

土壤耕作部件宏观触土曲面减阻性能研究现状分析*

郭志军¹ 杜干^{1,2} 周志立¹ 张鹏³ 李亦轩³

(1. 河南科技大学车辆与动力工程学院, 洛阳 471003; 2. 海军工程大学后勤指挥与工程系, 天津 300450;

3. 郑州交通职业学院车辆工程系, 郑州 450062)

【摘要】 对土壤耕作部件宏观触土曲面进行优化设计可有效减小工作阻力,设计的耕作部件具有结构简单、成本低、无额外能耗等特点。构成耕作部件宏观触土曲面的元线、准线及元线相对于准线的运动方式均会对工作阻力产生重要影响。从准线曲率的角度对各种土壤耕作部件触土曲面进行分类。阐述了耕作部件宏观触土曲面主要几何参数:宽度、切削角、耕作深度、宽深比和纵深比等工作阻力的影响。特别分析了不同准线形式触土曲面,包括直线、圆弧、简单曲线及变曲率复杂曲线等触土曲面对工作阻力及土壤扰动的影响。

关键词: 土壤耕作部件 触土曲面 准线 曲率 工作阻力

中图分类号: S22 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)06-0047-06

Actuality Analysis of Resistance-reducing Properties on Soil Cultivating Components with Different Macroscopic Soil-engaging Surfaces

Guo Zhijun¹ Du Gan^{1,2} Zhou Zhili¹ Zhang Peng³ Li Yixuan³

(1. College of Vehicle and Motive Power Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

2. Department of Logistics Command and Engineering, Navy University of Engineering, Tianjin 300450, China

3. Department of Vehicle Engineering, Zhengzhou Jiaotong Polytechnic College, Zhengzhou 450062, China)

Abstract

The working resistance of soil cultivating component can be reduced efficiently by way of optimizing its macroscopic soil-engaging surface. The cultivating component designed by this method possesses the features of simple structure, low cost and energy-saving. The forms of generatrix and directrix, and the way of generatrix slides along the directrix would seriously affect the working resistance of soil cultivating component. The macroscopic soil-engaging surfaces of soil cultivating components were classified mainly by viewpoint of the curvature profile of the directrix. How the geometric parameters of the macroscopic soil-engaging surface of soil cultivating component affect the working resistance was introduced, including the width, cutting angle, cultivating depth, ratio of width and depth, ratio of length and depth, etc. The soil-engaging surfaces with different kinds of directrices, including straight line, normal circular curve, simple curve and complex curvature-changing curve, were especially analyzed to uncover their affection to working resistance and soil disturbance.

Key words Soil cultivating component, Soil-engaging surface, Directrix, Curvature, Working resistance

引言

农业土壤耕作与工程施工作业共同的特点是通

过特定的触土部件与土壤发生机械作用,并使其接触的土壤产生破碎、切削、翻转或移动等效果^[1-5]。此处,统称各类触土部件为土壤耕作部件。

农业土壤耕作部件主要包括铧式犁犁体、旋耕机刀片、圆盘犁圆盘、深松铲等,工程施工中的土壤耕作部件主要有推土机推土铲、挖掘机铲斗、装载机铲斗、松土器等。长期以来,改进土壤耕作部件结构,减小工作阻力,提高工作效率和降低能源消耗一直受到人们关注。

已提出减小土壤耕作部件工作阻力的方法主要有触土曲面材料改性法、柔性结构法、流体注射润滑法、加热法、振动法、电渗法、磁化法、仿生非光滑法等^[1-11]。这些方法在一定程度上可以减小工作阻力。但是由于存在耐磨性差、加工工艺复杂、辅助件过多、额外能量损失等问题,使得这些方法在推广过程中遇到困难。合理优化耕作部件宏观触土曲面形状能有效减小工作阻力,由此形成的耕作部件具有结构简单、工作可靠、维修成本低、不额外消耗能量的特点。因此,学者一直在探索如何优化宏观触土曲面形状,建立合理的触土曲面数学模型来减小工作阻力。

