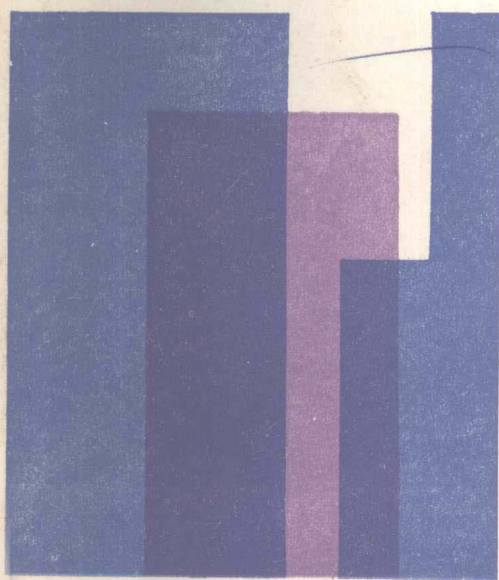


高等学校试用教材

铲土运输机械

(第二版)

同济大学 主编



中国建筑工业出版社

高等学校试用教材

铲土运输机械

(第二版)

同济大学 主编

中国建筑工业出版社

铲土运输机械是工程机械中的一大类别,主要包括推土机、装载机、铲运机、平地机等土方机械。为保证全书的完整性,本版内容增加了“铲运机、平地机”两章,并同时增加了“整机牵引性能及铲土运输机械的合理使用”等章节。全书内容着重讲述整机的总体设计、选型和工作装置设计,加强了基础理论,分析较为详尽。

本书系高等学校建筑机械(工程机械)专业试用教材,也可作为有关工程技术人员和行业的参考书。

高等学校试用教材
铲 土 运 输 机 械
(第二版)

同济大学 主编

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 20 字数: 484 千字

1987年7月第二版 1987年7月第二次印刷

印数: 7,811—12,400册 定价: 3.15元

统一书号: 15040·5229

再 版 前 言

原版《铲土运输机械》于1981年4月出版后,已经好几届学生使用,并供有关工厂、企业和科研单位技术人员参考。为适应新制订的有关教学计划和大纲的要求,本教材作了以下几方面的修订:

一、为加强基础理论,并使学生对影响整机作业性能的作业对象有一定了解,增加了“土的物理机械性能与土壤切削基本原理”和“整机牵引性能”等章节。

二、为适应城乡建筑工程施工特点,加速我国铲土运输机械薄弱机种的发展,增设“铲运机”“平地机”等章节。

三、为使学生具有合理选择、使用和管理铲土运输机械的知识,增写了“铲土运输机械的合理使用”一章。

本教材着重从整机的总体设计、选型和工作装置设计进行分析,注意与其他课程间的衔接,尽量避免与其他课程的重复和脱节。在学习本课程前,学生除已完成机械类专业的技术基础课程的学习外,还应学过《工程机械底盘构造与设计》、《液力、液压传动》和《结构力学》、《金属结构》等课程。

本教材由同济大学黄锡朋担任主编,并负责编写绪论和第二章;同济大学宋德潮编写第一章;西安冶金建筑学院王先哲编写第三章;重庆建工学院李邦禄编写第四、五、六章。全书由哈尔滨建工学院孙景武主审。

限于编者的理论水平和实际经验,缺点和错误在所难免,恳切希望读者给予批评指正。

一九八六年八月

目 录

绪论	1
第一节 用途与发展概况	1
第二节 设计方法与程序	6
第三节 土的主要物理机械性能与土的切削基本原理	7
第一章 铲土运输机械的牵引性能	18
第一节 牵引力平衡和牵引功率平衡	18
第二节 液力变矩器的选型和有效直径的确定	22
第三节 牵引性能参数的确定	32
第四节 牵引特性分析	39
第二章 装载机	45
第一节 概述	45
第二节 装载机选型和总体参数的确定	50
第三节 装载机的总体布置	80
第四节 轮式装载机的稳定性	89
第五节 装载机工作装置连杆机构设计	106
第六节 工作装置强度计算与车架受力分析	134
第七节 装载机的液压系统设计	149
第八节 装载机的生产率和发展趋势	168
附 录 装载机的整机性能试验	171
第三章 推土机	174
第一节 概述	174
第二节 推土机总体设计	178
第三节 推土机工作装置设计	201
第四节 松土器	228
第五节 推土机的生产率	237
第四章 铲运机	242
第一节 概述	242
第二节 铲运机的总体设计	249
第三节 铲运机总体受力分析	263
第四节 铲运机工作装置设计	265
第五节 链板装斗式铲运机的设计	279
第五章 平地机	283
第一节 概述	283
第二节 平地机的总体设计	288
第三节 平地机受力分析及工作装置设计	295
第六章 铲土运输机械的合理使用	307
第一节 铲土运输机械的正确选用	307
第二节 铲土运输机械合理组织施工	313

绪 论

第一节 用途与发展概况

铲土运输机械是指利用刀型或斗型切削装置在走行中铲掘、切削土石方，并能把所铲削的土石方运送到一定距离自行卸掉的机械。它也可包括专门用于越野运输的自卸运输车辆。

铲土运输机械是工程机械中的一大类别，主要包括推土机、装载机、铲运机、平地机和运土车等，能完成刮削、铲运、装卸和堆积物料、平整场地、修筑边坡、露天矿剥离等大量平面性的土石方工程作业，是工程准备工作和土石方作业的主要机械。因此，也可以和挖掘机等一起列为土方机械。

