

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.023

西瓜品质 LDV 测振响应影响因素分析^{*}

高宗梅 张 文 任梦佳 吴华林 崔 笛
(浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要: 西瓜的内部品质与其振动特性紧密相关。激光多普勒测振(LDV)技术可以准确、非接触地测量农产品组织的真实振动,从而获取农产品的内部品质信息。基于激光多普勒测振系统开展了单因素试验,研究了加速度振幅、扫频速率、检测点位置3个因素对西瓜振动频谱响应特性的影响。然后,针对以上因素进行了3因素3水平的有交互作用的正交试验,共27个参数组合,每个组合重复3次。单因素试验结果表明,加速度振幅和扫频速率对西瓜振动频谱影响显著,但检测点位置影响不显著。有交互作用的正交试验结果表明,在各参数组合中加速度振幅2.5 g、扫频速率1 000 Hz/min、阳面赤道检测点为较优的振动参数组合。本研究的结果为准确无损检测西瓜内部品质奠定了基础。

关键词: 西瓜 内部品质 无损检测 激光多普勒测振技术 影响因素分析

中图分类号: S2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)S0-0134-07

Analysis of Influence Factors of Watermelon Vibration Response

Gao Zongmei Zhang Wen Ren Mengjia Wu Hualin Cui Di
(College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The internal quality of watermelon is closely related to its vibration characteristics. As a representative of the non-contact vibration method, laser Doppler vibrometry technology can accurately measure the real vibration of agricultural tissue, so as to obtain the information of internal quality of the agricultural products. In this paper, the influence of vibration parameters on the watermelon vibration frequency response characteristics was firstly studied based on single factor experiments with the amplitude of acceleration, the frequency sweep rate and testing point of watermelon. Then, a interaction of multi-factor orthogonal experiment was conducted, which was performed by the laser Doppler vibrometry system based on the above factors and repeated three times at each parameter combination. The results of the single factor experiment indicated that the amplitude of acceleration and frequency sweep rate had significant effects on frequency spectrums, but the effect of testing point was not significant. The results of interaction of multi-factor orthogonal experiment showed that the optimal combination of the amplitude of acceleration, the frequency sweep rate and testing point for watermelon vibration measurement was 2.5 g, 1 000 Hz/min and the sunny side of the equator. The results laid a foundation for accurate nondestructive detection of internal quality for watermelon.

Key words: Watermelon Internal quality Nondestructive testing Laser Doppler vibrometry Influencing factors analysis

收稿日期: 2015-10-28 修回日期: 2015-11-08

^{*} 国家自然科学基金资助项目(31201132)、江苏省农产品物理加工重点实验室资助项目(JAPP2014-1)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015FZA6005)

作者简介: 高宗梅, 硕士生, 主要从事基于激光多普勒测振技术的西瓜内部品质检测研究, E-mail: gzm1660@163.com

通讯作者: 崔笛, 讲师, 博士, 主要从事农产品品质无损检测研究, E-mail: dicui@zju.edu.cn

引言

人们通常根据拍打西瓜发出的声音来判断西瓜的内部品质,但该方法依赖于个人的经验,常常会出现误判的情况。研究表明西瓜的内部品质与其振动特性密切相关^[1]。测量振动的传感器可分为接触式和非接触式两类。已报道的研究多采用接触式的传感器,其中应用最广泛的是加速度传感器。这种传感器直接附着于被测物体表面,但其自身的质量会对被测物体的振动产生影响,从而造成测量误差^[2]。相比之下,非接触式的传感器不会破坏被测物体原有的振动状态,测量精度较高。鉴于此,许多国内外的学者尝试利用激光多普勒测振仪和麦克风非接触地测量农产品的振动。激光多普勒测振技术(LDV)灵敏度高,动态响应快,对横向振动干扰不敏感,可以准确测量农产品组织的真实振动,而麦克风测量结果易受环境噪声的影响。因此,在过去 20 年中国外学者利用激光多普勒测振技术测量了众多农产品的振动响应,并据此准确判断了农产品的内部品质,如苹果^[3]、猕猴桃^[4-7]、柿子^[8]、西瓜^[9-10]等。

