

甘蔗地路谱对切割质量影响的仿真分析与试验

范志达¹, 李尚平², 麻芳兰¹, 李婉³, 赖晓¹, 薛斌¹

(1. 广西大学机械工程学院, 南宁 530004; 2. 钦州学院物理与材料系, 钦州 535000;
3. 中联重科建筑起重机械分公司, 长沙 410205)

摘要: 小型甘蔗收割机在坡地上行走过程中, 切割器会受地面等各种因素的影响产生剧烈振动, 影响切割质量。该文利用测量加速度的方法, 采集田间路谱, 并运用虚拟样机的仿真分析验证了路面的不平度会引起刀盘的振动, 经试验分析, 最后得出当刀盘转速为 600 和 1 000 r/min 时切割质量最好。该研究可为样机的开发提供理论依据。

关键词: 收割机, 振动, 切割, 路谱, 仿真

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.01.008

中图分类号: S225.5⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-01-0037-05

范志达, 李尚平, 麻芳兰, 等. 甘蔗地路谱对切割质量影响的仿真分析与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 37-41.

Fan Zhida, Li Shangping, Ma Fanglan, et al. Simulation analysis and experiment on influence of road spectrum of cane field on cutting quality[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 37-41. (in Chinese with English abstract)

0 引言

目前国外甘蔗收获机械发展基本成熟, 主要机型是联合切断式的, 机械化程度高、工作效率高, 但只适合平坦地势。而中国种植甘蔗多为丘陵地区, 大型机械行走不便, 加之糖厂工艺的限制, 切断式联合收割机一直都得不到推广。而国内整杆式收割机的研究一直被居高不下的破头率所困扰, 这其中也和中国甘蔗的种植环境有关^[1-2]。影响切割质量(破头率)的素因很多^[3], 但是从地形这一因素出发的研究很少, 由于甘蔗收割机行驶过程中蔗地不平会引起切割刀盘振动, 从而使破头率提高, 砍蔗质量下降。为解决这一问题, 本文借鉴汽车路谱理论, 利用实地路谱再现原理, 把采集到的实地路谱输入试验平台模拟收割机在蔗地行驶的真实状况, 进一步分析该因素对砍蔗质量的影响。

1 蔗地路谱的采集分析

1.1 蔗地实地路谱的数据采集

路谱研究经多年发展, 现在已经形成了多种采集测量方法。由于测量加速度的方法与其他方法相比, 具有测量准确、安装加速度器简便的特点, 所以本文采用在五轮仪上安装加速度传感器的方法来测量蔗地

路谱^[4-7]。采集原理如图 1 所示, 把路面和甘蔗收割机看成是一个系统, 路面起伏把随机振动通过轮胎及车架传递到甘蔗收割机的刀盘上, 甘蔗收割机受路面的激励相当于系统的输入, 甘蔗收割机刀盘表现出的振动就相当于系统的输出。这种输入、输出的关系可认为近似符合线性系统理论^[8], 它们可用下式来表达

$$Y=G \cdot X \quad (1)$$

其中, Y 为输出变量; X 为输入变量; G 为传递函数。

在路谱的采集过程中, 分别以不同车速对同一路段进行 4 次采集, 而路段又分垄沟平地、坡地、干地和湿地 4 种不同的工况。

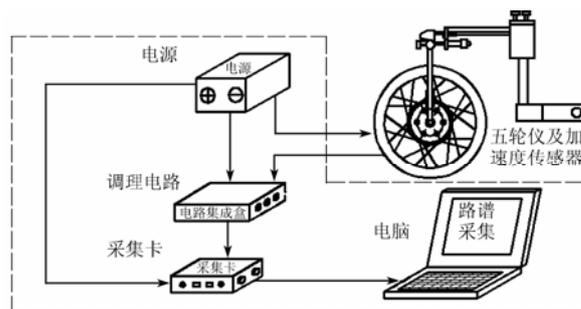


图 1 系统总体结构图

Fig.1 Structural diagram of system

1.2 路谱数据的分析处理

上述采集得到的数据属于随机数据, 因此需要进行统计分析来得到随机数据的规律和特性^[9]。下面对当车速为 0.5 m/s 前进时的数据进行分析:

