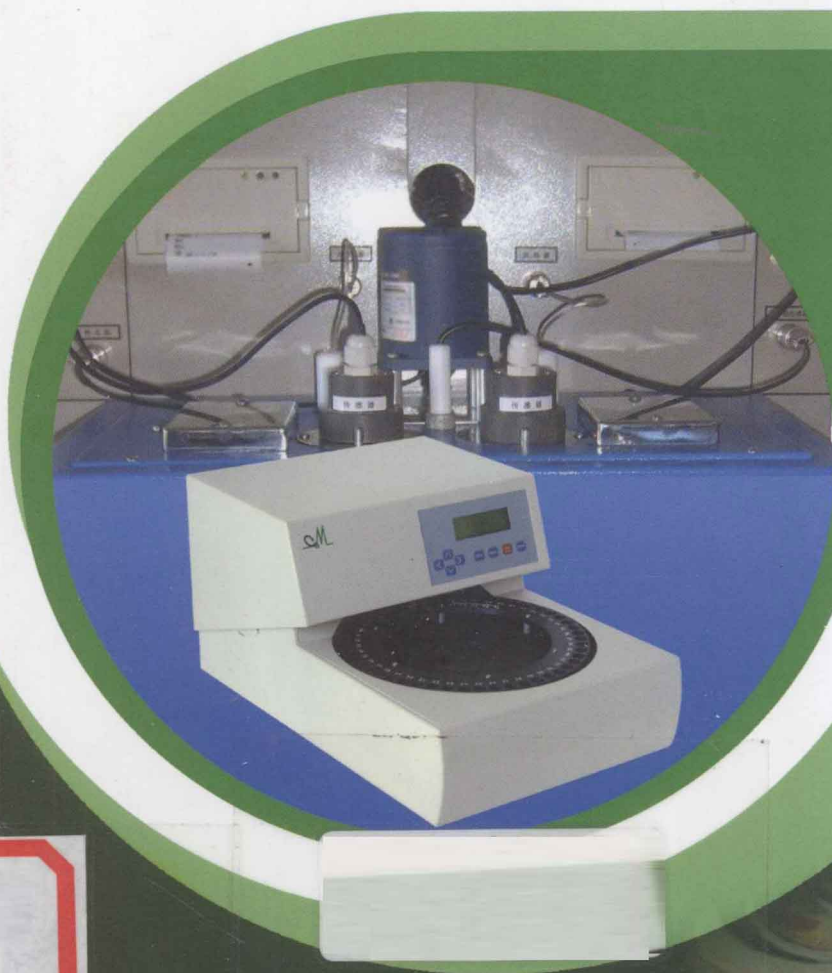


◎ 合理润滑手册

油液监测技术

主 编 杨俊杰

副主编 陆思聪 周亚斌



石油工业出版社

合理润滑手册

油 液 监 测 技 术

主 编 杨俊杰

副主编 陆思聪 周亚斌

江苏工业学院图书馆
藏书章

石油工业出版社

内 容 提 要

油液监测技术是随着设备维修体制的发展而发展起来的一门边缘技术,是设备预知性维修的重要支柱技术,其应用前景非常广泛,对保障企业设备的安全、稳定、长周期运行起着重要的作用。本书介绍了油液监测技术的历史沿革、理论与实践、主要油品监测规范、监测设备以及相关案例等,可供各类企业设备管理和润滑管理人员、润滑油品研发和技术服务人员、提供设备状态检测和油液监测的服务机构技术人员等参考。

图书在版编目(CIP)数据

油液监测技术/杨俊杰主编.

北京:石油工业出版社,2009.11

(合理润滑手册)

ISBN 978-7-5021-7466-8

I. 油…

II. 杨…

III. 机械设备-润滑-监测-技术手册

IV. TH117.2-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 190881 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523585 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2009 年 11 月第 1 版 2009 年 11 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:16 印张:17

字数:422 千字

定价:60.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《合理润滑手册》编委会

主 任:廖国勤

副主任:杨俊杰 贾铁鹰 伏喜胜 翟月奎

编 委:欧 风 王泽恩 张少明 徐小红 周亚斌

于 军 赵崇志 王东海 朱挺斌 陆思聪

周洪澍 李万英 程型国 魏文羽

《油液监测技术》编写组

主 编:杨俊杰

副主编:陆思聪 周亚斌

编 委:岳奇贤 马书杰 王 辉 刘功德 聂 刚

魏文羽

主 审:周洪澍

总 序

润滑油是工业机械和运动设备的“血液”，广泛应用于汽车、铁路、航空、船舶、军用装备、冶金、水泥、造纸、煤炭、油田、石油化工、电力等工业领域。合理有效的润滑不仅可以延长机械可运动设备的使用寿命、节约维修成本，而且可以达到节能降耗的目的。随着我国经济的持续稳定发展，润滑油在机械和运动设备中的重要性会越来越大，所发挥的作用会越来越明显，最后必将发展为机械和运动设备不可缺少的特殊及重要部件。

