

航天二次电源典型器件安装工艺研究

石宝松, 聂磊, 付柯楠

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

摘要: 二次电源作为航天电源系统的重要一环, 其可靠性和稳定性直接影响航天器中各用电载荷的正常运行及性能指标, 决定着整个航天器任务的成败。航天二次电源在空间环境中, 需经受严苛的力、热、电磁等环境因素的考验, 因此, 针对电源模块及外围常用器件安装工艺的研究, 对研制高性能、高可靠的航天二次电源具有重要意义。本文对二次电源的绝缘安装、力学加固、散热处理、静电泄放等方面的安装工艺进行了研究, 提高了航天二次电源的可靠性。研制的二次电源产品通过了地面试验及长期在轨验证。

关键词: 航天; 二次电源; 安装工艺

本文著录格式: 石宝松, 聂磊, 付柯楠. 航天二次电源典型器件安装工艺研究[J]. 电子技术与软件工程, 2024, 13(2): 18-23

中图分类号: TN6; V46

文献标识码: A

Research on Installation Process of Typical Components for Aerospace Secondary Power Supply

SHI Bao-song, NIE Lei, FU Ke-nan

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract: As an important part of the aerospace power system, the reliability and stability of the secondary power supply directly affect the normal operation and performance indicators of various electrical loads in the spacecraft, determining the success or failure of the entire spacecraft mission. The aerospace secondary power supply needs to withstand harsh environmental factors such as force, heat, and electromagnetic in the space environment. Therefore, research on the installation process of power modules and commonly used peripheral components is of great significance for the development of high-performance and highly reliable aerospace secondary power supplies. This article studies the installation process of secondary power supply such as insulation installation, mechanical reinforcement, heat dissipation treatment and electrostatic discharge, which improves the reliability of aerospace secondary power supply. The developed secondary power supply product has passed the ground tests and long-term in orbit verification.

Key words: aerospace; secondary power supply; installation process

Citation: SHI Bao-song, NIE Lei, FU Ke-nan. Research on Installation Process of Typical Components for Aerospace Secondary Power Supply[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2024, 13(2): 18-23

1 引言

二次电源作为航天电源系统的重要一环, 能够对航天器一次母线进行隔离与电压变换, 将太阳电池阵或蓄电池组提供的一次母线输出电压转换成载荷所需电压, 其可靠性和稳定性直接影响航天器中各用电载荷的正常运行及性能指标, 决定着整个航天器任务的成败。

DC/DC电源模块具有体积小、功率密度大、可靠性高的优点, 采用DC/DC电源模块进行二次电源设计,

能够有效地提高设计和调试效率, 增加二次电源的可靠性, 是最常用的一种二次电源设计方式。航天二次电源在空间环境中, 需经受严苛的力、热、电磁等环境因素的考验, 因此, 针对电源模块及外围常用器件安装工艺的研究, 对研制高性能、高可靠航天二次电源具有重要的意义^[1-3]。

2 航天二次电源安装工艺流程

航天二次电源安装涉及到电子装联、机械装配、

通讯作者: 石宝松

热控实施等工艺过程,二次电源整机安装流程如图1所示。

阻容等片式元件通过回流焊接,板上安装的插装器件通过手工或波峰焊接的方式装联至印制板。印制板组件在完成焊接和三防固封后,同需要直接安装至结构件上的大质量高热耗器件一同进行机械装配,

并完成板卡级装联。最后将各功能板卡、连接器、热控组件等进行整机集成,完成二次电源的总体安装。在整个工艺流程中,机、电、热等装配工序相互交叠,需要统筹考虑各项工艺方法,提高整机安装的可靠性。下文针对航天二次电源典型器件涉及到的电装、机装、热控工艺进行研究。

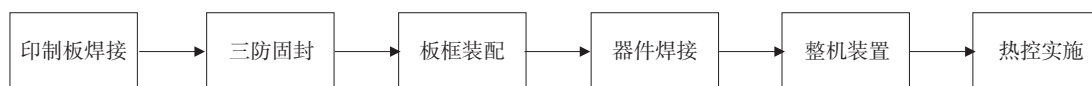


图1 航天二次电源安装工艺流程

3 典型器件安装工艺

3.1 电源模块安装工艺

3.1.1 电源模块的绝缘安装

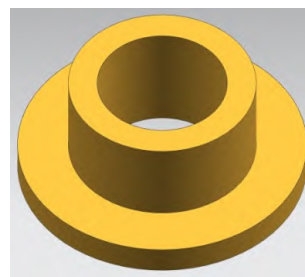
常见的宇航级DC/DC电源模块,一般封装于金属壳体中,其常见的封装形式如图2所示。根据安装方式可分为有法兰和无法兰两大类^[4]。对于大功率二次电源,大质量和有散热需求的器件均应安装于金属板框上,因此推荐使用有安装法兰的封装形式。



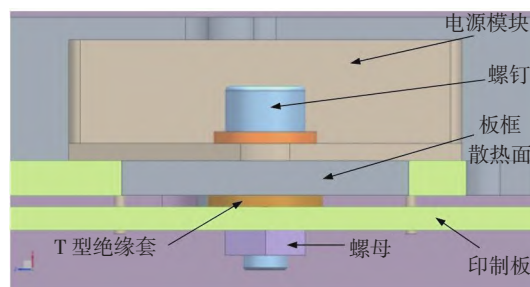
图2 带法兰的电源模块

在二次电源电路设计中,出于电气安全性考虑,电源模块壳体与结构板框间一般应进行绝缘安装,因此需要采用绝缘套管填充所有的螺钉安装孔和引脚过孔,如图3所示。在安装过程中,可以采用一种T型绝缘套管来解决绝缘问题,其材质一般可采用聚酰亚胺等绝缘材料,绝缘套管可使电源模块等金属壳体器件及其安装螺钉与整个电源壳体绝缘,同时还可以填充印制板与板框之间的缝隙,在进行紧固件安装时起到局部支撑印制板的作用。模块在安装时,采用如图3(b)所示的叠层结构进行安装,在器件及印制板组件安装前应仔细检查各安装孔中是否正确安装了绝缘套,并使用硅橡胶进行粘固,防止脱落。使用绝缘导热垫及T型绝缘套使电源模块外壳与安装板框绝缘。绝缘套在加工时应保证加工公差,即确保安装后的绝缘套边缘应略低于板框的器件安装面,从而保证安装面的整体平整程度,若绝缘套突出安装面,在器件安装时可能会造成

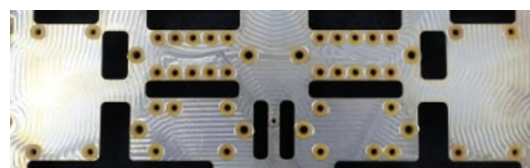
散热面处局部接触不良,影响散热效果。



(a) T型绝缘套结构



(b) T型绝缘套与板框安装叠层结构



(c) T型绝缘套实际安装于板框

图3 T型绝缘套的安装形式

3.1.2 模块引脚焊接工艺

电源模块按引脚的引出形式,可分为侧方出线和底部出线两种。由于模块固定于板框而非印制板上,根据航天禁限用工艺中关于功率器件安装方式的规定,不允许有导热要求或导热措施的功率器件的两体安装(本体与焊点不在相同零件上)。易使焊点和引脚受力,使导热能力下降影响质量与可靠性。因此,模块应采用软引线的方式与印制板进行连接。

软引线引脚的焊接一般应采用绕焊的方式,即将导线缠绕于模块引脚后进行焊接,这种方式的优点是焊点可靠性高,缺点是会产生直径较大的焊点。对于大功率大电流输出的引脚,一般采用较粗的导线。对于横截面积 0.5 mm^2 的导线,单个绕焊焊点直径可达 2 mm 以上,对于标准引脚间距 5.08 mm 的模块,其绝缘间隙较小,存在短路风险,需要采取套绝缘套管或点胶等方式加强绝缘性能。如图4所示,为侧方出线焊点的处理。

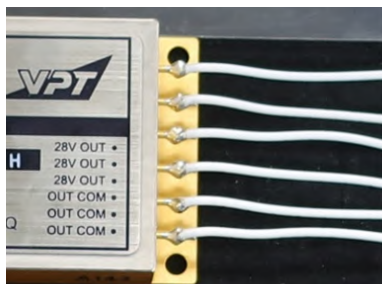


图4 侧方出线焊点的处理

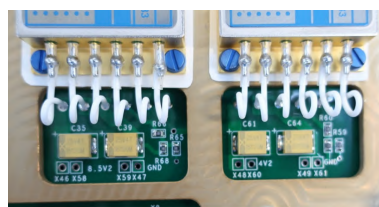
为了解决绝缘间隙和焊点大小之间的矛盾,还可以采用一种改进的焊接工艺方法来解决模块软引线的问题。一般情况下,搭焊的焊点可靠性不如绕焊,但其焊点直径可控制得较小。为了获得直径较小的焊点,同时提高焊点的可靠性,在焊接时可采用细铜丝缠绕后进行焊接的方式,这样可以将焊点直径控制在 2 mm 以内,同时具有较高的机械强度。

电源模块及其他软引线器件在进行焊接时,均应对引线采用绕“猪尾巴”弯的方式进行应力释放,如图5所示,防止焊点受力。

对于底部出线封装形式的模块,在焊接时还应考虑其穿过的T型绝缘套内径的限制,在模块安装前应逐点检查焊点的直径,软引线焊点在模块引脚上应偏向同一方向,同时因为焊点已用绝缘套管进行绝缘,可不再使用热缩管防护以减小整体焊点的直径。如图6所示,是底部出线模块的焊点。模块引线穿过印制板穿线孔后,从模块安装面一侧进行焊接时,引线应留有释力弯,在折弯处使用硅橡胶进行加固,防止焊点受力,如图7所示。

3.2 连接器安装工艺

连接器一般也直接安装于二次电源板框上,同样应采用软引线方式与印制板连接,同时,为了满足接触电阻的要求,连接器安装的板框位置采用“露白”工艺,不可采用可导致接触电阻劣化的表面处理方法,如图8所示。在将连接器安装至板框时,对于连接器自带螺纹的连接器(如J30J系列连接器),不能在螺纹



(a) 模块引出线应力释放



(b) TO 封装器件引出线应力释放

图5 引出线应力释放工艺

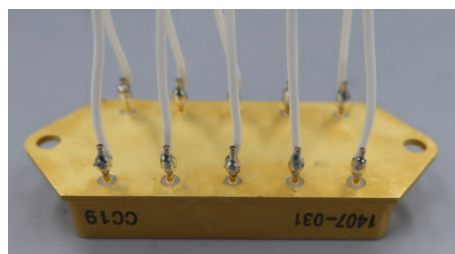


图6 底部出线模块的焊点

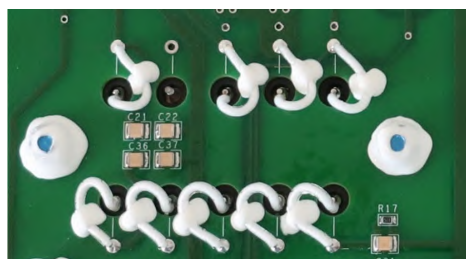


图7 底部出线模块引线处理

紧固件处使用防松胶,而对于采用螺母进行安装连接器,则应该在螺钉与螺母的连接位置使用适量的防松胶,如图9所示。无论哪种连接器,在阴锁紧附件与连接器本体接触的位置,均应使用环氧胶进行加固^[5],这样能够有效防止连接器在进行分离操作时,阴锁紧附件松脱的情况发生。

在安装连接器锁紧附件时,应参考连接器手册,进行力矩控制,对于J30J连接器,其力矩范围为 $0.3 \sim 0.4\text{ N}\cdot\text{m}$,电连接器在非使用状态时,均应使用防静电保护盖进行保护,防止静电损伤及多余物的产生。

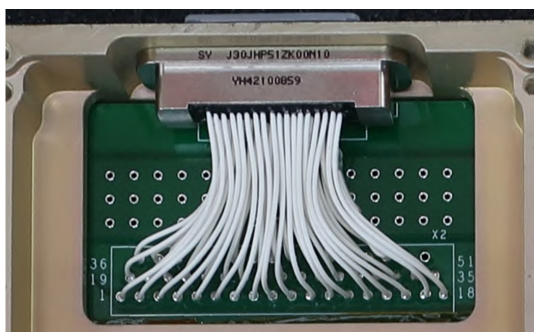


图 8 连接器的软引线焊接



图 9 使用环氧胶对连接器附件进行加固,防止反向旋转时松脱

3.3 紧固件安装工艺

航天二次电源在进行机械装配时,不允许没有力矩要求的螺纹紧固。二次电源涉及到多种紧固件应用场合,包括电箱装配,印制板装联,器件安装等。螺钉紧固的本质,是通过施加扭矩获得夹紧力的过程,其受到的影响很多,包括但不限于螺钉接触面的光滑程度、螺纹是否润滑等,若要获得精确的拧紧力矩,则需要经过大量的试验,这在工程实施中是不现实的,一般会通过一些经验值和相关标准提供的参考值作为依据。需要注意的是,部分标准给出的紧固力矩范围是两金属零件拧紧时的力矩,这并不适用于电子元器件、印制板、连接器等非刚性材料的紧固,相关的紧固力矩应进行降额,并观察是否在紧固过程中损伤元器件,表1列出了部分二次电源装配应用场景中螺钉的紧固力矩推荐值(力矩值为使用不锈钢螺钉的情况,使用钛合金螺钉力矩应略小于使用不锈钢螺钉)。

二次电源元器件安装螺钉应优选内六角圆柱头螺钉,但在部分空间较小的应用场合,如电源模块四

表 1 不同应用场景下螺钉紧固力矩(不锈钢)

应用场景	各规格螺钉紧固推荐力矩值/(N·m)		
	M2	M2.5	M3
紧固金属零件	0.3	0.7	0.9
紧固 PCB	0.2	0.3	0.4
有弹性绝缘垫的金属壳体元器件 紧固在金属零件上	0.2	0.3	0.4
有弹性绝缘垫的金属壳体元器件 紧固在 PCB 上	0.1	0.2	0.3

角法兰处的安装螺钉,由于距离引脚较近,可选用一字或十字盘头螺钉。弹簧垫圈因其防松效果不可靠,一般不推荐使用,在接触印制板的紧固位置,应注意紧固件不应直接压在印制板线路条上,在设计时应注意留出相应的禁止布线区域,也可以选用 GB848 标准的小平垫或绝缘垫片来进行绝缘处理。

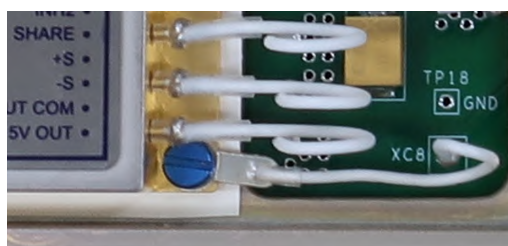
在进行紧固件安装时需搭配使用螺纹防松胶加强螺钉防松效果,具体实施时可在螺纹处涂抹 MS 胶或乐泰胶,同时在螺母或螺钉头处使用 GD414/D04 硅橡胶进行胶封,如图 10 所示。



图 10 使用 GD414 对螺母处进行胶封防松

3.4 静电泄放工艺

电源模块、继电器等金属器件,需要将自身外壳接地以建立静电泄放通路,防止静电积累,造成器件的损伤或误动作。在电装焊接时,由于电源模块钢壳的可焊性较差,可采用导线一端焊接焊片,利用电源模块螺钉安装的方式,如图 11 所示。而对于小型继电器或其他没有安装法兰的器件,没有可以利用的固定



(a) 模块的接地方式



(b) 继电器接地方式

图 11 接地引线方式

点,需要直接焊接在器件壳体上,在焊接时应选择远离继电器内部触点的位置,防止内部触点受到热冲击造成损伤,焊接前应对焊接表面进行打磨,保证焊接的可靠性。另外,还可以采用导电胶粘固的方式进行处理,根据继电器粘接面大小裁剪一片薄铜片,先将接地导线焊接在铜片上,再使用导电胶将铜片粘接在继电器表面,固化后使用硅胶胶对铜片四周进行封边粘固。这种工艺方法的优点是不需要在继电器表面进行焊接,但需要继电器表面有较大的粘接面,同时应严格控制导电多余物的产生,如图 11(b)所示。

3.5 散热工艺

需要通过板框散热的大功率器件,为了减小热阻,在安装时需要在器件与板框接触处使用绝缘导热垫或涂抹导热硅脂,在安装绝缘导热垫时,应在绝缘导热垫与板框接触面、模块底部分别均匀涂抹导热硅脂,以增强散热。同时,在有绝缘要求的场合,禁止将厚度不足的薄膜用于螺纹紧固等强压下的界面绝缘,否则有可能导致绝缘失效。在使用 0.5 mm 厚度以下的软质绝缘导热垫时,应注意检查安装后的绝缘状态,在强绝缘场合推荐使用较厚的绝缘导热垫,或叠加使用较薄的绝缘导热垫。

对于大功率电阻的散热,也应考虑直接通过板框进行散热和力学加固,由于电阻为轴向引线的圆柱形结构,可在电阻本体下垫绝缘导热垫,四角点环氧胶进行力学加固,同时两侧涂抹 GD414 硅橡胶填充电阻下方两侧缝隙,增加导热性能。如图 12 所示,为功率电阻的散热装配工艺。



图 12 功率电阻的散热装配工艺

航天二次电源在空间环境下,所散发的热量需要通过结构件、热管等通路传导至辐冷板并向空间进行辐射散热。为了降低散热路径上的热阻,在二次电源装配时需要注意:对于层叠结构的二次电源,应在各层板框间涂抹适量的导热硅脂,但应对电连接器附近的位置应进行防护或避让,防止导热硅脂污染接触件;在安装热管和加热片等热控元件前,应保证安装面的清洁和平整。

4 工艺应用效果

为了在产品的研制过程中及早发现和剔除产品中混杂着缺陷的元器件、工艺,从而保证产品的可靠

性,必须检验二次电源适应各种环境条件的能力。根据航天产品的研制流程,二次电源板级及整机应通过多轮的鉴定级及验收级环境试验,包括单板温度循环试验、整机的力学环境试验、热循环等等,其中,力学环境试验主要考察工艺应用后对产品各元器件的加固作用,二次电源整机参与的随机振动及正弦振动条件如表 2 和表 3 所示。

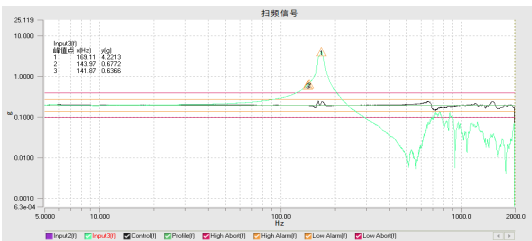
表 2 二次电源随机振动试验条件

频率范围/Hz	20 ~ 80	80 ~ 350	350 ~ 2 000
功率谱密度	+3 dB/oct	0.04 g ² /Hz	-3 dB/oct
总均方根加速度/grms	6.06		
试验方向	X、Y、Z 三轴向		
试验时间	4~5 min/轴向		

