

高 等 学 校 教 材

工 程 机 械

(上册)

西南交通大学	唐经世	编著
	高国安	
石家庄铁道学院	毛贵民	主审

中 国 铁 道 出 版 社

1996年·北京

是确保教材质量优秀的关键因素之一。

书稿完成之日,我深深悼念在文化大革命后,第一轮正式出版教材与其前期铅印教材编著出版的十年里(1972~1981),并肩工作的我校车辆工程专家章涵绪副教授。往日的相互鼓励与帮助历历在目,他那治学严谨与一丝不苟、锲而不舍的精神,将永远留在我的心底深处。

本书在内容和编排上有错误或不当之处,敬请读者批评指正。

唐经世志于 1996 年

711531



工程机械 上册/唐经世,高国安编著. —北京:中国
铁道出版社,1996
高等学校教材
ISBN 7-113-02278-2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 09173 号

读者姓名 证 号 还书日期 书内是否有污损

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. There are two solid black lines near the top and bottom edges, and a dashed black line runs horizontally between them. The paper is otherwise blank, with no text or other markings.

内 容 简 介

本书分上、下两册出版。上册内容含工程机械的一般理论,牵引力学,总体设计与典型工程机械的总体与分析。下册内容为工程机械底盘的原理、构造与设计计算。

本书是高等学校教材,也可供从事工程机械设计、制造、管理、修理与使用的专业人员参考。

前 言

《工程机械》一书作为高等学校试用教材,自从1981年以上、中、下三册问世以来,已多次重印,深受欢迎,本次作为高等学校教材出版。它除了满足高校教学需要外,还是工程单位、工程机械行业研究设计制造修理使用管理各部门常用的技术参考书籍,在教学科研等各领域发挥了积极作用。

经以往数十年的教学实践,全国三十多个设工程机械专业方向的高等院校在专业课之中,多校设置了“工程机械底盘”与“工程机械”两门课程。前者讲授工程机械的传动系、行走系、操纵系;后者讲授工程机械的一般理论、总体设计、工作装置。各校并取不同的主要工程机械作典型予以讲授,两课程各为60~85授课学时不等。由于工程机械在理论与实践上日新月异的发展变化,本教材亟待在原书基础上增删与修订。

本书上册分四篇十八章,按“工程机械”课程教学大纲写成。下册分三篇十一章,按“工程机械底盘”课程教学大纲写成。全书由西南交通大学高国安(上册第一章~第九章)、唐经世(上册第十章~第十八章、下册全部)编著。

鉴于工程机械种类繁多,用途各异,不可能也没有必要在大学教材中逐一予以介绍。如前所述,本教材上下册分别按照各自的课程教学大纲,提取各工程机械共性部分撰写,以收举一反三之效。另选若干主要工程机械列入典型工程机械篇以介绍其特殊性。

此外,本教材作为专业课教材,注重理论与实践的紧密结合,注重用各种简图、示意图、构造图、系统图给读者以形象的认识与方便的理解,注重用图表给学生以明确的参数概念。文字叙述则简明扼要,以利学生思索分析。学生学习时,不要孤立地学某一种机械、某一种结构或某一种计算方法,要在融会贯通上,多下功夫、多思考,相互借鉴与引用。须知“他山之石,可以攻玉”、“学而不思则罔”这些中国古代名言于治学之正确性。从而自己得出结论:掌握工程机械,不难。

书稿完成之日,衷心感谢郑州、成都、厦门、柳州、天津、武汉、宝鸡工程机械厂,洛阳、天津、北京、上海建筑机械厂,贵阳、合肥矿山机械厂,长江挖掘机械厂,沈阳桥梁厂,山东推土机厂,上海彭浦机器厂,天津工程机械研究所,铁道部中国土木工程公司,中国铁道建筑总公司,铁道建筑研究设计院,中国铁路工程总公司,铁道部武汉工程机械研究所,铁道部大桥工程局,铁道部隧道工程局,铁道部第一、二、三、四、五工程局,以及外国公司Caterpillar, Dresser, ZF, Rank, Atlas-Copco, Tamrock, Komatsu等先后提供的各种技术资料。可以说,此实践性强的专业课教材,其中相当一部分是在这批浩瀚的资料基础上提取而写成的。

