

文章编号:1674-8190(2021)04-163-05

# 直流航空接触器熔焊故障分析及预防建议

周跃飞

(中国民用航空飞行学院 航空安全办公室, 广汉 618307)

**摘要:** 直流航空接触器由于其体积小、负载大、高可靠性、长寿命等特点,广泛应用于航空器各大系统的电气部件中,是现代航空器的重要电气控制部件。直流航空接触器在断开和闭合过程中,触头会受到电侵蚀,当侵蚀达到一定程度后,动静触头将焊接在一起,接触器也将失去控制,造成航空器电源等重要系统故障。本文通过对某机型起动机接触器熔焊故障情况及触头熔焊分析,结合2016—2019年该型接触器平均故障万时率,统计其故障发生的时机和原因。结果表明:该直流航空接触器的维护属于时控件寿命曲线态势分布,建议对其按时控件管理。

**关键词:** 直流接触器;熔焊;整机断电;故障万时率;适航

中图分类号: V242.4<sup>+</sup>22

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.04.19

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Analysis and Prevention Suggestion of DC Aviation Contactor Fusion Welding Fault

ZHOU Yuefei

(Office of Aviation Safety, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

**Abstract:** Aviation DC contactor because of its small volume load characteristics, high reliability, long life, is widely used in aircraft electric parts of each big system. It is of great importance in modern aircraft electrical control unit. The DC contactor in the process of opening and closing, the contact part will get electrical erosion. When erosion reaching a certain degree, dynamic and static contact parts will be welded together, contactor will be out of control and cause the important system fault in the aircraft power supply. Based on the fault analysis of a starter contactor of a certain type of aircraft, and combining with the average fault rate of the contactor in 2016—2019, the suggestions on the timely control management of the component are put forward, which can effectively prevent the occurrence of major faults of other aircraft systems caused by the fusion welding of contactor.

**Key words:** DC contactor; fusion welding; full aircraft power off; fault hourly rate; airworthiness

收稿日期: 2020-10-14; 修回日期: 2020-11-29

基金项目: 四川省科技计划项目(2020JDR0373)

通信作者: 周跃飞, cafcff@163.com

引用格式: 周跃飞. 直流航空接触器熔焊故障分析及预防建议[J]. 航空工程进展, 2021, 12(4): 163-167, 174.

ZHOU Yuefei. Analysis and prevention suggestion of DC aviation contactor fusion welding fault[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(4): 163-167, 174. (in Chinese)

## 0 引言

接触器是一种适用于远距离频繁接通和分断交直流主电路及大容量控制电路的电气控制器件,其本质是通过“小电流”控制电流较大电路的通断,通过驱动线圈的通断带动衔铁动作,从而控制动静触头的闭合和断开,在电路中起着自动调节、安全保护、转换电路等作用,是航空器配电系统的关键控制和保护部件。

目前,研究人员对接触器的研究多是失效原因分析,例如,乔鑫磊<sup>[1]</sup>指出接触系统失效是电磁继电器最主要的失效模式,而接触系统失效中 60% 以上为触头粘接失效,并研究了触头分合过程中不同因素对熔焊力的影响规律。部分研究人员从接触器触头材料、触头现状来分析电侵蚀和熔焊原因,例如,韩春阳等<sup>[2]</sup>、郭凤仪等<sup>[3]</sup>对常用触头材料进行了介绍,总结了各类材料的性能表现,指出电弧侵蚀造成的触头表面形貌恶化是导致触头熔焊并失效的主要原因;周晓龙等<sup>[4]</sup>、魏国青等<sup>[5]</sup>研究了不同电触头材料的接触电阻、抗熔焊性、材料转移特性,提出电接触过程材料为阳极转移,转移主要以熔桥方式进行,证明对阳极与阴极触头进行每次电接触测试时都发生了质量减小;朱青成等<sup>[6]</sup>采用触头模拟装置进行触头的电寿命试验,分析接通过程中熔焊现象发生时的触头状态,得出熔焊发生具有随机性的结论;王珩等<sup>[7-9]</sup>等应用威布尔分布分析了不同粗糙度、不同曲率半径对电触头材料静熔焊力的影响,以及电触头材料在不同接触状态下塑性变形对静熔焊力影响。

