

# 履带推土机关键部件设计与仿真分析

黄一津 黄志凯 王志华 甘玉凤

(江西理工大学机电工程学院, 江西赣州 341000)

**摘要:** 推土机工作条件恶劣, 所工作的环境复杂多变, 而推土机工作装置是工作时的主要受力部件, 对推土机工作装置的仿真分析是推土机工作装置的设计所必需的。本论文以履带式推土机关键部件为对象, 对其结构进行仿真分析与应力应变分析。为验证履带式推土机在既定工况下工作时, 关键部件能符合工作要求, 本文利用了三轴软件对垂直撑杆以及部分工作装置进行了相应的建模以及应力分析, 并在既定参数计算设计的基础上进行仿真分析, 分析了什么情况下会失效, 为工作装置的改进提供了可行的理论依据, 对比结果与材料的应力应变判断其可靠性与安全性。最后根据分析结果并结合实际情况显示, 垂直撑杆及部分工作装置的形变和最大应力均在可接受的范围内, 避免了工作中可能出现的不安全现象。

**关键词:** 推土机; 垂直撑杆; 推土铲; 结构设计; 有限元分析

## 一、前言

随着我国一带一路战略构想的实施, 各类工程机械在矿产、国防建设, 以及农业、交通等基础设施行业中的应用日益广泛。推土机作为一种多功能的工程机械, 主要用于推移积土、填土、开渠、清理场地等各种作业和建设之中。推土机在各种修建中被大量使用, 是工程建设中最基础、使用较广的机种之一, 它不但可以铲掘而且还可以运送物料。推土机所具有的操作灵活、工作可靠等特点, 使得它在工程施工中扮演着不可或缺的角色。此外, 履带式推土机行走装置接地面积大, 在松软地面作业时不易下陷, 能更好地保持稳定。且履带式装置牵引力大, 在推动重物或爬坡时力量更强, 工作能力更出色。

道路工程中常用的大功率履带式推土机主要由推土铲等结构组成。其主要用于工况比较恶劣的环境中, 随着使用时间的延长, 不同部件会出现各种各样的故障。在实际工作中, 常常因为过大的载荷冲击, 导致影响推土机工作。因此, 我们对其工作装置进行仿真分析。虚拟仿真系统作为近年来新兴的技术对其有至关重要的作用, 它能模拟各种真实作业场景, 让学员在安全的虚拟空间中熟悉推土机操作流程和技巧, 快速提升操作技能。在施工应用上, 通过虚拟仿真系统提前规划施工方案, 有效提高施工效率, 减少施工中的错误和返工, 同时也能对施工成本进行更准确的预估和控制。

## 二、推土机作业阻力设计计算

在推土机执行作业时, 所面临的阻力主要由几个关键部分构成。首先是切向阻力, 以  $P_q$  表示, 这一阻力源自铲斗刀片与土壤接触时产生的切削效应。其次是推土阻力, 以  $P_t$  表示, 它由铲斗前方累积的土壤在推动过程中产生。再者是刀片与土壤间的摩擦阻力, 以  $P_{m1}$  表示, 这涉及到铲斗刀片切削土壤时的摩擦作用。此外, 当土壤碎屑沿铲斗向上移动时, 会产生水平方向的摩擦分力,

以  $P_{m2}$  表示。这些阻力的合成构成了推土机在作业中所承受的主要工作阻力。由《工程机械手册》得出土壤的切削比阻力及刃刃如图比阻力、土与土间的摩擦系数、土壤粘聚力、重度和土壤自然倾角, 见表 1, 表 2, 表 3 及表 4。

表 1 各种土壤的切削比阻力  $k_b$  及刃刃入土比阻力  $k_y$  (MPa)

土级别	土的名称	$k_b$	$k_y$
I	砂、砂质土、中等湿度的松撒黏土、种植土	0.01—0.03	0.25
II	枯质土、中纲砂砾、松散软黏土	0.03—0.06	0.6
III	密实枯土质、中等黏土、松撒黏土、软泥炭	0.06—0.10	1.0
IV	合碎石成卵石的枯土、霉湿枯土、中等坚实煤炭、合少量杂质的石砾堆积物	0.10—0.25	1.4
V	中等页岩、得于枯土、坚实而硬的黄土, 软石膏	0.25—0.32	

(1) 切线切削阻力  $P_q$

$$P_q = 10^6 B h_p k_b \quad \text{—— (1)} \quad \text{式中: } B \text{—推土板的宽度 (3.726m)}$$

$k_b$ —切削比阻力, 查表 1 取  $k_b = 0.04$  (MPa) (II 级)  $h_p$ —推土产平均切削深度 (m)

$$h_p = \left( \frac{h_m}{\sin \xi} - \frac{B}{2} \right) \sin \xi \quad \text{—— (2)}$$

