



“十三五”普通高等教育规划教材

工程机械 设计指导



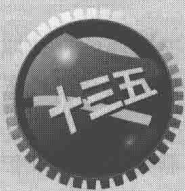
庞小兵 史春雪 主编
李自光 主审



GONGCHENG JIXIE
SHEJI ZHIDAO

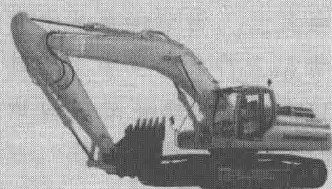


化学工业出版社



“十三五”普通高等教育规划教材

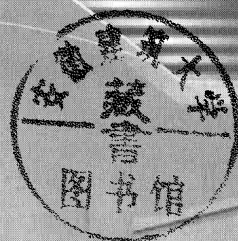
工程机械 设计指导



庞小兵 史春雪 主 编

尚志红 唐蒲华 副主编

李自光 主审



GONGCHENG JIXIE
SHEJI ZHIDAO



化学工业出版社

北京

《工程机械设计指导》分上、下两篇，上篇主要分析了典型工程机械工作装置和典型零部件的设计原则、计算方法以及主要计算参数的选择。下篇主要介绍工程机械液压系统的设计方法，并以实例介绍液压系统设计计算过程。

本书可作为高等院校培养工程机械设计人才的教科书，也可作为从事工程机械设计、制造及使用维护等工程技术人员参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程机械设计指导/庞小兵，史春雪主编. —北京：化学工业出版社，2017.9

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-122-28229-3

I. ①工… II. ①庞…②史… III. ①工程机械-机械设计-高等学校-教材 IV. ①TU602

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 240189 号

责任编辑：闫 敏 朱 理

文字编辑：余纪军

责任校对：王素芹

装帧设计：张 辉

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 装：大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 11½ 字数 280 千字 2017 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

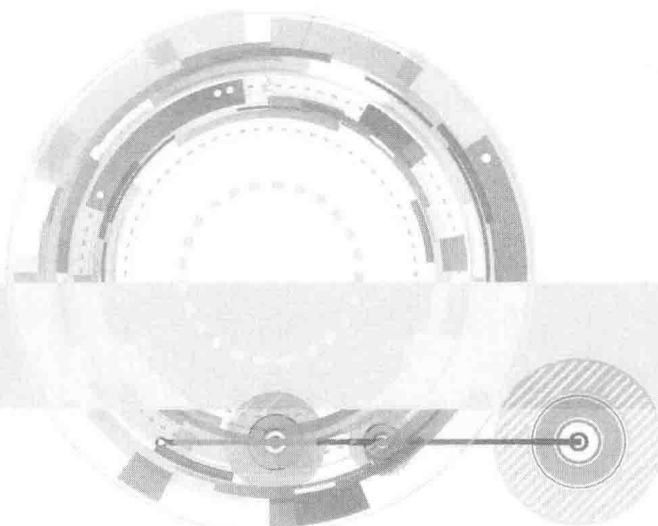
购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：39.00 元

版权所有 违者必究



前言

工程机械行业是国家装备制造业的重点行业之一。行业的发展与国民经济现代化发展和基础设施水平息息相关。

工程机械行业“十三五”发展规划通过对国内外工程机械市场发展的分析,尤其是根据“一带一路”、京津冀协同发展、长江经济带三大战略所引发的基础设施建设为行业所带来的机遇及新的发展环境,预测到2020年我国工程机械在国内外市场的销售额将达到6500亿元。行业出口及海外营业收入占比到“十三五”末将超过30%,出口力争实现稳步增长,到2020年行业出口额达到240亿~250亿美元,占行业年总销售额20%以上。

为了适应近年来我国工程机械行业的快速发展,满足对工程机械专业人才培养的需求,作者结合多年理论教学经验和企业实践经验,编写了本书。

本书分上、下两篇,上篇主要介绍了典型工程机械工作装置和典型零部件的设计原则、计算方法以及主要计算参数的选择。下篇主要介绍了工程机械液压系统的设计方法,并以实例介绍液压系统设计计算过程。

本书可作为高等院校培养工程机械设计人才的教科书,也可作为从事工程机械设计、制造及使用维护等工程技术人员参考书。

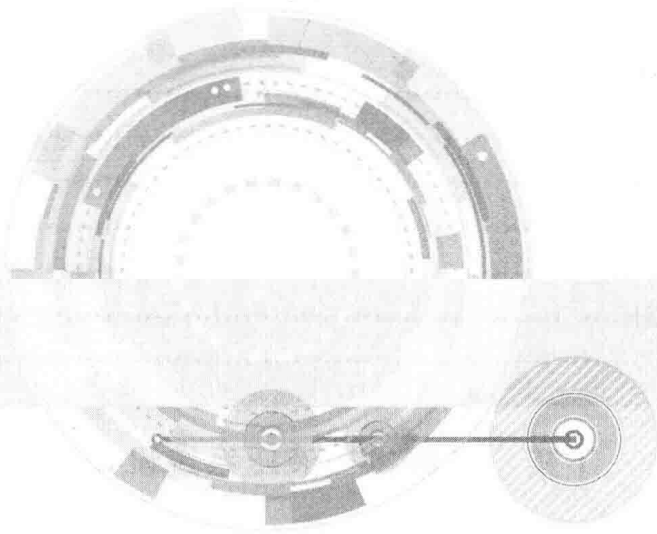
本书由长沙学院庞小兵、史春雪担任主编,上海中联重科桩工机械有限公司尚志红、长沙学院唐蒲华担任副主编。参与本书编写的还有长沙学院许焰、郝诗明、杨兴发、朱宗铭、向阳辉、黄升宇、段想平,上海中联重科桩工机械有限公司常延沛、朱长林。

