

核武器研制中的若干物理问题

经福谦 胡思得

(中国工程物理研究院,成都 610003)

核武器研制涉及到多学科领域,它既包含物理学中多学科的交叉,也包含物理学与其他学科的交叉。本文将在简单介绍核武器工作原理的基础上列出这些相关学科名称及其主要研究内容。核武器研制事业的发展来自国家安全需求的推动,它的每一次进步又会在经济建设和相关学科发展中给出丰硕之果。

核武器研制是一个复杂的系统工程问题,由物理设计和工程设计两个主要部分组成。物理设计的任务是解决所提出设计原理的合理性、可行性和原型设计;工程设计的任务是解决物理设计核装置能够进一步满足战场使用的各项工程技术要求。在这两部分众多的子系统研究中,涉及到许多基础科学和工程技术科学领域的基本问题。本文限于篇幅,仅简介物理设计部分的物理问题。

各种类型武器(严格讲,是指战斗部)的物理设计原理,大都可归结为解决一个最基本问

装置,一大批装置正在建造中。FEL 装置要求加速器输出的电子束团具有流强大、束流发射度小和能散度小的优异品质,加速器的技术难度大。因此,研制高性能的加速器是加速器物理和技术的新课题。用来作 FEL 注入器的加速器有脉冲成形线加速器、电子直线加速器、电子回旋加速器、电子储存环和感应直线加速器等。自由电子激光技术已被列为我国高技术发展项目,几年来,已建成了两台脉冲成形线加速器和一台感应直线加速器,正在建造电子直线加速器和高亮度注入器,相应装置的研制也正在为之中。

这批装置可望在 90 年代中期建成,投入使用后,主要在凝聚态物理、材料科学、生物学、医学科学和光化学等方面开展研究工作。美国等

题——对关键部件的快速现场装配技术。当然,这里所说的“装配”不是“机械式”的“装配”,而是指涉及物理学多学科的原理、方法、参数和技术综合应用的“装配”。以原子弹为例,为了获得一定的威力,弹中要装填足够量的裂变材料,但是又不能装得太多,以确保其在不使用时处于次临界状态,否则核装料中自发裂变产生的中子或其他本底中子会引起链式裂变反应而造成核事故;但在它发送到预定目标部位时,又需要在现场使处于次临界状态的裂变装料快速地转变为超临界状态,并适时提供一定数量的引

国家的兴趣还在于研制激光武器。

从上面介绍的情况可以看出,粒子加速器技术作为高技术、新技术的综合体,它的发展在一定程度上反映了一个国家的科技水平和经济实力。我国正处在发展时期,经济力量有限,不可能在数量上和规模上与发达国家相比。但是我们可以有限的经济条件下充分发挥中华民族的聪明才智,在已有条件的基础上,作出有水平的科学成果来。北京正负电子对撞机、兰州重离子加速器、合肥同步辐射装置、高功率电子束装置、自由电子激光装置和一批小型加速器,为我国的科学家们提供了施展才能的舞台。我们愿与物理学家们一起为创造 90 年代的新成就而共同努力!

发中子,触发链式反应,产生核裂变爆炸。在这里,“关键部件”是指裂变材料装料,“快速装配技术”是指裂变装料由次临界状态快速转变为超临界状态的技术。

进一步研究表明,这里所说的“快速现场装配技术”还有三点基本要求:

1. 由于现场装配过程必须是“高速”的,故用于装配(驱动)的能源应是高功率密度的;
2. 在“关键部件”现场装配过程中,其时空关系应按精密的匹配关系进行;
3. 装配结束时关键部件应有一个合适的几何构形,处于一定的物理状态。

