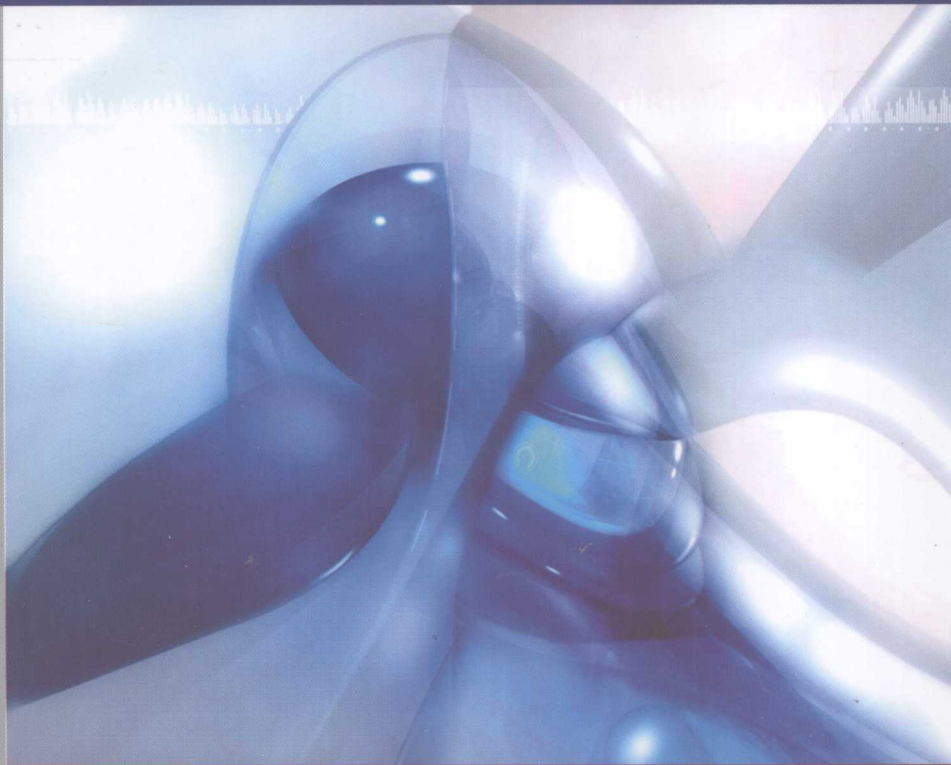




高中庸 著

涂油降噪理论与实践



科学出版社
www.sciencep.com

涂油降噪理论与实践

高中庸 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了自然界和工程中的各种摩擦自激振动现象,对各种摩擦自激振动产生的原因、频率特征以及由此引发的噪声特点进行了分析。其中,引出了“摩擦伴生阻尼”和“微凸体油膜弹性支承效应”等新概念;对摩擦系统消耗能源的正阻尼与负阻尼进行了定性和定量分析;定量分析了相对运动速度和加速度支配下的摩擦力对系统的周期性激励状况;介绍了降噪油的配制方法和涂油控制强烈摩擦噪声的实际效果。

本书可供企业设备管理人员、工程技术人员、环境保护人员、从事各级工程教育的教师以及机械类专业的本科高年级学生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

涂油降噪理论与实践/高中庸著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-024686-8

I. 涂… II. 高… III. 润滑油-应用-噪声控制 IV. TE626.3 TB535

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 089355 号

责任编辑:陈 婕 牛宇锋 / 责任校对:张 琪

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 6 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2009 年 6 月第一次印刷 印张: 15

印数: 1—2 000 字数: 286 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<新蕾>)

序

我很高兴读完了我的学生、广西工学院高中庸教授撰写的《涂油降噪理论与实践》书稿。这是一部跨机械振动学和摩擦学两个学科、书名新颖、汇集作者多年研究成果的学术专著。

该书以实验体系为支撑,以大量实验数据为依托,在继承、借鉴前人成果的基础上对摩擦自激振动成因的传统理论进行修正和拓展,进而形成了自己的见解和观点;并在实践上大胆创新,通过运用润滑技术来控制摩擦自激振动,不仅取得了突破性的降噪成果,而且显著提高了摩擦副构件的抗磨能力。其理论与实践两方面的建树,对推动摩擦自激振动及噪声控制的深入研究起到了积极的促进作用。

