

ICS 43.040

CCS T 35

# 团 体 标 准

T/CSAE 190.3—2021

---

## 汽车用轮毂电动轮总成 试验方法

Hub electric wheel assembly for automobile—Test method

2021-07-23 发布

2021-07-23 实施

---

中国汽车工程学会 发布

中国汽车工程学会标准（以下简称：CSAE 标准），是由中国汽车工程学会按照明确的程序、规则，遵循公开、透明、协商一致原则组织制定的，供市场自由选择、自愿采用的规范性技术文件。CSAE 标准旨在发挥市场自主制定标准优势，着眼企业竞争力提升，推动汽车产业创新技术的加速发展和广泛应用。

CSAE 标准版权归属中国汽车工程学会，除用于国家法律或事先得到中国汽车工程学会许可外，不得以任何形式复制该标准。

在本标准实施过程中，如发现需要修改或补充之处，欢迎将意见反馈至中国汽车工程学会，以便修订时参考。

中国汽车工程学会地址：

北京市大兴亦庄开发区荣华南路13号院（中航国际广场H5座）；

电话：010-50911954；邮编：100176；邮箱：[wwq@sae-china.org](mailto:wwq@sae-china.org)。



## 目 次

前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	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 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.....	14
附录 A（规范性） 检验项目和工作模式对应关系.....	20

## 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专利的责任。

本文件由电动汽车产业技术创新战略联盟提出。

本文件起草单位：杭州亚太依拉菲动力技术有限公司、浙江吉利新能源商用车有限公司、无锡威孚高科技集团股份有限公司、清华大学苏州汽车研究院、宁波易仑动力技术有限公司、江西精骏电控技术有限公司、华人运通技术有限公司、汕头市浩大轮胎测试装备有限公司、上海卓讯汽车科技有限公司、江苏迈吉易威电动科技有限公司、同济大学、浙江亚太智能网联汽车创新中心有限公司、北京长城华冠汽车科技股份有限公司、浙江万安科技股份有限公司、基准科技服务张家港有限公司、上海电驱动股份有限公司、江苏大学、哈电发电设备国家工程研究中心有限公司、上海理工大学。

本文件主要起草人：陈珍颖、张俨、杨建川、BlažŠtefe、运伟国、张海滨、丁皓、庄萍、徐东、王长江、于吉超、陈迅、张硕、施刚、孟德建、陆群、马志敏、徐强、朱江、应红亮、杨柏禄、韩靖超、周敏、陈辛波、石同军、俞碧君、董金聪、玉国成、贾旭、李勇、胡建峰、巩魁鑫、刘洋、赵礼辉、叶长春、王玉。

# 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总成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总成及其子系统,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,仅该日期对应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 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 环境试验 第2部分:试验方法 试验Ea和导则:冲击
- GB/T 2423.18 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 环境试验 第2部分:试验方法 试验N:温度变化
- GB/T 2423.37 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 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 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 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 电动汽车用驱动电机系统电磁兼容性要求和试验方法
- JB/T 13353—2017 滚动轴承汽车轮毂轴承单元试验及评定方法
- QC/T 316 汽车行车制动器疲劳强度台架试验方法
- QC/T 564 乘用车行车制动器性能要求及台架试验方法
- T/CSAE 190.1 汽车用轮毂电动轮总成 术语
- T/CSAE 190.2—2021 汽车用轮毂电动轮总成 技术条件

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 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 18488.1、 GB/T 19596及T/CSAE 190.1界定的术语和定义适用于本文件。

### 4 工作模式

表1列举了部分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，各试验对应工作模式关系见附录A。

表 1 工作模式

工作模式	被测件状态	参数范围
非连接模式	与轮毂电机控制器断开连接	无
连接模式	连接电源, 轮毂电机控制器直流母线电压设为额定电压, 但不启动	无
典型牵引模式	具有完全功能, 连接到轮毂电机控制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 %
典型制动模式	具有完全功能, 连接到轮毂电机控制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 %
连续运行模式	具有完全功能, 连接到轮毂电机控制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, 连接到轮毂电机控制器和电源, 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, 连接到轮毂电机控制器和电源, 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,所有试验应在下列环境条件下进行:

- a) 温度: 18 °C~28 °C;
- b) 相对湿度: 45%~75%;
- c) 气压: 86 kPa~106 kPa;
- d) 海拔: 不超过 1000 m,若超过 1000 m,按 GB/T 755 的规定进行。

