

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.041

基于 FDR 阈值自动选取的拖拉机 PTO 转矩载荷谱外推

王禹 王玲 吕东晓 温昌凯 王书茂
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对时域外推过程中常用的阈值选取计算复杂、精度低等问题, 基于错误发现率(False discovery rate, FDR)提出了一种阈值自动选取方法, 并基于该方法进行了拖拉机动力输出轴(Power take-off, PTO)转矩载荷谱外推研究。首先, 利用开发的拖拉机 PTO 转矩无线监测系统采集拖拉机作业工况下的载荷数据, 并进行数据预处理; 将顺序拟合检验与多重检验相结合, 采用 FDR 自动阈值选取法选取了最优阈值, 确定了时域外推数据的上限阈值为 342 N·m, 下限阈值为 100 N·m; 基于极大似然估计对超额值数据进行了广义帕累托分布(Generalized Pareto distribution, GPD)尺度参数和形状参数的拟合, 建立了 PTO 转矩载荷的超额值模型, 并与传统图像法的拟合结果进行了比较, 结果表明, 两种方法的拟合结果与载荷样本的决定系数均大于 0.995; 从拟合优度来看, 对于上限阈值, 自动阈值选取法的拟合优度比图像法的拟合优度降低 8.7%, 而对于下限阈值, 自动阈值选取法比图像法降低 31.21%。利用时域外推方法对 PTO 转矩载荷数据进行外推, 对外推 1 倍后的载荷时间历程与原载荷时间历程进行对比分析; 当时域外推因子为 131、PTO 转矩累积频次达到 10⁶次时, 得到了 PTO 转矩载荷谱; 基于统计学特征与雨流计数分析对外推载荷谱进行了验证, 结果表明, 外推后的载荷谱与样本载荷谱分布规律一致, 能够在保留载荷特征的前提下实现均值、幅值的双向外推。

关键词: 拖拉机; 动力输出轴; 载荷谱; 时域外推; 广义帕累托分布; 错误发现率

中图分类号: S232.3; O212.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)03-0364-09 **OSID:** 

Extrapolation of Tractor PTO Torque Load Spectrum Based on Automated Threshold Selection with FDR

WANG Yu WANG Ling LÜ Dongxiao WEN Changkai WANG Shumao
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The compilation of the load spectrum of tractor power output components is the main method to study the relationship between tractor working load and fatigue life. Based on the peak over threshold (POT) model, the time-domain extrapolation method of the tractor power take-off (PTO) operation load spectrum was studied. Aiming at the problems of complex calculation and low accuracy of the commonly used threshold selection methods for time-domain extrapolation, an automatic threshold selection method based on false discovery rate (FDR) was proposed. Based on this method, extrapolation of the tractor PTO torque load spectrum was realized. Firstly, a tractor PTO torque wireless acquisition system was developed to collect tractor PTO operating load data and perform data preprocessing; then, the FDR automatic threshold selection method was used to select the optimal threshold, and the upper threshold of the time-domain extrapolation data was determined to be 342 N·m and the lower threshold was 100 N·m. The maximum likelihood estimation was used to fit the scale parameters and shape parameters of the generalized Pareto distribution of excess threshold data, and the peak over threshold (POT) model of PTO torque load was built and compared with the fitting results of traditional image methods; the determination coefficients between the fitting results of the two methods and the load samples were greater than 0.995; from the perspective of goodness of fit, for the upper threshold, the goodness of fit of the automatic threshold selection method was 8.7% smaller than that of the image method, and for the lower

收稿日期: 2020-11-17 修回日期: 2021-01-08
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700102)
作者简介: 王禹(1994—),男,博士生,主要从事农业装备智能测控技术研究,E-mail: wysummer@cau.edu.cn
通信作者: 王玲(1987—),女,实验师,博士,主要从事农业装备智能测控技术研究,E-mail: wangling.0928@163.com

threshold, the goodness of fit of the automatic threshold selection method was 31.21% smaller than that of the image method. Finally, the PTO load data was extrapolated based on the POT model, and 1 time extrapolated load data was compared with the original load time history; when the time domain extrapolation factor was 131 and the cumulative frequency of PTO torque reached 10^6 times, the PTO torque load spectrum was obtained. The extrapolated load spectrum was verified based on statistical characteristics and rainflow counting method. The results showed that the extrapolated load spectrum had the same distribution law as the original load spectrum, which can realize the two-way extrapolation of the average amplitude on the basis of retaining the load characteristics, providing a theoretical basis for the compilation of the tractor PTO torque load spectrum.

Key words: tractor; power take-off; load spectrum; time domain extrapolation; generalized Pareto distribution; false discovery rate

0 引言

拖拉机作业环境复杂、载荷多变,这对其整机及零部件的疲劳寿命和可靠性造成较大影响。载荷谱作为研究作业载荷与疲劳寿命及可靠性关系的主要手段,能够反映整机或零部件所承受的载荷时间历程,是拖拉机进行疲劳及可靠性试验的基础。拖拉机动力输出轴(Power take-off, PTO)是进行旋耕、耙地等作业时的主要动力输出部件,其疲劳寿命及可靠性直接影响作业效率^[1]。因此,编制适用于拖拉机 PTO 部件的动态载荷谱具有实际应用价值。

由于受时间和测试成本的限制,一般多采用载荷谱外推方法来获取全生命周期内的载荷谱。常用载荷谱外推方法主要分为频域外推和时域外推^[2]。频域外推出现时间较早,方法较为成熟^[3]。如葛宜元等^[4]、张英爽等^[5]、李雯等^[6]分别对整株秸秆还田机刀轴、工程车辆、汽车电机驱动系统的载荷谱编制方法进行了研究。频域外推法需要将时域内的载荷信号转换到频域,只能保留载荷循环的均幅值信息,会打破原有载荷的加载时序,对后续时域载荷谱应用带来不便。时域外推方法可以通过筛选对载荷信号拟合、直接外推,保留了载荷时间历程,降低了转换带来的误差。目前,常用时域外推方法主要基于极值理论,通过拟合超越阈值部分的数据来加以实现。JOHANNESSON^[7]率先提出了基于极值理论的时域外推方法,并与雨流域外推的结果进行对比分析,验证了其适用性与准确性。阈值的选取是时域外推准确性的关键,常用的阈值选取方法主要分为图像法和数值法。图像法多采用平均超出量函数图^[8]或 Hill 图法^[9],但该方法具有较强的主观性,阈值选取多凭经验确定,影响了拟合效果^[10]。杨子涵等^[11]基于超阈值模型对拖拉机传动轴载荷进行了外推,采用图像法确定候选阈值范围,通过灰色关联度分析方法对载荷数据中上下限的最优阈值进行选取,并实现了外推。数值法则是基于统计学方法