为了解决接触器触头熔焊问题,同时又要保证优异的开断性能,张石松等<sup>[10]</sup>从材料研究着手在熔铸工艺的基础上,通过添加第三元素金属 Te 制备 CuCrTe 触头,其能够有效提高材料的抗拉强度,并且已经得到成功应用;肖翼洋等<sup>[11]</sup>从管理角度出发指出开关类器件寿控缺失、维护不足等问题,从技术上、制度上厘清器件维护面临的主要问题及产生原因。还有研究人员从结构设计出发,例如,刘铭光<sup>[12]</sup>、刘天宇等<sup>[13]</sup>分别从接触器结构和智能控制出发设计了一种磁锁定接触器和直流接触器智能控制单元,能够在接触器过载时或电侵蚀有恶化趋势时实现反延时保护和快速保护的

功能。

但相较于普通工业,民用接触器、航空接触器选用的标准首先是稳定的可靠性。因为相对于接触器自身的故障,人们更关注其次生故障。在飞机上负荷较大的电气设备如机载电源入网、动力装置起动、飞行姿态操作、起落架收放等核心系统通常采用接触器控制,这些系统中任何一个部件失去控制都可能导致航空器发生灾难性后果。

本文从一起飞机起动机接触器熔焊故障导致的整机断电入手,分析接触器触头熔焊机理,统计该型接触器 2016—2019 年的故障数据。

## 1 接触器熔焊故障简介

2017 年 5 月 14 日,一架塞斯纳 172 飞机从跑道起飞约 5 min 后在机场 3 边离跑道中心点约 4 n mile (1 n mile=1 852 m) 处从 ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) 监视器上消失,塔台可目视其方位,但不能建立任何机载通信设备联系,由于飞机高度仅为 300 m,在尝试后通过手机联系到机组,得知飞机整机断电后立即清空跑道,大约 8 min 后机组通过目视程序安全落地。

在这起飞机整机断电故障中,飞机虽然安全降落,无人员伤亡和飞机损伤,但依照《民用航空器事故征候》5.16 款“飞行中失去全部电源”被定性为一般飞行事故征候<sup>[14]</sup>。类似断电事故如果发生的地点在远离机场的航路上或者发生在能见度低而无法识别参照物的天气或夜晚,失去通信导航设备的引导,飞机可能迷航,后果不堪设想。

塞斯纳 172 飞机使用一额定电压 28 V、额定电流 60 A 的直流发电机作为飞机主电源,使用一个 24 V、容量 12.75 AH 的铅酸电瓶作为飞机的辅助/应急电源<sup>[15]</sup>。正常飞行中发电机作为飞机电源,电瓶作为发电机故障时飞机的应急电源,两套供电方式理论上不应出现整机断电的情况。

飞机滑回后机务人员上机检查,发现起动机齿轮已打坏,起动机壳体温度很高,测量起动机电机已烧断,拆下并分解起动机接触器,发现动静触头粘合在一起,分开后可以看见起动机接触器正极主触头有明显烧蚀现象,已形成约 2 mm 的凹坑。起动机接触器正极静触头熔焊粘连(如图 1 所

示),初步判断为起动机接触器熔焊粘连后起动机无法退出工作,持续大负荷输出导致电网电压下降至低于发电机/电瓶接入接触器释放电压,使得发电机和电瓶退出电网,导致整机断电。

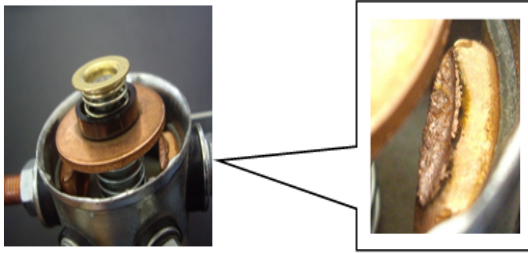


图1 故障 X61-0007 型接触器分解及正极静触头放大图  
Fig. 1 Breakdown of fault X61-0007 contactor and enlarged view of positive static contact

## 2 接触器工作原理

塞斯纳 172 飞机起动机接触器的件号为 X61-0007,其结构如图 2 所示。该接触器为动铁式接触器,动触头为一康铜圆盘。工作时,动触头 1 在控制线圈 4 产生的电磁力驱动下克服弹簧 5 的张力向下运动,与触头 2、3 吸合,起动机工作电路导通,起动机工作。如果控制线圈 4 断电,电磁力消失,动触头 1 在弹簧 5 的恢复力作用下向上运动,当动、静触头分离时,起动机工作电路断开,起动机退出工作。

