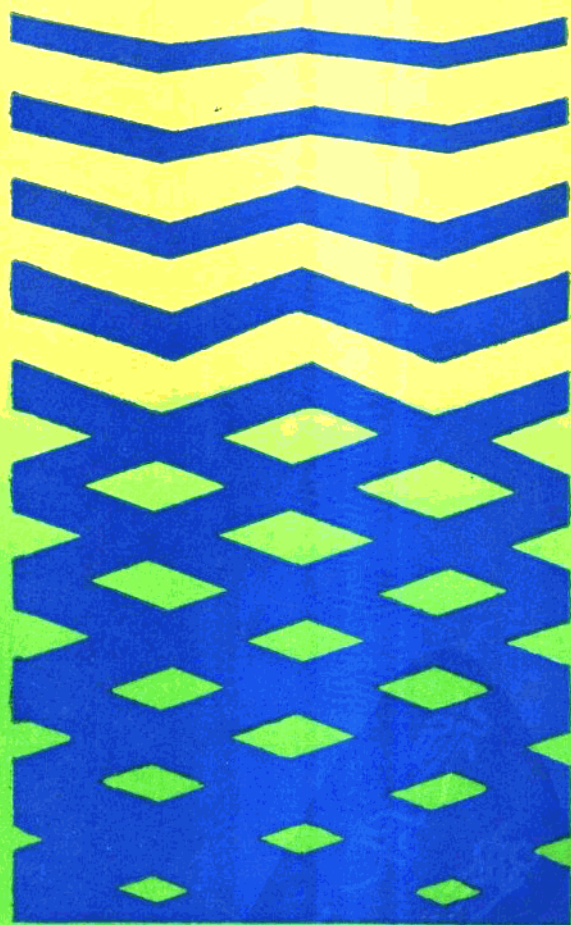


现代工程机械 检测与维修

宋廷坤 易新乾 王 潜 主编

汪鸿位 主审



中国铁道出版社

现代工程机械检测与维修

宋廷坤 易新乾 王 潜 主编
汪鸿位 主审

中 国 铁 道 出 版 社

1996年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书本着理论与实际相结合的原则编写,且以实用为主。在理论的讲述方面,力求简明、扼要;在实用技术和典型工程机械的检测与修理方面,力求全面、准确、详细。全书以预防修理、故障检测为重点。

全书共分七篇计三十四章。第一、二篇重点介绍了机械老化的概念和更新技术、维修经济分析;第三、四篇讲述了无损探伤、油样分析和振动技术;第五篇为零件的修复工艺;第六、七篇收集了我国 80 年代以来引进的部分工程机械的故障诊断、不解体检测的典型实例。

现代工程机械检测与维修

任坤、易新乾、王潜 主编

中国铁道出版社出版发行

(北京市东单三条 14 号)

责任编辑 江新锡 封面设计 马利

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印刷

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:34 字数:833 千

1996 年 3 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:1—5000 册

ISBN7-113-02088-7/TH·54 定价:42.70 元

前 言

随着科学技术的不断发展,工程施工机械化水平越来越高,机械已经成为工程施工的重要物质技术基础。机械设备的管、用、养、修,不仅关系到设备本身的寿命和完好率,而且直接影响到工程的施工进度和经济效益。在机械修理方面,过去乃至现在我们仍然采用定期维修、事后修理制。这一修理体制与市场经济和当前机械本身的结构状况及技术水平很不适应,表现出明显的弊端。首先是维修的盲目性大,浪费大;其次是难以预防机械事故,影响施工生产。因此,实行状态检测、预防维修体制势在必行。我国80年代就开始推行状态检测、预防性修理,应该说在这一方面有了长足的发展。实行状态检测、预防性修理的技术关键是状态检测技术,在这一方面现场缺乏可靠的、实用的检测数据和有关资料。为此,我们编写了这本书,旨在为机械技术人员提供一些有益的、可借鉴的资料,推动状态检测与预防修理体制的完善和发展。