通过计算和分析选取合适的阈值,客观性较好。如 BEIRLANT 等^[12]用最小均方根误差对应的值作为阈值; THOMPSON 等^[13]引入一个新的参量,通过检验其分布特性实现了阈值自动选取,并进行了验证; 翟新婷等^[14]从载荷数据拟合角度出发,将熵法、多准则决策技术结合,提出了基于多准则的阈值选取方法,并用于装载机工作载荷谱的时域外推中。虽然相关学者对阈值自动选取方法进行了探讨,但依旧存在计算精度较低、适用范围有限及过程复杂的问题。

针对上述问题,本文基于错误发现率(False discovery rate, FDR)提出一种阈值自动选取方法,将多重假设检验应用于阈值选取过程中,以实现阈值的自动快速选取。在此基础上,以拖拉机 PTO 为研究对象进行转矩载荷谱外推,并基于实际田间作业数据获得拖拉机 PTO 全生命周期内的转矩载荷谱,通过统计学特征与雨流计数分析对阈值自动选取方法的准确性和时域外推方法的可行性进行验证,以期为农业机械作业载荷谱的外推研究提供参考。

1 基于 FDR 的阈值自动选取方法

本文基于超阈值模型实现拖拉机 PTO 转矩载荷的时域外推,其原理是采用广义帕累托分布(Generalized Pareto distribution, GPD)来拟合样本中超越阈值数据的分布,根据拟合得到的 GPD 分布函数产生随机序列对原始数据进行替换进而实现载荷外推,该方法可基于当前工况的极值信息外推可能存在的理论极值载荷,得到全生命周期内的可能的转矩及其频次,实现极大值和极小值的双向外推。

广义帕累托分布是实现超阈值数据外推的基础,其累积分布函数和概率密度函数表达式分别为

$$G(x;u,\sigma,\xi)=\begin{cases} 1-\left(1+\xi\frac{x-u}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}} & (\xi\neq0,x\geq u) \\ 1-\exp\left(-\frac{x-u}{\sigma}\right) & (\xi=0,x\geq u) \end{cases} \tag{1}$$

$$g(x;u,\sigma,\xi)=\begin{cases}\frac{1}{\sigma}\left(1+\xi\frac{x-u}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi-1}} & (\xi\neq 0,x\geq u) \\ \frac{1}{\sigma}\exp\left(-\frac{x-u}{\sigma}\right) & (\xi=0,x\geq u)\end{cases}$$

(2)

式中 u ——阈值 x ——样本值
 ξ ——形状参数
 σ ——尺度参数

GPD 形状参数和尺度参数的计算可以采用极大似然估计实现,但为了建立准确的超阈值模型,需要选取合适的阈值。阈值 u 太大,超出量个数少,导致有效样本载荷数据丢失,使得 GPD 参数估计的方差变大;阈值 u 太小,虽然大量数据被保留下来,但是超出量数据与 GPD 分布相差较大,导致 GPD 参数估计偏差较大。为了提高载荷样本拟合的准确性,本文将多重检验方法引入阈值选取过程,提出了基于 FDR 的阈值自动选取方法,实现了阈值自动快速选取。

通常,为了确定某阈值下的 GPD 分布拟合结果是否能够准确反映样本的分布特征,会采用假设检验的方法来进行判断。 P 值是用来判定假设检验结果的参数,能够反映在某一置信水平下零假设被接受的概率,可以理解为对某次假设检验可信程度的评估而不是保证结果为真,因此这意味着单次检验会存在一个缺陷:当只对单个阈值对应的拟合结果进行假设检验时,如果假设检验的接受标准不具有很强的约束力,那么对于零假设的接受就可能会发生在较低的阈值,从而引入假阳性错误,导致阈值选取不合理^[15]。FDR 能够表示在所有 R 次拒绝中错误发现的期望比例,因此 BENJAMINI 等^[16]提出了 FDR 错误控制法(也称为 BH 法),基于多重检验方法,通过控制样本整体零假设检验的 FDR 来决定 P 值的阈值,进而降低因检验次数增加而带来的 I 型错误率,但 BH 法会受制于样本的检验顺序导致计算流程复杂且约束力较弱^[15]。G'SELL 等^[17]提出的 ForwardStop 规则采用顺序多重检验的方法实现了 FDR 的控制,在保证检验准确性的基础上提升了计算效率,因此,本文基于该规则并结合文献^[18]提出的拟合优度检验方法实现阈值的自动选取,流程如下。

考虑一组载荷样本 $X=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$ 以及候选阈值序列 $U=\{u_{\min},u_2,\cdots,u_{\max}\},u_{\min}<u_2<\cdots<u_{\max}$,对于每一个候选阈值 u_i ,都会有 n_i 个超出量,对应的第 i 组的超出量序列为 $y_i=x|_{x_i>u_i}-u_i$,基于此,对每一组的超出量序列 y_i ,提出对应的第 i 个零假设为 H_0^i :对于第 i 组的超出量 y_i 服从 GPD。

因此,对于候选阈值序列 U ,一共存在 l 个零假

设: $H_0=\{H_0^1,H_0^2,\cdots,H_0^l\}$ 。依次对 H_0^i 进行假设检验,可得到相对应的 P 值序列 $p_1,p_2,\cdots,p_i\in[0,1]$ 。

