

控制系统继电器可靠性分析与措施

郑南昌

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 试验系统可靠性是以系统各元器件的可靠性来保证的, 所以对于系统、设备所构成的某个部件(器件)从理论上进行可靠性分析、讨论, 并加以认识和重视是具有重要意义的。文中针对某型号发动机试车台控制系统使用的继电器进行了可靠性论述与分析, 主要从故障模式、影响及危害性分析(FMEA)、故障树分析(FTA)等方面进行失效分析, 并提出了相应对策与措施。

关键词: 控制系统; 可靠性分析; 继电器; 故障树

中图分类号: V433

文献标识码: B

文章编号: (2005)04-0058-05

Reliability analysis and countermeasures of relays in the control system

Zhang Nanchang

(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: It is important to analyze and discuss the reliability of all the equipment parts, for the reliability of the test system is realized through the component reliability of the system. The reliability of relays used in the control system of test-stand is discussed and analyzed in the paper. The failure analysis is carried out from the following aspects as the analysis of failure mode, influence, damage and fault tree. Countermeasures for failures are presented in the paper.

Key words: control system; reliability analysis; relay; fault tree

1 引言

随着航天事业的不断发展, 对火箭发动机的试验技术水平要求也越来越高。对于试验研究所

来说, 要求每次发动机的试验都必须做到“万无一失、次次成功”, 这无疑给我们提出了更高的要求。几十年来, 我所的发动机试验技术水平和能力都有了长足的发展和进步。但要做到“次次成功”, 除有技术力量和人的素质来保证外, 对系统

收稿日期: 2005-02-10; 修回日期: 2005-04-27。

作者简介: 郑南昌(1957—), 男, 高级技师, 研究领域为发动机地面试验控制与测量。

各元器件的可靠性也要做充分的分析。因为任何一台设备、一个元器件、一个单点的失效，都可能造成可靠性的闭环链断开，从而影响到整个试验设备、系统的可靠性，导致试验的失败。

2 现状与可靠性分析

2.1 现状

目前，我所某试验台控制系统使用的中间执行继电器，主要用于发动机试验时对电爆管的控制电路中，要求其满足对电爆管瞬时（10ms）、大电流（2~10A）的可靠控制。从建台初期至1995年，在某试验台控制系统中将该型号继电器作为逻辑控制、设计的主要控制器件而大量使用。由

于其具有触点控制数量多、容量大、低导通电阻和稳定的切换性能。因此，某试验台控制系统仍然在电爆管控制电路中大量使用，摇摆、测量系统部分用于信号的控制与切换。

2.2 可靠性分析与评估

2.2.1 系统组成及功能分析

发动机试验用电爆管控制系统基本组成如图1所示。由图1可知继电器群与控制系统可靠性框图为串联模型，在这里由于要评估分析的是电爆管控制系统或摇摆、测量系统的控制继电器，即属于单元评价。根据评估分析原则，在此只对继电器进行分析，故其它系统不在分析之列。

继电器组成与控制如图2所示。为便于分析列出继电器单元功能如表1所示。

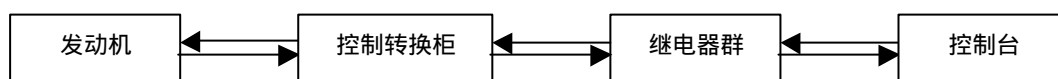


图1 可靠性框图

Fig.1 Reliability block diagram

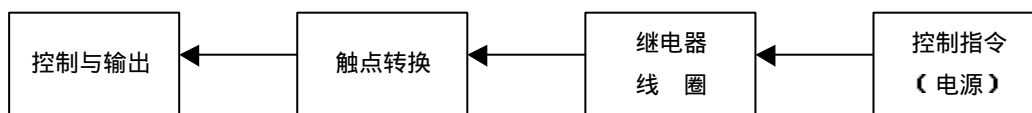


图2 继电器组成与控制框图

Fig.2 Block diagram of relay components and control

表1 继电器单元功能

Tab.1 Function of the relay components

序号	名称	功能
1	线圈	继电器心脏，产生磁场，控制触点转换。
2	转换装置	通过转换达到“通”与“断”的目的。
3	触点与输出（入）	经过接通或断开转换满足输入与输出和控制。

从1985年~1995年继电器共出现了三起故障（见表2）。可以看出：第一起故障是供电不足造

成；第二起故障是触点被大电流烧蚀造成。1995年后重新设计了控制电路，增加了灭弧保护电路和限流装置，有效的防止了触点烧蚀的现象，再未出现类似的问题。

2.2.2 故障模式、影响及危害性分析（FMEA）

为了进行可靠性评估及故障树分析，首先要对故障模式影响及危害性进行分析。根据继电器组成与控制，按照故障模式影响分析（FMEA）程序，表3列出故障模式、原因、后果、严重度分析及补救措施。

