

车用驱动电机系统振动测试标准分析

杨建川

(无锡威孚电驱科技有限公司, 江苏 无锡 214028)

摘要: 振动试验是驱动电机系统设计验证及电动汽车可靠性重要测试项目。简要分析了振动试验国标、ISO、IEC 标准的关系, 试验条件及应用现状。主要分析了依据现行国标 GB/T 18488.1—2015 进行振动试验的不足, 并探讨了振动测试标准修订改进方向。

关键词: 电动汽车; 驱动电机系统; 正弦振动; 随机振动; 测试; 标准

中图分类号: U 469.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2021)03-0094-05

doi: 10.12177/emca.2020.218

Analysis of Vibration Test Standards for Vehicle Drive Motor System

YANG Jianchuan

(Wuxi Weifu E-Drive Technologies Co., Ltd., Wuxi 214028, China)

Abstract: Vibration test is an important item for driving motor system design verification and electric vehicle reliability. The relationship between Chinese national standards, ISO standards and IEC standards, test conditions and application status of vibration test are briefly analyzed. The shortcomings of vibration test according to the current national standard GB/T 18488.1—2015 are analyzed, and the revision and improvement direction of vibration test standard is discussed.

Key words: electric vehicle; drive motor system; sinusoidal vibration; random vibration; test; standard

0 引言

道路行驶汽车受到车轮及悬架系统传递的地面激励振动和冲击, 汽车搭载部件如发动机、变速箱、减速器、冷却散热系统、驱动电机及控制器等运转工作时, 均会产生混合振动和噪声, 从而影响汽车振动噪声品质以及可靠性, 故驱动电机系统厂家在开发阶段做电机空载及负载工况振动噪声试验^[1]。

中国国内厂家振动试验主要参照沿用国家或行业标准^[2-7], 如 GB/T 2423.10—2008《电工电子产品环境试验 第2部分: 试验方法 试验 Fc: 振动(正弦)》、GB/T 2423.56—2006《电工电子产品环境试验 第2部分: 试验方法 试验 Fh: 宽带随机振动(数字控制)和导则》、GB/T 28046.3—2011《道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第3

部分: 机械负荷》、QC/T 413—2002《汽车电气设备基本技术条件》、QC/T 1022—2015《纯电动乘用车用减速器总成技术条件》等, 其中驱动电机系统主要依据 GB/T 18488.1—2015《电动汽车用驱动电机系统 第1部分: 技术条件》(引用了 GB/T 2423—2008、GB/T 28046—2011 等测试方法)。

合资或外资厂家执行的振动试验, 还会涉及如: 国际电工委员会 IEC 60068-2-6-2007、IEC 60068-2-64-2008 标准, 以及国际标准化组织 ISO 16750-3-2007、ISO 19453-3-2018 等振动试验相关国外国际标准^[8-11]。本文通过上述标准对比分析, 寻求振动测试标准修订方向思路。

1 分析背景

上述国标与国际标准之间的大致关系, 以及主要针对或适用测试的范围如表1、图1所示。

收稿日期: 2020-12-11; 收到修改稿日期: 2021-01-15

作者简介: 杨建川(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为新能源电机产品工程。

表 1 振动试验标准适用概况

标准名称	测试针对
ISO 16750-3-2007	质量较小的零部件, 如 ECU、传感
ISO 19453-3-2018	电机 & 控制器
GB/T 18488.1—2015	驱动电机系统(合理性待改进)

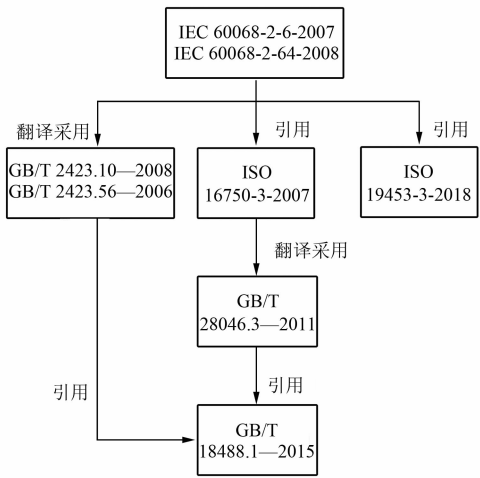


图 1 振动试验标准采用或引用关系

2 现行国标驱动电机系统测试方案

汽车行业振动试验方案设计主要基于零部件的安装位置及所受的载荷(道路路面或其他激励源),产生不同的振动方式(如有规律周期性的正弦振动、来自路面的随机振动)和强度等级。

