

摩擦裝置的 参数可靠性

[苏] Б.Г.克格林 著

樊连波 译

17.1

中 国 铁 道 出 版 社

摩擦装置的参数可靠性

〔苏〕Б.Г.克格林著

樊连波 译

中国铁道出版社

1988·北京

内 容 简 介

本书介绍了摩擦装置参数可靠性问题的现况、基本概念和研究方法。分析了各种因素对摩擦装置参数可靠性的影响及摩擦装置优化设计方法。并对起重运输机械制动器、机车车辆制动机及摩擦式缓冲器的参数可靠性进行了具体分析,指出提高摩擦装置参数可靠性的途径。该书对从事摩擦装置设计、制造、使用的工程技术人员均有参考价值。

Параметрическая Надежность
Фрикционных Устройств
Б.Г.Кеглин
МОСКВА «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 1981

摩擦装置的参数可靠性

樊连波 译

中国铁道出版社出版、发行

责任编辑 王雪芬 封面设计 安 宏

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 5 字数: 114 千

1983年10月第1版 第1次印刷

印数: 0001—1,600册 定价: 2.20 元

目 录

绪论

第一章 摩擦装置正常工作的条件	6
§ 1 摩擦装置的类型及其运用中载荷特点	6
§ 2 外摩擦及磨损规律科学的基本原理	8
§ 3 对摩擦装置的要求	17
第二章 摩擦装置参数可靠性的一般计算方法	20
§ 1 参数可靠性及其评定方法	20
§ 2 摩擦装置发生参数故障的物理条件及其 模型	33
§ 3 影响工作稳定性和参数可靠性的工艺、 结构和人-机因素	57
§ 4 建立摩擦装置性能参数分布规律的方法	62
§ 5 摩擦装置参数可靠性的预测	70
§ 6 按照参数可靠性准则优化摩擦装置	75
第三章 起重-运输机械中制动器的参数可靠性	79
§ 1 制动器的基本性能参数	80
§ 2 起重机制动器的使用载荷	82
§ 3 制动器的性能参数与运用、工艺因素间关系 的试验研究	85
§ 4 制动器参数可靠性和制动器摩擦片寿命的预 测	89
第四章 铁道运输用制动机的参数可靠性	96
§ 1 制动机的主要性能参数	96

§ 2	货车制动机的运用载荷	99
§ 3	对现行及强化运用条件下的制动机性能参数的试验研究	107
§ 4	货车制动机参数可靠性及其能量载荷的预测	111
第五章	摩擦式缓冲器的参数可靠性	118
§ 1	缓冲器的主要性能参数	119
§ 2	摩擦式缓冲器工作不稳定的物理条件	120
§ 3	工艺与结构因素	129
§ 4	机车车辆缓冲器的运用载荷	133
§ 5	摩擦式缓冲器参数可靠性的特征计算	134
§ 6	按照参数可靠性准则优化缓冲器	140
第六章	提高摩擦装置参数可靠性的基本途径	145
参考文献		150

绪 论

随着科学技术的发展以及复杂的现代化机械的产生，可靠性指标已经是判别机械质量的主要准则之一了。使机械获得很高的可靠性也是工程技术的一个发展方向。提高机械产品的质量、工艺水平和可靠性已作为机械制造业中的一个主要问题列入党和政府的决议中。所有这些，都促使了可靠性科学突飞猛进的发展，并扩展了这门科学的研究领域，以及加快了运用数学、物理学方法研究这门科学的进展。

根据可靠性术语的定义——产品在规定的時間间隔或规定的工作期间内，能将其运用指标保持在规定的限度之内，来完成规定的功能的性质。从这一定义中，可以看出，不仅使各个装配单位和各机组不发生损坏，从而保证机械的工作不产生中断是重要的，而且，将其功能准确地保持在规定的限度内，同样也是重要的。