### 5.2 试验仪器的选择

#### 5.2.1 仪器准确度

试验仪器或任何硬件数据采集设备的准确度应满足GB/T 18488.2—2015中4.2.1和4.2.2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应满足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应模拟实车状态。所有的数据,包括冷却装置的型号、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GB/T18488.2—2015中4.6的规定进行。

#### 5.2.6 静置处理

在每项试验开始前,受测件应在对应温度下静置不低于2 h。

## 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测试工具。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应使用满足测量精度要求且经过校准的量规(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

按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防渗漏处理,试验气体介质可以是空气、氮气或惰性气体。试验时环境温度分别设置为最高工作温度和最低工作温度,按GB/T 18488.2—2015中5.5.5的规定进行试验,通入气体使气压逐步增加到T/CSAE 190.2—2021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

在5.1规定的环境条件下,按GB/T 18488.2—2015中5.7的规定测量:

- 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。

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,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GB/T 18488.2—2015中5.7.5的规定进行。

### 6.1.8 耐电压

按GB/T 18488.2—2015中5.8的规定进行。

### 6.1.9 超速

按GB/T 18488.2—2015中5.9的规定进行。

### 6.1.10 冷却介质温度

按GB/T 18488.2—2015中6.3的规定进行。

## 6.2 温升试验

按GB/T18488.2—2015第6章的规定进行。

## 6.3 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GB/T 18488.2—2015中7.2.1~7.2.3的规定进行，选择测量转矩-转速点和参数，效率测量方法按本文件6.3.1.8中的规定进行。

温度条件(冷却剂、环境温度)应由和制造商商定。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进行，并使电机在稳定工作温度条件下运行。

试验时，通过调整冷却介质温度，使轮毂电机在30 min内的温度变化不超过1 K，并使轮毂电机系统工作于T/CSAE 190.2—2021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的规定进行试验，试验后，轮毂电机系统应能够长时间正常工作，试验过程中的温升不能超过GB/T 755—2019中8.10和制造商规定的限值。

#### 6.3.1.4 持续功率

按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± 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± 4 %。

### 6.3.1.6 峰值转矩

按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。试验前，按顺序执行以下步骤进行预处理：

- a) 在室温下放置电机至少 2 h；
- b) 在测试台上以典型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）。

完成预处理后，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 190.2—2021 中 5.4.1.5 规定的峰值转矩、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 GB/T 755—2019 中 8.10 和制造商规定的限值。

### 6.3.1.7 最高工作转速

按 GB/T 18488.2—2015 中 7.2.5.6 的规定进行。

### 6.3.1.8 高效工作区

按 GB/T 18488.2—2015 中 7.2.5.7 的规定进行。

### 6.3.1.9 效率测量

进行效率测量时，按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 °C 后，继续按同样的方法测量下一个工作点。冷却介质温度测定按 GB/T 18488.2—2015 中 6.3 的规定进行。

测量轮毂电机系统总效率的计算方法如下。

- a) 处于牵引工作状态：

$$\eta_+^{(sys)} = \frac{\omega_{meas}^{(+)} T_{meas}^{(+)}}{U_{DC} I_{DC}} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- $\eta_+^{(sys)}$  ——轮毂电机系统处于牵引工作状态下的系统总效率；
- $\omega_{meas}^{(+)}$  ——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)；
- $U_{DC}$  ——是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) 处于电制动工作状态：

$$\eta_{-}^{(sys)} = \frac{U_{DC} I_{DC}}{\omega_{mean}^{(-)} T_{mean}^{(-)}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

$\eta_{-}^{(sys)}$  ——轮毂电机系统处于电制动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) 处于牵引工作状态:

$$\eta_{+}^{(mot+mec)} = \frac{\omega_{meas}^{(+)} T_{meas}^{(+)}}{P_{AC}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$\eta_{+}^{(mot+mec)}$  ——轮毂电机处于牵引工作状态下的效率;

$P_{AC}$  ——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) 处于电制动工作状态:

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

式中:

$\eta_{-}^{(mot+mec)}$  ——轮毂电机处于电制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);

$T_{meas}^{(-)}$  ——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) 处于牵引工作状态:

$$\eta_{+}^{(inv)} = \frac{P_{AC}}{U_{DC} I_{DC}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:

- $\eta_+^{(inv)}$  —— 轮毂电机控制器处于牵引工作状态下的效率；
- $P_{AC}$  —— 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) 处于电制动工作状态：

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

式中：

- $\eta_-^{(inv)}$  —— 轮毂电机控制器处于电制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)。

### 6.3.1.10 最高效率

按GB/T 18488.2—2015中7.2.5.8的规定进行。

### 6.3.1.11 控制精度

按GB/T 18488.2—2015中7.3的规定进行。

### 6.3.1.12 堵转转矩

按GB/T 18488.2—2015中7.2.5.5的规定进行。

### 6.3.1.13 馈电特性

按GB/T 18488.2—2015中7.6的规定进行。

## 6.3.2 阶跃转矩响应

试验在电机惯性负载的测试装置上进行。

试验时按 $0.25 T_{max}$ ， $0.5 T_{max}$ ， $0.75 T_{max}$ 和 $T_{max}$ （其中 $T_{max}$ 为电机峰值扭矩）四个不同的目标转矩值 $T_N$ 设定轮毂电机控制器或上位机软件，轮毂电机系统输入由零到对应 $T_N$ 的阶跃信号，记录电机在执行转矩命令至达到目标转矩的稳定值过程中的电机输出转矩变化过程，过程中不允许对轮毂电机控制器或上位机软件做任何调整。轮毂电机系统从阶跃信号开始至输出转矩偏离其最终稳态值与初始稳态值之差不超过 $\pm 5\%$ 的瞬间止的持续时间间隔，为这一目标转矩值对应的阶跃变化的转矩建立时间。记录达到稳态后的实际输出转矩值，并计算。

注：实际转矩与目标转矩值的差值，或实际转矩值与目标转矩值的偏差占目标转矩值的百分数，即为这一目标转矩值对应的阶跃转矩控制精度。

对每一个目标转矩值均进行以上试验，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；选取阶跃变化的转矩建立时间中的最大值，作为轮毂电机系统的阶跃变化的转矩建立时间。

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。

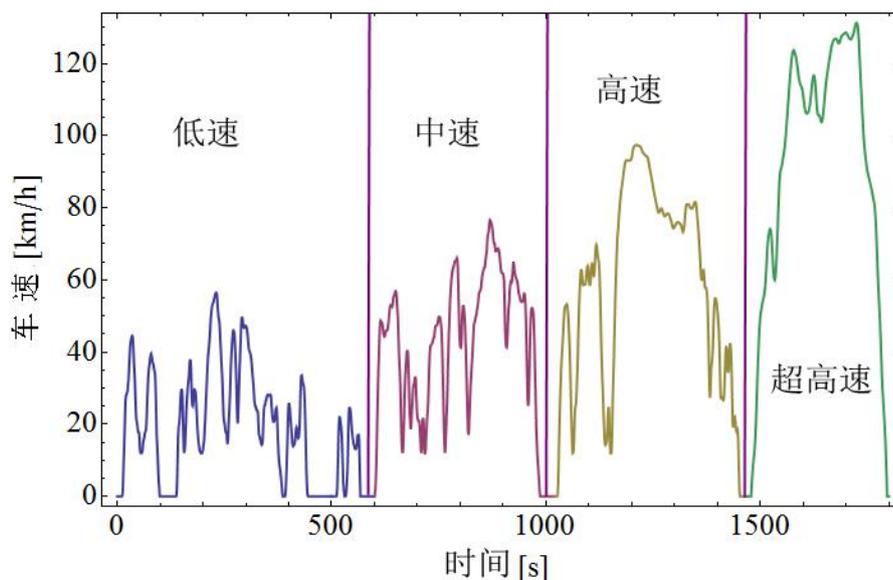


图1 WLTP 标准行驶循环

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转矩负载大小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，控制轮毂电机按循环工况速度剖面运行。试验时，实时记录轮毂电机系统的直流母线输电流和电压，并通过积分计算获得轮毂电机系统输入功。轮毂电机系统的循环效率应为牵引所需输出机械功（由用户与制造商协商确定）除以轮毂电机系统输入功。具体计算式如公式（8）：

