

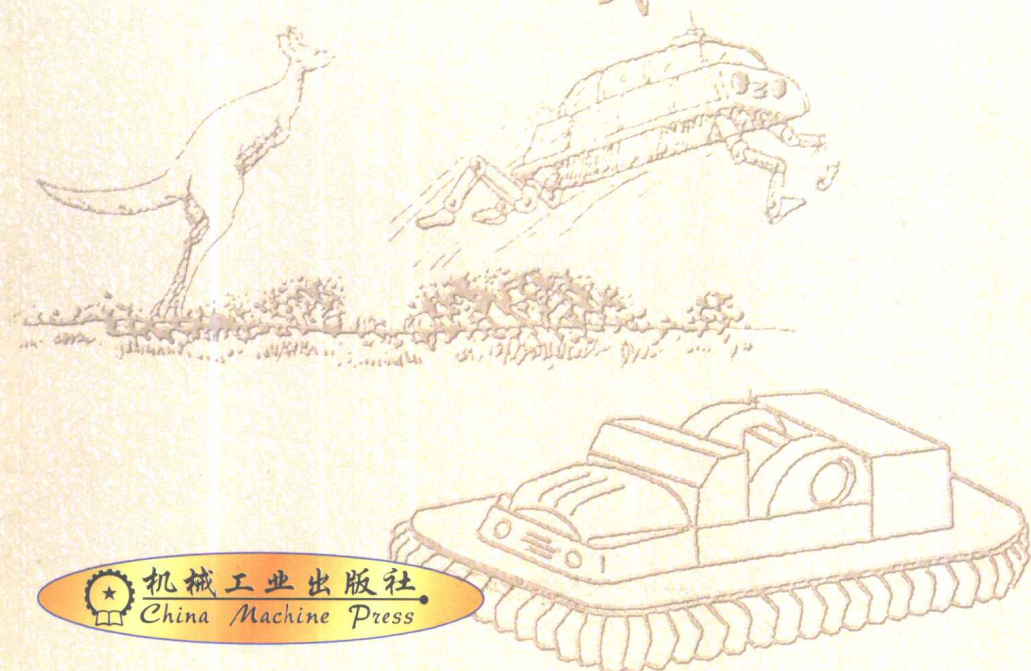
华夏英才基金资助出版

机械工业出版社高水平著作出版基金项目

车辆行走机构形态学及 仿生减粘脱土理论

Morphology of Vehicle Running Gear & Theory of
Reducing Adhesion and Scouring Soil

陈秉聪 著



机械工业出版社
China Machine Press

**车辆行走机构形态学及
仿生减粘脱土理论**

**Morphology of Vehicle Running
Gear & Theory of Reducing
Adhesion and Scouring Soil**

陈秉聪 著



机械工业出版社

本书是在作者及科研小组同志多年来科研成果的基础上总结而成的。书中主要根据仿生学原理对在松软地面(沼泽、水田、沙漠、滩涂等)上车辆行走机构的形态及仿生减粘脱土机理和技术进行了探讨及论述,以使车辆在上述松软地面上具有较大的驱动力、机动性及越障能力,并减少土壤对车辆和触土部件的粘附,以降低其行驶阻力,提高车辆和触土机具的效率。

本书分为两篇。第1篇车辆行走机构形态学与仿生学,阐明了车辆行走机构形态学的含义,车辆行走机构与仿生学的关系,仿生学的意义及其研究方法,仿生学在改变车辆行走机构形态学中的应用以及车辆行走机构形态学的发展趋势等;第2篇仿生减粘脱土理论及技术基础,回顾了该领域的研究成果及其发展趋势,论述了土壤粘附的基本理论、土壤分形及其对粘附的影响、地面机械减粘脱土的方法和技术以及生物脱附原理与脱附减阻仿生学等。

本书可供车辆和农机行业的工程技术人员以及高等学校车辆工程和农机工程专业教师、研究生与大学生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

车辆行走机构形态学及仿生减粘脱土理论/陈秉聪著.

