

土壤-车辆系统力学

吉林工业大学 陈秉聪 著

中国农业机械出版社



土壤-车辆系统力学

吉林工业大学 陈秉聪 著

中国农业机械出版社

全书计有绪论、土壤参数及其测试方法，土壤的垂直应力-应变及复合载荷-变形关系，土壤的水平应力-应变及复合载荷-变形关系，土壤-车辆系统数学模型的建立，行走机构的改进途径及其发展，模型试验共七章。介绍了土壤-车辆系统国内外的最新成就及其基本原理，特别是总结了国内外的科研成果。

本书可用作拖拉机专业大学生及研究生的教学参考书，亦可供从事车辆的研究、设计和制造方面的技术人员参考。

本书由洛阳农业机械学院赵铨同志审阅。

土壤-车辆系统力学

吉林工业大学 陈秉聪 著

*

中国农业机械出版社出版

河北新华印刷厂印刷

*

787×1092 32开 9 1/4 印张 205 千字

1981年7月北京第一版·1981年7月保定第一次印刷

印数：0,001—2,500 定价 0.96 元

统一书号：15216·063

目 录

第一章 绪 论	1
1-1 土壤-车辆系统力学的目的和意义	1
1-2 土壤-车辆系统力学国内研究情况	2
1-3 土壤-车辆系统力学的研究内容和方法	3
第二章 土壤参数及其测试方法	8
2-1 什么是土壤参数	8
2-2 土壤参数的测定仪器及测试方法	25
第三章 土壤的垂直应力-应变及复合载荷-变 形关系	62
3-1 载荷-沉陷曲线	62
3-2 测头形状对于“压力-沉陷”曲线的影响	76
3-3 滑动与沉陷	78
3-4 重复施加载荷对于土壤变形的影响	88
第四章 土壤的水平应力-应变关系及复合载 荷-变形关系	93
4-1 行走机构与土壤间的剪切阻力	93
4-2 车辆行走机构对土壤侧面剪切应力的计算	102
第五章 土壤-车辆系统数学模型的建立	115
5-1 经验方法	115
5-2 拖拉机的行走阻力理论	158
5-3 基本理论的研究方法及其展望	176
第六章 行走机构的改进途径及其发展	179

IV

6-1	行走机构的改进途径·····	179
6-2	新型行走机构的研究·····	183
第七章	模型试验·····	230
7-1	量纲的性质及其应用·····	230
7-2	量纲分析原理·····	234
7-3	无量纲乘积的计算方法·····	251
7-4	模型理论·····	259
7-5	相似理论及模型试验在土壤-车辆系统力学中的应用·····	265
7-6	畸变模型·····	282

第一章 绪 论

1-1 土壤-车辆系统力学的目的和意义

农业机器和拖拉机都要在松软的土壤上行驶，要土壤来支承，要借土壤来发挥驱动力，还要借这种驱动力牵引耕耘机具或其它机器，来改变土壤的状态，使之适于作物的生长或进行别的农业作业。农业机器和拖拉机不论在田间进行何种作业，都不可避免地要压实土壤，对作物产生有害的影响。土壤对农业机器和拖拉机也要产生各种阻力，有的是有用的、必要的，有的则是有害的，应当尽量减少或避免。虽然土壤和农业机器间的相互关系是这样的密切，但几十年来人们只孤立地研究机器，把机器和土壤作为一个整体或一个系统来考虑，则还是近二十余年的事。

过去拖拉机偏重于工程的研究，它涉及到：热力学，燃烧学，应用力学，材料力学，振动力学，流体力学，声学，材料、燃料、油料的物理化学性能，制造工艺，材料强度，发动机，底盘和各部件及标准化等方面的研究。但它缺乏对机器及部件形态(概念)方面的研究，这种研究涉及到：土壤-车辆系统力学，土壤力学，流变学，土壤参数的测定方法及其随季节变化的统计数据处理方法，地面几何学，行驶力学，地区测量和地面数据积累，环境条件和拖拉机用途及作业项目对其性能的要求，以及统计学，运筹学，运用效果的经济分析，运用定额和资料的积累等使用条件，还有拖拉机性能