作者通过爬行实验机、摩擦系数测定仪和摩擦摆等装置,从多方面测得摩擦系数具有随相对速度增加而下降的普遍特性,但他认为这种下降特性所形成的表面上的负阻尼并不能掩盖存在于摩擦副中始终消耗能源的真实阻尼,因此负阻尼不是自激振动的根本原因。为此,他在前人等效阻尼计算方法的基础上提出了摩擦伴生阻尼的新概念。随后,他通过摩擦摆力学模型,将摩擦力矩表示成相对摆动速度和相对摆动加速度两个变量的函数,并且正确运用平均加速度法求取数值解,使所求系统的振动波形与实际摆动状况相一致。另一方面,某些摩擦自激振动系统多具有强非线性特点,其振动波形呈锯齿形状。作者为此分段写出振动体的运动微分方程,用林纳图解法求解时,合理修正特征曲线的形状,使图解的滑块位移时间历程与实测结果基本相吻合,在揭示摩擦自激振动发生发展的普遍规律上形成了独特见解。

通过测量与分析,他首先提出了齿轮传动高频噪声成分由轮齿摩擦激励引起的观点,并且认为齿轮中的摩擦激励成分来源于从动轮齿顶的啮入以及主动轮齿顶的啮出,其频率因此等于啮合频率的两倍。这一观点对指导齿轮噪声与振动的控制将起重要作用。

受英国学者鲍登有关摩擦定义的启发,他提出了金属切削过程就是摩擦或广义摩擦过程的观点。通过镗孔与车外圆两个工序的对比认为,金属切削颤振在很大程度上同样取决于滑动摩擦激励。

他提出了“微凸体油膜弹性支承效应”的新概念,并且得到了刨切实验的验证。他认为,只要配油与选油得当,就可在摩擦副表面凹谷处形成可靠的油膜弹性支承,使表面粗糙的微凸体凸峰高度相应降低,从而有可能使系统内的摩擦力既不随相对运动速度变化,也不随相对运动加速度而变化,从而可从源头上抑制摩擦激

励,使振动和噪声失去产生的条件。他通过现场涂油将 108dB 和 120dB 的切削噪声和钢轨矫直噪声大幅降低,从而在将摩擦学与机械振动学相结合的研究上取得了理论分析和实践应用上的可喜成果。

当前许多机械产品不断趋于高速化和重载化,由此将会带来更多的摩擦自激振动与噪声问题,因此,该书更加具有理论价值和实用价值。我衷心祝贺该书的出版。

昆明理工大学原校长、教授

廖伯瑜

2009 年 3 月于昆明

前 言

工程中由摩擦自激振动引发的颤振和噪声,污染环境,危害人们健康,降低设备工作性能、生产效率与使用寿命。随着越来越多机械产品的进一步高速化、精密化和重载化,摩擦自激振动问题变得更加突出。当滑动摩擦在机械系统中充当重要角色时,其非线性特点使振动和噪声问题变得更加复杂:不仅理论上难以求解,而且实践处理也很困难。工程中的许多动力学问题,如机械装备滑动部件的爬行、金属切削加工中的颤振、轮轨间的尖叫以及齿轮中的高频噪声等,其共性特征之一在于,系统中普遍存在滑动摩擦力随相对运动速度增加而下降的现象。半个多世纪以来,人们习惯于认为摩擦力的下降特性产生负阻尼,由此引发摩擦自激振动,以至有人称此振动为负阻尼振动。

本书立足于系列实验手段和所获得的大量实验数据,从摩擦力下降特性与振动的关系入手,对系统中的正、负阻尼进行理论分析与计算,由此尝试通过爬行和颤振的有限实例,分析、探索和揭示摩擦自激振动的基本现象、共性特征、发生及发展的普遍规律,进而推介有效实用的控制方法。本书是作者将摩擦学润滑理论和机械振动学结合起来进行研究的成果,其核心内容涉及涂油控制噪声,从润滑起源的断想开始,介绍润滑材料和方法,从而对研究对象即工程中的摩擦自激振动的特征进行介绍与分析,论证涂油降噪的理论依据。降噪涂油不同于一般的减摩涂油,为此对降噪油的配制设备和方法进行了重点介绍,最后介绍了涂油降噪与抗磨的应用效果。

前人在长期实践中所形成的摩擦自激振动成因理论,的确为早期自激振动研究提供了理论依据。但是随着实验研究的深入,人们逐渐发现前人的负阻尼理论存在许多不合理的地方。在此基础上有所发现、有所修正进而有所创新和发展,这正是科学研究不断进步的趋势所在。

