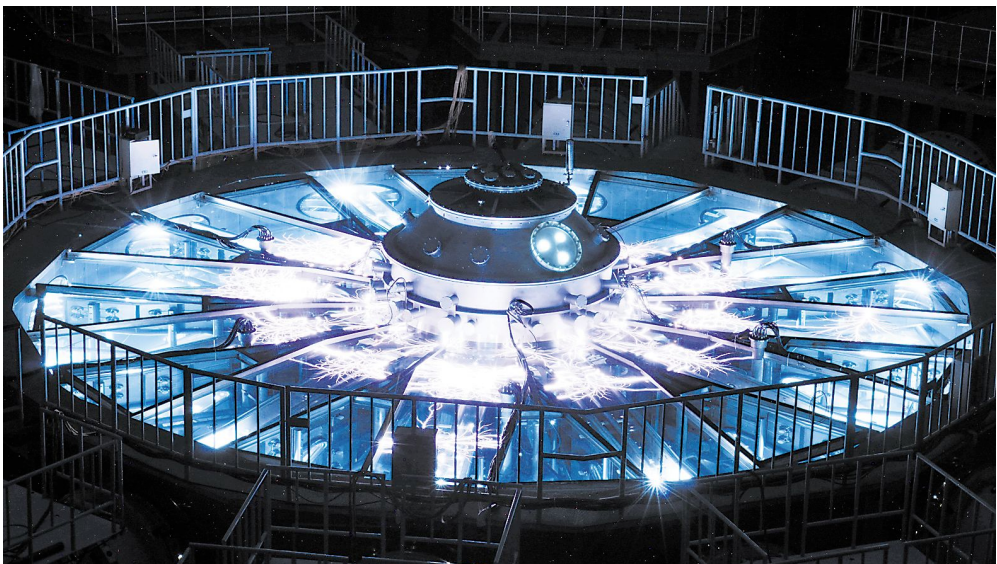


严谨求是 自主创新 为新时期核武器研究再立新功

——聚龙一号装置研制纪实

■姜洋 邹文康



聚龙一号装置放电瞬间

决策

直面挑战 迎难而上

中物院创建于1958年,是以发展国防尖端科学技术为主的理论、实验、设计、生产的综合体,是我国唯一从事核武器研制生产的综合性研究院。流体物理研究所是中物院下属的第一研究所,主要从事核武器研制、高新技术武器研制、军民两用技术开发及成果转化等工作。

伴随着1996年全面禁止核武器试验条约的签署,如何在实验室条件下,创造出接近核武器爆炸产生的极端高温、高压、高密度、强辐射条件,成为新时期核武器研究能否有效开展的关键。

脉冲功率技术是以电能为基础,通过对能量在时间和空间上进行压缩,并在特定负载上快速释放,获得极高的功率输出的一门实验科学,是在实验室条件下产生极端高温、高压、高密度、强辐射条件的有效手段。我国脉冲功率技术基础学科之一。“采用超高功率脉冲装置驱动柱形金属丝阵负载,使其气化并向轴心箍缩(即Z箍缩),能产生极强的X射线辐射,可以用来研究核武器中的辐射输运和聚变点火等问题,同时在惯性约束聚变、辐射效应、天体物理等前沿科学研究领域也具有非常重要的价值。

近几十年来,由于军事应用需求的强烈牵引,高功率脉冲技术成为主要的有核国家研究的焦点,美国投入了大量人力物力,先后建立了一系列超大脉冲功率装置,典型的Z箍缩研究装置有土星装置和ZR装置,俄罗斯也先后建成S-300和Angara-5-1装置。与之相比,我国起步较晚,基础薄弱。

为适应新时期核武器研究的需要,必须拥有具备足够驱动能力的综合实验平台,以此为基础加强精密物理实验设计、高精度多物理量诊断测试、数值模拟及理论分析等方面的能力。经过精心论证,上世纪末,中物院启动了大型多路超高功率脉冲装置的相关研究工作,并对已有平台进行技术改造,开始了原理探索及关键技术研究。在此基础上,本世纪初,中物院向国家提出了适合我国国情的研究发展计划建议,其中最关键的第一步,就是研制Z箍缩初级试验平台——聚龙一号并开展相应的物理实验研究。

