



QUANGUO GAODENG  
NONGYE YUANXIAO  
JIAOCAI

全国高等农业院校教材

# 拖拉机汽车学

第四册

拖拉机汽车理论

第二版

华中农业大学 主编

---

中国农业出版社

全国高等农业院校教材

# 拖 拉 机 汽 车 学

第四册 拖拉机汽车理论

第二版

华中农业大学 主编

中国农业出版社



封面设计：赵之公

### 图书在版编目 (CIP) 数据

拖拉机汽车学. 第4册, 拖拉机汽车理论/华中农业大学主编. —2版. —北京: 中国农业出版社, 2001.5  
全国高等农业院校教材  
ISBN 7-109-01763-X

I. 拖... II. 华... III. ①拖拉机-理论-高等学校-教材②汽车-理论-高等学校-教材 IV. U46

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 07079 号

---

出版人 沈镇昭  
责任编辑 段丽君  
出版 中国农业出版社  
(北京市朝阳区农展馆北路2号)  
发行 新华书店北京发行所  
印刷 北京忠信诚胶印厂  
\* \* \*  
开本 787mm×1092mm 16开本  
印张 15.25 字数 320千字  
版、印次 1981年7月第1版  
1991年5月第2版  
2001年5月第2版北京第6次印刷  
印数 20 851~23 850册 定价 20.10元

ISBN 7-109-01763-X



0 1 >

9 787109 017634

书号 ISBN 7-109-01763-X/ TH·85

## 第二版说明

本书是根据1981年7月农业出版社出版的全国高等农业院校试用教材《拖拉机汽车学》修订的。修订中遵照农牧渔业部教育司关于修订教材，要按照“打好基础、精选内容、逐步更新、以利教学”的指示精神，在广泛收集全国各高等农业院校对原教材意见的基础上，本着保证质量、控制篇幅、吸收国内外先进技术的原则，将原教材由五个分册修订为《拖拉机汽车构造》（第一册、第二册）、《拖拉机汽车发动机原理》（第三册）、《拖拉机汽车理论》（第四册）四个分册。对原教材的第五册《实验实习》作了分散到各有关章节去的处理，并在各分册每章后面增加了复习思考题。在编写中，适当减少了构造部分的篇幅，更新了内容；充实了发动机原理和拖拉机理论；增编了汽车理论的有关章节。

《拖拉机汽车学》是农业工程类专业的主干课程之一。其目的是使学生掌握拖拉机汽车的结构原理，内燃机、拖拉机和汽车的基本理论与性能试验的一般方法。为学习《农业机械管理学》、《农业机械维修工程学》、《农业机械化经营管理》等课程和解决生产实际问题、开展科学研究打下基础。

本书按农牧渔业部颁发的《拖拉机汽车学》教学大纲编写的，主要供农业工程类专业本科学生使用，也可供从事农机工程的同志和有关中等专业学校的学生参考。

遵照国务院1984年2月27日发布的《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》，本书计量单位采用了国家法定计量单位。有些转引图表和资料虽然沿用原著的单位制，但在附录中列出了两种单位对照表，以利读者换算。

本书在修订过程中，得到了全国各高等农业院校从事《拖拉机汽车学》教学的有关教师和北京农业工程大学陈济勤、张圣虎、周一鸣等有关同志的大力支持和帮助。在此，一并表示衷心的感谢。

限于修订者的水平，书中难免出现缺点和不足之处，欢迎使用本书的师生和广大读者指正。

编者

1988年3月

## 第一版说明

《拖拉机汽车学》是全国高等农业院校农业机械化专业试用教材，全书分发动机构造和电气设备、底盘构造、发动机原理、拖拉机理论、实验实习共五册，由华中农学院王能裕、冯联杰，华南农学院邵耀坚，东北农学院王德亭、戴天裘五同志主持编写。

第一册《发动机构造和电气设备》由华中农学院冯联杰、王能裕主笔，参加编写者有浙江农业大学奚文斌，西南农学院张朗轩、肖同明，山东农业机械化学院董前增、胡维信，吉林农业大学吴忠臣等。

