

机械式模拟运输台仿真研究

杨森, 吴斌, 郑旸

(西北工业大学, 西安 710072)

摘要: 模拟运输振动试验台作为一种机械式随机振动模拟器,能够较好地再现汽车运输振动环境。针对模拟运输台在调试、使用时具有一定盲目性的问题,进行了运动学仿真。仿真结果与实测数据吻合良好,验证了模型建立的正确性,调整模拟运输台上可变参数进行一系列的仿真,总结这些参数对于最终结果影响的规律。仿真结果表明,模拟运输台的台面振动由系统自激振动和凸轮带动台面强迫振动复合而成;台面上功率谱密度的第一主峰主要和系统的自激振动有关,第二主峰主要和凸轮带动台面的强迫振动有关。

关键词: 运动学仿真; 功率谱密度; 模拟运输台; 随机振动

中图分类号: U467.5 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2012)05-0106-06

Simulation Research of the Mechanical Simulation of Transport Vibration Test Stand

YANG Sen, WU Bin, ZHENG Yang

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: As a mechanical random vibration simulator, simulation of transport vibration test stand can well reproduce the vibrational condition of automobile transportation. However, there are some confusion in the process of debugging and using the simulation of transport vibration test stand. In order to avoid these problems, kinematic simulation was carried out. The simulation results and experimental data coincide well to verify the correctness of the model. A series of simulations were carried out to summarize the influencing rule of these parameters on final result. Simulation results showed that the vibration of stand face consists of system's self-excited vibration and the forced-vibration of the stand face driven by the cam, the system's self-excited vibration mainly affects the first peak, while the forced-vibration of the stand face driven by the cam mainly affects the second peak.

Key words: kinematic simulation; power spectral density; simulation of transport vibration test stand; random vibration

产品在公路运输过程中,不可避免会产生一些专门的运输夹具,以降低产品在运输过程中遭受颠簸。为了克服颠簸对产品可能造成的损伤,设计阶段预留一定的动强度设计裕度之外,还可以设计是必要的,根据试验环境不同,检验方式包括实际道

收稿日期: 2012-05-25

作者简介: 杨森(1989—),男,陕西人,硕士研究生,主要研究方向为飞行器结构设计。

路试验、汽车验证场试验、实验室模拟试验^[1]。实验室模拟试验由于其便捷性和操作性强的特点已经得到广泛使用。实验室模拟试验主要使用的设备包括电动振动台、液压振动台、模拟道路运输试验台(即机械式模拟运输台)。机械式模拟运输台具有操作简便、易于控制、可靠性高、维护成本低等优点,所以在模拟运输试验中得到广泛使用。

机械式模拟运输台模拟振动具有较大的随机性和不可预测性,目前没有相关文献对模拟运输台的参数调整进行研究,使得模拟运输台在调试和使用过程中有很大的盲目性。一旦需要模拟不同的路面状况,试验不同质量的产品,只能根据经验进行调整,效率很低,有时很难调整到试验技术条件要求。因此研究模拟运输台可调参数的变化规律对结果的影响是非常必要的。

文中建立了机械式模拟运输台的运动仿真模型,通过仿真研究,得出模拟运输台可变参数对最终输出结果的影响规律。

1 模拟运输试验标准

大量的测量数据和研究表明,路面不平度在数学上属于各态历经的平稳随机过程,随机过程没有明确变化形式,是不能用确定函数来描述的一种变化过程,却具有一定的统计规律。中国航天工业总公司制定了产品公路运输模拟试验标准 QJ/T 815.1—94,标准规定模拟运输台输出为加速度功率谱密度,试验标准值见表1。

