

团 体 标 准

T/CSAE 284.3—2022

自动驾驶乘用车 线控底盘性能要求及试验方法 第3部分：转向系统

Automated driving passenger vehicle—Performance requirements and test methods
for chassis-by-wire—Part 3: steering system

2022 - 12 - 30 发布

2022 - 12 - 30 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 一般要求 1

 4.1 系统架构 1

 4.2 功能要求 2

 4.3 接口要求 2

5 性能要求 4

 5.1 基础性能 4

 5.2 切换性能 6

6 试验方法 6

 6.1 试验准备 6

 6.2 试验内容 7

 6.3 试验数据处理 9

附录 A（资料性） 数据记录表样例 10

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。

T/CSAE 284《自动驾驶乘用车 线控底盘性能要求及试验方法》系列标准拟由三个部分构成：

——第1部分：驱动系统；

——第2部分：制动系统；

——第3部分：转向系统。

本文件为T/CSAE 284的第3部分。

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：北京百度智行科技有限公司、国汽（北京）智能网联汽车研究院有限公司、舍弗勒智能驾驶科技（长沙）有限公司、苏州衡鲁汽车部件有限公司、上海衡鲁汽车科技有限公司、北京理工大学、北京奥特尼克科技有限公司、上海拿森汽车电子有限公司、联创汽车电子有限公司、同济大学、北京车和家信息技术有限公司、北京航迹科技有限公司、中汽创智科技有限公司、北京汽车研究总院有限公司、湖南湘江智能科技创新中心有限公司、青岛华通图新信息科技有限公司、比亚迪汽车工业有限公司、北京裕峻汽车技术研究院有限公司。

本文件主要起草人：张鸿儒、赵云、马鸿超、张彦福、俞志华、高月磊、王刚辉、程周、彭伟、贾元辉、宋德王、刘卫国、於涛、李红海、何德管、陈礼、施国标、王帅、陶喆、李涛、李兵、冷博、焉国辉、黄晓峰、卢毅、白艳飞、梁阿南、高培基、徐光亚、崔华芳、李兴坤。

