

防爆与矿用 电气设备的 可靠性

[苏] Б.Н. 瓦涅耶夫 等

郭余庆 王志宏 译 谢桂林 朱秉全 校

KIB

R

防爆与矿用电气设备的可靠性

〔苏〕 B.H.瓦涅耶夫 等

郭余庆 王志宏 译

谢桂林 朱秉全 校

6x12 / 04

煤炭工业出版社

B

435448

内 容 简 介

本书介绍了煤矿井下矿用防爆电气设备的运行条件和工作方式,分析了矿用电气设备的故障特征和磨损、老化的规律性。叙述了确定电气设备可靠性的方法和手段,其中包括可靠性数据统计加工方法,可靠性计算、可靠性加速试验、设备耐外因能力的试验等。提出了在设计、制造和运行阶段,保证电气设备可靠性的措施。给出目前可达到的可靠性数量指标。此外还阐述了在考虑可靠性条件下新设备的设计制造和供电系统的最优化问题。

本书是为煤矿企业工程技术人员,科研人员编写的,亦可供高等院校教师,高年级大学生和研究生参考。

责任编辑:陈锦忠

А.И.Быков Б.Н.Ванеев В.Д.Главный В.М.Гостищев
И.В.Дашковский А.П.Котляревский А.И.Кубрак
М.И.Постернак

НАДЕЖНОСТЬ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО И РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Москва Издательство «Недра» 1979

*

防爆与矿用电气设备的可靠性

〔苏〕 Б.Н.瓦涅耶夫 等

郭余庆 王志宏 译

谢桂林 朱秉全 校

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本850×1168¹/₃₂

印张9⁸/₈

字数247千字

印数1—2,040

1987年4月第1版

1987年4月第1次印刷

书号15035·2846 定价1.85元



目 录

第一篇 可靠性的一般问题

第 1 章	可靠性理论的基本概念	4
1.1	可靠性理论的研究对象和方法	4
1.2	随机变量及其特征	4
1.3	可靠性的术语、定义及数量指标	7
1.4	防爆和矿用电气设备可靠性标准指标	11
第 2 章	电气设备的运行和工作条件	12
2.1	一般概念	12
2.2	周围环境的因素	14
2.3	机械力作用的因素	18
2.4	工作条件	19
2.5	电压的质量	20
第 3 章	电气设备故障原因及其特征的研究	23
3.1	电动机的主要故障	23
3.2	电气绝缘老化的物理规律	38
3.3	电器的主要故障	48
3.4	主触头磨损的物理规律	52
3.5	变电站和变压器的主要故障	54

第二篇 确定可靠性的方法和手段

第 4 章	可靠性计算的一般方法	56
4.1	串联系统的可靠性计算	56
4.2	并联系统的可靠性计算	59
4.3	元件可靠性数据不足时的可靠性计算	61
第 5 章	产品可靠性数据的统计加工	62
5.1	可靠性数据的来源	62

5.2	观察结果的非正态估计	67
5.3	样本一致性的假设检验	68
5.4	完全样本可靠性指标的确定	71
5.5	完全样本分布律的假设检验	72
5.6	不完全样本统计数据的加工	88
5.7	可靠性指标的置信区间	94
5.8	可靠性的 Γ 百分数指标	97
5.9	观测容量的确定	99
第6章	电动机可靠性的计算方法	100
6.1	定子绕组可靠性的数学模型	100
6.2	绝缘强度的特征及其变化规律	102
6.3	操作过电压及其变化规律	111
6.4	定子绕组绝缘无击穿概率的计算	125
6.5	保持规定的绝缘电阻水平概率的计算	130
6.6	轴承的可靠性计算	132
第7章	电动机可靠性加速试验方法	135
7.1	概述	135
7.2	定子绕组寿命与影响因素关系的研究	135
7.3	定子绕组可靠性加速试验方法	157
7.4	轴承和防爆组件可靠性加速试验方法	165
7.5	电动机转子和风扇的可靠性试验方法	167
第8章	电器的可靠性计算方法	169
8.1	无故障性的计算	169
8.2	修理有效性计算	177
第9章	电器可靠性的加速试验	178
9.1	概述	178
9.2	接触器的研究性加速试验	180
9.3	保护电器的研究性加速试验	187
第10章	耐气候和机械力因素的试验方法	190
10.1	概述	190
10.2	耐气候因素和特殊作用的试验	190
10.3	耐机械力因素的试验	194