—北京:机械工业出版社,2001.8

ISBN 7-111-09107-8

I. 车… II. 陈… III. ①车体结构—形态学②车体结构—仿生 IV. U270.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第045759号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码 100037)

责任编辑:赵爱宁 版式设计:冉晓华 责任校对:张佳

封面设计:姚毅 责任印制:郭景龙

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2001年10月第1版·第1次印刷

850mm×1168mm^{1/32}·7 375印张·196千字

0 001—2 000册

定价:20.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677—2527

ABSTRACT

This book is the conclusion according to the achievement in scientific research group of former Jilin University of Technology in past twenty years.

In this book according to the principles of bionics the morphology of vehicle running gears and theory of reducing adhesion and scouring soil in such soft terrain as swamp, paddy field, sand and beach are explored and discussed, regarding the vehicle pass over these fields with larger driving force, higher mobility and ability to cross over obstacles. And also for reduction of soil adhesion and moving resistance to vehicle and soil-engaging parts and increase of their efficiency, bionic anti-adhesion theory and techniques have been developed in recent years.

This book is divided into two major parts: the first part presents basic conceptions in the morphology of vehicle running gears and its meaning discusses the relation between vehicle running gear and bionics, and describes the state of arts and the trend of the morphology of the vehicle running gears. The second part is devoted to the theory and techniques of reducing adhesion and scouring soil for terrain-machine and soil-engaging parts by bionics, including survey of previous work of this field, the fundamental theory of soil adhesion, soil fractals and their effects on adhesion, the methods and techniques for reducing adhesion and scouring soil of terrain machines, the principle of reducing adhesion of living creature and bionics of reducing adhesion etc.

This book is recommended as a reference to graduate students,

vehicle and agricultural machinery engineers, teachers of the university, scientists of this field.

Chen Bingcong

Member of Chinese Academy of Engineering

Professor of Jilin University

Changchun, P. R. China

前 言

自古至今，人类的运输工具几乎都采用轮子作为车辆的行走机构，它已经成为车辆的常规行走机构。到今天，它的应用似乎已达到顶点。装有轮胎的车辆行驶在公路上特别是在高速公路上，是最有效的运输工具，它高速、平稳、机动灵活。因此，轮式车辆被广泛地采用，经久不衰并继续发展改进。

自然界的地面构成十分复杂，有沼泽、沙漠、水田、滩涂等松软地面；地形也多有不同，有山地、沟渠、梯田等崎岖地形。显然，轮胎式行走机构已不能满足这样复杂的地面环境的要求，而且在松软地面上行驶时，土壤粘附严重，导致车辆效率很低甚至不能行驶。因此，运用仿生学原理对车辆行走机构形态的研究改进和减粘脱土仿生的研究就显得十分必要。

仿生学应用到改进车辆行走机构的设计及对行走机构与触土部件的减粘脱土的研究，尚处于初级阶段。本书对原吉林工业大学地面机械仿生技术部门开放研究实验室的科研小组 20 余年来对仿生行走机构及仿生减粘脱土的研究成果进行了综合总结，对仿生学在工程中应用的探索具有十分重要的学术价值。发展适应多种环境（特别是松软地面及崎岖地面）的车辆行走机构形态学的仿生设计及机具触土部件仿生减粘脱土降阻技术，对国民经济的发展具有应用价值。

迄今为止，尚未见到国内外系统阐述车辆行走机构形态学及减粘脱土工程仿生的书籍，有的也是极少数零散论文及部分章节。

本书通过对仿生学原理的阐述，结合环境条件（特别是地面环境），从理论上和结构设计上对车辆行走机构形态学及触土部件减粘脱土进行仿生研究，是一个新的学术思想和大胆的尝试。

作者对原吉林工业大学地面机械仿生技术部门开放研究实验室的科研小组的全体同志及历届博士研究生、博士后等同志的辛勤努力表示感谢，特别是在本书撰写过程中，吉林大学的佟金特聘教授、青岛大学的霍炜讲师、周键秘书的热情而细微的帮助，表示衷心的感谢；在科研课题进行中，得到国家自然科学基金、高等学校博士学科点专项科研基金、中国工程院科学基金、吉林省科技基金、华夏英才基金及机械工业出版社的大力支持，在这里一并表示感谢！

