车载精密光电设备平顺性试验研究

李冬伟',任国全',郑鹏翱²,李本'

(1. 军械工程学院, 石家庄 050003; 2. 中国人民解放军63863部队, 吉林 白城 137001)

摘要:对某车载光电探测设备进行了平顺性试验研究。根据该光电设备的结构特点和性能要求,在旋转机座、俯仰转台和红外望远镜上选取3个测点,经试验得到了这3个测点在不同路况、不同车速情况下的加速度数据。通过对试验数据的整理,得出光电探测仪不同部位及整机的振动强度随车速变化曲线,为车载光电平台的减、隔振设计提供参考。

关键词: 平顺性试验; 振动测试; 车载光电设备 中图分类号: U461.4; TJ810.3⁺76 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2013)02-0056-06

Study on Riding Comfort of Vehicle-mounted Precise Photoelectric Device

LI Dong-wei¹, REN Guo-quan¹, ZHENG Peng-ao², LI Ben¹
(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;
2. No.63863 Troops of the PLA, Baicheng 137001, China)

Abstract: The riding comfort test of vehicle-mounted photoelectric device was carried out. According to the construction characteristic and performance requirement of the photoelectric device, three different measuring points were selected in the rotated base, pitch table, and infrared telescope. The acceleration response data of different measuring points were collected with different road condition and different vehicle speed. Changing curves of vibration strength with speed of different points and complete system of the photoelectric device were obtained, which provide reference data for damp design of photoelectric device platform.

Key words: riding comfortable test; vibration measurement; vehicle-mounted photoelectric device

大口径红外望远镜是对各种飞行物体、有人/无 人飞行器、弹道目标进行观测的精密光电设备。目 前,国内的相关单位多采用固定式的大口径红外望 远镜,即望远镜安装在圆顶内或固定塔台,试验时开 启遮光罩。随着观测指标的变化与观测试验要求的 提高,为满足不同试验任务的需求,未来大口径红外 望远镜应具备移动布站能力。光电设备运输车是大型红外望远镜实现机动布站承载、运输的平台^{III}。对于精密光电设备的载车平顺性,通过对"乘员(搭载 设备)-车-道路"所构成的振动系统进行试验,考察 一定速度与路面条件下车载设备与乘员耐受能力 (耐疲劳或耐损坏),可以求出车辆所能够行驶的最

收稿日期: 2012-10-16

作者简介:李冬伟(1979—),男,河北石家庄人,博士,讲师,主要研究方向为振动与冲击试验及防护技术。

高车速和最长行驶时间。精密性和结构特殊性是光 电仪器所固有的特性,这决定了光电仪器只能承受 较低量级的振动响应和冲击激励。研究车辆行驶的 平顺性,可以了解车辆振动传递途径,确保运输过程 中车载精密光电设备所承受的振动和冲击在可接受 范围内,并且为载车悬挂系统以及设备支承装置的 设计提供参考数据。文中对光电观测设备载车进行 了一系列不同路面行驶条件下的平顺性试验,同时 对不同工况时域信号响应试验结果进行了计算分 析。试验中所选的车型为四轮驱动、四轮独立悬挂 式车辆。

1 车载设备的平顺性评价方法

由路面-载车-设备组成的平顺性试验振动测试 系统如图1所示。系统"输入"主要是载车在随机不 平路面以一定车速行驶给车辆带来的振动,以及发动 机、传动系和轮胎等因自身运动所引起的振动。经轮 胎、悬架与减振器等弹性阻尼元件所构成的悬挂系统 及非悬挂系统,这些叠加振动激励最后将传递到光电 设备上形成加速度振动响应,即系统"输出"。



图1 车载光电设备平顺性试验流程

Fig. 1 Flowchart of riding comfortable test of vehicle-mounted photoelectric device

平顺性评价从原理上可分为理论仿真分析法与 试验测试分析法。前者需要建立车载设备动力学模型,再根据输入功率谱计算输出响应功率谱,见式 (1)--(3)。

$$H^{2}(f)_{x-q} = \frac{1 + (2\xi\lambda)^{2}}{(1-\lambda^{2})^{2} + (2\xi\lambda)^{2}}$$
(1)

$$G_x(f) = H^2(f)_{x-q} G_q(f)$$
(2)

$$\sigma_x^2 = \int_0^\infty H^2(f)_{x-q} G_q(f) \, \mathrm{d}f \tag{3}$$

式中: $H^{2}(f)_{x-q}$ 为典型多自由度车载设备动力学 传递函数; $G_{x}(f)$ 为车载设备振动功率谱函数; σ^{2}_{x} 为 加速度均方根值; ξ 为阻尼损耗因子; λ 为频率比;x 为车载设备变量;q为载车变量。

