



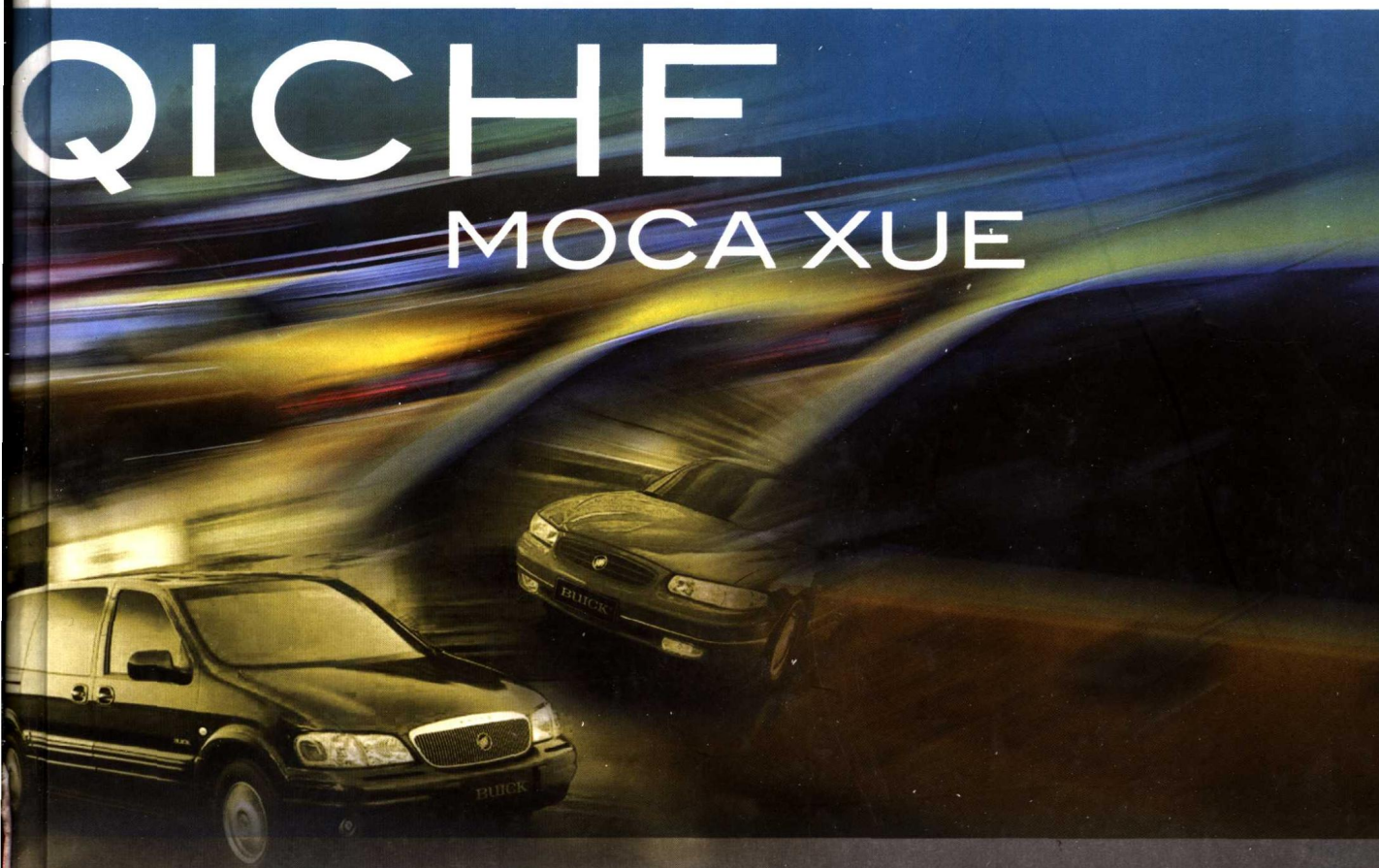
国家“十五”重点图书

现代汽车高新技术丛书

王成焘 姚振强 陈 铭 著

汽车摩擦学

QICHE
MOCA XUE



上海交通大学出版社

国家“十五”重点图书
现代汽车高新技术丛书

汽车摩擦学

王成焘 姚振强 陈 铭 著

上海交通大学出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

汽车摩擦学 / 王成焘, 姚振强, 陈铭著. —上海: 上海交通大学出版社, 2002
(现代汽车高新技术丛书)
ISBN 7-313-03296-X

I. 汽... II. ①王... ②姚... ③陈... III. 汽车—摩擦 IV. U461

中国版本图书馆CIP数据核字 (2002) 第107854号
本书出版由上海科技专著出版资金资助

汽车摩擦学

王成焘 姚振强 陈铭 著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 张天蔚

常熟市文化印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 31 字数: 708 千字

2002 年 12 月第 1 版 2002 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1—3 050

