

# 团 体 标 准

T/CSAE XX - 2020

## 汽车用轮毂电动轮总成 试验方法

Hub electric wheel assembly for automobile—Test method

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的该标准所涉必要专利信息连同支持性文件一并附上。

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国汽车工程学会 发布



# 目 录

前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	2
3 术语与定义.....	2
4 工作模式.....	2
5 试验准备.....	3
5.1 环境条件.....	3
5.2 试验仪器的选择.....	3
6 试验方法.....	3
6.1 一般性试验.....	3
6.2 温升试验.....	5
6.3 功能和性能试验.....	5
6.4 电气负荷.....	11
6.5 机械负荷.....	12
6.6 环境负荷.....	15

# 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国汽车工程学会提出。

本文件由中国汽车工程学会归口管理。

本文件起草单位：

本文件为首次发布。

# 汽车用轮毂电动轮总成 试验方法

## 1 范围

本文件规定了电动汽车用轮毂电动轮及其子系统的试验用的仪器设备、试验准备和各项试验方法。

本文件适用于乘用车类的电动汽车用轮毂电动轮及其子系统,对于有轨电车和其他特种车辆用的轮毂电动轮及其子系统可参考使用。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 755-2019 旋转电机 定额和性能

GB/T 2423.1-2008 电工电子产品环境试验 第2部分:试验方法 试验A:低温

GB/T 2423.5-2019 环境试验 第2部分:试验方法 试验Ea和导则:冲击

GB/T 2423.18-2012 环境试验 第2部分:试验方法 试验Kb:盐雾, 交变(氯化钠溶液)

GB/T 2423.22-2012 环境试验 第2部分:试验方法 试验N:温度变化

GB/T 2423.37-2006 电工电子产品环境试验 第2部分:试验方法 试验L:沙尘试验

GB/T 2900.25 电工术语 旋转电机

GB/T 2900.33 电工术语 电力电子技术

GB/T 3859.1-2013 半导体变流器 通用要求和电网换相变流器 第1-1部分:基本要求规范

GB/T 6882-2016 声学 声压法测定噪声源声功率级和声能量级 消声室和半消声室精密法

GB/T 15704-2012 道路车辆 轻合金车轮 冲击试验方法

GB/T 18488.1 电动汽车用驱动电机系统 第1部分:技术条件

GB/T 18488.2-2015 电动汽车用驱动电机系统 第2部分:试验方法

GB/T 19596 电动汽车术语

GB/T 28046.2-2019 道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第2部分:电气负荷

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

GB/T 28046.4-2011 道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第4部分:气候负荷

GB/T 28046.5-2013 道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第5部分:化学负荷

GB/T 30038-2013 道路车辆 电气电子设备防护等级(IP代码)

GB/T 36282-2018 电动汽车用驱动电机系统电磁兼容性要求和试验方法

QC/T 564-2018 液压制动钳总成性能要求及台架试验方法

QC/T 316-2017 汽车行车制动器疲劳强度台架试验方法

JB/T 13353-2017 滚动轴承汽车轮毂轴承单元试验及评定方法

T/CSAE XXXX-20XX 轮毂电动轮总成 术语和定义

T/CSAE XXXX-20XX 轮毂电动轮总成 技术条件

ISO 16750-3 道路车辆 电气和电子设备的环境条件和测试 第3部分:机械载荷 (Road vehicles. Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment. Part 3: Mechanical loads)

ISO 6469-3-2018 电动道路车辆 安全说明书 第3部分:防身体触电装置 (Electrically propelled road vehicles -- Safety specifications -- Part 3: Electrical safety)

ISO 20567-1-2017 涂料和清漆 涂层耐石屑的测定 第1部分 多次冲击测试 (Paints and varnishes. Determination of stone-chip resistance of coatings. Part 1: Multi-impact testing)

### 3 术语和定义

GB/T 2900.25、GB/T 2900.33、GB/T 19596、GB/T 18488.1及T/CSAE XXXX-20XX界定的术语和定义适用于本文件。

### 4 工作模式

表1列举了各项试验中涉及的轮毂电机相关工作模式,通过对应的工作模式下的参数设置,以适应各项试验的需要。

表1 工作模式

工作模式	被测件状态	参数范围
非连接模式	电机与逆变器断开连接	无
连接模式	电机连接电源,额定电压,但不启动	无
典型的牵引模式	具有完全功能,连接到逆变器和具有和车辆参数或属性一致的电源	保持恒定转速和转矩, 额定直流电压 正向转矩: 额定持续转矩的 40%±5 % 转速: 最高转速的 50%±5 %
典型的制动模式	具有完全功能,连接到逆变器和具有和车辆参数或属性一致的电源	保持恒定转速和转矩, 额定直流电压 反向转矩: 额定持续转矩的 40%±5 % 转速: 最高转速的 50%±5 %
连续运行	具有完全功能,连接到逆变器和具有和车辆参数或属性一致的电源	保持恒定转速和转矩, 额定直流电压 转矩: 额定连续转矩的 90%~100 % 转速: 最高转速的 60%±5 %
循环运行模式	全功能,连接到逆变器和电源,具有车辆参数或属性	根据目标车辆尺寸依据全球统一轻型车辆排放测试规程 (WLTP) 设定转速和转矩
耐久运行	全功能,连接到逆变器和电源,具有车辆参数或属性	设定特定循环工况的速度和转矩,包括最大扭矩、额定转矩及其余过渡到稳态过程中的工作点

### 5 试验准备

## 5.1 环境条件

如无特殊规定,所有试验环境条件应符合 GB/T 18488.2—2015 中 4.1 的规定,在试验开始前,受测件应在对应温度下静置不低于 2 h。

## 5.2 试验仪器的选择

### 5.2.1 准确度

试验仪器或任何硬件数据采集设备的准确度应按 GB/T 18488.2—2015, 4.2.1 和 4.2.2 中的规定。

### 5.2.2 试验电源

试验过程中,试验电源应满足轮毂电机系统测试输入功率的要求,并能够工作于对应的工作电压状态。试验电源的稳压误差按 GB/T 18488.2—2015 中 4.3.1 的规定。

### 5.2.3 线束布置

用于试验的连接电线、线束的类型和长度模拟实车状态进行布置。如果线束布置对测量结果产生影响,则应调整相应的外部线路阻抗,使之与实车内线束布置的阻抗尽可能相等。

### 5.2.4 冷却设备

轮毂电机及其轮毂电机控制器的冷却条件宜模拟实车状态。所有的数据,包括冷却装置的类型、冷却剂的类型、冷却液流量和温度都应记录在试验报告中。

### 5.2.5 信号屏蔽

按照 GB/T18488.2—2015 中 4.6 中的规定进行。

## 6 试验方法

### 6.1 一般性试验

#### 6.1.1 外观

通过测试人员目视检测被测物体的外观,对于具有明确强度要求的技术参数应辅之以必要工具。例如紧固件连接强度,应通过使用合适量程的校准扭力扳手,对轮毂电动轮上螺纹紧固件进行检查,并与产品技术说明书规定紧固扭矩进行对照,对应的紧固扭矩记录在试验报告中。