综上所述,目前直接应用激光多普勒测振技术检测农产品品质的报道较为常见,但对于农产品振动响应影响因素的研究较少。而准确测量农产品的振动响应是基于振动特性正确判断农产品内部品质的前提。因此,为了准确判断西瓜的内部品质,对影响西瓜振动响应的因素进行分析十分必要。本文利用激光多普勒测振技术,检测不同振动参数的西瓜振动响应,开展单因素和有交互作用的正交试验,研究各振动参数对西瓜振动响应的影响,筛选出较优的振动参数组合,以期为准准确检测西瓜内部品质奠定基础。

1 材料与方法

1.1 激光多普勒测振原理

振动可以用位移、速度、加速度和扫频速率等参数进行描述。激光多普勒测振技术测量的是物体的振动速度,其基本原理如图 1 所示^[11-12]。将频率为 f_0 的激光照射到振动物体上,从振动物体表面反射或散射回来的光会产生多普勒效应,即除了本身的激光频率 f_0 外还附加了一个频率 f_D (发射波频率与反射波频率之差),称之为多普勒频率,该频率与被测物体的振动速度之间的关系满足

$$f_D = \frac{2v\cos\theta}{\lambda}$$

式中 λ ——激光的波长

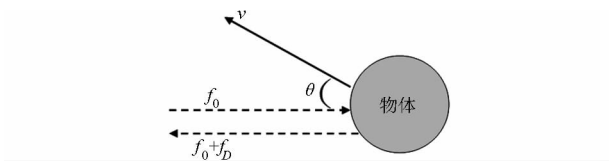


图 1 激光多普勒振动原理示意图
Fig. 1 Schematic of principle of laser Doppler vibrometry

v ——被测物体的振动速度
 θ ——入射光与被测物体振动方向的夹角

由于所使用的激光波长 λ 非常稳定,并且通常入射光与被测物体振动方向的夹角呈 0° ,因此多普勒频率 f_D 与被测物体振动速度 v 之间的关系可简化为

$$f_D = \frac{2v}{\lambda}$$

(2)

根据式(2)就可以获得被测物体的振动速度。

1.2 试验系统

如图 2 所示,试验中所使用的激光多普勒测振系统由振动发生机和振动控制器(ESS-05 型,苏州东菱振动试验仪器有限公司)、激光多普勒测振仪(LV-S01 型,舜宇仪器新加坡有限公司)、加速度传感器(752A 型,美国恩德福克公司)、功率放大器(PA-1200 型,苏州东菱振动试验仪器有限公司)、数据采集卡(NI USB-4431 型,美国国家仪器有限公司)和计算机 7 部分组成。振动发生机的驱动信号为 $0 \sim 10\text{ kHz}$ 经过功率放大的正弦扫频信号。加速度传感器用于测量振动发生机施加给被测物体的振动激励信号,激光多普勒测振仪用于测量被测物体的振动响应信号。振动激励信号和振动响应信号均由数据采集卡采集,并将它们保存在计算机中。在本研究中,振动激励信号采用正弦扫频信号,频率范围为 $0 \sim 1\text{ kHz}$ 。

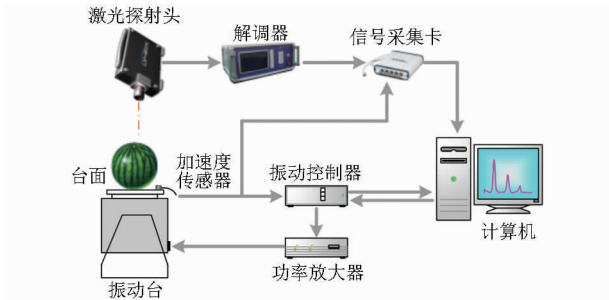


图 2 激光多普勒测振系统示意图
Fig. 2 Schematic diagram of laser Doppler vibration system

1.3 试验材料

试验材料为麒麟西瓜,采自浙江省杭州市郊区。在瓜农的帮助下,选取成熟度相同、大小和形状相似的麒麟瓜 17 个,编号 1~17。西瓜采摘后立即运回实验室,并在温度 20°C 、相对湿度 75% 的实验室环

境下存放 12 h,待其冷却后再开展试验,以剔除西瓜余温对试验结果的影响。

在振动响应测量之前,首先使用精度为 1 g 的电子秤和精度为 0.02 mm 的高度游标卡尺测量样本的物理参数,包括质量、纵径和横径,其中测量纵径时,以“瓜蒂-瓜柄”为轴线,间隔 120°测量 1 次,共测量 3 次,取平均值作为样本的纵径;测量横径时,沿着西瓜赤道部位,同样每间隔 120°测量 1 次,共测量 3 次,取平均值。测量结果显示,西瓜质量范围为 2 045 ~ 2 998 g,纵径范围为 15.12 ~ 17.88 cm,横径范围为 16.03 ~ 17.77 cm。

