

团 体 标 准

T/CSAE xx—2025

道路车辆线控转向系统方向盘手感模拟 控制器故障注入测试方法

Fault injection test method for steering wheel feel simulation controller in road vehicle
steer-by-wire system

(报批稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上

2025-xx-xx 发布

2025-xx-xx 实施

中国汽车工程学会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 缩略语 1

5 故障等级及故障响应模式 2

6 一般要求 2

 6.1 测试条件 2

 6.2 必要文件 2

 6.3 测试设备 2

7 测试方法与判定要求 2

 7.1 测试项目 2

 7.2 测试准备 3

 7.3 扭矩传感器故障 3

 7.4 转角传感器故障 5

 7.5 电机类故障 6

 7.6 通信类故障 12

 7.7 电源类故障 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：清华大学、中国第一汽车股份有限公司研发总院、吉利汽车研究院（宁波）有限公司、长城汽车股份有限公司、比亚迪汽车工业有限公司、上海同驭汽车科技有限公司、苏州汇川联合动力系统股份有限公司、中国汽车工程研究院股份有限公司、招商局检测车辆技术研究院有限公司、国汽（北京）智能网联汽车研究院有限公司、北京奥特尼克科技有限公司、武汉瑞立科德斯汽车电子有限责任公司、襄阳达安汽车检测中心有限公司、深圳市钛和巴伦技术股份有限公司、北京理工大学、工业和信息化部电子第五研究所。

本文件主要起草人：吴艳、王丽芳、苟晋芳、杨鑫、朱崇敬、邵荣、何承坤、张俊智、马瑞海、费二威、张吉、王月、杨文谦、贾具兵、王春全、范宏超、刘国芳、陆晓磊、赵高明、苗坤洋、蒋金方、王帅、彭冲、周洋、牛成勇、包汉伟、车佳黎、余颖弘、袁圆、於涛、赵伟、何云东、喻镇涛、褚秉华、邹柳、施国标、周晓峰、宋怀文、杨鹏飞、程毅、陈超英、骆健恒、舒强、王存强、赵欣宇。

道路车辆线控转向系统方向盘手感模拟控制器故障注入测试方法

1 范围

本文件规定了道路车辆线控转向系统方向盘手感模拟控制器故障注入测试的一般要求、测试方法及通过条件等。

本文件适用于乘用车和商用车。

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。

T/CSAE 407-2025 汽车智能底盘术语和定义

3 术语和定义

T/CSAE 407-2025 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

使用电子线路和通讯传输等线控技术，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。

[来源：T/CSAE 407-2025，10.1]

3.2

方向盘手感模拟控制器 steering wheel feel simulator controller

接收并依据驾驶员的转向操作输入和车辆实时状态信息，计算并输出手感模拟控制和转向执行器控制指令的控制器。

3.3

故障注入-移除时间间隔 fault injection-removal time interval

故障注入时间点与故障移除时间点之间的间隔。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

CAN：控制器局域网（Controller Area Network）

CAN FD：可变速率的CAN（CAN with Flexible Data Rate）

FTTI: 故障容错时间间隔 (Fault Tolerant Time Interval)

TAS: 扭矩转角传感器 (Torque and Angle Sensor)

5 故障响应等级及故障响应模式

本文件所定义的线控转向系统方向盘手感模拟控制器,按照故障响应模式不同,故障响应等级分为1-4级,不同故障响应模式等级对应的故障响应模式见表1。

表1 故障响应等级及对应的故障响应模式

故障响应等级	故障响应模式
1 级	手感模拟控制指令正常输出/降额输出/无输出,转向执行器控制指令无输出,发出报警信息
2 级	手感模拟控制指令无输出,至少有一路转向执行器控制指令正常输出,发出报警信息
3 级	输出降额手感模拟控制指令,至少有一路转向执行器控制指令正常输出,发出报警信息
4 级	手感模拟控制指令正常输出,至少有一路转向执行器控制指令正常输出,发出报警信息

6 一般要求

6.1 测试条件

测试环境为常规室内环境,且未施加任何额外的环境应力。

6.2 必要文件

应至少包含以下文件:

- 必要的测试操作文件以及与测试设备相连所需的接口说明书,包括连接端子、线束定义、通信协议、降级要求、FTTI、故障注入-移除时间间隔、系统恢复时间等;
- 线控转向系统方向盘手感模拟控制器的工作说明和工作限制、安全使用说明等。

6.3 测试设备

测试设备应满足如下条件:

- 能够模拟方向盘手感模拟控制器的基本采集信号:上电信号、TAS信号、电机转子位置信号、电机定子温度信号等,信号模拟精度应不低于被测件要求的传感器精度;
- 能够采集方向盘手感模拟控制器的输出:扭矩指令、转向执行器控制指令、电机相电压值、相电流值等;
- 能够模拟总线数据,总线仿真报文的周期误差不高于10%;
- 低压电源输出范围 0~60 V,其稳压精度应不低于 3%;
- 至少提供两路TAS传感器、总线通信、电机、电源模拟信号等。

