

当代科技重要著作·农业领域

机械土壤动力学

曾德超 编著

北京科学技术出版社

机械土壤动力学

曾德超 编著

北京科学技术出版社

(京)新登字 207 号

内容提要

本书是一本理论性专著,力图为这门薄弱学科新建立一个理论体系。书中系统地介绍了有关的理论基础和国内外近年的研究进展。内容包括学科现状和趋向,研究方法和手段,土壤本质和性质行为机理,静载下土壤的本构模型和动载下载荷动特性的效应,土壤工艺元素(含座机基础隔震)和耕作、挖掘、行驶的基本原理。

本书可供有关的教学、科研和工程技术人员参考,亦可作为高等学校农业机械设计制造、农业机械化、农田水利工程、工程机械、汽车拖拉机、军事工程、采矿工程等有关专业的研究生及高年级本科生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械土壤动力学 / 曾德超编著. — 北京: 北京科学技术出版社, 1995.1
ISBN 7-5304-1602-2

I. 机… II. 曾… III. 土壤机械组成-土壤动力性质
IV. S152.9

北京科学技术出版社出版
(北京西直门南大街16号)

邮政编码: 100035

各地新华书店经销

一二零一印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 55.75印张 1391千字

1995年1月第一版 1995年1月第一次印刷

印数 1—1000册

定价: 220.00元

序

人类对地球表面及海底一层松散介质进行日益增长的规模施工,消耗巨额能源、物料、人力和资金,因而,要求不断开发和改进高功能的机械装备和作业方法;同时还要耕作和保护人类赖以生存的土壤资源,改进生态环境。对土石半无限松散介质在机械施工中动力学响应和行为的深入研究和理解,开拓规律性知识,建立理论体系,发展学科等工作无疑将为技术和经济发展提供潜力和可能性。然而土壤属于结构和响应都十分复杂的一类介质,其理论分析和数值处理都十分困难和复杂。虽然机械土壤动力学方面的系统而深入的实验研究早在第二次世界大战前夕就已开始,但迄今国内外所出版的为数不多的有关土壤-机械关系著作,基本上立足于土壤静力学、极限平衡分析和唯象分析上,尚缺少突出土壤动力学特点的理论体系。

土建方面的土动力学、岩石动力学研究地上地下、土工水工、海底工程等大型建筑地震、爆破、波浪等动载下的平衡稳定问题,工程地质动力学着重研究高速波在地壳中的传播规律,以求应用于地震预测、石油和矿藏勘探等工程问题。机械方面的土壤动力学则着重研究属于快速施载所引起的大变形、破坏和流动,研究机器作用下土壤动态行为的普遍规律。可见土建方面的土动力学、岩石动力学,地质方面的地质力学与机械方面的土壤动力学所研究的问题、条件和特点是不尽相同的。

本书是在机械土壤动力学方面的一个尝试。本书在体系上从土壤本质、基本属性和土壤性态行为的机理入手,作为处理复杂问题中正确判断方向的基础。同时,在静载(慢载)下土本构理论模型的基础上,着重阐述载荷动特性对土壤行为的效应,将往往总是复杂的作业过程抽象为由少数基本的、简单的工艺元素所组成,给出这些工艺元素在施载速率影响下的预测公式,这样可望有助于实际问题的解决,亦有利于理论系统的发展。在理论系统的建立中,充分注意吸收土建土力学、土动力学中与机械土壤动力学有关的一些基础内容,进而搜集最近几年来国内外所发表有关机器-土壤关系的研究报告以及作者所在实验室的一些研究成果,编撰了土壤耕作、土方挖掘和地面行驶驱动原理这一部分的内容。

全书共分绪论和七章,包括学科的研究对象、特点、现状、方法和手段;土质概论和土壤行为机理;载荷特性,土的慢载特性及土的动载特性;土壤工艺元素(含座机基础隔震);土壤耕作原理;土方挖掘原理;以及地面行驶和驱动原理。

本书编写过程中协助整理资料的有北京农业大学研究生傅棋、朱勇华、杨邦杰、练国平、雷廷武、姚禹肃、隋红建等博士。负责全书图文加工核对的是叶梅芬副研究馆员;全书改稿和排版工作由刘香菊同志完成。协助本书稿件抄写和编排工作的有李玉华和张红莲等同志。对本书初稿进行校阅的有:绪论、第一、二、三章李振安副教授;第四、六章杨亚川副教授;第五章马廷玺教授;第七章喻谷源教授,特此致谢。由于目前学科发展程度和研究深度尚有很大的局限,更由于作者个人水平有限,本书遗误和不足之处必定很多,恳切欢迎指正,以便及时改正。

作 者

1990年10月于北京农业大学
机器与土壤植物关系实验室

EAC 7/101

符号说明表

A	面积, 振幅	K_0	静止土压系数
A, B	孔隙水压力系数	k	屈服参数, 抗剪张度,
B	宽度		弹簧常数
c	凝聚强度, 波速	k_i	破坏参数
C_c	压缩指数, 临界粘带系数	l, m, n	方向余弦
C_s	湿胀指数	M	压缩模量, 力矩, $p-q$
d_λ	流动规则中非负常量		线的斜率
$[D]$	弹性矩阵	N	法向力, 加载循环次数
e	孔隙比		Avogadro 常数(6.02×10^{23})
E_i	起始弹性模量	n_p	预压比
E_p	塑性区弹性模量	P	静水压力, 力
E_t	正切弹性模量	P_c	预先固结压强
E_{ur}	卸载弹性模量	Q	塑性势函数
E, E	弹性模量, 应变张量	Q_0	波动力的幅值
E'	偏应变张量	q, q_i	广义剪应力, 破坏时的 q 值
E''	球应变张量	Q_i	承载力
F	力	q'	象征剪应力
f	屈服函数	q_0	无侧限抗压强度
f^*	破坏函数	R_i	破坏比
f_N	自然频率	r, θ, z	圆柱坐标
G	剪切模量	s	样条函数, 剪力, 谱
G_i	起始剪切模量	s	应力张量
G_t	正切剪切模量	s'	偏应力张量
H	硬化参数, 高度	s''	球应力张量
h	Planck 常数 ($6.624 \times 10^{-34} \text{J/s}$)	T	松弛时间, 振动周期
		T_s	延滞时间
I	极惯性矩	tgi	剪胀率
I_1, I_2, I_3	应力不变量	u	位移, 孔隙压强
I'_1, I'_2, I'_3	偏应力不变量	U	应变能
I''_1, I''_2, I''_3	球应力不变量	U'	畸变应变能
J	质量极惯性矩	U''	体变应变能
J_1, J_2, J_3	应变不变量	U_{ij}	单位位移张量
J'_1, J'_2, J'_3	偏应变不变量	W_p	塑性功
J''_1, J''_2, J''_3	球应变不变量	α	角, 参数
K	体积模量, Boltzmann 常数($1.38 \times 10^{-23} \text{J/k}$)	β	角, 破坏面倾角, 应力参数
		γ	角, 工程剪应变

