DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.01.017

$PY_1$40 型摇臂式喷头摇臂碰撞过程数值模拟*

王祺铭　严海军　剧锦三　刘长云
(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

【摘要】 基于显式动力分析软件 ANSYS/LS-DYNA,建立了摇臂式喷头摇臂绕轴旋转、碰撞喷体的有限元分析模型,在 3 种摇臂转动角速度和喷体安装弹性橡胶垫与否的组合工况下,对摇臂与喷体的碰撞过程及动应力分布进行了计算模拟。结果表明,$PY_1$40 型摇臂式喷头在转动角速度 400(°)/s 时,计算的碰撞动应力峰值为 42.3 MPa,与试验值的误差小于 0.5%,预测的发生位置距离摇臂转轴中心 15 cm,与试验结果相同。摇臂各断面的动应力极值和碰撞接触应力均随转动角速度的增加而增大,喷体打击块安装橡胶垫后,3 种转动角速度下动应力峰值平均降低了 10.4%,但接触时间平均增加了 76.6%。

关键词: 摇臂式喷头　碰撞　有限元模拟　动应力
中图分类号: S277.9+4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2010)01-0086-06

Numerical Simulation of Swing Arm Impact Process to the $PY_1$40 Impact Sprinkler

Wang Qiming　Yan Haijun　Ju Jinsan　Liu Changyun
(*College of Water Conservancy and Civil Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract

As one of the key parts of the impact sprinkler, the swing arm is exerted by complex dynamic stress in the impact process. Based on the dynamic explicit software ANSYS/LS-DYNA, a finite-element model for simulating the rotation of swing arm around the axis and the impact between the swing arm and the sprinkler body was established. Several cases under three rotational angular velocities and with or without the rubber pad fixed on the sprinkler body's contact stop were investigated. The results indicate that under the angular velocity of 400 (°)/s, the simulated peak dynamic stress of $PY_1$40 impact sprinkler was 42.3 MPa, with an error less than 0.5% compared with the measured result. The predicted peak dynamic stress was located offset 15 cm from the centerline of the swing arm's rotation axis, which was the same as the measured data. The extreme dynamic stresses of different cross sections and contact stresses increased with the increase of the rotational angular velocity. After fixing the rubber pad, the peak dynamic stress had an average decrease of 10.4% under three angular velocities, while the contact time had an average increase of 76.6%.

Key words　Impact sprinkler, Impact, Finite element simulation, Dynamic stress

引言

摇臂是摇臂式喷头的关键部件之一,其强度将影响喷头的寿命、工作可靠性。摇臂在运动过程中撞击喷体、驱动喷头旋转,受到水流驱动力、摇臂弹簧力、自身重力及碰撞冲击力等诸多力的综合作用。

收稿日期: 2009-03-10　修回日期: 2009-06-01
* 国家自然科学基金资助项目(50509024、50979108)、长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0657)和新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-08-0542)
作者简介: 王祺铭,硕士生,主要从事流体机械及工程研究,E-mail: wang_qiming@CTGPC.com
通讯作者: 严海军,副教授,博士,主要从事节水灌溉装备技术与应用研究,E-mail: water220@cau.edu.cn

摇臂与喷体接触碰撞的瞬间会产生巨大撞击力，使摇臂产生弯曲变形，严重时摇臂会出现断裂现象[1~2]。因此，对摇臂碰撞动力学特性的研究至关重要。由于摇臂受力条件复杂，其与喷体的碰撞过程很难用准确的解析公式直接求解，迄今为止国内外相关的研究报道较少。由发表文献可知，已有研究主要以试验分析[3]、理论推导[4]为主。近期迅速发展的有限元数值模拟方法和商用软件在碰撞问题方面仿真精度较高，已得到广泛应用[5~7]。其中可求解高度非线性问题的通用显式动力分析程序 ANSYS/LS－DYNA 非常适合求解各种二维、三维非线性结构的高速、低速碰撞等非线性动力冲击问题[8~10]。因此，本文应用 ANSYS/LS－DYNA 软件，以 $PY_1$40 型摇臂式喷头为研究对象，建立摇臂与喷体碰撞的三维有限元模型，对不同摇臂转动角速度、喷体打击块是否安装橡胶垫等工况下的摇臂动应力进行数值模拟分析。

