

航天电磁继电器失效机理及分析

王立娟

北京航天新立科技有限公司 北京 100074

摘要: 航天产品对电磁继电器的可靠性要求极高,任何失效情形必须找出失效原因,进行失效分析及归零。本文结合国内外电磁继电器生产现状以及生产和工程实践的积累,按照失效分析的基本准则,通过具体案例的分析研究,对电磁继电器生产和使用过程中常见的失效模式及失效机理进行分析。对影响电磁继电器失效的典型因素及其作用机理进行详细探讨,结合失效机理研究提出电磁继电器的可靠性改进措施,对改进产品设计和提高产品可靠性具有重要意义。

关键词: 电磁继电器;失效分析;失效模式;失效机理;改进措施

Failure Mechanism and Analysis of Aerospace Electromagnetic Relay

Lijuan Wang

Beijing Aerospace Xinli Technology Co., Ltd, Beijing, 100074

Abstract: Aerospace products have extremely high reliability requirements for electromagnetic relays, and any failure situation must identify the cause of the failure, conduct failure analysis, and reset to zero. This article combines the current production status of electromagnetic relays at home and abroad, as well as the accumulation of production and engineering practices. According to the basic principles of failure analysis, through specific case analysis and research, it analyzes the common failure modes and mechanisms during the production and use of electromagnetic relays. Conduct a detailed discussion on the typical factors and their mechanisms that affect the failure of electromagnetic relays, and propose reliability improvement measures for electromagnetic relays based on the study of failure mechanisms. It is of great significance for improving product design and improving product reliability.

Key words: Electromagnetic relay; Failure analysis; Failure mode; ailure mechanism; Improvement measures

1 引言:

电磁继电器是一种由控制电流通过线圈时产生的电磁吸力来驱动磁路中的可动部分,从而实现触点的开、闭或转换功能的控制元件,电磁继电器常作为控制元件被广泛应用于航空航天、工业自动化、交通以及农业等领域中,它可以提供多组触点和常开常闭触点,具有低的残留输出电压、不需散热片、价格便宜、无漏电流、AC 和 DC 兼容和尺寸紧凑等特点。由于生产环境、工艺以及继电器本身的结构设计等原因,电磁继电器常发生偶然失效以及批次失效。目前,在所有失效分析电子元器件中,电磁继电器失效分析的比例相当高,仅次于单片集成电路,与分立器件齐平。

2 电磁继电器的定义

电磁继电器是根据“电→磁→力”的原理,利用电流在电磁铁(线圈)、铁芯与衔铁之间产生吸力作用而工作的一种自动控制开关,控制系统(输入回路)与被控制系统(输出回路)相互隔离,又可关联驱动,可实现小电流控制大电流。

3 电磁继电器的工作原理

电磁继电器一般由铁芯、线圈、衔铁、触点簧片等组成。在线圈两端施加一定的电压,线圈中就会流过一定的电流,从而产生磁效应,衔铁在电磁力作用下带动转换触点与动触点(常开触点)吸合。

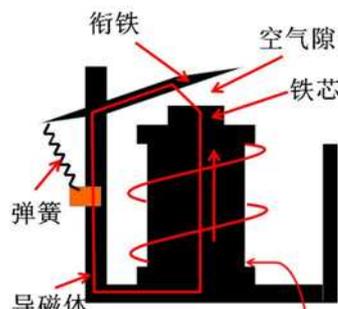


图1 电磁继电器工作原理图

原理:根据右手螺旋定则(安培定则),当线圈通电后,线圈的激磁电流产生磁场,磁通回路为:铁芯→空气隙→衔铁→导磁体→铁芯。衔铁在空气隙处受到电磁吸力的作用。当电磁吸力大于弹簧的反力时,衔铁动作,吸向铁芯,当线圈断电后,衔铁在反力的作用下又回到其起始位置。(见图1)

3 电磁继电器生产现状

1) 国外电磁继电器现状

国外继电器公司传统的电磁继电器技术已趋成熟,品种齐全;系列化开发与宇航标准出台,可靠性指标不断统计提高,制造过程控制技术成熟,已基本实现自动化或半自动化精密装配生产。

2) 国内电磁继电器现状

国内军用继电器生产厂家目前仍大量采用手工装配,继电器装

配过程中需要采用人工调校保证继电器尺寸、参数满足要求，自动化程度不高。零件加工能力主要是设备的差异导致加工能力有所差别。总体上各生产厂家制造水平相当。

4 电磁继电器存在的主要问题及与产品规模化生产存在的差距

由于设计结构、零件加工精度一致性、磁性材料加工处理以及装配工艺水平与国外还存在差距，使得产品的性能和国外产品相比，性能指标和可靠性还存在差距。具体表现如下：

1) 系列产品零组件通用化、系列化以及产品一致性、可靠性方面与国外生产水平有一定差距。

2) 影响产品关键特性的接触件、壳体、模具等用到的钣金加工、数控机械加工与国内外的技术还有很大差距，导致零件质量一致性、模具精度还难以满足大规模、自动化装配批生产。