铲土运输机械的用途甚广，从建筑、水利、港口码头建设、机场道路建筑、矿山开采到城市扫雪、环境维护等都很需要。同时因其工作条件恶劣，机器损耗严重，使用年限较短，需要量很大。在国外，其产值往往占工程机械总产值的 $1/3 \sim 1/2$ 。随着科学技术飞跃发展，人类改造自然的工程也愈来愈大，特别是近些年来，工程建设事业向高山、沙漠、边区等人烟稀少，条件恶劣的地区发展，对铲土运输机械的依赖程度更大，如国外修筑一条全天候双线公路，全长576km、宽8.5m，公路大部分在北极圈内，常年最低温度在零下70℃，路堤用砾石铺设，铺层厚1~2m，共需挖掘和在二、三km内运送砾石2432万 m^3 。如此巨大的土石方量和恶劣的自然条件，单依靠人力在短时间内是无法完成的。但由于使用大量工程机械（主要是铲土运输机械，有478台），全部工程只雇用3400人，实际施工100天就完成全线的铺设任务，充分显示了铲土运输机械的威力。

随着冶金工业的发展，露天矿开采发展甚快，在露天矿开采中，矿场的剥离、土石方和矿物的挖掘运输占总开采工作量的85%以上，这些物料的铲装、运输在很大程度上也要依靠铲土运输机械。

我国要在本世纪内实现四个现代化，需要建设大批矿山和工程建设项目，没有大量、高效的铲土运输机械是不可想象的。

我国的铲土运输机械行业原有的基础比较薄弱，60年代以前还没有专业生产厂，仅有二、三个兼业工厂生产少量的推土机和铲运机，1961年以后才正式建立铲土运输机械的专业厂，其中有郑州、宣化、柳州、厦门、天津、成都、黄河工程机械厂和济宁机器厂等主要生产厂家。产量逐年增长，品种不断增多。目前履带推土机和轮式装载机已形成品种系列。特别是近几年各企业积极引进国外先进技术，发展新品种，其中有些产品的技术性能已达世界水平。

我国的铲土运输机械行业虽然发展速度不算慢，但仍远远不能满足社会主义建设事业发展的需要，国家每年尚需从国外进口相当数量的铲土运输机械。目前我国铲土运输机械行业存在的主要问题是：专业化生产薄弱，品种不全，“三化”程度较低，质量不够稳

定，机器寿命较短。今后必需加强全面规划，改革管理体制，大力贯彻“三化”，组织专业化生产，加强科学研究，积极引进国外先进技术，改革生产工艺，采用新材料，把铲土运输机械的品种、质量和产量尽快搞上去，以适应“四化”建设的迫切需要。