通过汽车在不同道路条件下的运行监测,采集分析并形成其特征振动数据,如频率/加速度曲线、频率/功率谱密度(PSD)曲线,再按汽车或零部件预期的行驶里程/工作寿命,在振动试验台上以设定加速老化系数及循环工况进行振动测试,可以发现产品振动失效模式、提高汽车对振动环境的适应性。

针对电动汽车用驱动电机系统的振动试验测试,现行 GB/T 18488.1—2015 规定了 2 个独立的试验循环,也是目前新能源车公告准入强制要求的测试项目^[12]:扫频振动测试(根据在发动机上或其他部位安装的驱动电机系统设定试验严酷等级)、随机振动测试(参照 GB/T 28046.3—2011),但存在一些准确性适用性方面的不足,有待修订改进。

2.1 扫频振动测试简析

驱动电机及其控制器应能经受 X、Y、Z 3 个方

向的正弦扫频振动试验,如果驱动电机系统不与发动机连接,则按现行国标 GB/T 18488.1—2015 规定的“其他部位”进行振动试验,测试具体要求如表 2 所示。

表 2 扫频振动试验测试条件

序号	频率/Hz	振幅/mm	加速度/(m·s ⁻²)	对数扫频速率/(oct·min ⁻¹)	每一方向试验时间/h
1	10~25	1.2	-	1	8
2	25~500	-	30	1	8

在扫频范围 10~25 Hz(驱动电机系统主驱电机工作频率,对应汽车由静止过渡至起步成功阶段),扫频速率 1 oct/min 时,一个扫频循环 SR(10→25→10)的倍频程数 X_1 、应力循环数 N_1 、扫频持续时间 T_1 、8 h 扫频试验对应总应力循环数 N_{total1} 计算如下^[8](结果取整或用数量级表示):

$$X_1 = \frac{\ln\left(\frac{f_2}{f_1}\right) \times 2}{\ln 2} = \frac{\ln\left(\frac{25}{10}\right) \times 2}{\ln 2} \approx 3$$
$$N_1 = \frac{(f_2 - f_1) \times 60 \times 2}{\ln 2 \times SR} = \frac{(25 - 10) \times 60 \times 2}{\ln 2 \times 1} \approx 2\,597$$

$$T_1 = \frac{X_1}{SR} = \frac{\ln\left(\frac{25}{10}\right) \times 2}{\ln 2 \times 1} \approx 3 \text{ min}$$
$$N_{total1} = \frac{N_1 \times 8 \times 60}{T_1} = \frac{2\,597 \times 8 \times 60}{3} = 4.16 \times 10^5$$

在扫频范围 25~500 Hz(驱动电机系统主驱电机工作频率,对应汽车低速至中高速行驶阶段,该频率段更贴近于传统内燃机工作频率而不是电机工作频率),扫频速率 1 oct/min 时,一个扫频循环 SR(25→500→25)的倍频程数 X_2 、应力循环数 N_2 、扫频持续时间 T_2 、8 h 扫频试验对应总应力循环数 N_{total2} 计算如下^[8](结果取整或用数量级表示):

$$X_2 = \frac{\ln\left(\frac{f_2}{f_1}\right) \times 2}{\ln 2} = \frac{\ln\left(\frac{500}{25}\right) \times 2}{\ln 2} \approx 9$$
$$N_2 = \frac{(f_2 - f_1) \times 60 \times 2}{\ln 2 \times SR} = \frac{(500 - 25) \times 60 \times 2}{\ln 2 \times 1} \approx 82\,234$$

$$T_2 = \frac{X_2}{SR} = \frac{\ln\left(\frac{500}{25}\right) \times 2}{\ln 2 \times 1} \approx 9 \text{ min}$$

$$N_{total2} = \frac{N_2 \times 8 \times 60}{T_2} = \frac{82\,234 \times 8 \times 60}{9} = 4.39 \times 10^6$$

