

漫话电子直线加速器

——谨以此文祝贺导师谢家麟荣获国家最高科技奖
裴国玺

直线加速器 (Linear Accelerator, 简称 LINAC) 一词于 1928 年由挪威科学家维德罗 (Rolf Wideröe) 提出, 专指利用正负交变电场对带电粒子沿直线轨道进行加速的一类加速器。顾名思义, 电子直线加速器是指被加速的带电粒子为电子, 其真正迅速发展还是在“二战”以后。因为“二战”期间雷达的应用促进了磁控管和速调管的发明, 它们也是 LINAC 的关键部件——微波功率源。美国斯坦福大学直线加速器中心 (SLAC) 的建立和发展是一部很好的电子直线加速器的发展史。SLAC 是举世闻名的微波实验室, 早期在微波之父汉森 (W. W. Hansen) 和他的几个助手带领下, 其中包括非常著名的瓦里安兄弟 (Varian brothers), 提出了速度调制原理, 并发明了加速管 (图 1) 谐振腔、速调管 (图 2) 等很多加速器的关键部件。速度调制原理起源于微波功率源的发展, 也是电子 LINAC 的基本原理之一, 就是利用一个或多个谐振腔使走在前面的电子受到一个负作用力从而速度会慢下来, 而走在后面

的电子受到一个正作用力获得加速, 这样经过一定距离的漂移, 原先均匀的电子束就会向中间汇聚, 达到了密度调制的目的, 如图 3 所示。谢先生 20 世纪 40 年代后期在加州理工学院攻读物理, 由于出国前有 4 年无线电方面的工作经历, 加上也很喜欢应用物理和技术, 遂于 1948 年夏转学到微波物理和技术最强的斯坦福大学, 那时也是电子直线加速器的快速发展期, 正在建设的有 4.5 MeV 电子 LINAC。在美国海军研究署资助下, 1 GeV 的机器也于 20 世纪 50 年代初建成, 利用这台机器, 霍夫斯塔特 (R. Hofstadter) 进行了原子核电荷分布的研究, 并获得了 1961 年的诺贝尔物理奖。图 4 是谢先生与同事在这台机器的控制台前的合影。谢先生参与并见证了 SLAC 和现代电子直线加速器的发展, 同时也为谢先生后来在各个领域的杰出学术成就打下了坚实的基础。



图 1 汉森及助手和第 1 根加速管照片

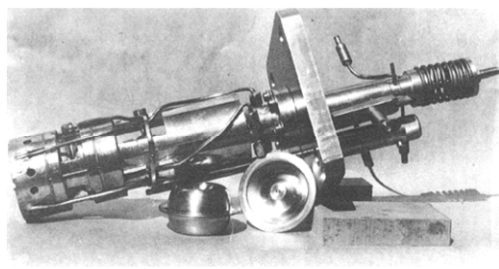


图 2 世界第 1 个速调管照片

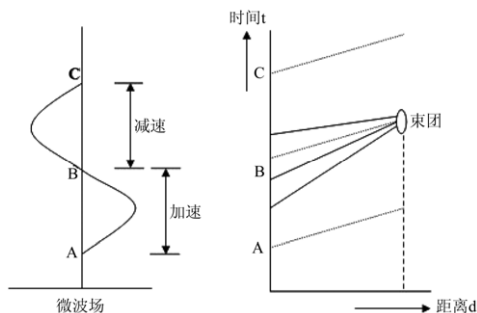


图 3 速度调制原理示意图



图 4 与美国斯坦福大学同事在 1 GeV 电子直线加速器控制台前 (前排右一)

行波电子直线加速器的原理很简单，就是把电子置于交变电场的波峰上同步加速，就像冲浪运动一样，滑板一直呆在浪峰上（图 5）前行。这种加速器的一个特点就是没有能量上限，只要加速器做

