

高等学校教材

铲土运输机械设计与计算

武汉水利电力学院 周复光 主编

江苏工业学院图书馆
藏书章

水利电力出版社

高等学校教材

铲土运输机械设计与计算

武汉水利电力学院 周复光 主编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书系统地讲述铲土运输机械理论和设计计算方法,取材简明扼要,文字通顺,重点明确,主要内容为土的基本性质与切削理论,铲土运输机械的行驶理论、牵引性能和总体设计,工作装置设计,传动系(包括离合器、定轴变速器、行星变速器、万向节传动、驱动桥)的设计、转向系、制动系和行走系设计。

本书可作为高等学校起重运输与工程机械专业及相近专业的教材。也可供有关工程技术人员和师生参考。

高等学校教材

铲土运输机械设计计算

武汉水利电力学院 周复光 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 20.25印张 459千字

1986年6月第一版 1986年6月北京第一次印刷

印数0001—3240册 定价3.75元

书号 15143·5944

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 土的基本性质与切削理论	6
第一节 土的基本性质	6
第二节 土切削的基本理论	11
第二章 铲土运输机械的行驶理论	12
第一节 轮式机械的行驶理论	12
第二节 履带式机械的行驶理论	25
第三章 铲土运输机械的牵引性能	32
第一节 铲土运输机械的阻力	32
第二节 铲土运输机械的牵引平衡及功率平衡	35
第三节 铲土运输机械的牵引效率	39
第四节 铲土运输机械的牵引特性	40
第五节 铲土运输机械的动力特性	46
第四章 铲土运输机械的总体设计	52
第一节 轮式装载机的总体设计	52
第二节 履带式推土机的总体设计	86
第五章 工作装置设计	99
第一节 推土机工作装置设计	99
第二节 装载机工作装置设计	117
第六章 传动系设计概论	144
第一节 传动系的型式	144
第二节 传动系的计算载荷	149
第七章 离合器设计	151
第一节 概述	151
第二节 离合器主要参数的选择	152
第三节 离合器接合过程的滑磨功	154
第四节 非经常接合离合器压紧机构设计	157
第八章 定轴变速器设计	162
第一节 机械变速器设计	162
第二节 动力换挡定轴变速器设计	171
第九章 行星变速器设计	182
第一节 行星传动运动学分析	182
第二节 行星传动力学分析	192

第三节	行星变速器的效率计算	197
第四节	行星变速器传动方案设计	199
第五节	行星变速器主要零件的计算	204
第十章	万向节传动设计	209
第一节	概述	209
第二节	万向节传动的运动分析和受力分析	209
第三节	万向节设计	213
第四节	传动轴设计	215
第十一章	驱动桥设计	218
第一节	驱动桥的功用和要求	218
第二节	主传动设计	218
第三节	差速器设计	234
第四节	半轴及桥壳设计	236
第五节	驱动桥轴承的受力分析与计算	240
第十二章	转向系设计	245
第一节	转向系的设计要求	245
第二节	偏转车轮转向系设计	245
第三节	铰接转向系设计	254
第四节	液动力转向系设计	259
第五节	履带式机械转向系设计	265
第十三章	制动系设计	272
第一节	轮式机械的制动性能	272
第二节	带式制动器设计	277
第三节	蹄式制动器设计	282
第四节	钳盘式制动器设计	286
第五节	制动驱动机构设计	288
第十四章	行走系设计	294
第一节	轮式行走系设计	294
第二节	履带式行走系设计	303

绪 论

一、铲土运输机械概况

铲土运输机械是工程机械中用途较广的机械，它包括推土机、装载机、铲运机、平地机和翻斗车等。铲土运输机械用来进行土石方和散粒物料的铲运、装卸、平整和堆积等作业，广泛应用在水利、电力、建筑、交通、矿山和国防等建设事业的工程施工中，是这些工程进行土石方作业的主要机械。

