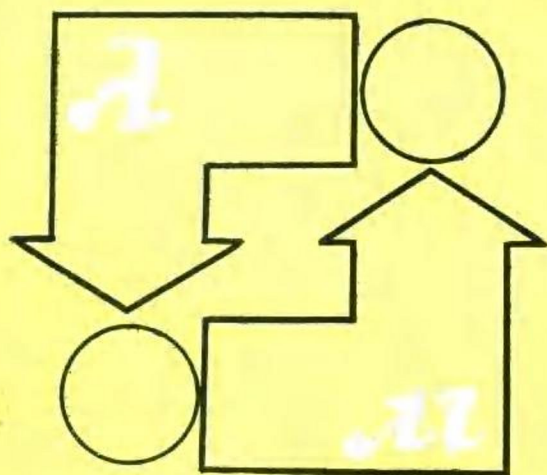


矿山电气设备 及自动化装置的可靠性

〔苏〕 Л.Д.别沃兹涅尔 著
耿来正 马明申 译



矿 山 电 气 设 备 及自动化装置的可靠性

〔苏〕Л. Л. 别沃兹涅尔 著

耿来正 马明申 译

12/13/14

煤 炭 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书主要是介绍矿山电气设备及自动化装置在设计阶段如何预测产品可靠性的实用方法,在产品投产前如何确定其可靠性的实际指标,以及在运行中如何维护保养才能保证其可靠性的技术措施。这种把产品从设计、制造直到运行几个阶段的可靠性问题统一起来考虑的思想是当前解决产品可靠性的有价值的途径。

本书适用于从事矿用电气设备及自动化元件可靠性研究的广大工程技术人员和科学工作者,也可作为高年级大学生及研究生的参考书。

责任编辑 陈锦忠

Л. Д. ПЕВЗНЕР
НАДЕЖНОСТЬ ГОРНОГО
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
И ТЕХНИЧЕСКИХ
СРЕДСТВ ШАХТНОЙ АВТОМАТИКИ
МОСКВА «НЕДРА» 1983

矿山电气设备
及自动化装置的可靠性

〔苏〕Л. Д. 别沃兹涅尔 著
耿来正 马明申 译

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 7

字数 181 千字

印数 1—2,000

1986年 9 月第 1 版

1986年 9 月第 1 次印刷

书号 15035·2813 定价 1.40 元

序 言

为保证采矿企业的高效生产，不仅要有合理的采矿工艺，而且要有完善的技术，使工艺过程实现电气化、机械化和自动化。可靠性便是采矿技术完善化的指标。

苏共二十六大批准的《1981—1985年和1990年以前苏联经济和社会发展的基本方针》规定《提高技术水平和机械制造、自动化装置及仪表的产品质量，大大提高技术装备的经济效益和生产率及其可靠性和寿命》。

矿山电气设备或矿井自动化装置的故障会引起工艺流程的破坏，并可成为发生事故的原因。由于电气设备和自动化装置不可靠而造成的物质损失，会大大超过故障设备的价值。

矿山电气设备和矿井自动化装置的可靠性能否得到保证，决定于工艺流程的精细程度、完成作业的复杂性和重要性、提出要求的严格程度和运行条件的艰难程度，而这些情况又是矿山企业所特有的。

矿山电气设备和矿井自动化装置性能方面的特殊重要性在于它关系到矿工劳动的安全保护：供热、供风、矿井大气检查、防火花、防爆、防火、防触电等等。矿山电气设备和自动化装置功能方面的重要性在不断增长，因为它是综合工艺流程中不可分割的一个组成部分。因此这类设备的可靠性的《价值》在急剧增长。

矿山电气设备和自动化装置的恶劣运转方式是由于采矿企业特殊的气候条件、机电负荷的剧烈波动、执行优质服务复杂性、以及经常缺少优质服务等条件所造成的。

保证矿山电气设备和自动化装置的可靠性问题在产品的整个《寿命》中都要解决，也就是说在设计、制造和运转的每一阶段

都要解决。

在设计阶段便要奠定可靠性的基础，这就要求设计研究人员能解决可靠性的分析问题，为得到适当的可靠性创造条件，确定故障原因，设计可靠性结构图，根据试验结果计算可靠性指标的估计值。提出便于修理的概略方法。

