

车辆 沙地行驶理论

刘聚德 著



机械工业出版社

车辆沙地行驶理论

刘聚德 著



机械工业出版社

内 容 简 介

本书为沙漠车辆的研究与开发提供了最新的系统性的理论分析方法及相关的试验方法。全书共分九章,从表层沙的力学性质开始,系统地介绍了建立沙的本构关系及其与车辆性能特别是行走机构间关系的传统方法、有限元方法和散体极限平衡理论法等,还介绍了车辆沙地行驶性能的试验技术。在最后一章介绍了有关沙漠车辆研究的最新课题及研究方向。

车辆沙地行驶理论

刘聚德 著

*

责任编辑:孙慧波 版式设计:冉晓华

韩会民 封面设计:方 芬

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京市通县燕山印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 8.8125 · 字数 228 千字

1996年9月第1版第1次印刷

印数 0001—1000 · 定价 18.00 元

*

ISBN 7-111-05403-2/U · 173

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前 言

当今世界蓬勃兴起的新科学技术革命正有力地推动着人类进步。本世纪 90 年代到下世纪中叶，是中华民族振兴的关键时期。为保证我们能在安全与和平的环境下实现经济起飞，必须加强国防建设。我国有 153 万平方公里的沙漠、戈壁和沙漠化土地，分布在新疆、内蒙古、陕西等西北疆域。因此，提高军队在沙漠地区的机动性，改进现有军车的沙地通过性并研究开发新型的沙地军用车辆已成当务之急。同时，在这大片的荒漠土地下还蕴藏着丰富的石油等矿产资源，国民经济的发展需要尽快开发利用这些宝藏，这也要求首先应具备沙漠运输车辆。

研究开发沙漠车辆还具有更深远的社会与经济意义。钱学森教授倡导的“沙产业理论”指出，我们必须运用全部的现代科学技术，包括物理、化学、生物学等基础科学，让生物利用沙漠地区的太阳能为人类创造财富。这就意味着我们将凭借优越的沙漠汽车向沙漠进军，去开发利用这片广阔的新天地。

由于现有的常规车辆不适应沙漠环境，表现为滑转下陷严重，甚至车桥被地面托住，不能行驶。此外还有，发动机容易过热，外露运动机构严重磨损等。鉴于这种情况，国家各有关部委纷纷投资研究开发沙漠汽车，形成了汽车研究的一个新分支。

车辆沙地行驶理论是通过建立车辆性能参数与沙地力学性质间的定量数学关系，提供沙漠车辆性能预测方法，保证设计方案选择最优的系统性多学科交叉科学。在设计过程中，可应用该理论预测未来车辆沙地行驶的性能；同样可以应用该理论研究分析现有车辆沙地行驶时的性能，得到改进的措施。

本书的著述目的,是为沙漠车辆的研究与开发提供最新的系统性理论分析方法及相关的试验方法。全书共九章,从表层沙的力学性质开始,系统地介绍了建立沙的本构关系及其与车辆性能特别是行走机构间关系的传统方法、有限元法和散体极限平衡理论法等,还介绍了车辆沙地行驶性能的试验技术。并在最后一章介绍了有关沙漠车辆研究的最新课题及研究发展的方向。在介绍作者有关车辆-沙地系统的研究成果时,注意引用前人一些著名的研究成果,以便于分析、比较。

书中有许多内容都是作者承担的国家自然科学基金项目和山东省自然科学基金项目所取得的最新研究成果。由于沙漠车辆的研究开发刚刚兴起,许多理论与试验方法都在不断的发展和完善,更有许多还没有被认识的规律。因此,书中难免有粗浅的认识和不妥之处,希望读者批评指正。

在本书的撰写过程中,装甲兵工程学院的邬惠乐教授和中国农业大学的余群教授对本书进行了详细的审阅,并提出了许多宝贵意见,同时还得到吉林工业大学汽车系许多专家的帮助,在此表示诚挚的谢意。

作 者

1996年5月

于青岛建筑工程学院

目 录

前 言

第一章 绪 论	1
第一节 概述	1
第二节 车辆沙地行驶性能的概念	3
第三节 沙漠车辆的应用领域	4
一、开发利用沙漠资源	4
二、军用车辆研究	5
三、农业机械	6
四、其它学科领域	7
第四节 车辆沙地行驶理论的研究内容及方法概述	7
一、纯经验方法	8
二、半经验方法	8
三、模型试验和因次分析法	9
四、理论分析方法	9
参 考 文 献	11
第二章 沙的力学性质及其试验技术	14
第一节 引言	14
第二节 沙地力学性质的现场测定	15
一、沙的单位质量、粒级和含水量的现场试验	15
二、压板沉陷试验	15
三、现场环形剪切试验	19
四、圆锥穿入试验	23
五、沙漠现场试验的共同性问题	24
第三节 力学性质的实验室试验方法及其局限性	25
一、直接剪切试验	26