近些年来，铲土运输机械的使用范围在日益扩大。随着经济建设和科学技术的不断发展，人类改造自然的规模也愈来愈大。今天，工程施工中庞大的土石方工程如果没有与之相适应的铲土运输机械来进行作业，工程的工期和质量均是难以保证的。以大型水电站建设为例，目前世界上已建成或正在建设中的 $100 \times 10^4 \text{kW}$ 以上的水电站有100余座，其中 $400 \times 10^4 \text{kW}$ 以上的有10余座。如巴西的伊太普水电站发电量达 $1260 \times 10^4 \text{kW}$ 。该电站在建设中仅导流渠和左、右岸土石坝的土石方量就达 $5 \times 10^7 \text{m}^3$ 。此电站在1975年开始动工时就使用了推土机、装载机、铲运机等铲土运输机械40余台和35t级的自卸汽车20辆。一年以后又补充装载机21台、推土机60台、铲运机10台、平地机15台及自卸汽车100辆。我国葛洲坝水电站的大量土石方工程也是使用铲土运输机械进行施工的。又如矿业的开发，近年来露天矿的开采发展速度很快，现在世界上对矿产品的需求量每15年约增长1~2倍，而其中的三分之二是来自露天矿。露天矿的开采和剥离对铲土运输机械的需求量愈来愈大，如果没有相应的铲土运输机械进行作业是难以胜任的。为了寻找并充分利用矿产资源，当前的开发事业正在向边远、山区和沙漠地带进发，在这些地区的施工就更需要有作业效率高、使用性能好的铲土运输机械来满足工程建设事业的需求。

铲土运输机械在农业上也有着广阔的使用范围。目前，在农田基本建设方面已有采用铲土运输机械来进行土方作业的。装有不同工作装置的铲土运输机械可以扩大作业范围并提高效率。为实现农业现代化，我国农业机械化的要求正在日益增长。预计，铲土运输机械在我国农业和林业等领域也将有着良好的使用前景。

铲土运输机械是在本世纪初，随着汽车、拖拉机工业的发展而相继发展起来的行业。到四十年代末和五十年代初，由于第二次世界大战后工程建设的需要和钢铁工业、高速大功率柴油机的发展以及液力变矩器和动力换挡变速器的相继出现，促使了铲土运输机械的发展。现在，一些工业发达国家的铲土运输机械在工程机械的总数中占有较大的比重，以产值计，在日本，铲土运输机械占一半以上，美国约占五分之二，并在不断开拓新产品。

我国在五十年代就由洛阳第一拖拉机厂生产了东方红-54履带式拖拉机，随后该厂生产了以该拖拉机为基础车的履带式推土机。随着我国社会主义建设事业发展的需要，从六十年代初开始，陆续建立起一批生产铲土运输机械的专业厂，产品的数量和质量在不断提

高。近些年来，在发展新产品和采用现代技术和先进工艺方面正在稳步前进。目前我国生产的铲土运输机械有100余种，并在开发具有先进水平的新产品。

二、铲土运输机械的发展趋势

近些年来，工程施工的范围不断扩大，工程施工的规模不断发展，同时又要求缩短施工工期、提高质量并降低成本。这些，均促使铲土运输机械朝着大功率、高速度、高作业效率及维修简便的方向发展。在进行新产品设计时，对安全保护、防止公害和减少振动等方面已愈来愈被重视。为安全起见，除了在铲土运输机械上设计翻车保护装置外，对制动和转向系统也采取了措施。有的国家规定制动系统应包括双管路行车制动、停车制动和紧急制动三套装置。有些产品的转向系统设计了紧急转向机构以应急需。限制排气污染和噪声日益为设计者所关注。为减小振动，设计人员正在作多方面的努力，振动已被认为是铲土运输机械应测试的重要项目之一。

铲土运输机械除以上总的发展趋势外，不同的产品尚有着各自的一些动向：

(一) 推土机

向大型化发展 由于各种建设工程的规模愈来愈大和土石方工程量的增加，同时又要求缩短工期，这就促使了推土机向大型化发展，大功率履带推土机不断出现。七十年代末，日本小松公司和美国卡特皮勒公司相继生产了456kW的D455A推土机及522kW的D10推土机。到八十年代初，小松公司又制造了735kW的D555A推土机。大型推土机在大规模土石方工程施工中的使用，进一步提高了机械的作业效率。

