

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2024.09.020

冲击试验机波形预测方法研究*

刘 博, 闫 明*, 李朕均, 雷 蕾
(沈阳工业大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要:在使用冲击试验机对产品进行考核时,其往往达不到规定脉冲波形的峰值加速度和脉宽,需要靠试验人员的经验以及多次重复试验进行调整。因此,为了在冲击试验前准确地预测冲击波形,节省调试时间和资源,提出了一种采用非线性回归模型对波形峰值加速度和脉宽进行预测的方法。首先,采用 Mooney-Rivlin 模型拟合了波形发生器超弹性本构参数,建立了冲击系统有限元模型,并进行了冲击试验,对有限元模型的准确性进行了验证;然后,采用有限元和正交实验法研究了波形发生器硬度、厚度、直径和冲击台跌落高度等参数对冲击波形的影响;最后,选用幂函数作为多元非线性回归的函数形式,并剔除了显著性较低因素项,建立了冲击波形峰值加速度和脉宽的预测模型,并通过冲击试验对预测模型的准确性进行了验证。研究表明:波形发生器的厚度和直径及其交互作用是影响冲击波形的主要因素;通过对比回归模型预测值与冲击试验数据,发现两者误差不超过 10%,表明该冲击波形回归预测模型具有有效性。

关键词:冲击波形峰值加速度;脉宽;波形发生器;有限元模型;正交实验;非线性回归;预测模型

中图分类号:TH87

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2024)09-1715-08

Waveform prediction method of impact testing machine

LIU Bo, YAN Ming, LI Zhenjun, LEI Lei

(School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: When using impact testing machine to evaluate products, it often fails to reach the peak acceleration and pulse width of the specified pulse waveform, and it needs to be adjusted by the experience of testers and repeated experiments. Therefore, in order to accurately predict the shock waveform before the shock test and save debugging time and resources, a method was proposed to predict the peak acceleration and pulse width of the waveform using a nonlinear regression model. First, the Mooney-Rivlin model was used to fit the hyper elastic intrinsic parameters of the waveform generator, a finite element model of the shock system was established, and shock tests were conducted to verify the accuracy of the finite element model. Then, the finite element and orthogonal experimental methods were used to study the effects of parameters such as hardness, thickness, diameter and shock table drop height of the waveform generator on the shock waveform. Finally, the power function was chosen as the functional form of multivariate nonlinear regression and the less significant factor terms were eliminated to establish the prediction model of peak acceleration and pulse width of the shock waveform, and the accuracy of the prediction model was verified by the shock test. The research results show that the thickness and diameter of the waveform generator and their interaction are the main factors affecting the shock waveforms. Comparing the predicted values of the regression model with the shock test data, it is found that the error between the two is not more than 10%, which indicates that the established regression prediction model of impact waveform is effective.

Key words: peak acceleration of shock waveform; pulse width; waveform generator; finite element model; orthogonal experiment; nonlinear regression; predictive model

收稿日期:2023-12-29

基金项目:辽宁省教育厅基金资助项目(LJKZ0108);辽宁省教育厅科学研究项目(LJKMZ20220461)

作者简介:刘博(1998-),男,辽宁辽阳人,硕士研究生,主要从事海军舰船设备振动与冲击等方面的研究。E-mail:13042683439@163.com

通信联系人:闫明,男,博士,教授,博士生导师。E-mail:yanming7802@163.com

0 引言

机械冲击是一种常见的现象,它在工程领域中经常出现,对结构和设备的安全性和稳定性有着重要的影响。为了提高产品的抗冲击性能,人们通常采用冲击试验机模拟真实的冲击环境,以考核产品功能的可靠性^[1-2]。而半正弦脉冲波形在冲击试验中最为常用,其试验参数主要为峰值加速度和脉宽^[3]。

在使用冲击试验机对产品进行考核时,其往往达不到规定脉冲波形的峰值加速度和脉宽,需要靠试验人员的经验以及多次重复试验进行调整,这需要花费大量的时间和资源。因此,开展对冲击波形峰值加速度和脉宽的分析与预测至关重要。