$\bar{\gamma}$	广义剪应变	ρ	质量密度
$\bar{\gamma}$	象征剪应变	σ	应力, 法向应力
γ_8	八面体剪应变	σ' (或 S)	偏应力
γ_s	纯剪应变	σ_c	抗压强度
$\bar{\gamma}_{rt}$	对数剪应变	σ_{ij}	应力张量
γ_σ	偏剪应变	σ'_{ij} 或 S_{ij}	偏应力张量
$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$	主剪应变	σ_{ij}	球应力张量
δ_{ij}	Kronecker δ	σ_m	平均应力
ϵ	应变, 对数应变	σ_t	抗拉强度
ϵ'	偏应变	σ_y	屈服应力
ϵ_{ij}	应变张量	$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	主应力
ϵ'_{ij}	偏应变张量	$\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$	偏主应力
ϵ''_{ij}	球应变张量	σ_8	八面体法向应力
ϵ_m	平均应变	$\bar{\sigma}$	有效应力
$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$	主应变	τ	剪应力
$\epsilon'_1, \epsilon'_2, \epsilon'_3$	偏主应变	τ_t	抗剪强度
ϵ_v	体积应变	τ_8	八面体剪应力
ζ	应变比 ($\zeta = \bar{r}/\epsilon_v$), 阻尼系数	τ_p	驼峰强度
η	应力比 ($\eta = q/p$), 粘滞系数, 纵向压缩 时的粘滞系数	τ_r	残余强度
η'	剪切时的粘滞系数	τ_s	纯剪应力
$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	应变张量不变量	τ_σ	偏剪应力
$\theta'_1, \theta'_2, \theta'_3$	偏应变张量不变量	τ_{max}	最大剪应力
$\theta_\sigma, \theta'_\sigma$	应力角 (罗地德)	$\tau_1, \tau_2, \tau_3,$	主剪应力
$\theta_\epsilon, \theta'_\epsilon$	应变角 (罗地德)	$\tau_{12}, \tau_{23}, \tau_{31}$	主剪应力
λ	拉梅常数	φ	内摩擦角
μ_σ	应力参数 (罗地德)	$\bar{\varphi}$	按有效应力计算的 内摩擦角
μ_τ	应变参数 (罗地德)	φ_n	粒间摩擦滑动阻力角
ν	泊桑比	ψ	相位角, 外摩擦角, 总水势
ν_i	起始泊桑比	χ	放大系数
ν_t	正切泊桑比	ω_{ij}	转动张量
ξ	相对阻尼	ω	转动分量, 角速度
		ω_σ	应力角
		ω_ϵ	应变角
		ω_n	自然角速度

目 录

绪论.....	1	1.6.2 土的基本组织和结构类型	110
0.1 机械土壤动力学的研究对象 和领域的特点	1	参考文献	118
0.2 机械土壤动力学研究状况和趋向	2	第二章 土壤性质行为机理	119
0.2.1 学科前期(1900年以前)	2	2.1 土壤性质行为概述	119
0.2.2 学科初期(1900~1950年)	2	2.2 土壤成分与性质行为的关系	121
0.2.3 学科研究近况(1950年以来)	3	2.2.1 粘土矿物的动力学特性	121
0.2.4 学科研究趋向	5	2.2.2 有机物质对土壤性质行为的影响	124
0.3 土壤—机器相互作用的研究方法和实验 手段	6	2.3 土壤组织结构与土壤性质行为的 关系	125
0.3.1 研究方法概述	6	2.3.1 阿特伯限的物理含义	125
0.3.2 土壤—机器相互作用实验手段	8	2.3.2 重塑与压密土的组织	126
0.3.3 模型试验和相似原理	29	2.3.3 土壤组织随时间的变化	126
0.3.4 双关联式经验法	50	2.3.4 土壤的敏性	127
0.3.5 模拟式半经验法	55	2.3.5 触变硬化	127
参考文献	63	2.3.6 土壤组织与性质行为的关系	128
第一章 土质概论	65	2.4 颗粒间应力及土中水压力的平衡	131
1.1 土壤矿物	65	2.4.1 颗粒间的力	132
1.1.1 土壤三相相互间的原子和分子力	66	2.4.2 有效应力原理	136
1.1.2 晶体及其性质	67	2.5 土壤的容积变化行为	137
1.1.3 矿物表面性质	68	2.5.1 各种土壤的压力—孔隙比关系	137
1.1.4 土壤中的非粘土矿物	70	2.5.2 物理作用所引起土壤容积变化的 机制	139
1.1.5 粘土矿物	70	2.6 土壤强度与变形行为机理	141
1.2 土壤的形成	77	2.6.1 概述	141
1.2.1 造壤过程	77	2.6.2 土壤变形作为一速率过程	145
1.2.2 土壤剖面及其发展	80	2.6.3 剪抗作为一速率过程	148
1.3 表层土壤的分类	82	2.6.4 土壤颗粒固体表面之间的摩擦	152
1.3.1 土壤按发生学和按属性的分类	82	2.6.5 剩余强度	155
1.3.2 我国土壤的分类和分布	85	2.6.6 应力—应变—时间行为与流变模型	157
1.3.3 土质分类	87	2.7 土壤中的传导现象	163
1.4 土壤中的水	93	2.7.1 传导现象概述	163
1.4.1 土壤中水的结构	93	2.7.2 水传导率	167
1.4.2 土壤中水的分类	96	2.7.3 土壤中电动学现象	174
1.4.3 土粒—水—溶质系统	100	2.7.4 土壤中的热流动	177
1.5 土壤气体	105	参考文献	187
1.5.1 土壤气体的结构类型和组成	105	第三章 土壤动力学的理论基础	189
1.5.2 土中自由气体和密闭气体	106	3.1 概述	189
1.5.3 溶解气体	107	3.2 机械对土壤所施载荷的特性	190
1.5.4 表面吸附气体	108	3.3 土壤介质在静载下的特性和行为——土壤 静力学基础	194
1.6 土壤组织结构和构造	108	3.3.1 土壤的应力与应变	194
1.6.1 土壤组织结构和构造的基本概念	108		