理论及其评价和计算方法,新形态(概念)设计和试验方法。

1961年在意大利都灵召开的国际会议上,才正式用“土壤-车辆系统力学”这一名词。以后又创造了一个新字“Terramechanics”来代替它,这个名词现在实际上包括任何土壤-机器系统的力学问题。

土壤-车辆系统力学的目的,是要通过对车辆或农机具在自然或农业土壤中工作时所涉及的特别“因子”的详尽的和定量的了解,来使车辆或农机具的设计、选择和运用最优化。

从系统分析的观点看,土壤-车辆系统力学的任务也可以说是探索土壤和车辆间关系的定量描述,建立土壤-车辆系统的数学模型,完成系统分析的关键环节,以便进行系统分析。这样便可以在设计过程中,预知机器在特定土壤中的性能,可以保证最优选择,并提出一些新概念和新技术,为对车辆行走机构进行重大改革提供了可能性。

我国土地辽阔,现有耕地十五亿亩,假定每年只耕翻一次,且平均耕深0.20米,则每年便要耕翻2132亿立方米的土壤。特别是水田,虽只占全国总耕地面积的29%,而水稻产量却占全国总产量的47%,在深泥脚水田中还没有很好的行走机构;东北平原,雨量集中在七、八月份,正值小麦收获季节,往往造成丰产不丰收的局面;大量的农田基本建设和清淤机器都面临着复杂的行走和工作条件,都要求有新的相适应的行走机构。土壤-车辆系统力学的基础理论研究,将为解决这些问题提供理论基础

1-2 土壤-车辆系统力学国内研究情况

早在五十年代初期,我国的科学工作者就已经认识到把土壤与农机具作为一个系统来研究的必要性。有些研究单位

和高等学校开始筹建土壤试验槽设备，中国农机研究院在58年开始用简单、直接、可靠的方法测定了南方水田土壤参数，以后又在六十年代初期，试制了第一台土壤参数测定仪和六分力测力装置；吉林工业大学进行了拖拉机行走机构模拟试验。与此同时，镇江农机学院、南京农学院、洛阳拖拉机研究所、南京农机化研究所、北京农机化学院、广东省农机研究所等单位，也都在五十和六十年代分别进行了关于水田土壤机械性质、犁体曲面分析、犁的牵引阻力和翻土、碎土等性能、水田拖拉机行走机构在水田中的性能、沤田行走机构等方面的大量试验研究工作。

1972年在“农业机械下水田行走机构研究协调座谈会”上，为了解决农业机械下水田行走防滑防陷问题，会议建议设立“水田土壤参数的选定及其测定仪的研究设计”课题。这个建议得到了批准执行，设计试制了水田土壤静载承压仪，水田土壤剪切仪，外附力/内聚力测定仪等三种仪器，并先后于1975年及1976年定型投产。从1976年起又对水田土壤参数与轮胎及履带性能间的关系，进行了初步的探索。

1-3 土壤-车辆系统力学的研究内容和方法

一、土壤-车辆系统力学研究的内容

土壤-车辆系统力学包括哪些内容呢？

一般地说，土壤-车辆系统力学包括四个部分：

- 1) 车辆在松软土壤的性能及松软土壤性能的分析，特别是对车辆在松软土壤中通过性能的评价，以及由此对于车辆改进和设计方面的研究；
- 2) 车辆由于不平地面而产生的振动的研究；
- 3) 车辆克服障阻（壕沟、树、岩石等）的能力；

4) 车辆的两栖性能,特别是在水陆之间的过渡地上的性能。

这里由于篇幅所限,我们只能对于车辆在松软土壤上的通过性能作为重点进行讨论。

二、土壤-车辆系统的研究方法

前面已经提过,土壤-车辆系统力学的任务也可以说是探索土壤和车辆间的关系的定量的描述,建立土壤-车辆系统的数学模型。在这方面,国外大致有四种方法:经验方法;半经验方法;基本的科学研究方法;模型试验方法。

