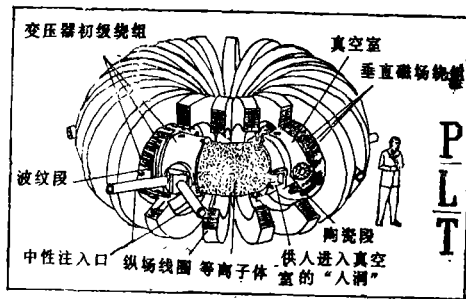


受控核聚变

——现代物理学的一个重要前沿领域(之三)

· 朱士尧 ·



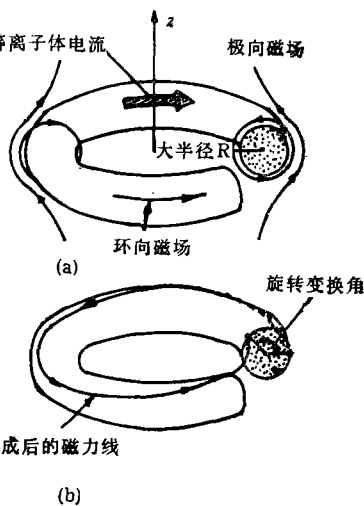
$$q(r) = \frac{r}{R} \frac{B_z(r)}{B_\theta(r)}$$

式中 r 、 R 分别是等离子体小截面半径和大环半径, $B_z(r)$ 和 $B_\theta(r)$ 是纵向磁场强度和角向磁场强度. 理论分析表明, 为了保证不出现最危险的磁流体不稳定性, 要求等离子体中心处 ($r=0$) 的安全因子 $q(0) \geq 1$.

托卡马克 这是一种环形的磁约束聚变装置. 这种装置在近 20 年来进展最快, 近一二年内可望达到劳逊判据, 实现聚变点火, 验证受控核聚变的科学可行性. 并有可能首先建成托卡马克型的聚变反应堆进行发电. 因而科学界和许多国家对托卡马克极为重视, 投入了大批优秀人材和巨大的财政支持. 托卡马克装置如题图所示. 它的主体结构包括两部分, 即真空系统和磁场系统. 真空室真空度要求达到 10^{-7} 帕以上. 磁场系统包括磁场线圈及其供电电源. 用分立的环形线圈(称纵向场线圈)排列成大环, 套在形状像救生圈的环形真空室上. 这些分立的环形线圈连接起来形成螺旋环状, 通电后在真空室内形成大环方向(纵向)的磁场, 一般为 0.5 特斯拉至 2 特斯拉. 中小型托卡马克通常采用高压脉冲电容器组做电源储能系统. 大托卡马克必须采用大功率脉冲飞轮发电机组给线圈供电. 除了纵向磁场以外, 还需要通过变压器对真空室中预先充有的氘气(或小托卡马克中采用的氢气)进行放电, 电离而形成等离子体. 早期的托卡马克一般采用铁芯变压器, 现在绝大部分托卡马克采用空芯变压器, 一方面为了充分利用托卡马克中心部位的空间, 另一方面可使等离子体环变得更“胖”一点. 题图中采用的就是空芯变压器. 等离子体一旦形成, 在其中有电流流过, 这时环形等离子体便相当于变压器的次级, 只有 1 匝. 等离子体中感应出的环向电流有着十分重要的作用. 它不但能够对等离子体进行欧姆加热, 而且还会有自收缩效应, 帮助等离子体离开真空室壁. 除此之外, 还有一个相当重要的作用. 由它产生的角向磁场和纵向磁场合成了一个螺旋形的磁场, 如图 5 所示. 这样的磁场位形有个重要特性, 当磁力线绕大环方向转一圈之后并不回到原点. 磁力线在沿大环方向绕 n 圈时恰好在小截面上绕了 m 圈. 磁力线的这种性质叫“旋转变换”, 如图 5(b)所示. m/n 的值可以是有理数, 也可以是无理数. 这种磁场位形不仅能克服由于大环内侧磁场强外侧磁场弱引起的漂移, 而且只要旋转变换满足一定关系, 还可以有效地抑制某些宏观不稳定性. 为此引入一个十分重要的概念即安全因子 $q(r)$, 它由下面的公式表示:

这个条件称克鲁斯卡-沙夫兰诺夫 (Kruskal-Shafranov) 条件. 在实验中边界处 ($r=a$) 的安全因子 $q(a)$ 更容易测量, 因此往往用 $q(a) \geq 3$ 来表述这个稳定条件. 这就是说要求托卡马克表面上的磁力线在绕小截面圆周上转一圈时在大环方向上要绕三圈以上.

仿星器 这是另一种环形磁约束聚变装置, 它跟托卡马克装置具有许多相似之处, 都有螺旋形的磁场结构. 带电粒子沿环形磁场运动时, 因磁场的曲率和梯度



引起漂移从而产生电荷分离电场, 为了抑制这种电场的影响, 磁场具有回转变换. 不同之处在于: 托卡马克的这种具有回转变换的磁场是由外部的纵场线圈产生的纵向磁场与等离子体电流自身产生的极向场结合而成的, 而仿星器的这种具有回转变换的磁场全部是由外部线圈产生的. 另一个不同之处是仿星器中没有等离子体电流. 典型的仿星器磁体结构如图 6 所示. 它由许多匝纵场线圈和一组螺旋绕组组成. 纵场线圈