ISBN 7-313-03296-X/U · 108 定价: 42.00 元

版权所有 侵权必究

内 容 简 介

现代汽车中存在大量的摩擦副,如缸套与活塞、活塞环,轴与轴承,凸轮、摇臂和挺杆,气阀与阀座,摩擦离合器,制动器以及轮胎与路面等。它们都是汽车中的关键零部件,其工作好坏将影响到汽车整体的性能、效率、可靠性和使用寿命。目前这些零部件的摩擦学设计已形成了较完整的基础理论与方法体系,成为汽车整体和零部件自主开发中必不可少的知识和手段,并逐渐形成摩擦学中一个重要的领域——汽车摩擦学。本书第1、第2章以十分简要的形式阐明了摩擦学的基础知识,作为全书的基础;第3章介绍了汽车中润滑系统及润滑材料;第4~9章分别阐述了六种主要摩擦副的设计理论与方法。第10章阐述了汽车摩擦学系统故障诊断有关知识。本书可供从事汽车设计与开发的工程技术人员和研究人员使用,同时也是高等学校相关专业教师与研究生的一本系统参考用书。

出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪,科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。

为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略,上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”,资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

推動科技出版事業
提高學術研究水平

為「上海科技書著出版資金」題

徐匡迪

二〇〇〇年十月十一日

序

汽车是应用得最多的机械系统之一,也是各部分之间相对运动种类最多、运动最为复杂的机械系统之一。摩擦学是研究相对运动、相互作用表面和表面间行为的科学、技术以及相关的实践。因此,汽车中的摩擦学行为,也是种类最多、最为复杂的。几乎各种摩擦、磨损和润滑的形式,在汽车中都可以找到。针对汽车各个部分的摩擦学技术,也是研究得最多,发展得最快的。很多在设计、制造和汽车使用中采用的与摩擦学有关的技术都是同一领域里最前沿的。这是由于汽车的生产量和使用量非常之大,如果每辆车能通过摩擦学技术节省 1% 的燃料,节省 1% 的材料,对于全世界来说,按汽车保有量 2 亿辆,年产量 5 000 万辆计,就是每年节省约 5 亿吨燃料和节省 7 500 万吨材料的规模。在汽车全生命周期中,对于环境的影响如此之大,在经济发达地区已经成为环保的首要课题,所以节省燃料、节省材料已经不是一个简单的经济问题。而且制动器、轮胎路面和车身结构特别是动力系统摩擦学行为对于汽车运行的安全性、操纵性和舒适性,即汽车的性能有决定性的影响。遗憾的是,由于摩擦学行为的系统依赖性(摩擦学第一公理),汽车中的摩擦学行为强烈地具有汽车系统的特征,目前还不能一般地采用其他目标系统的数据来解决汽车中的摩擦学问题。但是,现在能够找到的摩擦学知识,要么是根本没有考虑系统依赖性问题,完全不提适用于(或来自)哪一种系统;要么是把适用于(或来自)汽车的摩擦学知识片段与适用于(或来自)其他系统的摩擦学知识片段杂乱地放在一起,在要用的时候,不得不查阅许多资料。而且来自不同资料的汽车摩擦学知识片段,难免有不一致的地方,对于不太熟悉摩擦学的人,很不方便。所以将与汽车有关的摩擦学知识集中起来,让从事汽车研究、设计、制造和使用的人,能对汽车当中的摩擦学行为有一个深入、系统的了解,是十分重要的命题。如前所说,既然摩擦学对于汽车是如此之重要,这样的整合,对于提高汽车的研究、设计、制造和使用水平,将会有很大的意义。对于在汽车制造中节约能源、节约材料和保护环境也会做出很大贡献。

王成焘教授和他的同事们的这一本书,就肩负着这样一个使命。王教授长期从事与汽车有关的摩擦学的研究和教学工作,指导过许多这方面的研究生,积累了丰富的素材。书中许多章节都是在他们的学位论文基础上进一步加工而成的。书中不仅有理论,更介绍了许多经过实践考验的数据、计算方法和试验方法。与已经存在的一些专题学术会议论文集相比,书更具有由浅入深的系统性和对问题描述的完整性,更适合于学习和参考。相信这本书的出版,将能在满足上述需求方面,前进一大步。

谢友柏

2002 年 12 月 16 日

谢友柏,教授、中国工程院院士。现任西安交通大学教授,博士生导师。兼任清华大学摩擦学国家重点实验室学术委员会主任,国务院学位委员会学科评议组成员,国家教委面向 21 世纪教改顾问组成员,机械工业部机械科学研究院 AMTRC 现代设计技术首席专家及上海交通大学等多所大学教授,以及机械工程学报、中国机械工程、摩擦学学报、英 Proc IMechE (Part J) Journal of Engineering Tribology 等的编委。曾任中国机械工程学会摩擦学学会理事长。