这种快速的、在人工精密控制下的现场装配过程,好似一件科学和艺术巧妙结合作品的即兴创作。而这种“创作”的实现,必须得到大量的物理研究工作的有力支持。

核武器物理设计的流程框图可用图1表示,每个方框内又含有相关学科的丰富的研究内容。

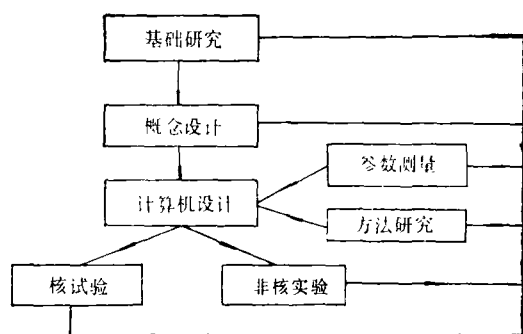


图1 核武器物理设计流程框图

鉴于有关核武器的具体结构是高度保密的,下面我们只能引用某些公开发行资料上给出的示意图,对其“关键部件的现场装配过程”原理作一般描述,并据此说明核武器研制中需要研究的物理问题。

一、核武器工作原理

核武器的类型很多,有原子弹、氢弹、中子弹,以及正处于探索研究阶段的核电磁脉冲弹、

物理

核激励 X 光激光武器、核定向能武器等。下面仅以原子弹和氢弹为例进行讨论。

1. 原子弹

裂变材料(铀-235 或钚-239)装料在中子轰击下通常分裂成两个中等质量数的裂变碎片,并放出 2—3 个中子和 200MeV 能量。这些中子有的损耗在非裂变的核反应中或漏失到裂变系统之外,有的则引发下一代的核裂变。如果每一次裂变后能够引起下一代核裂变的的中子数多于一个,则将形成自持的链式裂变反应,这就是一个处于超临界状态的核装料系统。原子弹中裂变装料由次临界状态到超临界状态的转变可以通过两种方法获得:枪法和内爆法。由于内爆法可少用价昂的裂变材料,故被普遍采用。

图2是内爆式原子弹的一个结构示意图。它利用炸药爆轰产生的内聚冲击波去压缩处于次临界状态的裂变材料,使其密度急剧增高,达到超临界状态。图中的钚和铀-238,是为了减少中子向外部漏失;还由于铀-238 密度大,可以延缓核装料在释能过程中由温升引起的膨胀,使链式反应维持较长时间,从而提高裂变装料利用率。随着裂变能量的不断释放,温度不断提高,核装料逐渐膨胀,密度不断下降,最终又转变成次临界状态,链式反应趋向熄灭。

由以上描述可知,内爆式“高速现场装配”时所用的驱动能源是高级炸药。它的作用过程大致可分为两个阶段:

(1) 高级炸药内爆驱动,对核装料进行压缩。这个过程即是其“现场高速装配过程”,历时约几十微秒;

(2) 从中子点火到链式反应熄灭是其“释能过程”,历时约微秒量级。

“高速现场装配设计”是原子弹物理设计技术的最关键部分。例如,大家知道,在裂变材料装量一定的条件下,球形结构的临界质量最小,故要求在“装配”终了时裂变装料构形尽可能地接近球形。但实际的情况是,原子弹的初始结构中总会存在一些非球形因素(即使在图2这种简图中,也可看出有炸药透镜及主炸药层这

