

高功率微波武器及其天线*

翟爱芬 张建利

(中国电子科技集团公司第39研究所 西安 710065)

摘要 从高功率微波武器的原理、关键设备及技术难点、发展状况介绍了HPM武器。并介绍了俄罗斯和美国研制的HPM设备,特别是美国在高功率武器系统中使用的天线。

关键词 高功率 微波武器 天线 HPM

1 前言

高功率微波一般指峰值功率在100MW以上,频率在1~300GHz内,相应波长为30cm~1mm以内的电磁波。超宽带是指频带宽度高达 $10^8\text{Hz}\sim 10^{12}\text{Hz}$ 。

作为武器,HPM有毁物和伤人两种功能。研究证明,当微波功率密度达 $0.01\sim 1\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时,可使工作在相应频段上的雷达和通讯设备受到干扰,不能正常工作;当功率密度达 $0.01\sim 1\text{W}/\text{cm}^2$ 时,可使雷达、通信、导航等设备的微波器件性能降低或失效,尤其是小型计算机的芯片更容易受到毁坏;当功率密度达 $10\sim 100\text{W}/\text{cm}^2$ 时,可使工作在任何波段的电子元器件失效,导致武器装备丧失功能,造成机毁人亡的后果。

高功率微波对人员的伤害具有热效应和非热效应两种。实验表明,当微波功率密度为 $0.5\text{W}/\text{cm}^2$ 时,会造成皮肤轻度烧伤;当功率密度为 $20\text{W}/\text{cm}^2$ 时,只要照射2秒钟就可造成皮肤三度烧伤;当功率密度达 $80\text{W}/\text{cm}^2$ 时,1秒钟就可使人死亡。俄罗斯研究人员曾使1kW的微波源照射山羊,结果使1km外的山羊丧命,2km外的山羊丧失活动能力。

脑细胞对微波加热效应非常敏感,只要微波使脑部温度变化几度,就可引起人体痉挛,失去知觉和记忆。3cm波段产生这种热效应的密度为 $10\sim 50\text{mW}/\text{cm}^2$ 。

非热效应是在微波强度较弱时产生的,它可使人产生神经错乱、行为错误、烦躁、致盲、记忆力减退或心肺功能衰竭等。在微波照射下,人还会感到一种可闻的声音,依脉宽和重复频率不同,声音可分为卡塔声、嗡嗡声或唧唧声等,称为微波声学效应,这些都影响人员的作战能力。试验证明,当飞机驾驶员受到功率密度为 $3\sim 13\text{mW}/\text{cm}^2$ 的照射后,便不能正常工作,甚至引起飞机失事。

2 高功率微波原理

初级能源经过能量转换装置转变为高功率强流脉冲相对论电子注。此电子注在各种高功率微波器件中与电磁场相互作用,将能量交给电磁场,产生高功率电磁波。这种

* 收稿日期:2003年1月20日

电磁波由特殊定向的发射装置发射,经过大气传输到目标表面,通过前门(如天线、传感器等)或后门(不可避免的孔、缝等)耦合入目标内部。耦合入目标的电磁能量可能干扰、致盲或烧毁电子传感器,或使电子控制线路失效(如烧坏保险丝),亦可能毁坏结构(如使弹药过早爆炸),从而不靠核武器却获得类似核爆电磁脉冲的效应(如图 1 所示)。

