

● 机械设计丛书

# 可靠性设计

何国伟 编著

● 机械工业出版社

机械设计丛书

---

# 可靠性设计

何国伟 编著



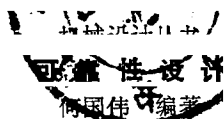
机械工业出版社

(京)新登字054号

本书是中国机械工程学会机械设计学会机械设计丛书编辑委员会组织编写的机械设计丛书之一,是专为机械设计人员编写的。

本书主要介绍机械及机电产品的可靠性(包括维修性)设计,包括可靠性指标体系、可靠性设计准则、寿命周期总费用(LCC),性能可靠性、可靠性模型、可靠性分配、FTA、FMEA、热设计、应力—强度分析、安全性大纲及安全性设计准则、常用件设计、人机工程等,还介绍了与可靠性设计密切有关的可靠性管理内容如设计评审及 FRACAS 等。本书介绍的内容有相当一部分是国内已出版的可靠性著作中较少详细介绍的。

本书还可供其他有关技术人员、管理人员参考,也可作为大专院校师生的参考书或教材。



责任编辑:夏曼苹 晏章华 责任校对:孙志筠  
封面设计:方 芬 版式设计:王 颖  
责任印制:王国光

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·印张10<sup>3</sup>/<sub>8</sub>·字数269千字

1993年8月北京第1版·1993年8月北京第1次印刷

印数0 001—3 000·定价:11.00元

ISBN 7-111-03623-9/TH·426

## 编辑委员会

主任委员 陈湖

副主任委员 周延佑 傅梦莲 郭可谦 徐家宗

委员(姓氏笔划序) 江 斌 任光华 刘存智 刘恒愉

何国伟 陈立周 吴宗泽 辛一行

周勤芝 林东初 郑效忠 徐 源

高庆荣 夏曼苹 黄致甲 曾 英

## 专业编审组

### 1. 机械设计理论方法专业编审组

组长 周延佑

组员 陈立周 曾 英 傅家骥 刘光宁 万耀青

### 2. 机械结构强度专业编审组

组长 傅梦莲

组员 刘存智 高镇同 丁奎元 周辛庚 张如一

### 3. 机械零部件设计专业编审组

组长 郭可谦

组员 吴宗泽 林东初 舒森茂 余梦生 姜 勇

(其他专业编审组暂缺)

## 编者的话

当前,国民经济各部门都迫切需要质量好、效率高、消耗低、价格便宜的先进的机械产品。而机械设计工作是决定机械产品质量、水平和经济效益的重要环节。一个机械产品的设计水平如果不高,即使制造得再好,也是一个落后的产品。所以必须加紧提高机械设计水平。

近三十年来,世界上科学技术的发展速度很快,机械设计工作也出现了崭新的局面。由于广泛运用了各学科和各技术领域里的新成就尤其是采用了电子计算机技术,在机械设计领域里,新原理、新方法、新技术与新结构不断涌现,从而,大大提高了设计水平和速度。特别是对于结构复杂、使用条件要求高的产品,改变了因设计难度大而不能设计或设计的质量低、周期长的状况。于是,许多大型、高精密度、高参数的质量高,效率高、消耗低和可靠耐用的各种机械产品,竞相出现。丰富了市场,并不断更新,以满足用户日益增长的需求。

在我国,随着国民经济的迅速发展,新产品的开发和老设备的技术改造工作日益增多,对机械设计工作的要求越来越高,机械设计人员迫切需要运用新的科学技术知识进行设计工作,但苦于缺乏学习和参考的资料。近几年来,一些进行产品研究、设计和教学的同志,一方面结合我国经验进行创新设计,一方面消化国外引进技术,均获得了可喜成果。这些成果也需要总结推广。因此,中国机械工程学会机械设计与传动学会机械设计丛书编辑委员会组织编写了这套机械设计丛书,以飨读者。

这套丛书编写的指导思想是:内容先进、实用。着重介绍新理论、新方法、新技术和新结构;对于传统的设计计算方法,要做总结提高工作。书中注意贯串整机设计思路。要求阐明本专题

的基本原理，避免深邃的数学，着重介绍物理概念及设计要点，给出实用的设计方法和计算公式、步骤、实际效果及经国内试验的数据、图表和实例。叙述深入浅出，分析透彻，使具有微积分数学知识的大中专程度的设计人员读得懂、用得上。花较少时间得到较大收获。