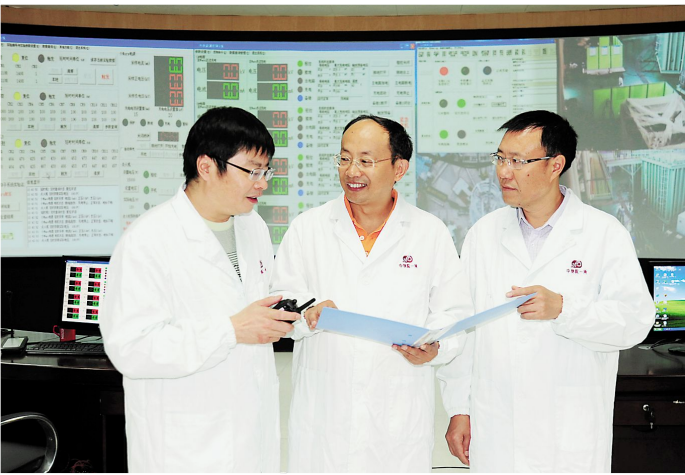
2004年,国家批复中物院正式启动相关工作,装置的技术指标确定为输出电流八百万至一千万安培,电流脉冲上升时间小于千万分之

一秒,功率超过20亿瓦。这样的装置系统极为复杂,技术难度和风险非常高,国内的技术基础十分薄弱,材料、设计、加工等各方面都面临极大的挑战。

国防科学技术研究的历史使命,使得中物院人毅然接受挑战,迎难而上、昂首前行。自2001年起,任务承担单位流体物理研究所开展了周密的立项论证工作,丁伯南、彭先觉等院领导对此给予了高度关注,多次亲临一线,了解项目的进展和亟待解决的问题。院内外老专家组成了顶尖专家团队,就装置技术路线和关键部件研制进行激烈讨论,提出了很多有益的思路和建议。流体物理研究所集中科研精英成立论证报告编写组和预研攻关小组,从国外有限公开的资料中收集、提炼相关信息,结合中物院的具体要求,对技术路线和关键技术进行充分的调研和分析论证,多次召开大范围深层次专题研讨会,技术资料、设想方案、加工图纸堆满了研究人员的文件柜。预研小组成员随后开展了场畸变开关、激光触发多级开关、马克斯发生器模块研制等大量预研工作,开展了上百次的论证研究,探索突破关键技术的路径。通过细致地进行物理分析、精确地验证计算参数、周密地考虑模型设计,取得了激光同步触发系统、场畸变气体开关、磁绝缘传输线,以及测试诊断系统研制的重大突破,为装置立项打下坚实的基础。

在聚龙一号装置的总体设计方案中,同步触发方案是其“灵魂”之所在。这是由于电流巨大,聚龙一号装置需由24路超高功率脉冲功率装置并联而成,每一路能量的释放由一个激光触发开关控制。为保证开关动作的一致性,激光实际出光时间与设定值的误差不能超过两亿分之一秒。如果将从电容器充电开始到最后能量释放完成的时间(约100秒)放大展宽至一千年,那么上述时间误差仅相当于1.5秒,其技术难度可想而知。为了实现这一技术指标,必须设计出完善的激光触发开关同步触发方案。

当时,美国Z装置是采用一台能量很大的激光器,分为36路激光去触发36个开关。如果直接借鉴美国的经验,技术风险会降低很多,但是该方案对激光器能量要求高、光路极其复杂、稳定性不高。



邓建军(中)、谢卫平(右)、丰树平(左)在商讨技术方案

2005年,项目负责人邓建军研究员、脉冲功率研究室主任谢卫平研究员带领团队结合装置研制特点,原创性地提出了采用12台激光器、每台激光器触发两个开关的技术路线,这样既能保证开关触发的同步性,触发光路也极为简化,原理上具有非常优越的性能;同时具备维护和运行效率高的特点。