作者先后主持了两项广西壮族自治区自然科学基金资助课题,通过系统的实验论证与分析,仿效前人等效阻尼的计算,发现系统中的“摩擦伴生阻尼”是消耗系统外部能源的主体,其值远远超过任何负阻尼,因此认为导致各类系统摩擦自激振动的不是负摩擦或负阻尼,而是受相对运动速度,特别是相对加速度支配的摩擦力的周期性激励。

作者受英国学者鲍登观点的启发,认为金属切削过程实际也是摩擦过程;通过对实验结果的分析,认为齿轮传动中两倍于啮合频率的噪声成分来自轮齿啮入与啮出时的摩擦激励。依此类推,工程中的许多颤振与噪声问题都具有摩擦激励的

背景,因而为采用类似的控制途径提供了理论依据。

在具有凹凸不平显微结构的摩擦副表面涂抹合适的润滑油,可以产生微凸体油膜弹性支承效应,因而有望使摩擦力不因相对运动速度与相对加速度变化而波动,从而可从源头上控制摩擦自激振动的形成与发展,而且可以有效提高摩擦副的抗磨能力。实践表明,经过实验条件验证的降噪油,通过涂油润滑可以消除 120dB 的重型钢轨矫直噪声和 108dB 的车削噪声,并且可数以百倍计地提高恶劣工况下试件的抗磨能力,作者的理论观点也由此得到了实践证据的支持。

全书共分 10 章。第 1 章提出了润滑起源的断想,虽然这一断想极难得到考古成果的验证,但它不乏合理性。第 2 章由此引出对涂油润滑材料与方法的讨论。第 3 章重点讨论自激振动的特点,其目的是为分析与论证工程中的典型摩擦自激振动问题有所铺垫。第 4~7 章分别介绍工程中滑动副间的爬行、轮轨间的噪声、切削颤振以及齿轮传动中的摩擦激励的成因与特征。第 8 章介绍涂油降噪的主要理论基础。第 9 章介绍配制降噪油的基本实验设备、方法与评价方式。第 10 章介绍涂油消除钢轨矫直噪声、车削噪声、齿轮噪声中的摩擦激励成分与涂油抗磨等案例。

感谢学生陈佰江与张利荣帮助打字画图,将书稿绝大部分内容输入电脑。感谢家人的理解与支持,小女高尚晗为本书初稿做了大量的校阅、修改和编辑工作,并提出了许多很好的建议;老伴周菊香为全书做了重要的文字审校工作。此外,还要感谢多位同事如李宝灵、罗玉军、靳龙、袁爱霞、李冰、庞新维、朱萍、申其芳和宋世柳等同志,他们为课题的顺利开展提供了多方面的支持。

本书是作者在探索摩擦自激振动成因,试图采用较简单方法对强烈摩擦自激振动进行有效控制尝试中构思的。由于作者理论水平和研究条件的限制,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正,更希望学者同仁不吝赐教。

作 者

2009 年 3 月于广西工学院

目 录

序

前言

第 1 章 涂油润滑的起源与传承	1
1.1 摩擦的二重性	1
1.1.1 摩擦对整个自然界具有重要意义	1
1.1.2 人类减少摩擦负面影响的努力永无止境	4
1.2 大自然界固有的润滑系统	6
1.3 涂油润滑的起源与发展	7
1.3.1 润滑起源于涂油的断想	7
1.3.2 涂油润滑的历史传承	8
1.3.3 涂油技术的发展展望	9
参考文献	11
第 2 章 涂油润滑材料与方法	12
2.1 润滑的功能	12
2.1.1 润滑的减摩功能	12
2.1.2 润滑的抗磨功能	13
2.1.3 润滑的防蚀功能	14
2.1.4 润滑的冷却功能	15
2.1.5 润滑的降噪功能	16
2.2 润滑的类型	16
2.2.1 干摩擦或无润滑	16
2.2.2 完全液体润滑	17
2.2.3 边界润滑	20
2.2.4 混合润滑	21
2.3 涂油润滑材料	21
2.3.1 润滑材料的分类	21
2.3.2 常用的基础油	24
2.3.3 添加剂	24
2.4 润滑方法	27
2.4.1 选择润滑方法的影响因素	27