自动驾驶乘用车 线控底盘性能要求及试验方法

第3部分：转向系统

1 范围

本文件规定了自动驾驶乘用车线控转向系统的一般要求、性能要求及试验方法。

本文件适用于3级及4级自动驾驶乘用车前轮线控转向系统在附着良好的路面工况下的开发和测试，其评价数据可来源于车载信息与控制系统，其他车辆可参考使用。

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 12534 汽车道路试验方法通则

GB 17675 汽车转向系 基本要求

GB/T 40429—2021 汽车驾驶自动化分级

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

自动驾驶车辆 automated driving vehicle

具备3级及以上级别驾驶自动化能力的车辆。

3.2

自动驾驶控制器 automated driving controller; ADC

车辆自动驾驶功能的处理单元，可发出控制指令，由硬件和软件共同组成。

3.3

线控转向系统 steering by wire system; SBWS

使用电子线路和通讯传输等线控技术，接收自动驾驶控制器或驾驶员控制指令改变或保持车辆行驶方向的系统。

注：在不引起混淆的情况下，本文件中的“线控转向系统”简称为“系统”。

3.4

最高设计运行速度 maximum design operational speed; $V_{\max}$

在其设计运行条件下，自动驾驶车辆在自动驾驶模式可运行的最高速度。

4 一般要求

4.1 系统架构

线控转向系统主要包括方向盘转向机构、车轮转向机构、转向控制器总成，系统架构可参考图1。

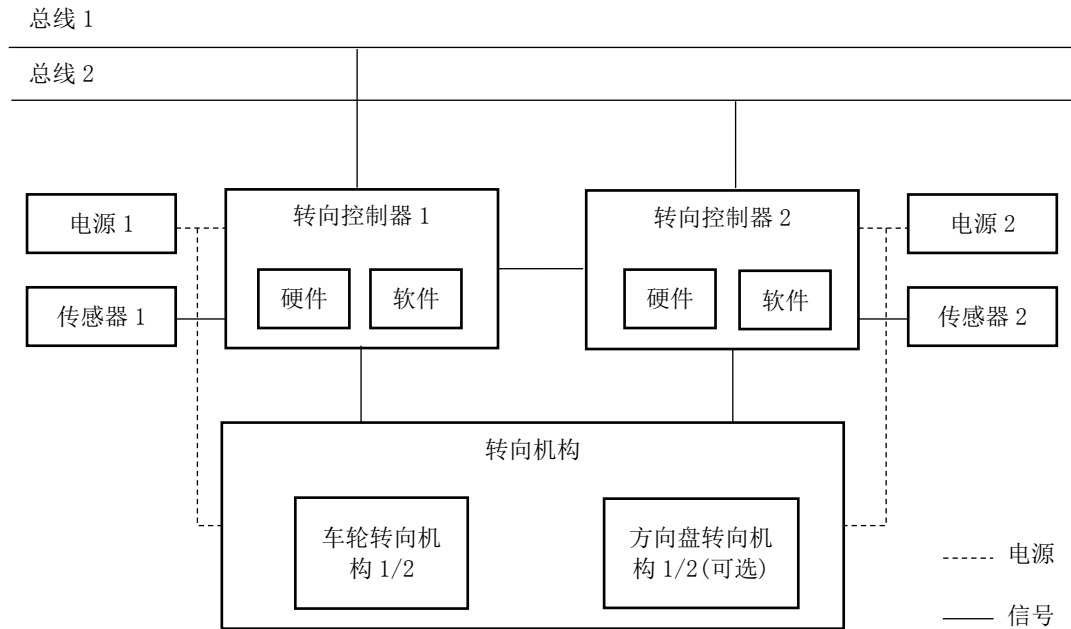


图1 线控转向系统架构

4.2 功能要求

在车辆运行期间，系统应满足以下功能要求：

- a) 在 V_{max} 内以及任意档位时都能实现线控转向；
- b) 当线控转向系统收到有效的自动驾驶退出请求时，立即退出自动线控转向状态；
- c) 线控转向系统具备故障自我诊断功能及相应的降级策略；
- d) 线控转向系统执行的转向角度、角度变化率及扭矩均不应超过安全限值，以保证车辆安全可控；
- e) 线控转向系统具备冗余转向功能，包含控制单元、功率驱动单元、电机执行单元、电源、通信和传感器等子系统的冗余。

4.3 接口要求

线控转向系统和自动驾驶控制器之间的接口信号应满足表1要求：

表1 线控转向系统接口要求

类型	发送节点	信号内容(以方向盘控制为例)	信号采集精度	单位
系统1	控制信号	进入退出自动驾驶请求	—	—
		方向盘转角	0.1	°
		方向盘转角变化率	1	°/s
		自动驾驶系统状态	—	—
	反馈信号	转向系统工作状态	—	—

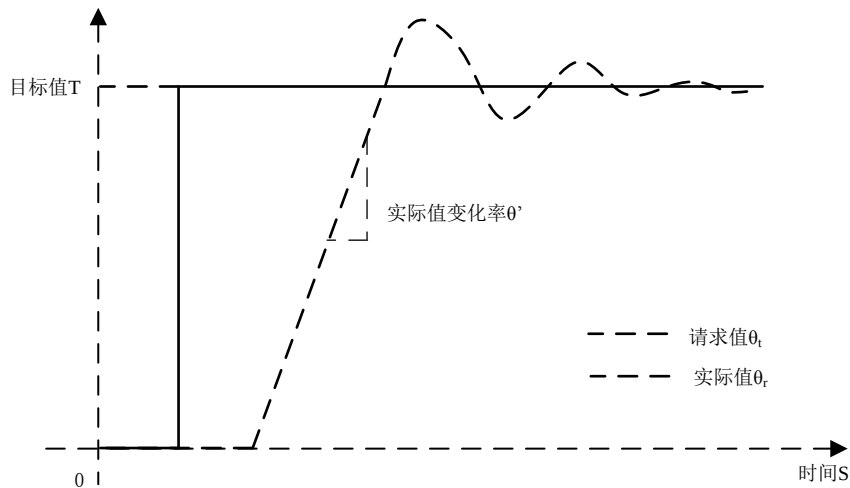
表1 线控转向系统接口要求(续)