向多品种及变型产品发展 为适应不同作业和气候条件，具有特殊性能、不同品种的推土机及变型产品不断出现。例如，适于在沼泽地区使用的湿地推土机性能不断改善，并朝着超低接地压力发展。如日本三菱公司BD2FSSS湿地推土机，其接地压力降到 $1 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ 。预计，今后还可能进一步出现具有更低接地压力的推土机。此外，为适应水下作业、环境污染地区或高温场所施工的需要，水下推土机、遥控推土机等产品均不断出现。我国也对这类品种进行了试验。

愈来愈多地采用液力机械传动 除在大型推土机上采用液力机械传动系统外，现在，中小型推土机也愈来愈普遍地采用装有液力变矩器和动力换档变速器的液力机械传动系统，从而改善了这些机械的使用性能，增强了自动适应性能。

目前，轮胎式推土机拥有一定的产量。但总的说来，由于履带式推土机在松软地面上具有良好的通过性并能发挥出较大的牵引力，现在履带式推土机在产品品种和数量上均明显地超过轮胎式推土机。

(二) 装载机

向大型化和小型化两极发展 装载机大型化，可以提高机械作业效率，有利于获得先进的经济指标，并便于采用先进的结构和技术。因此，装载机向大型化发展是明显的趋势之一。以轮式装载机为例，美国克拉克公司生产的675型轮式装载机，铲斗容量达 18.3 m^3 。由于没有合适的柴油机，采用两台柴油机并联，通过各自的变矩器后在变速器上合流，总功率达968kW。这样，一方面解决了动力问题，另一方面还可以在一台柴油机停止工作后，另一台仍可以继续工作，提高了装载机工作的可靠性。

装载机在向大型化发展的同时，又在向小型化发展。小型化在推土机上也有体现。但对于装载机，特别是轮式装载机，这个趋势更为显著。为了适应城市建设中拥挤、狭窄的施工现场以及港口、仓库、货场、船仓、地下和建筑物内的施工，小型化和超小型化的轮式装载机在产品的品种和产量上均在增长。世界上很多国家，特别是日本，对研制并生产这类产品十分积极。有些超小型产品的铲斗容量只有 0.14m^3 。

向多功能发展 这一点在小型装载机上更为明显。据报导，象美国克拉克公司的“山猫”、英国的JCB和加拿大的托马斯等小型装载机均备有30余种工作装置。日本生产的“山猫”小型轮式装载机也备有15种不同的工作装置以适应不同作业的需要。由于装载机功能的扩大，在包括工业、农业、林业、矿山和交通等多种行业中得到了愈来愈广泛的使用。

传动系统进一步完善 目前除少数小型轮式装载机采用机械传动和液压传动外，绝大多数装载机，特别是轮式装载机，普遍在传动系统中采用了液力变矩器、动力换挡变速器、行星传动轮边减速和全桥驱动。这些，均有利于装载机使用性能的改善，并使发动机的功率得到了更为合理的利用。

采用液压传动可以在一定范围内实现无级变速，并可使两边车轮在转向时以不同方向旋转来缩小转向半径并实现原地转向，有利于在狭窄的场地作业。近些年来，在一些小型轮式装载机上，特别是在铲斗容量为 0.3m^3 以下的轮式装载机上，液压传动系统的应用日益增多。

履带式装载机由于通过性好、重心低，特别是在潮湿的地面上通过性好，目前仍有着一定的产量。但轮式装载机具有灵活、快速、可在公路上行驶等优点，在品种和数量上均超过履带式。

(三) 铲运机

品种规格增加 铲运机的施工对象各不相同，规模差异也很大。目前，铲运机的品种和规格日益增多，并设计了履带式推土铲运机、双发动机铲运机及链板装载式铲运机等产品。现在各国生产着多种不同的铲运机，并都有其一定的合理使用范围。

斗容量大 由于土石方工程的加大，对大型铲运机的需求量增加，铲运机的斗容量有增大的趋势，目前主要发展 $10\text{m}^3\sim 30\text{m}^3$ 的产品。苏联在准备生产 40m^3 级的铲运机。总的来看，目前铲运机尚无向两极发展的明显趋向。