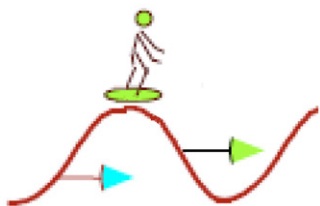


图 5 行波加速原理示意图

得足够长就可以把电子加速到任何能量。电子 LINAC 基本由电子枪、聚束器、加速管和微波功率源（调制器和速调管）四个系统组成。电子枪是束流源头，既然称之为枪（Gun），就表明它发射出的子弹（电子束）要有威力、精确性好；聚束器的作用就是利用速度调制原理，把电子枪发射出的电子束聚成“束团”，便于在后续的加速管中有效地获得加速；微波功率源无疑就是向束流提供能量的装置。这里面比较关键的技术是加速管和速调管。大家都知道，根据相对论原理，真实物体的运动速度是不可能超过光速的，但是，运动速度的投影或相位速度却可以大于光速。那么，能用普通同轴线或圆柱波导做加速管吗？答案是不行，因为电子是真实物体，速度不可能超过光速，但电磁波在普通波导中的相位传播速度却远远大于光速，无法做到上面说的冲浪似“同步”运动，也就不能获得有效加速。怎样才能把电磁波的相位传播速度降下来呢？为此科学家想了很多办法。在通常的应用中是不希望传输波导中有反射存在的，一方面它使传输功率受损和引起设备故障，另一方面电磁场的传播相位会发生杂乱无章的变换。但研究表明，在波导里周期性地加上盘片（反射体），不仅可以使相速降到我们需要的任何值，也可以建立所需的沿带电粒子运动方向的加速电场。这种结构被称为盘荷波导加速结构，如图 6 所示， $2a$ 为盘片孔径， $2b$ 为波导孔径，当然还有很多其他的慢波加速结构。速调管是一种微波放大器或微波功率源。虽然在加速器领域它只作为一个器件，但在微波通信行业却占据着单独、重要的地位，其规模、种类和关键技术都同加速器可比拟。原理上它同加速器则刚好相反，所以说可以称之为“减速器”，就是把电子束的能量转移给微波达

到功率放大的作用。为了提高微波放大效率（增益），在欧美科学家于 1937 年前后分别提出速度调制原理后不久，美国瓦里安兄弟就发明了世界第一台二腔速调管（图 2）。不同于前面说到的行波加速，它采用单腔驻波加速，即电磁场的空间分布形状不随时间变化，变化的只是电磁场幅度。其中第 1 个腔是聚束腔，加上二腔之间的漂移距离会使束流很好地汇聚；第 2 个腔称为输出腔，电子束“减速”并把能量转移给微波。现在为了进一步提高增益，多采用多腔结构，比如 3 腔、5 腔等。给这个东西起个什么名字好呢？美国人也喜欢附庸风雅，就在故纸堆里找，结果发现古希腊 $\kappa\lambda\nu\zeta\omega$ 单词（海浪拍岸）很适合：海浪在奔向岸边时，受到不平海底的作用浪头越来越高，在扑向岸边或岩石的瞬间把能量全部释放，形成美丽、巨大的浪花，这一词就是速调管（klystron）。

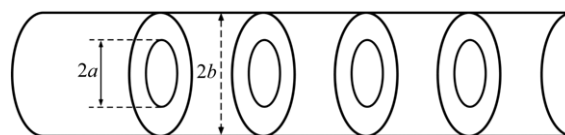


图 6 盘荷波导结构示意图

中国电子直线加速器发展也比较早，源于谢先生 1955 年回国。因电子直线加速器在当时是尖端科技装置，可以做基础研究和很多应用研究，需要的新技术更是国家需求，势必将促进国家在材料科学和加工制造业的发展。当时国内条件很差，可以说是一穷二白，什么无氧铜、氩弧焊、特种陶瓷金属化及焊接等听都没听说过，这也可以从谢先生归国所带的器材想象：扩散泵、机械泵、磁控管、反射速调管、波导管、晶体检波器等，这些东西现在再普通不过了。谢先生带着 4 个大学刚刚毕业的年轻人开始了长达 8 年的艰难研制旅程，亲自一个一个零件地做，一道一道工序地走，终于完成了亚洲第一台 30 MeV 电子直线加速器，谢先生的“四大弟子”也成了各专业的学术带头人，育人无数。

电子直线加速器有很多用途，首先可以做大型加速器的注入器。北京正负电子对撞机（Beijing Electron Positron Collider，简称 BEPC）是邓小平亲自奠基、继两弹一星后我国最重要的大型科研装置，它使中国在世界高科技领域占有了一席之地。BEPC 已成为 τ -粲能区世界上亮度最高的正负电子对撞

机，它的注入器就采用了 200 米长的电子直线加速器，现在能量可以达到 3 GeV。虽然规模要比早期的 30 MeV 高得多，但基本构成要件一致，研制过程中积累的经验 and 人才培养，也为 BEPC 工程顺利完成打下了良好的基础。