3) 继电器装配过程中，总体装配技术以手工操作为主，焊接后精度和变形控制、清洗、测试和内部气氛控制一致性等有待提高。

因此，提高电磁继电器生产效率、规模化生产能力，非常迫切。

5 电磁继电器失效分析方法、失效模式与失效机理

在实际的生产、贮存、运输和使用过程中，电磁继电器容易发生失效，进而影响整个系统的正常运作，甚至导致灾难性的后果。对电磁继电器进行全面的失效物理分析，剖析失效机理与失效模式，可以发现电磁继电器的固有质量问题，也可能发现因不按规定条件使用而失效的使用质量问题。通过向有关方反馈，促使责任方采取纠正措施，提高电磁继电器的固有可靠性或使用可靠性。

5.1 电磁继电器的失效分析方法

电磁继电器由于结构复杂，各个组成部件以及连接处都可能发生失效。另外考虑到其内部结构的特性，其失效检测与失效分析往往较为复杂。一般而言，对电磁继电器进行失效分析时，首先要从失效地点收集必要信息，了解失效发生的背景和环境；然后使用各种技术手段对失效件进行失效分析，进而确定失效模式与失效特征；最后根据得到的相关信息，结合失效件的设计、材料和制造工艺等特点，得到失效模式对应的失效机理或失效原因。

5.2 电磁继电器的失效模式、失效机理及预防措施

电磁继电器的失效主要分为使用不当失效模式、固有失效模式以及筛选失效模式。常见继电器的失效模式、失效机理及预防措施如表一所示。

表一常见继电器的失效模式、失效机理及预防措施

失效模式	失效机理	预防措施
容性负载产生浪涌电流，触点粘接	触点承受过载浪涌负载，导致触点烧蚀、熔焊粘接	改进电路设计，防止触点与电容形成小电阻回路产生过载浪涌。例如：串联电阻
大小继电器并联，产品误动作	大功率继电器线圈储能很大，可驱动TO-5继电器产生误动作	1、避免大功率继电器与TO-5继电器并联使用，并被同一信号驱动； 2、每只继电器线圈进行消反电动势设计（反向并联二极管）
电磁干扰，产品不正常动作	电路板上继电器的安装位置同扼流圈挨得过近。	灵敏型继电器，错开电磁干扰源安装。
阻性负载，触	吹弧反向，导致触	1、需要反向加电，降额使用；

点粘接	点烧蚀、熔焊粘接	2、可使用无极性要求的接触器。
有机膜污染导致接触电阻大	触点工作时不会产生电弧自我清洁，但是触点容易产生膜电阻	对继电器内部触点表面和内部气氛进行控制，减小膜电阻的产生。
参数漂移	高、低温筛选试验后，簧片应力释放导致参数变化，引起动作电压升高	使用时，不超过温度使用；对继电器内的簧片参数稳定性控制。
低温水汽结冰导致触点断开	产品漏气，内部水汽含量高，低温下水汽凝结，导致触点接触不良。	产品流转、试验和装机过程中，保护引出端，防止玻璃绝缘子产生裂纹导致密封性下降。
镀层冷粘	两个触点长时间接触，表面镀金层相互咬合，冷焊粘接	提高镀层硬度，控制镀层质量
高温吸合电压超差	高温下线圈电阻增大，通过电流减小，线圈提供的电磁力减小，吸合两步	优化吸反力配合，提高产品调试余量。
密封性超差	玻璃绝缘子受应力损伤，出现微裂纹	产品筛选试验过程中，保护引出杆避免受弯曲
介质耐压不合格	玻璃绝缘子上有污染物，在水汽含量大的情况下形成电流释放通道	筛选试验时，接触产品需带上无尘指套，指套被污染后，及时更换
振动试验触点抖	动触头压力小，导致振动时触点断开	通过机械老练释放应力，保证触头压力稳定；调试时保证保持力、弹簧力稳定
接触电阻超差	内部清洗不干净、烘烤不彻底	细化清洗烘烤工序；采用老练、电清洗等措施

6 失效案例分析

6.1 6JRXM-2型电磁继电器绝缘电阻下降问题

失效模式：

6JRXM-2型电磁继电器为下厂验收合格产品，装机复测时还要进行常温电参数测试及外观检查，出厂前在车间已进行整机的绝缘电阻测试、耐压测试、振动试验、寿命试验、外观检查等检验。该器件在使用中用来控制信号灯。系统加电时，信号灯异常闪亮，经排查发现继电器6JRXM-2失效。对继电器进行气密性检查，粗、细检漏均不合格。用绝缘电阻测试仪对继电器进行绝缘测试，各个管腿对外壳绝缘电阻严重下降（见图2）。



图2 继电器形貌

失效机理:

继电器中引线与壳体之间的绝缘电阻下降是继电器的一种常见失效模式,产生该种失效的原因主要有以下几个方面:第一是玻璃绝缘子上存在外来油污,如 C、S、K、Ca 等;第二是玻璃绝缘子本身破裂吸附潮气后而导致绝缘电阻下降,第三是 Ag 离子迁移失效,Ag 离子迁移可引起绝缘电阻下降。

