

# 激光警戒接收机

金梅

(西南技术物理研究所)

**摘要:** 分析了军用激光系统的典型参数, 提出了理想的激光警戒接收机应满足的要求, 并对国外几种典型的激光警戒接收机作出了评价。

Laser warning receiver

Jin Mei

(Southwest Institute of Technical Physics)

**Abstract,** We analyzed the typical parameters of the military laser systems. We started with a list of requirements that the ideal laser warning receiver should meet, and evaluated the performance of the realistic laser warning receiver development by the west.

## 一、激光警戒接收机的作用

近20年来激光在军事上的应用日益广泛。激光测距使火炮的首发命中概率大大提高, 激光制导则极大地提高了武器的投掷精度和命中概率, 效费比很高。美国军队的战斗力已靠这些小能量激光系统提高了一个数量级。

怎样对付带激光测距的火控系统和激光制导武器系统呢? 这就需要及时发现对方的激光行动。激光警戒接收机是实施激光对抗的基本器材, 它的作用是及时准确地探测到敌方激光测距机、目标指示器或激光波束制导照明器等发射的激光辐射, 发出警报, 通知某种威胁性武器(如炮弹、炸弹或导弹)有可能马上到来, 以便我方及时采取应急措施, 或是规避, 或是施放烟幕气溶胶保护自己, 或是通知相配合的武器系统(如火炮或激光致盲武器等), 实施对抗。因此激光警戒接收机对在战场上有效地保存自己、消灭敌人有重要意义。

## 二、理想的激光警戒接收机

设计一台灵敏的接收机用于“合作的”激光发射机要简单得多, 可是在“非合作的”系统中, 接收机的设计变得相当复杂。因为在非合作的系统中, 激光器是属于别人(军事上敌

对一方)的,激光波长、入射角等参数都是未知的。

在弄清激光警戒接收机所应满足的性能要求之前,让我们先概要地分析一下可能的激光威胁特点。目前用于激光测距的激光器主要是 $1.06\mu\text{m}$ 的钕激光器,已研制成功首先将在坦克上装备的新一代激光测距机有用 $10.6\mu\text{m}$   $\text{CO}_2$ 激光器及 $1.54\mu\text{m}$ 喇曼频移钕激光器的测距机。激光脉冲重复频率对地炮、坦克测距机大都为每分钟10次左右,对高炮、机载测距机为 $1\sim 20\text{pps}$ 。用于激光寻的制导的目标指示器几乎全部是 $1.06\mu\text{m}$ 的Nd:YAG激光器,经脉冲编码输出,重复频率为 $10\sim 20\text{pps}$ 。激光测距和目标指示器的作用距离一般为 $10\text{km}$ 左右。用于激光波束制导反坦克防空导弹的激光照明器主要是 $0.9\mu\text{m}$ 的GaAs半导体激光器和 $10.6\mu\text{m}$ 的波导 $\text{CO}_2$ 激光器,它们或输出空间花样编码,或偏振编码的连续光束,或输出编码调制的脉冲光束,脉冲重复频率在 $1\sim 100\text{kHz}$ 之间。照明器的激光束通过变焦光学系统发送,保持激光光斑直径恒定为数米,作用距离通常为 $5\text{km}$ 左右。主要的军用激光器的典型参数见表1。

飞机、坦克或舰艇的乘员最终希望知道,探测到的激光束是什么类型的激光束:是激光测距的、指示目标的、还是波束制导的?只要分析出敌方激光的脉冲特性或波长就可作出这种判断。一旦探测到测距激光束,通常在 $4\sim 8\text{s}$ 后便会有炮弹临头。如果探测到激光制导波束,一般经 $20\text{s}$ 左右目标便会为激光制导武器(炸弹、炮弹或导弹)

表1 军用激光典型参数

	测距机	目标指示器	照明器
波长( $\mu\text{m}$ )	0.69、1.06 1.54、10.6	1.06	0.9、10.6
作用距离(km)	5~20	$\leq 10$	$\leq 5$
束散(mrad)	0.5~2	0.2~0.5	保持光斑直径为8米左右
脉冲特性	峰值功率(W)	$10^6\sim 10^3$	$10^6\sim 10^7$
	脉宽(ns)	10~20	$\geq 10^5$
	重复频率(Hz)	$10^{-1}\sim 20$	10~20
编码	-	脉冲编码	脉冲编码或空间花样编码,或偏振编码。