1.4 试验方法

1.4.1 系统重复性试验

系统的重复性是确保所有试验数据正确的前提^[13]。所以在分析振动参数对振动响应的影响之前,需要对系统的重复性进行检测。

系统的重复性是指由同一评价人使用同一测量仪器对同一试验样本的同一特性进行多次重复测量时获得的测量值变差^[14]。为检测系统的重复性,在设置振动激励信号的参数时,低频段将其设置为振动位移幅度(简称定位移)一定的正弦扫频信号,高频段设置为加速度振幅一定(简称定加速度)的正弦扫频信号。另外,也需要设置正弦扫频信号的扫频速率,即在扫频过程中频率对时间的变化率。这是因为正弦扫频方式必须确保在每一个离散频率点上都让系统进入稳态^[15],使其行为特点得到充分的暴露,才能准确获得在该离散频率下系统的响应。与此同时,西瓜在振动扩展台上的检测点也会对系统的稳定性产生影响。本文通过多因素正交重复试验,分析不同水平定加速度、扫频速率和西瓜检测点下的系统重复性。

为了设置合理的加速度水平,首先计算激光多普勒测振系统检测西瓜品质的最大加速度。由于 ESS-05 型振动控制器的额定激振力 $F=500\text{ N}$,运动部件质量 $m=1.7\text{ kg}$,夹具即振动扩展台的质量为 2.7 kg,试件即西瓜质量定为西瓜质量的上限值 10 kg,所以 $M=12.7\text{ kg}$,根据公式

$$a_{\max} \leq \frac{F}{M+m}$$

(3)

式中 M ——试件夹具等质量

$a_{\max}$ ——最大加速度

及各变量值得最大加速度为 5.32 g ($g=9.8\text{ m/s}^2$),为防止西瓜振动时在振动扩展台面上发生移动,低频段定位移选择其工作范围的较小值 0.5 mm,高频段定加速度水平设置在最大加速度之内,当定加速度设置为 4.0 g 时,实验室噪声已达 92 dB,而 90 dB

以上就会使听力受损。所以试验时,为了试验人员的身体健康以及不损耗试验系统,定加速度最大值设为 3.5 g。低频段和高频段的交界频率计算式为

$$a=(2\pi f)^2d$$

(4)

式中 f ——交界频率 d ——定位移

a ——定加速度

定加速度、扫频速率设置在工作范围,因此定加速度取 0.5 g、1.5 g、2.5 g、3.5 g 水平;扫频速率取 500、1 000、1 500、2 000 Hz/min 水平。西瓜自然生长过程中着地面未接触阳光,瓜皮呈现白色,可据此将西瓜分为阴面和阳面,所以沿赤道线在阴面和阳面各取一个检测点,标号分别为 1 和 2,瓜蒂和瓜柄部位各选一个检测点,标号分别为 3 和 4。运用 SPSS (IBM SPSS Statistics 20) 软件生成正交试验表,共有 16 组参数组合。试验时,选用 1 ~ 7 号西瓜作为试验样本,西瓜按照组合下的检测点而放在振动扩展台上,激光垂直照射在检测点上。在每组参数组合下重复测量 3 次,然后采用上文所述的方法对系统的重复性进行分析。

1.4.2 振动响应影响因素试验

为了选取影响因素的较优工作水平,设置不同水平的定加速度、扫频速率和检测点来进行单因素试验。试验的定加速度取值、扫频速率取值和检测点位置与系统重复性试验相同。

交互作用是指因素间的联合搭配对试验指标的影响作用^[16],所以在正交表中有相应的列,称为交互作用列。交互作用列不能随意安排,一般通过两种方法:查所选的正交表对应的交互作用表;直接查对应正交表的表头设计表。本试验中采用第 1 种方法^[17-18]。根据单因素试验分析结果,对以上因素和水平进行有交互作用的 3 因素 3 水平正交重复试验,每个参数组合重复 3 次。其中,定加速度 A 3 个水平分别是 0.5 g、1.5 g、2.5 g;扫频速率 B 3 个水平分别是 500、1 000、1 500 Hz/min;检测点位置 C 3 个水平分别是阳面赤道、瓜蒂、瓜柄。