#### 6.1.2 外形和安装尺寸

在被测件上测量的任何尺寸都应由满足测量精度要求,并校准后的量规(如游标卡尺、三维坐标测量仪等)进行测量。

#### 6.1.3 质量

质量测量的偏差不得超过试验试样规定质量的 $\pm 2\%$ ,测量部分只包含簧下的质量(电缆线除外)。

#### 6.1.4 接口保护

检查轮毂电机动轮中轮毂电机系统所有开放的螺纹孔、冷却水管接口、定位孔等机械接口是否保护套保护。所有接线端子、连接器接口等电气接口是否安装有绝缘套。

#### 6.1.5 轮毂电机控制器壳体机械强度

试验方法按照GB/T 18488.2—2015中5.4的规定进行。

#### 6.1.6 冷却回路的密封性能

对液冷的轮毂电机系统进行该项试验,其中对分离式轮毂电机系统应将轮毂电机和轮毂电机控制器冷却回路分开后单独测量。试验前不允许对被测样品进行任何放渗漏处理,试验气体介质可以是空气、氮气或惰性气体。试验时试验环境温度分别设置为最高工作温度和最低工作温度,试验具体方法按照GB/T 18488.2-2015中5.5.5中规定进行,通入气体使气压逐步增加到T/CSAE XXXX-20XX中5.2.6规定的试验压力,并保持该压力至少15 min。

压力保持过程中,压力仪表显示值不应下降,期间不允许有可见的渗漏通过被试品壳壁和任何固定连接处。

#### 6.1.7 绝缘电阻测量

##### 6.1.7.1 轮毂电机的绝缘电阻

按照GB/T 18488.2—2015中5.7的有关试验要求,在具体环境条件下进行试验,测量绝缘电阻时应测量:

- a) 轮毂电机绕组(其中一相绕组)与低压回路元件(如温度传感器、位置传感器等)之间的绝缘电阻;
- b) 轮毂电机绕组(其中一相绕组)和机壳的导电部分之间的绝缘电阻。

为了便于测量,低压回路可以接地到机壳。试验时,在对应电压等级的兆欧表的工作电压下应测量不少于1 min后,兆欧表的选用应按GB/T 18488.2—2015中5.7.2的规定,测量结束时应记录读数。试验结束后,电机应通过绝缘测试装置或者将相线连接电机壳体进行放电。

##### 6.1.7.2 轮毂电机控制器的绝缘电阻

按照GB/T 18488.2—2015中5.7.5的规定进行。

#### 6.1.8 耐电压

按照GB/T 18488.2—2015中5.8的规定进行。

#### 6.1.9 超速

试验方法按照GB/T 18488.2—2015中5.9的规定进行。

#### 6.1.10 轮毂电机绕组温度的测量

温度应用具有适当量程、时间常数和准确度的温度传感器(即NTC或PT型)进行测量。温度传感器应置于电机最高温度点位置,并具有良好的热接触,以准确表示绕组温度。特殊情况下,如果直接使用温度传感器无法表征绕组的实际温度,则应按GB/T 18488.2-2015中6.2的方法计算获得。

#### 6.1.11 冷却介质温度

试验方法按GB/T 18488.2—2015中6.3的规定进行。

## 6.2 温升试验

试验方法按 GB/T18488.2—2015 第 6 章的规定进行。

## 6.3 功能和性能试验

### 6.3.1 输入和输出特性

#### 6.3.1.1 工作电压范围

按照 GB/T 18488.2—2015 中 7.1 的规定进行。

#### 6.3.1.2 转矩-转速特性及效率

按照 GB/T 18488.2-2015 中 7.2.1、7.2.2 和 7.2.3 的规定，选择测量转矩-转速点和参数，对应效率测量方法按照 6.3.1.8 中的规定进行。

温度条件(冷却剂、环境温度)应由客户和制造商商定。如未指定，试验应符合 GB/T 18488.2—2015 中 4.1 的规定在标定温度条件下进行。

#### 6.3.1.3 持续转矩

试验应在连续运行模式下，不同的环境温度和冷却液温度下进行。

试验时，通过调整冷却液进口温度，控制轮毂电机温度变化在 30 min 内小于 1 k，并使轮毂电机系统工作于 T/CSAE XXXX-20XX 中 5.4.1.3 规定的转矩和转速条件下，按 GB/T 18488.2-2015 中 7.2.3 的方法进行试验和测量，试验后，轮毂电机系统应能够长时间正常工作，此外，如果制造商没有特殊规定，那么持续功率测试期间的最高温度限定应符合 GB/T 755-2019 中的绝缘热等级 8.10。

#### 6.3.1.4 持续功率

按照 6.3.1.3 记录的持续转矩和相应的工作转速，利用公式 (1) 即可计算获得轮毂电机系统的持续功率。

$$P_m = \frac{T \times n}{9550} \dots\dots\dots(1)$$

式中：

- $P_m$  —— 轮毂电机输出的持续功率，单位为千瓦 (kW)
- $T$  —— 为所测轮毂电机的持续转矩，单位为牛米 (N.m)
- $n$  —— 为所测轮毂电机的工作转速，单位为转每分钟 (r/min)

#### 6.3.1.5 峰值功率

按 6.3.1.6 给出的峰值转矩和相应的工作转速，利用公式 (1) 即可计算获得轮毂电机的峰值功率，峰值功率应与试验转速区间对应。在试验中测量获得的峰值功率的转速区间内，功率测量结果曲线不得与峰值功率值相差超过 $\pm 2\%$ 。在电机速度变化范围内，指定的功率曲线变化也不应相差超过 $\pm 4\%$ 。

#### 6.3.1.6 峰值转矩

按照以下程序确定电机峰值功率的规格。

电机应完全组装并连接到轮毂电机控制器上，对于液冷式的轮毂电机系统，应另外连接冷却系统，

冷却液起始温度及流量与实际车辆上的一致。在试验正式进行之前，应按顺序执行如下两个步骤进行预处理：

- a) 在  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度下放置电机至少 2 h；
- b) 在测试台上以牵引模式使轮毂电机运行 3 min，使电机输出相当于最大机械功率标定值的 80 %（输出转矩为额定转矩）。

完成以上两个预处理步骤，即开始进行试验。试验开始时，将轮毂电机进行恒定转矩控制，其转矩值设置为电机的最大转矩，使轮毂电机系统工作于 T/CSAE XXXX-20XX 中 5.4.1.5 规定的峰值转矩和转速和持续时间等条件下，按 GB/T 18488.2-2015 中 7.2.3 的方法进行试验和测量。试验开始后，使试验电机转速以相等时间间隔逐步增加，直到达到最大速度，转速调节时间间隔长度是根据电机的热性能确定，测量和记录试验过程中的峰值转矩和相应的工作转速。试验过程中的温升不能超过制造商规定的限值，也不能超过 GB/T 755-2019 中规定的 8.10 的限值。