为了推动、规范润滑技术的合理应用，全国能源基础与管理标准化技术委员会组织制定了国家标准 GB/T 13608—1992《合理润滑技术通则》，由国家技术监督局 1992 年 8 月 15 日颁布，从 1993 年 5 月 1 日起实施。为了配合 GB/T 13608—1992《合理润滑技术通则》的宣贯工作，为企业开展合理润滑提供技术支持，欧风先生集多年积累，编写了《合理润滑技术手册》，1993 年由石油工业出版社出版发行，受到润滑研究、生产、应用各界的欢迎，为普及合理润滑技术做出了贡献，在业内有很大影响。

十几年来，我国经济持续以两位数的速度增长，加之国家加大了技术创新的号召和支持力度，各个行业都在探索从中国制造到中国创造之路。机械设备从引进国外先进技术到引进消化吸收再创新，从汽车到工业领域都全面接近世界先进水平，局部还有领先。为了适应国民经济和机械设备润滑的需要，润滑油行业也完成了重大的行业整合，与国内外的相关行业开展了大量合作，从研发、生产到营销服务正在塑造国际水平的中国润滑油品牌。这些实践的需要，已经大大超越了 1993 版《合理润滑技术通则》的内涵。为此，全国能源基础与管理标准化技术委员会从 2007 年起着手《合理润滑技术通则》的修订，欧风先生也准备对手册进行再版。现在 GB/T 13608—2009 已经颁布，而欧风先生不幸未能完成手册的修订就过早地离开了我们。为了给各行业提供现代的合理润滑技术与理念，配合新标准的宣贯工作，由中国石油润滑油公司牵头组成编委会，按照分册出版的方式，改版成《合理润滑手册》，作为 GB/T 13608—2009《合理润滑技术通则》宣贯教材的主要部分。整个手册初步拟定分为《合理润滑概论》、《润滑油脂及其添加剂》、《汽车及发动机润滑》、《工业机械的润滑》、《金属加工润滑与冷却》、《船舶、机车与航空润滑》、《润滑油脂的分析评定》、《油液监测技术》、《油气田设备的润滑》、《炼化设备的润滑》等十册，其中前六册是在原版基础上的再版，后四册是根据行业发展的实际和石油石化工业的特点而增加。每一册的出版顺序根据具体编审情况而定，总体上争取在 2011 年完成。

国际摩擦学会的研究表明，摩擦耗能相当于一次能源的 1/3 左右，磨损是材料和设备破坏失效的三种最主要方式之一。中国工程院“摩擦学科学及工程应用现状与发展战略研究”2007 年的咨询报告中指出，“我国工业领域应用摩擦学知识可节约潜力估计为 GDP 的 1.55%”。润滑是减少摩擦磨损的最主要途径之一。中国石油润滑油公司是集产、研、销为一

体的专业公司,是润滑油及其添加剂研究开发的国家队,有责任也有能力为中国经济发展中的各种尖端机械和运动设备提供良好润滑。我们不奢望靠一套书能够从根本上改变粗放润滑的局面,但愿尽己之能、有所贡献。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '徐冬' (Xu Dong), written in a cursive style.

2009 年 6 月

本书序

机械设备,与其他系统一样,在其生命期中总会有健康的时候和不健康的时候。当不健康的情况发生时,就不能正常工作,甚至不得不停工维修。更严重的还会伤害人身、破坏设备和环境,酿成严重事故。

不健康情况发生,有很多原因。根据不同来源的统计,大约有 50% ~ 70% 的设备故障,是由于与摩擦学有关的原因。中国工程院 2007 年发表的一个报告指出,2006 年全国消耗在摩擦、磨损和润滑方面的资金估计为 9500 亿元,其中如果正确运用摩擦学知识可以节省的人民币估计可达 3270 元,占国内生产总值 GDP 的 1.55%。这里面还没有包括因此耗费了本来可以节省的能源和资源而导致破坏环境和为恢复环境消耗的资金。因此关于与摩擦学有关的设备健康状况监测,就具有重要的经济意义和社会意义。

不健康的发生,常常有一个过程,而这个过程又不容易察觉。为了能够在严重损坏前就及时维修,避免事故,但是又不要在设备还健康的时候过度维修,增加运行和维修成本,实时知道设备健康状况就成为合理和经济使用设备的关键。长期以来工程师和研究人员为设备健康状况监测技术的发展而孜孜不倦地探索和实践,从而形成了一个范围广泛的技术领域。目前,对于与摩擦学有关的设备健康状况监测,主要依赖三方面的技术:振动分析、温度分析和油液分析,也就是采集系统结构某些部分的振动、测量系统结构某些部分的温度和检验系统所使用油液的成分来进行分析,这三方面技术各有其特点而又相互补充。

振动信号比较容易采集,在系统内部安装振动传感器,将振动信号变换为电信号传递出来并不困难。系统结构从不振动或振动不大到振动或振动较大,反映了系统结构已经发生了某种程度的变化。振动信号的采集和传送技术比较成熟,通常都可以做到自动、实时、连续地进行,对于信号的处理也已经有完善的硬件和软件支持。但是产生振动的原因非常复杂,确切地解释振动信号很不容易,而且一旦发生可以感觉到的异常振动,系统结构损坏已经发生了。温度信号的采集和传送也不难,也可以在需要的地方安装温度传感器并将温度信号变换为电信号传递出来。但是由于热惯性和热传导等原因,温度变化有相当的滞后,而且会很快衰减,温度传感器不可能正好处在发生问题的位置上,所以温度信号对于系统的健康状况经常很不敏感。