1) 时域分析

图 2 是经加窗和低通滤波后的信号。由上面这些统计数据可知, 路面越是不平, 加速度值的变化也就越大; 方差和均方值也越大。当五轮仪以不同的速度在同一路

收稿日期: 2011-04-02 修订日期: 2011-09-21

基金项目: 广西大学研究生教育创新计划项目(105931003031); 广西区科技攻关项目(桂科攻 0992002-18); 国家科技部科技人员服务企业项目(2009GJE10008); 广西制造系统与先进制造技术重点实验室科研项目(09-007-05S019)

作者简介: 范志达(1985-), 男, 山东聊城人, 主要从事先进制造技术与智能检测方面的研究。南宁 广西大学机械工程学院, 530004。

Email: fanzhida@324@163.com.

面上行驶时,采集到的时域信号也不相同,五轮仪行驶速度增加时,振动的加速度值也将变大。

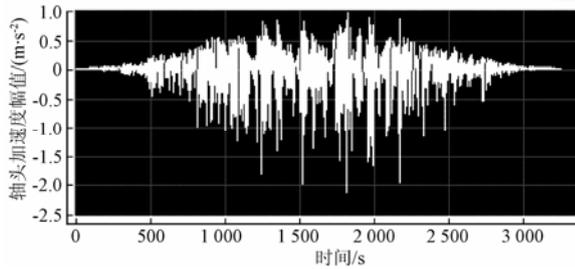


图2 加速度信号全程时域波形

Fig.2 Full time-domain waveform acceleration signal

2) 频域分析

由图 3 加速度响应频谱曲线得,加速度响应的频率范围是在 $0\sim 6\text{ Hz}$ 之间,且在 1.7 Hz 附近幅值达到最大,振动的最大幅值为 0.8 m/s^2 。根据路面标准统计资料^[10],在车辆行驶速度 $v=0.4\sim 0.8\text{ m/s}$ 的情况下,路谱频率范围在 $0.02\sim 6\text{ Hz}$ 之间。因此,对农场坡地的时间频率分析合理。

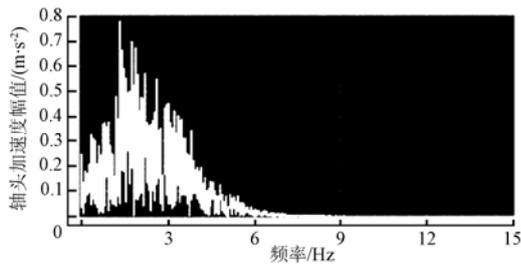


图3 加速度响应频谱

Fig.3 Acceleration response spectrum

通过对采集到的路谱数据进行运算处理得到空间的位移频谱密度,由空间谱可以转换时域内任一速度下的位移谱密度,为后面的仿真和激励的输出提供依据。

2 蔗地路谱对切割质量影响的仿真分析

2.1 蔗地路面的建立

在甘蔗收获过程中,收割机轮胎行驶的左、右垄沟的路面不平度是不一样的,因此在机械系统动力学自动分析(automatic dynamic analysis of mechanical systems, ADAMS)软件中需要建立分别代表左、右垄沟的路面模型^[11]。把路谱采集试验中测得的随机振动由加速度形式通过二次积分转化位移的形式,并对得到的位移波形按时间进行离散化处理,得到单位距离上垂直于路面方向上的位移值,并保存为文档格式。然后在 ADAMS 中的轮胎行驶方向画任一条光滑封闭的样条曲线,双击此样条曲线,出现修改对话框,导入保存有 y 方向上的位移值的文档,可以快速生成样条曲线一系列插值点的坐标值^[12-13]。最后对此样条曲线进行 z 方向上的拉伸就得到了蔗地蔗沟的地面模型,如图 4,以模拟路面的真实状况。

