

电子管专业会议
资 料 汇 编

电子管专业会议学术报告

资 料 选 编

(内 部)

第四机械工业部技术情报研究所

一九七三年九月

編 者 說 明

本資料选編了在电子管专业會議上的几个学术报告，其中包括胡汉泉同志所作的“电子管发展的一些动态”；吳祖愷同志所作的“电子束器件发展概况”；吳鴻适同志所作的“超高频电子管的过去、現在和将来”；張恩虬同志所作的“阴极电子学的簡况”；刘联宝同志所作的“超高频电子管用的某些新材料、新工艺情况介紹”等五篇文章。这些报告介紹了国内外电子管发展的动态，提高电子管寿命和可靠性的途径，电子管的新材料新工艺。根据伟大領袖毛主席关于“人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进”和“互通情报”的教导，現把上述几位同志所作的报告整理成这份选編，供有关方面参考。

电子管专业會議业务組

一九七三年九月

目 录

一、电子管发展的一些动态.....	(1)
二、电子束器件的进展.....	(14)
三、微波电子管的过去、现在和未来.....	(25)
四、阴极电子学简况.....	(31)
五、超高频电子管用的某些新材料、新工艺情况介绍.....	(38)

电子管发展的一些动态*

1. 引言

电子管技术近十年来有许多发展,在电子设备中起着重要的作用,新型电子管的出现和电子管性能提高给电子设备提供了新的可能性。概括的讲电子管技术的发展有以下的一些方面。

新工作原理的器件:电子束半导体放大器件、等离子体显示和贮存板器件、触发的真空间隙器件、通道式光电倍增管(channel Multiplier)。

对电子管的设计,通过电子计算机的应用提高到了新的水平,对于工作原理有了加深的理解,电子管中的物理现象有些是属于非线性和大讯号性质。以前为了数学和计算上能便于处理,采用小讯号和线性假定的设计关系式来计算,结果与实际情况有较大的距离。应用了电子计算机后就可以进行大讯号分析。作为一个例子来说明,五十年代的大功率速调管其效率一般为30%左右,而近年来应用电子计算机进行设计后,可将效率提高到50%甚至60%左右。

电子管性能改进可以更加方便于使用 and 使电子设备提高性能,近年来的主要进展如:

微波管采用了钐钴或混合稀土钴磁钢以减轻重量。前向波放大器采用冷阴极后可以不需要大的阴极调制器而只需用控制极上的小调制器。功率速调管采用了非截获栅电子枪可以用栅极上的小调制器进行脉冲调制。一只双工模式行波管使一部电子干扰机可工作于杂波干扰或回答式干扰的两种型式。热导管散热简化了冷却问题。微波管的转换效率通过采用降压收集极,速度再同步等技术而得到提高,这样就可以减轻电源要求和冷却的负担。在降低成本方面,金属陶瓷三四极管已可作到廉价、可靠、长寿命,它被用于用管多达一万五千余只经常值勤的FPS-85相控阵雷达。微波加热用的600瓦磁控管已达到成本低于100美元,从而使微波加热的应用得到广泛的发展。

光电器件也有很多发展,二次电子电导的摄像管可工作于低照度。例如WL-30691管可工作于 10^{-5} 至 10^{-2} 流明/呎²,也就是照度可弱于月光(月光的照度为0.02流明/呎²)。WL-30691用于观察天文,可以观察到很弱的星光,其亮度为* 18.5m和19.0m。象增强器可用于高速照象,曾有报导用EMI9694S象增强管拍摄了氮气中放电脉冲的照片,其脉冲持续时间为80毫微秒。近年来也报导了热线电视和X光射线电视,热线电视可以显示温度分布的图象,X射线电视用于医疗诊断可减少射线剂量并可进行快速摄影。砷化镓的光电阴极其灵敏度可达500微安/流明和1000微安/流明,并且其灵敏度可伸展至约0.9微米长的波长。通道式倍增管以长管(约50倍于直径)内径的半绝缘涂层作为分布式的倍增极并用作极间的分压电阻。

以上仅举一些动态,以说明电子管有很多发展,关于各类型电子管的发展动态,一九七三年电子管专业会议编辑组编写的资料已有详细介绍,在有限的篇幅内不可能谈很多管型的发展,因此以下仅就一些主要问题作一些介绍,以供参考。

* 京字123部队胡汉泉

** 星光亮度解释见第13页

2. 电子管与半导体的关系

自从半导体放大器件于1948年问世以来,其发展很迅速,现已与电子管交叉使用于电子设备中。半导体器件由于其结构所确定的耗散能力小,在大功率电子设备中仍然采用电子管。但是在小功率应用中电子管与半导体就存在着一个比较复杂的关系。

人所周知,日本是一个半导体技术比较发达的国家,让我们从1960年~1969年日本电子管产量数字中分析一下问题。

表1 1960~1969日本电子管产量(单位:万只)

	收 讯 管	速 调 管	磁 控 管
1960	14586.38	0.71	0.40
1961	15746.76	0.80	0.35
1962	18928.60	0.92	0.45
1963	17772.84	0.96	0.63
1964	19205.96	1.20	0.76
1965	17743.19	0.89	1.19
1966	19186.77	1.16	2.06
1967	21858.07	1.50	3.49
1968	22640.16	1.30	8.59
1969	25482.1	1.54	40.59

从上表中我们可以看到收讯管是受半导体器件影响较大的一个管型,但其产量还从1960年的14586.38万只上升到1969年的25482.1万只。在速调管的数字中,大功率速调管为数不多,绝大部份是中小功率速调管,这又是一个受微波半导体振荡源影响较大的一个管型,可是其产量也从1960年的0.71万只上升到1969年的1.54万只。