1. 经验方法

这种方法一方面用某种观察和测定来鉴别土壤,一方面将机器放在一系列的重要类型的土壤中试验,然后使两组测定值相关联,再进行适当的分类。这种方法的典型例子是美国陆军水道试验站(W.E.S)的圆锥指数法,简称WES法,也有人根据该所所在地叫做Vicksburg法。WES法不仅用圆锥指数来鉴别土壤,也用圆锥指数来鉴别车辆。对车辆评定的方法是通过试验确定,恰好能让某一种车辆通过50次的土壤状态的额定圆锥指数(RCI),将这个额定圆锥指数作为特定车辆的“车辆圆锥指数”(VCI)。这样,将土壤和车辆放在同一比较基础上,就可以判定某一特定车辆在某一土壤中的通过性和其他性能了。在松砂和湿粘土中,WES曾很成功地将土壤的额定圆锥指数与各种车辆的性能——如行走阻力、挂钩牵引力等相关联。

这个方法的最大优点是使用圆锥测定土壤性质,简单易行。因此,在美、英、日等国都经常应用。但是用经验方法找定量关系,总需要做大量的试验,且所得的结果,又很难外推应用于试验范围之外的情况。

2. 半经验方法

半经验方法是应用现在可以使用的土壤力学理论为土壤与车辆间的相互关系提供最简单的模型。再用这种模型来建立近似的理论，而这又将不断地用现场试验来校核与修正。

英国战车研究所与发展机构 (FVRDE) 的 Micklethwaite 是最早探寻土壤与车辆性能关系的人，他首先应用经典土壤力学部分地解决土壤-车辆系统的问题，他直接应用库伦公式

$$S_{\max} = C + P \tan \phi \quad (1-1)$$

来预计履带车辆可能发挥的最大驱动力，他的公式是：

$$H = blC + W \tan \phi \quad (1-2)$$

式中 b 及 l 是履带接地面积的长度和宽度； C 和 ϕ 为土壤的内聚力和内摩擦角。

五十年代，美国的 Bekker 和他的在美国陆地行驶实验室 (L.L.L) 的同事们也以经典土壤力学为依据，提出一套半经验的土壤-车辆系统的工程模型。以后 Harrison, Janosi, Reece 等人曾将 Bekker 的方法加以改进，用于农业机器。

Bekker 等将土壤对车辆的作用分解为加压和剪切，分别用两种仪器模拟这两种作用，得到压力 (P) 与下陷 (Z) 和抗剪强度 (S) 与位移 (j) 两种关系曲线，这两种关系是分别用下列方程式表示的：

$$P = \left(\frac{K_c}{b} + K_\phi \right) Z^n \quad (1-3)$$

$$S = S_{\max} \left(1 - e^{-\frac{j}{k}} \right) \quad (1-4)$$

两式中 n 为沉陷指数， K_c 、 K_ϕ 和 K 均为土壤变形模

量。(1-3)式是根据经典土壤力学知识对 Bernstein 公式 $P = K(Z)^n$ 的修正, $S_{\max}$ 就是库伦公式 (1-1)。从这两个公式可以导出土壤的 C , ϕ , K , K_c , K_ϕ 及 n 六个参数。有了这六个参数便可以计算某一车辆在特定的土壤中的性能, 例如对于履带和高挠度弹性轮胎, 总的驱动力 H 可表示为滑转率 i 的函数:

$$H = (bIC + Wtg\phi) \left(1 + \frac{K}{il} e^{-\frac{il}{k}} - \frac{K}{il} \right) \quad (1-5)$$

压实阻力 R_c 可写为:

$$R_c = \frac{1}{(n+1)(K_c + bK_\phi) \frac{1}{n} \left[\frac{W}{l} \right]^{\frac{n+1}{n}}} \quad (1-6)$$

Bekker 的理论已在越野车辆中引起巨大变化。但也有许多问题, 用这种方法推导出的公式, 与有的试验结果不能完全一致, 其压力-下陷公式完全是经验的, 没有理论基础, 且其中参数 K_c 及 K_ϕ 没有固定的量纲等。

3. 基本的科学研究方法

用经验方法和半经验方法导出的一些土壤-车辆系统的数学模型, 都存在一些问题。因为, 经验公式只适用于特殊条件, 有极大的局限性, 极不可取。现有的半经验的理论无论是行走理论还是土壤切削理论, 都是建立在经典土壤力学的基础之上的。经典土壤力学的基本假定与农业土壤不符。