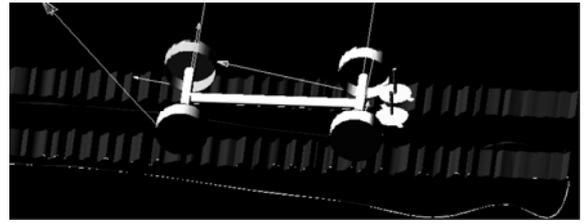


图4 简易车辆地面系统图

Fig.4 Simple vehicle-land system

2.2 仿真数据采集原理

在砍蔗的过程中,由于切割器的振动会对甘蔗切断面产生挤压,使甘蔗切面变茸或压裂,影响砍蔗质量。在切割甘蔗的 Δt 时间内,特别是刀片受到各种原因产生的刀盘轴向振动,一方面使切割时反抗振动位移变化的挤压加大而产生压裂;另一方面,由于振动位移的变化使得切割力对切断面残余弯矩和扭矩也产生相应的变化而使甘蔗破裂。另外,在实际切割甘蔗的过程中,甘蔗并不都是一刀切断,还有需要两刀才能切断的情况。因此,在分析影响砍蔗质量的因素时,还需要考虑两刀切断的情况。在此情况下,由于振动的存在,第二刀的切点并不一定与第一刀的切点完全重合,这就会在甘蔗切断面上有台阶出现,上述这些都会影响甘蔗的砍蔗质量,并且可以初步得到,在砍蔗的有效时间内,作用在刀片上的振动越大就越容易出现破裂和台阶的现象^[14-15]。因此,可以由切割过程中刀片的轴向位移来对砍蔗质量进行仿真分析。根据前期的研究成果,可在刀盘转速分别为 800 和 1000 r/min 时,测量单刀和两刀切断时,刀片的刀尖在刀盘轴向的振动位移,并由此振动位移来分析振动对砍蔗质量的影响。

2.3 仿真结果的分析

2.3.1 当刀盘转速为 800 r/min 时的仿真结果

测量刀盘上刀片的刀尖在垂直于路面方向的位移。经过数据处理后,得到下图 5 和图 6。

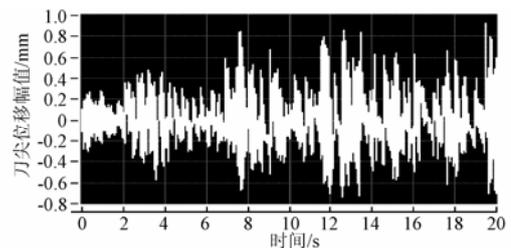


图5 800 r/min 单刀切断一根甘蔗时刀片在刀盘轴向的振动
Fig.5 Axial vibration of blade when sugarcane cut by one blade at 800 r/min

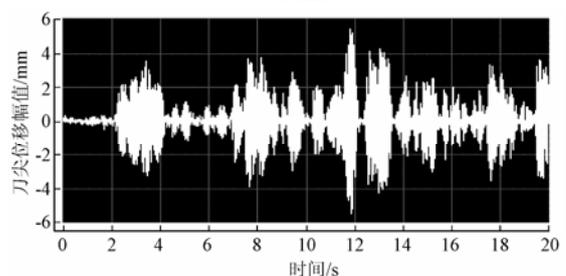


图6 800 r/min 两刀切断一根甘蔗时刀片在刀盘轴向的振动
Fig.6 Axial vibration of blade when sugarcane cut by two blade at 800 r/min

从图 5 可知，在刀盘转速为 800 r/min，单刀切断一根甘蔗时，刀片在刀盘轴向的位移最小值为-0.7337 mm，最大值为 0.91938 mm，最大最小值反映了振动变化的幅值。刀片上下振动的频率几乎相等，但是向下的振动将加剧刀片的下表面与蔗兜之间的摩擦，这也会加大蔗兜破头率。

从图 6 可知，在刀盘转速为 800 r/min，2 刀切断一根甘蔗时，前后 2 次切割 2 刀片在刀盘轴向位移最小值为 -5.767 mm，最大值为 5.57 mm，最大最小值反映了刀尖振动变化的幅值。由于 2 次切割的位置不同，形成了甘蔗根部的切割台阶。

2.3.2 当刀盘转速为 1 000 r/min 时的仿真结果

测量刀盘上刀片的刀尖在垂直于路面方向的位移。经过数据处理后，得到图 7 和图 8。

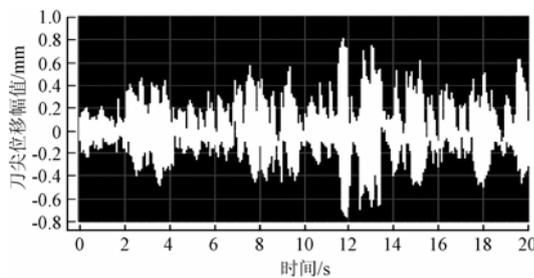


图 7 1 000 r/min 单刀切断一根甘蔗时刀片在甘蔗轴向的振动
Fig.7 Axial vibration of blade when sugarcane cut by one blade at 1 000 r/min