由于作者水平所限，本书内容又涉及相互交叉的多个学科，缺点错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

陈秉聪于吉林大学

2001 年 1 月 24 日

目 录

ABSTRACT

前言

CONTENTS

主要符号表

第 1 篇 车辆行走机构形态学与仿生学

绪论	1
1.0.1 引言	1
1.0.2 车辆形态学的含义	2
1.0.2.1 什么是车辆形态学	2
1.0.2.2 车辆行走机构形态学在学术上及国民经济中的重大 意义	2
第 1 章 车辆形态学与仿生学	4
1.1.1 概述	4
1.1.2 什么是仿生学	4
1.1.3 仿生学的研究方法	6
1.1.4 我国车辆形态学与仿生学的发展	7
第 2 章 仿生学在改善车辆行走机构形态学中的应用	9
1.2.1 半步行轮及步行轮	9
1.2.1.1 半步行轮	9
1.2.1.2 步行轮	23
1.2.2 在崎岖地面行驶及跨越沟壕的仿生行走机构	39
1.2.2.1 列车概念与铰接车辆	40
1.2.2.2 Metrak 仿生车辆	47
1.2.3 半浮式仿生行走机构的理论与实践	48
1.2.3.1 机耕船	48

1.2.3.2 四足步行机耕船	59
1.2.3.3 气垫车辆	65
1.2.4 生物之谜给科学技术带来的启示	74
1.2.4.1 21 世纪新型仿生材料——蜂窝板	74
1.2.4.2 仿生驼蹄轮胎	77
1.2.4.3 仿生企鹅车和无轮车	82
1.2.4.4 蠕动式步进船和推拉式平台	84
1.2.4.5 螺旋驱动行走机构	90
1.2.4.6 仿牛蹄水田轮	94
1.2.4.7 具有台阶式轮子的车辆	95
1.2.4.8 步行式车辆	97
第 1 篇 参考文献	115

第 2 篇 仿生减粘脱土理论及技术基础

绪论	118
2.0.1 土壤机械的土壤粘附	118
2.0.2 该领域研究的回顾	119
2.0.2.1 土壤粘附的测量	119
2.0.2.2 土壤粘附机理	120
2.0.2.3 土壤粘附法则	121
2.0.3 土壤粘附研究现状及其发展趋势	123
第 1 章 土壤粘附的基本理论	125
2.1.1 用毛细管作用解释粘附力的性质	125
2.1.2 温度对表面张力的影响	130
2.1.3 粘附的热动力学分析	131
2.1.4 界面水膜特性分析	133
2.1.4.1 两板内侧面与水的接触角分别为零和锐角	133
2.1.4.2 两板内侧面与水的接触角分别为锐角和钝角	135
2.1.5 界面水膜粘滞力分析	136
2.1.6 润湿现象及润湿能力	137
2.1.7 土壤粘附界面状态与法向粘附力	138
2.1.7.1 完全不接触微突体	140
2.1.7.2 液体(水)点接触微突体	141