图0-1和图0-2分别是柳州工程机械厂生产的ZL50轮式装载机和宣化工程机械厂生产的Z-120履带式装载机的外貌图。

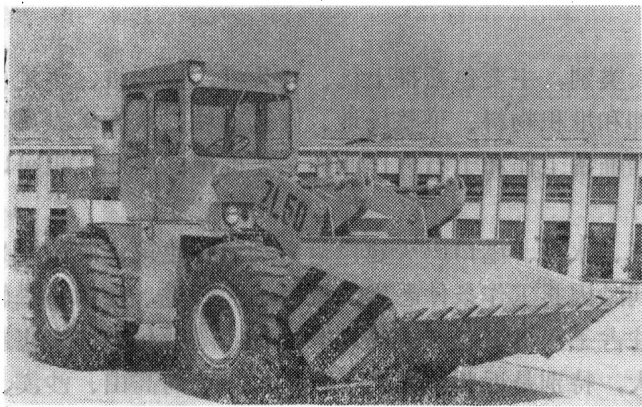


图 0-1 国产ZL50轮式装载机

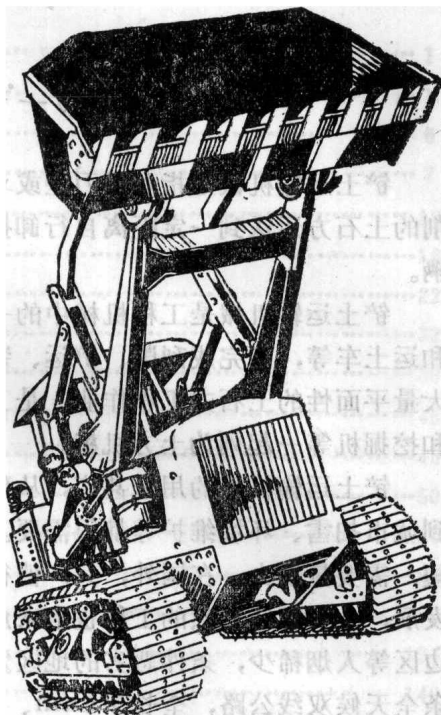


图 0-2 国产Z 120履带式装载机

图0-3是济宁机器厂生产的履带式推土机。

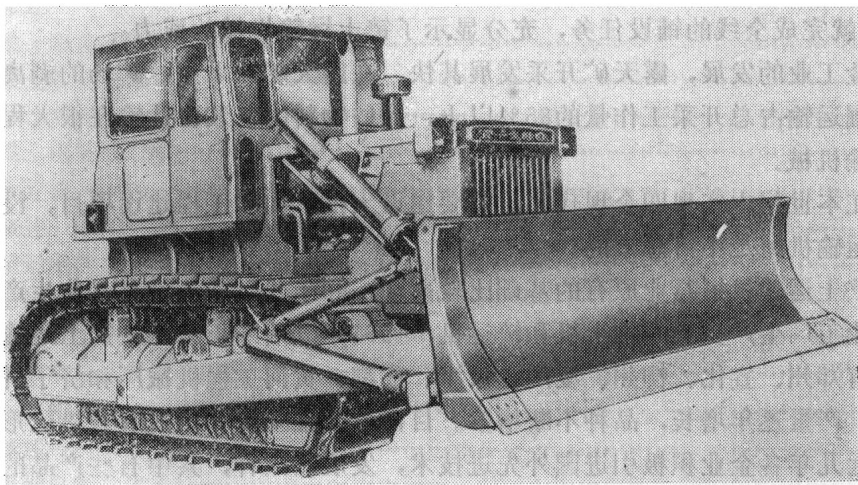


图 0-3 国产履带式推土机

图0-4所示是郑州工程机械厂生产的自行式铲运机。

图0-5为天津工程机械厂生产的自行式平地机。

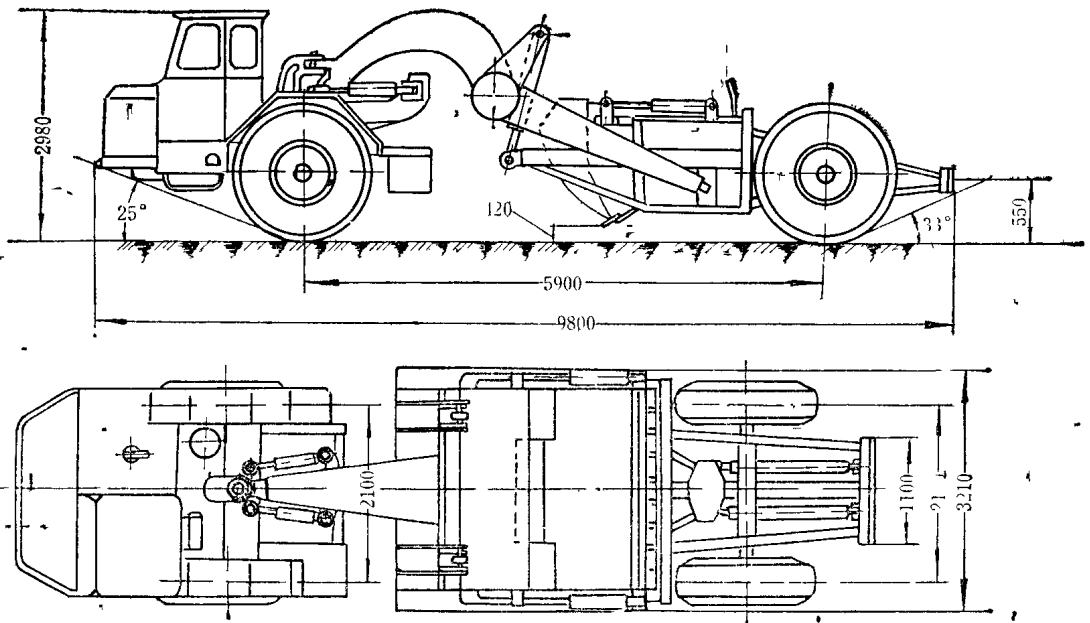


图 0-4 国产自行式铲运机

图0-6为小型翻斗车外形图。

根据对国内外铲土运输机械的现状和结构特点的分析，可以归纳以下一些总的发展趋势：

（一）为适应建筑业和采矿业规模的日益扩大，以及小型建筑工地仓库装卸作业机械化的实现，铲土运输既向大型化发展，又向小型化发展。

大功率的机器在能耗、施工单价和作业能力等方面具有优势。为提高施工效率，采用大型工程机械进行施工的倾向在不断增加，促使铲土运输机械的功率和作业能力向大型化发展，具体反映在两个方面。一方面是提高现有有机种的作业能力。例如，美国卡特皮勒公司战后生产的D8-2U推土机，其发动机的输出功率为112kW、机重16.5t。而现在生产的D8L-13Y，输出功率246kW、机重31.4t，功率和机重分别提高了2.3倍和1.9倍。60年代末生产的992-25K轮式装载机其发动机功率416kW、机重47.7t斗容7.7m³，而时隔十年在70年代末生产的992C-42X发动机功率达522kW、机重85.3t，斗容10.3m³。其功率和斗容都分别提高了25%和28%。另一方面是新研制的大型机械增多。例如，卡特皮勒公司近期生产的D10推土机（整机重量88t，功率522kW）、日本小松公司生产的D455推土机（整机重量81t，功率460kW）。1981年日本小松公司又首先生产了重120t，功率750kW的超大型推土机D555A-1型，是世界上目前最大的推土机。又如，美国最近十年载重为6.8~10.2t的装载机产量增加31.5%，其中载重量10.2t以上的装载机则增长了51%。目前载重量最大的前端式轮胎装载机为32.7t，是美国克拉克公司所生产。

小型机器具有整机体积小、机动灵活、通用性好、使用面广的特点，适用于零星小型工程、仓库和农村使用，以替代手工劳动，节约劳动力。日本、美国和欧洲一些国家都有小型铲土运输机械的品种，且数量逐年增加。例如日本洋马株式会社的手扶推土机仅6kW