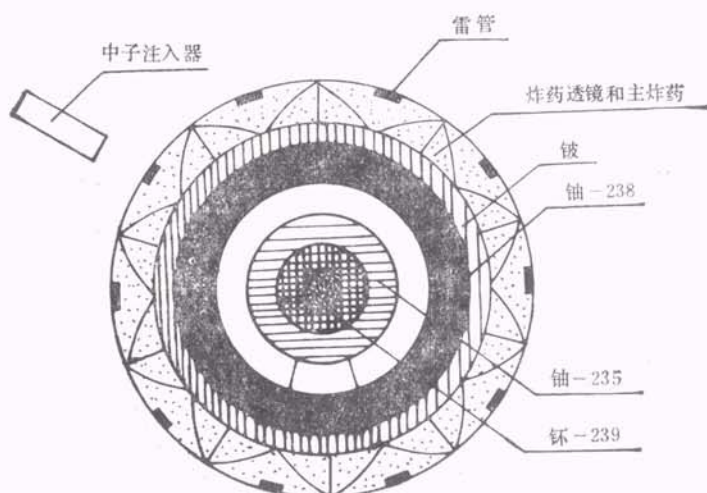


图2 内爆式原子弹结构示意图

一类非球形结构因素),根据内爆流体动力学理论,这种偏离球形的“扰动”,还会由于流体力学不稳定性(泰勒不稳定性等)而加剧,因此在内爆动力学的现场装配设计中,裂变装料形状及其调整控制又是需要侧重解决的重要问题。总的说来,原子弹物理设计中涉及的主要物理问题有:

(1) 炸药爆轰释能对裂变装料压缩做功的最优耦合效率。它对武器的小型化和轻量化是至关重要的。

(2) 内爆流体动力学过程中各种不稳定现象的研究。它直接影响到能否达到预期的裂变释能效果。

(3) 计算机设计时用到的有关材料(炸药、爆轰产物和核材料等)的特性参数,如物态方程、化学反应方程、核反应截面及裂变中子谱等。这些数据需通过大量的基础性研究工作提供。

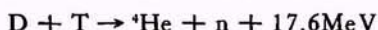
原子弹装置非核实验的任务是检验内爆流体动力学计算机模拟的物理模型合理性、校核计算程序和所用的参数值。它是一种模拟实验,有一套实验设计的理论和方法。实验研究时采用实时测量方法,经常用的是电子学、可见光高速摄影以及闪光X射线摄影测量技术。由于其动作过程历时约几十微秒,故对测量系统的时间分辨率要求一般为 10^{-8} — 10^{-9} s。这里特

别值得提出的是闪光X射线摄影技术。由于内爆型原子弹的“快速现场装配”是一个在弹壳内进行的驱动和压缩过程,对它的观测,特别是在临近装配过程结束的时刻,必须用闪光X射线阴影照相技术方能实现;又由于被透视物体(原子弹装置)的面密度高,故所用的X射线源应是高能量和高剂量的。例如,美国的洛斯-阿拉莫斯核武器研究所为此目的早在60年代就装备了一台 PHERMEX 闪光X射线机。它是一个长约 27.5m 的装置,其电子束能量为 30MeV,束流为 20A,脉宽为几十纳秒,在内爆流体动力学过程诊断中起着很重要的作用。

2. 氢弹

它是一种利用轻原子核聚变反应释能原理的爆炸装置。氢弹装置中“快速现场装配”的主要任务是使轻核装料达到高温高密度状态。

参与反应的轻原子核必须有足够的动能,才能克服静电斥力而彼此靠近,聚变反应才有可能发生。提高物质温度,是使大量原子核增大动能的重要途径。氘和氚是最合适的热核燃料,它们的反应式如下:



当热核装料温度为几百万到几千万度(K)时,氘、氚反应的速率比氘、氘反应的快约 100 倍,

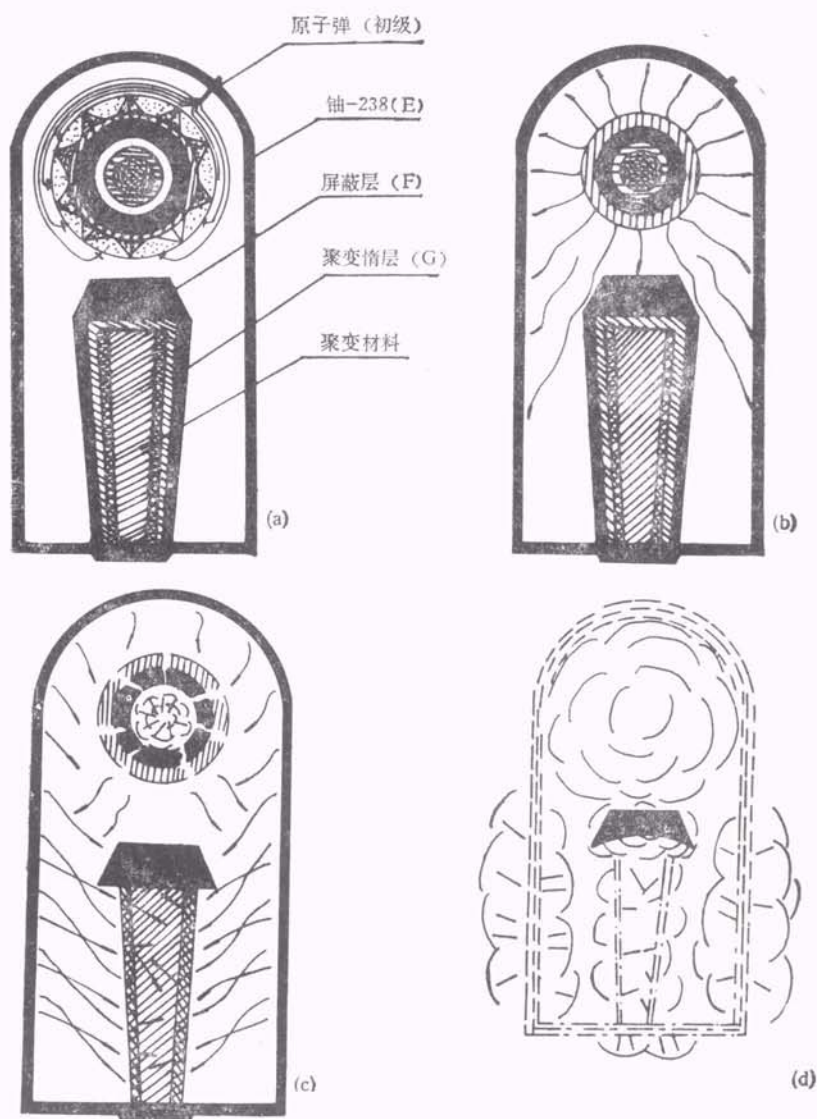
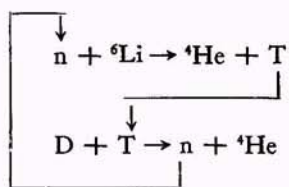


图3 氢弹及其爆炸过程示意图

(a) 爆炸前；(b) 初级爆炸后，光辐射向次级输运；(c) G层内爆压缩、加温、引发聚变反应；(d) 铀-238 裂变，整个核反应过程结束

故常利用氘、氚混合物实现聚变反应。但在氢弹装置中大量使用气态或液态氘、氚难以实现高密度的初始装料条件，一种实用的热核装料是固态 ${}^6\text{Li D}$ ，利用其氘-中子循环反应，即



循环反应中氘、氚放出中子，所产生的中子与

锂-6 作用很快又造出氘，两个反应都是放能的。为使热核装料充分燃烧，还必须对它先行强压缩。氢弹聚变反应所必需的高温、高压环境，目前只能用原子弹的爆炸释能作为其驱动能源来实现。

图3是 H. 莫兰德给出的氢弹结构及其动作过程示意图。图中的氢弹由一个封闭的铀-238 外壳包住。上方是一个用作驱动能源的原子弹，称为“初级”下方柱形结构是氢弹主体，内装聚变材料，氢弹主体又称“次级”。

H 莫兰德对其动作过程的描述如下:初级爆炸后释放出的巨大能量,以冲击波、光辐射和中子辐射为主要形式向周围空间传播;光辐射以光速运行,首先到达次级部位[见图3(b)];从铀-238(E)反射和绕厚辐射屏蔽层(F)后到达次级部位的光辐射对聚变惰层壳(G)施以辐射压,继之对内装聚变材料进行内聚压缩和加温,引发聚变反应[见图3(c)];聚变产生的部分高能中子被E层和G层吸收,产生裂变反应,再一次释放出裂变能[见图3(d)].他描述的是一种历经裂变—聚变—裂变三阶段释能的三相弹。

