

混合动力汽车电机驱动系统二维载荷谱研究*

李雯 张承宁 宋强 王志福 武小花

(北京理工大学电动车辆国家工程实验室, 北京 100081)

【摘要】 编制以雨流计数法为理论基础的 Matlab 二维载荷谱程序,用以对混合动力汽车电机驱动系统载荷时间历程进行统计处理,得到载荷值、均值雨流矩阵,进行幅值、均值各自分布假设检验,以及独立性和相关性检验,获得二维联合分布概率密度函数,建立了混合动力汽车电机驱动系统台架试验用二维载荷谱。

关键词: 混合动力汽车 电机驱动系统 可靠性 载荷谱

中图分类号: U469.7; TM302 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)07-0021-04

2-D Load Spectrum for Motor Propulsion System on Hybrid Electric Vehicle

Li Wen Zhang Chengning Song Qiang Wang Zhifu Wu Xiaohua

(National Engineering Laboratory for Electric Vehicle, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract

A 2-D load spectrum program based on rain-flow counting method was compiled in Matlab environment. The program was used not only in statistical treatment of load time history of motor propulsion system on hybrid electric vehicle (HEV) and getting rain-flow matrix, but also in hypothesis test for both amplitude and mean value distribution. 2-D distribution function was obtained after the independence and relevance tests of the amplitude and mean value. 2-D load spectrum was set up for traction motor propulsion system on HEV used in bench experiments.

Key words Hybrid electric vehicle, Motor propulsion system, Reliability, Load spectrum

引言

电机驱动系统是混合动力汽车中的关键部件,其使用寿命影响到电动汽车的运行性能。为了对混合动力电动车用电动机驱动系统可靠性进行台架测试,编制电机驱动系统载荷谱非常必要。

实车道路试验需要研制测试系统,监测、采集和记录被测试车辆电机驱动系统运行参数,并且需要多家单位配合,周期长,成本高。本文在实车道路试验之前采用整车模型仿真的方法研究电机驱动系统载荷谱的编制,对实车试验结果进行预测。

1 二维载荷谱的编制

1.1 仿真路况循环的选取

选用 Advisor 2002 中本田 Insight 模型为研究对象。为更好地模拟真实路况,使整车在更多的转速工况下仿真运行,按照郊区、城市和高速公路路况为 55:28:17 的比例选取如下组合路况^[1]: HWFET 工况 (highway fuel economy test, 美国环保局的高速公路省油测试工况)、UDDS 工况 (urban dynamometer driving schedule, 美国转鼓测试用市区行驶工况)、ECE_EUDC 工况 (urban drive cycle_extra urban drive cycle, 欧洲城市道路循环: 市内驾驶 + 市中心地带驾驶) 一倍循环加日本 10-15 工况二倍循环。

之所以选择上述组合工况,一方面是国外工况被各大学及科研机构普遍验证并接受,另一方面是国外路况复杂多样,可以满足模拟车辆各种行驶状况的需求。

1.2 电机驱动系统载荷幅值、均值分布假设检验

应用以上组合路况在 Insight 模型进行整车仿真得到电机驱动系统载荷。为得到载荷幅值、均值分布函数,应首先对幅值、均值各自边缘分布进行假设检验^[2]。幅值的分布可以用威布尔分布、对数正态分布或正态分布来描述和检验,均值可以用正态分布或对数正态分布来描述和检验^[3]。考虑图 1、2 中雨流矩阵拟合得到幅值、均值的累计频次分布曲线,对幅值做威布尔分布检验;均值做对数正态分布和正态分布检验。

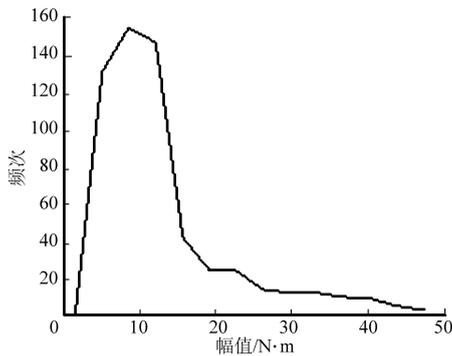


图1 电机驱动系统载荷幅值频次分布

Fig.1 Motor system load amplitude distribution

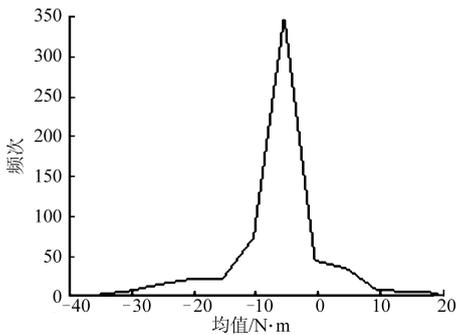


图2 电机驱动系统载荷均值频次分布

Fig.2 Motor system load mean value distribution

三参数威布尔分布属于偏态分布,其表达式为^[4]