土壤耕作部件宏观触土曲面由元线沿准线按一定规律运动而形成^[4]。元线、准线以及元线相对于准线的运动方式直接决定所形成曲面的耕作力学特性。从数学意义上讲,元线是形成曲面的基础,元线主要有水平直元线、倾斜直元线及曲元线等几种形式。工程铲运部件的触土曲面主要由水平直元线构成^[5]。圆盘犁圆盘、旋耕机刀片等较多由圆弧或螺旋线等组成^[1]。比较复杂的是铧式犁的触土曲面,曾经使用过的元线有水平直元线、倾斜直元线、圆弧、抛物线及螺旋线等。传统耕作部件触土曲面设计过程中主要考虑了几个要素:尽可能采用简单曲线,如常用水平或倾斜直元线;尽量使耕作过程中土壤的滑移面与压应力呈接近的角度,可使与触土曲面接触的土壤易于断裂,从而降低切削功或工作阻力;本着利于土堡翻转、不易缠草等目的,可对元线进行专门设计^[1-5]。

元线沿准线的运动规律可分为平行移动和夹角变化运动两种。工程施工中的耕作部件触土曲面元线沿准线的运动规律以平行移动为主。某些农业耕作部件(铧式犁犁体、旋耕机刀片等)耕作过程中,耕作部件切削刃初始切入土壤、土壤沿触土曲面的滑动过程以及土壤离开触土曲面上部时的土堡翻转与松碎的受力特点各不相同。这种耕作部件的触土曲面元线沿准线的运动规律经常会出现夹角变化的情况。通过元线夹角变化而形成触土曲面的方法主要是指充分考虑耕作过程中土壤沿触土曲面不同部位的运动与受力状态的差异,形成特定数学模型来完成触土曲面的设计工作。这种触土曲面设计计算

虽较复杂,但能更好地满足特殊耕作过程中与触土曲面接触的土壤或土堡在不同阶段的运动受力特点,从而获得较小的工作阻力,并满足耕后土壤状态要求^[1-5]。

触土曲面准线也可分别由直线或曲线(曲导线)构成。准线直接决定触土曲面法线的方向,影响土壤的滑移面,从而对土壤松碎状况和土壤耕作部件的工作阻力产生重要影响。实际土壤耕作部件触土曲面设计中,元线一般以直线为主,然而,准线的变化形式却非常丰富,对耕作阻力及耕后土壤状态的影响也更大^[12]。以下重点分析由不同准线形成的触土曲面的研究与设计要点。曲率可以深层次地反映曲线的变化特征,因此根据准线曲率变化趋势线的不同,将土壤耕作部件宏观触土曲面分成3类:准线曲率具有恒定值;准线曲率变化趋势线为具有单调性或仅有一个极大或极小值点的简单曲线;准线曲率变化趋势线为具有多个极值点的复杂曲线。

1 恒定曲率曲线

准线曲率具有恒定值时,又可分为曲率为零和非零常数两种情况。

1.1 准线曲率为零

准线曲率为零时,准线为直线形式。此时直元线沿直线准线平行移动形成的土壤耕作部件触土曲面为平面楔。曲元线沿直线准线平行移动形成的触土曲面为曲面楔。此类触土曲面广泛使用在土壤耕作部件切削刃的设计中,主要起到切土或松土作用。传统研究认为,无论是何种触土曲面,不论作直线运动还是旋转运动,都是以二面楔为基本元件^[1-5]。

如图1所示,二面楔触土曲面的几何参数主要有宽度、切削角和耕作深度,有时也会用到综合参数——宽深比、纵深比等。使用目的不同触土曲面宽度也不同,较宽的触土曲面主要用于土壤移动,而窄触土曲面主要用于土壤破碎切削等。文献[13]利用有限元分析发现,工作阻力随着铲刀宽度增加呈非线性增加趋势,例如宽度600 mm推土板其工作阻力约为宽度300 mm推土板工作阻力的120%。文献[14]对宽度为150、75 mm的平板耕作部件工作阻力进行试验,宽度加倍后工作阻力平均增加35%。文献[15]则得到了平板触土曲面的工作阻