第二册《拖拉机汽车底盘构造》由东北农学院王德亭、戴天裘主笔，编著者有西北农学院黄振声、左士伦，北京农业机械化学院孙衍庆、陈汝延，华中农学院王能裕等。

第三册《发动机原理》由北京农业机械化学院顾斌主笔，编著者有西北农学院任凤鸣同志。

第四册《拖拉机理论》由华南农学院邵耀坚主笔，参加编写者有东北农学院王德亭、戴天裘。

第五册《实验实习》由甘肃农业大学徐正杰同志主笔，编著者有甘肃农业大学唐兰治、胡振兴，广西农学院王予宾，内蒙古农牧学院张峰奇等同志。

# 目 录

绪论 .....	1
第一章 拖拉机汽车行走机构的基本理论 .....	2
第一节 轮式拖拉机、汽车行驶原理 .....	2
第二节 土壤及其物理机械性质 .....	4
第三节 轮子运动学 .....	14
第四节 轮子动力学 .....	18
第五节 水田轮及滑船 .....	31
第六节 履带行走机构运动学及推力 .....	38
第七节 履带行走机构滚动阻力 .....	41
第八节 汽车轮胎在道路上的动力性能 .....	44
第二章 拖拉机总体动力学 .....	48
第一节 轮式拖拉机总体动力学 .....	48
第二节 轮式拖拉机牵引平衡分析 .....	54
第三节 四轮驱动拖拉机性能特点及寄生功率 .....	62
第四节 手扶拖拉机受力分析 .....	67
第五节 船式拖拉机受力分析 .....	70
第六节 履带拖拉机总体动力学 .....	73
第七节 提高拖拉机牵引附着性能的途径 .....	79
第三章 拖拉机稳定性与汽车制动性 .....	85
第一节 轮式拖拉机及机组的纵向稳定性 .....	85
第二节 手扶拖拉机的稳定性 .....	92
第三节 履带拖拉机的纵向稳定性 .....	94
第四节 拖拉机的横向受力及稳定性 .....	95
第五节 改善拖拉机稳定性的措施 .....	96
第六节 车辆的制动 .....	97
第七节 车辆制动过程受力分析 .....	100
第四章 拖拉机的牵引特性 .....	107
第一节 拖拉机的功率平衡 .....	107
第二节 影响拖拉机牵引特性的主要参数 .....	109
第三节 拖拉机的牵引特性曲线 .....	114
第四节 拖拉机滚动阻力因数和附着因数的测定试验 .....	126
第五节 拖拉机的牵引试验 .....	130
第六节 拖拉机整机结构参数的测定 .....	134
第五章 汽车的动力性与燃油经济性 .....	140

第一节	动力因数与动力特性 .....	140
第二节	汽车的加速性 .....	143
第三节	汽车的燃油经济性 .....	145
第四节	汽车的牵引计算 .....	150
<b>第六章</b>	<b>车辆转向理论 .....</b>	<b>156</b>
第一节	轮式车辆的转向 .....	156
第二节	单式差速器对轮式车辆性能的影响 .....	164
第三节	手扶拖拉机的转向 .....	170
第四节	船式拖拉机的转向 .....	172
第五节	履带拖拉机的转向 .....	174
第六节	履带拖拉机转向的几种工况分析 .....	179
<b>第七章</b>	<b>拖拉机汽车人机工程 .....</b>	<b>187</b>
第一节	人体的人机工程学参数 .....	187
第二节	车厢内小气候及对其控制 .....	195
第三节	拖拉机汽车噪声 .....	202
第四节	拖拉机汽车的机械振动 .....	208
第五节	拖拉机汽车的安全措施 .....	216
<b>第八章</b>	<b>拖拉机的使用性能及本学科的发展 .....</b>	<b>219</b>
第一节	农业拖拉机的使用性能及评价指标 .....	219
第二节	本学科的发展 .....	226
	本书常用符号表 .....	234

## 绪 论

拖拉机汽车理论主要研究拖拉机、汽车的行驶推进原理及它们工作时整机及主要部件的运动、受力和功率变化的规律；研究拖拉机及其机组的运动学和动力学；研究拖拉机使用性能与人和使用环境的相互关系；研究提高拖拉机汽车性能的规律，为拖拉机的正确运用、设计、试验提供理论基础。

拖拉机汽车理论以各种参数、指标、公式、模型表达上述性能和规律的定性关系；通过试验、计算、数据分析给它们以数值定量关系，作为正确运用、设计的依据。

拖拉机汽车理论来源于对拖拉机汽车的实践，经过提高的理论又用于指导对拖拉机汽车的实践，并且不断互相促进提高。

在高等农业院校的农业机械化专业中，拖拉机汽车理论是《拖拉机汽车学》课程的重要组成部分。讲授拖拉机汽车理论的目的在于使学生在学拖拉机汽车发动机、电器设备、底盘等构造、工作原理等知识的基础上，理解行走装置（车轮、履带、滑船等）与土壤（地面）相互作用、推进行驶的理论基础、拖拉机汽车及机组总体动力分析，稳定性、牵引性能、转向理论、人机关系以及拖拉机汽车使用经济性、基本参数确定等有关知识，使学生理解拖拉机汽车的主要性能和工作规律，具有评价它们的使用性能的能力和有关改善性能、提高效率的知识，并为农业机器运用课程提供理论基础知识。

拖拉机汽车理论是一门正在发展中的学科，在理论和试验方面还需要做大量工作和从各方面探讨和研究，但已得到国内外学者的重视和努力探求。例如，为提高拖拉机汽车在各种土壤（地面）上的通过性能和牵引性能，近几十年来对车辆行驶的土壤（地面）物理特性和力学参数进行了许多研究，探讨建立地面—车辆系统的数学模型，以及稳定性、操纵性、燃料经济性、舒适性等的数学模型及分析，取得一定进展和成果。

随着拖拉机汽车结构的改进和适应不同土壤（地面）条件而研制新型车辆的发展，拖拉机汽车理论也在不断发展。例如四轮驱动拖拉机、大功率高速拖拉机、悬挂机具—拖拉机构成的机组等，都促使拖拉机汽车理论对于这些问题分析研究，并不断取得进展。

拖拉机理论在我国应结合国情，反映我国农业机械化特点及我国的环境条件，我国劳动人民创造的适于水田作业的拖拉机及行走机构——船式拖拉机、耕整机等，它们都有各自的理论特点，值得总结并反映出来。

根据《拖拉机汽车学》修订会议讨论并决定将《拖拉机理论》改为《拖拉机汽车理论》，这是由于我国农村使用汽车完成农业运输已较普遍，需适当编写汽车理论的内容，编者将本着“逐步更新”的原则进行编写，例如，增加了车辆人机工程等章节。这次还将在每章增加一些计算例题及在每章之后增加思考问题和习题。