### 6.3.1.6 最高工作转速

按照 GB/T 18488.2—2015 中 7.2.5.6 的规定进行。

### 6.3.1.7 高效工作区

按照 GB/T 18488.2—2015 中 7.2.5.7 的规定进行。

### 6.3.1.8 效率测量

进行效率测量时，应按照如下条件测量各工作点的效率：

- 如果测试点转矩值低于轮毂电机的持续转矩值，则连续测试 15 s；
- 如果测试点转矩值高于轮毂电机的持续转矩值，则连续测试不少于 5 s。

某一工作点连续测试完成后，应将试验电机转矩归零，并保持轮毂电机转速，使轮毂电机温度降低。使电机温度与冷却介质温度温差小于  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  后，继续按照同样的方法测量下一个工作点。冷却介质温度测定按照 GB/T 18488.2-2015 中 6.3 有关要求进行。

测量轮毂电机系统总效率的计算方法如下：

- a) 处于电动工作状态：

$$\eta_{+}^{(\text{sys})} = \frac{\omega_{\text{meas}}^{(+)} T_{\text{meas}}^{(+)}}{U_{\text{DC}} I_{\text{DC}}} \times 100\% \dots\dots\dots(2)$$

式中：

- $\eta_{+}^{(\text{sys})}$  ——轮毂电机系统处于电动工作状态下的系统总效率
- $\omega_{\text{meas}}^{(+)}$  ——轮毂电机的正向转矩工作点对应的角速度，单位为弧度/秒（rad/s）
- $T_{\text{meas}}^{(+)}$  ——轮毂电机的反向转矩工作点对应的电机轴端转矩，单位为牛米(N.m)
- $U_{\text{DC}}$  ——是轮毂电机控制器侧的直流电压，单位为伏特（V）
- $I_{\text{DC}}$  ——轮毂电机控制器侧的直流电流，单位为安培（A）

- b) 处于馈电工作状态：

$$\eta_{-}^{(\text{sys})} = \frac{U_{\text{DC}} I_{\text{DC}}}{\omega_{\text{mean}}^{(-)} T_{\text{mean}}^{(-)}} \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

式中：

- $\eta_{-}^{(sys)}$  —— 轮毂电机系统处于馈电工作状态下的系统总效率；
- $\omega_{meas}^{(-)}$  —— 轮毂电机的反向转矩工作点对应的角速度，单位为弧度/秒（rad/s）；
- $T_{meas}^{(-)}$  —— 轮毂电机的反向转矩工作点对应的电机轴端转矩，单位为牛米(N.m)；
- $U_{DC}$  —— 轮毂电机控制器侧的直流电压，单位为伏特（V）；
- $I_{DC}$  —— 轮毂电机控制器侧的直流电流，单位为安培（A）。

考虑机械损耗（包括当轮毂电机需要齿轮箱向车轮传递动力时产生的齿轮损耗）的电机效率，计算如下：

a) 处于电动工作状态：

$$\eta_{+}^{(mot+mec)} = \frac{\omega_{meas}^{(+)} T_{meas}^{(+)}}{P_{AC}} \times 100\% \dots\dots\dots(4)$$

式中：

- $\eta_{+}^{(mot+mec)}$  —— 轮毂电机处于电动工作状态下的效率
- $P_{AC}$  —— 功率分析仪测量的总交流功率，单位为瓦特(W)
- $\omega_{meas}^{(+)}$  —— 轮毂电机的正向转矩工作点对应的角速度，单位为弧度/秒（rad/s）
- $T_{meas}^{(+)}$  —— 轮毂电机的正向转矩工作点对应的电机轴端转矩，单位为牛米(N.m)

b) 处于馈电工作状态：

$$\eta_{-}^{(mot+mec)} = \frac{P_{AC}}{\omega_{meas}^{(-)} T_{meas}^{(-)}} \times 100\% \dots\dots\dots(5)$$

式中：

- $\eta_{-}^{(mot+mec)}$  —— 轮毂电机处于馈电工作状态下的效率
- $P_{AC}$  —— 功率分析仪测量的总交流功率，单位为瓦特(W)
- $T_{meas}^{(-)}$  —— 轮毂电机的反向转矩工作点对应的电机轴端转矩，单位为牛米(N.m)
- $\omega_{meas}^{(-)}$  —— 轮毂电机的反向转矩工作点对应的角速度，单位为弧度/秒（rad/s）

轮毂电机控制器效率应考虑电机系统电动状态和馈电状态时控制器的效率，计算方法如下：

a)处于电动工作状态：

$$\eta_{+}^{(inv)} = \frac{P_{AC}}{U_{DC} I_{DC}} \times 100\% \dots\dots\dots(6)$$

式中：

- $\eta_{+}^{(inv)}$  —— 轮毂电机控制器处于电动工作状态下的效率
- $P_{AC}$  —— 功率分析仪测量的总交流功率，单位为瓦特(W)
- $U_{DC}$  —— 轮毂电机控制器侧的直流电压，单位为伏特（V）
- $I_{DC}$  —— 轮毂电机控制器侧的直流电流，单位为安培（A）

b) 处于馈电工作状态：

$$\eta_{-}^{(inv)} = \frac{U_{DC} I_{DC}}{P_{AC}} \times 100\% \dots\dots\dots (7)$$

式中:

- $\eta_{-}^{(inv)}$  —— 轮毂电机控制器处于馈电工作状态下的效率
- $P_{AC}$  —— 功率分析仪测量的总交流功率, 单位为瓦特(W)
- $U_{DC}$  —— 轮毂电机控制器侧的直流电压, 单位为伏特 (V)
- $I_{DC}$  —— 轮毂电机控制器侧的直流电流, 单位为安培 (A)

### 6.3.1.9 最高效率

按照 GB/T 18488.2—2015 中 7.2.5.8 的规定进行。

### 6.3.1.10 控制精度

按照 GB/T 18488.2—2015 中 7.3 的规定进行。

### 6.3.1.11 堵转转矩

按照 GB/T 18488.2—2015 中 7.2.5.5 的规定进行。

### 6.3.1.12 馈电特性

按照 GB/T 18488.2—2015 中 7.6 的规定进行。

## 6.3.2 阶跃转矩响应

该试验旨在试验轮毂电机系统对阶跃负载需求的响应速度和精度。

实验在带有惯性负载的测量系统上进行(包括标定电机, 法兰, 轴等), 在设定的转速条件下, 试验时按照  $0.25 T_{max}$ ,  $0.5 T_{max}$ ,  $0.75 T_{max}$  和  $T_{max}$  (其中  $T_{max}$  为电机峰值扭矩)。四个不同的输出转矩目标值设定轮毂电机控制器或上位机软件, 轮毂电机由静止状态直接加载到指定转矩, 并达到稳定, 此过程中不对轮毂电机控制器或上位机软件做任何调整, 记录轮毂电机达到指定目标转矩值的时间, 此值为这一扭矩值对应的阶跃转矩响应时间, 记录达到稳定后的实际转矩值, 并计算实际转矩与目标转矩值的差值, 或者实际转矩值与目标转矩值的偏差占目标转矩值的百分数, 此值即为这一转矩目标值对应的阶跃转矩控制精度。