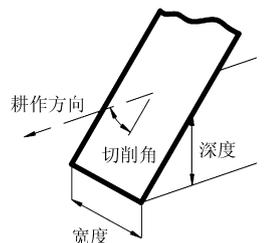


图1 二面楔触土曲面
Fig.1 Wedged soil-engaging surface

力与宽度的关系曲线,该曲线也表明随平板宽度增加,工作阻力先是呈线性增加,然后增加的速度减缓。

川村登等通过理论计算和试验研究发现切削角较小时工作阻力也较小,但是若切削角过低,工作阻力则增加^[1]。文献[14]通过试验研究了粘性土壤条件下耕作部件触土曲面几何参数对工作阻力的影响。试验中,选取切削角参数为30°、60°和90°。结果证明,当切削角设计成30°时,工作阻力较小。文献[16]则通过仿真方法预测了凿形犁不同切削角对工作阻力的影响。结果认为,当切削角从15°增加至45°时,工作阻力呈下降趋势,而切削角从45°增加至75°时,工作阻力又表现出增加趋势。文献[15]得到了切削角在22.5°~112.5°范围内,工作阻力与切削角之间的关系曲线。该曲线表明工作阻力随着切削角的增加而增加,但50°以下近似线性增加的趋势不明显,而50°以上工作阻力则随切削角的增加而快速增加。文献[17]研究了不同切削角推土板-干土壤接触的力动力学行为,也证明工作阻力随切削角的增加而增加。该文还指出,较小切削角对土壤产生“撕裂”破坏,较大切削角对土壤主要以剪切破坏为主。由于土壤的抗拉强度比抗剪强度小得多,所以造成了小切削角比大切削角工作阻力要小。另外,较小切削角以产生切削作用为主,土壤扰动及扰动功均较小,工作阻力也较小。

耕作深度也是影响工作阻力的重要因素之一。文献[14]对100、150和200 mm耕作深度下耕作部件进行试验研究,发现工作阻力随耕作深度增加而呈非线性增加,深度增加一倍,工作阻力增加75%。文献[18]对5种不同深度下耕作部件所受的工作阻力进行试验研究,经过回归分析后发现,工作阻力与耕作深度的关系可用指数函数表达,即 $D = ae^{bd}$,其中 a 和 b 为指数函数系数, D 为工作阻力, d 为耕作深度。Salokhe^[19]得出工作阻力与耕作深度间呈 $R_f = kAD^3$ 的非线性关系。由于耕深的增加,土壤密度增加,同时耕作时扰动的土壤量增加,从而导致工作阻力的迅速增加。但由于土壤种类及其机械特性千变万化,使得不同耕作过程中,工作阻力与耕深的变化关系不尽相同。

对土壤扰动的研究较多,早期有代表性的是文献[15],分析了耕作部件触土曲面宽度、切削角、深度对土壤扰动的影响。触土曲面耕深小于临界深度时仅形成新月形破坏区,如图2所示。若深度继续增加,大于临界深度,则土壤出现新月形破坏区和侧向破坏区。土壤扰动宽度主要由触土曲面宽度、切削角、土壤内摩擦角、土壤-触土面摩擦角等因素决

定。临界深度则随耕深增加而增加。文献[18]还设置了几个参数来衡量土壤扰动程度,并给出评价土壤扰动程度的参数。现代数值模拟技术则可得更为精确的土壤扰动模型^[12-13,16-17,20-21],从而深入分析触土曲面-土壤接触行为,直接观察接触力场、应力场、位移场、速度场等的细观变化,分析土壤扰动及其与工作阻力、触土曲面各参数之间的联系。现代数值模拟技术辅以一定的试验验证,可得到许多有价值的结论。

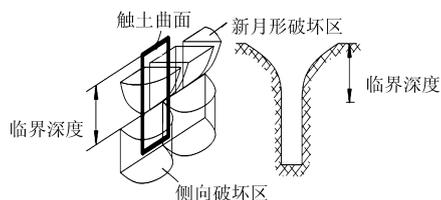


图2 土壤扰动示意图

Fig. 2 Diagram of disturbed soil

1.2 准线曲率为非零常数

当准线曲率为非零常数时,准线是圆弧。直元线沿圆弧准线平行移动形成的曲面为圆弧曲面。工程施工中的土壤耕作部件,如推土机推土铲、挖掘机铲斗、装载机铲斗等,较多采用圆弧或圆弧-直线组合式触土曲面。图3所示为两种形式的圆弧型触土曲面。圆弧型触土曲面主要控制参数有圆弧半径 R 、包角 θ 、直线段长度 A 与圆弧段长度之比等。

