

贺雨田,吕彭民,刘春朝,等.基于数值法和经验法的砂土推运工作阻力修正[J].长安大学学报:自然科学版,2020,40(6):118-126.
HE Yu-tian,LYE Peng-min,LIU Chun-chao,et al.Modification on working resistance of sand bulldozing based on numerical and empirical method[J].Journal of Chang'an University:Natural Science Edition,2020,40(6):118-126.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.06.012

基于数值法和经验法的砂土推运工作阻力修正

贺雨田¹,吕彭民²,刘春朝³,郭龙龙¹,吴文²

(1. 西安石油大学 机械工程学院,陕西 西安 710065; 2. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064; 3. 山推工程机械股份有限公司,山东 济宁 272073)

摘要:通过对平面铲刀前堆积土壤的形态进行几何近似,并简化铲刀前堆积土壤与地面剪切强度的理论计算方法,建立了不考虑黏附力的工作阻力计算理论模型。以干性砂土为推运介质,以平面铲刀为作业工具,采用自行设计的试验装置开展土壤推运试验,平面铲刀在 5 种作业倾角和 4 种作业深度下,共完成土壤推运试验 20 组。采用建立的理论模型计算每组试验的工作阻力视为理论值,将试验推运稳定阶段的平均工作阻力视为实测值,并对每组试验工作阻力的理论值与实测值进行了对比分析。为了获得更为可靠的理论预测结果,采用数值法和经验法对理论值进行了修正计算,给出了数值修正系数和经验修正系数的确定方法,2 个修正系数均为作业倾角 α 和作业深度 d 的函数。研究表明:当作业深度小于 90 mm 时,理论值与实测值存在一定误差,但理论值大于实测值,理论预测结果相对保守;当作业深度为 120 mm 时,理论值与实测值的误差不大,且理论值在实测值上下波动;当作业深度为 150 mm 时,且作业倾角小于 80° ,理论值与实测值的误差比较显著,此时,理论值小于实测值,理论预测结果不可靠;数值修正结果更接近实测值,但修正结果需要以实测数据为基础;经验修正结果更为保守,但计算方法相对简单。在工程实践中,可以根据实际需要采用不同修正方法对平面铲刀推运砂土的工作阻力进行计算。

关键词:机械工程;工作阻力;平面铲刀;土壤推运;砂土;修正

中图分类号:U415.512

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2020)06-0118-09

Modification on working resistance of sand bulldozing based on numerical and empirical method

HE Yu-tian¹, LYE Peng-min², LIU Chun-chao³, GUO Long-long¹, WU Wen²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Road Construction & Equipment of MOE, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. Shantui Construction Machinery Co., Ltd., Jining 272073, Shandong, China)

Abstract: Based on geometric approximation of the heaped soil profile in front of the flat blade and calculation model simplification of shear strength between the heaped soil and ground, the theory calculation model of working resistance without influence of adhesive force was established.

收稿日期:2020-07-19

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JM-295,2020JQ-786);

道路施工技术与装备教育部重点实验室(长安大学)开放基金资助项目(300102258502,300102250501)

作者简介:贺雨田(1979-),男,陕西榆林人,讲师,工学博士,E-mail:rainfield@xsyu.edu.cn.

Twenty groups of soil bulldozing experiment for flat blades under 5 rake angles and 4 operating depths were completed in self-designed test equipment filled with sand soil. The working resistances of the bulldozing experiments calculated by the theory calculation model which were regard as theoretical values, and the average working resistances during bulldozing stabilization stage of each experiment which were regard as measured values. The comparisons between the theoretical values and the measured values were carried out. In order to obtain more reliable the theoretical prediction results, the theoretical values were modified by numerical method and empirical method. The calculation methods of numerical correction coefficient and empirical correction coefficient were given, and two correction coefficients are function of the rake angle α and the operating depth d . The results show that there is a certain errors between the theoretical values and the measured values when the operating depths less than 90 mm, but the theoretical values are greater than the measured values, therefore, the theoretical prediction results are relatively conservative. The errors between the theoretical values and the measured values are small at different rake angle when the operating depth is 120 mm, and the theoretical values fluctuated around the measured values. There are significant errors between theoretical values and measured values when working condition under the operating depth is 150 mm and rake angle less than 80 degree, at this time, the theoretical values are less than the measured values, and the theoretical prediction results are unreliable. The numerical modification results are closer to measured value, but the numerical modification values should be calculated by the measured values. However, the empirical modification results are more conservative and the calculation method is relatively simple. Therefore, it is able to use different modified model to calculate working resistance according to practical requirements during engineering design. 1 tab, 10 figs, 25 refs.

Key words: mechanical engineering; working resistance; flat blade; soil bulldozing; sand; modification

0 引言

在道路施工、土方挖掘、资源开采、河道清淤以及农耕作业等工程中,机械与土壤的相互作用必不可少^[1-5]。其中,各类机械针对土壤的推运作业较为常见,而推土机是开展推运作业的典型机械之一^[6]。推土机在整机设计过程中,通常以机械自身结构的性能匹配为设计目标,往往会忽略实际作业介质的影响^[7-8]。或是仅考虑作业难度较大土壤的影响,以保证在不同土壤条件下作业的适应性。这样的设计会导致推土机经常在高耗能、低效率的实际状态下工作,造成不必要的资源浪费。因此,针对给定的土壤条件和铲刀结构,能够采用理论模型较为准确预测推运过程的工作阻力对推土机设计具有重要的现实意义。