击中。因此激光警戒接收机的反应时间必须足够快,才能在上述极短的时间里采取相应的对抗措施。由于不知道敌方激光束会什么时候从什么方向射来,因此警戒接收机的视场要相当大,最好能凝视监视整个半球空域,如果不能,则需对警戒空域进行扫描。为了能准确地实施火力对抗,还需要警戒接收机对激光器精确定向。

综上所述,理想的激光警戒接收机应该满足以下要求:

- 接收视场大
- 光谱带宽足够宽,能包括敌方所有可能的激光波长
- 探测概率接近100%
- 定位精度高
- 反应时间近于0
- 虚警率近于0
- 输出指示:波长、入射方向、激光脉冲特性
- 体积小、重量轻、价格便宜

在实际战场环境中有人为的和自然的背景光干扰的情况下,要满足上述所有要求是相当困难的,有些要求又是互相矛盾的。追求视场大,往往得牺牲定位精度;探测概率要达100%,虚警可能会高得不能容忍;要探测的参数越多,花费的时间越多……。需要设计者花费气力针对使用目的来妥善处理这些矛盾,进行最佳折衷。

### 三、几种典型的激光警戒接收机

从目前掌握的材料来看,国外研究发展的各种激光警戒接收机,按工作原理大体可分为光谱识别型、相干识别型和散射探测型三类。

#### 1. 光谱识别型

军用激光波长必须有良好的大气透射特性,现所用的只有 $1.06\mu\text{m}$ 、 $10.6\mu\text{m}$ 等几个已知的波长。如果探测到其中某个波长的能量,那么很可能就是由激光器所产生的,这就是光谱识别型警戒接收机的原理。这类警戒接收机又有成象型和非成象型之分。

(1) 非成象型 这种警戒接收机通常用一个或若干个光电二极管作探测器。挪威Simrad公司和英国Lasergage公司研制生产的RL1型激光警戒接收机是其典型产品,见图1。这是一种供装甲车辆使用的激光警戒装置,现已装备部队,它由装在车顶的探测器

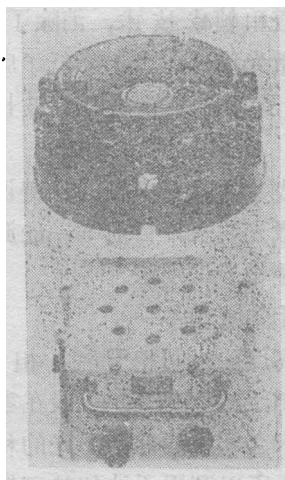


图1 RL1型激光警戒接收机

和装在车内的显示器两个部件组成。探测器含有5个pin硅光电二极管,水平方向4个,垂直方向1个。显示器由9个发光二极管表示激光源的大致方向,其中8个发光二极管排成一圈,分别代表水平方向上8个 $45^\circ$ 的扇形区,中央发光二极管指示接收到来自上方空中的激光辐射。每接收到一个激光脉冲时,显示器还同时发出持续2s的音响报警。其主要技术指标见表2。

表2 RL1激光警戒接收机的主要技术指标

探测器部件		指示器部件	
探测器个数	水平4个,垂直1个	方向分辨力	水平 $45^\circ$ 垂直 $45^\circ$
探测器视场	$360^\circ$	扇形区数目	水平8; 垂直1
探测器类型	pin光电二极管	显示亮度调节范围	$>100^*$
光谱带宽	$0.66\sim 1.1\mu\text{m}$	显示时间	音响2s; 光8s
虚警率	$<10^{-3}/\text{h}$	工作电压	20~32V(标称24V)

这种接收机的探测灵敏度,但(1)随着军用激光波长的增多,结构变得很复杂;(2)方向分辨很差,只能大体判定激光来袭方向;(3)虚警较高。这种接收机主要用于对定位精度要求不高的场合,对暂时无成象探测器可用的中远红外波段,这种二极管阵列还是实用的。