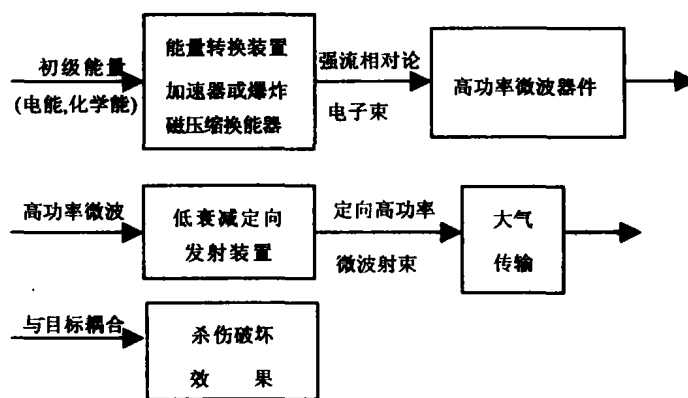


图 1 高功率微波原理示意图

3 重要的高功率微波武器

高功率微波武器主要有两类,即微波弹和高功率微波发射装置。

3.1 微波炸弹

1962 年 7 月,美国在约翰斯顿岛上空 400km 进行了威力为 140 万吨当量的核爆炸。但没有想到核爆炸同时,远在 1400km 之外的檀香山却出现了许多异常情况:供电系统被破坏、街灯突然同时熄灭、几百个防盗报警器响彻一片,高压输电线的避雷装置全部被烧毁。以后的几次高空核爆炸也同时出现了类似的情况。这一切引起了美国政府和军方的高度重视,经过核爆炸时释放出的伽马射线同大气层作用,可衍生出巨大的电子流,在地球磁场的作用下,能在地面上产生场强高达每米一万伏的电磁脉冲,其脉冲宽度为几百纳秒,频率低于 1000MHz。这个极强的电磁脉冲将在地面各种导线上产生几千伏的电压脉冲,并沿着电子设备的引线进入电子设备内部,使集成电路、半导体器件、电脑芯片等瞬间被毁坏,从而使各类电子设备失效。人们利用这种核电磁脉冲效应原理,制成了实用的常规武器——电磁脉冲弹(HPM 弹)。

HPM 弹也称 HPM 电磁脉冲弹,是 HPM 武器的一种,其爆炸方式的 HPM 弹的实际结构如图 2 所示。

微波炸弹的能量是炸药的爆炸能,再激励微波虚阴极振荡器,产生 10~40GW 的 HPM 脉冲,频率在分米波段。这个 HPM 脉冲将在其有效作用范围内(半径为

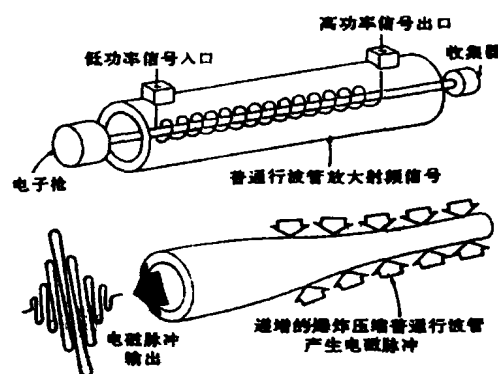


图 2 微波弹原理图

400~500m) 形成每米几千伏的场强,在地面导线和金属表面上产生极强的电磁波。并进入电子设备内部,使关键的元器件失效。HPM 脉冲还可以从相应波段的雷达,通信天线直接进入,小孔的作用类似微波谐振腔的耦合缝隙,HPM 脉冲在设备内形成巨大的驻波场,从而直接毁坏电子元器件。

俄罗斯研制了多个系列的投掷式的高功率微波武器,并于 1983 年实验成功,已生产了多种口径的电磁炸弹。

美国在 Balboa 计划中已研制成功高功率微波弹头,另据美国“防卫新闻”报导,美国海军在海湾战争中首次使用了微波炸弹。美国具有使用产生连续多个脉冲和产生单个脉冲的高功率微波武器的能力,并且在海湾战争中使用了巡航导弹搭载的高功率微波弹头,在空战中对付伊拉克的防空网。在对南联盟的轰炸中也使用了这种电磁炸弹。

Balboa 高功率微波弹头结构如图 3 (a) 所示,携带高功率微波武器的空射巡航导弹如图 3 (b) 所示。空射巡航导弹的头部改装为由许多小板组成球形,有些类似 F117 的机壳。装在头部的一块梯形光学透明板既可当作目标传感器的窗口,又可当作电磁波的出射口。一个精密加工的反射器式天线,将输出波束聚集在大约 30° 的区域内,发射到几百米外的目标上。