感谢各兄弟农业院校的教师及有关读者对本教科书提出宝贵意见，给予编写本书以很大帮助。



# 第一章 拖拉机汽车行走机构的基本理论

## 第一节 轮式拖拉机、汽车行驶原理

### 一、轮式拖拉机行驶的基本情况

两轮驱动轮式拖拉机带牵引农具在水平地段作等速行驶的受力基本情况如图1-1所示。

具有功率  $P_e$  的柴油机，其动力以高转速（角速  $\omega_e$ ）和低力矩（ $M_e$ ）的形式通过传动系统传到驱动轮，变成低转速（角速  $\omega_q$ ）和大力矩（ $M_q$ ）力矩  $M_q$  称为驱动力矩，就拖拉机整机受力来看，它属内力矩，图中用虚线表示。

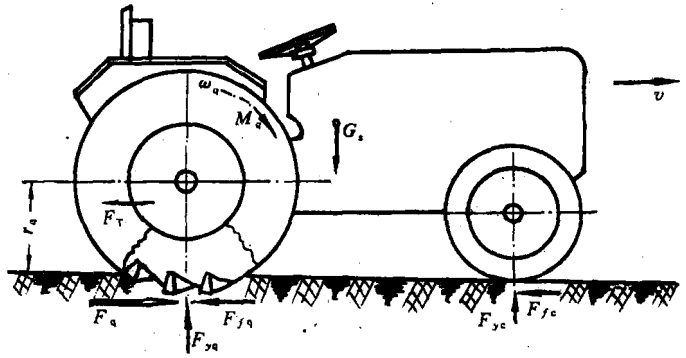


图 1-1 轮式拖拉机行驶原理

在驱动力矩  $M_q$  和拖拉机重量  $G_s$  的作用下，驱动轮与

土壤接触，在接触面产生了土壤反作用力，其中有水平反力  $F_q$  和垂直反力  $F_{yq}$ 。 $F_q$  的方向和拖拉机行驶方向相同，是推动拖拉机行驶作业的推力； $F_{yq}$  则是作用在驱动轮上的支承力。当推力  $F_q$  足以克服前、后轮的滚动阻力  $F_{fc}$  和  $F_{fq}$  以及机具牵引阻力  $F_T$  时，驱动轮将带滑转向前滚动，拖拉机以速度  $v$  向前行驶作业。

试验测定的数据表明：大、中型两轮驱动轮式拖拉机所发挥的牵引功率  $P_T = \frac{F_q v}{3600}$  kW，只占发动机功率的 50%~60%，功率消耗接近一半。通过分析，可以认识下述拖拉机行驶作业的一些基本现象：

(1) 发动机提供拖拉机行驶作业的动力，其有效功率  $P_e$  表现为有效力矩  $M_e$  和角速  $\omega_e$ ，通过传动系统向驱动轮传递过程，在传动系统损失约 10% 功率。

(2) 行走机构——驱动轮是轮式拖拉机发挥推进作用的主要装置。驱动轮必须和土壤（地面）相互作用（包括接触过程的摩擦、压缩和剪切等作用），在土壤反作用力作用下实现滚动，才能行驶作业。因此，拖拉机能够发挥多大的推力，最终要受限于行走机构与土壤的附着性。

(3) 土壤的物理机械性质对驱动轮推力、前后轮的支承力及滚动阻力的发挥和限制有着重要作用。

在松软易变形的土壤上，驱动轮的推力明显减少，滑转明显增加；即使在较坚实的土

壤上，尽管我们不易察觉，推力也受到限制，而滑转损失也是存在的。轮式拖拉机在旱地满负荷作业情况下，滑转引起的速度损失 15%~25%。推力要克服前、后轮的滚动阻力表示了推力损失，推力损失大小随土壤物理机械性质和行走机构型式而异。

传动损失、速度损失和滚动阻力损失三者所组成的功率总损失，是发动机功率消耗的主要部分，剩余的功率可用于牵引、加速、爬坡等。

## 二、汽车行驶的基本情况

后轴驱动的汽车在水平道路作等速行驶的基本受力情况如图 1-2 所示。可见汽车的行驶原理与轮式拖拉机基本相同，但也有些差异。

相同之处在于：发动机的动力经传动系统传递给驱动轮，驱动轮具有驱动力矩；驱动轮发挥推力靠它与路面相互作用；路面的性质对驱动轮推力，前、后轮滚动阻力有发挥和限制的作用。

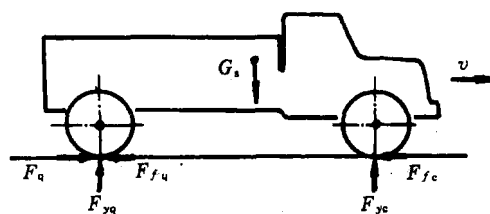


图 1-2 汽车行驶原理图示

差异在于：汽车主要用于交通运输，要有一定的装载能力和较高车速，当不拖带挂车时，推力只须克服自身的行驶阻力，

当拖带挂车或半挂车时在公路行驶时，以牵引力方式输出动力并不很大；在行驶阻力中，随着车速提高，空气阻力不可忽视；汽车的传动比一般较小，传动损失较小，路面变形与轮胎变形均小，滑转损失、滚动阻力损失较小。因而，汽车行驶功率总损失相对于轮式拖拉机来说要小得多。