前言

摩擦学中虽然还没有正式形成汽车摩擦学这一分支,但是,汽车的研发大量用到摩擦学知识。在汽车的总体性能及其安全性、可靠性、舒适性各方面的设计分析中,摩擦学起到了重要的作用。可以这样说,在现代汽车中,汇集了当今摩擦学最新、最深的理论和技术,汽车是摩擦学重要的应用领域之一。

中国汽车工业,无论是整车还是零部件领域,被普遍认为还缺少自主开发能力。这种能力是建筑在大量的研发人员,在大量的相关领域,进行了大量的研究工作基础之上的;是建筑在对大量知识高度整合基础之上的;是建筑在理论与大量的实践相结合基础之上的。一些著名的企业,无论是通用、福特这样的整车制造商,还是德尔福这样的零部件供应商,凭借自身的财力和悠久的历史,实现了这种知识与经验的获取与整合过程,从而具备了强大的创新与开发能力。我们要形成自主开发能力,这一过程是绕不过去的。

我作为 20 世纪下半叶在中国这块土地上成长与奋斗了一生的知识分子,有幸自 1975 年始,和我的同事们一起,陆续从国家或企业获得一个又一个汽车摩擦学的研究课题,从青年时代自己动手做,到培养一批又一批硕士生、博士生,总感到这一群体也积累了属于自己的一些知识,有必要将其整合,为加强中国汽车工业自主开发能力作一份贡献,这就是我组织自己的学生——已毕业和未毕业的,共同撰写这部著作的初衷。

全书第 1 章、第 2 章由我本人撰写,把汽车摩擦学中中共性问题集中到一起论述,使读者对于随后各章中遇到的共性知识能在书中找到出处,同时,也对汽车摩擦学中没有在本书专列的内容有所交代。第 3 章与第 10 章由陈铭博士撰写,他在攻读博士期间,承接了车用润滑油与汽车油液分析方面的多项课题,毕业后继续留校从事这一领域的研究与开发工作。第 4 章由于旭东博士、王政博士和杨俊伟博士撰写,前两位已作为博士后分别在上海交通大学和瑞典的大学从事同一领域研究工作,杨俊伟则在奇瑞汽车公司从事发动机开发工作。第 5 章由刘春慧博士撰写,这是我们自 1975 年起长期从事的课题,她的师兄倪学海在内燃机轴承疲劳磨损课题研究方面为后者打下了一定的工作基础,后来师从美国西北大学郑绪云教授,取得同一领域的博士学位,现任职于美国 Ford 公司研发部门。刘春慧在硕士和博士学习期间一直在做这方面的研究,并借此机会,和我一起对过去的工作共同进行了一次总结。第 6 章配气机构由我的同事浦耿强博士和机构学研究所郭为忠博士合写,前者在东风汽车集团工作期间专攻凸轮机构设计,后者在博士期间在动载弹性流体动力润滑膜对高速配气机构动力学性能影响方面进行了研究。第 7 章汽车轮毂轴承由姚振强教授和张雪萍博士合写,在此之前,前工学硕士余亚波分析了逾千套失效轮毂轴承,为后续理论分析打好了基础。姚振强教授早在 1987 年就作为我的硕士生,开始从事国家七五重点项目——铁路轴承的最佳游隙研究,从英国 Warik 大学联合培养回国后,继续从事摩擦学研究,现已为博士生导师。第 8 章由高雪官副教授撰写,他是上海交通大学 20 世纪 80 年代培养的摩擦学研究生,毕业后留校工作至今,从事机械设计与摩擦学领域研究,汽车制动器是他近几年结合上海汽车工业的需要,重点研究的内容之一。第 9 章由原上海交通大学摩擦学硕士,现同济大学王野平教授在我校学习进修期间所写,他的

工作帮助我们开辟了汽车摩擦学新的研究方向。全书的取材与结构由我选定,并和作者一起,对各章稿件进行了反复讨论与修改,即使如此,全书仍会存在各种缺点,恳请同行和朋友们给予批评、指正。

这里应该对原中国摩擦学学会理事长、西安交通大学与上海交通大学双职教授谢友柏院士表示感谢,他和我联合指导了,并正在指导着缸套-活塞摩擦学方向的几位博士生,并把他和刘昆博士前期很多研究成果提供给这一课题使用。还应感谢上海大学陶德华教授,作为上海交通大学兼职教授,他和我联合指导了陈铭博士,并帮助我们开展了润滑材料的研究。这里还应感谢原上海活塞厂厂长徐景雍教授、上海大学张直明教授,他们为我们许多研究生的开题和答辩付出了辛勤的劳动。最后还应感谢我的同事李柱国教授和程先华教授,很多研究生的培养都是和我们之间的各种合作分不开的。必须指出的是,我们的大量工作都是在原机械工业部有关基金、上海汽车基金和 Ford 专项基金资助下进行的,在此我们一并表示衷心的感谢!

