

越野车辆工程土力学

〔美〕L. L. 卡拉费斯 E. A. 诺瓦茨凯 著

SOIL MECHANICS FOR
OFF-ROAD VEHICLE
ENGINEERING



机械工业出版社

越野车辆工程土力学

〔美〕 L.L.卡拉费斯 E.A.诺瓦茨凯 著

张克健 王瑞麟 译

机械工业出版社

本书系统地阐述了越野车辆工程基础的土力学及其应用。其内容涉及了越野行驶力学、土力学、塑性力学和计算力学等领域。

全书分为三篇共十六章。第一篇介绍了与越野行驶问题有关的土力学的基本原理。第二篇介绍了土壤的塑性理论和数值解法。第三篇阐述了土力学原理和塑性理论在越野行驶问题中的应用。

本书可供从事越野车辆(越野汽车、拖拉机、工程机械和战斗车辆)以及农林机械的研究、设计人员参考,也可供高等院校有关专业师生参考。

SOIL MECHANICS FOR OFF-ROAD VEHICLE ENGINEERING

L. L. Karafiath E. A. Nowatzk.

TRANS TECH PUBLICATIONS

Germany, 1978

越野车辆工程土力学

[美] L. L. 卡拉费斯, E. A. 诺瓦茨凯 著

张克健 王瑞麟 译

孙凯南 吴起亚 校

责任编辑 李桂群

封面设计 刘代

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168 1/32 · 印张 14 $\frac{1}{4}$ · 字数 375 千字

1986 年 10 月北京第一版 · 1986 年 10 月北京第一次印刷

印数 0,001—1,010 · 定价 4.35 元

科技新书目: 129-106

统一书号: 15083 · 5973

译 序

在我国的四化建设中,越野行驶在汽车、农林机械、水利、矿山、石油及军事工程中引起了越来越广泛的关注。我国对于土壤-车辆的相互作用的研究,在各个部门之间不是平衡发展的,有的在经验的和半经验的阶段,有的课题则正向理论的定量分析阶段发展。对于研究越野行驶的工作者来说,已不得不极大地关注土力学、塑性理论和计算技术及他们本来不太熟悉的领域。这些方面的文献较多,而且分散,查阅与研究它们是件很艰苦的工作。本书的两位著者系统地阐述和评价了这些领域的成果,并探讨了将它们应用于越野行驶方面研究的可能性,以便使越野行驶问题的研究具有坚实的理论基础和定量分析的手段。无疑,这对于我国的研究、设计、使用和教育部门的有关人员是有意义的。

当然,本书远不是给出解决越野行驶问题的答案,但它毕竟提出了认识并解决这一问题的方向。

我国的地面-机器系统研究会业已成立,同行们有了建立联系、交流经验的方便场所。我希望这本书能为同行们提供有益的参考。

本书由中国农业机械化学术研究院王瑞麟翻译序言和第三篇的最后三章,其余部分均由北方车辆研究所张克健翻译。

由于我们水平有限,译文难免有不妥之处,欢迎读者批评指正。

译者

1982年6月

序 言

本书的主要目的是介绍越野车辆工程土力学领域的最新进展。解决这些问题的途径是应用理论上正确的方法并将理论解与能得到的试验数据进行比较。以前没这样做有许多原因,其中相当重要的一个原因是我们关于土壤的机械性状的知识只是最近二十年中才发展到可以进行这类工作的地步。在这二十多年中,旧的试验研究技术有了改进,发展了新的技术。不但在常规条件下,而且在超真空、失重、冲击负荷等极端情况下,都已经可以得到多种土壤性状的可靠实验数据。同时,其它学科的进展也促进了土力学问题理论上更严谨的分析方法的发展。例如,由于高速计算设施的普及,现在已可能对土壤性状进行最精致复杂的分析,现代试验技术所达到的精度也就可以充分利用。应用生化分析和X光衍射、电子显微镜等技术,能在微观水平上进行土壤性状的研究。由于这些进展,土力学的预测已成为改进土木工程设计者所能接受的方法。

人类最早的重大成就之一是轮子的发明,在开始使用轮子时,无疑并没有道路这个有利条件。但只是在最近才认识到越野行驶问题是土壤-轮子的相互作用问题,因而适于进行理论的土力学分析。但是,为什么土木工程中早被公认的土力学这样一门学科的进展没有能早些在越野行驶中应用呢?显然是问题的复杂性使许多研究者不敢追求理论上严谨的方法。但是,更严重的是由于某些过于简化的、半经验的、常常忽略了土壤基本性状的解决方法造成的失败,在越野行驶科学上产生了倒退的影响。事实上,即使在今天,许多研究者在越野行驶问题上所应用的土力学的水平并不比三十年前在土木工程问题上所应用的为高!这种在越野行驶研究中应用高等土力学概念的落后,大部分是由于在所涉及的各学