二、三轴试验	28
第 四 节 三轴仪试验原理	30
一、三轴仪结构	30
二、测试原理	33
第 五 节 车辆行走机构作用下沙的现场载荷条件 及实验室再现	34
一、沙的现场载荷条件	34
二、实验室再现方法	35
第 六 节 表层沙力学性质三轴试验的基本内容	38
一、静载压缩试验	39
二、各向等压压缩试验	39
三、轴向动载荷(振动)试验	40
四、侧向无应变试验	40
五、橡皮膜应力校正试验	40
第 七 节 橡皮膜与排水滤纸强度的校正	40
一、橡皮膜强度的校正	40
二、排水滤纸条强度的校正	44
第 八 节 表层沙的力学性质	44
一、应力-应变试验曲线的一般规律	45
二、剪应力、体应变与轴向应变关系的影响因素	45
三、强度特性的变化规律	50
四、变形特性	53
五、表层沙的动力特性	55
参 考 文 献	58
第 三 章 表层沙的本构关系	60
第 一 节 土的本构关系与土力学计算理论发展概况	60
第 二 节 表层沙的本构关系	62
一、弹塑性本构关系理论概述	63
二、黄文熙教授的弹塑性模型	70

三、 $K-G$ 模型	75
四、 Duncan-Chang 双曲线模型	82
第三节 本构关系的验证方法	83
一、 模型参数的检验	83
二、 典型工况的有限元模拟计算	84
参考文献	86
第四章 轮胎的力学性质	89
第一节 概述	89
第二节 轮胎结构及主要参数	90
一、 充气轮胎的组成	90
二、 充气轮胎结构	91
三、 轮胎的常规参数	95
第三节 轮胎的静力学性质	96
一、 轮胎的弹性特性	96
二、 轮胎的变形特性	99
第四节 轮胎的动力学性质	106
一、 轮胎动刚度与阻尼特性	107
二、 轮胎的传递特性	110
三、 轮胎的包容特性	110
第五节 轮胎力学模型	113
一、 轮胎力学模型综述	113
二、 关于轮胎模型参数的意义	120
三、 轮胎在沙地上力学模型的讨论	123
参考文献	125
第五章 车辆沙地行驶性能的传统预测方法	127
第一节 沙地行驶性能研究概述	127
第二节 沙地行驶阻力的传统预测方法	129
一、 压实阻力的计算原理	130
二、 压实阻力的计算方法	132

三、弹性轮胎的压实阻力	134
四、胎体变形滚动阻力	137
五、推土阻力的计算	137
六、滑转下陷产生的附加阻力	140
七、M. G. Bekker 法预测滚动阻力的验证	141
第三节 牵引性能的预测方法	143
一、车轮牵引力的预测	144
二、附着力的预测方法	145
三、牵引性能的预测	146
第四节 牵引性能的影响因素	147
一、轮胎形式的影响	148
二、轮胎宽度对滚动阻力的影响	150
三、轮胎直径的影响	152
四、轮胎载荷的影响	153
参 考 文 献	155
第六章 车辆沙地行驶性能分析的有限元法	157
第一节 有限元程序概述	157
第二节 相互作用有限元模型中的边界条件	159
一、相互作用界面摩擦性质的假设	159
二、载荷边界条件	160
三、分界面单元	161
第三节 有限元模拟计算方法实例	166
一、单元材料特性的模拟	166
二、选择求解策略	166
三、模型评价	171
第四节 车轮沙地行驶性能的有限元法预测	175
第五节 车辆行走机构在沙地上的有效作用方式的有 限元分析	178
一、“约束流动”的概念	178

二、相互作用的有效方式	179
第 六 节 车辆在沙地上的下陷机理综述	184
一、表层沙的强度与变形特性是下陷的根本原因	185
二、相互作用方式对沙的流动及应力分布规律有重要影响	185
参 考 文 献	186
第 七 章 行走机构与沙相互作用分析的	
散体极限平衡理论	189
第 一 节 序	189
第 二 节 应力平衡方程	190
第 三 节 散体极限平衡方程的特征线(滑移线)解法	191
一、滑移线	191
二、应力平衡方程的特征线解法	194
第 四 节 滑移线场	195
一、滑移线的基本性质	195
二、两种简单的滑移线场	197
第 五 节 边值问题	199
一、外边界载荷的换算	199
二、三类边值问题	201
第 六 节 滑移速度场理论	204
第 七 节 步行机足与沙地相互作用的散体极限平衡法分析	208
一、步行机足与沙地相互作用的简化模型	208
二、应力间断问题	211
三、计算与分析	213
第 八 节 车轮沙地行驶性能的散体极限平衡法分析	218
一、刚性轮下的滑移线场	218
二、一般载荷条件下滑移线场的计算	219
三、车轮与沙地相互作用的边界条件	225
四、车轮与沙地相互作用的计算模型	228