2.4.2 润滑方法及其分类	28
参考文献	30
第3章 自激振动类型、特征与分析	31
3.1 自激振动实例	31
3.1.1 自激振动概念	31
3.1.2 自然界中的自激振动	32
3.1.3 日常生活中的自激振动	32
3.1.4 工程中的自激振动	33
3.2 自激振动的特征	37
3.2.1 自激振动的形成条件	37
3.2.2 自激振动的特征	41
3.3 摩擦自激振动及其特征	43
3.3.1 摩擦自激振动的普遍性	43
3.3.2 自激振动系统中的摩擦力特性	44
3.3.3 摩擦自激振动系统力学模型	47
3.3.4 负阻尼理论及其缺陷	49
参考文献	52
第4章 滑动摩擦副中的自激振动	53
4.1 滑动摩擦副中的能量损耗特征	53
4.1.1 滑动摩擦过程与滑动摩擦力	53
4.1.2 机械能在摩擦中的损耗过程	53
4.1.3 摩擦过程中的能量损耗机理	54
4.2 摩擦伴生阻尼概念	55
4.2.1 摩擦副中的负阻尼与正阻尼	55
4.2.2 摩擦伴生阻尼的计算	57
4.3 滑动摩擦中的自激振动分析	58
4.3.1 爬行现象分析	58
4.3.2 静-动摩擦过程分析	59
4.3.3 爬行临界条件分析	61
4.3.4 静动摩擦力差与爬行的关系	61
4.3.5 爬行运动的图解分析	62
参考文献	71
第5章 轮轨间的摩擦自激振动与噪声	72
5.1 地铁弯道噪声及其危害	72
5.2 轮轨接触应力分析	74

5.2.1 轮轨接触应力的计算特点	74
5.2.2 重型钢轨矫直工艺	74
5.2.3 矫直辊磨损状况对矫直噪声的影响	77
5.2.4 矫直辊接触应力计算	78
5.3 轮轨自激振动中的噪声特点	81
5.3.1 铁路轮轨噪声简介	81
5.3.2 钢轨矫直噪声分析	82
5.3.3 钢轨矫直系统固有频率分析	84
5.3.4 铁路轮轨噪声控制现状	92
参考文献	94
第6章 金属切削中的摩擦自激振动	95
6.1 金属切削的摩擦本质	95
6.2 切削噪声及其特征	96
6.2.1 切削噪声及危害	96
6.2.2 摩擦条件对切削噪声的影响	96
6.2.3 切削噪声的频率特征	97
6.2.4 切削噪声的传播途径	102
6.3 切削颤振成因分析	103
6.3.1 再生效应理论	103
6.3.2 负阻尼特性理论	106
6.3.3 振型耦合理论	107
6.3.4 进给切入效应	108
6.4 动态切削力的数学描述	108
参考文献	112
第7章 渐开线齿轮传动中的摩擦自激振动	113
7.1 齿轮机构振动力学模型与振动方程	113
7.2 齿轮啮合传动中的振动频率特征	116
7.2.1 齿轮扭转振动的固有频率	116
7.2.2 齿轮本体轴向振动的固有频率	117
7.2.3 齿轮本体固有频率的测试实例	121
7.2.4 齿轮箱体的振动频率特征	124
7.3 齿轮传动中的摩擦特性	130
参考文献	135
第8章 涂油降噪的理论基础	136
8.1 噪声及其控制途径概述	136

8.1.1 噪声及其评价	136
8.1.2 噪声的危害	137
8.1.3 机械噪声的分类与控制途径	139
8.1.4 涂油降噪的性质与适用范围	142
8.2 润滑对摩擦副接触应力特性的影响	142
8.2.1 不考虑切向摩擦力时的接触应力计算	143
8.2.2 考虑切向摩擦力时的接触应力计算	146
8.2.3 涂油改善接触强度实例	146
8.3 润滑剂的油膜效应	148
8.3.1 悬臂微凸体油膜弹性支承效应	149
8.3.2 油膜对微观弹性势能积蓄的抑制效应	150
8.3.3 润滑油膜获得良好效应的条件	151
8.4 油膜弹性支承效应的实验验证	152
8.4.1 刨切实验基本条件	152
8.4.2 刨切实验结果与分析	153
8.4.3 微凸体油膜强化因子经验计算式	156
参考文献	157
第9章 降噪润滑油的配制与实验	158
9.1 润滑油配制常用辅助实验装置	158
9.1.1 爬行模拟实验装置	158
9.1.2 一种摩擦系数测定仪	161
9.1.3 摩擦摆实验装置	165
9.1.4 滚动副摩擦性能测试	173
9.2 正交实验法及其应用	174
9.2.1 正交实验法与正交表	175
9.2.2 正交实验数据处理方法	176
9.2.3 正交实验法应用实例	177
9.3 润滑降噪油的配制与实验	183
9.3.1 配制润滑降噪剂的主要原料	183
9.3.2 降噪油的正交配制实验法	184
参考文献	188
第10章 涂油降噪实践案例	189
10.1 涂油控制钢轨矫直噪声的实践案例	189
10.1.1 重型钢轨立式矫直噪声及特征	189
10.1.2 涂油降噪及其效果	192