单次假设检验的 P 值计算采用了 Anderson-Darling 检验方法(AD 检验),该检验方法是二次经验分布函数统计的一种,可以用来检验数据与特定分布的拟合程度,引入了权重函数使得在计算过程中能够更注重尾部分布的数据,对于检测背离样本的数据更加敏感,与其他检验方法(卡方检验、K-S 检验)相比,更适用于极值样本的检验^[18],计算式为

$$D=n\int_{-\infty}^{\infty}(F_n(x)-F(x))^2w(x)dF(x)$$

(3)

其中 $w(x)=[F(x)(1-F(x))]^{-1}$
式中 D ——假设分布 $F(x)$ 和经验分布函数 $F_n(x)$ 之间的距离
 n ——样本数 $w(x)$ ——权重函数

由于积分计算比较复杂,故采用基于式(3)提出的 AD 检验的统计量 A_n^2 来进行计算,即

$$A_n^2=-n-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(2i-1)(\lg Z_{(i)}+\lg(1-Z_{(n+1-i)}))$$

(4)

其中 $Z_{(i)}=\frac{x_i-\hat{\mu}}{\hat{\sigma}}$

式中 $Z_{(i)}$ ——标准正态分布的累积分布函数
对于阈值 u_i ,如果其对应的 AD 检验统计量不符合期望阈值,则代表零假设 H_0^i 被拒绝。根据 GPD 的分布性质,如果零假设 H_0^i 被拒绝,则对于 $u_{\min}\leq u_k < u_i, H_0^k$ 都将会被拒绝,因为假设检验是按阈值顺序单调排列进行的。因此,在此基础上应用 ForwardStop 规则:首先,按照单调递增的顺序依次对每个阈值下的零假设 H_0^i 进行 AD 检验,得到对应的 AD 检验统计量,构建 P 值序列;然后应用

$$\hat{k}=\max\left\{k\in\{1,2,\cdots,l\}: -\frac{1}{k}\sum_{i=1}^k\lg(1-p_i)\leq\alpha\right\}$$

(5)

式中 α ——预期阈值,可取 0.05、0.1、0.2,预期阈值越小,表示检验效果越严格,本文取 0.05

依次对前 i 次的 P 值进行校正,并同时构建校正后的 P 值序列;最后找到满足预期阈值 α 最小的 $\hat{k}$ 值,此时序列 $\hat{k}$ 所对应的阈值即为最优阈值。

2 拖拉机 PTO 转矩载荷超阈值模型建立

2.1 载荷谱采集试验与数据预处理

2018 年 11 月 8—12 日,在北京市郊区壤土地块进行 PTO 载荷谱采集试验。以 TS404 型拖拉机(山东五征集团有限公司)为样机,试验工况为旋

耕,旋耕机型号为 1GLN-0145,耕深为 200 mm,耕作宽幅为 1.8 m,平均作业速度为 7.3 km/h,基于转矩无线监测系统对拖拉机 PTO 转矩进行实时记录,田间试验现场如图 1 所示。



图1 田间试验
Fig.1 Field test

转矩无线监测系统主要由无线双法兰扭矩传感器、法兰盘连接件、信号接收装置、采集模块和上位机软件 5 部分组成。无线双法兰扭矩传感器型号为 CYB-807W,测试精度为 10 N·m,该传感器结构紧凑,能够与拖拉机 PTO 及万向节传动轴直接连接,并通过无线模块输出扭矩数据。转矩信号通过无线接收器传输到信号采集模块 NI9203,最终输入到基于 LabVIEW 开发的上位机软件平台实时显示与储存,根据旋耕机刀具与土壤接触频率设置转矩采样频率为 20 Hz。转矩无线监测系统原理图如图 2 所示。

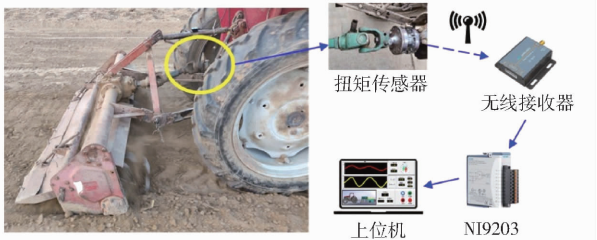


图2 转矩无线监测系统原理图

Fig.2 Principle diagram of torque acquisition system

由于试验环境复杂,PTO 转矩数据不可避免地会存在异常点,需要对数据进行预处理。选取作业工况良好的某次完整时域信号为外推样本,利用 Matlab 对数据进行滤波去噪和去除趋势项,并采用幅值门限法对数据进行预处理,剔除转矩信号中的异常数据,提高载荷谱数据的可靠性。此外,实际采集到的载荷信号中还包含了许多对疲劳寿命影响很小的无效载荷循环,根据文献[19],一般选取最大循环幅值的 10% 作为基准对数据进行剔除,以简化载荷时间历程。图 3 为处理后的拖拉机 PTO 转矩载荷时间历程,表 1 为载荷数据剔除前与剔除后的统计特性,可以看出,通过剔除无效载荷,数据量减少了 50.14%,但其统计特性基本维持不变。

2.2 门限阈值确定与 GPD 拟合

采用自动阈值选取方法对处理后的 PTO 载荷

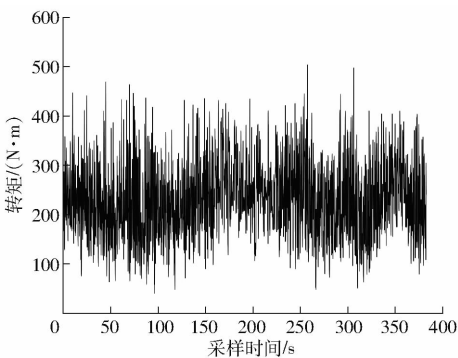


图3 PTO 转矩载荷时间历程

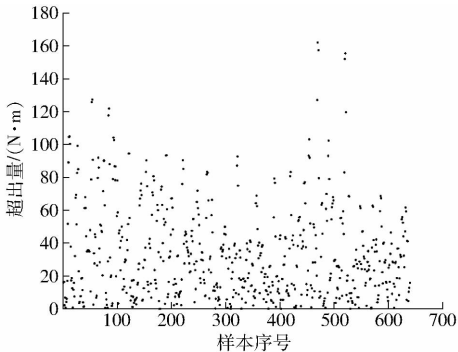
Fig.3 Load history of PTO torque

表1 剔除异常数据前后的 PTO 转矩载荷数据统计特性

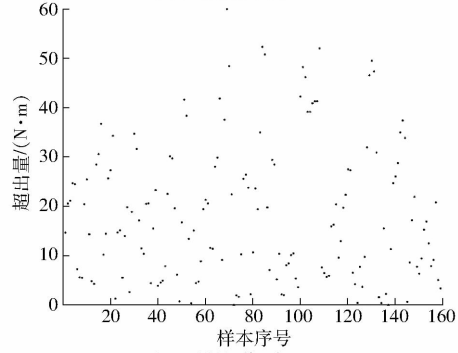
Tab.1 Statistical property values of PTO torque load value

数据量		极大值/ (N·m)	极小值/ (N·m)	均值/ (N·m)	标准差/ (N·m)	方差/ (N·m) ²
剔除前	15 793	504.20	40.01	224.72	72.88	5 311.84
剔除后	7 663	504.20	40.01	231.20	74.99	5 622.78

数据进行门限阈值确定。对于载荷样本中的极大值,选取候选阈值区间为 $[41\text{ N}\cdot\text{m}, 504\text{ N}\cdot\text{m}]$,以 $1\text{ N}\cdot\text{m}$ 为间隔递增,基于上述流程进行自动计算,选取 ForwardStop 自动停止的序列 $\hat{k}$ 代表的上限阈值为 $342\text{ N}\cdot\text{m}$,对应超出量个数为 640;同理,对载荷样本中的下限阈值进行自动计算,候选阈值区间为 $[41\text{ N}\cdot\text{m}, 504\text{ N}\cdot\text{m}]$,以 $1\text{ N}\cdot\text{m}$ 为间隔递减,选取 ForwardStop 自动停止的序列 $\hat{k}$ 代表的下限阈值为 $100\text{ N}\cdot\text{m}$,超出量个数为 159。超出上、下限阈值的样本提取结果如图 4 所示。



(a) 上限阈值 u 为342 N·m



(b) 下限阈值 u 为100 N·m

图4 超阈值样本提取结果

Fig.4 Excesses extraction result

根据阈值选取结果,采用 Matlab 对超阈值样本实现 GPD 参数的极大似然估计,得到上限阈值与下限阈值所对应的 GPD 分布参数的估计值,如表 2 所示。

表 2 GPD 拟合结果
Tab.2 GPD fitting result

阈值/(N·m)	形状参数	尺度参数
342	-0.183 4	39.962 6
100	-0.405 8	26.238 6

因此,可确定 PTO 载荷样本对于上限阈值和下限阈值超出量数据的 GPD 分布函数分别为

$$G(x;u,\sigma,\xi)=1-\left(1-0.183\,4\,\frac{x-342}{39.962\,6}\right)^{5.452\,6}\tag{6}$$

$$G(x;u,\sigma,\xi)=1-\left(1-0.405\,8\,\frac{x-100}{26.238\,6}\right)^{2.464\,3}\tag{7}$$

2.3 不同阈值选取方法 GPD 拟合结果检验与对比

为进一步验证和分析上述自动选取阈值方法的可行性以及拟合结果的精确性,同时采用平均超出量函数图法对载荷数据进行阈值选取及 GPD 拟合,对两者的拟合结果进行对比。

对于载荷样本数据中的上限阈值,其样本平均超出量如图 5 所示。从图中可以看到,由于超阈值样本数量减少,样本的平均超出量会随着阈值的增大而剧烈波动,在阈值选取过程中需要尽量避免。根据曲线形状,选取最接近波动区间且曲线分布近似为直线的起点作为最优阈值, $u=350\text{ N}\cdot\text{m}$ 。同理,对于载荷样本中的下限阈值,确定其候选阈值为 $u=123\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

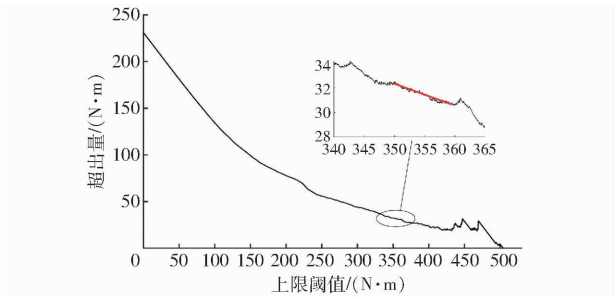


图 5 上限阈值的平均超出量

Fig.5 Graph of excess mean for upper threshold

针对每个阈值采用极大似然估计对超阈值数据进行参数估计,得到各自拟合后的 GPD 分布函数,从拟合检验、参数估计标准差、决定系数、拟合优度 4 方面与图像法选取的阈值进行量化分析与对比,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,各阈值对应的拟合结果在 95% 置

表 3 不同阈值选取方法拟合结果对比
Tab.3 Comparison of fitting results of different threshold selection methods

参数	上限阈值		下限阈值	
	自动阈值选取法	图像法	自动阈值选取法	图像法
阈值/(N·m)	342	350	100	123
形状参数	-0.183 4	-0.175 0	-0.405 8	-0.233 1
尺度参数	39.962 6	37.658 2	26.238 6	25.858 3
K-S 检验量	0.492 2	0.378 5	0.968 2	0.529 1
卡方检验量	0.754 3	0.321 3	0.848 7	0.489 5
形状参数标准差	0.029 6	0.033 8	0.060 0	0.046 8
尺度参数标准差	1.951 4	2.072 8	2.469 7	1.681 9
决定系数	0.998 9	0.995 7	0.996 9	0.995 4
拟合优度	0.008 4	0.009 2	0.010 8	0.015 7

信水平下都通过了 K-S 检验和卡方检验,表明拟合结果准确,但自动阈值选取法所对应的检验量高于图像法,拟合结果较优;通过参数拟合标准差来看,对于上限阈值,自动阈值选取法的参数拟合标准差更小,其拟合精度更高;而对于下限阈值,图像法参数拟合标准差更小,但总体来看参数拟合标准差均很小,拟合效果可行;其次,通过决定系数可以看出,两种方法的 R^2 均大于 0.995,表明拟合结果与超阈值样本具有较高的重合度,效果良好;从拟合优度来看,对于上限阈值,自动阈值选取法的拟合优度比图像法的拟合优度小 8.7%,而对于下限阈值,自动阈值选取法的拟合优度比图像法的拟合优度小 31.21%,表明自动阈值选取法的拟合结果在总体上更接近样本数据。通过以上对比,综合各项数据来看,基于 FDR 的自动阈值选取法优于传统的图像法。

为了更加直观反映自动阈值选取法得到的拟合效果,绘制样本载荷与拟合得到的 GPD 分布函数的累积分布函数图 (Cumulative distribution function, CDF) 和 Q-Q 图进行初步验证。如图 6 所示,两者 CDF 图具有很高的重合度,相关系数大于 0.99,同时 Q-Q 图的分布也近似为一条直线,从侧面表明了拟合结果的准确性。

3 全生命周期内 PTO 转矩载荷谱外推与验证

3.1 载荷谱外推

根据式(6)和式(7),利用 Matlab 生成随机数据,并在原位置对样本数据进行替换得到外推因子为 1 的时域外推载荷谱,原载荷谱与 1 倍外推载荷谱对比如图 7 所示。图 8 是从 1 倍外推载荷谱中截取的某一段载荷示意图,可以看出,原载荷样本中超过上限阈值和低于下限阈值的数据被 GPD 拟合生

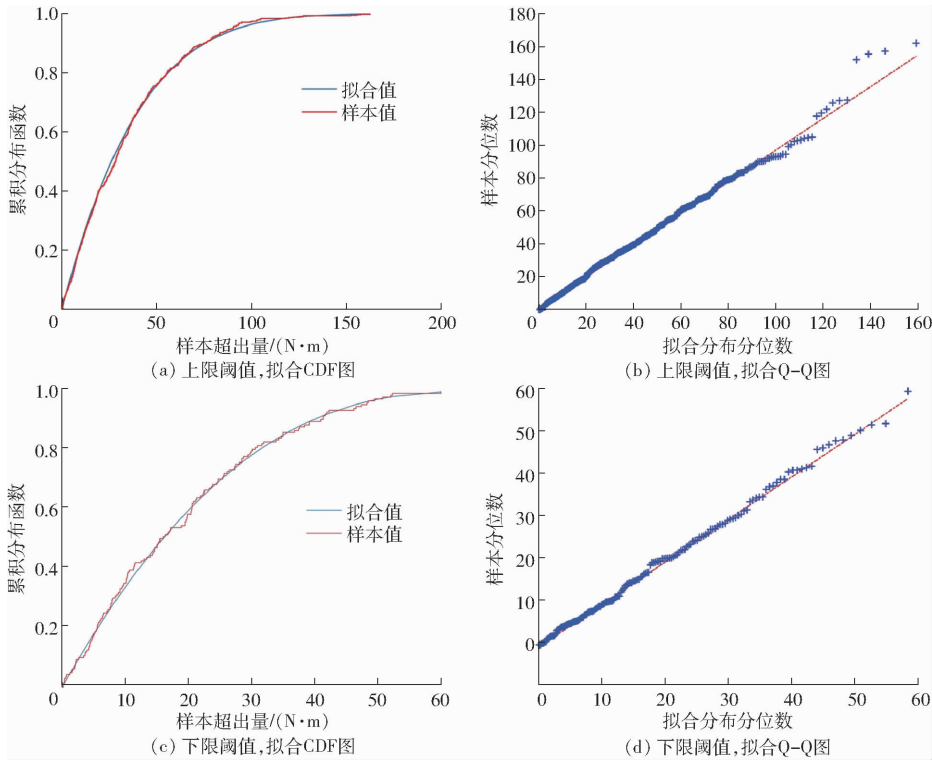


图 6 拟合效果检验
Fig.6 Fitting results test

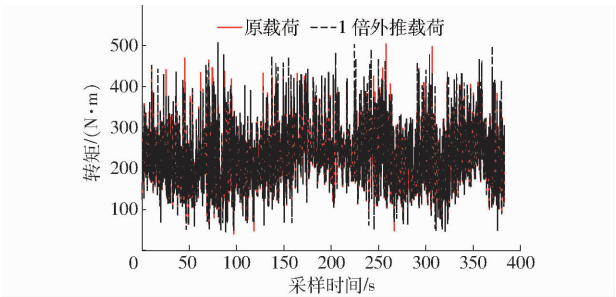


图 7 原载荷与 1 倍外推载荷时间历程对比
Fig.7 Original load time history and 1 time extrapolated load time history

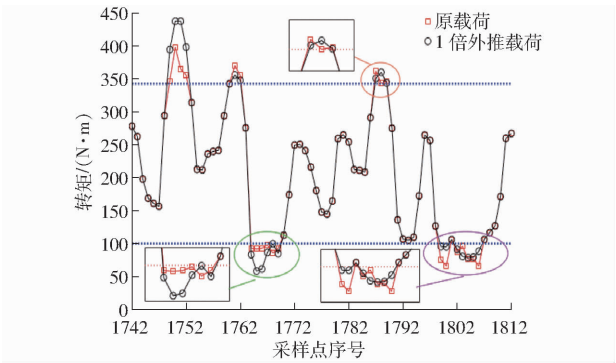


图 8 局部对比图
Fig.8 Partial comparison chart

成的随机数据替换,而处于上限阈值与下限阈值区间内的数据则被保留下来,且新生成的极值数据有的大于原载荷数据,有的小于或等于原载荷数据,表明采用时域外推方法可以有效保留原有的载荷时

序,而且还可以得到载荷时间历程中未出现过的极值载荷,实现载荷数据的外推。

为了得到所有可能出现的载荷数据,需要将载荷累积频次外推至 10^6 次。重复上述步骤,产生随机数对原载荷数据进行外推,分别得到外推因子为 1、50、131 的时域外推数据,各外推载荷数据的累积频次如图 9 所示,当外推因子为 131 时,载荷的累积频次外推至 10^6 次。

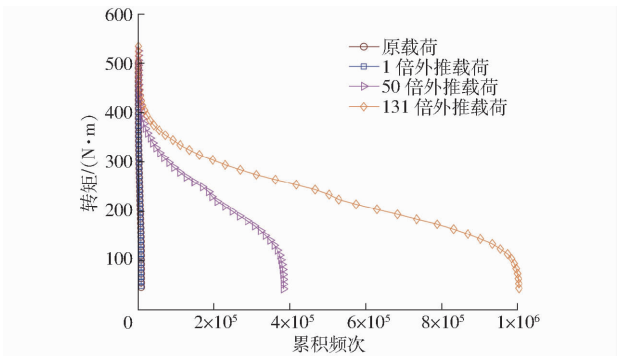


图 9 不同外推因子载荷累积频次外推曲线
Fig.9 Load frequency extrapolation curve under different extrapolation factors

3.2 外推载荷谱验证

为了验证时域外推载荷结果的合理性,对外推载荷谱进行验证。

3.2.1 统计特性分析

对外推得到的载荷数据进行统计特性分析,如表 4 所示。从表中可以看出,随着外推数据量的增

加,载荷极值范围从 $[40.01\text{ N}\cdot\text{m}, 504.20\text{ N}\cdot\text{m}]$ 扩大到了 $[36.12\text{ N}\cdot\text{m}, 539.19\text{ N}\cdot\text{m}]$,载荷覆盖范围扩大了 8.36%;同时可以看出,外推载荷数据的均

值、标准差以及方差基本保持了原载荷样本的统计特性,最大限度地保留了原有的载荷特征,可以认为外推载荷谱是有效的。

表 4 外推后的 PTO 转矩载荷数据统计特性

Tab.4 Statistical property values of PTO torque load value after extrapolation

外推因子	数据量	极大值/($\text{N}\cdot\text{m}$)	极小值/($\text{N}\cdot\text{m}$)	均值/($\text{N}\cdot\text{m}$)	标准差/($\text{N}\cdot\text{m}$)	方差/($\text{N}\cdot\text{m}$) ²
原载荷	7 663	504.20	40.01	231.20	74.99	5 622.78
1 倍载荷外推	7 663	507.24	42.39	231.21	75.01	5 626.04
50 倍载荷外推	383 150	529.99	37.28	231.20	75.00	5 625.39
131 倍载荷外推	1 003 853	539.19	36.12	231.19	74.99	5 623.64

3.2.2 雨流计数分析

应用雨流计数法对原载荷数据、1 倍外推载荷数据以及最终载荷数据进行均幅值双参数统计。原载荷与 1 倍外推载荷数据的均值、幅值频次对比如图 10 所示,对二者的分布进行相关性分析,得到幅值分布的相关系数为 0.995,均值分布的相关系数为 0.989,可见 1 倍外推载荷数据与原载荷数据的分布具有极大的相似性,较好地模拟了原载荷的数据分布特点及规律。

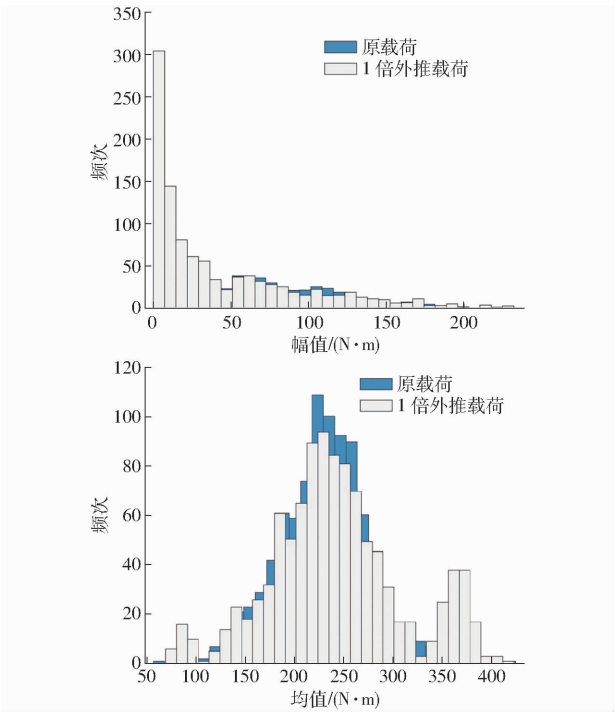


图 10 原载荷与 1 倍外推载荷数据的均值、幅值频次对比
Fig.10 Comparison of mean and amplitude frequency between original load and 1 time extrapolated load data

由于最终外推载荷数据量与原载荷数据量不同,因此基于雨流矩阵分布情况对外推结果进行分析。如图 11 所示,相对于原载荷数据,可以看到对原载荷循环的均值和幅值以及频次实现了同步外推。如图 11 中红色圈所示,经过外推后的载荷数据在极大值与极小值两端数据的分布出现了 2 个山

峰,意味着将载荷数据的均幅值及对应的频次实现了扩充;而从雨流矩阵的整体分布来看,外推后的载荷谱与原载荷样本的雨流矩阵具有一致的分布规律,证明该时域外推方法是可行合理的。

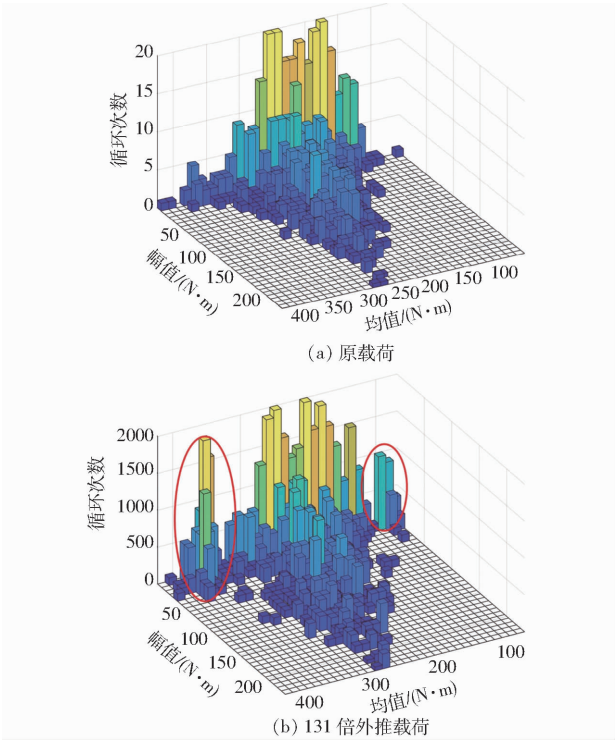


图 11 原载荷与 131 倍外推载荷的雨流矩阵对比
Fig.11 Comparison of rain flow matrix of original load and 131 times extrapolated load

4 结论

- (1) 基于旋耕作业工况采集拖拉机 PTO 实际作业载荷,并利用开发的 PTO 转矩无线监测系统得到了拖拉机实际作业载荷数据,通过对数据进行预处理和剔除无效载荷,提高了载荷数据的准确性和利用率。
- (2) 针对时域外推过程阈值选取主观性强的问题,基于 FDR 将 AD 检验与多重检验相结合,实现了阈值的自动选取,确定了拖拉机 PTO 扭矩时域外推的上限阈值为 $342\text{ N}\cdot\text{m}$,下限阈值为 $100\text{ N}\cdot\text{m}$ 。从拟合检验、标准差、决定系数、拟合优度 4 方面与图

像法选取的阈值进行了对比与检验,结果表明,两种阈值的拟合结果在 95% 置信水平下都通过了 K-S 检验和卡方检验,且参数拟合的标准差都比较小,总体来说自动阈值选取法的拟合结果相对较优;两种方法的拟合结果的决定系数都比较高 ($R^2 > 0.995$),表明均与样本有较高的重合度;从拟合优度来看,对于上限阈值,自动阈值选取法的拟合优度比图像法的拟合优度降低 8.7%,而对于下限阈值,自动阈值选取法的拟合优度比图像法的拟合优度降低 31.21%,表明自动阈值选取法的拟合结果在总体上更接近样本数据。

(3) 基于超阈值模型实现了拖拉机 PTO 转矩载

荷谱的时域外推。当外推因子为 131、转矩累积频次达到 10^6 次时,可认为其能够反映全生命周期内的载荷历程;从载荷数据的统计特性和雨流计数分析两方面对外推载荷谱的可行性进行了分析与验证。外推后的载荷谱在统计特性方面与原有载荷谱相比变化较小,在实现极值外推的过程中最大限度地保留了原有的载荷特征,可认为是有效的;在雨流计数分析中,原载荷与 1 倍外推载荷频次分布的均值、幅值的相关系数分别为 0.989 和 0.995,说明了时域外推方法的准确性。外推载荷谱与原载荷样本雨流矩阵具有相似的分布规律,可以证明该时域外推方法合理可行。

参 考 文 献

[1] 闫祥海,周志立,贾方. 拖拉机动力输出轴动态转矩载荷谱编制与验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 74-81.
YAN Xianghai, ZHOU Zhili, JIA Fang. Compilation and verification of dynamic torque load spectrum of tractor power take-off [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19): 74-81. (in Chinese)

[2] WANG J, CHEN H, LI Y, et al. A review of the extrapolation method in load spectrum compiling[J]. Strojniški vestnik- Journal of Mechanical Engineering, 2016, 62(1): 60-75.

[3] JOHANNESSON P, THOMAS J. Extrapolation of rainfall matrices[J]. Extremes (Boston), 2001, 4(3): 241-262.

[4] 葛宜元,王金武,李世伟,等. 整株秸秆还田机刀轴载荷谱编制与疲劳寿命估算[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 77-80.
GE Yiyuan, WANG Jinwu, LI Shiwei, et al. Compiling and fatigue life estimation of the cutter shaft of the whole-straw recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 77-80. (in Chinese)

[5] 张英爽,王国强,王继新,等. 工程车辆传动系载荷谱编制方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 179-183.
ZHANG Yingshuang, WANG Guoqiang, WANG Jixin, et al. Compilation method of power train load spectrum of engineering vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 179-183. (in Chinese)

[6] 李雯,张承宁,宋强,等. 混合动力汽车电机驱动系统二维载荷谱研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 21-24, 29.
LI Wen, ZHANG Chengning, SONG Qiang, et al. 2-D for motor propulsion system on hybrid electric vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 21-24, 29. (in Chinese)

[7] JOHANNESSON P. Extrapolation of load histories and spectra[J]. Fatigue Fracture of Engineering Materials and Structures, 2006, 29(3): 209-217.

[8] SARTINI L, MENTASCHI L, BESIO G. Comparing different extreme wave analysis models for wave climate assessment along the Italian coast[J]. Coastal Engineering, 2015, 100: 37-47.

[9] XIA Y, ZHANG J, REN W. Threshold selection for extreme strain extrapolation due to vehicles on bridges[J]. Procedia Structural Integrity, 2017(5): 1176-1183.

[10] 翟新婷. 基于外推改进的工程机械载荷谱编制方法研究[D]. 长春:吉林大学, 2018.
ZHAI Xinting. Load spectrum compiling method based on modified extrapolation in construction machinery[D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)

[11] 杨子涵,宋正河,尹宜勇,等. 基于 POT 模型的大功率拖拉机传动轴载荷时域外推方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 40-47.
YANG Zihan, SONG Zhenghe, YIN Yiyong, et al. Time domain extrapolation method for load of drive shaft of high-power tractor based on POT model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(15): 40-47. (in Chinese)

[12] BEIRLANT J, DIERCKX G, GOEGBEUR Y, et al. Tail index estimation and an exponential regression model[J]. Extremes, 1999, 2(2): 177-200.