怎样解释这些数字产生的原因,以下仅就我个人的见解来试图说明。这里所进行的分析就是用一分为二的观点来对待电子管和半导体,也就是说这两类器件从其工作原理上和其结构上就奠定了其各自的优缺点。另一个分析的观点就是具体问题具体分析,电子设备有多种用途及对器件的多样要求,在某些用途上正好半导体有优点,电子管是缺点,那么很自然会采半导体。可是在另一些用途上恰好是电子管的优点而是半导体的缺点,那么很自然的就应该采用电子管。当我们进一步分析时,我们将会看到在某些用途上收讯管仍有其优点,小功率速调管仍有其优点,这样就可以理解日本电子管产量数字的原因。

首先让我们先说一下半导体的优点,半导体是在固态物质中藉助于电子和空穴所组成的载流子来产生放大,其工作区域小,要求电压低。这样在工作原理上就奠定了半导体的体积

小、电压低、不需要灯丝电源的优点。相对于半导体来看电子管，电子管籍助于真空中的电子空间电荷来产生放大，这就确定其体积大、电压高和需要灯丝电源。针对用途来说，助听器 and 便携式收音机要求体积小、电源简单，半导体的优点是明显的。所以1948年以前用于这类电子设备上的1.5伏直流灯丝省电小型管，以后随着半导体的发展而被取代。

但是一分为二来看待半导体，半导体也有其缺点，这些缺点也是由其工作原理和结构所确定的。由于半导体的载流子浓度随着温度而变化，这就造成半导体的特性随温度变化而漂移。半导体整流器件在耐反向电压时，少数的载流子构成反向饱和电流，当反向电压达到一定数值时，载流子的速度达到能产生新的载流子时即产生雪崩性击穿。电子管由于其工作基于高温阴极所产生的空间电子流其特性与室温变化不产生可察觉的影响，而当用作整流器器件时由于真空中的间隙是良好的绝缘体，因此可以具有很高的额定反峯压。

由于半导体中的载流子浓度随温度而变化，其特性敏感于温度的变化而影响到线路的性能，此情况可用图1的曲线来表示。

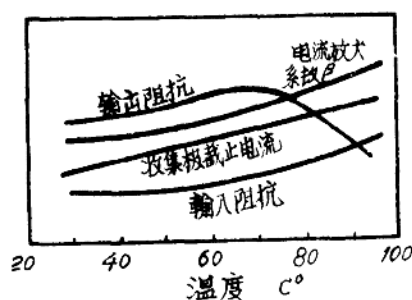


图1. 半导体特性随温度的变化

半导体器件的耗散额定值随着环境温度的升高必须线性的降低，例如2N104型锗音频功率管的耗散额定为：环境温度25°C，最大150毫瓦，50°C时降到80毫瓦，70°C时降到30毫瓦。

从上述的特性来看，用于电子测量仪器时，电子管回路具有读数不随温度漂移的优点。由于电子管的功率耗散能力受室温变化影响极小，所以很容易制出廉价的板耗10瓦的音频功率输出管，如6V6型管其单管输出可达4.5瓦，两只推挽放大可输出10瓦。因此电子管也利于制造音量大，音质好的扩音机和高逼真度收音机。

对于高电压小电流的应用，电子管的整流管也有其优越性，作为一个例子我们可以RCA HSKT1电视接收机^[5]来说明。HSKT1电视接收机是采用半导体回路的接收机，但是除了显象管12BNP4以外还采用了高压整流电子管2BJ2。我们只要具体问题具体分析就可以理解为何要采用电子管作显象管的高压整流管。

2BJ2的数据没有找到，但可以用同样用途的1X2B管的数据来作参放。1X2B半波整流管，反峯压22000伏，峯值板流最大45毫安，平均最大板流0.5毫安，外形是九脚小型管 $\phi 7/8$ 吋，高2 $\frac{13}{16}$ 吋。

固态整流器件在RCA半导体手册中找到的最高电压最小电流的型号是硅整流管CR212^[6]其数据为：

最大反峯压12000伏，在60°C时最大平均正向电流300毫安，峯值重复电流最大3安培。CR212的外形尺寸示于图2

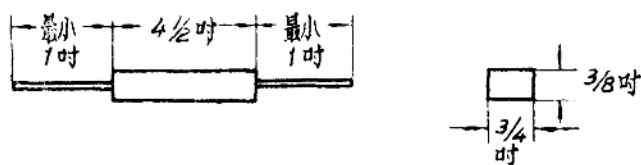


图2. CR212外形尺寸

从上述的比较来看,1X2B的外形尺寸较小而且成本也可能较低,所以在半导体回路电视机用2BJ2电子管是经过分析比较而有依据的。

一九七二年三月号的微波杂志上^[7]报导了瓦里安公司关于速调管振荡器的情况,在这篇报导中也讲到了小功率速调管与半导体的关系。报导的内容是:速调管曾经使用于各种环境和使用条件。它们在温度变化时的功率稳定性,最高工作温度,辐射环境等方面优于固态振荡器,并且它们能耐受环境,负载和工作电压的大变化。工作性能的高度预计性使它们适用于营业用和军用的环境。此外低运行成本和易于取得器件也是不容易忽视的。虽然固态器件在将来有潜在的可能满足这些要求,但是研制工作需要费用和时间。固态器件的发展是快的,但是不象一九六〇年、一九六五年、一九七〇年预计的那样快,在此期间久经考验的速调管还要多年使用。