1　显式有限元动力分析原理

摇臂与喷体的碰撞是瞬态、高速动力和接触同时存在的复杂力学问题。碰撞过程的仿真一般采用显式动力算法，无需进行矩阵分解或求逆和求解联立方程组，其计算速度快、计算精度较高，也不存在收敛性问题。求解时使用中心差分方法对运动方程进行显式时间积分，接触作为一种约束被引入。对于动力问题的求解时，由上一个增量步的动力学计算结果作为下一个增量步的动力学条件，求解的动力学平衡方程为

$$\boldsymbol{M}\ddot{u} = P - I \tag{1}$$

式中　$\boldsymbol{M}$——节点质量矩阵，kg

$\ddot{u}$——节点加速度，m/s^2

P——外界施加的外力，N

I——单元内力，N

在当前增量步开始时（t 时刻），计算加速度表示为

$$\ddot{u}_{(t)} = \boldsymbol{M}^{-1}(P - I)_{(t)} \tag{2}$$

对加速度在时间上的积分采用中心法，并假定加速度为常数，这样可由计算速度的变化值加上前一个增量步中点来确定当前增量步中点的速度

$$\dot{u}_{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)} = \dot{u}_{\left(t-\frac{\Delta t}{2}\right)} + \frac{\Delta t_{(t+\Delta t)} + \Delta t_{(t)}}{2}\ddot{u}_{(t)} \tag{3}$$

对速度进行时间积分，并加上在增量步开始时的位移，可以确定增量步结束时的位移

$$u_{(t+\Delta t)} = u_{(t)} + \Delta t_{(t+\Delta t)}\dot{u}_{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)} \tag{4}$$

在增量步开始时提供了满足动力学平衡条件的加速度，在时间上“显式地”前推速度和位移。为了提高中心法的计算精度，求解过程采用很小的时间增量，而且使增量步中的加速度几乎为常数[11~13]。

2　计算模型

摇臂和被撞喷体打击块组成摇臂式喷头的碰撞体系。摇臂结构复杂，在 ANSYS 软件中直接进行三维造型困难。因此，首先在 PRO/E 软件中构造摇臂的三维造型，然后导入 ANSYS 软件；而打击块直接在 ANSYS 软件中完成三维造型。为减少计算时间，摇臂与打击块的间隙取 0.1 mm。建立有限元模型时，打击块和摇臂分别采用 Solid164 和 Solid168 实体单元。Solid164 是用于显式动力分析的三维六面体单元，Solid168 是用于显式动力分析的高次三维四面体单元。为了减缓摇臂与喷体打击块的碰撞冲击力，在打击块接触表面安装橡胶垫。本文分别对安装和不安装橡胶垫两种情况进行了模拟分析。铸铝和橡胶垫的材料属性如表 1 所示。经过计算精度与计算时间的分析比较后，摇臂和打击块都选取了总体自由划分方式，其中摇臂的网格尺寸选取 4 mm，划分网格单元共 18 226 个，单元节点共 36 147 个；打击块的网格尺寸取 1 mm，网格单元为 1 440 个，单元节点共 1 995 个。网格划分结果如图 1 所示。