在实际推运过程中,铲刀对土壤作业的工作阻力受到诸多因素影响,其中土壤物理特性是先决条件。但由于土壤组成各异,再加上含水量或压实度

等存在差异时,会导致土壤物理特性复杂多变,这给铲刀对土壤的推运试验研究和工作阻力计算带来一定困难。为了简化作业介质的影响,采用无黏性砂土或颗粒物进行理论和试验研究是有效可行的方法。Obermayr等建立了只考虑宏观特性而忽略微观特性影响的非黏性颗粒离散单元模型,在试验时采用碎石和钢球为推运介质进行了验证^[9]。Shmulevich等采用4种不同结构的铲刀,以砂土为介质开展了试验研究并采用离散单元法进行了模拟分析^[10]。Agui等以一定级配的工业用砂和粉砂混合物模拟月球土壤为作业介质,开展了推运挖掘试验研究^[11]。采用无黏性砂土或颗粒物为推运介质,可以较好地控制介质的作业条件,使不同试验的可对比性增强,而且此类推运介质流动性较好,工作阻力的变化相对稳定。

当土壤条件确定后,铲刀结构、作业倾角、作业深度和作业速度等是影响铲刀工作阻力的外在因素^[12]。针对铲刀结构对土壤推运作业的影响,美国

国家航空航天局(NASA)的研究具有一定代表性,其研制的火星推土车就是以铲刀和土壤相互作用的最佳匹配设计为目的^[13-14]。Johnson等使用设计的半智能土壤挖掘装置,对工作阻力进行试验测试,并对有齿铲刀和平滑铲刀的作业特点进行了比较^[15]。但为了简化推运作业过程的理论分析和试验研究,诸多研究人员以平面铲刀为工具,提出了计算工作阻力的不同理论模型^[16-17]。King等采用了8种理论模型对平面铲刀在3种类月球砂中作业的工作阻力进行计算,并将计算结果与试验结果进行了对比分析,给出了适合该作业介质的理论计算模型^[18]。由此可以看出,计算工作阻力的不同理论模型都具有一定的适用范围。因此,尽可能使工作阻力的理论预测结果与实际推运作业的测试结果相吻合,以更好为推土机整机设计提供指导。

本文在对土壤推运工作阻力理论计算模型简化的基础上,建立了不考虑黏附力的工作阻力理论计算模型;以砂土为推运介质,以平面铲刀为作业工具,在不同作业倾角和不同作业深度下开展土壤推运试验,并对土壤推运工作阻力的试验测试结果与理论计算结果进行对比;围绕土壤推运工作阻力理论计算方法,对理论值采用数值法和经验法进行修正,得到与实测值更为接近或相对保守的理论预测结果。

1 理论模型

1.1 推运模型

在土壤推运过程中,随着铲刀位移的增加,铲刀前土壤不断堆积,当到达一定位移时,土壤堆积几何形态基本稳定。工作阻力的变化也呈现同样的规律,即先不断增加,后逐渐趋于稳定。因此,可以将土壤推运过程分为工作阻力不断增加和趋于稳定2个阶段,而土壤推运工作阻力计算模型主要是针对工作稳定阶段建立的^[19]。Mckyes等建立的模型考虑容重、黏聚力、垂向均载和黏附力4个因素的影响,该模型得到了广泛的应用^[20],其方程为

$$P = (\gamma g d^2 N_\gamma + c d N_c + q d N_q + C_a d N_{ca}) \omega \quad (1)$$

式中: P 为工作阻力; γ 为土壤容重; g 为重力加速度; d 为作业深度; c 为黏聚力; q 为土表负荷垂向压力; C_a 为黏附力; ω 为铲刀宽度; $N_\gamma, N_c, N_q, N_{ca}$ 均为量纲一化参数。

4个量纲一化参数由侧翼影响区域半径、铲刀深度 d 、铲刀宽度 ω 和5个相关角度所确定,计算方

程如下

$$N_\gamma = \frac{r}{2d} \left[1 + \frac{2r}{3\omega} \sin(\eta) \right] \left[\cot(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta + \varphi) \right]^{-1} \quad (2)$$

$$N_c = \left[1 + \cot(\beta) \cos(\beta + \varphi) \right] \left[1 + \frac{r}{\omega} \sin(\eta) \right] \cdot \left[\cot(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta + \varphi) \right]^{-1} \quad (3)$$

$$N_q = \frac{r}{d} \left[1 + \frac{r}{\omega} \sin(\eta) \right] \left[\cot(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta + \varphi) \right]^{-1} \quad (4)$$

$$N_{ca} = \left[1 - \cot(\alpha) \cos(\beta + \varphi) \right] \left[\cot(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta + \varphi) \right]^{-1} \quad (5)$$

式中: r 为侧翼失效半径,且 $r = d(\cot(\alpha) + \cot(\beta))$; α 为作业倾角; β 为土壤失效剪切角; η 为侧翼影响区域角; δ 为土壤与铲刀外摩擦角; φ 为土壤内摩擦角。

McKyes模型假设铲刀前端存在楔形失效区域,该区域由1个中心楔形块和2个侧翼失效区域组成,且失效区域存在边界,中心楔形块的失效边界为平面,两翼失效区域为尖点向下的扇形锥体结构,该扇形锥体的底面由半径 r 和夹角 η 确定。扇形锥体最外侧的失效边界假设为直线,如图1所示。