人们对现今运用“参数可靠性”的术语来确定机械所应具备的必要功能精确度问题的研究是很少的，但是，恰恰是参数可靠性这一问题，在许多情况下，决定了新机械的使用效能。

摩擦部件参数可靠性的问题是一个很现实的问题。这是因为，摩擦装置有其独特的功能，各种类型的摩擦装置（制动器、离合器、缓冲器、减振器）都是为机械安全工作创造条件的。

大家知道：在研制和试验摩擦部件中，在保持摩擦装置的使用特性方面（例如制动力矩）常嫌不足。因此，必须创

造条件，使其在广泛的运用工况范围内的特性是稳定的。随着外部条件、载荷工况和使用时间的延长，其特性有较大的离散是大多数摩擦装置所特有的性质。在研制未来的运输机械时，通常都要大幅度地增加其载重量和加快其运动速度，因此，这就势必增大了作用在摩擦装置上的力。对于参数可靠性差的摩擦部件，就会大大地降低机械的工作能力和生产率，并易发生事故，甚至导致破坏。

在研究摩擦部件的功能时，必须考虑到摩擦部件的综合物理参数——决定于摩擦部件功能质量的状态参数，我们将这些状态参数称之为性能参数。能够完全确定摩擦部件工作能力的整套性能参数与摩擦部件所要完成的功能有关。我们要把摩擦部件的性能参数与机械的性能参数区别开来，机械功能的质量与摩擦部件的工作能力有关。首先，诸如摩擦系数、表面温度或体积温度、磨损的强烈程度、磨合时间的长短，即摩擦副的任何一项物理参数都是摩擦部件的性能参数，这些参数的额定值应当适宜。机械的综合性能参数也是多种多样的（制动距离、加速度、冲击状态下作用于装有缓冲装置的车辆上的作用力、装有减振器的运输机械的动力系数等等）。

如果机械的主要参数值偏离到技术文件要求所规定的范围之外，那么，机械的工作能力也就遭到了破坏，这种类型的故障称之为参数故障。参数故障不同于因机械发生损坏、卡住等原因所造成的机械工作能力丧失的故障。

参数可靠性科学是研究参数故障的科学。对“参数可靠性”这一术语可有不同的解释：有时将参数可靠性看作为所研究的制品的性质；有时则视为无故障工作的定量评定〔8〕。

按照可靠性的一般说法，应将参数可靠性理解为制品随着运用时间的延长，仍能将其运用指标保持在规定的限度之

内的性质。进一步引申，可以将参数可靠性视为包括有：无故障工作能力、寿命、检修方便性和维持性能不变的能力的综合性质。本书主要研究无故障工作能力。以后如果没有特别说明，均将参数可靠性视为无故障工作能力，并用工作时间 T 内的无故障工作概率来定量地评定参数可靠性。

我们来研究几种主要类型的参数故障。当性能参数发生随机变化，或者实际负载与所研究的具体制品的质量指标的匹配关系不相协调时，就会发生**突然性参数故障**。例如，在调车作业中，当车辆的质量及其运动速度与摩擦式缓冲器的特性之间的匹配关系不良时，就会使作用在车辆上的力超出额定值，从而发生突然性参数故障。

当由于磨损、老化或锈蚀过程的作用，使得性能参数呈现出进行性恶化时，就会发生**渐进性参数故障**（例如，由于缓冲器零件产生磨损，改变了相互间的运动关系，使得发生故障的概率大为提高了）。无论是突然性参数故障，还是渐进性参数故障都是可能自行消除的。这种类型的故障使机械的工作能力受到暂时性的破坏，但仍视为**事故**。譬如，由于制动机工作中温度条件的恶化，使得机械的制动距离超出了额定值，即使热力作用并没有引起摩擦材料发生不可逆的组织变化，也仍视为发生了事故。反之，参数故障也可以使制品丧失掉一部分工作能力或者是全部的工作能力。也就是说，制品中所表现出的故障可以是可消除的，也可能是不可消除的。