1.5 试验数据分析方法

1.5.1 系统重复性的分析

应用差异系数 D 作为评判系统重复性的指标^[19],具体分析步骤如下:计算每种参数组合下 3 条振动响应波谱两两之间的相关系数(r_{y1y2} 、 r_{y1y3} 和 r_{y2y3})。代入公式

$$D_{y1y2}=1\,000(1-r_{y1y2})$$

(5)

计算差异系数 D_1 、 D_2 和 D_3 ,取它们的平均值作为每组参数组合的平均差异系数 $\overline{D}$ 。16 组参数组合的 $\overline{D}$ 的平均值作为每个样本的差异系数。

差异系数的范围是 0 ~ 2 000,数值越小,波谱的

重复性越好。0 代表两条波谱完全重合;1 000 代表两条频谱几乎没有相关关系;2 000 代表两条波谱完全没有相关关系。当差异系数在 50 以内时说明频谱的重复性非常好。

1.5.2 西瓜振动响应的分析

通过计算信噪比对西瓜振动响应进行分析^[20]。典型的西瓜振动频谱如图 3 所示。大致可分成 a、b、c 3 段。a 段(0 ~ 100 Hz)为信号前段,信号噪声较大,该段幅值的标准差定义为信号的噪声;b 段(100 ~ 500 Hz)为主要信号段,集中了信号的绝大部分能量,可将该段的最大峰值定义为有用信号;c 段(500 ~ 1 000 Hz)为信号衰减部分,能量较少。信噪比为 b 段最大峰值与 a 段幅值的标准差之比。

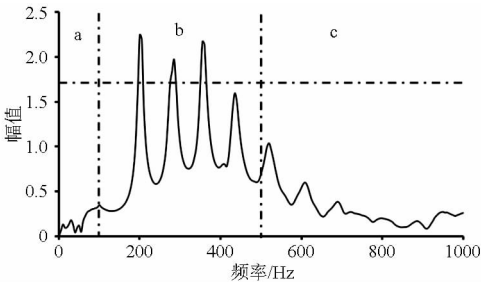


图 3 典型西瓜振动频谱

Fig.3 Typical watermelon spectrum measured by LDV

2 分析与结果

2.1 系统重复性

编号 1 ~ 7 样本的差异系数如表 1 所示。结果表明,7 个样本的差异系数都在 50 以内,说明波谱的重复性非常好,即激光多普勒测振系统重复性非常好。

表 1 7 个样本的差异系数 D

Tab.1 Difference coefficients of seven samples

样本编号							
	1	2	3	4	5	6	7
均值	23.5	23.3	27.9	17.9	18.7	20.9	41.9

2.2 单因素试验

扫频速率和检测点位置分别为 1 000 Hz/min 和阳面赤道,研究定加速度对西瓜振动响应的影响。定加速度分别设置为 0.5 g、1.5 g、2.5 g、3.5 g。通过单因素试验方差分析来分析影响因素的显著性,分析工具为 SPSS(IBM SPSS Statistics 20)软件。定加速度方差分析结果如表 2 所示。由表可知,组间 P 值为 0.001,因此定加速度对西瓜振动响应在 $\alpha = 0.01$ 水平上影响显著。信噪比越大说明有用信号越多,所以定加速度下某个水平的信噪比越大说明这个水平对于西瓜振动响应的测量越优。经过计

算,定加速度在上述水平下的信噪比分别为 22.5、28.6、29.6、20.3,其中定加速度为 2.5 g 时信噪比最大,因此 2.5 g 是定加速度的较优水平。

表 2 定加速度单因素方差分析结果

Tab.2 Results of single factor variance analysis of amplitude of acceleration

	平方和	自由度	均方	F 值	显著性
组间	369.7	3	123.2	9.0	0.001
组内	275.3	20	13.8		
总数	645.0	23			

将定加速度设置为较优水平 2.5 g,扫频速率分别设置为 500、1 000、1 500、2 000 Hz/min,通过方差分析研究扫频速率对西瓜振动响应的影响,结果如表 3 所示。由表可知,组间 P 值为 0.026,因此扫频速率对西瓜振动响应在 $\alpha = 0.05$ 水平上对于频谱图信噪比影响显著。经计算,扫频速率在上述水平下的信噪比分别为 30.3、30.2、33.4、30.1,其中扫频速率为 500 Hz/min 时信噪比最大,这说明 500 Hz/min 是扫频速率的较优水平。