本书在编写过程中,本着理论与实际相结合的原则,以实用为主,在理论的讲述方面,力求简明、扼要;在实用技术和典型工程机械的检测与修理方面,力求全面、准确、详细。

本书在编写过程中,中国铁路工程总公司的领导自始至终给予了亲切关怀和支持,铁道部隧道工程局,第一、二、三工程局,大桥工程局,石家庄铁道学院的领导也给予了大力的支持,谨此表示感谢。

编 者

本书编写人员

主 编 宋廷坤 易新乾 王 潜

主 审 汪鸿位

编写人员

宋廷坤 易新乾 王 潜 刘 军 姜仁祥

刘志强 黄清文 黄世达 王春恩 张爱华

沈福良 杨仁康 胡国庆 易 山 张宏斌

孙成刚 行 军 甄凯玉 张凤楼 马世宁

赵大庆

目 录

第一篇 修理组织	1
第一章 机械的老化	1
第一节 机械老化的分类	1
第二节 机械老化程度的数量指标	2
第三节 机械老化的规律	4
第四节 机械老化极限	5
第五节 老化机械的更新	9
第二章 可靠性原理在机械修理中的应用	9
第一节 概 述	9
第二节 可靠性的数量指标	10
第三节 可靠性原理应用中的几个问题	13
第三章 机械维修制度	17
第一节 概 述	17
第二节 维修制度分类	18
第三节 保养制度	21
第四节 国外典型维修制度	22
第四章 修理生产的组织形式	28
第一节 宏观的机械修理生产组织形式	28
第二节 工厂内部修理生产的方式	29
第三节 机械维修生产的管理	30
第二篇 维修经济	33
第一章 维修经济概论	33
第一节 概 述	33
第二节 维修经济的基本理论和指标体系	34
第三节 维修经济评价的基本方法	42
第二章 维修经济分析	45
第一节 设备寿命周期费用分析	45
第二节 投资决策	57
第三节 设备更新决策	61
第三篇 检测与诊断	66
第一章 无损探伤技术	66
第一节 概 述	66
第二节 渗透探伤法	67

第三节 磁粉探伤法	69
第四节 超声波探伤法	71
第二章 机械运转参数的检测	74
第一节 温度的检测	74
第二节 压力的检测	76
第三节 流量的检测	77
第四节 转速的测量	82
第五节 噪声的测量	84
第三章 油样分析技术	85
第一节 概 述	85
第二节 取油样	86
第三节 油样光谱分析	87
第四节 油样铁谱分析	90
第五节 油样分析技术的敏感范围	94
第四章 振动诊断技术	95
第一节 概 述	95
第二节 振动测量	95
第四篇 修复工艺和典型零件修复	102
第一章 维修焊接	102
第一节 手工电弧堆焊	103
第二节 埋弧自动堆焊	105
第三节 振动电弧堆焊	107
第二章 热喷涂技术	109
第一节 概 述	109
第二节 热喷涂的理论基础	110
第三节 氧乙炔火焰喷涂与喷熔	112
第四节 电弧喷涂	113
第五节 等离子喷涂	114
第六节 特种喷涂	116
第三章 电刷镀技术	119
第一节 概 述	119
第二节 电源/镀笔/镀液	120
第三节 电刷镀工艺	122
第四节 电刷镀镀层的结合机理与强化机理	123
第五节 镀层质量检验	125
第四章 镀铬技术	126
第一节 概 述	126
第二节 镀铬设备	127

第三节 镀铬电解液.....	128
第四节 镀铬工艺.....	130
第五章 粘接技术	131
第一节 概 述.....	131
第二节 胶粘剂的分类及性能.....	131
第三节 粘接工艺.....	134
第四节 接头设计要求.....	136
第五节 典型粘接应用实例.....	136
第六章 表面强化层的机械加工	137
第七章 零件修复层的表面强化	141
第一节 离子 N-C 共渗	141
第二节 激光表面处理.....	142
第三节 真空熔结技术.....	143
第四节 喷丸强化技术.....	144
第五篇 液压系统维修	145
第一章 液压液与密封件	145
第一节 液 压 液.....	145
第二节 密 封 件.....	157
第二章 液压系统的维护	161
第一节 液压油的维护.....	161
第二节 液压系统的维护.....	167
第三章 液压系统的安装和调试	168
第一节 液压系统的安装.....	168
第二节 液压系统的调试.....	170
第四章 液压系统的清洁	171
第一节 清洁度的标准.....	171
第二节 清洗工艺.....	174
第五章 液压系统的状态监测、故障诊断与修理	176
第一节 经验检查.....	176
第二节 常规检查.....	178
第三节 故障诊断.....	180
第四节 液压系统的修理.....	183
第六章 液压装置的泄漏及预防	190
第六篇 发动机检测与维修	196
第一章 发动机的状态监测与故障诊断	196
第一节 发动机的状态监测.....	196
第二节 柴油机的故障诊断.....	204