王成焘

2002 年 10 月 28 日

王成焘

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 摩擦学的起源	1
1.2 摩擦学的作用和意义	2
1.3 汽车中的摩擦学问题	4
第 2 章 基本原理与方法	8
2.1 固体材料的组织结构	8
2.2 摩擦表面	14
2.3 摩擦与减摩技术	28
2.4 磨损与抗磨技术	49
2.5 流体动力润滑	67
2.6 弹性流体动力润滑	81
2.7 滚动轴承与滑动轴承	84
参考文献	99
第 3 章 汽车润滑系统与润滑材料	101
3.1 汽车润滑系统	101
3.2 车用润滑油基础油	103
3.3 车用润滑油添加剂	105
3.4 汽车内燃机油	127
3.5 汽车齿轮油	156
3.6 汽车自动传动液	161
3.7 汽车用润滑脂	167
3.8 汽车空调器油	171
参考文献	176
第 4 章 缸套-活塞-活塞环系统	178
4.1 概述	178
4.2 缸套-活塞-活塞环系统摩擦学结构设计	178
4.3 缸套-活塞环摩擦学计算	196
4.4 活塞裙部的摩擦学计算	203
4.5 活塞的力、热变形及裙部型面修正	214
4.6 缸套-活塞-活塞环系统的试验研究	215

参考文献	223
第5章 主轴承与连杆轴承	224
5.1 概述	224
5.2 主轴承与连杆轴承的摩擦学结构设计	233
5.3 动载滑动轴承的轴心轨迹及润滑计算	238
5.4 动载滑动轴承合金层应力计算	258
5.5 轴承合金的疲劳性能测定及强度分析	264
5.6 合金层疲劳裂纹的萌生及扩展	272
5.7 发动机轴承摩擦学设计典型实例	284
5.8 汽车发动机轴承非正常失效与对策	291
参考文献	296
第6章 配气机构中的摩擦学问题	301
6.1 概述	301
6.2 凸轮机构的摩擦学设计概述	302
6.3 高速凸轮机构的动力学分析	304
6.4 配气机构的接触应力	310
6.5 凸轮与摇臂的润滑分析	313
6.6 气门及气门座	322
参考文献	324
第7章 轮毂轴承	326
7.1 概述	326
7.2 轮毂轴承载荷谱测试与分析	334
7.3 轮毂轴承滚动体载荷分布	341
7.4 轮毂轴承的最佳游隙	349
7.5 轮毂轴承的失效分析	354
参考文献	365
第8章 汽车制动器摩擦学	367
8.1 概述	367
8.2 制动器结构与工作原理	368
8.3 对摩擦材料的技术要求	369
8.4 摩擦材料的配方与生产	369
8.5 摩擦磨损性能试验	372
8.6 异常磨损失效的机理分析	374
8.7 摩擦表面工作温度的计算机辅助分析与计算	386
8.8 摩擦材料的验收标准	393

参考文献.....	399
第 9 章 轮胎-路面系统摩擦学	400
9.1 概述	400
9.2 轮胎与路面间摩擦产生的机理	406
9.3 影响轮胎与路面间摩擦的主要因素	407
9.4 轮胎磨损机理	410
9.5 轮胎磨损的影响因素	411
9.6 轮胎滚动阻力的计算	417
9.7 轮胎温度的预测	418
参考文献.....	423
第 10 章 车用润滑油油液分析与发动机状态监测	424
10.1 概述.....	424
10.2 在用内燃机油油质分析技术.....	429
10.3 车用发动机磨损状态监测技术.....	437
10.4 野外行车中的发动机摩擦学状态监测.....	440
参考文献.....	444

第 1 章 绪 论

1.1 摩擦学的起源

远在太古时代,人类就已经意识到摩擦、磨损和润滑这些现象的存在。先人就曾利用摩擦发热现象,钻木取火。图 1.1 为古埃及的一幅壁画,描绘了当时奴隶搬运巨大石像与石块建造金字塔的场景,图中有人不断在往滑橇前方浇灌泥浆,这大概是人类有记载的最早一位润滑工程师,也是古人类在运输工具中运用摩擦学原理的典范。据考古研究,中国约在公元前 2600 年就有车的出现(《古史考》),车轮是人类历史上最重要的发明之一,说明人类当时已认识到滚动摩擦低于滑动摩擦,并加以利用。不仅如此,在《诗经》“邶风·泉水”篇有“载脂载辇,还车言迈”的诗句,意思是在车的轴承部位涂上动物的脂肪,车的行驶就会轻快。