表 3 扫频速率单因素方差分析结果

Tab.3 Results of single factor variance analysis of frequency sweep rate

	平方和	自由度	均方	F 值	显著性
组间	94.7	3	31.6	3.8	0.026
组内	166.4	20	8.3		
总数	261.1	23			

将定加速度和扫频速率分别设置为较优水平的 2.5 g 和 500 Hz/min,研究西瓜检测点位置对西瓜振动响应的影响。检测点位置分别选取西瓜的阴面赤道、阳面赤道、瓜蒂和瓜柄。单因素方差分析结果如表 4 所示。结果表明,组间 P 值为 0.470,所以检测点位置对西瓜振动响应影响不显著。但检测点位置在上述水平下的信噪比分别为 22.5、28.6、29.6、20.3,其中检测点位置为瓜蒂时信噪比达到最大值,因此检测点位置较优水平是瓜蒂。

表 4 检测点位置单因素方差分析结果

Tab.4 Results of single factor variance analysis of testing point

	平方和	自由度	均方	F 值	显著性
组间	47.4	3	15.8	0.90	0.470
组内	360.1	20	18.0		
总数	407.5	23			

2.3 有交互作用的多因素正交试验

通过正交重复试验方差分析来分析影响因素的显著性,挑选最优参数组合^[21]。由表 5 可知,定加

根据表 6 知较优组合为 $B_2C_1A_3$,即定加速度 2.5 g 、扫频速率 $1\,000\text{ Hz/min}$ 、检测点位置为阳面赤道位置。与单因素试验相比,检测点位置由瓜蒂部位转换到阳面赤道部位变化较大,可能是由于西瓜赤道部位与振动扩展台接触面积更大,使西瓜质量比较均匀的分布在振动扩展台中间部位,减少了激光多普勒测振系统的横向振动,并且与西瓜生长过程的姿态保持一致。

3 验证试验

为了验证较优参数组合的科学性与合理性,选取上述试验中效果较好的试验条件做重复试验。选取 14~17 号西瓜并以表 6 中的试验数据为依据,选取试验号 10、13、19、22、23、24 参数组合的试验条件做 3 次重复试验,试验结果如表 7 所示。

表 7 验证试验数据
Tab.7 Verification test data table

定加速度 <i>A</i>	扫频速率 <i>B</i> /($\text{Hz}\cdot\text{min}^{-1}$)	检测位置 <i>C</i>	信噪比
1.5 <i>g</i>	500	阳面赤道	34.6
1.5 <i>g</i>	1 000	阳面赤道	34.4
2.5 <i>g</i>	500	阳面赤道	37.3
2.5 <i>g</i>	1 000	阳面赤道	38.35
2.5 <i>g</i>	1 000	瓜蒂	32.9
2.5 <i>g</i>	1 000	瓜柄	28.2

由表 7 可知,试验参数为定加速度为 2.5 g 、扫频速率为 $1\,000\text{ Hz/min}$ 、检测位置为阳面赤道时西瓜的信噪比最大,所以此试验参数为较优工作参数,与正交试验分析结果一致,证明了正交试验的准确性。

4 结论

(1)提出用差异系数 D 评价激光多普勒测振系统的重复性。结果表明,各试验样本的 D 值都在 50 以内,证明本研究中所使用的激光多普勒测振系统具有很高的重复性。

(2)从单因素试验结果得知,定加速度和扫频速率对西瓜振动频谱影响显著,较优水平分别是 2.5 g 和 500 Hz/min 。虽然检测点位置单因素方差分析结果对于系统不显著,但是检测点为瓜蒂时,西瓜振动频谱的信噪比最大。

(3)从有交互作用的多因素正交重复试验的方差分析结果得知,3 个因素对于试验系统在 $\alpha=0.05$ 水平上均影响显著,交互作用影响较小;极差分析结果得到较优组合为:定加速度 2.5 g 、扫频速率 $1\,000\text{ Hz/min}$ 、阳面赤道检测点,与验证试验结果一致。此试验结果为准确无损检测西瓜内部品质提供了依据。

参 考 文 献

1 崔笛,张文,应义斌. 激光多普勒测振技术在农产品品质检测中的应用[J]. 农业机械学报,2013,44(7):160-164.
Cui Di, Zhang Wen, Ying Yibin. Application of laser Doppler vibrometer technology in nondestructive detection of agro-product quality[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 160-164. (in Chinese)

2 Mitsuru Taniwaki, Naoki Sakurai. Evaluation of the internal quality of agricultural products using acoustic vibration techniques [J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 2010, 79(2): 113-128.