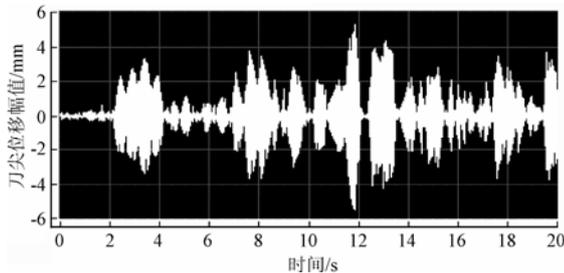


图 8 1 000 r/min 两刀切断一根甘蔗时两把刀片在甘蔗轴向的振动
Fig.8 Axial vibration of blade when sugarcane cut by two blade at 1 000 r/min

从图 7 可知，在 1 000 r/min 单刀切断一根甘蔗时，刀片在刀盘轴向的位移最小值为-0.7569 mm，最大值为 0.81739 mm。

从图 8 可知，在 1 000 r/min 两刀切断一根甘蔗时，前后两刀片在刀盘轴向的最小值为-5.698 mm，最大值为 5.1003 mm。

2.3.3 2 种转速下的振动频谱分析

对上面 2 种转速下单刀切断一根甘蔗的振动图像进行频谱分析，得图 9 和图 10。

在对一刀砍断情况下刀片切割振动进行频谱分析可知，刀片的振动频率结构主要是低频振动和高频振动。其中，由仿真的初始条件可知，2 Hz 左右的低频振动分量为收割机以 0.5 m/s 的速度行驶时地面不平度所引起的刀盘振动；高频振动分量与刀盘转速有关，其中 800 r/min

时，高频振动为 13.3 Hz；1 000 r/min 时，高频振动为 16.6 Hz，与刀盘的转动频率一致。

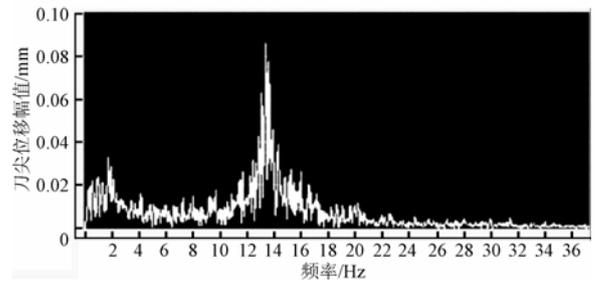


图 9 800 r/min 时一刀切断振动的频谱图
Fig.9 Spectrum of blade vibration when sugarcane cut by one blade at 800 r/min

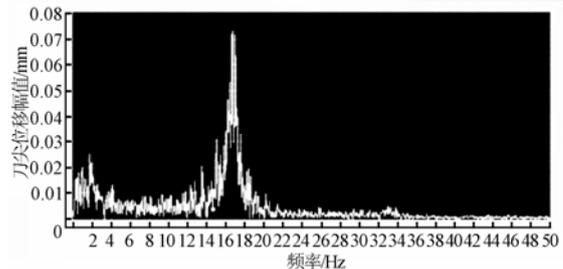


图 10 1 000 r/min 时一刀切断振动的频谱图
Fig.10 Spectrum of blade vibration when sugarcane cut by one blade at 1000r/min

通过以上 2 种情况的分析可得，刀盘 800 r/min 时的振幅要大于 1 000 r/min 的振幅；影响砍蔗质量的因素主要有刀盘转速引起的高频振动，路谱引起的低频振动和砍蔗刀数。无论是一刀切断还是两刀切断，路面的不平度都会引起刀片的振动，如果路谱引起的低频振动的频率与砍蔗频率（转动频率的 2 倍）相等时，所引起的刀尖位移振幅最大，这时路谱对砍蔗质量的影响最大。

3 甘蔗地路谱对切割效果的试验研究

3.1 路面随机激励信号的编制

蔗地路谱到五轮仪轴头传感器采集到的信号将经过一个传递函数的传递，用下式来表达

$$Y=H \cdot X \tag{2}$$

其中，X 为反应实际蔗地路面的输入变量，Y 为电脑采集到的传感器输出变量，H 为路面到采集点（加速度传感器安装点）的传递函数。并把采集到的路谱数据进行了时域和频域的数据分析，最后以实际的蔗地路谱为根据编制了可模拟输出的随机振动信号^[16]，重现了蔗地地面形状。