表 1　铸铝和橡胶垫的材料属性

Tab.1　Material properties of cast aluminum and rubber pad

材料	密度 ρ/kg·m^{-3}	弹性模量 E/GPa	泊松比 v
铸铝	2 660	72.4	0.330
橡胶垫	1 300	0.007 84	0.499

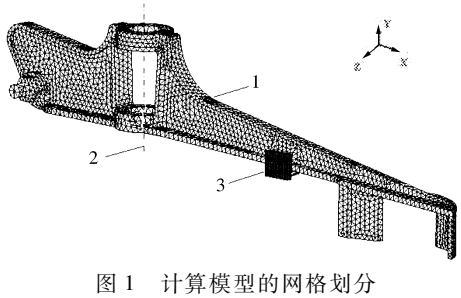


图 1　计算模型的网格划分

Fig.1　Mesh grids of the computation model

1. 摇臂　2. 转轴中心线　3. 喷体打击块

摇臂与喷体打击块的接触类型选择点面自动接触算法（ANTS）。为了使摇臂在碰撞过程中始终保持绕转轴中心旋转，需要对摇臂施加转动约束。首先分别在摇臂转轴上下端面过圆心作两条平行线段，将线段定义为显式动力分析的三维梁单元类型 Beam161，但线段中点在 X、Y、Z 3 个方向的位移自由度被限制。两线段中点的连线构成了约束虚拟轴。转动约束的施加结果如图 2 所示。

由于摇臂在运动过程中承受弹簧力、水流作用力、重力及其与喷体的碰撞冲击力等,其中摇臂与喷体的碰撞冲击力远大于其他作用力[2~4],本文模拟时只考虑碰撞冲击力。因碰撞接触时间极短,计算时间选取 0.01 s,计算结果文件和时间历程的输出步数均为 50。

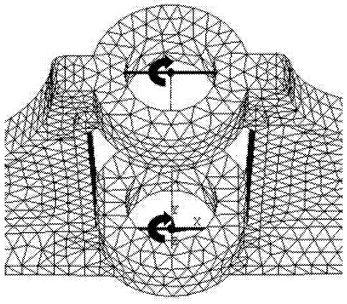


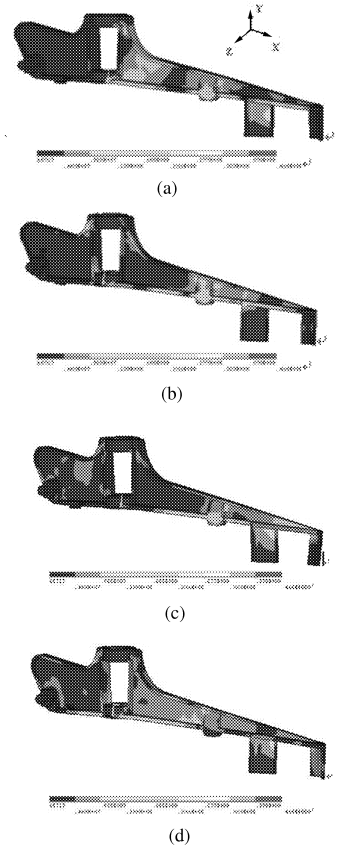
图 2 转动约束的施加

Fig. 2 Application of the rotating constraint

3 结果和分析

3.1 计算结果

由 $PY_1$40 摇臂式喷头摇臂转动时的高速摄影试验获知,当喷头进口工作压力为 0.35 ~ 0.50 MPa 时,摇臂转动角速度在(250 ~ 500)(°)/s 之间,本文分别对 300、400 和 500(°)/s 3 种角速度进行计算。



(a)

(b)

(c)

(d)

图 3 碰撞过程中摇臂的 Von mises 应力分布云图

Fig. 3 Von mises stress contours of the swing arm during impact process

(a) 碰撞接触后 1 ms (b) 碰撞接触后 2 ms

(c) 碰撞接触后 3 ms (d) 碰撞接触后 4 ms

图 3 给出了角速度 400(°)/s 时摇臂碰撞过程中不同时刻 Von mises 应力分布云图。可以看出,当摇臂和喷体接触碰撞后,碰撞点附近应力最大,而且随时间是变化的,表明应力波随着时间的推移在摇臂内来回传播直至衰减。本文亦对加密网格精度的模型进行了计算,结果非常相近。

3.2 结果分析

3.2.1 动应力峰值与发生位置

樊桂林等[3]曾应用动态电阻应变仪法对 $PY_1$40 型摇臂的动态应变进行测试,应变片的布置位置如图 4 所示。当喷头在进口压力 0.45 MPa 时,应变片布置的第Ⅰ断面第 1 点的测试应变值最大,该点距离摇臂转轴中心 15 cm 处,其相应的动应力峰值为 42.5 MPa。由高速摄影试验结果可知,$PY_1$40 型摇臂式喷头进口工作压力 0.45 MPa 时,其转动角速度为 400(°)/s。由计算模拟得,转动角速度 400(°)/s 时摇臂的动应力峰值为 42.3 MPa,与试验结果之间的误差小于 0.5%。模拟的动应力峰值出现在单元节点 4 821 位置,距离摇臂转轴中心 15 cm,如图 5 所示,与试验结果一致。