为了拖拉机、汽车正常行驶，并提高拖拉机的牵引效率和汽车的运输效率，我们力图提高土壤推力，减少滚动阻力，这就使我们必须研究土壤的物理机械性质、路面性质、行走机构的运动学、动力学以及推力、滚动阻力、沉陷与支承力等，下面将分别讨论。

## 三、驱动力矩与传动效率

拖拉机或汽车的驱动力矩  $M_q$  是由发动机经传动系统传到驱动轮的，传递过程有一定的功率损失，主要是由齿轮啮合的摩擦阻力、轴与轴承间的摩擦阻力、油封与轴间的摩擦阻力以及齿轮搅油阻力等引起。

拖拉机或汽车的传动效率  $\eta_c$  为传到驱动轮上的功率  $P_q$  与发动机发出的有效功率  $P_e$  的比值，即

$$\eta_c = \frac{P_q}{P_e} = \frac{M_q \omega_q}{M_e \omega_e}$$

式中： $\omega_q$ ——驱动轮角速；

$\omega_e$ ——发动机曲轴角速；

$M_e$ ——发动机有效力矩。

$\eta_c$  值因传动系的组成不同而有差异，也与传动系的技术状态有关，一般  $\eta_c$  约为 0.9。假定离合器不打滑，发动机有效功率能够全部经由离合器传出，上式可表示为

$$\eta_c = \frac{M_q}{M_e i} \quad (1-1)$$

式中： $i$ ——传动系总传动比，它是变速箱、中央传动和最终传动（汽车一般无最终传动）各部分传动比的乘积， $i = \frac{\omega_e}{\omega_q}$ 。

于是，拖拉机或汽车在水平地段作等速直线行驶时，发动机的有效力矩  $M_e$  与驱动轮力矩  $M_q$  的关系可用下式表示：

$$M_q = \eta_c i M_e$$

## 第二节 土壤及其物理机械性质

土壤既是拖拉机、农业机械的工作介质，又是农作物赖以生长的介质。我们不仅要在地面—车辆系统力学方面探求车辆推进和行驶原理，而且要从农业生产方面去研究拖拉机行驶和作业对农田土壤结构、土壤肥力以及对农作物产量的影响。从而在拖拉机设计、使用上探求减少作业能耗、减轻机具对土壤结构的破坏、提高土壤肥力等问题。现在，许多国家农业生产规模不断扩大，农业生产机械化程度不断提高，因而发展了大功率、重型、高速的拖拉机以及配套的宽幅作业机具，长期用这类机具全面机械作业的结果，引起了不少学者的关注，他们查觉了机具对土壤的过分压实，破坏土壤结构，造成水土流失，土壤肥力下降。疏松压实的土壤要增加额外的能耗，还导致农作物产量的下降。农机工作者应统筹考虑机具、土壤、农作物三者的相互关系。拖拉机及农业机具不仅应具有先进的工程技术和经济性能指标，施行机械化作业时，能提高劳动生产率，作业成本低，而且不使土壤结构破坏，有利于提高土壤肥力（包括改善土壤中水、肥、气、热、光等条件），为农作物生长创造良好条件，从而达到促使农作物增产增收的目的。

土壤自身就是一个复杂的系统，受含水量、有机质含量和孔隙度等变化的影响，其性状多变。土壤的物理机械性质是指土壤组成，单位重，湿度，土壤与行走机构的摩擦因数，土壤的抗压、抗剪能力等。这不仅影响车辆行走机构性能的发挥，还影响农机具的性能以及农作物的产量高低。

### 一、土壤组成

土壤粒子组成与土壤的性质有密切关系。这里介绍国际地面—车辆系统协会（ISTVS）推荐的国际土壤科学协会关于土壤粒子组成的分级系统。这个系统按下列土粒尺寸对土壤分级：

石块：直径大于 20mm。

砾石：20mm 至 2mm 直径。

粗砂：2mm 至 0.2mm 直径。

细砂：0.2mm 至 0.02mm 直径。

粉粒：0.02mm 至 0.002mm 直径。

胶体粒子或粘粒：直径小于 0.002mm。

由于土壤粒子结构不同，土壤的性质变化极大。干砂土壤呈摩擦性；而粘土则呈粘结性，且随含水量不同而有固态、半固态、塑态或者液态的明显差别，使行走机构性能产生很大差异。

一般土壤由若干级的土壤粒子组成，可通过分析获得土壤各种组成粒子成分的百分率，从而确定土壤的主要组成及性质。除了土壤粒子作为固相存在外，一般土体在自然状态下还含有液体和气体，是固、液、气三相的构体。

## 二、土壤单位重、空隙率和湿度

土壤单位重 (unit weight)  $\gamma$  指土壤在固、液、气三相自然状态下单位体积土体的重量，亦称土壤密度或容重，注意土壤力学的单位重与农业土壤学的容重定义有所不同，应加以区别。

由于一般土壤容积  $V$  包括固体容积  $V_g$ 、水容积  $V_s$  和空气容积  $V_k$  三部分容积之和，即  $V = V_g + V_s + V_k$ ，而土壤重量  $G$  只包括固体重量  $G_g$ 、水重量  $G_s$ ，即  $G = G_g + G_s$ ，土壤力学规定土壤中的空气重量  $G_k$  忽略不算。参阅图 1-3。