基本科学研究遵循连续介质的力学方法, 即

- 1) 描述和分析机器通过它与土壤的邻界面对土壤的作用力;
- 2) 研究土壤受力后的反应, 即变形与运动情况;

- 3) 研究土壤的应力与应变关系;
- 4) 平衡条件, 边界条件和一致性的陈述和满足;
- 5) 研究土壤失效和破坏理论。

这一方法之所以重要, 是因为只有这样才能获得关于客观事物内在联系和变化规律的知识, 才能利用这些知识探寻行走和土壤剪切的方法。

4. 模型试验方法

模型试验可以用来探寻土壤与车辆性能间的相互关系和验证关于这关系的理论。这是在流体力学、造船和航空等方面的研究中发展起来的一种技术。美国 Caterpillar 公司首先应用模型技术来研究土壤切削板锄。这是因为模型试验具有下列优点:

- 1) 可以节约试验设备开支;
- 2) 扩大可试验的土壤参数的范围;
- 3) 对试验条件进行较精密的控制;
- 4) 可以缩短试验周期。

模型试验的结果可用来定性地和定量地预计原型性能。

土壤-车辆系统模型试验的主要问题是土壤性质的模型化问题。目前, 对这一问题采取两种方法, 一种是采用人工土壤, 将土壤性质按比例缩小。另一种是采用畸变模型。

为了扩大比例模型试验技术的应用, Schafer, Larson, Reaves 和 Garrity 等人都在耕耘机具的土壤切削板锄的研究中应用畸变模型试验理论。方法是先计算不将土壤性质按比例缩小可能在系统中引起的畸变量, 知道畸变量后, 便不必再将土壤性质按比例缩小。这样便可将大小不同的模型和原型, 在同样的土壤状态下试验, 可由两者之一的试验结果, 预计另一的性能。

第二章 土壤参数及其测试方法

2-1 什么是土壤参数

要研究土壤和车辆行走机构或耕耘部件互相之间的定量关系,首先要能鉴定和测量土壤特性,也就是先把土壤特性变成一种数量。这样就产生了各种各样的土壤测量仪器来测量土壤的参数,但这些仪器所测量的结果,不一定是真正的土壤参数。为了使土壤测定值的计算和应用方便,有的研究者将土壤测定分为三类:①土壤特性,它不受任何测定仪器影响;②土壤参数,随不同的测定仪器而变化;③模拟值,即系统中较难处理的简单模拟值。

这里我们对与土壤-车辆系统力学有关的一些参数作一简单说明,以便于读者了解和应用这些参数。

土壤是一个复杂三相系统。在一般情况下,土壤的系统是固体的(无机质和有机质)颗粒,但没有密实地占据整个体积,而是在颗粒间有孔隙,一部分被水、冰或其他液体所充满,而另一部分则被空气和水蒸气所充满。因此,土壤是由固体、液体和气体三部分组成的。

这些组成的性质、体积、形状和在土壤中的数量对比关系以及它们之间的相互作用,都决定着土壤的力学性质。

三相系统的图解如图2-1。

一、孔隙比及孔隙度(e 及 n)