类型	发送节点	信号内容(以方向盘控制为例)	信号采集精度	单位
系统1	反馈信号	转向系统故障状态	—	—
		方向盘转角反馈	0.1	°
		方向盘转角变化率反馈	1	°/s
		转向接管状态	—	—
		转向系统力矩反馈	0.1	Nm
		转向系统力矩传感器有效位	—	—
		转向系统最大转角限制	0.1	°
		转向系统最大转速限制	1	°/s
系统2	控制信号	请求进入退出自动驾驶	—	—
		方向盘转角	0.1	°
		方向盘转角变化率	1	°/s
		自动驾驶系统状态	—	—
	反馈信号	转向系统工作状态	—	—
		转向系统故障状态	—	—
		方向盘转角反馈	0.1	°
		方向盘转角变化率反馈	1	°/s
		转向接管状态	—	—
		转向系统力矩反馈	0.1	Nm
		转向系统力矩传感器有效位	—	—
		转向系统最大转角限制	0.1	°
		转向系统最大转速限制	1	°/s

5 性能要求

5.1 基础性能

- 5.1.1 线控转向系统应满足 GB 17675 的技术要求。
- 5.1.2 参照图 2，按照 6.2.1 和 6.2.4 进行测试，系统应满足表 2 行程测试指标要求。



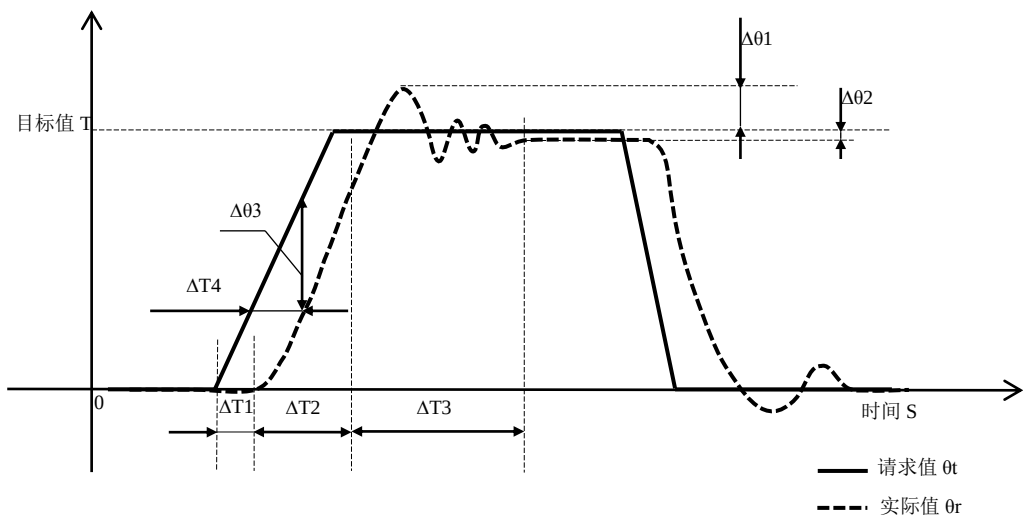
- 注1：请求值 θ_r ——自动驾驶控制器通过总线发送的数值，也指线控转向系统通过总线接收到的数值。
- 注2：实际值 θ_a ——方向盘或车轮上（或转向传动装置上）安装的转角传感器（或齿条位置传感器）测量并通过总线反馈的转动角度（或齿条位置）。
- 注3：目标值T——请求值达到稳定后的数值。
- 注4：实际值变化率 θ' ——线控转向系统转动过程中实际值的变化斜率。