$$f(x) = \frac{\gamma}{\eta - \beta} \left(\frac{x - \beta}{\eta - \beta} \right)^{\gamma - 1} \exp \left(- \left(\frac{x - \beta}{\eta - \beta} \right)^{\gamma} \right) \quad (1)$$

式中 x ——实验载荷值 β ——最小载荷值

γ ——威布尔曲线的形状参数

η ——特征载荷值,即为累积频率为 36.2% 的载荷值

将电机驱动系统载荷变程均值取为对数值,即可进行对数正态分布检验。应用第 2 节介绍的 Matlab 二维载荷谱编制程序拟合得到电机驱动系统

幅值、均值假设分布参数如表 1 所示。

表 1 电机驱动系统载荷均幅值假设分布参数

Tab.1 Hypothesis distribution parameters of motor system load mean value and amplitude

幅值威布尔分布			均值正态分布		均值对数正态分布	
γ	η	β	μ	σ	μ	σ
1.53	15.82	1.79	-5.47	0.69	-5.87	4.47

表 1 中 μ 为载荷值的均值, σ 为载荷值的标准差。

应用卡尔·皮尔逊 (Pearson K) 定理检验幅值、均值是否服从假设分布。当样本容量足够大时,近似地认为统计量

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - np_{i0})^2}{np_{i0}} \quad (2)$$

服从自由度为 $m - 1$ 的 K - P 分布。此时卡尔·皮尔逊统计量的值一般比较小。假设 H_0 : 电机驱动系统载荷幅值、均值服从假设分布。处理得载荷雨流矩阵幅值、均值分别为 13、12 级。K - P 分布上 5% 的分位点为 21.03, 载荷幅值威布尔假设分布 K - P 统计量为 17.58, $\chi_{0.05}^2 < \chi_{0.05}^2 (12)$ 接受假设 H_0 , 幅值服从威布尔分布。均值正态假设分布 K - P 统计量为 19.59, K - P 分布上 5% 的分位点为 19.68, 小于参考值; 对数正态分布 K - P 统计量为 109.13, 大于参考值, 所以载荷均值服从正态分布。

1.3 幅值、均值独立性及相关性检验

为求得电机驱动系统载荷幅值、均值的二维联合概率密度函数,需要应用卡方检验对其进行独立性检验。设卡方检验统计量为

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^m \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} = n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^m \frac{\left(\frac{n_{ij} - \frac{n_i \cdot n_j}{n}}{n} \right)^2}{\frac{n_i \cdot n_j}{n}} \quad (3)$$

其中 $n_{i \cdot} = \sum_{j=1}^m n_{ij}$ $n_{\cdot j} = \sum_{i=1}^a n_{ij}$ $n = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^m n_{ij}$

式中 O ——幅值、均值雨流矩阵

i ——均值分组中第 i 组

a ——均值分组总数 m ——幅值分组数

j ——幅值分组中第 j 组

n_{ij} ——均值属于第 i 组,幅值属于第 j 组频数

$n_{i \cdot}$ ——第 i 组均值频数总数

$n_{\cdot j}$ ——第 j 组幅值频数总数

定义雨流计数得到的幅值、均值矩阵的期望值矩阵为 $E_{ij} = \frac{n_i \cdot n_j}{n}$ 。当所有的期望值都大于或等于 5 的时候,服从自由度为 $(a - 1)(m - 1)$ 的卡方分布。

设计假设 H_0 : 电机驱动系统载荷幅值与均值是相互独立的。有: 若 $\chi_\alpha^2 > \chi_\alpha^2((a-1)(m-1))$ 时拒绝假设 H_0 , 即认为幅值与均值不独立; 否则接收假设 H_0 , 即认为幅值与均值独立的。拟合得到电机驱动系统载荷幅值、均值卡方分布统计量如图 3 所示。

