

CT-6 和 CT-6B 的历史

——纪念聚变研究 50 周年和中国科学院物理研究所成立 80 周年

王 龙

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

CT-6 是我国第一台托卡马克装置,于 1974 年在中国科学院物理研究所建成。CT-6B 是其在 1978 年的升级版,于 2000 年关闭。我们主要叙述它们早期的历史。

1 历史背景

1966 年“文革”以前,二机部和科学院(当时中国科学院简称科学院,而不称中科院)的领导协商,确定科学院也开展受控核聚变的研究工作,而且有二机部主攻磁镜,科学院开展箍缩类装置研究之议。当时在科学院物理所负责筹建的位于三线汉中的“技术物理中心”的规划中,也包含等离子体物理的内容。

1966 年 5 月,在哈尔滨召开第三届“全国电工会议”,即聚变学术会议。物理所派人参加。这个会议甫结束,“文化大革命”的炮声响起。随之政治运动开炼,业务工作停止,领导机关瘫痪。这些话题无人提起。“技术物理中心”的建设也随之搁浅。

1967 年 3 月,局面有所缓解。人们想起了业务工作。但是,在“文化大革命”的语境中,以前的话题作何种解读,自然成了问题。人们自然要问:科学院是否还搞聚变?以前的分工协议还算数否?如果还搞,在本地搞还是搬迁三线?如果搬三线,和二机部合并还是另搞?在全国大乱的形势下,无任何领导机关可以回答这样的问题。于是,有人建议召集“民间”的串联会,于 1967 年 3 月在物理所先后举行两次。参加人员来自二机部五局、原子能研究所二部(即后来的中国原子能科学研究院)、电力科学研究院,以及科学院的物理所、电工所、力学所。当然与会人员也回答不了这些问题,但是大家均表示,受控聚变一定要搞。也许是这次“串联”使物理所的职工认清了形势,知道短期内无人下达任务,只能自己拿主意,否则只能长期坐等。于是从这时起,自发执行

“文革”前的协议,开始了箍缩型装置的研究,具体的是设计、建造一台储能 10 万焦耳的角向箍缩装置。

在叶茂福、姚鑫兹等人主持下,这一装置从 1967 年上半年开始设计,到 1969 年底建成,并在实验中产生了热核聚变中子。而且使用马赫-珍德干涉仪和高速相机,得到了等离子体截面时空分布的二维密度图像,研究了不稳定性问题。这样的进展速度即使用今天的标准看也毫不逊色。这一工程项目的成功以及所积累的经验使得更大规模装置的建造成可能。

1968 年,苏联公布的托卡马克装置 T-3 上的实验结果,后经英国卡拉姆实验室科学家携诊断仪器前去证实。其达到的等离子体参数及其稳定性使国际聚变界震惊,从此开辟了聚变研究的托卡马克时代。而在纷纷扰扰的中国,有一个人当即注意到这一科学界的巨大成就并领会到它的长远意义。这个人就是物理所处于被批判逆境中的陈春先(1934—2004)(图 1)。

无论在“文革”前后,陈春先都属于异类。他 1959 年从苏联留学归国后,承担了几项研究课题,都不甚成功。所以在“文革”中受到批判,角向箍缩项目也未参与。这些批判虽然粗暴但不能说毫无道理。当然事情也不能完全怪他。陈春先本人对这些批判可能有所保留。但是有一点是肯定的,就是他不管受到什么不公正待遇,都没有忘记他科学家的身份,而时刻密切注视着国际科学发展的动态。而且看来,这些挫折也丝毫不影响他的情绪和自信。他始终精力充沛,情绪饱满,不顾自己被批判、无权的身份,不断向领导提出一些开展研究工作的建议,尽管这些领导的处境也未必比他强。他之所以能够如此,是因为在他的心中怀有长远而稳定的人生目标,不为一时的荣辱所干扰,不为了一事的得失所左右。

极“左”路线正是要将科学家异化为非科学家。



图1 陈春先

从主流的意识形态角度看,他这样的态度正是他没有吸取教训的表现.所以他又受到更猛烈的批判.

