

舰载电子设备的三防设计*

谢义水

(中国电子科技集团公司第十研究所 成都 610036)

摘要: 防潮湿、防霉菌、防盐雾的三防设计是研制服役于海洋气候环境下的舰载电子设备的重要任务, 产品研制时即应从材料应用、结构设计和工艺技术等诸多方面进行系统性三防设计。正确、合理地应用耐腐蚀性好的金属材料 and 不长霉、耐老化的非金属材料是三防设计的基础。大多数的腐蚀都能通过合理的结构设计来避免, 结构设计的合理性对设备的环境适应能力影响最大, 是舰载电子设备三防设计的关键。恰当地应用材料改性、表面镀涂、浸渍、灌封和绝缘处理等具有良好防护效果的工艺技术, 进一步提高设备的三防能力。目前, 覆膜技术仅能解决 L 波段低频段以下电路组件的三防问题, 微波/毫米波电路组件应用环境密封和电磁屏蔽复合技术可有效杜绝普遍性的电化偶腐蚀的发生, 保证了组件的恶劣气候环境适应性和在 0.1~10 GHz 工作频段内的屏蔽性能大于 80 dB, 且可满足 3 m 水深浸渍的防水要求。微组装了裸芯片等集成电路的毫米波收发组件则采用气密封装技术实现其三防设计, 氦质谱检测漏率符合小于 $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的国军标要求, 有效地保证了电路组件的可靠性。

关键词: 舰载电子设备 三防设计 防护技术 微波/毫米波电路组件 环境密封和电磁屏蔽

中图分类号: U674.7

0 前言

舰载电子设备服役于恶劣的海洋气候环境, 高温、高湿、空气中的腐蚀性物质、盐雾和各种霉菌对设备具有极大的破坏性, 直接影响了设备的导电、磁导、电感、电容、电子发射和电磁屏蔽等参量的改变。同时随着高科技电子设备向系统化、综合化、智能化的发展, 要求设备能全天候高可靠、抗干扰地适应各种恶劣环境的使用, 因此防潮湿、防霉菌、防盐雾的三防设计是研制舰载电子设备的重要任务。

三防设计涉及到材料、元器件、电路、结构、工艺和综合性技术管理等多方面的工作, 在设备研制时应同步进行。

1 三防材料应用

正确、合理地应用材料是三防设计的基础。就三防而言, 应用材料时应掌握材料的腐蚀机理、破坏形式及其相容性, 避免某些危险性大的腐蚀形式, 防止不同材料彼此相互作用而引起腐蚀和老化等。电偶腐蚀、隙缝腐蚀、晶间腐蚀、腐蚀磨损和应力腐蚀等是金属腐蚀的主要破坏形式, 而电子设备中以电偶腐蚀最为普遍和突出, 因而根据材料的相容

性, 合理选用不同类型金属的和镀层的合理选择是极为重要的。当然, 设计时必须综合材料的电气、力学、物理、化学以及加工性能等特性而优选耐腐蚀性好的金属材料 and 不长霉、耐老化的非金属材料。

耐腐蚀性能好的金属材料有金、铬、镍、钛及钛合金、铝合金、铜合金和不锈钢等。考虑到经济因素, 通常选铝合金、铜合金、不锈钢和优质碳素钢和钛合金等再镀覆金属层和涂覆非金属层联合保护。不长霉、耐老化的非金属材料包括聚四氟乙烯、聚碳酸酯、改性聚苯乙烯、有机玻璃和硅橡胶等。

2 三防结构设计

电子设备的结构设计是否合理, 对环境适应能力影响最大, 也是最主要的, 因为大多数的腐蚀问题都能通过合理的结构设计来避免, 因此必须重视三防结构设计。

设备尤其是舱室外设备应尽量避免积水结构, 如焊接结构应采用连续焊缝设计, 尽可能消除缝隙和凹坑结构, 防止积水、灰尘和盐雾。在可能积水和留存湿气的空间开设排水孔和排气孔。

伺服转台、天线罩等大容积的设备应避免气密式设计, 因为气密设计一旦失效, 经过一定的时间, 内部产生积水, 形成 100% 的蒸气压, 电子设备易受潮失效。可选用专业厂商的防水透气阀来完成设备的防水透气设计, 从而避免气密式设计。这种防水透气阀可阻止水滴、灰尘、细小杂物、细小的盐结晶、油滴以及其他化学物质, 进入电子设备中,