7 测试方法与通过条件

7.1 测试项目

本文件中故障类型及对应的故障注入测试项如表2所示。

表2 故障类型及测试项目

序号	故障类型		测试项目
1	扭矩传感器故障		扭矩信号丢失故障注入
			扭矩传感器感应异常故障注入
2	转角传感器故障		转角信号丢失故障注入
			转角传感器感应异常故障注入
3	电机类故障	电机电流不平衡	三相电机电流不平衡故障注入
			双绕组六相电机电流不平衡故障注入
		电机过电流	三相电机过电流故障注入
			双绕组六相电机过电流故障注入
		电机温度保护	三相电机温度保护故障注入
			双绕组六相电机温度保护故障注入
		电机开路/短路	三相电机开路/短路故障注入
			双绕组六相电机开路/短路故障注入
		电机温度传感器信号丢失	三相电机温度传感器信号丢失故障注入
			双绕组六相电机温度传感器信号丢失故障注入
		电机位置传感器信号丢失	三相电机位置传感器信号丢失故障注入
			双绕组六相电机位置传感器信号丢失故障注入
电机轴卡滞	三相电机轴卡滞故障注入		
	双绕组六相电机轴卡滞故障注入		
4	通信类故障		整车/私有通信信号超数值范围故障注入
			整车/私有通信报文周期异常故障注入
			整车/私有通信报文节点丢失故障注入
			整车/私有通信计数位或校验位故障注入
			整车/私有通信链路与电源/地短路故障注入
5	电源类故障		电源过电压故障注入
			电源欠电压故障注入
			电源开路/短路故障注入

7.2 测试准备

按以下步骤进行测试准备：

- 正确安装和连接线控转向系统方向盘手感模拟控制器，确保其进入正常待机状态；
- 正确设置和校准方向盘手感模拟控制器，确保测试设备与方向盘手感模拟控制器能够进行信号交互。

7.3 扭矩传感器故障

7.3.1 扭矩传感器信号丢失故障

7.3.1.1 测试目的

验证当扭矩传感器由于开路、短路或传感器信号周期异常时，方向盘手感模拟控制器能否及时、准确地检测到故障并进入对应的故障响应模式；同时验证在故障恢复后，方向盘手感模拟控制器能否按照预定的处理策略进入相应的系统状态。

7.3.1.2 扭矩传感器信号丢失故障注入

按以下步骤进行测试。

a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值、报警信息及测试文件规定的相关参数。

b) 分别模拟以下扭矩信号丢失故障：

1) 设置某一路或者多路扭矩传感器开路/短路，或调整传感器信号周期超过预期值；

2) 设置全部的扭矩传感器开路/短路，或调整传感器信号的周期超过预期值。

c) 监测方向盘手感模拟控制器进入故障响应模式的过程。

d) 在测试文件规定的故障注入-移除时间间隔后移除故障，监测方向盘手感模拟控制器进入正常工作状态的过程。

e) 对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环才能恢复到正常工作状态的方向盘手感模拟控制器，应重新启动方向盘手感模拟控制器并监测其进入正常工作状态的过程。

f) 将方向盘手感模拟控制器恢复到正常状态，结束测试。

7.3.1.3 测试通过条件

a) 部分扭矩传感器信号丢失故障，方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内进入4级故障响应模式；

b) 全部扭矩信号丢失故障，方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入3级故障响应模式；

当移除故障后，方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态；对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的，重启后，方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.3.2 扭矩传感器感应异常故障

7.3.2.1 测试目的

验证当转向盘扭矩传感器信号值异常时，方向盘手感模拟控制器能否及时检测到该故障并进入对应的故障响应模式；同时验证在故障恢复后，方向盘手感模拟控制器能否按照预定的处理策略进入相应的系统状态。

7.3.2.2 扭矩传感器感应异常故障注入

按以下步骤进行测试。

a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值、报警信息及测试文件规定的相关参数。

b) 分别模拟以下扭矩传感器信号异常情况：

1) 设置一路或多路扭矩传感器信号值超出允许的最大值；

2) 设置一路或多路扭矩传感器信号值低于允许的最小值；

3) 设置部分扭矩传感器信号值始终为恒定不变；

4) 设置部分扭矩传感器信号输出值不同，最大差值大于规定的阈值；

5) 设置全部扭矩传感器信号值超出允许的最大值；

6) 设置全部扭矩传感器信号值低于允许的最小值；

7) 设置全部扭矩传感器信号输出值不同，最大差值大于规定的阈值；

c) 重复7.2.1.2中的步骤c)～f)。

7.3.2.3 测试通过条件

a) 部分扭矩传感器感应异常故障，方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内进入4级故障响应模式；

b) 全部扭矩传感器感应异常故障，方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入3级故障响应模式；