瓦里安公司的这篇报导就从工作的稳定性和可靠性方面说明了为什么小功率速调管还在使用,也可以部份地说明日本的速调管产量数字还在上升。

表1中磁控管产量上升之快是与微波加热应用的开展有关的,这个估计在微波杂志关于微波管的民用市场^[8]一文中指出,在一九七〇年度家庭用的微波炉曾销售了345000台,微波炉的技术性能是:频率 2450 ± 10 兆赫,输出功率600瓦,负载驻波比忍受4:1,寿命十年,100000次。

在目前世界上所销售的微波炉半数以上是日本制造的,微波炉的另售价格是350美元,由日本向美国出口的批发价为180美元,其中电子部份的成本是60美元,其中磁控管所占成本为35美元。

微波加热有很多工农业方面的应用,作为一个例子在这里介绍一下加拿大用微波加热处理小麦^[9]的报导。加拿大处理小麦将小麦通过波导管内加热以烘干去除水气和消灭虫卵。其加热装置见图3,加热处理小麦的能力可从以下的计算来估计。

小麦的比热 C_{wh} 经过三次测定为
 $0.513 \text{ 卡/}^\circ\text{C}$ 或 $2.14 \text{ 焦耳/克} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

环境温度为 22°C , 一个满意的处理需加热至 65°C 或 $\Delta T = 43^\circ\text{C}$ 。

所使用的磁控管为 philips DX260 型,其输出功率为1.27千瓦。

加热速率的计算关系为

$$MC_{wh} = \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

其中: M 为每分钟处理小麦的数量;

ΔE 为磁控管每分钟所输出的

能量;

于是

$$\Delta E = 1.27 \text{ 千瓦} \times 60 \text{ 秒}$$

= 每分钟76200焦耳

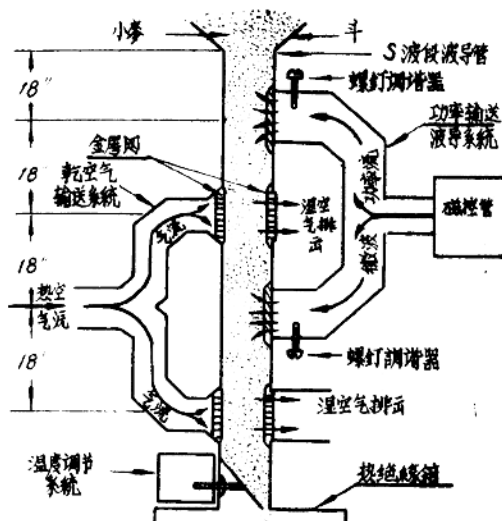


图3. 小麦干燥及消灭虫卵的实际应用系统

$$M \frac{\Delta E}{\Delta t} \cdot \frac{1}{C_{nh}} = \frac{76200}{43 \times 2.14} = 0.8 \text{ 公斤/分}$$

或1.82磅/分

实际实验结果,磁控管的输入能量用瓦特计测量,效率按制造者的数据取60%,磁控管能将18.6磅小麦在9分钟内升温43℃,计算的加热率为2.26磅/分,实验值与理论的差异是因为小麦的比热随含水量之不同变化于0.3至0.5之间。

加拿大的电费为每度电0.9分,一蒲式耳(bushel)为60磅,其处理费用为0.44分。这个成本显著低于原来所用烘焙去湿气和消毒气体杀虫卵的费用。

3. 长寿命是综合性的研究工作

电子管的长寿命问题是项具有巨大实际意义的研究工作。在某些应用中如卫星通讯的星上用管和海底电缆中的增音管,因为不能更换必须要求长寿命。在多管体制的装备如相控阵雷达中电子管必须有足够长的寿命才能保证整机的故障率不致过高。即便是在一般的电子设备中长寿管也能更好的保障值勤时的可靠性和减少备份管的配备。

长寿命的研究是一项牵涉面很广而又需要进行深入细致地研究工作。这里仅就所看过的有关文献和在实际工作中所遇到的问题,提出一些看法供参考。长寿命研究所涉及的问题有下述方面:设计、阴极、制造工艺、材料、真空技术、磁钢、冷却问题、正确使用、寿命试验、分析技术、存放期处理等。现在分别加以说明。

(1) 设计上的考虑:

一个重要的考虑就是阴极负荷 J_k (安培/厘米²),在设计上所选用的数值,采用的阴极型式必须胜任供给足够的电子放射。在普通的磁控管中随着工作波长的缩短 J_k 增加很快,在短波长要实现上述的 J_k 选取原则有时发生困难,这时就要改用同轴或反同轴磁控管的结构以实现 J_k 值的选取原则。直流阳极电压工作的前向波放大器比阴极调制的器件容易打火击穿,这是因为持续的直流电压比短暂的脉冲电压打火几率高得多,而且打火以后因为直流电源的储能大得多,对管子所造成的损伤也大得多。因此在设计时必须注意选用低电压的工作点。例如C波段窄脉冲阴极调制的1兆瓦磁控管,工作点可设计在33千伏。但是对于直流阳极电压工作的SFD-237管在C波段峰值1兆瓦时所选用的工作点仅为27千伏^[10]。在短波长大平均功率的微波管中,有时热负荷的设计成为设计上的主要矛盾,这时在慢波结构的选型上就不能偏重于电参数的考虑,而是要对所用结构的散热能力给予足够的考虑。

(2) 阴极:需要有较好的 J_k 能力,阴极工作于正交叉场器件中还要求能够耐轰击耐打火,阴极需要有较好的抗中毒能力和寿命期间的储备,所以需要采用储存式阴极,阴极分解时所释放出的气体和沉积物在管内分解时能对阴极产生不利的影响,所以管外子分解也是有利于寿命的一种措施。