由于国际上毫无先例,当时这方案甫一提出,受到了国内部分相关专家的质疑。在激光触发方案专题论证咨询会上,国内从事激光器研究的权威专家认为,国内尚无满足要求的激光器,而且按照这种激光器的常规的控制方式和水平,出光时间要达到所需的精度几乎是不现实的。

面对诸多质疑,邓建军率领项目组在开展了大量关键技术攻关的基础上,进一步对方案 and 验证性样机相关实验数据进行了充分的分析和细致论证,证实了该方案可行性,并最终取得了成功。在随后2006年的首届亚欧脉冲功率会议上,聚龙一号项目团队交流了激光触发开关的技术方案,引起了美方的高度重视。2007年,美国圣地亚实验室Z装置升级完成,其激光开关的触发方案也改为由36台小激光器触发,再次证明了这一方案的先进性。

总体技术方案既定,标志着聚龙一号装置研制的大幕正式拉开。这将是漫长的远征,在这条路上将会有激流险滩般的高歌猛进,也会有深山峡谷般的跌宕起伏。然众志成城何惧艰难险阻,且看沧海横流英雄聚,云起龙骧写豪情!流体物理研究所科研人员在每一个岗位上都焕发出最大的创造活力,汇聚成为无坚不摧的洪流!

突破

凝智聚力 自主创新

聚龙一号装置庞大繁杂而又极为精密,各个部分环环相扣,丝丝相关,需攻克单元技术难关高达数十项之多,其中有多项技术是世界级难题。

在几乎是从零开始的研究过程中,邓建军、谢卫平等人精心筹划、积极协调技术攻关和装置建设,并亲力亲为,坚持参加项目组重要的技术讨论并果断决策;项目组核心攻关团队成员丰树平研究员、王勤研究员、李洪涛研究员、宋盛义研究员、何安副研究员、卫兵高级工程师和分系统负责人与成员一起凭借敏锐物理嗅觉在迷雾中探寻规律,在脑力极度碰撞中迸射出智慧火花,终于铸就了一个个单元项目的成功。

激光触发多级多通道开关是控制聚龙一号装置中能量在约亿分之一秒内释放的“闸门”,作为核心的可控超高功率活性元件,关系到装置的总体运行效率和可靠性;同时,开关还需具有耐压高(5百万伏)、导通电流大(近百万安培)、导通电感电阻小、触发延迟和抖动小、可靠性高、使用范围大等特点。王淦昌院士曾认为,应用激光开关实现多路装置同步放电是脉冲功率技术发展的里程碑之一。在2002年对其进行论证的时候,国际上仅美国拥有这一研制技术,且在不断地摸索改进中。

高峰险阻,唯勇者至!面对这一难题,在项目负责人的指导下,李洪涛带领的攻关小组凭借不屈不挠的精神,在探索中前行。他们在物理机理研究、实验设计研究、系统检验三个阶段,通过反复实验和数值模拟计算,探究着其中极细微、深入的物理规律,获取了大量基础物理数据。

在开关间隙电压的匀场设计方面,他们开展了大量的文献调研和现场考察,汲取他人的研究精华;在综合考虑装置特点的基础上,独创性地提出了钳位环技术,针对这一技术方案开展了多次计算和模拟实验以验证其有效性。这一方案在后续的实验中证实具有突出的优越性。

经过不懈努力,李洪涛等人在国内首次研制成功触发时间误差小于五亿分之一秒的5百万伏低抖动激光触发多级多通道开关,开关的击穿时延分散性与一致性等技术指标达到世界先进水平。在2006年由流体物理研究所发起并主办的首届亚欧脉冲功率会议上,俄罗斯科学院院士斯米尔诺夫和美国圣地亚实验室激光开关负责人对该开关给予了高度评价,并主动找到邓建军表达了开展合作研究的愿望。

磁绝缘传输线可称为装置的“命脉”。沿磁绝缘传输线的发展进行了运输方向,电磁场强度及功率密度

有特色的超高功率多路汇流装置总体设计方案,突破了多路太瓦量级电脉冲的纳秒级精确时间控制、超高功率脉冲的产生和传输与汇聚等关键技术,自主研制成功国内首台多路并联超高功率脉冲装置,在负载上实现了峰值近千万安培、前沿约千万分之一秒的电流输出,技术指标达到国际同类装置先进水平!