本书由长沙理工大学李自光教授主审。

本书编写过程中得到了上海中联重科桩工机械有限公司的大力支持,在此表示由衷的感谢。

限于水平和实际经验有限,书中难免有不足和疏漏之处,敬请读者批评指正。

编者



目录

上篇 典型工程机械工作装置结构设计

第 1 章 推土机工作装置设计	2
1.1 推土机推土工作装置概述	2
1.2 推土工作装置设计	3
1.3 松土器概述	27
1.4 松土器的设计	29
第 2 章 铲运机工作装置设计	37
2.1 铲运机工作装置概述	37
2.2 工作装置的结构	37
2.3 铲斗与铰架的设计	40
2.4 铲运机部件上作用力的确定和部件的强度计算	43
第 3 章 装载机工作装置设计	52
3.1 装载机工作装置概述	52
3.2 工作装置的结构设计	53
3.3 工作装置强度计算	60
3.4 工作装置油缸作用力的确定	65
3.5 工作装置的限位机构	67
第 4 章 液压挖掘机工作装置设计	69
4.1 液压挖掘机工作装置概述	69
4.2 工作装置机构自身几何参数	72
4.3 工作装置各部分的基本尺寸计算和验证	74
4.4 工作装置结构受力分析与校核	81
第 5 章 平地机工作装置设计	87
5.1 平地机工作装置概述	87
5.2 平地机工作装置操纵机构设计	88
5.3 平地机工作装置设计	91
5.4 工作装置受力分析及校核	98

第 6 章	轮式工程机械驱动桥设计	101
6.1	驱动桥功用与组成	101
6.2	主减速器设计	102
6.3	差速器设计	109
6.4	驱动半轴的设计	113
6.5	轮边减速器设计	114
6.6	驱动桥壳设计	117

下篇 工程机械液压系统设计

第 7 章	工程机械液压系统设计方法	120
7.1	概 述	120
7.2	液压系统设计与计算总则	120
7.3	液压系统使用要求和负载特性分析	120
7.4	液压系统方案设计	122
7.5	液压系统原理图的拟定	127
7.6	液压系统参数设计	127
7.7	液压执行元件的设计计算与选用	128
7.8	液压能源装置设计	129
7.9	液压控制元件选用与设计	135
7.10	液压系统密封装置选用与设计	136
7.11	液压系统性能估算	137
第 8 章	推土机液压系统设计举例 (ZD220-3 推土机)	141
8.1	推土机液压系统组成与选择	141
8.2	推土机工作装置液压系统原理分析	143
8.3	推土机工作装置液压系统原理图的拟定	144
8.4	推土机铲刀系统受力分析与计算	146
8.5	执行元件 (液压缸) 设计与系统压力计算	146
8.6	液压泵的选定	150
8.7	液压元件的选择	152
8.8	油箱的计算与设计	156
8.9	液压系统性能验算	157
第 9 章	铲运机液压系统设计举例 (自行式铲运机)	161
9.1	液压系统方案的确定	161
9.2	液压系统原理图的确定	162
第 10 章	装载机液压系统设计举例 (运木式装载机)	164
10.1	液压系统方案分析与拟定	164
10.2	液压系统原理图的拟定	165
第 11 章	挖掘机液压系统设计举例 (WY200 挖掘机)	167
11.1	液压系统方案的制定	168

11.2 绘制液压系统图.....	170
第 12 章 平地机液压系统设计举例（前推后松式）	171
12.1 工作装置液压系统工况分析.....	171
12.2 液压系统要求.....	172
12.3 液压系统类型的选择.....	172
12.4 液压系统图拟定.....	172
参考文献.....	175



上篇 典型工程机械工作装置结构设计

推土机工作装置设计

1.1 推土机推土工作装置概述

推土工作装置包括推土铲、顶推架、斜撑杆和油缸及其液压系统等。

推土铲安装在推土机的前端，当推土机处于运输工况时，推土铲被升降油缸提起；推土机处于作业工况时，升降油缸降下推土铲，借助行走机构产生的牵引力将铲刀切入土中，在行进中推土铲前土堆积满并将铲松的土推移。利用推土铲的浮动功能，可将铲刀贴着地面移动，而将地面松散物料聚集，或清除积雪、平整场地。调节两端斜撑杆等量伸长或缩短，可以调整铲刀的切削角（即改变刀片与地面的夹角），如果调节两端斜撑杆不等长，即可在一定范围内改变铲刀的侧倾角，实现侧铲作业，用于开挖边沟。铲刀的几何形状及切削参数对于铲土阻力、铲刀聚土和铲土过程的能量消耗都有决定性影响。

