

团体标准

T/CSAE xx—20xx

乘用车线控转向手感模拟单元技术规范

Technical specification for steer-by-wire steering feel simulation unit in passenger vehicle

(报批稿)

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

20xx-xx-xx 发布

20xx-xx-xx 实施

中国汽车工程学会 发布

目 次

目 次	I
前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 技术要求	2
4.1 一般要求	2
4.2 冗余要求	2
4.3 降级要求	3
4.4 信号接口要求	3
4.5 性能要求	4
4.6 其他要求	6
5 试验条件及设备	6
5.1 试验条件	6
5.2 试验设备	6
6 试验方法	6
6.1 一般要求试验	6
6.2 系统冗余要求确认	7
6.3 降级试验	7
6.4 信号接口确认	8
6.5 手感模拟性能试验	8
6.6 主冗余系统切换时间试验	9
6.7 响应性能试验	9
6.8 调节特性试验	10
6.9 限位机构试验	12
6.10 方向盘折叠试验	13
附录 A （资料性） 手感模拟单元电子电气架构	14
附录 B （资料性） 手感模拟单元故障类型	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。

本文件由中国汽车工程学会标准化工作委员会归口。

本文件起草单位：长城汽车股份有限公司、中国第一汽车股份有限公司、吉利汽车研究院（宁波）有限公司、中国科学院电工研究所、清华大学、江苏智驭汽车科技有限公司、比亚迪股份有限公司、武汉瑞立科德斯汽车电子有限责任公司、中汽零部件技术（天津）有限公司、北京奥特尼克科技有限公司、中汽研（天津）汽车工程研究院有限公司、上海交通大学、浙江万安科技股份有限公司、上海同驭汽车科技有限公司、中国汽车工程研究院股份有限公司、北京理工大学、苏州坐标系智能科技有限公司。

本文件主要起草人：王东东、孙晖云、李飞、任增光、李菊飞、高尚、费二威、郑树东、宋怀文、顾頔、苟晋芳、王丽芳、吴艳、包汉伟、廖银生、刘国芳、陆晓磊、姜清伟、车佳黎、张俊智、何承坤、马瑞海、董晓、杨忠、李宏业、赵高明、苗坤洋、梁大强、程毅、刘伟、臧会尧、王帅、杨建森、韩忠良、李占旗、吴晓东、施国标、陈锋、朱奇章、季强、舒强、王存强、赵欣宇、唐俊、袁圆、张向国。

乘用车线控转向手感模拟单元技术规范

1 范围

本文件规定了乘用车线控转向手感模拟单元的技术要求，描述了相应的试验方法。
本文件适用于乘用车线控转向手感模拟单元。

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 17675—2021 汽车转向系 基本要求

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 2423.2 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验B：高温

GB/T 2423.3 环境试验 第2部分：试验方法 试验Cab：恒定湿热试验

GB/T 28046.1 道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第1部分：一般规定

QC/T 649 汽车转向操纵机构性能要求及试验方法

QC/T 1081 汽车电动助力转向装置

T/CSAE 407 汽车智能底盘术语和定义

3 术语和定义

T/CSAE 407 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

线控转向 steering by wire; SBW

使用电子线路和通信传输等线控技术，接收控制指令，实现车辆行驶方向的改变或保持的转向形式。

注：控制指令来自方向盘手感模拟器、自动驾驶控制器或整车其他相关控制器。

[来源：T/CSAE 407—2025，10.1]

3.2

手感模拟单元 steering feel simulation unit

依据方向盘转角和道路阻力等，为驾驶员提供方向盘手感反馈的装置。

3.3

转向执行器 road wheel actuator

接收控制指令驱动车轮转向的装置。

注：控制指令来自方向盘手感模拟器、自动驾驶控制器或整车其他相关控制器。

[来源：T/CSAE 407-2025, 10.3]

3.4

故障状态 **fault state**

底盘发生故障，且未启动故障应对机制的工作状态。

注：应对机制包括故障隔离、原有功能降级、冗余系统启动等。

[来源：T/CSAE 407-2025, 6.2]

3.5

主冗系统切换时间 **switchover time from the default system to the backup system**

默认系统失效时，从默认系统报出故障时刻到备份系统接管完成时刻的时间间隔。

[来源：T/CSAE 407-2025, 7.4]