从对故障模式影响分析（FMEA）和危害性分析可知：只要控制好电压（电流）的波动范围，对于目前不会有大的影响和危害。需要指出的是：

一方面，要对在用继电器的动作次数（寿命）跟踪记录、更换，不能等到出问题后再去解决；另一方面，在使用中不得超压或欠压，无论超压和欠压都会使继电器工作可靠性降低。通过试验证明继电器欠压低于48.1%额定控制电压，不动作的发生频数分别占6.7%（12V）和3.3%（12.5V），这充分表明该型号继电器在13V以下工作是不可靠的。

表 2 三起故障现象原因分析及措施

Tab.2 Trouble shooting for three failure cases

序号	时 间	故 障 现 象	原 因	后 果	措 施 及 效 果
1	1985.7.15	控制台电压表指针不稳定。	被控对象负载过大，造成电源继电器常开触点烧蚀。	控制台供电不可靠。	1. 更换该型号继电器； 2. 采用双继电器供电； 3. 加强监测。
2	1988.10.8	综合测试 WQ 电爆管未按程序通电。	继电器常开触点有凹陷破口，为大电流烧蚀造成。	电爆管控制不可靠。	1. 更换传感器； 2. 采用双触点并联控制。
3	1992.3.25	控制台进入程序后，电源指示灯发暗，有关程序不执行。	继电器线圈端电压供电电压低，压降大造成。	控制程序不能正常执行，重新启动。	1. 增加蓄电池供电电压，加强供电电压的检查与监视； 2. 严格按规程精心操作，供电电压控制在 27±3V（DC）范围内。

表 3 发动机试验控制系统继电器故障模式影响分析

Tab.3 Failure mode analysis for relays in the engine test control system

名称	功 能	故障模式	故障原因	故障监测方法	故 障 影 响			发生概率	严重程度	改 进 措 施
					局部影响	对发动机试验影响	最终后果			
继电器	控制发动机电爆管点火或断电	不执行控制指令	线圈电压过载	三用表、综合测试	继电器不能正常工作	发动机试验不能按正常程序启动或关机	发动机试验失败或爆炸	很少	I	1. 加强电爆管控制电源的监视、检查与记录，对继电器群使用情况造表存档，注意综合测试等效果的检查； 2. 大电流控制采用双继电器，双触点同步控制，按要求增加限流电阻，防止发动机试车点火过程中，电爆管桥丝搭壳、短路； 3. 增加控制电路灭弧功能和冗余设计，防触点烧蚀； 4. 按操作规程有关规定供电，供电电压严格。
		不能满足容量要求	触点烧蚀接触面积减少	三用表、综合测试	继电器不能正常工作					
	作为执行器件控制转换 / 信号（信息）	不受控制	触点短路或断路	三用表、综合测试	继电器不能正常工作	不能输出有关试验信息或控制指令	有关试验摇摆指令或部分试验测量记录丢失	很少	I	1. 控制在 27±3V（DC）范围内，确保继电器实际端电压不低于 85% 额定控制电压； 2. 加强对继电器的维护和检查，按要求更换失效的继电器； 3. 防止控制线路短路。
		无输入信号	触点接触不良	三用表、综合测试	继电器不能正常工作					

2.3 故障树定性分析 (FTA)

2.3.1 建立故障树

根据继电器控制原理和故障模式分析对可能的故障分类排队建立故障树如图3。

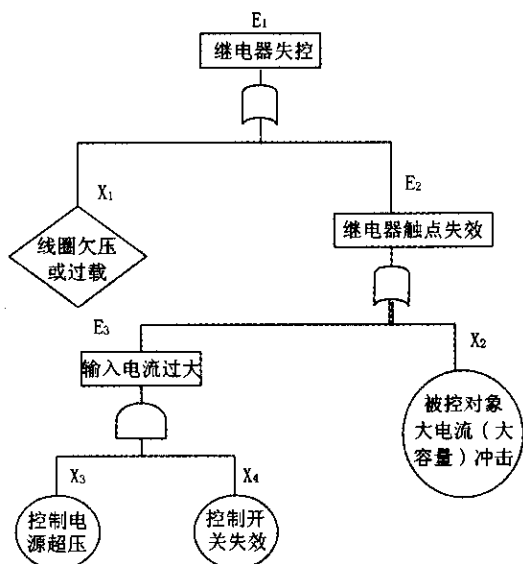


图3 故障树

Fig.3 Fault tree

2.3.2 求最小割集

采用下列方法求最小割集:

$$\begin{aligned}
 E_1 &= X_1 + E_2 \\
 &= X_1 + X_2 + E_3 \\
 &= X_1 + X_2 + X_3 X_4
 \end{aligned}$$