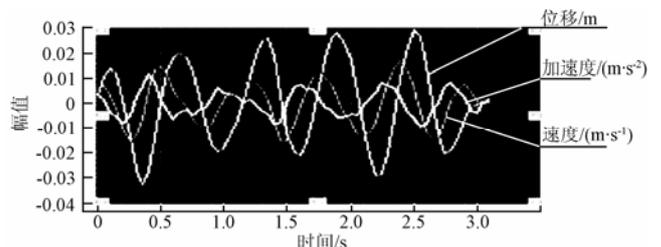


图 11 激励加速度、速度和位移信号
Fig.11 Excitation acceleration, velocity and displacement signals

图 11 显示了在一段加速度响应信号下, 相应的激励驱动信号的加速度、速度和位移曲线, 反映了道路表面最真实的情况。

3.2 试验装置

由于试验条件的限制, 采用在电机和支撑轴承之间安装一个偏心轮, 当电机转动时, 偏心轮同时转动, 这时会产生一个正弦振动, 使用调频装置来调节振动频率, 以模拟路面不平引起的振动。受试验空间的限制, 在实验室切割刀盘不移动只转动, 利用甘蔗输送装置向刀盘部位输送甘蔗, 进而将模拟振源安装到输送装置上, 利用甘蔗装置的振动替代路谱引起的刀盘振动。实验装置如图 12。

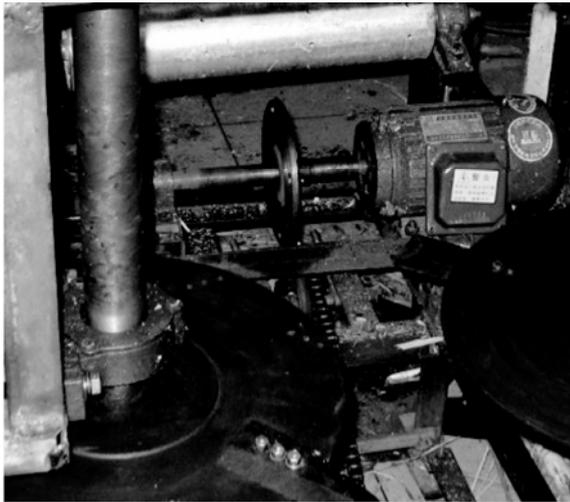


图 12 试验平台振动装置

Fig.12 Vibration Device of bench platform

3.3 砍蔗质量的试验分析

在砍蔗中各种振动将使得砍蔗质量下降, 由于路谱会引起刀盘的低频振动和刀盘转速引起刀盘的高频振动, 因此分析砍蔗质量要以低频振动的频率和刀盘转动速度作为因子。以仿真的数据为参考, 选择在不同频率和不同转速的组合条件下, 每种组合下试验 5 次, 取平均值, 以评定砍下甘蔗的切割质量^[17]。砍蔗质量由断面裂纹数 M , 最大裂纹长度 L 、最大裂纹厚度 W 、砍切台阶数 N 来综合评定, 参考课题组研究结果, 他们的权重分别为 0.233、0.236、0.244 和 0.287^[2,18]。利用公式: 砍蔗质量影响系数= $0.233M+0.236N+0.244W+0.287N$, 得到砍蔗质量的双因素试验数据, 如下表 1 所示。表示不同频率和不同转速对砍蔗的质量的影响系数。

表 1 影响砍蔗质量路谱频率和刀盘转速双因素试验数据
Table 1 Influence of sugarcane cut quality with road spectrum frequency and blade speed double factors test

路谱频率/Hz (刀尖振幅/mm)	影响系数		
	刀盘转速 600 r·min ⁻¹	刀盘转速 800 r·min ⁻¹	刀盘转速 1 000 r·min ⁻¹
1.5(0.36)	2.166	0.574	0
2.0(0.63)	0.574	6.673	0
2.5(1.00)	0.287	7.141	0.574
3.0(1.36)	11.933	12.397	1.590
3.5(2.00)	10.585	15.074	9.497