第二章 发动机的修理	211
第一节 拆装的一般技术要求.....	211
第二节 进、排气系统的修理.....	213
第三节 基本部件的修理.....	221
第四节 润滑系统的修理.....	240
第五节 冷却系统.....	244
第六节 电气设备及仪表.....	248
第七节 发动机磨合及调试.....	257
第三章 发动机燃油系	269
第一节 柱塞式喷油泵燃油系.....	269
第二节 泵—喷油器燃油系.....	309
第七篇 典型工程机械检测与维修	344
第一章 ATLAS-H178 液压凿岩台车	344
第一节 液压油泵.....	344
第二节 控制阀组的检测与维修.....	348
第三节 液压凿岩机.....	350
第二章 CAT953 履带式装载机	355
第一节 主要结构和性能.....	355
第二节 检 测.....	355
第三节 调整维修.....	367
第三章 CAT966D 型轮胎式装载机	374
第一节 主要技术参数.....	375
第二节 传动系统.....	376
第三节 液压系统.....	384
第四节 转向系统.....	392
第五节 制动系统.....	397
第四章 W90-2 轮胎式装载机	403
第一节 结构特点和液压系统工作原理.....	403
第二节 检测和故障分析.....	407
第三节 液压系统总成的功能检测.....	414
第四节 典型故障的诊断与排除.....	418
第五节 液压系统和底盘修理规范.....	420
第五章 827B 型自行式铲运机	424
第一节 传动系统.....	424
第二节 铲运机液压工作系统.....	438
第三节 转向系统.....	441
第四节 缓冲连接装置.....	443
第五节 传动系统的修理.....	445

第六章 D85-18 型履带式推土机	447
第一节 传动系统的检测	448
第二节 行走机构的检测	451
第三节 液压系统的检测	457
第四节 检测修理标准	460
第七章 PC-400-1 液压挖掘机	474
第一节 结构与性能	474
第二节 总成的功能检测	478
第三节 传动系统检测修理	485
第四节 液压系统检测修理	489
第八章 履带式起重机(柴油打桩机)	498
第一节 机 型	498
第二节 主要技术参数	501
第三节 性能检测	507
第四节 液压系统的检测	516
第五节 履带修理	525
第六节 柴 油 锤	529

第一篇 修 理 组 织

第一章 机械的老化

机械从生产出来以后,在保管和使用中就开始了一个逐渐老化、直至报废的过程。研究这一老化过程的规律性、探讨适应这一规律的相应对策是机械修理学的核心内容,是指导机械维修生产的理论基础。

第一节 机械老化的分类

机械老化可以分为以下几类:

- | | | |
|-------|---|---------|
| ①有形老化 | — | 第Ⅰ种有形老化 |
| | | 第Ⅱ种有形老化 |
| ②无形老化 | — | 第Ⅰ种无形老化 |
| | | 第Ⅱ种无形老化 |

一、有形老化

机械及其零件的实体由于磨损、变形、断裂、蚀损等原因而损坏,使机械的精度降低、性能变坏的现象叫有形老化。其中,第Ⅰ种有形老化是指机械在运转过程中,由于磨损、变形、断裂、蚀损等原因而形成的实体损坏;第Ⅱ种有形老化是指机械在闲置过程中,由于金属锈蚀、木材与皮革腐朽、橡胶与塑料老化等自然力形成的实体损坏。

第Ⅰ种有形老化与使用时间和使用强度有关,第Ⅱ种有形老化与闲置时间和保管状况有关。改进设计、提高加工质量、采用新型耐用材料、正确使用、合理维修、认真保管都能推迟有形老化的进程,延长机械的寿命。