衷心感谢本校与有关兄弟院校帮助过此教材编写的老师们,感谢你们的指导、鼓励、关怀、帮助与辛勤劳动。也衷心感谢西南交通大学描图员宋明露、任荣等,此类机械书籍制图的质量

目 录

绪 论	1
第一篇 工程机械的一般理论	
第一章 土壤概论	5
第一节 土壤分类	5
第二节 土壤的物理机械性质	6
第三节 土壤切削理论	12
第四节 土壤的计算条件	14
第二章 轮式行走机构理论	15
第一节 车轮滚动运动学	15
第二节 车轮滚动动力学	20
第三节 车轮滚动过程中的土壤与轮胎变形规律	23
第四节 轮胎与地面相互作用的变形计算	26
第五节 轮胎式行走机构的滚动阻力	30
第六节 轮式行走机构轮胎的外摩擦与牵引力分析	33
第七节 轮式行走机构轮胎的滑动	36
第八节 附着牵引力	40
第九节 轮式行走机构的动力半径	41
第十节 轮式行走机构的无因次牵引特性	42
第三章 履带式行走机构	47
第一节 概 述	47
第二节 履带式行走机构的运动学	48
第三节 履带式行走机构的动力学	49
第四节 履带式行走机构的行驶阻力	51
第五节 履带式行走机构的附着性能	53
第六节 履带式行走机构的效率	56
第四章 工程机械的驱动力分析	58
第一节 柴油机的特性	58
第二节 液力耦合器的传动特性	62
第三节 液力变矩器的传动特性	65
第四节 发动机与液力传动装置的共同工作	72
第五节 发动机-液力传动装置系统的输出特性	74
第六节 并联功率流式发动机-液力变矩器系统的输出特性	80
第七节 驱动力与运行速度计算	85

第二篇 工程机械的牵引力学

第五章 牵引平衡	91
第一节 铲土运输机械的工况	91
第二节 工作阻力计算	92
第三节 铲土运输机械的牵引平衡	95
第六章 牵引特性	99
第一节 概 述	99
第二节 机械传动式机械的牵引特性绘制	101
第三节 机械传动式机械的理想牵引特性绘制	107
第四节 液力机械传动式机械的牵引特性绘制	109
第五节 特殊工况下的机器牵引特性绘制	112
第六节 由两台牵引车构成的机组的牵引特性	114
第七节 试验牵引特性	116
第七章 工程机械的速度性能	120
第一节 机械传动式机械的速度特性	120
第二节 液力机械传动式机械的速度特性绘制	123
第三节 动力特性	124

第三篇 工程机械总体设计

第八章 设计总论	128
第一节 设计工程机械的基本原则	128
第二节 设计程序与样机试制、试验	130
第九章 总体设计	133
第一节 工程机械总体设计综述	133
第二节 机器类型的选择	134
第三节 发动机选型分析	137
第四节 总体结构设计 with 主要性能参数的确定	143
第五节 工程机械的稳定性计算	145
第六节 工程机械的技术及经济指标	151

第四篇 典型工程机械

第十章 单斗液压挖掘机	154
第一节 概 述	154
第二节 工作装置	156
第三节 回转支承装置	160
第四节 液压系统	167
第五节 主要技术参数	173
第十一章 推土机与铲运机	176