(3) 制管工艺:制管工艺确定了管子封口以后阴极工作在什么样的环境气氛中,制管工艺应保证良好的去气以实现封口后高真空度和减少对阴极有害的气体和有害的尘粒。对于冷阴极前向波放大器来讲,真空中的击穿打火是对寿命的一个威胁,为此要抛光电极,尽可能的减少装进管子的尘粒。因为尘粒在很大程度上增加了打火几率。由冷阴极管在排气台上需要输入高频讯号来启动冷阴极给出电流进行阳极电子轰击去气,这就需要管子带上适当的钛泵,以便在管子封离后上调制器进行动态去气。

(4) 材料的真空性能及其与处理工艺的关系:

材料不密实造成慢性漏气或放气量很大,均不适用于长寿命管。材料经过处理以后管内的残余气体的分析,据资料报导与清洗工艺的不同而残余气体的成份也不同,究竟怎样对阴极和真空度最有利,是值得细致研究的。

另件予先真空去气,近年来国外报导了制管予先真空去气的排气工艺来实现更好的真空质量。另件予先在真空炉内去气可以实现较高的去气温度,同时真空泵与真空炉壁的通道粗而短可以实现大抽速对另件彻底去气。与此相比到了排气台上进行烘烤轰击去气,大量的气体往往积压在管内,因为排气管的通导能力有限。试举一例加以说明:

对于内径为 D_{cm} ,长为 L_{cm} 的排气管在293°K时其通导能力为

$$Cn_2 = 12.3 D^3 / L \text{ 升/秒}^{(11)}$$

当 $D=1$ 厘米、 $L=15$ 厘米时

$$Cn_2 = 12.3 / 15 = 0.82 \text{ 升/秒}$$

(5) 真空技术:

检漏:常用的检漏仪灵敏度为 10^{-10} Std c.c./秒,国际上的先进水平为 10^{-13} Std c.c./秒。 10^{-10} 检漏仪查不出来的漏孔有可能在存放约一天后真空度变坏,而 10^{-13} 检漏仪查不出来的漏孔就小三个数量级,而观察对真空度变坏的时间也长三个数量级,成为二或三年的时间。

快速质谱分析:对于阴极分解和阳极轰击去气时所释放气体的观察就需要快速反应的质谱仪。

封口后管内真空度的维护对于大型管可附钛泵于管上,对于小型电子管就需要采用非溅散型消气剂, CeTh—TiNi 和 ZrAl 消气剂等。

无油系统及油系统减少回油:油气对氧化物阴极有不利的影响,油膜沾污电极表面对于电极间的耐压值也不利。

残余气体分析:通过对封口管子在存放和使用条件下的残余气体分析可对管内的物理化学现象进行研究。

(6) 磁钢:铁器对磁钢的最小距离应经过测定,规定在磁通计测不出数值的距离之外,否则在使用中就会退磁而影响器件性能。包装箱也根据这个距离设计以便在存库期间不会相互退磁,在卡车火车上运输时也不会受车辆铁板的影响而退磁。

(7) 冷却水问题:前向波放大器冷却水通过水通道截面积很小,这就要求水中无悬浮物而且不结水垢,雷声公司曾设计了用闭合循环的冷却水设备以保证功率管的正常工作。

(8) 管子的正确使用:这也是实现长寿命的一个重要方面,国外的微波管厂商在经过试验找出正确使用条件后明确规定于管子的说明资料中,在这里我们举EEV公司4J50A磁控管的说明资料^[12]中的规定作为例子。

$$4J50A \text{ 磁控管} \quad \hat{P}_0 = 225 \text{ 千瓦}$$

$$V_h = 13.75 \text{ 伏} \quad I_h = 3.25 \text{ 安}$$

磁钢与任何磁性材料间最小距离2吋(50毫米),在施加阳极功率时灯丝电压退电压的规范:

对于输入功率在595瓦以下时:

$$V_h = 14 - 0.0125 P_i$$

对于输入功率在595瓦以上时,

$$V_h = 24 - 0.0293 P_i$$

对于脉冲宽度大于1.2微秒时,峰值阳极电流也应相应降低。

$$I_{apk} = 29.6 - 1.934\tau p$$

I_{apk} 峰值阳极电流 (安培)

τp 脉宽 (微秒)

脉冲前沿上升速度应跟随脉宽调整。

脉宽 (微秒) 电压上升率 (千伏/微秒)

最小 最大

0.5 120 160

1.75 95 140

5.0 70 110

灯丝的两端用4000微微法电容器并联以保护热丝免遭打火损伤。

波导中加压力45磅/时²以防止波导击穿, 冷却风量的风流量80呎³/分, 压力约760毫米, 吹风冷却翼片以保持阳极温升不大于50℃。

从以上的例子可以看出, 正确使用条件的规定需要采取措施, 设置专人配备仪器进行试验以后才能写出正确使用的详细规定。

(9) 分析技术:

研究提高寿命的措施常需要从解剖寿命终了管子的观察中寻找线索, 使用过的管子常在其电极表面产生沉积物而需要分析这些沉积物。但由于沉积数量较少就需要采用微区分析的技术如激光光谱分析, 可分析一个微克的量和几十微米的区域, 电子束探针可分析一个微克的量和几个微米的区域。

(10) 寿命的预计和试验

对于长寿命研究的一个重要问题是寿命怎样观察, 长寿命卫星行波管的寿命是估计的, 其估计的基础是以产生自由钨的速率低于由蒸发、气体中毒和离子轰击所造成的钨损失率为估计寿命的依据^[13]。对于寿命不是很长的器件1000~2000小时, 有时也需要实地作一下试验, 但是做这样一次试验, 常用的软管和硬管调制器在经济上耗费较大, 但是采用固态的磁调制器可以减少消耗, 因为组成磁调制器的磁铁芯元件和可控硅元件运行1000~2000小时不会有显著的损耗。做这样一次试验时, 管子上附上质谱泡以取得在运用情况下管内总压强和分压强的变化也是很有价值的数。