推土机的平均切削计算图如图 1 所示。

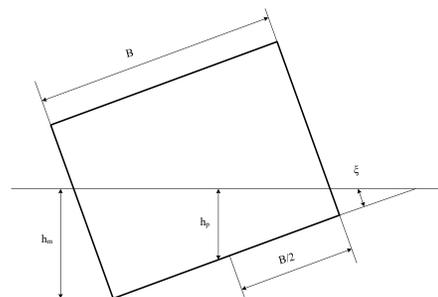


图 1 推土铲平均切屑计算

(2) 铲刀前积土的推移阻力  $P_t$

$$P_t = G_t \cdot \mu_2 \quad (3)$$

式中： $\mu_2$ —土与土之间的摩擦系数，查表 2 取 0.5

$G_t$ —推土铲前积土重量

$$G_t = \gamma \frac{B(H-h_p)^2}{2 \tan \phi_0} \quad (4)$$

式中： $\gamma$ —土的重度 ( $N/m^3$ )，查表 3 得  $\gamma_{g0} = 21 \times 10^3 N/m^3$  (亚黏土、半硬)  $B$ —推土铲的宽度 (3.726m)  
 $H$ —推土铲的高度 (1.355m)  $h_p$ —推土铲平均切屑深度 (0.216m)

$\phi_0$ —土壤的自然坡度角，查表 4 得取  $40^\circ$

表 2 土对钢和土对土的摩擦系数  $\mu_1$ 、 $\mu_2$

土壤名称	$\mu_1$	$\mu_2$
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

表 3 几种土壤的粘聚力 C 和重度  $\gamma_{g0}$

塑性土壤的种类	黏土		亚黏土		亚砂土	
	C/MPa	$\gamma_{g0} / (KN/m^3)$	C/MPa	$\gamma_{g0} / (KN/m^3)$	C/MPa	$\gamma_{g0} / (KN/m^3)$
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

表 4 土壤的自然坡度角

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

(3) 刀刃与土壤摩擦阻力

$$P_{m1} = 10^6 K_y \cdot X \cdot \mu_1 \quad (5)$$

式中： $K_y$ 为推土铲切削刃磨损后刀刃压入土的比阻力，查表 1 得 0.6MPa； $B$ 为推土铲宽度 (取 3.726m)， $X$ 为切削刃磨损后的接地长度 (取 0.008m)， $\mu_1$ 为土壤与钢铁的摩擦系数，查表 2 取 1.0。

(4) 土屑沿铲刀上升时的摩擦阻力的水平分力

$$P_{m2} = G_t \mu_1 \cos^2 \delta \quad (6)$$

式中： $G_t$ 为推土铲前积土重量 (60488N)， $\mu_1$ 为土壤与钢铁的摩擦系数 (1.0)， $\delta$ 为推土铲的切削角 ( $55^\circ$ )。

当铲斗撞到难以克服的障碍物时，推土机仍然全速推动，轨道完全滑动。在这一点上，必须考虑到强大的冲击力和惯性。经

验公式如下：

$$P_X = K_d \cdot P_T \quad (7)$$

式中， $K_d$ 为动载系数，取 1.5。

### 三、仿真分析

为了进一步对设计计算进行验证，对推土机工作装置关键部件进行仿真分析。

(一) 垂直撑杆有限元分析

#### 1. 三维模型

对推土机工作装置中的垂直撑杆进行仿真分析，其外形尺寸和三维模型图分别如表 5 和图 2 所示：

表 5 垂直撑杆外形尺寸

长度 (mm)	三段圆柱直径 (mm)	球头直径 (mm)	右侧圆孔 (mm)
1476	72/90/72	60	36



图 2 垂直撑杆三维模型图

#### 2. 网格的划分及约束条件

垂直撑杆材料选用 Q345，在进行网格生成时，为确保模型的加载性能，提供足够的离散化精度，同时保持计算效率，本文选用四面体网格，网格如图 3 所示，格点数为 52,445。采用此类网格，可以确保在后续的仿真分析中，模型能够准确地响应施加的载荷，从而获得可靠的结果。据分析对 A 点添加固定支撑然后进行添加载荷，施加约束及载荷如下图 4。



图 3 垂直撑杆网格图



图 4 垂直撑杆约束及载荷图

#### (3) 结果分析

由图 5 和图 6 可得其应力分布云图及形变分布云图。应力分布主要集中在球头处，最大应力点在球头杆，为 190MPa，低于屈服强度，安全系数为 1.81。顶推架的最大形变测量值为 0.35mm，数值较小，符合设计规范。由此可见，在标准工作环境下，顶推架展现出良好的受力性能，且形变控制在可接受范围内。