还应该指出,在氢弹设计中,要求次级系统在初级系统膨胀火球到达并摧毁它之前完成聚变反应过程,故聚变反应可利用的全部时间仅约微秒量级。这一约束条件除了只能选用初级释能中的光辐射部分能量作为次级现场装配能源外(因其运行速度最快),还要求聚变反应速率高,以期在这么短的时间内聚变材料得以充分燃烧,这就是为什么要对它进行先行强压缩的主要理由。

由以上讨论可知,氢弹主体(次级)的“现场装配过程”设计主要涉及以下过程:

(1) 初级系统爆炸释放能量向次级部位的传输问题,特别是其中的辐射运输问题。

(2) 辐射压通过聚变惰层G对内装聚变材料进行冲击波内聚压缩和加温。这是一个内爆辐射流体力学问题。

(3) 中子与压紧的聚变材料中铀核发生反应,形成氦与氘,氘与氘发生反应释放出更多的中子;聚变反应产生的部分高能中子打在E层和G层上,使之发生裂变反应(因铀-238与高能中子的裂变反应截面大),释放出更多的能量。这是一个辐射流体力学、中子输运和核反应紧密耦合的综合过程。

在它的计算机设计中,虽仍要用到原子弹设计时用到的那些材料特征参数,但由于所处的能(量)区(域)不同,这些参数的具体数值必须进行专门测定和编译。

氢弹设计的非核实验技术目前还不很成

熟,只能对某些个别的物理问题进行模拟实验研究。一般认为,激光惯性约束聚变研究中的“黑洞物理”与“辐射驱动内爆动力学”两大研究主题,都能为氢弹非核实验任务提供若干概念认识和数据。考虑到对激光驱动惯性约束聚变研究已另有专文介绍,本文不拟对之赘述。

3. 核试验

核试验是核武器物理设计的最后检验手段。其任务是测量核装置威力,诊断其内部运动和反应过程是否按预想的顺序和特性进行。

核试验测量分实时测量和事后分析(遗留效应分析)两种。实时测量包括对核装置内部运动和反应过程的近区物理测量和对远区物理效应的测量。近区物理测量主要依靠从核装置中发出的贯穿辐射和粒子(中子、 γ 射线和X射线等)提供信息,测量它们的时间谱、能谱以及针孔照相等。由于测量时间仅为 10^{-6} — 10^{-8} s,故测量系统的时间分辨率约需 10^{-8} — 10^{-10} s。远区物理效应主要靠核爆炸产生的冲击波、光辐射和电磁脉冲等现象造成,它们是核装置爆炸后与周围介质作用产生的。核试验的远、近区物理测量的技术准备包括对核物理快变事件各种测试技术研究,对探测器、信号传输和记录系统都有其特殊要求。对测量方案的设计和测量结果的反问题求解,还需要在大型电子计算机上进行。顺便指出,核试验物理测量又是在核爆炸诱发的严重电磁干扰环境中进行的,为了取得有用信号,还必须对核爆炸电磁干扰场时空分布规律及相应的抗干扰措施进行深入的研究。