当移除故障后，方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态；对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的，重启后，方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.4 转角传感器故障

7.4.1 转角传感器信号丢失故障

7.4.1.1 测试目的

验证当转向盘转角传感器由于开路、短路或传感器信号周期异常时，方向盘手感模拟控制器能否及时检测到该故障并进入对应的故障响应模式；同时验证在故障恢复后，方向盘手感模拟控制器能否按照预定的处理策略进入相应的系统状态。

7.4.1.2 转角信号丢失故障注入

按以下步骤进行测试。

a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值、报警信息及测试文件规定的相关参数。

c) 分别模拟以下转角信号丢失故障：

- 1) 设置某一路或者多路转角传感器开路/短路，或调整传感器信号的频率超过预期值；
- 2) 设置全部的转角传感器开路或短路，或者调整传感器信号的周期比预期的频率大。

c) 重复7.2.1.2中的步骤c)～f)。

7.4.1.3 测试通过条件

a) 部分转角信号丢失故障，方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内进入4级故障响应模式；
b) 全部转角信号丢失故障，方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入3级故障响应模式；
当移除故障后，方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态；对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的，重启后，方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.4.2 转角传感器感应异常故障

7.4.2.1 测试目的

验证当转向盘转角传感器信号值异常时，方向盘手感模拟控制器能否及时检测到该故障并进入对应的故障响应模式；同时验证在故障恢复后，方向盘手感模拟控制器能否按照预定的处理策略进入相应的系统状态。

7.4.2.2 转角传感器感应异常故障注入

按以下步骤进行测试。

a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值、报警信息及测试文件规定的相关参数。

b) 分别模拟以下转角传感器信号异常情况：

- 1) 设置一路或多路转角传感器信号值超出允许的最大值；
- 2) 设置一路或多路转角传感器信号值低于允许的最小值；
- 3) 设置部分转角传感器信号值始终为恒定不变；
- 4) 设置部分转角传感器信号输出值不同，最大差值大于规定的阈值；
- 5) 设置全部转角传感器信号值超出允许的最大值；
- 6) 设置全部转角传感器信号值低于允许的最小值；
- 7) 设置全部转角传感器信号输出值不同，最大差值大于规定的阈值；

c) 重复7.2.1.2中的步骤c)~f)。

7.4.2.3 测试通过条件

- a) 部分转角传感器感应异常故障, 方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内进入4级故障响应模式;
- b) 全部转角传感器感应异常故障, 方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入3级故障响应模式;

当移除故障后, 方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态; 对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的, 重启后, 方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.5 电机类故障

7.5.1 电机电流不平衡故障

7.5.1.1 测试目的

验证当路感模拟电机由于电机匝间短路/断路、线圈间短路、相间短路或制造缺陷等, 导致出现电机电流不平衡时, 方向盘手感模拟控制器能否及时检测到该故障并进入对应的故障响应模式; 同时验证在故障恢复后, 方向盘手感模拟控制器能否按照预定的处理策略进入相应的系统状态。

7.5.1.2 三相电机电流不平衡故障注入

按以下步骤进行测试。

- a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值、报警信息及测试文件规定的相关参数。
- b) 在设定转速条件下的10%~90%最大输出电流范围内, 均匀取10个不同电流输出值作为目标值。
- c) 分别模拟以下电机电流不平衡故障:
 - 1) 调节某一路三相电机的某一相模拟负载参数, 使得该相电流输出值为所取的目标值;
 - 2) 同时调节两路三相电机的某一相模拟负载参数, 使得该相电流输出值为所取的目标值。
- d) 重复7.2.1.2中的步骤c)~f)。

7.5.1.3 测试通过条件

- a) 单电机故障, 方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内进入4级故障响应模式;
 - b) 双电机故障, 方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入2级故障响应模式;
- 当移除故障后, 方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态; 对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的, 重启后, 方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.5.1.4 双绕组六相电机电流不平衡故障注入

按以下步骤进行测试。

- a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值、报警信息及测试文件规定的相关参数。
- b) 在设定转速条件下的10%~90%最大输出电流范围内, 均匀取10个不同电流输出值作为目标值:
 - 1) 调节六相电机中某一三相绕组中的某一相模拟负载相参数, 分别使得该相电流输出值为所取的目标值;
 - 2) 同时调节六相电机中两个三相绕组中的某一相模拟负载相参数, 分别使得该相电流输出值为所取的目标值。
- c) 重复7.2.1.2中的步骤c)~f)。

