

基于失效模式的 电子元器件质量控制

QC Electronic
Component

李京苑 主编 | 熊盛阳 洪鸣 姚全斌 副主编

基于失效模式的 电子元器件质量控制

JIYU SHIXIAO MOSHI DE
DIANZI YUANQIJIAN ZHILIANG KONGZHI

QC Electronic
Component

李京苑 主编 | 熊盛阳 洪鸣 姚全斌 副主编



首都经济贸易大学出版社
Capital University of Economics and Business Press

图书在版编目 (CIP) 数据

基于失效模式的电子元器件质量控制 / 李京苑主编. --北京:
首都经济贸易大学出版社, 2019.5

ISBN 978-7-5638-2934-7

I. ①基… II. ①李… III. ①电子元器件—质量控制
IV. ①TN60

中国版本图书馆CIP数据核字 (2019) 第063965号

基于失效模式的电子元器件质量控制

李京苑 主编

熊盛阳 洪鸣 姚全斌 副主编

责任编辑 刘元春

封面设计 风得信·阿东
Fondesy Design

出版发行 首都经济贸易大学出版社

地 址 北京市朝阳区红庙 (邮编 100026)

电 话 (010) 65976483 65065761 65071505 (传真)

网 址 <http://www.sjmcb.com>

E-mail publish@cueb.edu.cn

经 销 全国新华书店

照 排 北京砚祥志远激光照排技术有限公司

印 刷 北京玺诚印务有限公司

开 本 710毫米×1000毫米 1/16

字 数 211千字

印 张 12

版 次 2019年5月第1版 2019年5月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5638-2934-7 / TN · 3

定 价 68.00元

图书印装若有质量问题, 本社负责调换

版权所有 侵权必究

前 言

Preface

电子元器件是在电子线路或电子设备中执行电气、电子、电磁、机电或光电功能的基本单元，是电子产品的基本组成部分。在中国航天六十余年的发展历程中，电子元器件的可靠性问题备受关注。按照自力更生的原则，中国运载火箭长期以来坚持推广应用国产电子元器件。中国的电子元器件为我国航天事业的发展做出了重要贡献。

曾有一段时期，电子元器件面临的可靠性问题比较突出，因此，在国家层面，相继组织了“七专”电子元器件质量控制和科学试验、航天电子元器件可靠性增长工程、载人航天电子元器件质量保证计划等，这些质量提升工程主要针对电子元器件的失效模式，将消除或控制电子元器件的失效模式作为工作目标，在后续工作中取得了良好成效。

中国运载火箭研究院（以下简称“航天一院”）在从事运载火箭研制过程中，积极参与国家的电子元器件质量提升工程，同时，也建立了自己的电子元器件产品保证体系，包括检验检测系统、失效分析系统、管理体系和标准体系。航天一院十分重视元器件

的现场失效，长期开展失效分析和质量问题的归零活动，在解决元器件故障的艰难过程中，积累了经验。

本书不是对电子元器件质量与可靠性进行系统性研究的书籍，只是结合实际工作，通过对典型案例的分析，介绍航天一院在电子元器件质量控制方面所做的工作。本书的第一章由李京苑、达猛、熊盛阳、李森等负责编写或提供素材；第二章由彭磊、苏磊、周康、赵钺、崔德胜、么东阁、李丹等负责编写或提供素材；第三章由张伟、刘泓、加春雷、王丽妍、许春来、王闯、刘博龙、张晓丽、张佳鑫、陈灏、杨凡等负责编写或提供素材；第四章由张伟、林雄辉、张晖、官岩、卢欣、王慧等负责编写或提供素材；第五章由熊盛阳、张伟、王树升等负责编写或提供素材。全书由李京苑、熊盛阳、洪鸣、姚全斌负责整理、修改、完善。

在本书的撰写过程中，虽经多次修改，几易其稿，但因为资料收集不及时，编者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请广大读者批评指正。

CONTENTS

目 录

第一章 问题导向

——基于失效模式的质量控制方法 1

第一节 再归零原则 4

第二节 规范标准，建立数据管理系统 9

第三节 提升元器件可靠性的主要途径 19

第二章 看似简单，但失效时常发生

——电子元件的典型失效模式 25

第一节 电容器漏电 27

第二节 电连接器内部多余物问题 40

第三节 混装电连接器的接触对损坏问题 48

第四节 电磁继电器内部多余物问题 61

第三章 成效显著，但仍需努力保持

——电子器件典型失效模式 71

第一节 功率器件的热致失效 73

第二节 半导体器件键合界面的可靠性控制 85

第三节 半导体器件键合质量一致性控制 94

第四节 半导体器件内部水汽含量控制 106

第五节 内部多余物问题的防治 112

第四章 存在变数，探索的重点 ——大规模集成电路的可靠性问题 121

第一节 大规模集成电路的质量保证 123

第二节 芯片设计与制造问题 128

第三节 内引线短路问题 133

第四节 引出端疲劳损伤问题 142

第五节 其他新器件应用的可靠性问题 153

第五章 不可不关注的问题 ——塑封器件及其质量保证 163

第一节 典型生产工艺及其在高可靠领域的应用现状 166

第二节 失效模式、机理和应对措施 169

第三节 质量保证建议 174

第

一

章

问题导向

——基于失效模式的质量控制方法

▲ 再归零原则

▲ 规范标准，建立数据管理系统

▲ 提升元器件可靠性的主要途径

问题是科学研究、技术创新和管理创新的起点，也是保证产品质量和可靠性的出发点。长期以来，航天一院不断加深对质量问题的理解，加强对产品故障或失效的管控，认识到那些需要通过技术创新来解决的质量问题只占少数，大部分问题属于可以通过已有方法解决的常规问题，这种现象说明我们在经验教训的总结方面、在知识的管理方面存在不足，使得电气系统可靠性分析与设计缺乏基础的数据支持。

2013年，我们提出“梳理模式、提炼准则、统计分析、完善基线、积累数据”的质量问题归零原则，要求在完成归零主体工作之后，要对解决问题的过程进行系统梳理，提炼出基线和准则。如此，一方面，可使后续的改进工作更有针对性；另一方面，通过对不同失效模式的数据积累，为电子设备的可靠性设计提供支持。

21世纪以来，元器件的质量水平有较大的提高，但作为航天复杂庞大系统的基础之一，元器件依然是质量保证工作的重点。过去元器件质量水平的提高得益于一系列质量提升工程，其特征是用户牵引、问题导向。当前，在如何提高元器件质量与可靠性方面，仍然应当统一认识，继续坚持以问题为导向，尤其是面向已经发生的质量问题，要从元器件的失效模式抓起。

元器件失效模式是元器件失效的表现方式，是对产品所发生的、能被观察或测量到的故障现象的规范描述。研究元器件失效模式，特别是研究元器件的现场失效，开展失效分析，并采取纠正措施，是提高元器件可靠性的主要途径，也是保证元器件质量与可靠性的关键和重点。

第一节 再归零原则

严肃、规范地处理质量问题，是航天事业持续发展的保证，坚持双“五条”归零标准的同时，还要进一步体现归零标准的具体量化，不断丰富归零工作的内涵。2010年，针对航天工程的系统特征和组织特征，提出“眼睛向内、系统抓总、层层落实、回归基础、提升能力”的“五条”归零原则。2013年，又提出“梳理模式、提炼规则、统计分析、完善基线、积累数据”的“五条”归零原则，强调要对质量问题归零结果进行深入分析，并与可靠性工作密切结合。

一、梳理模式

梳理模式，即收集、整理已经发生的元器件质量问题，提炼元器件失效模式。航天系统较早开展了故障模式影响及危害性分析（FMECA：failure mode effects and criticality analysis）工作，但因未能及时有效总结现场失效数据，并未形成可支撑系统FMECA的失效模式库，因此系统的FMECA工作仍然主要依赖于设计师个体的经验或教科书的数据。此外，在现行有效的标准规范中，针对相同的产品，不同的行业给出了不同的失效模式分类和定义，不利于具体工作的实施。为了针对质量问题达到举一反三的目的，需要先对质量问题归零的相关重要信息和要素进行整理，形成质量问题线索表，此后还要增加故障模式的收集要求，建立复杂故障故障树库，系统地积累航天产品的故障模式。

结合运载火箭的特点，将故障模式分成两大类进行研究。

一是以元器件、原材料、软件、标准紧固件等零部件为代表的基础产

品失效模式。几乎所有的质量问题，最终可能都体现在某个特定的元器件、原材料或者某项软件的失效上，因此基础产品是设计师系统开展可靠性设计的起点，有必要对这些产品的失效模式进行统一分类和定义，以便开展FMECA以及单点故障模式识别与控制工作。例如，对于元器件的失效模式可以划分为开路、短路、外观损伤、功能失效、参数变化、结构破坏、绝缘不良、接触不良等。

二是系统或单机产品的故障模式，例如运载火箭总体、控制系统、发动机等。这一类失效模式通常缺乏公用的数据基础，需要结合工程系统不断积累。

故障模式的梳理要本着能用、好用的原则，一方面要面向进行可靠性设计和分析工作的设计师；另一方面，要面向从事产品质量保证和可靠性研究的人员。

二、提炼准则

提炼准则，即通过对已有质量问题的深入分析，提出今后在设计、工艺、试验、管理等方面的准则或禁忌，运用这些准则或禁忌，能够防止问题重复发生。在当前的质量问题归零活动中，一方面存在“纠正”和“纠正措施”概念混淆的问题，以现场处理措施作为纠正措施，没有明确在设计、工艺等方面的改进措施；另一方面，质量部门发出的用于举一反三的质量问题线索表中，未将导致问题的共性原因及改进措施加以提炼，致使举一反三的针对性不强。

提炼准则的工作，不仅针对技术问题，也针对管理问题。提炼准则，应该遵循两条原则：一是可操作性要强，应当尽量具体，类似“严格过程控制”“加强验收把关”等词语应尽量避免使用；二是要做好归纳或类推，要由针对一个产品的准则上升为针对一类产品的准则。

以某系统发生的单元测试结果异常为例，其故障定位于单片机设计使用的内部复位电路复位时间与电源上电时间不协调。纠正措施为更换单片机并增加外部复位电路。

按照上述纠正措施，工作范围将仅限于该系统的某一测试设备。如果按照提炼准则的工作要求，则应当对该问题进行进一步分析，并形成如下内容：①单片机电路设计应尽可能采用外部复位电路；②当使用内部复位电路时，其复位时间应大于电源上电时间。

按照上述工作准则，可以对其他系统使用的单片机复位电路进行检查，并采取相应的改进措施。

三、统计分析

统计分析，一方面是对已认知或已发生的失效模式的种类进行统计分析，识别其发生的深层次原因，为改进工作提供支撑；另一方面，还要对失效模式的发生频率进行统计分析，为开展可靠性设计提供依据。

例如，运载火箭所使用的阀门产品有“打不开”和“关不住”这两种故障模式，由于缺乏对两种故障模式的发生频率进行统计，并未明确主要故障模式。在以往的阀门设计过程中，主要担心“打不开”情况的发生，为此采用并联阀门以解决该问题，而并联阀门的设计方式却增加了“关不住”的风险，反而降低了系统的可靠性。

又如，过去理论上认为瓷介质电容器的主要失效模式是开路，在滤波电路设计时，经常采用两个电容器并联的设计方式，一旦发生开路失效，只会造成性能偏差。但实际的统计结果表明，绝大部分瓷介质电容器的失效是由于介质层缺陷或端头处理不当造成的短路失效，电容器并联设计方式反而提高了产品功能失效的概率。

举一反三基线的建立，一方面可以有效地指导各单位建立并完善标准规范体系，帮助提高员工工作能力；另一方面通过不断完善故障模式库或故障树库，可以使FMECA和故障树分析工作更加充分，为开展后续单故障模式分析及闭环控制等工作打下基础。质量问题举一反三基线与相关工作关系如图1-1所示。

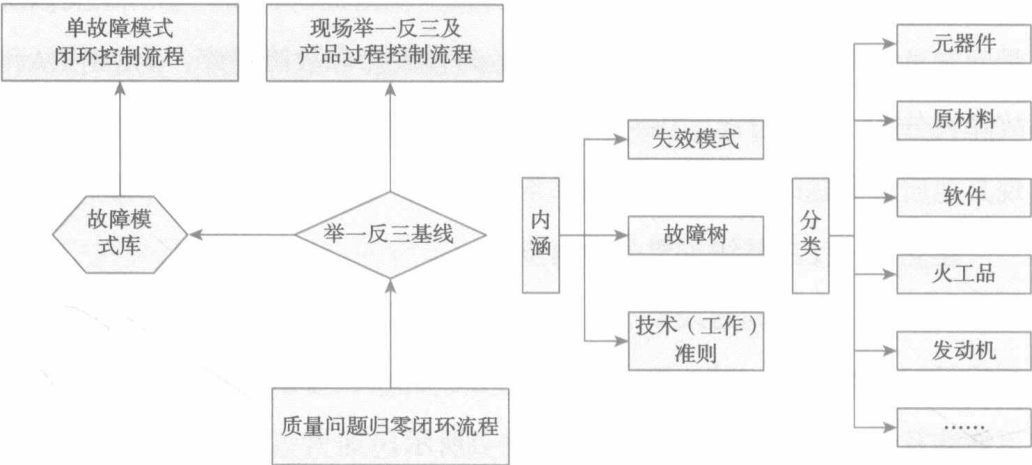


图1-1 质量问题举一反三基线与相关工作关系图

五、积累数据

积累数据，即通过质量问题归零，将以往未认识到，在产品设计、生产、试验等过程中的薄弱环节提取出来作为产品的关键特性加以控制，并完善质量与可靠性数据包，通过后续数据的不断积累，为开展数据分析以及产品质量评价提供支撑。目前的问题是，虽建立了质量与可靠性数据包，但缺乏后期评价和优化完善的过程，一旦出现问题，已有的数据包难以为故障分析提供全面、有效的支撑。因此，质量问题归零，一定要对数据包进行不断补充完善。