IEC 60068-2-6-2007、GB/T 2423.10-2008 等标准针对电工电子产品、推荐扫频振动试验的总应力循环数为 10⁷ 量级,需考虑根据不同车型搭载驱动电机系统考核需求及其工作条件进行更准确的总应力循环数设计。

2.2 随机振动测试简析

驱动电机及驱动电机控制器应能经受 X、Y、Z 3 个方向的随机振动试验,根据不同安装部位,现行国标参照 GB/T 28046.3—2011 严酷度及持续时间进行试验,部分安装部位的测试要求如表 3 所示。

表 3 随机振动试验测试条件

型号	安装部位	试验配置方式或参数
I	乘用车发动机	每个方向持续:22 h
		RMS 值:181 m/s ²
		频率:10~2 000 Hz
II	乘用车变速器	PSD:10~20 (m/s ²) ² /Hz
		每个方向持续:22 h
		RMS 值:96.6 m/s ²
IV	乘用车弹性体/车 身	频率:10~2 000 Hz
		PSD:10~5 (m/s ²) ² /Hz
		每个方向持续:8 h
V	乘用车车轮/悬挂	RMS 值:27.8 m/s ²
		频率:10~1 000 Hz
		PSD:20~0.14 (m/s ²) ² /Hz
VI	商用车发动机 变速箱	每个方向持续:8 h
		RMS 值:107.3 m/s ²
		频率:20~2 000 Hz
VII	商用车弹性体	PSD:200~3 (m/s ²) ² /Hz
		每个方向持续:94 h
		RMS 值:177 m/s ²
IX	商用车车轮/悬挂	频率:10~2 000 Hz
		PSD:14~20 (m/s ²) ² /Hz
		每个方向持续:32 h
VII	商用车弹性体	RMS 值:57.9 m/s ²
		频率:10~2 000 Hz
		PSD:18~1 (m/s ²) ² /Hz
IX	商用车车轮/悬挂	每个方向持续:32 h
		RMS 值:57.9 m/s ²
		频率:10~2 000 Hz
IX	商用车车轮/悬挂	PSD:18~1 (m/s ²) ² /Hz
		每个方向持续:32 h
		RMS 值:57.9 m/s ²

上述随机振动试验条件对不同种类车型及安装位置进行了合理区分配置,适用于传统发动机

汽车零部件的随机振动测试。针对电动汽车用驱动电机系统的振动特性是否适合,仍需进行评估分析。

3 ISO 振动试验标准对比参考

驱动电机系统振动试验可以参考的 ISO 16750-3-2007(GB/T 28046.3—2011 采用)及 ISO 19453-3-2018,相关试验设计主要指标对比如表 4 所示。

表 4 标准对比

对比项目	ISO 16750-3-2007	ISO 19453-3-2018
坏路比例	坏路标准 90%	坏路降低至 50%,尤其是动力总成部件的随机振动降至 10%
温度循环	一个循环 480 min,可协商恒温条件	正弦振动中增加一个温度循环设计原则
振动方向	XYZ 3 个方向振动时 间和幅值一致	针对汽车各个方向振 动差异,各方向不同
等效里程	24 万公里	24 万公里

ISO 19453-3-2018 标准的坏路占比下降,更接近于各国道路条件的改善趋势;振动试验叠加温度循环^[13],可更准确模拟驱动电机系统实际使用环境应力条件,但需考虑搭载于不同车型时的布置状态对应的温度循环差异;X、Y、Z 3 个振动方向,Z 方向承受最严苛的振动条件;振动试验循环的老化等效里程,需要结合乘用车或商用车的具体应用需求进行设定换算。

除安装于弹性体车身的零部件外,ISO 19453-3-2018 针对与电动汽车直接安装连接电机的随机振动试验 PSD 中,X 及 Z 方向 10~40 Hz 的 PSD 值为 55~28 (m/s²)²/Hz、X 方向 120~1 000 Hz 的 PSD 为 0.02 (m/s²)²/Hz、Z 方向 120~1 000 Hz 的 PSD 为 0.06 (m/s²)²/Hz、Y 方向为更标准的“Z”字型随机振动 PSD,如图 2 所示^[11]。

由图 2 可知,基于分体式的中央电机在车身安装连接的随机振动加速试验条件,未考虑多合一电驱动系统产品带有的更多运转部件(变速箱、减速器及电控等)的振动特性。

4 驱动电机系统随机振动试验改进

以 ISO 16750-3-2007(GB/T 28046.3—2011)