图2 行程测试指标示意图

表2 行程测试指标要求

序号	指标名称	系统无故障 (以方向盘控制为例)	单系统故障 (以方向盘控制为例)
1	最大实际值变化率 $\theta'_{\max}$ (deg/s)	≥ 500	≥ 250
2	最大实际值 $\theta_{r_{\max}}$ (deg)	$\geq \text{机械行程} \times 90\%$	$\geq \text{机械行程} \times 90\%$
3	对称性	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$
注1：对称性——在相同环境和相同请求指令的情况下，左、右转向响应的差异。计算公式详见6.2.1。 注2：针对方向盘转角接口，其它控制方式（如齿条位移控制）可根据转向系统传动比或设计参数进行推算。			

- 5.1.3 参照图 3，按照 6.2.2、6.2.4 进行测试，系统应满足表 3 斜坡测试指标要求。



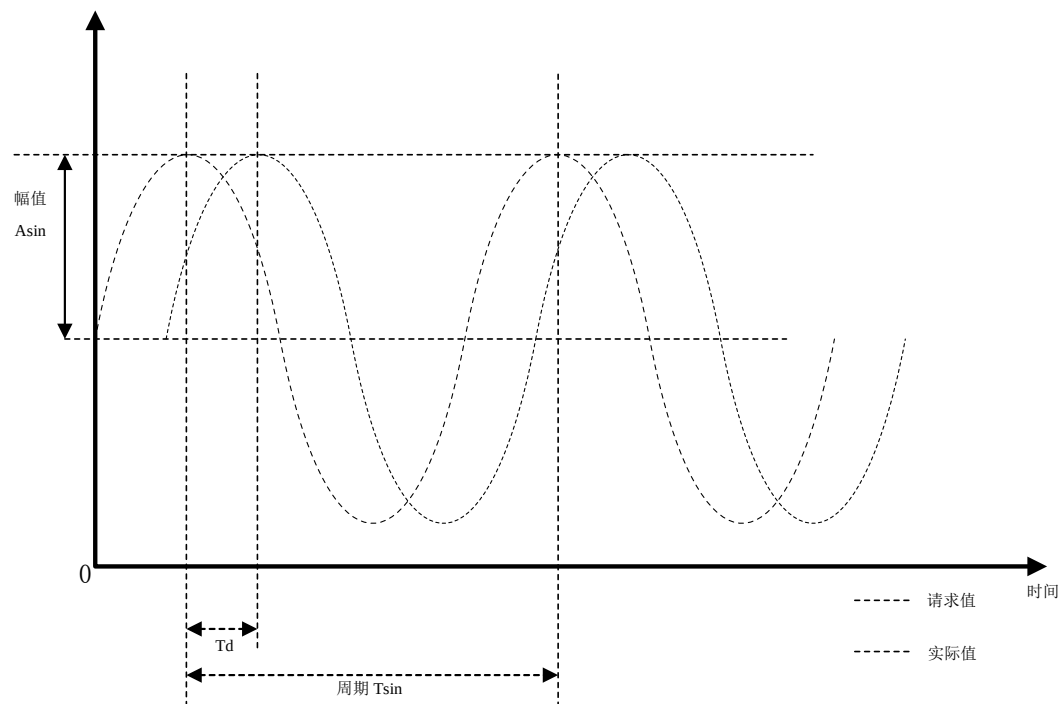
注1：最大超调值（ $\Delta\theta_1$ ）：线控转向系统转动过程中最大实际值与目标值的差值。
注2：稳态误差（ $\Delta\theta_2$ ）：线控转向系统转动过程中稳定实际值与目标值的差值。
注3：跟随差值（ $\Delta\theta_3$ ）：线控转向系统转动过程中某一时刻实际值与请求值的差值。
注4：响应延迟时间（ ΔT_1 ）：自动驾驶控制器发出请求值的时刻与接收到实际值开始产生变化的时刻之间的时间差。
注5：执行时间（ ΔT_2 ）：实际值开始产生变化的时刻与实际值第一次达到目标值90%时刻之间的时间差。
注6：稳定控制时间（ ΔT_3 ）：实际值第一次达到目标值90%时刻与实际值达到稳定的时刻之间的时间差。
注7：动态跟随时间（ ΔT_4 ）：线控转向系统转动过程中同一变化方向请求值与实际值相同时所对应时刻的时间差。