DUAN Z Y 等人^[4]针对一种高 g 冲击试验机的冲击波形进行了理论和试验分析,发现了在相同的冲击速度下,采用不同材料制成的波形发生器可以改变冲击波形的峰值加速度和脉宽;但其未考虑波形发生器的形状因子对冲击波形的影响。KIM T H 等人^[5]对横向冲击试验机进行了动态仿真分析,发现了冲击波形的峰值加速度和脉宽主要由冲击速度、空气弹簧的刚度以及阻尼器的剪切力来控制;但其没有考虑各因素间的相互作用对冲击波形的影响。王贡献等人^[6]建立了双波冲击试验机工作机理的动力学模型,并对其动态性能进行了仿真研究,发现了可以通过调整速度发生器和脉冲调节器来对冲击波形进行控制;但其没有分析各因素对冲击波形的影响程度。梁斌强^[7]建立了摆锤冲击试验机的运动方程和有限元模型,根据仿真结果分析了不同跌落高度和波形发生器对冲击波形的影响规律;但其没有建立起表征各个参数与波形峰值加速度、脉宽间定量关系的数学模型。毛勇建^[8]建立了冲击系统运动学方程,通过对比多工况下的冲击波形曲线,发现了可通过改变波形发生器的刚度和冲击速度来对冲击波形进行控制;但其没有从理论角度出发研究各个参数对冲击波形峰值加速度和脉宽影响的排序及显著性。

因此,笔者首先建立冲击系统有限元模型,并通过冲击试验对有限元模型的准确性进行验证;继而,采用有限元与正交实验相结合的方法,研究波形发生器厚度、直径、硬度和冲击台跌落高度对冲击波形的影响;最后,建立冲击波形峰值加速度和脉宽的回归预测模型,为实际的冲击试验提供理论依据。

1 动力学仿真分析

1.1 冲击试验机工作原理

冲击试验机结构如图 1 所示。

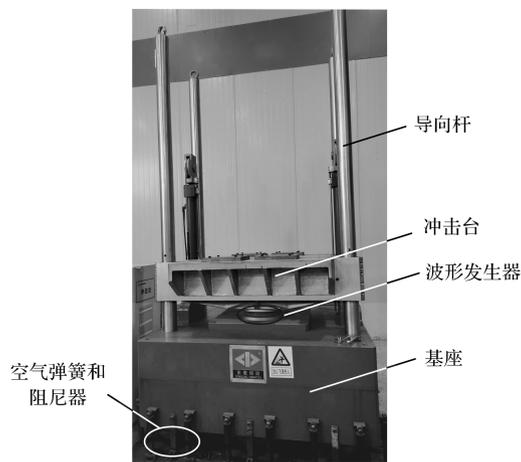


图 1 冲击试验机

Fig. 1 Shock testing machine

图 1 中,冲击试验机总重量为 8 000 kg,外形尺寸为 1 800 mm × 1 400 mm × 2 750 mm,最大试验负载为 500 kg,可获得垂直向上的半正弦冲击波形,波形加速度峰值在 10 g ~ 400 g 内可调,脉宽在 3 ms ~ 60 ms 内可调。

进行冲击试验时,需要通过液压驱动将冲击台沿导向杆上升到指定高度,然后使冲击台自由跌落,与固定在基座上的波形发生器发生对心碰撞。

另外,在台面和被测产品上分别装有加速度传感器,其可以直接采集到每次冲击的加速度信号,以此确定产品所受的冲击波形是否达到试验要求,考核产品的可靠性。

1.2 橡胶 Mooney-Rivlin 本构模型

波形发生器一般采用橡胶材质,在冲击激励下具有硬非线性特性。通常情况下,使用应变能函数来描述橡胶材料的物理属性^[9-11],应变能函数 W 表示如下:

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_i - 3)^i (I_j - 3)^j \quad (1)$$

式中: N 为多项式的阶数; C 为材料常数,可以通过橡胶的 8 种基础实验获得。

2 参数 Mooney-Rivlin 本构模型表示如下:

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) \quad (2)$$

2 参数 Mooney-Rivlin 本构模型可以很好地描述橡胶材料在压缩应变为 30% 之内的中小变形。常用的

试验方法有单向拉伸、双轴拉伸和平面剪切等。通过多种类型的试验,可获得更多的试验数据,对橡胶超弹性特征的描述就越准确,从而能更全面地定义橡胶材料的力学行为;但这对于试验条件的要求会更高,计算量更大^[12]。