无故障技术是在提高机械可靠性的理论及其实践的深入发展中所产生的。是用概率——统计的方法来进行故障同机构的研究，以及对机械中所发生的各种过程和现象的物理本质的分析有机地结合起来的产物。

我们来研究摩擦装置产生参数故障的一些原因。

无论在我们规定的时刻里，还是在整个运用期限内，摩擦部件的工作不稳定性及其性能参数的离散程度都是由各种不同的因素所决定的。通常，使用因素（载荷工况、磨合程度、空气状况、污垢等）对摩擦装置不稳定性的影响为最大。摩擦装置各装配件中诸尺寸的离散及同批和不同批制造的摩擦副的摩擦性能偏差的工艺因素也起着重要的作用。而摩擦装置的结构、力传递系统和运动方式的特点等，则决定了机械的性能参数对摩擦部件的摩擦性能和几何特性方面所产生的不可避免的偏差的敏感程度是各不相同的。由于在接触处进行着各种各样的过程，使得摩擦表面变化不定，又由于摩擦件的物理性质也是不一致的，使得在同样的试验中，即使同一套摩擦装置，其摩擦性能也仍有某些离散。

因此，在研究现有的以及新设计的摩擦装置的参数可靠性问题时，应包括下列研究内容：

确定可靠性的定量特征并建立其评定方法；

仔细地考查运用中作用于摩擦部件上的实际载荷；

考虑结构因素和工艺因素的影响；

揭示摩擦和磨损过程中所发生的各种过程及各种现象，研究控制这些过程和现象的方法，摩擦副特性的概率描述以及建立其数学模型。

通过研究，应当在摩擦部件参数可靠性准则的基础上，建立起评定摩擦部件质量优劣以及优化摩擦部件的标准，拟订出提高现有的和新设计的摩擦装置参数可靠性的综合措施。

本书试图总结布良斯克运输机械制造学院及其它单位在摩擦部件参数可靠性方面的研究成果。

第一章和第二章，介绍了参数可靠性的现代研究进展状况，研究了可靠性科学的一般性基本原理和研究可靠性科学的基本方法。

第三至五章，研究了几类具体的自动作用的摩擦装置，这几类摩擦装置可靠性的评定方法是不尽相同的。所研究的摩擦装置是铁路运输用的制动机、起重-运输机械用的制动器和缓冲器。人-摩擦系统的功能问题，即它的参数可靠性，主要取决于人的控制和人的心理-生理特点。人-摩擦系统的功能问题现今还处于研究阶段。有关这个问题的某些观点，以及按照可靠性准则优化摩擦装置的问题，将在本书的第二章中予以介绍。

第一章 摩擦装置正常工作的条件

§1 摩擦装置的类型及其运用中 载荷特点

吸收运动物质的动能，并通过摩擦将其转变为热能是机械中使用摩擦装置的目的。大多数的现代化机械中都装有制动装置，以便在需要的时候能使机械停车；使用摩擦式离合器能平稳地开动机械；摩擦式缓冲器能够降低调车作业或者列车运行中车辆碰撞时的冲击力；而摩擦式减振器（阻尼器），则能限制动负荷和变形量。摩擦装置如能可靠地工作，就在很大程度上决定了装有摩擦装置的整个机械的工作是可靠的。

如果不能详尽地估算运用中摩擦装置上的载荷，就不可能分析摩擦装置的工作。我们可以将摩擦装置的载荷理解为摩擦装置使用条件的总合。摩擦装置的载荷指标则与机械的类型有关。对于摩擦副而言，通常它的运用载荷指标是：滑动速度、压力、一个加载周期的延续时间、单位时间内的加载次数以及摩擦副所产生的热能和摩擦中温度工况的特征（摩擦副各零件的表面温度和体积温度）（表1）。