7.5.1.5 测试通过条件

- a) 单绕组故障, 方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内进入4级故障响应模式;

b) 双绕组故障, 方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入2级故障响应模式;

当移除故障后, 方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态; 对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的, 重启后, 方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.5.2 电机过电流故障

7.5.2.1 测试目的

验证当电机由于控制异常等失效导致电机电流超限时, 方向盘手感模拟控制器能否及时检测到该故障并进入对应的故障响应模式; 同时验证在故障恢复后, 方向盘手感模拟控制器能否按照预定的处理策略进入相应的系统状态。

7.5.2.2 三相电机过电流故障注入

按以下步骤进行测试。

a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值、报警信息及测试文件规定的相关参数。

b) 分别模拟以下电机过电流故障:

1) 设定最大扭矩指令, 并按测试文件要求的设定负载曲线, 使某一路三相电机持续加速, 直到电机发生过电流;

2) 设定最大扭矩指令, 并按测试文件要求的设定负载曲线, 同时使两路三相电机持续加速, 直到电机发生过电流;

3) 通过标定工具改变电流环控制参数, 使某一路三相电机相电流超过过流检测阈值, 激发电机过电流保护功能;

4) 通过标定工具改变电流环控制参数, 同时使两路三相电机相电流超过过流检测阈值, 激发电机过电流保护功能。

c) 重复7.2.1.2中的步骤c) ~f)。

7.5.2.3 测试通过条件

a) 单电机故障, 方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内进入3级故障响应模式;

b) 双电机故障, 方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入2级故障响应模式;
当移除故障后, 方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态; 对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的, 重启后, 方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.5.2.4 双绕组六相电机过电流故障注入

按以下步骤进行测试。

a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值、报警信息及测试文件规定的相关参数。

b) 分别模拟以下电机过电流故障:

1) 设定最大扭矩指令, 并按测试文件要求的设定负载曲线, 使六相电机持续加速, 直到电机发生单绕组/双绕组过电流;

2) 通过标定工具改变电流环控制参数, 使六相电机单绕组/双绕组相电流超过过流检测阈值, 激发电机过电流保护功能。

c) 重复7.2.1.2中的步骤c) ~f)。

7.5.2.5 测试通过条件

a) 单绕组故障, 方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内进入3级故障响应模式;

b) 双绕组故障, 方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入2级故障响应模式;

当移除故障后，方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态；对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的，重启后，方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.5.3 电机温度保护故障

7.5.3.1 测试目的

验证当电机由于控制异常等失效导致电机过温时，方向盘手感模拟控制器能否及时检测到该故障并进入对应的故障响应模式；同时验证在故障恢复后，方向盘手感模拟控制器能否按照预定的处理策略进入相应的系统状态。

7.5.3.2 三相电机温度保护故障注入

按以下步骤进行测试。

a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值、报警信息及测试文件规定的相关参数。

b) 设定方向盘手感控制器控制指令，使方向盘手感控制器在额定转速和峰值转速分别达到最大电流输出。

c) 分别模拟以下电机温度保护故障：

1) 通过测试设备模拟某一路三相电机温度过高信号或使用调试工具修改电机温度保护阈值，激发电机温度保护功能；

2) 通过测试设备模拟两路三相电机温度过高信号或使用调试工具修改两路三相电机得温度保护阈值，激发电机温度保护功能。

d) 重复7.2.1.2中的步骤c)～f)。

7.5.3.3 测试通过条件

a) 单电机故障，方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入3级故障响应模式；

b) 双电机故障，方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入2级故障响应模式；

当移除故障后，方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态；对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的，重启后，方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.5.3.4 双绕组六相电机温度保护故障注入

按以下步骤进行测试。

a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值、报警信息及测试文件规定的相关参数。

b) 设定方向盘手感控制器控制指令，使方向盘手感控制器在额定转速和峰值转速分别达到最大电流输出。

c) 通过测试设备模拟六相电机温度过高信号或使用调试工具修改电机温度保护阈值，激发电机单绕组/双绕组温度保护功能。

d) 重复7.2.1.2中的步骤c)～f)。

7.5.3.5 测试通过条件

方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入3级故障响应模式。当移除故障后，方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态；对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的，重启后，方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.5.4 电机相线开路/短路故障

7.5.4.1 测试目的

验证当电机相线出现开路或短路时,方向盘手感模拟控制器能否及时检测到该故障并进入对应的故障响应模式;同时验证在故障恢复后,方向盘手感模拟控制器能否按照预定的处理策略进入相应的系统状态。

7.5.4.2 三相电机开路/短路故障注入

按以下步骤进行测试。

a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值、报警信息及测试文件规定的相关参数。

b) 在电机额定工况下,分别模拟以下三相电机开路/短路故障:

- 1) 设置某一路三相电机任意两相间短路;
- 2) 设置某一路三相电机三相同时短路;
- 3) 设置某一路三相电机任意一相与电机外壳短路;
- 4) 设置某一路三相电机任意一相开路;
- 5) 设置某一路三相电机发生开路/短路故障后,另一路三相电机任意两相间短路;
- 6) 设置某一路三相电机发生开路/短路故障后,另一路三相电机三相同时短路;
- 7) 设置某一路三相电机发生开路/短路故障后,另一路三相电机任意一相与电机外壳短路;
- 8) 设置某一路三相电机发生开路/短路故障后,另一路三相电机任意一相开路。

c) 重复7.2.1.2中的步骤c)~f)。

7.5.4.3 测试通过条件

a) 单电机故障,方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入3级故障响应模式;

b) 双电机故障,方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入2级故障响应模式;

当移除故障后,方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态;对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的,重启后,方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.5.4.4 双绕组六相电机开路/短路故障注入

按以下步骤进行测试。

a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值、报警信息及测试文件规定的相关参数。

b) 在电机额定工况下,分别模拟以下故障:

- 1) 设置某一绕组中任意两相间短路;
- 2) 设置某一绕组中三相同时短路;
- 3) 设置某一绕组中任意一相与电机外壳短路;
- 4) 设置某一绕组中任意一相开路;
- 5) 设置某一绕组发生开路/短路故障后,另一绕组中任意两相间短路;
- 6) 设置某一绕组发生开路/短路故障后,另一绕组中三相同时短路;
- 7) 设置某一绕组发生开路/短路故障后,另一绕组中任意一相与电机外壳短路;
- 8) 设置某一绕组发生开路/短路故障后,另一绕组中任意一相开路。

c) 重复7.2.1.2中的步骤c)~f)。

7.5.4.5 测试通过条件

a) 单绕组故障,方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入3级故障响应模式;

b) 双绕组故障,方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入2级故障响应模式。

当移除故障后，方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态；对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的，重启后，方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.5.5 电机温度传感器信号丢失故障

7.5.5.1 测试目的

验证当电机温度传感器出现故障后，方向盘手感模拟控制器能否及时检测到该故障并进入对应的故障响应模式；同时验证在故障恢复后，方向盘手感模拟控制器能否按照预定的处理策略进入相应的系统状态。

7.5.5.2 三相电机温度传感器信号丢失故障注入

按以下步骤进行测试。

a) 将模拟温度传感器设备接入到电机控制器温度传感器的信号线上，设置方向盘手感模拟控制器运行在峰值工况。

b) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值、报警信息及测试文件规定的相关参数。

c) 分别模拟以下电机温度传感器信号丢失故障：

- 1) 设置某一路三相电机的部分温度传感器开路或短路；
- 2) 同时设置两路三相电机的部分温度传感器开路或短路；
- 3) 设置两路三相电机的全部温度传感器开路或短路；

d) 重复7.2.1.2中的步骤c)～f)。

7.5.5.3 测试通过条件

a) 部分温度传感器丢失故障，方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入3级故障响应模式；

b) 全部温度传感器丢失故障，方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内进入2级故障响应模式；

当移除故障后，方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态；对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的，重启后，方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.5.5.4 双绕组六相电机温度传感器信号丢失故障注入

按以下步骤进行测试。

a) 将模拟温度传感器设备接入到电机控制器温度传感器的信号线上，设置方向盘手感模拟控制器运行在峰值工况。

b) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值、报警信息及测试文件规定的相关参数。

c) 分别模拟以下电机温度传感器信号丢失故障：

- 1) 设置六相电机的部分温度传感器设备开路/短路；
- 2) 设置六相电机的全部温度传感器设备开路/短路。

d) 重复7.2.1.2中的步骤c)～f)。

7.5.5.5 测试通过条件

a) 部分温度传感器丢失故障，方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内进入4级故障响应模式；

b) 全部温度传感器丢失故障，方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入2级故障响应模式；

当移除故障后，方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态；对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的，重启后，方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.5.6 电机位置信号丢失故障

7.5.6.1 测试目的

验证当电机位置传感器接线松动或发生短路时,方向盘手感模拟控制器能否及时检测到该故障并进入对应的故障响应模式;同时验证在故障恢复后,方向盘手感模拟控制器能否按照预定的处理策略进入相应的系统状态。

7.5.6.2 三相电机位置传感器信号丢失故障注入

按以下步骤进行测试。

- a) 设定方向盘手感模拟控制器控制指令,使电机在最高工作转速、额定转速。
- b) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值、报警信息及测试文件规定的相关参数。
- c) 分别模拟以下电机位置传感器信号丢失故障:
 - 1) 设置某一路三相电机的部分位置传感器开路或短路;
 - 2) 分别设置两路三相电机的部分位置传感器开路或短路;
 - 3) 同时设置两路三相电机的全部电机位置传感器开路或短路故障。
- d) 重复7.2.1.2中的步骤c)~f)。