10.2 降噪油抗磨实践案例.....	199
10.2.1 问题的提出	199
10.2.2 抗磨实验设计及验证	200
10.2.3 相似实验结果及讨论	207
10.3 涂油控制切削噪声实践案例.....	208
10.3.1 金属切削中的振动	208
10.3.2 切削参数的测试实验	212
10.3.3 涂油控制切削噪声实践	214
10.4 涂油控制齿轮摩擦噪声实践案例.....	218
10.4.1 实施齿轮润滑降噪的依据	218
10.4.2 控制齿轮摩擦激励噪声的实践	219
10.5 降噪油的推广实例.....	226
参考文献.....	226

第1章 涂油润滑的起源与传承

1.1 摩擦的二重性

最适合用“一分为二”观点审视的自然现象当首推摩擦。摩擦是两个相互接触的物体具有相对运动或具有相对运动趋势时,在接触处产生阻力的现象^[1]。

1.1.1 摩擦对整个自然界具有重要意义

自然界中,摩擦无处不在,它确保了自然界的平衡与和谐。没有摩擦,从低等到高等、从简单到复杂的各种植物都无法根植于岩石缝隙或泥土之中;没有摩擦,任何动物甚至人类都无法在地球上立足。简言之,地球上的任何生命形式无不从摩擦中获益。摩擦使自然界千奇百怪的生命形式得以形成、发展和演绎。

地球上具有最高生命形式的人类早就懂得摩擦的重要作用,并尽可能合理地利用它来为自己服务。在最简单的生产活动中,人们通过世代相传从小就懂得用最原始的方法来增加摩擦。例如,向手心吐些口水,可以得心应手地握紧锄头和镰刀等生产工具。在古代狩猎活动或者野蛮的相互争斗冲突中,采用同样的方法可以有效地握紧棍棒或刀枪等武器。由此增加的摩擦有利于生产劳动工效的提高或者狩猎的成功与争斗的胜出。人们今天的生活丰富多彩,远非古人所能想象。但是在今天的日常生活中,人们通过某些原始方法来充分利用摩擦的事例仍然比比皆是。不少人翻书或清点钞票时,常将手指伸入口中沾些唾液以增加手指与纸面间的摩擦力。虽然这是很不卫生的习惯,但操作起来确也简便有效。银行的营业柜台上总摆放着含水海绵盒以方便顾客蘸水点钞。不难想象,若是盒中不放含水海绵而是放置含有动植物油或矿物油的棉纱,那点钞的效果就适得其反了。

火是促进人类进化与社会进步的一个极为重要的因素。但是人类学会使用并且有效控制和掌握火必定经历了一个漫长的过程。在取火的实践中,摩擦作用居功至伟。古人类钻木取火是小学生们都知道的常识,那是因为钻木时产生的摩擦热易于使枯草干叶燃烧。今天的取火已变得极为简便和容易,取火的方法也更加丰富而多样、快速而先进。但是摩擦取火的方式仍然方便和实用,取火的摩擦原理至今还有很强的生命力。例如,划火柴和使用带火石的打火机都离不开摩擦的参与。利用凸镜的聚焦原理从太阳光中取火虽然与摩擦无直接关系,但是若不经过程摩擦过程,凸镜的制造就是一句空话。