表1 模拟运输试验标准

Table 1 Standard of the transport simulation test

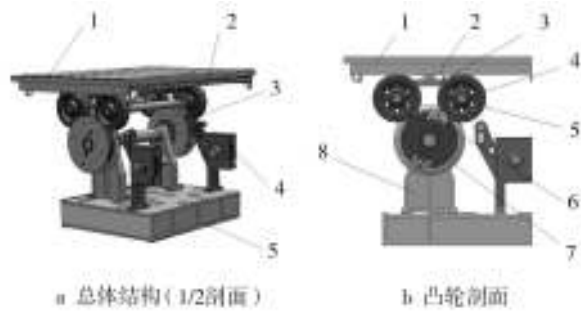
说明	测量项目	标准值	容差值
加速度功率谱密度图上第一个主峰对应的频率	f_1/Hz	3.5	$\pm 1 \text{ Hz}$
加速度功率谱密度图上第二个主峰对应的频率	f_2/Hz	9.0	$\pm 2 \text{ Hz}$
对应 f_1 的加速度功率谱密度	$G_1/(g^2 \cdot \text{Hz}^{-1})$	0.0208	$\pm 3 \text{ dB}$
对应 f_2 的加速度功率谱密度	$G_2/(g^2 \cdot \text{Hz}^{-1})$	0.0220	$\pm 3 \text{ dB}$
0~400 Hz内加速度均方值	σ^2/g^2	0.228	$\pm 2 \text{ dB}$

机械式模拟运输台模拟的路面为公路工程技术标准 JTJ 01 规定的三级公路中级路面与四级公路中、

低级路面。三、四级公路主要供汽车行驶的双车道或单车道,是我国公路标准中条件最为恶劣的公路。

2 模拟运输台仿真模型的建立^[2-5]

机械式模拟运输台结构如图1所示。工作原理是利用一个电机,通过变速箱变速后,带动4个带凸轮的轮毂以不同的转速转动。台面下部同样位置安装4组滚轮,4组滚轮和台面之间用板簧连接,模拟汽车箱体的4个弹性支撑方式。台面上部的滚轮由轮毂驱动,由于每个支撑点凸轮的位置不同,使得台面随轮毂的旋转做上下颠簸运动,模拟路面不平产生的运输振动环境。台面由多组安装在箱体上的弹簧预拉紧,箱体和台面共同组成一个振动系统,在激励的同时,使得振动系统本身也产生强迫振动,和台面的激励运动合成一个复合振动。箱体上可以安装配质量,通过调整弹簧的刚度和系统的质量可以调整系统的固有频率;通过调节电机的转速改变激励的频率,使合成的振动满足标准的要求。



a1.台面;a2.滚轮;a3.带凸轮的轮毂;a4.减速机构;a5.箱体;b1.台面;b2.台面框架;b3.板簧;b4.橡胶轮;b5.橡胶轮毂;b6.可调式凸台;b7.凸轮端盖;b8.凸轮座

图1 模拟运输台结构

Fig. 1 Structure of the transport vibration simulation test stand

凸轮机构作为产生振动的主要部分,在模型中采用 IMPACT 函数模拟凸轮机构之中部件的接触,根据 ADAMS 推荐的不同材料之间的接触参数进行设置。凸轮机构接触部分的凸台以及凸轮轮毂材料为钢,与之接触的为橡胶轮。设置参数时参考橡胶与钢的接触参数,设置的主要参数:接触模式为 solid to solid;接触刚度为 2855 N/mm;接触指数为 1.1;阻尼系数为 0.1 N·s/mm;接触距离为 0.1 mm;摩

擦模式选择库仑摩擦模型;静摩擦系数为0.3;动摩擦系数为0.25;静摩擦速度为0.1 mm/s;动摩擦速度为10 mm/s。台面下部的板簧对于缓冲有较大的作用,在建立板簧模型时进行了柔性化处理。利用ADAMS中的AUTOFLEX模块生成板簧的模式中性文件(MNF)导入仿真模型。凸轮根据实际的布置,带凸轮的轮毂直径为410 mm,滚轮直径为150 mm。仿真模型中去掉减速机构和电机,按照不同的减速比设置4个凸轮的转速。底部沙箱与外部箱体之间连接的弹簧直接使用ADAMS中的SPRING。建立仿真模型如图2所示。