第 11 章	可靠性试验的技术手段	197
11.1	研究运行条件和外部影响用的仪器	197
11.2	统计工作时间及负载的仪器	198
11.3	确定绝缘特性的仪器	200
11.4	电气设备制造过程中绝缘的中间检验装置	204
11.5	可靠性加速试验的试验台	208
11.6	用于气候试验和机械因素试验的试验室 (箱) 和试验台	215

第三篇 可靠性的保证

第 12 章	设计时电气设备的可靠性保证	219
12.1	设计阶段可靠性保证的工作范围、程序和内容	219
12.2	对防爆和矿用电气设备可靠性的要求	220
12.3	提高电动机可靠性的结构措施	222
12.4	提高电器可靠性的结构措施	228
第 13 章	制造时电气设备可靠性的保证	229
13.1	工艺过程的最佳调整原则	229
13.2	提高电动机可靠性的工艺措施	234
13.3	改善电动机定子绕组的中间检验	240
13.4	提高电器可靠性的工艺措施	246
第 14 章	电气设备的运行可靠性	247
第 15 章	在运行时保证可靠性的方法	249
15.1	运行时保证可靠性的工作范围、程序和内容	249
15.2	电气设备的使用及其技术保养	250
15.3	电气设备的计划预防性检修制度	253
15.4	电气设备的修理	258
第 16 章	考虑可靠性时产品及系统的最优化	268
16.1	产品和系统设计的系统观点	268
16.2	考虑部件可靠性时供电系统的最优化	273
16.3	考虑可靠性时产品的最优化	278
附录		281
参考文献		288

绪 论

在苏联1976至1980年国民经济发展纲要中规定：到1980年要把煤炭工业的劳动生产率提高24%至26%。完成该项重要国民经济任务的途径之一，就是进一步提高劳动的动力装备程度、提高生产过程的机械化自动化水平以及提高矿用防爆电气设备的质量与可靠性。

有关现代化矿用防爆电气设备的一般资料和构造特征，其中包括爆炸性混合气体的分类、防爆等级、各种防爆电气设备的标记和使用条件，矿用电气设备的制造规程和标准的基本条款、各元件以及结构特点等均详载于《防爆和矿用电气设备制造规程》和参考文献〔2—5〕中，本书不再赘述。

电气设备和供电的可靠性是决定矿井电气化效果和矿工劳动安全的一个重要因素。根据对供电可靠性要求的不同，《电气设备安装规程》将工业企业用电户划分为下面三个级别〔6,7〕。

一类用户：对这类用户断电将会引起人身事故，给国民经济造成严重损失，使设备遭受损坏，生产大量废品并使复杂的生产工艺过程陷入混乱。

二类用户：对这类用户停止供电将会造成大量减产或使生产机器与工业运输陷于停顿状态。

三类用户：不属于上述两类的都属于三类用户。

采矿工业中属于一类用户的有〔3,7〕：

- 1) 用于升降人员的设备及其附属装置。
- 2) 有瓦斯或煤尘爆炸危险的煤矿或金属矿的主通风设备及其附属装置。
- 3) 三级和超级瓦斯矿风井的可反风的辅助通风设备及其附

属装置。

- 4) 锅炉房的循环泵和给水泵。
- 5) 使用风动局扇的急倾斜开采矿井的压气机站。
- 6) 消防泵站。
- 7) 主排水设备。
- 8) 水力运输中的煤水泵站。
- 9) 煤层瓦斯抽放设备。
- 10) 深井空调用致冷装置。
- 11) 井下中央变电所。

