

开关稳压电源用铝电解电容器的失效机理

王锡清

(信息产业部电子第五研究所, 广东 广州 510610)

摘要: 概述了开关稳压电源用铝电解电容器的工作状态和失效模式, 着重讨论了开关稳压电源用铝电解电容器的开路失效和击穿失效机理。

关键词: 失效模式; 失效机理; 铝电解电容器

中图分类号: TM 535+.1 **文献标识码:** A

Failure Mechanism of Aluminum Electrolytic Capacitor for Switching Voltage Stabilizing Power Supply

WANG Xi-Qing

(CEPREI, Guangzhou 510610, China)

Abstract: This paper summarizes working state and failure mode of aluminium electrolytic capacitor for switching voltage stabilizing power supply. The disconnection and breakdown failure mechanism of aluminium electrolytic capacitor have been discussed on emphasis.

Keywords: failure mode; failure mechanism; aluminum electrolytic capacitor

1 开关稳压电源的特点及铝电解电容器的工作状态

铝电解电容器是开关稳压电源的关键电子元件, 随着开关稳压电源的发展和广泛应用, 用于开关稳压电源的铝电解电容器的质量、可靠性、失效模式及失效机理越来越引起电子工程界的关注。

开关电源是一种采用开关方式控制的直流稳压电源, 它以小型、轻量和高效率的特点被广泛应用于各种通信设备、家用电器、计算机及其终端设备。作为输入滤波和平滑作用的铝电解电容器, 它的质量和可靠性直接影响到开关电源的可靠性。一旦铝电解电容器失效, 就会导致开关稳压电源的

故障。

与以往用于传统的滤波电路不同, 开关稳压电源用铝电解电容器的使用条件较严酷, 它不仅承受 100 Hz (全波及桥式整流时, 流经滤波电容器的纹波电流为市电工频的 2 倍频) 纹波大电流的冲击, 而且要承受高频 (10 ~ 100 kHz 开关频率) 大电流的冲击。

作为卷绕型芯子结构的铝电解电容器, 其等效电路可以视为 CLR 相串联的网络。随着频率的升高, 电容器的有效电容量越来越小, 而损耗角正切值却越来越大; 频率再升高时铝电解电容器的电抗呈现感抗, 即在此频率下电容器已成电感器。作为

收稿日期: 2002-01-17

作者简介: 王锡清 (1941-), 男, 江苏宜兴人, 信息产业部电子第五研究所研究分析中心高级工程师, 长期从事电子元件失效机理研究和电子元件可靠性快速评价方法研究工作。

电路设计师要清楚地认识到,作输入滤波用的铝电解电容器,对于100 Hz(市电工频的2倍频)是一个电容器;而对于高频开关频率(10~100 kHz)来说,往往就是一个电感器。

铝电解电容器的电抗从容抗变为感抗的频率,视电容器的外形尺寸、结构和型号规格而异,表1为开关稳压电源用几种铝电解电容器的电容量频率特性测试数据。电容量越大其容抗变为感抗的频率越低,450 V、82 μF 铝电解电容器到40 kHz频率仍然呈容性,但450 V、470 μF 铝电解电容器到20 kHz频率就呈感性。而对于75 V、12 000 μF 铝电解电容器来说,引出线达8 mm时,频率到5 kHz就呈感性。这是因为电容量越大,铝箔卷绕的圈数就越多,其分布电感量就越大。因此,电路设计师在选用铝电解电容器的型号规格时一定要考虑到电容器的频率特性。

表1 铝电解电容器电容量频率特性测试数据

型号规格	100kHz	1 kHz	3 kHz	5 kHz	10 kHz	15 kHz	20 kHz	30 kHz	40 kHz
450 V 470 μF	428.6	335.2	138.6	64.1	15.4	3.51	-0.76	-3.88	-4.84
450 V 82 μF	74.3	67.5	45.5	28.8	11.1	5.72	3.49	1.66	0.97
63 V 2 200 μF	2 244	1 875	763.9	380.2	-94.2	-101.5			
75 V 1 200 μF	10 866	1 189	186	-16.3	-129.4				

