

固体继电器介质耐电压的研究进展

刘 艳, 王海建, 李有池, 李金宝, 周 蕾, 高加林

中国兵器工业第214研究所, 江苏 苏州

收稿日期: 2023年6月29日; 录用日期: 2023年9月1日; 发布日期: 2023年9月12日

摘 要

近年来, 由于2类固体继电器开关速度快、灵敏度高、功耗低、可靠性高、在整机系统中干扰小等优势被广泛应用于航空航天电子、汽车飞机控制开关、工业控制系统、电信仪表等领域。固体继电器的介质耐电压可以直接表征电路所用元器件的质量, 从而以此判断继电器的可靠性。然而随着继电器小型化、模块化的快速发展, 继电器的耐压值越来越无法满足使用要求。为解决固体继电器低耐压值的问题, 本文从空气湿度、大气压强环境因素分析了耐压值低的内在原因。从继电器印制电路板布局、元器件选型、管壳镀膜、金属多余物控制角度阐述了优化介质耐电压相应的物理机制。

关键词

固体继电器, 介质耐电压, 金属多余物, 管壳, 镀膜

Research Progress of Dielectric Voltage Resistance in Solid State Relays

Yan Liu, Haijian Wang, Youchi Li, Jinbao Li, Lei Zhou, Jialin Gao

China Weapons Industry No. 214 Research Institute, Suzhou Jiangsu

Received: Jun. 29th, 2023; accepted: Sep. 1st, 2023; published: Sep. 12th, 2023

Abstract

In recent years, due to the advantages of fast switching speed, high sensitivity, low power consumption, high reliability and low interference in the whole system, Class 2 solid relay is widely used in aerospace electronics, automotive and aircraft control switches, industrial control systems, telecommunications instruments and other fields. The dielectric withstand voltage of a solid state relay can directly characterize the quality of the components used in the circuit, so as to judge the reliability of the relay. However, with the rapid development of miniaturization and modularization of relays, the voltage withstand value of relays is more and more unable to meet the require-

ments of use. In order to solve the problem of low withstand voltage value of solid state relay, the internal reasons of low withstand voltage value are analyzed from the environmental factors of air humidity and atmospheric pressure. The physical mechanism of optimizing dielectric voltage resistance is described from the perspectives of relay PCB layout, component selection, shell coating and metal particle control.

Keywords

Solid State Relay, Dielectric Voltage Resistance, Metal Particle, Tube, Coating Film

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

固体继电器是微电子学领域、机电领域以及材料学的重要结合点，它的出现为传统继电器行业带来了技术革命，并逐步呈现出代替电磁继电器的趋势。电磁继电器由于在长期加电过程中触电压降、吸合电压、释放电压、接触电阻、触电压力、触电形貌等参数由于材料的疲劳，均会产生不同程度的超差[1]。1类固体继电器局限于工艺、结构、技术指标、应用领域，只能用于地面设备，而2类固体继电器是一种由半导体分立器件、MOS管裸芯片以及一些厚膜电阻网络组成并通过微电子混合组装工艺技术进行组装的全电子式通断转换控制元件，由于其具备低噪音、低电磁射频干扰、长稳定性、强环境适应性等优点在航空航天、兵器船舶、武器装备等自动控制领域大放光彩[2]。然而航空航天电子元件长期工作于低气压、强辐射、湿度大等恶劣环境，并且内部工作模块与密封管壳、输入与输出必须承受一定的过幅电压，才能使内部电子元器件稳定工作，所以提高2类固体继电器耐压值变得尤为重要，现有的2类固体继电器的介质耐电压大多可以达到750V，在兼顾小型化的同时采用双层叠加结构，上层为印制电路板，上下两面均是由半导体分立器件组成的控制电路、振荡电路、隔离电路，隔离变压器位于下面；下层为陶瓷基板，其上主要是由MOS管、稳压管等芯片结合真空共晶焊、金丝键合等工艺组成的输出过压保护电路、输出驱动电路。

为了进一步提高固体继电器的耐压值，本文主要从印制电路板布局布线、使用环境揭示了耐压值受限的原因，并从印制电路板的布局、元器件选型、管壳镀膜、多余物控制等角度阐述了提高耐压值的方法，为后续固体继电器使用领域的扩展提供了理论参考。

