90 m。为了保证低能区有良好的性能，20 MeV前采用较低的工作频率，文献[22]的方案在10 MHz以上就用1300 MHz的频率，我们要保守一些。

4.3 S波段质子治疗直线加速器

我们设计的S波段质子治疗直线加速器能量在70~200 MeV间可调，脉冲流强120 μ A，平均流强10~40 nA。束流时间结构类似医用电子直线加速器，脉冲宽度1~3 μ s，重复频率30~120 Hz。它由离子源、RFQ (357 MHz)、DTL (714 MHz)、SCDTL (2856 MHz) 和CCL (2856MHz) 组成(见图2下)，SCDTL是带边腔耦合的SDTL。DTL、SCDTL和CCL的加速梯度分别为8.5、12.5和15 MV/m。整个加速器长度26 m。这一方案已经发表^[7]。这台加速器的特点一是结构小巧，造价较低；二是可以利用关闭部分高频功率源和改变输入功率的方法来调节质子能量；三是束流性能远好于其它质子治疗加速器，因此运输磁铁和转动机架可以做得较轻。

本文承方守贤教授审阅，郭伟明同志和作者进行了有益的讨论，特此致谢。

参 考 文 献

- 1 Lagniel J M. Proc. Euro. Part. Accel. Conf., 1998. 93
- 2 Akaoka N, et al. Proc. Part. Accel. Conf., 1999. 3546
- 3 Tooker J, Lawrence G. Proc. Part. Accel. Conf., 1999. 3567
- 4 Gardner I S K. Proc. Euro. Accel. Conf., 1998. 98
- 5 Avignone III F T, Gabriel T A (ed). The Savannah River Accelerator Project and Complementary Spallation Neutron Sources. Singapore: World Scientific. 1998
- 6 Hamm R H, Crandall K R, Potter J M. Proc. Part. Accel. Conf., 1991. 2583

- 7 ZHOU Linong, et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1998, 22: 1042
- 8 YU Qingchang, et al. Foundations of protontherapy technology (in Chinese). Beijing: Atomic Energy Press, 1999
- 9 GUO Weiming, YU Qingchang. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 2000, 24: 262
- 10 Kato T. KEK Report, 1992-10
- 11 Los Alamos National Laboratory Report, LA-12668 MS, 1993
- 12 Bourat C, Perraudin C. Proc. Part. Accel. Conf., 1997. 1191
- 13 D'Auria G, Rossi C. Proc. Part. Accel. Conf., 1997. 1180
- 14 Benincasa G, et al. High frequency proton linac. In: Amaldi U, Grandolfo M, Picardied. The RITA network and design of compact proton accelerators. Frascati: INFN, 1996. 215
- 15 Billen J H, et al. Proc. Inter. Linac. Conf., 1994. 341
- 16 Swenson D A, et al. Proc. Inter. Linac. Conf., 1994. 804
- 17 Tepliakov V A. Proc. Inter. Linac. Conf., 1992. 21
- 18 Shepard K W, Kedzie M. Proc. Part. Accel. Conf., 1999, 955
- 19 Jameson R A. Proc. 2nd Inter. Symp. Adv. Nucl. Ener. Research, Japan: Ibaraki, 1990.163
- 20 Ryne R, et al. Proc. Part. Accel. Conf., 1995. 3197
- 21 OUYAN Huaifu, YU Qingchang. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1999, 23: 65
- 22 Takeda H, et al. Proc. Part. Accel. Conf., 1995. 1140

Study on design of proton linacs

YU Qingchang

Institute of High Energy physics, The Chinese
Academy of Sciences, Beijing, 100039

Abstract: Two important directions in the development of proton linacs are high-current proton linacs (mainly applied in nuclear power field) and compact proton linacs (for proton therapy). There are some common characteristics in them: (1) Employment of the novel accelerating structures, which are combination and evolution of the conventional ones; (2) Accelerating beam with small emittance; (3) Requirement for high reliability. The construction of the former is, however, much more difficult because it still needs low beam lose rate and as high power transformation efficiency as possible. In this paper, some important problems in the design of these accelerators are discussed and some schemes designed are presented.

Key words: proton linac high-current accelerator compact accelerator
accelerating structure