

典型电容近炸引信存储性能退化分析

吴英伟^{1,2}, 齐杏林¹, 王洪岩¹, 余春华³

(1.陆军工程大学 石家庄校区,河北 石家庄 050003; 2.中国白城兵器试验中心,吉林 白城 137001;
3.陆军北京军代局驻长治地区军代室,山西 长治 046012)

摘要: **目的** 分析退化或失效的原因及机理。**方法** 提出电容近炸引信储存性能试验,结合引信组成结构特点和出厂性能要求,对实际储存2~8年的引信开展储存性能检测试验,并对试验结果进行分析,进而确定性能退化敏感参数。**结果** 性能退化原因和机理分析表明,三极管、电阻、电路中导电胶粘结力、电感线圈等长储后性能退化影响引信性能。**结论** 确定了引信长储后检测时应重点关注定时器接电前输入电流、炸高和检波电压三项参数,并着重分析三极管、电阻、电路中导电胶和电感线圈等部位。

关键词: 电容近炸引信; 储存性能; 退化分析

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.02.012

中图分类号: TJ43+4.3 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)02-0063-05

Storage Performance Degradation of Typical Capacitance Proximity Fuse

WU Ying-wei^{1,2}, QI Xing-lin¹, WANG Hong-yan¹, YU Chun-hua³

(1.Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China;

2.Baicheng Ordnance Test Center of China, Baicheng 137001, China;

3.Military Delegate Office of Beijing Military Delegate Bureau to Changzhi, PLA Army, Changzhi 046012, China)

ABSTRACT: Objective To analyze causes and mechanisms of degradation or failure. **Methods** The storage performance test method of capacitance proximity fuse was put forward. In combination with the requirements of the composition, structure and performance of fuse, storage performance of fuse stored for 2~8 years was tested. And the test results were analyzed to determine the sensitive parameters of the performance degradation. **Results** Performance degradation of the causes and mechanism analysis shown that the transistor, the resistance, the conductive adhesive force in the circuit, the inductance coil and other long storage performance degradation influenced the fuse performance. **Conclusion** After determination of test after long storage of fuse, it is important to pay attention to the three parameters of input current, explosion height and detection voltage, and focus on the analysis of the transistor, the resistance, the conductive glue and the inductance coil in the circuit.

KEY WORDS: capacitance proximity fuse; storage performance; degradation analysis

电容近炸引信性能要求主要是指针对电子部件、电源、安全系统以及各部件或引信整体的环境适应性的要求^[1]。文中研究对象是以某无线电近炸引信为基型设计的,其安全系统、传爆序列和电源均直接采用该无线电引信的相关部件,具有明显的通用化、系列

化和组合化的“三化”特点。经过多年使用和研究表明,安全系统、传爆序列和电源性能长储后性能较稳定,而经过长期储存,受储存环境影响,发火控制系统内元器件的某些参数会发生漂移,如果性能变化影响到其功能,会导致引信近炸失效。因此,只需对发

火控系统部件储存性能进行研究即可。对经过长期储存引信进行检测,分析引信失效机理,掌握储存质量变化规律,是目前急需解决的问题。针对此问题,文中以实际储存 2~8 年的库存电容近炸引信为研究对象,开展了储存性能检测试验,对实验结果进行分析,确定性能退化敏感参数,并对性能参数退化原因及机理进行了分析。

1 电容近炸引信储存性能试验

1.1 样本量确定

引信可靠性试验中进行储存性能检测通常需要抽样检验,因此需要预先确定样本量。样本量越大,试验数据的处理精度越高,但随之带来的样本消耗量和工作量等环节也会导致试验成本过高。因此应根据统计分析需要,在满足数据处理精度的前提下合理确定样本量。在抽取试验样本时,要注意每个年份点上抽样样品的生产条件和储存环境应基本相同^[2-4]。引信储存性能试验中样本量常用式(1)计算:

$$n = \frac{Z_{1-\gamma}^2 (p_0 - p_0^2) / d^2}{1 + \frac{1}{N} \left[\frac{Z_{1-\gamma}^2 (p_0 - p_0^2)}{d^2} - 1 \right]} \quad (1)$$