7.5.6.3 测试通过条件

- a) 部分位置传感器信号丢失故障,方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内进入4级故障响应模式;
 - b) 全部位置传感器信号丢失故障,方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内进入2级故障响应模式;
- 当移除故障后,方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态;对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的,重启后,方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.5.6.4 双绕组六相电机位置传感器信号丢失故障注入

按以下步骤进行测试。

- a) 设定方向盘手感模拟控制器控制指令,使电机在最高工作转速、额定转速。
- b) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值、报警信息及测试文件规定的相关参数。
- c) 分别模拟以下电机位置传感器信号丢失故障:
 - 1) 设置六相电机的部分电机位置传感器开路或短路故障;
 - 2) 设置六相电机的全部电机位置传感器开路或短路故障。
- d) 重复7.2.1.2中的步骤c)~f)。

7.5.6.5 测试通过条件

- a) 部分位置传感器信号丢失故障,方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内进入4级故障响应模式;
 - b) 全部位置传感器信号丢失故障,方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内进入2级故障响应模式;
- 当移除故障后,方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态;对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的,重启后,方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.5.7 电机轴卡滞故障

7.5.7.1 测试目的

验证电机轴在运行过程中突然发生卡滞时,方向盘手感模拟控制器能否及时检测到该故障并进入对应的故障响应模式;同时验证在故障恢复后,方向盘手感模拟控制器能否按照预定的处理策略进入相应的系统状态。

推荐使用电机模拟装置代替电机，方向盘手感模拟控制器与电机模拟装置匹配运行，方向盘手感模拟控制器工作在扭矩模式、额定转速、最大输出扭矩。

7.5.7.2 三相电机轴卡滞故障注入

按以下步骤进行测试。

a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值、报警信息及测试文件规定的相关参数。

b) 分别模拟以下电机卡滞故障：

- 1) 设定某一路三相电机模拟装置输出转速为零，保证转速转换时间 ≤ 10 ms；
- 2) 同时设定两路三相电机模拟装置输出转速为零，保证转速转换时间 ≤ 10 ms。

c) 重复7.2.1.2中的步骤c)～f)。

7.5.7.3 测试通过条件

a) 单电机故障，方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入3级故障响应模式；

b) 双电机故障，方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入2级故障响应模式；

当移除故障后，方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态；对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的，重启后，方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.5.7.4 双绕组六相电机轴卡滞故障注入

按以下步骤进行测试。

a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值、报警信息及测试文件规定的相关参数。

b) 设定六相电机模拟装置输出转速为零，保证转速转换时间 ≤ 10 ms。

c) 重复7.2.1.2中的步骤c)～f)。

7.5.7.5 测试通过条件

方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入2级故障响应模式。当移除故障后，方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态；对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的，重启后，方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.6 通信类故障

7.6.1 通信信号超数值范围故障

7.6.1.1 测试目的

验证当方向盘手感模拟控制器接收的通信信号数值超过预定义范围时，方向盘手感模拟控制器能否及时检测到该故障并进入对应的故障响应模式；同时验证在故障恢复后，方向盘手感模拟控制器能否按照预定的处理策略进入相应的系统状态。

7.6.1.2 整车/私有通信信号超数值范围故障注入

按以下步骤进行测试。

a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值、报警信息及测试文件规定的相关参数。

b) 分别模拟以下通信信号超数值范围故障：

- 1) 向方向盘手感模拟控制器某一路整车/私有通信链路中发送被测信号超限值的通信报文；
- 2) 向方向盘手感模拟控制器两路整车通信链路中发送被测信号超限值的通信报文；
- 3) 向方向盘手感模拟控制器两路私有通信链路中发送被测信号超限值的通信报文。

c) 重复7.2.1.2中的步骤c)～f)。

7.6.1.3 测试通过条件

a) 单路整车/私有通信信号超数值范围故障, 方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内进入4级故障响应模式;

b) 双路整车通信信号超数值范围故障, 方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入3级故障响应模式;

c) 双路私有通信信号超数值范围故障, 方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入1级故障响应模式。

当移除故障后, 方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态; 对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的, 重启后, 方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.6.2 通信报文周期异常故障

7.6.2.1 测试目的

验证当方向盘手感模拟控制器在规定时间内未能接收到指定的通信报文时, 方向盘手感模拟控制器能否及时检测到该故障并进入对应的故障响应模式; 同时验证在故障恢复后, 方向盘手感模拟控制器能否按照预定的处理策略进入相应的系统状态。

7.6.2.2 整车/私有通信报文周期异常故障注入

按以下步骤进行测试。

a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值、报警信息及测试文件规定的相关参数。

b) 分别模拟以下通信信号超数值范围故障:

1) 向方向盘手感模拟控制器某一路整车/私有通信链路中发送通信协议规定的报文;

2) 向方向盘手感模拟控制器两路整车通信链路中发送通信协议规定的报文;

3) 向方向盘手感模拟控制器两路私有通信链路中发送通信协议规定的报文;

c) 在报文发送一段时间后, 设置与方向盘手感模拟控制器进行交互的总线节点或者报文信号以非正常发送周期进行通信。

d) 重复7.2.1.2中的步骤c) ~f)。

7.6.2.3 测试通过条件

a) 单路整车/私有通信报文周期异常故障, 方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内进入4级故障响应模式;

b) 双路整车通信报文周期异常故障, 方向盘手感模拟控制器应在规定的FTTI内至少进入3级故障响应模式;

c) 双路私有通信报文周期异常故障, 方向盘手感模拟控制器在规定的FTTI内至少进入1级故障响应模式;

当移除故障后, 方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态; 对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的, 重启后, 方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.6.3 通信报文节点丢失故障

7.6.3.1 测试目的

验证当与方向盘手感模拟通信的网络节点丢失时, 方向盘手感模拟控制器能否及时检测到该故障并进入对应的故障响应模式; 同时验证在故障恢复后, 方向盘手感模拟控制器能否按照预定的处理策略进入相应的系统状态。

7.6.3.2 整车/私有通信报文节点丢失故障注入

按以下步骤进行测试。

a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值及报警信息或测试文件规定的相关参数。

b) 分别模拟以下通信报文节点丢失故障：

- 1) 向某一整车/私有通信链路中注入干扰信号模拟信号丢失故障；
- 2) 向两路整车通信链路中注入干扰信号模拟信号丢失故障；
- 3) 向两路私有通信链路中注入干扰信号模拟信号丢失故障。

c) 重复7.2.1.2中的步骤c)～f)。

7.6.3.3 测试通过条件

a) 单路整车/私有通信报文节点丢失故障，方向盘手感模拟控制器在规定的FTTI内进入4级故障响应模式；

b) 双路整车通信报文节点丢失故障，方向盘手感模拟控制器在规定的FTTI内至少进入3级故障响应模式；

c) 双路私有通信报文节点丢失故障，方向盘手感模拟控制器在规定的FTTI内至少进入1级故障响应模式；

当移除故障后，方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态；对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的，重启后，方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.6.4 通信计数位或校验位故障

7.6.4.1 测试目的

验证当方向盘手感模拟控制器收到的CAN/CAN FD信号在计数位或校验位发生错误时，方向盘手感模拟控制器能否及时检测到该故障并进入对应的故障响应模式；同时验证在故障恢复后，方向盘手感模拟控制器能否按照预定的处理策略进入相应的系统状态。

7.6.4.2 整车/私有通信计数位或校验位故障注入

按以下步骤进行测试。

a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值及报警信息或测试文件规定的相关参数。

b) 分别模拟以下通信计数位或校验位故障：

- 1) 向方向盘手感模拟控制器某一整车/私有通信链路中发送冻结的rolling counter或者错误checksum的通信报文；
- 2) 向方向盘手感模拟控制器两路整车通信链路中发送冻结的rolling counter或者错误checksum的通信报文；
- 3) 向方向盘手感模拟控制器两路私有通信链路中发送冻结的rolling counter或者错误checksum的通信报文。

c) 重复7.2.1.2中的步骤c)～步骤f)。

7.6.4.3 测试通过条件

a) 单路整车/私有通信计数位或校验位故障，方向盘手感模拟控制器在规定的FTTI内进入4级故障响应模式；

b) 双路整车通信计数位或校验位故障，方向盘手感模拟控制器在规定的FTTI内至少进入3级故障响应模式；

c) 双路私有通信计数位或校验位故障, 方向盘手感模拟控制器在规定的FTTI内至少进入1级故障响应模式;

当移除故障后, 方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态; 对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的, 重启后, 方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.6.5 通信链路与电源/地短路故障

7.6.5.1 测试目的

验证当方向盘手感模拟控制器采用 CAN/CAN FD 等总线通信时, 方向盘手感模拟控制器能否及时检测到该故障并进入对应的故障响应模式; 同时验证在故障恢复后, 方向盘手感模拟控制器能否按照预定的处理策略进入相应的系统状态。

7.6.5.2 整车/私有通信链路与电源/地短路故障注入

按以下步骤进行测试。

a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值及报警信息或测试文件规定的相关参数。

b) 分别模拟以下通信链路故障:

- 1) 设置方向盘手感模拟控制器的某一路整车/私有通信链路与地线短路;
- 2) 设置方向盘手感模拟控制器的某一路整车/私有通信链路与电源线短路;
- 3) 设置方向盘手感模拟控制器的某一路整车/私有通信链路内部短路;
- 4) 设置方向盘手感模拟控制器的两路整车通信链路与地线短路;
- 5) 设置方向盘手感模拟控制器的两路整车通信链路与电源短路;
- 6) 设置方向盘手感模拟控制器的两路整车通信链路内部短路;
- 7) 设置方向盘手感模拟控制器两路私有通信链路与地线短路;
- 8) 设置方向盘手感模拟控制器两路私有通信链路与电源短路;
- 9) 设置方向盘手感模拟控制器两路私有通信链路内部短路。

c) 重复7.2.1.2中的步骤c) ~f)。

7.6.5.3 测试通过条件

a) 单路整车/私有通信链路与电源/地短路故障, 方向盘手感模拟控制器在规定的FTTI内进入4级故障响应模式;

b) 双路整车通信链路与电源/地短路故障, 方向盘手感模拟控制器在规定的FTTI内至少进入3级故障响应模式;

c) 双路私有通信链路与电源/地短路故障, 方向盘手感模拟控制器在规定的FTTI内至少进入1级故障响应模式;

当移除故障后, 方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态; 对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的, 重启后, 方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.7 电源类故障

7.7.1 电源过电压故障

7.7.1.1 测试目的

验证当出现器件失效或 DC/DC 功能失效导致电源过电压时, 方向盘手感模拟控制器能否及时检测到该故障并进入对应的故障响应模式; 同时验证在故障恢复后, 方向盘手感模拟控制器能否按照预定的处

理策略进入相应的系统状态。

7.7.1.2 电源过电压故障注入

按以下步骤进行测试：

a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值及报警信息或测试文件规定的相关参数。

b) 分别模拟以下电源过电压故障：

1) 设定某一路电源输出值，提高电压输出值，达到过电压限值；

2) 设定两路电源输出值，提高电压输出值，达到过电压限值；

c) 重复7.2.1.2中的步骤c)～f)。

7.7.1.3 测试通过条件

a) 单路电源过电压故障，方向盘手感模拟控制器在规定的FTTI内至少进入3级故障响应模式；

b) 双路电源过电压故障，方向盘手感模拟控制器在规定的FTTI内至少进入2级故障响应模式；

当移除故障后，方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态；对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的，重启后，方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.7.2 电源欠电压故障

7.7.2.1 测试目的

验证当出现器件失效或DC/DC功能失效导致电源欠电压时，方向盘手感模拟控制器能否及时检测到该故障并进入对应的故障响应模式；同时验证在故障恢复后，方向盘手感模拟控制器能否按照预定的处理策略进入相应的系统状态。

7.7.2.2 电源欠电压故障注入

按以下步骤进行测试：

a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值及报警信息或测试文件规定的相关参数。

b) 分别模拟以下电源过电压故障：

1) 逐渐降低某一路电源电压，将电压降低到允许的最低值；

2) 逐渐降低两路电源电压，将电压降低到允许的最低值；

c) 重复7.2.1.2中的步骤c)～f)。

7.7.2.3 测试通过条件

a) 单路电源欠电压故障，方向盘手感模拟控制器在规定的FTTI内至少进入3级故障响应模式；

b) 双路电源欠电压故障，方向盘手感模拟控制器在规定的FTTI内至少进入2级故障响应模式；

当移除故障后，方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态；对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的，重启后，方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。

7.7.3 电源开路/短路故障

7.7.3.1 测试目的

验证当出现电源线开路的情况下，方向盘手感模拟控制器能否及时检测到该故障并进入对应的故障响应模式；同时验证在故障恢复后，方向盘手感模拟控制器能否按照预定的处理策略进入相应的系统状态。

7.7.3.2 电路电源开路/短路故障注入

按以下步骤进行测试。

a) 监测并记录方向盘手感模拟控制器的扭矩指令、转向执行器控制指令、输出电机电流值及报警信息或测试文件规定的相关参数。

b) 分别模拟以下电源开路/短路故障：

1) 断开方向盘手感模拟控制器的某一路电源线；

2) 设置方向盘手感模拟控制器的某一路电源线正极与地短路；

3) 设置方向盘手感模拟控制器的两路电源开路或短路；

c) 重复7.2.1.2中的步骤c)～f)。

7.7.3.3 测试通过条件

a) 单路电路电源开路/短路故障，方向盘手感模拟控制器在规定的FTTI内至少进入3级故障响应模式；

b) 双路电路电源开路/短路故障，方向盘手感模拟控制器在规定的FTTI内至少进入1级故障响应模式；

当移除故障后，方向盘手感模拟控制器能够恢复到正常工作状态；对于测试文件中要求需要进入下一个驾驶循环控制器才能恢复到正常工作状态的，重启后，方向盘手感模拟控制器能够进入正常工作状态。