* 2006 年中国机械工程学会年会推荐论文。20061205 收到初稿, 20061215 收到修改稿

同时保持良好的透气性,非常适用于舰载电子设备以及其他平台内部含电池的通信设备的三防设计。

尽量避免采用点焊、铆接、螺纹紧固等结构形式,而优选钣金结构或整体浇注的结构形式,以免形成隙缝腐蚀,同时可在能形成缝隙腐蚀处加密封涂覆或加密封衬垫。

在同一结构中尽量选用同一种金属材料,避免采用不同类型金属接触,以防电化偶腐蚀。若需使用不同类型的金属,两种材料的电位差应小于 0.25 V 或符合小阴极一大阳极结构^[1],否则在结构上要采取相应的防护措施,如在其中一种金属上镀覆上允许与第二种金属相接触的金属层^[2],或两种金属间涂覆绝缘保护层或加绝缘衬垫隔离,但要注意兼顾设备的电磁兼容性要求。

易腐蚀部位结构断面厚度应尽量相近,因为断面厚度不一致时,一旦温度发生变化或在机械电气负载作用下薄弱部位发生形变,材料晶格会扭曲而产生应力腐蚀,严重时能引起电参数的变化^[3]。最容易发生腐蚀的零件可应用“弃件”可靠性设计方法,从结构上保证易于维修和更换。也可应用“腐蚀裕度”的设计思想,加厚腐蚀部位,“腐蚀裕度”一般取预期寿命的两倍。

3 三防工艺技术

三防设计时,除了从材料应用和结构设计两方面采取防护措施外,还必须应用恰当的工艺技术,通过它们的联合作用实现良好防护效果,以进一步提高设备的三防能力。

3.1 材料改性处理工艺技术

根据应用材料的组成、表面状态、应力存在与分布情况,通过金属材料冷、热加工和热处理工艺的改性处理或非金属材料制造中加入老化剂和稳定剂,以进一步提高材料的抗蚀能力。

(1) 改善材料金相组织,消除应力和变形,改善形状与表面粗糙度,提高金属材料的耐蚀性。

(2) 对于需电镀的铸铝等铸造件,若还需机械加工的,应在机械加工前进行喷砂处理;对于焊接件,若还需表面涂覆的,应在涂覆前进行喷砂处理。

(3) 合理选择焊接工装、焊接参数和焊接次序等工艺措施来减小焊接应力引起的构件变形,必要时采取去应力方法弥补,从而减少残余应力造成的晶间腐蚀倾向。

(4) 通常镀覆后表面粗糙度值要比镀覆前大 1~2 倍,所以有精度要求的镀覆零件,镀覆前的精加工表面粗糙度值应小于镀覆层表面粗糙度值的

1~2 倍^[3]。

3.2 表面镀涂处理工艺技术

表面镀涂处理就是通过镀覆或涂装的方法在设备及其零件表面覆盖一层金属镀层或非金属涂层,使之与周围介质隔离开来,从而达到防护的目的。为保证零件的防护能力,通常多采用镀层和涂层双重保护。

3.2.1 金属镀层

用化学或电化学方法使金属表面生成某种化合物而形成覆盖层,以达到防腐蚀的目的。常用的金属镀层有锌、锡、镍、铜、铬、银、金以及其他贵金属镀层。选择镀层时,应综合考虑设备环境条件、基材的特性和功能要求以及材料的相容性要求。

钢制零件的镀锌、镀镉、多层镀铬,或镍、铬镀层组合的防护镀层,对于海水与盐雾的侵蚀有十分满意的防护性能,其中,锌是钢制零件最常用的防护镀层。

铝制零件则通过化学氧化、阳极氧化处理来提高防护能力。通常,对有导电要求的结构件进行化学氧化处理,对无导电要求的则进行绝缘氧化处理。

铜合金通常采用氧化处理和钝化处理。氧化处理后,氧化膜的硬度和耐蚀性均高于金属本身,具有一定的耐蚀性。钝化处理后,耐蚀性得到提高,但焊接性和导电性均有所下降,故需焊接的零件一般不采用此方法,而采用电镀方法。

3.2.2 非金属涂层

(1) 油漆涂层。油漆覆盖层在非金属覆盖层中用得最普遍,对设备具有较好的防护作用。三防用漆的种类很多,性能各异,漆种的选择应根据油漆的性能,适应范围以及产品的外形要求和实际使用环境而定。常用的三防油漆是丙烯酸漆和聚氨酯漆。

(2) 塑料涂层。塑料涂覆层是采用氟塑料、氯化聚醚、环氧及聚乙烯等耐化学腐蚀性优良的树脂,制成分散液或悬浮液涂覆于金属基体上,然后经干燥、高温塑化、淬火等工序形成的。采用塑料涂覆层防护的设备和零件必须能经受住高温塑化和急冷淬火时的剧烈温度变化。

3.3 浸渍,灌封和绝缘处理工艺技术

(1) 浸渍工艺。浸渍是对如变压器绕组、线圈等进行绝缘处理的工艺技术。经处理的绕组提高了防潮能力,增加了粘接强度,在冲击振动时绕组亦不会产生位移或断路,因此要求对所有的绕组必须进行浸渍处理。

浸渍材料的配方需要特别设计,要求有合适的贮存期和操作期,固化后不开裂,应力小。

(2) 灌封工艺。灌封是指将树脂(或泡沫)渗透到

变压器、电子组件等电路系统、元件或部件的所有空隙而进行整体封装，或将密封保护材料加在从某个接插件或部件露出的导线周围的埋封，以提高产品的防潮性。因此，灌封后的产品不但提高了防潮、防霉、防盐雾能力，而且能承受高的冲击等恶劣环境条件，可保证部件的正常工作。研究表明，灌封后的产品，暴露在户外或海上，可保证20年以上元件和电路板不被腐蚀，而未封装的电路板，在海上盐雾环境下1年将失效^[4]。因此，工作在舱外、舰船甲板上的印制板组件，除必需进行保护涂覆外，在允许的情况下，应进行固体封装。而变压器，除必须进行浸渍处理外，原则上也应进行灌封处理，以适应海上湿热和盐雾侵蚀，保证变压器的正常工作。

工作在海上或海岛上高温、高湿环境下，电子设备中的高压部分(高压组件、带高压组件)，在设计时，必须采用固体封装技术，而不应采取增大距离来保证耐压强度^[4]。因为即使是设计是能够符合设计要求，但在使用时受到环境因素的作用。例如，在充满雾气的湿热环境下，仍然有可能引起打火、爬电、甚至击穿。可靠的方法是精密的计算，缩小高压部件间的距离，将高压器件封装在高绝缘的有机硅凝胶内。

灌封材料有环氧树脂，有机硅和聚氨酯，其中有机硅弹性体和环氧树脂应用最广泛，若进行维修性设计通常更多地选用有机硅凝胶进行整体灌封^[4]。

(3) 绝缘处理工艺。绝缘处理是指对自制的线圈、铁氧体器件，绝缘板、支架等和其他部件包括装联后的线扎进行绝缘处理，以提高它们适应海上恶劣环境的能力。最常用的绝缘处理材料是环氧酯漆和聚氨酯漆^[1]。

(4) 裹覆和憎水处理工艺。裹覆是指用保护材料将分立元件或部件封装在部件、组件之中的过程，裹覆能显著提高元件或部件的防潮及绝缘能力。憎水处理可提高抗湿能力，同时也能提高绝缘强度和机械强度。这两种防护工艺也常常被采用。

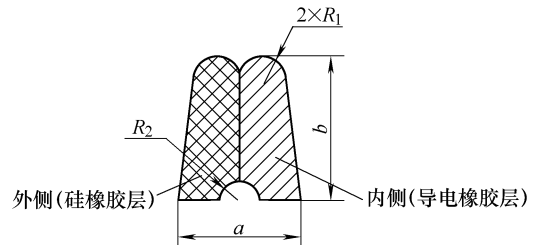
4 电路组件三防设计

电路组件的三防设计是电子设备可靠性的重要保证，其三防处理通常以覆膜技术为主，即对电路安装板、焊点等涂覆三防清漆，对接插件则浸涂电接触保护剂。但对于微波/毫米波电路，由于其具有电场和磁场双重特性，通过覆膜技术途径解决其三防则具有较大的局限性。目前，国内仅有采用覆膜技术进行L波段低频段微波电路三防处理的工程应

用报道，国外在10 GHz频段左右，毫米波频段电路的覆膜技术三防处理则未见报道。

密封是微波/毫米波电路组件三防设计的重要技术措施，包括水汽密封、环境和电磁复合密封和气密封技术，需要根据电路组件的组成、结构、可靠性任务要求，以及环境断面等技术条件进行密封设计。无源微波器件如微带型天线的和差器和功分器，有源微波器件如收发分机，均可采用国内具有自主知识产权、性能有别于独立导电密封胶(条)，且性价比高的兼具环境和电磁双重密封功能的“双峰”型复合导电橡胶密封圈(条)进行三防设计。

“双峰”型密封圈(条)采用独特的“复合”技术，使导电橡胶与非导电的硅橡胶复合在一起，形成外侧为普通硅橡胶，内侧为导电橡胶的“双峰”型密封圈(条)，断面如下图所示。