孔隙比是孔隙的体积与固体体积之比。孔隙可以完全为

水所充满，亦可完全由空气充满，也可以部分地为水和空气

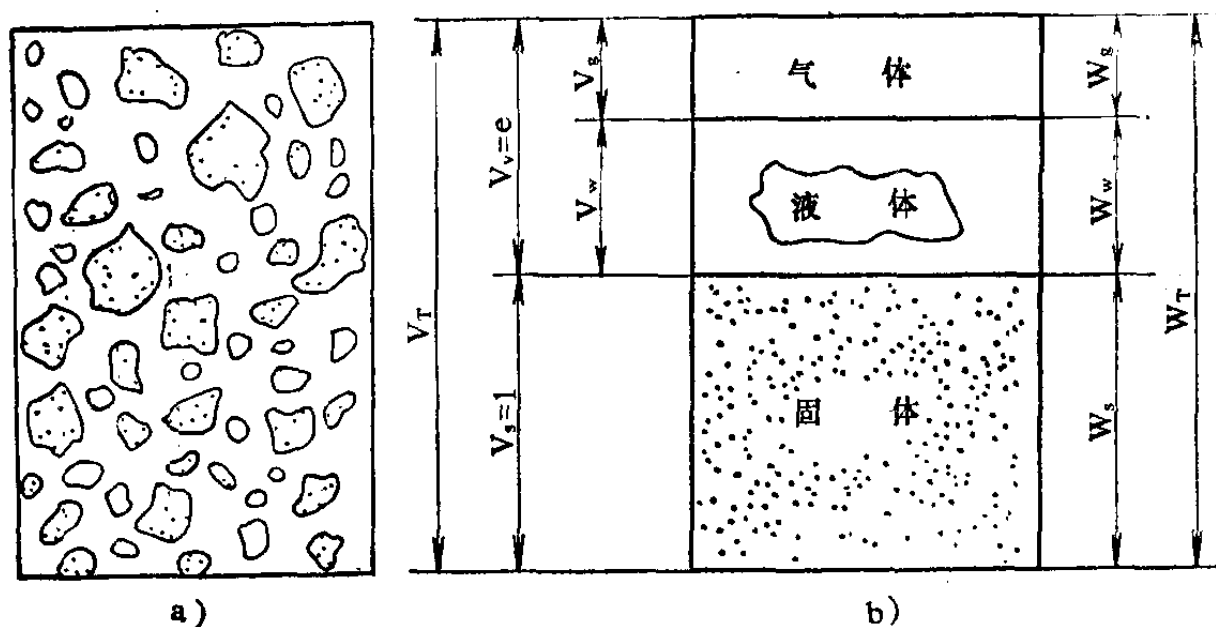


图 2-1 土壤三相系统

a) 自然土壤的元素 b) 元素分离成相位

充满，用公式表示如下：

$$\text{孔隙比} = \frac{V_v}{V_s} \quad (2-1)$$

由于在给定过程中土壤试样中固体的重量一定，为了方便起见，可以考虑固体的体积一定，假定等于 1 即 $V_s = 1$ ，所以公式 (2-1) 变成：

$$\text{孔隙比} = \frac{V_v}{V_s} = \frac{e}{1} = e \quad (2-2)$$

孔隙度可定义为：

$$n = \frac{V_v}{V_t} = \frac{e}{1 + e} \quad (2-3)$$

式中 V_t ——土壤试样的体积， $V_t = V_v + V_s$ 。

很明显，孔隙比及孔隙度均为暂时土壤特性，它随所加力的大小而改变。

二、含水量 (W)

土壤的含水量是已给土壤试样中水的重量与干土的重量

(亦即固体颗粒重量) 的比, 通常都以百分数表示, 用公式表示为:

$$W = (W_w / W_s) \times 100 \quad (2-4)$$

三、爱特伯极限 (Atterberg Limit)

在天然条件下, 土壤可能具有各种不同的物理状态。砂土由紧密到极疏松, 粘土由固体到流动。对于粘土而言, 相对密度的概念是没有什么意义的。粘土的天然密度取决于它们的稠度 (或者说浓度), 亦即取决于含水量。根据含水量的不同, 粘性土壤的稠度可能在相当大的范围内变化。爱特伯极限就是用以说明粘性土壤由于含水量不同, 从一种土壤状态变成另一种土壤状态的极限, 它对于土壤的力学性质有极大的影响, 特别是对水田及沼泽地区的土壤特性更为重要。