科间难于互相交流。在自然地面上车辆行驶的能力对范围广大的各种学科,例如汽车工程、军事工程、机械工程、空间工程和农业工程都是非常重要的。这些学科的工作者会不得不去评价大量土力学文献,并摘取对他们有用的资料。在另一方面,从地质学、土壤物理和化学、农业土壤科学等领域可以取得的丰富的土工技术资料,直到现在还没有找到应用于越野行驶和土力学中的途径。认识到这一困难,著者们将试图从越野行驶的角度综述已公布的土力学及其它有关文献,并对其最重要的概念提出经过斟酌的讨论。

但是,主要是论证土壤-车辆的相互作用基本上是土力学问题这一方面,作用在越野车辆上的力系与作用在道路车辆上的力系之间的差别,实质上就是土壤反应与刚性地面反应之间的差别。土力学和应用数学当前的水平足以列出理论上正确的越野行驶问题的方程,而解这些方程,在数学上已有令人满意的数值方法。

本书中提出的理论和解法是准备为研究生和在车辆设计和车辆机动性分析领域工作的工程师和研究工作者应用的。

本书的第一部分介绍用于越野行驶问题的基本土力学原理。对一些名词和概念作了简短的说明,以使有着不同经历的工程师理解以后的推导而无需求助于参考书。对用于解土壤-车辆相互作用问题实用而必要的土力学理论则进行较透彻的讨论,使读者能够清楚地理解概念和基本假定。在这一部分中,叙述了为了在理论中应用土壤特性所必需的有关土力学实验室试验。对于固结、蠕变等对越野行驶分析只是稍有关系的土力学理论,则放在次要地位。

在本书的第二部分中,应用塑性理论的原理和适当的土壤屈服条件来推导土壤塑性平衡的基本微分方程。也推导了在机动性分析中特别注意的某些情况的基本微分方程。由于这些方程并没有严格解,因此详细地介绍了数值方法。充分地讨论了边界条件,并且用塑性理论在若干一般土壤-结构相互作用问题中的应用来说明数值解法的原理。

本书的第三部分将前两部分介绍的土力学原理和塑性理论用

于越野行驶问题。说明了土壤与行走机构(刚性轮、充气轮胎、履带)间的相互作用的性质,也详尽地说明了在解决各种相互作用问题时,如何选择可应用的理论。以图解形式表示了通过计算机技术获得的车辆性能与土壤参数间的一般关系。这类复杂问题很少能用计算尺或图解方法解决,任何这种尝试都会令人失望。从这一观点看,这本书可以说是为未来用的,那时,大的计算系统将会和今天用的计算尺和袖珍电子计算器一样便宜和普及。在这一部分中,也详细地介绍了用于预测越野机动性的土壤参数性质的土力学试验室研究结果、取样方法和现场测定结果。关于车辆机动性的特殊问题的土力学也包括在这一部分中。

著者们认为,从人类社会的早期就存在的问题领域不可能用一本书全面解决,但是,正确地认识问题往往等于解决了问题的一半。我们希望这本书所介绍的概念能使读者对越野行驶问题有较充分的理解与体会,并使他们在解决这些问题时有新的方向。

(下略)^①

L. L. 卡拉费斯

E. A. 诺瓦茨凯

1977年6月

① 原序以下为感谢有关单位和个人方面的内容,从略。——译者注

目 录

译序

序言

第一篇 越野行驶问题的土力学基础

1.1 导论	I
1.2 土壤特征	3
1.2.1 为可行驶性目的鉴定土壤	3
1.2.2 土壤的恒定特征	4
颗粒尺寸	4
颗粒形状	8
矿物组成	13
比重	21
根据含水量的结持极限和其它指标	21
1.2.3 土壤的瞬态特征	31
一般概念	32
单位重量和相的关系	36
湿度-密度关系	38
相对密度	45
渗透度	50
1.2.4 土壤分类方法	53
分级分类系统	54
公共道路局(BPR)分类系统	55
机场分类系统	55
土壤描述分类系统	63
地质分类系统	63
农业分类系统	65
专用的土力学分类系统	67