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

式中：

$\eta^{(DC)}$  —— 轮毂电机系统的循环效率（%）；

$E_{required}$  —— 循环工况内牵引所需总的输出机械功，单位为焦耳(J)；

$E_{traction}$  —— 循环工况内轮毂电机系统用于牵引的总机械功的测量值，单位为焦耳(J)；

$E_{regenerated}$  —— 循环工况内轮毂电机系统进行能量回收的总电功的测量值，单位为焦耳(J)。

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

电机必须在试验前进行预处理，环境温度和冷却介质进口分别保持在5℃、25℃、65℃，至少2h。将参考转矩设置为最大转矩的80%，并在产品专用技术条件规定的最低转速下运行。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 ( $T_{peak-to-peak}$ )，用公式 (9) 计算峰间值转矩波动系数：

$$T_{ripp} = \frac{T_{peak-to-peak}}{T_{avg}} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

式中：

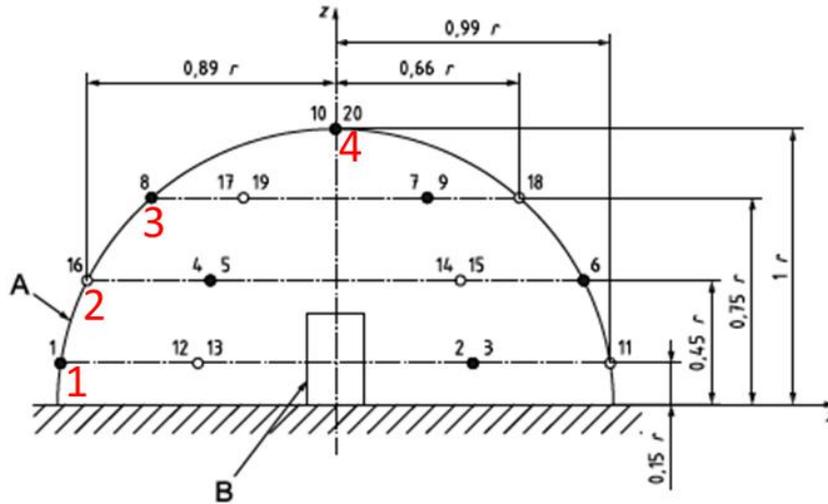
- $T_{ripp}$  —— 转矩波动系数 (%)；
- $T_{avg}$  —— 测量的转矩平均值，单位为牛米 (N·m)；
- $T_{peak-to-peak}$  —— 测量的转矩峰峰值，单位为牛米 (N·m)。

试验需要在不同环境温度和冷却液温度下进行后，取转矩波动系数的最大值作为测量结果，若不超过产品技术文件规定值则符合要求。

### 6.3.5 噪声

按GB/T 6882中半消声室测量的规定进行试验。

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。



注：图中A为半球面剖面线，B为被测件。

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 ( $L_{pa}$ ) 通过公式 (10) 计算获得，单位为dB (A)；

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

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( $L_{wa}$ ) 由公式（11）计算：

$$L_{wa} = L_{pa}(1m) + 10 \log_{10}(S) \dots\dots\dots (2)$$

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（ $m^2$ ）。

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），可通过公式（12）计算获得：

$$L_{pa} = L_{wa} - 10 \log_{10}(S_{pass}) \dots\dots\dots (3)$$

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，为 $84.5\pi$ ，单位为平方米（ $m^2$ ）。

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1 pa (1 m)、声功率级1 wa和6.5 m处的声压级1 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

按ISO 6469-3:2018中10.2的规定进行，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

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

按GB/T 18488.2—2015中8.3的规定进行。

### 6.4.6 电磁兼容试验

按GB/T 36282的规定进行。

## 6.5 机械负荷

### 6.5.1 碎石冲击

按ISO 20567-1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~5 mm
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，将轮端部分与车轮完全安装后，在非连接模式下进行试验。路沿碰撞试验按GB/T 15704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

将轮毂电动轮按照整车状态安装在试验台上，按QC/T 564的规定进行。

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

试验开始前，将轮毂电机模拟整车状态安装在振动试验台上。

按GB/T18488.2—2015中9.4.2的规定进行试验。

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

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。

对于集成式轮毂电机系统，按GB/T 28046.3—2011中4.1.2.5的规定进行，DUT每个轴向的试验持续8 h，持续时间共24 h。PSD与频率见图3和表3。