注:电容量为负值,表示在该频率下电容器呈感性。

开关稳压电源用铝电解电容器工作状态的另一个特点是电容器的温升大。一方面是由于市电工频的纹波电流的影响,另一方面是由于高频电流(开关频率)使电容器发热。在实验室室温条件下对450 V、470 μF 铝电解电容器进行施加纹波电流的实验,施加1.5 A纹波电流时电容器外壳表面温升为7 $^{\circ}\text{C}$;施加1.8 A纹波电流时电容器外壳表面温升为9 $^{\circ}\text{C}$;施加2 A纹波电流时电容器外壳表面温升为14 $^{\circ}\text{C}$ 。上述实验数据表明用于开关稳压电源的铝电解电容器温升很大,这还不包括高频成分电流产生的温升。

2 开关稳压电源用铝电解电容器的失效模式

开关稳压电源用铝电解电容器的失效模式有击穿失效、开路失效、漏液失效及电参数超差失效,

下面举例说明。

2.1 击穿失效

开关稳压电源用铝电解电容器的击穿失效分为介质击穿和热击穿两种类型。

铝电解电容器发生介质击穿最主要的特征是阳极铝箔有明显的击穿点,击穿点往往烧通阳极铝箔形成空洞,高压铝电解电容器介质击穿时还会烧通衬垫纸和阴极箔。

热击穿是开关稳压电源用铝电解电容器经常发生的另一种击穿失效形式。对于大功率和大电流输出的开关稳压电源用铝电解电容器,热击穿失效常占一定比例。

2.2 开路失效

电腐蚀导致铝引出条断裂和电容器芯子干涸,是开关稳压电源用铝电解电容器开路失效的主要失效模式。

80年代起,我国彩电用铝电解电容器开始国产化,当时国内电子元件学术界对阳极引线导针腐蚀断裂使得电容器正极端引出线(引出箔)开路失效机理进行了认真的研究;国内铝电解电容器同行进行了技术攻关,已经基本解决了这一技术问题。然而,近几年来信息产业部电子五所研究分析中心受理的元件失效分析任务中,又发现多起开关稳压电源用铝电解电容器开路失效的