X_1 指继电器线圈欠压或过载, 易造成继电器不工作, 形成断路, 从而使继电器失控, 这种故障不易发生, 要加强对系统继电器群的维护和工作人员操作技能的提高; X_2 指被控对象大电流(大容量), 这种情况易发生, 是造成继电器失效的重要方面, 要引起高度重视。特别是防止控制电路短路问题的发生。对于已知的大电流切换控制要优化冗余设计, 还要考虑消火花电路的设计, 将可靠性始终放在第一位; $X_3 X_4$ 指控制电源超压, 同时控制开关失效, 在这方面要加强操作人员的责任心和三检制, 防止出现电源超压而未发现, 误合电源控制开关的问题发生。

2.4 寿命可靠性分析

影响继电器寿命的因素主要有:

(1) 机械环境对接点的影响。振动冲击可能使接点产生误动作, 特别是发动机试验振动频率与接点动作频率相近时, 危害更为突出, 但这种发生概率极低。

(2) 潮湿对接点的影响。潮湿环境会加速触点腐蚀氧化, 这点对控制系统来说不构成影响。

(3) 接点低电平(欠压)失效。前面已介绍。

(4) 接点寿命。指的是继电器正常工作之后, 接点的接通与断开的动作次数, 接点的失效表现为断开时粘结, 出现错误的动作, 闭合时接触电阻大于规定的值。失效的形式主要表现为突然失效、退化失效、自然失效。

3 结论与对策

3.1 结论

目前使用的 JX-3 型系列继电器规定的额定负载寿命为 10^4 次。而目前我所进行的大型试验已突破 400 次。有的继电器投入工作了 30 多年, 经计算有的继电器工作已经达到 8000 次。考虑某试验台的试验次数的分配和继电器触点负荷特性, 如: 承受通断功率的能力、瞬时功率冲击、电腐蚀、熔化等因素对继电器的影响, 同时考虑继电器失效规律明显地表现为“浴盆曲线”的特征, 建议对继电器应采取降额使用。即: 加强对继电器群的监测, 若继电器再次发生失效故障, 或发现触点组接触电阻 $\geq 0.01 \Omega$ 时, 表明继电器已进入故障多发期: 一方面应对同批次的继电器全部进行更换, 确保对发动机试验程序的可靠控制; 另一方面将失效继电器送交认可的失效分析资格单位进行最终结果分析, 以得出正确的报告结论, 采取相应对策。

3.2 对策与措施

为了确保继电器可靠工作, 除了采取表 3 中的针对性措施以外, 还应考虑以下几个方面并采取相应对策。

(1) 安装问题

安装前应确认继电器的生产日期及外壳、触点上是否有尘土、油物、锈蚀; 要安装在固定的架子上; 不允许不固定而直接摆放在控制盒内, 以免因试验振动而造成触点振动。

(2) 加强维护检查

主要内容为通电检查、外观检查和绝缘检查。触点接触面积聚尘埃时，应用酒精棉布擦拭干净，切勿用砂纸打磨触点（接点），防止打磨不平造成接触不良，焊接时严防虚焊。

(3) 提高控制电路的可靠性

根据实际情况，采用消电火花（灭弧）电路设计和冗余设计。

(4) 控制供电电压（见表 3）

不允许超负荷使用，否则其使用寿命会大大受到影响。

参考文献：

- [1] 李进贤，火箭发动机可靠性[M]，西安：西北工业大学出版社，1999。
- [2] 李海泉，李刚，系统可靠性分析与设计[M]，北京：科学出版社，2003。
- [3] 郑南昌，控制系统适应试车恶劣条件的技术对策[J]，火箭推进，2003，29（5）。

（编辑：马 杰）

简讯

英国公司展示新型发动机

英国追星者公司目前已将其液氧/煤油火箭发动机——邱吉尔 MK3 公之于众，该发动机可产生 147000 牛顿的推力，是自 20 世纪 70 年代以来英国制造的此类发动机中最大的型号，主要用于满足追星者公司提供低成本卫星以及太空旅行发射的需求，发射场计划设在新墨西哥。

此次展示在曼彻斯特的索尔福德大学举行，索尔福德是追星者公司的诞生地。追星者公司希望能把此型号的发动机用在太空旅行计划中去。该发动机使用航天用复合燃料和低温液氧作为推进剂，与阿波罗/土星 V 登月项目提供动力的推进剂相似。

追星者公司希望在接下来的十年里，新型发动机能在新墨西哥发射场把自己的下一代火箭送往太空。

追星者公司还计划研制一枚可重复使用的探空火箭，它要比英国刚刚退役的云雀探空火箭具有更强的性能。新型探空火箭的研制将为低成本卫星以及太空旅游铺平道路。

追星者公司是一个国际私人独资公司，致力于太空相关设备的研发及提供太空服务。它的目标是成为世界上第一家开展太空旅游的私人公司。

云雀探空火箭是世界上为期最长的太空计划（1957-2005 年），主要用于科学研究。早期的实验包括 X 射线天文学的大气研究和对引起变异带的电离层相互作用的研究。近些年，研究关注于德国航天局的微重力实验、多普勒激光雷达（DLR）以及太空实验室和国际空间站的实验设备。