人类研究肿瘤的历史已经超过了 50 年，但还没有从根本上解决这一问题，治疗方法之一就是大家所熟知的放射疗法，即用高能电子直线加速器产生的束流来杀死肿瘤。目前全世界有上千台这种加速器在医院为病人治疗，为人类的健康作出了重大贡献，但很少有人知道第一台高能电子束医用直线加速器出自谢先生之手。1951 年谢先生回国受阻，留在美国的工作之一，就是负责为芝加哥大学研制一台高能电子束医用加速器，要求机器稳定、束流品质好。即便在美国，按当时的条件要完成这一任务也很具挑战性，否则芝加哥大学也不会请 SLAC 帮他们研制。谢先生亲力亲为、不畏困难，终于 1955 年夏完成并投入病人治疗。20 年后，潘诺夫斯基第一次来中国参加中美高能物理会谈时，兴奋地告诉谢先生：“你的那台加速器还在运行”。潘诺夫斯基是 SLAC 的前所长，美国总统科学顾问，负责美国的星球大战计划和多次全世界核裁军谈判，也为中美科技合作交流做出过很大贡献。说到星球大战计划，它是美国的一套国防防御系统，阻止敌军用各种方式对美国本土发动进攻，其中主要防御武器之一就是被称为自由电子激光（Free Electron Laser，简称 FEL）的装置，即利用自由电子工作的激光器，并希望其强度可以打掉敌军的卫星。谢先生看到了这里面有新技术，更有国防和科研等广阔的应用前景，从而开始了这方面的研究，其技术难度在于微波电子枪和扭摆磁铁，经过多年的努力，终于 1992 年建成并于 1993 年 5 月实现饱和振荡，成为亚洲第一台出光的 FEL。

工业辐照是电子直线加速器的另一应用领域，比如材料改性、消毒和食品保鲜等，国外有几百台在运行，国内也有很大的市场。这类加速器除要求高平均功率外，对束流的其他性能要求并不高。谢先生除鼓励把科研院所和大学现有的技术向企业转移外，自己则想得更深更远。如前所述，电子直线加速器一般由 4 大部分组成，能不能简化？简化就

意味着可以给企业节省空间和造价乃至运行经费。前面说过，速调管是一台“减速器”，它把电子束的能量转移给微波达到放大作用，剩余的束流就作为垃圾打在垃圾桶上。如果能把部分有用的垃圾束流收集起来重新利用，就有可能省略电子枪和聚束系统。谢先生带领博士生们做了大量的模拟研究、系统搭建和原理性试验，最后完全证实了他的“绿色”想法。如果未来加速器需要用在航空航天领域，这种简易加速器将会更彰显它的优势。

科学家对自然规律的探索是无止境的。从 20 世纪 80 年代开始，全世界高能物理和加速器科学家就在考虑建造一台能量达到万亿电子伏的加速器，由于正负电子束对撞本底小和直线加速器没有辐射损失的特点，而使得电子 LINAC 成了首选，被称为国际直线对撞机（International Linear Collider，简称 ILC），图 7 是它的断面效果示意图。ILC 规模非常大，长度达 40 千米，造价约 200 亿美元，因此任何一个国家都独自承担不起而必须是国际通力合作。ILC 已不止是传统意义上的电子直线加速器，必须采用更多新技术和新原理，才能把正负电子的能量加速到万亿电子伏而束团尺寸在亿米分之一，并且保证准确对撞。谢先生也在关注，希望中国对 ILC 的预研和建造有所贡献，并对其中一些重要部分进行了周密的思考，比如超导技术、精密数字电源、固态微波功率源、飞秒束流诊断和定时系统等，这里面也有太多太多我们迫切需要的技术。

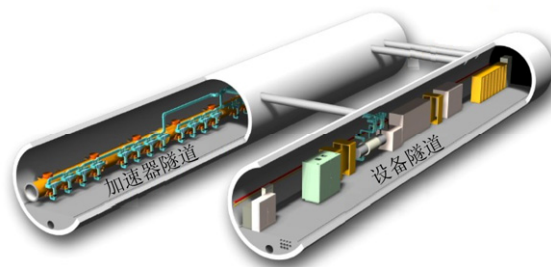


图 7 ILC 断面效果示意图

（中国科学院高能物理研究所 100049）

作者简介

裴国玺，博士，研究员，博士生导师。1985 年师从于谢家麟院士。主要研究领域为电子直线加速器及其关键技术和应用。