图3 斜坡测试指标示意图

表3 斜坡测试指标要求

序号	指标名称	系统无故障 (以方向盘控制为例)	单系统故障 (以方向盘控制为例)
1	最大超调值 $\Delta\theta_1(\text{deg})$	$[0, 15]^\circ : \leq 1$ $(15, 66]^\circ : \leq \theta_t \times 7.5\%$ $(66, \theta_{\max}]^\circ : \leq 5$	$[0, 15]^\circ : \leq 1$ $(15, 66]^\circ : \leq \theta_t \times 7.5\%$ $(66, \theta_{\max}]^\circ : \leq 5$
2	稳态误差 $\Delta\theta_2(\text{deg})$	$[0, 66]^\circ : \leq 0.5$ $(66, \theta_{\max}]^\circ : \leq 1$	$[0, 66]^\circ : \leq 0.5$ $(66, \theta_{\max}]^\circ : \leq 1$
3	跟随差值 $\Delta\theta_3(\text{deg})$	≤ 100	≤ 100
4	响应延迟时间 $\Delta T_1(\text{ms})$	≤ 80	≤ 80
5	执行时间 $\Delta T_2(\text{ms})$	$\leq \text{Min}(\theta_t / \theta', 900)$	$\leq \text{Min}(2\theta_t / \theta', 1800)$
6	稳定控制时间 $\Delta T_3(\text{ms})$	≤ 150	≤ 150
7	动态跟随时间 $\Delta T_4(\text{ms})$	≤ 80	≤ 80
8	对称性	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$
注：针对方向盘转角接口，其它控制方式（如齿条位移控制）可根据转向系统传动比或设计参数进行推算。			

5.1.4 参照图 4，按照 6.2.3 和 6.2.4 进行测试，应满足表 4 正弦测试指标要求。



注1：幅值(A_{sin})：请求值在每个周期能够达到的最大值。
注2：周期(T_{sin})：请求值在相邻两个波峰或波谷时刻的时间差。
注3：相位延迟时间(T_d)：请求值和实际值在相邻的两波峰或波谷之间的时间差，即两个正弦波的相位差。

图4 正弦测试指标示意图

表4 正弦测试指标要求

序号	指标名称	系统无故障 (以方向盘控制为例)	单系统故障 (以方向盘控制为例)
1	相位延迟时间 T_d (ms)	≤ 80	≤ 80
2	峰-峰差值(deg)	≤ 10	≤ 10

5.2 切换性能

按照6.2.5进行测试，系统切换时间应不大于50 ms。

6 试验方法

6.1 试验准备

6.1.1 场地条件

试验应在封闭试验场地进行，试验场地应为干燥、平坦且清洁的，用水泥混凝土或沥青铺装的路面，场地应有良好的附着系数。试验路面的纵向坡度应不超过0.10%，横向坡度应不超过0.50%。场地应有一定的安全空间，保证试验安全。



6.1.2 环境条件

试验环境应满足如下要求：

- a) 环境温度 $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 天气干燥，没有降水及降雪；
- c) 平均风速应小于 3 m/s ；
- d) 其他要求按照 GB/T 12534 的规定执行。