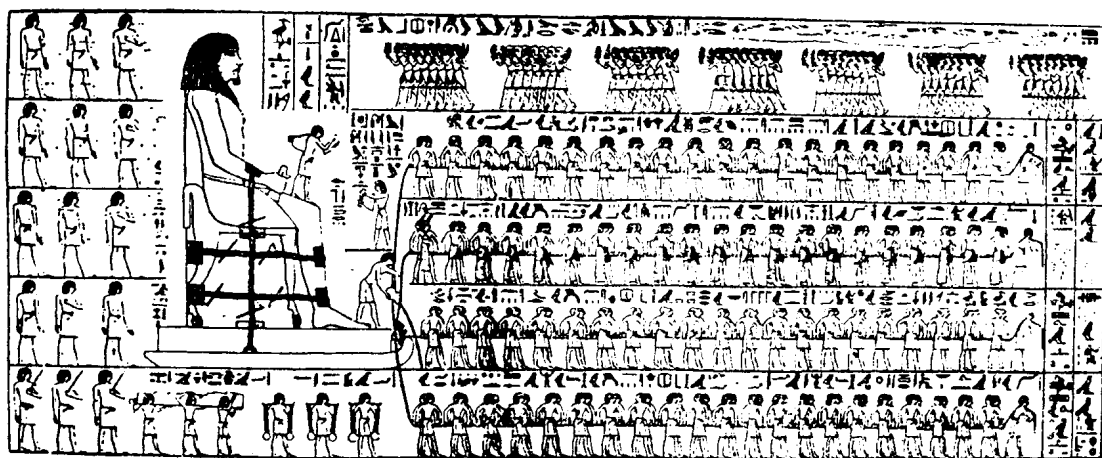


图 1.1 公元前 1900 年搬运一台埃及巨像的情况

人类对摩擦、磨损与润滑现象从科学上加以认识,最早应属利奥纳德·达·芬奇(Leonardo da Vinci, 1452~1519),他在 15 世纪中叶就已发现摩擦力与载荷成正比,并根据自己的实验得出,摩擦力的大小为载荷的 $1/4$,即摩擦系数 $f=0.25$ 。1967 年在马德里发现了他的一部手稿,其中介绍了他在滑动轴承磨损方面的研究。他发现:磨损随载荷的增大而加剧;磨损方向不一定是铅垂方向,而是沿着载荷的主向量方向。为了减少磨损,他研制了一种含 30%铜和 70%锡的轴承合金。

对摩擦的系统研究是由法国的阿蒙顿(1699)和库伦(1785)完成的。两人的实验都表明,摩擦力 F_f 和法向载荷 F_n 成正比,他们把这一比值称为摩擦系数 f ,即 $f=F_f/F_n$ 。实验还表明,摩擦力 F_f 仅取决于配对表面的材料与性质,与接触面积大小无关。这些结论虽然现在已被证明是有条件的,但长期以来,一直作为摩擦定律,在物理与力学中被广泛应用。

人们早期认为摩擦起源于相互贴合表面微凸体间的机械互嵌作用。对摩擦现象从机理上加以研究,并取得初步成功是在 1940 年前后。在互嵌学说启蒙性认识的基础上,Bowden 与 Tabor 发现了微凸体间的粘着现象,以及表观几何接触面积与真实接触面积之间的差异。他们的研究成果系统地解释了阿蒙顿与库伦的关于摩擦的经验法则。今天,有关摩擦的机理已与各种润滑机理、表面物理与材料科学融为一体,进一步被深入研究,以期实现人类主动设计与控制摩擦的目标。

对磨损的研究真正入门,同样应归结到人类发现表观接触与真实接触的差异之后。R. holm(1938), M. E. Merchant(1940), E. P. Bowdon 和 D. Taber(1942)先后对真实接触面积及微凸体的粘着机理进行了深入的研究。特别是 Taber 所发表的大量论文,为磨损研究奠定了基础。在粘着表面能对磨损碎片分离作用方面,美国麻省理工学院(MIT)的 E. Rabinowice 做了大量工作。前苏联的 И. В. Крагельский 在摩擦的分子-机械理论,磨损的疲劳理论以及摩擦副表面材料选择性转移等方面做出了重要贡献。由美国国家航空与航天局(NASA) R. L. Johnson 和荷兰 G. Salomon 先后任主席的欧洲经济合作发展组织工程材料磨损国际研究小组,致力于开展“把材料的磨损和寿命研究反映到工业界”的工作,取得了重要的成就。但是由于磨损类型的多样性,磨损过程的综合性、时变性、随机性,使得磨损问题的研究变得十分复杂,至今还没有达到“从必然王国进入自由王国”的境地。现阶段,人们正利用先进的测试手段与表面分析工具,以及表面科学理论知识,从磨损机理及其工业应用(特别是抗磨技术)两方面开展研究,以期实现人类主动控制磨损的目标。