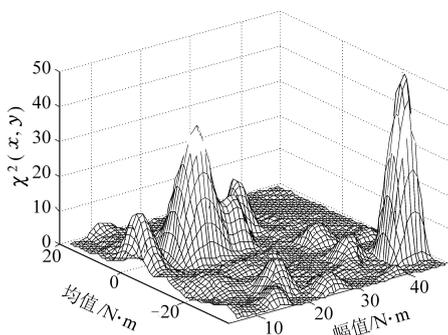


图 3 电机驱动系统载荷均值卡方分布统计量
Fig. 3 Chi-square statistic distributions of motor system load mean value

计算得到自由度为 132 的卡方分布统计量为 311.91, 卡方分布上 5% 分位点为 159.81, $\chi_{0.05}^2 > \chi_{0.05}^2((13-1)(12-1))$ 拒绝假设, 幅值与均值不相互独立。

若幅值、均值不相互独立, 则它们之间必然存在着线性回归或非线性回归的关系^[5], 可用总体相关系数 $\rho_{x,y}$ 检验, 衡量两个随机变量相关性强度。 $\rho_{x,y}$ 绝对值越接近于 1, 说明两个变量之间线性相关程度越好。当 $\rho_{x,y}$ 越接近于零, 如果按 $\rho_{x,y}$ 定义公式算出的相关系数的绝对值 $|\rho_{x,y}|$ 大于相关系数检验表中的相关系数起码值, 则可以用直线拟合变量之间的关系, 否则两者不相关。经计算, 电机驱动系统幅值、均值相关系数为 -0.076 , 其绝对值小于自由度为 567 的相关系数上 5% 分位点起码值 0.001 ^[6]。幅值、均值线性负相关。对其进行线性回归直线拟合有意义。

1.4 二维载荷谱联合概率密度函数

设幅值 x 服从威布尔分布, 均值 y 服从正态分布。当 x, y 相互独立, 其二维联合概率密度函数为幅值、均值边缘分布概率密度函数的乘积。由以上分析, 电机驱动系统载荷幅值、均值不相互独立, 且线性相关。拟合得线性回归参数为 $\hat{\beta}_0 = -7.0863$, $\hat{\beta}_1 = 0.0558$ 。得幅值、均值的联合概率密度函数为

$$f(x, y) = 0.0015(x - 1.79)^{0.79} \cdot e^{-\left(\frac{(y + 7.0863 - 0.0558x)^2}{27.2174} + \left(\frac{x - 1.79}{14.03}\right)^{1.79}\right)} \quad (4)$$

联合概率密度函数三维分布如图 4 所示。

应用二维载荷谱统计处理 Matlab 程序对原始

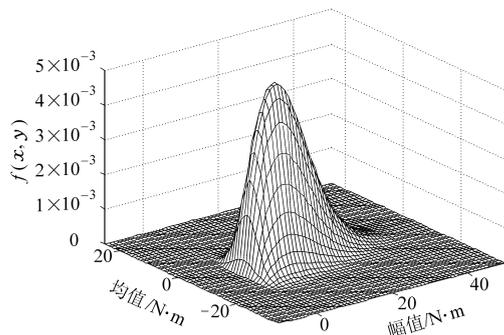


图 4 电机驱动系统载荷均值联合概率密度
Fig. 4 Motor system load mean value joint probability density

数据进行处理, 最后可得到混合动力电动车电机驱动系统二维载荷谱。

2 基于雨流计数法的二维载荷谱编制 Matlab 程序

2.1 二维载荷谱统计处理程序流程

一个连续的随机过程由全部过程的峰谷值依其真实次序排列来描述, 而与载荷历程的时间无关^[7]。

原始数据经过载荷时间历程压缩处理后, 可以处理得到雨流矩阵, 基于雨流计数法的载荷-时间历程处理以及幅值、均值二维载荷谱编制流程如图 5 所示。

2.2 应用二维载荷谱编制程序处理结果

建立二维载荷谱需要得到均值与幅值的全部信息^[8]。应用本田 Insight 整车模型进行仿真, 记录电机驱动系统需求扭矩载荷-时间历程, 应用以上基于雨流计数法的二维载荷谱编制程序处理得到电机驱动系统雨流矩阵, 对该矩阵进行统计分析, 部分结果如表 2 所示。

对所得雨流矩阵频次数据拟合分析, 得到雨流矩阵幅值、均值联合分布概率密度函数后, 经二维载荷谱编制程序积分可得到幅值 11 级, 均值 5 级载荷频次矩阵如表 3 所示。