2.1.7.3 水环接触微突体	141
2.1.7.4 水环接触土粒	142
2.1.7.5 水膜接触微团聚体	142
2.1.7.6 水膜接触土块	143
2.1.8 化学吸附的土壤粘附机理	144
2.1.8.1 触土部件的表面性质	144
2.1.8.2 土壤表面的性质	146
2.1.8.3 土壤水及水中离子	147
2.1.8.4 土壤粘附的化学吸附模式	147
2.1.9 小结	149
第2章 土壤分形及其对土壤粘附的影响	150
2.2.1 引言	150
2.2.2 土壤颗粒尺寸分布分形	151
2.2.3 土壤颗粒表面分形	152
2.2.4 土壤粘附	153
2.2.5 小结	154
第3章 地面机械减粘脱土的方法及技术	155
2.3.1 充气及充液式减粘脱土法	155
2.3.2 热脱附减粘脱土法	157
2.3.3 振动脱土法	159
2.3.4 脱土减粘的电渗法	160
2.3.4.1 电渗法原理	160
2.3.4.2 非光滑表面电渗原理及试验设备	162
2.3.4.3 非光滑表面电渗极板面积尺寸的优化设计	164
2.3.5 机械式减粘脱土法	167
2.3.5.1 采用弹性及链节式零件	167
2.3.5.2 采用刮削方法	168
2.3.6 表面改性减粘脱土法	171
2.3.7 表面改形减粘脱土法	172
2.3.8 小结	173
第4章 生物脱附原理与脱附减阻仿生学	174
2.4.1 自然界生物的启示	174
2.4.2 土壤动物防粘原理	175

2.4.2.1 土壤动物体表的几何形态	175
2.4.2.2 体表形态对减粘脱土作用的分析	181
2.4.3 仿生推土板减粘降阻机理	184
2.4.3.1 蛻螂对人类的启发	184
2.4.3.2 仿生推土板及其表面模型	185
2.4.3.3 推土板—土壤系统的力学模型	187
2.4.3.4 仿生推土板减粘降阻分析	189
2.4.4 土壤动物体表成分与憎水性	192
2.4.4.1 试验与观察	192
2.4.4.2 白口铁的化学成分	195
2.4.4.3 含磷白口铁的微结构特征	197
2.4.4.4 减粘脱土分析	197
2.4.5 生物电系统对减粘脱土的影响	198
2.4.6 土壤动物的体表柔性	199
2.4.7 土壤动物体表分泌液	204
2.4.7.1 液体的收取方法	204
2.4.7.2 试验结果分析	206
2.4.8 小结	207
第2篇 参考文献	209
结束语	218

CONTENTS

Preface

Nomenclature

PART 1 MORPHOLOGY OF VEHICLE RUNNING GEARS

Introduction

1.0.1 Prolegomenon

1.0.2 Meanings of vehicle morphology

1.0.2.1 What is vehicle morphology

1.0.2.2 Scientific and practice importance of the morphology
of vehicle running gears

Chapter 1 Morphology and bionics of vehicle

1.1.1 Prolegomenon

1.1.2 What is bionics

1.1.3 Research methods of bionics

1.1.4 Morphology of vehicles running gear and bionics

Chapter 2 The applications of bionics in morphology of the vehicle running gears

1.2.1 Half walking wheel and walking wheel

1.2.1.1 Half walking wheel

1.2.1.2 Walking wheel

1.2.2 Bionics walking mechanism passing over the uneven terrain and trench

1.2.2.1 Idea of vehicle trains and articulated vehicles

1.2.2.2 Metrack-bionics vehicle

1.2.3 Bionics running gears according to the semi-floating the theory

1.2.3.1 Boat tractor

1.2.3.2 Four foot walking boat tractor

1.2.3.3 The air cushion vehicles

1.2.4 Enlightenment to science and technology from animals

1.2.4.1 New type bionics material of 21 Century-honeycomb plate

1.2.4.2 Bionics camel foot tire

- 1.2.4 3 Modeled penguin vehicle and wheel less vehicle
- 1.2.4.4 Worming step boat and push-crawl plat form
- 1.2.4 5 Screw drive walking mechanism
- 1.2.4 6 Bionics bull foot wheels for paddy field
- 1.2.4.7 Vehicle with stepping wheel
- 1.2.4.8 Walking vehicle

References (for Part 1)

PART 2 THEORY AND TECHNIQUES OF REDUCING ADHESION AND SCOURING SOIL FOR TERRAIN MACHINE BY BIONICS

Introduction

- 2.0.1 The adhesion of soil to terrain machines
- 2.0.2 Surrey of previous work of this field
 - 2.0.2.1 Measurement of soil adhesion
 - 2.0.2.2 The mechanism of soil adhesion
 - 2.0.2.3 Law of soil adhesion
- 2.0.3 The state of arts and prospect of the research in soil adhesion