3.3.2 标准慢载试验下土样的应力—应变关系	201	4.2.3 桩的极限荷载	380
3.3.3 土体中一点的应力张量—应变张量关系	208	4.3 贯入	387
3.3.4 静慢载标准试验下土壤的屈服与失效类型	225	4.3.1 机具零部件的缓慢贯入	387
3.3.5 土壤在复合应力下的屈服准则和强度理论	236	4.3.2 撞击贯入作用	391
3.3.6 土体在复合应力下的本构理论模型	243	4.4 压密	393
一、弹性本构理论模型	243	4.4.1 侧限压缩(干土)或固结(湿土)	395
二、弹塑性本构理论模型	249	4.4.2 考虑侧向变形的压缩(干土)或固结(湿土)	399
三、颗粒密集材料的剪胀模型	264	4.4.3 固结压缩	400
四、流变理论	267	4.4.4 实际工作中密度场的计算	404
3.4 载荷动态特性对土壤介质行为的效应	283	4.4.5 土的振动压密	412
3.4.1 应变速率效应问题	283	4.5 切削	414
一、应变速率对孔隙水压力的影响	284	4.5.1 纯切削模型	416
二、应变速率对应力—应变关系的影响	285	4.5.2 两面楔切削	419
三、应变速率对抗剪强度的影响	286	4.5.3 宽齿切削	421
四、应变速率对本构理论的影响——K. W 模型	286	4.5.4 直立窄齿切削	422
3.4.2 循环重复加载效应问题	288	4.5.5 刀板切削动力模型	433
一、循环重复载荷下土壤的疲劳强度	288	4.6 破碎	438
二、循环载荷下的粘弹塑性本构模型	293	4.6.1 破碎理论	438
三、循环载荷对流变特性的效应	299	4.6.2 破碎的粒度分布	439
3.4.3 冲击载荷效应(一)——土的振动	301	4.6.3 破碎比功学说	441
3.4.4 冲击载荷效应(二)——土中波的传播	314	4.7 粘附、摩擦与磨损	443
一、土中的弹性波	314	4.7.1 粘附与脱土	443
二、杆件中的粘弹性波	323	4.7.2 土壤的外摩擦	447
三、杆件中的塑性波	325	4.7.3 磨损与自磨锐	454
四、土中波的传播	326	4.8 机器基础	457
五、波的反射与折射	329	4.8.1 概述	457
六、爆炸载荷所产生的应力波	331	4.8.2 应用集总参数法分析机器基础振动	459
3.4.5 循环载荷的土壤液化效应	335	4.8.3 冲击型机器的基础	466
一、液化机理	335	4.8.4 振动和波的隔离	471
二、液化判据	336	参考文献	472
三、影响液化特性的因素	337	第五章 土壤耕作	474
四、液化的实验室实验	338	5.1 土壤耕作的目的与作用	474
参考文献	343	5.2 土壤耕作与植物生长发育的动态关系	475
第四章 土壤工艺元素	345	5.2.1 植物和土壤水的关系	475
4.1 挡土	345	5.2.2 根的物理环境	507
4.1.1 静载荷下的土压力	345	5.2.3 种床的土壤环境	511
4.1.2 动载土压力问题和动载下的挡土	357	5.2.4 不恰当耕作的副作用 I——土壤的侵蚀	513
4.2 承载	361	5.2.5 不恰当耕作的副作用 II——土壤的过度压实	523
4.2.1 浅基础极限荷载的计算	363	5.3 土壤耕作设计原理	527
4.2.2 动力承载能力	367	5.3.1 耕作栽培制度(Cropping System)和土壤耕作法	527