(1) 存放期处理: 第二届国际微波管会议录刊登了一篇英国人对仓库储存磁控管所作的工作^[14]。此工作所研究的管型4J50磁控管为3厘米, 250千瓦, 脉宽5.5微秒, 其稳定性的检验规范是在15分钟试验期的最后5分钟内打火率不得超过输入脉冲的0.5%。打火的定义是通过磁控管的电流超过正常脉冲电流值100%以上。在研究工作开始之初现场的报告指出存放几个月之后就不能通过稳定性试验而需要再进行老练。经过研究为了延长存放到需要再老练的时间, 最好的方法是在制造期间减少所需要的老练。在试验中最有用的一个发现就是激活后的阴极可以暴露于大气中20分钟而其性能不受影响。这样就有可能将阴极在玻璃泡中去气和分解碳酸盐, 然后再装入管中。在这样的处理中阴极必须制备得使其表面具有金属性质和反光。阴极的镍基底做成软涂层性质, 最先尺寸用模具成形得大一些, 在浸入碳酸盐以后再用铁模压小, 压小的幅度是阴极直径缩小60%和涂层厚度减小约30%。这样处理后的阴极就不再起消气的作用而管内需要另外采用消气剂来维持真空度。对存放的一批管子进行稳定性的测定, 发现存放一个月后每管每分钟打火两次, 存放四个月为每分钟六次, 存放十二月后为每分钟20次。对存放的管子进行点灯丝16小时的试验, 结果发现存放12个月的管子虽然比

刚制造的稍差但也能通过检收规范。在试验中发现刚加高压时打火率比正常情况高2至3倍，但在5至7分钟后逐渐消失。又取3~5个管子进行下述循环的试验：

储存四个月——稳定性试验——点灯丝16小时——稳定性试验——储存四个月——稳定性试验——点灯丝16小时——稳定性试验。

循环试验的结果表明，在第一个储存期后的试验把管子恢复到象新管的情况而没有累积的质量下降现象。

对英国人存放试验的报导现在提一些个人的粗浅见解：

管子在制造期间减少老练的要求意味着管内留有对阴极有害物质少，这样存放到再需老练的时间可以延长，管子外分解把阴极有害的气体 and 物质留在管外，对阴极工作的环境是有利的。阴极制造得表面具有金属性质反光，阴极不作消气剂，这样可使阴极更耐轰击耐打火和少暴露于外界气体作用。管子在工作情况下阴极方面有两个物理过程，一是活性物质的损失，另一是因为阴极有高温，所以活性物质从深部储存扩散到表面来补充。在存放期间，没有扩散补充而只有残余气体工作于阴极表面造成活性物质的损失，所测定的打火率表现出递增现象。点灯丝16小时是使深部储存的活性物质得以扩散到表面来补充，所以可以改善存放管的性能。

总之，存放期间的物理化学问题是复杂的，本着洋为中用的精神，把这篇报导介绍给大家参考，还需今后从事这方面研究的人员结合自己的试验实践来验证与加深理解。

可靠性

电子设备复杂程度的增长和使用环境的更加苛刻，对设备和元件的可靠性提出了更高的要求。近代防御系统的电子设备是由多部整机和许多元件所组成的，面阵式的相控阵雷达如如FPS-85用电子管多达一万五千余只。由于系统或整机的故障率是所用元件故障率的总和，为了使系统或整机的故障率不致过高，就要求元件达到高可靠的程度，也就是故障间的平均时间简称MTBF (Mean Time Between Failure)，要达到万级小时数。

为了开展提高可靠性的工作，首先需要了解有关可靠性的基本概念。下面将介绍一些从一本关于可靠性基本原理和实践[16]一书中所摘录出来的基本概念。

可靠性的含义，按照美国无线电电子学及电视制造者协会所订的定义“可靠性是一个器件在所遇到的工作条件下在执行任务的时间期限内适当的完成其用途的概率”，在这里要指出可靠性的定义着重指出了四个要素即概率、适当的性能、时间期限和工作环境条件。

故障率以符号R来表示，故障率是表示为单位时间内的故障。例如每小时的故障，每100小时的故障或每1000小时的故障。故障率的计算是作为在规定试验期限内故障数f与剩余元件的总和和试验时间的比值，此关系式可表达为下式：

$$r = \frac{f}{T} \quad (1)$$

在此r=故障率，每小时的故障数

f=试验期限中的总故障数

T=总和和试验小时数

(1)式也可以写成 $r = \frac{f}{S \cdot t}$ 因为剩余元件数S与试验期限t的乘积即等于总和和试验小时数T，另一种方法就是用平均剩留元件数 $\bar{S}$ 与t的乘积来计算，这将导致(1)式的一个新的形式

$$r = \frac{f}{\bar{S}t} \quad (2)$$

怎样计算 $\bar{S}$ 现举例说明, 假设在一小时试验期限的开始时间有600个剩余元件, 并且在试验期限内发生了50个故障。这就意味着在试验期限终了时只有550个剩留元件, 平均剩留数 $\bar{S}$ 是:

$$\bar{S} = \frac{600 + 550}{2} = 575$$

从此一小时计算的故障率是:

$$r = \frac{f}{\bar{S}t} = \frac{50}{575(1)} = 0.087 \quad \text{故障每小时}$$

(简写 fph)