对每一个转矩目标值均进行以上实验, 选取阶跃转矩控制精度中的误差最大值, 作为轮毂电机系统的阶跃转矩控制精度; 选取阶跃转矩响应时间中的最大值, 作为轮毂电机系统的阶跃转矩响应时间。

对于无转矩控制功能的轮毂电机系统, 不进行该项试验。

## 6.3.3 循环效率

为了验证在典型工况下的轮毂电机系统效率, 采用 WLTP (全球统一轻型车辆测试程序) 循环标准验证电机的循环效率, 见图 1。

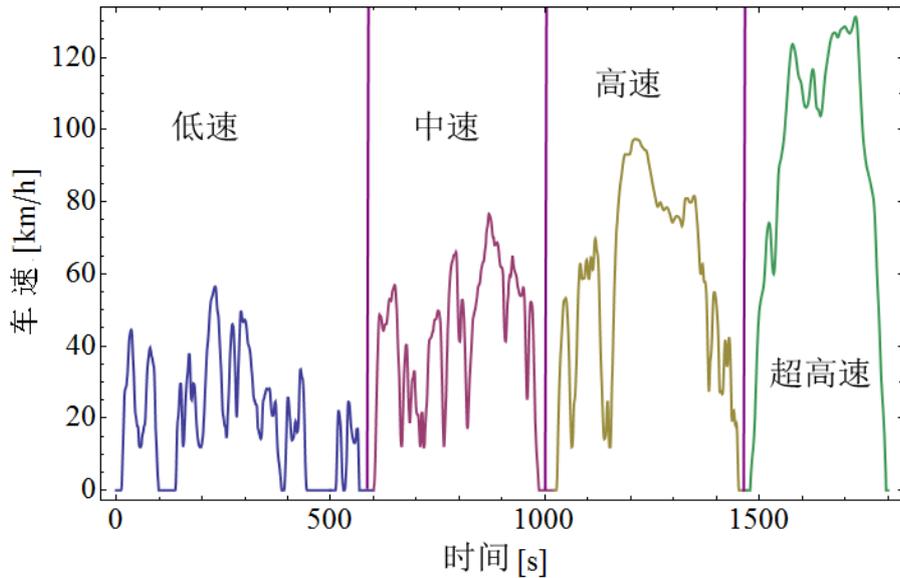


图 1 WLTP 标准行驶循环

试验应用测功机或具备测功机功能的设备作为负载, 轮毂电机用于进行循环试验的负载转矩取决于具体车辆参数 (包括车辆重量、空气阻力系数、滚动阻力、电机数量等), 根据用户与制造商协商确定的数值进行试验。通过设定轮毂电机控制器或上位机软件, 控制轮毂电机按照循环工况速度剖面运行。试验时, 应实时记录轮毂电机系统的输入/输出电流和电压, 并通过积分计算获得测量的直流母线消耗能量值。

轮毂电机系统的循环效率应为所需的总牵引能量 (由用户与制造商协商确定) 除以循环消耗的总直流能量, 即用于牵引所消耗的能量, 减去制动能量回收的能量值。循环效率应在轮毂电机控制器直流侧测量。具体计算式如下:

$$\eta^{(DC)} = \frac{E_{required}}{(E_{traction} - E_{regenerated})} \times 100\% \dots\dots\dots (8)$$

式中:

- $\eta^{(DC)}$  —— 轮毂电机系统的循环效率
- $E_{required}$  —— 循环工况下所需总牵引能量的计算值, 单位为瓦特(W)
- $E_{traction}$  —— 循环工况下直流母线总消耗能量的测量值, 单位为瓦特(W)
- $E_{regenerated}$  —— 循环工况下直流母线总回收能量的测量值, 单位为瓦特(W)

试验需要在相同的环境温度和冷却液温度下重复进行, 循环次数应不少于 3 次, 取循环效率的平均值作为测量结果, 若与产品技术文件差值在 1% 内则符合要求。

#### 6.3.4 转矩脉动

此试验的目的是验证转矩脉动低于所需值, 推荐的试验程序如下:

电机必须在试验前进行预处理, 环境温度和冷却液进口分别保持在 5°C、25°C、65°C, 至少 2 h。将参考转矩设置为最大转矩的 80%, 再将电机从静止状态加速到最大工作转速的 80%。测量在不同温度环境下电机在整个加速过程中的转矩, 包括转矩平均值 ( $T_{avg}$ )、转矩峰峰值 ( $T_{peak-to-peak}$ ), 用以下公式计算峰间值转矩脉动:

$$T_{ripp} = \frac{T_{peak-to-peak}}{T_{avg}} \times 100\% \dots\dots\dots(9)$$

式中:

- $T_{ripp}$  —— 转矩脉动, 单位为牛米 (N.m)
- $T_{avg}$  —— 测量的转矩平均值, 单位为牛米 (N.m)
- $T_{peak-to-peak}$  —— 测量的转矩峰峰值, 单位为牛米 (N.m)

### 6.3.5 噪声

试验按照 GB/T 6882-2016 中半消声室测量的规定进行。

轮毂电机从静止匀加速到电机最高工作速度, 持续时间为 100 s。在此期间对声功率级进行测量, 在距离电机中心半径 1 m 的半球形上的几个位置上设置测量点, 以 50 kHz 的帧速率记录电机噪声, 单位 dB (A), 以确定声功率。半球测量面上的传声器位置见图 2。