5.3.2	机器系统	531	6.5.2	旋转式开沟	675
5.3.3	耕作部件的设计方程	531	6.5.3	链式刮刀开沟器	682
5.3.4	耕作部件的设计	532	6.5.4	清沟	686
5.3.5	耕作部件的形状以及土-机相对位置的几何关系	532	6.6	暗管的铺设和暗沟的开挖	688
5.3.6	部件运动的方式	538	6.6.1	排水设施概述	688
5.4	翻垡部件模型	541	6.6.2	暗管的铺设	689
5.4.1	实现翻垡的途径	541	6.6.3	排水暗沟的开挖	698
5.4.2	滚垡壁犁	543	6.7	螺旋式挖穴和螺旋输送	705
5.5	深松部件	567	6.7.1	螺旋式挖穴部件	705
5.5.1	凿形犁的预测模型	569	6.7.2	螺旋式土壤输送部件	712
5.5.2	铲形深松部件的预测	572	6.8	冻土施工特性	715
5.6	旋转耕作部件	574	6.8.1	土壤的结冻和融化	716
5.6.1	概述	574	6.8.2	冻期土壤的水热运移	718
5.6.2	旋转耕作部件运动学要素	574	6.8.3	冻土的动力学特性	720
5.6.3	旋转耕作部件动力学要素——切土阻力和功耗	581	6.8.4	冬季土方开挖特点	732
5.7	振动耕作部件	591	6.9	岩石施工特点	735
5.7.1	受迫振动	591	6.9.1	岩石的分类、力学性质及强度理论	735
5.7.2	强迫振动	594	6.9.2	岩石的机械破碎	748
5.8	圆盘耕作部件	600	6.9.3	岩石的爆破	790
5.8.1	力的预测模型	601		参考文献	801
5.8.2	圆盘部件所造成的沟底不平度	603	第七章 地面驱动		804
5.9	表土整备部件	606	7.1	地面驱动总论	804
5.9.1	运动学分析	606	7.1.1	地面驱动的性能方程和性能指标	804
5.9.2	动力学分析	611	7.1.2	土壤水平推力(H)的潜势	809
	参考文献	612	7.2	行走装置与土壤相互作用基本模型(I)	
第六章 土石挖掘原理		615		——刚性刺轮	814
6.1	推土与铲运	615	7.2.1	刚性轮的数学模型	816
6.1.1	推土	615	7.2.2	刚轮刺作用下土壤的变形	827
6.1.2	铲运	624	7.3	行走装置与土壤相互作用的基本模型(II)	
6.2	装载	634		——轮胎	838
6.2.1	铲掘物料方法和机组作业方法	634	7.3.1	轮胎在硬地面和在软土上的变形	838
6.2.2	铲掘阻力	636	7.3.2	轮胎切向变形引起的滑转率分量	847
6.2.3	铲斗的形状与参数选择	639	7.3.3	轮胎-土壤界面上应力分布的模型	847
6.3	挖掘斗	642	7.3.4	轮胎性能的计算	849
6.3.1	挖掘机的一些总体参数	642	7.4	行走装置与土壤相互作用的模型(III)	
6.3.2	工作部件种类与铲斗参数	645		——履带	854
6.4	平地、铲抛与夯实	651	7.4.1	履带-土壤关系的特点	854
6.4.1	平地	651	7.4.2	履带-土壤相互作用的数学模型	855
6.4.2	铲抛	661	7.5	地面和土壤对车辆动态特性的作用	863
6.4.3	夯实	667	7.5.1	建立车辆动态特性模型的方法	863
6.5	沟渠的开挖与清理	672	7.5.2	车辆的方向控制及方向稳定性	865
6.5.1	牵引式开沟器	672	7.5.3	乘坐舒适性及货物安全性	877
				参考文献	881

绪 论

0.1 机械土壤动力学的研究对象和领域的特点

机械土壤动力学是土壤科学和力学科学的一个交叉的独特领域,它研究施加于土壤上的各类机械快速作用力(亦含振动和波)与土壤动态行为之间的规律性关系及其应用于土壤—机器系统的技术开发。根据载荷的来源和特性,以及土石材料的领域和工程目的的不同,在机械土壤动力学之外,还出现了土建方面的土动力学(岩土动力学)、工程地质动力学等。

土建方面的土动力学(岩土动力学)着重研究地上、地下、土工、水工、海底工程等往往是大型的建筑物在地震、爆破、波浪等高速、重复或振动载荷下,地基的平衡稳定这类问题中土石动态行为的规律。工程地质动力学着重研究高速波在地壳中传播的规律,以求应用于地震预测、石油及矿藏勘测等工程问题。

机械方面的土壤动力学着重研究往往属于快速施载,并引起大变形和破坏后移动的各种机器作用力对土壤、土、冻土、石进行切削、挖掘、钻削、爆破、推运、耕作或在其上行驶和拖拽等机械作业时,或是座机地基在机器作业时,土壤动态行为的普遍性规律。出于不同专业的需要,出现了越野车辆土力学、耕作与牵引的土壤动力学、工程机械土力学等分支。

与其他土壤动力学领域不同,在耕作土壤动力学中,土壤是作为一种特殊的生物有机物质和人类最基本的一种资源来看待的。在作物生长的周期中,土壤不仅受到机械力的作用,也受到自然力(风力、水力、重力、热力等)的作用。必须把自然力考虑在内,是因为现代化农业的概念,既包含可再生有机物质和原料的生产,亦包含保护自然资源、环境和生态,以便为人类后代留下生存的基本条件。

由于机器在土壤岩石上的作业量大面广,机械领域土壤动力学方面的系统性规律性知识对大量的耕作作业、土方施工、矿物挖掘、越野行驶、固定精密机器或冲击机械的基础隔震等的设计优化,新技术、新机器的开发,以及作业过程的优质低耗,具有重大意义。

然而,由于土壤的机械组成和矿物成份变化范围大,液相气相含量变化带来的物理力学特性变化往往达几倍甚至几十倍,而机械作业所包含工艺元素的组合又往往错综复杂,常使严格的详尽的解析演算的意义遭到淹没。力学应与实践紧密结合,分析的深度和精度应取决于实际需要和可能。我们认为现阶段机械土壤动力学应从土壤本质、基本属性及各种性态行为机理入手,以作为工程技术活动中正确判断的基础。正是由于土壤动态行为的复杂性,对某些现象、过程或问题尚不具备完整的、完全确切的解析,这是现阶段机械领域土壤动力学的—个特征。

0.2 机械土壤动力学研究状况和趋向

0.2.1 学科前期(1900年以前)

人类最早使用轮子可溯至公元前3200~3400年,中国最早用轮子约在公元前3300年。中国使用耒耜最早约在公元前3200年,驯畜拉犁打钻约在公元前2000年,用石耜牛耕始于商代(约公元前1155年),具有犁壁的牛犁至晚出现在战国末年(公元前221年)^[1]。古代轮子、撬板、犁、锄、鹤嘴器的应用表明,农民已能悟性地根据地面状况的不同来发明相匹配的工具;但是却缺少描绘工具与土壤之间如何相互作用的史料。根据机械组成作土壤分类的最早记录见于1681年。测定犁牵引阻力的第一个测力计出现于1784年。英国Bailey于1750年提出螺旋犁面土垡翻转理论。1788年美国杰菲逊提出了一种描述壁犁犁体曲面的方法。1837年俄国沙格拉茹斯基上尉获得履带驱动专利。1873年美国Parvine实现了蒸汽机履带装置。当时人们已认识到研究犁面和轮子是人类重要的工作之一。1752~1900年期间共发表研究犁的理论和影响其设计因素的专门技术报告就有60多篇,有关轮子在土壤中滚动问题的技术报告就有8篇^[2]。