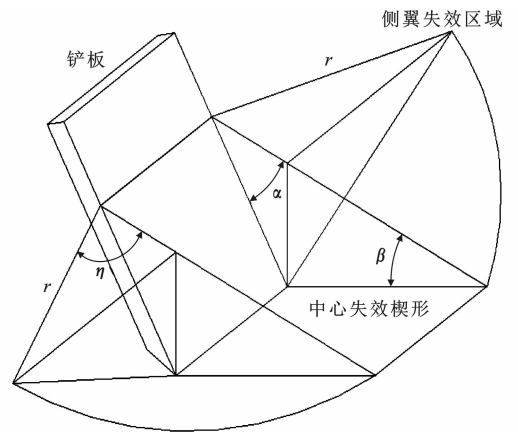


图1 McKyes模型

Fig.1 McKyes model

1.2 几何近似

基于McKyes模型,图2给出了平面铲刀在土壤推运过程中工作稳定阶段的一个瞬时装置。图2中, B 为铲刀沿作业方向投影的高度, l 为作业位移, v 为作业速度, h 为铲刀触土高度。

从图2可以看出,在铲刀作用下,前端的一部分土壤处于流动状态,流动土壤与前端静态土壤存在一个分界面,该分界面就是土壤的失效面,失效面与铲刀之间的土壤流动区域称为失效区域。当铲刀位

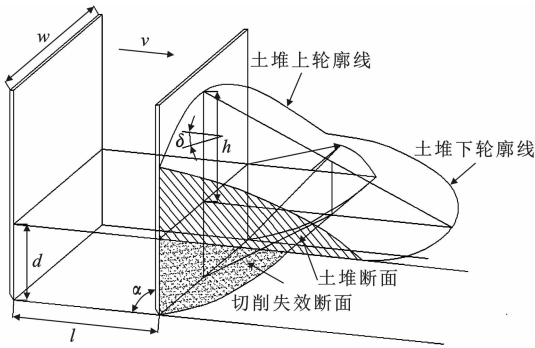


图 2 土壤切削失效区域

Fig. 2 Failure zone of soil cutting

移不断增加时,失效区域不断前移,铲刀前端土壤堆积质量不断增加,宏观上,土壤堆积外形始终在不断变化,但土壤外形的轮廓线基本是一定的,且上轮廓线和前轮廓线均近似呈抛物线。土堆上轮廓线顶点、下轮廓线顶点和铲刀与土壤水平面交线的中点确定了 1 个平面,该平面所在的土堆断面由 2 条直线和 1 条土壤轮廓曲线围成,是沿作业方向断面中面积最大的中心平面。

为了后续计算的进一步简化,将曲线近似为直线,此时,土堆断面也近似成为 1 个直角三角形。失效断面与土堆断面相似,也是 1 个由 2 条直线和 1 条曲线围成的三角区域,将失效断面的曲线也近似为直线。通过曲线简化,可以对土堆几何形态和失效区域进行几何近似,根据铲刀前土堆形态的几何特征可以简化为由 1 个三棱柱和 2 个对称的三棱锥构成的组合体,三棱柱内的土壤为中心堆积区域,其截面为实际土堆最大中心面所确定的断面,断面高度为铲刀触土高度 h ,断面长度 b 为土堆最大前移距离。三棱锥为两侧的土壤失效区域,将土堆断面视为三棱锥的底面积,参数 e 由铲刀边缘与地面交点到土堆两侧垂向最外沿的长度确定。得到的几何近似简化模型如图 3 所示。经试验验证,几何近似简化模型的土壤堆积体积计算结果与理论计算结果相对偏差约为 5%,因此,该近似方法在工程实际中是可行的。

1.3 砂土推运模型

在沙漠和戈壁地区开展基础建设施工,需要对砂土进行大量的推运作业。当以砂土为作业介质时,式(1)中黏附力 C_a 的影响可以忽略^[10],则工作阻力计算方程简化为

$$P_s = (\gamma g d^2 N_\gamma + cd N_c + qd N_q) w \quad (6)$$

式中: P_s 为忽略黏附力影响的工作阻力。

根据工作阻力的计算方程,可得水平阻力理论

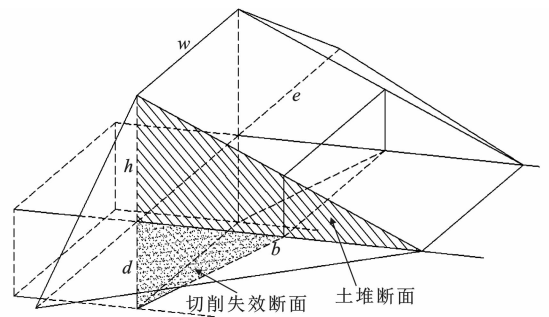


图 3 土壤失效区域几何近似

Fig. 3 Geometric approximation of soli failure zone

值 H 的计算如下

$$H = P_s \sin(\alpha + \delta) + F_m \quad (7)$$

式中: F_m 为铲刀前堆积土壤与地面的剪切阻力。

工作阻力的理论值采用该公式进行计算。这里需要指出,由于垂直力的测量比较复杂,且垂直力在作业倾角较小时为负值,作业倾角较大时为正值,故而在存在一个垂直力为 0° 的作业倾角,通常认为在 67.5° 左右^[21]。而且根据经验,垂直力对工作阻力的影响远小于水平力^[22]。因此,本文所进行的工作阻力试验以水平工作阻力为对象,并通过理论计算和试验对比,对工作阻力变化规律进行研究。