这一台在我国核武器研究进程中具有标志性意义的科学实验装置的建成,使我国成为世界上极少数独立掌握数十万瓦级超高功率脉冲加速器设计和建造技术的国家,是我国高功率脉冲技术发展的又一个里程碑!

急剧升高,对其物理参数设置、部件材料选型、结构设计及加工制造提出了极高的要求。而像这种参数等级的磁绝缘技术在国外应用仅十来年的历史,在国内更无先例。因此,磁绝缘传输线从设计、制造、安装到测试都面临巨大的困难和挑战。

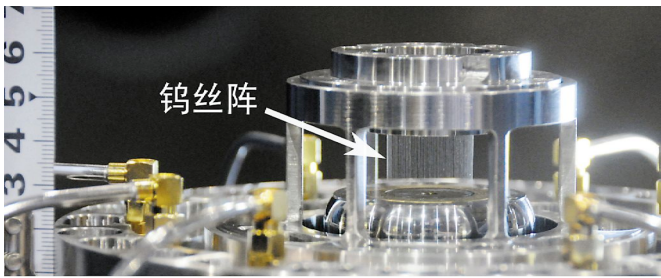
在设计过程中,宋盛义攻关小组结合装置磁绝缘传输线的具体要求,有针对性地开展物理设计、实验验证等深入细致的工作,从公式推导、程序编制、参数优化、到模拟结果验证,环环相扣、步步深入,成功完成磁绝缘传输线电路模拟计算模型的自主研发,为参数设计奠定了基础。

在参考国外先进经验的同时,他们针对装置磁绝缘传输线的多层圆盘锥大型腔体结构,在国际同类装置中首次采用了大锥角、高阻抗等新的设计思路,成功解决了靶区物理测试困难的问题。

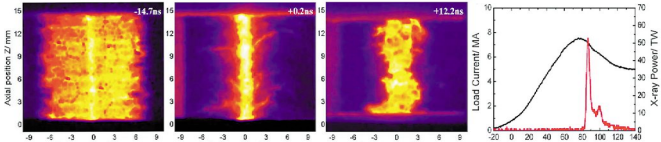
磁绝缘传输线的安装与测试是技术含量颇高的大工程,涉及上百个组件,材料、形状、重量及安装要求千差万别,单件重量大到吨级,小到公斤级,有的几米尺寸的大型件组装配合精度甚至要求达到0.2毫米,从吊装设备到配合工装均有特殊要求。安装人员发挥聪明才智,对吊装设计、装配流程、配合工艺等每个步骤、每道工序控制十分严格。

精确的物理设计、周到的工艺设计和完备的预案,使得磁绝缘传输线一次安装成功,首次通电即获得了理想的工作状态,这对我国的超高功率密度能量传输系统的设计,具有标志性的意义。

聚龙装置的每一个分系统,都是其发挥强大作用所必不可少的组成部分。科研人员们历经一次次挫折与成功,倾洒无数心血与汗水,他们的智慧之光在一项项创新性成就中闪烁:6项独创性技术达到了国际先进水平;获得了多项部委级科技进步奖,50余篇论文在国内外发表。



安装于聚龙一号装置靶区的单层钨丝阵负载



左1~3:单层钨丝阵等离子体三个内爆时刻的X射线分幅图像
右1:典型钨丝阵加载负载电流(黑)和X射线功率波形(红)

成就

汇聚能量 绽放异彩

凝众人之智,聚集体之力,终于换来了龙腾九霄!2012年3月,聚龙一号装置整机安装工作全部结束。直径约33米、高度近7米的聚龙一号装置傲然矗立。它由储能系统、脉冲形成与传输系统、电流汇聚系统、物理负载系统和辅助系统等组成,包含了1440台脉冲电容器,720个场畸变开关、24台激光触发气体开关、12台高能能激光器。

2013年6月,由国内加速器、脉冲功率技术和等离子体物理专家组成的测试组,对聚龙一号装置相关技术指标进行现场测试。测试结果表明,在驱动箔套筒负载条件下,装置输出了近千万安培峰值电流;在钨丝阵Z箍缩负载条件下,装置输出了九百万安培峰值电流,X射线辐射产额达590千焦耳,X射线峰值辐射功率达到47万瓦。装置输出电流的水平处于国际同类装置的先进水平!