链板装载式发展迅速 链板装载式铲运机有降低装斗阻力、较合理地利用动力等优点，近年来发展迅速。在美国，链板装载式铲运机的品种和数量均超过铲运机总和的一半。苏联、日本等也十分重视链板装载式铲运机的发展。

(四) 平地机

目前各国主要发展自行式平地机和采用先进技术。如用自动化系统和仪表来控制平地机刀片的液压系统工作，和采用激光装置来控制施工的作业平面以提高工作效率和质量，这是目前平地机技术发展的动向。

近些年来，国外在铲土运输机械设计中出现的组件单元设计，有利于组织专业化生产。采用组件单元设计的产品，在总装前可以对各部件进行严格的质量检查和试验。在整

机使用过程中出现故障时可以以部件为独立单元进行更换。对于向大型化发展的一些铲土运输机械，采用组件单元设计还有利于以部件为单元进行装车运输。

三、铲土运输机械的设计程序

铲土运输机械新产品研制大体要经历设计、试制、样机试验等阶段，经改进后方能定型生产。

铲土运输机械新产品在设计阶段，一般有制定设计任务书、方案设计、技术设计三个程序。

设计任务书一般由主管单位组织有关部门制定后下达。设计任务书应根据使用的要求，阐明该项新产品在发展经济中的意义，明确该产品的使用范围，提出主要技术要求和经济指标以及生产方式等基本内容。设计任务书是对整个新产品设计具有指导性的文件，应体现我国的有关技术规定的要求。在制定设计任务书时，要充分收集并研究国内外同类机型的技术资料，并考虑到生产方式、技术水平及发展规划。任何一项新产品设计任务的提出均应该是使用的需要；同时应使该项产品与国内同类产品比较，在技术经济指标上具有先进水平。在可能的情况下，应达到国际先进产品的水平。

方案设计是铲土运输机械在设计阶段关键性的第一步。设计人员在充分研究设计任务书以后，应进行深入的调查研究。设计人员在进行方案设计时应充分了解使用条件和使用要求；掌握国家现行或将要实行的有关技术规定和系列，以及生产厂的技术水平和装备；并对国内外同类产品的技术资料和发展动向进行分析。在综合分析了上述条件和资料后，设计人员应根据设计任务书的要求，提出对新产品设计的方案设想，并进行可行性论证。方案设想实质上是一个初步的选型。它包括整机型式的选择、发动机型式的选择、传动型式的选择、主要部件及工作装置型式的选择、总体尺寸和主要参数的考虑、档位数和车速等内容。方案设想可以是多种。有条件时应选择几种有参考价值的样机进行试验、对比并加以分析，从中选出一、两种进行深入一步的方案设计，绘制总体布置草图并进行总体参数与尺寸的计算。在绘制总体布置草图的同时，还应进行部件的方案设计并确定各部件的特性参数。应对所考虑的方案进行必要的试验、对比，从中找出最佳方案。

方案设计确定以后，应制定技术任务书。通过技术任务书，进一步用文字、参数及必要的图形来确定铲土运输机械技术设计的任务和要求。技术任务书除了包括整机的类型、部件的型式、整机和部件的特性参数外，还应阐明本设计对结构、材料、工艺及采用的其它技术等方面的要求；对系列化、标准化、通用化的考虑和要求；以及对达到技术经济指标的措施和对制造成本的估计。方案设计和技术任务书经设计、生产和使用单位研究后，应经审批后实施。

技术设计包括在总体布置草图的基础上绘制正式的总布置图，进行部件和总成的设计与计算并绘制部件和总成的装配图，对主要零件进行强度、刚度、寿命等方面的计算。总布置图应确定各部件和总成的相对位置，定出控制尺寸，然后绘制部件和总成装配图及零件图。在部件和总成设计的基础上还要绘出整机总装配图。