4 技术要求

4.1 一般要求

4.1.1 工作温度

按6.1.1对手感模拟单元进行高低温工作温度测试，手感模拟单元应能在-40℃~85℃正常工作。

4.1.2 工作湿度

按6.1.2对手感模拟单元进行工作湿度测试，手感模拟单元应能在0~95% RH正常工作。

4.1.3 工作电压

按6.1.3对手感模拟单元进行工作电压测试，对于12V系统，手感模拟单元应能在9V~16V正常工作。对于48V系统，手感模拟单元应能在36V~52V正常工作。

4.1.4 基本性能

手感模拟单元的间隙、刚性要求、耐久性能应符合QC/T 649规定的要求；机械强度、环境耐久性能要求应符合QC/T 1081规定的要求。

4.1.5 静态电流

按6.1.5对手感模拟单元进行静态电流测试，手感模拟单元单路静态电流应不大于0.2 mA。

4.2 冗余要求

手感模拟单元电子电气部分应具备冗余结构，手感模拟单元冗余电子电气架构可参考附录A。针对冗余结构，应满足以下要求：

- a) 具备至少两套独立的电源输入接口；
- b) 具备至少两套独立的整车通讯及私有通讯接口；
- c) 具备至少两套独立的控制单元、执行单元及传感器。

4.3 降级要求

按6.3对手感模拟单元进行降级测试，手感模拟单元应根据软硬件故障位置及故障类型记录相应故障代码，并根据GB 17675—2021中4.4.2要求发出报警信号。手感模拟单元故障降级要求，应包含但不限于表1的规定，对手感模拟单元功能影响的典型故障类型可参考附录B。

表 1 手感模拟单元降级要求

序号	故障对手感模拟单元功能影响	故障响应
1	对功能实现无影响。	转向执行器控制指令正常计算及输出； 手感模拟力矩正常输出； 记录相关故障信息。
2	单路转向执行器控制指令输出异常。	剩余未故障的一路转向执行器控制指令正常计算及输出； 手感模拟力矩正常输出； 输出故障信息，用于整车点亮故障灯或文字提示。
3	全部转向执行器控制指令输出异常。	转向执行器根据整车通讯接收的转角自行计算目标位置； 手感模拟力矩正常输出； 输出故障信息，用于整车点亮故障灯或文字提示。
4	单路扭矩无法输出。	转向执行器控制指令正常计算及输出； 剩余未故障的一路手感模拟力矩正常输出，最大手力输出值不低于未故障时的 50%； 输出故障信息，用于整车点亮故障灯或文字提示。
5	单路扭矩及转向执行器控制指令均无法输出。	剩余未故障的一路转向执行器控制指令正常计算及输出； 剩余未故障的一路手感模拟力矩正常输出，最大手力输出值不低于未故障时的 50%； 输出故障信息，用于整车点亮故障灯或文字提示。
6	单路扭矩无法输出及全部转向执行器控制指令均无法输出。	转向执行器根据整车通讯接收的转角自行计算目标位置； 剩余未故障的一路手感模拟力矩正常输出，最大手力输出值不低于未故障时的 50%； 输出故障信息，用于整车点亮故障灯或文字提示。
7	全部扭矩无法输出。	转向执行器控制指令正常计算及输出； 手感模拟无力矩输出； 输出故障信息，用于整车点亮故障灯或文字提示。
8	全部扭矩无法输出及单路转向执行器控制指令无法输出。	剩余未故障的一路转向执行器控制指令正常计算及输出； 手感模拟无力矩输出； 输出故障信息，用于整车点亮故障灯或文字提示。
9	全部扭矩及转向执行器控制指令均无法输出。	转向执行器根据整车通讯接收的转角自行计算目标位置； 手感模拟无力矩输出；

4.4 信号接口要求

手感模拟单元应具备表 2 中规定的信号接口。

表 2 手感模拟单元信号接口

信号接口内容			备注
整车通讯	接收	车速信号	必选
		方向盘转角信号（线控转向系统外部传感器提供）	可选
		方向盘转速信号（线控转向系统外部传感器提供）	可选
		整车纵向加速度信号	可选
		整车横摆角速度信号	必选
		整车侧向加速度信号	必选
		方向盘折叠指令信号	可选
	外发	线控转向系统状态信息（故障状态、解耦状态等）	必选
		方向盘扭矩信号	必选
		方向盘转角信号（线控转向计算后外发）	必选
		方向盘转速信号（线控转向计算后外发）	必选
		方向盘折叠位置信号	可选
私有通讯	接收	齿条力	必选
		转向执行器位置（或转角）信号	必选
		齿条移动速度	必选
		转向执行器状态信息（标定状态、故障状态等）	必选
	外发	齿条目标位置	可选
		齿条目标移动速度	可选
		手感模拟单元状态信息（标定状态、故障状态等）	必选