但是,在1970年左右,当他再接再厉,又提出研究托卡马克的时候,已没有人再批判他了.这也许是他的精诚所至,也许是广大群众厌倦了这一套.经他不断向有关领导的游说,和周围研究人员的讨论,大家逐渐同意了他的意见,认为这是一个很好的机会,我们也有必要的条件,托卡马克应该立即上马.

1972年4月物理所从事托卡马克研究的课题组成立,陈春先任组长,郑少白、李文莱为副组长.被称为CT-6的工程项目随之正式启动.CT是中国托卡马克的意思,6代表其储能水平为 10^6 J.

2 CT-6的建造

陈春先也有强的社会活动能力.他联系了电工所以严陆光为首的课题组作为合作伙伴.选择电工所的另一原因是该所有一台自制的6号电感.6号是指其储能 10^6 J.本来想将这一电感作为建造的托卡马克装置的电源,而将位于科学院合肥分院的另一8号电感作为下一代装置的电源.但是,后来考虑到使用电感电源时,短路开关的技术问题不好解决,又放弃了电感方案,而采用电容器储能.然而,后来,科学院进一步发展聚变的地点依然定在合肥,而物理所与电工所的合作关系也依旧保持.

当时确定的装置参数是:大半径45cm,等离子体小半径12.5cm,环向磁场2T,铁芯变压器的双向磁通0.28Vs.真空室采用如T-3的双层结构.真空系统为无油超高真空.环向磁场和变压器初级均用电容器脉

冲放电电源.环向磁场线圈初为24饼,480匝,后改为22饼,440匝.加热场分为两级.第一级用于击穿,第二级用于维持电流.

所有设计所根据的知识完全来自文献.当时中外关系已有所松动,但尚没有对口的外国人与之交流.至于到外国实验室去实地考察,是根本没想过的事.

下面说一下建造过程中遇到的困难,以及如何解决的.

首先是真空室的加工.内真空室是两不锈钢波纹管段.是用购买的多个波纹管焊在一起做成的,要求真空气密性.波纹管壁厚0.2mm.当时在中国,这样厚度材料的氩弧焊处在研究阶段,无现成的产品和技术,成为整个工程进展的瓶颈.于是,自己设计、加工等离子体焊枪和电源,在实验室里,由技术人员或工人自己练习焊接技术.陈春先本人也曾动手参与.最后终于攻克这一技术难关.

此外,在实验室里还自己加工、安装了等离子体切割设备,包括枪和电源.这是因为40—50mm厚的不锈钢板在附近找不到切割的地方,无法进一步加工.

陈春先将这种“从种麦子做起”的技术路线发挥到极致.他还试图自己安装一台复印机,以解决复制参考文献问题,但没有成功.

其次是真空系统.文献说要超高清洁真空,但是当时国内没这样的真空泵.于是设计为两级分子筛吸附泵+钛升华泵系统.这几种泵完全自制.至于法兰,则采用金丝密封的台阶式刀口方案.

在电源系统方案中,一个很大的问题是能耐高电压的大电流开关.国内也没这样的产品.幸而当时正值铁路上以可控硅(晶闸管)代换引燃管作为电气机车动力的开关,大批引燃管退役.于是乘这机会到株洲无偿引进了一批引燃管作为放电的开关.

重达5吨的铁芯变压器的加工也未采取外包的形式.像硅钢片的裁剪、去毛刺,都是实验室人员到二七机车车辆厂进行施工的.而组装则是在北京变压器厂人员的协助下在该厂完成的.

之所以采取这种“事必躬亲”的做法,是因为在当时环境下,这是唯一节约经费、保证进度的方法.至于未考虑进口器件,是因为没有外汇,也为了保证进度.当时人们确实想争分夺秒,早日建成装置,以赶超国际先进科学水平,并身体力行.