第九节	散体极限平衡理论和非线性有限元法	
	在沙地行驶问题中应用的评价	231
一、	非线性有限元法	231
二、	散体极限平衡理论	232
参 考 文 献		233
第八章	车辆沙地行驶性能的试验技术	235
第一节	概述	235
第二节	土槽模拟试验	236
一、	土槽模拟试验设备	236
二、	土槽试验的内容与方法	238
三、	土槽的方案设计	240
第三节	行走机构作用下沙子流动规律的观测试验	242
一、	沙流动位移场的观测	242
二、	约束流动试验	243
第四节	整车野外试验	247
一、	通过性试验	247
二、	燃油经济性试验	253
三、	车速测量装置	253
参 考 文 献		254
第九章	车辆沙地行驶理论研究的新课题	255
第一节	行走机构的结构与行走方式的合理化研究	255
一、	行走机构的合理行走方式	256
二、	行走机构的结构方案研究	257
第二节	车辆行走机构与沙相互作用分析的新理论探索	259
参 考 文 献		264
附 录	步行机足与沙相互作用的散体极限平衡法	
	计算源程序	266

第一章 绪 论

第一节 概 述

占陆地面积三分之一的干旱荒漠土地历史上曾是人群栖息居住的重要场所，是人类早期文明的发祥地。由于技术水平的限制和人口稀少，很长一个时期人们择水草而居，沿溪流而住，过着游耕、游牧生活。当时，人类的生存、生产处在同自然界原始的和谐协调之中。人们在沙漠地区利用自然的恩赐，顺应自然的变化，维系着生活。

随着时间的推移，人口增长很快。游耕、游牧时期，1000年间人口才增加 40 %；而至近代，1650 年地球上 5.5 亿人，仅用 200 年就增加了一倍；此后的翻番仅隔了 100 年；再后的倍增则不到 50 年。今天，世界人口已达 56 亿了。估计 21 世纪中期，全世界人口将增至 100 亿。快速增加的人口和日益增长的需求，驱使人们加速开发沙漠地区这个幅员辽阔的空间。

我国有 153 万平方公里的沙漠、戈壁和沙漠化土地，主要分布在西北地区。林业部部长徐有芳 1994 年 8 月考察陕西榆林等地治理毛乌素沙漠情况时说，今后防治沙漠工作必须从单纯的防沙固沙逐步转移到全面开发沙漠资源的轨道上来，必须对沙漠实施综合治理，综合开发，在沙漠地带建设大片绿洲，从而进入向沙漠索取粮、棉、油、肉、蛋、奶的新阶段。

沙漠地区的开发需要科学、正确的战略抉择，人们既不能凭藉现有的知识、强大的技术和资金为所欲为，也不能以“常识”代替客观真谛。特别是即将进入 21 世纪，技术进步使人类有了更强大的武器，技术、金融已进入国际化合作轨道，资金亦将不再是开发沙漠的主要障碍。在这种情况下，一个正确的指导思想

和战略框架比任何时候都更有意义。

蒸汽机的出现，揭开了现代文明的序幕，使人类在超越畜力方面取得了巨大的进步。汽车的诞生给人类社会装上了轮子，对人类生活产生了空前广泛的影响，已渗透到人类活动的各个方面。同时，汽车又随着社会的进步和人类不断增长的需求而迅速发展。人类要向浩瀚的沙漠进军，必然要借助汽车作为交通运输的工具。

然而，现行的常规轮式汽车在沙漠上行驶非常困难，几乎可以说不适用于沙漠地带。因此，必须开发能适应沙漠地区行驶环境的新型汽车，这是国民经济和国防事业发展的迫切要求。车辆沙地行驶理论就可以为沙漠车辆设计、性能改进提供系统的理论分析方法。