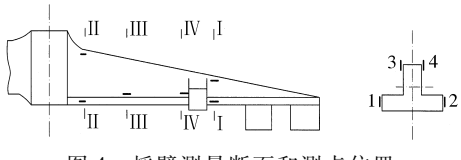


图 4 摇臂测量断面和测点位置

Fig. 4 Measured cross sections and points on the swing arm

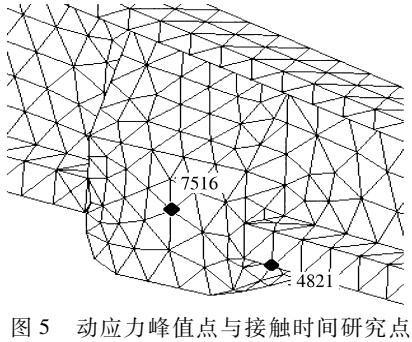


图 5 动应力峰值点与接触时间研究点

Fig. 5 Observed points of the peak dynamic stress and the contact time

3.2.2 动应力分布

范国瑛等[2]和王泽[4]分别对摇臂碰撞动力学进行了解析求解,预测出摇臂的碰撞动应力峰值出现在距摇臂转轴中心 14.5 cm 附近。本研究在摇臂 X 轴方向取若干计算横断面,模拟求得不同转动角速度下在各横断面上的动应力极值。图 6 给出了转动角速度 400(°)/s 时摇臂沿 X 轴方向动应力的比

较结果。本文数值模拟计算结果与解析结果具有较高的一致性，而且数值模拟计算的动应力峰值出现在距摇臂转轴 15 cm，与解析结果亦非常接近。

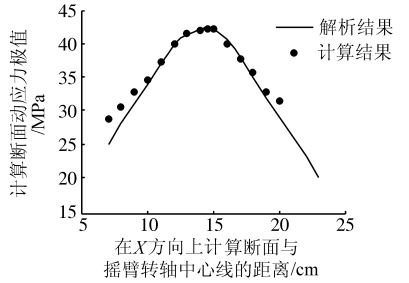


图 6　转动角速度 400(°)/s 时摇臂 X 方向上动应力极值分布比较

Fig. 6　Comparison of the calculated and simulated extreme dynamic stress distribution under the angular velocity of 400(°)/s

3.3　转动角速度与橡胶垫的影响

对摇臂转动角速度和喷体打击块有无橡胶垫工况下的碰撞动应力模拟进行对比了分析，表 2 给出了不同转动角速度时图 5 节点 4821 作为观测点的动应力峰值。图 7 给出了未安装橡胶垫时分别在 300、400 和 500(°)/s 转动角速度下沿摇臂 X 方向不同位置动应力极值的变化趋势。

表 2　不同转动角速度时动应力峰值比较

Tab. 2　Comparison of peak dynamic stress under different angular velocities

转动角速度 /(°)·s^{-1}	安装橡胶垫 /MPa	未安装橡胶垫 /MPa
300	37.1	39.5
400	42.3	49.2
500	60.8	68.3

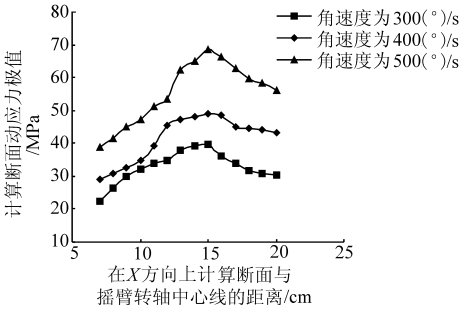


图 7　3 种转动角速度下的各计算断面上动应力极值分布

Fig. 7　Extreme dynamic stress distribution on calculated cross sections under three different angular velocities