当时另一难题是数据采集,因为现在通用的数字技术全无.原来在实验室做实验都是用普通电子示波器观察放电波形,用照相机照相记录.这样需要

事后在暗室显影定影,不能当时对数据进行分析,而且容易弄错放电次数。在托卡马克实验中,每3—5分钟就放电一次,这种原始的数据采集方法更不方便,只能作为辅助方法。当时选择了工业中常用的光线示波器。这是一种低频的机械示波器,靠一种带反射镜的机械转子反射紫外线在感光纸上记录信号。这种记录纸可在当时进行湿法显影,如同一次成像照相机。所以在实验室里到处可见挂着晾干的记录纸。这一装置建成一两年后,才进口了记忆示波器,当然还只能用照相机记录。直到1980年代以后,家用计算机出现,才解决了数值采集和处理问题。

1972年下半年开始加工,1974年初全部完成,并成功安装。1974年春节前试放电未能成功,直到当年7月1日才正式放电,宣布装置建成(见图2)。

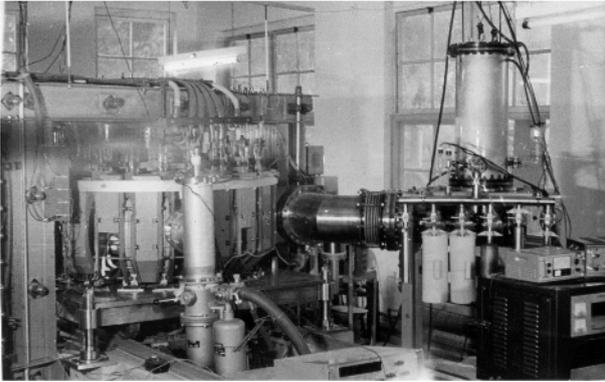


图2 CT-6装置(1974)

当时国际上已不采用过时的单层真空室,所以决定更换也是由波纹管焊成的单层真空室,于1975年初更换完毕。此时,已认识到放电清洗的重要性。采用低环向磁场、一组加热场、高重复频率的放电作为清洗放电。经过较长时期的清洗放电,于1975年8月得到平衡稳定、脉冲长达36ms的放电。从电流电压数值估计,等离子体的电子温度有100多eV。环向磁场最高作到1.3T。

装置的工程问题于1974年在成都召开的受控核聚变研究工作座谈会上报告。工程问题和初步物理研究结果于1980年发表于《物理学报》^[1],后被全文翻译登载在美国出版的《中国物理》上^[2]。1978年陈春先等首次访美。他在访问普林斯顿等离子体实验室时,和Furth, Rosenbluth等美国同行进行了交流,并展示了自己实验室的结果。^[3]鉴于当时条件,他携带的实验报告还是油印在很粗陋的纸上的资料。

3 CT-6的升级

作为工程模拟装置,CT-6已获得成功。但是作为物理研究装置,还存在很多问题。单层真空室虽然口径大了,但是由于波纹管上不好开法兰,测量窗口仍然缺乏。而且没有用于中性粒子束注入的切向窗口。于是开始设计完全用硬段焊接的新真空室。此外考虑进行电流和位置的反馈控制,要求延长放电时间,须改造环向磁场放电回路。此时适逢专门用于聚变研究的新楼(俗称受控楼)落成,于是决定结合搬迁将装置进行较大的改造。

1977年停止运行,搬迁装置,并进行改建。新真空室为2mm厚的不锈钢板圈焊成虾腰段焊接而成,开有多个诊断窗口和两个大口径切向窗口。由于有中性粒子注入窗口,真空室分为三段,法兰连接。

抽气系统仍用涡轮分子泵-溅射离子泵系统。充气用美国PV-10压电阀,可以连续或脉冲充气。

环向磁场电源采用仿真线路,可以产生长达100ms以上的平顶。使用部分电容器组用于电流反馈,以闸流管做开关。反馈平衡场使用单独线圈,用场效应管做电源。

1978年正式开始运转。因为电源和真空室均作了较大改动,运转后的装置称为CT-6B。这一装置的主要特点是有长达100ms的等离子体电流平顶,为物理实验提供了可靠的平台。这在小型装置中是少见的。