土壤-车辆力学及耕耘力学的土壤分类	67
1.3 土的性状特征	69
1.3.1 有效应力原理	69
1.3.2 固结概念	77
1.3.3 土壤剪切强度概念	79
1.3.4 确定土壤固结及强度特征的试验	89
固结试验	89
强度试验	89
剪切试验结果的表示法	99
1.3.5 越野行驶的加载及排水条件	105
越野行驶的现场条件	105
评定机动性的土壤强度的实验室确定	106
1.3.6 固体与土壤间的剪切阻力	108
1.4 确定加载时土壤应力状态的理论	113
1.4.1 弹性理论	113
1.4.2 弹塑性理论	118
1.4.3 常规土力学中的破坏理论	121
单表面破坏	121
区域破坏	122
承载能力的常规理论	126
第一篇 参考文献	134

第二篇 土壤的塑性理论

2.1 导论	141
2.2 塑性平衡的微分方程	145
2.2.1 莫尔-库仑屈服(破坏)准则	145
2.2.2 在平面应变条件下土壤塑性基本微分方程的推导	152
2.2.3 非线性屈服准则	156
2.2.4 包含惯性力的塑性微分方程	158
2.2.5 以有效应力表示的土壤塑性微分方程	160
2.2.6 纯内聚性土壤的塑性微分方程	162
2.2.7 在轴对称几何与加载条件下土壤的塑性微分方程	165
2.2.8 土壤-结构相互作用问题应用塑性理论的模拟	167

2.3 数值解法	172
2.3.1 基本递推关系	172
平面应变情况和 $\varphi \neq$ 常数的递推关系	174
平面应变情况和 $\varphi =$ 常数的递推关系	175
轴对称情况和 $\varphi \neq$ 常数的递推关系	176
轴对称情况 ($n=1$) $\varphi =$ 常数的递推关系	178
2.3.2 边界条件和格栅系统	179
2.3.3 奇点	184
2.3.4 分层界面的边界条件	186
2.3.5 特殊情况的解法	190
孔隙水压效应	190
土壤惯性力效应	194
2.4 塑性极限理论	198
2.4.1 上下界解	198
2.4.2 速度场理论	199
2.4.3 运动边界条件	202
2.4.4 速度的数值计算	204
2.5 塑性理论应用于一般土壤-结构相互作用问题	206
2.5.1 塑性理论应用于土壤承载能力	207
2.5.2 塑性理论应用于涉及推土阻力和土壤切割作用的问题	216
2.5.3 塑性理论应用于涉及穿入阻力的问题	223
2.5.4 塑性理论的局限性	231
第二篇 参考文献	233

第三篇 在机动性问题中应用土力学理论

3.1 导论	237
3.2 越野机动性中行走机构-土壤相互作用的任务	243
3.2.1 接触面几何形状对车辆基脚-土壤相互作用的影响	244
3.2.2 界面剪应力的产生	246
3.2.3 界面剪应力对车辆基脚-土壤相互作用的影响	248
3.2.4 行走机构-土壤相互作用和牵引力的概念	250
3.3 塑性理论在受土壤破坏条件支配的车轮-土壤相互作用问题中的应用	251

3.3.1 刚性车轮-土壤相互作用的概念	251
3.3.2 单个刚性车轮在均匀土壤中的性能	255
3.3.3 计算方法	260
单个滑移线场的计算	260
车轮-土壤相互作用问题的滑移线场的匹配组合的计算	266
对一给定载荷的车轮-土壤相互作用问题的解	269
3.3.4 车轮载荷及 α_r, δ 角间的一般关系	272
3.3.5 车轮性能预测与实验的比较	276
3.3.6 运动边界条件、滑转与界面摩擦角	284
3.3.7 并列、串列和多轮布置	290
并列轮	290
串列轮	295
多轮布置	300
3.3.8 在呈现非线性强度特性的土壤中车轮-土壤的相互作用	300
3.3.9 水下土壤中的车轮-土壤相互作用	305
浮力	306
饱和	306
孔隙水压	307
孔隙水压及牵引力的产生	307
样本计算结果	308
3.4 部分地受土壤破坏条件支配的充气轮胎-土壤相互作用	311
3.4.1 充气轮胎-土壤相互作用	311
在刚性表面上和在软土中轮胎的变形	312
轮胎挠曲对轮胎-土壤界面发挥应力的影响	314
充气轮胎-土壤相互作用的概念	319
充气轮胎-土壤模型	322
3.4.2 计算方法	325
驱动轮胎的轮胎-土壤模型及计算方案	326
从动轮胎的轮胎-土壤模型及计算方案	336
制动轮胎的轮胎-土壤模型及计算方案	339
3.4.3 轮胎-土壤相互作用的分析和模拟用轮胎-土壤模型	341
3.4.4 变强度断面土壤的轮胎-土壤相互作用	357
土壤强度随深度连续变化的计算方案	357