凡是由油润滑的设备,润滑油通常在重要的摩擦副之间循环流动,就好像血液在人体各个器官之间流动那样,系统中摩擦学行为的产物,都将或多或少存在于润滑油中。如同血液中含有丰富的关于人的健康状况的信息,润滑油也携带着大量关于设备健康状况的信息。首先,润滑油本身就是系统结构中一个非常重要的元素,通过对润滑油理化性质的分析,就能够知道润滑油的健康状况。其次是对润滑油携带物的分析,因为它们都是摩擦副中摩擦学行为的产物,从中可以直接解读出摩擦副的健康状况,并由此得到整个设备与摩擦学有关的健康状况。与振动和温度这样的单一物理量分析相比,油液分析面对的是摩擦学行为产生的物质,可以从多

个物理和化学的视角去进行分析,得以更及时地检测到健康状况的变化,不必如振动分析和温度分析那样依赖统计特征从单一物理量推算健康状况。当然,全面了解一个设备的健康状况是很复杂的,需要尽可能得到多方面的输出信息,同时观察系统的功能变化、振动变化、温度变化和油液成分变化,更有利于对它的健康状况做出全面和正确的判断。

油液监测目前主要还是依赖离线分析,需要从设备上取样送到实验室,很难自动、实时、连续地获取信号。由于需要对物质进行处理,它对人的素质有更大的依赖,不仅需要技术和经验,还需要科学而严格的管理。从取样、送样、分析前处理、分析仪器的操作、分析结果后处理、结果解读以及到数据的管理等等,任何一个环节不规范,都会导致监测的失败。要做好油液监测,与购置硬件和软件相比,也许组织到合格的人员来进行这项工作更为重要。

人不能生而知之,也不能依靠盲目实践来积累经验。用前人的经验教育新的从业人员是推动油液监测工作开展的当务之急。目前大学教育因为体制原因,不可能安排专业性很强的课程,像油液监测这种科目的学习,需要在从业人员的继续教育和自学中解决。不论是继续教育还是从业人员的自学,好的读物是成功的重要条件。

《油液监测技术》一书与已经出版的同类读物相比,具有两个鲜明的特点:一是作者们在企业一线从事高水平油液监测服务多年,有切身的体会和经验;二是作者们广泛的国际联系,使得书中包含大量国际上在用或认可的标准和规范,这就有助于读者奠定将自己的油液监测工作与国际接轨的基础。作者们在多年的实践中,深感培养人对于做好油液监测工作的重要,将长期积累的经验和从各方面收集的资料集中起来,不辞辛苦、写成此书,对我国油液监测工作的发展和专业教育工作做出了自己的重要贡献。

可以期望,油液监测工作的发展将大大提高我国设备运行的健康状况,减少不健康使用设备导致的事故和损失,从设备健康运行的方面实现节能、降耗和减排,从而促进整个社会提高研究和应用摩擦学科学和技术的积极性,包括推动润滑技术和润滑材料的发展,表面技术和表面材料的发展,摩擦学系统健康状况监测技术和设备健康运行管理的发展,各种摩擦学新理论、新技术的应用和机械设备摩擦学设计的发展。

西安交通大学、上海交通大学教授
中国工程院院士
谢友柏
2009年5月

前 言

油液监测业务作为设备先进维护体制的重要基础,已经有 60 年以上的历史,在中国也有了近 20 年的实践,在由中国制造向中国创造转型的重要历史阶段,它的重要性正日益被认识。作为这样一个实践的结晶,也是进一步实践的指导,编辑出版一本关于油液监测理论与实践的书是业界人士多年的盼望。

本书的编写是一个跨行业合作的实践,是团队合作的结晶。全书按照从历史沿革、理论基础、实践做法、主要装备到具体实例的逻辑顺序安排。其中杨俊杰负责整体大纲的提出,每一个部分的修改和最终讨论定稿;陆思聪教授负责编写了第一章第一节,第二章第一、四两节,第三章第二节和第四章;周亚斌编写了第二章第二、三节和第三章第六节;岳奇贤博士负责编写了第一章第二、三节和第三章第一节;王辉博士编写了第三章第三、四节;刘功德博士编写了第三章第七节;马书杰负责编写了第三章第五节;周洪澍教授对全书进行了通阅,并对润滑与失效、油液监测的实践和案例等部分做了精心修改,程型国、聂刚和魏文羽对书稿的整理和出版承担了不少工作。

这本书的编写终于在我们的直接努力下实现了,这是我们的责任和幸运。在即将出版的时刻,我们首先需要衷心感谢使本书能够诞生的一些关键人物:中国石油润滑油公司的领导团队致力于整个国家润滑水平的提高,大力支持对行业的贡献,正是在他们的亲自安排和过问下,本书才能够快速、顺利地完;中国设备管理协会的赵宝琴女士为本书的创作团队的形成做出了关键的贡献;中国石油大连润滑油研究开发中心王泽恩和翟月奎两任主任、中国石油兰州润滑油研究开发中心张少明和伏喜胜两任主任、西安热工院孟玉婵教授等在本书写作过程中提出了重要的建议;中国石油润滑油公司王玉刚、姚红、姜小娟女士在本书编辑过程中给予了热情的帮助。在此一并表示感谢。

本书的编辑出版是各位编著者多年的构想、一年半集中攻关、多次热烈讨论修改的结果。我们力图做到设备与油品相结合、理论与实际相结合,为广大设备制造商、设备使用维护者和润滑剂生产商提供一本“科学、适用、可读”的工具书。但由于知识、经验所限,难免有不尽如人意、甚至错误之处,恳请广大读者给予批评指正!