这一段的主要研究成果之一是用软X射线的吸收比较法测得等离子体中心的电子温度为200eV左右,和电导温度接近。先后用微波干涉仪和远红外干涉仪测量了等离子体的线平均电子密度。此外,由于使用了脉冲充气技术,使等离子体平均密度达到 $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 。在这样的密度下,成功地用自制的红宝石脉冲激光散射仪测量了电子温度,也和软X射线测量结果符合。在这一时期,还在装置上进行了环向磁场的慢压缩实验、热脉冲传播测量电子热导、等离子体电流和平衡位置反馈的稳定区域的实验和数值研究。

1984年,物理研究所进行了体制改革,取消了研究室编制,涉及CT-6B实验的人员分属于三个独立的课题组。这种体制给聚变研究这样的研究的带来了组织上的困难。后来,所领导试图用联合研究基金的方式克服这一困难。

也在这一年,合肥的等离子体物理研究所成功

研制了 HT-6M 装置,乐山的西南物理研究院也建成了 HL-1 装置.这两托卡马克装置的规模和等离子体参数均高于 CT-6B.在这样的情况下,CT-6B 上的实验研究应调整研究方向,争取取得更高水平的研究成果.

从 1980 年代初期开始,就确定了开展电子回旋波加热的研究方向.其背景是从更早起,就和我院电子学研究所进行了密切的合作,曾在 CT-6 上合作进行了电子回旋共振预电离的实验,以及电子回旋辐射(ECE)测量.这一时期,该所在回旋管研制上取得了很大进展,在 20—40GHz 频率下,可单管脉冲输出 150—200kW.物理研究所则负责用于该管的高压脉冲电源的研制.两所合作进行加热系统的调试.

1980 年代后期,正式在 CT-6B 上进行电子回旋共振加热的实验研究,并观察到明显的加热效果.这也是国内首次在托卡马克装置上得到加热效果的辅助加热实验.这一结果发表于 1989 年的国际聚变会议.

在这一实验成功的基础上,将研究方向调整为电子回旋波的电流启动.研究成果目的是希望实现将来聚变堆的非感应电流启动.1990 年代以后,在这个研究方向上,以及在交流运行和输运过程研究上,均取得一定的研究成果.^[4]物理研究达到了国际上同规模装置的水平.

4 成功原因的分析

应指出的是,CT-6 项目的成功,不光是参与人员主观努力的结果,也是因为当时在国内具备了一些条件,主要是工业部门提供了必要的支持.构成真空室的不锈钢波纹管是应国防需要在 1970 年代初刚刚生产出的.上述装置上完全自制的抽气系统后来运转很不正常.恰好在 1973—1974 年左右,先是上海真空泵厂,后是科学院科学仪器厂研制成功涡轮分子泵和溅射离子泵,于是用涡轮分子泵作为运转主泵,溅射离子泵作为夜间维持泵,有效地改善了真空.也是在 1973 年左右,科学仪器厂研制氦质谱检漏仪成功,第一台样机就用物理所.如果没有这一台仪器,CT-6 的真空不可能正常运转.至于残余气体分析,原来用一台调拨的进口回旋质谱计,比较简单,质量数低.1970 年代后期,北京分析仪器厂研制成功四极质谱计,也长期用于这台装置.至于其他材料如结构材料、绝缘材料、高压电缆等,国内产品

也基本能满足要求.变压器铁芯的中心柱使用进口的硅钢片,回臂使用国内产品.