应该指出，部件设计、零件设计和总装配图的绘制有着上述大体的程序，但绝不是进行了后一项不能再修改前一项。实际的设计过程往往是交错、反复地进行来达到设计的

成功。

在技术设计阶段还应进行多方面的试验。例如对采用的新结构进行部件性能试验，对选用的新材料进行可靠性试验和寿命试验等。

铲土运输机械在完成了上述主要的设计程序以后，应在生产厂进行样机试制。在试制期间，设计人员应对零部件在加工和装配中的工艺性进行检查。样机试制出来后应对样机的参数进行实测并进行性能试验。在进行了国家规定的工业性试验后应进行技术分析和鉴定，并进行必要的改进和修改设计。必要时还应再次组织试制、试验和修改。

由于电子计算机技术的发展和运用，目前不仅可以在不同设计参数和方案中用计算机进行选择，达到最优设计；而且可以检索资料并对复杂的公式和数据进行高速处理。电子计算机还可以通过图形来显示设计，从而大大地减少了设计人员的绘图和计算时间并提高了设计质量。计算机技术在设计中的应用正在促使设计工作向着一个新的阶段发展。

第一章 土的基本性质与切削理论

第一节 土的基本性质

铲土运输机械是在地面上进行行驶和作业的。机械的使用性能、土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。因此，了解土的基本性质是十分必要的。

自然界中的土是在各种不同的成土环境里形成的，土的成分及性质有很大差别。分散土是由不同大小和不同形状的颗粒所组成。颗粒的大小和形状在一定程度上反映成土环境的特点及矿物成分，并影响土的性质。

自然界中土颗粒的大小相差很大，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。按土颗粒的粒径大小分组，则不同粒度的土其性质有很大差别。粒径在200mm以上的为漂石；200~20mm为卵石；20~2mm为砾石；2~0.05mm为砂；0.05~0.005mm为粉土；小于0.005mm为粘土。绝大多数土是由几种粒度混合组成的，土的性质与各粒度的相对含量、含水量、密实程度以及气候等自然条件有关。而土中各粒度成分决定土的性质的主要因素，常以此来进行分类，即按土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1-1所列。

表 1-1 土按粒度成分分类

土 的 名 称		粒 度 成 分 (%)		
		2.0~0.05 (mm)	0.05~0.005 (mm)	<0.005 (mm)
砂 性 土	粉质砂土	50~80	20~50	0~3
	粗亚砂土	>50粗砂多于细砂	少于砂粒含量	3~10
	细亚砂土	>50细砂多于粗砂		3~10
粉 性 土	粉质亚砂土	20~50	粉粒多于砂粒含量	0~10
	粉土	<20		0~10
	粉质轻亚粘土	<40		10~20
	粉质重亚粘土	<40		20~30
粘 性 土	轻亚粘土	>40	砂粒多于粉粒含量	10~20
	重亚粘土	>40		20~30
	轻粘土	<70		30~50
	重粘土	<50		>50

一、土的主要物理性质

1. 土的重度

自然状态下单位体积土的重量称为土的重度 γ 。

$$\gamma = \frac{g}{V} \quad (\text{kN/m}^3)$$

式中 g —— 土的重量^① (kN),

V —— 土的体积 (m^3)。

土的重度与土的矿物组成、孔隙度、含水量等因素有关。几种土的重度见表1-5。

2. 土的含水率

土的含水率 W 是土中水的重量 g_w 与固体部分重量 g_s 之比, 以百分数表示

$$W = \frac{g_w}{g_s} \times 100\%$$

3. 土的孔隙比

土的孔隙比 e 是土中孔隙的体积 V_v 对于固体部分的体积 V_s 之比, 即

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

4. 土的孔隙率

土的孔隙率是土中孔隙的体积 V_v 对于土的总体积 V 之比, 以百分数表示

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100\%$$

土的孔隙比 e 和孔隙率 n , 可表示土的紧密程度, 它不是一个固定值, 随土内颗粒的排列情况和土所受的压力而变化。粘性土的孔隙比通常比砂土大。

5. 土的粘结性

土粒之间, 由于分子之间的吸引力表现出对机械破坏的抵抗能力, 称为土的粘结性。粘结性的大小与土的含水量及土的粒度成分有密切关系。对于粘性土, 当含水量小于某一限度时, 粘结水膜很薄, 土颗粒靠得很近, 粒间的粘结力很强。随着含水量的增加, 水膜加厚, 土粒间距加大, 粘结力减弱。砂土粘结力弱, 当含水量增加时, 由于水膜的压力, 反而使其微具粘结性。