与磨损相比,润滑的研究比较成熟,1883 年英国蒸汽机车工程师 B. Tower 发现流体动压润滑现象后,1886 年 O. Reynolds 根据流体力学基本理论,提出了著名的雷诺方程,随后一百多年的流体动力润滑理论与轴承技术的研究都是以求解雷诺方程为基础展开的,成为理论解决工程问题的成功典范。20 世纪 50 年代人们发现在滚动轴承、凸轮、齿轮工作表面接触区存在一种极高压力状态下的油膜,通过 Грубин(1949), D. Dowson(1959), G. R. Higginson(1959), 美籍中国学者 H. S. Cheng(1977)等人的工作使之成为直接应用于工程设计的理论与方法,建立了弹性流体动力润滑理论。此外,在边界润滑理论、固体膜润滑理论与技术、润滑材料,润滑装置的研究方面也取得了广泛的成果。

但是,长期以来摩擦、磨损与润滑分散在三个孤立的领域内被研究,直到 1966 年,英国的 Jost 博士受工业大臣的委托,成立了一个工作组,进行了大量的调查分析,在著名的 Jost 报告中方才提出,这三者应该合成为一个有机的整体,于是形成了一门新的学科——摩擦学,牛津大学辞典部为其确定了专门的英文术语,即 Tribology。

摩擦学被定义为“研究彼此作相对运动的相互作用表面及有关理论和实践的科学技术”。它是一门跨众多传统学科的交叉学科,包括物理、化学、力学、热力学和材料科学,并涉及机械工程的广泛领域,如航空、航天、船舶与海洋工程、铁路、动力机械制造等,当然也包括本书将展开阐述的领域——汽车。

1.2 摩擦学的作用和意义

在机械中,许多零件之间存在着相对运动,各运动副之间的摩擦、磨损和润滑,对机械的功能、效率、可靠性和寿命等性能有着直接的影响。

机械零部件中的摩擦会导致能量的严重损失。据统计,全世界工业部门所用的能源约 $1/3 \sim 1/2$ 消耗于机件间的摩擦。汽车发动机因摩擦而损失约30%的功率,其中,缸套-活塞-活塞环之间的摩擦损失,约占总摩擦损失的40%以上。

磨损给人类所使用的机械设备带来的损失更大,约为摩擦损失的12倍。据统计,在失效机械零件中约80%是由磨损造成的。机械设备磨损给工业国带来的经济损失可达国民生产总值的2%~8%。据美国1997年统计,机械设备磨损造成的损失为国民经济总产值的12%,约2000亿美元。在行星齿轮箱中,体积破坏类仅占10%,主要失效类型为表面磨损。农机设备中约40%的零件是按磨损状况进行更换的。英国每年需用2000万把硬质合金切削刀具,价值约5000万英镑,主要也是因刀具磨损而报废造成的。在我国铁路部门,因列车通过曲线段造成轮轨超常磨损,每年曲线区间换轨量约2520 km,耗费约超过10亿元人民币。

Jost在他的调查报告中指出:如果在设计中很好地运用摩擦学知识改善机械设备的摩擦磨损状态,可使英国每年节约5亿多英镑,相当于当时英国国民生产总值的1%。继Jost之后,世界上许多国家相继都对本国因摩擦学问题而造成机械设备报废的情况进行了调查研究。1981年,英国的进一步估计表明,在消耗全国能源87%的部门中,如能有效地应用摩擦学知识,每年可以节约能耗价值达4.68~7.00亿英镑。美国机械工程师学会1978年估计,在美国的交通运输、发电、涡轮机和加工业等四个主要产业部门中,由于在摩擦学理论和应用的研究方面投资了2400万美元,每年约可节约能源消耗为原来能源消耗的11%,取得相当于160亿美元的收效。因此1984年至1990年,美国商品生产和服务的增长并没有引起能源消耗的增加。原联邦德国科技部门调查表明,每年因机械设备的摩擦磨损所造成的损失约100亿马克,若积极运用摩擦学知识可以避免50%的损失,即节约50亿马克。日本在1974年因注意和改善一些机械设备的摩擦磨损问题而节约了2.7亿美元,而近来的资料进一步表明每年可节约100亿美元。最近十年工业发达国家的能源消耗减少了三分之一,汽车发动机的寿命较20世纪70年代提高了3倍,其中摩擦学理论的实际应用起了重要的作用。