车辆沙地行驶理论源于地面-车辆系统理论，是关于车辆与沙地相互作用过程中力学关系的边缘科学。它建立车辆-沙地系统的数学模型，以使设计过程中能预知车辆在沙地上的性能，保证沙漠车辆设计方案的最优选择。所以，在沙漠车辆设计过程中，可直接应用该理论，通过计算，预测未来车辆沙地行驶的性能；同样可以应用该理论分析现有车辆在沙地上行驶时的性能，进而得到改进其性能的措施。

车辆沙地行驶理论属于多学科交叉科学，它涉及机械学、力学、计算科学、国防与军事科学等。因而，从事沙漠车辆研究设计的工作者就要了解并掌握相关的理论，去阅读大量的其它相关学科的文献资料，跟踪各有关学科的最新发展，从日益发展的其它学科领域汲取有益的方法来解决车辆-沙地系统的相互作用问题；同时，还要与其它学科领域的学者密切合作，才能取得丰硕的成果。

该书所涉及的内容实践性很强，任何一个研究环节都需要大量的试验来验证，许多规律又都是通过试验来发现的。由于车辆与沙地相互作用的复杂性，使得许多相互作用关系目前还很难从

理论上定量描述,需在大量试验的基础上寻找经验公式。与此同时,又有许多试验研究手段(仪器设备)及研究方法需要科学工作者们在试验中去创造,去完善。无疑,这是一个大有作为的科学领域。

第二节 车辆沙地行驶性能的概念

自从汽车问世以来,其行驶性能就始终占据着非常重要的地位。在汽车设计的最初时期,设计者们就已经认识到重心低、轴距长有利于稳定性;汽车转向和制动时的滑动现象使人们在1900年前后就致力于操纵性及防滑性能的研究;第二次世界大战期间,大量汽车被军队用于各种地面环境,使得汽车在松软地面或崎岖不平地面上的可行驶性成为一个焦点问题,因而战后兴起了汽车通过性研究。在随后的100年里,汽车行驶性能的研究已发展成一个内容十分广阔的研究领域,例如其中的制动性、操纵稳定性、动力性、通过性及平顺性等。

车辆的行驶性能具有非常广泛的含义,几乎涉及汽车行驶过程中的所有行为,它的具体内容应由分析问题时的侧重面来确定。例如,车辆驾驶员是根据车辆对他所发出指令的反应来评价行驶性的,因此他们认为行驶性能是车辆自身所固有的;从事交通及道路工程设计的技术人员则认为,行驶性能主要是车辆在道路上的运动特性。阿达姆·措莫托^[1]认为,行驶特性的概念应包括驾驶员-车辆-环境系统的总特性。

当车辆在沙地上行驶时,由于系统环境的特殊性,使得车辆沙地行驶性能具有独特的内容。沙属于一种松软的无粘土,抗剪强度低,容易发生剪切变形,因而行走机构的下陷较大,滚动阻力也比硬路面上大得多。车辆在沙地上怎样才能够保证它的可行驶能力是车辆沙地行驶性能研究的主要内容。车辆在沙地上的行驶速度一般都不高,柔软的沙地使车辆制动和转向时轮胎相对地面的滑动都转化为轮下沙的变形,不会引起明显的动态响应。行

驶性能全部问题的核心都集中反映在车轮在沙地上的附着性能和滚动阻力上,行走机构与沙地的相互作用性质决定着车辆的沙地行驶性能。

总之,车辆沙地行驶性能的概念应该是以车辆行走机构与沙地的相互作用问题为核心,以通过性为主,兼顾稳定性、平顺性等的沙地-车辆系统的性能。

第三节 沙漠车辆的应用领域

一、开发利用沙漠资源

我国西北沙漠地区蕴藏着丰富的矿产资源,已探明的石油储量超过 350 亿吨。其中,占地约 32 万平方公里的新疆塔克拉玛干沙漠就已探明有 150 多亿吨的石油。随着经济建设的发展,我国已着手开发塔克拉玛干沙漠油田。不久,一个美丽富饶的石油城将拔地而起,耸立在我国西北边疆。

然而,在硬路面上可以为人类代步的常规轮式汽车,在沙漠上行驶时将会失去通过能力。此外,发动机过热、空气滤清器阻塞、暴露的运动机构遭受严重的磨损等也是沙漠行驶环境所特有的问题。因而使得沙漠资源开发与该地区的经济建设受到交通运输工具的制约。

为解决沙漠地区的交通运输工具问题,有关高等院校、研究所等纷纷成立跨部门、跨学科的课题组,研究开发沙漠车辆。解决车辆沙地行驶性能问题之关键是行走机构的设计,即:通过对行走机构与沙地的相互作用过程进行合理的计算、分析,找出使车辆下陷小,从而行驶阻力小,且牵引性能高的行走机构。所以说,车辆行走机构与沙地的相互作用分析的有效理论分析方法是解决上述关键问题的关键性基础技术。本书所提供的车辆沙地行驶性能理论分析方法就可以直接应用到沙漠车辆的设计中,是沙漠车设计的基础理论,因而有广阔的应用前景。