按推土装置机构形式分类如下。

(1) 固定式推土装置

固定式又称作直铲式。固定式推土装置，结构简单，但只能正对前面方向推土，作业灵活性差，见图 1.1。

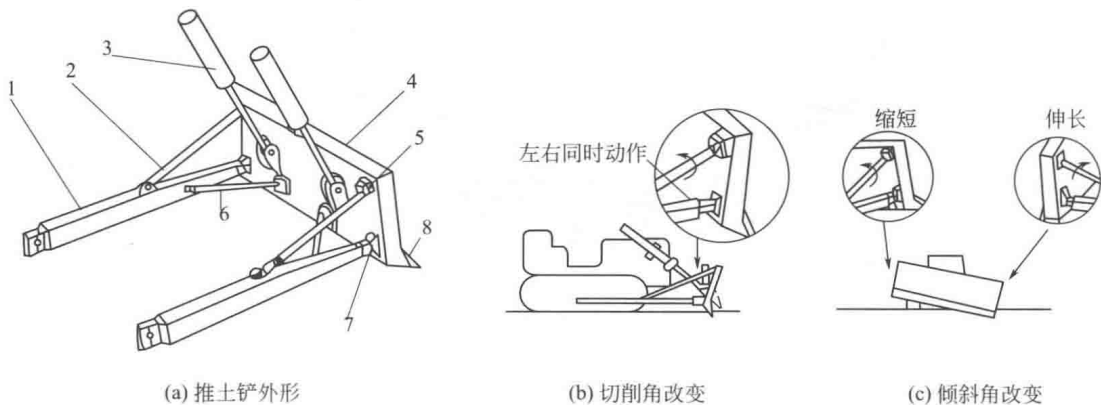


图 1.1 固定式推土装置

1—顶推架；2—斜撑杆；3—推土铲升降油缸；4—推土铲；5—球铰；6—水平撑杆；7—销连接；8—刀片

(2) 回转式推土装置

回转式又称作斜铲式。推土铲可在水平面内回转一定角度（一般为 $0^{\circ} \sim 25^{\circ}$ ），实现斜铲

作业, 便于向一侧移土, 适合平地作业, 见图 1.2。由于铲刀要在水平面和垂直平面内改变其安装角度, 所以铲刀与顶推门架的连接是一个中央球铰或者十字万向铰, 铲刀与水平面的斜撑、垂直平面的斜撑方式都应该具备球铰的特点。

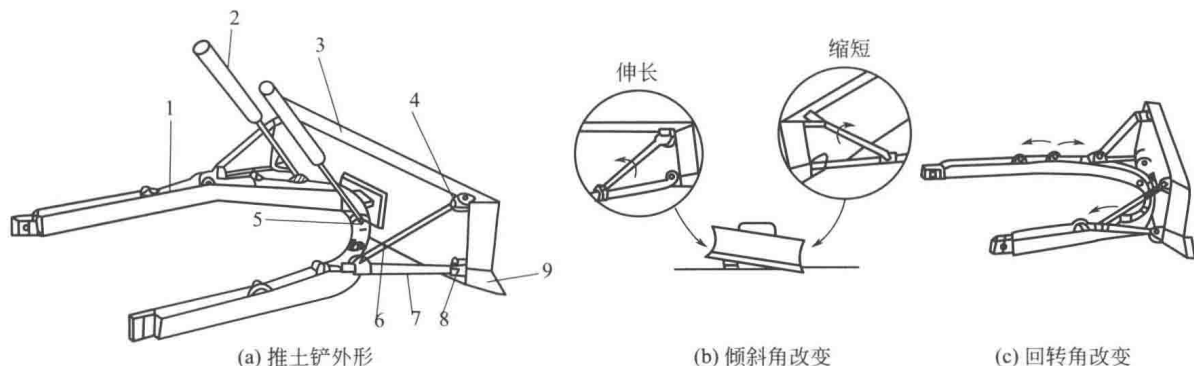


图 1.2 回转式推土装置

1—顶推架; 2—推土铲升降油缸; 3—推土铲; 4—万向节连接; 5—销连接; 6—斜撑杆;
7—支杆; 8—万向节连接; 9—刀片

1.2 推土工作装置设计

1.2.1 推土铲结构设计

推土铲的主要工作部分是切削刃和曲面板。切削刃是直接切土的零件, 应具有足够的耐磨性、强度和刚度。由于切削刃是易损件, 因此其与曲面板之间的连接是可拆卸连接, 便于更换。曲面板的作用在于积土和推运土。在整个铲土和推运过程中, 如果切土和推土阻力很小, 则表明其性能良好。

(1) 切削刃

切削刃的参数如切削角 δ 、尖角 β 和后角 α 等对切削阻力有显著的影响, 见图 1.3。一般认为切削角 δ 在 30° 时切削阻力最小。但为保证强度, 尖角 β 不能小于 20° ; 由于切削原理和推土机实际作业时地形变化的需要, 必须有后角 α , 其值通常在 30° 左右。综上所述, 切削角 δ 通常以 55° 左右为宜。