爱特伯极限可以用图表示, 如图 2-2。

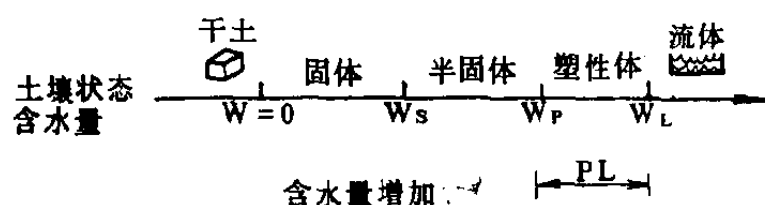


图 2-2 爱特伯极限及其相关指数

假定往一块完全干的土壤慢慢加水, 直到干土的所有孔隙都充满水。若水分减少时不伴随土体体积的缩小, 此时土体的含水量叫做收缩极限 (shrinkage limit) (W_s)。再加水, 土壤变成半固体状态, 当土体的水分继续增加时, 土壤开始变成塑性状态, 这时的含水量叫做塑限 (W_p)。再增加水分时土壤变成流体, 此时的含水量叫做液限 (W_L)。下面我们对这些极限再作一些描述。

1. 土壤的液限 (W_L)

相当于土壤这样的含水量, 即稍微超过这一含水量时,

土壤就变成流动的粘滞性液体。液限标志着土壤由液体状态过渡到塑性状态。它以水对于土重量的百分比来表示，当含水量减少时，它具有小的但可测量的剪切力。

液限的实验方法是用特制的割刀在土壤膏上切成小沟，将此盛有土壤膏的杯子在指定高度撞击三次，测定土壤膏流在一起的含水量。原始的方法是 Atterberg 提出的，后来由 Casagrande 修正，现在已标准化 (ASTM-423-66 或 AASHO-T-89-68) 了，这样大大消除了在确定时的主观因素。

不同类型土壤的液限的典型值如表 2-1 中第三行所示。

表 2-1 某些典型土壤的稠度极限

土壤类型	塑性程度	液限 (W _L)	稠 度 极 限		塑 性 指 数 范 围
			塑限 (W _p)	塑性指数 PI	
1	2	3	4	5	6
砂	非塑性	20	20	0	0
壤土	低塑性	25	20	5	<7
壤粘土	中塑性	40	25	15	7~17
粘壤土	中塑性	40	25	15	7~17
粘土	高塑性	70	40	30	>17

土壤的液限是在重塑状态时确定的，所以它不取决于土壤本身的情况。对于越野行驶来说，它是用以鉴定土壤的重要特性。

处于液限的土壤，其重塑剪切强度为 0.02~0.04 公斤/厘米²；按土壤本身情况，它的剪切强度可能稍高些。

2. 土壤的塑限 (W_p)。

土壤的塑限是以其含水量与烘干土重量之比的百分数表

示的，在这种情况下土壤逐渐从塑性状态向半固体状态变化，变得脆弱。

土壤塑限定义是在土壤能够碾成三毫米直径的泥条时的最小含水量，当含水量再减少时泥条即破碎成片。这个定义首先是 Atterberg 提出的，在美国和许多国家中稍加修正后作为标准（ASTM-D424-59 或 AASHO-T-90-70），所以塑限的定义是：土壤变得易碎时的极限含水量。

土壤的塑限也决定于土壤中的粘土含量、粘土颗粒的成分、分散性、形状和弹性。如果颗粒成鱼鳞片状，土壤便具有塑性，这方面 Seed 等作了较详细的讨论。

土壤塑限较之土壤液限的变化范围小。不同类型土壤塑限的典型值如表 2-1 中第 4 行所示。

土壤塑限的确定在某种程度上带有主观成分并受人的因素影响。Russell 和 Mickle 1970 年曾试图用更客观的方法来决定塑限，但由于 Atterberg 方法几乎已普遍地被人们接受，以致影响了人们对新方法的接受。标准化减少了但不能消除人的因素。人的因素影响塑限的含水量变化范围不超过 $\pm 2\%$ 。

塑限除了是鉴别土壤的简单方法外，它对估计车辆“可行驶性”具有一定意义。塑限表征着土壤状态从塑性状态过渡到半固体状态，所以当土壤含水量相当或低于塑限时，大多数越野车辆可以行驶。

3. 土壤的收缩极限 (W_s)

土壤的收缩极限是干土所有空隙都充满了水、当减少土壤水分时它的体积不伴随收缩的含水量。收缩极限是用测量烘干的土壤体积和测量完全充满干土孔隙所需的含水量来计算的（ASTM-D427-61 或 AASHO-T-92-68）。这个试验既可以在重塑也可以在未经扰动的试样上进行。另外一些决