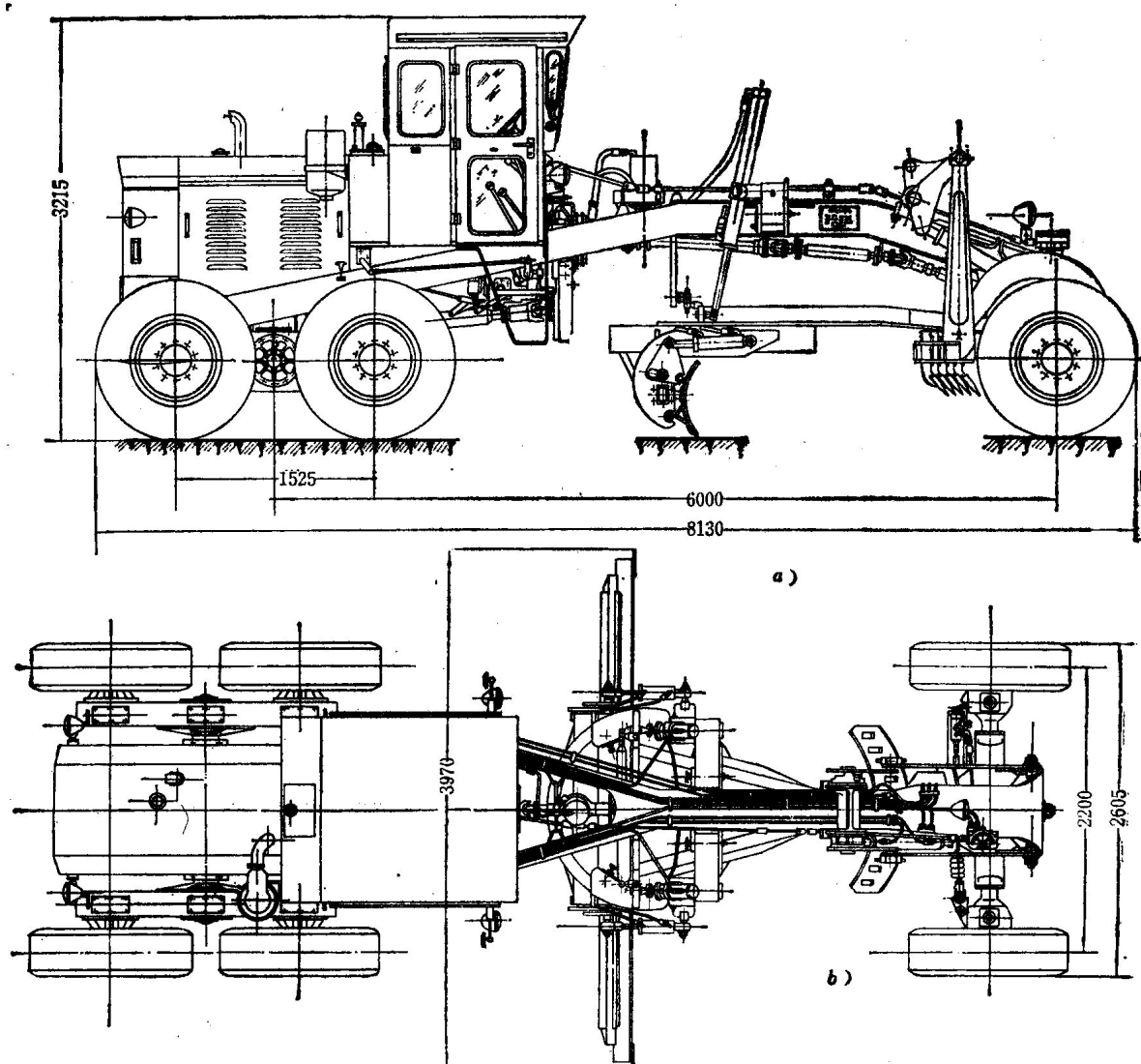


图 0-5 国产自行式平地机
a)、b)外形尺寸图

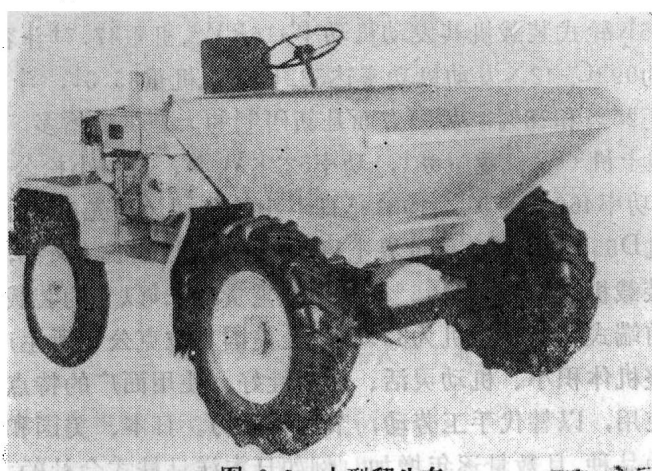


图 0-6 小型翻斗车

联邦德国瓦克小装载机功率仅9kW。

(二) 采用各项新技术和各种技术措施降低能耗, 提高机械作业能力和生产率。

1. 采用先进的传动形式

为适应铲土运输机械工况剧烈变化的特点。在大中型机械上广泛采用液力机械传动系, 并常带有可变能容的液力变矩器, 可提供更宽广的扭矩/速度的可变范围, 提高作业效率。

容积式液压传动由于具有操作简单、无级变速范围大、传动效率高、低耗等优点, 近年来在铲土运输机械上的应用不断增长, 成为一些运行速度要求不高的机械的发展特点。目前采用容积式液压传动的产品有: 联邦德国利勃海尔公司的150kW履带式推土机、美国卡特皮勒公司的功率为60~110kW的履带式装载机、美国约翰·迪尔公司的自行式平地机等, 有些轮式装载机也采用了容积式液压传动。

2. 采用更完善的液压系统

以调整机器转向和工作装置油路的流量, 保证机器低速运行时转向油路的供油和作业时工作装置有足够的工作速度和作业能力。合理利用发动机功率, 提高作业效率。

3. 在大中型机器上应用微处理机

应用微处理机技术, 使传动系统和动力装置的工作参数始终保持最佳匹配状态, 实现传动系统操作自动化是近年来铲土运输机械又一发展趋势。1980年春, 美国约翰·迪尔公司在其新型JD862型16Y₃链板式铲运机上装了首创的微处理机控制自动变速箱, 它可根据作业工况选定合适的档位和变矩器工况, 以便在作业全过程中, 保持发动机运转在最大功率点附近。通过精确的速比和发动机油门控制, 使燃油经济性最好。由于驾驶员能集中注意力于作业的操作, 提高了生产率。在这以后, 美国克拉克公司和瑞典伏尔伏公司相继在装载机上采用微机控制变速箱。日本在最新生产的D555-A超大型推土机上也采用了类似系统。采用该项技术能缩短作业循环时间, 减轻结构负荷和燃油消耗量(据伏尔伏公司资料, 可减少油耗10%, 足以弥补由于安装电气系统所花费的支出。