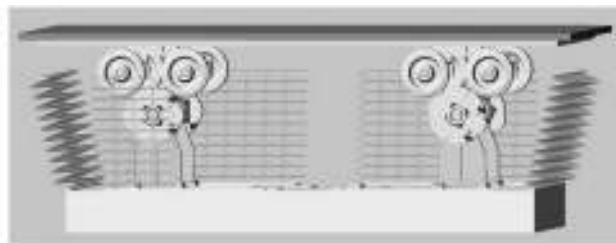


图2 模拟运输台仿真模型

Fig. 2 Simulation model of the test stand

3 仿真分析^[6-8]

3.1 仿真模型的验证

采用某2000 kg运输模拟试验台为仿真模型,由于对系统仿真模型进行了诸多简化,特别是在凸轮和滚轮接触处采用了IMPACT函数进行模拟,接触模型的选择对仿真结果有较大的影响,因此必须先进行模型的验证。通过反复调整各参数,选定的仿真参数如下。

- 1) 弹簧84根,刚度为10.3822 N/mm;
- 2) 电机的输出转速为1400 r/min;
- 3) 板簧弹性参数:板簧材料为普通钢,弹性模量为207 GPa,泊松比为0.29,密度为 $7.08 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

仿真数据和实测数据对比如图3所示。典型加速度功率谱值见表2。

由表2可知,试验数据与仿真数据之间相对误差不超过5%,仿真模型较真实地反映了实际模型。

采用以上验证模型,研究电机转速、连接弹簧刚度和分布、负载的大小、板簧材料参数的变化对模拟

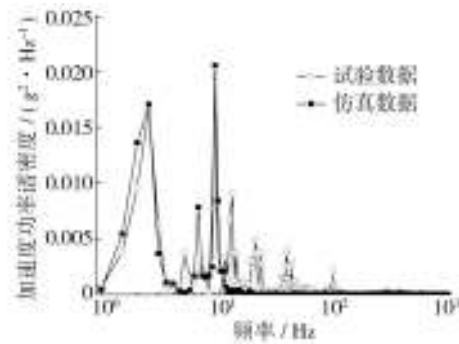


图3 仿真数据和实测比较

Fig. 3 Comparison of the result from simulation and measurement

表2 仿真结果与试验值对比

Table 2 Comparison of the result from simulation and measurement

	f_1/Hz	$G_1/(g^2 \cdot \text{Hz}^{-1})$	f_2/Hz	$G_2/(g^2 \cdot \text{Hz}^{-1})$	σ^2/g^2
试验值	2.5	0.016 68	9.0	0.019 53	0.2190
仿真值	2.5	0.017 05	9.0	0.020 54	0.2040

运输台加速度功率谱密度的影响。由于振动主要集中在低频部分,调整参数影响的主要是振动能量的分布,对最终积分得到的均方值影响并不大,仿真中并没有列出加速度均方值的变化。

3.2 电机转速变化

电机转速(滚毂转速)从600~1500 r/min变化时,其谱密度的频率和幅值随转速变化的曲线如图4,5所示。

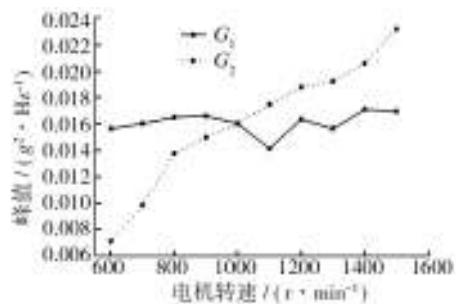


图4 频率随转速变化的曲线

Fig. 4 Relation between frequency and rotary speed

当转速增加时, f_1, G_1 基本保持不变,而 f_2 呈上升趋势。这是因为台面振动的第二主峰受凸轮机构带动台面振动的影响,当电机的输出转速提高,对应的频率必然上升。凸台与台面接触时产生的接触力变