4.5 性能要求

4.5.1 手感模拟性能

4.5.1.1 转动力矩

按6.5.1对手感模拟单元进行转动力矩测试，转动力矩应满足：

- 旋转启动力矩不大于2 N m；
- 转动力矩不大于1.5 N m；
- 力矩波动不大于0.3 N m。

4.5.1.2 转向力特性

按6.5.2对手感模拟单元进行转向力特性测试，转向力特性应满足：

- 方向盘扭矩和电机扭矩曲线光滑无突变；
- 方向盘在左右两个方向上，电机扭矩相同时，方向盘扭矩差值不大于0.3 N m。

4.5.1.3 软止点

手感模拟单元应具备软止点，按6.5.3对手感模拟单元进行软止点输出扭矩测试，软止点提供的方向盘扭矩应不小于20 N m。

4.5.2 主冗系统切换时间

按6.6对手感模拟单元进行主冗系统切换时间测试，切换时间应不小于20 ms。

4.5.3 响应性能

按6.7对手感模拟单元进行响应性能测试，响应性能应满足：

- a) 响应延迟时间不大于100 ms；
- b) 角度调整时间不大于150 ms；
- c) 超调量应满足表3要求；
- d) 稳态误差不大于 0.1° 。

注：角度调整时间，为系统首次达到目标角度至达到并保持在稳态值允许误差范围内的角度所需要的时间。

表 3 超调量要求

目标位置	超调量要求
目标位置为： $0^{\circ} \sim 66^{\circ}$	min (10%的目标转角， 2°)
目标位置为： $67^{\circ} \sim$ 最大转角范围	min (3%的目标转角， 3°)

4.5.4 调节特性

4.5.4.1 手动调节特性

配备手动调节的手感模拟单元，调节特性应满足QC/T 649要求。

4.5.4.2 电动调节特性

4.5.4.2.1 电动调节噪音

按6.8.2.1对手感模拟单元进行电动调节噪音测试，调节噪音应满足：

- a) 启动噪音不大于50 dB(A)；
- b) 调节噪音不大于45 dB(A)。

4.5.4.2.2 电动调节稳定性

按6.8.2.2对手感模拟单元进行电动调节稳定性测试，手感模拟单元电动调节过程中，跳动量应满足：

- a) 高度调节过程中跳动量小于0.5 mm；
- b) 换向过程中跳动量小于1.0 mm；

4.5.4.2.3 电动调节机构保持力

按6.8.2.3对手感模拟单元进行调节机构保持力测试，保持力应满足：

- a) 高度调节保持力不小于1200 N，
- b) 角度调节保持力不小于1200 N；
- c) 调节机构耐久试验后，任意位置保持力大于500 N。

4.5.4.2.4 电动调节速度

按6.8.2.4对手感模拟单元进行调节速度测试，调节速度应满足：

- a) 高度调节速度不小于7 mm/s；
- b) 角度调节速度不小于8 mm/s。

4.5.4.2.5 电动调节机构耐久

按6.8.2.5对手感模拟单元进行电动调节机构耐久测试,耐久试验过程中无异响发生,且不应出现热保护现象。耐久试验后,调节机构应满足:

- a) 高度调节及角度调节保持力大于500 N;
- b) 四向调节功能无异常、调节速度满足设计要求,启动噪音不大于55 dB(A);调节噪音不大于50 dB(A);
- c) 调整机构各零部件不应出现塑性变形、开裂等损坏现象。

4.5.5 限位结构要求

4.5.5.1 限位结构强度

按6.9.1对手感模拟单元进行限位机构强度试验,限位结构承受的破坏扭矩应不小于100 N·m。

4.5.5.2 限位结构耐久

按6.9.2对手感模拟单元进行限位结构耐久试验,耐久试验后,限位结构应满足:

- a) 手感模拟单元限位结构无损坏,限位结构强度满足4.5.5.1的要求;
- b) 手感模拟单元转动扭矩波动不大于0.3 N·m;
- c) 手感模拟单元无润滑脂泄露、破损变形、异常磨损、异响等。

4.6 其他要求

手感模拟单元支持方向盘折叠时,按6.10进行测试,应满足:

- a) 具备折叠位置反馈功能;
- b) 在方向盘处于折叠过程和折叠完成状态时,手感模拟单元不应启动。

5 试验条件及设备

5.1 试验条件

开展试验前,应满足:

- a) 除另有规定外,测试环境为常规室内环境,且未施加任何额外的环境应力。
- b) 试验前,需要提供包括但不限于必要的测试操作文件以及与测试设备相连所需的接口部件说明书,包括连接端子、线束定义、通信协议等,还需要提供包括但不限于手感模拟单元的工作说明和工作限制、安全使用说明等,以保证整个测试过程的安全与有效。

5.2 试验设备

试验设备应满足如下条件:

- a) 能够模拟并提供方向盘手感模拟控制器基本信号:上电信号、转向执行器信号;
- b) 能够采集方向盘手感模拟控制器的通讯总线数据;
- c) 提供的低压电源应在输出值 0 V~60 V 时,其稳压精度应不低于3%。

6 试验方法

6.1 一般要求试验

6.1.1 工作温度试验

对手感模拟单元分别在低温及高温下开展工作温度试验。

a) 低温工作试验

按以下步骤进行低温工作试验：

- 1) 将手感模拟单元放入高低温环境试验箱中；
- 2) 在-40℃温度下按GB/T 2423.1进行试验，持续24h，采用GB/T 28046.1定义的工作模式3.2；
- 3) 记录试验过程中手感模拟单元工作状态。

b) 高温工作试验

按以下步骤进行高温工作试验：

- 1) 将手感模拟单元放入高低温环境试验箱中；
- 2) 在85℃温度下按GB/T 2423.2进行试验，持续96h，采用GB/T 28046.1定义的工作模式3.2
- 3) 记录试验过程中手感模拟单元工作状态。

6.1.2 工作湿度试验

按以下步骤进行工作湿度试验：

- a) 将手感模拟单元放入湿度环境试验箱中；
- b) 按GB/T 2423.3进行试验，持续21天，采用GB/T 28046.1定义的工作模式2.1，在最后一小时采用GB/T 28046.1的工作模式3.2
- c) 记录试验过程中手感模拟单元工作状态。

6.1.3 工作电压试验

按以下步骤进行工作电压试验：

按4.1.3电压范围给手感模拟单元供电，并记录电压值及手感模拟单元工作状态。

6.1.4 基本性能试验

手感模拟单元的间隙、刚性要求、耐久性能试验按照QC/T 649中试验要求开展。机械强度、环境耐久性能试验按照QC/T 1081中试验要求开展。

6.1.5 静态电流试验

按以下步骤进行静态电流试验：

- a) 将手感模拟单元按实车状态安装在试验台架上，手感模拟单元总成处于中间位置；
- b) 样件处于休眠模式5 s后，记录10 s内ECU 供电电流，并计算平均电流值。

6.2 系统冗余要求确认

提供设计文档，包含但不限于手感模拟单元电子电气架构、冗余方案等，用于确认是否具备 4.2 要求的冗余结构。

6.3 降级试验

按以下步骤进行故障降级试验：

- a) 将手感模拟单元安装在试验台上，通电，确保手感模拟单元控制器能够正常收发报文，向手感模拟单元注入控制器相应故障，控制器应能够及时检测到该故障并按照该故障对应的故障类型及降级表现要求进入到相应的系统状态及发送相应信息，并在该故障恢复后，控制器应按故障恢复的处理措施进入到相应的系统状态及发送相应信息；
- b) 开始监测并记录控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值及报警信息；
- c) 向手感模拟单元注入相应故障，具体注入故障点可参照附录B典型故障点或依据设计方案执行；

- d) 注入故障后，监测手感模拟单元系统状态及发送的相应信息；
- e) 将步骤c) 注入的系统故障条件恢复，监测手感模拟单元系统状态及发送的相应信息；
- f) 完成步骤e) 后，将测试系统恢复到正常状态，结束测试；
- g) 确认注入及取消故障后是否进入相应的系统状态及发送信息是否满足设计要求。