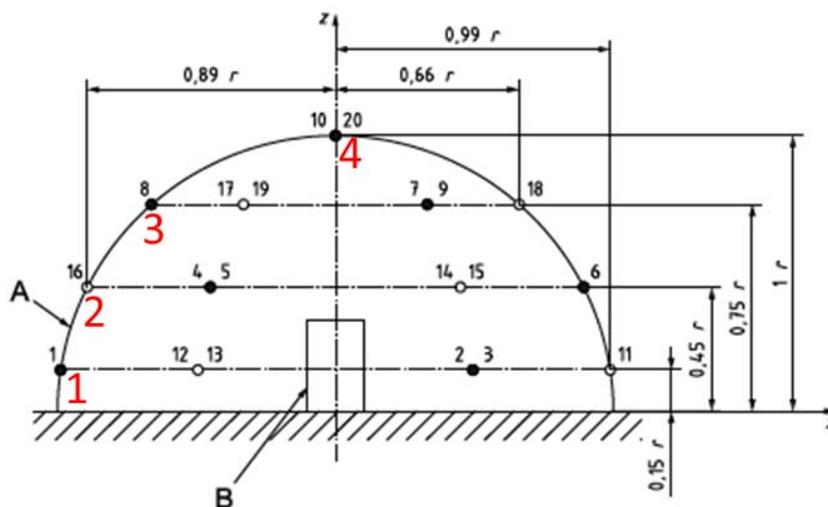


图 2 半球测量面上的传声器位置图

半径 1 m 半球形面上的时间平均声压级 ( $L_{pa}$ ) 通过下式计算获得, 单位为 dB (A) :

$$L_{pa}(1m) = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{10} \left[ 3 \times 10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 3 \times 10^{\frac{L_{p2}}{10}} + 3 \times 10^{\frac{L_{p3}}{10}} + 10^{\frac{L_{p4}}{10}} \right] \right) \dots\dots\dots(10)$$

式中:

- $L_{pa}(1m)$  —— 半径 1 m 半球形的测量面时间平均声压级, 用分贝 (dB) 表示
- $L_{p1}$  —— 传声器 1 处的时间平均声压级, 用分贝 (dB) 表示
- $L_{p2}$  —— 传声器 2 处的时间平均声压级, 用分贝 (dB) 表示
- $L_{p3}$  —— 传声器 3 处的时间平均声压级, 用分贝 (dB) 表示
- $L_{p4}$  —— 传声器 4 处的时间平均声压级, 用分贝 (dB) 表示

声功率级( $L_{wa}$ ) 由下式计算:

$$L_{wa} = L_{pa}(1m) + 10 \log_{10}(S) \dots\dots\dots(11)$$

式中：

$L_{pa}(1m)$ ——半径 1 m 半球形的测量面时间平均声压级，用分贝（dB）表示

$L_{wa}$  ——1 米处的声功率级，单位为瓦（W）

$S$  ——半球面面积 1 m 处的表面积， $S = 2\pi$ ，单位为平方米（m<sup>2</sup>）

因电机在汽车边缘，而不是在中心，估算在半径 6.5 m（近似距离）半球面上的时间平均声压级（近似声学中心），可通过下式计算获得：

$$L_{pa} = L_{wa} - 10 \log_{10}(S_{pass}) \dots\dots\dots (12)$$

式中：

$L_{pa}$  ——近似时间平均声压级，用分贝（dB）表示

$L_{wa}$  ——1 米处的声功率级，单位为瓦（W）

$S_{pass}$  ——半球面 6.5 m 处的表面积， $S_{pass} = 84,5 \pi$ ，单位为平方米（m<sup>2</sup>）

测试结果中应过滤超过 0.5 s 或 1 s 的时间尺度的数据，以平滑数据防止速度变化引起的误差。

测试结果应该保存为 1m 处的声压级  $l_{pa}(1m)$ 、声功率级  $l_{wa}$  和 6.5 m 处的声压级  $l_{pa}$ （近似）与电机速度的图表。

## 6.4 电气负荷

### 6.4.1 安全接地检查

接地检查方法按 ISO 6469-3-2018 中 10.2 的规定，测量轮毂电机系统暴露部分（包括高压线的防护物）的不同可导电部位的接地电阻。测量时电机工作电流应大于 1 A，电压应低于 60 V，量具应使用毫欧表。

### 6.4.2 轮毂电机控制器的保护功能

试验按 GB/T 3859.1—2013 中 7.5.3 的规定进行。

### 6.4.3 电气绝缘检查

按照 GB/T30038-2013 中 8.3 规定的触及防护试验的要求，对轮毂电机系统可导电部分进行绝缘保护检查，并检查用于绝缘保护的非导电壳体是否有双绝缘或加强绝缘保护结构。

### 6.4.4 供电电压瞬态变化试验

按照 GB/T 28046.2—2019 中 4.6 的规定进行。

### 6.4.5 轮毂电机控制器支撑电容放电时间

试验方法按 GB/T 18488.2-2015 中 8.3 的要求进行。

### 6.4.6 电磁兼容试验

按照 GB/T 36282-2018 给出的相应要求进行。

## 6.5 机械负荷

### 6.5.1 石子喷溅

试验方法按照ISO 20567-1: 2017的规定进行。

对于集成式轮毂电机系统,应将轮毂电机系统与车轮完全安装后进行试验。对于分离式轮毂电机系统,将其轮端部分与车轮完全安装后进行试验,具体试验参数见表2。

表2 试验参数

类型	参数
电机模式	非连接模式
每次喷射石子重量	500 g
气压	2 bar
喷射石子	喷射石子,大小为 4 mm~5mm
测试区域	所有能直接可见的外表面
喷射角度	54°
试验循环	2 次

试验结束后,将轮毂电机控制器母线工作电压设定为额定电压,轮毂电机工作于持续转矩、持续功率条件下,检查系统能否正常工作。

### 6.5.2 路沿碰撞

对于集成式轮毂电机系统,轮毂电机系统与车轮完全安装后,将轮毂电动轮按照整车状态安装在试验台上。对于分离式轮毂电机系统,将其轮端部分与车轮完全安装后,在非连接模式下进行试验。具体试验方法按照GB/T 15704-2012中的规定进行。

试验结束后,轮毂电机系统结构不允许有断裂、可视裂纹、影响性能的变形。

### 6.5.3 轮毂电动轮壳体强度

将电动轮按照整车状态安装在试验台上,按照 QC/T564-2018 中的规定进行试验。

试验结束后,检查轮毂电动轮壳体是否出现物理变形或缺陷(裂纹,弯曲,变色或其他不可接受的外观缺陷)。

### 6.5.4 振动试验

#### 6.5.4.1 扫频振动

在试验开始前,将轮毂电机安装在振动试验台上。试验方法按 GB/T18488.2—2015, 中 9.4.2 的规定。

振动试验完成后,检查零部件是否损坏,紧固件是否松动。恢复常态后,将轮毂电机控制器直流母线工作电压设定为额定电压,轮毂电机工作于持续转矩、持续功率条件下,检查系统能否正常工作。

#### 6.5.4.2 随机振动

在试验开始前,将轮毂电机按照正常安装方式安装在振动试验台上,电机连接螺栓的紧固转矩应与车辆相同。在轮毂电机系统未通电状态下试验,使电缆、连接器、管路和其他附件等连接件固定上。线

束和连接件应尽可能地按照车辆的实际状况布置。

轮毂电机的振动严酷度等级符合 GB/T 28046.3-2011 测试 V - 非簧载质量, 持续时间 24 h(每轴 8 h)。

对于分离式轮毂电机系统, 则应将逆变器放置在试验室外或根据 ISO 16750-3 测试 IV - 簧载质量的振动曲线单独测试, 持续时间为 24 h(每轴 8 h)。