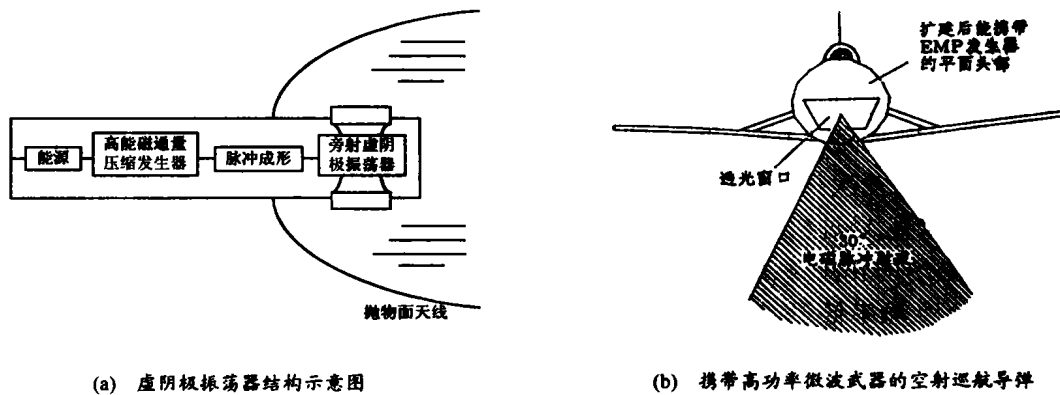


图 3

能源、高功率微波发生器、大型天线及配套设备是 HPM 的关键部件。

3.1.1 HPM 源

实用的 HPM 源大都采用微波虚阴极振荡器,其结构如图 4 所示。

虚阴极振荡器的基本原理是栅网阳极加速强流电子束,使许多电子通过阳极网,在阳极后面形成一个空间电荷“泡”,称之为虚阴极。在适当的条件下,虚阴极将后来的电子反射回去,形成电子在阴极与虚阴极之间来回振

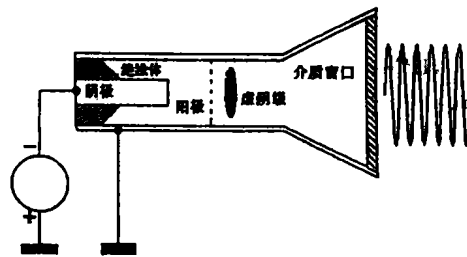


图 4 虚阴极振荡器结构示意图

荡而产生微波。如果使这个空间电荷区位于适当调谐的谐振腔中,就能达到很高的峰值功率。一般功率值为 170kW 到 40kW,频率在分米波和厘米波段。微波功率通过天线辐射到空间,虚阴极振荡器与天线的连接如图 5 所示。

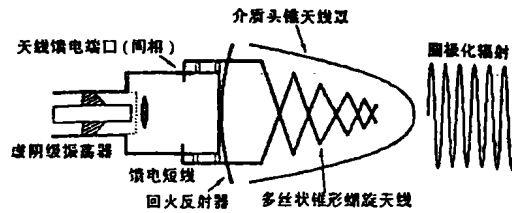


图 5 虚阴极振荡器与天线连接示意图

3.1.2 爆炸激励磁通量压缩发生器

虚阴极振荡器需要一个强流电子束来激励,这个电子束的峰值电流值高达几十兆安培。强电子束将由爆炸激励磁通量压缩发生器来产生。螺旋形磁通量压缩发生器的结构如图 6 (a) 所示。图 2 所示的 HPM 弹有两级磁通量压缩发生器,在第一级磁通量压缩发生器之前是同轴电容组,其作用是产生爆炸的启动电流。当爆炸启动后,爆炸将使电枢管膨胀变形,使之与线圈形成短路,爆炸持续进行将使电枢管变形为张角 $12^{\circ} \sim 19^{\circ}$ 的角锥状,并沿轴向向前传递前进。此种持续前进的短路,将会压缩电磁场并减少线圈电感,使线圈电流直线上升,直到发生器崩溃为止,如图 6 (b) 所示。电流上升时间为数十至数百微秒,峰值电流为几十兆安培。

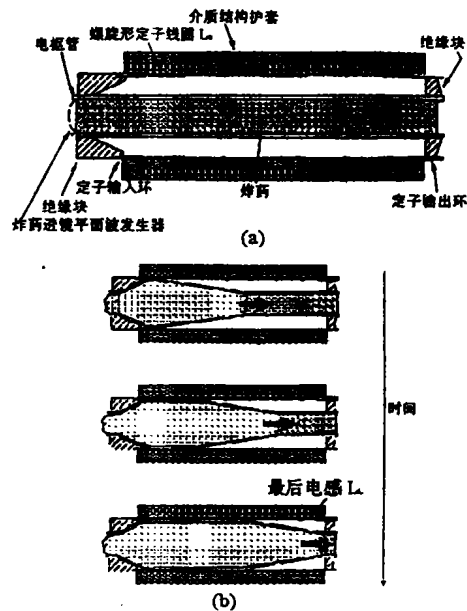


图 6 爆炸激励螺旋形磁通量压缩发生器

3.1.3 天线设备

微波弹的定向发射天线对方向性要求不太严,但对其尺寸有严格的限制,以便于巡航导弹或飞机携带。美国正在执行的 Balboa 计划中的高功率微波弹头采用抛物面天线发射出去,参见图 3。