6.4 信号接口确认

提供设计文档，包含但不限于手感模拟单元从公共CAN、私有CAN接收与外发信号，用于确认是否满足4.4信号接口要求。

6.5 手感模拟性能试验

6.5.1 转动力矩试验

6.5.1.1 试验步骤

按以下步骤进行转动力矩试验：

- a) 将手感模拟单元按实车状态安装在试验台架上，手感模拟单元总成处于中间位置且处于断电状态；
- b) 空载，以 $7.5 \text{ r/min} \pm 2.5 \text{ r/min}$ 的转速匀速转动输入端至左右机械极限位置，然后回转至 0° ；
- c) 测量并记录试验过程中转动力矩与转角的关系曲线。

6.5.1.2 数据处理

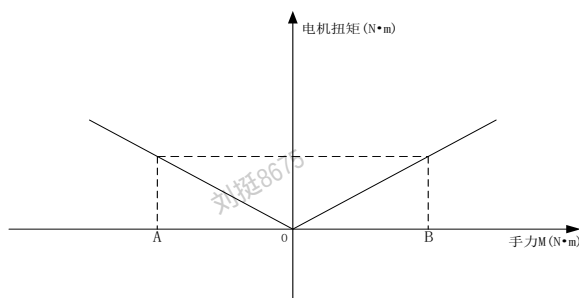
分析启动时刻的转动力矩、转动过程中转动力矩、转动过程中转动力矩相邻波峰、波谷力矩差值。

6.5.2 转向力特性试验

6.5.2.1 试验步骤

按以下步骤进行转动力特性试验：

- a) 将手感模拟单元按实车状态安装在试验台架上，通电；
- b) 设定不同车速（均分5点，包括0 km/h车速和最高车速，允许1%的误差）以 $5 \text{ r/min} \pm 0.5 \text{ r/min}$ 的转速向左右两个方向匀速转动输入轴；
- c) 按照设计需求，利用外部设备模拟转向执行器信号给手感模拟单元；
- d) 记录各个车速下方向盘手力和手感模拟单元电机输出扭矩曲线（如图1）。



标引序号说明：

A——向右转动对应的手力扭矩值； B——向左转动对应的手力扭矩值；

图1 转向力特性曲线

6.5.2.2 数据处理

以电机输出扭矩 $0.1\text{ N}\cdot\text{m}$ 为间隔，确认由 $0.1\text{ N}\cdot\text{m}$ 至电机最大输出扭矩下，分别对应的左右两个方向手力扭矩差值，扭矩差值 $= | |\text{扭矩值A}| - |\text{扭矩值B}| |$ 。

6.5.3 软止点试验

按以下步骤进行软止点试验：

- 将手感模拟单元按实车状态安装在试验台架上，通电；
- 按照设计需求，利用外部设备模拟转向执行器信号给手感模拟单元，车速信号设定为零；
- 分别在手感模拟单元左右两侧软止点限位位置，以不高于 $5\text{ N}\cdot\text{m/s}$ 的速率在输入端匀速施加转动动力矩，直至转过软止点位置，转动力矩卸载至零。
- 测量并记录试验过程中转动力矩与转角的关系曲线，记录转角超过软止点时的方向盘扭矩。

6.6 主冗系统切换时间试验

按以下步骤进行主冗系统切换时间试验：

- 将手感模拟单元按实车状态安装在试验台架上，通电；
- 按照设计需求，在主系统中注入一个使主冗系统发生切换的故障；
- 监测线控手感模拟单元的主冗系统的切换信号，切换时间数据读取方法如图2所示。

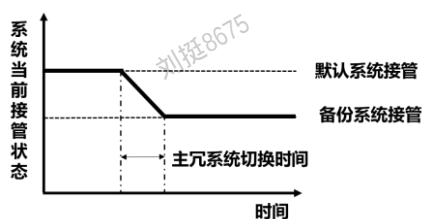
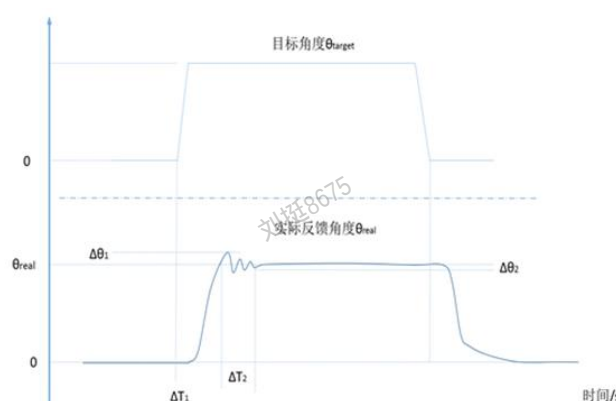