属于二类用户的有：

- 1) 箕斗提升设备及其附属装置。
- 2) 无瓦斯和煤尘爆炸危险的煤矿和金属矿的扇风设备。
- 3) 不使用风动局扇的矿井压气机站及其附属装置。
- 4) 井底水窝的排水设备。
- 5) 采区中心变电所。
- 6) 涌水量大于 $50\text{m}^3/\text{h}$ 的采区排水设备。
- 7) 严寒地区的井筒加热装置。

属于三类用户的是上述以外的所有用户（矸石运输、修配厂、非严寒地区的暖气装置、仓库、行政福利办公大楼、工业建筑和工人居住区的室内外照明等）。

回采和掘进工作面的用电设备（联合采煤机及其配套设备、刨煤机、联合掘进机、钻巷机、耙矿绞车）、电机车、钢丝绳和胶带输送设备、推车器、翻车器、装载设备、移动式压气机等都属于三类用户。

采区变电所和配电点的等级，由其供电的用户等级决定。

用户的级别一方面决定着供电系统的备用设备的数量和该系统的基建费用；另一方面决定着供电中断时间长短和由此造成的物质损失情况。因此用户划分为那一级别的问题，应在技术经济核算的基础上加以决定。例如，生产能力高的采区，停电一小时的物质损失就比较大，可将这些采区从三类用户升到二类，甚至

在某些技术条件下上升为一类用户在经济上可能更合算。进行这种技术经济计算所需的原始数据，就是供电系统各组成部件（变压器和移动变电站、电气开关装置、电动机、电缆等）的可靠性指标。

井下供电系统的每个设备都包含有一定的发生故障的潜在危险性（如引起瓦斯或煤尘爆炸、火灾、触电等）。设置备用的供电系统，导致系统设备数量的增加，从而增加发生故障的危险性。这个问题有时可以采用某种接线系统予以解决。但是在多数情况下，降低发生故障的危险性可以从提高每个电气设备本身的可靠性，尤其是提高它们的电气部分和防爆外壳的可靠性方面来加以解决。这样首先就减少停电时间和由此造成的经济损失。

随着科学技术的发展，不仅对技术装备而且对维护这些装备的人员也提出了愈来愈严格的要求。在井下供电系统中，由于人员的失职、没有及时或者不正确地对电气设备进行技术保养和预防性计划检修所造成的后果，无论从电气化的效果和从劳动安全的观点来看都是非常严重的。

因此，为了保证矿井电气化具有最大的经济效果和高度的矿工劳动安全性，要进行下列三方面工作：

- 1) 针对用途研制、生产和使用每一类型电气设备的高可靠性产品。
- 2) 实行电气设备的技术保养和预防性计划检修。
- 3) 采用备用的供电系统。

为了保证电气设备和供电系统可靠性的工作，自然首先要研究确定可靠性的方法和手段，其中包括选择可靠性理论的数学模型，研究可靠性试验和计算方法，建立用于可靠性试验和耐外部有害作用能力的试验装置、试验台和试验槽（间）。在可靠性理论方面，作者仅介绍最低限度的必要材料。书中更多讨论的是上述三方面中的后两方面的问题。

第一篇 可靠性的一般问题

第 1 章 可靠性理论的基本概念

1.1 可靠性理论的研究对象和方法

可靠性科学的特点就在于它所研究的是发生偶然事件的情况，在这些事件中随机因素是起着显著作用的。随机因素为数甚多而其作用又十分复杂，故使用传统的物理的、机械的、电工的方法来研究产品的故障和可靠性不能奏效，这是因为这类方法极端纷繁且难获定论。