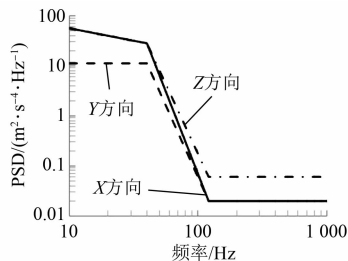


图2 ISO 19453-3-2018 III型随机振动试验 PSD 与频率

中乘用车变速器安装位置为例,“V”字型随机振动 PSD 中 100~500 Hz 下沉区间将用于单独的正弦振动试验,主要根据传统内燃机的气缸和活塞运动频率规律,而<100 Hz、>500 Hz 这 2 个区间平直的 PSD 是基于等损伤原则的简化等效处理(随机激励载荷来自于变速箱及减速器),如图 3 所示^[10]。

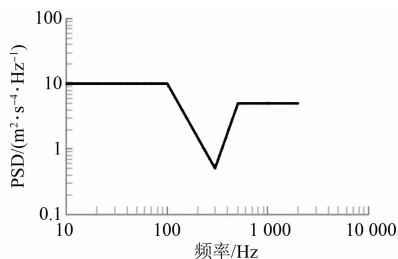


图3 ISO 16750-3-2007 II型随机振动试验 PSD 与频率

以 ISO 16750-3-2007 (GB/T 28046.3—2011) 中乘用车非弹性体(车轮、车轮悬挂)安装位置为例(类似于轮毂电机形式驱动电机系统应用条件),随机振动 PSD 中,20~40 Hz 的 PSD 为 $200 \text{ (m/s}^2\text{)}^2/\text{Hz}$ 、300~800 Hz 的 PSD 为 $0.5 \text{ (m/s}^2\text{)}^2/\text{Hz}$ 、1 000 ~ 2 000 Hz 的 PSD 为 $3 \text{ (m/s}^2\text{)}^2/\text{Hz}$,接近于“Z”字型随机振动 PSD (20~40 Hz PSD 较大,主要考虑路面上低频的较大道路冲击),如图 4 所示^[10]。

某乘用车搭载的直驱轮毂电机驱动系统(不含变速箱及减速器等传动系统部件),不考虑路面道路冲击较大的条件下,以合理的预设速度分别通过均匀波浪路、比利时路、搓板路等标准场地测试路面,实测轮端 Z 方向随机振动 PSD(取原始测试数据各频率下对应的峰值包络线),约 10 Hz 出现最大振动加速度,如图 5 所示。

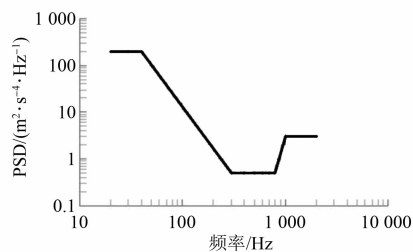


图4 ISO 16750-3-2007 V型随机振动试验 PSD 与频率

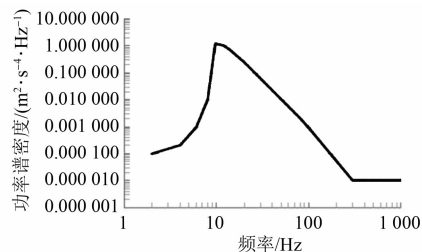


图5 轮毂电机车型的轮端 Z 方向实测随机振动峰值

图 5 中,在特定急加/减速工况会测得最大约 3 倍的 PSD 峰值,但随机振动严重区域仍主要集中在低频段(100 Hz 以下);在没有变速箱及减速器等传动部件情况下,中高频段(200 Hz 或 300 Hz 以上)随机振动 PSD 数量级非常小。

为了缩短试验时间、实际振动试验循环中可人为设定更大的振动量级(需保持频率特性谱型趋势),达到耐振动加速验证效果,但关键是需要根据驱动电机系统零部件的材料组成,确定振动试验时间与振动量级的等效计算关系加速因子,才能基于线性疲劳累计损伤 Palmgren-Miner 假设,将被测驱动电机系统的随机振动试验总应力循环数也控制在 10^7 数量级,以兼顾测试经济性及车辆等效里程换算的准确性。