第一个系统地从土壤物理性质着手研究的是Schubler(1838年)。Schubler认识到土壤物理性质对耕具和轮子阻力的重要影响,并测定了土壤的粘附性及凝聚性。同时,主要是结合土建方面的考虑,库仑于1773年提出了压力下土的滑移理论。朗肯于1857年提出了主动、被动土压力的概念。鲍沁内斯克于1885年发表了地面下应力分布的研究。达西于1856年提出了土壤水渗透定律。阿太堡则于1911年确定了粘性土壤的各稠度限,等等。

和任何领域的科学技术一样,机械土壤动力学的发展也是与生产的需求和发展分不开的。中国在长期封建社会的生产关系下,重视小农户的精耕细作,耕具则长期没有得到发展。欧州在现代科学技术和资本主义兴起之后,人多地少,农业重视提高土地生产率,从而重视土壤化学。1840年李比西对化学施肥作了划时代的贡献。美国人少地多,农业重视劳动生产率,而开荒后风蚀严重,从而重视土壤物理;但主要集中在土壤的气、水、盐和热特性,而忽视了土壤强度等力学特性。进入20世纪以来,大功率机器的广泛应用,其中包括各种农业机械、土石挖掘机械和越野车辆,以及土工、水工建筑物地基工程的日益扩大和增多,土力学和土壤动力学方面的研究才受到人们的注意。

0.2.2 学科初期(1900~1950年)

在1900年以前,有关土壤的机械受力问题主要是作为土壤耕作机械的一个属性来处理。苏俄郭辽契金(1900~1935)首先试图作为独立分开的学科来发展机械土壤动力学,并用此学科的知识来解决包括农业、矿业、建筑和土方等机械的设计问题。在此期间,郭辽契金及其学派同人发表了驱动轮和随动轮的基础研究;把模型理论和相似理论应用于机器设计;研究了土壤的失效理论和土壤受机器振动和冲击的影响;1920年完成犁曲面的绘图设计理论;建立了犁阻力计算公式;继而进行了楔子对土作用的研究;测量旋耕式机器的切割阻力与速度、土壤密

度、水份、粘附性和动态、静态贯入阻力的影响;测定土壤对金属的摩擦、土壤变形以及发展土壤切削方程;并将土壤按机械行为分为与农业上土壤分类不同的13个类别。与此同时,美国尼柯斯在1925~1935年期间发表了一系列关于土壤动力学特性的经典研究报告,成为50年代以前唯一对土壤动力学特性进行系统研究的先驱者。

在1900~1950年间苏俄的机械土壤动力学工作领先于美国15~20年。一个重要的区别是苏俄的研究企图将土壤和机器参数综合在阻力或性能预测的方程之中。他们处理土壤切削所用的理论直接缘用库仑1773年对地基及挡土墙土压力的经典研究以及太沙基的有关的土力学研究。而美国的研究集中在土壤与机器参数的孤立研究上。郭辽契金和尼柯斯两人在1985年6月17~19日于美国奥本举行的国际土壤动力学会议上被承认为机械土壤动力学的先驱。

与郭辽契金和尼柯斯同时,Kuehne于1913年在德国慕尼黑建立了第一个土槽,并由VonPoncet实现了犁的6分力测定(Prandtl也只是在1908年建立了世界上第一个风洞,并实现飞行器6分力测定)。德国Bernstein(1913)和波兰的Swiewzaski(1932)及Kanafojski(1934)研究了滚动轮子的力学特性,发展了描绘土壤在轮子载荷下变形的方法和建立了滚动阻力方程。德国的Dinglinger(1920)和Rathje(1931)研究了相邻铅垂凿形铲的相互作用,提出了铅垂齿破坏的临界深度的概念,即土壤从表面破坏转而为土内凿齿周围的破坏。英国亦于1924年建立了农业工程研究所,从事拖拉机试验和胎轮试验,得到降低胎压、增加轮径能改进牵引效率等结论。

在此时期,虽然主要出于土建的需要,但对机械土壤动力学研究而言,亦属于奠基性工作的有:太沙基(1936)提出的土体有效应力理论,固结理论,承载能力解法;Filde(1940)创制的三轴仪;Casagrande在土的分类与识别(1948)以及土强度和渗流方面的工作;Skempton(1953)揭露粘性土受力下隙水压力变化规律;Taylor(1937)的土坡稳定理论;Lambe(1951)的土壤实验方法等等。

中国在此时期,国内军阀混战,国外列强侵略,虽然科技界的一些有识之士在治水、兴农、筑路、建桥、开矿等方面做了一些开拓性工作,但就机械土壤动力学学科而言,基本上未提到日程。

0.2.3 学科研究近况(1950年以来)

第二次世界大战结束以后,有利于开展土壤机器关系研究的条件是:农业机械化在全球范围内得到迅速发展;土建工程施工的规模和数量日益扩大;国际间的紧张局势要求战车性能的改进和对全球各地区土壤的军事车辆通过条件加以确定;可用于各领域研究和开发的新技术的不断涌现;管理技术的发展使得能够计划和协调大型研究和开发项目;种种越野活动的大量增多;以及人们对这个领域的研究所能带来的成果寄以很高的希望等。

在行走机械方面的研究情况是具有代表性的。1945年起,一些国家和公司在轮胎研究上投入了大量的人力物力,涉及轮胎结构形式、结构参数、配置方式和作业参数等与性能和压实的基本关系,得出一些具有实用性的结论,即开发了驼峰形截面等新型胎体;发展了自动显示动载荷、自动调节胎压的理论和系统;提出了发展四轮驱动,以便利用轮胎二次通过的效应来提高驱动效率的方向;揭露了正常载荷下轮胎将耕松土壤重新压实而不利于作物生长,作为一

种土壤污染的防治而需要长期普遍地避免,并发展固定轨道或宽轨道耕作。为了便于揭露轮胎与土壤之间的本质性关系,在研究手段方面采用了单轮实验装置,将传感测量元件镶嵌在组合轮内,籍以进行了钢轮和轮胎与土壤交界面上正应力和切向应力的分布、接触区的轮胎变形、轮胎与土壤的相对滑动等方面的测量和研究。这些都有助于揭露牵引过程的本质和机械土壤动力学学科的发展。