(2) 成象型 随着固体摄像器件的发展,目前已出现了利用广角远心鱼眼透镜和CCD摄像器件构成的凝视式警戒接收机。美国陆军光电武器对抗办公室和仙童公司共同研制的LAHAWWS激光寻的和警戒系统是其典型代表。LAHAWWS,在美国陆军支持下,从1973年开始研制,1979年研制成功并公开报导。它由探测和显示两个部件组成,光学系统配置如图2所示。探测部件用广角远心鱼眼透镜作物镜,采用双光通道消背景及CCD成象器件探测。在显示部件中采用了帧存贮和象背景减法技术,只有当pin光电二极管光路探测出有激光存在时才在显示器的荧光屏上显示敌方激光源位置(方位和俯仰)。光路中还采用了光学自动增

益控制以防强光饱和。

成象型接收机的主要特点是：(1) 采用广角远心鱼眼物镜可实现全空域凝视监视，不需扫描，不存在由扫描引起的漏探测；(2) 采用CCD成象器件，象元尺寸很小( $\mu\text{m}$ 量级)，分辨率高，为精确定位提供了先决条件；(3) 采用双光通道和帧减技术，消除了背景干扰，突出了激光信号，大大降低了虚警率；

(4) 因采用了窄带滤光片，多波长工作比较困难。

无论是成象还是非成象的光谱识别方法都不能探测激光波长，目前唯一能测定激光波长的方法是相干识别法。

## 2. 相干识别型

激光有高度的时间相干性，相干长度(表示时间相干的物理量)一般在零点几毫米到几十厘米之间，而非相干光的相干长度只有几微米。所以利用干涉仪就可探测识别激光，这就是相干识别型警戒接收机的基本原理。目前使用的干涉仪有两种：

(1) 法布里-珀罗型 用一块透明平行

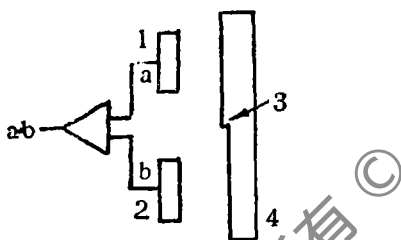


图3 法布里-珀罗标准具

1、2. 探测器 3. 分级 4. 标准具

平板(熔石英或锗)，两表面镀有半反半透膜，构成法布里-珀罗标准具，如图3。入射光一部分穿过平板，一部分被后表面反射回到前表面再次为前表面反射后穿过后表面，出射光将形成干涉，二相邻出射光线的光程差为：

$$\Delta = 2nd\cos\theta' \quad (1)$$

$$n\sin\theta' = \sin\theta \quad (2)$$

出射光强为

$$I = \frac{I_0}{2} (1 + \cos\varphi) \quad (3)$$

为二相邻出射光线的位相差，

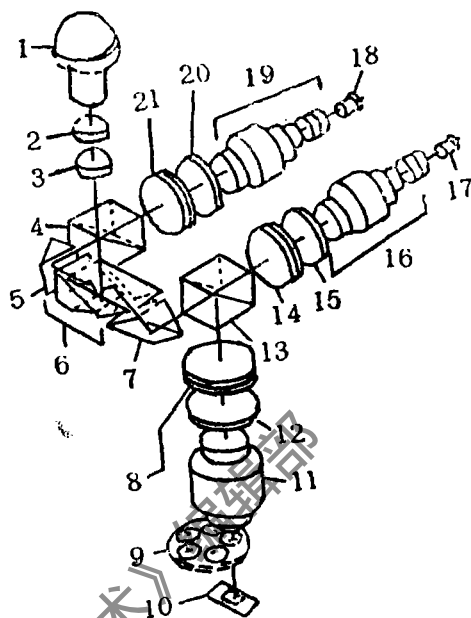


图2 LAHAW系统光学配置图

1. 广角物透镜 2. 阻挡滤光片 3. 场透镜  
4. 分光镜 5. 折叠棱镜 6. 介质分光镜装置  
7. 折叠棱镜 8. 准直透镜 9. 自动电平控制滤光片 10. CCD 11. CCD成象透镜  
12. 滤光片(激光) 13. 分光镜 14. 准直透镜  
15. 滤光片(激光) 16. pin二极管中继透镜  
17. pin二极管(激光) 18. pin二极管(背景)  
19. pin二极管中继透镜 20. 滤光片(背景)  
21. 准直透镜

$$\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} = -\frac{4\pi nd}{\lambda} \cos\theta' \quad (4)$$