从表1中可以看出：一个具体的摩擦装置的载荷指标常常是在较宽范围内变化的。因此，如不采用相应的概率-统计的评定方法，就不可能对摩擦装置的载荷提出完整的见解。

由于机械运动速度的增长和载重量的提高，而摩擦装置的外廓尺寸却没有多大的增加，甚至在许多情况下反而减缩

了，这就使得摩擦装置上的载荷在不断地增大。设计师们为了降低摩擦部件上的载荷，考虑了各种不同的办法。虽然也采用了与以往截然不同的各种新型的吸收能量的手段（飞机上的气动制动器、列车中的电力制动、液压及空气缓冲器和减振器等）。但是，摩擦式装置仍然是主要型式。

表 1

摩擦装置	滑动速度 m/s	压 力 $P \times 10^5, \text{Pa}$	一个承载周 期的延续时 间, s	一个小时内 平均承载 数	表面温度 $^{\circ}\text{C}$
铁路车辆制动机	1~80	1~12	15~200	5	可达300
起重机械制动器	3~25	3~12	0.3~2.0	200	可达300
汽车离合器	20~30	1~3	0.2~0.6	15~200	300~400
车辆摩擦式缓冲器	0.2~2	150~2500	0.1~1	10	可达600
车辆摩擦式减振器	0.1~0.2	20~100	0.2~0.4	200~15000	可达200

可以按摩擦部件的载荷将摩擦部件进行分类。按照体积温度的高低，可以将制动机使用的摩擦部件分为三类[24、40]，它们各自的体积温度分别达200℃、400℃和600℃。根据摩擦元件工作表面的温度又可分为五类：极轻、轻、中等、重和超重工况，其所对应的表面温度分别达100℃、250℃、600℃、1000℃及1000℃以上。进行这样的分类也便于选择摩擦副所使用的摩擦材料。但是，由于摩擦副具有已有定论的某些特点，还不能考虑大多数摩擦装置运用条件的随机特性。

当了解了摩擦装置上的载荷并掌握了载荷指标的概率-统计特征之后，就可以有根据地选择可靠的摩擦副了。

§ 2 外摩擦及磨损规律科学的基本原理

只有在深入地研究摩擦过程和摩擦过程中所伴随发生的各种物理-化学现象[11、14、23、25等]的基础上,才能解决研制可靠性好的摩擦部件的问题。

如今,分子-力学的摩擦理论[24]已经获得了很大的发展并被人们所认识。根据这个理论,人们研究了发生在摩擦表面上的两类不同的相互作用:机械作用和分子作用。当非常光滑的表面切向移动时,由于分子结合力的作用,材料中便形成了变形波。在负荷作用下,变形波将增大。在附着力的作用下,使得在覆盖物体表面的薄层之间形成了牢固的接合。但在剪切力作用下,形成的这种结合便被破坏。由于在分子-力学的理论研究中,采用了单元摩擦力总和的原理,所以必须要考虑接触物体的实际接触面积。由于接触表面的粗糙度、波纹度以及硬度不均匀的影响,两个物体仅在个别点上相接触,即呈离散接触状。在各接触区中,接触面积很小,便产生了很高的压力,接触部分相互侵入。在某些压力不大的接触点上,材料产生了弹性挤压;在另外一些压力超过了材料的屈服极限的接触点上,则产生了塑性变形。

在具有波纹度的表面,微突起集中在波纹表面的突起部,拥有微突起的表面,其变形波主要为弹性波。

每个突起的面积与表面材料的微观形状和表面材料的组织有关,接触点的尺寸约从零点几 μm 至30~50 μm 内变化。负载增大后,先是各个接触点的尺寸增大了,然后,由于接触点数量的增多,使得接触面积也随之增大了。这里应将名义的、轮廓的和实际的物体接触面积加以区别。名义接触面积由相互接触表面的外廓尺寸所限定;轮廓接触面积决定于物体变形区域的大小,即单元接触面积是置身于轮廓面积上

的；实际接触面积（物理学所指的接触面积）是单元接触面积的总和，其值与接触表面的机械性能和表面的粗糙度参数有关，由于这些因素的影响，实际接触面积约有四、五倍的变化。