土壤强度随深度不连续变化的计算方案	362
3.4.5 速率对轮胎-土壤相互作用的影响	364
3.5 用于分析履带车辆性能的几个土力学理论	376
3.5.1 履带作为牵引装置	376
3.5.2 轮子和履带对土壤相互作用的同时和异点	378
3.5.3 车辆基脚的沉陷及其基本过程	381
3.5.4 履带的压力-沉陷关系	383
3.5.5 履带-土壤相互作用的实验研究	386
3.5.6 刚性履带模型	394
3.5.7 刚性履带-土壤相互作用的概念	397
3.5.8 柔性履带-土壤相互作用的概念	402
3.6 预测越野机动性的土壤性质的野外测定	406
3.6.1 土壤含水量和单位重量的现场确定	406
3.6.2 平板沉陷试验和参数 k_0 , k_1 和 n	408
3.6.3 现场环形剪切试验	413
3.6.4 圆锥穿入试验	416
3.6.5 加利福尼亚承载比(CBR)试验	419
3.6.6 Cohron 剪切图仪	420
3.6.7 野外叶片剪切试验	421
3.7 专门问题	423
第三篇 参考文献	431
符号一览表	439

第一篇 越野行驶问题 的土力学基础

1.1 导 论

由于人-车辆-土壤系统的复杂性,越野车辆工程领域内的问题本质上是多学科性的。因此,这一领域的工作者,只有了解其它有关学科日益增多的贡献,并在各自专攻的领域内保持高水平的专门知识,才能使工作变得更有成效。作者决心用本书的第一篇讨论土力学的某些原理,以促进这种学科间的了解。这里,作者既不算提供一本土力学的完整教程,也不想用学习大量土力学术语词汇来加重读者的负担。因此,这里的论述,对于土壤工作者也许是肤浅而不完整的。然而作者特意介绍了与越野行驶问题有关的土力学原理,希望车辆设计者掌握这些知识,从而了解在土壤-结构相互作用问题中土壤的作用。

为了介绍越野行驶问题的土力学基础,作者首先决定从土力学的角度识别土壤和它的组份,然后讨论土壤的若干永久特征和瞬态特征,最后说明,怎样按照分类者的需要对土壤进行分类。接着,详细叙述土的强度特征、影响它们的因素和在实验室内确定它们的方法。特别强调了有效应力原理以及土壤与固体间剪切阻力的性质。介绍了固结和剪切强度的概念,并表明了它们与机动性问题的关系。然后描述了确定外载下土中应力状态的广为采用的理论,讨论了它们用于机动性问题的优缺点。最后,提出是什么构成土壤破坏的问题,并评定一般土力学破坏理论对于土壤-车辆行走机构相互作用问题的适用性。

在整个讨论中,对于专门研究的课题参考了许多通用的文献

和公认的“标准”。但是作者仍建议不熟悉土力学概念和术语的读者查考第一篇末文献目录中列出的参考文献，例如：Taylor (1948)、Lambe 和 Whitman (1969)、Scott (1963)、Wu (1966) 以及 Yong 和 Warkentin (1966)。

1.2 土壤特征

1.2.1 为可行驶性目的鉴定土壤

“土壤”这个词，在 Webster 的新世界辞典里定义为“维持植物生存的表层土”。这个定义，虽然对农学家是完全合意的，但对于许多其它有关土工技术学科的研究者和专业人员来说，无论如何也是不完整的。例如，这种狭窄的定义未包括工程师在设计建筑物地基（一个放宽的底脚或桩基）时与地面和基础有关的“土壤”。越野车辆工程师必须设计能越过撒哈拉沙丘和月球荒地的越野车辆。那么，什么是他们的“土壤”呢？实际上，“土壤”这个词对不同的人意味着不同的东西，不存在对所有与土有关的学科都能接受的一般定义。因此，读者在开始了解越野车辆工程的土力学之前，必须了解作者对土壤的定义，熟悉用以描述土壤特征的术语，并了解这些特征和可行驶性有关的物理性质的影响之间的相互关系。

土壤是由原始岩石矿物、粘土矿物、颗粒间的粘合剂、有机质、水、溶解的盐、空气、水蒸汽和其它气体组成的三相系统中固体颗粒和流体按规定排列的天然或人工的集合物。在自然界中土壤的多样性可通过详细说明土壤的某些恒定特征（例如颗粒大小、颗粒形状、矿物组成、比重、阿特伯极限等）的规范来加以鉴定。我们只用这些特征把土壤一般地鉴定为“砂”、“粉砂”、“壤土”和“粘土”。然而由于某些瞬态因素（例如含水量、孔隙比和土壤结构）的影响，不可能使这些一般性的鉴定中的任何一个与一组物理性质发生联系。因此在用土力学预测土壤性状时，用现场条件的数据补充这种一般的鉴定是绝对必要的。这对涉及表土和近表土的越野行驶土力学来说尤其如此。表土的现场条件很容易受到环境改变的影响，这会极大地影响车轮或履带下土壤的性状。