Chapter 1 The fundamental theory of soil adhesion

- 2.1.1 The behavior of adhesive forces captained by function of the capillary
- 2.1.2 The influence of temperature on the surface tension
- 2.1.3 The thermodynamic analysis of adhesion
- 2.1.4 Analysis of characters of the interface water film
- 2.1.5 Analysis of the viscous force of the interface film
- 2.1.6 Wetting phenomina and wettability
- 2.1.7 The state of adhesive interface of the soil and the normal adhesive force
- 2.1.8 Soil adhesion mechanism of chemical absorption
- 2.1.9 Summary

Chapter 2 Fractals of soil and the influence on soil adhesion

- 2.2.1 Introduction
- 2.2.2 The fractal of the distribution of the soil particles size
- 2.2.3 The surface fractal of soil particles
- 2.2.4 Adhesion of soil
- 2.2.5 Summary

Chapter 3 Methods and techniques of reducing adhesion and-scouring soil

- 2.3.1 The air and liquid injection type
- 2.3.2 Reducing soil adhesion by heating
- 2.3.3 Reducing soil adhesion by vibration
- 2.3.4 Reducing soil adhesion by electro-osmosis
 - 2.3.4.1 Theory of electro-osmosis
 - 2.3.4.2 Experimental equipment of non-smooth surface electro-osmosis
 - 2.3.4.3 Optimizing design of non-smooth surface electro-osmosis
- 2.3.5 Reducing adhesion and scouring soil by mechanical methods
 - 2.3.5.1 Elastic and chain element type
 - 2.3.5.2 Scraping type
- 2.3.6 Modifying the surface properties of the implements
- 2.3.7 Reforming the surface shapes of the implements
- 2.3.8 Summary

Chapter 4 The principles of reducing adhesion of living creature in anti-adhesion and bionics of reducing adhesion

- 2.4.1 The principles of reducing adhesion of animals and doing it by bionics
- 2.4.2 Principles of soil animals to prevent adhesion
 - 2.4.2.1 The geometric morphology of soil animal body surface
 - 2.4.2.2 Analysis of the function of the geometric morphology of the body surface to reducing adhesion and scouring soil
- 2.4.3 The mechanism of reducing adhesion and resistance by the bionic bulldozing plate
 - 2.4.3.1 Enlightenment from dung beetle
 - 2.4.3.2 Bionic bulldozing plate and its surface model
 - 2.4.3.3 The force model of bulldozing-soil system
 - 2.4.3.4 Analysis of the reducing adhesion and resistance of the bionic bulldozing plate
- 2.4.4 Constitution and hydrophobic of the body surface of soil animal
- 2.4.5 The influence of system to reducing adhesion and scouring soil
- 2.4.6 The flexibility of the bioelectricity body surface of the soil animals
- 2.4.7 The body surface liquid of the soil animals
- 2.4.8 Summary

References (for Part 2)

第 1 篇 车辆行走机构形态学与仿生学

绪 论

1.0.1 引言

人类陆地运输历史可由下列经过标记：最初，人用自己的腿来运输；几乎在同一时期，人训练了动物，使它携带人或货物作为运输工具。这样几个世纪以来，动物成为人类最重要的运输工具。后来人类发明了轮子及热机，修筑了公路，大大提高了轮式运输工具的效率。到今天，轮子的应用似乎已达到了顶点。几乎所有地面车辆的行走装置基本是轮子（履带也是轮子行驶在铺于地面的铁板上）。车辆的形态也是根据轮子的安装方式来设计的。事实证明，轮子在公路上，特别是在高速公路上，是最有效的运输工具，它平稳、高速、机动、灵活，因此，轮式车辆被人们长期广泛地采用并经久不衰，也是很自然的事情。但自然界的地面构成是十分复杂的，有沼泽、沙漠、水田，也有旱地；地形各有不同，有山地，也有沟渠。轮式车辆已不能满足这样复杂环境的要求，需要根据环境的条件，改变车辆行走机构的形态，以适应不同的需要。我国人均国土面积仅为 12 亩 (7999.2m^2)[○]，为世界人均量的 29%；山地丘陵地约占 2/3；半干旱、干旱地区约占国土的 1/2；水田面积约 4.5 亿亩 (2999.7亿 m^2)，占耕地的 40% 以上，而其粮食产量却占 60%，且目前仍在发展中。我国