当平板围绕垂直于光轴的轴线匀速转动时，由光电探测器探测到的光强信号（如图4）正比于 $T(\theta)$ ：

$$T(\theta) = \frac{1 + \cos\left(\frac{4\pi nd}{\lambda} \cos\theta'\right)}{2} \quad (5)$$

可见，光强信号是一个调频波，对称分布于 $\theta=0$ 的两侧，利用鉴频器很容易判断 $\theta$ 的正负号。将鉴频器的输出信号馈送到步进电机中，使标准具转动，直到扫过调频波的频率最低点，即可测出激光入射角 $\theta$ 的大小。不同波长的激光对应的调频信号的周期间隔不同，由此可测定激光波长。美国Perkin-Elmer公司为多传感器警戒接收机研制的激光警戒子系统就是根据这个原理设计的，为了消除背景光干扰，该公司采用了分级法布里-珀罗标准具，如图5所示。与图3不同的是标准具的前表面有一“台阶”，上半部比下半部高出 $\left(\frac{\lambda}{4n}\right)$ 的奇数

倍（通常取一倍 $\frac{\lambda}{4n}$ ，用真空镀膜来实现）。标准具后面对应有两个光电探测器，它们的偏压极性相反，两输出送到求和放大器代数相加，于是激光干涉形成的调频信号不受影响，而直流背景信号，不管标准具倾角如何，都被抵消。该子系统于1978年研制成功，1979年战术演示获得成功，达到的主要技术指标是：工作波长 $0.45\sim 1.1\mu\text{m}$ ，接收视场 $90^\circ$ ，探测概率95%，虚警率 $\leq 10^{-8}/\text{h}$ 。

法布里-珀罗相干识别法的主要优点是可测定激光波长和入射方向，虚警低。但它需通过机械扫描才能确定激光的有无及特性参数，因此无法截获单次激光短脉冲。这是它的主要缺点，通常可用于探测激光波束制导照明器的光束。

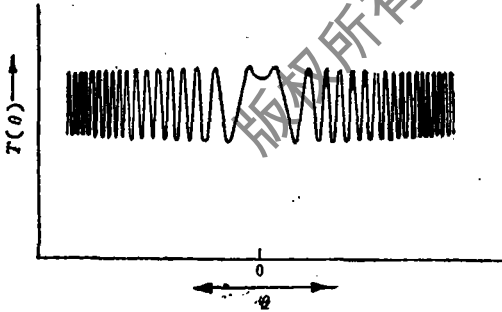


图4 光电探测器探测的光强信号

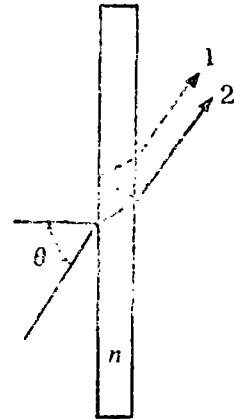


图5 分级法布里-珀罗标准具示意图

(2) 迈克尔逊型 美国电子战系统研究实验室1981年公开报导了LARA激光接收分析仪的原理试验，获得美国空军航空电子学司令部的投资支持，图6是这种警戒接收机的结构示意图。其基本部分是一个由分束棱镜和两块球面反射镜构成的干涉仪，在观察屏处放了一个二维阵列探测器探测干涉条纹。非相干光不产生干涉条纹，而激光产生一种“牛眼”状的