在制造阶段要使可靠性达到设计规定的水平，这时要收集有关生产故障的数据，进行结构和工艺的变更以消除发生故障的原因。这个阶段的重要任务之一是进行可靠性的鉴定性和检查性试验。

在按计划进行合理的技术服务的情况下，矿山电气设备和自动化装置在运转阶段可以保持设计中规定的并在制造中达到的可靠性水平。

在编制技术服务计划时必须确定保持可靠性水平的经济合理的预防性检修周期。

解决各种有关保障矿山电气设备和自动化装置可靠性问题的书刊已大量问世。第一批论述矿山自动化装置可靠性的文献之一是Л. Г. 米利古莫夫，М. С. 拉宾诺维奇，В. Б. 根滋布尔格和其他人的专题论文集，该书中叙述了矿山自动化装置的运转条件、计算和研究其可靠性的方法和提高运转可靠性的方法。文献〔14〕对矿山电气设备的可靠性及提高其水平的基本方向和可靠性的经济问题进行了研究。在В. Н. 瓦涅耶夫编辑的专题论文集〔31〕中引用了防爆和矿用电气设备可靠性的鉴定性试验的统计方法，并介绍了对机械和气候因素适应性进行试验的方法，此外还给出了各种电气设备在运转可靠性方面的实际数据。

矿山供电系统及其各个元件的可靠性问题由В. П. 木拉维耶夫和Г. И. 拉自吉里捷耶夫解决了〔28〕。矿井和露天矿电气设备各种元件的运转可靠性指标见В. Ф. 贝劳尼、А. Ф. 卜劳金、В. Н. 瓦涅耶夫、В. А. 格拉夫诺依、Т. С. 库兹明，Р. М. 列依包夫，М. И. 马克洛夫、Л. В. 谢达柯夫，А. Н. 施比格诺维奇，В. И. 舒茨基等人的著作。

本书的基本目的是要阐明可靠性理论在工程技术方面的实际应用方法，以便在矿山电气设备和自动化装置的设计、制造和运转阶段对可靠性进行计算和分析。

本书对可靠性和可修性指标的工程计算（可靠性的名称和概念的定义见 ГОСТ 13377-75 号苏联国家标准），建立保证规定水平的可靠性结构，编制实验室和生产条件下的可靠性试验计划和对试验结果进行统计分析的计划，编制矿山电气设备和自动化装置的技术服务计划等的方法给予了特殊的地位。

审阅原稿时承蒙技术科学院士 А. Г. 什瓦尔茨曼提出了意见和建议，作者为此表示感谢。

目 录

序言

1. 矿山电气设备和自动化装置的故障模型	1
1.1. 矿山电气设备和自动化装置的故障原因分析	1
1.1.1. 电动机的故障	1
1.1.2. 开关设备的故障	2
1.1.3. 供电系统各元件的故障	2
1.1.4. 挖掘机电气设备的故障	3
1.1.5. 矿用自动化装置的故障	4
1.1.6. 故障原因分类	4
1.2. 故障的统计模型	6
1.2.1. 无故障工作时间的分布	6
1.2.2. 突发性故障的连续模型和离散模型	7
1.2.3. 以伽马分布为基础的渐发性故障模型	11
1.2.4. 以正态分布为基础的老化模型	13
1.2.5. 以威布尔分布为基础的磨损性故障模型	16
1.2.6. 离散型故障模型	18
2. 可靠性指标	21
2.1. 不可修设备的可靠性指标	21
2.1.1. 无故障工作概率	21
2.1.2. 故障强度	22
2.1.3. 故障前的平均工作时间	23
2.1.4. 基本故障模型的可靠性指标	24
2.2. 可修复设备的可靠性指标	29
2.2.1. 故障流和修复模型	30
2.2.2. 能够瞬间修复的可修设备的可靠性指标	39
2.2.3. 故障流基本模型的可靠性指标	41
2.2.4. 备用元件的数量	42