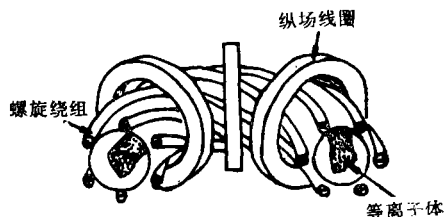


图 6 仿星器示意图

跟托卡马克中的纵场线圈没有什么区别。螺旋绕组可以把它看成是一个沿着轴向拉伸了的螺旋管。螺旋绕组成对出现。图中的仿星器有三对螺旋绕组，称作 $l=3$ 的仿星器。相邻螺旋绕组中的电流方向相反，这样可以抵消这些螺旋绕组产生的磁场中的垂直分量和纵向分量。因此纵场线圈有单独存在的必要。

将仿星器的位形略为简化一些便成了仿星器的变种——扭曲器和螺旋器。螺旋器与仿星器的结构基本没有什么差别，只是相邻螺旋绕组的电流方向跟仿星器有区别。仿星器中相邻螺旋绕组电流方向相反，而螺旋器中绕组的电流方向均相同。在这基础上再作简化便成为扭曲器 (torsatron)。它跟仿星器的区别主要有两个方面：其一是扭曲器没有单独的纵场线圈，仅保留螺旋绕组，结构更加简单；其二是相邻绕组的电流方向均相同。总之，仿星器(包括扭曲器和螺旋器)的磁场位形比托卡马克复杂，无论是在等离子体小截面上还是在大环方向上，都不具有对称性。这类装置一般没有纵向等离子体电流，往往通过注入的方式建立等离子体。仿星器的历史较早，近年来取得了不少比较重要的进展。

磁镜 这是一种开端型磁约束等离子体装置，简单磁镜的原理如图 7 所示。这类装置的一个基本特点就是它的磁力线在装置内是不闭合的，因此通常称之为开端型磁约束装置。

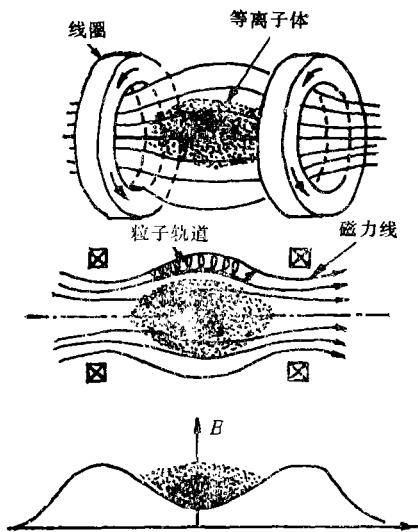


图 7 简单磁镜示意图

两个强磁场线圈中通过电流便产生具有某种特点的磁场位形，在两个线圈之间的中间区域磁场强度较小而且平坦，在正对线圈处磁场强度突然增大到最大值。由于磁镜效应，等离子体中的带电粒子大部分都将在两个强磁场区域之间来回反射。这部分粒子叫捕获粒子。那些平行方向的速度分量足够大的粒子将会沿磁力线从强磁场区域逃逸出去。这部分粒子叫逃逸粒子。这部分粒子从磁镜中泄漏出去造成“终端损失”，这是简单磁镜的致命缺点。磁镜的另外一个问题是其磁力线形状凹向等离子体，容易产生等离子体宏观不稳定性。为此，有人提出了极小 B 概念，即在这种磁场位形中，等离

子体位于磁场最小的区域。这样的磁场位形有好几种，比较典型的是“全球缝”形线圈和“阴阳线圈”，如图 8 所示。这些特殊的磁场位形对于抑制等离子体宏观不稳定性是十分有利的。为了克服“终端损失”，有人提

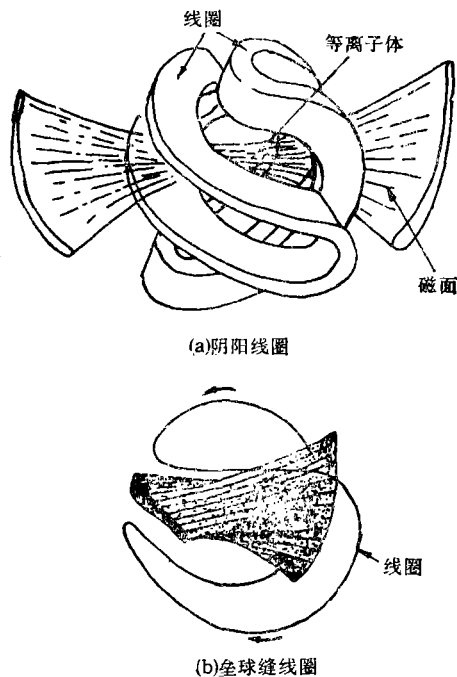


图 8(a) 阴阳线圈，(b) 全球缝线圈

出将若干磁镜首尾相接，构成一个环形或比较长的直线型装置。80 年代提出的串列磁镜是一种比较先进的磁镜概念。所谓串列磁镜就是在一个大体积的中心螺管区域的两端分别装上磁场特别强的“端塞”(end plug)，或用其它办法在两端建立起很强的“热垒”，阻挡从中心螺管区域逃出来的带电粒子，以此来解决终端损失问题，提高等离子体约束性能。串列磁镜取得了不少进展，代表了磁镜装置的发展方向。

除了以上介绍的托卡马克、仿星器和磁镜装置之外，还有一种比较受重视的磁约束装置就是场反向箍缩装置。这是英国卡拉姆实验室在早期的洋塔 (Theta) 装置放电实验中偶然发现的一种磁场位形。后来采用程序控制外回路电流的方法来建立这种磁场位形。它的特点是环向磁场在等离子体柱外表面附近反向，因而磁剪切大，有利于克服不稳定性。

· 出版消息 · 欢迎订阅本刊合订本

本刊热忱欢迎各界朋友订阅 1989, 1990, 1991, 1992 年合订本，每册定价分别为 15, 15, 15, 20 元(含邮费、包装费)需要者，可从当地邮局直接汇款至北京 918 信箱《现代物理知识》编辑部秋培收，邮政编码：100039。