综合考虑试验成本和计算时间,笔者通过单轴压缩试验获取天然橡胶的应力-应变曲线,进而拟合出天然橡胶的材料参数。

单轴压缩试验如图2所示。

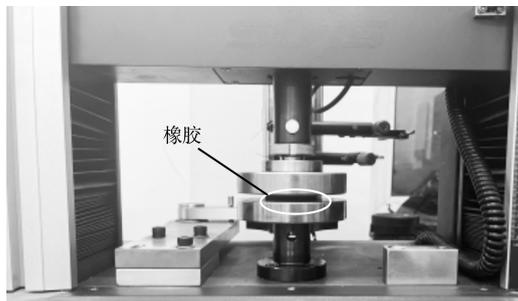


图2 单轴压缩试验

Fig. 2 Uniaxial compression test

图2中,橡胶试样按 GB/T 7753—93 单轴压缩试验标准制作。笔者选取的压缩标准为30%。

在正式试验之前,笔者进行了3次加卸载循环试验,通过试样的压缩载荷-位移曲线计算,得到相应的应力-应变关系。

试验数据与本构模型拟合曲线对比如图3所示。

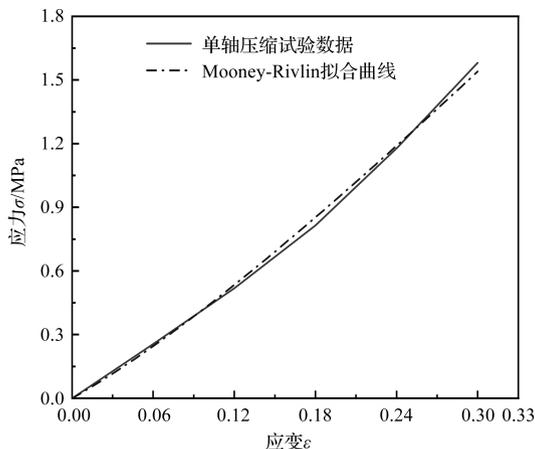


图3 试验数据与拟合曲线对比

Fig. 3 Comparison of test curve and fitted curve

从图3可知:试验数据与 Mooney-Rivlin 本构模型拟合效果较好。因此,该模型可以用来描述天然橡胶的超弹性力学行为。

1.3 冲击系有限元模型

笔者基于有限元软件 Abaqus 对冲击试验机的工作过程进行仿真分析;同时,为了节省仿真计算时间,

只着重分析参与碰撞的部件。

冲击系统有限元模型如图4所示。

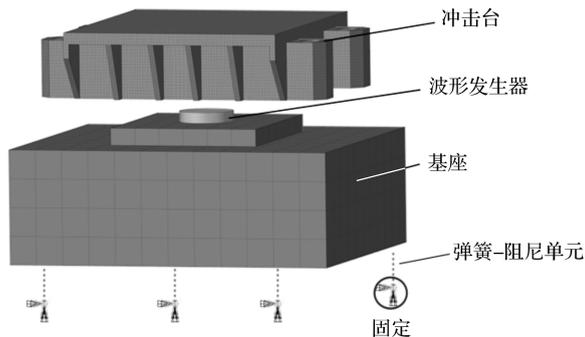


图4 冲击系统有限元模型

Fig. 4 Finite element modeling of shock systems

图4中,冲击台面尺寸为800 mm × 1 000 mm,材料为 Q355NC 高强度钢焊接结构,重 392 kg;基座台面尺寸为 1 200 mm × 1 400 mm,材料为铝合金,重 4 697 kg;波形发生器直径为 200 mm、厚度为 40 mm、硬度为 60 HA,采用 Mooney-Rivlin 本构模型定义其超弹性力学行为,由单轴压缩试验数据拟合得到橡胶材料参数 $C_{10} = 0.57$, $C_{01} = 0.31$ 。

笔者采用弹簧-阻尼单元对空气弹簧和阻尼器进行简化。除此之外,其余所有单元属性均为 8 节点六面体杂交缩减单元;杂交公式可以防止计算过程中波形发生器体积自锁;缩减积分可以减少积分点,提高计算速度,但易出现刚度为零的情况。因此,需设置默认的沙漏控制,添加相应的沙漏阻尼。

笔者根据各部件表面主从关系设置接触,采用有限滑移主面-从面接触对算法(其中,冲击台为主面,波形发生器为从面)。

笔者采用罚函数算法来模拟接触的切向行为,将摩擦因素定义为 0.3,采用硬接触模拟接触法向力行为。在波形发生器与基座之间进行绑定约束,弹簧-阻尼单元底部施加固定约束。并且为了减小计算时间,在仿真中直接将冲击台的最终速度赋予冲击台,作为碰撞的初始条件。