2.2.5. 非零时修复的可修设备的可靠性指标	44
2.2.6. 可变工作制的装置的可靠性	50
2.2.7. 可修性指标	53
3. 结构可靠性和备用	56
3.1. 系统的结构可靠性分析	56
3.1.1. 系统可靠性的结构方式	56
3.1.2. 初等结构系统的可靠性	59
3.1.3. 高等结构系统的可靠性	62
3.1.4. 由不可靠元件构成的可靠结构	67
3.2. 备用	71
3.2.1. 备用的种类	71
3.2.2. 不可修装置的更替性备用	72
3.2.3. 可修复的备用	81
4. 可靠性设计	86
4.1. 设计中可靠性指标的计算	86
4.1.1. 设计和可靠性	86
4.1.2. 可靠性的近似计算方法	88
4.1.3. 运转条件下可靠性指标的计算	90
4.2. 可靠性设计用的统计模型试验	96
4.2.1. 统计模型试验方法	96
4.2.2. 可靠性研究的计算方法	104
4.2.3. 模型试验结果的分析	110
4.3. 最佳可靠性设计	113
4.3.1. 最佳参数设计	113
4.3.2. 最佳参数设计问题的解决方法	116
4.3.3. 最佳结构裕度问题	120
4.3.4. 可靠性经济学	127
5. 可靠性的统计试验	135
5.1. 根据试验结果对可靠性指标的估计	135
5.1.1. 试验计划	135
5.1.2. 限制故障次数的试验	136
5.1.3. 限制持续时间的试验	142

5.1.4. 可修性指标的估计.....	144
5.1.5. 试验结果与故障模型的一致性检验.....	147
5.2. 根据运转中观测结果对可靠性指标的估计.....	154
5.2.1. 试验工作的计划化.....	154
5.2.2. 运转可靠性指标的估计.....	157
5.2.3. 矿山电气设备和自动化装置的运转可靠性.....	165
5.3. 可靠性检验.....	169
5.3.1. 接收检验步骤.....	169
5.3.2. 检验计划的编制和检验结果的估计.....	171
6. 矿山电气设备和自动化装置的技术服务.....	182
6.1. 技术服务模型.....	182
6.1.1. 技术服务的性质.....	182
6.1.2. 技术服务指标.....	183
6.1.3. 最佳服务周期.....	184
附录.....	192
1. 概率论基础.....	192
1.1. 随机变量的特性.....	192
1.2. 马尔可夫随机过程.....	194
1.3. 拉普拉斯变换.....	196
2. 统计分析基础.....	198
2.1. 经验分布.....	198
2.2. 经验分布的参数估计.....	198
2.3. 假设的统计检验.....	201
统计用表.....	203
附表1 标准正态分布密度表.....	203
附表2 正态分布函数表.....	204
附表3 正态分布分位点.....	205
附表4 自由度为 m 的 χ^2 分布分位点.....	205
附表5 自由度为 m 的学生分布的分位点 t	206
附表6 参数为 μ 的泊松分布的分位点.....	207
附表7 柯尔莫哥洛夫分布的分位点.....	208
附表8 对数函数表.....	208

附表9 艾列尔伽马函数表.....	209
附表10 指数函数表.....	210
参考文献.....	211
词汇表.....	213

1. 矿山电气设备和自动化装置的故障模型

1.1. 矿山电气设备和自动化装置的故障原因分析

设计高度可靠的现代化矿山电气设备和自动化装置如果没有同类设备和装置的台上试验或运转条件下正常使用中的故障原因分析,那是不可能的。

1.1.1. 电动机的故障

矿井中使用的电动机,比如在采煤机、掘进机、刮板输送机、胶带输送机、采区装载点的推车机、小绞车、手电钻、采区水泵、扇风机、局部扇风机、钻机油泵等等,其故障分析表明,定子绕组的绝缘损坏为故障主要原因,占91.3%〔46、31〕^①。

最有代表性的绕组绝缘损坏情况如下:

由于两相工作而造成的匝间短路占28.7%,定子绕组对外壳的绝缘击穿占27%,绕组的炭化占14.2%,由于频繁起动和换向使电动机过负荷和过热而造成的定子绕组相间短路占12.8%;

由于电动机内部潮气凝结或水和油从轴承直接进入而使定子绕组绝缘降低占7.1%;