对于一个成熟的设计来说, 故障率在工作或服务寿命期限中是大致恒定的, 因此故障率是经常定义为恒定故障率。

图四表示了典型的故障率曲线, 由曲线可以看出在工作或服务期限内故障率比较恒定, 但是进入磨损期以后故障率增加得很快。

故障率的指数定律

指数故障定律是用于预计作为时间的函数元件剩留的概率。前面所讨论的故障率 r 是每单位时间的故障率。所以 rT 将是在时间 T 内可能发生的故障数。如果将 rT 代入泊松分布, 就将在时间 T 内发生 0, 1, 2, 3 个故障的概率, 如果用符号 $d = rT$, 泊松分布可以写成

$$1 = \frac{e^{-d}}{0!} + \frac{d e^{-d}}{1!} + \frac{d^2 e^{-d}}{2!} + \frac{d^3 e^{-d}}{3!} + \dots + \frac{d^f e^{-d}}{f!} \quad (3)$$

在上式中

e^{-d} = 在 T 时间内发生 0 次故障的概率

$d e^{-d}$ = 在 T 时间内发生 1 次故障的概率

$\frac{d^2 e^{-d}}{2!}$ = 在 T 时间内发生 2 次故障的概率

$\frac{d^3 e^{-d}}{3!}$ = 在 T 时间内发生 3 次故障的概率

发生 0 次故障的概率表示着剩留的条件。所以上述级数的第一项一般称为指数故障定律, 它也被称为剩留或生存的概率 P_s 。

P_s 可以写成

$$P_s = e^{-rT} \text{ 或 } P_s = e^{-d}$$

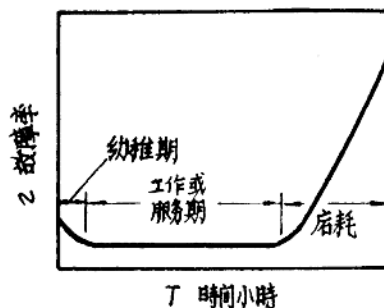
在此式中

P_s = 剩留或生存的概率 (等效于可靠性)

T = 时间总数的小时

e = 自然对数的基数

r = 故障率或每小时故障数



图四 故障率曲线

d = 在时间 T 内的预计故障

故障间的平均时间 m

在工作期中当故障为恒定时, 故障间的平均时间 MTBF 为恒定故障的倒数

$$m = \frac{1}{r} = \frac{\sum t}{f} = \frac{T}{f} \quad (5)$$

将 $r = \frac{1}{m}$ 代入 (4) 式, 我们得到

$$P_s = e^{-rT} = e^{-T/m} \quad (6)$$

串联可靠性——乘积规则:

如果一个系统中的一些元件是连接成这样的形式, 当任何一个元件的故障都能造成整个系统的故障时, 这些元件就被认为在功能上起着串联作用。在保留或生存含义上, 每个元件必须生存, 系统才能生存。对于可靠性来讲, 设备可靠性等于元件可靠性的乘积, 这称为乘积规则, 以数学方式来表达则可见下式

$$P_s = (P_1) (P_2) (P_3) \dots (P_n) \quad (7)$$

综合故障率, 设备的综合故障率可以从 (6), (7) 两式的关系来说明

$$\begin{aligned} P &= P_1 P_2 P_3 \dots P_n \\ &= e^{-r_1 T} e^{-r_2 T} e^{-r_3 T} \dots e^{-r_n T} \\ &= e^{-(r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n) T} \end{aligned} \quad (8)$$

按此类推如果设备上有很多元件, 各种元件的数目是 $n_1, n_2, n_3, \dots$ 其各自的故障率为 $r_1, r_2, r_3, \dots$ 则对于设备所造成的故障率即为

$$P = e^{-(n_1 r_1 + n_2 r_2 + n_3 r_3 + \dots) T} \quad (9)$$

关系式 (9) 对于设备的设计工程师是很有用的, 我们从以后的举例中可以看到。

并联可靠性:

并联可靠性经常被称为重复性 (redundancy), 称为重复性的原因是因为元件的功能是并联的, 也就是说如果一个元件发生故障, 重复并联的元件将继续执行任务。重复性在必需时是值得的, 因为所增加的成本可以换取增加的可靠性。

可靠性是一个概率用 P 来表示, 不可靠性也是一个概率可以用 u 来表示, 这两者遵守相辅 (Complementary) 规则, 也就是说

$$P + u = 1 \quad (10)$$

$$\text{或 } P = 1 - u, u = 1 - P \quad (11)$$

现在我们用不可靠性 u 的概念来分析采用重复性的系统。在这样一个系统中只有全部并联元件发生故障后系统才发生故障。所以也可应用乘积规则来计算系统的不可靠性。如果我们有 n 个部件起并联作用, 其每个部件的不可靠性为 u_1 , 则系统的不可性 u 将是

$$u = (u_1) (u_2) (u_3) \dots \text{等}$$

$$\text{发生故障的概率 } u = u_1^n \quad (12)$$

由 (11) 式我们知道 $P = 1 - u$

$$P = 1 - u_1^n$$

或相反地说

$$u = 1 - P_1^n \quad (13)$$

(13) 式表达了并联可靠性的基本关系。

除了采用重复性外还有下述的措施来提高设备的可靠性。

可维护性 (Maintainability) 也被采用以提供高的有效可靠性。如果另部件是可以方便的互换, 故障可以通过迅速用备份件更换损坏件来加以排除。当这些更换是可以很方便的进行的话, 我们获得了高的维护率或相应高的设备可用性。

另一种方法来实现可靠性是称为去弊 (debugging) 或鍊入 (burn-in), 这个方法就是利用幼稚期的故障率较高的规律, 其方法是将设备日夜运行以加速完成其幼稚期, 直至所有的早期故障被隔离出来並进行了排除。当完成此工作时, 设备就进入了工作或服务期限, 並表现出了恒定的故障率和较好的可靠性

多元件整机MTBF与元件MTBF之关系:

为了说明上述可靠性基本概念的运用以估计多元件整机的可靠性, 现举一个接收机的可靠性分析来作为例子以结合实际来理解。

分析例题, 一部无线电接收机包括有五个插件即电源、高放级、混频级、中放级和功率输出级, 所有插件中的每个另件都是在功能上起串联作用, 任何一个另件的故障都能造成接收机的故障。现要估算接收机的故障率 r_e 及其故障间的平均时间。又假定接收机执行任务的时间 T 是100小时, 问接收机无故障的概率 P_s 是多大?