计算模型简化后,有 3 个参数 η 、 q 、 F_m 需要确定。 η 的确定方法 Swick-Perumpral 给出了一个经验公式,通过理论分析 η 对工作阻力影响发现, η 对工作阻力的影响并不大^[23]。因此,结合试验观察,对 η 取了固定值 45° 。

对 q 、 F_m 进行计算时,将图 3 中三维几何形态的最大断面表述在二维平面中,如图 4 所示,其中 OA 为 h , OB 为 b , OD 为 r' 。 q 为失效区域上方所受到的土壤均布压力,在三维空间里该受压区域的面积为铲刀宽度 w 和土堆失效距离 r' 的乘积,求出四边形 $OAFD$ 面积,该面积乘以铲刀宽度 w 便可得到该处土壤的体积,通过测定土壤的密度,就可以计算出 q ,即

$$q = \rho g \left(1 - \frac{r'}{2b}\right) h \quad (8)$$

式中: ρ 为土壤密度。

F_m 根据库伦剪切强度定律进行估算,将三角形 OAB 断面形成的三棱柱区域的土壤重量计算出来,根据下式可以计算推动该区域土壤所需的剪切阻力

$$F_m = \tau_m b w \quad (9)$$

$$\tau_m = c + \rho g \frac{h}{2} \tan(\varphi) \quad (10)$$

式中: τ_m 为抗剪强度。

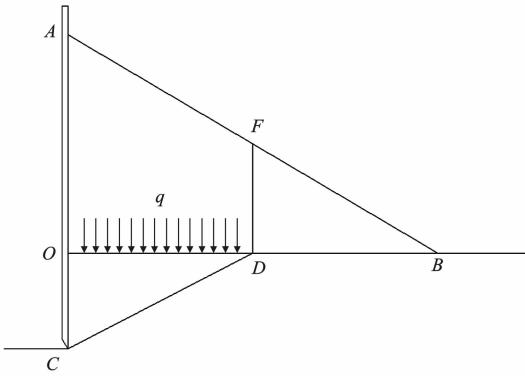


图4 土壤失效区域断面均布压力示意

Fig. 4 Uniform pressure on section of soil failure zone

2 试验过程

2.1 砂土物理特性

推运试验在道路施工技术与装备教育部重点实验室的土槽实验室进行,作业介质为砂土,含水量忽略不计,属于无黏性砂土,其平均密度为 1.52 g/cm^3 。对砂土进行了筛分试验,得到砂土的粒径分布,绘制其级配曲线,如图5所示。

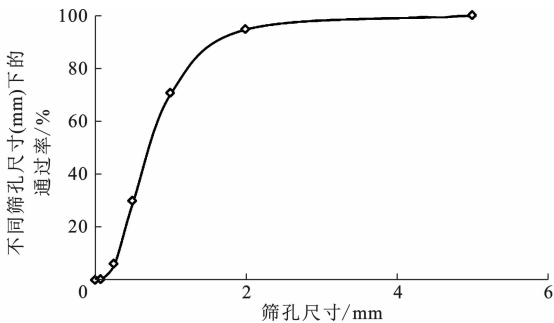


图5 砂土级配曲线

Fig. 5 Grading curve of sand soil

为计算工作阻力,还需要确定式(2)~式(5)中的相关参数,根据试验砂土的物理特性,其土壤失效剪切角 β 为 25° ,土壤内摩擦角 φ 为 30° ,土壤与铲刀的摩擦角 δ 为 15° ,不同作业深度下侧翼影响区域角 η 取 45° ,黏聚力 c 约为 1700 Pa 。

2.2 试验装置

推运试验在自行设计的试验装置上开展,试验装置主要由刚性框架、铲刀车架、牵引装置、拉力传感器和数据采集系统五大部分组成。刚性框架固定在砂土上,铲刀车架的车辆采用V形槽结构嵌入在上下导轨上,防止车轮在运动中脱落;为了较为准确测试水平阻力,在试验装置设计时,采用了水平牵引的方式施加推运作用力,牵引装置为电葫芦;拉力传感器连接在电葫芦钢丝绳和铲刀车架的拉环之间,

数据采集采用 Dewesoft 的应力应变仪记录处理,其总体结构如图6所示。

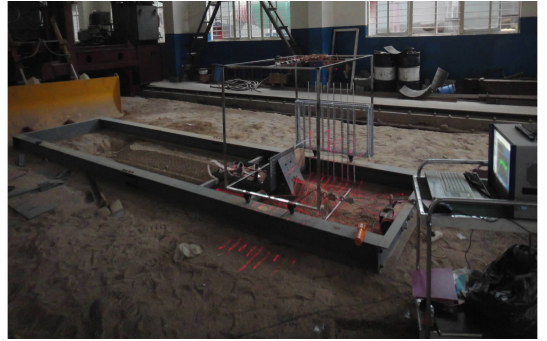


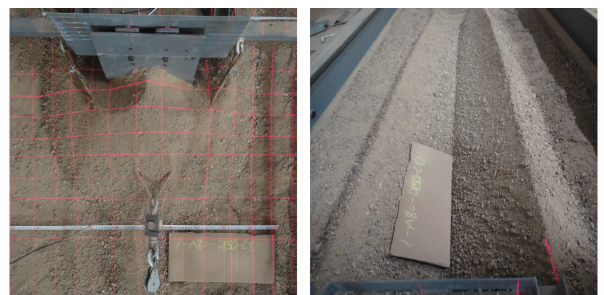
图6 试验装置

Fig. 6 Testing apparatus

2.3 推运作业过程

选择5种作业倾角(90° 、 80° 、 70° 、 60° 和 50°),分别在4种作业深度(60、90、120、150 mm)下开展土壤推运试验,所有试验的作业速度均为 0.12 m/s ,推运试验的有效位移4 m左右。在进行推运试验前,对砂土进行平整压实,并测试土壤密度,在试验完成后,回填砂土,然后平整压实,再次测试推运试验前的砂土密度,保证推运试验时的砂土密度与平均密度相近。