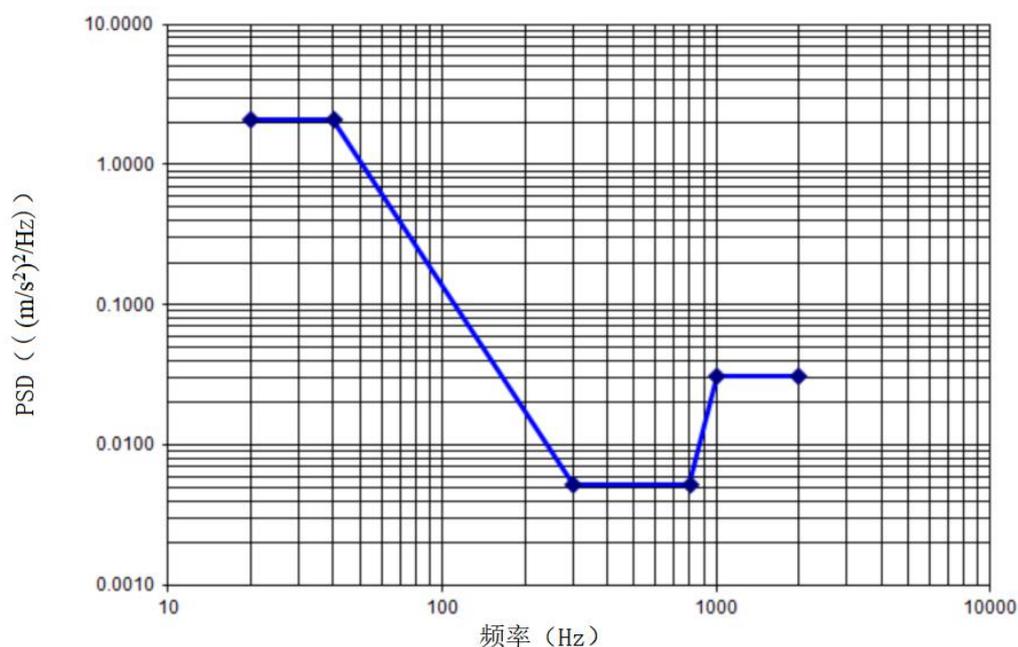


图3 PSD与频率(簧下)

表3 PSD与频率(簧下)

频率 Hz	PSD (m/s²)²/Hz
20	200
40	200
300	0.5
800	0.5
1000	3

2000	3
------	---

对于分离式轮毂电机系统，则应将轮毂电机控制器放置在试验振动台外或按GB/T 28046.3—2011中4.1.2.4的规定单独进行试验，持续时间为24 h（每轴8 h）。

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照实车状态安装到试验台上，按QC/T 316的规定进行。

试验结束后，检查轮毂电动轮壳体是否出现裂纹、弯曲和变色等外观问题的任何物理变形或故障。

#### 6.5.6 机械冲击

按GB/T 2423.5的规定进行。

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，在轮端部分与车轮完全安装后，进行试验。

试验时在被测样品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4。

表4 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裂纹、弯曲和变色等外观问题的任何物理变形或故障。

#### 6.5.7 包装跌落

按GB/T 28046.3—2011中4.3的规定进行。

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裂纹、弯曲和变色等外观问题的任何物理变形或故障。

### 6.6 环境负荷

#### 6.6.1 低温

### 6.6.1.1 低温储存

应将轮毂电机系统在室温下放入环境箱中，调节环境箱温度降至-40℃，并保持2h。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，应按6.1.7的规定测量轮毂电机及轮毂电机控制器的绝缘电阻。

绝缘电阻测试完成后，环境箱温度应升至室温，并恢复至少2h。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裂纹、弯曲和变色等外观问题的任何物理变形或故障。

### 6.6.1.2 低温工作

按GB/T 18488.2—2015中9.1的规定进行。

将轮毂电机系统放入在最低工作温度的环境箱中，保持4h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裂纹、弯曲和变色等外观问题的任何物理变形或故障。

试验后，箱内按6.1.7的规定复测绝缘电阻。

## 6.6.2 高温

### 6.6.2.1 高温储存

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48h后，按6.1.7的规定测量轮毂电机及轮毂电机控制器的绝缘电阻。

绝缘电阻测试完成后，温度箱温度应降至室温，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

将轮毂电机系统安装在环境箱中，环境箱温度设置为轮毂电机最高工作环境温度，轮毂电机系统冷却条件设置为最高冷却介质温度，对自然冷却轮毂电机应设置为电机转速对应车速下的相同风冷条件。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4h。