在履带研究方面,Mickletwaite(1944年)把库仑定律用于水平方向牵引力的理论计算,提出Mickletwaite牵引公式。1952年苏联列伏夫在其出版的《拖拉机理论》一书中,介绍了计入履刺垂直面积的影响及由履板压地面积来确定的水平牵引力计算公式。1956年Bekker、1961年Janosi则将车辆滑动量引入Mickletwaite公式。1956年Reece等给出较精确的运行阻力-挂钩牵引力-滑移率的关系式。Bekker还提出了间隔链节式履带,以提高切向推动力。与此同时,美国陆军水道实验站发展了一整套预测地区通过性的理论和方法。

在机具方面,发展了计算犁阻力的公式和正确调整及减少阻力的方法;发展了犁曲面及高速犁的设计方法;研究了振动犁的工作过程;发展了凿形齿破坏区域和阻力预测方法;研究了圆盘机具结构参数和作业参数对性能的影响;研究了旋耕机低能耗刀齿形式、结构参数和运行参数,研究了往复式和旋转式齿耙的碎土过程和程度;发展了复式表土整备耕作部件,发展了开出隙缝式种沟以利保墒、提高出苗率的播种开沟部件;研究了大功率挖掘机、开沟机、推土铲运机、大深度埋管机、高精度平地机具和技术;研究了大功率大深度钻探机等工作部件的工作过程和土机关系等。

土壤种类和水分状况是对土壤性质影响最大的因素。1948年起较详细地研究了各种土壤在不同水分下的摩擦、粘附、凝聚,及压、张、剪应力的分别作用和同时作用下的行为,以及土体中各种水、热、气、电的传导过程,以求有助于了解土壤-机器关系中的内情。为了更好地存蓄水份、提高土温或增加耐磨、利于脱土、减少阻力和提高性能,开拓了在土壤-机器系统中加入其它工程材料或措施的技术途径,如塑料薄膜、土工织物、表面材料、电渗等等。在研究中广泛应用相似理论和模型试验。由于土壤的颗粒和孔隙不能和机器或建筑物的尺寸一样,能按比例放大缩小,因此不同土壤的土机关系相似定律在理论上十分复杂。1960年以后,对于精度要求不高的场合,仍应用比例尺为1:1的模型,对诸如推土铲、排水埋管工程机具和某些地面驱动的阻力预估,可得出满足工程需要的结果。对精度要求较高的场合,发展了用人工合成土作试验,从而将土壤状况化为一个单一的相似参数,能较好地应用于驱动轮胎和钢轮的模型试验。另外,从理论上发展了土壤畸变修正模型应用于较简单部件,如凿形齿等的阻力预测。在试验装置中广泛应用传感元件、电子线路及单板机、计算机于测定、显示、数据处理和控制。在60年代以后,由于电子计算机的广泛应用,在土机关系的研究中发展了一些代表性问题的解析解、数值方法、建模技术、优化技术等等。

在土建方面,由于建筑物的防备地震和核爆炸及海底石油钻探平台防备波浪冲击等的需要,对半无限土体中波的传动、土体振动,以及高速载荷下土体的性态行为等进行了大量的实验研究,从而对机械土壤动力学的发展起显著促进提高作用的有:Rayleigh(1885)和Lambe(1904)给出了在半无限弹性体中,除了压缩波和剪切波外,在介质表层所传播的Rayleigh波的初步解和精确解;Casagrande和Shannon(1948)设计了摆锤加载式土样试验机,研究了应变速率对抗剪强度的影响;Seed等设计了振荡载荷式三轴仪(1959),研究了泥土在定常载荷上施加脉冲情况下的失效情况,研究了周期载荷下土的动载模量(1968);Whitman(1957)在三轴

仪上研究了应变速率对应力-应变关系的影响; Bjerrum 等(1958)给出了应变速率对孔隙水压力的效应; Larew 和 Leonando(1962)揭露了土的疲劳极限; Richert(1962)通过研究给出了人体、机器基础和建筑物基础所允许的频率与振幅极限关系; D'Appolonia(1968)研究了振动压滚的作用原理; Prakash 等(1966)提出了 $c-\varphi$ 土动态下土压力的解等等。

中国在国民党统治期间, 民族资本主义有所发展, 曾出现机耕农垦的尝试以及小型排灌动力、药械、农具制造的萌芽; 战后派遣农具学方面留学生; 在解放前夕建立了农业工程系。中华人民共和国成立以后, 由于大兴水利、大搞农田基本建设, 将农业机械化作为农业的一条根本出路, 同时出于建设、开矿和国防的需要, 各部门设立了与机械土壤动力学在不同程度上有关的专业研究所, 并在普通高等学校和军事工程院校设立了有关的专业。50年代初起, 各院校和有关研究所都较普遍地设置了土机关系实验土槽; 进行了有关水田叶轮、机耕船、步行机构、低洼地区拖拉机和收割机行走装置以及水田犁体曲面、旋耕机刀片、水田土壤特性和流变规律的研究; 进行了旱田轮胎和履带的牵引、压实、通过性能的研究; 进行了犁体曲面设计方法, 二面楔、凿形齿、旋转切削、振动碎土等过程的研究和一些过程的有限元分析; 进行了高速载荷下土壤强度、摩擦和粘附特性的研究; 研究了不同覆盖和耕层结构下土壤、水、热、盐运移的模型和模拟等。为我国机械土壤动力学学科的成长做出了贡献。