为了对有限元模型的准确性进行验证,笔者选取上述规格的波形发生器,分别进行了跌落高度为 300 mm、400 mm 和 500 mm 的冲击试验和仿真分析。

仿真计算结果与试验测得的冲击脉冲对比情况,如图5所示。

从图5可知:试验波形与仿真波形的偏差较小,说明试验波形和仿真波形吻合程度较好。由此对冲击系统有限元模型的准确性进行了验证,证明其可以作为后续正交实验分析的基础。

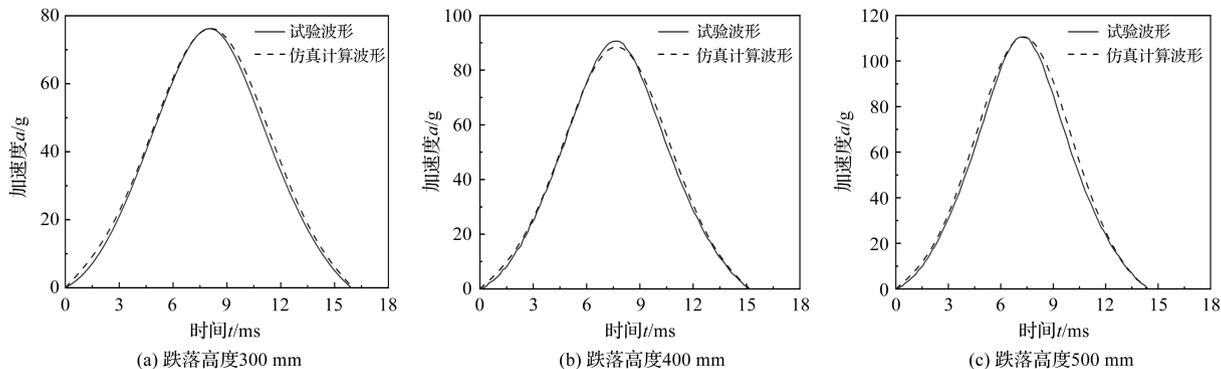


图 5 冲击试验与仿真曲线对比

Fig. 5 Comparison of shock test and simulation curves

2 正交实验的结果与分析

正交实验设计是用于研究多因素和多水平的设计方法,其采用正交性的原则设计正交表,从全因子实验中选择出代表性的点进行实验。

利用这种设计方法可以有效地减少实验次数,同时仍能够获得对各个因素和水平的全面了解^[13-16]。

为了研究多种因素对冲击波形峰值加速度和脉宽的影响,笔者简化分析难度,采用有限元正交模拟方法,研究波形发生器硬度 P 、厚度 S 、直径 D 和冲击台

跌落高度 H 对冲击波形峰值加速度和脉宽的影响。

除了考虑四个因素间的独立影响外,笔者还考虑因素间的交互作用 $P \times S$ 、 $P \times D$ 、 $P \times H$ 、 $S \times D$ 、 $S \times H$ 及 $D \times H$ 。

2.1 无交互作用的正交实验

根据相关文献以及实际应用场景,笔者确定波形发生器 and 跌落高度的参数范围,对这 4 个因素均匀取 4 个水平数据值。采用 $L_{16}(4^5)$ 正交表安排 16 组正交实验,

并根据实验要求进行有限元仿真,得到了冲击波形峰值加速度和脉宽的仿真结果,如表 1 所示。

表 1 正交实验设计及仿真结果

Table 1 Orthogonal experimental design and simulation results

实验序号	因素					峰值加速度 A/g	脉宽 T/ms
	硬度 P/HA	厚度 S/mm	直径 D/mm	高度 H/mm	空列		
1	50	30	100	300	1	64.25	18.88
2	50	40	150	450	2	77.24	19.94
3	50	50	200	600	3	80.39	18.14
4	50	60	250	750	4	75.52	17.85
5	60	30	150	600	4	138.24	12.17
6	60	40	100	750	3	118.51	18.72
7	60	50	250	300	2	61.88	16.54
8	60	60	200	450	1	43.9	21.73
9	70	30	200	750	2	199.77	8.05
10	70	40	250	600	1	140.06	10.02
11	70	50	100	450	4	59.98	21.73
12	70	60	150	300	3	13.15	31.47
13	80	30	250	450	3	172.69	6.74
14	80	40	200	300	4	86.71	13.49
15	80	50	150	750	1	102.97	17.14
16	80	60	100	600	2	64.84	17.21

笔者根据表 1 中的仿真结果,对冲击波形峰值加速度和脉宽进行极差分析计算,可以求得各因素对波形峰值加速度和脉宽的影响程度。

四水平-无交互作用正交试验的极差分析结果如表 2 所示。

从表 2 可知:对波形峰值加速度产生影响的 4 个因素中,由于波形发生器厚度 S 所对应的极差值最大,因此,波形发生器厚度 S 的改变对波形峰值加速度的影响最大,其次是冲击台跌落高度 H ,再次是波形发生器直径 D ;波形发生器硬度 P 是 6 个因素中极差值最

表2 正交实验极差分析

Table 2 Orthogonal experimental range analysis

因素	极差	
	峰值加速度 A/g	脉宽 T/ms
硬度 P	32.45	5.05
厚度 S	94.38	10.61
直径 D	35.64	7.39
高度 H	67.69	5.71

小的,表明其水平改变对波形峰值加速度的影响最小。

依据表2计算结果可知:按由大到小次序进行排序,各因素对波形峰值加速度的影响依次为:波形发生器厚度 > 跌落高度 > 波形发生器直径 > 波形发生器硬度;