由表 2 和图 7 可知，随着转动角速度的增加，摇臂各计算断面的动应力极值是逐渐增大的，而且每次动应力峰值都出现在距摇臂转轴 15 cm 处。喷体打击块安装橡胶垫前后的动应力峰值差异显著，安装橡胶垫后，其动应力峰值平均降低了 10.4%。由模拟分析表明，安装橡胶垫可以明显缓解摇臂与喷体的碰撞冲击力，这与实际情况完全一致。

3.4　接触应力

以图 5 中接触点 7516 点为研究对象，对不同摇臂转动角速度和是否安装橡胶垫情况下该点在接触时间内的接触应力进行了分析对比，得到的结果如图 8、图 9 所示。

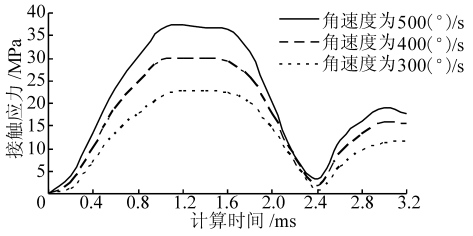


图 8　安装橡胶垫时 3 种转速下接触应力的变化

Fig. 8　Comparison of contact stresses under three different angular velocities with the rubber pad

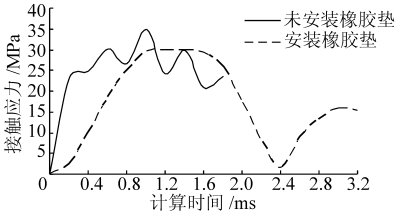


图 9　转动角速度 400(°)/s 时接触应力的变化

Fig. 9　Comparison of contact stresses under angular velocity of 400(°)/s

由图 8 可知，在相同的橡胶垫安装情况下，随着转动角速度增大，碰撞接触区域内的接触点所受的接触应力峰值在各个时刻都有所增大。由图 9 可知，在相同的转动角速度情况下，安装橡胶垫对于接触应力影响较大。安装橡胶垫后，接触应力峰值明显减小，而且应力的波动亦有所减少。

3.5　接触时间的确定

摇臂与喷体打击块的接触时间可以继续通过分析图 5 中接触点 7 516 的变形位移与时间的历程曲线来确定。接触时间定义为摇臂与打击块表面的接触历时。图 10 给出了角速度为 400(°)/s、安装橡胶垫工况时接触表面某接触点在 Z 方向位移随时间历程的变化曲线。假定摇臂绕轴顺时针转动时该点的位移为正，而且计算起始时刻，该点 Z 方向位移为零。图 10 给出的时间 t_1 指摇臂逐渐靠近橡胶垫的历时；时间 t 指摇臂与橡胶垫开始接触并压缩橡胶垫的历时，此时喷头受旋转摩擦阻力矩和水流驱动力矩的联合作用，摇臂与橡胶垫共同运动；时间 t_2 指摇臂开始反转，与橡胶垫分离，并回到起始点的历时。可以看出，在计算时间 0 ~ 3.2 ms 之间，该点的 Z 方向位移是正值；而 3.2 ms 之后，该点的 Z 方向位移为负值。由摇臂与橡胶垫之间的间隙和运动

速度计算出 $t_1 = t_2 = 0.1$ ms,由此可推求出摇臂与橡胶垫的接触时间 $t = 3$ms。在不同转动角速度和有无安装橡胶垫等各工况下,摇臂与喷体打击块的接触时间结果如表 3 所示。

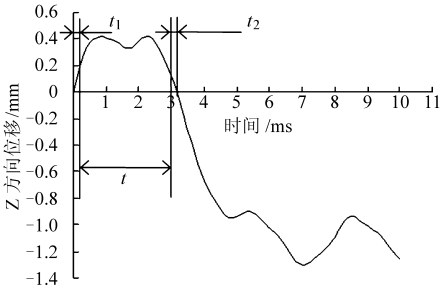


图 10 碰撞接触点的 Z 方向位移随时间历程的变化曲线

Fig. 10 Displacement of the impact contact point in Z direction *vs* computation time