杨俊杰
2009 年 3 月

目 录

第一章 油液监测的作用与意义	(1)
第一节 设备的润滑与失效	(1)
第二节 维修体制与油液监测	(14)
第三节 油液监测的发展历程	(20)
第二章 油液监测的基础知识	(23)
第一节 颗粒污染及其控制	(23)
第二节 油品衰变的监测	(40)
第三节 油液监测常用指标及检测方法	(47)
第四节 油液监测的数据解读	(66)
第三章 主要润滑油品监测规范	(93)
第一节 油液监测的实施	(93)
第二节 内燃机润滑油的监测	(97)
第三节 液压油的监测	(112)
第四节 汽轮机油的监测	(121)
第五节 变压器油的监测	(133)
第六节 齿轮油的监测	(143)
第七节 船舶用油的监测	(154)
第四章 油液监测的分析仪器及最新进展	(172)
第一节 元素分析	(172)
第二节 固体颗粒和水污染的测试	(188)
第三节 铁谱	(196)
第四节 红外分析技术	(206)
第五节 多功能一体化分析技术	(227)
附录 油液监测案例	(239)

第一章 油液监测的作用与意义

油液监测是通过对在用润滑剂样品的检测分析,以判断油品和设备所处状态的一门应用技术。它是通过对油品衰变、污染,以及部件磨损等方面的异常征兆进行早期预报,让设备管理者可以适时进行维护和修理,以避免设备的意外失效,延长油品和部件的使用寿命。油液监测主要应用于设备润滑和磨损状态监测(在用油监测),同时也可用于油品生产的质量控制、新油入库验收和储存状态监测。

现代社会对设备运行可靠性的要求越来越高,激烈的竞争要求设备管理者必须以最低的费用来维持设备的可靠运行,状态监测技术为设备的可靠性管理提供了有力的技术支持。同时,国内外的研究表明,超过 70% 的设备失效都与润滑有关,因此设备的良好润滑是设备可靠性管理的重要基础。而无论对于润滑管理还是设备状态监测,油液监测都是其重要的组成部分。

根据条件的不同,油液监测可以采取在线监测(on-line)、现场监测(on-site)和离线监测(off-site)等不同形式;可以由设备使用者、设备制造商或润滑剂生产商发起,通过自己、供应商或者第三方中立机构实施。

第一节 设备的润滑与失效

任何设备运动做功,都要依赖其零部件的相对运动来实现。相对运动的零部件表面之间(或摩擦副)必然会产生摩擦,出现磨损。摩擦导致能量消耗,是决定设备机械效率和能耗的关键因素;磨损导致材料消耗,会使零件原始尺寸发生变化,影响设备精度,乃至发生卡咬、破坏设备正常运转,是限制设备可靠性和寿命的主要因素。

为了减少设备零件表面的摩擦和磨损,提高设备可靠性、延长寿命,最有效的手段是在摩擦副之间加入特定的润滑剂,通过润滑剂在摩擦副之间形成润滑膜,将固体金属表面分开,以实现减摩降磨。为此,研究设备摩擦副之间的润滑状态及其对设备磨损和失效的影响非常重要。

一、设备的润滑状态

根据设备的不同结构及运动方式、润滑油膜的形成原理与摩擦副表面被隔开的程度,润滑状态一般分为边界润滑、混合润滑、弹性流体动力润滑和流体动力润滑几种形式。斯特里贝克(Streibek)以滑动轴承的大量实验数据为基础绘制了著名的斯特里贝克曲线(图 1-1-1)。

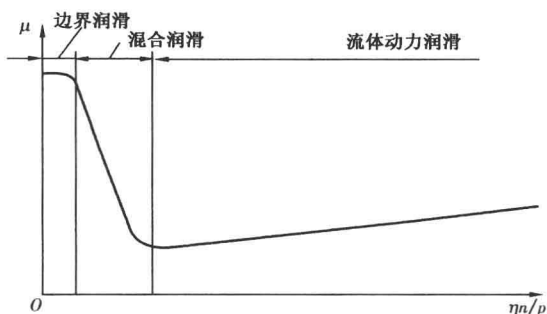


图 1-1-1 斯特里贝克曲线

曲线的纵坐标是摩擦系数 μ ,横坐标为滑动轴承的特性参数 $\eta n/p$ 。 η 是润滑剂的粘度, n 是轴的转速, p 是轴承压力,对该曲线的最好说明,是轴在滑动轴承中的启动过程。图 1-1-2 (a)是静止状态时的轴和轴承。图 1-1-2 (b)是轴从静止状态开始旋转,向 B 点爬行,此时系统还不具备形成承载动力油膜的条件,处于边界润滑状态,摩擦系数较高。图 1-1-2 (c)是随着转速的提高,卷入的润滑油增多,油膜压力迫使轴向左方移动,轴与轴承表面逐渐隔离,摩擦系数急剧下降,系统处于混合润滑状态。图 1-1-2 (d)是轴的转速进一步提高,动力油膜充分形成,轴与轴承表面完全隔开,摩擦力只是油膜分子之间的阻力,摩擦系数降至最低,此时系统处于流体动力润滑状态。此后,转速再增高时,剪切速度增大,摩擦系数又会缓慢上升。