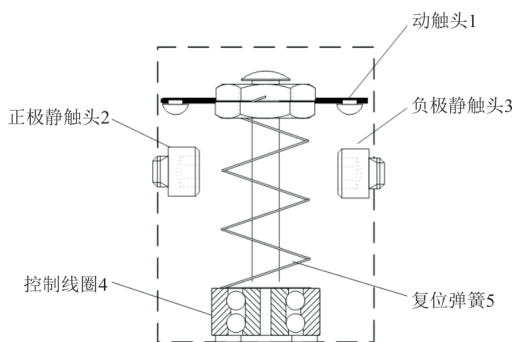


图2 X61-0007 型接触器简图  
Fig. 2 Schematic diagram of the X61-0007 contactor

## 3 接触器触头熔焊分析

动静触头看似两个光滑平台,但从微观上看,两者表面实则凹凸不平,因此,两者接触时,其表面不可能完整贴合,实际上接触面积比目视的接

触面积小得多。电流仅仅通过触头间局部很小的接触点。此时,当电流由导线通过触头时,电流就因为触头接触面积的缩小而产生阻力,即收缩电阻。

假定在两个触头相接触时,仅存在一个真正的接触点,那么,该触头所具有的电阻为

$$R_c = \frac{\rho}{2} \left( \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\gamma} \right) \quad (1)$$

式中: $R_c$ 为接触头的收缩电阻; $\rho$ 为接触材料的电阻系数; $\gamma$ 为触头元件的半径; $\alpha$ 为实际接触头面积的半径。

当接触点的数目  $n > 1$  时,触头间真正的接触面积之和  $A = n \cdot \pi \cdot \alpha^2$ ,此时:

$$R_c = \frac{\rho}{2n\alpha} = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi}{nA}} \quad (2)$$

即  $R_c$  的大小取决于接触头的数量  $n$  和总接触面积  $A$  的大小。

根据焦耳定律,接触元件在接触部位的温度  $T$  在理论上为

$$T = \frac{u^2}{8\rho\lambda} \quad (3)$$

式中: $T$ 为触头温度; $u$ 为接触部位的电压降; $\lambda$ 为接触材料的导热系数。

因为接触部位的电压降  $u$  等于收缩电阻  $R$  乘以通过接触部位的电流  $I$ ,于是:

$$T = \frac{u^2}{8\rho\lambda} = \frac{uIR_c}{8\rho\lambda} \quad (4)$$

式中: $I$ 为接触部位的电流。

从式(2)、式(4)可以看出:接触头的数目  $n$  越小,收缩电阻值越大,触头接触部位的温度  $T$  越高。

触头分离时触头的电侵蚀机理:触头分离时,由于接触压力减小,电流在触头间的物理接触头迅速减少,触头面积减小,触头间电阻迅速增大,使得接触电压激增。

从焦耳定律  $Q = I^2 R t$  可知,电流通过导体产生的热量跟电流强度的平方成正比、跟导体的电阻成正比、跟通电时间成正比。接触器触头分离电路可以视为纯电阻电路,电流做的功全部用来产生热量,即  $W = UIt$ 。此时,根据欧姆定律,有  $W = \frac{U^2}{R} t$ 。

上述激增电压产生的焦耳热能触头表层微区域材料熔化,熔化的金属在机械力和电弧力作

用下产生流动和喷溅。当液态区域温度持续升高后,沸腾的液体还将蒸发气化。流动、喷溅和气化都将造成触头接触区域材料的侵蚀损耗。

触头闭合时触头熔焊的机理:触头闭合过程中,触头间原本处于绝缘状态的空气,随着触头间隙逐渐缩短,中间空气在两端触头足够强的电场作用下将失去介电性能成为导体,也即电击穿。触头中的游离电子,在电击穿强电场作用下,电子被加速获得动能,轰击空气和触头材料里的其他电子,电子间剧烈的碰撞所产生的高温足以使触头表面材料熔化,即静熔焊机理。

另外,由于零部件制造工艺因素,触头接触面并非完全处于同一平面上,当动静触头在吸合作用力下以一定速度碰撞时,触头间的电动斥力和衔铁与铁心的碰撞都可能引起触头的机械振动和弹跳。触头振动弹跳后,触头分离产生电弧,电弧高温使接触面金属熔化、溅射。在经过反复弹跳后,触头最后吸合在一起,触头表面已经熔化的金属迅速冷却,凝固在一起,就可能导导致动、静触头焊接在一起,也就是触头熔焊。