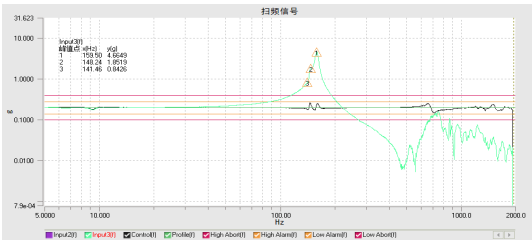
表 3 二次电源正弦振动试验条件

频率范围/Hz	5 ~ 15(0~P)	15 ~ 100
量级	6.61 mm	6 g
方向	X、Y、Z 三个方向	
扫描频率	4 oct/min	

通过力学环境试验进行验证,二次电源整机经过 3 个方向的振动试验,试验过程中整机通电以考察电气方面的性能变化,图 13 所示的振动试验曲线为二次电源整机在试验前后扫频曲线的对比(以 X 方向正弦振动试验为例),通过曲线能够看出,二次电源的力学特性在振动前后没有发生明显变化,同时观察试验过程中二次电源的各项电气指标及外观均正常,证明二次电源内部各焊点、元器件均得到了良好的固定,本



(a) 预试验扫频



(b) 试验后扫频

图 13 X 方向正弦振动试验前后对比

工艺能够对二次电源起到良好的保护作用。

通过热循环试验进行验证,二次电源整机参与温度循环试验条件如表4所示,试验过程中二次电源周期性通电工作,使用热敏电阻监测整机发热量最大的电源模块及其周边位置的峰值温度,对比不同工艺实施状态的数据如表5所示。

表 4 二次电源温度循环试验条件

试验项目	试验条件
温度循环试验	温度: -35~+60℃
	保持时间: 首末循环各 6 h, 中间循环各 2 h
	变速率: 3~5℃/min 循环次数: 25.5 次

表 5 二次电源模块散热对比数据

项目	电源模块 温度/℃	周边监测点 1 温度/℃	周边监测点 2 温度/℃
同时使用绝缘导热垫及导热硅脂	66.9	64.5	63.2
仅使用绝缘导热垫	69.1	63.6	61.7
无散热工艺措施	75.2	61.4	60.9

通过表5的温度对比数据可以看出,使用本文所述的散热工艺后,电源模块的峰值温度明显低于对比试验工况,同时其温度均匀性也更好,证明本工艺可以有效地降低元器件安装界面的热阻,使发热元件的热量能够更容易的传导至散热结构上。

在研制过程中,通过对生产工艺的严格把控,二次电源产品经受住了严苛的环境条件,各项电气性能及力学特性等方面均正常,顺利地通过了各阶段的环境试验,证明了本文各项工艺的可行性和可靠性。

5 结束语

本文对航天二次电源典型器件的安装工艺进行了研究,从二次电源安装的可靠性出发,分别对二次电源相关的绝缘安装、力学加固、散热处理、静电泄放等方面的安装工艺细节进行了分析。依据本安装工

艺装配的二次电源产品,经过了地面可靠性试验及长期的在轨验证,证明了其可行性。同时,本文所研究的安装工艺也可以对航天器用电源模块及其他大功率、大质量器件的安装提供指导。

参考文献

[1] 叶泽雨,尹靖元,贾海鹏,等.基于深度强化学习的卫星电源冗余电池均衡控制策略[J].电子学报,2023,51(9):2419-2427.

[2] 金阳,李浩.基于反激拓扑的超低纹波双路输出DC/DC变换器设计[J].电子技术与软件工程,2021(22):102-105.

[3] 罗聘,赵恒飞,陈伟伟,等.一种星载固态功率放大器用400W二次电源设计[J].空间电子技术,2024,21(2):94-100.

[4] 潘建男,于长存.一种适用于DC/DC变换器大功率外壳的设计[J].电子元器件与信息技术,2024,8(2):13-16.

[5] 袁群博,何娇娇,杨斌,等.环氧胶粘剂对二次电源用平面变压器粘固效果的研究[J].今日制造与升级,2022(5):139-142.

作者简介



石宝松(1980—),男,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员,主要研究方向为航天产品电装工艺技术。
E-mail: shibs@ciomp.ac.cn



聂磊(1987—),男,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员,主要研究方向为航天及光电类产品电装工艺技术。E-mail: nltitan23@126.com



付柯楠(1991—),男,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员,主要研究方向为航天及光电类产品电装工艺技术。E-mail: fukenan@foxmail.com