○ 1998 年的统计资料。

南方许多地区每年两季或三季稻，水田作业任务困难又繁重，黄淮海地区 1 亿多亩（666.6 亿 m^2 ）地需要改造，东北三江平原沼泽地，黄河、长江、珠江等河套三角洲和滩涂地区等数亿亩湿地的开发，西北、东北及沿海的沙漠、沼泽及滩涂地区油田，均急需解决车辆行走机构的形态，以提高车辆的行走效率和通过性能。因此，研究改进车辆行走机构的形态，对我国的农业工程、工程机械、运输机械、军事机械等都有广阔的应用前景。

地面车辆形态适应地面条件，只是改善车辆性能的一个方面。在车辆与地面接触的过程中，各部件的土壤粘附问题尤为突出，同样会降低车辆的工作效率，影响其作业的质量，增大其能耗，甚至因行走系统积泥而无法行驶，因此，土壤粘附问题的解决在工农业生产、军事上都具有重要的实际意义，并可为其他方面的物料粘附问题的解决提供研究基础。

1.0.2 车辆形态学的含义

1.0.2.1 什么是车辆形态学

车辆形态学就是要研究在不同外界环境、用途和使用性能中，车辆的形态如何适应的一门学科。

1.0.2.2 车辆行走机构形态学在学术上及国民经济中的重大意义

研究车辆行走机构的形态学，就是为了从理论上分析车辆行走机构的形态学，即它的形状、尺寸、重量和功率等形态参数之间的相互关系及其对车辆多种性能的影响，探讨在不同地区、不同环境、不同用途时最合理的车辆及行走机构的形态，以便获得良好的通过性和最大的经济效益，并在理论分析的基础上，确定车辆行走机构的设计参数、性能指标。这在学术上具有重大的意义。

研究车辆行走机构的形态学，可以根据我国的具体情况创制出能适应不同地区自然环境和用途的最佳最经济合理的行走机构。这对我国农业、工业、军事等都起到推动作用。

土壤粘附的研究涉及表面科学、物理化学、土壤学、土壤力学、材料科学与工程、土壤动物学及各种表面分析技术等多种学科领域,土壤粘附研究同时可以促进这些学科领域的发展,从而更显示了其重要的理论价值。

许多国家对松软地面的开发利用给予了足够的重视,国内外许多学者多年来一直致力于这方面的研究,特别是在国内有关水田、沼泽、沙漠等地通过性的研究。美国、前苏联等国家从40年代开始就一直研究车辆在松软地面的通过性。但是,他们的研究工作主要局限于改变原有车辆的某些参数,如加大轮胎尺寸、加长履带、改变轮胎气压等,因而始终未能取得突破性的进展。60年代美国开始了非常规行走机构的研究,从而涉足仿生学领域。其他国家如前苏联、日本、澳大利亚等也相继开展这方面的研究,但大多数尚处于科学试验阶段,未能真正应用到实际当中去。

仿生学给人们带来了新的启示,人们模拟生物系统的原理来建造技术系统,可以“形仿”,模拟生物的外形来改造车辆的外部“形态”、内部构造,使之适应周围的环境;也可以“神仿”,即研究模拟生物系统的结构性质、能量转换和信息传递过程,用以改善或创制一些适应特殊环境与要求的科学领域。因此,本书采用仿生学(Bionics)原理,从“形仿”与“神仿”两方面来解决车辆的通过性及减粘降阻问题。

有关土壤的力学性质及车辆与土壤相互作用问题,作者已在拙著《土壤-车辆系统力学》及《步行车辆理论及脚踝设计》两书中作了阐述,本书不再重述。