3 结论

(1) 对 Insight 整车仿真所得到混合动力汽车电机驱动系统载荷时间历程统计分析表明, 载荷幅值服从偏态威布尔分布, 均值服从正态分布。幅值、均值不相互独立, 线性相关, 可求得载荷幅值、均值联合分布概率密度函数, 用以描述电机驱动系统二维载荷谱。

(2) 所建立的混合动力汽车电机驱动系统二维载荷谱模型反映了电机驱动系统实际受载情况, 具有理论与应用价值, 可对混合动力电动车电机驱

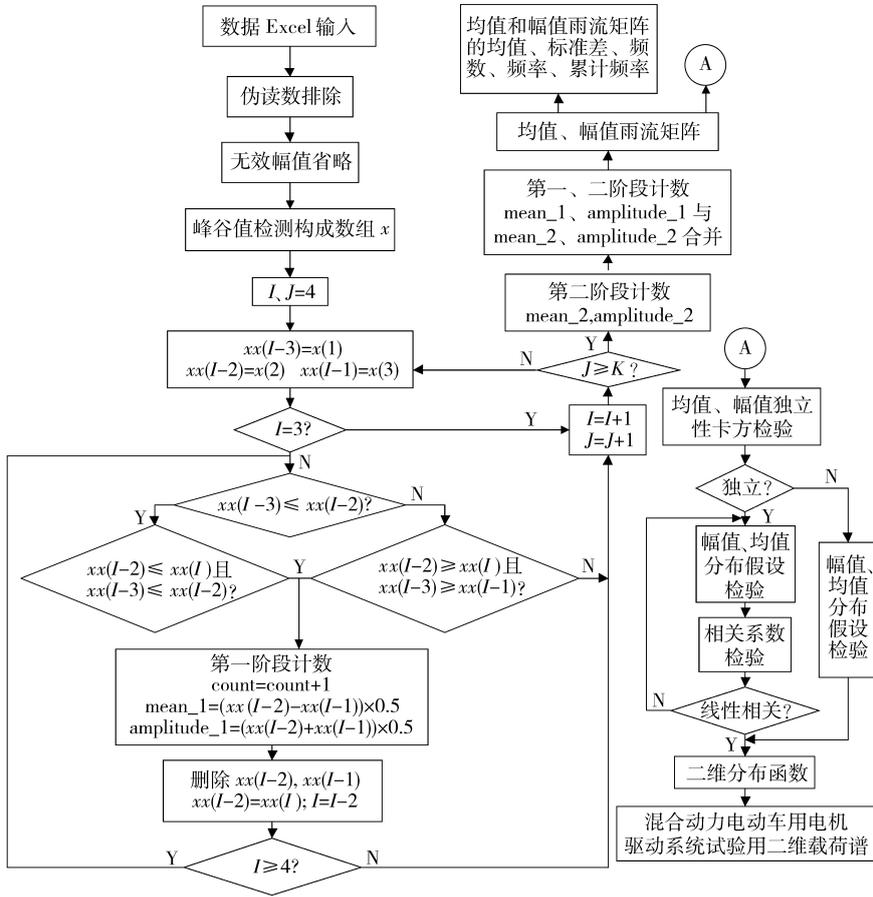


图 5 二维载荷谱编制流程

Fig. 5 2-D load spectrum preparation plour chart

表 2 雨流矩阵处理结果

Tab. 2 Rain-flow matrix processing results

总循环频次	均值/N·m			幅值/N·m			载荷范围	
	级数	平均值	方差	级数	平均值	方差	均值	幅值
569	12	-5.527	7.75	14	11.4	8.35	-42.83 ~ 21.94	3.23 ~ 49.13

表 3 幅值、均值概率密度函数拟合雨流矩阵

Tab. 3 Mean rain-flow matrix deriving from the probability density function

均值 /N·m	幅值/N·m										
	3.2	6.8	10.3	13.8	17.4	20.9	24.4	27.9	31.5	35.0	38.5
-12.9	3	4	4	3	2	1	1	0	0	0	0
-8.0	21	30	30	24	17	10	6	3	1	1	0
-3.0	30	46	48	41	31	20	12	6	3	1	1
2.0	9	15	16	15	12	8	5	3	2	1	0
7.0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0

动系统可靠性台架试验起指导作用。

序,通用性好,实用性强,可用于混合动力电动车其他零部件的疲劳设计与载荷谱的研究。

(3) 基于雨流计数法的二维载荷谱的编制程

参 考 文 献

1 Michael O'Keefe, Terry Hendricks, Robert Rehn, et al. A new composite drive cycle for the evaluation and test of heavy duty hybrid electric class 4 ~ 6 urban delivery vehicles [C] // Proceedings of 2003 International Truck and Bus Meeting and Exhibition, Fort Worth, Texas USA, 2003.