至于政治环境,“文化大革命”的动乱确实给研究工作造成很大的困难.但当时已值“文革”后期,大规模的群众运动阶段已经过去,人们虽然仍对国家民族的前途表示忧虑,但已普遍不关心当前的这一场闹剧,并逐渐摆脱极“左”思想的束缚而走向务实,回归自我.而由于长期传统教育的关系,人们对理想主义的价值观念仍具备一定程度的认同,表现为奉献精神.另一方面,像聚变这样具有明显应用前途的项目,无论在“文革”哪一阶段,都无人明确表示反对.当时只有少数激进分子提出批评,但无人响应.等到 CT-6 建成,众人皆认为是项成绩的时候,就开始用“文革”话语来解读,被说成是“开门办所”的典型,所取得成绩是知识分子与工农相结合的产物.^[5]

这一项目在物理所来说是算得上一项工程,但与国家的一些大项目比较就够不上了,然而它具有所谓科学工程的特点.如何组织这样的科学工程,在“文革”前的我国就已积累了一定的经验并取得成功.但是在如何开展深入的物理研究方面还缺乏经验,使得物理研究进展缓慢.当然这里在学术环境和人员素质方面有更深刻的背景.

5 CT-6 和合肥聚变研究基地的建设

1972 年,开始在物理所建设 CT-6 的同时,我院决定在合肥分院建设聚变研究基地,初期附设于安徽光机所,称为受控研究站.陈春先参加了它的建设过程并担任了领导工作.而物理所负责技术人员的招聘.物理所也有部分人员为解决夫妻两地关系问题调往该站.第一批从社会招募的大多是“文革”期间分配的大学生和研究生.他们在分配当地一般从事与专业无关的工作.在这批人员中,有十几个人长期在物理所进修.此外,中国科技大学近代物理系新成立的等离子体物理专业的几位老师也在这里协作.他们都为 CT-6 的建设贡献了力量.他们之中很多人日后成为这一领域的领导和学术骨干.

1975 年,CT-6 装置换了单层真空室.换下来的双层真空室的外真空室送给合肥受控站.他们用这个真空室建了一台空芯变压器的托卡马克,称为 HT-6,后来又升级为 HT-6B.由于这一历史联系,这一装置的大小半径和 CT-6 一致.

“文革”后的 1979 年,著名美国科学家 Furth,

Rosenbluth 应邀访问中国. 华裔科学家刘全生和他们同来. 他在参观了物理所以后写道: “当时他们已经有了自己制造的托卡马克. 我们更惊讶的是, 这实验室的房子, 都是科学家们一砖一瓦自己动手造成的. 但艰辛之后, 确实确实做成了中国第一部能运转的小型托卡马克, 而且作了许多物理实验和探测.”^[6]这里所说的建房一事系指科学家们参加了建实验室的劳动.

最近, 陈骝教授在提到这一段历史时使用了“heroic”一词. 对在艰苦环境下作出贡献的许多人, 包括很多不知名的、我也难以逐一介绍的人来说, 他们确实无愧于这个词. 英雄业绩往往是很多平凡的普通人创造的, 尽管我们不能及时认识到这一点, 但是我们没有埋没这段历史的权利.

参考文献

[1] 中国科学院物理研究所 104 组, 电工研究所 403 组. 物理学报, 1980, 29(5): 577 [Group 104, Institute of Physics, Group 403, Institute of Electrical Engineering, Academia Sinica, Acta