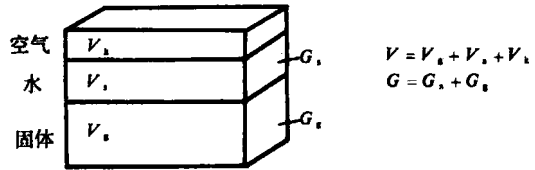


图 1-3 土壤的三相组成

土壤单位重有干单位重  $\gamma_{干}$  和湿单位重  $\gamma_{湿}$  之分：

$$\gamma_{干} = \frac{G_g}{V} = \frac{G_g}{V_g + V_s + V_k} \quad (1-2a)$$

$$\gamma_{湿} = \frac{G}{V} = \frac{G_g + G_s}{V_g + V_s + V_k} \quad (1-2b)$$

一般来说，土壤单位重  $\gamma$  是指湿单位重  $\gamma_{湿}$  而言。土壤单位重一般在  $15.7 \sim 21.6 \text{ kN/m}^3$  之间。

至于土壤比重  $\Delta$ ，主要是指土壤固体重量  $G_g$  与固体容积  $V_g$  之比与同样体积水重的比值， $\Delta = \frac{G_g}{V_g} : \gamma_{水} = \frac{G_g}{V_g}$ 。一般砂土比重约为 2.65，粘土比重为 2.7~2.75。

土壤空隙率  $e$ ，指在土壤内的空气与水容积（即空隙） $V_k + V_s$  与固体粒子容积  $V_g$  之比，参阅图 1-3。

$$e = \frac{V_k + V_s}{V_g} \quad (1-3)$$

土壤湿度  $w$  即土壤含水量，亦即土壤中所含水分重量  $G_s$  与该土壤固体粒子重量  $G_g$ （相当于土壤试样烘干时重量）的百分比。

$$w = \frac{G_s}{G_g} \times 100\% \quad (1-4)$$

或

$$w = \frac{G - G_g}{G_g} \times 100\%$$

以上所述土壤单位重、空隙率和湿度对土壤的物理机械性质有密切关系，对行走机构性能有重要影响。其中，土壤湿度对土壤性质及行走机构的影响更为显著。

### 三、土壤与行走机构之间的摩擦因数

土壤与车辆行走机构的摩擦因数亦称土壤的外摩擦因数，行走机构的性能和它们与土壤间的摩擦因数  $\mu$  有密切关系，特别是在干硬的旱地土壤和路面上，摩擦力是产生推力的主要因素之一。

用  $F_\mu$  表示行走装置与土壤或路面之间的滑动摩擦力，则有

$$F_\mu = \mu Q \quad (\text{N}) \quad (1-5)$$

式中： $\mu$ ——行走机构与土壤之间的摩擦因数；

$Q$ ——行走机构所承受的垂直载荷 (N)。

摩擦因数  $\mu$  与行走机构的材料、类型、土壤的组成、湿度及相对滑动速度等有关。土壤湿度对摩擦因数  $\mu$  的影响尤为明显，在一定范围内，湿度增加，摩擦因数下降。据试验，行走机构与土壤间的  $\mu$  值，在正常的土壤条件下不超过  $0.25 \sim 0.3$ <sup>[13]</sup>。

船式拖拉机的滑船底部（钢板）与水田土壤之间的摩擦因数，据测定为  $0.09 \sim 0.14$ <sup>[8]</sup>。

针对车辆与土壤相互作用的特点，为了研究土壤在车辆载荷及行走机构作用下产生沉陷、滑转、滚动阻力、推力等各种现象，许多学者对在车辆载荷作用下的土壤应力—应变关系提出各种各样的测定方法、仪器以及表达它们之间关系的数学模型。概括地说，目前这些应力—应变关系主要从两方面去探究：一是土壤垂直应力—应变关系，即土壤的承压性能，它直接影响车辆的沉陷和滚动阻力；二是土壤水平应力—应变关系，即土壤的水平剪切性能，它直接影响车辆推进力的发挥和滑转的产生。下面分别作一些介绍。

### 四、土壤的垂直应力—应变关系（承压性能）

土壤的承压性能可通过平面测板或圆锥测头在垂直载荷作用下压向土壤，土壤抵抗变形并产生沉陷，记录不同载荷面积及与之对应的沉陷量，可测得压强与沉陷的关系曲线，即土壤承压曲线。

目前，国内外用来测试压强—沉陷的仪器较多，前苏联全苏农业机械研究所（ВЦХОМ）的土壤坚实度仪，用来测试旱地承压能力；美国陆军水道试验站（WES）采取圆锥指数法来鉴别土壤的承压能力，并用作判断车辆的通过性能；贝克（M.G. Bekker）设计的贝氏仪，其中承压测试部分用来测定土壤的承压能力；在 50 至 60 年代，我国许多研究单位也设计各种不同尺寸测板或圆锥形测头用来测试水田土壤坚实度，以表征水田土壤的承压能力，国产的 SY-1 型水田土壤承压仪适于水田土壤测定，是作为部标（NJ-168-78）在全国推广使用的仪器。

使用上述仪器和测试方法都可得到压强—下陷曲线，即  $\sigma-z$  曲线， $\sigma$  表示贯入压强 (kPa)， $z$  表示下陷值 (cm)，压强—下陷曲线形状和走向大体相似，但数值会有差异，因而会有一定的局限性。试验表明，不同形状的测头如圆锥测头、圆盘或矩形平板测头，测头的大小及其几何形状、测头贯入速率或土壤变速率以及土壤的普遍不均匀性等都会引