- Luo Gang. Satisfactory solution principles and their application in control system research [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1999. (in Chinese)
- 13 Yao X S, Huang H Z, Zhou Z R. Study on multi-objective optimization based on generalized satisfactory degree theory for transportation capability of railway network [C] // Traffic and Transportation Studies: Proceedings of ICTTS 2002, 2002: 947 ~ 952.
- 14 黄洪钟,姚新胜,周仲荣. 基于满意度原理的装载机工作装置的多目标优化设计[J]. 机械工程学报,2003,39(5): 97 ~ 103.
Huang Hongzhong, Yao Xinsheng, Zhou Zhongrong. Multi-objective optimization design of the working unit of loader based on the satisfactory degree theory[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(5):97 ~ 103. (in Chinese)
- 15 姚新胜,黄洪钟,周仲荣. 机械满意优化中满意度函数的建立方法[J]. 机械科学与技术,2004,23(4): 399 ~ 401.
Yao Xinsheng, Huang Hongzhong, Zhou Zhongrong. Design of satisfactory-degree function in the mechanical satisfactory optimization[J]. Mechanical Science and Technology, 2004,23(4): 399 ~ 401. (in Chinese)
- 16 孙跃东,周萍,尹冰声. 工程车辆液力变矩器与发动机匹配的研究[J]. 上海理工大学学报,2003,25(3):289 ~ 292.
Sun Yuedong, Zhou Ping, Yin Bingsheng. Study on the matching of torque converter and engine for engineering vehicles [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2003, 25(3):289 ~ 292. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 24 页)

- 2 陈东升,项昌乐,陈欣. 军用车辆传动系零件载荷谱的建立[J]. 机械强度,2002,24(2): 310 ~ 314.  
Chen Dongsheng, Xiang Changle, Chen Xin. Establishment of the spectrum of the military vehicle transmission elements[J]. Journal of Mechanical Strength, 2002, 24(2): 310 ~ 314. (in Chinese)
- 3 凌静,高镇同. 多工况机械结构疲劳载荷的统计处理[J]. 机械强度,1992,14(2): 31 ~ 34.  
Ling Jing, Gao Zhen tong. Statistical treatment for fatigue loads of a mechanical structure under multi-operating conditions[J]. Journal of Mechanical Strength, 1992, 14(2):31 ~ 34. (in Chinese)
- 4 项昌乐. 车辆传动系轴类零件疲劳设计与变矩器动态特性研究[D]. 北京:北京理工大学,2001.  
Xiang Changle. The study on fatigue design of the axles and the dynamic characteristics of the torque converter in the vehicle transmission system [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2001. (in Chinese)
- 5 肖生发,左惟炜,沈德平. 轻型车后桥二维载荷谱及其疲劳寿命预测[J]. 汽车工程,2002,24(4):343 ~ 347.  
Xiao Shengfa, Zuo Weiwei, Shen Deping. Two-dimension load spectrum and fatigue life prediction for the rear axle of light-truck[J]. Automotive Engineering, 2002,24(4):343 ~ 347. (in Chinese)
- 6 周永宏,郑大伟. 相关系数检验表的新算法[J]. 中国科学院上海天文台年刊,1997(18): 17 ~ 22.  
Zhou Yonghong, Zheng Dawei. A new calculation method of correlation coefficient test table [J]. Annals Shanghai Astronomical Observatory Chinese Academy of Sciences, 1997(18): 17 ~ 22. (in Chinese)
- 7 阎楚良,王公权. 雨流计数法及其统计处理程序研究[J]. 农业机械学报,1982,12(4): 88 ~ 101.  
Yan Chuliang, Wang Gongquan. Investigation of rain-flow counting method and it's program of statistical treatment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1982, 12(4): 88 ~ 101. (in Chinese)
- 8 胡宗武,董邦宣. “雨流法”与疲劳寿命估算[J]. 机械强度,1985,7(4): 53 ~ 60.  
Hu Zongwu, Dong Bangxuan. Rain-flow method and fatigue life prediction[J]. Journal of Mechanical Strength, 1985,7(4): 53 ~ 60. (in Chinese)