6. 土的可塑性

土的可塑性是指土在外力作用下可塑成任何形状而不发生裂缝, 并在外力解除之后能保持已有的变形而不恢复原状的性质。土的可塑性与含水量及土的粒度成分有关。粘性土属于塑性土, 砂土为非塑性土。

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, 对其它物体有粘着性。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。从一种状态到另一种状态的分界点, 称为分界含水量。流动状态与可塑状态间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 。

可塑性是粘土区别于砂土的重要特征。可塑性的大小, 是用土处在塑性状态的含水量变化范围来衡量的。这个范围即液限与塑限的差值, 称为塑性指数。塑性指数越大, 土与水的结合能力越大, 土的粘性也越大。

① 凡在指力的场合, 本书中的重量、载重量和自重等均应理解为重力。

土的自然含水量 W 是反映土中水量多少的指标，在一定程度上也说明土的软硬与干湿状况。

7. 土的粘着性

土粘附于其它物体上的能力称为土的粘着性。粘结性大的土粘着性也大。含水量对粘着性有较大的影响，一定范围内增加含水量，土的粘着性也增加，但含水量超过某一范围时，含水量越大，土的粘着性反而越小。土的粘着性对铲土运输机械的行走性能和工作装置的作业有一定影响。

8. 土的松散系数

土的松散系数 K_i 是同一重量的土在挖松后的体积 V_i 与挖松前，即自然密实状态的体积 V_o 之比： $K_i = V_i / V_o$ 。各种土的松散系数见表1-2所列。

$$K_i = \frac{V_i}{V_o}$$

表 1-2 土 和 岩 石 的 松 散 系 数 K_i

土 和 岩 石 名 称	初 始 松 散	残 余 松 散
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
沃性粘土、重亚粘土、自然湿度黄土	1.24~1.30	1.04~1.07
块状粘土、带有碎石的粘土	1.26~1.32	1.06~1.09
硬黄泥, 软泥炭土	1.33~1.37	1.11~1.15
硬泥炭土、软的裂缝陡峭土	1.30~1.45	1.10~1.20
矿 石	1.40~1.50	1.20~1.30

表中的初始松散系数是刚刚挖散的松散系数，残余松散是在松散后经过若干时间，在自重、风、雨的作用下有一定程度变实后的松散系数。

9. 土的自然坡度角

土的自然坡度角 ϕ_o 是松散土堆积时，自然形成的堆角，见表1-3。

表 1-3 土 的 自 然 坡 度 角 ϕ_o (°)

土 的 种 类 状 态	土 的 自 然 坡 度 角 ϕ_o (°)								
	卵 石	碎 石	粗 砂	中 砂	细 砂	沃 粘 土	贫 粘 土	轻 亚 粘 土	种 植 土
干	40	35	30	28	25	45	50	40	40
湿	40	45	32	35	30	35	40	30	35
饱 和	35	25	27	25	20	15	30	20	25

10. 土与钢及土与土的摩擦系数

土与钢的摩擦系数 μ_1 、土与土的摩擦系数 μ_2 见表1-4所列。

11. 土的内聚力 c 及内摩擦角 ϕ

土的内聚力 c 及内摩擦角 ϕ 等土的性能参数见表1-5。

表 1-4

土与钢及土与土的摩擦系数 μ_1 及 μ_2

土的名称	μ_1	μ_2	土的名称	μ_1	μ_2
砂	0.73	0.58~0.75	干粘土	0.75~1.0	0.7~1.0
水泥	0.73	0.84	泥灰土	1.0	0.75~1.0
卵石	0.75	0.62~0.78			

表 1-5

土的性能参数

土的状态	粘土			亚粘土			亚砂土		
	γ (kN/m ³)	c (MPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	c (MPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)	c (MPa)	ϕ (°)
硬	21.5	0.1	22	21.5	0.06	25	20.5	0.02	28
半硬	21.0	0.06	20	21.0	0.04	23	20.0	0.015	26
低塑	20.5	0.04	18	21.0	0.025	21	19.5	0.01	24
塑性	19.5	0.02	14	19.0	0.015	17	19.0	0.005	20
高塑	19.0	0.01	8	18.5	0.01	13	18.5	0.002	18
流动	18.0	0.005	6	18.0	0.005	10	18.0	0.00	14