二、无形老化

机械在使用或闲置过程中,由于科学技术进步而发生使用价值或再生产价格降低的现象叫无形老化。

第Ⅰ种无形老化是指设备的技术结构和经济性能并未改变,但由于技术进步、生产工艺不断改进、再生产这种机械的费用降低,从而使机械发生贬值的现象。

第Ⅱ种无形老化是指由于出现了结构改进、技术性能更好、生产率更高、经济性更好的机械,如果继续使用原有机机械,则技术上变成落后。在技术发展中,如广泛采用新的材料或采用完全不同的的施工方法,则原有机机械完全失去使用价值而被淘汰,也就产生了急剧的老化。

应当指出:无形老化既然是社会生产力发展的结果,老化愈快,则表示社会技术进步愈快,

应该受到欢迎。所以机械维修人员的任务不是防止机械的无形老化,而是认真研究无形老化的规律,采取适当措施,以适应科学技术的发展。

第二节 机械老化程度的数量指标

一、有形老化程度的数量指标

(一)以磨损为主的零件老化程度的指标

以磨损为主的零件,其老化程度的计算公式如下:

$$\alpha = \frac{\delta_r}{\delta_m}$$

式中 α ——零件的老化程度;

δ_r ——零件的实际磨损量;

δ_m ——零件最大允许磨损量。

(二)以疲劳为主的零件老化程度的指标

以疲劳为主的零件,其老化程度的计算公式如下:

$$\alpha = \frac{T_r}{T_m}$$

式中 T_r ——零件实际工作时间;

T_m ——零件的疲劳寿命。

(三)以零件老化程度计算的机械的老化程度的指标

在计算各零件老化程度的基础上,可以算出机械的老化程度。在下面公式里,借用经济指标比物理老化程度具有更大的实用价值。

$$\alpha_r = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i K_i}{\sum_{i=1}^n K_i}$$

式中 α_r ——机械有形老化程度;

α_i ——第 i 个零件的老化程度, $i=1, 2, 3, \dots$;

n ——机械中发生有形老化零件的数目;

K_i ——第 i 个零件的价格。

(四)以机械性能降低程度来计算的机械的老化程度的指标——性能指数

参照日本用以度量机床老化程度的指标——精度指数,提出可用于度量工程机械有形老化程度的指标——性能指数 T 。性能指数的定义式是:

$$T = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i T_i)^2}{n}}$$

当 T_r 是渐增型时 $T_i = \frac{T_r}{T_n}$

T_r 是渐减型时 $T_i = \frac{T_n}{T_r}$

式中 T_n ——机械某一项性能(功率、油耗、生产率……)的实测值;

T_n ——机械某一项性能(功率、油耗、生产率……)的额定值;

T_i ——机械某一项性能的老化比;

a_i ——第 i 项性能指标的加权系数,根据该项性能在反映机械老化程度方面的重要程度选取;

n ——考察的性能的项数。

性能指数 T 可用来反映机械性能降低的程度。指数越大,则机械老化越甚。由于性能指数是各项性能的比值的综合,消掉了各项性能的计量单位,成为一个无量纲值,所以各项性能、各种机械以及各机群之间都有了可比性。

(五)直接以经济指标计算的机械老化程度

公式如下:

$$a_r = \frac{R}{K}$$

式中 R ——修复机械所需的费用;

K ——在确定机械老化程度时,该机械再生产的价值。

二、无形老化的指标

度量机械的无形老化程度,常常采用价值指标:

$$a_1 = 1 - \frac{K_n \left(\frac{q_0}{q_n}\right)^a \left(\frac{c_n}{c_0}\right)^\beta}{K_0}$$

式中 a_1 ——机械无形老化程度;

K_0 ——机械原始价值;

K_n ——新机械的价值;

q_0 ——旧机械的年生产率;

q_n ——新机械的年生产率;

c_0 ——使用旧机械时的单位产品成本;

c_n ——使用新机械时的单位产品成本;

a ——劳动生产率提高指数, $0 < a < 1$;