高功率微波发射装置的功能与普通雷达发射天线馈电系统的功能类似,但要解决高功率击穿问题,这是一个难题,同时也希望更小的副瓣以消除对友邻的影响。有时为了远距离发射,希望采用阵列天线。

高功率微波传输中可能碰到大气击穿与衰减问题。据研究,对脉宽大于 $1\mu s$ 的微波,空气击穿的临界功率密度为 $1.5MW/cm^2$,大气衰减也较小。因此,高功率微波在通常大气压下没有严重的传输问题。定向辐射天线主要用于把高功率微波辐射电磁能聚集成极窄的波束,使微波能量高度集中,从而以极高的能量强度发射出去照射目标,破坏武器系统和损伤作战人员。高功率微波定向天线是高功率微波源与自由空间的界面。与常规天线技术不同的是高功率微波天线具有高功率和短脉冲两个基本特性。因此这

类天线一般由常规天线技术演变过来,使其与上述两个基本特性相适应。对天线的主要要求是高定向性,大功率容量,一定的带宽和快速扫描等。到目前为止,只有几种天线已用在窄带高功率微波研究中,而最常用的是矩形喇叭天线,其典型的天线效率可达80%。抛物面天线由于其集中馈电包含非常高的电场,因而应注意击穿问题。阵列天线应用于高功率微波系统中看来是可行的,其理由一是更高的功率将要求较高的天线面积以避免击穿问题;二是超高功率($\sim 100\text{GW}$)将从锁相源阵列来实现,这意味着多个输出波导要求多个天线;三是阵列天线的目标快速电子跟踪和照射与高的定向性相兼容。

3.2 典型的高功率微波发射装置及天线

高功率微波发射装置一般由电源供电,采用加速器产生强流相对论电子注。加速器可以是单次的或重复的,其重复频率限制了高功率微波的重复频率,其脉宽与功率限定了发射高功率微波波束相应能量的上限。

单次脉冲发射装置可以产生千兆瓦级的瞬时功率,目前功率大于 10kMW 的高功率微波辐射都是由这类加速器产生的,从一次发射到下次发射所需时间为数分钟到数十分钟不等。不过这类加速器的体积较大,投入实用还有较多困难。

重复脉冲发射机用的加速器有紧凑型感应加速器、太斯拉变压器型加速器及其它一些类型。前苏联二十余年来执行了一项深思熟虑的计划,发展了一系列太斯拉变压器型的小型加速器—Sinus系列,其主要参数如表1所示。近两年,英国和美国的几个国家实验室都从俄罗斯购买了这种加速器,在这种加速器基础上研制的相对论返波管已达到了下述水平:单次运行的峰值功率大于 1kMW ,重复运行的功率不小于 500MW ,重复频率 100Hz ,工作波段为 X 波段,功率不稳定性小于 $1\sim 2\%$,频率不稳定性小于 0.1% ,可连续工作数小时以上,阴极寿命大于 10^8 发次。

表 1

装 置	电子能量 (千电子伏)	束 流 (千安培)	脉宽 (纳秒)	重复频率 (赫兹)	应用范围 相对论电子学
Sinus-4	300	5	25	100	激光泵
Sinus-5	700	7	10	100	相对论电子学
Sinus-6	400 (700)	5 (7)	25	1000	
Sinus-7	2000	20	40	50	设计
Sinus-13	200	10	10	250	