由于机械设计涉及面广，本丛书题目的选定，原则上是根据上述指导思想成熟一个定一个，不追求系统和全面。因此，全套丛书编写及出版时间将比较长。将采取分批出版的方式陆续出版。第一批13本将在近两年内出齐。它们是：《价值分析在产品设计中的应用》、《可靠性设计》、《电阻应变测量》、《光弹性应力分析》、《防断裂设计》、《抗疲劳设计》、《振动特性计算》、《轴的设计》、《现代带传动设计》、《机械零件可靠性设计》、《机械结构设计》和《耐磨损设计》、《联轴器》。

尽管我们朝上述设想作了许多努力，但因缺乏经验，并受水平限制，一定还存在一些缺点和不足之处，欢迎读者提出批评改进意见。

机械设计丛书编辑委员会

## 序

可靠性系统工程是一门新兴的涉及面十分广泛的综合性工程学科。它的发展和应用,对于民用产品与军用产品的研制、生产和使用产生了重要影响,是提高产品效能的重要因素。

可靠性是质量的重要内容。这里讲的可靠性是广义的,即包括维修性在内。我国军方在总结了国内外先进的经验并试行若干年后,发布了军工产品质量管理条例(1987)。此条例的执行,大大提高了军品的质量。最近等效采用ISO9000标准的国标GB/T 19000已公布,正在宣贯(它与《条例》有很多类似之处,只是《条例》强化了在研制过程的质量管理,而19000则在市场调研分析及售后服务方面更细化了)。

若干年来,航天、电子、航空等部门的可靠性工作走在全国的前面。到近几年,很多部门与单位都开始重视可靠性工作。国军标《装备维修性通用规范》(GJB368)及《装备研制与生产的可靠性通用大纲》(GJB450)的颁发、实施,大大促进了我国军品及民品的可靠性工作的开展,提高了军、民品的可靠性。但是从全国来看,发展还很不平衡。从领导的主观认识到技术人员掌握的可靠性工程技术都存在不少问题。为提高军、民品的效能,更好地满足人民日益增长的物质生活方面的需要,提高产品在国外市场的竞争能力,必须提高产品的可用性、可信性、固有能力,降低产品维修人力及后勤保障费用,降低产品的全寿命周期费用。而这些都以加强产品的可靠性(包括维修性)的工作为基础。

当前,从各级领导到具体工程技术及管理人员都面临一个重要的观念大转变。要从过去长期追求单一的性能指标转变到评价综合效能的观念上去。要把产品的可靠性(维修性)放到至少与产品性能同等重要的地位。要把LCC(寿命周期费用)、进度、性能、

可靠性(维修性)四者作为产品项目管理的四大指标。

可靠性(维修性)与其它性能一样,都必须在研制过程中设计到产品中去,通过设计、工艺、管理予以实现,并确实得到验证。在每一设计阶段末了的设计评审中,必须评审可靠性(维修性),经评审合格后才允许转入下一阶段。因此,产品本身与性能指标一起应有具体的可靠性(维修性)指标,它们都应有验证要求。产品设计师系统中应建立可靠性系统工程管理系统。但在具体实施过程中,不能设想有一批技术人员从事一般设计,另一批从事可靠性设计。实际上,要求设计人员掌握可靠性设计技术,把性能、可靠性一起设计到产品中去。