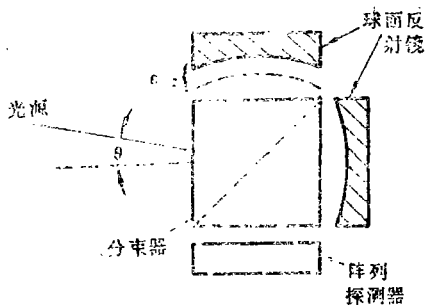


图6 LARA结构示意图

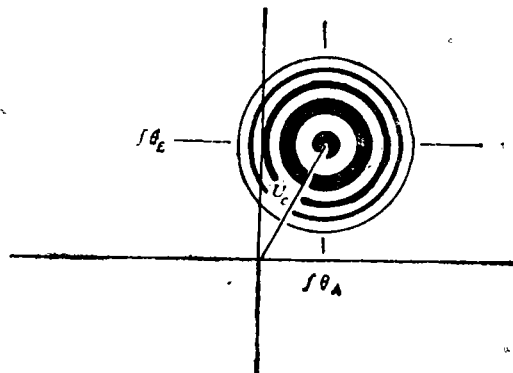


图7 LARA的干涉条纹图

同心干涉环，如图7所示。干涉环的中心位置为

$$\vec{U}_c = -f' \vec{\theta} \quad (6)$$

式中， $f'$ 为系统焦距， $\vec{\theta}$ 为入射方向。光强分布为

$$I = \frac{I_0}{2} (1 + \cos \phi) \quad (7)$$

相位函数 $\phi$ 为

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left( P_0 - \frac{2}{\epsilon} \left| \vec{u}' \right|^2 - \frac{2}{\epsilon} \left| \vec{u}' - \vec{u}_c' \right|^2 \right) \quad (8)$$

(8)式头两项与观察屏坐标 $\vec{u}'$ 无关，剩下的一项描述了观察屏上干涉图形的空间关系。只要阵列探测器检测到干涉环，就说明有激光照射。由干涉环的圆心位置可确定入射方向，由条纹间隔可确定激光波长。

迈克尔逊型相干识别法的主要优点是能测定激光波长和精确定向，不需机械扫描因而能截获单次激光短脉冲，是一种很有前途的激光警戒接收方法。

### 3. 散射探测型

以上几类警戒接收机必须拦截激光束，才能探测到激光辐射。探测大气气溶胶散射的激光能量，既不需要拦截激光束，也不依赖于目标表面特性，只与大气状况有关。通过分析可知，探测大气散射的激光能量是一种可行的警戒方法。

激光在大气中传输时要受大气的吸收和散射而衰减。吸收损失的能量被转换成热能，散射损失的能量则产生再辐射，其波长一般不改变（发生喇曼散射时例外）。在可见光到近红外区，在地面附近的低空范围内，散射效应超过吸收，可近似认为大气消光作用是由散射造成的。散射主要由气溶胶悬浮在大气中的微粒特别是水滴和灰尘和大气分子引起的。对一定波长的光，散射的强弱与分布同能见度有关。当天空特别晴朗时，散射元主要是大气分子，分子的尺寸大大小于光波长，发生瑞利散射，接近各向同性分布。当天气较差，主要散射元为气溶

胶，因气溶胶微粒尺寸接近或大于波长，发生米氏散射，小角度前向散射占优势。计算表明，散射信号很弱，一般比发射激光功率低好多个数量级，为了降低背景光的影响，必须减小视场和采用光谱滤光。英国Plessey雷达公司设计了一套散射探测光学系统（见图8），它能提供全空域警戒而又大大降低了所需视场，因出射光线角度较小，有助于采用窄带滤光片提高信号鉴别能力，减小虚警。图9说明了该公司叫作“激光与红外探照灯探测器”的这种散射探测警戒接收机的基本概念。接收机由散射探测器和显示器组成，散射探测器安装在车顶，视场向外向下展开，形成一个锥形罩将车辆完全“罩住”，在垂直平面上的视场为 $60^\circ$ ，水平方向上的视场为 $360^\circ$ 。来自任何方向射到车辆任何部位的激光都必然穿过这个“罩”，当穿过“罩”时，气溶胶散射的激光能量就能被探测器探测到。在散射探测器下方