Physica Sinica, 1980, 29(5): 577(in Chinese)] ; 中国科学院物理研究所 104 组. 物理学报, 1980, 29(6): 764 [Group 104, Institute of Physics. Acta Physica Sinica, 1980, 29(6): 764(in Chinese)]
 [2] Group 104, Institute of Physics, Group 403, Institute of Electrical Engineering, Academia Sinica, Chinese Physics, 1981, 1(4): 828 ; Group 104, Institute of Physics, Academia Sinica, Chinese Physics, 1981, 1(4): 860
 [3] 陈春先. 物理, 2002, 31(4): 466 [Chen C X. Wuli(Physics), 2002, 31(4): 466(in Chinese)]
 [4] 例如: Yang X Z, Jiang D M et al. Nucl. Fusion, 1996, 6: 1669 ; Wang G D, Yang X Z et al. Phys. Plasmas, 1998, 5: 1328 ; Dong L F, Wang L et al. Phys. Rev. E, 1998, 57: 5929 ; Han G H, Yao X Z et al. Nucl. Fusion, 1998, 38: 287 ; Wang G D, Wang L et al. Nucl. Fusion, 1999, 39: 263 ; Zheng S B, Yang X Z et al. Nucl. Fusion, 2000, 40: 155 ; Huang J G, Yang X Z et al. Nucl. Fusion, 2000, 40: 2023
 [5] 中国科学院物理研究所 104 组. 物理, 1975, 4(1): 5 [Group 104, Institute of Physics, Academia Sinica, Wuli(Physics), , 1975, 4(1): 5(in Chinese)]
 [6] 刘全生. 台湾《物理》, 1992, 14(4): 355



· 书评和书讯 ·

探索高等科教书店物理类书目推荐(15)

作者	书名	定价	作者	书名	定价
E. S. Aders	量子力学(影印)	44.0	王红艳	带自相容源的孤立子方程	28.0
P. G. Hewitt	概念物理(影印)	75.0	Y. Imry	介观物理导论 第 2 版(影印)	56.0
戈衍三	一些经典数学问题的另类解算	28.0	T. P. Cheng	基本粒子物理学的规范理论(影印)	96.0
钟万镒	力、功、能量与辛数学	12.8	J - P Francoise	广义相对论: 量子引力弦论和 M - 理论(影印)	118.0
冯康	哈密尔顿系统的辛几何算法	68.0	胡孟权	高等大气飞行动力学	48.0
李浙生	物理科学与辩证法	30.0	宋伟强	高分子材料辐射加工	35.0
杨邦文	新型光电器件与光电辅料应用手册	30.0	王秀峰	微电子材料与器件制备技术	39.0
胡威捷	现代颜色技术原理及应用	58.0	罗伯德特 W. 康	走进材料科学	59.0
Krauter	太阳能发电 - 光伏能源系统	30.0	高世桥	微机电系统动力学	28.0
S. M. Carroll	时空与几何(影印)	69.0	C. Claeys	先进半导体材料及器件的辐射效应 · 刘忠立 译	55.0
唐晋发	现代光学薄膜技术	64.0	陈治明	半导体概论	29.8
范洪义	从量子力学到量子光学	33.0	杨邦朝	薄膜物理与技术	16.0
金先龙	结构动力学并行计算方法及应用	56.0	蔡珣	现代薄膜材料与技术	42.0
D. E. Krane	生物信息学概论 · 孙啸 译	36.0	侯静	共光路/共模块自适应光学与位相畸变光束变频过程	35.0
S. 米塞诺	生物信息学方法指南 · 欧阳红生 等译	58.0	张以忱	真空材料	29.0
王翼飞	生物信息学 - 智能化算法及其应用	35.0	王晓东	真空技术	50.0
D. W. Mount	生物信息学 · 钟扬 等 译	56.0	达道安	真空设计手册	186.0
郝柏林	生物信息学手册 第 2 册	42.0	Γ. A. 米夏兹	真空放电物理和高功率脉冲技术	75.0
陶士珩	生物信息学	28.0	徐成海	真空工程技术	180.0
H. W. 伊弗斯	数学圈 1 - 3 · 李泳 译	109.5	梁绍荣	普通物理学 第 5 分册 量子物理学基础	22.4

我店以经营科技专著为特色, 以为科技工作者和大专院校师生提供优质服务为宗旨, 欢迎广大读者来店指导或来电查询.

电话 010 - 82872662, 62556876, 89162848

网址 <http://www.explorerbook.com>

电子邮箱 explorerbook@vip.163.com

通讯地址 北京市海淀区海淀大街 31 号 313 北京探索高等科教书店

邮政编码 100080

联系人 徐亮、秦运良