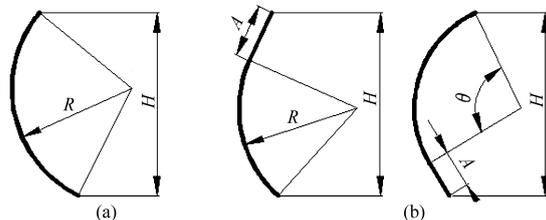


图3 圆弧型触土曲面准线示意图

Fig. 3 Diagram of soil-engaging surfaces with curved directrix

(a) 单一圆弧触土曲面 (b) 圆弧-直线组合式触土曲面

不同半径的圆弧触土曲面工作阻力也不同。文献[2]对4种推土板进行试验研究(图4)。结果表明,大半径圆弧推土板工作阻力均比小半径圆弧推土板要小,相差量达10%~13.5%。大半径圆弧推土板不易产生土壤粘附,且使前方土堡产生翻滚形式的规则运动;小半径圆弧推土板易产生土壤粘附,其前方土堡为拥翻或推拥形式的紊乱运动。文献[22~23]发现,工作阻力随圆弧触土曲面的半径减小而增大主要是由于垂直工作阻力的增加,而水平工作阻力并无多少变化。另外,耕作过程中,圆弧触土曲面法线均指向圆心,使得滑过圆弧触土面的土壤法向压力也指向圆心一点,这可能会导致土壤粘附和工作阻力的增加^[12]。在设计耕作部件时,要

求土壤在触土曲面上缘易向前翻落,此时圆弧半径宜小,若希望减小土屑上升阻力及卸土干净,则半径又宜选较大值。因此,圆弧触土曲面半径的设计还需综合考虑。

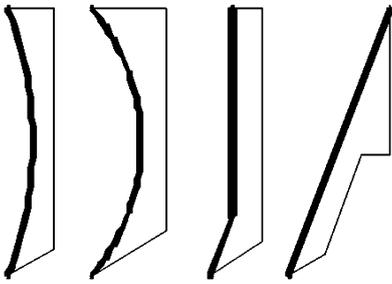


图4 不同准线形式触土曲面示意图

Fig. 4 Diagram of soil-engaging surfaces with varying directrix

文献[24]对某一型号推土机推土铲的圆弧-直线组合式触土曲面的结构参数进行改进。将其圆弧下部直线的长度由267 mm改为130 mm,半径也从450 mm变成600 mm。试验发现改进后的推土铲工作阻力减小且表面基本不粘土。分析表明圆弧触土曲面中直线段准线过短使得土堡向上运动加速度较低,同时圆弧半径过小会使上升的土堡急速前翻扣下。这些原因造成了曲面上土壤的粘附,引起土堡前翻形式紊乱,加大了工作阻力。因此,组合式圆弧触土曲面准线中直线段长度与圆弧半径之比对工作阻力的确切影响仍有待进一步研究。

2 简单变曲率曲线

准线曲率变化趋势线为简单曲线,准线本身通常也是简单曲线。此类曲线主要有抛物线、渐开线、螺旋线、摆线或部分三角函数曲线等。其中,抛物线在耕作部件触土曲面准线设计中应用最为广泛[1-5,25]。

此类触土曲面工作阻力分析时,相关因素主要有准线形式、耕作深度、耕作速度、宽深比、切削角、倾角及纵深比(图5)等。倾角指触土曲面上下刃之间连线与铅垂线之间的夹角。纵深比是指耕作部件纵向弯曲长度 L 与耕深 B 的比值。