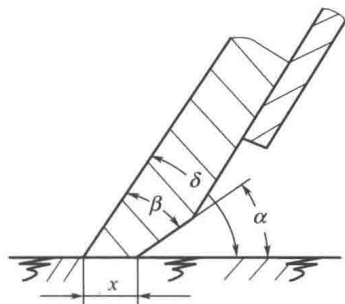


图 1.3 切削刃参数

δ —切削角; β —尖角; α —后角;
 x —切削刃接地宽度

(2) 曲面板

曲面板的结构参数对土屑运动规律、积土容量、漏损、推运阻力都有影响。为了减少积土阻力, 有利于物料滚动前翻, 以防止物料在铲刀前散胀堆积, 或越过铲刀顶面向后溢漏, 通常采用抛物线或渐开线曲面作为曲面板的积土面。此类积土表面物料贯入性好, 可提高物料的积聚能力和铲刀的容量, 降低能量的损耗。

因抛物线与圆弧的形状及其积土特性十分相似, 且圆弧的制造工艺性比抛物线好, 容易加工, 所以现代推土机均采用圆弧曲面板。

1.2.1.1 推土铲的结构参数

(1) 铲刀高度和宽度

① 推土铲高度 H_g ：推土铲支地，沿地面垂直方向量出的推土铲高称为推土铲高度 H_g 。推土铲高度取决于发动机的额定功率或推土机在推土作业速度下所能发挥的有效牵引力。 H_g 可按以下经验公式确定。

固定式铲刀高度 H_g ：

$$H_g = (220 \sim 275) \sqrt[3]{N_{eH}} \quad (\text{mm}) \tag{1.1}$$

或
$$H_g = 500 \sqrt[3]{P_{KP}} - 5P_{KP} \quad (\text{mm}) \tag{1.2}$$

回转式铲刀高度 H_g ：

$$H_g = (175 \sim 220) \sqrt[3]{N_{eH}} \quad (\text{mm}) \tag{1.3}$$

或
$$H_g = 450 \sqrt[3]{P_{KP}} - 5P_{KP} \quad (\text{mm}) \tag{1.4}$$

式中 N_{eH} ——发动机的额定功率，kW；
 P_{KP} ——推土机在推土作业速度下所能发挥的有效牵引力，以 10kN 为单位。

② 推土铲宽度 B_g ：固定式推土铲的宽度比左右履带最外侧各宽出 25~35mm。若工作在轻型土质条件下，或是推运散状物料时，还可将它制成加长型。对于回转式推土铲，要保证在它回转到极限位置后，沿推土机纵向轴线方向看去，推土铲的投影宽度仍要保证每端各比履带最外缘宽 25~35mm。这种宽出量是为了保证在作业过程中推土机能给自己开辟前进的道路，从而保证其作业质量，在平整土地的作业场合尤有意义。

当铲刀高度确定以后，也可以用下列经验公式确定或验证铲刀宽度 B_g 的值。

固定式铲刀：
$$B_g = (2.5 \sim 3) H_g \tag{1.5}$$

回转式铲刀：
$$B_g = (3.5 \sim 4) H_g \tag{1.6}$$

(2) 曲面板形状及参数

推土铲的角度参数包括切削角 δ 、后角 α 、刀刃尖角 β 、前翻角 β_K 、推土铲斜装角 ϵ 、挡土板安装角 β_z 、推土铲水平面回转角 Φ 、推土铲垂直面倾斜角 ξ 等，见图 1.4。推土铲角度参数推荐值见表 1.1。

表 1.1 推土铲角度参数推荐值

角度参数	固定式铲刀	回转式铲刀
切削角 δ	$55^\circ \pm 10^\circ$	$(50^\circ \sim 55^\circ) \pm 10^\circ$
回转角 Φ	90°	$50^\circ \sim 90^\circ$
倾斜角 ξ	螺杆调整的取 $\xi = \pm 5^\circ$ ，用油缸调整的取 $\xi = \pm (6^\circ \pm 12^\circ)$	
后角 α	$30^\circ \sim 35^\circ$	
刀刃尖角 β	30°	
前翻角 β_K	$70^\circ \sim 75^\circ$	$65^\circ \sim 75^\circ$
推土铲斜装角 ϵ	75°	
挡土板安装角 β_z	$90^\circ \sim 100^\circ$	

① 切削角 δ 是铲刀支地，刀片与地面间的夹角。 δ 越小切削阻力就越小。通过试验得出结论： δ 在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 时切削的阻力最小。但是，由于推土机作业时，必须保证后角 $\alpha > 30^\circ$ ，因此，过小不仅使 α 得不到保证，而且会引起刀刃尖角过小，使刀片强度受到影响。所以，在实际设计时，一般取 $\delta = (45^\circ \sim 60^\circ) \pm 10^\circ$ 。