β ——成本降低指数, $0 < \beta < 1$ 。

在上式中,当 $q_0 = q_n$ 、 $c_0 = c_n$ 时,表示新旧机械的劳动生产率和使用成本均相同,此时 a_1 表示的只是第 1 种无形老化。

$$a_1 = 1 - \frac{K_n}{K_0}$$

三、综合老化程度的指标

公式如下:

$$a = 1 - (1 - a_r)(1 - a_1)$$

式中 a ——机械综合老化程度的指标;

a_r ——机械有形老化程度, $(1 - a_r)$ 为考虑有形老化时机械的剩余寿命;

a_1 ——机械无形老化程度, $(1 - a_1)$ 为考虑无形老化时机械的剩余寿命。

当两种老化同时发生时,机械的剩余寿命为 $(1-\alpha_1)(1-\alpha_2)$ 。

第三节 机械老化的规律

对机械及其零件老化的规律目前还缺乏研究,现参考中国农机科学院杨秋荪教授的研究成果,整理了如下内容。

一、零件寿命的不平衡性和分散性

零件的寿命有两个特点:异名零件寿命的不平衡性和同名零件寿命的分散性。

机械中每个零件的工作条件和设计各不相同,因而每个零件老化的速率相差很大,这就是异名零件寿命的不平衡性。机械修理技术人员常常以那些寿命较短的零件为研究对象,努力提高他们的寿命;但这些零件寿命提高以后,其他零件寿命又相对显得较短;所以异名零件寿命的不平衡性是绝对的,平衡只是相对的。

由于材质上的差异、加工与装配时的误差、使用与维修条件上的差别,同名零件的寿命也有差别,其分布规律如正态曲线(如图 1—1—1),这就是同名零件寿命的分散性。严格地按照科学方法加工、使用和维修,可以缩小同名零件寿命的分散程度,但不能消除它。也就是说:同名零件寿命的分散性也是绝对的。

同名零件寿命的分散性扩大了异名零件寿命的不平衡性。

以上零件寿命的两个特点也完全适用于部件和总成。

二、机械寿命的分散性、地区性和递减性

由于零件寿命的分散性,机械寿命也具有分散性,其分布规律也呈正态曲线。

机械寿命受自然条件的影响很大。在砂性土壤或水田工作的拖拉机,其行走部分及减速箱磨损加剧;寒冷和沙漠地区,发动机的腐蚀和磨损增大;在青海高原工作的推土机,由于空气稀薄,发动机燃烧不完全,再加上风沙很大,所以发动机的腐蚀和磨损严重,寿命较短,也正因为燃烧不完全使发动机发不出额定功率,底盘始终在轻载下工作,所以底盘的工作寿命延长。气候和地理条件的影响,扩大了机械寿命的分散性;但这一影响在同一地区具有相同的趋势,所以称为机械寿命的地区性。

材料的物理、机械性能的变化需要相当的时间;零件的许多缺陷需要经过相当时间的发展才逐渐显露出来;我国机械修理企业的现状,使修理后机械的技术状况往往达不到要求;所以,随修理次数的增加,机械寿命产生递减的现象。通过修理人员的努力,完全可以减少上述递减的幅度,但是否可以完全消除上述递减性尚无定论。

机械寿命的分散性和递减性如图 1—1—2 所示。图中曲线 1 是 235 台新发动机寿命的分布规律,曲线 2 是 353 台经过大修的发动机的寿命分布规律。可以看出曲线 2 明显地左移。

三、机械性能和效率的递减性

机械的有形老化中,有一些是可以通过修理加以恢复的,如磨损、变形;也有一些(如疲劳、腐蚀等),由于技术上或经济上的原因,在目前条件下还无法彻底恢复。所以经过修理的机械,其机械性能和使用效率有逐次递减的趋势。

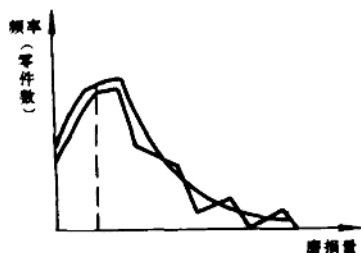


图 1—1—1 零件老化的典型分布

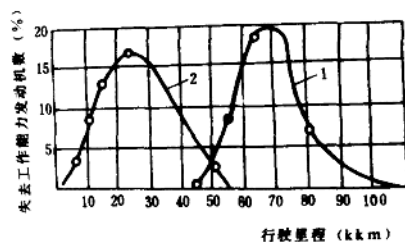


图 1—1—2 M-20 发动机寿命分布曲线

据某厂测算,设备每次大修后,性能和效率下降幅度大致如下:

第一次大修后,下降 5%;

第二次大修后,下降 5%~10%;

第三次大修后,下降 10%~15%;

第四次大修后,下降 15%。

虽然并不是所有经过修理的机械的性能、效率都有如此的下降幅度,但逐次下降的规律却是事实,这对于一台机械的合理大修次数具有决定意义。

第四节 机械老化极限

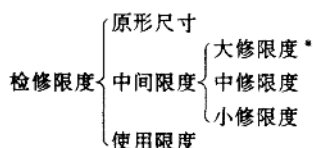
一、概 念

老化极限是一个适用于不同层次的概念,零件、配合副、总成有老化极限的问题,整台机械也有老化极限的问题。习惯上把零件、配合副、总成的老化极限叫做检修限度,把机械的老化极限叫作寿命。

(一)零件和配合副的检修限度

检修限度是在机械检测和修理中,对零件尺寸大小、形状变化、损伤程度、配合间隙和相对位置所规定的标准和允许变化限度。机械经过一定时间运转后,将出现各种损伤,零件的尺寸、形状、配合间隙和相对位置必然全有所变化,但并不是稍有损伤和变化就需要修理,也不能每次修理都恢复到原形尺寸。究竟损伤到什么程度才修理,每次修理要修到什么程度才算合适呢?因此,在确保机械正常运转、实现使用技术要求和保证安全生产的前提下,通常把检修限度分成几个档次(级别)。

1. 检修限度的分类



部分欧美国家的工程机械公司将检修限度分为原形尺寸、使用限度两类。

* 也有将大修限度和原形尺寸归为一类的。

日本、前苏联和中国(50~70年代)的工程机械修理规范中将修理限度分为原形尺寸、大修限度、中修限度和使用限度四大类,或原形尺寸、修理限度和使用限度三类。

(1)原形尺寸。各零件原形尺寸及配合原始间隙是指机械各零部件的设计尺寸和制造允许公差,组装时的允许间隙。

(2)大修限度。大修限度是指机械大修时,各零部件超过或不符合此限度者需修理或更换的限度尺寸。机械大修时,原则上将各限度恢复到设计所规定的原形尺寸或者说恢复到机械的原有使用性能。

(3)中修限度。中修限度是指机械中修时超过或不符合此限度的、需修理或更换的尺寸限度。

(4)小修限度。小修限度是指机械小修时超过或不符合此限度者需修理或更换的尺寸限度。

(5)禁止使用限度。禁止使用限度是指机械检修限度中最低要求的限度。机械各零部件尺寸和配合间隙超过此限度时,不经修理或更换不准继续使用,它实际上是指零部件的极限尺寸或配合的极限间隙。

检修限度虽然有五个档次,但是并不是每个零件或配合均有这五个限度。有些零件只规定有中间限度,没有使用限度,这些零件在低级检测、保养及日常检查时,不需要检查其限度。有些零件只有高级修程的限度,则该零件在低级修程中不做检修要求。

工程机械修理中常见的限度有原形尺寸、大修限度、中间修理限度和使用限度。

2. 检修限度确定的依据和方法

(1)原形尺寸,即设计图上的尺寸和技术要求。

(2)大修限度是根据尽可能将各零件或配合恢复到原始设计尺寸和原有使用性能的要求制定的。

(3)使用限度 确定零件的使用限度是以零件发生的损伤是否危及该零件的安全,是否影响该零件的正常使用为依据的,制订零件使用限度通常考虑以下因素:

a. 损伤程度是否影响零件的强度。

大多数零件的损伤,如磨损、裂纹、腐蚀等都使零件的有效断面减小,当损伤程度发展到使零件的应力接近许用应力时,零件就到了使用限度,如轴的最小直径、轮辋的最小厚度。

受变载荷作用的零件应注意零件的损伤对疲劳强度的影响,如光滑表面的划伤、表面剥蚀坑的数量等。

b. 损伤程度是否影响该零件的损伤急剧发展。

有些零件的磨损达到一定程度后,磨损速率会急剧增大,这时的损伤量就是该零件的使用限度。

确定配合的使用限度不仅要考虑零件本身的工作条件,还要考虑与其他零件的配合情况,轴与滑动轴承配合通常应考虑以下因素:

(a)配合间隙增大,最小润滑油膜厚度小于或等于两配合表面不平度之和时,润滑条件破坏;

(b)配合间隙增大,运转时的冲击值迅速增大,当冲击值增加到某一极限值时,配合会迅速破坏,此时的配合间隙值是配合的使用限度;

(c)配合间隙增大,则润滑油的压力值下降,当润滑油压力下降到允许的最低值时,此时的配合间隙为使用限度。

活塞环与气缸套的滑动配合,当活塞环磨损后,气缸的漏气量增加,内燃机功率下降,燃油与润滑油的消耗量增大,但过早地更换活塞环又使修理费用增加,当内燃机台班经济损失与修理费之和为最小时,活塞环的磨损量即为使用限度。

(4)中修或小修限度:

中修或小修限度的确定原则是当检测或修理时,该零件的磨损表面尚有足够的磨损余量,能保证继续安全可靠地用到下次检测周期或修程。但是,由于机械各个零件磨损情况不同,在到达某一定期检测或修程进行定期检测和修理时,按规定不该修的零件,可能不得不进行修理,而该修的零件,可能还不需要修理,但如不加修理,可能又使用不到下次定期检测或修程时零件已达到禁止使用限度。为了解决这一问题,可利用间隙扩大曲线制定出中修或小修限度,以保证零件或配合能继续使用到下一修程 而不超过限度。

如图 1—1—3 所示,某配合间隙,按原检修计划安排,设计间隙 $S_{\text{设}}$ 由于磨损扩大到使用极限 $S_{\text{限}}$ 时,机械可走行 2000km,恰好是一个中修修程,但是由于保养条件的改善或其它原因,可继续延长走行 1000km,即变成 3000km,也就是可由一个中修修程延长一个小修修程,新的中修限度应是多少呢?

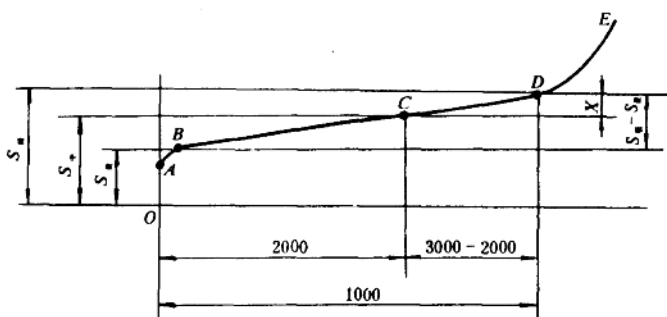


图 1—1—3 中间限度的确定

如果零件在使用中,磨损量与单位走行公里或运转小时成正比,则配合间隙的扩大量成一直线,图 1—1—3 中 D 为该配合的使用极限点,与 D 点相应的是使用极限间隙 $S_{\text{限}}$,配合间隙由 $S_{\text{设}}$ 扩大到 $S_{\text{限}}$ 时使用寿命便告结束。

从图 1—1—3 中的几何关系中可知:

$$\begin{aligned}\frac{x}{3-2} &= \frac{S_{\text{限}} - S_{\text{设}}}{3} \\ \frac{3-2}{3} &= \frac{x}{S_{\text{限}} - S_{\text{设}}} \\ x &= \frac{S_{\text{限}} - S_{\text{设}}}{3} \cdot (3-2) = \frac{1}{3}(S_{\text{限}} - S_{\text{设}}) \\ S_{\text{中}} &= S_{\text{限}} - x = S_{\text{限}} - \frac{1}{3}(S_{\text{限}} - S_{\text{设}})\end{aligned}$$

经演算得:

$$S_{\text{中}} = S_{\text{设}} + \frac{2}{3}(S_{\text{限}} - S_{\text{设}})$$

在图 1—1—3 中可按三分之一的比例求出新的中修限度 $S_{\text{中}}$ 。