偶发故障所固有的复杂性、不确定性，原因的多样性等因素要求创立专门的研究方法。实际上，在大量等可能性的随机现象的整体中，正因为随机现象量大，而表现出明显的稳定的规律性。可靠性学科采用概率论和数理统计方法〔8—10〕，尽管不能预报出每个产品的无故障工作时间和故障形式，但能揭示出故障的稳定性规律并能预报大量产品试验的平均的结果。

当研究产品可靠性时，首先利用统计和概率分析方法，这对解决大多数可靠性课题是完全可以的。只有在应用此法无能为力时，才从事比较复杂的各种过程物理实质的研究。

1.2 随机变量及其特征

为了定量地评定产品的可靠性，广泛应用随机变量这个概念。

随机变量。在概率论中通常把这样的量称为随机变量：在试验之前不能预知它的大小，而它的取值决定于试验的结果。随机

变量有连续的和离散的两类。在已知试验下的随机变量是以等于某一确定值或落在某一取值区间的概率来表征的。

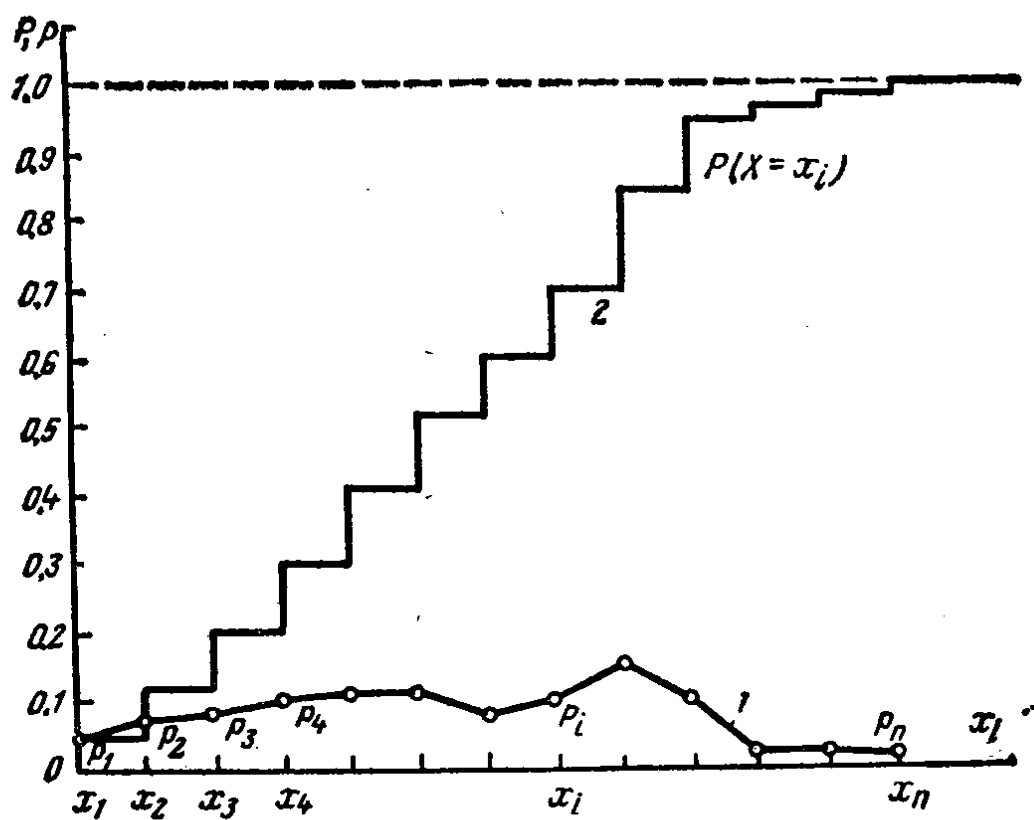


图 1.1 离散型随机变量的分布规律
1—概率数列；2—分布函数

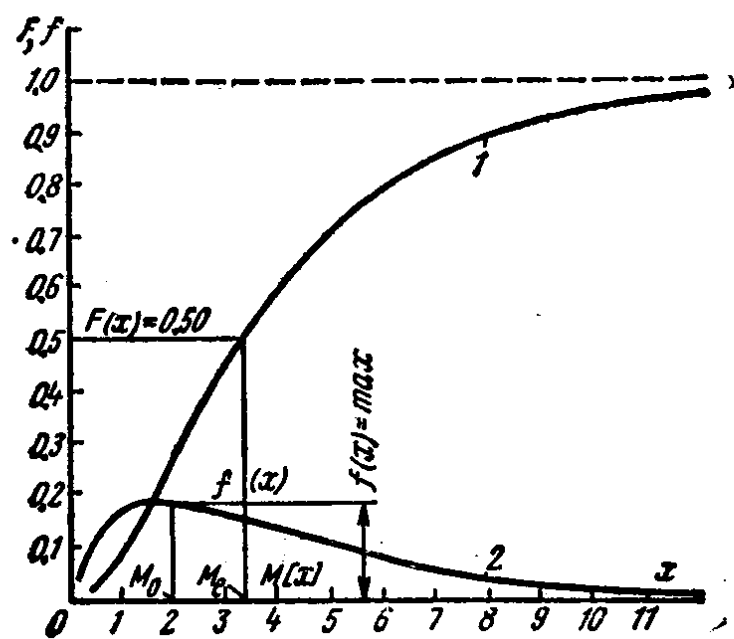


图 1.2 连续型随机变量的分布规律
1—分布函数；2—分布密度

如果在相同条件下进行不限次数的独立试验,对每一组大量的试验来讲,事件 A 出现的频率仅与某一常数有很小的差值。若按统计学的定义则事件 A 的概率近似等于事件 A 出现的频率或者说等于频率的近似数。

上述定义可用数学式表示为

$$P(A) \approx P^*(A) = \frac{n}{n_0} \quad (1.1)$$

式中 $P^*(A)$ 是事件 A 出现的统计频率; n 是事件 A 出现的次数; n_0 是每组试验的总次数。

经多次反复试验,随机变量 X 将以概率 $p_1, p_2, \dots, p_n$ 的形式完全确定几个离散数列,即 $X = x_1, x_2, \dots, x_r, \dots, x_n$ 。上述诸事件组成整体的独立事件群并遵守以下关系