由于土壤性质可以变化，甚至在同组或同类土壤中亦如此，也

由于涉及这些性质变化影响土壤性状的方式可以因学科的不同而不同,因此按照用户的标准,提出了许多土壤分类系统。遗憾的是,还没有公认的包罗万象的分类系统。事实上,由于分类取决于用户的需要,想要设计这样的系统实际上也许是不可能的!然而在本章的下述部份中,将讨论现有分类系统的基础,并研究它们对机动性需要的适应。

1.2.2 土壤的恒定特征

在越野车辆工程的土力学中,土的恒定特征系指通常在越野行驶中各种可能情况下都没有重大变化的那些特征。由于给定情况的土壤-车辆相互作用是一种瞬态现象,环境因素(例如风化、浸析作用等)对土壤成份或结构的长期变化相互作用的影响就显得不那么重要了。因此,在本书中,与细粒状土壤有关的特征例如颗粒尺寸、颗粒形状、矿物组成、比重和各种“极限”含水量)被认为是恒定的,这是因为它们不因外加应力场或短期的环境作用而有重大改变。恒定特征是鉴定系统的基础。

颗粒尺寸

在土工技术和土壤学的所有分支中,颗粒尺寸都定义为土粒的“有效直径”。显然不可能用单一的尺度定义一个任意形状的颗粒。对于经筛分的颗粒,有效直径就是颗粒能通过的最小筛孔。表1.1是部分常用筛的尺寸和名称的一览表。对于非常小的颗粒,由于静电效应妨碍筛分,通常用基于沉积原理和斯托克斯(Stokes)定律的比重计来确定颗粒尺寸。在这种情况下,有效直径就是等效球体的直径,而等效球体在已知粘度的液体中与任意形状颗粒沉降的速度相同。

在土工技术工程中,把结构(例如用泥土和岩石填筑的坝)分析处理成“土”结构,甚至组份颗粒的厚度为几英尺时也是这样处理。另一方面,固结分析经常涉及颗粒小到 $1 \times 10^{-6} \text{ mm}$ ($10^3 \text{ \AA}$)的土壤的沉积,而这样小的颗粒只能通过电子显微镜才能看到。从

表 1.1 标准筛尺寸

泰 国		美 国		英 国		公 制	
编号	标准直径 mm	编号	标准直径 mm	编号	标准直径 mm	编号	标准直径 mm
4	4.699	4	4.76	5	3.36	5000	5.00
6	3.927	6	3.36	8	2.06	3000	3.00
10	1.651	10	2.00	12	1.41	2000	2.00
20	0.853	20	0.84	18	0.85	1500	1.50
48	0.295	40	0.42	25	0.60	1000	1.00
60	0.246	60	0.25	36	0.42	500	0.50
100	0.147	100	0.149	60	0.25	300	0.30
200	0.074	200	0.074	100	0.15	150	0.15
				200	0.076	75	0.075

1 到 10^9 这么大的范围, 好比孩童玩的玻璃弹子与地球的尺寸之比 (Lambe 和 Whitman, 1969)! 因此, 存在许多不同的方案, 用数量上占优势的土的通用名称来鉴定颗粒大小是不足为怪的。由于许多非科学性的理由 (例如: 为便于使界限等于某些标准筛尺寸或便于使界限等于仅由原产国习惯采用的长度单位), 存在着许多分类法。

协调颗粒尺寸范围界限的差别和采用一种国际标准的企图已告失败, 主要是因为没有任何一种分类界限有足够充分的论据。在越野行驶工程中, 有着各种各样经历的工作者必然意识到这些差别的存在, 而用土壤的名称和极限直径来表示颗粒尺寸的范围, 以避免进一步的混乱。

图 1.1 表示各种颗粒的尺寸(标准直径)和检测颗粒大小的某些方法。在图的最上部, 表示了按广为使用的土粒大小分类方案 (MIT 系统) 确定的土壤名称。为了对颗粒尺寸有一个完整的概念, 还列出了其它的尺寸和尺寸极限。

有许多鉴定颗粒大小的系统。这些不同系统的区别在于它们都各自提出自己认为重要的粒级划分的界限。众所周知和广为使用的分级分类系统有: