

适应多工况的工程机械液压元件 载荷集总参数动态响应模型

李晓田, 邹博文, 王安麟

(同济大学机械与能源工程学院, 201804, 上海)

摘要: 为在系统动力学仿真中动态表达不同工况下工程机械液压元件所受剧烈变化的不确定性载荷,提出一种液压元件载荷集总参数动态响应模型。针对液压元件所受非平稳随机循环载荷,采用小波分解法将其分解为趋势项与随机项,其中非平稳的趋势项用经现场试验数据标定的集总参数模型进行表达,平稳的随机项根据能量等价原则用随机谐和函数进行表达,并由两者合成得到载荷模型;然后以某型液压挖掘机回转载荷为实例,建立了回转马达的载荷模型,对比某工况下载荷模型的响应与现场试验数据,证明了该载荷模型搭建方法的可行性和有效性。研究结果表明:该载荷集总参数动态响应模型能实现不同工况下液压元件载荷的动态表达,有助于改善工程机械液压系统动力学仿真对复杂多变工况的适应性。

关键词: 工程机械;载荷;系统动力学仿真;小波分解;集总参数

中图分类号: TH137.52 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202105007 **文章编号:** 0253-987X(2021)05-0056-09



OSID 码

Lumped Parameters Dynamic Response Model of Loads for Hydraulic Components of Construction Machinery Adapted to Multiple Working Conditions

LI Xiaotian, ZOU Bowen, WANG Anlin

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To dynamically express the uncertain loads of hydraulic components of construction machinery under different working conditions in system dynamics simulation, a lumped parameters dynamic response model of hydraulic component load is proposed. For the non-stationary random cyclic load of hydraulic components, the wavelet transform method is used to decompose it into a trend term and a random term. The non-stationary trend term is expressed by a lumped parameter model calibrated by data from field tests, and the stable random term is expressed by a random harmonic function based on the principle of energy equivalence, and the load model is synthesized by the above two terms. Then, taking rotary load of a certain type of hydraulic excavator as an example, the load model of the rotary motor is established and the response of the load model is compared with the field test data under a certain working condition to prove the feasibility and effectiveness of the load model construction method. The research results show that the lumped parameter dynamic response model can realize the dynamic expression of the hydraulic component loads under different working conditions, which helps

improve the adaptability of the hydraulic system dynamic simulation of construction machinery to complex and variable working conditions.

Keywords: construction machinery; load; system dynamics simulation; wavelet decomposition; lumped parameter

液压系统被称为工程机械的肌肉,其性能优劣直接决定了整机性能的好坏^[1]。在工程中针对特定整机性能需求进行液压系统设计时,往往需要对液压系统及其液压元件进行测试以验证设计效果,考虑到时间、经济成本及试验可重复性,其多在计算机仿真环境中进行。工程机械实际工作中工况繁多,所搭建的系统动力学仿真模型应适用于多工况仿真。工程机械液压元件所受非平稳随机循环载荷变化剧烈,且变化规律具有不确定性,载荷的动态表达难以实现,仿真模型的多工况适应性难以得到保证。如何实现剧烈变化的不确定性载荷在不同工况下的动态表达已经成为了一个亟待解决的难题。

吴健兴等以信号输入模块的形式将现场试验测得的载荷数据直接导入到系统仿真模型之中,该方法虽然能够真实复现实际载荷工况,但是只能实现有限工况的仿真,无法反映任意工况下的载荷情况^[2-4];熊坚等运用概率统计的方法建立了工程机械的载荷谱,但是只能体现出载荷的某些统计特性,且主要用于快速模拟疲劳试验^[5-8];Wang等运用外推法进行了工程车辆非稳态载荷历程的模拟,但是该方法主要用于疲劳试验^[9-10];Norden等提出了一种基于经验模态分解法的新分解方法对随机信号进行了分析^[11];马登成等通过数学手段将非平稳随机循环载荷分解为趋势项及随机项并进行重构,建立了载荷的数学模型,实现了载荷的参数化表达,但未能将其与系统动力学仿真相结合^[12-14];陶海军等通过建立整机模型,联系工程机械实际结构特点搭建了负载模块,实现了非平稳随机载荷趋势项的动态表达,但是模型较为复杂,且无法表达出载荷的随机项^[15-17]。本文提出一种适应多工况的工程机械液压元件载荷集总参数动态响应模型搭建方法。

1 工程机械载荷特征

工程中可通过现场试验获取工程机械液压元件的载荷数据来分析其特征。压力载荷试验结果如图1所示,通过现场试验分别获得了某中型液压挖掘机循环作业过程中,铲斗单动作工况下铲斗大腔压力载荷、回转单动作工况下马达进油口压力载荷以及动臂+回转复合动作工况下动臂大腔压力载荷测试数据。

通过分析以上现场试验测得的载荷数据,可以发现工程机械液压元件所受载荷呈现出了明显的非平稳随机循环特征。其主要特征可概括为^[18]:①试验样本长度很短,试验样本总体只能靠多次重复试验获得;②试验数据中包含有某种循环出现并带有确定性趋势的分量,这是一种缓慢变化的趋势项,其主要由整机作业条件决定;③整个试验过程中,除了趋势项载荷,还始终伴随着锯齿形波动的随机项载荷。图2所示为动臂+回转复合动作试验过程中动臂大腔压力载荷变化情况,可以看出其随机项的波动特征。在不同工况中随机项波动程度有差异,主要由整机自身结构及力学特性决定。

由分析可知,工程机械所受载荷为含有明显趋势项的非平稳随机循环载荷,其变化剧烈且变化规律具有不确定性,因此该载荷在系统动力学仿真中的动态表达难以实现。

2 载荷模型搭建流程与方法

2.1 载荷模型搭建流程

工程机械液压元件实际工作中所受载荷由趋势项与随机项构成,其产生机制、决定因素及变化规律都不相同,故在搭建载荷模型时需要将两者分开考

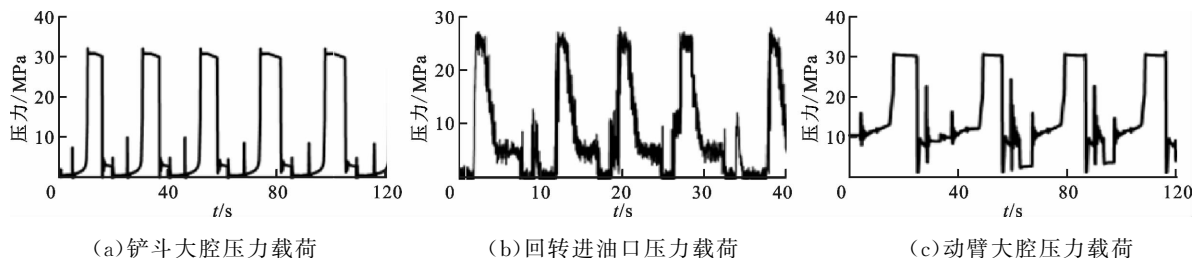


图1 压力载荷试验结果

Fig. 1 Test data of pressure load

虑。小波变换对非平稳随机信号有很好的处理效果,可利用其将非平稳随机载荷分解为非平稳的趋势项以及平稳的随机项

$$L_m(t) = T_m(t) + R_m(t) \tag{1}$$

式中: $L_m(t)$ 为第 m 个工况下某时间历程经现场试验测得的载荷; $T_m(t)$ 为载荷非平稳分量(趋势项); $R_m(t)$ 为载荷平稳分量(随机项)。

载荷模型的搭建分为 3 个步骤,即趋势项模块的搭建、随机项模块的搭建及两个模块的合成。其中:趋势项模块采用集总参数法思想,根据液压系统实际结构特点用多个功能元件进行搭建,各元件参数根据实际情况进行设置或者通过现场试验测得的数据标定得到;随机项模块则是在能量等价条件下将随机项载荷参数化,并用随机谐和函数对其进行表达。载荷模型的具体搭建流程如图 3 所示。

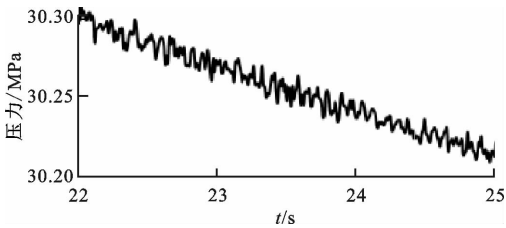


图 2 试验过程中动臂大腔压力载荷变化情况

Fig. 2 Pressure load fluctuation in big chamber of boom during test

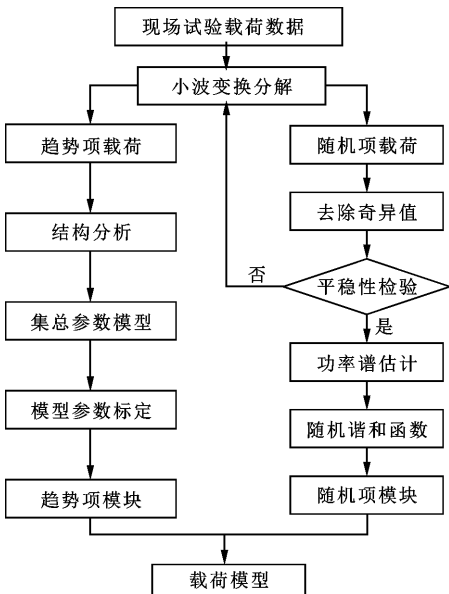


图 3 载荷模型的具体搭建流程

Fig. 3 Construction process of building load model

2.2 载荷模块搭建关键方法

2.2.1 小波变换分解 工程机械液压元件所受非平稳随机循环载荷具有如下特征:高频部分(随机

项)变化迅速,持续时间短;低频部分(趋势项)变化缓慢,持续时间长。小波变换作为一种时间窗和频率窗均可改变的时频局部化分析方法,既能分析载荷信号的整体轮廓,也可以进行信号细节分析,非常适合进行趋势项载荷与随机项载荷的分离^[19]。

根据文献[13-14],采用多尺度一维小波变换的方法,选择合适的小波函数和分解层次,可以很好地对非平稳随机载荷中的趋势项和随机项进行分离。

设分解尺度为 2^j ,对近似信号 $A_j f$ 进行分解。每次分解后可得到通过低通滤波器的低频分量 $A_{j-1} f$ (趋势项)和通过高通滤波器的高频分量 $D_{j-1} f$ (随机项),表达式如下

$$\left. \begin{aligned} A_j f &= A_{j-1} f + D_{j-1} f \\ A_{j-1} f &= \sum_k a_k^{j-1} \phi(2^{j-1} - k) \\ D_{j-1} f &= \sum_k d_k^{j-1} \psi(2^{j-1} - k) \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

其中: a_k^{j-1} 和 d_k^{j-1} 分别为近似系数和细节系数; $\phi(\cdot)$ 为尺度函数,与低通滤波器对应; $\psi(\cdot)$ 为小波函数,与高通滤波器对应。根据多分辨率分析理论,对于非平稳随机载荷信号,分解层次越多,趋势项和随机项分离得就越彻底。但是考虑到计算量及实际需求,分解层次选择 4 层左右为宜,图 4 为将试验载荷数据进行三尺度分解后所得结果。

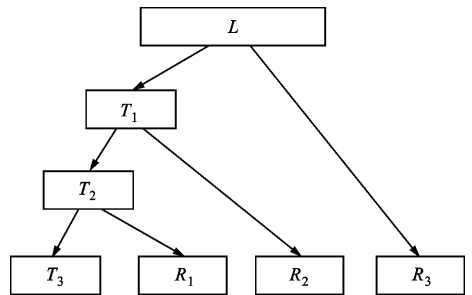


图 4 试验载荷数据进行三尺度分解示意图

Fig. 4 Decomposing diagram of test load in 3 scales

如图 4 所示, L 为现场试验载荷数据, T_i 和 R_i 表示第 i 次分解后所得低频分量(趋势项)和高频分量(随机项)。经三尺度分解后,最终得到的趋势项为 T_3 ,随机项则可以由 R_1 、 R_2 及 R_3 叠加得到。

2.2.2 集总参数建模法 集总参数建模是指在一定假设条件下,将空间分布式物理系统简化成由各个离散单元组合而成的,能体现分布式系统行为的拓扑结构的一种建模方法^[20]。

趋势项模块可以采用集总参数建模法进行搭建,即通过分析工程机械液压元件载荷部分液压系统实际结构,在一定假设条件下,选取若干离散的功

能元件进行组合,使组合得到的仿真模块能够体现实际工作中载荷部分的行为特征。若干功能元件参数的组合就能表征原本复杂的液压系统结构。各功能元件的参数中:一部分表征整机系统固有特性,按照实际情况设置即可;一部分参数则需根据现场试验载荷数据进行标定。标定时,选取若干待标定参数作为设计变量,以载荷仿真值与载荷试验数据的平均误差为设计目标,目标函数如下式

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_i - S_i| \quad (3)$$

式中: η 为平均误差; n 为试验数据点数; R_i 和 S_i 分别为第 i 个点的试验值和仿真值。选取合适的设计目标或者迭代次数,即可得到各参数的标定值。

2.2.3 随机谐和函数 在实际工作中,工程机械振动能量通常集中在一定的范围内,超出该范围的振动能量将会非常小,因此可以近似认为工程机械的振动能量集中在某个频率范围内^[12]。利用 Welch 法可以对载荷随机项进行功率谱估计,得到的功率谱密度函数 $P(\omega)$ 可在统计意义下描述一个载荷随机项。文献[21]证明,采用随机谐和函数表达一个随机过程,仅需要很少的项数,即可获得精确的目标功率谱密度。随机谐和函数 $Y_N(t)$ 表达式如下

$$Y_N(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (4)$$

式中: A_i 、 ω_i 、 φ_i 分别为第 i 个谐和分量的幅值、频率和相位角。

为保证谐和函数的能量与随机信号能量相等,可将 $P(\omega)$ 频域轴划分成 e 个区间,取每个区间中间频率 $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_e)$ 为 $Y_N(t)$ 谐和分量的频率。要使每个谐和分量的能量等价于其对应频率区间的能量,第 i 个谐和分量的振幅应满足以下条件

$$\frac{A_i^2}{2} = \int_{\omega_{i-1}}^{\omega_i} P(\omega) d\omega \quad (5)$$

若把频率分为 e 个区间,式(1)中的载荷随机项 $R_m(t)$ 用以下随机谐和函数表达

$$R_m(t) =$$

$$\sum_{i=1}^e \left(\sqrt{2 \int_{\omega_{i-1}}^{\omega_i} P(\omega) d\omega} \cos\left(\frac{\omega_{i-1} + \omega_i}{2} t + \varphi_i\right) \right) \quad (6)$$

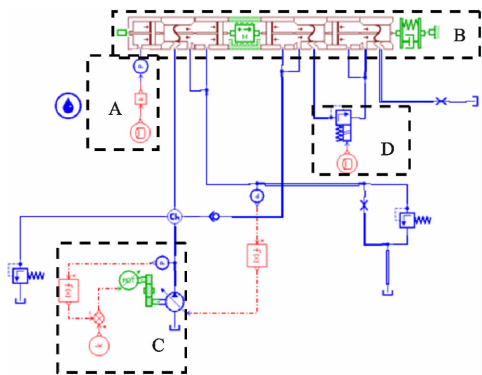
其中各谐和分量振幅及频率由上述能量等价原则获得,相位 φ_i 可通过程序拟合得到。

2 载荷模型搭建实例

3.1 回转联液压系统模型

以某中型液压挖掘机回转载荷为实例搭建载荷

模型,首先建立如图5所示多路阀回转联液压系统模型,可分为4部分。先导部分A可导入任意先导信号;载荷部分D由溢流阀暂时替代,其可导入试验载荷数据。经仿真验证,该模型在外部导入试验载荷的情况下能正确地对应工况下的仿真^[22]。



A—先导部分;B—阀芯部分;C—变量泵及发动机部分;
D—载荷部分。

图5 回转联液压系统模型

Fig. 5 Hydraulic system model of swing circuit

挖掘机在实际工作中工况繁多,以空载回转为例,其回转角度或作业循环次数可以是任意的,现场试验却无法获得所有工况的载荷信号。因此,若载荷信号需要依靠外部输入,仿真将无法对所有工况进行模拟。按图3所述流程搭建载荷模块,能使载荷信号随着先导信号的改变而改变,只需通过调整先导信号就能实现对所有工况的仿真。

3.2 载荷的小波分解

搭建面向空载回转工况的载荷模型,首先应通过现场试验获得该型挖掘机在连续两次空载回转360°工况下的回转马达进出油口压力载荷数据(试验数据能完整反映包含启动加速、匀速回转、制动减速在内的整个回转过程即可);出油口载荷试验数据、趋势项、随机项如图6所示,选取小波基为db10,分解层数为5层,对出油口载荷试验数据进行小波分解,可得到载荷趋势项及随机项。

3.3 趋势项模块

趋势项模块采用集总参数建模法进行搭建,首先应对回转联载荷元件及其液压回路进行分析。图7所示为回转马达的液压回路。其中,I为回转马达,其他液压回路按照功能分为4部分。

采用集总参数建模法对回转联载荷趋势项模块进行建模时,做出如下假设:①整机转动惯量在工作过程中视为定值;②液压油的各物理性质在工作过程中不改变;③不考虑减速机传动时的效率损失。

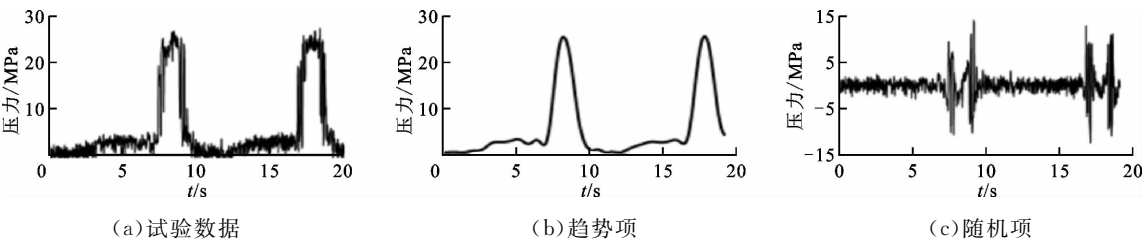
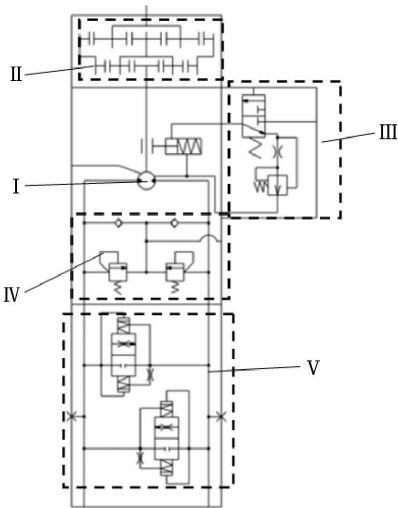


图 6 出油口载荷试验数据、趋势项、随机项

Fig. 6 Test data of load at outlet and the trend term and random term



I—回转马达；II—行星齿轮减速机；III—中位延时制动部分；
IV—过载保护和缓冲补油部分；V—制动时防反转装置部分。

图 7 回转马达液压回路

Fig. 7 Hydraulic circuit of swing motor

由于本文仅关注马达启动及回转过程的载荷变化情况,不考虑制动过程,同时为了简化模型,使模型所包含的元件尽可能少,所以在建模时仅保留 II 和 IV 两部分。在实际操作过程中,运用本文方法可根据实际需求对模型进行改进。搭建的回转联载荷趋势项模块如图 8 所示。图 7 中 II 部分行星齿轮减速机简化为了一个减速比元件,IV 部分过载保护及缓冲补油装置按照其实际结构选择相应功能模块进行搭建,整机则简化为一个转动惯量元件。回转马

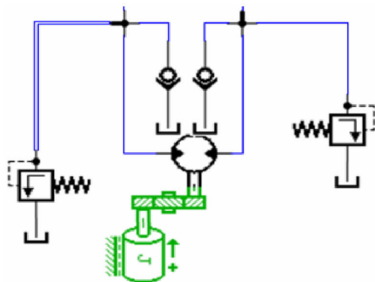


图 8 回转联载荷趋势项模块

Fig. 8 Trend term module of swing circuit load

达两端油路连接部分与图 5 载荷部分溢流阀所连接部分一致。该模块需要自行设定的参数如表 1 所示,其中一部分参数根据实际情况进行设置,其他无法直接获取的参数应通过标定得到^[22]。

以回转马达进出油口载荷趋势项试验数据与仿真数据的平均误差为设计目标,其中进油口及出油口的权重各占 50%,对表 1 所示 4 个需标定参数进行标定,目标函数如下式

$$\eta_m = \frac{1}{2p} \sum_{h=1}^p |R_{in(h)} - S_{in(h)}| + \frac{1}{2p} \sum_{l=1}^q |R_{out(l)} - S_{out(l)}| \quad (7)$$

式中: η_m 为平均误差; p 、 q 分别为现场试验中进出油口采集载荷数据的点数; $R_{in(h)}$ 和 $S_{in(h)}$ 分别为第 h 点进油口载荷的试验值及对应的仿真值; $R_{out(l)}$ 和 $S_{out(l)}$ 为第 l 点出油口载荷的试验值及仿真值。

表 1 载荷趋势项模块参数

Table 1 Parameters of trend term module	
参数	数值
溢流阀溢流压力/MPa	25
马达排量/(cm ³ ·r ⁻¹)	129.2
马达额定转速/(r·min ⁻¹)	1 600
减速机减速比	147.4
转动惯量	需标定
黏性摩擦系数	需标定
库仑摩擦转矩	需标定
静摩擦转矩	需标定

设置迭代次数为 50,最后得到的最小平均误差约为 1.5 MPa,载荷趋势项模块各设计变量的标定值如表 2 所示。

为了验证经标定后的趋势项载荷模块对多工况仿真的适应性,调整图 5 中 A 部分的先导信号,使其变为空载回转 180°工况所对应先导信号,并将回转马达出油口载荷趋势项仿真数据与试验载荷趋势项数据进行对比,结果如图 9 所示。

表 2 载荷趋势项模块各设计变量的标定值

Table 2 Calibrated parameters of trend term module

参数	标定值
转动惯量/(kg·m ²)	114 627.30
黏性摩擦系数(N·m·min·r ⁻¹)	227.56
库仑摩擦转矩/(N·m)	4 676.07
静摩擦转矩/(N·m)	4 890.57

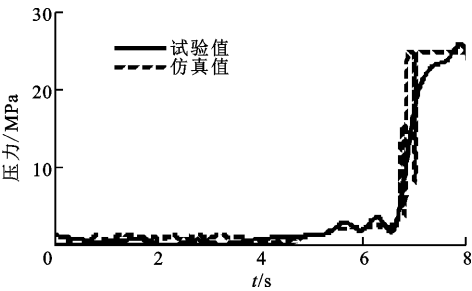


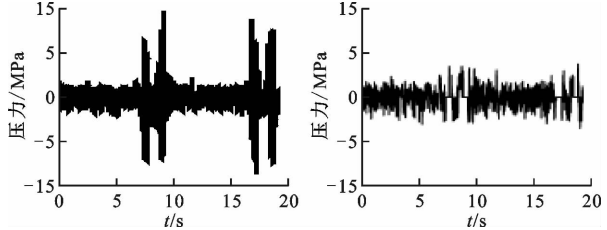
图 9 趋势项载荷仿真数据与试验数据对比

Fig. 9 Comparison between trend term simulation data and test data

通过计算得到该工况下载荷趋势项仿真数据与试验数据的平均误差约为 1.4 MPa,可认为趋势项载荷模块能够实现任意空载回转工况的趋势项载荷动态表达。

3.4 随机项模块

经过 3.2 节所述的小波分解后,可得到挖掘机连续空载回转两个 360°工况下回转马达进出油口载荷的随机项试验数据。通过对比进出油口随机项载荷的统计量及平均功率,认为两者在统计意义上基本相等,都能够代表回转载荷随机项的统计特征,本文选取出油口随机项载荷搭建随机项模块。为了排除试验中的外部干扰,应去除该随机项载荷的奇异值,即去掉均值正负 3 个标准差之外的数据。图 10 给出了随机项去除奇异值前后比较。



(a)去奇异值前 (b)去奇异值后

图 10 随机项去除奇异值前后比较

Fig. 10 Comparison between random terms before and after removing singular values

只有载荷随机项是平稳的各态历过程,其统

计特征才具有代表性,才能用有限长度的样本去推断、估计相同试验条件下的其余随机过程^[23]。用轮次法检验图 10b 中所示随机过程样本的平稳性,在子样本数为 10、显著水平为 0.05 的条件下,计算出该样本的轮次数为 3,经查轮次分布表,其满足平稳性假设条件,且获得各子样本的试验条件基本相同,故该平稳随机过程可当作各态历过程来处理^[24]。

针对能量有限信号,功率谱密度(PSD)可用来反映信号能量特征,即表现信号功率在频域中的分布状况。利用 Welch 法可得到随机项载荷的功率谱密度函数曲线,如图 11 所示。可以用其与坐标轴所围成面积来表征信号平均功率大小。工程中考虑非电信号能量时,常将其等效为施加在单位电阻上的电压信号。

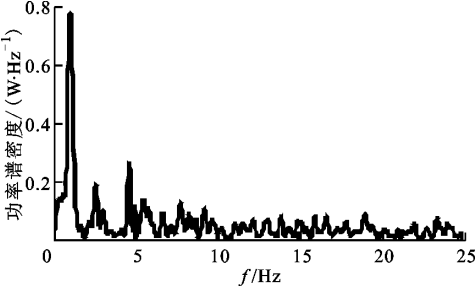


图 11 随机项载荷的功率谱密度函数曲线

Fig. 11 Power spectral density of random term load

由图 11 可见,载荷随机项功率谱密度峰值出现在 1 Hz 左右,具有低频振动特性,并可近似认为随机项能量集中在 0~20 Hz 范围内。将该频率范围等分成 10 个区间,取每个区间中间频率(1,3,⋯,19 Hz)为随机谐和函数 $Y_N(t)$ 分量的频率,各分量对应的振幅由式(5)求出,相位由 Matlab 程序拟合得到,随机谐和函数可由下式表示

$$Y_N(t) = \sum_{i=1}^{10} y_i(t) = \sum_{i=1}^{10} A_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (8)$$

求得的谐和函数各分量参数如表 3 所示。

在系统动力学仿真软件中搭建的回转联载荷随机项模块如图 12 所示。

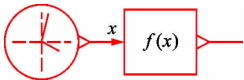


图 12 回转联载荷随机项模块

Fig. 12 Random term module of swing circuit load

随机项模块左侧为时钟元件,作用是使随机项载荷加载与仿真同步;右侧为函数元件,得到的随机谐和函数需写入该元件。为了验证构建随机项函数

表 3 谐和函数各分量参数

Table 3 Parameters of harmonic components

谐和分量	振幅/MPa	频率/Hz	初相位/rad
$y_1(t)$	0.900	1	2.540
$y_2(t)$	0.500	3	-2.273
$y_3(t)$	0.597	5	0.463
$y_4(t)$	0.463	7	1.837
$y_5(t)$	0.479	9	-0.919
$y_6(t)$	0.372	11	1.780
$y_7(t)$	0.412	13	1.630
$y_8(t)$	0.404	15	2.779
$y_9(t)$	0.412	17	2.301
$y_{10}(t)$	0.387	19	-2.493

$Y_N(t)$ 与原随机项的一致性,调整图 5 中 A 部分的先导信号,使整机空载回转两个 360° ,并将回转马达出口口载荷随机项仿真数据与试验数据进行对比,如图 13 所示。

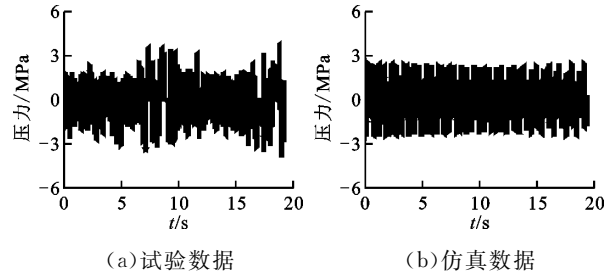


图 13 随机项模块试验数据与仿真数据对比

Fig. 13 Comparison between random term simulation data and test data

随机项试验数据与仿真数据的关键统计量与平均功率对比如表 4 所示。

表 4 随机项试验数据与仿真数据的关键统计量与平均功率对比

Table 4 Comparison of key statistics and average power between random test data and simulation data

随机项	随机项载荷/MPa		平均功率/W
	均值	标准差	
试验数据	-0.011 9	1.137 8	1.299 7
仿真数据	-0.007 4	1.150 4	1.326 5

通过对比图 13a 与图 13b,可以发现随机项试验数据与仿真数据波动范围大致都在 ± 3 MPa 内;通过对比表 4 可以发现两者关键统计量基本一致,且满足能量等价条件。因此,可认为构建的谐和函数与载荷随机项相等。

另经 3.4 节验证,载荷随机项是一个平稳的各

态历经过程,构建的随机项函数可适用于各空载回转工况,故认为该随机项模块能够实现任意空载回转工况的随机项载荷动态表达。

3.5 载荷模型的合成与验证

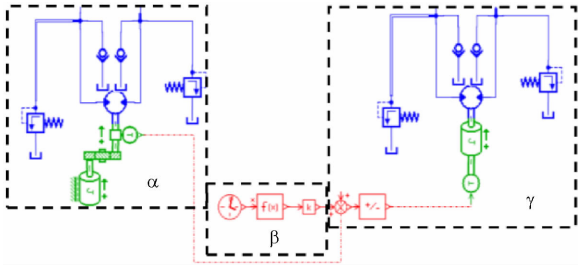
前文 3.3 节及 3.4 节已经分别搭建了面向空载回转工况的载荷趋势项及随机项模型,由于在该系统动力学仿真软件中无法直接在回转马达口叠加趋势项及随机项压力载荷,故选择将趋势项及随机项压力载荷分别转换为转矩再叠加给回转马达。

回转联载荷模型如图 14 所示, α 部分为趋势项模块,在回转马达输出转矩口添加一个转矩传感器模块,可以获取趋势项转矩信号; β 部分为随机项模块,随机项载荷信号通过乘以一个系数 K 可以将压力信号转换为转矩信号, K 值可由下式得到

$$K = \frac{T}{P} = V$$

(9)

式中: T 、 P 分别为回转马达口的随机项转矩和压力,故知 K 值在数值上等于回转马达排量 V 。



α —趋势项模块; β —随机项模块; γ —叠加模块。

图 14 回转联载荷模型

Fig. 14 Load model of swing circuit

γ 部分为叠加模块,将趋势项转矩和随机项转矩叠加后通过连接元件传递给该部分的回转马达,此回转马达进出口的压力载荷即为最终的载荷仿真值。 α 、 γ 部分中的回转马达进出油口所连接其他部分参考图 5。

为了验证合成后的载荷模型仿真效果,调整图 5 中 A 部分的先导信号,使整机空载回转 180° ,将图 14 中 γ 部分的回转马达进出口压力载荷仿真数据与试验数据进行对比。

进口口、出口口载荷试验数据与仿真数据对比如图 15、16 所示,回转马达进出口压力载荷仿真数据与试验数据关键点及趋势基本保持一致,且仿真数据具有明显非平稳随机特征。在前文对趋势项模块和随机项模块都已进行验证的情况下,认为合成之后的载荷模块可以实现任意空载回转工况的载荷动态表达。

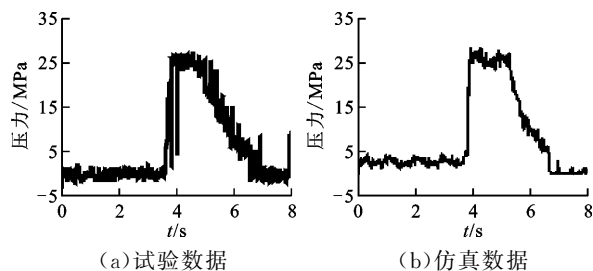


图 15 进油口载荷试验数据与仿真数据对比

Fig. 15 Comparison between inlet load test data and simulation data

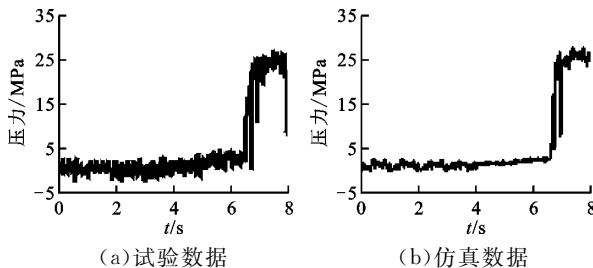


图 16 出油口载荷试验数据与仿真数据对比

Fig. 16 Comparison between outlet load test data and simulation data

4 结 论

本文提出了一种面向工程机械液压系统动力学仿真的液压元件载荷集总参数动态响应模型的搭建方法,并以某中型液压挖掘机回转载荷为实例进行了载荷模型搭建。本模型的特点及优势有以下3点。

(1)表达了载荷的随机项。工程机械液压元件所受非平稳随机循环载荷包含有平稳的随机项,本文通过小波分解将其分离出来,并在能量等价条件下用随机谐和函数代替原随机项,实现了随机项载荷在系统动力学仿真中的动态表达。

(2)适应于复杂多变工况。该载荷模型能够匹配先导压力的变化实现液压元件载荷的动态表达,可任意调整先导信号,实现对应工况的仿真。改善了工程机械液压系统动力学仿真对实际工作中复杂多变工况的适应性。

(3)模型搭建方法具有普适性。本文仅以挖掘机回转载荷为实例验证了该方法的可行性,但从理论上讲,此方法对工程机械液压元件所受非平稳随机循环载荷具有普适性。

参考文献:

[1] 吴兵. 工程机械液压系统动态性能试验平台开发与设计 [D]. 厦门: 集美大学, 2012: 1-5.

[2] 吴健兴, 路芳, 周知进. 基于 AMESim 的轮式挖掘机作业支撑液压系统响应特性试验研究 [J]. 机床与液压, 2019, 47(22): 79-82.
WU Jianxing, LU Fang, ZHOU Zhijin. Experimental research on the response properties of working support device's hydraulic system of wheel excavator based on AMESim [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(22): 79-82.

[3] 吴云展, 吴运新, 龚海. 基于响应面法的挖掘机装载动作协调性优化研究 [J]. 现代制造工程, 2019(4): 64-69.
WU Yunzhan, WU Yunxin, GONG Hai. Optimization of the coordination of loading action of excavator based on response surface method [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(4): 64-69.

[4] 马登成, 杨士敏, 马登慧. 动态载荷下发动机动态性能的 AMESim 仿真分析 [J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(2): 135-138.
MA Dengcheng, YANG Shimin, MA Denghui. Simulation analysis on the dynamic characteristics of engine under fluctuant load based on AMESim [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2011, 46(2): 135-138.

[5] 熊坚, 张昆, 杨树忠. 山区汽车转向载荷谱的动态仿真研究 [J]. 云南工业大学学报, 1998, 14(4): 42-45.
XIONG Jian, ZHANG Kun, YANG Shuzhong. Research for the automotive load spectra in mountain roads [J]. Journal of Yunnan Polytechnic University, 1998, 14(4): 42-45.

[6] 李晋善, 薛广兰. 农用运输车的载荷谱及应用 [J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 55-58.
LI Jinshan, XUE Guanglan. The load spectrum of farm vehicles and its applications [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(2): 55-58.

[7] 高天宇, 李焕良, 郑铮. 基于雨流频次外推的 ZLK50 型装载机液压缸载荷谱编制 [J]. 机械强度, 2017, 39(4): 951-956.
GAO Tianyu, LI Huanliang, ZHENG Zheng. Compiling method of load spectrum of ZLK50 type loader hydraulic cylinder based on rain flow frequency extrapolation [J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39(4): 951-956.

[8] CARBONI M, CERRINI A, JOHANNESSON P, et al. Load spectra analysis and reconstruction for hydraulic pump components [J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2008, 31(3/4): 251-261.

- [9] WANG Jixin, CHEN Hongbin, LI Yan, et al. A review of the extrapolation method in load spectrum compiling [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 62(1): 60-75.
- [10] WANG Jixin, LI Yan, JIANG Zhujin. Non-parametric load extrapolation based on load extension for semi-axle of wheel loader [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(3): 1-12.
- [11] NORDEN E H, ZHENG S, STEVEN R L, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society: A, 1998, 454: 903-995.
- [12] 马登成, 杨士敏, 马登慧. 工程机械波动载荷分析与模拟方法研究 [J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(6): 136-143.
- MA Dengcheng, YANG Shimin, MA Denghui. An analysis of fluctuations load and simulation method on construction machinery [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2013, 48(3): 136-143.
- [13] 王安麟, 石世宁, 李晓田. 挖掘机动态性能试验及其数据的小波处理方法 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 115-123.
- WANG Anlin, SHI Shining, LI Xiaotian. Dynamic performance test and wavelet processing method for non-stationary random data of hydraulic excavator [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(1): 115-123.
- [14] 姜涛, 付志翼, 王安麟. 一种非平稳随机循环工况下的参数化载荷模型 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 845-850.
- JIANG Tao, FU Zhiyi, WANG Anlin. Parameterized load model under non-stationary random cyclic conditions [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(6): 845-850.
- [15] 陶海军, 管伟, 郝鹏. 挖掘机挖掘工况多路阀能耗分析 [J]. 液压液力, 2016(6): 81-85.
- TAO Haijun, GUAN Wei, HAO Peng. Energy consumption analysis of multi-way valve in excavator digging condition [J]. Hydrodynamics & Hydrostatics, 2016(6): 81-85.
- [16] 邱清盈, 魏振凯, 高宇. 挖掘机工作装置疲劳分析方法 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(1): 159-165.
- QIU Qingying, WEI Zhenkai, GAO Yu. Fatigue analysis method of working devices of hydraulic excavator [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(1): 159-165.
- [17] CASOLI P, ANTHONY A. Gray box modeling of an excavator's variable displacement hydraulic pump for fast simulation of excavation cycles [J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(2): 483-494.
- [18] 孙祖望, 张义甫, 郭德虎. 推土机动态性能试验的非平稳随机数据模型和处理方法 [J]. 工程机械, 1988, 19(10): 22-28.
- SUN Zuwang, ZHANG Yifu, GUO Dehu. Non-stable random data model of dynamic performance testing for bulldozers and data processing procedure [J]. Construction Machinery and Equipment, 1988, 19(10): 22-28.
- [19] 李晓祥, 王安麟, 付志翼. 面向典型换挡工况重构的参数化试验载荷模型 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(1): 43-49.
- LI Xiaoxiang, WANG Anlin, FU Zhiyi. Parameterized test load model for typical shifting condition reconstruction [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(1): 43-49.
- [20] 夏天. 基于集总参数法的附壁射流无阀压电微泵建模 [D]. 苏州: 江苏大学, 2019: 15-17.
- [21] 陈建兵, 李杰. 随机过程的随机谱和函数表达 [J]. 力学学报, 2011, 43(3): 505-513.
- CHEN Jianbing, LI Jie. Stochastic harmonic function and spectral representations [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011, 43(3): 505-513.
- [22] 陈源流, 王安麟, 李晓田. 挖掘机多路阀的载荷分类设计 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(9): 100-108.
- CHEN Yuanliu, WANG Anlin, LI Xiaotian. Load classification design of excavator multiway valve [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(9): 100-108.
- [23] SONSINO C M. Fatigue testing under variable amplitude loading [J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(6): 1080-1089.
- [24] 徐礼超, 葛如海, 常绿. 典型工况下载载机液压系统载荷时间历程的制取方法 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 57-62.
- XU Lichao, GE Ruhai, CHANG Lü. Acquisition method of load time course of loader hydraulic system under typical operating conditions [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(6): 57-62.

(编辑 武红江)