式中: N 为产品总数; n 为抽样数量; $Z_{(1-\gamma)/2}^2$ 为正态分位点; p_0 为经验提供的次品率; γ 为置信水平; d 为抽样次品率与其真值差最大可接受值。

根据式(1)和产品实际各年份储存数量情况,结合相关国军标标准,确定样本量情况见表1。

表1 试验样本量情况

| 储存时间/a | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|
| 样本量/发 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

1.2 储存性能试验项目与方法

发火控制系统是指由探测器、引信体和定时器等组成的部件。根据各部件的结构特点和储存性能要求,结合实际实验条件,只需对定时器和探测器部件展开性能检测即可,检测项目和方法如下。

1.2.1 定时器部件

将装定一定时间的定时器部件放入综合参数仿真测试系统中,输入目标仿真信号,施加 28 V 直流电压后,测量下列参数。

1) 定时器接电前输入电流 I_Q 。定时器接电前输入电流是指在施加 28 V 工作电压后,定时器接电前输入的直流电流。

2) 定时器接电时间 t_I 。定时器接电时间指的是根据性能需要对定时器进行预装定后,从开始输入电

源电压到定时器计时完成并接电为下一级电路提供工作电压所经过的时间。

3) 工作电流 I_G 。工作电流,是指施加 28 V 工作电压,定时器接电后引信在正常工作状态下从定时器部件输入的直流电流。

4) 系统功能 F_X 。系统功能包括点火脉冲幅值和脉宽,点火脉冲幅值和脉宽决定着引信能否成功引爆电雷管,是发火控制系统作用的重要参数。如果点火脉冲不满足要求,则会引起引信近炸功能失效。

1.2.2 探测器部件

将探测器部件放仿真箱中,将目标仿真信号作用到探测器上,供电 28 V,测量以下参数。

1) 检波电压 U 。检波电压是指将代表弹目距离信息的电容变化量提取出来,并转化成的电压信号。

2) 炸高 H 。炸高决定着战斗部毁伤效能,是近炸引信的重要性能指标参数,按照规定落速将目标信号作用到探测器部件上,对其进行仿真测试,计算 160 m/s 典型仿真落速下的对应炸高。

3) 点火脉冲宽度 P_W 。测量探测器部件的点火脉冲宽度可以有效对比出发火控制系统进行拆分是否会对部件性能产生影响。

1.3 储存性能试验原理

定时器部件检测设备是在探测器部件检测设备基础上设计的,二者原理类似。其本质是模拟目标对引信的作用,使被测试引信检波电路能够产生与弹目相遇时信号输出相同的信号,变容二极管的电容量随着偏置电压的变化而改变,从而使引信电极间电容变化量与弹目交会时电容变化量相同。该仿真测试系统包括仿真信号源、稳压电源、万用表、存贮示波器以及位于屏蔽箱内的接口电路等部分,测试原理如图1所示。

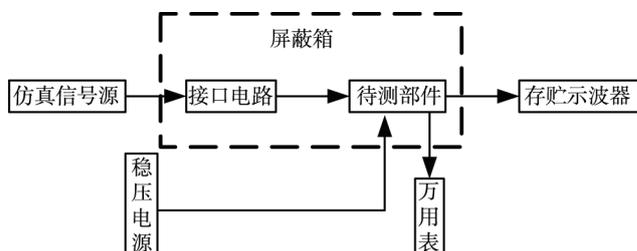


图1 储存性能试验原理

2 结果分析

该试验对储存时间为 2~8 年每年 10 发共 70 发引信开展性能试验,分别检测了定时器部件的 I_Q , t_I , I_G , F_X 和探测器部件的 U , H 和 P_W 共 7 项参数。结果表明,所有引信均满足产品性能要求,未发生失效。与出厂时原始数据进行对比研究发现, t_I , I_G , F_X 和