轮毂电机和轮毂电机控制器随机振动耐久性试验期间, 随机振动试验曲线及试验参数见图 3 和表 3, 环境温度应依照图 4 循环进行, 热循环试验参数见表 4。

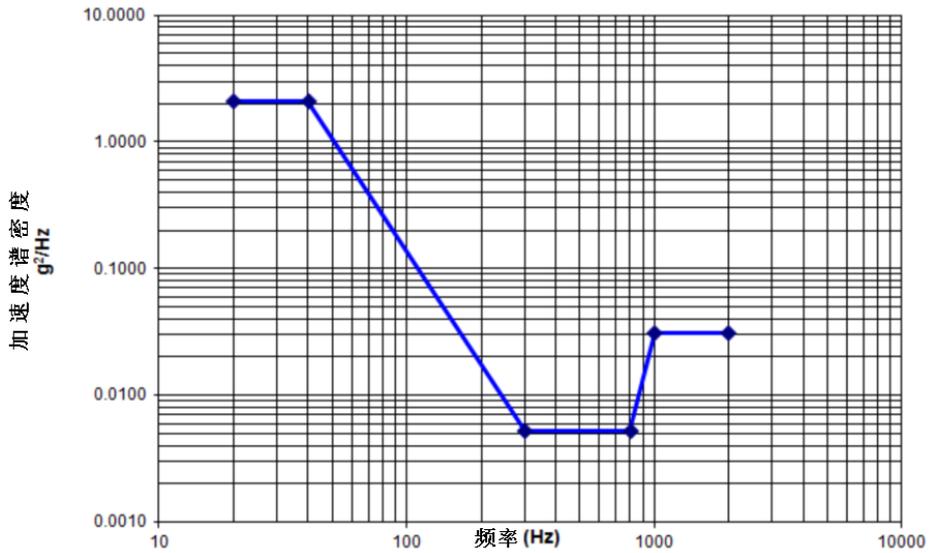


图 3 随机振动试验曲线示意图

表 3 随机振动试验曲线

频率	功率谱密度
20 Hz	$200.2748 \text{ (m/s}^2\text{)}^2\text{/Hz} = 2.0825 \text{ g}^2\text{/Hz}$
40 Hz	$200.2748 \text{ (m/s}^2\text{)}^2\text{/Hz} = 2.0825 \text{ g}^2\text{/Hz}$
300 Hz	$0.5001 \text{ (m/s}^2\text{)}^2\text{/Hz} = 0.0052 \text{ g}^2\text{/Hz}$
800 Hz	$0.5001 \text{ (m/s}^2\text{)}^2\text{/Hz} = 0.0052 \text{ g}^2\text{/Hz}$
1000 Hz	$3.0005 \text{ (m/s}^2\text{)}^2\text{/Hz} = 0.0312 \text{ g}^2\text{/Hz}$
2000 Hz	$3.0005 \text{ (m/s}^2\text{)}^2\text{/Hz} = 0.0312 \text{ g}^2\text{/Hz}$

单温度循环曲线

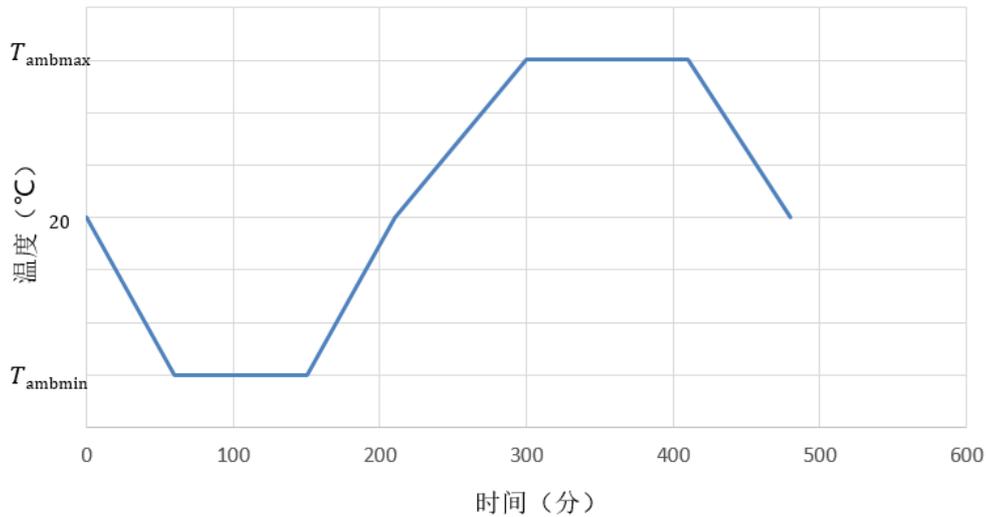


图 4 叠加单个温度循环曲线示意图

表 4 叠加热循环试验参数

时间/分钟	温度/°C
0	20
60	T <sub>AMBMIN</sub>
150	T <sub>AMBMIN</sub>
210	20
300	T <sub>AMBMAX</sub>
410	T <sub>AMBMAX</sub>
480	20

注：T<sub>AMBMIN</sub> 为最低环境温度，T<sub>AMBMAX</sub> 为最高环境温度。

随机振动试验完成后，检查零部件是否损坏，紧固件是否松脱。恢复常态后，将轮毂电机控制器直流母线工作电压设定为额定电压，轮毂电机工作于持续转矩、持续功率条件下，检查系统能否正常工作。

#### 6.5.5 制动耦合耐久

将轮毂电动轮总成按实车安装状态安装到试验台上，按照 QC/T 316-2017 进行试验。

试验结束后，检查轮毂电动轮壳体是否出现任何物理变形或故障（裂纹，弯曲，变色或其他不可接受的外观问题）。

#### 6.5.6 机械冲击

试验按照 GB/T2423.5-2019 中规定进行。对于集成式轮毂电机系统，将轮毂电机系统与车轮完全装配后，将轮毂电动轮按照整车状态直接/通过夹具固定在冲击试验机上，对于分离式轮毂电机系统，则其轮端部分与车轮完全安装后，按照下述试验方法进行试验。

试验需要在非连接模式下进行，在被测样品 3 个轴的两个方向上施加半正弦波形冲击脉冲，试验参

数见表 5:

表 5 耐机械冲击试验参数

类型	参数
脉冲持续时间	6 ms
脉冲峰值加速度	50 g (500 m/s <sup>2</sup> )
脉冲波形	半正弦波形
每个方向施加冲击次数	10 次
总共冲击次数	60 次

试验结束后,使轮毂电机系统恢复 1 h~2 h 后,将轮毂电机控制器直流母线工作电压设定为额定电压,轮毂电机工作于持续转矩、持续功率条件下,检查系统能否正常工作,并检查电机零部件是否出现任何物理变形或故障(裂纹,弯曲,变色或其他不可接受的外观问题)。