② 后角 α 是刀片后段斜面与地面的夹角，见图 1.3。一般取 $\alpha = 30^\circ \sim 35^\circ$ 。 α 最好不能

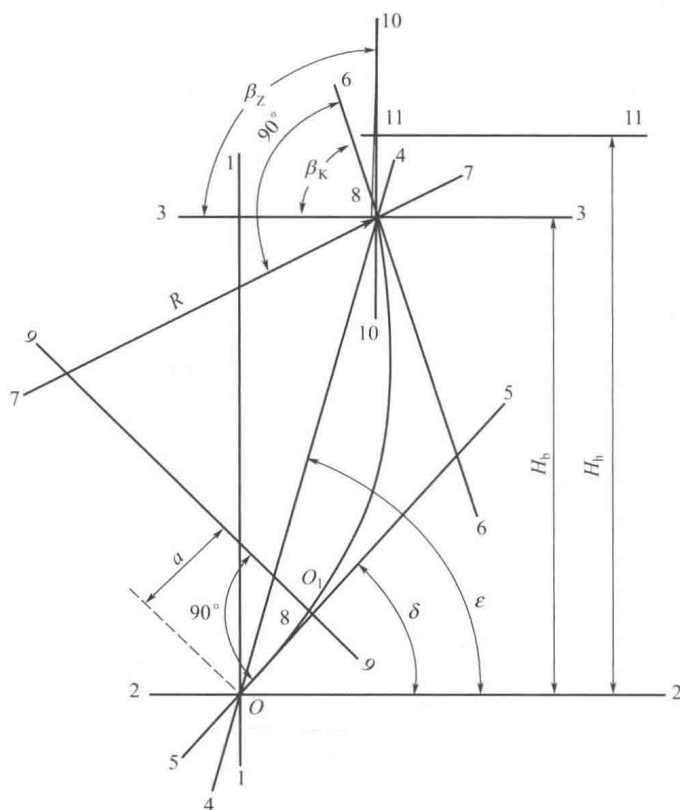


图 1.4 推土铲角度参数

小于 30° ，否则，由于地势起伏会出现刀片背后接地现象，从而增加摩擦力，降低切削能力。

③ 刀刃尖角 β 是刀片前后面夹角（图 1.3），一般为 30° 左右， β 过小刀片强度减弱； β 过大引起后角 α 过小。

④ 前翻角 β_k 是推土铲最上缘切线与水平面间夹角。 β_k 的选择主要考虑使土屑沿推土铲上缘向前翻滚性能良好。 β_k 值随推土铲上部曲面的曲率半径的变化而改变。 β_k 过大，会使土壤里开上缘时不能向前翻滚， β_k 过小，必然要减小推土铲上部的曲率半径，这就增加了土壤沿推土铲向上滑动的阻力，也增加了土壤对推土铲的法向压力，从而增加了土壤黏结在推土铲上的可能性。考虑到推土机上坡（ β_k 增大）和下坡（ β_k 减小）的影响，一般取 $\beta_k = 65^\circ \sim 75^\circ$ 。

⑤ 推土铲斜装角 ϵ 是指整个推土铲与地面倾斜安装的角度。一般取 $\epsilon = 70^\circ$ 。 ϵ 过小，一方面土屑易从推土铲上缘往后翻落；另外，由于推土铲上积土太多而引起铲刀提升阻力增加。 ϵ 过大，切削角随之增大，使得土屑上升变形加大，增加切削阻力。

⑥ 挡土板安装角 β_z 是指推土铲上部挡土板与地平面的夹角。一般取 $\beta_z = 90^\circ \sim 100^\circ$ 。加装挡土板的目的是防止土屑往推土铲后面翻落并增加推土铲前积土量。

⑦ 挡土板回转角 Φ 是指在水平面内，推土铲与推土机纵向轴线的夹角。从土壤切削试验可知，当 $\Phi < 40^\circ$ 时，土的侧移阻力显著减小，但由于结构位置限制，一般不易达到上述要求。对于回转式铲刀，侧向排土时， Φ 的变动范围为 $60^\circ \sim 90^\circ$ 。

⑧ 推土铲倾斜角 ξ 是在垂直面内推土铲与地平面的夹角。有了 ξ 角，能使推土机在坡地上横向推出水平切面，以及在地面上推出横坡。另外对于较坚硬土（铲刀尖啃地），可用

铲角作业。 ξ 的调整范围，用螺杆调整的取 $\xi=\pm 5^{\circ}$ ，用油缸调整的取 $\xi=\pm (6^{\circ}\pm 12^{\circ})$ 。

(3) 推土铲曲率半径

推土铲曲率半径 R 直接影响推土机的作业性能。 R 过小，使土屑向推土铲前面翻落，增加土屑沿推土铲上升阻力，并且导致卸土不干净； R 过大，土屑容易向推土铲后翻落，减少推土铲前面积土量。因此确定 R 值要综合考虑上述因素，其中最主要的就是避免土屑向推土铲后面翻落，也就是要求 $\beta_K<90^{\circ}$ 。 R 的具体数值可按经验公式计算，一般需满足 $R>(0.8\sim 0.9)H_g$ ，通常取 $R=H_g$ 。另外，当铲刀高度 H_g 、切削角 δ 、前翻角 β_K 、推土铲斜装角 ϵ 已知时， R 值按下式确定：

$$R=\frac{\sin(\epsilon-\delta)}{\sin\epsilon\left[1-\sin\left(\beta_K+\delta-\frac{\pi}{2}\right)\right]}H_g\text{mm}$$