绕组连接线断开、端线盒绝缘套管由于螺栓紧固不当而损坏以及尘埃和潮气进入端线盒内造成故障占1.5%。

元件和部件的机械损伤也是电动机发生故障的原因,比如:

绝缘套管损坏造成接线端子短路占4.2%,轴承部件损坏占3.5%,轴的损伤和转子鼠笼烧坏占1.0%。

在矿井条件下绝缘损坏的基本原因是绕组导线的绝缘质量低,绕组的防潮和耐热能力不足,制造上的缺陷,而主要原因是工作条件恶劣,比如频繁起动、过负荷,倒转,传动机构被粉尘

① 方括号内数字为原书参考书目编号。——译者

填塞或卡住，以及电网的工作电压太低等等。

1.1.2. 开关设备的故障

矿用电气设备中自动开关、控制站和磁力起动器的故障分析〔14、26、27〕表明，故障的主要原因（56%）仍然是绝缘的损坏。

这类装置的最有代表性的绝缘损坏情况为：馈电自动开关的脱扣线圈烧坏或磁力起动器的接触器线圈和控制回路的变压器烧坏（35%）；内部连接线的导线绝缘被击穿，线路绝缘子和负荷侧端线盒绝缘子被击穿，开关的绝缘板上导线过桥发生相间短路约占20%。

开关设备故障的其它原因（约占故障总数的40%）为动力触头和中间继电器触头的机械损伤和烧毁。

馈电自动开关脱扣机构的故障次数约占故障总数的20%，由于切断相间短路电流而烧坏动力触头以及灭弧室的损坏占18%。

开关设备绝缘损坏的原因为：电气绝缘材料的防潮和耐电弧能力低，过电流跳闸和无压释放机构的结构不合理，自动开关的容量不足以及开关的使用条件恶劣。

井下使用的开关设备处于湿度大、粉尘多、温度变化显著而且有冲击和振动的环境。由于电动机在制动和起动时的频繁接通和断开，开关内的空气反复受热和冷却，这样便会吸入井下的空气，而使潮气凝聚在开关内的元件上。

当有粉尘、烟雾和潮气时，在电弧的作用下便会生成硝酸和亚硝酸，这些东西对金属和绝缘材料是非常有害的。

1.1.3. 供电系统各元件的故障

敷设在井筒中的矿用高压铠装电缆的主要故障〔9、13、20、26、43〕是在贯通式接线盒和入井接线盒内的绝缘击穿——42%，电缆芯线的绝缘击穿或绝缘电阻降低到允许水平以下和单相接地——18%。

矿用井筒高压电缆的另一种故障是被落入井筒中的物体所砸伤，或在升降外形不规则的重物时造成的机械损伤——约40%。

敷设在水平巷道中的高压铠装电缆，其最常见的故障是由于运送物料时所造成的机械损伤引起的——32%，电机车的电弧火花烧伤——12.5%。

电缆芯线绝缘击穿占12~15%，铠装锈蚀——5%。

在采区或准备巷道的供电系统中主要使用矿用软电缆，在其故障分析中机械损伤所占百分数还要更大些。敷设在顺槽和工作面的软电缆，其故障总数的65%为机械损伤（由被运送的物料、工作面机械和机组、煤块、岩石、支护元件等造成的）。而由于绝缘损坏所造成的故障为30%。

装于固定式和移动式变电所的矿用动变压器，其最有代表性的故障是高压或低压绕组的绝缘对地击穿——42%。匝间短路占故障总数的31%，机械损伤——6%。

如将变压器作为变电站的一个元件来看，则变电站因动力变压器而发生的故障占10~15%，高压隔离开关、自动开关和闭锁保护装置的故障一般约为60%。

高压防爆配电装置由于主触头烧毁而造成的故障占32%，由于传动机构的机械损伤——21%，由于油箱破裂和漏油——8.5%。

1.1.4. 挖掘机电气设备的故障

露天开采和剥离用单斗挖掘机电气设备的故障以控制系统为最多（30~40%），直流电机的故障则发电机为22~30%，电动机为20~25%〔11、36、40〕。

控制系统中的主要故障是在提升机构、旋转-行进机构、牵引-顶推机构等承重而复杂部分的控制系统中，故障形式为电气装置线圈和导电部分绝缘击穿以及开关设备触头连接线的损伤。