失效模式。这一情况,必须引起我们的高度重视。

电容器芯子干涸,是导致开关稳压电源用铝电解电容器开路失效的另一类失效模式。而铝壳空腔内的高气压和漏液是产生电容器芯子干涸的根源。

2.3 漏液失效

漏液是开关稳压电源用铝电解电容器常见的失效模式,由于使用环境及工作状态较严酷,常发生漏液失效。

2.4 电参数超差失效

开关稳压电源用铝电解电容器在使用中最常见的失效模式是电容量减少、漏电流增大及损耗角正切值增大。

3 开关稳压电源用铝电解电容器的失效机理

3.1 击穿失效机理

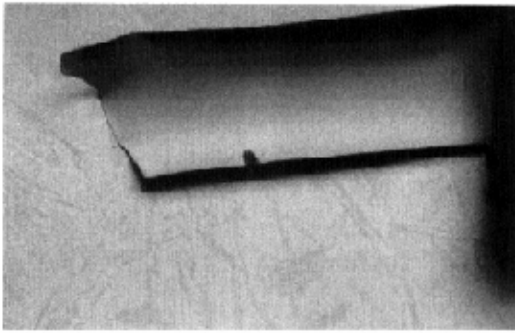


图1 电容器阳极铝箔展开后形状图

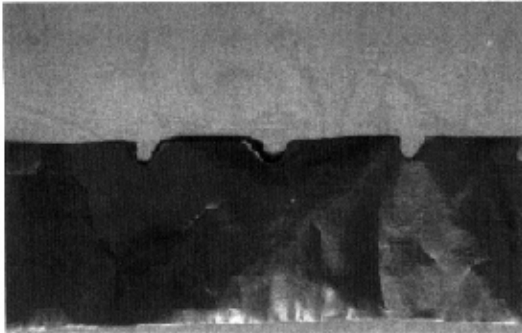


图2 击穿部位衬垫纸和阴极铝箔展开形貌

图1为400 V、330 μF 高压铝电解电容器击穿失效样品芯子内层阳极铝箔展开后的形貌，在铝箔边缘有一小块黑色的部位就是阳极铝箔的击穿点（由于铝箔较脆，电容器芯子内层的曲率半径小，电容器芯子展开时阳极铝箔断裂）。

图2为图1所示样品阳极铝箔击穿部位相对应的电容器纸和阴极铝箔展开后的形貌。在电容器纸和阴极铝箔边缘有击穿空洞，击穿过程中强大的电流由阳极箔击穿阳极氧化膜通过电容器隔离纸飞弧至阴极箔。击穿过程中的高温将电容器纸和阴极铝箔烧熔形成空洞。电容器纸和阴极铝箔边缘各有3个击穿空洞，这是将卷绕形电容器芯子展开后的情形；实际上卷绕后3个击穿空洞都在同一个部位。

对击穿失效样品阳极铝箔击穿部位进行了扫描电子显微分析及电子能谱分析，电子能谱分析结果表明，击穿部位有少量的铁杂质。铝电解电容器的介质是阳极铝箔表面的三氧化二铝氧化膜。当介质氧化膜表面含有杂质时，就降低了电介质的介电性能及耐压性能，导致电容器的漏电流增大。在高电

压作用下电流集中在介质氧化膜缺陷部位，最终导致电容器的击穿。

开关稳压电源用铝电解电容器的热击穿是经常发生的击穿失效形式。图3为75 V、12 000 μF 热击穿失效样品电容器芯子的形貌，击穿时的高温将电容器纸碳化。

对于大功率和大电流输出的开关稳压电源用铝电解电容器，电容器芯子发热厉害，高温使得介质氧化膜的介电性能下降，对于原来介质氧化膜有缺陷、漏电流和损耗角正切值较大的铝电解电容器，高温使得氧化膜的介电性能进一步劣化，使得电容器漏电流增大及损耗角正切值增加，导致电容器芯子发热进一步加剧，如此不断循环，最终将电容器烧毁。

导致铝电解电容器热击穿失效的另一个原因是电网电压的异常波动造成的，当输入电压升高时，不仅使电容器两端的电压升高，而且有很大的浪涌电流流经电容器，如果持续时间较长或者频繁电压波动会使电容器芯子的发热加剧，严重时将电容器烧毁，铝外壳烧通；失效样品外观形貌如图4所示。



图3 热击穿失效样品电容器芯子形貌



图4 热击穿失效样品外观形貌

3.2 开路失效机理

图5为450 V、82 μF 铝电解电容器电化学腐蚀使正极引出铝箔腐蚀断裂、导致电容器开路失效样品形貌；图6为450 V、470 μF 铝电解电容器电容器芯子干涸导致开路失效样品形貌。



图5 电化学导致开路失效样品形貌

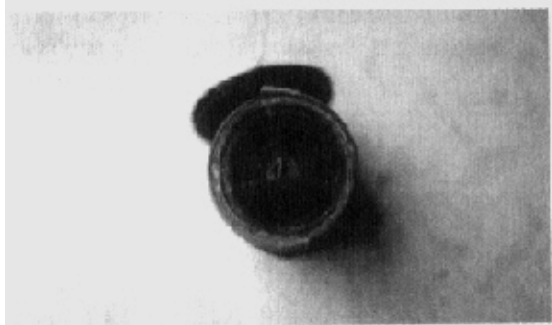
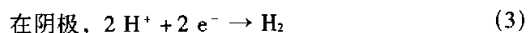
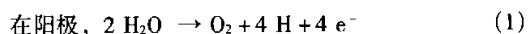