因此,针对不同驱动电机系统,如分体式、二合一、多合一等不同质量及构型方案,需结合搭载乘用车或商用车不同使用工况条件,进行差异化随机振动国标试验型谱设计,避免漏掉驱动电机系统内部的部分振动载荷(如减速器等),或者采用了统一的但不合理的试验循环方案设置。可参考 ISO 16750-2007 及 ISO 19453-3-2018 等系列标准中汽车电气和气子部件产品的石体冲击试验、振动试验、机械冲击和持续机械冲击试验分类方式^[14],区分道路冲击试验与随机振动试验对驱动电机系统的不同考核目标。

5 结 语

(1) 现行驱动电机系统振动测试国标或 ISO 标准,需要基于电动汽车用驱动电机系统搭载条件及道路条件变化而修订。

(2) 正弦扫频振动试验主要分析驱动电机系统的共振点及稳定性,现行标准需要关注电动汽车用驱动电机系统工作频率范围,并重新设计选取系统考核的合理总应力循环数量级。

(3) 随机振动试验主要关注各种道路路面、通过车轮及悬架等部件对驱动电机系统的传递振动,故需采集不同电动汽车用驱动电机系统典型振动路谱,重新进行随机振动试验型谱提炼,不能简单地参考采用 ISO 16750-3-2007 或 ISO 19453-3-2018 的随机振动试验条件及方法。

(4) 道路冲击试验可与随机振动试验分开制定试验标准,以确保此类低频的恶劣道路条件也能得到考核,特别是针对轮毂电机系统应用场景。

【参考文献】

- [1] 相龙洋,顾彦,何融. 新能源车电机负载工况振动噪声试验研究[J]. 新能源汽车, 2019(14): 24.
- [2] 中国电工电子产品环境条件与环境试验标准化技术委员会. 电工电子产品环境试验 第2部分: 试验方法 试验 Fc: 振动(正弦): GB/T 2423.10—2008[S]. 2008.
- [3] 全国电工电子产品环境试验标准化技术委员会. 电工电子产品环境试验 第2部分: 试验方法 试验 Fh: 宽带随机振动(数字控制)和导则: GB/T 2423.56—2006[S]. 2006.

- [4] 全国汽车标准化技术委员会. 道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第3部分: 机械负荷: GB/T 28046.3—2011[S]. 2011.
- [5] 全国汽车标准化技术委员会. 汽车电气设备基本技术条件: QC/T 413—2002[S]. 2002.
- [6] 全国汽车标准化技术委员会. 纯电动乘用车用减速器总成技术条件: QC/T 1022—2015[S]. 2016.
- [7] 全国汽车标准化技术委员会. 电动汽车用驱动电机系统 第1部分: 技术条件: GB/T 18488.1—2015[S]. 2015.
- [8] ES-AENOR. Environmental testing-part 2-6: tests-test Fc: vibration (sinusoidal): IEC 60068-2-6-2007[S]. 2007.
- [9] IX-IEC. Environmental testing-part 2-64: tests-test Fh: vibration, broadband random and guidance: IEC 60068-2-64-2008[S]. 2008.
- [10] IX-IEC. Road vehicles-environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment-part 3: mechanical loads: ISO 16750-3-2007[S]. 2007.
- [11] IX-IEC. Road vehicles-environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment for drive system of electric propulsion vehicles-part 3: mechanical loads: ISO 19453-3-2018[S]. 2018.
- [12] 黄炳,温泉,何鹏林,等. 电动汽车电驱动系统随机振动评价方法研究[J]. 汽车电器, 2018(1): 10.
- [13] 黄永华,雷东鹏,谢丽梅,等. 温度对振动特性的影响分析及试验研究[J]. 环境试验, 2020, 38(8): 47.
- [14] 马会凯,许毅,王家星,等. 汽车电气和电子部件机械环境试验要求与关键测试研究[J]. 环境技术, 2019(增刊2): 127.

欢迎订阅 2021 年《电机与控制应用》

联系地址: 上海市武宁路 505 号《电机与控制应用》编辑部

邮编: 200063

电话: 021-62574990-462

邮箱: eec@seari.com.cn

国内邮发代号: 4-199

每册定价: 12.00 元

全年定价: 144.00 元