[13] THOMPSON P, CAI Y, REEVE D, et al. Automated threshold selection methods for extreme wave analysis[J]. Coastal Engineering, 2009, 56(10): 1013-1021.

[14] 翟新婷,张晓晨,江柱锦,等. 基于混合分布的轮式装载机半轴载荷谱编制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 78-84.
ZHAI Xinting, ZHANG Xiaocheng, JIANG Zhujin. Load spectrum compiling for wheel loader semi-axle based on mixed distribution[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(8): 78-84. (in Chinese)

[15] BADER B, YAN J, ZHANG X. Automated threshold selection for extreme value analysis via ordered goodness-of-fit tests with adjustment for false discovery rate[J]. The Annals of Applied Statistics, 2018, 12(1): 310-329.

[16] BENJAMINI Y, HOCHBERG Y. Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1995, 57(1): 289-300.

[17] G'SELL M G, WAGER S, CHOULDECHOVA A, et al. Sequential selection procedures and false discovery rate control[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 2016, 78(2): 423-444.

- [18] STEPHENS V C A M. Goodness-of-fit tests for the generalized pareto distribution[J]. *Technometrics*, 2001, 43(4): 478–484.
- [19] WANG J, WANG N, WANG Z, et al. Determination of the minimum sample size for the transmission load of a wheel loader based on multi-criteria decision-making technology[J]. *Journal of Terramechanics*, 2012, 49(3–4): 147–160.
- [20] PARK M H, KIM J H T. Estimating extreme tail risk measures with generalized pareto distribution [J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2016, 98(2): 91–104.
- [21] NAGODE M, FAJDIGA M. A general multi-modal probability density function suitable for the rainflow ranges of stationary random processes[J]. *International Journal of Fatigue*, 1998, 20(3): 211–223.
- [22] ZHAO X, ZHANG Z, CHENG W, et al. A new parameter estimator for the generalized pareto distribution under the peaks over threshold framework[J]. *Mathematics*, 2019, 7(5): 406.
- [23] HONG N. A modified rainflow counting method[J]. *International Journal of Fatigue*, 1991, 13(6): 465–469.
- [24] 温昌凯, 谢斌, 李若晨, 等. 拖拉机作业载荷数据平台设计与旋耕作业质量预测[J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(8): 372–381.
WEN Changkai, XIE Bin, LI Ruochen, et al. Construction of tractor working load data platform and prediction of rotary tillage quality[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(8): 372–381. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200842&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.042. (in Chinese)
- [25] LANGOUSIS A, MAMALAKIS A, PULIGA M, et al. Threshold detection for the generalized pareto distribution: review of representative methods and application to the NOAA NCDC daily rainfall database[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(4): 2659–2681.
- [26] 李文礼, 石晓辉, 柯坚, 等. 关联用户的汽车传动系载荷谱室内台架试验编制方法[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(20): 143–150.
LI Wenli, SHI Xiaohui, KE Jian, et al. Weave method study of customer correlated load spectrum for driveline durability indoor test[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(20): 143–150. (in Chinese)
- [27] 王继新, 季景方, 张英爽, 等. 基于小波分形理论的工程车辆时域载荷信号降噪方法[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2011, 41(增刊2): 221–225.
WANG Jixin, JI Jingfang, ZHANG Yingshuang, et al. Denoising method of time domain load signals of engineering vehicles based on wavelet and fractal theory[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology)*, 2011, 41(Supp. 2): 221–225. (in Chinese)

(上接第 340 页)

- [28] KANG J, CHOI M Y, KANG S, et al. Application of a ^1H nuclear magnetic resonance (NMR) metabolomics approach combined with orthogonal projections to latent structure-discriminant analysis as an efficient tool for discriminating between Korean and Chinese herbal medicines [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(24): 11589–11595.
- [29] FANG G, GOH J Y, TAY M, et al. Characterization of oils and fats by ^1H NMR and GC/MS fingerprinting: classification, prediction and detection of adulteration [J]. *Food Chemistry*, 2013, 138(2–3): 1461–1469.
- [30] 李徐, 徐小光, 刘睿杰, 等. 9 种市售稻米油极性物质含量的测定及组成分析[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(2): 120–124.
LI Xu, XU Xiaoguang, LIU Ruijie, et al. Analysis on polar material content and composition in 9 rice bran oils[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2017, 32(2): 120–124. (in Chinese)
- [31] ZHANG Q, SALEH A S M, SHEN Q. Discrimination of edible vegetable oil adulteration with used frying oil by low field nuclear magnetic resonance [J]. *Food Bioprocess Technology*, 2013, 6(9): 2562–2570.
- [32] HIRASAKI G J, LO S W, ZHANG Y. NMR properties of petroleum reservoir fluids [J]. *Magnetic Resonance Imaging*, 2003, 21(3): 269–277.
- [33] CHEN L, TIAN Y Q, SUN B H, et al. Rapid, accurate, and simultaneous measurement of water and oil contents in the fried starchy system using low-field NMR [J]. *Food Chemistry*, 2017, 233: 525–529.
- [34] BIRESAW G, BANTCHEV G B. Pressure viscosity coefficient of vegetable oils [J]. *Tribology Letters*, 2013, 49(3): 501–512.
- [35] 毛锐, 王欣, 成实, 等. 基于油脂过氧化值的脂质氧化诱导期分析及货架期预测 [J]. *中国油脂*, 2018, 43(8): 94–99.
MAO Rui, WANG Xin, CHENG Shi, et al. Induction period and shelf-life prediction of oil based on peroxide value [J]. *China Oils and Fats*, 2018, 43(8): 94–99. (in Chinese)
- [36] CHALAND B, MARIETTE F, MARCHAL P, et al. ^1H nuclear magnetic resonance relaxometric characterization of fat and water states in soft and hard cheese [J]. *Journal of Dairy Research*, 2000, 67(4): 609–618.
- [37] FARHOOSH R, HOSEINI-YAZDI S Z. Shelf-life prediction of olive oils using empirical models developed at low and high temperatures [J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(1): 557–565.