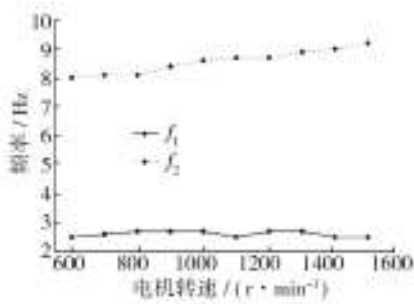


图5 幅值随转速变化的曲线

Fig. 5 Relation between amplitude and rotary speed

大,所以第二主峰对应峰值 G_2 呈上升趋势。

3.3 连接弹簧刚度变化

仿真的弹簧刚度范围为设计刚度的 $\pm 20\%$ 。其谱密度的频率和幅值随刚度变化的曲线如图6,7所示。

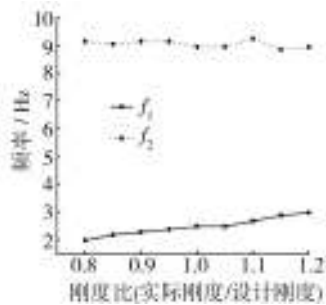


图6 频率随刚度变化的曲线

Fig. 6 Relation between frequency and stiffness

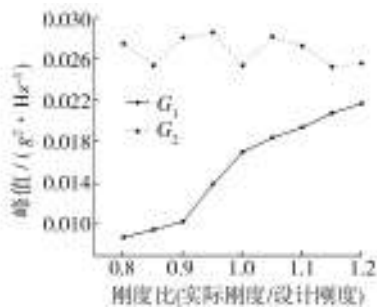


图7 幅值随刚度变化的曲线

Fig. 7 Relation between amplitude and stiffness

当弹簧刚度上升,系统的固有频率上升, f_1 呈上升趋势,系统对于相同位移激励的响应增加,加速度幅值 G_1 增加。但是并没有对凸轮机构产生影响, f_2 , G_2 变化较小。

3.4 台面质量变化

在台面上固定一个尺寸为1200 mm × 2000 mm × 1000 mm的钢制长方体,改变长方体质量进行仿真。负载质量从0~2000 kg变化时其谱密度的频率和幅值随转速变化的曲线如图8,9所示。

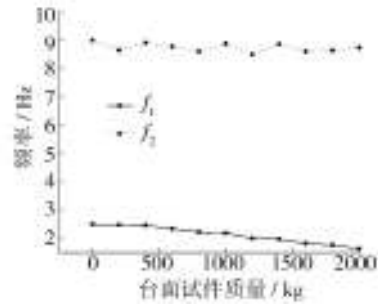


图8 频率随负载变化的曲线

Fig. 8 Relation between frequency and load

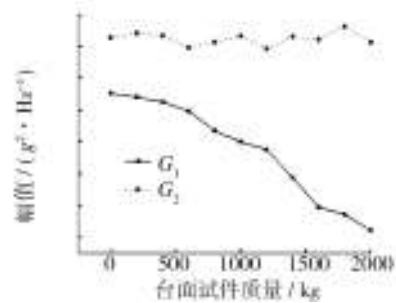


图9 幅值随负载变化的曲线

Fig. 9 Relation between amplitude and load

当振动系统的质量增加,系统的固有频率下降,所以 f_1 呈下降趋势,同3.3节中的结论类似,系统的固有频率降低,负载增加,振动幅值较小,对应加速度峰值 G_1 变小。