图7为其中1组试验完成后,铲刀前后砂土的变化情况。由于推运过程中砂土的不断堆积,砂土在铲刀前形成了相对稳定的几何形态,见图7(a);砂土完成推运试验后,铲刀后端形成沟槽形态如图7(b)所示。通过数据采集系统对拉力传感器数据实时采集,记录推运工作阻力的变化曲线,并根据工作稳定阶段的变化曲线确定工作阻力的实测值。



(a) 土壤堆积形态

(b) 砂土沟槽形态

图7 推运试验完成后砂土的几何形态

Fig. 7 Geometry situations of sand soil after bulldozing test

3 试验结果

图8给出了不同作业倾角下工作阻力的实测值和理论值随作业深度变化的对比曲线。从图8可以

看出:当作业倾角为 90° 时,不同作业深度下工作阻力的理论值均大于实测值;当作业倾角为 80° 、 70° 、 60° 和 50° 时,在作业深度为 60、90 mm 条件下,理论

值均大于实测值;在作业深度为 120 mm 的条件下,理论值接近实测值或在实测值上下波动,在作业深度为 150 mm 条件下,理论值均小于实测值。

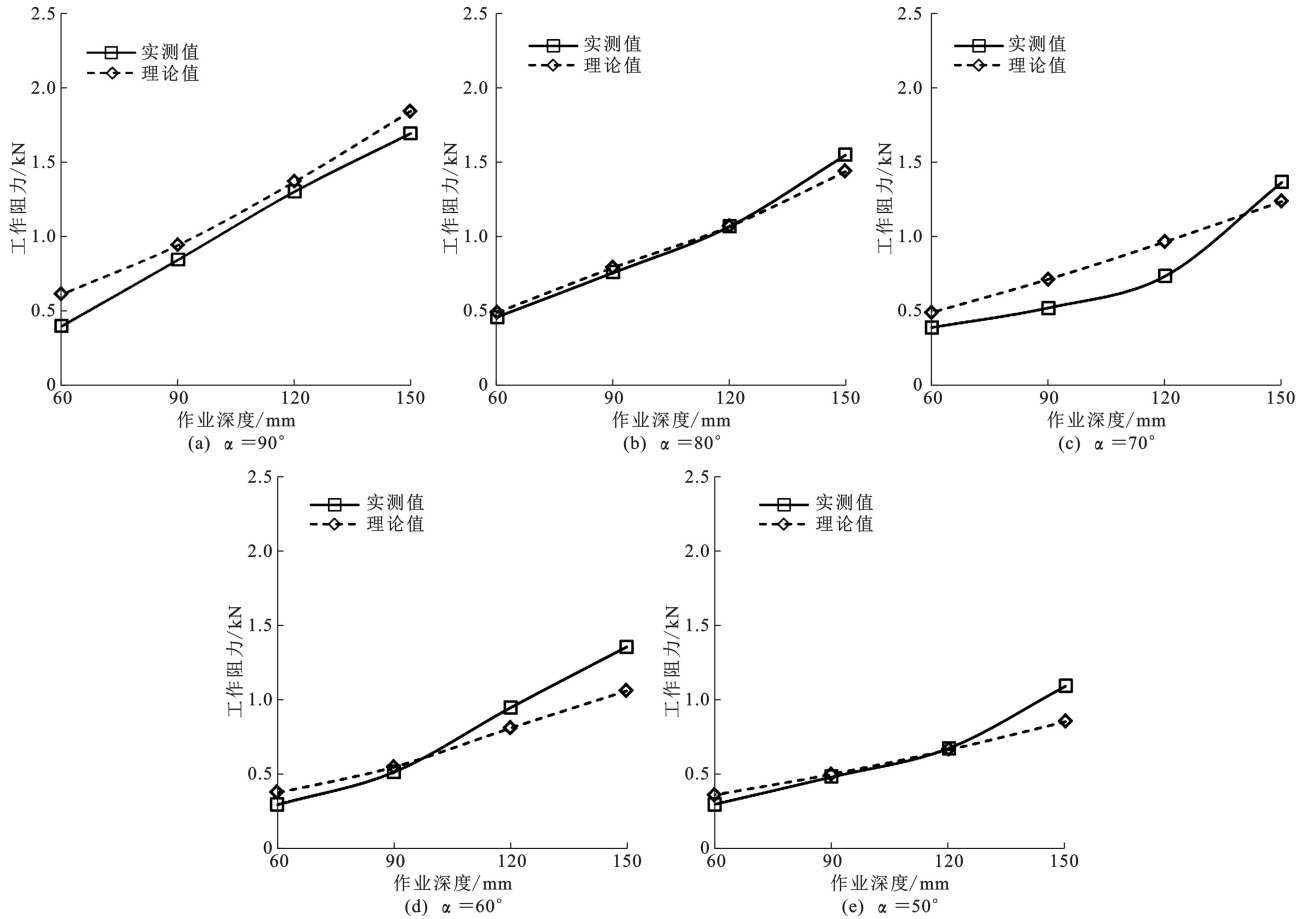


图 8 不同作业倾角下工作阻力实测值与理论值随作业深度的变化曲线

Fig. 8 Changes curves of cutting resistance of measured values and theoretical values with cutting depths under different rake angles