1997年Jost访华时,他按我国到20世纪末钢铁工业年产8000万吨估计,只要运用摩擦学知识每年可节约2~3亿英镑。1981年,我国对冶金矿山、采煤、发电站、建材及农业机械五个工业部门进行了估算,磨损件造成的钢铁消耗达95万吨,约19亿元。据大庆油田的统计,由于自80年代初开始加强了企业机械设备的润滑管理,延长了设备的使用寿命,减少了维修费用,至1989年已取得1.34亿元的节约效益。据中国摩擦学学会推测计算,通过摩擦学知识的应用,到2000年,我国每年可节约400亿元。

摩擦与磨损不仅造成惊人的经济损失,而且严重影响机械设备的性能与可靠性。在50年代,由于人们不了解发生在高速滑动轴承中的油膜振荡这一摩擦学现象,在日本曾经发生大型汽轮发电机组因轴承油膜振荡引起整个机组爆炸的重大事故。在我国,200 MW和300 MW汽轮发电机组在研制初期也曾因轴承失稳而不能正常运转。国产隧洞联合掘进机,由于刀具耐磨性差,每次装刀后只能掘进几十米,甚至几米就必须更换刀具,严重影响设备性能的发挥,而国外同类产品可掘进1 km。我国为了开发西部油田,专门研制了沙漠用汽车,其中重点工作之一就是进行系统的摩擦学设计,提高机件的密封与抗磨性能,保证汽车在沙漠运行中的可靠性。精密机床和精密仪器的导轨因摩擦产生爬行现象,也是通过现代一流的摩擦学设计予以解决的。

一般来说,通过摩擦学的运用有可能解决如下几方面问题:

- ① 能量方面:减小摩擦,提高机械效率,降低能源消耗及使用成本;
- ② 表面强度方面:减小磨损,延长零件的使用寿命,保持设备的运转精度和性能,提高其工作可靠性,减小因更换元件带来的材料损失以及设备停产损失,减轻设备的维护保养要求;
- ③ 运动性能方面:减小摩擦,提高机构运动的灵活性和灵敏性,克服死点、滞后、爬行等现象,提高机构对信号的响应度;
- ④ 伴生现象方面:控制与克服因摩擦而带来的许多伴生现象,如振动、噪声、发热与静电效应等;
- ⑤ 特种要求方面:如设计具有高摩擦力矩的制动器、离合器;开发具有高磨削能力的磨具;在精密仪器中设计摩擦力的自动补偿系统等。

以上五个方面,在汽车的设计与使用中均有非常多的典型实例。

1.3 汽车中的摩擦学问题

汽车是一个非常复杂的摩擦学系统,至少有 50 多个部位的设计需要运用摩擦学知识。而在汽车制造过程中人们将会遇到更大量的摩擦学问题,由于它们不被列为本书内容,这里不加统计。

在汽车中可以列出一批重要的摩擦学专题,它们不仅需要运用系统的摩擦学理论与方法,而且还与相关专业领域的知识结合,形成了完整的、专门的设计理论与方法学体系,在汽车设计中被广泛应用。

1. 发动机中的摩擦学问题(图 1.2)

(1) 活塞环与气缸壁 活塞中一般装有 2~4 道活塞环,分气环与油环两种。它们紧贴气缸壁,主要起气密和布油作用。同时,活塞顶部的热量约 70% 经活塞环传至气缸壁然后向外散发。这就对环的材料提出了很高的要求,它必须具有良好的导热性和高温机械性能;具有足够的贮油能力;既要具有良好的跑合性以保证气密,又要具有良好的耐磨性。因此,活塞环-气缸壁材料的配对及表面处理在今天已成为非常重要的专业技术。同时,环与壁的接触面在运动中将形成一层流体动力润滑油膜,环的断面形状、气缸壁与环的表面粗糙度、环与缸套表面的压力分布都必须有利于这层油膜的形成,并由此建立了一套完整的理论计算方法。此外,环与环槽的磨损还是发动机诸多性能的重要影响因素。

(2) 缸套与活塞 缸套与活塞的接触面承受着由活塞销传来的侧推力,由此产生的摩擦力在发动机摩擦损失中占有较高的比例。活塞裙部的设计要求在这一区域能形成流体动力润滑膜。为此,现代活塞的裙部沿活塞轴向作鼓形修正。考虑到缸套与活塞在发动机横剖面与纵剖面方向受力不同,结构也不同,因此所产生的力变形、热变形皆不同,鼓形修正量沿活塞轴向是变化的,活塞裙部截面是一个由上到下呈不同长径比的椭圆形。设计所得型线还必须与发动机台架实验的磨损结果进行对比,进一步做出修正。总之,现代发动机活塞裙部的设计和制造是一项十分复杂的专门技术,是发动机摩擦学设计的典型范例。