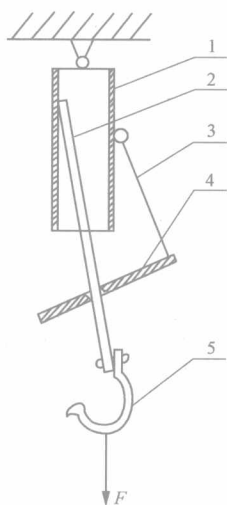


图 1.1 梭筒钩结构示意图

1. 楠竹筒；2. 木棒；
3. 棕绳；4. 手柄；5. 挂钩

与火有关的梭筒钩应该是直接利用摩擦的一个重要发明。梭筒钩常见于湖南及其周边省份的农村。如图 1.1 所示，梭筒钩的主体是一根已被打通竹节、长度约为 2m 的楠竹筒；其内穿入一条质地较为坚硬的天然直木棒；竹筒外壁一侧系一根棕绳；棕绳另一端与木质或竹质手柄的端部相铰接，在该手柄靠近另一端的适当位置凿有方孔或圆孔以使木棒通过；木棒的最下端嵌入铁钩。在较早的年代，木棒和钩是自然生长成为一体的带钩长条树枝。在极为偏僻的山村，或者当制造铁钩不太方便时，直接采用天然带钩的直木棒无疑是最佳的选择。

梭筒钩大多用棕绳系挂于农居火塘正中的房梁或两房梁之间的粗竹竿上。村民们围在火塘四周烤火时，梭筒钩上总要挂上水壶烧开水沏茶待客或自饮，有时候挂上铁锅煮饭或炒菜，或者挂上猪食锅煮猪食。只要绳索与钩具足够结实，梭筒钩杆无论承受多大重量也不会自动从梭筒中滑落。梭筒钩主要由农家妇女操作，她们可以根据木柴堆积高度、火势大小或者根据所需温度的高低来调节钩杆的位置，使用起来十分方便。

梭筒钩的工作原理其实十分简单。带钩直木棒的上端与竹筒内壁接触形成一个支点；其下端与手柄孔形成两个接触点；手柄通过此两点迫使直木棒向逆时针方向形成偏转趋势，而竹筒内壁的支点产生的反作用力使直木棒保持平衡。要提高挂钩位置时，人们直接将直木棒上推即可；要使挂钩位置下降，则需操纵手柄使其尽可能与竹筒轴线处于垂直位置，或者让手柄上孔的轴线与竹筒孔轴线尽可能平行，此时即可轻便地下移挂钩到合适位置，随后让手柄自动下垂，挂钩位置即被固定。当挂钩处挂上水壶或铁锅等重物时，即使重量很大，直木棒所受摩擦力与逆向力矩都可平衡钩上重物且能确保其不会坠落。

从运动学角度看，图 1.1 所示梭筒钩可以称之为受摩擦控制的单向运动阀。即在外力作用下，若不人为搬动手柄，直木棒只能上推而不能下移。

梭筒钩结构简单，取材容易，制作方便，挂物及调节高度快捷可靠，普通农妇操作时都能得心应手。在湖南省及其周边地区广大农村，梭筒钩是农家必备之物，并且无须购买，完全可以自己加工组装。现在社会有了很大进步，各地区农民的传统生活习惯也开始不同程度地发生着变化，梭筒钩终有一天会退出农居生活的舞台。也许今后人们只能在毛泽东或刘少奇的故居看到梭筒钩这种稀罕物品。祖先直接利用摩擦原理为自己服务的重要发明——梭筒钩，构思巧妙，很值得我们后人钦

佩、借鉴和弘扬。

人类创新或发明的价值往往并不与其复杂程度成正比。斜面这种最简单、最原始也最基本的机械的发明就比梭钩更要伟大,也更具有普遍意义。在古代人们要将巨大而沉重的物体从低处搬上高台,因无法直接举升,在多次失败之后得出推拉比直接举升要省力的结论,随即就近利用竹、木或者土石材料,在重物与高台之间架设或修筑一条斜坡通道,依靠众人的推拉或者翻滚,可以较容易地将重物移上高台。当然,架设或修筑这条斜坡通道应当充分考虑地形和环境。如果条件允许,就可修成直线式,使其从重物处开始直接通达高台;也可以盘旋而上,修建成螺旋状。在斜面上推拉只需克服摩擦力和重力的少许分力;如果能够在斜面上滚动重物,那就更加省力了。经过不知多少世纪的演变和发展,现在斜面作为一个重要的组成要素使机械变得更加丰富而多彩。今天的各种螺钉、各种传递运动和动力的螺杆都是人为将斜面缠绕在圆柱或圆锥体上的结果。由于斜面升角的大小直接影响斜面机械的效率,因此为了提高功效,传动用螺旋的升角应当适当做得大些;若是用于连接,则应采用较小升角,以使其具有尽可能大的自锁能力来防止连接件之间的松脱。

