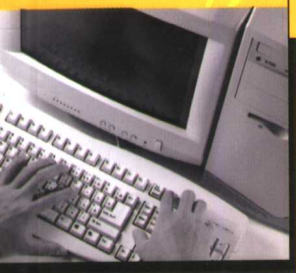


工程机械设计

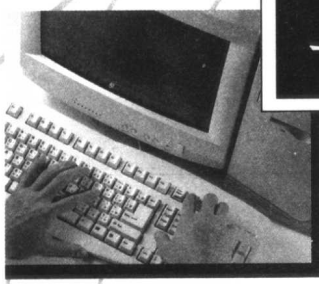
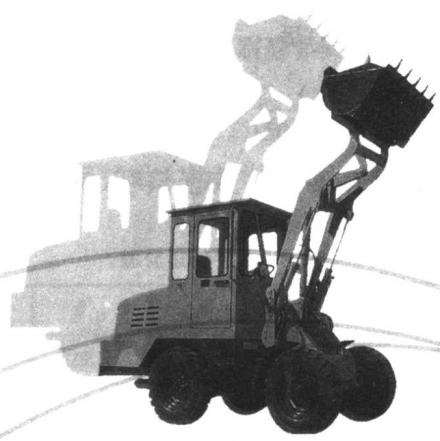
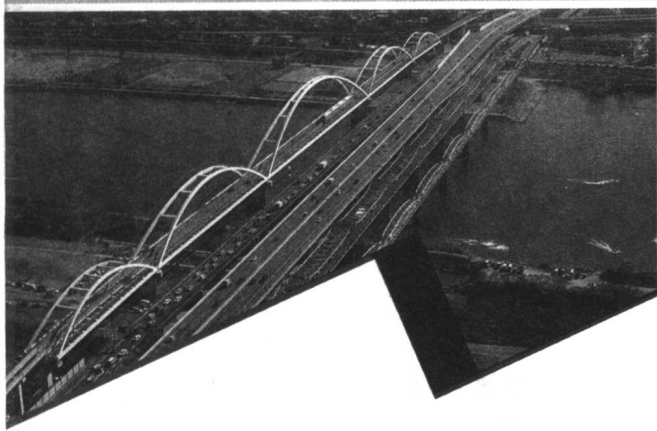
■ 主编 吴庆鸣 何小新

■ 参编 刘华英 夏大勇



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



工程机械设计

■ 主编 吴庆鸣 何小新
■ 参编 刘华英 夏大勇



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程机械设计/吴庆鸣,何小新主编. —武汉:武汉大学出版社,
2006.4

ISBN 7-307-04952-X

I. 工… II. ①吴… ②何… III. 工程机械—机械设计
IV. TU602

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 012100 号

责任编辑:李汉保 责任校对:程小宜 版式设计:支 笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:wdp4@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:华中科技大学印刷厂

开本:787×1092 1/16 印张:14.5 字数:347千字

版次:2006年4月第1版 2006年4月第1次印刷

ISBN 7-307-04952-X/TU·62 定价:24.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

内 容 简 介

本书较全面地论述了工程机械设计理论和设计方法,主要包括:工程机械一般理论、工程机械总体设计、传动系设计、行走系和转向系设计、制动系统设计、工作装置设计,并介绍了虚拟样机技术等新的设计方法,体现了先进性、系统性和实用性。

本书为高等学校起重运输及工程机械专业方向本科生的教材,也可以供从事工程机械和水电施工机械的科研、设计、制造、使用和维修管理等方面工作的技术人员参考。

前 言

《工程机械设计》是武汉大学“十五”规划教材立项项目。

工程机械设计课程为机械工程类专业课程,现有相关教材多数是在 20 世纪 80 年代出版的,多限于工程机械单机种的设计,对工程机械共性的设计理论和方法介绍相对较少,这与当前飞速发展的现代技术明显地不相适应,难以满足当前工程机械的教学需要。同时,工程机械行业在国民经济中占居较重要的地位,从业人员很多,也亟需较新设计理论和方法的专业参考书。

本书较全面地论述了工程机械设计理论和设计方法,揭示了工程机械设计的内在规律,反映了现代工程机械的先进技术和研究成果,希望能以此推动工程机械设计水平的提高。

作为高等院校本科阶段的专业教科书,由于学时的限制,在编写中我们努力贯彻少而精、理论联系实际的原则,在内容的安排上力求精炼介绍工程机械设计理论,而工程机械构造和工作原理、主要零部件的设计理论、液压传动技术等内容则由相关配套的课程予以讲解,以形成系统的专业教学体系。

考虑到工程机械品种繁多,各机型又有特殊之处,本书本着突出共性、照顾特性的思路,注意了与其他相关课程的衔接,着重介绍工程机械各主要系统的基本设计理论和现代成熟的设计方法,同时介绍了虚拟样机技术等新的设计方法,使之能体现先进性、系统性和实用性。本书不仅在内容上更符合教学需要,而且有利于培养学生分析问题和解决问题的能力。

本书的编写得到了武汉大学教务部教材建设专项资金的资助,以及武汉大学动力与机械学院老师们的大力协助,在此表示衷心感谢!

限于作者水平,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2005 年 8 月于武汉大学

目 录

第一章 概述	1
§ 1.1 国内工程机械行业的现状	1
§ 1.2 国外工程机械新技术发展特点	1
§ 1.3 工程机械科学研究的特点	3
第二章 工程机械的一般理论	5
§ 2.1 土壤的切削性能	5
2.1.1 土壤的分类	5
2.1.2 土壤的主要物理性质	6
2.1.3 土壤切削的基本理论	8
2.1.4 工程机械的行驶理论	9
§ 2.2 工程机械的牵引特性	19
2.2.1 牵引力平衡和牵引功率平衡	20
2.2.2 机械传动理想牵引特性曲线解析法绘制与分析评价	24
§ 2.3 工程机械的动力性	31
2.3.1 驱动力—行驶阻力平衡图	31
2.3.2 动力特性曲线的绘制与分析评价	34
第三章 总体设计	37
§ 3.1 概述	37
3.1.1 工程机械设计时应遵循的原则	37
3.1.2 工程机械的设计程序和试制步骤	38
3.1.3 总体设计的主要内容	39
3.1.4 总体设计的方法	40
§ 3.2 装载机的总体设计	40
3.2.1 装载机各零部件结构型式的选择	40
3.2.2 装载机作业阻力	44
3.2.3 装载机总体参数的确定	46
3.2.4 装载机的总体布置	50
3.2.5 装载机的稳定性	55
§ 3.3 推土机的总体设计	61
3.3.1 推土机各部件型式的选择	61

3.3.2	推土机作业阻力的计算	62
3.3.3	推土机总体参数的确定	64
3.3.4	履带式推土机总体布置	67
3.3.5	推土机的稳定性计算	68
第四章 传动系设计		
§ 4.1	概述	71
4.1.1	传动系的功用、类型和组成	71
4.1.2	工程机械对传动系的要求	71
4.1.3	传动系的计算载荷	72
4.1.4	典型工程机械传动系	72
4.1.5	机械传动系设计的主要内容及一般步骤	72
§ 4.2	主离合器设计	76
4.2.1	主离合器的设计要求及选型	76
4.2.2	离合器的接合过程及滑磨功计算	76
4.2.3	摩擦面上压紧力的分布	77
4.2.4	主离合器的主要参数选择	78
4.2.5	主离合器主要零部件设计要点	80
§ 4.3	定轴式变速器设计	81
4.3.1	变速器的设计要求	81
4.3.2	人力换挡变速器	81
4.3.3	定轴式动力换挡变速器	86
§ 4.4	动力换挡行星式变速器设计	93
4.4.1	行星式变速器运动学分析	93
4.4.2	行星式变速器动力学分析	97
4.4.3	行星变速器的效率计算	99
4.4.4	行星式变速器的设计	101
§ 4.5	万向节和传动轴设计	112
4.5.1	万向节传动的设计要求	112
4.5.2	不等速十字轴万向节的运动学、动力学特性	112
4.5.3	万向节的传动效率	114
4.5.4	万向节的设计	115
§ 4.6	轮式工程机械驱动桥	118
4.6.1	驱动桥的设计要求	118
4.6.2	主减速器的设计	118
4.6.3	差速器的设计	125
4.6.4	车轮传动装置的设计	128
第五章 行走系与转向系的设计		
		130

§ 5.1 轮式行走系的设计	130
5.1.1 从动桥的设计	130
5.1.2 轮胎的选择	134
§ 5.2 履带式行走系的设计	137
5.2.1 行走系的布置	137
5.2.2 履带行走装置的设计	139
5.2.3 半刚性悬架设计	142
§ 5.3 轮式机械转向系的设计	145
5.3.1 转向系的设计要求	145
5.3.2 偏转车轮转向系的设计	146
5.3.3 铰接底盘转向系的设计	151
第六章 制动系统设计	158
§ 6.1 概述	158
§ 6.2 轮式机械制动性能	159
6.2.1 制动时车轮受力分析	159
6.2.2 理想制动状态	160
6.2.3 前后轮制动力的合理分配	160
6.2.4 制动性的评价	163
6.2.5 制动器计算载荷的确定	164
§ 6.3 制动器的设计	164
6.3.1 蹄式制动器的设计	164
6.3.2 钳盘式制动器的设计	168
§ 6.4 制动驱动机构的设计	171
6.4.1 驱动机构的型式及选用原则	171
6.4.2 液压式驱动机构的设计	171
6.4.3 气压式驱动机构的设计	172
第七章 工作装置的设计	176
§ 7.1 概述	176
§ 7.2 装载机工作装置的设计	176
7.2.1 工作装置选型	177
7.2.2 工作装置结构设计	178
7.2.3 工作装置强度计算	188
7.2.4 工作装置液压系统的设计	196
7.2.5 行走缓冲装置	200
第八章 工程机械现代设计方法	202
§ 8.1 概述	202

§ 8.2 虚拟样机技术	202
8.2.1 虚拟样机的基本概念	202
8.2.2 制造虚拟样机的基本过程	204
8.2.3 ADAMS 软件概述	205
8.2.4 工程机械虚拟样机的建立	209
8.2.5 应用实例——基于虚拟样机技术的步行机步态轨迹及仿真	210
§ 8.3 优化设计	214
8.3.1 卡钳型盘式制动器的优化设计	214
8.3.2 转向梯形的优化设计	218
参考文献	222

第一章 概 述

§ 1.1 国内工程机械行业的现状

品种繁多的工程机械广泛应用于国民经济建设中的交通运输、能源、矿山、农、林、水利、市政建设和现代化国防建设事业中。工程机械制造业,作为我国制造业的重要组成部分,曾一度成为发展最快、经济效益和产品市场前景均较好的行业,在整个装备工业体系中具有举足轻重、无可替代的地位和作用。但随着市场经济和改革开放的不断深入和推进,特别是我国加入 WTO 后,中国工程机械行业面临着日趋激烈的竞争。毋庸置疑,就整体而言国产工程机械产品的质量、寿命和可靠性,与国外产品相比确实存在着较大差距,以至于在我国的长江葛洲坝、黄河小浪底等大型建设工地上大部分是卡特皮勒公司的推土机、小松公司的挖掘机等外国工程机械,难觅国产机的踪影。多少年来,这不能不说是一个令我们每个工程机械从业者羞愧而又必须面对的现实。

导致工程机械行业落后的根本原因,是由于企业管理水平不高,生产、制造工艺水平低,造成零、部件乃至整机产品质量低劣;同时企业自主开发、创新能力薄弱,不重视科学研究,未能形成企业的核心竞争力,致使大多数工程机械产品,不能快速进行产品的升级换代以适应市场发展的需要。显然,要想从根本上扭转这一局面,惟一有效的途径是企业必须依靠科技进步,重视和加强工程机械的科学研究:研究如何提高产品性能,完善其结构,提升其科技含量;研究怎样提高企业的制造能力、工艺水平,确保产品设计指标和质量;研究怎样去推行和实施企业的品牌战略,提高对市场需求的应变能力和企业的综合竞争力。

§ 1.2 国外工程机械新技术发展特点

近年来,随着建筑施工和资源开发规模的扩大,对工程机械需求量迅速增加,因而对其可靠性、维修性、安全性和燃油经济性也提出了更高的要求。随着微电子技术向工程机械的渗透,现代工程机械日益向智能化和机电一体化方向发展。自 20 世纪以来,国外工程机械进入了一个新的发展时期,在广泛应用新技术的同时,不断涌现出新结构和新产品。继完成提高整机可靠性任务之后,技术发展的重点在于增加产品的电子信息技术含量和智能化程度,努力完善产品的标准化、系列化和通用化,改善驾驶人员的工作条件,向节能、环保方向发展。

1. 系列化、特大型化

系列化是工程机械发展的重要趋势。国外著名大公司逐步实现其产品系列化进程,形成了从微型到特大型不同规格的产品,同时,产品更新换代的周期明显缩短。特大型工程机

械的特点是科技含量高,研制与生产周期较长,投资大,市场容量有限,市场竞争主要集中在少数几家公司。

2. 多用途、超小型化、微型化

推动多用途、超小型化、微型化发展的因素首先源于液压技术的发展和快速可更换连接装置的诞生,使得工程机械能在作业现场完成各种附属作业装置的快速装卸及液压软管的自动连接。一方面,工作机械通用性的提高,可以使用户在不增加投资的前提下充分发挥设备本身的效能,能完成更多的工作;另一方面,为了尽可能地用机器作业替代人力劳动,提高生产效率,适应城市狭窄施工场所以及在货栈、码头、仓库、农舍、建筑物层内和地下工程作业环境的使用要求。

3. 节能与环保

为提高产品的节能效果和满足日益苛刻的环保要求,国外工程机械公司主要从降低发动机排放、提高液压系统效率和减振、降噪等方面入手。绿色环保型工程机械的理念已经显露。人机工程学、无污染绿色施工等成为人们的共识。近几年来国外装载机的设计和制造进一步体现了以人为本的理念,要为司机提供一个更加舒适的环境,以达到他们称之为全自动化型的境地。

4. 计算机管理及故障诊断、远程监控系统及整机智能化

广泛应用微电子技术与信息技术,完善计算机辅助驾驶系统、信息管理系统及故障诊断系统,不断研制出集液压、微电子及信息技术于一体的智能系统,并广泛应用于工程机械的产品设计之中,进一步提高产品的性能及高科技含量。工程机械集成化操作与智能控制技术主要包括:电液控制自动换挡变速器技术、机电一体化控制技术、负荷传感全功率控制技术、可编程控制与遥控以及无人操作技术等。例如卡特彼勒公司的采矿铲土运输技术系统包括多种多样的技术产品,如无线电数据通信、机器监测、诊断、工作与业务管理软件和机器控制等装置。在运行中,机载系统通过无线电接收整个无线网络中的铲土运输数据、工程数据或现场规划数据。这些数据都显示在驾驶室内的一个屏幕上,司机在驾驶室内能直观地了解机器的作业位置,并准确地判断需要挖掘、回填或装载的土方量。

5. 优秀的设计和新结构的不断采用

优秀的设计是延长机械使用寿命的首要环节。日本提出“设计立业”,遂使日本产品经久耐用,行销全球。日本新卡特彼勒—三菱公司运用负荷分析方法,准确地进行了推土机等在施工现场的受力部件的应力分析,提出了延长机件寿命的设计(长寿设计),即降低面压(机件表面的接触应力),如用螺旋齿代替渐开线齿轮,使重叠系数增大;分散负荷,如采用三角形履带行走系代替常见的履带行走系,将驱动轮从常规的触地式移至三角形顶部,与地面脱离接触,使驱动轮承受的冲击负荷、作业负荷大幅度减小;为减少热量,采用湿式离合器、湿式制动器等,以减少摩擦热。设计时努力改善机械的维修性是延长寿命的有力措施。此外曲面造型技术在工程机械产品设计中也得到了广泛应用。

工程机械不仅要有科学、合理的结构,满足实际需要,而且还要结合美学法则、形态法则和色彩配置等技法来展示工程机械造型的艺术性。工程机械利用材料、工艺等条件充分体现出产品外观的形体美、线型美、色彩美和面饰美等。

§ 1.3 工程机械科学研究的特点

1. 工作环境恶劣、产品要求可靠度高

许多工程机械都要在潮湿、多尘、腐蚀等恶劣的环境下作业。而且随着工程建设规模的扩大和深入,高速、重载、大功率、可靠性好且又机动灵活的工程机械已成为用户的迫切需要,因而对产品也提出了更高的要求。尤其像西部大开发中复杂多变的地形、地质结构,地域广阔所形成的温度、湿度相差悬殊的气候条件,要求工程机械不仅能耐高温、高寒和高压,而且要求有正常工作条件下同样的寿命和可靠度,这无疑都增加了工程机械从选材到设计、加工及使用的难度,也是工程机械科技人员科学研究中面临挑战性的新课题。

2. 从科研获得成果到推广应用周期长

据相关资料统计,我国装备工业现有机械设备的役龄超期,许多设备为 20 世纪 50~60 年代的水平,工程机械制造企业也不例外,这样的传统装备和制造技术,与国外相比有很大的差距。正是由于设计手段落后,又受制造设备、制造工艺的制约,即便是我国科研人员花工夫、倾全力,经科研开发出来的工程机械新产品,从设计、制造、试验、检测到鉴定投产、推广使用其周期必定较长。由于周期长往往使有些国产工程机械从一面世就已是过时、落后,产品缺乏竞争力而惨遭淘汰。因此,提高工程机械制造业的技术装备工艺水平,对于科研成果的推广、新产品的应用,无疑是一个极为重要的保证。

3. 改变观念陈旧、缺乏科研的需求和拉动的局面

实践证明,科研过程及其成果,一定程度上是依赖市场需求的刺激和拉动。现在,由于企业转制,除了国家重点建设项目和重点企业外,有相当部分的工程建设决策者或企业经营者,在其承包期内,往往是求稳怕险,只要是现有的机械设备能收回资金、获得利润,就不再去投资、使用新的国产工程机械。面对高盈利、高风险的新型工程机械和低盈利、低风险的传统机械作选择时,也往往更易接受后者。这种陈旧和保守的观念,就在客观上使得工程机械的科学研究和新技术的推广使用缺乏需求的拉动和激发。按照市场经济规律,没有需求,就没有市场,也就没有工程机械科学研究的原动力,从而影响到科技人员的积极性,也使科研成果不能及时转化为生产力。

4. 涉及知识领域宽,要求科研人员素质高

今天,科学技术的迅猛进展,已使工程机械产品成为集机、电、液、生物技术等于一体的高科技载体。产品所涉及的专业知识,已不再是单一的、传统意义上的机械学科,而是融电子、通讯、卫星、生物和生态环境等多学科知识的互相交叉和渗透。要进行工程机械课题研究,解决相关技术问题,需要跨学科、多领域的合作。实际上,工业发达国家一直在把当代各种领域涌现的尖端技术,诸如自动控制、故障自检、全球定位导航系统和遥控、激光技术等相继应用到工程机械上。毫无疑问,要提升国产工程机械质量档次和制造加工的科技水平,进行现代工程机械新技术的科学研究,没有一大批博学多才、刻苦钻研,具有高度责任感、使命感的科研人员,没有一支富有献身精神、团队精神的高素质的科研队伍是不可想象的事情。

5. 工程机械的科学研究,必须以信息技术为依托

有专家指出,当今信息技术已成为制造业企业生存与发展的基础环境,也是工程机械行业得以发展的强有力支撑。设计信息化技术能为制造业的产品设计创新注入无穷动力;经

营与生产信息化技术,则可以优化资源配置和管理;过程信息化则支持先进制造技术;电子商务和供应链技术,则为促进制造市场重组;而网络平台的营销和维护技术更是提供了快捷、全面的售后服务系统。十分明显,进行工程机械的科学研究并取得预期的成果,同样离不开信息技术的支持。只有紧紧依托信息技术,改造传统工程机械制造业、实现跨越式发展;充分利用信息技术的发展成果,建立工程机械行业的科技信息网络和相关数据库,将有利于组成科研队伍联合攻克技术难题。实际上,也正是由于信息技术的飞速发展,才给工程机械行业的科学研究带来一场革命,这是推动工程机械行业发展的极好机遇。因为各种现代设计方法、先进制造技术,如并行设计、虚拟技术、柔性系统、智能加工和精益生产等,无一不是信息技术的集中体现。实践表明,依托信息技术才能高效地进行科学研究、成果推广,才能最终使企业生产、管理更为科学、合理,资源、能源得到充分利用,产品科技含量得以提升,成本大幅度降低。使企业在产品设计、制造、物料供应、库存质检、营销和成本控制等方面集成一体。并缩短产品研发周期,及时调整产品的数量、品种,以快速响应市场的需求,使产品的“零缺陷”、“零库存”成为可能。另外,通过实施信息化,加强信息化建设,可以提高企业的整体竞争力,也将有助于工程机械的企业和产品走向国门。因此说,依托和实施信息化是带动工程机械工业化,提高我国工程机械产品质量,赶超世界先进工程机械水平的必由之路。

第二章 工程机械的一般理论

§ 2.1 土壤的切削性能

工程机械是在地面上进行作业的机械,机械的使用性能、土壤的切削阻力及机械的作业效率等与土的性质有着密切的关系。

2.1.1 土壤的分类

土颗粒的大小称为粒度。把大小相近的颗粒合并为一组,称为粒组。粒径在 200mm 以上的为漂石;粒径在 20 ~ 200mm 的为卵石及碎石;粒径在 4 ~ 20mm 的为砾石;粒径在 2 ~ 4mm 的为砂粒;粒径在 0.25 ~ 2mm 的为砂;粒径在 0.05 ~ 0.25mm 的为细砂;粒径在 0.005 ~ 0.05mm 的为泥砂或粉土;粒径在 0.005mm 以下的为粘土。

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。而土壤中各粒度成分是决定土的性质的主要因素,常以此进行分类,即按土壤中所含某一粒径的颗粒重量占土的全重量的百分数来分类,如表 2-1 所示。

表 2-1 土按粒度成分分类

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

2.1.2 土壤的主要物理性质

1. 土壤的密度与重度

自然状态(具有自然含水量)单位体积土的质量称为土壤的自然密度 γ_0 。其值为土壤的质量 m_0 与体积 V_0 之比

$$\gamma_0 = \frac{m_0}{V_0} \quad (\text{kg/m}^3) \quad (2-1)$$

若无特别说明,本书中的土壤密度均指自然密度。自然状态下单位体积土壤所受的重力称为土壤的自然重度 γ_{s0} ,其值为

$$\gamma_{s0} = \frac{m_0 g}{V_0} \quad (\text{kN/m}^3) \quad (2-2)$$

土的重度与土壤的矿物组成、孔隙率、含水量等因素有关,几种土的重度如表 2-2 所示。

表 2-2 几种土壤的粘聚力 C 、内摩擦角 ϕ 和重度 γ_{s0}

塑性土壤 的种类	粘 土			亚粘土			亚砂土		
	C /MPa	ϕ (°)	γ_{s0} /(kN/m ³)	C /MPa	ϕ (°)	γ_{s0} /(kN/m ³)	C /MPa	ϕ (°)	γ_{s0} /(kN/m ³)
硬 性	0.10	22	21.5	0.06	25	21.5	0.02	28	20.5
半 硬	0.06	20	21.0	0.04	23	21.0	0.015	26	20.0
低 塑	0.04	18	20.5	0.025	21	21.0	0.01	24	19.5
塑 性	0.02	14	19.5	0.015	17	19.0	0.005	20	19.0
高 塑	0.01	8	19.0	0.01	13	18.5	0.002	18	18.5
流 动	0.005	6	18.0	0.005	10	18.0	0.00	14	18.0

2. 土壤的含水率与塑性

土壤的含水率 W 是土壤中所含水的质量 m_2 与固体部分质量 m_1 之比,以百分数表示

$$W = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2-3)$$

在一定条件下,压实某含水量的土壤达到标准密度所消耗的能量为最小,则该含水量为土壤的最佳含水量 W_0 。

土壤在外力作用下发生变形,当外力解除后,土壤保持其变形形状的能力称为土壤的塑性。粘性土是可塑性土壤,而砂和砾石等则为非塑性土壤。

粘性土的物理状态的变化与含水量有关,当含水量很大时,粘性土呈流动状态。含水量逐渐减小,粘性土呈现出塑性,土在呈塑性状态时,对其他物体有粘着性。当含水量继续减小时,土的塑性逐渐消失,从塑性状态变到半固体状态,含水量很小时,呈固体状态。

3. 土壤的粘着性

土壤的粘着性是指土粘附在其他物体上的能力。当粘性土的含水量增加到一定程度后(这一含水量称做粘着界限 W_n),土开始具有粘附在不同物体上的能力。在一定范围内增加含水量,土的粘着性增加,但含水量超过某一范围时,含水量越大,土的粘着性反而减小。评价土壤粘着性的另一指标是比粘着力 P_n 。比粘着力 P_n 是使单位面积的金属片与土壤脱

离所需的力。土壤的粘着性会使工作装置表面粘结土层,增加土方机械的铲掘阻力,减少工作装置的装土容量。

4. 土壤的自然坡度角

土壤的自然坡度角 ϕ_0 是松散土堆积时,自然形成的堆角。 ϕ_0 的值与土壤的内摩擦力和粘聚力有关,对于非粘性土,自然坡度角 ϕ_0 即等于干土的内摩擦角 ϕ 。各种土壤在不同状态时的自然坡度角如表 2-3 所示。

表 2-3 土壤的自然坡度角($^{\circ}$)

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

5. 土对土及土对钢的摩擦系数

土对土的摩擦系数 μ_1 、土对钢的摩擦系数 μ_2 如表 2-4 所示。初步计算时土对钢的摩擦系数 μ_2 也可以按下式估算

$$\mu_2 = (0.75 \sim 1) \tan \phi \quad (2-4)$$

式中: ϕ ——土壤的内摩擦角,其数值如表 2-2 和表 2-5 所示。

表 2-4 土对土和土对钢的摩擦系数 μ_1 、 μ_2

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

表 2-5 几种土壤的内摩擦角 ϕ 、内摩擦系数 μ_1 、重度 γ_{s0}

土壤的种类、状态		ϕ ($^{\circ}$)	$\mu_1 = \tan \phi$	$\gamma_{s0} / (\text{kN}/\text{m}^3)$
砂	干	30 ~ 35	0.677 ~ 0.70	16.5 ~ 18.5
	自然含水量	40	0.839	18
	饱和含水量	25	0.416	20
亚粘土	干	40 ~ 46	0.339 ~ 1.003	15
	湿	20 ~ 25	0.364 ~ 0.466	19
粘土	干	40 ~ 50	0.839 ~ 1.192	15.7
	湿	20 ~ 25	0.364 ~ 0.466	19.6
砂石	干	35 ~ 40	0.700 ~ 0.839	17.6 ~ 18.2
	湿	25	0.466	18.3

续表

土壤的种类、状态		$\phi(^{\circ})$	$\mu_1 = \tan\phi$	$\gamma_{s0}/(\text{kN/m}^3)$
砾石	有棱角	45	0.99	17.6
	圆形	30	0.577	17.6

6. 土壤的挤压应力系数和承载能力

进行土壤试验时如果土的变形较小(如小于10mm),则平板直径的影响可以略去,此时法向接触应力 σ 与总变形量 x 之间有以下近似关系

$$\sigma = P_0 x \quad (\text{Pa}) \quad (2-5)$$

式中: P_0 ——常数,称做土壤的挤压应力系数,其含义是土壤每下沉10mm所需的挤压应力。

土壤支承机器行走装置的能力可以用土在支承面上的最大容许压力 P_a 表示。通常 P_a 由允许行走装置沉入土中60~120mm的条件决定。 P_0 和 P_a 的值如表2-6所示。

表 2-6 土壤的挤压应力系数和最大容许应力

土壤种类	$P_0/(\text{MPa/cm})$	$P_a/(\text{MPa})$
沼泽土	0.018 ~ 0.025	0.2 ~ 0.3
饱和水粘土、挖松砂土、耕地	0.025 ~ 0.035	0.3 ~ 0.5
粗砂、中等密实度湿粘土	0.035 ~ 0.05	0.4 ~ 0.6
中等密实度粘土、湿密实粘土	0.05 ~ 0.06	0.6 ~ 0.7
中等含水量密实粘土、泥灰岩、湿黄土	0.07 ~ 0.10	0.8 ~ 1.0
干燥密实粘土、黄土、泥灰岩	0.11 ~ 0.13	1.1 ~ 1.5

2.1.3 土壤切削的基本理论

工程机械的各种土壤切削装置的共同特点是其切削部分都具有楔形,如图2-1所示,图2-1中 γ 被称为前角, α 为后角, δ 为切削角, β 为楔角, $\delta = \beta + \alpha$, b 为切削刃的宽度。各种土壤的切削比阻力 K_s 及刀刃入土的比阻力 K_y ,如表2-7所示。

表 2-7 各种土壤的切削比阻力 K_s 及刀刃入土的比阻力 K_y (MPa)

土级别	土的名称	K_s	K_y
I	砂、砂质土、中等湿度的松散粘土、种植土	0.01 ~ 0.03	0.25
II	粘质土、中细砂砾、松散软粘土	0.03 ~ 0.06	0.6
III	密实粘土质、中等粘土、松散粘土、软泥炭	0.06 ~ 0.13	1.0
IV	含碎石或卵石的粘土、重湿粘土、中等坚实煤炭、含少量杂质的石砾堆积物	0.13 ~ 0.25	1.4
V	中等页岩、得干粘土、坚实而硬的黄土,软石膏	0.25 ~ 0.32	