0.2.4 学科研究趋向

纵观整个发展过程, 我们认为近代土机关系研究经历了三次认识上的飞跃。第一次是认识到为改进机器而进行的常规整机试验受有很多的限制, 难于获得普遍性规律。因此必须对工作部件与土壤相互作用的过程及所涉及的土壤动力学性质进行分别研究(Nichols, Горячкин)。第二次是认识到, 演示土壤动力学性质的存在是比较容易的, 但是要定量化, 把一项具体的特性(譬如土壤的变形、流动)分离开来测量并直接应用于机器的设计或运用, 则比预先所想像的要困难^[2]。同样, 要把机械作用的一些工艺元素(譬如切削、贯入)单独分离开来也是很困难的。因此, 需要从更基础的层次上去研究土壤动力学特性行为的机理和土机工艺过程的本质。同时也出于土建土力学、土动力学发展的需要, 自60年代以来, 对土、石、土壤的行为本质及其土壤物理学基础的研究有很大的发展(Mitchell)。对应用弹塑性理论、粘弹塑性体及流变理论来研究土壤本构关系, 并借助于计算机应用有限元等数值方法求解机械对土壤加工典型工艺问题的亦日益增多。然而必须指出, 就总的情况而言, 不论是土壤动力学特性行为机理、本构理论, 还是典型工艺问题的数值解方面的研究, 与能简便而有效地应用于实际工作, 尚有一定距离, 以致不少场合下, 机器的设计和运用尚在缺乏所需知识的情况下进行。第三次是认识到, 对土壤动力学特性行为及其本质、本构理论、工艺过程原理等等的研究, 其着眼点不在于追求详尽的封闭解, 而在于指导现场观测什么、如何观测、如何理解和做数量上的判断(Terzaghi)。对于通常精度要求比大型土建工程低的耕作、挖掘和越野行驶问题, 如能确定置信水平, 则即使是做比较粗略的预计, 也可应用于机器的设计和运用(Bekker)。关键在于理论分析的途径和详尽程度要与实际需要紧密结合, 避免繁琐, 获得实效。

展望未来, 在世界范围内, 有关土壤动力学特性行为和土机关系的研究, 虽然经历了五六十年代的高度热忱和所获的进展之后, 面临一种新突破前的平稳, 甚至是低潮的形势, 因为这类基础性的研究往往不是当时就能获得经济效益的。但是, 由于世界人口的不断增长, 生态环

境趋于恶化,建筑和采掘工程的不断增大,越野行驶运输量和领域的不断扩展,与土壤相互作用的机器种类日益增多,技术要求的不断提高,土机关系及作为理论支柱的土壤动力学特性行为的研究,无疑将得到继续和发展。我们认为,中国和其它国家一样,在这个领域的研究势必针对如下的技术发展方向,即:突出蓄水效能的保土、调温、赶时、节能,以及旨在扩大水土资源的利用,提高生产和改进生态环境的综合耕作技术的开发;较大深度、速度、规模、难度的土石挖掘、开采、钻探、爆破等施工装备与技术的发展;越野领域的扩展和越野技术的继续改进;精密机器、装置的基础防震等。土壤动力学特性行为及土机关系方面的基础性研究,势必考虑结合这些技术发展方向的特殊需要来开展。譬如,进一步挖掘机械力的动力学效应,结合综合施载方法或综合性工程措施(如复式作业,多次渐进的分段重复作业,利用水力电力热力生物力的作用,加添改良剂;使用覆盖材料、利用掺土、排水灌水、嵌入小型结构等),开发这些机械力及综合措施所起效应的描绘和定量确定方法;所要求达到的土壤状况的描绘和定量确定方法;不同作用力、不同工艺组合方案在达到所要求土壤状况的程度上,以及造成不良副作用的程度上,评价指标的确定方法;发展典型场合下应力应变场预测的计算机模拟方法;不同工艺和部件设计方案对比中的优化方法;开发自动测量、显示、评价、调控和数据处理技术等等。

0.3 土壤—机器相互作用的研究方法和实验手段

0.3.1 研究方法概述

耕作、挖掘和行驶是通过形状往往比较复杂的工作装置对条件变化范围较大的半无限连续介质土壤进行施加作用而实现的。研究有关土壤—机器相互作用的目的是要从机器结构、作业参数和土壤(地面)条件三者联合对土壤状况变化所起影响的普遍性原则出发,建立定量化的数学模型,以所需要的精度预测机器作业性能,为合理设计、选择和运用机器提供指导性依据。

研究土壤—机器的相互作用,建立性能方程时,通常根据问题的性质、条件和具体情况分别或交叉运用如下几种方法。

1. 经验法。即通过反复试验,建立经验公式,用于相同条件下的预测。经验公式与理论模型的实验数据回归公式的区别在于其变量之间的关系往往不属于严格地建立在基本物理力学规律上的理论关系,所涉及参量亦往往是复合性的非唯一的量。自古以来,耕具和车轮就主要是靠总结多种土壤上的试验经验,通过经验来指导这些工具的发展和完善的。由于在每次试验时,田间土壤性质和状况很难相同,整机在作业中的各种受力又很复杂,从田间试验得出的经验公式所表达的变量之间的关系,一般适用范围较窄,所传递的有关过程内部本质的信息有限,对科学技术进步的作用相对比较少。然而作为一种研究方法,经验法仍将在一个问题在不同研究阶段,在一定的范围内得到应用。这不仅由于人类对自然界和技术的认识总是由表及里,有时不得不诉诸经验法,还由于在一些特定场合下,它比用理论方法经济及时。经验法本身的水平亦将由于理论的积累和测试技术的发展而得到提高。

在土壤—机器相互作用研究中,经常应用的一种具有特点的可称为“双关联式”经验方法,它是利用一种便于使用的仪器(譬如贯入仪)来测定各种土壤的综合性参数(合成参数)或基本

参数,将之与特定的机器在各种相应土壤中的性能(譬如车辆通过性)加以对比,建立经验关系式。这样,只要简便地测定各种土壤的综合性指标,就能预测该种机器在该种土壤条件下的性能。常用的有利用圆锥贯入仪预测某种车辆的通过性或利用土壤“硬度”贯入仪预测某种型的比阻等。显然,这种方法能大量节省实际应用中的人力、物力和时间,已经起过并将继续起有效作用。但是,建立这类经验关系式时需进行大量试验工作,这在涉及变量较少时才可行;如果变量太多,经济上可能并不合算。另外,只能在某些问题上而不是在各种问题上都能采用这种双关联式经验法,如在新的工作环境中或在评价新的设计思想时就很难采用这种方法。