起土壤承压性能曲线的变化和数值的误差。各国学者在各自采用的仪器和当时试验条件下获得的土壤承压特性，都有一定的局限性，有时难以得到良好的可比性。因此，仪器和方法应统一并考虑相应条件。如在我国宜统一使用 SY-1 型水田土壤承压仪，以测定水田土壤承压性能。表 1-1 列出各国较普遍采用的测定仪器和测头数据。

表 1-1 国内外较普遍使用的土壤承压性能仪器、测头的的数据

国家	设计单位 或人名	仪器名称	承载能力范围 (kPa)	测头形状及尺寸					贯入速率 (cm/s)	适用土壤类别承压 性能指标及模型
				圆锥			平面压板			
				锥角 (度' 分')	底部 直径 (cm)	底面积 (cm <sup>2</sup> )	圆盘 直径 d(cm)	矩形 l×b (cm)		
前苏联	ВИСОМ	坚实度仪 (ПЛОТНОМЕР)		22°30'		1 2 2.8	— — —	— — —	— — —	旱地坚实度 $\sigma$ $\sigma = \frac{G}{A} = Kz^n$
美国	Bekker	贝氏仪 (Bevamerter)		—		— — —	10 15 30	10×2.5 22.5×3.75 25×7.5	2.5~5 2.5~5 2.5~5	各种土壤承压能力 $\sigma$ $\sigma = \left(\frac{K_c}{b} + K_p\right)z^n$
美国	WES	圆锥指数法 (CONE INDEX)	0~200CI	30°		3.2	—	—	3	各种土壤圆锥指数 CI (1CI = 1 lb/in <sup>2</sup> ≈7kPa)
日本	田中孝	TN-4 型 土壤贯入仪		30°		3.2	—	—	—	水田土壤圆锥指数 CI
中国	吉林工业大学、 中国农业机械化 科学研究院	SY-1 型 水田承压仪	10~100 (硬层水田) 5~50 (表层) 1~10 (沷田)	30°	1.2	3	— 2.76 (6cm <sup>2</sup> 面积) 6.175 (30 cm <sup>2</sup> 面积)	— — —	— — —	水田土壤承压能力 $\sigma$ $\sigma = K_1 \times 10 \frac{K_2}{b} \cdot z^n$

下面将分别对圆锥指数法、贝氏仪及 SY-1 水田承压仪作一些说明。

(一) 圆锥指数法 这是美国陆军水道试验站 (WES, 即 Waterways Experiment Station) 发展的。它所用的圆锥贯入仪的测头呈圆锥形, 锥角 30°, 锥底面积为 1/2 英寸<sup>2</sup> (3.2cm<sup>2</sup>) (英寸为非法定计量单位, 1 英寸=2.54cm), 以 3cm/s 的速度贯入土中到车辆作用深处, 土壤对圆锥测头的单位面积抵抗力 (当时用磅/英寸<sup>2</sup> 为单位, 换算为 6.89476kPa), 称为圆锥指数 (CI, 即 Cone Index), 这是反映土壤强度的一个综合性指标。WES 用圆锥指数来鉴别土壤强度, 并借此以鉴别车辆的通过性能。由于拖拉机等车辆常在同一车辙重复行驶, 使土壤产生“重塑”而强度产生变化 (一般细粒耕地土壤强度变弱)。为此, 对土壤进行“重塑试验”, 以求得土壤强度变化的指标, 称为“重塑指数” (Remolding Index)。该指数大于 1 表示土壤强度变强, 小于 1 表示强度变弱。圆锥指数与重塑指数的乘积称为额定圆锥指数 (Rated Cone Index, 即 RCI)。

$$(RCI) = (CI) \times (RI)$$

例如，某耕地土壤最初测定的圆锥指数为 70，重塑指数为 0.8，该土壤的额定圆锥指数 RCI 为 56。

由此可知，最初测定的圆锥指数 CI 表示该层土壤的承载能力，而额定圆锥指数 RCI 表示经过重塑后该层土壤的最小承载能力，RCI 是判断车辆通过性能的土壤指标。

车辆在同一车辙通过 50 次后陷车时，测取土壤的额定圆锥指数，称为“车辆圆锥指数 (VCI, 即 Vehicle Cone Index)。VCI 是判断某种车辆在重复 50 次通过车辙的土壤最小额定圆锥指数，这样，将车辆通过性和土壤强度联系起来，使土壤的承载能力与车辆通过时所必须的土壤承载能力放在同一基础上比较，从而判定车辆的通过性。

圆锥指数法在美国、欧洲使用很普遍。日本还将圆锥指数法应用在水田拖拉机通过性的判定。该法虽然简单易行、直观，但必须做大量试验才能获得经验性定量关系，由于土壤性质千变万化，所得结果常难推广于试验条件不同的地方，这种局限性是经验法的主要缺点。

该方法的进一步发展是把土壤额定圆锥指数与车辆的性能，如行走阻力、行走部分推力（或拖拉机牵引力）等建立经验关系。只要知道土壤的额定圆锥指数，便可预测车辆的牵引力、行驶阻力以及牵引效率等。对此，美、英、日等国都做了许多工作。我国开展了水田圆锥指数与水田拖拉机通过性及其牵引性能相互关系的研究，取得了进展。