可靠性工程需要一定的手段及机构,需要必要的试验及费用。美军的一个大体规定的比例可供参考,在美军项目的研制计划费用中,规定其中的30%为可靠性(维修性)费用。

本书引用资料以美军标、美军手册及国军标为主,强调了可靠性、维修性、设计准则, LCC, 安全性、人机工程等内容。其中相当一部分内容是其它书籍所未列入的。

编著者1991.于北京



# 目 录

|                                               |     |
|-----------------------------------------------|-----|
| 第一章 可靠性及可靠性设计概述.....                          | 1   |
| 一、可靠性及可靠性参数 .....                             | 1   |
| 二、设计可靠性及可靠性设计 .....                           | 12  |
| 三、可靠性设计准则 .....                               | 15  |
| 四、寿命周期费用 (LCC) .....                          | 27  |
| 第二章 可靠性管理.....                                | 42  |
| 一、可靠性工作的指导思想 .....                            | 42  |
| 二、可靠性大纲 .....                                 | 45  |
| 三、故障, 故障报告、分析和纠正措施系统 (FRACAS) .....           | 49  |
| 四、可靠性设计标准 .....                               | 54  |
| 五、元器件大纲 .....                                 | 58  |
| 六、可靠性大纲的评审 .....                              | 69  |
| 第三章 性能可靠性.....                                | 71  |
| 一、性能可靠性 .....                                 | 71  |
| 二、性能可靠性的分配 .....                              | 72  |
| 三、性能可靠性的鉴定 .....                              | 74  |
| 四、性能可靠性的综合 .....                              | 88  |
| 五、射击精度及CEP鉴定 .....                            | 92  |
| 第四章 可靠性模型、分配及预测.....                          | 95  |
| 一、可靠性模型 .....                                 | 95  |
| 二、冗余技术 .....                                  | 107 |
| 三、用概率方法从系统的可靠性框图计算系统可靠性 .....                 | 115 |
| 四、三状态系统的可靠性 .....                             | 127 |
| 五、可靠性分配 .....                                 | 132 |
| 六、可靠性预计 .....                                 | 140 |
| 第五章 故障树分析(FTA)及故障模式、影响及<br>危害性分析(FMECA) ..... | 145 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 一、故障树 .....                  | 145 |
| 二、建立故障树的程序及规范化 .....         | 150 |
| 三、故障树的定性分析及定量分析 .....        | 156 |
| 四、故障模式、影响及危害性分析(FMECA) ..... | 166 |
| <b>第六章 应力—强度分析</b> .....     | 173 |
| 一、应力—强度的统计特性 .....           | 173 |
| 二、应力—强度的概率设计 .....           | 179 |
| 三、疲劳寿命的Miner法则 .....         | 182 |
| 四、随机载荷过程的统计分析 .....          | 184 |
| <b>第七章 热设计</b> .....         | 189 |
| 一、热管理 .....                  | 189 |
| 二、传导散热 .....                 | 193 |
| 三、对流散热 .....                 | 196 |
| 四、辐射散热 .....                 | 199 |
| 五、强迫风冷散热及热管 .....            | 202 |
| <b>第八章 可靠性的评定</b> .....      | 205 |
| 一、成功率的评定及综合 .....            | 205 |
| 二、指数寿命的评定及综合 .....           | 210 |
| 三、Weibull寿命的评定 .....         | 225 |
| 四、对数正态维修时间的检验 .....          | 229 |
| 五、可用性的评定及综合 .....            | 231 |
| <b>第九章 产品的使用可靠性</b> .....    | 242 |
| 一、使用寿命及耐用性 .....             | 242 |
| 二、维修策略及备件件数分析 .....          | 244 |
| 三、安全性大纲 .....                | 248 |
| 四、安全性设计 .....                | 253 |
| 五、常用件设计 .....                | 265 |
| <b>第十章 人机工程</b> .....        | 277 |
| 一、人机设计 .....                 | 277 |
| 二、产业疲劳 .....                 | 278 |
| 三、体力限度 .....                 | 280 |
| 四、视觉设计 .....                 | 281 |

|                        |            |
|------------------------|------------|
| 五、色彩设计 .....           | 284        |
| 六、听觉设计 .....           | 287        |
| 七、控制器的人机设计 .....       | 292        |
| 八、显示器设计 .....          | 299        |
| 九、可达性设计 .....          | 305        |
| 十、工作区的人机工程要求 .....     | 306        |
| <b>第十一章 设计评审</b> ..... | <b>311</b> |
| 一、设计评审概述 .....         | 311        |
| 二、设计评审的详细要求 .....      | 312        |
| 三、设计评审组织及程序 .....      | 314        |
| 附表 I 正态分布函数表 .....     | 316        |
| 附表 II 正态分布分位数表 .....   | 318        |

# 第一章 可靠性及可靠性设计概述

## 一、可靠性及可靠性参数

### 1. 寿命周期的四个阶段

产品从提出任务到退出服务为止的整个寿命叫产品的**寿命周期**(life cycle)。它大体上可以划分为四个阶段:

(1) **方案设计阶段** 在对产品提出技术指标要求后,生产部门根据技术指标进行研究开发,提出若干个可行方案,通过以产品效能为主要因素的优选,定下最佳方案,付诸实施。

(2) **研制阶段** 根据选定的可行方案,进行软件及硬件的设计及试制。对样机进行各种试验,验证它的功能是否达到技术指标的要求,发现产品的薄弱环节并加以改进。最终进行设计定型。复杂产品还把它分为**技术设计阶段与样机阶段**。

(3) **生产阶段** 将设计定型图样交付生产部门进行生产定型。进行批量生产,经检验证明质量合格后,交付使用方。

(4) **使用阶段** 使用方根据规定的使用、维修规程使用产品。到达产品的寿命时,退出服务,予以处理。

### 2. 可靠性及可靠性参数

产品或产品的一部分不能或将不能完成预定功能的事件或状态叫**故障**(fault),对某些产品如电子元器件、弹药等称**失效**(failure)。为保持或恢复产品规定功能采取的技术措施叫**维修**。**可修复产品**(repairable item)是可通过维修恢复其全部功能的产品,而**不修复产品**(not repairable item)则是不能通过维修恢复其全部功能或不值得修复的产品。产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力叫产品的**可靠性**(reliability),可靠性的概率度量亦称**可靠度**。“规定的条件”中包括**环境条件**(envi-

ronmental conditions),即所有外部和内部的条件如温度、湿度、辐射、磁场、电场、冲击、振动等或其组合。这些条件是自然的、人为的或自身引起的。它们影响产品的形态、性能、可靠性或生存力。恶劣的环境条件会使产品的可靠性下降。正因为产品的可靠性与环境条件密切相关,因此在提出产品任务书时必须提供产品的**寿命剖面**(life profile)(即产品从制造到寿命终结或退出使用这段时间内所经历的全部事件和环境的时序描述)及**任务剖面**(mission profile)(即产品在完成规定任务这段时间内所经历的事件和环境的时序描述。其中包括任务成功、失败的准则)。一个寿命剖面通常包括一个或几个任务剖面。

产品可靠性定义中规定的条件也包括维修条件,这包括维修体制、维修点的人员、水平、技术条件、备件供应等等。

描述产品可靠性的量叫产品的**可靠性参数**(reliability parameter)。

设一批产品于 $t = 0$ 时刻出厂交付使用,批量为 $N$ ,到时刻为 $t$ 时,还剩 $M$ 个未出故障, $M$ 是 $t$ 的函数,记为 $M(t)$ , $M(0) = N$ 。在规定的条件下和规定的时间内,产品的故障总数与寿命单位总数之比叫产品的**故障率**(failure rate),记为 $\lambda$ ,它是产品可靠性的一种基本参数。

产品的寿命 $T$ 是一个随机变量, $T$ 超过 $t$ 的概率 $P(T > t)$ 称为产品的可靠性函数,记为 $R(t)$ ,

$$R(t) = P(T > t), \quad 0 \leq t < \infty$$

一批批量为 $N$ 的产品在 $t = 0$ 时刻开始投入工作。到时刻为 $t$ 时,大体上还有 $NR(t)$ 个产品未出故障;到时刻 $t + \Delta t$ 时,大体上还有 $NR(t + \Delta t)$ 个未出故障。亦即在 $(t, t + \Delta t)$ 时间区间内,大体上有 $NR(t) - NR(t + \Delta t)$ 个产品出故障。

$$NR(t) - NR(t + \Delta t) = -NR'(t)\Delta t$$

因此在 $t$ 时刻后,单位时间内出故障的产品占 $t$ 时刻还在工作的产品的比率为

$$-\frac{NR'(t)\Delta t}{NR(t)\Delta t} = -\frac{R'(t)}{R(t)}$$

这亦即单位时间内出故障的产品数与单位时间内产品寿命单位总数之比, 即故障率 $\lambda(t)$ ,

$$\lambda(t) = -R'(t)/R(t)$$

处于稳定工作状态的电子机械或电子系统的故障率基本上是常数; 一个由较多部分组成的设备或系统, 出了故障后即修复使用, 在较长时间后, 它的故障率也基本是常数。

$$\text{如} \quad \lambda(t) = \lambda$$

则解 $\lambda(t) = -R'(t)/R(t) = \lambda$ , 可得 $R(t) = Ke^{-\lambda t}$ ,  $K$ 为积分常数。由于 $R(0) = 1$ , 故 $K = 1$ 。从而