3.2.1 俄罗斯的高功率防空微波武器

前苏联还用这种加速器研制成功了防空用微波武器系统,并进行了外场试验,其配置情况如图7所示。

该武器系统辐射的峰值功率为 1kW,杀伤距离为 1~10km,照射到 1 公里远的目标上的功率密度为 $400W/cm^2$,照射到 10km 远的目标上的功率密度为 $4W/cm^2$ 。其主要作用是保护重要的指挥中心,它不仅能使敌方的电子设备失效,而且具有抗反辐射导弹的能力。该微波武器总重量为 13 吨,分载在三辆越野卡车上。第一辆卡车载微波功率源和燃料,重约 10 吨;第二辆卡车载射频武器,重约 3 吨;第三辆卡车载配套使用的对空监视雷达:雷达工作在 X 波段、峰值功率 1GW、脉宽 5ns、重复频率 100Hz。器件为返波管振荡器,电源为 Sinus-4,重复脉冲发生器,装置探测到 50km 以外的飞机,距离分辨率为 10m。武器与功率源分置可使武器本身不受功率源振动的影响。从图中可知,系统采用的天线与一般的雷达天线类似。

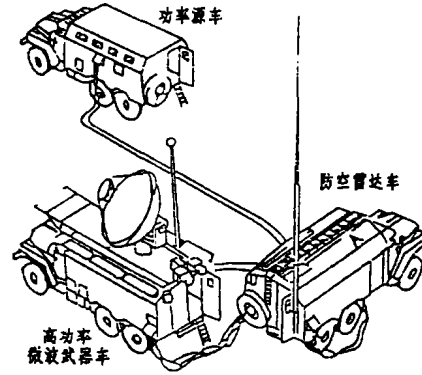


图 7 俄罗斯用于防空的高功率微波武器

可以说,这种重复频率加速器是世界上运行时间最长、最可靠的重复脉冲加速器,其重复频率可高达 1000Hz。它的缺点是脉宽较窄,因而平均功率不高。

3.2.2 美国的高功率微波武器

美国除微波弹外,也积极研究高功率微波武器系统设备,下面介绍一套美国车载型 HPM 武器设备,这是一套重量小于 250kg 的设备,与前面介绍的俄罗斯设备相比,重量小很多,而且使用了更新颖的天线。如图 8、9 所示。

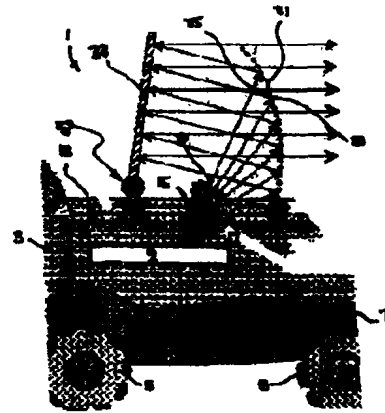


图 8 是一个全图,不同部件的相对位置及互相联接

这套紧凑型、重量轻、易操作、高功率微波武器包括的部分有:带自备电源、至少有带外部天线的易操作的汽车一部;汽车上安装有一个带电源的微波辐射源、把电源连接到外部天线的波导、与波导设备相连的馈源喇叭、一个接收辐射脉冲、高能微波波束的微波能量透射窗口、固定安装在外部天线面上的固定传输反射器。这个传输反射器与馈源喇叭窗口相对且有空间隔离并位于馈源喇叭上方,天线的凹面对着馈源喇叭,通过馈源喇叭可产生一定形状的波束;一个钮动反射器安装在传输反射器下面与反射器的凹面分离并自适应接收来自传输反射器凹面的能量。并将极化旋转 90° 。通过传输反射器形成一个窄的、笔形的高能极化辐射波束、一直从传输反射器的凸面延伸出去。

峰值功率的微波传输能量超过 100MW 级时,用 L 波段天线,波束很窄笔形 ($G \sim 30dB$),重量很小(小于 250kg),可很紧凑地安装在地面的汽车上或空中平台上。这种

天线更广阔的用途是拦截目标,干扰或抑制电子监控系统以及导弹或飞机这类目标的方向控制系统。另外这种设备还可用于电子系统平抑和自动汽车的计算机控制中,减少追逐行为中的财产损失和人员伤亡。

天线包括一个微波馈源(高真空状态下),馈源的作用是把微波能量从功率源发送到天线系统。一个传输反射器,这个反射器是由排列在一个框架上的相互隔离的许多导体,在抛物曲线内形成的相对较薄的凹凸面,以铰链方式安装在汽车表面上。这个传输天线能够折叠到与地球表面平行位置(收藏位置),使用时能快速变换到与地面垂直位置,直立接收微波。