6.1.3 车辆条件

试验开始前，车辆应按照如下要求进行准备：

- a) 轮胎气压充气至汽车制造商规定的数值。同轴左右轮胎的型号、胎面花纹、花纹深度、轮胎气压应保持一致。轮胎胎面花纹深度不低于初始花纹深度的 50%；
- b) 车辆按制造厂的技术要求进行检查及必要的调整，转向系统预热至正常工作温度状况，冷却液温度应达到正常工作温度；
- c) 在试验前，将试验车辆加载到最大设计总质量，增加的载荷均匀分配到乘客舱及行李舱内；
- d) 测量并记录检测环境的温度、相对湿度和大气压力。

6.1.4 试验设备

试验设备应满足如下要求：

- a) 速度采集精度不低于 0.1 km/h ；
- b) 加速度采集精度不低于 0.1 m/s^2 ；
- c) 角度采集精度不低于 0.1 ° ；
- d) 角度变化率采集精度不低于 $0.1\text{ }^{\circ}/\text{s}$ ；
- e) 设备需具有 ADC 与 SBWS 之间通信所采用的软硬件接口，可以采集记录表 1 中信号；
- f) 测试设备要满足动态数据的采样及储存，采样和存储的频率至少为 100 Hz ；
- g) 如有需要，测试设备可具备数字量和模拟量信息的记录，并与总线数据同步记录。

6.2 试验内容

6.2.1 行程测试

按照如下步骤进行行程测试：

- a) 安装、调试测试设备，开始信号采集；
- b) 使车辆保持 10 km/h 稳定行驶；
- c) 通过测试设备发送转向测试指令。以方向盘控制为例，按照阶跃方式发送方向盘转角信号值 500 ° 和方向盘转角变化率信号值 $500\text{ }^{\circ}/\text{s}$ 的测试指令，持续到车辆响应稳定；
- d) 停止发送测试指令，车辆方向盘回正；
- e) 按照阶跃方式发送方向盘转角信号值 600 ° （或转角信号最大物理值）和方向盘转角变化率信号值 $600\text{ }^{\circ}/\text{s}$ （或转角变化率信号最大物理值）的测试指令，持续到车辆响应稳定；
- f) 停止发送测试指令，并保存原始数据；
- g) 需分别测试左转和右转两个方向，每个方向至少进行 3 次；
- h) 处理测试数据，评价最大实际值、最大实际值变化率和对称性指标是否满足表 2 要求。

注：对称性 = $|\text{左转测量值} - \text{右转测量值}| / \text{测试请求值}$ 。

6.2.2 斜坡测试

按照如下步骤进行斜坡测试：

- a) 安装、调试测试设备，开始信号采集；
- b) 使车辆保持 10 km/h 稳定行驶；
- c) 通过测试设备发送转向测试指令。以方向盘控制为例，发送方向盘转角变化率信号值等于最大实际值变化率，方向盘转角信号值从 0° 开始，以最大实际值变化率为斜率增加到最大实际值，方向盘转角信号值增加到最大实际值后保持，持续到车辆响应稳定；方向盘转角信号值以最大实际值变化率从最大实际值降低到 0° ，持续到车辆响应稳定；

- d) 停止发送测试指令，并保存原始数据；
- e) 需分别测试左转和右转两个方向，每个方向至少进行 3 次；
- f) 处理测试数据，评价信号值上升和下降过程中的最大超调角度、稳态误差、跟随差值、响应延迟时间、执行时间、稳定控制时间、动态跟随时间和对称性指标是否满足表 3 要求。

6.2.3 正弦测试

按照如下步骤进行正弦测试：

- a) 安装、调试测试设备，开始信号采集；
- b) 使车辆保持 10 km/h 稳定行驶；
- c) 通过测试设备发送转向测试指令。以方向盘控制为例，发送方向盘转角变化率信号值为最大实际值变化率，方向盘转角信号值参照公式 $f(t)=A\cdot\sin(2\pi\cdot t/T)$ ，A 为幅值、T 为变化周期（周期 $\geq 4\times$ 幅值/最大实际值变化率并取整），持续测试 5 个周期，具体 A、T 取值见表 5；
- d) 停止发送测试指令，并保存原始数据；
- e) 需分别测试左转和右转两个方向；
- f) 处理测试数据，评价相位延迟时间、峰-峰差值指标是否满足表 4 要求。