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1 \quad (1.2)$$

概率数列 p_i 称为随机变量的分布律,若此数列已确定,则取值的概率 p_i 如图1.1所示。

离散随机变量的分布函数定义为随机变量 X 取值不大于给定值 x_i 的概率

$$p_i(x = x_i) = \sum_{j=1}^i p_j \quad (1.3)$$

该函数是取值由0到1的非减阶梯曲线,图形见图1.1。

对连续型分布的概率,不是用事件的概率 $p_i(x = x_i)$,而是用随机变量 X 取值小于给定值 x 的概率 $P(X < x)$ 表示。概率 $P(X < x)$ 与 x 的关系称为连续随机变量分布函数 $F(x)$ 即

$$F(x) = P\{X < x\} \quad (1.4)$$

分布函数有以下性质(图1.2):

- 1) 该函数是非减的, 即当 $x_2 \geq x_1$ 时, $F(x_2) \geq F(x_1)$;
- 2) $F(-\infty) = 0$;
- 3) $F(+\infty) = 1$

$F(x)$ 的导数 $f(x)$ 称为连续随机变量的分布密度即

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (1.5)$$

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad (1.6)$$

分布密度的基本性质是：它是 x 的非负函数， $f(x)$ 与横轴间的面积等于 1

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad (1.7)$$

用概率来描述随机变量时，经常是利用分布函数的参数来代替分布律。这些参数很容易由试验数据来确定。随机变量主要分布参数是数学期望、离差、分位点、众数、均方差与变差系数〔8—10〕。