2. 模型试验法。包括为了避免土壤的变化掩盖了机器作用趋势,采用均匀的人工土壤(纯砂、纯粘土、磁化铁砂粒等),在实验土槽中进行原尺寸的模型试验;为了避免利用昂贵的原机,而按相似原理,在状况尽可能相同的情况下进行的缩尺模型试验;为了避免在危险的环境或在无法接近的环境条件下试验而利用模型来进行的模型试验。模型试验在流体力学、空气动力学等领域的技术发展中获有很大的成功。人们期待在土—机技术领域亦能获得类似的成效。然而,由于土壤松散、颗粒介质特性所引起的模型预测因素的畸变尚难达到令人满意的结果,因此土壤—机器关系的模型技术尚待进一步发展。另外,虽然模型试验可得出一些综合性定量关系,但一般较难做出对于机理的揭露。

3. 模拟式半经验法^[3]。是经验法与理论法之间的一种过渡,是在理论解法成熟之前迁就于按较低要求解决问题,但却能使所得的解较经验法更接近于按实际情况。做法是用模拟机器工作部件形状和载荷的测头代替双关联式经验法中所用的简便的土壤综合性参数测定仪,并将所测得的土壤参数拟合为曲线,结合局部的理论分析,将其转换为机器工作部件的性能方程。例如利用具有承压平板和扭剪装置的贝氏仪所测得的现场载荷—位移曲线和土壤水平力—位移曲线来预测行走部件的铅垂荷重—沉陷及水平牵引力—滑转率的关系。显然,这种简单的模拟并不充分反映机器的全面的、真实的情况,只能在某些有限场合得出比较合理的结果,如履带行走装置的最大牵引力等。这种模拟方法的结果的好坏,取决于测试系统的原件与所模拟系统的相似程度。

4. 理论法。将所需要的土壤—机器相互作用分解为少数不能忽略不计的基本性能(或行为),识辨各性能所包含的特性,用基本物理力学法则描述这些特性,从而建立一套包括基本参数,并能得出所有输入变量相互作用的结果的定量化性能方程式,并经实验验证。真正成立的理论解的优点是适用于大范围的环境变化,精度较高,但往往复杂而费时费力。因而,有时较为简单的、即使适用范围较小的方法亦是可取的。近年来,新的解析方法、数值方法以及数字计算机的发展大大促进了理论分析方法的进展。理论分析法还可以用来探索变量改变的效应,从而有可能避开难于实测的参数。一个理论是否有用,必须有事实证明,其预测结果为其后的实验所证实。

至于一个能比较有效地解决所面临工程实际问题的学科理论体系,其建立和发展理应是多种途径的。本书所采用的学科理论体系参照了太沙基建立土力学理论体系的经验^[11],即对代表现场的土样进行室内标准化试验,测定在标准试验状态下的土壤特性和行为,运用连续介质力学原理和适当的本构理论,将其应用于现场复合应力状态,建立模型;同时,将复杂的机械作业过程分解为少数基本的、简单的工艺元素,借助于数值方法进行这些工艺元素的性能计算模拟,经实验验证和修正,然后综合应用于预测复杂的机械作用下土壤状况变化和其它机器性能。

本章下面将只讨论反映土机关系研究特点的实验手段及模型试验法、经验法和模拟式半经验法。理论法将在第三章详细讨论,学科理论体系框架则贯穿于整书之中。

0.3.2 土壤—机器相互作用实验手段

土机关系研究的中心课题之一是建立性能方程(Performance Equation),其通式可表达为^[3]:

$$[O]=f[S,M] \quad (0.3.1)$$

式中: O ——性能参数; S ——土壤参数; M ——机器参数。

在工程实际工作中亦需建立设计方程(Design Equation)^[4],其通式可表达为:

$$[F]=f[T_s,T_m,S_0-S_i] \quad \text{或} \quad [S_0-S_i]=g[T_s,T_m,F] \quad (0.3.2)$$

式中: F ——机械作用力; T_s ——工作部件形状参数; T_m ——部件运动方式参数; S_i ——土壤初始状态; S_0 ——土壤结果状态。

在建立力学关系时核心问题之一则是建立行为方程(Behaviour Equation)^[4],其通式亦可表达为

$$[S_0]=f[S_i,F] \quad (0.3.3)$$

可见在土机关系乃至整个机械土壤动力学研究中,总是一方面需要实验验证或试验找出性能方程、行为方程等所表达的关系,一方面需要测定土壤(地面)参数(S,S_i,S_0)、机器参数(M,T_s,T_m)、力学参数(F)的数值。性能、行为的关系,以及所涉及的土壤(地面)、机器、力学参数是随不同课题而异的。本节及随后在本书中将只介绍具有土壤—机器关系研究特色的一些性能、行为实验装置和有关的土壤参数测定方法。

一、土壤机器相互作用试验土槽

为了能够在受控条件下对重要现象进行精细地观察,以便评价、修正和发展理论,改进设计,测定数据,既在室内或田间设置试验装置。田间进行试验的优点是试验得以在实际条件下进行;所受到的限制是:(1)试验时间常因气候或耕作栽培而中断;(2)不同田地之间、同一田块的不同行、同一行而时间不同,都会因土壤及水分的变化,地面的不平程度等影响试验的结果,难于联系部件与土壤相互作用的因果关系。因此,各种式样的试验土槽就成为各国在土机关系的研究、开发、设计和教学上的重要设备。试验土槽的缺点是土壤组构状况难于恢复至同一和均匀,而且使用一个较长时间之后土壤的耕性将逐渐丧失。

土槽的式样、尺寸和附属设备依任务而确定。要求使用及换土方便,且具有适当的准确度。

在式样上,有用于全尺寸模型的大土槽(图0.3.1),有可做缩尺模型部件试验的中型或小型土槽(图0.3.2)。分为土槽槽体运动、被测部件固定及土槽槽体固定,工作部件运动(图0.3.3)两类。土槽槽体运动时一般惯量较大,起动和停车距离较长,导轨长度至少为行程的2倍,占地大,不适于高速;但被测部件的驱动以及信号的测取和传递较为方便,误差也较小。土槽槽体固定时,导轨可安装在土槽槽体上,亦可安装在土槽上方框架上,或安装在侧壁上。这时土槽可方便地轮流更换使用。导轨不装在土槽体上时,可避免台车的振动对土壤所引起的影响,特别是在测定应力应变或进行其它需要准确精细的试验时,外界振动的干扰须予考虑。为了能获得准确的测量,工作装置通过土壤移动时,其速度、方向、深度必须置于控制之下,此时,必须采用