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

$T$ 的概率分布函数 $F(t) = P(T \leq t) = 1 - R(t)$ , 此时

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

即 $T$ 的概率密度函数为

$$f(t) = F'(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad t \geq 0$$

$T$ 是具有指数分布的随机变量。它的均值 $\mu_T$ , 方差 $\sigma_T^2$ 分别为

$$\mu_T = E(T) = \frac{1}{\lambda}, \quad \sigma_T^2 = 1/\lambda^2$$

令 $\theta = 1/\lambda$ , 则 $\theta$ 为**平均寿命**, 即 $\mu_T = \theta$ ,  $\sigma_T = \theta$ 。

在电子元器件的生产过程中, 总免不了有一部分元器件存在一些缺陷, 这些有缺陷的元器件较快出故障, 在产品使用的早期阶段即暴露出来, 这叫产品的**早期故障期**, 在这一段时期内,  $\lambda(t)$ 迅速下降。到一定时期后,  $\lambda(t)$ 基本上不变, 这是**偶然故障期**。有的产品由于老化、磨损或疲劳等原因, 使其故障率到一定时期后, 随寿命单位数的增加而增加, 这叫**耗损(wear out)故障期**。带有早期故障的元器件如果装上整机, 则会大大降低整机的可靠性。为此, 要对元器件在装机前进行**筛选(screening)**, 这是一种通过检验剔除不合格或有可能早期失效产品的方法。检验包括在规定的环境条件下的目视检查、实体尺寸测量与功能测量等。某些功能测量是在较大应力下进行的。

对不修复产品来说, 在规定条件下和规定的时间内, 产品寿

命单位总数与故障产品总数之比叫平均故障前时间(mean time to failure)(MTTF)。

对可修复产品来说,在规定的条件下和规定的时间内,产品的寿命单位总数与故障总次数之比叫平均故障间隔时间(mean time between failure)(MTBF)。俗称平均寿命。MTTF及MTBF都是产品的一种可靠性参数。

**例1-1** 指数分布的参数估计,定数截尾试验。在一批产品中随机地抽取 $n$ 个样品,作无替换的定数截尾寿命试验,即事先规定一个故障数 $r$ ,出了故障的产品不予替换。当试验到第 $r$ 个故障出现时就截止试验。令第 $i$ 个出故障的产品的寿命为 $t_i$ ,显然有 $0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_r$ ,还有 $n-r$ 个到 $t_r$ 时刻还未出故障。设 $n=10$ ,  $r=5$ ,  $t_1=50$ ,  $t_2=75$ ,  $t_3=125$ ,  $t_4=250$ ,  $t_5=300$ (单位:h),试估计平均故障前时间 $\theta$ 的值 $\hat{\theta}$ 。

**解:** 产品寿命单位总数 $T^*$ 为 $\sum_{i=1}^r t_i + (n-r)t_r$ ,故障产品总数为 $r$ ,故

$$\hat{\theta} = \left( \sum_{i=1}^r t_i + (n-r)t_r \right) / r = T^* / r$$

代入诸值,得 $\hat{\theta} = [50 + 75 + 125 + 250 + 300 + (10-5)300] / 5 = 460$ (h)

如果是有替换的试验,即一个产品出故障时,立刻将一个新的产品予以取代,继续试验。此时试验的任何时刻都有 $n$ 个产品在试验。因此产品寿命单位总数 $T^* = nt_r$ ,故 $\hat{\theta} = nt_r / r = T^* / r$

**例1-2** 指数分布的参数估计,定时截尾试验。在一批产品中随机地抽取 $n$ 个样品,作无替换的定时截尾寿命试验。即事先规定一个试验时间 $\tau$ ,当试验到时刻 $\tau$ 停止试验。令第 $i$ 个出故障的产品的寿命为 $t_i$ ,设到停止试验前,一共出了 $r$ 个故障(注意:这里的 $r$ 是随机的)。于是 $0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_r \leq \tau$ 。到时刻 $\tau$ 还有 $n-r$ 个未出故障。设 $n=20$ ,  $\tau=2500$ ,  $r=6$ ,  $t_1+t_2+\dots+t_6=4780$ (单位:h),试估计平均故障前时间 $\theta$ 的值 $\hat{\theta}$ 。