#### 4 接触器故障数据统计分析

某单位现有塞斯纳 172 飞机 174 架,分布在 5 个运行基地,通过该单位统一的飞机故障填报系统对该型接触器(X61-0007)故障数据进行收集,其中 2016—2019 年的故障如表 1 所示。

表 1 2016—2019 年 X61-0007 故障量统计

Table 1 Statistics of the number of failures in X61-0007 from 2016 to 2019

年份	故障数量	故障发生时机			故障发现人员	
		空中	地面	定检	机组	机务
2016	10	3	5	2	3	7
2017	13	8	4	1	11	2
2018	16	4	4	9	5	11
2019	9	3	1	5	3	6

2016—2019 年,该单位所有塞斯纳 172 飞机共发生 48 起 X61-0007 型接触器故障,期间,所有塞斯纳 172 飞机共计飞行 683 007 h,该型接触器平均万小时故障率为 0.7,其中接触器熔焊粘连故障万时率为 0.01。2016—2019 年 X61-0007 故障率统计如图 3 所示。

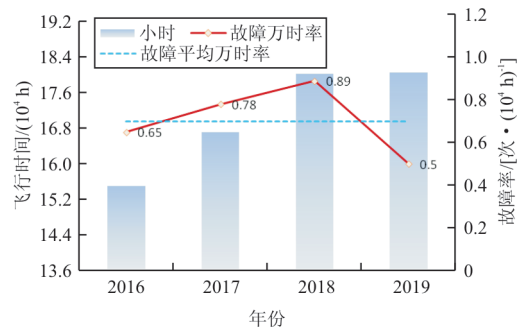


图 3 2016—2019 年 X61-0007 故障率统计

Fig. 3 Statistics of X61-0007 failure rate from 2016 to 2019

按该型接触器故障发生时机统计:空中发生 17 起,占比为 37.5%;地面发生 13 起,占比为 27.1%;定检检查发现 17 起,占比为 35.4%。

按该型接触器故障原因统计:接触器控制线圈不工作 9 起,占比为 18.8%;接触器触头接触压力不稳定 29 起,占比为 60.4%;接触器触头间接接触电阻大 9 起,占比为 18.8%;触头粘连 1 起,占比为 2.1%。

该型接触器故障发生最多的月份为 3 月、9 月和 10 月,均为 7 起;最少为 1 月、2 月,分别为 1 起和 0 起。1 月、2 月期间该单位放寒假,飞行量减少,该单位塞斯纳 172 飞机月平均飞行 8 902 h。3 月、9 月、10 月为飞行训练的高峰期,该单位塞斯纳 172 飞机月均飞行 17 336 h。X61-0007 故障量按月统计如图 4 所示,可以看出:该型接触器故障与天气、外界环境无必然联系,仅与飞行时间成正比例关系。因此,该件的维护属于时控件寿命曲线态势分布,可参照时控件的管理方法进行管理。

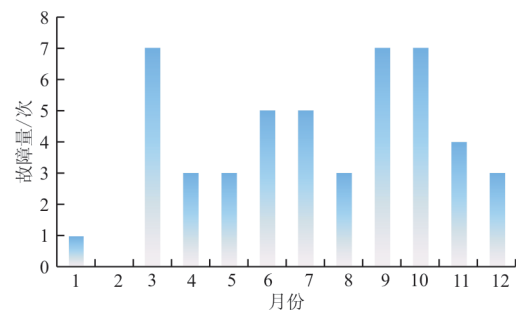


图 4 X61-0007 故障量按月统计

Fig. 4 Monthly breakdown of X61-0007

#### 5 预防建议

虽然接触器熔焊故障纯属机械故障,与人为因素和组织管理没有任何关系,但作为飞机运行维护单位在执行厂家推荐的维护检修标准时,可

以适当提高。因为事发飞机为培养飞行学员的教学飞机,教学性质就决定了该飞机和其他通航单位的飞机不同,它有更密集的飞行量、频繁的起降、较为粗猛的操作等使用特点,发动机的起动、关停次数大幅度多于其他同类飞机。由于发动机频繁的起动,对起动接触器的电侵蚀程度必然超出飞机厂家对起动接触器的初始适航的设计要求。