(1.7)

(4) 推土铲直线部分及挡土板尺寸

推土铲下部直线部分用来安装刀片，所以其长度 a 等于刀片宽度，一般取 $a=(0.1\sim 0.25)H_g$ 。

挡土板垂直高度一般为 $(0.1\sim 0.25)B_g$ 的宽度，挡土板上边宽大于发动机罩迎风宽度，不小于推土铲宽度的 $1/2$ ；挡土板下边的宽度，固定式推土铲取其为推土铲宽，回转式推土铲则取其为推土铲宽的 75% 。

固定式推土铲的侧边做成直线形，并具有 $5^{\circ}\sim 7^{\circ}$ 的后角，以利用侧边铲土。（图 1.5 推土铲两侧外形）对于回转式推土铲侧边做成为曲线形，侧边与推土机前进方向（即纵轴线方向）的夹角为 $\Phi+(5^{\circ}\sim 7^{\circ})$ 。

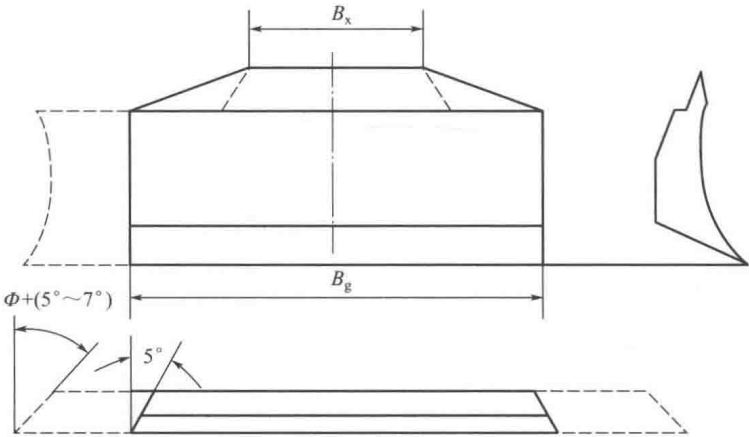


图 1.5 具有挡土板的推土铲

1.2.1.2 推土铲断面结构

推土铲断面的结构有开式、半开式、闭式三种形式（图 1.6）。小型推土机宜采用结构简单的开式；中型推土机大多为半开式，大型以上推土机作业条件恶劣，为保证足够强度和刚度采用闭式。

推土铲的具体结构由图 1.7 可见，曲面板与刀刃通过螺钉连接在一起，并在其背面和端面用钢板封闭成闭式结构。这样，既减轻推土铲的重量，又加强其刚度，这是大型推土铲普遍采用的一种结构形式。