从图 8 可以看出,在作业深度较小时,理论值大于实测值,当作业深度较大时,理论值小于实测值。在 80° 、 70° 、 60° 和 50° 这 4 种作业倾角下,2 种计算结果的曲线变化具有相似性,且在作业深度 90~150 mm 区间范围内,工作阻力的理论值与实测值的变化曲线存在一个相等的值。

在所有 20 组理论值和实测值结果中,有 14 组结果的理论值大于实测值,其余 6 组结果理论值小于实测值。特别是作业深度为 150 mm 时,在作业倾角为 80° 、 70° 、 60° 和 50° 的条件下,理论值比实测值相对误差分别减小了 7.2%、9.4%、21.7% 和 21.8%。在这种作业条件下,对土壤推运机械设计而言,理论值相对于实测值的相对误差不能忽略。此外,从误差变化规律来看,在作业深度较大时,其误差随作业倾角的减小呈增加的趋势。因此,通过对理论值进行修正,可以使工作阻力作

为设计参数指导设计时更可靠。

因此,为了进一步将理论值与实测值的误差与后续修正结果与实测值的误差进行比较,这里对理论值相对于实测值的误差进行统计分析,选择平均绝对误差(V_{MAE})、平均相对误差(V_{MRE})和均方根误差(V_{RMSE})对结果进行评估,计算如下

$$V_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |H - H_m| \quad (11)$$

$$V_{MRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(H - H_m)100}{H_m} \right| \quad (12)$$

$$V_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H - H_m)^2}{n}} \quad (13)$$

式中: n 为试验组数; H_m 为试验实测值。

经计算,水平阻力理论值相对于实测值的平均绝对误差为 124.8,平均相对误差为 21.3%,均方根误差为 154.4。

4 修正计算

4.1 数值修正计算对比

为了获得更准确的计算结果,对理论值进行数值修正,设工作阻力数值修正值为 H_n ,修正系数为 k_1 ,则数值修正计算如下

$$H_n = k_1 H \quad (14)$$

由于土壤推运试验过程中存在2个变量,分别是作业倾角 α 和作业深度 d ,因此,再设修正系数 k_1 为作业倾角 α 和作业深度 d 的多项式函数,即

$$k_1 = f(\alpha, d) \quad (15)$$

这里需要对多项式函数2个变量的最高次幂进行确定。文献[24]指出工作阻力随作业倾角呈现平方变化的关系,因此,将作业倾角 α 设置为二次系数。Luth等在对砂土的推运研究中,对不同宽度铲刀随作业深度的变化规律进行了研究,将铲刀宽度分为小于254 mm的窄板和宽度为508 mm的宽板。研究表明,当铲刀宽度约为126 mm时,工作阻力随作业深度呈现平方变化关系,当铲刀宽度约为508 mm时,铲刀推土阻力随深度的变化近似呈线性关系^[25]。试验采用的铲刀宽度为300 mm,介于平方变化关系与线性关系之间,为了简化多项式函数,近似工作阻力随深度的变化为线性关系,故而将作业深度 d 设置为一次系数,则拟合系数 k_1 的多项表达式如下

$$k_1 = m_0 + m_1 \alpha + m_2 d + m_3 \alpha^2 + m_4 \alpha d \quad (16)$$

式中: m_0 、 m_1 、 m_2 、 m_3 、 m_4 均为待定系数。

以20组实测值与理论值之比为拟合数据,采用MATLAB软件中的sftool曲面拟合工具箱,对 k_1 进行多项式拟合,得到各待定系数的计算结果,见表1。

表1 待定系数计算结果

Tab. 1 Calculation results of undetermined coefficients

多项式系数	m_0	m_1	m_2	m_3	m_4
系数值	0.343 1	2.211×10^{-3}	9.029×10^{-3}	1.523×10^{-5}	-7.780×10^{-5}

因此,每种作业倾角和作业深度组合试验条件下的系数 k_1 可以通过多项式进行求解,从而根据式(15)计算出工作阻力的数值修正结果。图9给出了不同作业条件下工作阻力的数值修正结果与实测值和理论值的对比。

从图9可以看出,与理论值相比,采用数值修正后计算得到的工作阻力,其结果更为接近实测值。根据式(12)~式(14)计算数值修正结果与实测值的

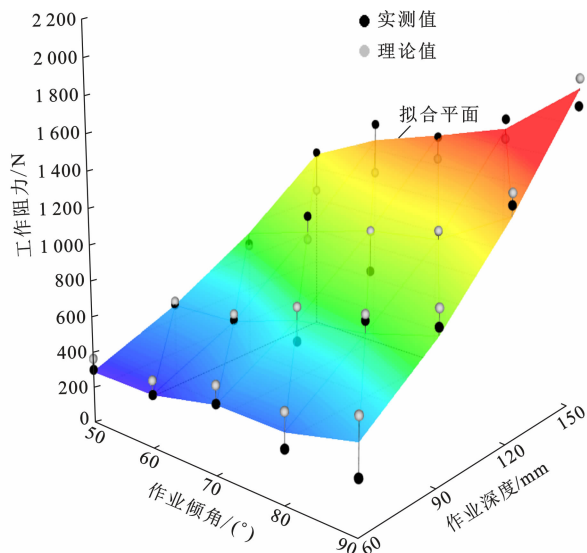


图9 工作阻力数值修正值、实测值和理论值的对比

Fig. 9 Comparisons of cutting resistances for numerical correction values with measured values and theoretical values