第一节 推土机概述·····	176
第二节 推土工作装置·····	179
第三节 松土工作装置·····	186
第四节 铲运机概述·····	187
第五节 铲运机的悬架与连接·····	191
第十二章 装载机机械·····	197
第一节 概 述·····	197
第二节 装载机的工作装置及其操纵·····	200
第三节 隧道工程用的装载机机械·····	207
第十三章 架梁机械与设备·····	215
第一节 概 述·····	215
第二节 单梁机臂筒支式架桥机·····	217
第三节 双梁机臂筒支式架桥机·····	233
第四节 架桥机主要技术性能·····	240
第五节 移动支架法建梁·····	241
第十四章 铺轨机械·····	246
第一节 概 述·····	246
第二节 DP-28 型铺轨机·····	246
第三节 长征Ⅱ型铺轨机·····	249
第四节 PGX-30 型铺轨机·····	251
第五节 铺轨机主要技术参数与设计要点·····	251
第十五章 液压凿岩机械·····	254
第一节 概 述·····	254
第二节 液压凿岩机的工作原理·····	255
第三节 冲击机构的结构设计 with 主参数的关系·····	256
第四节 瑞典 ATLAS COPCO 液压凿岩机·····	258
第五节 芬兰 TAMROCK 液压凿岩机·····	267
第六节 液压凿岩台车·····	271
第七节 主要技术参数·····	276
第十六章 盾构机械及顶管技术·····	277
第一节 盾构与盾构法·····	277
第二节 普通盾构·····	279
第三节 特种盾构·····	280
第四节 插刀盾构·····	286
第五节 盾构的导向与纠偏(方向调整)·····	288
第六节 盾构主要技术参数的确定·····	291
第七节 顶管技术·····	296
第十七章 掘进机·····	304
第一节 概 述·····	304

第二节	切削头工作机构.....	312
第三节	推进装置与调向装置.....	322
第四节	出碴装置与除尘装置.....	324
第五节	国产掘进机.....	326
第六节	90年代的全断面掘进机整机结构	327
第七节	当代国外全断面掘进机的总体参数.....	339
第十八章	基础工程机械.....	343
第一节	钻孔方法.....	343
第二节	DQ2450B型钻孔机	346
第三节	潜水钻机.....	349
第四节	振动打桩机.....	352
第五节	柴油打桩锤.....	355
主要参考文献.....		363

绪 论

一、工程机械分类

所有建筑、筑路工程中所用的机械,均称为工程机械。因此,工程机械形式多样,品种繁多,用途各异。我们一般习惯将其分为以下九大类,列述于下。

1. 挖掘机械

单斗挖掘机;多斗挖掘机;隧道掘进机;盾构机械。

2. 铲土运输机械

推土机;装载机;铲运机;平地机。

3. 压实机械

按压实原理,又有静压滚压压实法、振动滚压压实法、冲击压实法之不同,视用途不同而组合成各种不同的压实机械。

4. 工程起重机械

臂式起重机;塔式起重机;缆索起重机;门式起重机与梁式起重机。

5. 基础工程机械

振动沉桩机;冲击钻孔机;旋转钻孔机;柴油打桩机。

6. 钢筋混凝土机械

钢筋加工机;混凝土(或水泥砂浆)拌合机;混凝土(或水泥砂浆)输送机。

7. 凿岩机械与机械化工具

气动凿岩机;电动凿岩机;液压凿岩机;各种机械化工具。

8. 公路路面机械

沥青路面摊铺机;混凝土路面摊铺机;路面破碎机;路面材料拌合机。

9. 铁道线路机械

铺换钢轨机;铺换轨枕机;道碴捣固机与稳定机;道碴清筛机;道碴整形机;焊轨机;起拨道机等。

综上所述,工程机械在国民经济与国家建设事业中,占据重要地位。它广泛用于铁道建筑工程、公路工程、机场建设、水利枢纽、房屋建筑、市政工程、港口建设、矿山工程、地下建筑、军事工程等各种工程项目中。我国建国四十多年社会主义建设的实践充分说明,如果没有大量优质高效的工程机械,是不可能高速高质完成国家的建设项目的。至于人烟稀少,工作面狭窄,工作条件恶劣,高寒沙漠地带,工程质量要求严格的工程项目,没有工程机械更是绝对不可能完成工程任务的。

