



工业自动化仪表系列丛书

仪表可靠性工程 和环境适应性技术

刘建侯 编著
裘履正 主审



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



工业自动化仪表系列丛书

仪表可靠性工程和环境适应性技术

刘建侯 编著



机械工业出版社

本书是工业自动化仪表系列丛书之一。本书着重地讲述了仪表可靠性工程（包括可靠性基础、仪表可靠性和维修性设计、可靠性和维修性设计评审、可靠性试验、失效分析等）和仪表环境适应性技术（包括仪表工作条件、环境要求及环境适应性设计等）。本书在选材、内容的深度和广度以及理论性和实践性等方面，均力求简明、实用，尽量介绍仪表可靠性工程和环境适应性技术方面的实际例子，使读者在深入学习本书后，能掌握仪表可靠性工程和环境适应性技术的基本原理及方法，并能根据例题，灵活应用及融会贯通于自身的工作。

本书可作为仪表类专业的工程技术人员、大专院校师生的参考书，也可作为相关专业部门的培训教材。

图书在版编目（CIP）数据

仪表可靠性工程和环境适应性技术/刘建侯编著. —北京：机械工业出版社，2003.7

（工业自动化仪表系列丛书）

ISBN 7-111-12011-6

I. 仪… II. 刘… III. ①工业仪表：自动化仪表—可靠性—研究②工业仪表：自动化仪表—环境—适应性—研究 N. TH86

中国版本图书馆CIP数据核字（2003）第029596号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

责任编辑：周娟 张沪光 版式设计：霍永明

责任校对：李秋荣 封面设计：姚毅 责任印制：路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003年5月第1版第1次印刷

850mm×1168mm¹/₃₂·8.875印张·234千字

0 001-3 000册

定价：18.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话（010）68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

**“工业自动化仪表系列丛书”
编辑委员会**

主任委员		张继培	
副主任委员		史美纪（常务）	吴钦炜
委 员		王璐璐	罗命钧 秦起佑
		周 娟	张沪光 张永江
		薛生虎	杜水友 梁国伟
		蔡武昌	高克成 于世南
		陈晓竹	李铁桥 周有海
		吴 哈	彭 瑜 张雪申
		俞金寿	汪克成 缪学勤
		刘建侯	徐建平

编写说明

工业自动化仪表是国民经济各部门重要的现代技术装备之一，广泛用于冶金、电力、石油、化工、轻工、纺织，交通、建筑、食品、医药、农业、环保以及日常生活等各个领域。

工业自动化仪表是对物质世界的信息进行自动测量与控制的基础手段和设备，是信息产业的源头和组成部分。

为了认真总结国内外工业自动化仪表的先进经验，提高我国工业自动化仪表的科技、生产、应用水平，经中国仪器仪表学会、上海工业自动化仪表研究所、机械工业信息研究院和中国仪器仪表学会过程检测控制仪表分会共同研究，决定组织编写、出版“工业自动化仪表系列丛书”。

目前，首先陆续出版以下 12 种：《温度测量技术及仪表》、《压力测量技术及仪表》、《流量测量技术及仪表》、《物位测量技术及仪表》、《机械量测量技术及仪表》、《物性分析技术及仪表》、《显示调节技术及仪表》、《可编程序控制器及其应用》、《控制阀选型和应用》（原名执行器）、《过程控制系统和应用》、《仪表可靠性工程和环境适应性技术》、《仪表本安防爆技术》。

本系列丛书内容完整，系列齐全，基本上反映了工业自动化仪表技术与产品的全貌，文字力求深入浅出，通俗易懂。系列丛书既可作为从事工业自动化仪表专业的工程技术人员及广大用户的参考书籍，也可作为大专院校教材及科研、设计、制造、使用单位工程技术人员培训教材。

编写出版“工业自动化仪表系列丛书”，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希望广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

“工业自动化仪表系列丛书”编辑委员会

前 言

可靠性从广义角度来说，它涉及到可靠性工程和环境适应性技术，是一门涉及面很广，又具有相当深度的交叉学科。一个优良的仪表或系统，它应该既性能优良，又能在要求的环境条件下安全、可靠工作。随着科学技术的发展，仪表或系统的应用范围越来越广泛，不但要求能在正常条件下工作，还需要能适应各种不同环境条件（如恶劣气候、振动、电磁骚扰等）下安全、可靠工作。因此，广义可靠性愈来愈受到人们的重视，由此，我们需要在仪表和系统的可靠性工程及环境适应性方面开展研究和应用工作。

近10年来，国内的电子、机械、仪表、船舶、冶金、建筑、邮电、航空航天和军工等行业都引进了许多国外设备，同时，也引进了国外的技术（包括技术标准、性能要求及可靠性要求和可靠性试验方法等），通过对引进产品的消化吸收、批量生产和新产品的研制开发等实践，逐步掌握了国外的先进工艺、严格的试验方法和先进管理方法，从而推动了国产设备的质量提高，为国产设备立足国内市场，开拓国外市场打下良好的基础。

为了向国内工程技术人员和有关专业大学生介绍可靠性工程和环境适应性技术的基本概念、基本内容和基本方法，并根据作者多年从事仪表可靠性工程与环境适应性技术工作的实践，编写了本书。出版本书的愿望：一是能使读者看懂，二是能在实际工作中应用。

全书共分三章，第1章是叙述仪表可靠性和环境适应性的基本概念。第2章是本书的重点，叙述可靠性工程的基本内容，所选材料是从大量可靠性工作实践中总结出来的，是最基本的，较为成熟的，所以希望读者能掌握。它的核心内容包括仪表可靠性

指标的确定, 仪表常见的失效分布, 可靠性设计程序和要求, 可靠性模型, 可靠性预计与分配, 失效分析, 可靠性与维修性设计技术, 可靠性试验技术, 软件可靠性设计、测试与试验以及可靠性与维修性管理等。第3章主要通过对工业自动化仪表工作条件和环境试验技术的叙述, 着重推荐仪表环境适应性设计技术(如热设计、耐腐蚀设计、耐环境设计和电磁兼容性设计技术等)。

本书是叙述仪表的广义可靠性, 所以内容涉及面较广。由于在某些内容的应用方面尚不够丰富(如软件可靠性技术、电磁兼容性设计等), 还需要继续大力开展研究工作。为了使读者掌握可靠性工程和环境适应性的基本内容, 在使用本书时可以相应辅以一定数量的习题, 使读者加深理解内容。因限于水平, 错误之处在所难免, 读者如能给予批评指正, 将是对作者最好的鞭策。

编 者

目 录

编写说明

前言

第 1 章 仪表可靠性和环境适应性的基本概念	1
1.1 仪表可靠性及维修性的基本概念	1
1.2 仪表环境适应性技术的基本概念	2
第 2 章 可靠性工程	4
2.1 仪表可靠性及维修性指标和常见的失效分布	4
2.1.1 可靠性及维修性主要指标	4
2.1.2 常见的失效分布	14
2.2 可靠性及维修性设计	21
2.2.1 可靠性设计程序和要求及维修性设计准则	21
2.2.2 可靠性及维修性指标的规定	22
2.2.3 可靠性模型	24
2.2.4 可靠性预计与分配	28
2.2.5 可靠性及维修性分析	37
2.2.6 可靠性及维修性设计技术	46
2.3 可靠性试验	80
2.3.1 概述	80
2.3.2 可靠性验证试验	84
2.3.3 可靠性数据的收集和统计分析	92
2.4 软件可靠性	121
2.4.1 概述	121
2.4.2 软件可靠性的基本特征量	122
2.4.3 软件错误与分类	126
2.4.4 软件可靠性设计	128
2.4.5 软件可靠性模型	134

2.4.6 软件的测试和检验	139
2.5 可靠性与维修性管理概论	147
2.5.1 可靠性、维修性管理与质量管理的关系	148
2.5.2 可信性管理大纲指南的使用	150
2.5.3 可靠性保证大纲	150
2.5.4 可靠性、维修性管理计划	151
2.5.5 研制设计阶段的管理	152
2.5.6 生产与使用阶段的管理	153
第3章 环境适应性技术	157
3.1 工业自动化仪表环境适应性技术主要内容	157
3.1.1 仪表的工作条件	157
3.1.2 仪表的环境试验技术	159
3.1.3 环境适应性设计技术	160
3.2 工业自动化仪表工作条件	160
3.2.1 温度、湿度和大气压力	160
3.2.2 动力	162
3.2.3 振动和冲击	166
3.2.4 腐蚀和侵蚀影响	168
3.3 工业自动化仪表环境试验技术要求	171
3.3.1 概述	171
3.3.2 工业自动化仪表振动(正弦)试验要求	171
3.3.3 仪器仪表运输、运输贮存基本环境试验条件及要求	171
3.3.4 抗扰度试验要求	172
3.3.5 各类工业自动化仪表环境试验技术要求	183
3.4 工业自动化仪表环境适应性设计技术	195
3.4.1 热设计	195
3.4.2 耐腐蚀设计	203
3.4.3 耐振设计	208
3.4.4 电磁兼容性(EMC)设计	224
附录	252
附录A 标准正态累积分布函数	252
附录B χ^2 分布分位数表	253

附录 C	中位序表	255
附录 D	相关系数 ρ 的临界值 (ρ_0, α)	256
附录 E	定数截尾 MTBF 双侧 (或单侧) 置信限 系数 C_L, C_U	257
附录 F	定时截尾 MTBF 双侧 (或单侧) 置信限 系数 C_L, C_U	258
附录 G	一次抽样试验方案表 ($\alpha=0.20, \beta=0.20$)	259
附录 H	一次抽样试验方案表 ($\alpha=0.10, \beta=0.10$)	263
附录 I	AMSAA 增长模型拟合优度检验的临界值 $C_{M,a}^2$...	267
附录 J	增长试验 (定时截尾) MTBF 置信限系数 K_L, K_U	267
附录 K	增长试验 (定数截尾) MTBF 置信限 系数 K_L, K_U	268
参考文献		270

第 1 章 仪表可靠性和环境适应性的基本概念

仪表可靠性工程从广义来说,它包括可靠性和环境适应性。所以,可靠性是仪表产品的主要属性之一,也是主要的质量特性。仪表工业作为国民经济的装备部门,为了保证国民经济各部门生产的正常运行和运行效率,提高仪表产品的可靠性和环境适应性势在必行。因此,仪表产品可靠性和环境适应性问题制造部门和用户共同关心的重要方面。

1.1 仪表可靠性及维修性的基本概念

衡量仪表质量通常应当有两类性质的指标:一类是反映仪表完成规定功能所需要的技术性能指标,另一类是反映仪表保持技术性能指标能力的可靠性指标。也就是说,具有良好的技术性能又经久耐用的仪表才算得是质量好的仪表。仪表“可靠性”是指仪表处于使用状态时,在所规定的时间内是否处于“完好状态”。“可靠性”更精确的定义,是指仪表在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。从这个定义可知,与可靠性有关的因素有四个:①规定条件;②规定时间;③规定功能;④完成规定功能的能力。“维修性”是指仪表在规定条件下、规定的时间内、按规定的程序和方法进行维修时,保持或恢复到规定状态的能力。与维修性有关的因素有四个:①规定条件;②规定时间;③规定程序和方法;④保持或恢复到规定状态的能力。

规定的条件主要指环境条件(包括气候环境、生物化学环境、机械环境及电磁骚扰环境等)、使用条件(包括连续工作、断续工作、周期工作、负载能力等)、维护条件和操作条件等,这些条件对仪表的可靠性都会有直接的影响。

规定的时间是指仪表能完成规定功能的时间(有时可定义为

动作次数、运行周期、循环次数等)。

规定的功能是泛指仪表应具有的技术性能指标和使用要求。这是在仪表设计时就已确定了的，正常工作时均应得到保证。如仪表具有的精确度、回差和灵敏度等。

完成规定功能的能力就是仪表可靠性的直接反映，这只是定性的概念，应当有能够定量描述仪表可靠性的具体指标，才能进一步进行深入的研究，以便不断提高仪表的可靠性。仪表可靠性可用不同的指标表示，以适应不同仪表和不同场合的要求。例如可靠度、平均寿命、失效率、平均恢复前时间、可用度、修复率等。

仪表的技术性能与可靠性的关系是极为密切的，无数事例说明，如果仪表不可靠，它的技术性能再好，也难以发挥作用。因此，可以说仪表的可靠性是仪表质量的基础，没有可靠性这个基础，理论上再先进、技术指标再高的仪表也是没有多少使用价值的。

许多产品是为了满足用户的需求或规定要求而开发的，这些要求通常涉及到可靠性、维修性，有时也涉及到在规定维修条件下的可用性。同时，社会对服务（如运输、电力、通信和信息服务）的依赖日益增加，导致了用户对服务质量更高的要求 and 期望。所以，在国际上对产品提出了可信性要求，国际电工委员会和国际标准化组织提出了 IEC300-1 和 ISO9000-4“可信性管理——可靠性大纲管理”/“质量管理和质量保证标准——可信性大纲管理指南”。可信性是许多产品的最重要性能特性之一。可信性保证是指产品的可靠性性能和维修性性能，以及由顾客（和或供方）提供的维修支持能力。可信性是由供方和顾客双方承担的责任。一般用于非定量描述的场合。

1.2 仪表环境适应性技术的基本概念

仪表环境适应性指产品对环境条件变化的承受能力。

环境适应性技术是指从产品研究、设计开始，直至产品投入

使用的全过程中，研究产品经受的环境条件，借助于产品耐环境设计方法和环境模拟试验技术，使产品对环境条件变化的承受能力达到设计规定的要求。环境适应性技术主要研究仪表在运输、使用等过程中经受的环境条件，在自然或人工模拟的环境中进行的环境模拟试验方法，以及仪表产品耐环境防护设计技术等。