误差,得到数值修正结果相对于实测值的平均绝对误差为64.7,平均相对误差为10.6%,均方根误差为88.4。

将数值修正结果和理论值相对于实测值的误差进行比较后可以发现:数值修正计算结果的离散程度相对较小,平均相对误差减小了一半,且数值修正计算结果与实测值之间的偏差也优于理论值。因此,采用数值法修正的公式进行计算可以得到更为接近实测值的预测结果。这里需要指出的是,数值修正计算结果要以实测值为依据,当作业介质改变时,拟合目标值会发生变化,但拟合多项式的表达式是确定的(即式(17)),只需要确定多项式的系数即可进行数值修正计算;此外,有部分工况下计算得到数值修正结果仍小于实测值,在设计和工程应用时,需要根据不同使用要求确定相应的安全系数,从而保证设计的可靠性。

4.2 经验修正计算对比

从试验结果可知,当作业深度较大,且作业倾角为 50° 、 60° 、 70° 和 80° 时,理论值均小于实测值。而且数值修正计算结果需要确定相应的安全系数,才能保证设计的可靠性。为了进一步改善理论模型的计算结果,并方便设计和工程实际应用,采用经验法对理论值进行进一步修正,其目的是为了得到更为保守的修正计算结果。设经验修正值为 H_e ,经验修正系数 k_2 ,并设 k_2 为作业倾角 α 和作业深度 d 的函数,经计算,经验修正系数 $k_2 = 3(1 + \cos^2(\alpha))\sqrt{d}$ 。采用该系数对水平阻力的理论值进行了经验修正,

则经验修正计算为

$$H_e = 3(1 + \cos^2(\alpha))\sqrt{d}H \quad (17)$$

图10为不同作业条件下工作阻力的数值修正结果与实测值和理论值的对比。

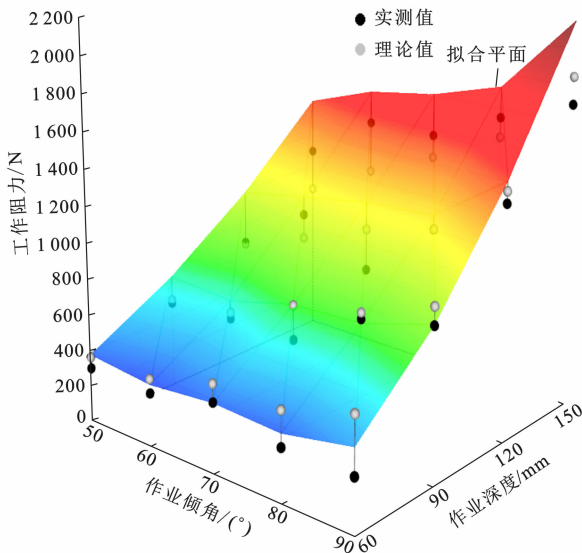


图10 工作阻力经验修正值、实测值和理论值的对比

fig. 10 Comparisons of cutting resistances for empirical correction values with measured values and theoretical values

对理论值进行经验修正后,仅有2组经验修正计算结果小于实测值,这2组数据作业条件分别是作业倾角 70° 和作业深度60 mm时,以及作业倾角 80° 和作业深度90 mm时,其相对误差分别为 -0.4% 和 -0.31% ,可以看出,这2个经验修正计算结果与实测值相差不大;其余18组经验修正计算结果均大于实测值,以作业深度为150 mm为例,当作业倾角为 90° 、 80° 、 70° 、 60° 和 50° 时,理论值与实测值的相对误差为 8.8% 、 -7.2% 、 -9.4% 、 -21.7% 和 -21.8% ;而采用经验修正方法计算后,经验修正结果相对于实测值的相对误差分别为 26.4% 、 11.1% 、 17.5% 、 13.7% 和 28.5% 。因此,相对于理论计算结果,经验修正计算的工作阻力更为保守。

根据式(12)~式(14)计算数值修正结果与实测值的误差,得到经验修正结果相对于实测值的平均绝对误差为159.3,平均相对误差为 21.6% ,均方根误差为200.5。与理论值相对于实测值的误差相比较,虽然平均绝对误差和均方根误差有所增大,但平均相对误差基本一致。从对比分析结果来看,平均绝对误差和均方根误差增大表明离散度和偏差有所增加,但18组数据的相对误差均为正值,这表明经验修正计算结果更为可靠。以经验修正计算结果为

依据进行结构设计,可以使设计更安全,因此经验修正计算结果更具有实际指导意义。

5 结 语

(1)通过对平面铲刀前堆积土壤的形态进行几何近似,并简化铲刀前堆积土壤与地面剪切阻力的理论计算方法,建立了不考虑黏附力的工作阻力理论计算模型。

(2)采用理论计算模型对20组试验的工作阻力进行计算,并与实测值比较,当作业深度较小时,理论值大于实测值,当作业深度较大时,理论值小于实测值。

(3)给出了数值修正系数和经验修正系数的确定方法,2个修正系数均为作业倾角 α 和作业深度 d 的函数,其中数值修正系数是作业倾角 α 为二次幂和作业深度 d 为一次幂的二元多项式,经验修正系数为 $\cos^2(\alpha)$ 和 \sqrt{d} 的函数。

(4)对2种修正结果与理论值的误差进行了统计学分析,数值修正计算较为复杂,但修正结果更接近实测值,经验修正计算相对简单,但计算结果更为保守。在工程设计中,可以根据实际需要采用不同的修正方法进行计算。