然而车辆悬架可以看成是一个复杂的多自由度 非线性系统,包含一系列弹性元件、阻尼元件。路面 不平度与发动机等振源激励下,该系统将产生十分 复杂的非线性随机振动,使得理论分析与数值仿真 精确化难以有效实现。

试验测试分析法主要利用传感器技术与信号处 理技术,测试车辆行驶时路面激励给车载设备或乘 员带来的振动响应,并基于数值处理方法对振动影 响程度进行评价。目前,车辆平顺性试验测试法有 两种常用评价方法^[2],第一种是以*TFD-f*曲线来评价 乘员工作环境(*TFD*为疲劳-工效降低时间,自变量 为振动加权加速度的均方根和振动频率*f*),即"疲 劳-工效降低界限";第二种方法是以车内的加速度 均方根值来评价承载设备运输的环境应力。显然, 人体自身对振动方向和振动频率的敏感程度是第一 种评价方法的主要衡量指标。车载光电设备是本次 试验的主要对象,试验中应着重评价车载设备的运 输扰动环境。从本次试验具体情况出发,应该采用 第二种试验评价方法。

2 车载光电设备的平顺性试验

2.1 试验测试条件

2.1.1 道路条件

根据GB 4970—1996《汽车平顺性随机输入行驶 试验方法》³³的规定,本次试验路线长度应不小于3 km,试验中的路面应该保持平直,路况要保持良好; 试验过程中,路面的纵坡应小于等于1%,路面应干 燥平整,无突变颠簸。试验路面包括沥青路面(与二 级公路相当)以及砂石路面(与三级公路相当)。经 过一系列的现场观察与评估,本次试验的沥青路选 择石家庄北二环出市口赵陵铺至太平河的平直路 段,砂石路则选择上庄镇至植物园路的平直路段。

2.1.2 载车技术性能参数

选择某国产型号四轮驱动、四轮独立悬挂特种 作业车辆。载车全质量8700 kg,光电设备质量2600 kg,轮胎充气压力为910±15 kPa。

2.1.3 试验车速

按ISO 16750—2003^[4]中的相关规定,对于电子

系统、光电设备等精密仪器,道路运输平顺性试验车 速至少应包括3种常用车速。在综合考虑了路面以 及牵引车的具体情况后,匀速行驶平顺性试验时的 车速在沥青路面取30,40,50 km/h共3种,在砂石路 面取10,20,30 km/h共3种,并进行往返试验。试验 环境风速要求不大于5 m/s。

2.2 试验评价方法

为了实现对大口径红外光电观测设备在道路运输状态下振动加速度的准确测量与有效评价,在本次试验中,从动力学角度将该光电系统结构分为采 用弹性装置连接的3个独立弹性体。

1)基座:包括与载车连接的过渡基座、调平装置、抗扭弹性机构与机体,由于这些部分主要以短螺栓、槽板等过渡连接,可视为刚性整体。

2) 转台:可赋予观测镜头360°全方位回转,通 过方位电液回转轴承和基座进行连接,在运输状态 下必须作机械位置固定与锁止;由于连接该回转台 与基座的部件结构由一系列防翻拉杆组成,故可将 锁止后的回转平台、防翻机构和基座视为弹性体。

3) 观测镜头:通过高低电液回转轴承、推力止动 轴承和方位转台水平轴相连,在运输状态下可以将锁 定后的镜头视作弹性体,其结构示意如图2所示。



图 2 光电观测设备结构及各测点位置与坐标 Fig. 2 Construction of photoelectric device, different measuring points and coordinates

根据以上分析,在载车基座、方位回转平台和观测镜头各选一个测点。测点选取过程中主要应考虑以下两个方面因素,一是测点的选取要有典型代表性,二是在试验中便于安装加速度传感器。测点的具体选取位置如图2所示,测点A选在基座上表面;测点B选在转台立柱的上表面;测点C选在观测镜头箱体的上端面。在每个测点上沿3个垂直轴方向