做好积累数据工作，首先要提高对质量与可靠性数据包的认识，以单机产品为例，质量与可靠性数据包是表现产品功能、性能的质量与可靠性模型。基于已经建立的数据包，对于出现的失效问题，能够快速实现故障

定位。数据包的本质是在对产品关键特性深刻理解、充分认识的基础上，用数据进行量化表征的结果，并在后续工作中不断地进行数据积累。在积累数据的过程中，应注重以下两点。

首先是关键特性的识别。在质量问题归零工作中发现一些产品的特性往往具有耦合性，表现为两个或两个以上特性共同影响产品功能、性能指标的实现，因此需要在产品特性识别的基础上，进一步梳理确认产品内部、产品间、系统与产品间以及系统间的特性耦合关系。对于一个型号，要形成型号的关键特性分解树，将关注的型号总体关键特性逐级分解为单机、部组件甚至元器件及原材料的特性要求，不仅要作为本级产品关注的重点，更要作为上游对下游管控的重点。

其次是数据包的建立。原则上产品的功能、性能以及可靠性数据应当通过检测、试验等手段直接获取，当某些数据无法直接获取时，就需要通过设计分析，将产品特性分解到可测的几何、机械、物理或化学特性。如果产品特性同样不可测，则应当进一步按照产品生产制造的工艺流程细化到关键的工艺特性和材料特性。

第二节 规范标准，建立数据管理系统

一、建立产品树和对应的故障模式标准

从可靠性工作的角度出发，需要统一掌握系统、整机、元器件的失效模式。目前，三者之间的界限变得愈加模糊，在研究失效模式时，应当统一考虑三个层次的产品。元器件的失效模式和机理往往是支撑整机FMECA分析的基础。同理，整机的失效模式和机理对于系统的作用也是如此。在对整机的设计、生产过程中通过对影响整机功能、性能的元器件失效模式

进行分析，并控制元器件的失效模式，能够有效提高整机的可靠性。

以某应答机为例，选用某项元器件内嵌存储功能模块。在轨运行期间，该应答机向地面接收站输出错误码，表现为应答机内器件转码时第7位和第8位出现误码（总共16位），该问题是由于内部存储功能模块受到高能粒子轰击出现瞬态失效而引起的。该案例中，应答机（整机级）的故障模式为错码，器件（器件级）的失效模式为转码错误。吸取类似问题的教训，对于某型号涉及存储功能的关键单机均采用软件以及硬件冗余设计保障技术。

对于电气整机而言，需要统一元器件的失效模式标准，才能对元器件的失效模式进行统计分析。元器件本身的可靠性管理同样需要确定统一失效模式的标准。20世纪90年代中期，航天一院在航天工业总公司元器件专家组徐书文的帮助下，制定了元器件失效模式标准，并以文件形式发布。1999年，我国颁布了由工信部电子五所起草的GJB 3781—1999《电子系统质量与可靠性信息分析和编码要求》，规定了电子产品包括元器件在内的失效模式标准。2005年，航天科技集团公司进一步完善了元器件失效程度和失效模式的分类及代码，发布了《电子元器件失效分类及代码》。

目前的故障模式主要是对不同层次的产品进行定义，整机、元器件都有各自的故障模式或失效模式。比如，整机的故障模式根据单机的种类和失效情景，一般可以划分为参数漂移、参数突变、绝缘下降、错码等；元器件的失效模式一般包括开路、短路、外观损伤、功能丧失、参数变化、结构破坏、绝缘不良、接触不良等。

开展系统的可靠性研究，首先要建立产品树，其次对于产品树的每一级产品均应明确相应的失效模式。以通用的陶瓷封装单片集成电路为例，该类产品可划分为由外引线、外壳、芯片、芯片连接、引线键合五个部分组成的二层结构产品树，如图1-2所示。对应于产品树的每一级产品和分支，都有对应的失效模式，如表1-2所示。