图2 主冗系统切换时间

6.7 响应性能试验

按以下步骤进行响应性能试验：

- 将手感模拟单元按实车状态安装在试验台架上，安装方向盘和气囊总成或等效惯量盘，将方向盘转动到中间位置通电；
- 分别发送左右两个方向的转角目标位置阶跃信号，测试手感模拟单元的响应性能；
- 采集4.5.3响应性能要求中各个性能指标数据，绘制试验过程中实际转角随时间关系曲线，如图3所示。



标引序号说明:

ΔT_1 ——响应延迟时间 (ms); ΔT_2 ——角度调整时间 (ms); $\Delta \theta_1$ ——最大超调量 ($^\circ$); $\Delta \theta_2$ ——稳态误差 ($^\circ$)

图3 响应性能物理特性曲线

6.8 调节特性试验

6.8.1 手动调节特性试验

手动调节特性试验按照QC/T 649中试验要求开展。

6.8.2 电动调节特性试验

6.8.2.1 电动调节噪音试验

按以下步骤进行电动调节噪音试验:

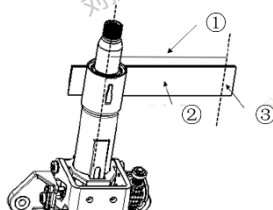
- 在环境噪声不超过35 dB (A) 的环境中, 将手感模拟单元按照实际装车状态固定;
- 手感模拟单元角度及高度调节均处于中间位置, 安装方向盘、组合开关、电子锁等附件, 通电;
- 在方向盘上方沿手感模拟单元轴线400 mm处放置传感器;
- 分别高度调节及角度调节一个循环, 测量并记录操作过程中的噪声值。

注: 从中间位置调节到高度上极限再调节到下极限回到中间位置为一个循环, 角度调节一个循环参考高度调节。

6.8.2.2 电动调节稳定性试验

按以下步骤进行电动调节稳定性试验:

- 手感模拟单元水平刚性固定, 组合开关处安装辅助工装以模拟组合开关长度, 在辅助工装模拟的组合开关长度处 (距手感模拟单元轴线约200 mm处) 对跳动量进行测量。
- 高度和角度调节在设计位置, 保持角度方向不动, 进行高度调节一个循环, 用百分表测量辅助工装末端平面跳动量, 安装及测试方式如图4所示;
- 辅助工装要求: 材质为金属材质, 宽度不小于3 cm, 厚度不小于3 mm。



标引序号说明:

①——组合开关长度; ②——辅助工装; ③——测量点

图4 电动调节稳定性测试示意图

6.8.2.3 电动调节机构保持力试验

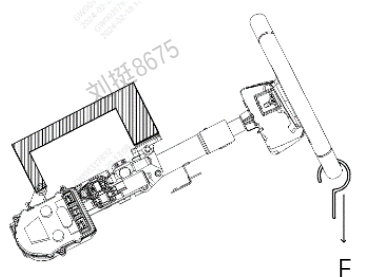
试验包含常温、低温、高温三种状态，其中低温、高温两种状态试验零件在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境中放置时间不低于2h，并在取出后在10min内做完测试。分别对手感模拟单元开展角度调节及高度调节保持力试验。

a) 角度调节保持力

按以下步骤进行角度调节保持力试验：

1) 按照水平方向或实车安装角度（允许误差 $\pm 2^{\circ}$ ）安装，对方向盘下方（垂直方向）施加1200 N载荷或直至保持机构破坏，记录力-位移曲线；

2) 手感模拟单元拉至最长位置，在角度上下极限位置测量保持力（下极限时向上调高5 mm进行测量），施加1200 N载荷或直至保持机构破坏，记录力-位移曲线，角度调节保持力测试方法如图5。