挖掘机传动装置中直流电机的主要故障形式也是线圈和导电部分的绝缘击穿，它约占故障总数的40%。其它故障形式为电刷

装置整流条件的破坏和机械部件的磨损。

露天矿挖掘机电气传动装置的工作特点是电机和控制系统的
热状态经常变化，这是由于挖掘机本身工作的周期性、采矿工艺
的性质和环境温度条件所造成的。由于热状态的不均衡性，而且
在电气传动装置的控制系统中又缺乏温度保护，所以在运行中便
会偏离传动装置的机械特性和速度特性校准曲线，因而造成功能
故障。挖掘机电气传动装置的功能故障率平均为20~25%。

电机故障的主要原因是过热、过负荷、绝缘老化、匝间短
路、导电部分断线、异物落入、机械维护不良等。

1.1.5. 矿用自动化装置的故障

矿用自动化装置因可执行控制、保护、自动化及信号通讯等
功能，故可用以保证工作安全。它在井下巷道中的工作条件是恶
劣的——空气潮湿多尘，易受机械损伤，负荷经常变化，技术服
务困难。

矿用自动化装置发生故障的直接结果是造成不幸事件，损失
大量物资，使固定设备长期停用，甚至使企业停产。因此，对矿
用自动化装置的可靠性提出了更高的要求。然而，正如统计分析
资料所表明，当代的矿用自动化装置的可靠性水平还是不够
的〔14、25、30〕。

成套采矿设备、采煤机组和工作面机械的自动控制装置，输
送机线自动化装置，道岔操纵装置以及装载点的自动化装置等的
主要故障形式都是机械损伤——组件、部件、原始发送器、执行
机构等的机械损伤。这些自动化装置的另一类故障是变压器绝缘
击穿，绕组断线，继电器缺少触头或触头烧坏，无线电元件烧坏
等。但是这类故障在井下大气的瓦斯自动监测、绝缘检测、通风
自动化、矿井排水自动化、无线电扩音通讯及遥控信号装置等自
动化装置中是主要的。

1.1.6. 故障原因分类

矿山电气设备和自动化装置的主要故障原因可分为两类：设

计制造方面的和使用维护方面的。第一类故障是由于设计和制造水平不高而引起的。这类产品故障的直接原因是：原理和结构上的错误，对尖峰负荷与特殊使用条件的忽视，制造工艺上的差错以及产品制造质量管理不严。

第二类故障是由于违犯正常操作规程和材料的老化、磨损及物理化学性质的不可逆变化过程而引起的。在矿山电气设备和自动化装置的特别恶劣的使用条件下，上述过程大大加快。

矿山电气设备和自动化装置的工作环境条件的特点是受机械方面的强烈影响：振动大，冲击强，频繁的、周期性的开停、冷热，电流引起的过热；电动力学作用所产生的高强度机械应力；机体内部大幅度的温度变动；空气中含有瓦斯，在潮湿的条件下会形成有害于绝缘和金属的腐蚀剂；遭受外部机械损伤的较大危险性；电网电压的大幅度波动。

任何产品的可靠性，即执行预定功能的能力，都决定于它的设计、制造、使用以及老化过程中可能发生的故障。发生故障后便会部分地或全部地丧失工作能力。故障的发生可能是突然的，也可能是逐渐的，张弛的，或是由于几种原因同时作用而造成的〔8〕。

突发性故障的特点是它与故障前的使用时间和产品状态无关，因而在检查和维护中是不能预先发现的。这种故障的实例为：由尖峰负荷造成的产品故障，由运输物件造成的井下电缆的机械损伤或由电机车电弧火花造成的电缆外皮烧伤，电缆外皮破裂，电动机转子卡住，电源线路断线，由于机械过负荷使电动机停转，由于电压太低而造成的磁力起动器故障，无线电电子元件和微电路中的断线和短路。