从上表可知, 当在刀盘转速 800 r/min 且路面频率在 3.5 Hz 的情况下, 砍蔗质量的影响系数达到了最大值, 且振动频率与质量影响系数呈线性正比关系。在 1.5 Hz 时各转速的砍蔗质量影响系数都接近零点, 砍蔗质量好。从 1.5 到 2.5 Hz 的范围内, 当刀盘转速为 600 和 1 000 r/min 时, 砍蔗质量影响系数接近于 0。在 2.5 Hz 以后刀盘转速为 1 000 r/min 时, 影响系数仍然较低, 在 3.5 Hz 时各转速下的质量影响系数都达到了最高值。在各转速下, 基本上是路面振幅增加, 砍蔗的质量影响系数也就越高; 在同一频率下, 刀盘转速为 1 000 r/min 时质量影响系数最低, 在 800 r/min 的转速下, 质量影响系数为同频率的最高。在同一刀盘转速下, 路面振动的频率增高, 砍蔗质量的综合影响系数也有随之增大的趋势。

为进一步分析路面低频振动、刀盘转动对砍蔗质量的影响, 对试验数据进行方差分析, 结果如表 2 所示。

表 2 刀盘振动影响因素方差分析

Table 2 Knife dish vibration influence factors anova

方差来源	离差平方和	自由度	方差	F 值	临界值
路谱频率	252.967	4	63.24176	7.067077	$F_{0.05}(4, 8)=3.84$
刀盘转速	91.30325	2	45.65162	5.101432	$F_{0.05}(2, 8)=4.46$
误差	71.59029	8	8.948786		

由表 2 可得, 在给定的显著水平 $\alpha=0.05$ 下, $F_{\text{频率}}=7.067077 > (F_{0.05}(4,8)=3.84)$, 因此, 在 95%置信区间内, 路面低频振动对砍蔗质量有显著影响。在给定的显著水平 $\alpha=0.05$ 下, $F_{\text{转速}}=5.101432 > (F_{0.05}(2,8)=4.46)$, 因此, 在 95%置信区间内, 刀盘转速对砍蔗质量有显著影响。

根据上面分析, 要提高砍蔗质量可以通过避开蔗地路面不平度引起的 3.0 Hz 以上的刀盘振动, 同时避开 800 r/min 的刀盘转速。在 1.5 Hz 左右的低频振动下工作时, 砍蔗质量不受刀盘振动的影响。因此可以认为刀盘转速为 600 和 1 000 r/min 时和路面不平度引起刀盘振动的频率为 1.5 Hz 左右时将得到最小的砍蔗质量影响系数, 说明此时砍蔗效果最好。

4 结论

通过田间路谱的采集并运用虚拟样机的仿真分析, 验证了路谱和刀盘的转速都会对刀盘的振动幅值产生影响。并通过两因素对甘蔗切割质量影响的试验分析, 得到结论如下:

1) 刀盘在 1.5 Hz 左右振动频率下工作时路面不平度对切割质量(破头率)的影响比较小, 3.0 Hz 以上影响较大。

2) 刀盘转速为 600 或 1 000 r/min 时切割效果较好。

【参考文献】

- [1] 陆丽. 广西甘蔗生产机械化发展若干问题研究[J]. 全国甘蔗生产机械与产业研讨会, 2002, 103-106.