### 6.5.7 包装跌落

试验方法按 GB/T 28046.3-2011 中 4.3 要求进行,轮毂电机系统的包装状态从 1 m 高度自由跌落到混凝土或钢板上,填料不应损坏,紧固件不得松动。试验结束后,将轮毂电机控制器直流母线工作电压设定为额定电压,轮毂电机工作于持续转矩、持续功率条件下,检查轮毂电机系统能否正常工作,并检查电机零部件是否出现任何物理变形或故障(裂纹,弯曲,变色或其他不可接受的外观问题)。

## 6.6 环境负荷

### 6.6.1 低温

#### 6.6.1.1 低温贮存

进行低温贮存试验时,应将轮毂电机系统在室温下放入环境箱中,将环境箱温度降至-40℃,并保持 2 h。试验过程中轮毂电机系统处于非通电状态,在环境箱贮存 24 小时后,应测量轮毂电机及轮毂电机控制器的绝缘电阻,试验方法按照 6.1.7 进行。

绝缘电阻测试完成后,环境箱温度应升至室温,并恢复至少 2 h。轮毂电机应在牵引模式下运行,检查系统能否正常工作,并检查电机零部件是否出现任何物理变形或故障(裂纹,弯曲,变色或其他不可接受的外观问题)。

#### 6.6.1.2 低温工作

试验方法按 GB/T 18488.2—2015 中 9.1 的规定。将轮毂电机系统放入在-40℃的环境箱中,保持 24 h 后在常温冷却条件下,将轮毂电机控制器直流母线工作电压设定为额定电压,轮毂电机工作于持续转矩、持续功率条件下,检查轮毂电机系统能否正常工作,并检查电机零部件是否出现任何物理变形或故障(裂纹,弯曲,变色或其他不可接受的外观问题)。

试验后箱内复测绝缘电阻,试验方法按照 6.1.7 的规定进行。

### 6.6.2 高温

#### 6.6.2.1 高温贮存

进行轮毂电机高温存储试验时,将驱动电机系统在室温下放入环境箱内,使箱内温度升至 85℃。

驱动电机系统应处于非通电状态。高温贮存 48 h 后，应测量轮毂电机及轮毂电机控制器的绝缘电阻，试验方法按照 6.1.7 的规定进行。

绝缘电阻测试完成后，温度箱温度应降升至室温，轮毂电机应在牵引模式下运行，以检查系统能否正常工作。

#### 6.6.2.2 高温工作

试验程序如下：

- a) 将轮毂电机系统安装在设置为最高环境温度的环境箱中，冷却介质温度设置为设计最高温度，将轮毂电机控制器直流母线工作电压设定为额定电压，轮毂电机工作于持续转矩、持续功率条件下，持续工作；
- b) 轮毂电机停止工作，在室温的情况下，放置 15 min；
- c) 以 a) 和 b) 为 1 个工作循环，连续进行 192 个工作循环，共计 96h；

试验结束后，箱内复测绝缘电阻，测试方法按照 6.1.7 的规定进行。

#### 6.6.3 制动高温

根据制造商与客户商定的制动工况，按照 QC/T 564 有关要求进行试验。试验后电机静止 2 h，并使轮毂电机工作于持续转矩、持续功率条件下，检查系统能否正常工作。

#### 6.6.4 恒定湿热

试验方法按 GB/T 18488.2-2016 中 9.3 的规定进行。

试验结束后，将轮毂电机控制器母线工作电压设定为额定电压，轮毂电机工作于持续转矩、持续功率条件下，检查系统能否正常工作。

#### 6.6.5 交变湿热

在耐温度/湿度循环试验中，轮毂电机系统在额定电压，额定转矩和额定功率情况下，保证可以在交替湿度和热的 10 个测试循环运行，交变湿热热循环示意图见图 5。

- a) 低温冷浸：-20℃，预处理时间不小于 2 h；
- b) 高温高湿热浸：低温平衡后 3 min 之内转移到 45℃ 和 95% 相对湿度的高温环境平衡 4 h；一个循环共包含以上两个平衡，共计 6 h。