二、土的剪切强度

土在受到外载荷作用后发生变形，当剪应力达到极限值时，土沿剪应力作用方向发生剪切破坏，这个极限剪应力称为土的最大剪应力，即土的剪切强度 τ_{max} 。

土的剪切强度 τ_{max} 与土的内聚力 c 、内摩擦系数 $\text{tg}\phi$ 及剪切面上的法向应力 σ 有关。根据库仑公式

$$\tau_{max} = c + \sigma \text{tg}\phi \quad (1-1)$$

式中 c —— 土的内聚力，即单位剪切面积上的内聚力，其数值与土的性质有关；

σ —— 剪切面上的法向应力；

ϕ —— 土的内摩擦角，其值与土的性质有关；

$\text{tg}\phi$ —— 土的内摩擦系数。

不同性质土的性能参数相差很大。对于摩擦性土，如纯干砂，其内聚力 $c=0$ 。土的剪切强度取决于单位剪切面积上土的内摩擦力 $\sigma \text{tg}\phi$ ，即

$$\tau_{max} = \sigma \text{tg}\phi \quad (1-2)$$

对于纯塑性土或雪，其摩擦角 $\phi = 0$ ，土的剪切强度取决于土的内聚力 c ，即

$$\tau_{max} = c \quad (1-3)$$

大多数土其性质介于两者之间，因此，土的剪切强度按式(1-1)计算。不同性质的土其内摩擦角 ϕ 及内聚力 c 值可查表1-5。

三、土的剪切应力与剪切变形的关系

上面讨论的是土的最大剪应力，由试验得到土的剪切应力与剪切变形的关系有两种类型。对于松散的土，如干砂、饱和的粘土、干雪及大多数受过扰动的土，其剪切应力与剪切变形的关系如图1-1中曲线 a 所示。当剪切应力达到最大值后，剪切应力几乎与土的剪

切变形无关，剪切应力保持不变。对于未受过扰动的坚实土，如压实的砂、淤泥、冻结的雪等，当剪切应力达到最大值时出现峰值，以后剪切应力很快减小，并维持一定的残余剪切应力，如图1-1中曲线b所示。

对于前一类土，其剪切应力与剪切变形的关系可用公式表示

$$\tau = (c + \sigma \operatorname{tg} \phi) (1 - e^{-\frac{j}{K}}) = \tau_{\max} (1 - e^{-\frac{j}{K}}) \quad (1-4)$$

式中 j —— 土的剪切变形；

K —— 土的剪切变形模量，其值为曲线 a 在原点处的切线与曲线 a 水平段延长线的交点的横坐标。

对于后一类土，其剪切应力与剪切变形的关系也可近似用公式(1-4)表示。

四、法向载荷及土的沉陷

土在法向载荷作用下要发生沉陷，作用在单位支承面积的载荷 p 与土的沉陷量 z 之间的关系可用公式表示

$$p = \left(\frac{k_c}{b} + k_s \right) z^n \quad (1-5)$$

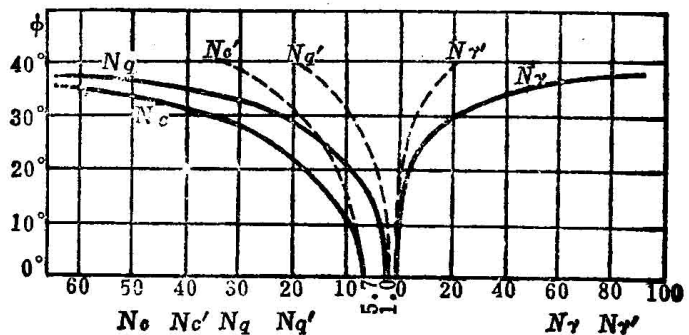
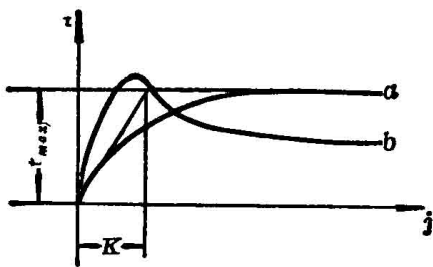