1.3 可靠性的术语、定义及数量指标

按ГОСТ13377-75*，电气设备的可靠性是指它可以发挥其规定功能的能力，同时在规定的技术保养、修理、贮存和运输章程下，已定各项运行指标随时都要保持在规定范围之内。可靠性是一项综合的性能指标，包括在故障性、耐久性、维修性和保存性中。

故障就是指产品丧失其工作能力的事件。在该产品的技术标准文件中，均规定有产品故障的标准。

对防爆和矿用电气设备来讲，其一般故障标准是：

1) 当电机输入端有电压时，电机轴没有转矩或转矩低于规定值；

2) 当给变压器一次线圈电压后，变压器二次线圈端子上完全无电压或个别相没有电压；

3) 按正常送电操作顺序，给电气开关进线端以电压后其出线端完全无电压或个别端子无电压（当电网无故障时）；

4) 在开关正常断开或事故跳闸后，装置出线端仍有电压或

* ГОСТ是苏联国家标准的俄文缩写，下同

个别端子有电压；

- 5) 合不上闸，断不开闸或不能进行正常技术操作；
- 6) 电气设备的防爆性能遭到破坏；
- 7) 电气设备的电气安全性受到破坏。

除了上述一般性故障标志外，对各种不同型式的产品，根据其功能还应注明该产品特有的故障标志。

前面已指出，组成电气设备可靠性的四个性质在数量上用统一的可靠性指标来表征。

如产品的无故障性可用下述指标表征：无故障工作概率 $P(t)$ 、故障强度 $\lambda(t)$ 、平均故障前工作时间 T_1 （对不可修产品）和故障间工作时间 T （对可修产品）。

无故障工作概率 $P(t)$ ，是指在规定的时间内不发生故障的概率，也就是产品的无故障工作时间大于某一规定时间的概率

$$P(t) = P\{T > t\} \quad (1.8)$$

由 (1.4) 和 (1.6) 式可知，无故障工作概率与分布函数和分布密度函数有以下关系

$$P(t) = 1 - F(t) = \int_0^{\infty} f(t) dt \quad (1.9)$$

故障强度 $\lambda(t)$ (1/h)，是指不可修产品在时间 t 瞬间发生故障的条件概率，其条件是在此瞬间之前产品未曾发生故障。故障强度与分布密度以及无故障工作概率间的关系可用下式表示

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} \quad (1.10)$$

故障前平均工作时间 T_1 ，是指首次故障前产品工作时间的数学期望。由 (1.9) 式得

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (1.11)$$

也就是说 T_1 等于无故障工作概率 $P(t)$ 曲线与横坐标轴间围成的面积。

故障间工作时间 T ，是指可修产品的工作时间与在此期间

发生故障次数的数学期望的比值。

上述无故障性指标可根据运行数据或可靠性试验数据按下式统计计算

$$P(t) = \frac{n(t)}{N_0} \quad (1.12)$$

$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t} \quad (1.13)$$

$$T_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_{1j} \quad (1.14)$$

$$T = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i \quad (1.15)$$

式中 N_0 为试验产品数； $N(t)$ 是在 t 时刻仍能工作的产品数； $N(t + \Delta t)$ 是 $t + \Delta t$ 时刻仍能工作的产品数； t_{1j} 是第 j 个产品的首次故障前工作时间， h ； t_i 是产品的第 i 次故障前工作时间， h ； m 是故障次数。

产品的耐久性、维修性和保存性等也可采用类似 $P(t)$ 、 $\lambda(t)$ 、 T_1 和 T 的指标来表示，但是常常采用的是其参数的平均值。

大修前的平均寿命 T_x 是指产品从运行开始到其首次大修前工作时间的数学期望。

平均修理时间 T_r 是指修复产品工作能力所需时间的数学期望。

平均保存期限 T_{ox} 是指在规定的条件下产品保存或运输延续时间的数学期望，在此期限内及以后应保持产品指标在规定范围之内。

上述指标可根据运行数据或可靠性试验数据按下式统计确定

$$T_x = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_{x,j} \quad (1.16)$$

$$T_B = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_{Bi} \quad (1.17)$$

$$T_{cox} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N t_{coxj} \quad (1.18)$$