被测量以外的任何能影响仪表性能和使仪表示值产生变化的量称为影响量。影响仪表性能的环境条件，不但包括产品正常工作时经受的环境条件，还包括产品在生产、贮存、运输和安装时经受的环境条件。

产品环境条件涉及影响产品性能的环境参数和它们的严酷程度，为了便于研究，国家标准和国际电工委员会（IEC）的有关标准，将环境参数分为四类：

（1）气候环境参数 包括温度、湿度、气压、降水、太阳辐射等。

（2）生物和化学环境参数 包括盐雾、二氧化硫、硫化氢、霉菌等。

（3）机械环境参数 包括正弦振动、随机振动、冲击、碰撞、恒加速度等。

（4）电磁环境参数 包括电源电压和频率的稳态变化、共模和串模干扰、音频传导干扰、磁场骚扰等。

在实际使用中，根据产品生产过程、流通过程和使用场所的特征，环境条件常以多种环境参数复合的形式组成特定的应用环境条件，如贮存、运输环境条件。有关环境条件的国家标准和 IEC 标准见第 3 章。

第2章 可靠性工程

2.1 仪表可靠性及维修性指标和常见的失效分布

2.1.1 可靠性及维修性主要指标

可靠性及维修性是衡量产品质量的重要指标之一。但产品发生失效或故障又是难以预测和无法完全避免的,这就需要运用可靠性技术来预防和减少失效或故障的发生,降低故障造成的损失。对质量管理部门来说,还要实施包括可靠性在内的全面质量控制,使产品达到所要求的质量与可靠性。这就不仅需要理解产品可靠性及维修性的含义,更需要有定量的概念,即评价产品可靠性及维修性高低的可靠性技术指标。

在讨论产品的可靠性及维修性时,通常可以将产品分为可修复与不可修复两大类型。所谓不可修复产品是指产品投入使用后,一旦损坏(称失效)在技术上就无法修复,或者即使修复也是极不经济的,因而不予修复。例如常用的晶体管、集成电路、阻容元件、轴承、齿轮等,都是属于这一类产品。可修复产品是指产品投入使用后,如果损坏(称故障),仍然能够修复到具有原有的功能再投入使用的产品,如汽车、电视机、仪表等整机或设备。

对于不可修复和可修复产品,可靠性及维修性指标的侧重点与计算均有所差别,但其基本原理仍然是一致的。

1. 可靠度及维修度

(1) 可靠度 产品在正常工作条件和规定的时间内工作,由于性能指标下降到超出许可范围,或者不能完成预定的功能等原因就要造成失效(或故障)。但如果产品可靠性高,则可能不失效(或不出现故障)。所以,产品在规定时间内完成规定功能实际上是一随机事件,可用概率来定量描述它完成规定功能的能力,即

产品的可靠程度。

产品在规定的条件下和规定的时间 t 内, 完成规定功能的概率称为该产品的可靠度, 记为 $R(t)$ 。因为它是时间的函数, 故亦称可靠度函数, 可用下式表示:

$$R(t) = P(T > t), \quad t \geq 0 \quad (2-1)$$

式中 T ——产品的寿命, 通常它是一个非负随机变量。

对不可修复产品, T 是指产品从使用开始到失效前的工作时间 (或次数、距离); 对可修复产品, T 是指两次相邻故障之间的工作时间 (或次数、距离), 亦称无故障工作时间。“ $T > t$ ” 为一随机事件, 表示产品寿命超过规定时间 t , 即在 t 时间内能够完成规定的功能。

显然, $R(t)$ 表示产品可靠程度的大小。为一非增函数, 从理论上讲有:

$$R(0) = 1, R(+\infty) = 0$$

即产品在初始时完全可靠, 但寿命不可能很长。应当指出, 可修复产品的可靠度是指首次故障时间超过规定时间 t 的概率。

按照我国国家标准 GB/T 3187—1994《可靠性、维修性术语》规定, 将估计值称作“观测值”(或点估计值)。可靠度观测值 $R(t)$ 定义为:

1) 对于不可修复产品是指直到规定的时间区间 $(0, t]$ 终了为止, 能够完成规定功能的产品数 $n_s(t)$ 与在该时间开始投入工作的产品数 N 之比。