试验结束后，箱内复测绝缘电阻，按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QC/T 564的规定进行试验。试验后电机静止2h，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

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，交变湿热循环示意图见图4。

一个循环共计6 h，包含以下两个平衡：

- a) 低温冷浸：-20 °C，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 °C 和 95 % 相对湿度的高温环境平衡 4 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。

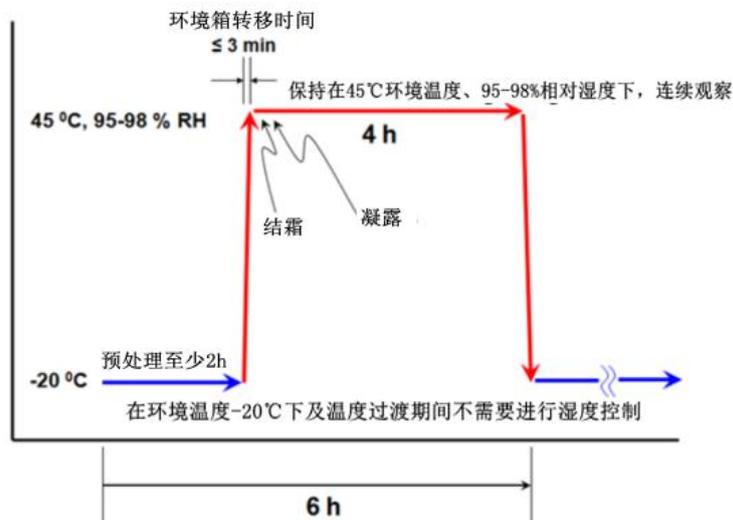


图 4 交变湿热循环示意图

### 6.6.6 温度梯度

按GB/T 28046.4—2011中5.2的规定进行。

### 6.6.7 温度循环

按GB/T 2423.22的规定，按如下步骤进行：

- a) 将电机放入人工环境室；
- b) 根据图 5 所示的周期循环人工环境室温度，试验参数见表 5；
- 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。

应在100次循环后，按GB/T 2423.1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 5 温度循环试验参数

时间/分钟	温度/°C
-------	-------

0	20
60	$T_{AMEMIN}$
150	$T_{AMEMIN}$
222	20
300	$T_{AMEMAX}$
410	$T_{AMEMAX}$
480	20
注： $T_{AMEMIN}$ 为最低环境温度， $T_{AMEMAX}$ 为最高环境温度。	

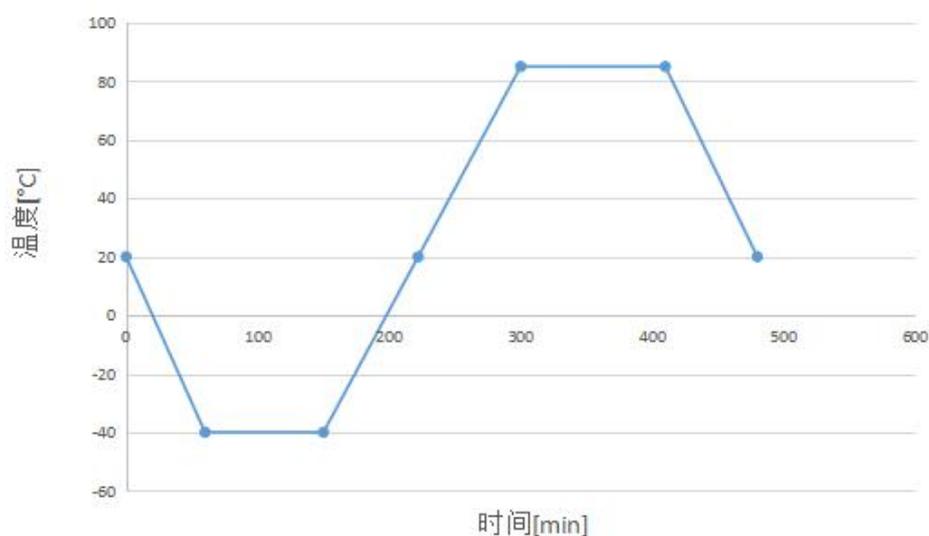


图5 单个温度循环示意图

### 6.6.8 交变盐雾试验

按GB/T 2423.18的规定进行总时间600 h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，将轮端部分与试验设备连接进行试验。