结合机型维护手册、该单位飞行特点以及上述故障统计分析,在满足航空器适航性要求的前提下,建议把X61-0007型接触器由故障更换件改为时控件予以控制,其到寿时限设定为2 000 h。这样,该型接触器平均故障万时率将由0.7下降到0.14。接触器熔焊粘连的故障万时率相应下降为0.002。另外,在时限内,飞机每100 h定检时增加接触器性能测试项目,以此来监控该部件的工作性能,如果性能有变差趋势遂将其更换。在2 000 h时限到了之后,无论其性能参数如何即刻更换该部件以确保飞行安全。

将该接触器作为时控件和定检监控件只是飞机使用单位在满足航空器适航的基础上所做的预防手段。根本上解决还需飞机制造厂家接受使用单位的反馈信息,另选满足飞机负荷需求的其他型号接触器,以达到稳定可靠工作的适航审定要求。

## 6 结 论

塞斯纳172飞机起动机接触器的电侵蚀现象随着飞行时间的增加而成正比例的累加。兼顾航空器运行单位特点和适航性要求,将X61-0007型航空直流接触器作为时控件管理,可有效地预防接触器触头熔焊故障的发生。

### 参考文献

- [1] 乔鑫磊. 高压直流大功率继电器触头动熔焊现象研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
QIAO Xinlei. Study on dynamic of high volage DC power relay contact[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [2] 韩春阳, 王召斌, 王占, 等. 触头材料及其性能测试技术概述[J]. 电工材料, 2019(1): 27-30.  
HAN Chunyang, WANG Zhaobin, WANG Zhan, et al. Development of contact material and its performance testing technology[J]. Electrical Engineering Materials, 2019(1): 27-30. (in Chinese)
- [3] 郭凤仪, 张跃辉, 王智勇, 等. 交流继电器熔焊现象实验分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2020, 39(3): 259-264.  
GUO Fengyi, ZHANG Yuehui, WANG Zhiyong, et al. Experimental analysis of the welding phenomenon of AC relay[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2020, 39(3): 259-264. (in Chinese)
- [4] 周晓龙, 熊爱虎, 刘满门, 等. AgSnO<sub>2</sub>NiO电触头材料电接触性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(9): 2885-2892.  
ZHOU Xiaolong, XIONG Aihu, LIU Manmen, et al. Research on electric contact performance of AgSnO<sub>2</sub>NiO electric contact material[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(9): 2885-2892. (in Chinese)
- [5] 魏国青, 赵军富, 李志刚, 等. 真空烧结制备电触头Cu-W/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>合金组织和侵蚀性能分析[J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(9): 887-890.  
WEI Guoqing, ZHAO Junfu, LI Zhigang, et al. Arc erosion/welding behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped Cu-W alloy formed by vacuum sintering[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2020, 40(9): 887-890. (in Chinese)
- [6] 朱青成, 李震彪, 柳子逊, 等. 电触头闭合过程中熔焊现象研究[J]. 电器与能效管理技术, 2017(14): 9-12, 16.  
ZHU Qingcheng, LI Zhenbiao, LIU Zixun, et al. Research on electrical contact welding in making operations[J]. Electrical Appliances And Energy Efficiency Management Technology, 2017(14): 9-12, 16. (in Chinese)
- [7] 王珩, 李杰, 颜小芳, 等. 电触头材料粗糙度对静熔焊力影响的探讨[J]. 电工材料, 2018(3): 14-16, 22.  
WANG Heng, LI Jie, YAN Xiaofang, et al. Influence of roughness on static welding force of contact material[J]. Electrical Engineering Materials, 2018(3): 14-16, 22. (in Chinese)
- [8] 王珩, 宋振阳, 颜小芳, 等. 电触头材料曲率半径与静熔焊力关系研究[J]. 电器与能效管理技术, 2016(15): 59-63.  
WANG Heng, SONG Zhenyang, YAN Xiaofang, et al. Influence of contact material curvature radius on its static welding force[J]. Electrical Appliances and Energy Efficiency Management Technology, 2016(15): 59-63. (in Chinese)
- [9] 王珩, 宋振阳. 接触状态对电触头材料静熔焊力影响的研究[J]. 电器与能效管理技术, 2016(9): 13-16.  
WANG Heng, SONG Zhenyang. Influence of contact condition on the ctatic welding force of contact material[J]. Electrical Appliances and Energy Efficiency Management Technology, 2016(9): 13-16. (in Chinese)
- [10] 张石松, 王小军, 刘凯, 等. 高抗熔焊性CuCrTe触头的断裂机理研究[J]. 电工材料, 2020(4): 7-8, 14.