二、工程机械组成

1. 动力装置

内燃机,电动机,尤其是内燃机中的柴油机,常用来作为工程机械的动力装置。

2. 传动系

用以保证工程机械的行走传动。有机械传动、液力机械传动、液压传动、电传动之分。传动系由分动箱、主离合器、液力变矩器、变速箱、万向节与传动轴、驱动桥等组成。

3. 行走系

用以在其上装工程机械各个部件与保证行走式工程机械在地面上行进。有轮胎式、轨行式、履带式、步行式行走装置之分。轮胎式由机架、桥壳与轮胎等组成。履带式由机架、履带架、四轮一带等组成。轨行式由机架、转向架、轮对等组成。步行式由机架、步行装置等组成。

4. 转向系

用以保证行走式工程机械行走时的转变行走方向。轮胎式工程机械转向系由转向器、动力转向装置、转向传动系统组成。履带式工程机械或由操纵传动系中之转向离合器、转向制动器实现转向,或由分别操纵左右履带的传动实现转向。轨行式由轨道引导转向。步行式用于有转台回转装置的工程机械,步行装置置于转台两侧,转台相对于底架回转,就可以实现步行方向的改变。

5. 制动系

用以保证行走式工程机械行走时的减速与停止。履带式工程机械由行走制动器实现制动。轮胎式工程机械因行走速度高,为确保安全,设有主制动装置,停放(或紧急)制动装置,辅助制动装置。轨行式工程机械则常装以机车车辆的制动装置。

6. 工作装置

各种工程机械的主要不同,在于其工作装置的不同与总体设计的各异。

上述六大部分中,一般将传动系、行走系、转向系、制动系四部分合称为“底盘”。作为高等学校与中等专业学校组织工程机械专业课程的教学,常设置“内燃机”课程、“工程机械底盘”课程以讲授前五部分内容,而以“工程机械”课程讲授工程机械的一般理论,介绍若干典型工程机械的总体设计与工作装置。

党的十一届三中全会以来,我国工程机械行业迅猛发展,产品数量质量迅速提高,与先进的工程机械生产国(如美国)在工程机械的品种、性能、质量上的差距大为缩短。

20世纪60年代以来,是世界工程机械大变化、大改观的30年。表现在其结构、性能的方面面上。例如:

传动系大量采用使用性能改善的液力传动,采用既改善性能、又提高传动效率的外功率分流式液力机械变矩器,采用使结构简化的全液压传动,采用使受力均衡的行星传动于变速箱、减速箱、轮边减速器等。

行走系因钢丝帘布轮胎,无内胎轮胎,子午线轮胎等先进的轮胎结构的出现,使轮胎式工程机械品种数量迅速增长。履带式工程机械又因具有接地比压力低,附着牵引力大而继续不断改进提高,出现密封履带、密封润滑履带、浮动油封等行之有效的先进结构,从而在工程机械中,占据着仅次于轮胎式而又不可能被取代的位置。轨行式工程机械因其滚动阻力小,又没有轮胎这一易磨损件,除独占铁道线路机械领域外,在作业面狭窄的地方(如隧道与某些地下工程)也是颇为合适的。

转向系中铰接式转向风靡工程机械,整体车架式轮胎式装载机、推土机几乎全为铰接式取代,又有铰接式压路机、凿岩台车、自卸汽车等出现。其原因在于铰接式转向结构简单,转向灵活(转弯半径小)。虽转向时要求作用力大,但完全可用动力转向装置来实现。因此,机械反馈

随动式动力转向,尤其是液压反馈随动式动力转向大量出现。反过来,随动式动力转向又广泛用到整体车架偏转车轮转向式工程机械中,从而大大减小转向操纵力,减轻驾驶人员的劳动强度。

制动系中,人力式制动驱动机构几乎全为助力式制动驱动机构,以至全助力式(气压式,液压式)制动驱动机构所取代,使制动操纵轻便;双管路主制动系取代单管路主制动系,使安全性提高;而除主制动系、停放制动系外,重型高速工程机械常装性能良好的辅助制动装置,如液力减速器或排气制动装置以进一步提高行驶安全性。而制动器,则中小型工程机械中,不少采用单盘开式钳盘式制动器以使结构简化,大中型工程机械则采用多片封闭油浴式盘式制动器以使制动力持久不变而使用寿命长。

传动系、转向系、制动系以至工作装置的操纵控制系统进一步完善与电子化,则是现代工程机械的又一特色,有人称之为机电一体化技术。

工作装置中,一是努力采用新材料、新结构以提高结构强度、刚度、耐磨性,或减轻自重;一是引人优化技术。

三、工程机械发展的一般趋势

在不同的工程机械的总体结构方面,三十年来,其共同的发展趋势为:

1. 不断提高单位机械重量的比功率,生产率;
2. 不断提高工作装置的通用性与可换装的工作装置的品种数,充分利用同一底盘,使一机多用;
3. 不断提高整机安全性,注意合理降低整机重心,增加整机的稳定性,加装各种必要的安全装置监测监控与翻车保护架、落物保护棚;
4. 不断提高作业舒适性,如装封闭式司机室与司机室空调装置,司机室与座椅的优化设计等;
5. 不断降低工程机械作业时的噪音,对内燃机的废气排放采用机内净化法,必要时加机外净化法予以有效控制。

总之,工程机械行业覆盖面广,技术先进,直接关系到国家的建设事业,有不少领域等待着人们探索与提高,是大有可为的。

本教材既注重工程机械基本理论的论述,也注重理论与实践的紧密结合。现代的工程机械,在传动方式上,是机械传动、液力机械传动与液压传动三者并举;在行走装置上,是轮胎式为主,而履带式与其并列或略次之;在轮胎式机械的转向方式上,广泛采用铰接机体随动式动力转向。本书根据诸如此类的实际情况,安排全书各章节的内容与重点,本着既介绍当今工程中用的主要的工程机械,也注意介绍设计新颖的、新的工程机械乃至新施工方法。俾利于学生了解工程机械的现实状况与发展趋势,也将其提供给同行参考。

第一篇 工程机械的一般理论

第一章 土壤概论

土壤是工程机械的作业对象,又是其支承基础。土壤的物理机械性质直接影响工程机械的作业阻力、运行阻力、牵引性能及运行通过性。为了正确地设计、运用工程机械,设计者与运用者应具有一定的土壤知识。

本章主要介绍土壤分类、土壤的物理机械性质、土壤切削理论和工程机械设计时的土壤条件。

第一节 土壤分类

可以根据工程机械的作业情况与运行情况,进行土壤分类。

一、按土壤的一般特性分类

(一) 无粘性土壤

无粘性土壤又称为摩擦性土壤,其颗粒之间无粘聚力或粘性,如砂土、干砂等。无粘性土受到外力作用后,在剪应力作用下而破坏。剪切面上的极限剪应力 τ_a 与法向应力 σ 成正比,符合库伦摩擦定律(见图 1-1):

$$\tau_a = \mu_2 \sigma = \sigma \operatorname{tg} \phi \quad (\text{MPa}) \quad (1-1)$$

式中 μ_2 ——土壤的内摩擦系数;

ϕ ——土壤的内摩擦角, $\mu_2 = \operatorname{tg} \phi$ 。

(二) 粘性土壤

粘性土壤的颗粒之间有粘聚力或粘性存在,如粘土。粘性土受到外力作用后,同样因剪应力作用而破坏。但是,剪切面上的极限剪应力 τ_a 不仅与法向应力 σ 有关,而且与其粘聚力 C (MPa) 有关(见图 1-1)。

$$\tau_a = C + \sigma \operatorname{tg} \phi \quad (\text{MPa}) \quad (1-2)$$

二、按土壤的粒度分类

通常,土壤按其颗粒大小分为:

卵石及碎石——颗粒直径 20~200mm;

砾石——颗粒直径 4~20mm;

砂粒——颗粒直径 2~4mm;

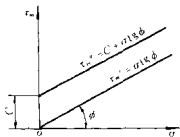


图 1-1 土壤的极限应力

砂——颗粒直径 $0.25 \sim 2\text{mm}$;

细砂——颗粒直径 $0.05 \sim 0.25\text{mm}$;

泥砂——颗粒直径 $0.005 \sim 0.05\text{mm}$;

粘土——颗粒直径 0.005mm 以下。

实际上土壤是各种大小颗粒混合在一起的,其物理机械性质与各种颗粒所占比例、含水量、密实程度,以及气候等自然条件有关。依据土壤粒度构成而形成的筑路土壤分类法如表 1—1 所示。

表 1—1 筑路土壤分类法

土壤名称	按重量计算的颗粒(其尺寸以 mm 计)含量(%)		
	砂 粒 ($2.00 \sim 0.05$)	粉 粒 ($0.050 \sim 0.005$)	粘 土 粒 (小于 0.005)
砂 土	—	<15	<3
粉质砂土	—	$15 \sim 50$	<3
亚 砂 土	颗粒尺寸为 $2.00 \sim 0.25$ 者 >50	较砂土少	$3 \sim 12$
细亚砂土	尺寸为 $2.00 \sim 0.25$ 的颗粒 <50	较砂土少	$3 \sim 12$
粉 质 土	—	较砂土多	<12
亚 粘 土	比粉质土多	—	$12 \sim 18$
重质亚粘土	比粉质土多	—	$18 \sim 25$
粉质亚粘土	—	较砂土多	$12 \sim 25$
粘 土	任意	任意	>25

三、土壤的等级

在研究机器与土壤相互作用时,为表示土壤的可切削性、土壤的密实度、松散性,可按土壤的冲击指数(详见本章第二节)和切削比阻力(详见本章第三节)分为 4 个等级,其分级级别的定义见表 1—2。

表 1—2 土壤级别的定义

土壤级别	土 质	切削比阻力 (N/cm^2)	冲击次数
I	砂土、亚砂土、不含杂物的轻质亚粘土、粉质土	($\phi=45^\circ$)5 以下	0~7
II	中等含水量不含杂物的亚粘土、中等和较高含水量的轻质粘土	5~10	8~15
III	低含水量的密实亚粘土、含砾石和卵石的重亚粘土、中等含水量的粘土	10~15	16~23
IV	密实的粘土、干燥的黄土、轻质的泥岩、未胶结的磷钙土和砾岩	15~25	24~30

第二节 土壤的物理机械性质

一、土壤的粒度组成

工程中所研究的土壤系指各种大小的土壤颗粒任意组合而构成的堆积物。土壤通常由土壤颗粒、水和空气三相物质构成。若土粒间的空隙全部被水充满,形成饱和土,即为两相土壤;

若土粒间的空隙无水,形成干土,也是两相土壤。土壤各相的相对含量决定了土壤的状态与性质。

实际土壤是不同粒度土粒的混合物。不同粒度土粒的相对含量直接影响土壤的性质。为了研究土壤的性质,常常要确定土壤的粒度组成,即进行颗粒分析试验。工程中实用的颗粒分析试验方法有筛分法和比重计法。筛分法适用于粒径大于 0.1mm 以上的土壤;比重计法适用于粒径小于 0.1mm 的土壤。如果土壤中同时含有大于和小于 0.1mm 的土粒时,两种方法并用。

土壤中各级粒度分组搭配情况,用其含量(以重量计)的百分数表示,称为土壤的颗粒级配。颗粒不均匀,称为级配良好;颗粒较均匀,则级配不好。颗粒分布均匀程度用不均匀系数 K 表示:

$$K = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (1-3)$$

式中 d_{60} ——限定粒径,土壤中小于该粒径的颗粒占总上重的 60%;

d_{10} ——有效粒径,土壤中小于该粒径的颗粒占总上重的 10%。

K 值愈大,说明颗粒愈不均匀。当 $K > 5$ 时称为不均匀土壤。

二、土壤的含水量与塑性

土壤的含水量 W 是土壤中所含水的质量 m_2 与土壤颗粒的质量 m_1 之比:

$$W = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1-4)$$

土壤在外力作用下变形。当外力解除后,土壤保持其变形形状的能力称为它的塑性。粘性土是可塑性土壤,而砂和砾石则为非塑性土壤。

含水量对土壤的塑性有重要影响。当含水量大于一定界限时,粘性土会呈现某种流动状态。这一极限含水量称为粘性土的流动界限(液限)或称为塑性上限。当含水量小于某一界限时,则粘性土壤会失去压延性而变成硬性的固体状态,这一极限含水量称为粘性土的压延界限(塑限)或称为塑性下限。

土壤含水量的流动界限采用下述方法测定:质量为 76g,锥顶角为 30°的圆锥体,在其重力作用下,经 5s 后沉入土壤中的深度达 10mm 时,这一含水量即作为被测试土壤的流动界限。

土壤含水量的压延界限的测定方法为:当土壤的块体被压延展成厚 3mm 的薄带时,土壤薄带开始产生碎裂,则这时的含水量即作为被测试土壤的压延界限。

随着含水量的不同,粘性土壤具有不同的物理状态;当含水量小于塑性下限 W_p 时为硬性土壤;当含水量大于塑性上限(即流动界限) W_L 时,则为流动性土壤;当含水量处于 $W_p \sim W_L$ 之间时,则属于塑性土壤。 $W_L - W_p$ 称为塑性土壤的塑性指数 I_p 。按照塑性指数 I_p 可将塑性土壤分为表 1—3 所示的类别。

表 1 3 塑性土壤的分类

塑性指数 I_p	>17	$7 \sim 17$	$1 \sim 7$	<1
塑性分类	高塑性土壤(粘土)	塑性土壤(亚粘土)	低塑性土壤(亚砂土)	非塑性土壤(砂土)

三、土壤的密度与重度

土壤的自然密度 γ_0 是土壤在自然状态(具有自然含水量)下,土壤的质量 m_0 与体积 V_0 之比

$$\gamma_0 = \frac{m_0}{V_0} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-5)$$

土壤的干密度 γ_d 是土壤颗粒的质量 m_s 与土壤总体积 V_0 之比:

$$\gamma_d = \frac{m_s}{V_0} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-6)$$

土壤的自然重度 γ_{s0} 是土壤在自然状态(具有自然含水量)下,单位体积土壤所受的重力

$$\gamma_{s0} = \frac{m_0 g}{V_0} \quad (\text{kN/m}^3) \quad (1-7)$$

土壤的重度与土壤的矿物成分、孔隙率、含水量等因素有关,一般 $\gamma_{s0} = 15 \sim 20 \text{kN/m}^3$, 详见表 1-7。

四、土壤的孔隙率与孔隙比

土壤的孔隙率 n 是土壤颗粒间的空隙体积 V_v 与土壤总体积 V_0 之比

$$n = \frac{V_v}{V_0} \quad (1-8)$$

土壤的孔隙比 e 是土壤中的空隙体积 V_v 与土壤颗粒体积 V_s 之比

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-9)$$

孔隙率 n 或孔隙比 e 反映了土壤的密实程度, n 与 e 之间的关系为:

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (1-10)$$

或

$$e = \frac{n}{1-n} \quad (1-11)$$

五、土壤的粘着性

土壤的粘着性是指土壤粘附在其它物体上的能力。粘着性是大部分塑性土壤在含砂质土较少,且又有适当的含水量时所共有的特性。当粘性土壤的含水量增加到一定程度后,土壤开始具有粘附在不同物体上的能力,这一含水量即称为粘着界限 W_H 。 W_H 是表示土壤粘着性的指标。评价粘着性的另一指标是比粘着力 P_H 。比粘着力 P_H 是使单位面积 of 的金属片与土壤脱离所需的力。对于粘土, $P_H = 7 \sim 8 \text{MPa}$, 对于亚粘土, $P_H = 5 \sim 7 \text{MPa}$ 。

土壤的粘着性对于铲上运输机械的运用有重要影响。当土壤粘附在工作机构上时,将使铲掘阻力增大,减少工作装置的实际容量。

六、土壤的自然坡度角

土壤的自然坡度角 ϕ_0 是堆积松散土壤时自然形成的堆角。 ϕ_0 值与土壤的内摩擦力和粘聚力有关。对于非粘性土壤,自然坡度角 ϕ_0 等于土壤的内摩擦角 ϕ , 各种土壤在不同状态时的自然坡度角列于表 1-4 中。

表 1-4 土壤的自然坡度角(°)

种类 状态	碎石	砾石	砂石			粘土		轻亚粘土	种植土
			粗砂	中砂	细砂	肥土	贫土		
干	35	40	30	28	25	45	50	40	40
湿	45	40	32	35	30	35	40	30	35
饱和	25	35	27	25	20	15	30	20	25

七、土对土与土对钢的摩擦系数

土壤的内摩擦系数 μ_1 和土壤对于钢的摩擦系数 μ_2 影响工程机械的作业阻力。设计时可参考表 1-5 确定。初步计算时也可按下式估算土壤对钢的摩擦系数 μ_2 ：

$$\mu_2 = (0.75 \sim 1) \operatorname{tg} \phi \quad (1-12)$$

式中 ϕ ——土壤的内摩擦角。

表 1-5 土对土和土对钢的摩擦系数 μ_1, μ_2

土壤名称	μ_1	μ_2
砂上和亚砂土	0.8	0.35
中质亚粘土	1.0	0.50
重质亚粘土	1.2	0.80

八、土壤的松散系数 K

土壤的松散系数是同一质量的土壤挖松后的体积 V_0 与其自然密实状态下的体积 V_n 之比：

$$K = \frac{V_0}{V_n} \quad (1-13)$$

因为 V_0 是指刚刚挖松后的土壤体积，所以 K 又称为初始松散系数。挖松的土壤经过自重、风、雨作用若干时间后，其密实度增大，此时的松散系数称为残余松散系数。

各种土壤的松散系数列入表 1-6。

表 1-6 土壤的松散系数 K

土壤名称	初始松散系数	残余松散系数
砂、砂质土	1.08~1.17	1.01~1.02
种植土和泥炭	1.20~1.30	1.03~1.04
黄亚粘土、松散潮湿黄土	1.14~1.28	1.02~1.05
粘性粘土、重亚粘土、大卵石、自然湿度黄土	1.24~1.30	1.04~1.07
块状粘土、带有碎面的粘土	1.26~1.32	1.06~1.09
硬黄泥、软泥炭土	1.33~1.37	1.11~1.15
硬泥灰土、软的裂缝陡峭土	1.30~1.45	1.10~1.20
矿石等	1.40~1.50	1.20~1.30

九、土壤的粘聚力 C 与内摩擦角 ϕ

土壤的粘聚力 C 取决于土壤的物理性质和化学性质，尤其与土壤含水量有密切关系。含水量过高或过低都会使 C 值降低。不同的土壤，与最大粘聚力相对应的含水量也不同。为了使工程机械发挥较好的牵引性能，应使机器在含水量适中的土壤上进行作业。

粘土的粘聚力较大，砂土的粘聚力几乎为零。各种土壤的粘聚力 C 列于表 1-7 中。

土壤的内摩擦是由于土壤颗粒表面粗糙，相互嵌锁而引起的。内摩擦角 ϕ 是表征土壤内摩擦性质的参数。内摩擦角的正切值称为内摩擦系数。各种土壤的内摩擦角列于表 1-7、表 1-8 中。