安装3个加速度传感器,用来检测待测点水平向(x 轴,与载车行驶方向垂直)、纵向(y轴,载车行驶速度 方向)和竖直向(z向,光电设备垂直方向)3个方向共 9个振动加速度响应信号^[5]。振动加速度信号试验测 试系统连接如图3所示。



图3 振动加速度数据采集与处理系统

Fig. 3 Data acquisition and processing system of vibration acceleration

加速度传感器选用压电陶瓷式传感器,能够将 加速度信号转换为电荷信号,再利用电荷放大器将 其转换成计算机使用的电压信号。应用江苏东华公 司开发的DH5966 振动信号采集、处理和分析系统, 计算机采集到的数字信号需经过标定,将所得到的 电压信号转换为实际物理量;采集过程需要对车速 进行实时监控,保证车辆能匀速行驶,采用非接触速 度计实现车速实时监测。

平顺性试验共分6组,试验分别安排在沥青路 面以及砂石路面上,以3种不同车速进行。在行驶 试验过程中,要求驾驶员稳住车速,并且有警示车在 前方为试验装备开道,避免出现意外。行驶中车速 波动不得大于±3%。每次行驶试验连续不超过10 min,试验期间如果车速波动过大或在行驶过程中路 面出现明显异常,应立即终止本次试验。

3 平顺性试验结果及计算分析

载车在沥青路面以及砂石路面匀速行驶,各测 点加速度最大值与根据此加速度最大值所计算得到 的加速度均方根值,见表1。某工况下加速度响应如 图4所示。表1中x_A为测点A横向(x)的最大加速 度;σ_{xA}为测点A横向(x)的最大加速度均方根值;其 余符号以此类推。

 m/s^2

表1 匀速行驶条件各测点加速度最大值及均方根值

Table 1 Maximum and mean square root of acceleration at different measuring points

测点编号	符号					砂石路面车速/(km・h ⁻¹)			
		30	40	50	半均值	10	20	30	半均值
	$\chi_{ m A}$	0.42	1.01	0.48	0.64	0.91	1.67	1.73	1.44
	$\sigma_{\scriptscriptstyle xA}$	0.12	0.21	0.15	0.16	0.28	0.31	0.36	0.32
А	Ул	0.54	1.32	0.89	0.92	2.16	2.31	1.53	2.01
	${oldsymbol \sigma}_{ m yA}$	0.11	0.17	0.15	0.14	0.28	0.34	0.35	0.32
	$Z_{\rm A}$	1.17	1.64	1.25	1.35	1.44	2.39	3.26	2.36
	$\sigma_{z\mathrm{A}}$	0.42	0.32	0.33	0.36	0.43	0.59	0.69	0.57
	$\chi_{ m B}$	2.06	2.50	2.54	2.37	2.45	5.30	6.76	4.84
	$\sigma_{x\mathrm{B}}$	0.44	0.70	0.61	0.58	0.62	1.37	1.75	1.25
В	Ув	1.78	2.51	2.00	2.10	1.88	4.77	6.06	4.24
	${m \sigma}_{ m yB}$	0.39	0.67	0.51	0.52	0.48	0.99	1.36	0.94
	$Z_{\rm B}$	1.22	1.83	1.42	1.49	1.41	2.71	4.24	2.81
	$\sigma_{z\mathrm{B}}$	0.41	0.35	0.37	0.38	0.40	0.62	0.78	0.60
С	$x_{ m c}$	1.95	2.61	2.56	2.37	2.32	5.42	9.66	5.80
	σ_{xc}	0.45	0.70	0.61	0.59	0.63	1.32	1.71	1.22
	Уc	1.78	2.44	1.93	2.05	1.90	4.68	6.00	4.19
	${m \sigma}_{ m yC}$	0.33	0.62	0.50	0.50	0.42	0.97	1.34	0.91
	$Z_{\rm C}$	1.51	1.81	1.61	1.64	1.54	4.68	8.60	4.94
	σ.	0.42	0.41	0.42	0.42	0.40	0.83	1.26	0.83



图4 C点沥青路面50 km/h行驶时加速度数据 Fig. 4 Vibration acceleration data of position C at 50 km/h on asphalt road