式中 t_{kj} 是第 j 个产品大修前的工作时间, t_{Bi} 是第 i 次故障后产品的修理时间, t_{coxj} 是第 j 个产品的保存时间。

除了随机变量 $t_i, t_{1j}, t_{kj} \dots$ 的数学期望 T, T_1, T_k 等以外, 还可用下列统计公式计算其均方差和变差系数

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n-1}}, \quad v = \frac{S}{\bar{t}} \quad (1.19)$$

式中 t_i 是第 i 个随机变量的取值; $\bar{t}$ 是随机变量的数学期望 (算术平均值); n 是产品数量或故障次数。

产品的耐久性, 可用大修前的平均服务期限表示。平均服务期限的计算公式与 (1.16) 式类似, 只不过将大修前产品工作时间换成产品年度计划大修前的服务期限。

在计算无故障工作指标时, 应考虑产品的所有故障, 而在计算耐久性指标时则仅考虑必须进行大修的那些故障。当计算维修性指标时, 或者考虑产品拆卸、寻找故障元件、排除故障、修复后的调整、装配和试验等所耗费的时间或者考虑用新产品更换故障产品所需的时间。故障分析和等待修理的时间以及进行大修理所需的时间均不计入。

涉及产品可靠性的若干个性质的指标称为可靠性综合指标, 这些指标有: 完好系数 K_r 、技术利用系数 $K_{r,u}$ 和运行完好系数 $K_{o,r}$ 。

除了未规定投用产品的计划期限外, 产品任何时刻都具有工作能力的概率称为完好系数。

在一定的运行周期内产品正常工作时间的数学期望与该运行周期内产品正常工作时间、用于技术保养的停歇时间和修理时间的数学期望总和之比值称为技术利用系数。

备用产品在任意时刻投用而运行正常并自该时刻起于规定期间内，仍将无故障运行的概率称为运行完好系数 $K_{o.r.}$ 。

上式指标的统计量按下式计算

$$K_r = \frac{T}{T + T_b} \quad (1.20)$$

$$K_{r.н} = \frac{t_{cyн}}{t_{cyн} + t_{p.н} + t_{огс}} \quad (1.21)$$

$$K_{o.r.} = K_r P(t_p) \quad (1.22)$$

式中 $t_{cyн}$ 是所有产品总的工作时间，h； $t_{p.н}$ 是所有产品由于计划内和计划外修理所占用的总的停歇时间，h； $t_{огс}$ 是所有产品由于技术保养而停歇的时间，h； t_p 是产品投用后能实现其功能而规定的无故障时间。

1.4 防爆和矿用电气设备可靠性标准指标

防爆和矿用电气设备多数是可修产品，它们能运行很长时间，其运行状况具有无规律的周期性。在评价故障引起效益上的后果时，主要因素是必要的修理费用和生产时间内的被迫停歇时间。按照苏联国家标准规定这类产品属于2434编号标准。对这些产品推荐用以下名称作为可靠性的数量指标：

- 1) 故障间的工作时间 T ，
- 2) 大修前的平均寿命 T_k ；
- 3) 完好系数 K_r 。

在这些指标中唯独没有表征产品维修性的可靠性指标。其实，维修性像纳入可靠性这个综合性质中的每个单项性质一样是切实可行的，因此可针对它采取独特的结构，工艺和运行等方面的措施。为了评价这些措施的有效性，对防爆和矿用电气设备用平均修理时间 T_b 来代替 K_r ，作为必要的可靠性指标。这些可靠性指标 (T 、 T_k 和 T_b) 是最近出版的书中经常采用的。

必须注意，在防爆和矿用电气设备中，有个别型号产品是不可修复的，对这类产品根据使用条件、工作制和故障造成的后