3.5 板簧材料参数变化

改变板簧使用材料的模量(并不考虑该材料存在的真实性,只是研究其变化对结果的影响),其谱密度的频率和幅值随刚度变化的曲线如图10,11所示。

当板簧的弹性模量变大时,台面对于底部产生的振动响应变小, G_2 呈下降趋势,对 f_2 没有影响。

3.6 挂簧分布变化

模拟运输台连接底部沙箱的挂簧是对称分布在底部沙箱的四周,调整转动轴两侧弹簧(结构图中的

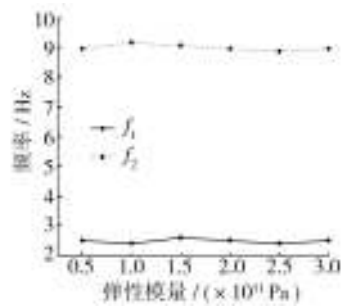


图10 频率随板簧材料参数变化的曲线

Fig. 10 Relation between frequency and elastic modulus

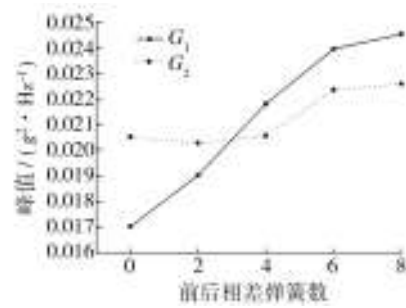


图13 幅值随挂簧分布变化的曲线

Fig. 13 Relation between amplitude and distribution of spring

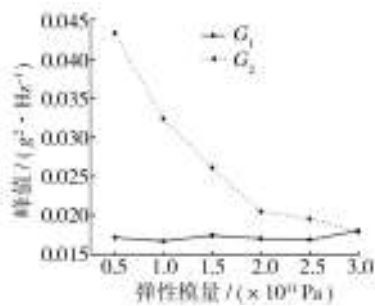


图11 幅值随板簧材料参数变化的曲线

Fig. 11 Relation of amplitude and elastic modulus

前后两侧)的分布,把后侧的弹簧装配在前侧,其仿真结果如图12,13所示。

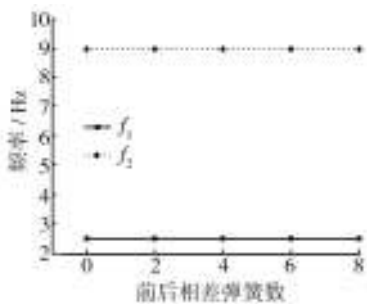


图12 频率随挂簧分布变化的曲线

Fig. 12 Relation between frequency and distribution of spring

改变挂簧的分布,系统竖直方向的总刚度并没有发生改变,所以 f_1, f_2 没有变化。挂簧的分布不平衡改变使得台面振动加强,所以 G_1 呈上升趋势。

4 结论

1) 台面上功率谱密度的第一主峰主要和系统的自激振动有关,第二主峰主要和凸轮带动台面的

强迫振动有关。

2) 当 f_1, G_1 不符合输出标准时,调整弹簧刚度,或者调整运输台配质量。 f_1 初步调整时可采用 $f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ 计算,再根据上述的变化趋势进行精确调整。 G_1 的变化趋势和 f_1 变化相同,调整方法也类似。

3) f_2, G_2 不符合输出标准时,调整电机的输出转速。转速越高,对应频率 f_2 增大,峰值 G_2 增大。

4) 如果最终计算的频率 f_1, f_2 符合要求,但是峰值 G_1, G_2 不符合要求。可通过调整挂簧分布调整 G_1 ,调整板簧的刚度调整 G_2 。

5) 机械式模拟运输台产生的振动是系统振动和凸轮带动台面产生的强迫振动的复合,两者之间具有较强的耦合性,总结的调整方法只是反映了输出参数的变化趋势,具有一定的理论指导意义。在实际工程应用中,可以通过改变电机转速、负载质量等方法得到不同的测试数据,进行分析和归纳,得出相应的变化规律。

参考文献:

- [1] 汪斌. 道路模拟试验台路面不平度再现方法研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.
- [2] 岳喜磊,王红岩. 基于整车刚柔耦合动力学模型的悬架典型部件结构强度分析[C]// MSC Software 虚拟产品开发(VPD)中国用户大会,2007.
- [3] 谢淑芳,刘强. 高性能XY工作台的MSC.ADAMS刚柔耦合建模及动态性能分析[C]// MSC Software 用户论文集,2005:159.
- [4] 刘义翔,高德,刘晔. 基于ADAMS软件瓦楞纸板缓冲性能的动力学仿真研究[J]. 包装工程,2002,23(4):127-129.