许多汽车至今都随车配有螺旋千斤顶,一旦在野外需要检查油底壳、更换轮胎或进行某种修理工作时,司机们都可使用千斤顶来顶住汽车前后桥架的某个位置,以便将汽车局部顶起以实施相关作业。螺旋千斤顶的关键零件就是斜面缠绕在圆柱体上而形成的螺杆与螺母。借助这种具有省力特性的斜面机械,一个或者最多两个人就能在野外将重达数吨车辆的一端举升到一定高度。

在今天市场经济环境下,某些商业或公益型建筑也开始主动适应市场变化,全钢结构的可拆式厂房、仓库、展览场馆甚至剧院应运而生。出于可拆的需要,建造这样的结构物既不能焊接与铆接,也不能采用配合螺栓来连接。首先,焊接和铆接属于不可拆连接方式,当然不能应用于这种场合;其次,配合螺栓与连接孔配合精度较高,两者间隙极小,无法进行现场安装施工作业,因此连接时只能采用普通螺栓。这种建筑的建造特点在于,采用高强度钢材制成的普通螺栓将各种型钢连接起来组建成一座人们所需要的建筑结构物。高强度螺栓将预先钻出光孔的被连接型钢紧固在一起,通过结合面间足够大的摩擦力来抵抗构件自重或风雪等外部载荷引起的相对滑移趋势。如果摩擦力较小,那么在外力作用下,连接件之间很可能发生错位,构件间相对运动速度的变化将会引起惯性力的冲击,最终导致建筑物坍塌而造成惨重后果。实验发现,一般钢材制品之间的摩擦系数很难超过0.3,只有经过认真喷砂或喷丸处理方可获得0.35或0.4以上的摩擦系数^[2]。由此可见,钢结构件结合面间具有尽可能大的摩擦系数,同时采用足够尺寸的高强度螺栓实施可靠的连接,这才是确保这类建筑物安全使用的最基本条件。

在长期的生产实践活动中,人类早就学会了直接利用摩擦来实现运动和动力

的传递。木匠最早使用的木工钻和民间早年流行的纺纱车都采用绳传动;今天许多家庭还保留着的脚踏缝纫机采用圆形带传动;多种运输机械采用平皮带传动;工厂车间随处可见的 V 形带传动等都是人们直接而且最大限度利用摩擦的例子。一切依赖模具型腔成型的金属或非金属制品,都离不开原材料与型腔之间的摩擦,否则定难获得准确的造型。

在人类的现代生产活动中,摩擦有益于人类的正面角色发挥得更加淋漓尽致。一幢幢摩天大楼拔地而起,都有摩擦在建筑物基础与基坑、钢筋与混凝土以及各种结构之间发挥着重要作用。各种机械零件连接成部件,进而组装成千变万化的机器以满足人们日益增长的物质和文化生活方面的需求,这都是摩擦做出重要贡献的结果。没有摩擦,人们赖以出行的一切交通工具都无法启动,一切飞行器都无法顺利起降。毫无疑问,没有摩擦的自然界将是多么不可思议的混乱不堪!

1.1.2 人类减少摩擦负面影响的努力永无止境

人类在依赖摩擦得以生存的同时,也常常会被摩擦所困扰。摩擦会使人们的工作费劲,更会加快工具和器物的磨损。据估计,全世界大约有 $1/3 \sim 1/2$ 的能量以各种形式消耗在摩擦上,摩擦导致的磨损是机械失效的最主要原因,大约有 80% 的损坏零件是由各种形式的磨损引起的;摩擦使机械设备的工作效率和使用寿命大打折扣。有时,摩擦副间的非正常相对运动会产生令人烦躁的振动和噪声,对人们的身心健康造成某种程度的伤害。就连人类和动物各种关节疼痛的疾病也与关节处的摩擦和磨损有密切的关系,这类摩擦问题往往给人们带来的是难以忍受的痛苦。

现代人类生活日益改善,每天摄入的营养素越来越丰富,随之而来的心血管疾病便成为威胁人类生命的主要杀手。人类甚至动物的心血管疾病同样属于摩擦学问题。人们往往因为饮食不当,造成血液与血管内壁之间的摩擦阻力增大,血液流动困难,势必引起心脏压力增大而不堪重负,人体中的一系列疾病随之发生进而恶化。同时,关节肿胀、颈椎与腰椎疼痛、肩周发炎等也都是摩擦在人体中产生负面影响的结果。