神兵在手,且看我剑指苍穹!邓建军、谢卫平等针对聚龙一号的性能特点,配合当前的研究重点内容,对测试实验和物理实验进行了统筹策划。通过以聚龙一号这一大型多路并联的超高功率脉冲强流装置为加载平台,在长脉冲和短脉冲两种工作模式下,驱动不同类型的物理负载,产生超高压、超高温、强辐射、强磁场

等极端物理环境,进一步深入开展强X射线辐射源相关物理研究、脉冲功率驱动的聚变科学与技术研究、重大基础前沿科学研究及探索。

在所开展的七百万至九百万安培电流驱动水平下的丝阵等离子体内爆物理实验中,科研人员在国内外首次获得了功率大于50万瓦、能量大于500千焦的X光辐射,以及清晰的丝阵内爆图像。在五百万至七百万安培长脉冲电流驱动下的磁驱动准等熵压缩物理实验研究中,超高速飞片发射达到的峰值速度约每秒11.5公里,获得了达到120万大气压的峰值磁压力,这是目前国内脉冲功率技术领域所能获取准等熵压力的最高值。此外还开展了多路超高功率脉冲装置分时放电技术、高功率密度能量传输与汇聚等高功率脉冲技术的实验研究。截至2014年6月,经过共计120余次实验的历练,不仅充分证明了聚龙一号装置能够产生瞬间功率高达数十亿瓦、温度数百万度的X射线辐射,也可以产生高达数百万大气压的加载压力,同时利用该装置取得了一批达到国际先进水平的Z箍缩物理实验结果。

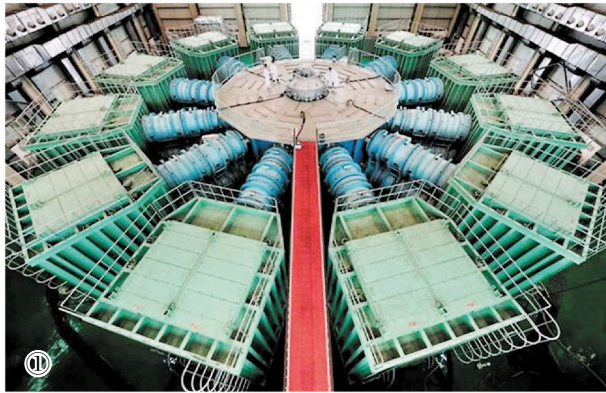
2013年10月10日,聚龙一号顺利通过了国家级鉴定。这一项目的建设,为该技术领域新概念和长远发展方向探索奠定了重要基础,

成为我国高功率脉冲技术发展的又一个里程碑!

2014年6月,在美国华盛顿举行的第41届国际等离子体科学会议暨第20届国际高功率离子束学术会议上,邓建军受大会组委会邀请,作了题为“Overview of pulsed power researches at CAEP(中物院脉冲功率技术研究概述)”的全体大会特邀报告。报告对中物院在脉冲功率科学领域的发展进行了阐述,对取得的成果和进展进行了交流,引起了国际上的极大关注和高度赞誉,美、俄、法等国的参会专家纷纷表达了想与我国合作开展研究的意愿。

聚龙一号项目的成功,是我国在新的历史时期,核武器科学技术研究实验设施的重大进展,将对核武器物理研究产生重要的影响。同时,也将为聚变能源科学、材料科学等前沿科技的发展创造有利的条件。项目研究过程中的重重难关造就了一支素质良好、善于协同攻关、能打硬仗的队伍,在科研管理、装置设计、物理实验技术、理论和数值模拟、负载及靶的制备技术以及诊断技术等方面积累了雄厚的底蕴。

未来,在超高功率脉冲技术的大舞台上,且看中国人的矫健身姿!



①聚龙一号装置实景图
②王勤(右一)和科研人员在检测设备