2. 影响耐压值的因素

2.1. 气压因素

固体继电器工作的气压环境往往随着海拔高度的变化而不断变化，气压的急剧变化会对整个继电器耐压值的数值产生较大的影响，大气压强与继电器耐压值的变化关系被称为帕邢定律，正如公式1所示：

$$U_s = \frac{BPd}{\ln \left(\frac{APd}{\ln \left(\frac{1}{\gamma} \right)} \right)} \quad (1)$$

其中, 公式中 U_s 为低气压条件下的耐电压值, V; A 为系数, 在空气中为 0.110 V/cm pa ; B 为系数, 在空气中为 2.744 V/cm pa ; P 为大气压强, pa; d 为导线间距, cm; γ 为一个正离子与阴极表面发生碰撞时, 阴极表面逸出的平均电子数。从公式中不难看出, 当电极和气体不变时, 耐电压值 U_s 直接由大气压强 P 与电极间距 d 的乘积决定。固体继电器的上层采用印制电路板, 其密度高、介质层厚度较薄, 因此会对整个继电器的耐压值有很大的影响。2011 年, 刘立国等人研究了在低大气压强条件下, 印制电路板的介质耐电压值与气压变化的内在关联, 并且通过实验得到了当导线间距相同时, 介质耐电压值会随着气压的减小而不断减小的结论, 且当大气压强相同时, 导线间距越大, 其耐压值越大[3], 如表 1 所示。

Table 1. Dielectric withstand voltage and pressure, wire spacing statistical table

表 1. 介质耐电压与气压、导线间距统计表

| 温度/°C | 气压/kPa | 间距/mm | 击穿电压/V | 气压/kPa | 间距/mm | 击穿电压/V |
|-------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|
| 30 | 100 | 0.1 | 590 | 100 | 0.2 | 920 |
| 30 | 70 | 0.1 | 570 | 70 | 0.2 | 680 |
| 30 | 40 | 0.1 | 480 | 40 | 0.2 | 580 |
| 30 | 25 | 0.1 | 450 | 25 | 0.2 | 550 |
| 30 | 16.5 | 0.1 | 410 | 16.5 | 0.2 | 500 |
| 30 | 10 | 0.1 | 390 | 10 | 0.2 | 460 |
| 30 | 8 | 0.1 | 350 | 8 | 0.2 | 390 |
| 30 | 7 | 0.1 | 280 | 7 | 0.2 | 320 |
| 30 | 6 | 0.1 | 140 | 6 | 0.2 | 180 |

2.2. 空气湿度因素

固体继电器工作在复杂恶劣的环境中时, 介质耐压值受到空气湿度、温度等大气环境参数的影响较大。固体继电器小型化进程的快速发展使得管壳侧壁与内部电路间距越来越小。2019 年, 郑跃胜等人研究了在交流电场下, 空气湿度与短间隙击穿电压的对应关系, 得到了击穿电压随大气湿度的增加而不断减小的结论, 其内在原因主要是当给固体继电器施加上千伏的交流电压时, 电极附近会出现大量离子, 较小的空间水汽湿度增大时, 水分子与离子结合形成离子团, 正离子迁移率大幅下降, 正空间电荷不断积累, 当电极极性相反时, 电极附近电场强度得到增强, 从而气体间隙更易被击穿[4]。电极半径越小, 湿度的影响越大。

3. 耐压值的优化方法

3.1. 印制电路板布局对耐压值的优化

刘立国团队对某型号固体继电器印制电路板的导线间距进行了优化, 通过改变的印制电路板元器件的布局, 增加了导线之间的距离, 并使用型号为 19073 的耐压测试仪开展相关实验, 最终通过 1000 V 的耐压测试, 主要是由于当印制电路板导线间距变大时, 电子或离子的自由程会相应增加, 以至于在间隙中产生碰撞电离的概率大大减小, 因此, 击穿电压会变大。所以, 对于应用到航空航天领域的固体继电器, 在保证小型化的基础上, 应通过完善印制电路板元器件的布局来拉开导线之间的距离, 提高其耐高电压

的能力,进一步保证继电器的长时间稳定工作,如图1。



Figure 1. Dielectric voltage resistance test diagram of printed circuit board [3]
图1. 印制电路板介质耐电压实验图[3]