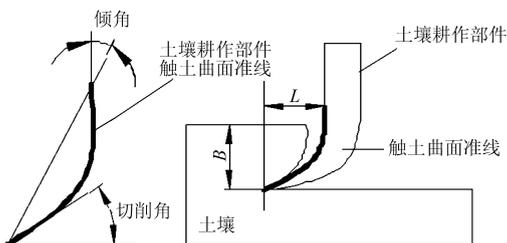


图5 倾角与纵深比示意图

Fig. 5 Diagram of tilt angle and longitudinal/depth ratio

不同形式的触土曲面因对触土面前方土壤的切

削与推移作用不一致,使得各自具有不同工作阻力。文献[12]从纵深比入手,研究了直线、抛物线、摆线、圆弧、仿生曲线等分别作为触土曲面准线时,各种不同触土曲面耕作部件工作阻力的差异。结果表明,触土曲面准线形式和纵深比这两个因素对工作阻力影响效果明显。小纵深比($0 < L/B < 1.0$)时,弯曲型耕作部件普遍比直线型耕作部件工作阻力低。抛物线式耕作部件在较宽纵深比范围内($0 < L/B < 1.5$)都有可能获得相对较低的工作阻力。摆线或最速下降曲线适宜于设计具有较大纵深比($L/B \approx 1.2$)的触土曲面。仿生触土曲面耕作效果较复杂。圆弧面耕作部件减阻性能在所研究的几种曲面中耕作力学性能相对较差。单纯出于减阻的目的将圆弧面用于耕作部件触土曲面准线设计不太合适。但圆弧面加工简易,且具有推土、持土以及使土壤前翻并混合等功能,某些土壤耕作部件(如工程施工中使用的推土机推土铲、挖掘机铲斗、装载机铲斗等)宏观触土曲面被广泛设计成圆弧面。

3 复杂变曲率曲线

准线曲率变化趋势线为具有多个极值点的复杂曲线,这类准线通常由高次多项式或由简单函数组合而成。某些仿生曲线就属于变曲率的复杂曲线,如图6所示。

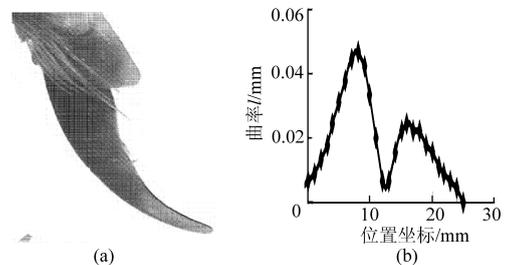


图6 田鼠爪趾曲线几何特征

Fig. 6 Geometric features of a field mouse's clawed toe

(a) 田鼠爪趾图片 (b) 内轮廓线的曲率变化趋势线

文献[12,26~27]对这种具有复杂变曲率准线的窄齿耕作部件触土曲面的耕作性能进行了研究,结果发现,具有特定纵深比的变曲率触土曲面可比其他形式触土曲面耕作部件获得相对较小的工作阻力。文献[28~30]还分别探索了用变曲率曲线替换推土机推土铲、挖掘机铲斗和装载机铲斗触土曲面的圆弧准线后,各种变曲率耕作部件的工作阻力变化情况,结果表明,经妥善设计,各种不同宽度的土壤耕作部件均获得相对较小的工作阻力。

与以往土壤耕作过程中偏重滑移线分析的静态的研究结果略有不同,这些研究在对耕作部件的减阻效果分析时,还考虑到了在运动条件下土壤扰动

状态对工作阻力及耕作部件宏观触土曲面优化设计方法的影响。在特定纵深比下变曲率触土曲面可获得相对较小的工作阻力,原因是此类触土曲面在耕作过程中能使触土曲面前方的土壤应力场产生波动作用。如图7所示($L/B = 0.83$),土壤在沿此种变曲率触土曲面高速滑动时,沿着触土曲面切向的土壤单元应力存在波动现象,这将有利于减少土壤与触土曲面之间的摩擦和粘附,从而起到减小工作阻力的作用;沿着触土曲面法向土壤单元应力的波动将有利于触土曲面前方大量被压缩的土壤松碎,从而起到减阻的作用。这种耕作过程中一定速度下的持续作用使得与触土曲面接触的前方土壤产生一种类似于“地震波”的效应,易于松碎和脱附,最终使其获得了较低的工作阻力。

图7中直线型耕作部件耕作过程中触土曲面前方土壤单元应力场的变化特征是先在耕作部件尖端部位产生一个高应力区,这个高应力区再随着耕作过程的持续而逐步扩张,直至使得触土曲面上所有土壤单元的应力达到破坏极限,而发生土壤的剪切和破碎作用(传统的滑移线分析以此为基础)。外在表现是土壤容易积聚于耕作部件尖端,不宜脱附,工作阻力较大。研究表明,耕作力学性能较差的触土曲面具有类似分析结果^[27]。这种土壤应力场变化特征显得比较“生硬”,不如变曲率耕作部件那样具有高度“智能化”。从“动态设计”的角度讲,是否能够使触土曲面前方土壤应力场产生波动变化的效