解题: 将可靠性数据列表如表2所示, 设备设计师是按元件制造者公布的数据或特殊可靠性试验的结果列表, 例如整流管的故障率 r 为0.18%/1000小时, 相应的:

$$MTBF = \frac{1}{r} = \frac{1}{0.18 \times 10^{-2} \times 10^{-3}} = 55400 \text{ 小时。}$$

表2 估算接收机电源可靠性的数据表, 故障率 r 表示为每1000小时的百分数

另件名称	故障率 r	另件数 n	nr
电 阻	0.30	20	6.00
电 容 器	0.35	10	3.50
整 流 器	0.18	1	0.18
充气稳压管	0.10	1	0.10
电源变压器	0.40	1	0.40
继 电 器	0.50	4	2.00
电源扼流器	0.35	6	2.01
钮子开关	0.60	1	0.60
连接插头	0.20	2	0.40
另件总数		46	
故障率总和			15.28

按关系式 (9) 来估算设备的故障率,

$$r_e = n_1 r_1 + n_2 r_2 + n_3 r_3 + \dots$$

表2给出了电源插件中46个另件的故障率总和 r_e 为15.28%/1000小时。用同样的方法来

估算高放级、混频级、中放级和功率输出级的故障率分别为40.28, 33.58, 54.34, 32.89百分数每1000小时。接收机的故障率为5个插件故障率的总和即176.3%/1000小时。接收机的故障间平均时间MTBF是 λ 的倒数, 所以

$$m = \frac{1}{176.3 \times 10^{-2} \times 10^{-3}} = 567 \text{ 小时}$$

接收机执行任务 $T=100$ 小时的无故障率按(6)式为

$$P_s = e^{-T/m} = e^{-\frac{100}{567}} = 0.838 \text{ 或 } 83.8\%$$

用并联运用重复性来提高可靠性:

在上面的例题中 P_s 为83.8%, 假设这个可靠性还感到不足而提出的最低可靠性要求为96%, 计算表明这意味着设备的故障率要由0.00176改善到0.0004故障每小时。如果样机的设计已经完成, 实际上就难于全部重新设计来提高可靠性。因此最合理的办法是用两套设备相重复以获得所需要的可靠性。下面我们将计算两部接收机重复的可靠性看是否能达到96%的要求。

接收机的不可靠性 u 当 $T=100$ 小时, 等于 $1 - 0.838 = 0.162$, 两部接收机并联时可以用(12)式来计算 $u = u_1^2 = (0.162)^2 = 0.028$, 因此双机并联时 $P = 1 - 0.028 = 0.972$ 或97.2%即可以满足可靠性96%的要求。

故障物理的研究:

元件的可靠性数据是花费了人力物力的代价而得来的, 但是使人感到麻烦的是这些数据不能延伸到其他情况下去使用。原材料的改变, 制造工艺的改变, 使用条件的变化, 都能否定以前的结果, 而需要重复做试验来取得新情况下的可靠性数据。

这些严重的限制产生了推动力来采取一个新途径以研究元件的可靠性, 这个途径就是研究和应用故障的基本物理学[17]。研究故障的物理可以在有限度的采用大量试验数据时作为一种方法来实现较高的元件可靠性和预计另件的可靠性。

作为说明故障物理学的一个例子, 可以用易于脱开的焊接引线来说明。在硅半导体器件中基极和发射极的窄带是用铝沉积到20至40微寸厚。内部引线约30至40密耳(千分之一吋)长, 引线的直径约为0.5至0.75密耳。引线的焊接是用热压结合的工艺来将引线焊到窄带上及接线端子上。在器件制造好以后发生了引线的脱开, 脱开的位置差不多总是在结合点。对脱开焊点的观察表明在铝带和结合周围出现了深色的区域。深色区域的意义在开始时是未被了解的, 直至冶金学家证明这是金铝的金属间化合物作用。这个作用是化学性质而是被结合和稳定工艺的较高温度所造成的, 在所有形成的金属间化合物中 $AuAl_2$ 是最坏的一种。它具有一些不好的性能如不良的电导率、脆性及不同的金和铝的热膨胀系数。这个情况变成了普遍认识的现象, 而且取得了工业中常用的不好的名词“紫色的灾难”。

可靠性的工作是一项专业性的工作, 正如电子管、半导体一样是一个方面的专业工作。在这个问题上已出版了许多书, 美国无线电工程师学会的刊物中有一个可靠性汇刊, 国际上还曾举行了关于可靠性的专业会议并出版会议录。可靠性的专业工作在电子设备日益复杂的发展中, 已经成为一个重要的问题。

参 考 文 献

1. Advances in electronics and electron Physics, Edited by L. Marton Volume 28A, 28B Photo-Electronic Image Devices, Proc. of the 4th symposium, september 16~20, 1968.