P_W 四项参数均在出厂数据 $\pm 3\%$ 内波动，无明显变化趋势， I_Q 有明显增大趋势， U 和 H 都有减小趋势，从而确定 I_Q 、 U 和 H 为引信性能退化敏感参数。不同储存时间的引信长储前后定时器接电前输入电流均值变化趋势如图 2 所示，炸高均值变化趋势如图 3 所示，检波电压均值变化趋势如图 4 所示，图中坐标 0 为出厂时间。

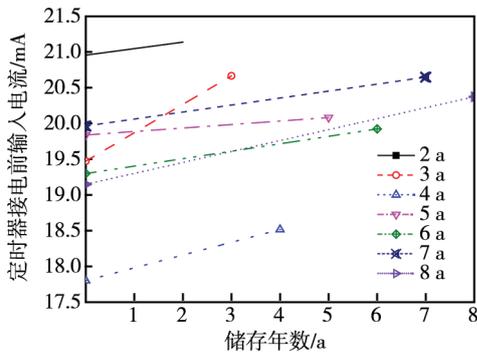


图 2 定时器接电前输入电流均值变化趋势

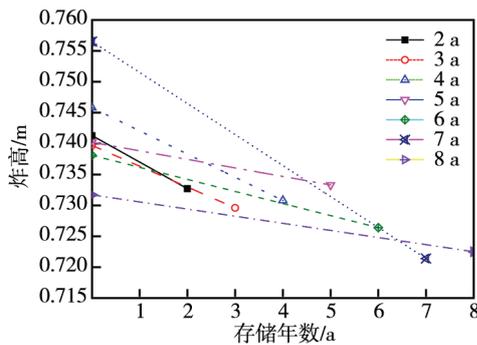


图 3 炸高均值变化趋势

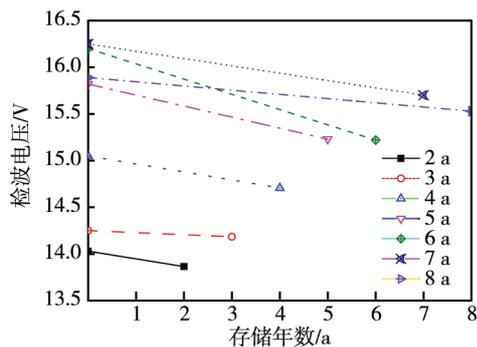


图 4 检波电压均值变化趋势

从图 2 可以看出， I_Q 储存后基本都呈上升趋势，原始定时器接电前输入电流最低为 17.8 mA，最高为 20.9 mA，储存后定时器接电前输入电流最低为 18.6 mA，最高为 21.1 mA，增大幅度在 1%~6%之间。从图 3 可以看出，储存后 H 都呈现下降趋势，原始炸高均值最高为 0.7565 m，最低为 0.7317 m，储存后炸高均值最高为 0.7333 m，最低为 0.7213 m，变化幅度在 6%以内。从图 4 可以看出， U 同样有比较小的下降趋势，其中原始检波电压均值在 14.03~16.25 V 之

间，储存后范围变为 13.865~15.673 V，变化幅度小于 7%。由图 2—图 4 可以看出，随着时间的推移， I_Q 、 U 和 H 有较为明显的退化趋势，虽然尚未发生失效，但长期储存仍需多加关注。

3 性能退化原因及机理分析

通过之前的分析，发火控制系统中以定时器接电前输入电流、炸高和检波电压为最主要性能退化敏感参数，故该节对定时器接电前输入电流和探测器部件的炸高及检波电压退化原因和机理进行分析。