(3) 主轴承与连杆轴承 发动机曲柄连杆机构中的主轴承和连杆轴承是典型的动载滑动轴承。通过求解非稳态雷诺方程,可以计算发动机一个工作循环中轴承内的轴心运动轨迹,由此判断润滑膜的厚度及润滑状态、合金层表面应力和抗疲劳磨损性能,并以此为依据确定轴承

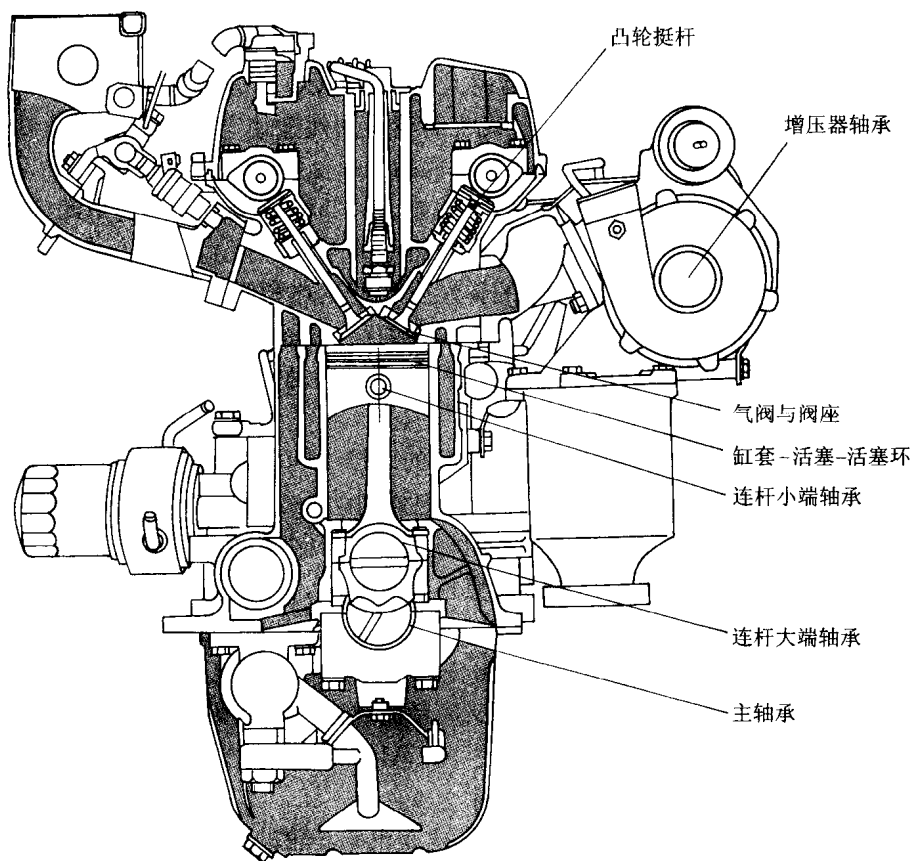


图 1.2 轿车发动机中重要的摩擦学设计部位

最佳间隙、多缸发动机的发火顺序、曲柄平衡比率、轴承表面油槽和油孔位置等，一度产生了 Holland, Hahn, Bocker 等著名的计算方法。今天，这一理论计算已更趋完善，并成为现代发动机设计的常规内容。

发动机轴承合金材料的研究与开发一直是减摩材料研究的重点，它的冶炼与薄壁轴承制造技术已高度专业化。

(4) 凸轮、摇臂与挺杆 控制气阀开闭的凸轮挺杆机构或凸轮-摇臂-挺杆机构是典型的动载弹性流体动力润滑理论的应用实例，曾先后产生多种用以计算接触区的油膜厚度、压力分布、拖动力以及其他摩擦学参数的方法。良好的设计将使凸轮副表面处于弹性流体动力润滑状态下工作，从而具有所期望的抗磨损可靠性。对于高速发动机，凸轮副表面的摩擦学行为是系统设计中不可忽略的因素。

(5) 气阀与阀座 气阀与阀座系统是内燃机中工作条件十分恶劣的摩擦副，它一方面在气阀的不断开启和关闭过程中受到冲击载荷的作用，是冲击磨损的典型实例；另一方面，排气阀头部和阀座承受着热废气的高速冲刷（废气温度可达 $600\sim 800^{\circ}\text{C}$ ），阀的工作表面经受疲劳磨损、粘着磨损、腐蚀磨损以及高温气流中未燃尽粒子的冲蚀磨损等的作用。这些恶劣的工作条件可能使阀的密封性遭到破坏，严重的将影响发动机的正常工作。