(二) 贝氏仪法 这是 50 年代由美国贝克提出的，贝氏仪有 2 至 3 个尺寸不同的平面测板和一个剪切环。平面测板用来测定土壤承压能力，剪切环用来测定土壤抗剪强度。因此，贝氏仪是同时测定土壤垂直、水平的应力—应变关系的仪器，见图 1-4。

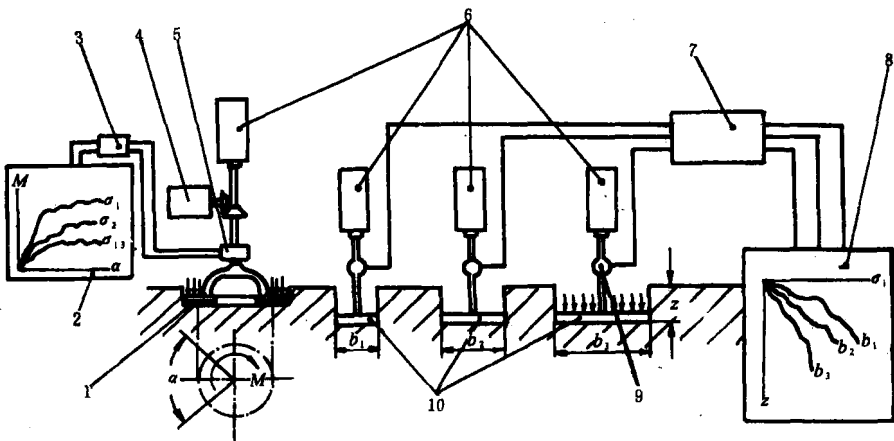


图 1-4 贝氏仪示意图

1. 剪切环 2. 记录带 3. 放大器 4. 扭矩电动机 5. 扭矩及角运动传感器 6. 加载缸筒 7. 放大器
8. 记录带 9. 压力表 10. 穿入平板

2 至 3 个平面测板逐渐压入土内，以此模拟车辆行走部分对土壤的加载作用，加载的液压缸筒内压力与平板压强相当，记录压强—下陷关系，用  $\sigma-z$  曲线表示，如图 1-5、图 1-6、图 1-7 所示实验所得的曲线。

图 1-5 是用圆形或矩形板在塑性均匀土壤测得的压强—下陷曲线。这是浅层塑性均匀

土壤产生的理想压强—下陷曲线,可由 OA 与 AB 两条直线大致表示。OA 表示开始时弹性变形或土粒变位,或者两种情况都产生的情况。A 点近似地表示土壤的极限承载能力。AB 线表明土壤产生塑性流动失效时的压强—下陷过程。实际的压强—下陷关系是一条曲线,如图中实线所示,曲线形状随土壤性质而不同。

图 1-6 表示相同平板在各种塑性均匀土壤中测得的压强—下陷曲线族。这些曲线可用下列公式以不同的  $n$  值来描述:

$$\sigma = Kz^n \quad (1-6)$$

式中:  $\sigma$ ——平板上的压强 (kPa);

$z$  ——下陷量 (cm);

$n$  ——土壤变形指数;

$K$  ——土壤承压系数,它是土壤及测板面积的函数,对于一定的土壤和一定的测板面积,可以认为  $K$  是常数。

图中各曲线按  $n$  值将土壤划分为坚硬土壤 ( $n > 1$ ) 以及松软土壤 ( $n < 1$ ) 两种类型。当  $n = 1$  时,压强—下陷曲线呈直线,压强与下陷成正变关系。在这直线上方的曲线都属坚硬土壤,而在直线下方的曲线都属松软土壤。

图 1-7 所示的压强—下陷曲线还可表明土壤是否分层。图中有三条曲线代表均质土壤,另外三条曲线代表分层土壤。

贝克为了消除测板形状及面积尺寸对压强—下陷曲线的影响,并区分土壤内聚力和内摩擦因数对土壤承载能力的作用,将式 (1-6) 发展为下列形式:

$$\sigma = \left( \frac{K_c}{b} + K_\phi \right) z^n \quad (1-7)$$

式中:  $b$  ——平面测板的短边长度;

$K_c$  ——与土壤内聚力有关的土壤系数;