2) 对于可修复的产品是指一个或多个产品的无故障工作时间达到或超过规定时间 t 的次数 $n_s(t)$ 与观察时间内无故障工作总次数 N 之比。在计算 N 时, 每个产品的最后一次无故障工作时间, 若不超过规定时间 t , 则不予计入。

因此, 不论对于不可修复产品或可修复产品, N 个产品从开始 ($t = 0$) 工作, 到规定的 t 时刻的失效数为 $r(t)$, 产品在该时刻的可靠度可用它的不失效频率来估计 (当 N 足够大时), 即为可靠度观测值的计算公式:

$$R(t) = [N - r(t)] = \frac{n_s(t)}{N} \quad (2-2)$$

式中 $n_s(t)$ ——残存数, 即为时刻 t 仍然保持完好的产品数, $n_s(t) = N - r(t)$ 。

图 2-1 表示可修复和不可修复产品的试验示意图。

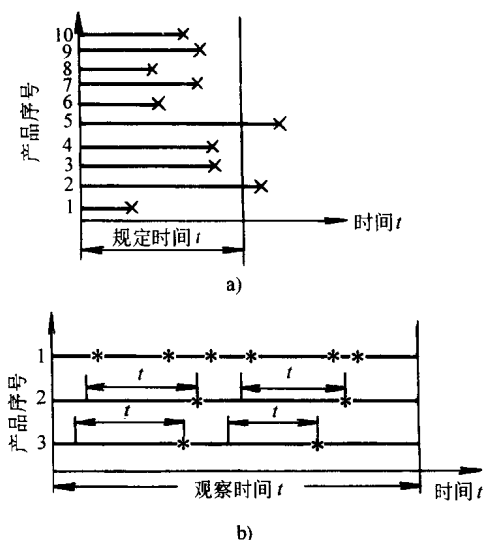


图 2-1 可修复与不可修复产品试验示意图

a) 不可修复产品 ($N=10$, $n_s(t)=8$) b) 可修复产品 ($N=10$, $n_s(t)=4$)

$$R(t) = n_s(t) / N = 8 / 10 = 0.80 \quad R(t) = n_s(t) / N = 4 / 10 = 0.40$$

(2) 维修度 维修度 $M(t)$ 是指规定的条件下并按规定程序和手段实施时, 产品在规定的使用条件和规定的时间区间内保持或恢复能执行规定功能的概率, 其数学表达式为

$$M(t) = P(\zeta \leq 0) \quad t \geq 0 \quad (2-3)$$

2. 失效分布 (累积失效概率)

产品在规定的条件下和规定的时间 t 内, 丧失规定功能 (即失效) 的概率, 称为失效分布或寿命分布, 亦称累积失效概率或不可靠度, 可用如下公式表示

$$F(t) = P(T \leq t), \quad t \geq 0 \quad (2-4)$$

显然 $F(0) = 0, F(+\infty) = 1$

并且 $R(t) + F(t) = 1$

累积失效概率的观测值为 $\hat{F}(t) = r(t) / N$ (2-5)

3. 失效密度及维修密度

(1) 失效密度 失效密度是产品失效分布函数 $F(t)$ 的导函数, 亦称寿命的概率密度函数, 记作

$$f(t) = dF(t) / dt = F'(t) \quad (2-6)$$

由此还可得到

$$F(t) = \int_0^t f(u) du, t \geq 0 \quad (2-7)$$

失效密度的观测值:

$$\hat{f}(t) = [r(t + \Delta t) - r(t)] / (N\Delta t) = \Delta r(t) / (N\Delta t) \quad (2-8)$$

失效密度的观测值 $\hat{f}(t)$ 表示在规定的的时间区间 $(0, t]$ 内的终了时刻 t 开始的单位时间内的失效数 $\Delta r(t) / \Delta t$ 与该区间开始投试的产品数 N 之比。其中, $\Delta r(t)$ 是在 $(t, t + \Delta t)$ 时间内的失效产品数。

对可修复产品, 式 (2-7) 表示一个或多个产品的无故障工作时间达到规定时间 t , 但不超过从 t 起的单位时间的次数 $\Delta r(t) / \Delta t$ 与观测时间内无故障工作总次数 N 之比。而此时 $\Delta r(t)$ 是 $(t, t + \Delta t)$ 时间内的故障次数。

所以, 不论产品是否可以修复, 失效密度的观测值都可用式 (2-8) 计算。

(2) 维修密度 维修密度为

$$m(t) = \frac{dM(t)}{dt}$$

或

$$m(t)\Delta t = M(t + \Delta t) - M(t)$$

所以, $m(t)\Delta t$ 就是产品在 $(t, t + \Delta t)$ 时间内完成维修的概率。维修度和维修密度之间有如下关系