当重复频率超过 100Hz 时,系统工作最合适的脉冲宽度大约是 $5\mu\text{s}$,在 L 波段 $f_0=1.3\text{GHz}$ 时,本装置的波束增益为 30dB。扭转反射器和传输反射器一样都能覆盖小于 7m^2 的面积,装在汽车上的紧凑型天线也使总设备重量小于 250kg。

天线主要特点是重量轻、紧凑型、易操作和方向性强,天线产生高功率微波,目的是在目标上形成一个高能量聚焦。例如聚焦在导弹、飞机或汽车上,同时伤及人命少。天线还包括一种以可控制形状快速传输微波能量的方法,对准正移动的目标快速应用高能量微波束控制目标的电子控制系统,同时对人或设备无伤害。本套设备能够提供可灵活折叠成小体积结构并可快速应对任务的天线系统。

4 HPM 武器的技术难点及各国研发状况

4.1 技术难点

高功率微波弹具有波束较宽(与激光武器相比)、照射区域大、作用距离远、杀伤范围广、受天气影响小等优点,在现代战争中有较大应用潜力。然而,在发展高功率微波弹中尚存在一些技术难点:

(1) 减小电源等设备的体积。高功率微波源的电源和散热设备极为笨重,因而急需设计出一种能满足功率要求的小而轻的电源,以满足现代战争对机动性能的要求;

(2) 提高天线的可靠性、可控性和高方向性。高功率微波弹的天线发射很强的电磁能,要想保证有效地杀伤敌人,保护友方或己方的电子设备不受影响,必须设计出可靠性高、可控性好、方向性强的发射天线,并要求用小而轻的天线能辐射超过杀伤距离所要求的微波能量,美国正在考虑使用相控阵天线,但需要解决将微波能量转换成合适的模式并将其馈电到天线的一些技术问题;

(3) 爆炸能脉冲功率源方面。目前还不足以提供微波器件所需的电功率,转换效率也较低,电子束质量有待改善,脉宽和总能量尚需提高;

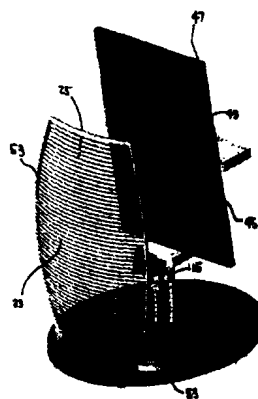


图9 馈源喇叭、传输反射器、扭转反射的另一图示

(4) 重复脉冲加速器方面。单脉冲能量、重复频率均有待提高,但这又受限于电源平均功率和散热条件,最后只能根据具体需求进行权衡;

(5) 高功率微波器件方面。需要提高单个器件的峰值功率,有迹象表明上限功率可能在 100 千兆瓦左右;增加脉宽会遇到二极管短路与高频击穿问题;锁频、锁相研究工作还需深入进行,对锁定源功率要求很高;器件的能量效率太低,有待提高;器件与实际脉冲功率源的匹配问题有待于进一步解决。

上述种种困难决定了微波武器发展的道路是不会平坦的。但是,高功率微波毕竟是电子战攻击的极好手段,而且某些应用的主要障碍已经扫除,现有的困难多属技术限制,而不是物理限制,技术问题总是可以通过不断努力求得解决的。

4.2 各国研发状况

美国一直在进行宽频带、高功率微波武器和窄频带定向微波武器的研究与开发。1987 年开始执行的平衡技术倡议计划,把高功率微波武器列为五大关键技术之一。在高功率微波武器方面,重点是虚阴极振荡器,基本上能达到武器应用水平。从 20 世纪 70 年代开始,美国先后开发出普通虚阴极振荡器试验样机、旁虚阴极振荡器和轴向激励虚阴极振荡器。美国还研制了自由电子激光器、以相对论原理偏转电子束的磁控管、回波振荡器等微波产生器件和先进的自由电子半导体开关。这些微波辐射源的峰值功率大于 1GW,转换效率达 30%~50%。1992 年又研制出等离子体辅助波振荡器并进行原理性试验,达到了较高水平。100kV 的电子束能产生 3~5MW 的脉冲功率,脉冲宽度为现有脉冲宽度的 1000 倍,每脉冲能辐射 399~500J 的能量,电子束转换率为 15%~20%。这种振荡器采用的新技术使设备的体积减小 3/4。但作为战场使用存在的问题是如何将机动的微波器所需要的能源安装在车辆或飞机上。