按由大到小次序进行排序,各因素对波形脉宽的影响依次为:波形发生器厚度 > 波形发生器直径 > 跌落高度 > 波形发生器硬度。

2.2 有交互作用的正交实验

根据正交实验表的一些规定,无法直接得到含交互作用项的四因素五水平的标准正交表,因此,需要选择 $L_{16}(2^{15})$ 正交表来设计正交试验。

为消除各因素水平取值对后续分析结果的干扰,笔者选用表1中各因素水平的最大值和最小值作为本次实验的水平数据。其中,交互项不用作输入模拟变量,仅用于进一步的数据分析。

有交互作用的正交表及仿真结果如表3所示。

表3 有交互作用的正交表及仿真结果

Table 3 Interactive orthogonal table and simulation results

序号	P/HA	S/mm	$P \times S$	D/mm	$P \times D$	$S \times D$	H/mm	$P \times H$	$S \times H$	$D \times H$	加速度 A/g	脉宽 T/ms
1	50	30	1	100	1	1	300	1	1	1	64.25	18.88
2	50	30	1	100	1	1	750	2	2	2	168.86	13
3	50	30	1	250	2	2	300	1	1	2	101.33	10.49
4	50	30	1	250	2	2	750	2	2	1	196.41	8
5	50	60	2	100	1	2	300	1	2	1	27.84	42.47
6	50	60	2	100	1	2	750	2	1	2	84.83	29.48
7	50	60	2	250	2	1	300	1	2	2	41.87	21.98
8	50	60	2	250	2	1	750	2	1	1	75.52	17.85
9	80	30	2	100	2	1	300	2	1	1	64.76	17
10	80	30	2	100	2	1	750	1	2	2	154.29	13.24
11	80	30	2	250	1	2	300	2	1	2	146.52	7.24
12	80	30	2	250	1	2	750	1	2	1	259.38	6.24
13	80	60	1	100	2	2	300	2	2	1	26.51	35.23
14	80	60	1	100	2	2	750	1	1	2	65.07	26.73
15	80	60	1	250	1	1	300	2	2	2	60.26	15
16	80	60	1	250	1	1	750	1	1	1	110.38	13

笔者采用方差分析方法对考虑交互作用的正交实验表进行分析,采用这种方法不仅可以与无交互作用正交实验表的极差分析结果进行对比验证,而且能进一步提高两次正交实验分析结果的可靠性。

考虑交互作用的正交实验方差分析结果如表4所示。

表4 方差分析结果

Table 4 Variance analysis

因素	自由度	加速度方差分析		脉宽方差分析	
		F 值	P 值	F 值	P 值
P	1	10.538	0.023	26.039	0.007
S	1	291.018	<0.001	411.963	<0.001
D	1	74.298	<0.001	354.426	<0.001
H	1	223.44	<0.001	66.912	0.001
$P \times S$	1	2.536	0.172	6.506	0.063
$P \times D$	1	25.539	0.004	0.409	0.557
$P \times H$	1	0.001	0.986	5.398	0.081
$S \times D$	1	18.59	0.008	52.636	0.002
$S \times H$	1	32.801	0.002	9.865	0.035
$D \times H$	1	0.003	0.961	14.192	0.02

从表4可知:对波形峰值加速度的影响表现为高度显著性的因素为 $S, D, H, P \times D, S \times D, S \times H$;对波形峰值加速度的影响表现为显著性的因素为 P ;对波形峰值加速度的影响不显著的为 $P \times S, P \times H, D \times H$ 。因此,在后续预测模型的建立中,笔者将不考虑其对冲击波形峰值加速度的影响。

同理,根据表4中对波形脉宽的方差分析结果可知:对波形脉宽的影响表现为高度显著性的因素为 $P, S, D, H, S \times D$;对波形脉宽的影响表现为显著性的因素为 $S \times H, D \times H$;对波形脉宽的影响不显著的为 $P \times S, P \times D, P \times H$ 。因此,在后续预测模型的建立中,笔者将不考虑其对冲击波形脉宽的影响。

因此,综合上述分析可以得到各因素对波形峰值加速度影响的主次顺序为: $S > H > D > S \times H > P \times D > S \times D > P$;各因素对波形脉宽影响的主次顺序为: $S > D > H > S \times D > P > D \times H > S \times H$;单因素间的主次顺

序与无交互作用的极差分析结果一致。

3 冲击波形预测建模

回归分析是一种建立数学模型,并进行统计分析的方法,其主要目的是利用给定的数据进行非线性函数拟合,再采用拟合函数确定这些变量之间的定量关系,以此来对某个随机变量进行预测。