2. “电子管专业会议国外资料汇编” 1973.4.
3. 美、日、西德电子工业概述, 北京750信箱专题资料X-70-15, 表20.
4. RCA transistor manual, RCA Technical Services SC-10 P.63, Fig.107.
5. RCA Institute HSK T1 Tv receiver P.129, RCA Transistor Servicing Guide.
6. RCA Transistor manual, RCA Technical Services SC-10 P.268.
7. Klystron Oscillators, Varian Solid state Division, Microwave Journal, March 1972 P.24
8. Opening up the Commercial Market A. W. Scott, Varian Associates, P.49, Microwave Journal June 1972.
9. A New method for the control of moisture and insect infestations of grain by Microwave Power, M.A.K. Hamid and R. J. Boulanger, The Journal of Microwave Power, Volume 4, No.1, March 1969 P.5.
10. 电子管技术 1972年二期第11页
11. Conductance of Pipes for molecular flow Fundamentals of Vacuum Science and Technology. Gerhard Lewin P.13.
12. Product Data. English Electric Valve Company Limited. X band magnetron 4J50A. February 1970.
13. Miniaturized Metal—Ceramic travelling wave tubes for space vehicle, B.A. Highotrette, Microwave Journal January 1964 P.49.
14. Solid State Magnetic Modulator Questions and Answers. Microwave, May 1967
15. An investigation into the factors affecting the life of magnetrons by F.C. Thomson Ph. D., Proc. of the Institution of Electrical Engineers Part B Supplements Nos. 10~12, Volume 105, 1958 P.429.
16. Reliability Principles and Practices by S R. Culubro. McGraw Hill Book Company 1962.
17. Physics of Failure in Electronics, Edited by M.F. Goldberg and J. Vaccars, Spartan Books Inc. Baltimore Md. 1963.

星光亮度解释

参考: Smithsonian Physical tables, Eighth Revised Edition, First Reprint, Fowle P.602, 623.星光外观亮度级 m (Apparent magnitude m) 一级星光亮度为六级星光度的100倍, 两个星其级数 m 差1时其光亮度差 $5\sqrt{100}$ 或2.512倍 ($\log 10^{0.400} = 2.512$), m 每增加5级其亮度减弱因数为100, 用肉眼在晴朗的黑夜可看到的最弱星光为 $m=6$, 用100吋反射镜在威尔逊山所能拍摄的最弱星光为 $m=22$, 一个标准烛光在一公里距离处观看其亮度为 $m=0.8$.

电子束器件的进展*

光电器件是以光的信号或图象转换成电信号或将电的信号转换为光的图象或信号的电子器件。光电器件包括的范围很广,如电子束器件,变象管,图象增强器,光电倍增管,激光器件,全息显示器件,固体显示器,主体显示器等,其中电子束器件是一个极重要的门类。

电子束器件或电子束管就其应用来分,可分为示波管,指示管,储存管,显象管,大屏幕显示器件,摄象管及其它印刷管等。在此重点地介绍彩色显象管,彩色指示管(统称为彩色显示管)及摄象管。

一、示波管

示波管是以电的信号转换为光的图象的一种电子束管。它除被广泛地应用于各种示波器外,还用于其它超声波探伤器,医疗诊断器,电缆故障侦察器等。

六十年代初期,由于晶体管的大量应用,而当时晶体管承受的电压不高,不能使偏转电路供给较高的电压,采用晶体管化的电路的示波器就要求示波管具有高的偏转灵敏度。为了达到这一目的,就采取了螺旋后加速,轴向后加速等结构。随着超高频技术的发展,由于取样技术的成功,对于显示重复次数较多的高频脉冲,用一般的示波管就可以了。但对于单次显示的高频脉冲,则需要宽频带的示波管。这种管子,除偏转系统要采取行波结构外,还需要高的偏转灵敏度,尤其在垂直方向;以及高的亮度,所以采取了偏转后加速;为了避免管子太长,就采用了网状偏转后加速系统。为了达到垂直方向高的偏转灵敏度,新的发展应用了扫描放大的原理。这主要采用了四极透镜的结构。所谓四极透镜是一个非轴对称的透镜,它的特殊的电场的分布使得它在一个平面上是会聚的,而在另一个正交的平面是发散的作用。这样就可以把它作

为扫描放大来使用。这个透镜位于垂直偏转系统和水平偏转板之间,它的发散平面在垂直偏转的方向。因此它将垂直偏转放大了,而没有影响到水平的偏转。

由于四极透镜的非轴对称性,一般常用的轴对称的聚焦透镜是不能用的。我们采用了另外二个静电四极透镜,它们的发散和会聚平面是相互交替的。聚焦的作用如图1所示:

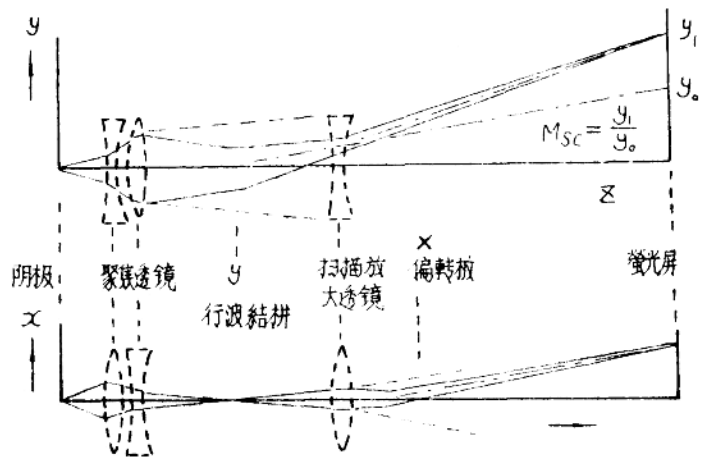


图1 四极透镜的扫描放大示意图

*773厂吴祖楷