虽然人们对生物摩擦学的认识还不透彻和充分,但人类试图减少自身体内摩擦负面影响的努力一直没有停止。随着多学科综合课题研究的开展,人体本身摩擦学问题研究定将取得进展与突破。

人和动物的本质区别在于能否制造工具。人类早期对工具或机械的创新大多和摩擦有着难以分割的关系。这类创新不是利用增大摩擦就是减小摩擦或改变摩擦的形式。斜面的发明是如此,车轮的发明同样是如此。车轮是另外一种最原始、最基本的机械,即滑轮的进一步演化。和斜面一样,车轮也是在长期生产实践中发明出来的。在极其原始的古代,在平地或斜坡上搬运一件巨大的物体,当采用推或

拉的办法都无济于事时,人们逐渐懂得用杠杆撬起重物一端,然后在其下方放置滚木,如此处理即可极为轻便地将巨物从一个地方搬运到另一个地方。这一生产实践揭示了滚动比滑动省力得多的道理。随后很多场合下的滑动摩擦逐渐被滚动摩擦所代替,滑轮和车轮等简单机械从此开始进入人类社会的大舞台。人类社会的生产效率由此得以大幅提高,社会财富也逐渐积累和丰富。

车轮和车辆的运用加快了商品和货物流通与周转的速度。在战争环境下,车辆有效地提高了作战的机动性与灵活性。车轮促成了强势族群或者强势民族的逐渐形成,战车数量的大量增加壮大了一个民族或者诸侯国家的军事实力,膨胀了其统治集团开疆拓土、称霸天下的野心。由此不妨说,一个辽阔地域上一统天下格局的形成、发展和巩固跟车轮的发明和应用有着极大的关系。

除变滑动摩擦为滚动摩擦外,人们还懂得充分改善摩擦副的表面状态来减小摩擦力。历史上最典型的实例发生在我国清朝乾隆二十六年(即1761年)。现今仍安放在北京故宫中的一块长16.5m、宽8m、厚1.7m、重约二百多吨的大石雕^[3]就是通过改善滑动表面摩擦状态的原理完成了远距离的搬运。这块巨石产于京郊房山县的大石窝,起运前,有关官员命沿途百姓每隔一里挖井一口。冬季来临时便命人吸水泼成冰道,然后使用旱船拉运进入故宫。毫无疑问,巨石与坚硬光滑冰面之间的摩擦系数,远远小于与松软地面甚至水泥路面之间的摩擦系数。当然,那时的中国还不可能修筑水泥马路。

通过润滑来改善滑动摩擦副的摩擦特性也应当早为人类所认识,同时也一定早被应用于生产之中。润滑一词和润滑技术的应用也因此一定会留下其历史痕迹。中国西汉初年汉高祖刘邦重孙淮南王刘安(公元前179—公元前121)招集宾客,主持编写了学术名著《淮南子》。书中写道:“夫水所以能成其德于天下者,以其淖溺润滑也”^[3]。该书大概就是最早写出了“润滑”一词的不朽传世典籍。在公元前2400年古埃及墓中的浮雕上,清晰地刻着搬运雕像过程中,有人在雕像底板下加润滑剂的情景。这恐怕称得上是有据可考的形成功业专业润滑分工的最早历史记录。

在数千年的封建社会中,车辆肯定优先用于战争或供贵族统治者出行之用,随后才有可能应用于民间的农业生产。农民常用的独轮车、牛车、马车、各式水车、风车以及贵族家庭和军旅中使用的各种车辆,其车轴与基座孔间完全处于滑动摩擦状态。为了确保车辆跑动起来轻便而且耐用,人们早就知晓这样的操作规程:定时给车轴涂油以获得良好的润滑效果。大约三千年前我国周朝中期的《诗经》卷二邶风·泉水章中就记载了有关脂润滑的诗句。该诗记叙了一个远嫁他国的卫国女子的思乡之情。诗中写道:“载脂载輶,还车言迈,遄臻于卫,不暇有害……”。其中輶(音狭xia)是车轴的古字。这四句话用今天的语言写出来,大体就是:“洁净的油膏涂抹在车轴上,乘坐这样的车辆定会让人备感安全而舒畅;调转车头,唤声马儿快