常用的拟合函数曲线包括:多项式、高斯曲线和幂函数等。由于幂函数的泛化能力较强^[17-20],笔者选用幂函数作为冲击波形预测模型的函数形式。

笔者将表 2 中的 16 组正交实验数据作为样本数据,对其峰值加速度和脉宽的仿真结果进行多元非线性回归拟合,可以得到波形峰值加速度和脉宽与 P 、 S 、 D 、 H 的回归方程;同时,根据显著性分析结果,将对波形峰值加速度和脉宽影响显著性较低的因素水平项进行剔除。

冲击波形峰值加速度和脉宽的多元非线性回归预测模型表示如下:

$$A_{\max} = 760.2346x_1^{-0.1812} - 5043.6018x_2^{-924.7199} - 0.5872x_3^{-3.2492} + 0.1814x_4^{1.0673} + 0.0089x_1x_3 - 0.0059x_2x_3 - 0.0033x_2x_4 - 386.3997 \quad (3)$$

$$T = 52.0461x_1^{-0.2365} + 0.595x_2^{0.9524} - 5.2048x_3^{0.3336} - 0.3049x_4^{-4.0584} - 0.0001x_2x_3 - 0.00016x_2x_4 - 0.00001x_3x_4 + 9.8831 \quad (4)$$

式中: A_{\max} 为波形峰值加速度; T 为波形脉宽; x_1, x_2, x_3, x_4 为 P, S, D 和 H 的数据值。

为进一步检验回归预测模型的可信度,笔者将各因素数据值代入回归方程,即可计算得到采用该回归方程所预测的冲击波形峰值加速度和脉宽;通过将计算出的峰值加速度和脉宽与正交实验得到的结果进行对比,即可验证回归预测模型的有效性。

将通过预测模型求得的峰值加速度与表 1 得到的仿真数据进行对比,得到其对比情况如图 6 所示。

从图 6 可发现:仿真模拟值与波形峰值加速度预测值吻合程度较好,表明波形峰值加速度的回归模型具有较高的预测准确率。

将通过预测模型求得的波形脉宽与表 1 得到的仿真数据进行对比,得到其对比情况如图 7 所示。

从图 7 中可发现:仿真模拟值和波形脉宽预测值变化趋势一致,误差较小,表明波形脉宽的回归模型具有较高的预测准确率。

为了进一步检验回归预测模型的有效性,笔者选取直径 150 mm、厚度 30 mm、硬度 70 HA 的波形发生

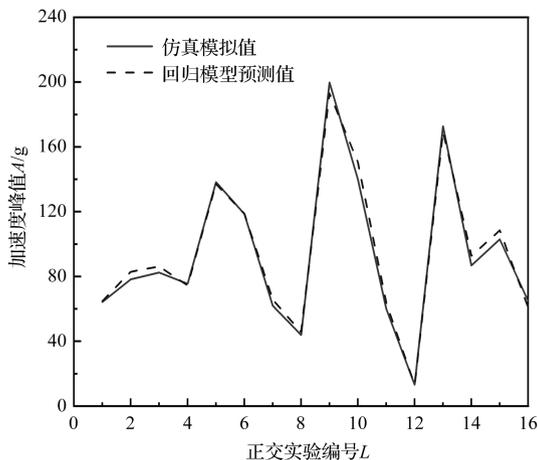


图 6 仿真与预测波形峰值加速度数据对比
Fig. 6 Comparison between simulation and predicted waveform peak acceleration data

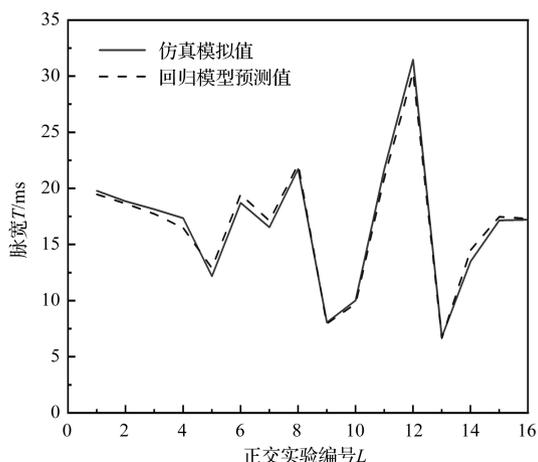


图 7 仿真与预测波形脉宽数据对比
Fig. 7 Comparison of simulation and predicted waveform pulse width data

器,采用冲击试验机分别进行跌落高度 300 mm、400 mm 和 500 mm 的冲击试验。

将回归预测模型求出的数据与冲击试验数据进行对比,得到其结果如表 5 所示。

表 5 预测波形与试验波形数据对比
Table 5 Comparison of predicted waveform data with test waveform data