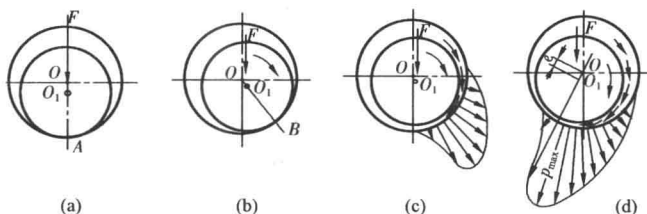


图 1-1-2 轴在滑动轴承中的启动过程

如前所述,斯特里贝克曲线的建立是以滑动轴承为基础的,其横坐标采用滑动轴承特性参数 $\eta n/p$ 是合理的(其意义与 Sommerfield 数 $\eta w/p$ 相同)。但是,对于丰富多样的摩擦副来说,仅用这个参数来表示隔离程度是有局限性的。美国 Hamrock 教授提出,为使斯特里贝克曲线更具普遍性,将横坐标改为油膜厚度与表面粗糙度之比 λ (比膜厚 Specific Film Thickness),于是便有了改进的斯特里贝克曲线(图 1-1-3)。

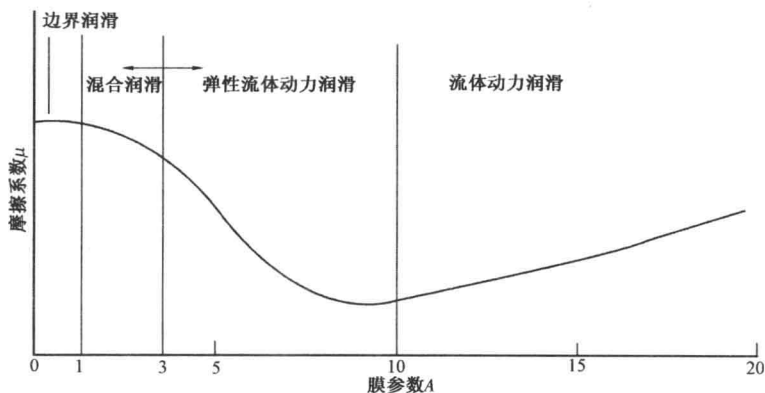


图 1-1-3 改进的斯特里贝克曲线

$$\lambda = \frac{h_{\min}}{\sigma}$$

$$\sigma = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2};$$

式中 $h_{\min}$ ——最小油膜厚度;

σ ——摩擦副表面综合粗糙度;

σ_1 ——摩擦副表面 1 的粗糙度；

σ_2 ——摩擦副表面 2 的粗糙度。

图 1-1-3 中除了横坐标的变动,又增加了一个新的润滑状态“弹性流体动力润滑”,使曲线的含义更加完整。近来又提出一种更新的表示方法,实际上是将上两图合并起来,可以看作是复合的斯特里贝克曲线(图 1-1-4),而将其进行数值化则可表达成表 1-1-1,表中给出了各种润滑状态下典型的油膜厚度 $h_{\min}$ 、比膜厚 λ 和摩擦系数 μ 。

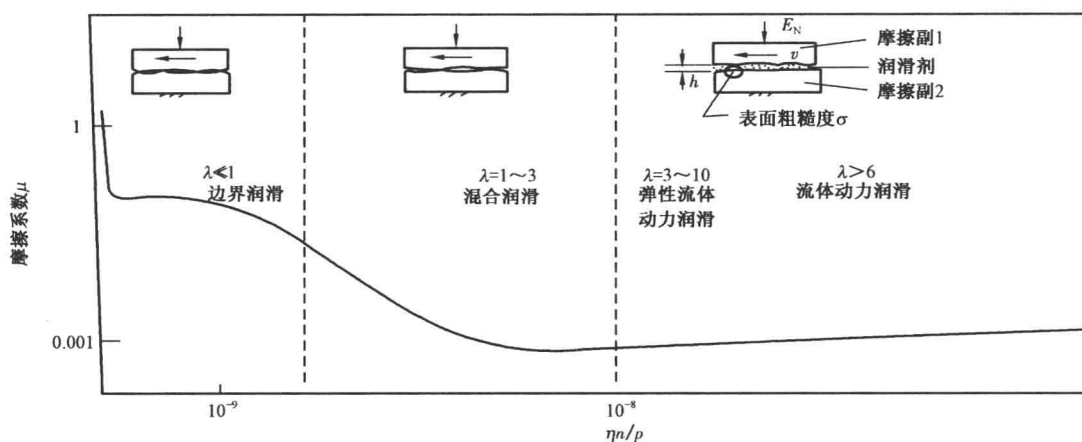


图 1-1-4 复合的斯特里贝克曲线

表 1-1-1 数值化的斯特里贝克曲线

润滑机制	油膜厚度 $h_{\min}$, μm	比膜厚 λ	摩擦系数 μ
边界润滑	0.005 ~ 0.1	< 1	0.03 ~ 1
混合润滑	0.01 ~ 1	1 ~ 3	0.02 ~ 0.15
弹性流体动力润滑	0.01 ~ 10	3 ~ 10	0.01 ~ 0.1
流体动力润滑	1 ~ 100	6 ~ 100	0.001 ~ 0.01

1. 边界润滑

从使用寿命、可靠性、节约能源、降低材料消耗等需求出发,希望能够实现流体动力润滑或者弹性流体动力润滑。但是,有些情况往往不能获得理想的润滑条件,例如:(1)如果设计计算的油膜厚度与表面综合粗糙度的比值小于 5 时;(2)多次重复启动、停机,或者承受过高载荷,冲击载荷时;(3)零件的几何尺寸不当,油的粘度过低、供油中断或者对中太差,而使油膜难以形成时。

当油膜厚度不足以使一对摩擦副完全分开时的润滑状态称为边界润滑。在边界润滑状态下,表面形成的物理沉积膜或化学反应膜常常成为保护接触表面不发生直接接触的最后保障。下列工况构成边界润滑:(1)齿轮在重载低速条件下工作时;(2)发动机的阀系零件,特别是凸轮挺杆;(3)金属切削和成型工艺;(4)摆动运动的滚动轴承;(5)滑动轴承在低速重载下,经常启停或摆动。

在边界润滑状态下,起保护作用的是由物理吸附或化学反应产生的固体薄膜,所以要特别

关注润滑剂中的极压添加剂。在具有边界膜的情况下,滑动只发生在薄膜之间,当薄膜受剪切时不损伤其所覆盖的金属基体。这些膜的生成取决于润滑剂的性质、表面金属的性质和表面温度。

(1) 润滑剂的化学性质:在柔和的滑动和适度的温度条件下,边界膜只是来自摩擦副表面吸附的基础油中的极性分子,例如氮的化合物,或者来自添加剂中的含氮和含氧基团,其有效性取决于分子的链长以及被吸附分子的化学活性。这种吸附是可逆的,当温度升高时,吸附能力和保护作用将会丧失。润滑或减摩性主要是由润滑剂中长链极性有机化合物和表面活性所赋予的,例如脂肪酸和油酸与铁表面反应而生成的皂膜。抗磨特性需要通过加入极性添加剂获得,如 ZDDP 就是最常用的抗磨添加剂,几乎所有的发动机润滑油中都含有 ZDDP,而三甲基磷酸酯(TCP)则常用于合成油。抗胶合添加剂则是在金属表面形成金属盐而起保护作用,例如油中的硫化物与钢表面形成硫化铁薄膜。

(2) 金属表面的化学性质:金属表面的化学活性影响边界膜的形成,铜合金与铁合金或其氧化物很容易吸附油中的极性分子,这种反应实际上是腐蚀性质的。不锈钢、铝合金和贵金属则活性很差,较难形成边界膜。

(3) 表面温度:边界膜的有效性受到吸附物熔点的限制。有机金属反应生成物如硬脂酸盐金属皂的熔点只有 65°C ,而像硫化铁这样的边界膜的熔点则高达 1000°C ,故可防护表面在高温下不发生胶合。当然任何化学反应都随温度升高而加速,而且某些添加剂只有在高温下才会形成保护膜。在边界润滑条件下,磨损是不可避免的,边界膜常常需要不断补充或再生才能持续起作用。

2. 流体动力润滑

两个相互运动的表面之间可完全被润滑油膜分开而不直接接触的润滑状态称为流体动力润滑,在这种润滑条件下起关键作用的是润滑剂的粘度。以滑动轴承为例,其基本方程为雷诺方程(图 1-1-5):

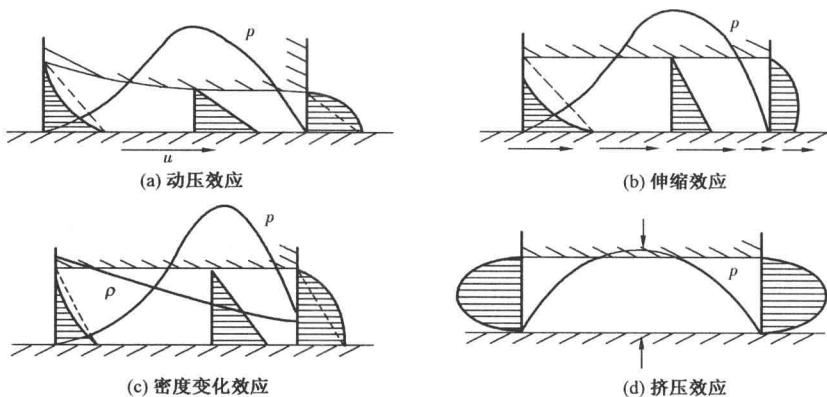


图 1-1-5 油膜形成机理

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho}{\eta} h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho}{\eta} h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6 \left[\frac{\partial}{\partial x} (u \rho h) + \frac{\partial}{\partial y} (v \rho h) + 2\rho (w_h - w_0) \right]$$

式中 $u\rho\frac{\partial h}{\partial x}, v\rho\frac{\partial h}{\partial y}$ ——动压效应, 轴承形状沿 x, y 的变化而产生;