每一个接触点的存在时间，与材料的应力状态和滑动速度的大小有关，其值可从 $0.0001s$ 到数 s 变化。在这段时间里，在接触点上产生了热并激烈地进行着化学作用，使得材料的性质发生了变化。由于这个原故，实际摩擦和磨损过程存在下面三个阶段：表面的相互作用阶段、接触处发生变化阶段和接触的破坏阶段。这些现象不断地相互影响着，致使该部材料在其破坏之前，已经历了一系列的物理-化学变化。这样，就在很大程度上决定了该部材料的特性。

人们对于磨损的本质及磨损形式的多样性有着各种不同的看法。M.M.赫鲁肖夫将磨损分为三类：以磨料磨损形式出现的由塑性变形或脆性破坏所引起的机械磨损；分子-力学磨损；腐蚀-力学磨损——腐蚀和氧化磨损。

按照 И.В.克拉格利斯基的说法，在机械的相互作用中，接触点处的材料磨损与表面微观不平度的几何形状有关。此时，磨损以微切削、塑性挤压时的疲劳磨损或弹性变形时的疲劳磨损形式表现出来。在分子间相互作用力的影响下，材料依附着力与内聚力的比例关系，或发生由附着力引起的破坏，或发生材料的深度掘起——内聚力作用的破坏。

气体介质是影响磨损的最为活跃的因素之一的概念，已被人们所公认。在此基础上，B.И.科斯特茨基也提出了磨损类型的分类[28]，在他的分类中，将氧化磨损做为最重要的磨损类型之一。在摩擦表面上形成和在磨损过程中不断再产生的氧化薄膜，能避免摩擦面直接接触和防止摩擦面产生粘滞。氧化磨损是机械零件正常工作中唯一允许存在的磨损

型式，而在摩擦过程中，其它磨损型式（摩擦腐蚀、锈蚀、气蚀、浸蚀、以磨料磨损形式出现的机械磨损等）均视为不允许的。

现在，人们已经探寻到氧化介质对摩擦和磨损的影响这一理论的发展方向，并且掌握了对确定的摩擦部件，揭示这种影响机理的途径。

人们研究了在摩擦表面上进行氧化反应的条件[3]。在磨损过程的同时，氧化薄膜也遭到了破坏。为了在原氧化区产生新的氧化层，必须要有氧供入。但是，并不是总能获得氧供入的条件，此外，氧沿途也要产生耗散。若某点处，氧化物分解时，氧的浓度为等浓度，那么，氧的供入就受到了限制。在氧供入的方向上，该点之后的摩擦表面将不可能氧化。从这里，我们可以得出实现氧化磨损的条件。

对氧化剂进入到摩擦接触处的机理进行了研究[14]，观察到两种基本的进入方法：通过接触间隙（缝隙效应）和通过开放状态的那一部分摩擦表面，对气体的吸附（吸附效应）。而空气中的氧进入到接触处的数量，则与热氧化过程、分解过程及其它化学吸着作用的烈度有关。

当摩擦件的表面缺少保护性的氧化膜时，粘滞将得以发展，而粘滞又引起金属表面的激烈磨损和使摩擦副产生故障。尽管对于粘滞机理的认识是很不统一的，但是，金属的塑性以及摩擦表面生成原生物的能力，对粘滞的成因有着重要影响的想法，则是一致的。滑动速度低的摩擦所形成的第Ⅰ类粘滞（不导热的），与滑动速度高的摩擦所形成的第Ⅱ类粘滞，是不相同的。滑动速度高时，摩擦金属表面层上的温度梯度是很大的，温度也在急剧地增高[23]。Б.И.科斯特茨基认为：在实际的接触点上，形成了活跃的分布中心。在这些分布中心上，有着非常高的空缺浓度和分布原子浓度，这