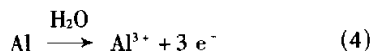
图6 电容器芯子干涸导致开路失效形貌

产生正极引出铝箔腐蚀断裂导致铝电解电容器开路的原因是电化学腐蚀。

氯离子是铝电解电容器危害最严重的杂质离子，在有水存在的酸性工作电解液中，会发生电容器阳极引出线(引出箔)的电化学腐蚀：



上述3种化学反应是众所周知的，水电解成氧和氢(或氢和氢氧根离子)。电容器工作电解液中含有一定比例的水分，在电场作用下，铝被腐蚀放出电子：

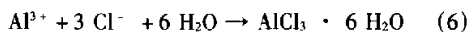


当电容器芯子或工作电解液中含有氯离子时，由于氯离子是阴离子(Cl^-)，在电场作用下氯离子

趋向电容器的阳极，与电容器阳极铝引出线(或引出箔)反应生成氯化铝：



在有水的情况下，氯离子会与电容器阳极铝引出线(或引出箔)反应生成六水氯化铝：

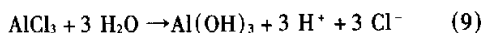


氢氧根负离子在电场作用下趋向电容器的正极，与氯化铝(AlCl_3)发生化合反应形成氢氧化铝和氯离子：



化学反应生成的氯离子继续腐蚀阳极铝引出线(或引出箔)，如此不断循环。所以少量氯离子的存在都会使电容器正极引出线(或引出箔)产生大量腐蚀。直至将阳极引出线腐蚀断裂，导致电容器的开路失效。

此外，电化学腐蚀过程同时在正极引线导针与阳极铝箔铆接部位进行，氯离子在电场作用下趋向电容器的正极，与正极引线导针与阳极铝箔铆接部位的阳极铝箔表面电介质 Al_2O_3 反应生成氯化铝和氧气，导致该部位的阳极铝箔产生腐蚀：



反应(9)生成的 Cl^- 又参与(5)和(8)的化学反应，直至完全耗尽。通过这种连锁反应，少量氯离子 Cl^- 的存在就会导致铝引出线和电介质三氧化二铝的大量腐蚀。

工作电解液中的氯离子在电场作用下趋向阳极，由于阳极引出线(或引出箔)处的电流密度最大，电化学腐蚀效应首先就在阳极引线导针和阳极引线导针与阳极铝箔铆接部位发生。在长期的电化学腐蚀作用下，就导致阳极引出线(或引出箔)处逐渐腐蚀，在阳极引出线(或引出箔)与阳极铝箔铆接部位产生腐蚀断裂。

除了电化学腐蚀导致开路外，电容器芯子干涸同样会导致铝电解电容器开路失效。

铝电解电容器的阴极是具有一定粘度的液体电解质。结构设计上采用阳极箔及阴极箔之间的隔离电容器纸吸附工作电解液，铝电解电容器在使用条件下，实际上是一个电解槽，所以使用期间随时会有气体产生。气体的产生量取决于电极的电位和漏电流的大小，工作电压越高、漏电流越大的电容器产生的气体越多。另外，根据法拉第定律可知，电解作用产生气体的速率为 $0.6\text{ cm}^3/\text{mA}\cdot\text{h}$ 。电容器

的漏电流越大、使用的时间越长,则产生的气体就越多;气体的积累使得铝壳内部的压力逐渐增大。此外,开关稳压电源用铝电解电容器由于有较大的纹波电流通过,使得电容器芯子发热。根据热力学定律,电容器芯子发热使得铝壳内部空腔气体压力进一步增加。铝壳内部空腔高压作用于电容器芯子,将电容器芯子电容器纸吸附的电解液挤干,使得电容器芯子干涸,导致铝电解电容器开路。

参考文献:

- [1]杨晋泰,王锡清.可靠性物理[M].北京:人民邮电出版社,1993.
- [2]杨晋泰,王锡清.电子产品可靠性技术丛书(可靠性物理)[M].广州:中国电子产品可靠性与环境试验研究所,1986.
- [3]汪泽忠.铝电解电容器失效机理分析及改进措施[A].电子产品可靠性与质量管理学会第五届学术年会论文集[C].1990.