表 3 摇臂与喷体打击块的接触时间

Tab. 3 Contact time of the swing arm and the sprinkler body's contact stop

转动角速度/(°)·s^{-1}	接触时间/ms	
	安装橡胶垫	未安装橡胶垫
300	3.1	1.8
400	3.0	1.7
500	2.9	1.6

由表 3 可知,橡胶垫可以起到缓冲碰撞,延长碰撞接触时间,并有效减少碰撞瞬时摇臂所受的碰撞冲击力。随着转动角速度的增加,接触时间亦相应地有所减短。喷体打击块在安装橡胶垫前后的接触时间差异显著,安装橡胶垫后,不同转动角速度下接触时间平均增加了 76.6%。模拟结果表明,安装橡胶垫可明显延长摇臂与喷体打击块的接触时间。

4 结论

(1) 应用显式动力分析软件 ANSYS/LS - DYNA,建立了摇臂式喷头摇臂与喷体的碰撞过程有限元分析模型,通过数值模拟得到了碰撞过程中摇臂的变形位移量、动应力分布等特征信息。

(2) $PY_1$40 型摇臂式喷头在转动角速度 400(°)/s 时,碰撞动应力峰值的计算结果为 42.3 MPa,与试验值的误差小于 0.5%,出现位置距摇臂转轴中心 15 cm 处,与试验结果相同。模拟计算求得的沿摇臂 X 轴方向各横断面上的动应力极值分布与解析结果非常接近。

(3) 通过对比分析不同转动角速度和有无安装橡胶垫等工况下摇臂各断面的动应力变化可知,动应力峰值随着转动角速度的增加而增大;喷体打击块安装橡胶垫后,不同转动角速度下动应力峰值平均降低了 10.4%,表明安装橡胶垫可以有效减小摇臂与喷体的碰撞冲击力。

(4) 摇臂与喷体打击块的碰撞接触应力随着转动角速度的增加而增加,喷体打击块安装橡胶垫后,接触应力的波动次数明显减少;摇臂与喷体打击块的碰撞接触时间随着转动角速度的增加而减小,喷体打击块安装橡胶垫后,不同转动角速度的接触时间平均增加了 76.6%。由接触应力和接触时间的变化表明安装橡胶垫可以明显延缓摇臂与喷体的碰撞过程。

参 考 文 献

1 王泽, 范国瑛, 李世英. PY_1 系列喷头摇臂运动的研究[J]. 排灌机械, 1986(5):6~8.
Wang Ze, Fan Guoying, Li Shiying. Research on the movement of the PY_1 series impact sprinkler[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 1986(5):6~8. (in Chinese)

2 范国瑛, 陈次昌, 王泽. 对喷头摇臂的几项初步研究[J]. 排灌机械, 1984(1):13~17.
Fan Guoying, Chen Cichang, Wang Ze. Several preliminary studies on the swing arm of impact sprinkler[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 1984(1):13~17. (in Chinese)

3 樊桂林, 梁芝兰. 摇臂式喷头摇臂应力分布的实验研究[J]. 排灌机械, 1995(2):34~36.
Fan Guilin, Liang Zhilan. Experimental research on the stress distribution of impact sprinkler[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 1995(2):34~36. (in Chinese)

4 王泽. 摇臂式喷头摇臂强度的分析与计算[J]. 排灌机械, 1994(2): 55~59.
Wang Ze. Analysis and computation on structure strength of the impact sprinkler[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 1994(2):55~59. (in Chinese)

5 林红吉, 孟宪林, 严建平, 等. 护弦碰撞过程有限元数值模拟[J]. 船舶, 2004(5):47~49.
Lin Hongji, Meng Xianlin, Yan Jianping, et al. Finite-element numerical simulation of fender collision procession[J]. Boat & Ship, 2004(5):47~49. (in Chinese)

6 Hassan M, Hamid R R. Impact factor for a composite steel bridge using non-linear dynamic simulation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008,35(11):1 228~1 243.

7 Wang Z J, Cheng L D. Experimental research and numerical simulation of the dynamic cylinder upsetting[J]. Material Science and Engineering, 2009,499(1~2):138~141.