为了使施工面保持一定形状, 广泛采用了自动控制系统, 如在自行式平地机、铲运机、推土机上采用各种刚性导向结构和激光技术。

(三) 提高机械的可靠性和耐久性, 减少技术保养时间

1. 受力件采用优质合金钢

2. 在支承销轴部位采用特殊密封, 选用耐磨材料

3. 为了减少技术保养时间, 采取特殊保养区(点)的结构, 在保养区集中了滤油器、油面指示器、润滑点以及集中润滑系统或永久润滑的组件结构。在有的大型机器上还装置微型电子计算机, 它不仅能指出操作时出现的故障, 还能指出故障发生的部位和性质。

(四) 重视人的因素, 注意提高使用机器的安全性和舒适性。减少环境污染

1. 为确保安全和舒适, 对司机的工作条件提出了更高的要求。大中型机器均设有驾驶室。驾驶室装在减震器上, 具有隔音、隔热、防尘、空调等设备, 座位支承在可调式弹性悬架上。保证作业前方有良好的视野, 以提高生产率。为保证安全, 除根据用户要求可设有安全保护司机棚(即所谓ROPS, FOPS)使车辆在发生倾翻或遭到意外落物时, 保护司机免遭不测外, 还装有信号传递器、防止变速箱在挂档情况下发动机起动的锁紧装置, 以及紧急制动系统和灯光、音响信号等。

2.减少排气、噪音污染是国外很重视的技术措施之一。采取降低噪声的措施主要是加大散热风扇的口径,提高动力传动系统零部件加工精度等级,用发动机防震支座和隔断噪音传播路径等方法,已取得了显著效果。

第二节 设计方法与程序

产品设计是试制、发展新产品的首要环节,只有有了先进的设计,才能制造出先进的产品,设计必须努力使产品做到可靠、耐用、高效、经济、好用、好修、好造、好看的原则。

铲土运输机械新产品的设 计一般要经过:明确设计任务、调查研究、编制设计任务书,进行总体设计(包括确定整机的主要性能参数、选择主要部件的结构形式、进行整机布置和计算),部件和零件的图纸设计和强度计算,样机试制和试验鉴定等几个阶段。样机试制和试验、鉴定是设计工作的继续,只有通过试验才能检验设计的正确性。在经过试验、鉴定证明设计是成功的以后,就可以组织试生产。然后进入产品的销售。此后,需经常、及时地收集市场的信息反馈,检查产品是否达到预期的性能、质量指标。并对产品设计作进一步的修改,这样反复进行,直至满足需要。

一个高水平的产品不仅要有优异的性能,还应有高质量的保障,即确保性能参数的稳定、持久、缓衰,这就是对产品的可靠性要求,因此,现代设计应包括质量设计在内。

可靠性是产品质量中最重要的属性,它定义为“产品在规定条件下和规定时间内,完成规定功能的能力。”丧失规定的功能即称为失效或故障。凡以数值表征产品可靠性的单项和多种属性的统称为可靠性指标。最常用的有寿命、可靠度和失效率等。我国机械工业部对部分工程机械已作出规定(如轮胎式装载机技术条件标准1985年报批稿),在验收产品时不仅要测定性能指标,同时还要考核可靠性指标,这意味着在编制设计任务书时,不仅要提出产品的基本性能参数,同时还应有整机可靠性指标的要求。换言之,可靠性指标将成为产品设计的目标与任务。

要使产品达到可靠性指标,则必须由目前的常规设计过滤到按可靠性设计。由于当代的技术水平远未达到按规定的整机可靠性指标进行产品设计的阶段,因而只能借鉴同类型机器已积累的可靠性情报信息,指导结构或工艺的修改,再试制,重新投入试验,为此反复,直至完全达到规定的可靠性指标。因此可靠性试验已成为设计的一个极其重要的不可缺少的组成部分。

随着科学技术的发展,机械产品的更新换代周期也日益缩短,这就不断要求加速设计过程,缩短设计周期。同时设计的完善与否对产品的性能、质量和制造成本都有决定性影响。因此过去传统的,常规设计方法已越来越显得不适应发展的需要。在近三十年来,由于计算机的应用,正在设计领域中产生一场深刻的革命如用理论设计代替经验设计,用精确设计代替近似设计,用优化设计代替一般设计,用动态分析代替静态分析等等,所有这一切,都需要使用电子计算机来完成。计算机已成为设计人员进行创造性劳动的得力助手。目前,我国在铲土运输机械产品设计中已应用电子计算机在总体参数、工作装置、传动系统、结构强度计算等方面进行辅助设计,并已取得初步成效。

一个好的机械设计人员不仅要有渊博的现代科学知识,丰富的生产实践经验,而且还

要善于贯彻我们国家的技术方针政策。

产品设计必须贯彻系列化、标准化、通用化的原则，没有“三化”就没有专业化生产，就没有高质量、高速度。只有提高“三化”水平，才能用尽可能多的通用件装配出不同的变型产品和系列产品，用尽可能少的产品系列满足各方面的需要。

第三节 土的主要物理机械性能与土的切削基本原理

一、土的主要物理机械性能

土（包括土壤、碎石、松散岩石和它们的混合物）是铲土运输机械的作业对象，也是机械的支承物，它的物理机械性能对机器的生产率和效率影响极大。

（一）土的颗粒级配

土是由各种不同大小的颗粒所组成。按颗粒大小的不同可大致分为：颗粒直径200mm以上的为块石；20~200mm为卵石、碎石；2~20mm为砾石，0.05~2mm为砂粒，0.005~0.05mm为粉粒，小于0.005mm为粘土。

土壤的工程分类习惯上对于粗颗粒土主要根据颗粒大小及其级配来分。对于细颗粒土则是根据土的塑性指数分类。

粗颗粒土按其粒度组成所占重量的百分比可分为大块碎石类土壤，砾石土和砂土。颗粒大于10mm的碎块岩石，其数量超过50%时属于大块碎石类非胶结性土；颗粒大于2mm的砾石，其数量超过50%时属于砾石土；颗粒大于2mm而数量小于50%的则属于砂土。它们同属于疏松土壤，不能承受拉应力；在剪切力作用下容易破坏。