3 Motomura Y, Nagao T, Sakurai N. Nondestructive and noncontact measurement of flesh firmness of 6 apple cultivars by laser dopplar vibrometer (LDV) [J]. Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology, 2004, 51(9): 483-490.

4 Terasaki S, Wada N, Sakurai N, et al. Nondestructive measurement of kiwifruit ripeness using a laser Doppler vibrometer [J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(1): 81-87.

5 Terasaki S, Sakurai N, Yamamoto R, et al. Changes in cell wall polysaccharides of kiwifruit and the visco-elastic properties detected by a laser doppler method [J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 2001, 70(5): 572-580.

6 Noboru Muramatsu, Naoki Sakurai, Naoki Wada, et al. Evaluation of fruit tissue texture and internal disorders by laser Doppler detection [J]. Postharvest Biology and Technology, 1999,15(1): 83-88.

7 Noboru Muramatsuet, Naoki Sakurai, Naoki Wada, et al. Remote sensing of fruit textural changes with a laser Doppler vibrometer [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2000,125(1): 120-127.

8 Taniwaki M, Hanada T, Sakurai N. Postharvest quality evaluation of “Fuyu” and “Taishuu” persimmons using a nondestructive vibrational method and an acoustic vibration technique[J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 51(1): 80-85.

9 Cui Di, Gao Zongmei, Zhang Wen, et al. The use of a laser doppler vibrometer to assess watermelon firmness[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 112: 116-120.

10 Rouzbeh Abbaszadeh, Ali Rajabipour, Mohammad Mahjoob, et al. Evaluation of watermelons texture using their vibration responses[J]. Biosystems Engineering, 2013, 115(1): 102-105.

11 刘金凤. 激光多普勒参考光检波技术的研究[D]. 天津:天津大学, 2004.
Liu Jinfeng. Study on the technology of laser Doppler reference demodulation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese)

12 吕宏诗,刘彬. 激光多普勒测振技术的最新进展[J]. 激光技术,2005,29(2):176-179.

- Lü Hongshi, Liu Bin. Latest development of laser Doppler technique in vibration measurement[J]. Laser Technology, 2005, 29(2): 176 – 179. (in Chinese)
- 13 周波. 测量系统分析在质量检测中的应用[D]. 北京:华北电力大学, 2012.
Zhou Bo. Measurement system analysis's application in quality detection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012. (in Chinese)
- 14 朱华盛. 系统误差的来源及其消除方法[J]. 湛江师范学院学报:自然科学版,1994(1):111 – 114.
Zhu Huasheng. The source of the system error and its elimination method [J]. Journal of Zhanjiang Teachers' College: Natural Science, 1994(1): 111 – 114. (in Chinese)
- 15 杨巍. 多输入多输出正弦扫频试验控制方法研究与实现[D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.
Yang Wei. Research on implementation of an algorithm for MIMO sine swept-frequency test control system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- 16 Yang W H, Tarn Y S. Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 84(1 – 3): 122 – 129.
- 17 Marti J Anderson. A new method for non-parametric multivariate analysis of variance[J]. Austral Ecology, 2001, 26(1): 32 – 46.
- 18 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- 19 Mouwen D J M, Hörman A, Korkeala H, et al. Applying fourier-transform infrared spectroscopy and chemometrics to the characterization and identification of lactic acid bacteria[J]. Vibrational Spectroscopy, 2011, 56(2): 193 – 201.
- 20 李萌,何明霞,田震. 太赫兹时域频谱信噪比分析与规范性研究[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(3):606 – 609.
Li Meng, He Mingxia, Tian Zhen. Studies on signal-to-noise ratio standardization for THz time-domain spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(3): 606 – 609. (in Chinese)
- 21 李志西,杜双奎. 试验优化设计与统计分析[M]. 北京:科学出版社,2010.
- 22 肖怀秋,刘洪波. 试验数据处理与试验设计方法[M]. 北京:化学工业出版社,2013.