标引序号说明：

F——荷重

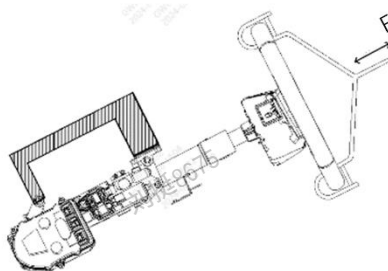
图5 角度调节保持力测试

b) 高度调节保持力

按以下步骤进行高度调节保持力试验：

1) 按照水平方向或实车安装角度（允许误差 $\pm 2^{\circ}$ ）安装，对手感模拟单元轴端平面（垂直方向）施加1200 N载荷或直至保持机构破坏，记录力-位移曲线；

2) 手感模拟单元抬至最上位置，在高度上下极限位置测量保持力（极限位置时向外调整5 mm进行测量），施加1200 N载荷或直至保持机构破坏，记录力-位移曲线，高度调节保持力测试方法如图6。



标引序号说明：

F——荷重

图6 高度调节保持力测试

6.8.2.4 电动调节速度试验

6.8.2.4.1 试验步骤

按以下步骤进行电动调节速度试验：

- 将手感模拟单元按照实际装车状态固定，安装方向盘和气囊总成或等效惯量盘，通电；
- 分别进行一个循环的高度及角度调节，记录手感模拟单元全行程高度调节及角度调节时间；

6.8.2.4.2 数据处理

根据高度调节时方向盘中心点移动的距离与时间，计算方向盘中心高度调节速度；根据角度调节时方向盘中心点移动的距离与时间，计算方向盘中心角度调节的速度。

6.8.2.5 电动调节调整机构耐久试验

按以下步骤进行电动调节机构耐久试验：

- 手感模拟单元按实车位置安装固定，紧固力矩为设计公差最下限，手感模拟单元输入端安装方向盘或等效质量块，进行40000次调节循环试验（所有端部位置应被覆盖，有电子限位功能的手感模拟单元，可以运行到电子停止位置，其中包含运行到机械限位次数不小于1000次）；
- 单个循环行程A-B-C-D-A，如图7所示，每个循环之间可以有5 s间隔；
- 调节机构耐久试验温度与耐久循环比例分配按表4要求进行。

注：循环过程中电机使用风冷或者水冷。

表 4 试验温度与耐久循环比例分配要求

温度	耐久循环比例分配
-40 ℃	15%
20 ℃	70%
85 ℃	15%

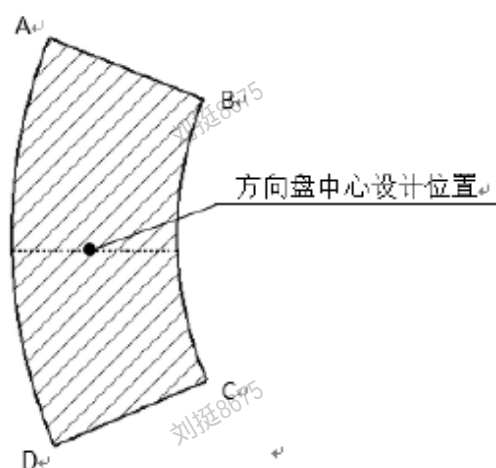


图 7 调节机构耐久试验周期图

6.9 限位机构试验

6.9.1 限位机构强度试验

按以下步骤进行限位机构强度试验：

- 将手感模拟单元按照实际装车状态固定；

b) 将手感模拟单元转至左（右）极限位置，从轴输入端施加扭矩至设计要求的扭矩，确认限位机构是否损坏；

6.9.2 限位结构耐久试验

按以下步骤进行限位机构耐久试验：

- a) 将手感模拟单元按照实际装车状态固定，安装方向盘或等效惯量盘；
- b) 设置手感模拟单元自行转动或由外部装置带动手感模拟单元转动，转速 $360^{\circ}/s$ ，分别撞击左右极限位置各3万次；
- c) 每次撞击至极限位置时，维持方向盘扭矩至 $8\text{ N}\cdot\text{m}$ 并保持 1 s ；
- d) 撞击完成后方向盘转角回至中位，间隔 5 s 后再进行下一次撞击；
- e) 耐久试验后开展转向力特性试验及限位机构强度试验，确认限位结构及手感模拟单元总成受损情况。