渐发性故障是指由于产品材质的物理化学性能变化而使产品的某些决定性参数超出极限允许值所造成的故障。这类故障是可以在检查或预防性维护中预先发现的。

电气设备由于绝缘电阻降低、轴承磨损、锈蚀、触头表面损伤、凸轮机构磨损等原因所造成的故障即为渐发性故障的实例。

在矿山电气设备和自动化装置的工作条件下，会出现这种情况，即老化和磨损不是故障的直接原因，而只是造成突发性故障概率急剧增加的条件。这种类型的故障称为张弛性故障。由于匝间或相间短路而造成的电动机故障、由于铠装锈蚀而引起的井下电缆绝缘击穿、电缆接线盒内的断线或对外壳短路，绝缘电阻的逐步降低等均为张弛性故障的实例。

在矿山电气设备和自动化装置的使用条件下，最常见的故障原因是综合性的，是由突发性、渐发性和张弛性故障同时而不是单独作用的结果。

1.2. 故障的统计模型

故障的统计模型是在产品设计、制造、使用中研究其可靠性的必要数学工具，每一故障形式都可有一个或几个故障统计模型相对应。为确立对应关系，应研究各种故障模型的固有统计性质。

1.2.1. 无故障工作时间的分布

无故障工作时间或循环次数是一个随机变量，在该段时间内，产品可按预定功能工作，超出该段时间后，产品便会出现故障。这一随机变量的概率分布亦即无故障工作时间便是所研究的产品的故障统计模型。

设随机变量 τ 表示产品的无故障工作时间，则这一随机变量的概率分布函数为

$$F(t) = P\{\tau < t\}, t \geq 0$$

产品在 t 时间内不发生故障的概率亦即无故障工作概率或可靠性函数为

$$R(t) = P\{\tau \geq t\} = 1 - F(t), t \geq 0$$

随机变量 τ 的分布概率特性可完全确定产品的故障模型特性和可靠性特性曲线。

1.2.2. 突发性故障的连续模型和离散模型

产品突发性故障的连续模型为指数分布函数，其离散模型则为几何分布函数。

无故障工作时间的指数分布函数由下式确定：

$$F(t, \lambda) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0, \quad \lambda > 0 \quad (1.1)$$

指数分布为单参数函数，参数 λ 便可确定分布曲线的特性。

指数分布密度函数为

$$f(t, \lambda) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0 \quad (1.2)$$

这些函数的曲线如图1.1所示。

无故障工作时间分布的数学期望或模型的一阶矩为

$$M\tau = \int_0^{\infty} \lambda t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \left(\int_0^{\infty} v e^{-v} dv \right) = \frac{1}{\lambda} \quad (1.3)$$

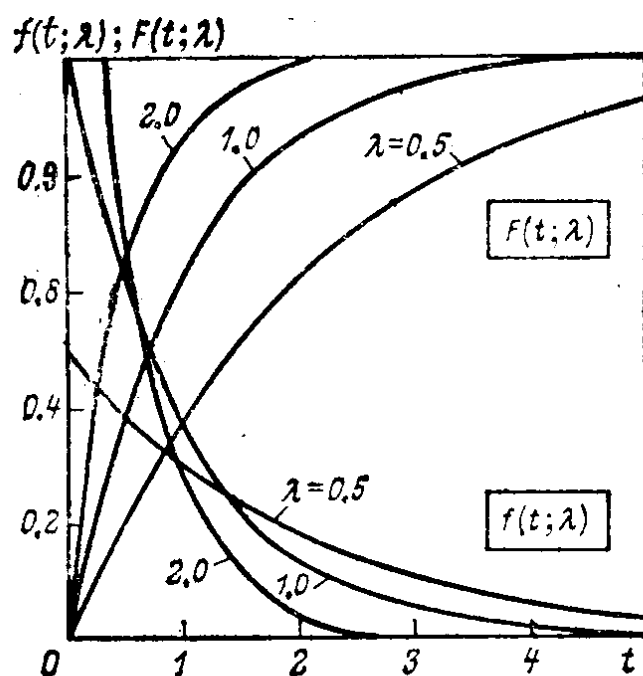


图 1.1 指数故障模型的特性曲线

模型的二阶矩为

$$M\tau^2 = \int_0^{\infty} \lambda t^2 e^{-\lambda t} dt = \frac{2}{\lambda^2} \left(\int_0^{\infty} v e^{-v} dv \right) = \frac{2}{\lambda^2}$$

因此，模型的方差为