在高科技迅速发展的今天,研制沙漠车不仅仅是为开发沙漠

石油资源，其更重要的意义在于，它是人类全面向沙漠进军的工具。1984年，钱学森教授提出了沙产业的构思：我们必须应用人类全部的现代化科学技术，包括高新技术，找出高效的太阳能生物转化器，利用这种转化器，将沙漠地区的太阳能转化成生物制品。从本质上说，人类日常生活中消耗的能源、吃的粮食、水果、蔬菜及肉，都是通过植物的叶绿体转化的太阳能的不同形态。可见，如果我们找到了一种生物和技术，能建立“叶绿素工厂”，那么钱学森教授的沙产业理论就可实践了。微藻是地球上最原始的一种单细胞生命体，结构简单，生命周期短，也是地球上最早出现的自养植物，它存活时间最长、分布地域最广，沙漠中的江河湖泊、盐湖沼泽、临时性积水等都有微藻。多年来，许多国家已建立了不同类型养殖装置，并已形成产品。因此，选定微藻作为沙漠中极为丰富的太阳能的转化器，将有广阔的前景。

沙漠地区的工程建设也离不开沙漠车辆。例如：国土面积约20000平方公里的以色列，60%为荒漠。1992年，以色列计划投资20亿美元，开挖一条连接死海和红海的运河。丹·扎斯拉夫斯基教授主持该项目，他将沿河安置一系列气流发电塔，其形状为底部直径约305 m、高915 m的尖顶塔，海水被水泵抽至塔顶，用喷头喷下，水滴遇到干热空气后迅速蒸发。下沉的冷气流用来驱动发电机。这种设备既可发电，又可产生淡水，比核电站和火电站都便宜。

由上述可见，开发利用沙漠资源对人类的生存和发展有着极其深远而重要的意义，因而沙漠车辆研究开发的意义不言而喻。

二、军用车辆研究

车辆的机动性是军事战术原则中强调的重要性能，尤其是越野机动性，即松软地面机动性、雪地机动性和高速通过不平路面的机动性。显然，如果能够有效地通过敌人所不能通过的地区，或以较高的速度、灵活地通过相同的地区，那么就将有一个决定性的、超过敌人的优势：可以随意地迅速分散，能够利用敌人所

屏拒的地区，在敌人有时间重新集结之前，从敌人意想不到的方向进行闪电式攻击。我国西北地区分布着广阔的沙漠及沙漠化土地，穿越该地区的军队就应具有足够的沙地机动性。另一方面，我国数千公里的海岸线及众多的岛屿上，还分布着大面积的沙滩地带。所以，提高军用车辆的沙地机动性已成为国防建设的重要要求。

早期，军队的运动和战斗主要靠步行。随着摩托化车辆的出现，机械化运输代替了人力、畜力运输。最开始采用的军用车辆只是常规商用车辆的改制品，而民用车辆是为公路而设计的，其性能是在公路比较理想的环境内来评价的。公路和车辆的同时发展使得民用车辆对于军事使用的适用性降低。在难以通行的无人地区，如果机动性不够，就易于被敌人封锁、攻击，或使军队行军的路上总耗时增加；现代核战场要求军队极其分散，而各分散位置之间的后勤支援和联络的需要必然增大。这就对改进车辆机动性提出了更高的要求，尤其是高度的越野机动性和高的越野行驶速度。这些增加的需要只能由许多具有高度越野机动性的车辆来满足。

沙漠地区的军事行动要求装备沙地通过性优良的车辆。彻底改善车辆沙地机动性之关键是，在给定的任务环境下车辆行走机构的设计，而行走机构设计之关键技术是所采用的理论与试验方法，这也正是“车辆沙地行驶理论”研究探讨的核心问题。

三、农业机械

农业机械要在农田土壤上作业。首先农业机械必须解决松软土壤上的通过性问题。其次，农业机械行走机构须尽可能地减少对农田土壤的压实，一方面可减少土壤结构的破坏，保护植物；另一方面，减少压实可减少再耕作时农业机械的能量损耗，这是许多学者重视并关心的问题。再次，耕作过程中土壤工作部件与土壤间的相互作用影响耕作效果和能量消耗。另外，粮食收获与播种机械中涉及到粮食与工作部件间相互作用问题，它决定