2002年全国可靠性学术交流征文通知

为了迎接我国加入世界贸易组织所面临的新的竞争形势,促进可靠性学术研究、技术进步和成果的交流与推广,推动可靠性技术在工业生产中的应用,提高国内企业产品的设计开发和生产能力,2002年全国可靠性学术交流会定于2002年10月在大连召开。会议主题是“广泛交流,推动进步,迎接挑战”。会议将邀请院士、知名专家学者到会报告,介绍国内外可靠性、维修性和安全性概况,并与企业家深入座谈。会议还将组织专题讨论,并增选可靠性工程分会第三届理事。会议录用的学术论文将在国家级出版社和国内核心期刊发表。

主办单位: 中国机械工程学会可靠性工程分会

承办单位: 大连理工大学

一、会议内容

两院院士、知名专家学者作专题学术报告,学术交流,企业家座谈,国内外知名软件演示,增选可靠性工程分会第三届理事,参观。

二、征文范围

机械、电子产品的可靠性、维修性、安全性和保障性的设计理论与方法,机械、电子产品的可靠性、维修性、安全性和保障性的计算机辅助分析技术,软件和网络的可靠性、维修性以及安全保障性技术,失效智能在线预示与在线监控技术,故障预测、故障诊断与安全管理技术(PHM),产品、项目的质量管理与质量保证技术,可靠性基础数据的收集与分析,可靠性评估与安全性论证,可靠性、维修性、安全性和保障性的相关技术。

三、征文要求

应征论文要求未在全国性学术会议或公开发行的刊物上发表过,来稿文责自负。来稿一律不退并请作者自留底稿。寄送稿件时请注明作者的详细通信地址、邮政编码、联系电话以及电子邮箱地址,以便联系。

大会录用论文将由国内核心期刊专集发表。投稿

论文原则上不超过4页,并请于2002年7月30日前将200字左右的中文摘要寄至会议筹备处,全文稿件(图表一并排入)则于2002年8月25日前寄至会议筹备处。投稿最好通过电子邮件寄送,通过邮局寄送时则要求同时寄送软盘及打印稿。全文稿件经审定后将于2002年9月10日发出正式录用、交版面费的通知以及会议邀请函。

全文稿件须严格遵照下列格式,不符合者将不予录用。

论文用中文WORD 97或WORD 2000编辑,A4版面,上下左右四边各留25mm边框。除中英文标题、作者、单位、摘要和关键词外均双列排版,文字、图表清晰,数据准确。论文字型要求宋体。编辑顺序为:(1)中文标题:居中3号;(2)中文作者姓名:居中小4号;(3)作者单位、城市、邮政编码:中文,居中5号;(4)中文摘要:限200字符,5号;(5)关键词:限三至五个,中文5号;(6)正文:双列排版,分节标题4号,正文5号;(7)参考文献:严格按照国际标准格式书写,5号;(8)英文标题、作者拼音姓名、英文单位:要求与中文内容相同;(9)文末注明作者姓名、性别、出生年月、职称、职务、专长、联系地址、邮政编码、电话、电子邮箱地址,5号宋体。

四、会议时间与地点: 2002年10月,会期三天;地点在辽宁省大连市

五、联系方式

通信地址:辽宁省大连市 大连理工大学机械工程学院

邮政编码:116023

负责人:黄洪钟——大连理工大学教授、博士生导师

联系人:李剑中 冯刚 张晓丽

电话:0411-4708428 0411-4707312

E-mail: XXX@dlut.edu.cn