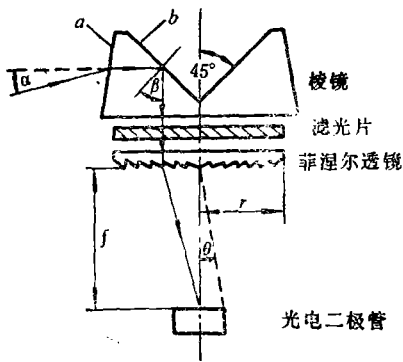


图8 Plessey公司散射探测警戒接收机的光学系统

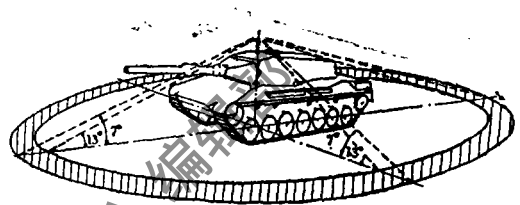


图9 Plessey公司散射探测警戒接收的概念

表3 五类激光警戒接收机的比较

类型	光谱识别		相干识别		散射探测
	非成像型	成像型	法布里-珀罗型	迈克尔逊型	
优点	<ul style="list-style-type: none"> <li>简单</li> <li>视场大</li> <li>灵敏度低</li> <li>成本低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>视场大，可凝视监视</li> <li>虚警低</li> <li>角分辨率较高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>使用单管探测器</li> <li>虚警低</li> <li>角分辨率高</li> <li>能测激光波长</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>虚警较低</li> <li>无需机械扫描</li> <li>能截获单次激光短脉冲</li> <li>角分辨率高</li> <li>能测激光波长</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>无需直接拦截激光束</li> <li>使用单管探测器</li> <li>可凝视监视</li> </ul>
缺点	<ul style="list-style-type: none"> <li>角分辨率低</li> <li>不能测激光波长</li> <li>虚警高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>不能测激光波长</li> <li>成本高</li> <li>要用窄带滤光片</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>需机械扫描</li> <li>不能截获单次激光短脉冲</li> <li>视场较小</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>视场较小</li> <li>成本较高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>光学系统难加工</li> <li>要用窄带滤光片</li> <li>不能分辨方向</li> </ul>

还有一个直接探测系统，二者封装成一体。直接探测系统由12个硅光电二极管排成圆形阵列，角分辨为 $15^\circ$ 。当直接探测器拦截了激光束，显示器上就显示出方位信息。该接收机已于1978年由部队进行了鉴定，在非常晴朗的天气下，作用距离超过20km，随后即转入生产型研制。

#### 四、结 语

上面介绍了国外正在研制发展的几种典型的激光警戒接收机，它们的优缺点比较见表3，光谱识别型简单价廉；相干识别型是目前唯一能探测激光波长的警戒装置；散射探测型探测大气散射的激光，无需直接拦截光束，其原理仍属光谱识别。不管哪一种警戒接收机都要受当前技术发展的限制。显然，没有性能优良的宽光谱探测器，就做不出从可见直到远红外的全波段激光警戒接收机。我们应针对不同使用目的选取不同的探测方法进行最佳设计。可以肯定，激光警戒接收机的性能将随着光学材料、光学加工、光电探测器、超高速集成电路技术及图象处理技术的发展而日趋完善。

#### 参 考 文 献 (略)

收稿日期：1989年1月25日。

· 简 讯 ·

### 签订了合同的光纤传感器

美国麻省牛顿市地球中心的传感器系统研究小组赢得了为海军和陆军发展光纤电场测量系统的一百万美元的合同。海军计划规定提供电磁脉冲实验中用的三轴电场测量系统，陆军合同规定提供作脉冲功率研究与发展应用的光纤电压测量系统。在SBIR计划的第二阶段，给这两项计划提供了经费。

该电场传感器有测定电场强度和方向的功能，体积小于 $8\text{in}^3$ ，并且它的多轴测量能力极好，海军计划用它测试舰船的电磁脉冲强度，为了这项应用，这种传感器具有更宽的测量带宽的性能。而且比目前出售的电子传感器有更大的动态范围。该传感器对电磁干扰的有害影响不敏感，而且能与光纤数据传输直接互换。地球中心独具的传感器设计提供了抗光源变化、光纤微弯曲损耗以及辐射使纤维变黑影响的能力。

陆军的传感器是一种光学高压探测器，用高压连接器将它直接与所测电压连接。计划将该传感器用于脉冲功率的研究和系统开发应用。它的测量范围为 $-40\text{kV}\sim 40\text{kV}$ ，测量带宽从直流至 $2\text{GHz}$ ，电压测量分辨率超过 $10\text{V}$ 。对脉冲电源应用最重要的是此种光学传感器作工作人员和仪器与同兆瓦级的部件相联的电压隔离。

译自L.F.W., 1989, Jan., P.174.

杨友濂 译 刘建卿 校