是由于活跃中心区的接触金属相互扩散，以及这些金属的原子，按最适宜的动态关系，调整它们的电子电平所促成的。

按照A. II. 谢麦诺维提出的能量假说[34]，当晶体点阵处于这样的状态：其原子所具有的能量，超出了附着能量的限度时，便构成了产生粘滞的基本条件。另一方面，因为原子微调过程中所激发的能量（这对结晶体形成粘滞是必需的）稍小于原子并拢所消耗的功，因此几何因素，即形成足够的实际接触面积，便限制了粘滞过程[24、29]。从中得出一个结论：应首先以接触物体的机械性能和使它们的表面薄层或表面覆盖层各不相同为前提，选择不产生粘滞的摩擦副。

将材料的变形局限在表面很薄的一层，是外摩擦的必要条件。为了实现这种限制条件，必须使材料具有优越的梯度分布[24]，即分子结合强度应小于底层的强度。如果这种梯度分布不能满足，那么，外摩擦就要转变到内摩擦。

为使材料具有上述的梯度分布，促使人们去研制专用的合成摩擦材料。这些材料在使用条件下，由于各种物理-化学过程的作用，能自行形成可以承受多次塑性变形的稳定工作层。任何一个摩擦副元件，当这种过渡层的结合强度，低于紧贴于过渡层中变形区深处材料的微粒结合强度时，材料就具有很高的耐磨性，并以摩擦副各元件过渡层的结合强度各不相同为最好。表面层的塑性有促使局部单位压力降低和改善材料磨合性能的作用。表面层的组织，通常是不均匀的，它是含有细小硬性微粒的塑基混合物。工作层中，由于有这些硬性微粒的存在，提高了工作层的抗剪强度。此外，即使形成了粘滞薄层，摩擦力提高了，这种粘滞破坏也不会造成材料发生深度掘起。

大量的研究指出：摩擦副的温度工况是决定合成摩擦材料工作能力的主要因素之一。对于合成摩擦材料，当材料滑

动时，变形局限于很薄的一层材料之中，同时变形能也集中在该层。变形能转变为热，又引起该处温度的升高，形成了温度梯度。于是引起了一系列物理-化学过程的发生，从而改变了材料的原始结构，形成了过渡层。除此之外，温度也影响到材料的机械性能与硬度的可逆性变化。

通过研究指出：当摩擦表面为石棉摩擦材料时，很高的摩擦温度将使粘合剂分解。粘合剂是材料中维持材料整体性的成分。粘合剂分解了，材料也就破坏了。即材料的耐热性实质上决定于粘合剂的耐热性。通常，粘合剂在不太高的温度下，就开始分解了，只不过进展得很缓慢罢了。如进一步发展，这个分解过程就变得很激烈了。绝大多数的分解物呈液态，且集中在摩擦表面，因此起到了润滑剂的作用，从而降低了摩擦系数。摩擦时，在很高的温度条件下，发生的还原-氧化过程还会扩散到材料很深的地方。通过调整粘合剂的成分及加入到粘合剂中各成分的数量，就能使得给定的摩擦部件获得需要的摩擦材料性能。

研制重载摩擦部件所使用的耐热粉末冶金摩擦材料的基本原理及其研究成果，已在书刊[9、15、24等]中介绍了。干摩擦部件所使用的粉末冶金材料，通常为铁基材料。该材料中加入能促使摩擦系数提高的成分（石棉、硅的氧化物、某些金属的氧化物和碳化物）和促使耐磨性提高的成分（铜、锡、铅、石墨、硼的氮化物、二硫化钼等）。除了成分之外，制造工艺（挤压、烧结等规范）也对粉末冶金摩擦材料的性质，产生很大的影响。

在摩擦学的现代进展和评定温度工况所起作用的基础上，就可以确定对摩擦材料应提出的要求[1、11、14、24]。对摩擦副所提出的主要要求是：需要的摩擦系数值，而且摩擦系数应稳定，耐磨性要高。如果摩擦材料具有足够高的耐热