事后分析主要采用放射化学方法。它通过回收核反应的气体和固体产物,分析其组分,来反推核爆炸时的核反应情况。

二、相关学科及研究工作特点

1. 蛛网结构

从上一节讨论中不难看出,核武器物理设计的中心问题是对一个辐射流体力学方程组和材料特性方程组(物态方程、化学及核反应方

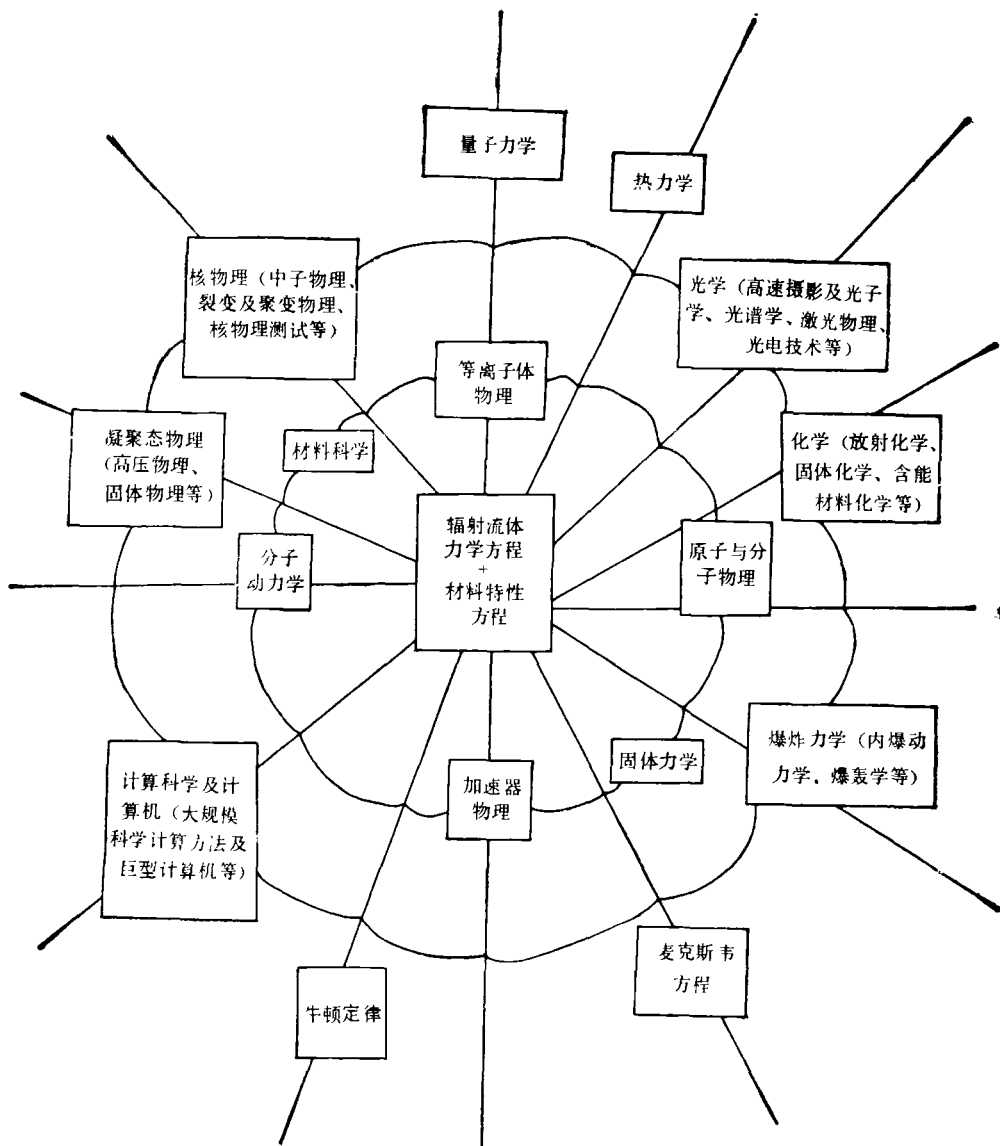


图 4 核武器研制中相关学科网络图

程、辐射自由程等)的耦合求解问题。但为了使这种求解成为事实,必须进行相应的和大量的理论、实验和计算机数值分析的研究工作,其中还涉及到多学科的协同攻关问题。

可以用图 4 所示的蛛网结构表示核武器物理设计的这种多学科交叉关系。蛛网中心好象蹲着一只巨蜘蛛,它雄踞于核武器最基本动作过程的中心位置——非线性辐射流体动力学方程组和材料特性方程组。网的四周分布着被它捕获的相关学科:力学、化学、计算科学与计算机