6.10 方向盘折叠试验

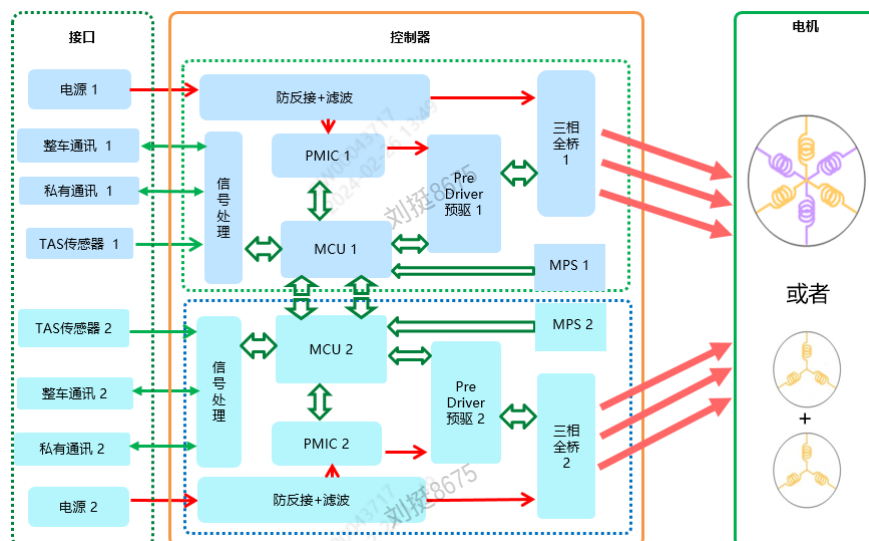
按以下步骤进行方向盘折叠试验：

- a) 将手感模拟单元按照实际装车状态固定，通电；
- b) 利用外部设备模拟方向盘折叠指令信号及转向执行器位置（或转角）信号给手感模拟单元，其中，转向执行器位置（或转角）信号按 0.2Hz 的频率模拟车轮转动到极限位置；
- c) 采集手感模拟单元外发信号，用于确认其中包含设计要求的方向盘折叠位置信号；同时采集手感模拟单元内部电机扭矩请求及电机实际扭矩输出信号，用于确认手感模拟单元是否启动。

附录 A (资料性)

手感模拟单元电子电气架构

手感模拟单元的传感器、控制器中电源接口、通讯接口、主芯片、驱动等部分均采用两路设计，同时可采用双绕组六相电机或两个三相电机，实现手感模拟单元的冗余要求，电子电气架构示意图如图 A.1 所示。



注：

MCU：主芯片（Microcontroller Unit）

MPS：电机转子位置传感器（Motor Position Sensor）

PMIC：电源管理芯片（Power Management IC）

TAS：扭矩转角传感器（Torque and Angle Sensor）

A.1 手感模拟单元电子电气架构示意图

附录 B
(资料性)
手感模拟单元故障类型

手感模拟单元的典型故障类型及对功能的影响可参考表B.1。

表 B.1 典型故障类型

序号	典型故障类型	故障对手感模拟单元功能影响
1	部分扭矩或部分转角传感器故障。	对功能实现无影响。
2	单路转向执行器控制指令计算程序运行异常； 单路转向执行器控制指令输出通讯故障。	单路转向执行器控制指令输出异常。
3	全部转向执行器控制指令计算程序运行异常； 全部转向执行器控制指令输出通讯故障。	全部转向执行器控制指令输出异常。
4	单路扭矩计算或电机控制程序运行异常； 单路电机故障； 单路驱动电路故障。	单路扭矩无法输出。
5	单路控制芯片故障； 单路电源故障； 单路电源管理故障。	单路扭矩及转向执行器控制指令均无法输出。
6	单路控制器芯片故障及全部控制指令输出通讯故障； 单路电机故障及全部控制指令输出通讯故障； 单路驱动电路故障及全部控制指令输出通讯故障等。	单路扭矩无法输出及全部转向执行器控制指令均无法输出。
7	全部扭矩计算程序或全部电机控制程序运行异常； 全部电机故障； 全部驱动电路故障。	全部扭矩无法输出。
8	全部扭矩计算程序或全部电机控制程序运行异常及 单路转向执行器控制计算程序运行异常； 全部扭矩计算程序或全部电机控制程序运行异常及 单路转向执行器控制指令输出通讯故障； 全部驱动电路故障及单路转向执行器控制计算程序运行异常。	全部扭矩无法输出及单路转向执行器控制指令无法输出。
9	全部控制芯片故障； 全部程序运行异常； 全部电源故障； 全部电源管理故障。	全部扭矩及转向执行器控制指令均无法输出。