果,对于土壤耕作部件是否能够获得较优的耕作力学性能显得尤其重要。

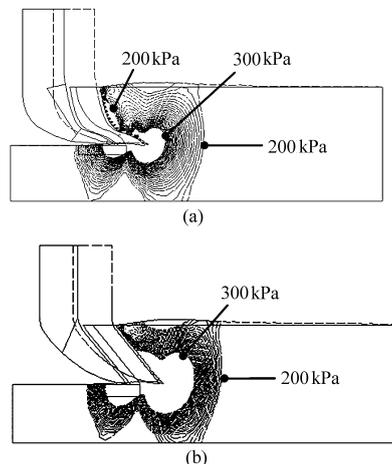


图7 仿真耕作过程土壤应力场

Fig. 7 Stressfields in simulating cultivation

(a) 复杂变曲率弯曲型耕作部件 (b) 直线型耕作部件

3 结束语

耕作部件宏观触土曲面设计中触土曲面元线、准线及其元线相对于准线的运动形式对耕作部件减阻性能具有重要影响。分析结果表明,各类触土曲面结构参数,特别是准线形式对耕作性能的影响非常明显。通过优化耕作部件宏观触土曲面的结构参数或准线形式可简单、有效、可靠地减小工作阻力,有效促进耕作过程的节能降耗工作。

参 考 文 献

- 1 吉尔 W R, 范德伯奇 G E. 耕作和牵引土壤动力学[M]. 北京:中国农业机械出版社,1983.
- 2 曾德超. 机械土壤动力学[M]. 北京:科学技术出版社,1995.
- 3 孙一源,高行方,余登苑. 农业土壤力学[M]. 北京:农业出版社,1985.
- 4 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
- 5 吴庆鸣,何小新. 工程机械设计[M]. 武汉:武汉大学出版社,2006.
- 6 Araya K, Gao R. A non-linear three-dimensional finite element analysis of subsoiler cutting with pressurized air injection[J]. J. Agric. Engng. Res., 1995, 61(2): 115 ~ 128.
- 7 Foley A G, Chisholm C J, Mclees V A. Wear of ceramic-protected agricultural subsoilers[J]. Tribology International, 1988, 21(2): 97 ~ 103.
- 8 田丽梅,任露泉,韩志武,等. 仿生非光滑表面脱附与减阻技术在工程上的应用[J]. 农业机械学报,2005,36(3): 138 ~ 142.
Tian Limei, Ren Luquan, Han Zhiwu, et al. Applications of anti-adhesion and anti-resistance of biomimetic non-smooth surface in engineering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 138 ~ 142. (in Chinese)
- 9 Shahgoli G, Fielke J, Desbiolles J, et al. Optimising oscillation frequency in oscillatory tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 106(2): 202 ~ 210.
- 10 Ren L Q, Cong Q, Tong J, et al. Reducing adhesion of soil against loading shovel using bionic electro-osmosis method[J]. Journal of Terramechanics, 2001, 38(4): 211 ~ 219.
- 11 Ren L Q, Han Z W, Li J J, et al. Effects of non-smooth characteristics on bionic bulldozer blades in resistance reduction against soil[J]. Journal of Terramechanics, 2003, 39(4) 221 ~ 230.