物理等,为它提供各种知识和数据的“支持”。这个蛛网结构的一个重要性质是,当网上“粘住”的一个“昆虫”动作,它的影响便会迅速被中心“巨蜘蛛”和网上其余的“昆虫”所感受,并作出相应的反应。核武器物理设计技术正是如此,当某一相关学科的理论或技术有所进展,就会对核武器物理设计技术有所推动,并对其他的相关学科发展有所促进。

2. 研究工作特点

由于核武器动作过程是以瞬时、高速、高

高 T_c 超导量子干涉器及其应用¹⁾

戴 远 东

(北京大学物理系, 北京 100871)

本文简述了超导量子干涉器的基本用途,高 T_c 超导量子干涉器的研究现状,探讨了高 T_c 超导量子干涉器在我国可能最早实现实用化的优先领域,对我国高 T_c 超导量子干涉器研究和应用工作的计划安排提出了一些设想。

超导量子干涉器(SQUID)是利用超导体的宏观量子相干性和超导约瑟夫森效应制成的灵敏度极高的磁敏感器件。用它制作的超导磁强计和各种电磁测量仪器有广泛的用途,如用于地质与地球物理(大地磁测及古地磁研究等)、

温、高密度和宽能区等为其主要特征,在这种极端条件下,材料的各种性质及其运动过程都将表现出独特的规律。例如,物态方程研究感兴趣的范围很广,压力从几十吉帕到几十太帕,温度 10^2-10^7K ,压缩比从略小于 1 到几十。核物理研究感兴趣的内容有 $1-15\text{MeV}$ 中子核反应的次级中子能谱与角分布, $1\text{eV}-20\text{MeV}$ 入射中子能量与裂变产物产额的关系,轻核间的聚变反应,激发核和不稳定同位素的中子截面等。等离子体物理研究感兴趣的主要是高温、高密度等离子体等。上述这一类核武器物理设计中所需的知识积累和有用参数是难以全部从相关学科的现有公开发表资料中得到的,因为这类课题或者是由于尚未被核武器研究机构之外工作的专家所重视,或者是由于他们得不到相应的条件支持,或者是由于保密的原因。换句话说,核武器研制所需的相当部分的知识基础和数据需要通过核武器研制部门的专题规划和专题研究工作去解决。为此,核武器研制机构必须建立起能再现这些极端条件的实验场地和设备(最重要的有反应堆、爆炸试验场、强流加速器和闪光 X 光机、巨型计算机、压缩气体炮、高功率激光装置等),组织起一支专业背景极不相

物理、生物医学(肺磁、脑磁、心磁及神经磁学等)、军事科学(潜艇探测及水下通信)、计量科学及信息科学等方面的研究。

1) 本文为作者在“八五期间超导战略目标汇报会”上的报告,内容略有删改。

同的科技队伍,在理论研究、实验研究和计算机数值仿真研究方面,进行有相当广度和深度的合作研究和协同攻关工作。

在本文行将结束之际,我们愿意再讲几句话:核武器研制事业来自国家安全需求的推动,它的发展依赖于物理学有关学科的发展;反过来看,核武器的深入研究又可为相关学科的发展注入新的活力,例如,近年来对 X 射线、激光、非平衡现象和冲击波固体化学等方面的研究推动等。

核武器研制事业的每一个进步,又是经济建设和技术进步的催化力量。军事与经济、技术的这种相容性,已为无数事实所说明,处理好了,就可兼而得之。例如,从当前的情况可以设想,它可能在推动下列高、新技术领域的工程与技术进步中起重要作用:

- (1) 能源工程与技术(如聚变-裂变混合堆、激光惯性约束聚变发电和石油开采等);
- (2) 材料科学与工程(如辐射改性、冲击波改性、新材料合成、难熔和陶瓷材料成型技术等);
- (3) 巨型计算机和大规模科学计算方法;
- (4) 强激光工程及技术等。