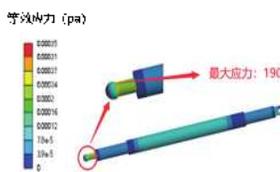


图 5 垂直撑杆应力分布云图



图 6 垂直撑杆形变分布云图

(二) 推土铲装置有限元分析

1. 三维模型及网格划分

推土铲是由主刀片、侧刀片、上加筋板、加筋版、耳板、顶推架和销轴等装配而成，主要承受推土机工作时的压力，在实际工作中必须保证其正常状态，不能因施加较大的压力而变形和超过其屈服强度而导致不能继续工作，三维模型图如图7所示。推土铲材料同为Q345，选定尺寸为30mm的四面体网格，格点数为165,323，网格图如图8所示。

表8 推土铲外形尺寸

主刀片长度 (mm)	主刀片宽度 (mm)	侧刀片长度 (mm)	侧刀片宽度 (mm)	顶推架长度 (mm)
3726	1355	1109	645	3090



图7 推土铲三维建模图



图8 推土铲工作装置网格图

(2) 约束及载荷设置

根据前述分析结果对图9中的推土铲在A、B、C、D、E、F、G点添加固定支撑及载荷，施加约束及载荷如下图10。

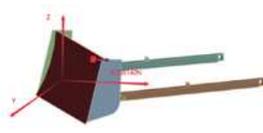


图9 推土铲工作装置图

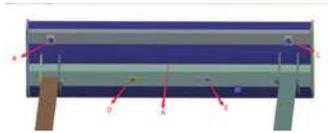


图10 推土铲工作装置约束及载荷图

(3) 推土铲有限元分析结果

由图11和图12可得，应力分布主要集中在主刀片，最大应力点是在主刀片下端，值为0.079MPa，远低于屈服强度。通过分析，可以确认该部件发生的变形属于弹性类型，并且是符合规定的。其最大变形量仅 $9e^{-6}$ mm，在可接受的范围内。由此可以得出，在标准操作条件下，推土铲所承受的力量条件是适宜的，并且其形变程度也保持在较低水平。

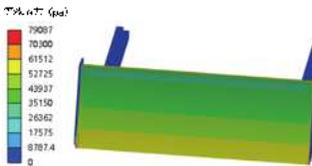


图11 推土铲应力分布云图

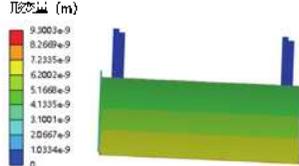


图12 推土铲形变分布云图

四、结语

推土机作为工程机械中最为常见的机种之一，在我国经济发

展中起着至关重要的作用。其关键部件如推土铲等成为了影响推土机工作效率的决定性因素。因此，本文在对推土机作业阻力的设计与分析基础上，继续运用现代计算机技术，通过虚拟仿真系统设计出主要部件并得出其在正常工作条件下的受力情况，得出结论如下：履带式推土机正常工作时受到的阻力施加在所设计的工作装置后，均不会产生损坏，能够正常工作。然而，本文所建立的有限元分析与虚拟仿真模型是简化后的模型，与实际情况仍然存在一定的差异。若能进行实验验证，则对推土机关键部件的设计与改进有较大意义。

参考文献：

[1] 张潇卓, 杨继红. 智能无人驾驶自主施工推土机[J]. 中国安全生产, 2020, 15(02): 62-63.

[2] 孔彦军, 郑恩华, 季小燕. 推土机智能化控制技术的现状与发展趋势[J]. 机械制造, 2020, 58(03): 36-38.

[3] 芦仕辉. 我国工程机械制造企业数字化转型对其内部控制质量影响研究[D]. 江西师范大学, 2023.

[4] 张春梅. 工程机械经济效益的影响因素分析[J]. 商业观察, 2021(06): 35-37.

[5] 胡爱斌. 履带式推土机电传动系统选型及改进分析[J]. 工程机械与维修, 2020(4): 56-58.

[6] 陈威, 鲁冬林, 于建坤, 等. 基于思维导图的推土机工作装置液压系统故障诊断与排除[J]. 机械管理开发, 2022, 37(11): 120-122.

[7] 管建华, 秦凯, 张光耀. 履带式推土机底盘部件常见故障原因分析[J]. 工程机械与维修, 2019(1): 66-68.

[8] 符升平, 李胜波, 罗宁. 某推土机作业时动力传动效率动态匹配[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(9): 1890-1898.

[9] 王领, 陈四景, 纪旭超, 等. 推土机液压系统故障案例分析及维修方法的应用[J]. 建设机械技术与管理, 2023, 36(05): 111-113.

[10] 李德明, 宫涛, 王彩凤, 等. 基于虚拟仿真技术的推土机台车架结构优化设计[J]. 焊接, 2022(10): 47-53.

项目号：江西省教育厅项目《大型H型钢快速冷却最佳化性能研究》(GJJ210813)；江西省自然科学基金资助项目《车载质子交换膜燃料电池动态热质传输机理及流道优化研究》(20242BAB20217)。

通讯作者：甘玉凤