测试时轮毂电机工作模式应为典型的牵引操作。轮毂电机应在高温高湿热浸试验 2 h~3 h 内以典型牵引模式运行，检查轮毂电机能否正常运行。

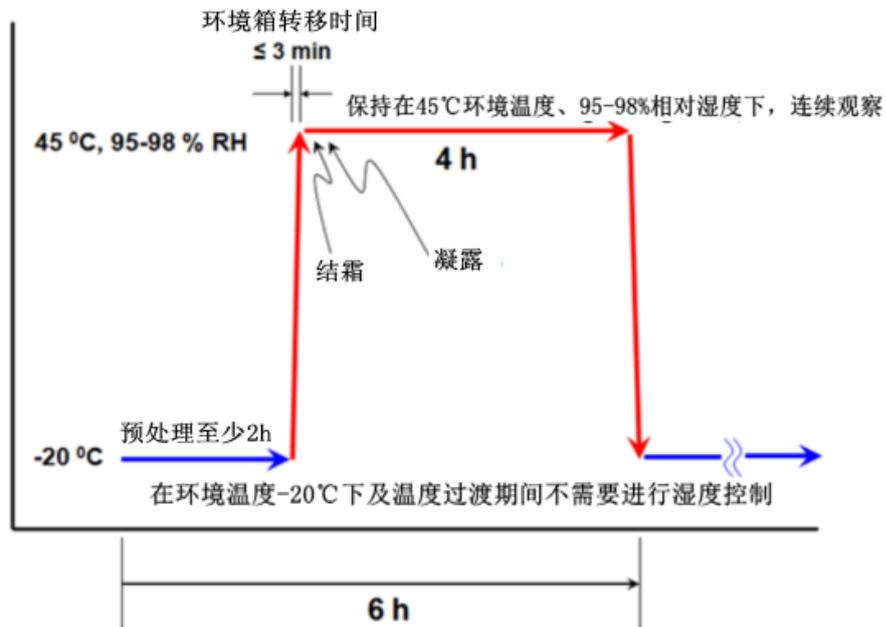


图 5 交变湿热循环示意图

#### 6.6.6 温度梯度

按照 GB/T 28046.4-2011 中 5.2 的规定进行。

#### 6.6.7 温度循环

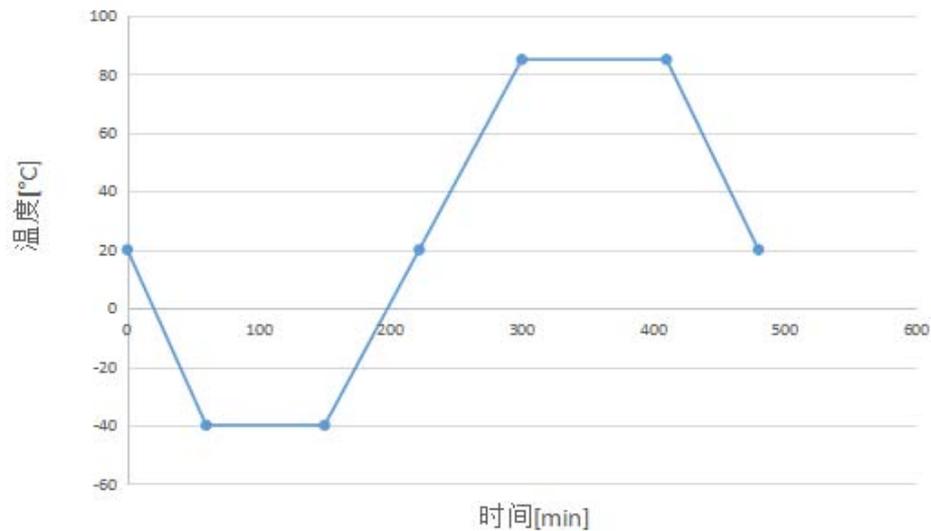


图 6 单个温度循环示意图

试验方法按 GB/T 2423.22-2012 中的规定，轮毂电机需按照如下步骤进行以下试验：

- a) 将电机放入人工环境室；
- b) 根据图 6 所示的周期循环人工环境室温度，试验参数见表 6；
- c) 冷却液温度应与环境室温度一致；
- d) 在整个循环周期内，在持续运行模式下运行电机；
- e) 重复循环 100 次后将电机取出温度室。

100 次循环后，按照 GB/T 2423.1-2008 的规定恢复常态后，将轮毂电机控制器母线工作电压设定为额定电压，轮毂电机工作于持续转矩、持续功率条件下，检查系统能否正常工作。

表 6 温度循环试验参数

时间/分钟	温度/°C
0	20
60	T <sub>AMBMIN</sub>
150	T <sub>AMBMIN</sub>
222	20
300	T <sub>AMBMAX</sub>
410	T <sub>AMBMAX</sub>
480	20
注：T <sub>AMBMIN</sub> 为最低环境温度，T <sub>AMBMAX</sub> 为最高环境温度。	

#### 6.6.8 交变盐雾

试验方法按 GB/T 2423.18-2012 的规定进行总时间 28 天的交变盐雾试验。

试验后检查轮毂电机系统所有和车身、制动器等接口的外露紧固件基材是否出现腐蚀现象，是否丧失可拆卸性及维护性能。将轮毂电机控制器母线工作电压设定为额定电压，轮毂电机工作于持续转矩、持续功率条件下，检查系统能否正常工作。

对于分离式轮毂电机系统，将其轮端部分与试验设备连接进行试验。

#### 6.6.9 耐沙尘

试验方法按照 GB/T 2423.37-2006 的规定。

试验参数：吹沙时间不小于 90 min，砂石颗粒尺寸为 150~850 μ。

对于分离式轮毂电机系统，将其轮端部分与试验设备连接进行试验。

#### 6.6.10 防尘、防水

试验方法按照 GB/T30038-2013 的规定进行。

#### 6.6.11 泥沙喷溅

试验方法按 JB/T 13353-2017 中 6.2 有关规定进行。对轮毂电机系统喷射泥沙，测试完毕轮毂电机系统应运转无异常、无异响。

将轮毂电机控制器直流母线工作电压设定为额定电压，检查轮毂电机系统是否能正常启动，工作于持续转矩、持续功率条件下，检查轮毂电机系统能否正常工作。

对于分离式轮毂电机系统，将其轮端部分与试验设备连接进行试验。

#### 6.6.12 结冰

试验步骤如下：

- a) 向轮毂电机系统表面以 2 L/min 的流量泼水 1min；

- b) 5 min 之内转移到环境箱内冷浸 24 h, 环境箱温度设置为最低环境温度;
- c) 检查其外表面及缝隙处是否结冰, 否则重复进行上面步骤;
- d) 将轮毂电机控制器直流母线工作电压设定为额定电压, 检查轮毂电机系统是否能正常启动, 工作于持续转矩、持续功率条件下, 检查轮毂电机系统能否正常工作。

以上步骤为一个试验循环, 共进行 5 个循环。对于分离式轮毂电机系统, 将其轮端部分与试验设备连接进行试验。

#### 6.6.13 冰水冲击

试验旨在模拟轮毂电机系统由冰水引起的热冲击, 检验是否会出现不同的温度膨胀系数导致的材料机械破裂或密封失效。试验有如下两种方法可选:

- a) 水飞溅

试验方法按 GB/T 28046.4-2011 中 5.4.2 的规定。

在最高环境温度下, 轮毂电机系统在典型牵引模式下运行并达到热稳定后, 在运行状态下向其任一方方向喷射水温 0 °C~4 °C、浓度为 5%、流量为 3 L/3 s~4 L/3 s 的 NaCl 冰水, 共 100 个冲击循环。

试验结束后, 将轮毂电机系统恢复至少 2 h 后, 将轮毂电机控制器母线工作电压设定为额定电压, 轮毂电机工作于持续转矩、持续功率条件下, 检查系统能否正常工作, 并检查轮毂电机系统是否出现裂纹、弯曲、褪色等外观改变, 轮毂电机系统内部是否有水侵入, 电机电磁部件是否被腐蚀。

对于分离式轮毂电机系统, 将其轮端部分与试验设备连接进行试验。

- b) 浸没

试验方法按 GB/T 28046.4-2011 中 5.4.3 的规定。

在最高环境温度下, 轮毂电机系统在典型牵引模式下运行并达到热稳定后, 完全浸没在 0 °C 的冰水中 5 min, 共 10 个循环。

试验结束后, 将轮毂电机系统恢复至少 2 h 后, 将轮毂电机控制器母线工作电压设定为额定电压, 轮毂电机工作于持续转矩、持续功率条件下, 检查系统能否正常工作, 并检查系统能否正常工作, 检查轮毂电机系统是否出现裂纹、弯曲、褪色等外观改变, 轮毂电机系统内部是否有水侵入, 电机电磁部件是否被腐蚀。

对于分离式轮毂电机系统, 将其轮端部分与试验设备连接进行试验。

#### 6.6.14 化学负荷

按 T/CSAE XXXX-20XX 中 5.7.14 的规定的化学品对轮毂电动轮轮端部分部件进行化学负荷试验, 试验按 GB/T 28046.5-2013 有关规定进行。

试验结束后, 检查轮毂电动轮外表面, 标志和标签是否清晰可辨认, 使轮毂电机系统恢复 1h~2h 后, 将轮毂电机控制器直流母线工作电压设定为额定电压, 轮毂电机工作于持续转矩、持续功率条件下, 检查系统能否正常工作。