$K_\phi$  ——与土壤内摩擦因数有关的土壤系数。

式 (1-7) 实质是式 (1-6) 的一种变化,用

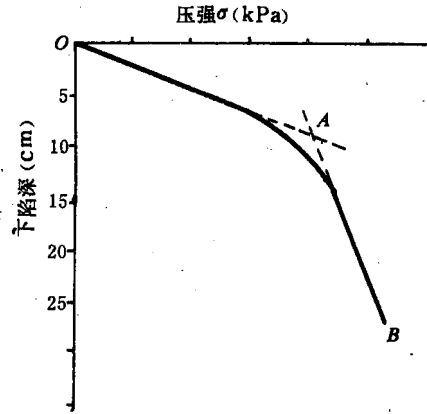


图 1-5 用圆形或矩形测板在塑性均匀土壤中测得的压强—下陷曲线

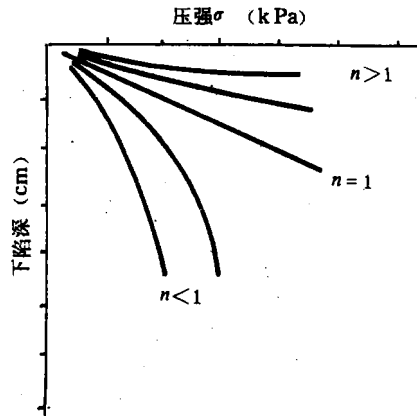


图 1-6 用同一平面测板在各种塑性均匀土壤中测得的压强—下陷曲线

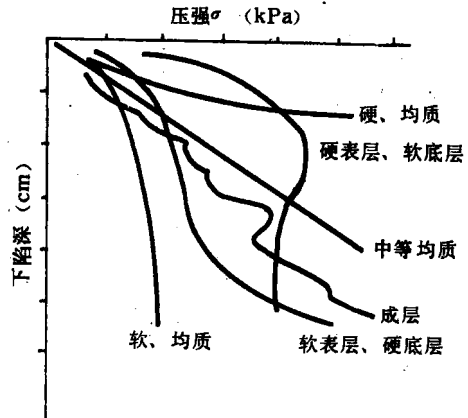


图 1-7 用同一种平面测板在各种类型土壤和分层土壤中测得的压强—下陷曲线



$\left(\frac{K_c}{b} + K_\phi\right)$  代替  $K$  系数。

为了决定土壤参数  $K_c$ 、 $K_\phi$  和  $n$  值, 要用土壤承压仪以两个不同宽度 ( $b_1$  和  $b_2$ ) 的平面测板进行试验。用对数坐标表示  $\sigma$  与  $z$  的关系, 则  $b_1$  和  $b_2$  测板测出的两曲线变为两平行的直线, 如图 1-8 所示。于是  $K_c$ 、 $K_\phi$ 、和  $n$  值便可按下列三式求出。其中, 直线斜率就是  $n$  值。

$$K_c = \frac{(a_1 - a_2) b_1 b_2}{(b_2 - b_1)}$$

$$K_\phi = \frac{a_2 b_2 - a_1 b_1}{(b_2 - b_1)}$$

$$n = \tan \alpha$$

用平面测板的承压仪测量  $K_c$ 、 $K_\phi$  和  $n$  值时, 对松软的土壤需用大的测板 (如长边等于 10cm、20cm), 对较硬的土壤宜用小的测板 (如长边为 2~5cm)。土壤承压性能参数变化较大, 具有统计学特征, 但也有某种程度的一致性。一般来说, 多次出现的测量值是有代表性的真实土壤参数。

(三) SY-1 型水田静载式承压仪 为了测量我国的水田土壤承载能力, 可统一使用 SY-1 型静载水田土壤承压仪。该仪器由测头、加载和记录三部分组成。结构简单、重量轻、使用方便。测头有三个: 一个为顶角  $30^\circ$  的圆锥测头, 底面积  $3\text{cm}^2$ , 适用较坚硬的土壤和有硬底的水田, 承载能力范围  $10\sim 100\text{kPa}$ ; 其余两个是平板测头, 面积分别为  $6\text{cm}^2$  (适用于表层较软水田, 承载能力  $5\sim 50\text{kPa}$ ) 及  $30\text{cm}^2$  (适用于沷田, 承载能力  $1\sim 10\text{kPa}$ )。测杆长 50cm, 可供测头穿入土壤 50cm 深处。加载用刚度为  $30\text{N/cm}$  的弹簧, 弹簧最大压缩量 10cm, 最大加载力为 300N。自动记录部分可记录 1:5 的下陷深 ( $z$ ) 与压强 ( $\sigma$ ) 的关系。

图 1-9 为 SY-1 型静载式水田土壤承压仪的结构图。

### 五、土壤的水平应力—应变关系 (抗剪性能)

土壤在水平剪切力作用下, 有使土粒与土粒间、上部分土壤与下部分土壤产生相对位移的趋势。这种相对位移受土壤的抗剪强度的制约。当土

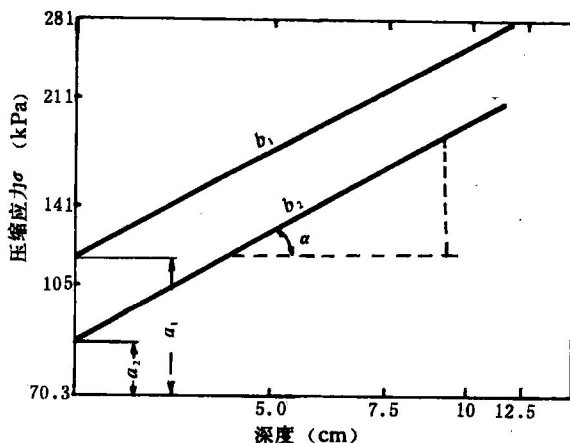


图 1-8 对数坐标的  $\sigma-z$  关系

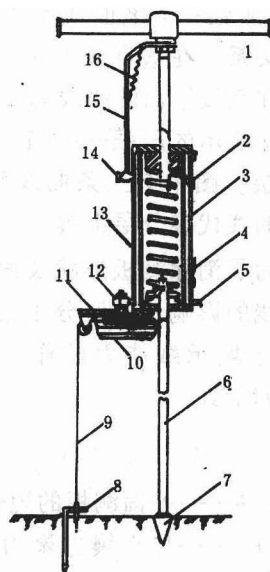


图 1-9 SY-1 型静载式水田土壤承压仪

1. 手柄 2. 压力弹簧 3. 记录纸 4. 记录筒  
5. 大齿轮 6. 测杆 7. 测头 8. 插针 9. 弦  
10. 线轮 11. 发条 12. 小齿轮 13. 外  
筒 14. 记录笔 15. 记录杆 16. 小弹簧