图 1-1 土的剪切应力与剪切变形关系曲线

图 1-2 土的承载力系数

式中 k_c —— 土的内聚变形模量；

k_s —— 土的内摩擦变形模量；

b —— 承载面积的短边长度；

z —— 土的沉陷量；

n —— 沉陷指数。

土的特性参数 k_c 、 k_s 及 n 与土的种类有关，对于松散干砂， $k_c=0$ ；对于塑性过饱和水的粘土， $k_s=0$ ；沉陷指数 n 在 $0 \sim 2$ 之间，通常为 $0 \sim 1$ 。

五、土的承载力

土的承载力是指土不发生崩裂，且承载面积能保持处于地面之上时土对载荷的支承能力。并以单位面积上均匀分布的安全载荷值 p_s 来评价。

$$p_s = cN_c + \gamma z N_q + \frac{1}{2} \gamma b N_\gamma \quad (1-6)$$

式中 N_c 、 N_q 及 N_γ 为土的承载力系数，其值随内摩擦角 ϕ 而变化。承载力系数可按两种土质查取，图1-2中 N_c 、 N_q 及 N_γ 表示较为密实土质的承载力系数； N'_c 、 N'_q 及 N'_γ 则表示松软土质的承载力系数。式中其余符号同前。

第二节 土切削的基本理论

铲土运输机械工作装置的共同特点是其切削部分都具有楔形，如图 1-3 所示，都有前角 β 、后角 θ 、切削角 γ 、夹角 δ 及切削刃宽度 B_0 。

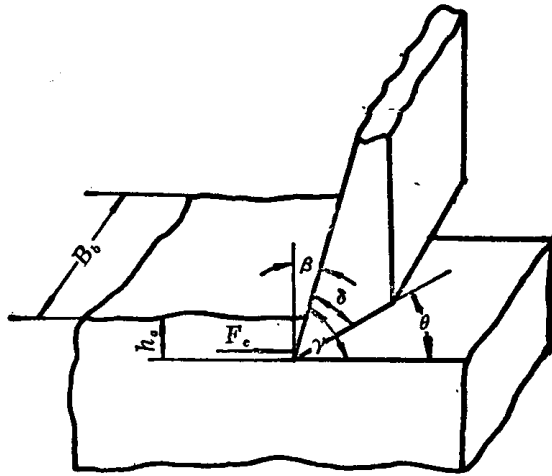


图 1-3 切削刃的几何关系

在切削过程中，土对切削刃的作用力称为切削阻力。切削阻力与土的性质、工作装置的几何参数等有关。

作用在切削刃上的切削阻力 F_c 可按下式计算

$$F_c = 10^6 K_b B_0 h_c \quad (\text{N}) \quad (1-7)$$

式中 B_0 ——切削刃宽度 (m)；

h_c ——切屑层厚度 (m)；

K_b ——土的切削比阻力 (MPa)，由表 1-6 查得。

表 1-6 土的切削比阻力 K_b 及刀刃压入土的比阻力 K_{b1} (MPa)

土 级 别	土 的 名 称	K_b	K_{b1}
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质，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、重干粘土、坚实而硬的黄土，软石膏	0.25~0.32	

切削比阻力 K_b 与土的性质、切削刃的几何形状等有关。对大多数土，切削角 γ 的最佳值为 $20^\circ \sim 30^\circ$ ，在保证有足够后角 θ 的条件下，切削角 γ 太小会使切削刃变薄，以致刀刃强度不足；但切削角 γ 增大，会使切削比阻力 K_b 增大。切削角 γ 每增加 10° ，切削比阻力 K_b 将增加 $10 \sim 12\%$ 。为此，在切削刃强度足够的情况下，应使切削角 γ 接近其最佳值。切削时应保证有一定的后角 θ 。作业过程中由于地形及其它因素的改变会使后角 θ 减小，故后角不能小于 7° 。