- [5] 明波,杨洁,贾进峰.基于三维路面谱仿真履带车辆振动系统的动态模拟[J].装备环境工程,2011,8(2):85—88.
- [6] 易当祥,吕国志,张弛.随机路面激励下车载无人机的载荷响应与仿真[J].飞机设计,2004(3):21—24.
- [7] SCHIEHLEN W,HU B. Spectralsimulation and Shock Absorber Identification[J]. International Journal of Non-linear Mechanics,2003,38(2):161—171.
- [8] ROBSON J D. Road Surface Description and Vehicle Response[J]. International Journal of Vehicle Design, 1979, 1(1):25—35.

(上接第11页)

明加固玻璃与显示屏之间密封不好。

3) 6台样机出现腐蚀情况:显示屏表面玻璃下方出现大量斑点,插头垫片出现白色腐蚀,铜螺钉局部出现灰色腐蚀,后盖板出现较多灰色腐蚀,铭牌上出现气泡,螺钉垫片出现红锈,插头标识模糊,表面玻璃下方出现较多斑纹等等,腐蚀情况较为普遍和严重。这说明选材、工艺涂层等方面还需加强。

4) 1台样机开机有控制面板按键失灵现象,2台样机试验后开机“加热”灯亮。分析结果是按键开关和温度传感器不适应潮湿环境,未对其进行防潮设计。

3.4 对盐雾环境的适应能力分析

1) 盐雾试验后,1台样机无法通电工作,盐沉积影响了样机的电气性能,显示器密封不好造成样机故障现象的产生。

2) 9台样机全部出现不同程度的腐蚀情况:大部分螺钉出现锈蚀(红锈、铜锈绿等);有的前面板背面出现黑色腐蚀,面积约占10%;铭牌上出现黑色腐蚀,面积约占20%;部分螺钉根部由于电解作用而导致涂层起泡;2台样机表面屏幕玻璃出现发花(有的面积达到40%)现象等等。说明加固液晶显示器在防盐雾腐蚀方面还有许多工作要做,这也与装备实际使用情况相似。

3.5 各样机的环境适应性分析

从表1和第2.2节的故障数据统计来看,3#样机对每一种环境均不能适应,出现9次故障(占故障总数33.3%),完全不能适应军用装备的要求;5#未发生任何故障;2#和7#各发生1次故障,1#和8#各发生2次故障,基本能适应环境要求;4#,6#和9#各发生4次故障,需改进。

从上面的分析以及第2.2节的数据统计情况来

看,湿热环境对液晶显示器的影响较大,使用的环境应力为30℃/60℃温度交变,相对湿度为95%的10个周期湿热试验。此条件相对较为严酷,许多机载设备也在剪裁使用(降低60℃高温指标),但它可以重现湿热环境对装备的主要影响,并且可能诱发长期环境效应产生的故障,对于可能工作于高温高湿环境的地面电子设备来说,使用该条件是合适的,但需要生产厂家在湿热防护方面,做更深层次的工作。

4 结论和建议

比对试验结果说明,多数厂家生产的加固液晶显示器能在恶劣环境下工作,但普遍存在对湿热、盐雾环境适应能力不强的问题,经过总结分析得出以下结论。

1) 加固液晶显示器的低温局部加热技术已趋于成熟。军用地面设备的低温工作温度一般要求-40℃,考虑LCD的特殊性,其低温工作温度为-20℃,从试验结果来看,可以探讨研制更宽温度范围的加固液晶显示器。

2) 防腐选材、涂层工艺有待进一步改进。在低温、高温、湿热、盐雾试验后,腐蚀情况较为普遍和严重,需要在材料选择、工艺涂层等方面改进。

3) 应普及新装备的环境应力筛选。振动及温度试验的故障,可通过环境应力筛选进行早期剔除,在军品的采购中,应要求产品出厂时进行100%环境应力筛选,消除早期故障。

4) 环境防护设计还需进一步加强。如需考虑低温条件下材料变形、湿热条件材料绝缘、器件的隔湿防湿等问题。

参考文献:

- [1] GJB 150—1986,军用设备环境试验方法[S].
- [2] 张彩先,蒋晓彦,孙艳,等.直升机东南沿海地区环境适应性研究[J].装备环境工程,2009,6(1):66—70.