（二）土的自然重度 γ （又称容重）

土的自然重度 γ 是指土在天然状态下单位体积的土重，即土重 G 与体积 V 之比。

$$\gamma = G/V$$

土方机械所能铲掘的土壤重度一般为13~24kN/m³。多种土壤的自然重度 γ 见表0-1。

土壤的自然重度 γ 及单位粘着力 τ

表 0-1

土壤种类 土壤软硬程度	粘 土		亚 粘 土		砂 质 土	
	γ (kN/m ³)	τ (N/cm ²)	γ (kN/m ³)	τ (N/cm ²)	γ (kN/m ³)	τ (N/cm ²)
硬 状 态	21.5	10.0	21.5	6.0	20.5	2.0
半硬状态	21	6.0	21	4.0	20	1.5
硬塑状态	20.5	4.0	20	2.5	19.5	1.0
软塑状态	19.5	2.0	19	1.5	19	0.50
半流动状态	19	1.0	18.5	1.0	18.5	0.20
流动状态	18	0.5	18	0.5	18	0.00

（三）土壤的含水量 W

土壤的含水量 W 系指在给定体积内，土中水分的重 G_2 与土壤颗粒重（干重） G_1 之百分比。

$$W = G_2/G_1 \times 100\%$$

（四）粘着性

粘着性是指土粘附在其他物体上的能力。土的粘着性是大部分塑性土在含砂土质较少，而又有适当的含水量时所共有的特性。例如粘土在含水量25%时，与钢的粘着力（土壤受到0.15MPa）的压应力时，使土与钢脱离时所需的力）达1~2MPa，该力能使工作表面粘结几十厘米厚的土层，增加土方机械的铲掘阻力，减少工作装置装土容量。

（五）自然坡度 φ 。

自然坡度 φ 。是堆积松散土时自然形成的土堆坡角。各种土壤在不同状态下的 φ 。值以角度表示列于表0-2。

各种土壤的自然坡度角 φ 。

表 0-2

土 壤	碎 石	卵 石	砂			粘 土	壤 土	轻 壤 土	腐 植 土
			粗 粒	中 粒	细 粒				
干 燥 的	40	35	30	28	25	45	50	40	40
湿 润 的	40	45	32	35	30	35	40	30	35
潮 湿 的	35	25	27	25	20	15	30	20	25

（六）土的塑性

土在外力作用下变形，并在外力解除后仍保持已有变形而不恢复原状的性质称为土的塑性。通常粘土属于可塑性的土，而砂及砾石等为非塑性的土。

可塑性土壤的物理状态随含水量不同可变化成流动状态、塑性状态和固体状态。土从一种状态变到另一种状态时所含水量的分界点称为分界含水量。流动状态与可塑状态的分界含水量称为液限 W_L ，可塑状态与半固体状态间的分界含水量称为塑限 W_P 。当土的含水量小于 W_P 时为硬质土，介于 W_L 与 W_P 之间为塑性土，大于 W_P 为流动性土。

可塑性土壤的颗粒尺寸大多数小于0.005mm，依靠微粒间的连结力结合在一起。按照塑性指数 I_P （ $I_P = W_L - W_P$ ）分类：对于塑性指数 $I_P < 7$ 属于砂壤土（低塑性土）； I_P 在7~17之间属于亚粘土（塑性土）， $I_P > 17$ 属于粘土（高塑性土）。

（七）土壤的松散性

是指土在被铲挖过程中土壤松散，使体积增加的性质。以松散系数 K_s 来表示，它是铲挖过程中同一重量土壤松散状态的体积 V_s 与铲挖前自然状态的体积 V 的比值：

$$K_s = V_s / V > 1$$

各种土壤的 K_s 值是不同的，一般在1.1~1.35之间，爆炸的多石土和冻土其 K_s 值一般在1.45~1.6之间，见表0-3。

（八）土壤的摩擦系数

土壤颗粒之间的摩擦系数称为土壤的内摩擦系数，以 μ_2 表示；土壤与工作部件之间的摩擦系数称为外摩擦系数，以 μ_1 表示。其值见表0-4。

（九）土的密实度

土的密实度是表示土质密实程度的一项特性，它可以用土的容重、空隙比等物理特性来表示，但是由于天然状态的孔隙比值不易测定，误差较大，因此常采用标准贯入试验所确定的指数来判定土壤的密实度。这种指数不仅与土的密实度有关。而且还综合地反映了土

的机械特性，也用作土壤的分级指标。目前最常采用的指数有以下两种：

土壤的松散系数 K_s 表 0-3		
土壤级别	土壤名称	K_s
I	砂土	1.08~1.17
II	亚粘土	1.14~1.28
III	粘土	1.24~1.30
IV	重质粘土	1.26~1.32

土壤的摩擦系数 表 0-4		
土壤名称	内摩擦系数 μ_2	土对钢的摩擦系数 μ
砂	0.58~0.75	0.73
粘土	0.7~1.0	0.75~1.0
小块砾石	0.9~1.1	—
饱含水分的粘土	0.81~0.42	—
碎石	0.9	0.84

1.圆锥指数 圆锥指数是将一顶角为 30° 的圆锥压头以大约 1.83m/min 的速度压入土内至一定深度时，单位圆锥投影面积上所需之力。测定该指数的仪器称为圆锥贯入计。西方有些国家多采用此法。

2.冲击指数 冲击指数是将一面积为 1cm^2 的圆形平压头，在每次 $10\text{N} \cdot \text{m}$ 冲击功作用下，将压头压入土中达 10cm 深度时所需的冲击次数。测定该指数的仪器称为动载贯入计（或称冲击器）。