3.1 定时器部件性能退化分析

试验对定时器部件进行了定时器接电前输入电流、接电时间、工作电流、系统功能四项参数的检测，确定了定时器接电前输入电流为性能退化参数。虽然未达到失效阈值，但仍需多加关注，下面对其退化原因和机理进行分析。定时器电路组成如图 5 所示。

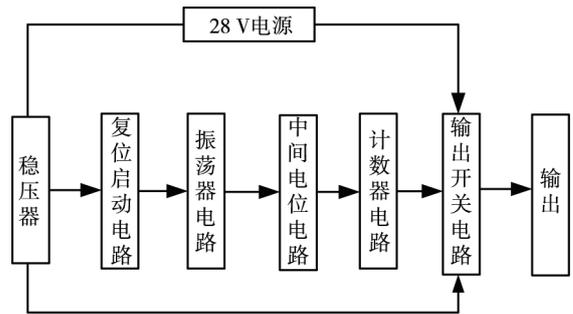


图 5 定时器电路组成

3.1.1 性能退化原因分析

定时器接电前输入电流主要是用来为定时器集成电路中振荡器、分频器和其他晶体管等提供静态消耗电流，因此不应过大。过大会导致定时器消耗过多电源能量，使定时器输入端与输出端压降增大，导致定时器接电后输入无法满足目标探测及信号处理器所需的电流和电压。定时器接电时间及工作电流皆无明显退化趋势，说明定时器内部复位启动电路、振荡器电路、中间电位电路和计数器电路功能均未发生明显退化。接电前电流退化的原因是稳压器电路和输出开关电路发生退化导致，稳压器电路和输出开关电路主要由三极管和阻容元件组成。电路发生退化的原因主要包括以下两个方面。

1) 三极管存在集电极暗电流，长期储存过程中，由于温湿度应力的长期作用，导致三极管表面形成漏电通道，暗电流增加，从而导致三极管性能退化，影响稳压器输出电压和输出开关电路性能。

2) 电路中多个电阻元件本身就有热噪声，相互之间也会产生干扰噪声，长期储存噪声加大，进而使电路性能产生退化。

3.1.2 性能退化机理分析

根据 3.1.1 中得到有关性能退化原因, 具体分析相关退化机理。

1) 三极管的暗电流公式为^[5-6]:

$$I_D \approx S \frac{q\rho_i^2}{2L_s} \left(\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 V_w}{q\rho_n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: ρ_i 为本征载流子浓度; ε 为硅的相对介电常数; ε_0 为真空介电常数; V_w 为固定值外加电压; ρ_n 为 n 型材料掺杂浓度; L_s 为少子寿命; q 为电子电荷; S 为 p-n 结面积。其中 ε , ε_0 , V_w , ρ_n , q 都为固定值, I_D 和 ρ_i^2 、 S 成正比, 和 L_s 成反比。

长期储存后, 在环境应力的不断作用下, 三极管硅晶体内缺陷会扩大, 从而使少子扩散时间缩短, 进而导致少子寿命减小。硅晶体内杂质也会随着储存时间的推移聚集沉淀, 不仅会减少少子寿命, 还会导致 p-n 结面积减小^[7]。根据式 (2), 无论是少子寿命的衰减还是 p-n 结面积的减小, 都会导致暗电流的增大。

2) 电阻中自由电子和振动离子之间热量相互作用导致热 (白) 噪声的产生, 其功率可由约翰逊公式表示^[8-9]:

$$P = kT \times B_w \quad (3)$$

3) 用电压源的平方表示热电压:

$$e^2 = 4kTR \times B_w \quad (4)$$

式中: p 为噪声功率; k 为玻尔兹曼常数; T 为温度; B_w 为系统带宽; e^2 为热电压; R 为电阻。

长储后电阻阻值通常会增大, 由式 (4) 可知, 热电压变化与电阻成正比, 会随着电阻的增大而升高, 进而导致热噪声的增大, 且温度越高越明显。电阻热噪声和热电压都会影响电路性能。