### 6.6.9 耐沙尘

按GB/T 2423.37的规定进行。

试验参数：吹沙时间不小于90 min，砂石颗粒尺寸为（150~850） $\mu$ 。

对于分离式轮毂电机系统，将轮端部分与试验设备连接进行试验。

### 6.6.10 防尘、防水

按GB/T30038—2013的规定进行。

### 6.6.11 泥沙喷溅

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1 min；
- 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，将轮端部分与试验设备连接进行试验。

#### 6.6.13 冰水冲击

冰水冲击试验具有水飞溅和浸没两种方法。

##### a) 水飞溅：

按GB/T 28046.4—2011中5.4.2的规定进行。

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向喷射水温0℃~4℃、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，将轮端部分与试验设备连接进行试验。

##### b) 浸没：

按GB/T 28046.4—2011中5.4.3的规定进行。

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℃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GB/T 28046.5的规定进行，化学品选用GB/T 28046.5—2013规定的代码为A或D类的试剂。

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。



## 附录 A

(规范性)

## 检验项目和工作模式对应关系

表A.1 规定了检验项目和工作模式的对应关系。

表 A.1 检验项目和工作模式对应关系

检验项目		试验方法	对应轮毂电机工作模式
一般性项目	外观	6.1.1	非连接模式
	外形和安装尺寸	6.1.2	非连接模式
	质量	6.1.3	非连接模式
	接口保护要求	6.1.4	非连接模式
	冷却回路密封性能	6.1.6	非连接模式
	绝缘电阻	6.1.7	非连接模式
	耐电压	6.1.8	非连接模式
	超速	6.1.9	-
温升		6.2	-
输入输出特性	工作电压范围	6.3.1.1	-
	转矩-转速特性及效率	6.3.1.2	-
	持续转矩	6.3.1.3	连续运行模式
	持续功率	6.3.1.4	连续运行模式
	峰值功率	6.3.1.5	典型牵引模式
	峰值扭矩	6.3.1.6	典型牵引模式
	最高工作转速	6.3.1.7	-
	高效工作区	6.3.1.8	-
	最高效率	6.3.1.10	-
	控制精度	6.3.1.11	-
	堵转转矩	6.3.1.12	-
	馈电特性	6.3.1.13	典型的制动模式
	阶跃转矩响应	6.3.2	-
	循环效率	6.3.3	循环运行模式
转矩脉动	6.3.4	-	
噪声		6.3.5	-
电气负荷要求	安全接地检查	6.4.1	非连接模式
	轮毂电机控制器的保护功能	6.4.2	-
	电气绝缘要求	6.4.3	-
	供电电压瞬态变化	6.4.4	-
	轮毂电机控制器支撑电容放电时间	6.4.5	-
	电磁兼容	6.4.6	-

表 A.1 检验项目和工作模式对应关系（续）

检验项目		试验方法	对应轮毂电机工作模式	
机械 负荷 要求	碎石冲击	6.5.1	非连接模式	
	路沿碰撞	6.5.2	非连接模式	
	轮毂电动轮壳体强度	6.5.3	非连接模式	
	耐振动	扫频振动	6.5.4.1	-
		随机振动	6.5.4.2	-
	制动耦合耐久	6.5.5	-	
	机械冲击	6.5.6	-	
包装跌落	6.5.7	非连接模式		
环境 负荷 要求	低温	低温储存	6.6.1.1	非连接模式
		低温工作	6.6.1.2	耐久模式
	高温	高温储存	6.6.2.1	非连接模式
		高温工作	6.6.2.2	耐久模式
	制动高温	6.6.3	-	
	恒定湿热	6.6.4	连续运行模式	
	交变湿热	6.6.5	循环运行模式	
	温度梯度	6.6.6	连续运行模式	
	温度循环	6.6.7	耐久	
	交变盐雾试验	6.6.8	-	
	耐沙尘	6.6.9	非连接模式，连续运行模式	
	防尘、防水	6.6.10	-	
	泥沙喷溅	6.6.11	-	
	结冰	6.6.12	连接模式，连续运行模式	
冰水冲击	6.6.13	典型牵引模式		
化学负荷	6.6.14	非连接模式，连续运行模式		
注：对未注明工作模式的试验，按其具体试验描述或参考标准执行。				