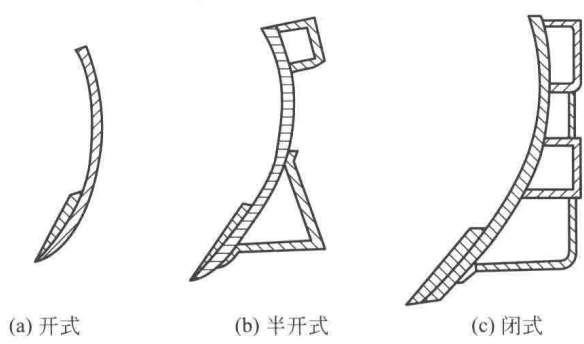


图 1.6 推土铲断面结构形式

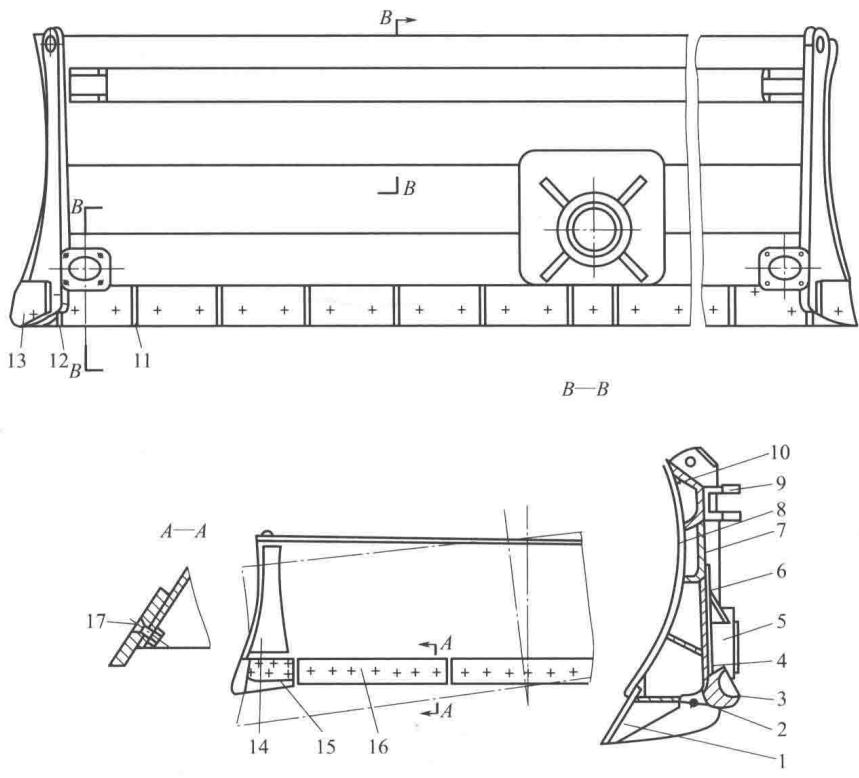


图 1.7 推土铲结构

- 1—底板；2—托板；3—下支座；4—下横梁；5—球铰座；6—横板；7—角板；8—曲面板；
9—上支座；10—上横梁；11—后筋板；12—侧板；13—前加强板；
14—侧加强板；15—刀角；16—切削刃；17—螺钉

1.2.1.3 推土铲横向结构

推土板的横向结构外形，一般有直线形和 U 形，如图 1.8 所示。直线形的推土板一般较窄，宽度比较小，切力较大，因此铲刀的积土容易从两侧流失，切土和推运的距离过长会降低推土机的作业效率。所以直线形推土板的铲土、运土和回填的距离比较短，主要用于短距离土的剥离和运输。

U 形推土板具有积土、运土容量大的特点，主要用于远距离土的运输。在运土的过程中，铲刀的中部的土壤上卷并前翻，两侧的土壤则上卷向铲刀的内侧翻滚，有效地减少了土粒和物料的侧漏现象，提高了铲刀充盈程度，提高了推土机的作业效率。



图 1.8 推土铲横向结构

1.2.1.4 铲刀钢板厚度

推土铲及顶推架均系钢板焊接构件，钢板厚度由强度及刚度条件所定。初算时可按额定有效牵引力参考表 1.2 推土铲钢板厚度推荐值选择。

表 1.2 推土铲钢板厚度推荐值

额定有效牵引力/kN	≤30	≤50	≤150	≤250	>250
钢板厚度/mm	6	8	10~12	14~16	17~20

1.2.1.5 顶推架与台车架的铰点位置

顶推架铰接在台车架的偏后位置，靠近驱动轮轴承，其优点是在推土铲升降时，特别是铲掘深度有变化时，推土铲的切削角变化较小。

1.2.1.6 铲刀升降机构和铲刀切削角机构

推土机铲刀升降机构如图 1.9 所示，铲刀油缸倾斜布置在主机前部，油缸活塞杆直接与顶推架或推土板铰接。铲刀升降机构由顶推架、活塞杆、油缸体、机体等组成四杆机构。通过调节倾斜油缸和斜撑杆的长度（等量伸长或等量缩短），可以调节铲刀的切削角。

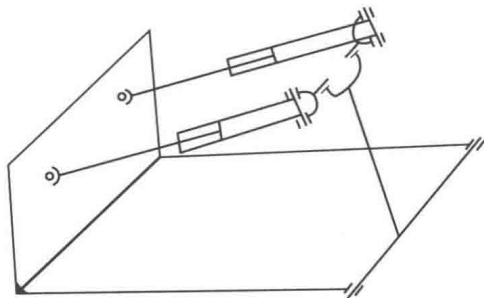
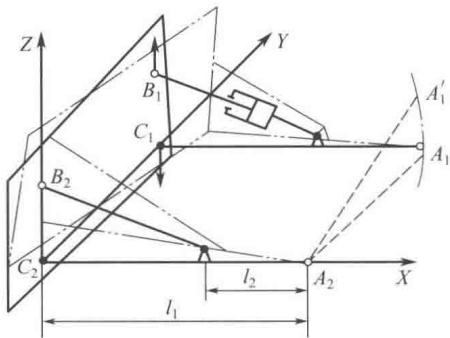


图 1.9 铲刀升降机构



○ 球面副 ● 转动副

图 1.10 铲刀垂直倾斜机构

1.2.1.7 铲刀垂直倾斜机构

固定式铲刀通过铲刀倾斜油缸的伸缩，实现推土板的垂直倾斜。假设推土板固定不动，由于倾斜油缸动作，右顶推架绕 Y 轴转动，见图 1.10，它与履带台车架的铰点 A₁ 作圆弧运动。A₁ 转至 A'₁，铲刀横向轴线 A₁A₂ 相对倾斜至 A'₁A₂。由于 A₁A₂ 位置是固定的，不可

能倾斜，因此只能反过来使推土板垂直倾斜。在推土铲实现倾斜角时，每端的两根撑杆所在的新位置已经离开了它原来所在的平面，理论上讲只有撑杆之间两端各以球铰与推土铲和拱形钢架相连接时才有可能实现撑杆的空间运动。但实际结构是撑杆与拱形钢架的连接采用平面运动的铰销。之所以允许用平面铰代替空间铰的原因，是由于调整的倾斜角很小（ $0^{\circ}\sim 9^{\circ}$ ）、撑杆较长，因此撑杆的空间角位移量很小，铰销的配合间隙一般比较大，足以补偿撑杆空间角位移的需要。