8 John O H. LS-DYNA theoretical manual[M]. Livemore, CA: Livermore Software Technology Corporation, 1998.

9 LSTC. ANSYS/LS-DYNA user's manual[M]. Livemore, CA: Livermore Software Technology Corporation, 2006.

10 屈文涛, 沈允文, 徐建宁. 基于 ANSYS 的双圆弧齿轮接触应力有限元分析[J]. 农业机械学报, 2006,37(10):139~141.
Qu Wentao, Shen Yunwen, Xu Jianning. Finite-element analysis of contact stress for double-arc gear based on ANSYS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(10): 139~141. (in Chinese)

11 剧锦三, 杨蔚彪, 蒋秀根. 刚体撞击弹塑性直杆时冲击荷载之数值解[J]. 工程力学, 2007,24(6):49~53.
Ju Jinsan, Yang Weibiao, Jiang Xiugen. Numerical solution for impact load of elasto-plastic bar subjected to rigid body impact[J]. Engineering Mechanics, 2007,24(6):49~53. (in Chinese)

12 剧锦三, 杨蔚彪, 蒋秀根. 受刚体碰撞方管柱考虑局部屈曲时的弹塑性冲击载荷[J]. 工程力学, 2007,24(7):190~195.
Ju Jinsan, Yang Weibiao, Jiang Xiugen. Elasto-plastic impacts by rigid body on rectangle columns considering local buckling[J]. Engineering Mechanics,2007,24(7):190~195. (in Chinese)

13 剧锦三, 蒋秀根, 傅向荣. 考虑接触变形的梁受到球碰撞时弹塑性冲击荷载[J]. 工程力学,2008,25(4):32~38.
Ju Jinsan, Jiang Xiugen, Fu Xiangrong. Elasto-plastic impact load of the beam subjected to lateral shock of ball[J]. Engineering Mechanics, 2008,25(4):32~38. (in Chinese)

14 朱兴业,袁寿其,李红. 全射流喷头与摇臂式喷头的对比实验[J]. 农业机械学报,2008,39(2):70~72,184.
Zhu Xingye, Yuan Shouqi, Li Hong. Compared experiments between complete fluidic sprinkler and impact sprinkler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(2):70~72,184. (in Chinese)

(上接第 71 页)

4 聂卫波,马孝义. 畦田 Philip 入渗参数和田面综合糙率同步推求[J]. 农业机械学报, 2009,40(5):39~44.
Nie Weibo, Ma Xiaoyi. Synchronously determining Philip infiltration parameter and synthesis roughness model of border irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(5):39~44. (in Chinese)

5 Darboux F R, Huang C. Does soil surface roughness increase or decrease water and particle transfers? [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2005, 69(3): 748~756.

6 Sun Y, Lin J, Schulze Lammers P, et al. Predicting surface porosity using a fine-scale index of roughness in a cultivated field [J]. Soil & Tillage Research, 2009, 103(1): 57~64.

7 Moreno R G, Lvarez M C D A, Alonso A T, et al. Tillage and soil type effects on soil surface roughness at semiarid climatic conditions[J]. Soil & Tillage Research, 2008, 98(1): 35~44.

8 Warner W S. Mapping a three-dimensional soil surface with handheld 35 mm photography[J]. Soil & Tillage Research, 1995, 34(3): 187~197.

9 Darboux F R, Chihua H. An instantaneous-profile laser scanner to measure soil surface microtopography[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2003, 67(1): 92~99.

10 Flanagan D C, Huang C, Norton L D. Laser scanner for erosion plot measurement[J]. Trans. ASAE, 1995, 38(3): 703~710.

11 Zhixiong L, Nan C, Perdok U D, et al. Characterisation of soil profile roughness[J]. Biosystems Engineering, 2005, 91(3): 369~377.

12 迟桂纯, 周肇飞, 王世华. 激光三角法微位移测量技术[J]. 工具技术, 1997, 31(6): 37~40.
Chi Guichun, Zhou Zhaofei, Wang Shihua. Laser triangle method for measuring microdisplacement[J]. Tool Engineering, 1997, 31(6): 37~40. (in Chinese)