苏联广泛采用道尔尼冲击器，根据冲击次数对土壤进行分级，见表0-5。

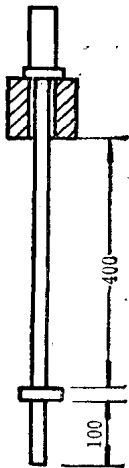


图 0-7 道尔尼冲击图

(十) 土的变形模量

土的变形模量代表土在垂直载荷作用下抵抗变形的能力。可通过土的承压试验确定：

土壤按冲击次数分级 表 0-5		
土的等级	土质	冲击次数
I	粉质土、砂土	1~4
II	中等含水量的轻质粘土	5~8
III	中等含水量的粘土	9~16
IV	密实的粘土	17~35

$$E = \alpha \frac{\sigma D}{\lambda}$$

式中 α ——考虑模具形状及刚度的修正系数（ $\alpha = 1.1 \sim 1.25$ ）；

σ ——在模具作用下沿土壤表面的应力；

λ ——土壤压缩变形量；

D ——模具直径。

土壤变形模量的意义近似于均质体的弹性模量，但具有非直线的特性，且随土的含水量及密实度变化。多种土壤的 E 值见表0-6。

二、土力学基本知识

工程实践和试验都证实，土体在外力作用下，它的一部分相对于另一部分的移动是在

剪应力作用下发生的，因此研究土抵抗剪切破坏的能力就成为土力学最重要的基本内容。

各种土壤的变形模量 **表 0-6**

土 壤	大颗粒砂	中颗粒砂	小颗粒砂	细砂，砂土	粉 状 砂 土 细 砂 土	砂 壤 土 粘 土	粉 状 土 黄 土
E 值 (N/cm ²)	3500~4500	2500~4000	1500~3500	1150~2600	750~2000	700~2200	600~1900

土壤的极限剪切应力取决于剪切面上的正应力 σ 。内摩擦系数 $\mu_2 = \operatorname{tg} \varphi$ 和土壤粘聚力 C 。由试验可得出抗剪强度曲线(图0-8)，它符合库仑摩擦定律，表达式为

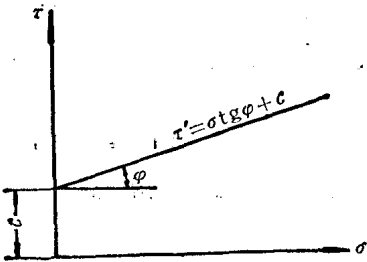


图 0-8 抗剪强度曲线

$$\tau_j = \sigma \operatorname{tg} \varphi + C$$

对于无粘性土(如纯干性砂土) $C = 0$, 则 $\tau_j = \sigma \operatorname{tg} \varphi$, 即土的抗剪强度由土粒间的摩擦力所决定。

(一) 土的强度理论

土体受力后是否发生破坏，决定于土体内部剪应力 τ 值是否超过土的极限剪应力 τ_j 。我们把该平面上的剪应力刚好达到抗剪强度的极限情况(即 $\tau = \tau_j$) 称为极限平衡状态。

为了验算土体是否达到极限平衡状态，需要了解土体中任一点的应力状态。任取一单元体，则土体受力后，单元体内受到来自四面八方的压力。我们只讨论二向应力状态，该单元体作用有大小主应力分别为 σ_1 和 σ_2 。引用材料力学莫尔应力圆概念和抗剪强度线可作图0-9，由图可见，该单元在 $\alpha = 45^\circ$ 截面上的 τ 值为最大(图中 M' 点)，但因小于极限剪应力，土体并未发生破坏。如人为地改变 σ_1 和 σ_2 的数值，例如保持 σ_1 不变而缩小 σ_2 值(或保持 σ_2 不变而增大 σ_1 值)，则应力圆增大，直至与直线 $\tau_j = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi$ 相切于 M ，此时该单元体即处于剪切破坏的极限平衡状态。如果再略增大 σ_1 与 σ_2 的差值，则莫尔应力圆将与极限抗剪强度线相割，土体即发生滑移而破坏。

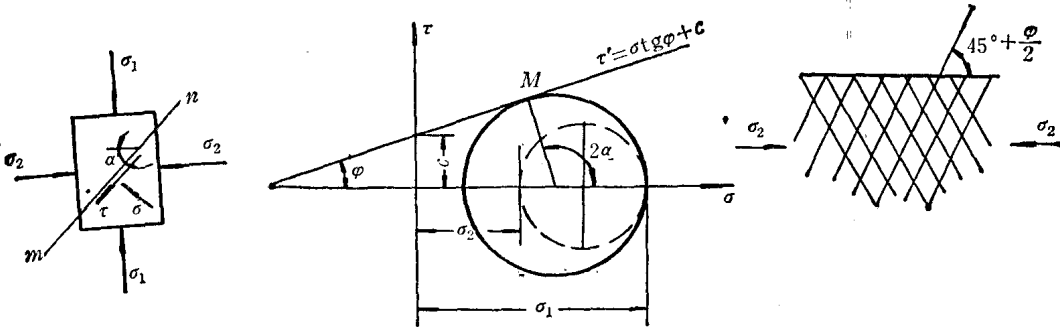


图 0-9 极限应力圆

土的抗剪强度线与莫尔应力圆相切的应力状态作为极限平衡条件称为莫尔——库伦强度理论。由图的几何关系可得：

$$\text{大主应力 } \sigma_1 = \sigma_2 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2 \operatorname{ctg} \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (0-1)$$

$$\text{小主应力 } \sigma_2 = \sigma_1 \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (0-2)$$

由图0-9可见

$$2\alpha = 90^\circ + \varphi$$

$$\text{则} \quad \alpha = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}$$

因此我们很容易找到土体破坏时滑移面的位置与方向：土体滑移面的方向与大主应力作用面的夹角为 $\alpha = 45^\circ + \frac{\varphi}{2}$ ，而与大主应力方向呈 $\alpha' = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}$ 角。