俄罗斯的研究重点是相对论原理磁控管和回波振荡器。它研制的单脉冲回波振荡器的脉冲输出功率达 15GW,能量转换效率为 50%。10Hz 重复频率的回波振荡器的脉冲输出功率为 1GW,能量转换效率为 30%。俄罗斯已经研制出用于防空的高功率微波武器样机,峰值功率为 1GW,杀伤距离为 1~10km,整个系统重约 3t,分装在三辆越野车上,并进行过外场试验。

目前,英、法、德、日、印等国也在进行微波武器和微波炸弹的研究,但水平低于美国和俄罗斯。1992 年英国国防部研制出了一种用飞机投放的微波炸弹和用导弹携带的微波弹头,它们在空中爆炸后,发射大量的微波脉冲,能烧毁一定区域内的计算机电路和电话线,并扰乱人们的大脑神经系统,使人暂时失去知觉。法国从 1988 年起将“用微波武器烧毁电子设备”的研究列为重点课题,10 年后达到了能辐射 10~100J 能量的水平。

印度在 1999 年 9 月宣称,它将研制高功率微波武器的实验系统。其巴巴原子研究中心研制的高能电子加速设备在同年 9 月进入最后组装阶段,1999 年底进行系统测试。它是印度研制的第一种定向能武器试验系统,其产生的微波在吉瓦级,能严重损坏敌方导弹、飞机上的电子设备和计算机系统。

高功率微波武器是高杀伤力的常规武器,它的使用可以大大提高军队的作战能力,各个军事大国都在争相发展。

参 考 文 献

- 1 张兴华. 高功率微波弹原理及其应用. 中国人民解放军电子工程学院学报, 2001 (6): 48~50,59
- 2 姬国良. 俄罗斯的电磁弹. 高功率微波武器文集[译文], 1998 (11): 224~227
- 3 林峥. 电子战武器的发展及高功率微波武器. 航天电子对抗, 2000 (1): 28~31
- 4 袁俊. 国外微波武器及其发展. 中国航天. 2001 (5): 1~5
- 5 Koslover, Robert A. 紧凑型、重量轻、易操作的高功率微波天线. 美国专利 US 2002/0011963A1 Jan.31,2002
- 6 Kenneth W. Brown etc. 紧凑型、高功率微波移相器. 美国专利 US 6,313,963B1

(上接第4页)

应根据不同的应用场合选择可行的网面成形方式,根据原理误差产生的电气损失的允许值来确定合理的调整点数。减小调整误差的途径之一是减小调整过程中各调整点之间的牵连性,使得调整某一点时只影响周围的少数几个点。

参 考 文 献

- 1 Michael J.Lynch. Performance of the TDRSS Space Deployable Antenna,1991
- 2 Koryo Miyra. Concept of Tension Activated Cable Lattice Antenna,1986

(上接第10页)

达克罗技术克服了电镀锌和热镀锌的缺点,可以适应用户的各种防护和装饰要求,适应出口产品的要求。

目前使用达克罗技术成本是要比电镀锌或热镀锌成本高一些,但是深入地进行一下经济分析还是合算的。以热浸镀锌为例,现市场加工价每吨1800元,用达克罗加工费大致高20%~30%,但是热浸镀锌件易氢脆,易变形,废品率高达10%左右,如果把加工成本和材料成本放在一起,远远超过达克罗高出的加工费了,对中小零件的加工费达克罗要比电镀锌高30%~50%,但是达克罗涂复件的寿命要高出原电镀件的三至五倍,甚至更多,不仅节省了大量的维修费,也节省了大笔的材料费。对于个别要求高的零件,电镀技术是无法满足的,只能用达克罗技术才能解决,这也就不存在加工费互比的问题。

总之,达克罗技术的产生,是当今世界金属表面处理的高新技术,被专家们誉为国际金属表面处理行业中具有划时代意义的革命性产品和绿色工程。它将切实为国内外各行各业服务。