$\rho h\frac{\partial u}{\partial x}, \rho h\frac{\partial v}{\partial y}$ ——伸缩效应, 速度沿 x, y 的变化而产生;

$uh\frac{\partial \rho}{\partial x}, vh\frac{\partial \rho}{\partial y}$ ——密度变化效应, 密度沿 x, y 的变化而产生;

$\rho\frac{\partial h}{\partial t}$ ——挤压效应, 膜厚随时间变化而产生。

实际上, 在静载时主要依靠的是动压效应产生的油膜, 在动载时依靠的是动压效应和挤压效应产生的油膜, 平行间隙时应考虑密度变化效应产生的油膜。

流体动力润滑一般使用寿命较长, 适形性和贴合性好, 单向受载时不发生疲劳失效, 但会发生正常磨损, 而在油膜破裂点则会发生空蚀磨损, 多向变载(如曲轴、连杆轴瓦)时会有疲劳失效。其承受温度的高限和低限取决于润滑剂, 一般适用于 $40\text{ }^{\circ}\text{F}$ (4.4°C) 到 $300\text{ }^{\circ}\text{F}$ (116.7°C), 膜厚范围 $1\mu\text{m}$ 到 $100\mu\text{m}$, 不适宜于超低速和超高速的工况。

小型流体动力润滑轴承占空间很小, 压力供油时需要泵、滤清器、油箱等附属设备。为了有良好的承载能力, 所用材料应有足够的硬度和抗腐蚀性, 典型材料有铜、锡、铅、石墨纤维、聚四氟乙烯等及其组合。流体动力润滑需要的维护费用较低, 但在润滑剂使用不当、污染以及监测工作不到位的情况下需要进行置换。进一步提高的方向是改进润滑系统设计、正确选择润滑剂并改良润滑剂配方、选用最新的轴承材料及镀膜技术等。

流体动力润滑轴承的工作界限主要受到油膜厚度、界限温度、油液氧化以及油膜震荡等因素影响。低速时使用的界限值由油膜厚度决定, 高速轻载时由油膜震荡决定, 高速重载时由界限温度和氧化界限决定。

油膜厚度: 一般认为只有在比膜厚 $\lambda > 3$ 时, 才有足够的承载能力形成流体动力润滑, 而速度越高, 承载能力越高。

界限温度: 界限温度主要受制于轴承材料的熔点, 如锡基材料约 230°C , 巴氏合金 130°C , 高锡铝 $150\sim 160^{\circ}\text{C}$, 铜铅合金高于 200°C 。为了确保最高温度不超过界限, 通过降低润滑油入口温度, 可以起到降低最高温度 50% 的作用, 即入口温度降低 10°C , 最高温度可降低 5°C 。

油液氧化: 温度升高, 油液氧化会加速。虽然一般油箱出口温度控制在 $75\sim 80^{\circ}\text{C}$, 并可调节, 但材料所受实际温度要高得多, 而且较难控制。

油膜震荡: 设备在高速轻载时, 会出现一种自激现象, 即轴的中心绕轴承中心以约轴速 50% 的速度运动, 可能会发生摩擦副表面的直接接触。如果震荡时间过长, 会引起轴承材料的疲劳损伤, 同时还会出现明显的振动。解决的方法是在轴承上开槽、适当降低油的粘度等。

3. 弹性流体动力润滑

对于理论上的点接触和线接触的摩擦副润滑机理的研究直到 20 世纪 70 年代才逐渐成熟。这类摩擦副在承受载荷之后, 表面材料产生局部弹性变形而形成接触面, 由于接触面非常小, 因而接触应力非常高(常常达到和超过 1000MPa)。在此高压下有两个问题需要认真考虑: 一是在计算雷诺方程时, 关于接触表面是刚性物体的假设不适用了, 膜厚计算中必须考虑弹性变形的影响; 二是油液的粘度也会随压力的升高而以几何级数增高。解决的方法是联合求解高度非线性雷诺方程和弹性方程, 其典型的结果如图 1-1-6 所示。

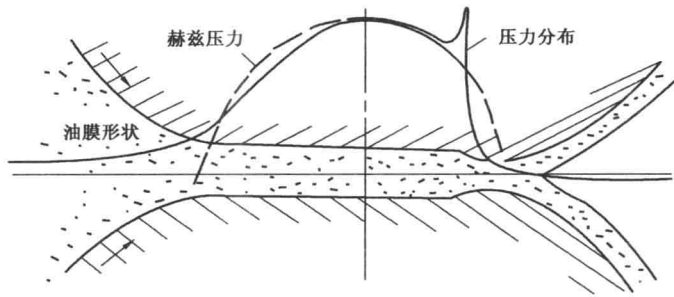


图 1-1-6 弹性流体动力润滑

压力分布基本上与赫兹压力相似,但在入口区有一段逐渐上升的过程,而在出口处则会有突然的升高,形成所谓“二次峰值”,这个压力峰值的大小和位置将改变赫兹压力的分布,从而影响裂纹的形成与扩展。油膜特点为出口处的显著收缩形成最小油膜厚度 $h_{\min}$,是影响摩擦和磨损的重要指标之一。