此外, D.S.Peck 提出了 Peck 加速模型, 该模型描述了温湿度应力对产品寿命的影响^[10], 因此也可以用来对三极管和电阻元件常温下储存寿命进行外推:

$$L = C(RH)^{-\beta} \exp(E_a / kT) \quad (5)$$

式中: C 为待定常数; L 表示寿命; RH 表示相对湿度; β 为湿度的加速率常数, 通常介于 2~3 之间; E_a 为激活能; k 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度。

随着储存时间的变大, 产品密封性能必然会退化, 产品内部湿度也会随着密封性下降而变化, 通常情况下湿度会增加。从式 (5) 可以看出, 湿度增加会导致产品寿命的减小。

3.2 探测器部件性能退化分析

探测器部件电路组成如图 6 所示。

通过前面分析, 知道探测器部件性能参数中点火脉冲宽度未发生明显退化, 炸高和检波电压较敏感, 随时间呈减小趋势, 下面对其退化原因及机理进行分析。

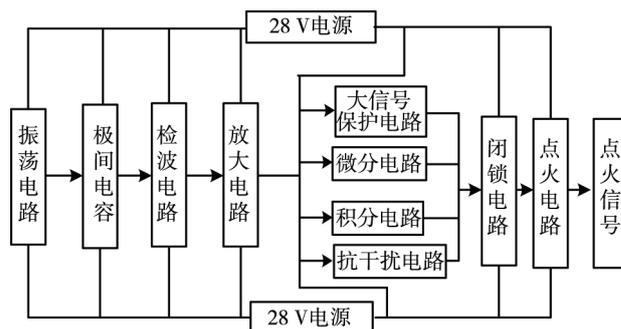


图 6 探测器部件电路组成

3.2.1 性能退化原因分析

检波电压主要与振荡电路、极间电容和检波电路有关, 而炸高降低主要由探测灵敏度降低导致。电路中主要由阻容元件、振荡电感和晶体管影响探测灵敏度, 所以炸高下降的原因是电路中相关元器件的参数漂移, 与定时器接电前输入电流退化原因基本相同。此外, 电路中还包含大量的放大器, 因此具体退化原因还包括以下两方面。

1) 电路中存在多个运算放大器, 位于放大电路、微分电路、积分电路、大信号保护电路和点火电路中, 其中一个放大器的微小问题, 经过多个放大器放大后都将变成不可忽视的问题。

2) 在振荡器中, 通常是将电路板、电容、电阻、晶体管和电感焊接装配于管壳中, 管壳空间有限, 各元件部分之间间距很小, 因此在装配过程中很可能导致漆包线和电感磁环存在缺陷, 经过长期储存缺陷会逐渐显露出来, 影响其性能。

3.2.2 性能退化机理分析

1) 运算放大器经过长期储存后, 导电胶性能会发生退化, 导致导电胶粘结力退化甚至丧失, 造成运放芯片与底座发生部分或完全分离, 使芯片与底座之间存在空隙。一旦经受来自外界机械作用力, 键合丝就可能断开, 使运算放大器性能发生漂移。随着储存时间的推移, 性能漂移量越大, 只要其中一个出现问题, 都会经过多个放大器层层放大, 并对电路产生不可忽视的影响^[11-12]。

2) 电感的电感量是其最重要的电性能参数, 其理论公式为^[13]:

$$L = 4\pi p \frac{N^2 S}{X} \times 10^{-9} \quad (6)$$

式中: L 为电感量; p 为磁芯的导磁率; S 为磁芯截面积; N 为线圈匝数; X 为有效磁路长度。

此外, 品质因数 Q 也是电感的另一个重要参数, 表示电感的储能与耗能之比。 Q 越大表示电感损耗越小, 工作效率越高。 Q 的表达式为:

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (7)$$

式中: ωL 为感抗; R 为等效电阻。

结合电感量公式和品质因数表达式可知, 品质因数正比于线圈匝数、磁芯导磁率和磁芯截面积, 反比于电感等效电阻。

在电感装配之前, 会经过电感绕制或电感传递过程, 在此过程中的环境因素可能会导致漆包线存在局部微小区域的漆膜破损。电感焊接过程中可能会因为操作不当导致漆包线某些部位漆膜受到微小损伤, 使其内层金属外露。经过长期储存后, 随着环境应力的累积, 漆膜处损伤会增大, 由于相邻线圈之间距离很近, 损伤部位处两线圈极易发生短路, 使电感有效匝数变少。因此导致电感量和品质因数同时下降, 影响电感性能。此外, 长期储存后电感等效电阻的增大也会使品质因数变小, 影响电感性能。

4 结语

文中提出了典型电容近炸引信储存性能试验方法, 定位了性能敏感参数并分析了退化的原因和机理。该方法选取储存时间为 2~8 年的每年 10 发共 70 发引信开展储存性能试验, 检测了定时器接电前输入电流、接电时间、工作电流、系统功能、炸高、检波电压和点火脉冲宽度等 7 项参数。

试验结果表明, 定时器接电前输入电流、炸高和检波电压等 3 项参数较敏感, 有明显退化趋势, 其他参数相对稳定, 无明显变化趋势。同时所有性能参数均满足产品性能要求, 说明引信电路整体设计较合理, 长储后虽然存在退化, 但电路整体性能仍较好。得到了引信性能退化的原因和机理: 三极管晶体内杂质聚集沉淀导致暗电流增大; 电阻长储后阻值增大导致热噪声增大; 电路中导电胶粘结力退化使运算放大器性能发生漂移; 电感线圈短路等使电感量和品质因数下降, 影响电感性能。

该研究对弹药技术保障机构准确掌握库存电容

近炸引信质量状况具有重要参考意义。

参考文献:

- [1] 高俊, 王世忠. 无线电引信检验技术与方法研究[R]. 邓州: 驻邓州地区军事代表局, 2004.
- [2] 刘传模. 弹药可靠性工程基础[M]. 石家庄: 军械工程学院, 1996: 81-82.
- [3] 郑波, 李明, 杨宝强, 等. 阵地环境下引信贮存可靠性研究[J]. 探测与控制学报, 2003, 25(3): 51-53.
- [4] 高萌, 王金柱, 何学广. 基于可靠性统计分析法的制导弹药储存寿命评估[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 110-113.
- [5] 张生才, 郑云光, 张世林, 等. 光敏二极管的可靠性和寿命分析[J]. 光电子·激光, 2003, 14(5): 466-468.
- [6] 赵铁山. 典型弹载控制系统部件储存失效分析与寿命评估[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2013.
- [7] BUONASSISI T, ANDREI A I, MATTHEW A M, et al. Engineering Metal-impurity Nanodefects for Low Cost Solar Cells[J]. Nature Materials, 2005, 4(9): 676-679.
- [8] 伍刚, 张小平. 电阻热噪声的研究[J]. 测控技术, 2006, 25(4): 86-87.
- [9] 吴英伟, 齐杏林, 郑波. 引信典型电子部件长储性能加速退化试验方法[J]. 探测与控制学报, 2016, 38(4): 20-23.
- [10] PECK D. S. The Uses of Semiconductor Life Distributions[J]. Semiconductor Reliability, 1962(2): 10-28.
- [11] VONA S A, TONG J R Q K, KUDER R, et al. Surface Mount Conductive Adhesives with Superior Impact Resistance[C]// International Symposium on Advanced Packaging Materials. 1998.
- [12] ZWOLINSKI M, HICKMAN J. Electrically Conductive Adhesives for Surface Mount Solder Replacement[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technologies, Part C, 1996, 19: 241-250.
- [13] 许悦, 刘晓红, 杜银波, 等. 无源 LC 滤波器磁环电感元件可靠性研究[J]. 电子元器件与可靠性, 2013(1): 44-48.