经分析,该只继电器内部存在(腐蚀性)沾污物残留以及外壳不密封等原因,造成在使用过程中,这些腐蚀性介质和沾污物在水汽和电应力作用下,对玻璃绝缘子周围及焊缝周围材料产生腐蚀,形成较多沉积物,导致电磁继电器绝缘电阻下降。

建议控制措施:

- 1) 在封焊过程中,产品应水平放置,防止外壳转角部位焊锡流动;
- 2) 焊接过程应加强对焊缝的焊锡饱满程度的检查;
- 3) 对操作者加强封焊工艺的技能培训;
- 4) 针对锡封焊产品建议使用单位在装机使用前增加检漏试验。

6.2 KJZC-30M 型电磁继电器常闭触点开路问题

失效背景:

KJZC-30M 型电磁继电器在按工艺文件进行整机调试、温度循环试验、随机振动试验,功能测试合格后开始电应力功率老炼,每隔 5 个循环进行一次测试,在第 5 次测试时,产品出现异常即在未加点的状态下,错误显示为常开状态。

失效分析:

该继电器失效是由于包扎线圈的聚四氟乙烯生料带细小断头因静电吸附,卡在轭铁与支架接触缝隙等隐蔽部位,在清洗和镜检时没有发现并清除。在继电器工作过程中,触点间形成电场将其吸附到触点周围,当它漂移到静触点与接触簧片的接触部位时,就会导致触点不通。(见图 3)

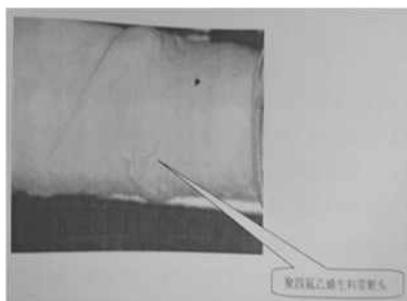


图 3 包扎线圈的聚四氟乙烯

建议控制措施:

- 1) 线圈包扎工序中,操作者应改变包扎缠绕方向,将断头向下捋平,这样在装配后断头被零件压住,线圈外包扎周围处的聚四氟乙烯生料带拉丝就不会被摩擦脱落而形成有机多余物。
- 2) 继电器密封前对内部机构进行等离子清洗,以便更好地去除有机污染。
- 3) 建议将外线圈包扎材料由聚四氟乙烯生料带改为聚四氟乙烯薄膜,该材料表面光滑,周边不产生拉丝。
- 4) 建议使用单位在下厂验收工作中对该型号继电器加严检查 PIND

6.3 4JT20-1 型电磁继电器功能失效问题

失效模式:

4JT20-1 型电磁继电器功能失效。

失效机理:

该继电器在锡焊引线时,带入锡渣类多余物,使用过程中金属多余物移动到动触点与角片之间,加电后一组常开触点和反力簧片的一端短路烧毁,反力簧片的一端与限位簧片熔融为一体,导致继电器线圈包加电后,反力簧片无法移动,引起衔铁无法动作,引起功能失效。(见图 4)



图 4 触点与簧片形貌

建议控制措施:

- 1) 建议将线圈引出端与引出杆的连接由锡焊改为点焊。并采用康铜安装线作为线圈引线。
- 2) 继电器套壳前增加一道去离子水清洗工序,采用专用的多工位喷淋设备对继电器整件进行“加点、自动、流动、动态”喷淋,以增加对刷笔难以触及部位的洁净处理的能力和效率。
- 3) 建议使用单位在装机前,对大功率继电器有针对性地进行 PIND 检查和绝缘电阻测试。

7 结语

本文对电磁继电器常见的失效模式与失效机理进行了研究,并完成了三个失效案例分析。综上,对于电磁继电器生产厂家来说,改善生产环境,完善质量控制及检验制度对预防此类失效模式的发生将会起到非常关键的作用。对于使用单位来说,设计人员应尽量选择成熟、高可靠性产品;下厂验收人员加强对厂家生产流程工艺的监控;加强检验人员的检测手段以剔除早期失效及问题隐患;车间操作人员加强培训,避免低层次错误。元器件的质量得到有效控制,才能保证整机产品的质量可靠性,进而提高一次检验的合格率。元器件的质量可靠是任务产品质量可靠性保障的先决条件。保证元器件质量才能保生产,保发展。

参考文献:

- [1]黄娇英,胡振益,高成,等.军用电磁继电器失效分析[J].现代电子技术,2013-05-15.
- [2]高东阳,席善斌,等某机载电子设备中电磁继电器的失效案例分析[J].环境技术,2019:3-8
- [3]朱军辉.电磁继电器常见失效模式、失效原因及失效机理.百度文库,2021:4-12
- [4]王香芬,高成,付桂翠.电磁继电器电测失效分析技术研究[J].低压电器,2011(2):6-9.

作者简介:王立娟,1985 年 2 月,女,天津,工程师,大学本科,研究方向为元器件检验;通讯地址:北京市房山区长阳镇,102445