研究证明:弹性流体动力润滑不仅发生在滚动轴承、齿轮传动、凸轮挺杆、活塞环缸套、牵引传动之中,而且也存在于极易变形的材料接触之中,例如橡胶密封、轮胎与地面等,甚至还存在于血细胞在毛细血管的流动和体液润滑之中。

弹性流体动力润滑理论的建立不仅为许多摩擦副的润滑机理奠定了基础,而且使我们对整个润滑状态的分域有了更完整的认识,在这种润滑模式下,需要特别关注润滑剂的粘压特性。现在,我们可以更好地理解斯特里贝克曲线的走向 $f = T/F$, T 是切向摩擦力, F 是法向正压力。

根据计算,流体动力润滑时, $F \propto 1/h^2$ 。即正压力与膜厚的平方成反比,而弹性流体动力润滑时正压力与膜厚几乎无关,方程式为: $h_{\min} = 3.65 U^{0.68} G^{0.49} W^{-0.073} (1 - e^{-0.68K})$,其中膜厚只与载荷 W 的 -0.073 次幂成正比。

于是 $(f)_{HL} \propto \frac{1/h}{1/h^2} \propto h$, $(f)_{EHL} \propto \frac{1/h}{\text{常数}} \propto 1/h$,即流体动力润滑时摩擦系数与膜厚成正比,而弹性流体动力润滑时摩擦系数与膜厚成反比。

从弹性流体动力润滑的膜厚公式中可以看出,决定 $h_{\min}$ 的两个重要参数是 U 和 G , U 是速度参量, G 是材料参量,通过控制 U 和 G 便可控制 $h_{\min}$ 。

$$U = \frac{\eta u}{ER}$$

$$G = \alpha E$$

$$\mu = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2}$$

$$E = \left(\frac{1 - V_1^2}{E_1} + \frac{1 + V_2^2}{E_2} \right)^{-1}$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

式中 η ——流体的粘度;
 u ——平均速度;
 u_1, u_2 ——表面 1, 2 的速度;
 E ——综合弹性模量;
 E_1, E_2 ——固体 1, 2 的弹性模量;
 V_1, V_2 ——固体 1, 2 的泊松系数;
 R ——综合曲率半径;
 α ——压粘系数。

二、机械设备的磨损与失效

用油润滑的机件的承载表面受到足够大的损伤从而导致机器丧失功能的现象称为失效。如果机件的制作、搬运、安装和润滑都受到良好的控制,那么它就很少会在其预期寿命期间发生与润滑有关的失效,它会顺利通过磨合磨损与稳定磨损两个阶段而进入老年期,最终发生剧烈磨损而失效。如果机件由于制造不良(材质不当或工艺不精)、搬运野蛮(摔落)、安装不达标(对中不好或者不平衡)以及润滑失当(加错油,油品污染),则机件就会直接进入剧烈磨损,这是在运行中不希望发生的,也是不正常的现象,所以又常称为异常磨损。

设备在所有工作机制中的润滑很少是完美无缺的,而摩擦副表面相互接触,从而产生磨损金属屑并被油料带走,实际上磨损曲线的正常阶段并不是平直的。它会由于使用中的磨损而增长,也会由于补油而降低并形成若干循环。磨损金属的这种有起有落的模式会持续下去直到发生下列情况:(1)实施换油——正常磨损将重新开始;(2)机件磨损失效——更换机件;(3)出现异常磨损——润滑剂中磨损金属浓度急剧增加。

通过磨损趋势的分析来确定机器摩擦副表面磨损的基线是正常增长还是异常增长,这是在用油分析的一个重要功能,了解不同磨损阶段的差异对于正确解读数据非常重要。

1. 磨合磨损(Break-in Wear)

即使是精心制作的零件表面,在高倍显微镜下仍可看出是凹凸不平的,因此在新零件投入使用的初期阶段,常会有一段快速磨损的时期。在此期间偶合表面通过摩擦和抛光相互适应,且形成所谓“剪切混合层”,这是一层光滑、延展性良好的低抗磨性薄层。从开始工作到完成磨合称为磨合期。磨合产生的碎屑往往在第一次换油和更换滤清器时即被清除。

磨合过程可以很容易地用油液分析方法进行观察,图 1-1-7 便是用扫描电镜观察到的磨合期颗粒图像。磨合期间

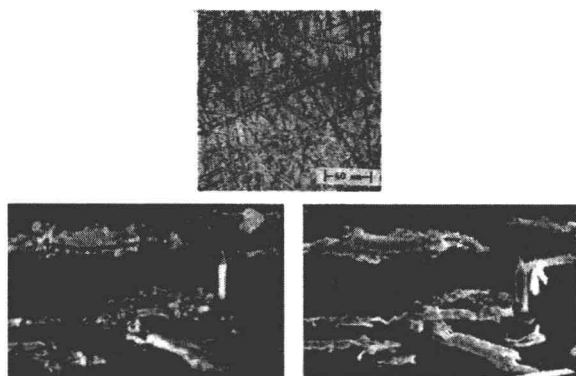


图 1-1-7 磨合期的扫描电镜图

与异常磨损时十分相似,磨损金属浓度急剧增加,在数据解读时不可将两者混淆,这就要求缩短取样间隔,以便清楚地辨明其发展趋势。油料分析人员必须了解设备所处的运转状态,避免