载车的匀速行驶试验数据结果说明以下几个问题。

 1)表1的两种路面"平均值"对比说明光电设备 在砂石路面比沥青路面所承受振动强度要大很多。

2) 在沥青路面上,当行驶车速为40 km/h时,观 测镜头的振动强度比50 km/h时略强。

3) 在6组试验中,砂石路上30 km/h时B点水平

横向振动强度最高,C点的水平横向振动加速度最大。

4) 在砂石路面上行驶时,当车速为30 km/h, σ_x 和 σ_x:接近且保持最大,约为 σ_x的5.5倍,表明此设 备观测镜头在砂石路面上主要发生横向摆振,横摆的 瞬时主轴线距离A点较近,故A点的振动幅值较小。

5)根据正态分布的原则,对于振动加速度构成 的随机矢量响应,各测点合成加速度均方根值可由该 点在各方向加速度均方根值平方和求得,见式(4)。

$$\begin{cases} \sigma_{A} = \sqrt{\sigma_{xA}^{2} + \sigma_{yA}^{2} + \sigma_{zA}^{2}} \\ \sigma_{B} = \sqrt{\sigma_{xB}^{2} + \sigma_{yB}^{2} + \sigma_{zB}^{2}} \\ \sigma_{C} = \sqrt{\sigma_{xC}^{2} + \sigma_{yC}^{2} + \sigma_{zC}^{2}} \end{cases}$$
(4)

另外,可以利用各测点在横向、纵向和竖直方向 的振动强度平均值,来估算观测镜头在该方向上的 振动响应强度,见式(5)。

$$\begin{cases} \sigma_{x} = (\sigma_{xA} + \sigma_{xB} + \sigma_{xC})/3 \\ \sigma_{y} = (\sigma_{yA} + \sigma_{yB} + \sigma_{yC})/3 \\ \sigma_{z} = (\sigma_{zA} + \sigma_{zB} + \sigma_{zC})/3 \end{cases}$$
(5)

根据表1数据,计算得到A,B和C共3个测点振动加速度合成后均方根值和整体振动强度的响应数据,见表2。

表2 各测点与光电设备各方向整体振动强度

 Table 2
 Vibration strength of different points and different directions

m/	S

强度 30 40 50 30 40 $\sigma_{\rm A}$ 0.19 0.42 0.38 0.19 0.42 $\sigma_{\rm B}$ 0.72 0.99 0.85 0.72 0.99 $\sigma_{\rm C}$ 0.58 1.01 0.86 0.58 1.01	50 0.38
$\sigma_{\rm A}$ 0.19 0.42 0.38 0.19 0.42 $\sigma_{\rm B}$ 0.72 0.99 0.85 0.72 0.99 $\sigma_{\rm C}$ 0.58 1.01 0.86 0.58 1.01	0.38
$ σ_{\rm B} = 0.72 0.99 0.85 0.72 0.99 $ $ σ_{\rm C} = 0.58 1.01 0.86 0.58 1.01 $	
$\sigma_{\rm c} = 0.58 = 1.01 = 0.86 = 0.58 = 1.01$	0.85
u iii iii iii iii iii iii iii iii iii i	0.86
σ_x 0.33 0.51 0.46 0.33 0.51	0.46
σ_y 0.31 0.51 0.41 0.31 0.51	0.41
$\sigma_z = 0.42 = 0.34 = 0.39 = 0.42 = 0.34$	0.39

根据表2的数据,绘制出A,B和C点的振动强度 随车速变化关系,如图5所示。





Fig. 5 Change of vibration strength of different points with speed

根据图5可知,砂石路面上,载车匀速行驶时,随着车速的不断提高,各测点的振动强度将显著增加。对于车速的敏感程度,观测镜头最强,其次是转台,而基座的变化则不明显,当行驶速度较高(20~30 km/h)时,变化更不明显。沥青路面上,各测点的变化趋势则相对比较接近。当车速保持在30~40 km/h的范围内时,随着车速的提高,振动强度值会变大;车速进一步提高后,保持在40~50 km/h的条件下,振动强度随车速的提高会出现下降现象。各测点振动强度幅值在车速为40 km/h时,将比30 km/h和50 km/h时都大。