解： 产品寿命单位总数  $T^*$  为  $\sum_{j=1}^r t_j + (n-r)\tau$ ，故障产品总数为  $r$ ，故

$$\hat{\theta} = \left( \sum_{j=1}^r t_j + (n-r)\tau \right) / r = T^* / r$$

代入诸值，得  $\hat{\theta} = (4780 + (20-6)2500) / 6 = 6630 (\text{h})$

如果有替换试验，则

$$\hat{\theta} = n\tau / r = T^* / r$$

### 3. 维修性及维修性参数

产品出了故障就要维修，所以这里谈到的可靠性是广义的，即包括下述的维修性在内。

为使产品保持规定状态所需采取的措施，如润滑、加燃料、加油和清洁等叫**维护**(servicing)，也叫**保养**。为使产品保持或恢复到规定状态所进行的全部活动叫**维修**(maintenance)。使产品保持或恢复到规定状态所必须的一种或多种基本维修作业，如修理、功能检查等叫**维修活动**(maintenance action)。确定故障大体部位的过程叫**故障定位**(fault localization)，把故障部分确定到必须进行修理范围的过程叫**故障隔离**(fault isolation)。故障定位与故障隔离都是一种维修作业。一项维修活动可以分解成的工作单元，如拧螺钉、装垫片等叫**基本维修作业**(elementary maintenance activity)。由于虚警、故障或按预定的维修计划进行的一种或多种维修活动叫**维修事件**(maintenance event)。

通过对产品的系统检查、检测和发现故障征兆以防止故障发生，使其保持在规定状态所进行的全部活动叫**预防性维修**(preventive maintenance)，它可以包括调整、润滑、定期检查和必要的修理等。设产品有  $m$  种预防维修作业， $f_{pi}$  为第  $i$  种预防维修作业的频率(即产品每工作小时分担的该项作业数)， $\bar{M}_{pi}$  为第  $i$  种预防维修作业所需的平均时间。则产品的平均预防维修时间  $\bar{M}_p$ ，即产品每次预防维修所需实际时间的平均值为



$$\bar{M}_{pi} = \frac{\sum_{j=1}^m f_{pj} \bar{M}_{pij}}{\sum_{j=1}^m f_{pj}}$$

在产品寿命周期中按预定的安排所进行的预防性维修叫**计划维修**(scheduled maintenance)。

产品发生故障后,使其恢复到规定状态所进行的全部活动叫**修复性维修**(corrective maintenance)。它可以包括下述一个或全部步骤:故障定位、故障隔离、分解,更换、再装、调准及检测等。

产品在规定的条件下和规定的时间内,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叫产品的**维修性**(maintainability)。产品在规定的任务剖面中,经维修能保持或恢复到规定状态的能力叫**任务维修性**。当产品由  $n$  种可修复项目(分系统、组件或元器件等)组成时,设  $\lambda_i$  为第  $i$  种项目的故障率,  $\bar{M}_{ci}$  为第  $i$  种项目的平均修复性维修时间,则产品的**平均修复时间**  $\bar{M}_{ci}$ (即 MTTR, mean time to repair)是:在规定的条件下和规定的时间内,产品在任一规定的维修级别(即产品维修时所处场所划分的等级,如基层级、中继级、基地级等)上,修复性维修总时间与在该级别上被修复产品的故障总数之比,亦即排除故障所需实际修复时间的平均值

$$\bar{M}_{ci} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{M}_{cii}}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}$$

这里的  $\bar{M}_{ci}$  所计及的只是实际修理时间,不包括由于保障资源补给或管理原因未能及时对产品进行维修所延迟的时间即**延误时间**(delay time)。产品在不同维修级别维修的  $\bar{M}_{ci}$  不完全一致。

描述产品维修性的量叫产品的**维修性参数**。 $\bar{M}_{ci}$  就是一例。

对于现场或模拟现场的样本来说,设样本大小  $n$  较大,修复时间值为  $M_{ci1}, M_{ci2}, \dots, M_{cin}$ , 则  $\bar{M}_{ci}$  的估值为  $\hat{\bar{M}}_{ci} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_{cii}$