(二) 挡土墙理论

挡土墙理论是研究填土对墙壁压力的理论，近年来许多学者应用该理论来分析和计算土对铲土运输机械切削装置的阻力和土对走行装置的承载及牵引能力。

1. 土压力

作用在挡土墙壁上的土压力有三种情况：

(1) 静止土压力 挡土墙没有移动，墙后土体作用于墙壁上的压力。

(2) 主动土压力 挡土墙在墙后土体作用下背离土体移动某一距离时，土体一斜面上剪应力达极限平衡状态，此时土体作用在墙壁上的土压力称为主动土压力。

(3) 被动土压力 挡土墙在外力作用下向着土体方向移动某一距离时，土体濒于被挤出而滑动，此时土体作用在墙壁上的土压力称为被动土压力，见图0-10。

2. 朗肯状态

朗肯状态是指受载的土体在不计土与墙壁、土与底面摩擦阻力影响的条件下达到极限平衡的应力状态。墙壁受主动土压力的朗肯状态称为主动朗肯状态。受被动土压力的朗肯状态称为被动朗肯状态。由于我们讨论车辆行驶和工作阻力问题，土体受挤压是主要问题，故下面仅讨论被动土压力的计算。

3. 被动朗肯状态土压力计算

参见图0-11，土体表面上作用有均布载荷 q ，挡土墙后土体达到被动极限状态时，处于深度为 z 的土体单元在竖直方向所受的应力 σ_2 是小主应力，其值 $\sigma_2 = q + \gamma z$ 。而水平方向的应力，即被动土压力强度 p 是大主应力。代入式(0-1)得：

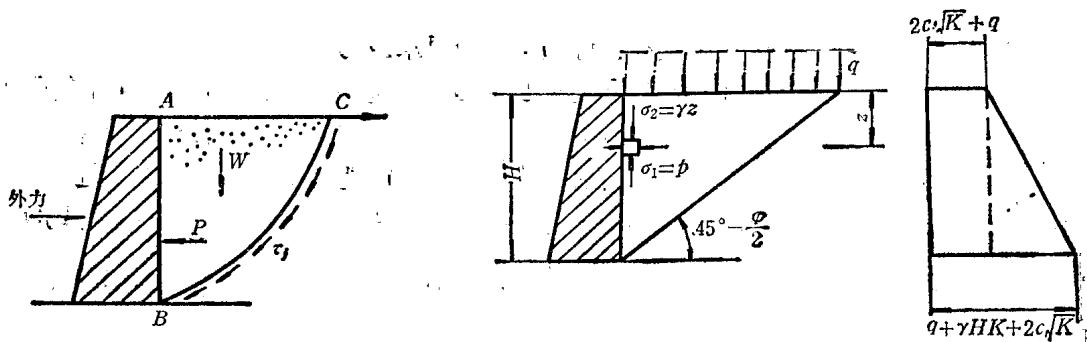


图 0-10 产生被动土压力情况

图 0-11 被动朗肯状态土压力计算

$$p = (q + \gamma z) \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$= qK + \gamma zK + 2c\sqrt{K}$$

式中 K ——被动土压力系数。

作用于墙壁上的被动土压力为：

$$P = \int_0^H p dz = qHK + \frac{1}{2} \gamma H^2 K + 2cH\sqrt{K}$$

实际上，由于存在摩擦力（墙壁与土体、土层之间）它会阻止土体的变形，因而土体内不可能产生完全的朗肯状态，而只能是局部朗肯状态。理论和试验证明，由于摩擦力的存在，土体滑移面不是平面而是曲面，图0-12表示墙壁水平移动而加压力于土体时，土体破坏的滑移面。接近地表面处的 ABC 区处于朗肯状态，而 ADB 区由于摩擦力的存在影响土的变形，使受剪滑移面成曲线状和径向线式，该区称为辐射剪切区。试验表明： ABC 区的土壤在土体破坏前先到达被动朗肯状态，使该区土体向上拱起。

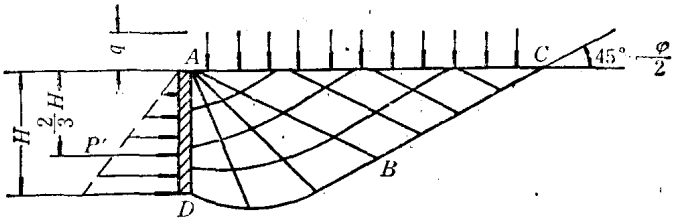


图 0-12 局部朗肯状态

考虑摩擦力存在，墙壁上被动土压强度 p' 和压力 P' 可用下式近似表述：

$$p' = qK_q + cK_o + \gamma zK,$$

$$P = \int_0^H p' dz = qHK_q + cHK_o + \frac{1}{2} \gamma H^2 K, \quad (0-3)$$

式中， K_q 、 K_o 、 K_r 与 z 无关，是可以计算出来的常数。

（三）土的承载能力

土体在垂直载荷作用下发生整体剪切破坏时，土体中出现与地面连通的连续滑动面，地面显著向上隆起。

使土体失去整体稳定时的垂直载荷称为土的极限承载力。

根据理论研究，如果土体上承受有宽度 $b = 261$ 的带状负荷和土体表面均布载荷 q 的作用，在发生整体剪切破坏时，假定滑动面的形状如图0-13所示，共分三个区： ADA 区为楔形压密区，由于土与带状极限负荷的摩擦作用，该区的土不呈剪切状态而处于压密状态，压密区的边界与带状板接触面的夹角为 φ （土的摩擦角）； ADB 区为辐射剪切区，滑动面按对数螺旋线变化； ABC 区是被动朗肯状态区，是底角为 $\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$ 的等腰三角形。

土体处于极限平衡状态时，带状极限载荷 Q 必将与下列各力平衡：

1. 土楔 ADA 的自重，其值为 $\gamma b^2 \tan \varphi$ ；
2. 作用于土楔斜面 AD 上的粘聚力 $P_o = b_1 c / \cos \varphi$ ；
3. 土体 $ADBC$ 对土楔边 AD 的合力 P_o 。土楔边 AD 相当于一个斜置的挡土墙（见图0-