工况	预测波形峰值 A_1/g	试验波形峰值 A_2/g	误差 /%	预测脉宽 T_1/ms	试验脉宽 T_2/ms	误差 /%
1	82.74	77.19	7.19	14.08	13.25	6.26
2	101.55	95.43	6.41	13.45	12.35	8.91
3	120.86	111.25	8.63	12.82	11.75	9.11

从表 5 可发现:预测值和冲击试验数据误差均在 10% 之内,表明多元非线性回归模型可以有效预测冲击波形峰值加速度和脉宽。

4 结束语

在使用冲击试验机对产品进行考核时,其往往达不到规定脉冲波形的峰值加速度和脉宽,需要靠试验人员的经验以及多次重复试验进行调整。开展对冲击波形峰值加速度和脉宽的分析、预测至关重要。针对在冲击试验前难以准确地预测冲击波形的问题,笔者提出了一种采用非线性回归模型对波形峰值加速度和脉宽进行预测的方法。

笔者采用有限元仿真和正交实验方法,研究了波形发生器的厚度、直径、硬度和冲击台跌落高度对冲击波形的影响,建立了冲击波形多元非线性回归预测模型。

主要研究结论如下:

1)建立了冲击系统有限元模型,通过冲击试验对有限元模型的准确性进行了验证。选取波形发生器的厚度、直径、硬度和冲击台跌落高度作为影响冲击波形峰值加速度和脉宽的主要因素,基于有限元和正交实验法,对仿真结果进行了极差和方差分析,结果表明:各因素对波形峰值加速度的影响关系依次为:厚度 > 跌落高度 > 直径 > 硬度;对波形脉宽的影响关系依次为:厚度 > 直径 > 跌落高度 > 硬度;

2)在两因素交互影响中,波形发生器厚度和直径的交互作用对冲击波形的峰值加速度和脉宽有显著影响,甚至高于个别单一因素对其的影响,因此,在分析中不应忽略各因素间的交互作用;

3)基于方差分析结果,剔除显著性较低的影响因素,建立了冲击波形峰值加速度和脉宽的回归预测模型,将其与正交实验数据进行了对比,发现两者之间的变化趋势一致;并通过冲击试验对回归预测模型做了进一步检验,发现冲击试验数据和预测值误差在 10% 之内,证明了该回归预测模型的准确性,为实际的冲击试验提供了理论支撑。

在目前的研究中,笔者只是基于影响冲击波形的因素进行了分析,因此,该结果尚具有一定的局限性。在后续的研究中,笔者将根据需要对影响冲击波形的更多参数进行更为全面深入的优化分析。

参考文献 (References):

[1] 黄德东,温晶晶,邢亮亮,等. 半正弦波形发生器的非线性动力学模型及模型参数标定方法研究[J]. 西北工业大学学报,2019,37(6):1085-1094.
HUANG De-dong, WEN Jing-jing, XING Liang-liang, et al. Study on a nonlinear dynamic model and its parameters

determination method for half sine programmer[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37 (6) : 1085-1094.

- [2] 王贡献,褚德英,张 磊,等. 舰船设备冲击试验机研究进展[J]. 振动与冲击,2007,26(2):152-159.
WANG Gong-xian, CHU De-ying, ZHANG Lei, et al. Advances in shock test facilities for shipboard equipments [J]. Journal of Vibration and Shock,2007,26(2):152-159.
- [3] 胡 凯,车汉生,张仕彬,等. 浅谈不同设备做半正弦波冲击试验的差异[J]. 环境技术,2022,40(3):133-138.
HU Kai, CHE Han-sheng, ZHANG Shi-bin, et al. Talking about the difference of half-sine wave shock test with different equipments [J]. Environmental Technology, 2022, 40(3):133-138.
- [4] DUAN Z Y, TANG C S, LI Y, et al. Pulse shaping techniques for a high-g shock tester based on collision principle[J]. Review of Entific Instruments,2016,87(9):223-250.
- [5] KIM T H, BAE J S, SHUL C W. Investigation on the parameter determination and implementation of a dual-pulse shock test machine using a MR damper [J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2016, 30 (12) : 5381-5387.
- [6] 王贡献,胡吉全,汪 玉,等. 舰船设备水下爆炸冲击模拟器机理与仿真[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2008,36(7):124-128.
WANG Gong-xian, HU Ji-quan, WANG Yu, et al. Numerical modeling and mechanism of a simulator for underwater explosion shock loads on warship equipment[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition,2008,36(7):124-128.
- [7] 梁斌强. 摆锤式冲击试验系统的研制及性能研究[D]. 北京:北京交通大学机械与电子控制工程学院,2017.
LIANG Bin-qiang. Development and Performance Study of Pendulum Impact Experiment System[D]. Beijing: School of Mechanical and Electronic Control Engineering, Beijing Jiaotong University, 2017.
- [8] 毛勇建. 跌落冲击机垫层的硬非线性对半正弦波模拟的影响[J]. 环境技术,2002,20(5):5-9.
MAO Yong-jian. Effects of hard-nonlinear cushion for drop shock machine to simulation of half-sine waveform [J]. Environmental Technology,2002,20(5):5-9.
- [9] 李东方,赵应龙,肖全山. 一种舰用橡胶减振器疲劳寿命预测方法研究[J]. 机电工程,2020,37(7):811-815.
LI Dong-fang, ZHAO Ying-long, XIAO Quan-shan. Fatigue life prediction method for shipborne rubber shock absorber [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2020, 37(7):811-815.