3.2. 多余物控制对耐压值的优化

固体继电器在生产过程中会经过外壳底座的清洗、底座与陶瓷基板的真空共晶焊接、金丝键合、手工焊接固定、半导体分立器件的组装、清洗、人为手工测试、激光封焊、整体电镀等一系列工序,在这些工序中会产生较多的金属毛刺、镀层脱落、焊锡渣等金属导电多余物[5],点焊过程是一个多变量的线性耦合过程,容易受到焊接电流、焊接时间、焊接压力、电极材料和形状、焊接零件表面状态、镀层等因素的影响,所以点焊飞溅多余物是金属导电多余物的主要来源,当继电器在经受激烈振动冲击实验和高低温环境后,这些多余物会处于自由的状态,造成元器件短路失效、印制电路板导线间距缩短、键合丝与外壳距离减小等问题,从而导致耐压值降低,绝缘电阻减小,最终致使电路发生失效现象[6][7]。

为避免多余物造成继电器耐压值的降低,从“人、机、法、料、环、测”等角度详细阐述对导电多余物控制的方法,首先保证生产操作人员要经过多余物去除、内部目检等工序的职业技能培训,并且成绩合格;然后对于生产继电器的设备、工具、检测仪器要专人专管、定期维护保养清洁,生产过程中进行在线测量、精准监控焊接参数[8];由于材料的质量直接决定了多余物的大小、数量以及去除的难易程度,所以在生产过程中确保用到的焊锡、焊膏、助焊剂的质量用法用量符合生产文件的要求。再者,每道工序在生产中都应严格按照工艺文件执行,对于多余物尽量去除,除不掉的多余物通过固定胶将其固定到某一位置。最后,环境和测试要贯穿于整个生产流程中,在装配、测试、检验、周转、储存上都应使继电器处于超净环境中,保证最大程度的洁净[9]。

3.3. 元器件选型与管壳镀膜对耐压值的优化

介质耐电压主要表征的是继电器输入输出与管壳的绝缘性能,因此,为了提高固体继电器的最高耐压值,首先应保证电路所用核心电容器具备较高的耐电压能力。汪于成等人制作了多层叠片陶瓷电容器,并通过实验验证了多层电容器的耐压性能相比于单层电容器提升了29%~33% [10],实验结果如表2所示,其改善耐电压的物理机制主要是多层陶瓷电容器可以看作是多个单层电容器串联,当对多层陶瓷电容器

施加高压时,电压会分散至多个单层电容器,从而起到改善耐压性能的效果。刘成等人围绕生坯成型、瓷件烧结、电容器装配三个方面研究了提升耐压值的方法,通过增加生坯的密度、控制瓷件烧结时间、烧结温度以及烧结曲线,提高树脂与瓷件的结合力,极大的增加了电容器的耐压水平[11]。

Table 2. Pressure comparison experiment

表 2. 耐压对比实验

| 电容器结构 | 电容芯片尺寸/mm | 常温耐压(20℃) | 高温耐压(85℃) |
|-------|-----------------------|-----------|-----------|
| 单层 | $\Phi 7.5 \times 4.3$ | 15 kV | 12.5 kV |
| 三层 | $\Phi 6.6 \times 3.6$ | 20 kV | 15.5 kV |
| 四层 | $\Phi 7.5 \times 3.6$ | >20 kV | >16 kV |

2021年,陕西群力电工有限责任公司发明生产了一种可承受2000V耐压的管壳,为之后固体继电器的广泛应用提供了样品支撑。其管壳主要由钨铜底板、铁镍合金侧板、氧化铍绝缘基板、钨铜焊盘以及陶瓷绝缘子构成,同时采用热沉结构设计,提高了继电器工作时的散热效率[12];另外,固体继电器内部导电器件与金属管壳底座之间爬电距离为3.2mm,钨铜焊盘绝缘间隙为2.4mm,陶瓷玻璃绝缘子采用高温烧结技术增大了引出端与金属管壳的绝缘间隙,使其全部满足了管壳与导电器件、导电器件之间以及引出端与金属管壳之间经受2000V的耐压值的条件,具体结构示意图请见图2。