1.2.1.8 结构尺寸确定

根据主机的结构尺寸、铲刀最大提升高度、最大切削深度和铲刀的倾斜角等参数，在确保机构不发生干涉、结构稳定的条件下，通过作图或计算等方法进行机构运动分析，确定合理尺寸参数。

1.2.2 推土机受力分析

(1) 铲刀自重 G_g

液压推土机靠油缸力使铲刀强制入土，所以铲刀不必太笨重，铲刀自重 G_g 在强度及刚度允许的情况下，可适当减轻。可以用经验公式确定铲刀自重：

$$G_g = (0.18 \sim 0.21) G_S \text{ (N)}$$
 (1.8)

式中 G_S ——推土机的使用重量。

(2) 土壤的切削性能

土壤的自然坡度角 ϕ_0 见表 1.3。

表 1.3 土壤的自然坡度角 ϕ_0 (°)

种类 状态	碎石	砾石	砂石			黏土		轻亚黏土	种植土
			粗砂	中砂	细砂	肥土	贫土		
干	35	40	30	38	35	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

几种土壤的黏聚力 C 和重度 γ_{g0} 见表 1.4。

表 1.4 几种土壤的黏聚力 C 和重度 γ_{g0}

塑性土壤的种类	黏土		亚黏土		亚砂土	
	C/MPa	$\gamma_{g0}/(\text{kN}/\text{m}^3)$	C/MPa	$\gamma_{g0}/(\text{kN}/\text{m}^3)$	C/MPa	$\gamma_{g0}/(\text{kN}/\text{m}^3)$
硬性	0.10	21.5	0.06	21.5	0.02	20.5
半硬	0.06	21.0	0.04	21.0	0.015	20.0
低塑	0.04	20.5	0.025	21.0	0.01	19.5
塑性	0.02	19.5	0.015	19.0	0.005	19.0
高塑	0.01	19	0.01	18.5	0.002	18.5
流动	0.005	18	0.005	18.0	0.00	18.0

各种土壤的切削比阻力 K_b 及刀刃入土比阻力 K_y 见表 1.5。

表 1.5 各种土壤的切削比阻力 K_b 及刀刃入土比阻力 K_y MPa

土级别	土的名称	K_b	K_y
I	砂、砂质土、中等湿度的松散黏土、种植土	0.01~0.03	0.25
II	黏质土、中细砂砾、松散软黏土	0.03~0.06	0.6
III	密实黏土质、中等黏土、松散黏土、软泥炭	0.06~0.13	1.0
IV	含碎石或卵石的黏土、重湿黏土、中等坚实煤炭或少量杂质的石砾堆积物	0.13~0.25	1.4
V	中等页岩、重干黏土、坚实而硬的黄土、软石膏	0.25~0.32	

土对钢和土对土的摩擦系数 μ_1 、 μ_2 见表 1.6。

表 1.6 土对钢和土对土的摩擦系数 μ_1 、 μ_2

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

土壤内摩擦角 $\phi = \arctan \mu_2$ ，土与钢的摩擦角 $\phi_1 = \arctan \mu_1$ 。

(3) 推土机作业阻力计算

取推土机在水平地段切土结束即将提铲的瞬间作为切削阻力的计算工况。对于固定式直铲，其上作用有下列力，见图 1.11：

- ① 水平切削阻力 P_Q ；
- ② 铲刀前积土的推移阻力 P_t ；
- ③ 刀刃与土壤的摩擦阻力 P_{m1} ；
- ④ 土屑沿铲刀上升时的摩擦阻力的水平分力 P_m ；
- ⑤ 作用在刀刃上的垂直反力 P_{y1} 。

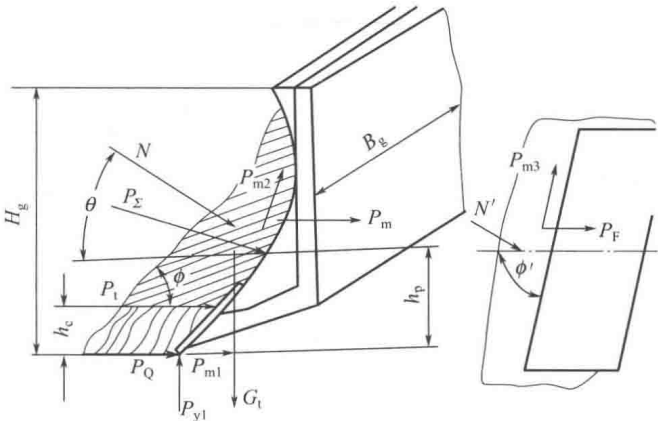


图 1.11 推土时铲刀所受的作用力

在图 1.11 中， N 为由铲刀前积土引起的正压力， B_g 为推土铲宽度。 P_Σ 表示由各个力合成后的切削总阻力。切削总阻力 P_Σ 的作用点高度，在切削坚实土壤时， $h_p \approx 0.17H$ ；切削松散土壤时， $h_p \approx 0.27H$ 。

对于回转式斜铲，在具有倾斜角时，切削阻力较直铲小。可按直铲计算。作用在直铲上的水平方向的各个力可用下列方法计算。