- [10] 金 著,赵应龙,杨 雪. 舰用隔振橡胶超弹性力学本构模型研究[J]. 船舶力学,2023,27(1):144-152.
JIN Zhu, ZHAO Ying-long, YANG Xue. Study on hyperelastic constitutive model of marine isolation rubber [J]. Journal of Ship Mechanics,2023,27(1):144-152.
- [11] XU C, CHI M, LIANG S, et al. Research on non-hyperelastic mechanical model of EMU rubber spring based on experimental data[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design,2022,57(4):255-265.
- [12] 王 雷,李 毅,马智慧. 基于 Mooney-Rivlin 模型的车辆环形橡胶减震器径向刚度计算与参数优化[J]. 兵工学报,2022,43(S1):35-45.
WANG Lei, LI Yi, MA Zhi-hui. The radial stiffness calculation and parameter optimization of the annular rubber shock absorber based on Mooney-Rivlin model[J]. Acta Armamentarii,2022,43(S1):35-45.
- [13] SUN J, ZHANG D, JING X, et al. Experimental investigation and optimization on trepanning drilling in K24 superalloy by femtosecond laser via orthogonal experiment [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2023,128(7):3343-3356.
- [14] DONG J Y, YANG J H, YANG G X, et al. Research on similar material proportioning test of model test based on orthogonal design[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(1):44-49.
- [15] 钱小辉,马骁妍,秦中华,等. 基于正交试验的玻璃壳热应力影响因素分析[J]. 机械工程学报,2019,55(12):91-98.
QIAN Xiao-hui, MA Xiao-yan, QIN Zhong-hua, et al. Analysis of glass shell's thermal stress based on orthogonal experiment[J]. Journal of Mechanical Engineering,2019,55(12):91-98.
- [16] 吴 斌,肖轶男,毛 迪. 涡轮增压器叶轮参数设计[J]. 机械制造,2023,61(10):19-22.
WU Bin, XIAO Yi-nan, MAO di. Parameter design of turbocharger impeller [J]. Machinery, 2023, 61 (10): 19-22.
- [17] 张庆军,谢 颖,吴 松. 基于正交实验与回归分析的机载共形天线吸波涂层厚度预测[J]. 兵工学报,2021,42(12):2693-2699.
ZHANG Qing-jun, XIE Ying, WU Song. Prediction of wave-absorbing coating thickness of airborne conformal antenna based on orthogonal experimental design and regression analysis[J]. Acta Armamentarii,2021,42(12):2693-2699.
- [18] BIN L, FANG H Y. Prediction model for maximum shear displacement of pipe joints with preexisting defects based on finite element-multiple nonlinear regression method [J]. Structural Concrete,2021,22(6):124-128.
- [19] 马 涛,马 源,黄晓明. 基于多元非线性回归的智能压实关键参数最优解[J]. 吉林大学学报:工学版,2023,53(7):2067-2077.
MA Tao, MA Yuan, HUANG Xiao-ming. Optimal combination of key parameters of intelligent compaction based on multiple nonlinear regression[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition,2023,53(7):2067-2077.
- [20] 罗 炆,王湘江,林 光. 基于响应面法的核部件运输桶结构冲击可靠性分析[J]. 机电工程技术,2023,52(4):124-127.
LUO Yang, WANG Xiang-jiang, LIN Guang. Impact reliability analysis of nuclear component transport barrel structure based on response surface method[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023, 52 (4): 124-127.

本文引用格式:

刘 博,闫 明,李朕均,等. 冲击试验机波形预测方法研究[J]. 机电工程,2024,41(9):1715-1722.

LIU Bo, YAN Ming, LI Zhenjun, et al. Waveform prediction method of impact testing machine[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2024,41(9):1715-1722.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>