- [2] 梁兆新. 甘蔗生产机械化发展状况探讨[J]. 中国农机化, 2003, (2): 26—27.
Liang Zhaoxin. Discussion about the development states of mechanization in cane production[J]. Chinese Agriculture Mechanization, 2003, (2): 26—27. (in Chinese with English abstract)
- [3] 戴小标. 小型甘蔗收获机切割器结构设计、动力学分析及试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2008, 28—43.
Dai Xiaobiao. Structure Design and Kinetic Analysis and Experiment Research of the Cutter in Minitype Sugarcane Harvester[D]. Nanning: Guangxi University, 2008, 28—43. (in Chinese with English abstract)
- [4] Sayem M W. Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements[R]. World Bank Technical Paper, 1986, 46: 31—39
- [5] GB / T 7031-1986, 车辆振动输入一路面平度表示方法[S]. 中国标准出版社, 1987, 55.
- [6] 韩晓峰, 董斌, 陈剑. 汽车电器可靠性试验台的路谱信号采集及其再现[J]. 噪声与振动控制, 2008, (5): 109—112
Han Xiaofeng, Dong Bin, Chen Jian. Acquisition and reappearance of road spectrum of a testing platform for automobile electronics reliability[J]. Noise and Vibration Control, 2008, (5): 109—112. (in Chinese with English abstract)
- [7] 孙建民, 曲正新. 试论虚拟仪器及其在汽车测试中的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2002, (3): 10—12.
Sun Jianmin, Qu Zhengxin. Application of virtual instrument in automobile test[J]. Automobile Technology and Material, 2002, (3): 10—12. (in Chinese with English abstract)
- [8] Abdehhamid M K, McConnell K G. Spectral analysis method for nonstationary field measurements[C]// Proceedings of the 5th international congress on experimental mechanics. M. omreaf. international conference and tour SESA Brookfield Center, CT. P. 605, 4512, 2006
- [9] 王宵峰, 杨春伟, 杜永昌. 道路模拟控制系统的研制和开发[J]. 仪表技术与传感器, 2004, (10): 56—58.
Wang Xiaofeng, Yang Chunwei, Du Yongchang. Study and design of road simulation control system[J]. Instrument Technique and Sensor, 2004, (10): 56—58. (in Chinese with English abstract)
- [10] GB / T 4970-1996, 汽车平顺性随机输入行驶试验方法[S]. 中国标准出版社, 1996: 78—80.
- [11] 任卫群. 车一路系统动力学中的虚拟样机: MSC. ADAMS 软件应用实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005, 36—41.
- [12] 王其东, 乔明侠, 梅奋永. 汽车随机路面输入平顺性的仿真分析[J]. 合肥工业大学学报, 2005(4): 346—350.
Wang Qidong, Qiao Mingxia, Mei Fenyong. Simulation and analysis of vehicle ride comfort under random input[J]. Journal of Hefei University of Technology Science, 2005(4): 346—350. (in Chinese with English abstract)
- [13] Dave Crolla, 喻凡. 车辆动力学及其控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003, 57—62.
- [14] 杨坚, 梁兆新, 莫建霖, 等. 甘蔗切割器切割质量影响因素的试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 60—64.
Yang Jian, Liang Zhaoxin, Mo Jianlin et al. Experimental research on factors affecting the cutting quality of sugarcane cutter[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [15] 林茂, 杨坚, 梁兆新, 等. 双刀盘甘蔗切割器工作参数的试验优化研究[J]. 农机化研究, 2006(12): 146—150.
Lin Mao, Yang Jian, Liang Zhaoxin, et al. Experimental optimization research on working parameters of dual base cutter of sugarcane harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(12): 146—150. (in Chinese with English abstract)
- [16] 靳晓雄, 张帆. 时域波形再现技术在汽车道路模拟中的应用[J]. 中国工程机械学报, 2006(4): 67—75.
Jin Xiaoxiong, Zhang Fan. Application of time waveform replication technology in automobile road simulation[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2006(4): 67—75. (in Chinese with English abstract)
- [17] 汪荣鑫. 数理统计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.
- [18] 刘庆庭, 区颖刚, 卿上乐, 等. 甘蔗茎秆在光刃刀片切割下根茬破坏试验[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 103—107.
Liu Qingting, Ou Yinggang, Qing Shangle, et al. Stubble damage of sugarcane stalks in cutting test by smooth-edge blade[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(3): 103—107. (in Chinese with English abstract)

Simulation analysis and experiment on influence of road spectrum of cane field on cutting quality

Fan Zhida¹, Li Shangping², Ma fanglan¹, Li wan³, Lai xiao¹, Xue Bin¹

(1. College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Physics and Materials Department, Qinzhou College, Qinzhou 535000, China; 3. Hoisting Machinery Branch Company, Zoomlion Heavy Industry Science and Technology Development Co., Ltd., Changsha 410205, China)

Abstract: When a mini-type sugarcane harvester moves on the sloping field, its' cutter suffers from violent vibration, which affects the cutting quality. The field roughness was measured by using the field spectrum with the method of measuring acceleration. The influence of the field roughness on vibration of cutter was analyzed and verified by simulation analysis of the virtual prototype. The results showed that the best cutting quality could be obtained when the blade speed was 600 or 1 000 r/min after experimental analysis. The results can provide a reference for the development of prototype.

Key words: harvesters, vibrations, cutting, road spectrum, simulation