图“双峰”复合橡胶圈(条)断面示意图

“双峰”型密封圈的三防机理是外侧硅橡胶层起环境密封作用，内侧导电橡胶层实现电磁屏蔽功能。由于首先实现了环境密封，电路组件内部不会有潮气，使得内层的导电橡胶层与密封盖(屏蔽盖)之间不会产生电化偶腐蚀，有效杜绝了使用独立导电橡胶条密封而普遍性存在的电化偶腐蚀的情况发生，从而实现了电路组件的兼具电磁密封(即电磁屏蔽)的高可靠密封，保证了微波/毫米波电路组件的恶劣气候环境适应性和在0.1~10 GHz工作频段内的屏蔽性能大于80 dB，并可实现3 m水深浸渍的防水要求，破解了微波/毫米波电路的三防技术难题。同时，“双峰”型密封技术亦可广泛用于具有环境密封要求，尤其是水汽密封要求和电磁屏蔽要求的低频段的电路组件、单元、分机和整机的三防设计中，针对有源毫米波电路组件，特别是微组装裸芯片等集成电路的收发组件则可采用气密封装技术实现其三防，如采用特种焊接技术，在真空环境或惰性气体氛围下，将毫米波电路组件部分或全部气密封，使内部的氦质谱检测漏率控制于国军标规定的 $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的可靠性指标以下，有效地保证了毫米波组件的可靠性。

5 控制环境条件

对舱内工作的电子设备,应考虑改善环境条件,在设计时应考虑通风、换气、加温除湿以及其他有利于设备的贮存或非工作状态时有良好的内部环境。

对某些设备可采用定期通电加热的方法来除潮气或用吸潮剂(如硅胶)吸掉潮气。此外,还可采用添加缓蚀剂的方法来拟制腐蚀速度。

6 结论

电子设备的防潮湿、防霉菌和防盐雾的三防性能是系统、整机的重要技战术指标之一,在设备研制过程中应同步进行三防设计,使三防技术融入到产品设计中,并通过工艺控制得到实施。

科学技术的发展,电子设备向大多采用微型元器件密集组装的薄小体积结构方向发展,设备三防性能更成为影响设备电气可靠性的重要因素。因此,不断提高电子设备的三防性能和耐受各种恶劣环境条件的适应性,仍然是电子工业设计、研制、生产领域亟待解决的技术问题。同时,三防技术内涵已发生很大的变化,结构和工艺设计人员应突出关注和研究三防设计新材料、新工艺和新结构的课题。

参 考 文 献

- [1] 电子科学研究院. 电子设备三防技术手册[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2000.
- [2] 邱成梯. 电子设备结构设计原理[M]. 南京: 东南大学出版社, 2001.
- [3] 华静, 姜荫棠. 浅谈舰载电子设备的三防设计[J]. 雷达与对抗, 2003, 3: 58-60.
- [4] 马骥. 三防设计技术[J]. 电讯技术, 1996, 36(4): 5-12.

THREE-PROOFING DESIGN OF SHIPBORNE ELECTRONIC EQUIPMENT

XIE Yishui

(The 10th Institute, China Electronics Technology
Group Corporation, Chengdu 610036)

Abstract: The design of moisture-mildew-saltspray proofing to shipborne electronic equipment is an important mission for the shipborne electronic equipment operating at the ocean environment. It should be considered overall from the materials-application, structure design, process engineering and so on at the time of the product development. The accurate use of metal material with good corrosion resistance and the nonmetal material with good mildew-proofing and aging resistance is the basis of the design. Most corrosion could be avoided by the rational structural design. The rationality of the structural design would affect mostly the adaptive capacity to environment of the product and is the key factor for the moisture-mildew-saltspray proofing design of the shipborne electronic equipment. It would improve the proofing capability farther that the correct use of the material modification, surface coating/depositing, impregnation, encapsulation, insulation process and so on. At present, the coating-film technology would only solve the moisture-mildew-saltspray proofing problem in the circuit component under the L-band, but the encapsulation of application environment of micro/millimeter wave circuit component and the electromagnetic shielding composite technology could prevent effectively the ubiquitous galvanic corrosion, ensure that the component could adapt the inclement environment, and the shielding properties should be above 80 dB during the 0.1~10 GHz operating frequency, and meet the waterproof requirement of the three meter depth impregnation. Hermetic package is used at the millimeter-wave T/R components in which the bare chips are micropackaged for the moisture-mildew-saltspray proofing. The helium mass spectrum leakage detection rate should be less than 1×10^{-8} Pa · m³/s of the GJB requirement, which could ensure the reliability of the circuit component.

Key words: Shipborne electronic equipment

Moisture-mildew-saltspray proofing design

Protection technology

Micro/millimeter wave circuit component

Environment encapsulation and electromagnetic shielding

作者简介: 谢义水, 男, 1969 年出生, 硕士, 高级工程师。主要从事电子设备及系统工艺研究和产品技术策划等工作。

E-mail: xonewaters@yahoo.com.cn