- 12 郭志军,周德义,周志立. 几种不同触土曲面耕作部件的力学性能仿真研究[J]. 机械工程学报,2010,46(15):71~75.
Guo Zhijun, Zhou Deyi, Zhou Zhili. Simulation research on mechanical performances of several kinds of cultivating components with different soil-engaging surfaces[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 71~75. (in Chinese)
- 13 Abo-Elnor M, Hamilton R, Boyle J T. Simulation of soil-blade interaction for sandy soil using advanced 3D finite element analysis[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 75(1): 61~73.
- 14 McKyes E, Maswara J. Effect of design parameters of flat tillage tools on loosening of a clay soil[J]. Soil and Tillage Research, 1997, 43(3): 195~204.
- 15 Godwin R J. A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 97(2): 331~340.
- 16 Tong J, Moayad B Z. Effects of rake angle of chisel plough on soil cutting factors and power requirements; a computer simulation[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 88(1~2): 55~64.
- 17 张锐,李建桥,许述财,等. 推土板切土角对于土壤动态行为影响的离散元模拟[J]. 吉林大学学报:工学版,2007,37(4):822~827.
Zhang Rui, Li Jianqiao, Xu Shucui, et al. Simulation on dynamic behavior of dry soil ahead of the bulldozing plate with different cutting angles by DEM[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007,37(4):822~827. (in Chinese)
- 18 Manuwa S I. Performance evaluation of tillage tines operating under different depths in a sandy clay loam soil[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 103(2): 399~405.
- 19 Salokhe V M, Pathak B K. Effect of aspect ratio on soil reactions on flat tines in dry sand[J]. J. Agric. Engng. Res., 1993, 56(3): 179~188.
- 20 于建群,钱立彬,于文静,等. 开沟器工作阻力的离散元法仿真分析[J]. 农业机械学报,2009,40(6):53~57.
Yu Jianqun, Qian Libin, Yu Wenjing, et al. DEM analysis of the resistances applied on furrow openers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 53~57. (in Chinese)
- 21 丁启朔,丁为民,孟为国,等. 耕作力学研究中的土壤结构表现与评价[J]. 农业机械学报,2007,38(8):62~66.
Ding Qishuo, Ding Weimin, Meng Weiguo, et al. Characteristics and quantifications of soil structure for soil tillage research[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 62~66. (in Chinese)
- 22 Gebresenbet G. Optimization of animal drawn tillage implements: part I, performance of a curved tillage implement[J]. J. Agric. Engng. Res., 1995, 62(3): 173~183.
- 23 Shmulevich I, Asaf Z, Rubinstein D. Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 97(1): 37~50.
- 24 马兰. 东方红-60T推土机推土铲曲面的改进[J]. 拖拉机与农用运输车,1987(1):52~56.
Ma Lan. Improvement of blade curve surface for Dongfanghong-60T bulldozer[J]. Tractor & Farm Transporter, 1987(1): 52~56. (in Chinese)
- 25 郭志军,周志立,佟金,等. 抛物线型剖面刀具切削性能二维有限元分析[J]. 洛阳工学院学报,2002,23(4):1~4.
Guo Zhijun, Zhou Zhili, Tong Jin, et al. A 2-D finite element analysis for cutting performance of a parabolic curved cutting surface[J]. Journal of Luoyang Institute of Technology, 2002, 23(4): 1~4. (in Chinese)
- 26 郭志军,周志立,任露泉. 仿生弯曲型切削工具切削性能的二维有限元分析[J]. 机械工程学报,2003,39(9):106~109.
Guo Zhijun, Zhou Zhili, Ren Luquan. A 2-D finite element analysis for the cutting performance of bionic curved cutting tools[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(9): 106~109. (in Chinese)
- 27 Guo Zhijun, Zhou Zhili, Zhang Yi, et al. Bionic optimization research of soil cultivating component design[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(4): 955~965.
- 28 郭志军,孙政伟,张毅,等. 推土铲切削性能的二维有限元分析[J]. 拖拉机与农用运输车,2006,33(6):30~33.
Guo Zhijun, Sun Zhengwei, Zhang Yi, et al. Two-dimensional FEA on bulldozing shovel[J]. Tractor & Farm Transporter, 2006, 33(6): 30~33. (in Chinese)
- 29 郭志军,邓志强,陈海燕. 仿生挖掘斗-土壤接触二维有限元分析[J]. 建筑机械,2007(3):74~77.
Guo Zhijun, Deng Zhiqiang, Chen Haiyan. Two-dimensional FEA of bionic excavator bucket-soil on the interacting problem [J]. Construction Machinery, 2007(3): 74~77. (in Chinese)
- 30 郭志军,陈海燕,邓志强. 装载机铲斗的仿生设计及有限元分析[J]. 河南科技大学学报:自然科学版,2007,28(5):18~20.
Guo Zhijun, Chen Haiyan, Deng Zhiqiang. Bionic design and finite element analysis of loader bucket[J]. Journal of Henan University of Science & Technology: Natural Science, 2007, 28(5): 18~20. (in Chinese)