沿横向、纵向和竖直3个方向,观测镜头振动强度的数值随车速的变化关系如图6所示。由图6可知,匀速行驶于砂石路面时,光电设备中的观测镜头振动强度在3个方向上均会随车速的提高而增加,且变化比较明显。在沥青路面行驶的过程中,横向与纵向的变化趋势则基本保持一致,同时振动强度在车速为40 km/h时行驶振动响应达到最高值。随着车速的变化,振动强度在竖直方向的变化将不明显,当车辆以30~40 km/h的速度行驶时,竖直振动强度会表现出随车速提高而逐渐下降的趋势。



图6 光电设备各方向振动强度随车速的变化

Fig. 6 Change of vibration strength of different directions with speed

4 结论

 1)建立了车载精密光电设备平顺性的试验评 价方法。利用对不同位置测点合成加速度均方根值 来定量评价设备底座、转台、观测镜头的振动量级;
 利用各测点3个方向加速度均方根平均值来定量评 价观测镜头振动强度。

2) 基于评价方法,完成了2种道路条件、3种行 驶速度下的平顺性试验。结果表明,3个测点的振动 强度在两种道路下的变化趋势区别较大,砂石路段 表现为随车速逐渐增大,沥青路段表现为随车速先 增大后减小,特别是沥青路40 km/h 行驶会出现地 面-车辆-光电设备力学系统谐振现象^[6]。

3)不同方向振动测试数据分析表明^[7],砂石道路行驶时,*x*,*y*,*z*方向振动强度依次减弱,即垂直行驶方向振动强度最大,该方向需增加结构的阻尼耗能;沥青道路行驶时,*x*方向振动强度大于*y*方向,*z*

方向振动基本不变,40 km/h行驶时的谐振现象主要由x,y两方向的振动激励引起。

 4) 文中提出的平顺性试验研究方法,为车载精 密光电探测设备的结构优化设计与研制定型提供了 参考。

参考文献:

- [1] 何照才.光学测量系统[M].北京:国防工业出版社,2002: 15-26.
- [2] 高数新,汪立民. 军用战术车辆平顺性评价方法及指标 极限值的研究[J]. 汽车技术,2008(7):27—30.

- [3] GB 4970—1996,汽车平顺性随机输入行驶试验方法[S].
- [4] ISO 16750—2003,道路车辆电气和电子设备的环境条件 与试验[S].
- [5] 叶盛祥.光电仪器精密测量技术[M].成都:四川科学技术 出版社,2003:1—4.
- [6] 李根成. 武器装备环境例行试验的有效性研究[J]. 强度 与环境,2006,33(3):11—16.
- [7] 康兴无. 武器装备运输环境适应性评估研究[J]. 装备环 境工程,2006,3(4):16-19.

(上接第47页)

邻的若干类别对该类别聚类中心的影响问题和灰类 区间长度不一样的问题。通过实例验证,得到的计 算结果是科学有效的。

45—48.

- [2] 赵经成,祝华远,王文秀.航空装备技术保障运筹分析 [M].北京:国防工业出版社,2010:28-29.
- [3] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社, 1999:80—92.
- [4] 庄德慧,李孝全.基于网络计划技术的某发射装置维修 管理研究[J].维修管理,2007,11(5):23-26.

参考文献:

[1] 徐宗昌.保障性工程[M].北京:兵器工业出版社,2002:

(上接第51页)

方法使用时需注意以下几点。

 1)只对正弦定频试验及特定频率范围内正弦 扫频试验有效,不适用于随机振动试验。

 2)样件体积和质量不应过大,否则容易造成非 主振动方向的侧向振动。

3) 振动控制时会产生一定的频率及加速度偏 差(频率偏差≤±1Hz,加速度偏差≤±1g~2g)。

4) 共振频率不仅取决于共振板的特性,还取决 于样件的质量及形状。每次试验均应先进行扫频试 验,观察样件中心的响应。

参考文献:

- [1] 吴瑞轩. 振动夹具的测试方法研究[J]. 装备环境工程, 2010,7(6):252-255.
- [2] 马玉真,王新华,宋波. 简谐振动测试系统的设计[J]. 试 验技术与试验机,2001(3):21-22.
- [3] 黄华. 随机振动与正弦振动的等效[J]. 航空标准化与质 量,1980(2):87—92.
- [4] 刘道标,宦海祥.振动试验方法的研究及发展趋势[J].环 境技术,2006(3):21-25.