参考文献:

References:

- [1] KIM Y B, HA J Y, KANG H, et al. Dynamically optimal trajectories for earthmoving excavators[J]. Automation in Construction, 2013, 35: 568-578.
- [2] 贺雨田,吕彭民.相近刃缘条件下不同铲板结构的切削阻力研究[J].中南大学学报:自然科学版,2016,47(12):4056-4061.
HE Yu-tian, LU Peng-min. Study on cutting resistance of different blade structures in condition of similar blade-edge[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2016, 47(12): 4056-4061.
- [3] ZHU Y O, ZHOU Q, LIU B L, et al. Finite element analysis on interaction between lunar regolith and cutter[J]. Procedia Engineering, 2014, 73: 194-203.
- [4] MIEDEMA S A. The cutting of water saturated sand at large cutting angles[C]//ASCE. Proceedings of Specialty Conference on Dredging and Dredged Material Disposal. Reston: ASCE, 2002: 1-16.
- [5] 郭志军,杜干,李忠利,等.触土曲面形式对推土板减阻性能影响的正交试验[J].农业机械学报,2015,46(7):372-378.
GUO Zhi-jun, DU Gan, LI Zhong-li, et al. Orthogonal

- experiment on resistance reduction by soil-engaging surfaces of bulldozer blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7):372-378.
- [6] SKONIECZNY K, WETTERGREEN D S, WHITTAKER W. Advantages of continuous excavation in lightweight planetary robotic operations[J]. The International Journal of Robotics Research, 2016, 35(9):1121-1139.
- [7] 邹渊,陈晓玲,李东阁,等. 串联式混合动力推土机驱动系参数匹配设计[J]. 机械工程学报, 2014, 50(1):70-75.
- ZOU Yuan, CHEN Xiao-ling, LI Dong-ge, et al. Parameter matching design and control optimization for series hybrid tracked bulldozer[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(1):70-75.
- [8] MUELLER R, WILKINSON R A, GALLO C A, et al. Lightweight bulldozer attachment for construction and excavation on the lunar surface[C]//AIAA. Proceedings of AIAA Space Conference & Exposition, Pasadena; AIAA, 2009; 1-16.
- [9] OBERMAYR M, DRESSLER K, VRETTOS C, et al. Prediction of draft forces in cohesionless soil with the discrete element method[J]. Journal of Terramechanics, 2011, 48(5):347-358.
- [10] SHMULEVICH I, ASAF Z, RUBINSTEIN D. Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 97(1):37-50.
- [11] AGUI J H, WILKINSON R A. Granular flow and dynamics of lunar simulants in excavating implements [C]//SONG G B, MALLA R B. Proceedings of Earth and Space 2010; Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments, Reston; ASCE, 2010; 84-94.
- [12] ZHANG L, CAI Z, WANG L, et al. Coupled Eulerian-Lagrangian finite element method for simulating soil-tool interaction [J]. Biosystems Engineering, 2018, 175:96-105.
- [13] WILKINSON A, DEGENNARO A. Digging and pushing lunar regolith: Classical soil mechanics and the forces needed for excavation and traction[J]. Journal of Terramechanics, 2007, 44:133-152.
- [14] SANDERS G B, LARSON W E. Integration of in-situ resource utilization into lunar/mars exploration through field analogs [J]. Advances in Space Research, 2011(47):20-29.
- [15] JOHNSON K, CREAGER C, IZADNEGAHDAR A, et al. Development of field excavator with embedded force measurement [C]//ZACNY K, MALLA R B, BINIENDA W. Proceedings of Earth and Space 2012; Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments. Reston; ASCE, 2012; 365-374.
- [16] JAYASURIYA H P W, SALOKHE V M. A review of soil-tine models for a range of soil conditions[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 79(1):1-13.
- [17] ZHANG L B, CAI Z X, LIU H F. A novel approach for simulation of soil-tool interaction based on an arbitrary Lagrangian-Eulerian description [J]. Soil & Tillage Research, 2018, 178:41-49.
- [18] KING R H, VAN SUSANTE P, GEFREH M A. Analytical models and laboratory measurements of the soil-tool interaction force to push a narrow tool through JSC-1A lunar simulant and Ottawa sand at different cutting depths[J]. Journal of Terramechanics, 2011, 48:85-95.
- [19] ANI O A, UZOEJINWA B B, EZEAMA A O, et al. Overview of soil-machine interaction studies in soil bins[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 175:13-27.
- [20] MCKYES E, ALI O S. The cutting of soil by narrow blades[J]. Journal of Terramechanics, 1977, 14(2):43-58.
- [21] GODWIN R J. A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 97(2):331-340.
- [22] GODWIN R J, O'DOGHERTY M J. Integrated soil tillage force prediction models [J]. Journal of Terramechanics, 2007, 44(1):3-14.
- [23] ASHRAFIZADEH S R, KUSHWAHA R L. Soil failure model in front of a tillage tool action—A review [C]//CSAE. Proceedings of SCGR 2003 Meeting, Montreal; CSAE, 2003:1-28.
- [24] ONO I, NAKASHIMA H, SHIMIZU H, et al. Investigation of elemental shape for 3D DEM modeling of interaction between soil and a narrow cutting tool [J]. Journal of Terramechanics, 2013, 50:265-276.
- [25] LUTH H J, WISMER R D. Performance of plane soil cutting blades in sand [J]. Transactions of the ASAE, 1971, 14:255-259, 262.