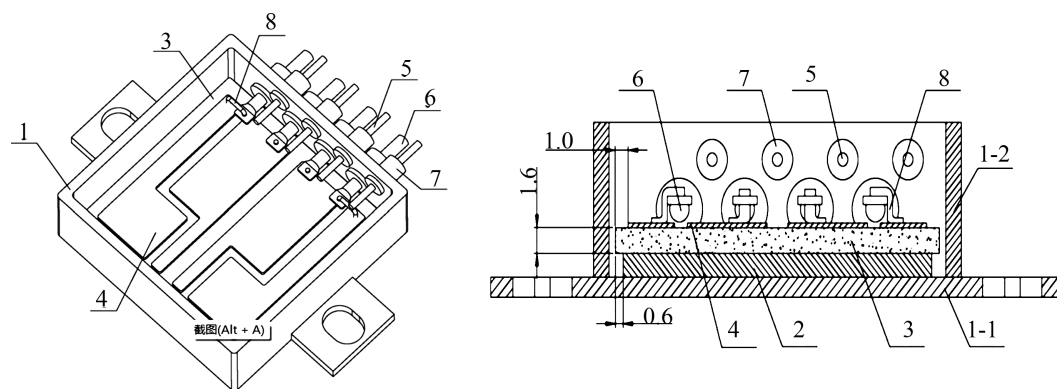


Figure 2. Schematic diagram of metal shell: 1: metal casing; 2: metal base; 3: insulating substrate; 4: metal pad; 5: input terminal; 6: output terminal; 7: ceramic insulator

图 2. 金属管壳示意图: 1: 金属管壳; 2: 金属基板; 3: 绝缘基板; 4: 金属焊盘; 5: 输入端子; 6: 输出端子; 7: 陶瓷绝缘子

为了进一步提高固体继电器抗交流高电压的能力,2023年,周国方等人提出了在金属管壳上以磁控溅射的方式沉积生成复合绝缘膜的方法,该复合绝缘膜主要由五氧化二钽薄膜、 Al_2O_3 薄膜、 SiO_2 薄膜自下而上堆叠组成[13],具有良好的高耐压、高可靠、小应力等优点,对耐压值的提升提供了有效的手段。

4. 结论

文章分析了2类固体继电器在不同使用环境下,介质耐电压低的内在物理机制,并在固体继电器设计、选型、生产等角度提出了相应的解决措施,通过优化印制电路板的内部走线,增加导线之间间距、多次电路洁净、镀复合绝缘膜等手段大大提高了继电器的抗高压能力,提高了其在复杂恶劣环境中工作的可靠性,扩展了2类固体继电器的应用领域,为后续继电器的发展提供了理论支撑与技术基础,缩短了与国外继电器行业的差距。

参考文献

- [1] 陈俊峰, 杨愈印, 齐玉祥. 电磁继电器长期加电可靠性研究[J]. 桂林航天工业学院学报, 2023(1): 9-16.
- [2] 李富成. 混合组装固体继电器工艺设计技术研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [3] 刘立国, 韩爱芳, 贾燕. 印制电路板低气压条件下的耐电压测试[J]. 印制电路信息, 2011(9): 35-42.
- [4] 郑跃胜, 任建华, 舒胜文, 张佳. 空气湿度对非均匀交流电场下短间隙击穿特性的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1352-1359.
- [5] 陈俊峰, 唐宏基, 王明文. 电磁继电器金属多余物控制技术研究[J]. 机电元件, 2022, 42(1): 14-18.
- [6] 王虹, 秦志英. 从生产六要素看密封固体继电器多余物控制[J]. 机电元件, 2011, 31(4): 21-27.
- [7] 陈俊峰, 文尚晖, 程纲. 电磁继电器非金属多余物的控制技术研究[J]. 机电元件, 2020, 40(4): 46-49.
- [8] 汪于澄. 改善中高压陶瓷电容器耐电压性能的工艺探索[J]. 电子元件与材料, 1994, 13(2): 19-21.
- [9] 刘成, 随辰. 从生产六要素看密封固体继电器多余物控制[J]. 机电元件, 2011, 31(4): 21-27.
- [10] 韦明彰, 唐宏基, 王明文. 大功率继电器点焊仿真分析与飞溅多余物控制技术[J]. 电焊机, 2018, 48(12): 45-49.
- [11] 王明文. 正交试验方法在继电器点焊参数优化中的应用[J]. 机电元件, 2011, 38(5): 38-42.
- [12] 李彩英, 刘亚锋, 杨涛. 一种高介质耐电压的固体继电器管壳[P]. 中国专利. CN202123267684.6, 2022-05-24.
- [13] 周国方, 余浪, 何峰. 高介质耐电压复合绝缘膜及其制备方法、高介质耐电压合金薄膜压敏芯体及其制备方法[P]. 中国专利. CN202211304478.4, 2023-01-31.