表5 正弦测试 A、T 取值表

A(deg)	T (s)
2	4A/最大实际值变化率
5	4A/最大实际值变化率
10	4A/最大实际值变化率
15	4A/最大实际值变化率
30	4A/最大实际值变化率
60	4A/最大实际值变化率
90	4A/最大实际值变化率
180	4A/最大实际值变化率
270	4A/最大实际值变化率
360	4A/最大实际值变化率
450	4A/最大实际值变化率
最大实际值	4A/最大实际值变化率

6.2.4 故障性能测试

按照如下步骤进行测试：

- a) 安装、调试测试设备，开始信号采集；
- b) 通过制造单系统故障（如传感器失效），使线控转向系统中一套系统完全失效；
- c) 分别执行 6.2.1、6.2.2 和 6.2.3 测试；
- d) 需分别测试两套系统单独失效后的性能指标；
- e) 按照上述测试方法完成后，采集数据分析全部指标是否满足表 2、表 3 和表 4 要求。

6.2.5 系统切换测试

按照如下步骤进行测试：

- a) 安装、调试测试设备，开始信号采集；
- b) 使车辆保持 10 km/h 稳定行驶；
- c) 通过测试设备发送测试指令。以方向盘控制为例，发送方向盘转角、方向盘转角变化率为有效范围内的任意值，持续到车辆响应稳定；

- d) 通过制造单系统故障（如传感器失效），使线控转向系统中一套系统失效，另一套系统介入工作；
- e) 记录系统报出故障时刻、系统工作状态变化时刻；
- f) 停止发送测试指令，并保存原始数据；
- g) 需分别测试左转和右转两个方向，每个方向至少进行 3 次；
- h) 需分别测试两套系统单独失效后切换时间；
- i) 处理测试数据，评价系统切换时间是否满足 5.2 要求。

注：系统切换时间=系统2工作状态变化时刻-系统1报出故障时刻。

6.3 试验数据处理

试验数据处理应满足如下要求：

- a) 计算有效数据的算术平均值；
- b) 数据分析记录全面、客观，记录表可参考附录 A。

附录 A
(资料性)
数据记录表样例

表A.1 行程测试

转动方向	方向盘转角 (deg)	方向盘转角变化率 (deg/s)	可支持的最大实际值 (deg)	可支持的最大实际值变化率 (deg/s)	对称性	车速	备注
左转	500	500					
	600(或信号最大物理值)	600(或信号最大物理值)					
右转	500	500					
	600(或信号最大物理值)	600(或信号最大物理值)					

表A.2 斜坡测试

转动方向	方向盘转角 (deg)	方向盘转角变化率 (deg/s)	请求值变化	最大超调值 (deg)	稳态误差 (deg)	跟随差值 (deg)	响应延迟时间 (ms)	执行时间 (ms)	稳定控制时间 (ms)	动态跟随时间 (ms)	对称性	车速	备注
左转	最大实际值	最大实际值变化率	上升										
	最大实际值	最大实际值变化率	下降										
右转	最大实际值	最大实际值变化率	上升										
	最大实际值	最大实际值变化率	下降										

表A.3 正弦测试

测试公式	A(deg)	T (s)	相位延迟时间 (ms)	峰-峰差值 (deg)	车速	备注
$f(t)=A\cdot\sin(2\pi\cdot t/T)$	2	4A/最大实际值变化率				
	5	4A/最大实际值变化率				
	10	4A/最大实际值变化率				
	15	4A/最大实际值变化率				
	30	4A/最大实际值变化率				
	60	4A/最大实际值变化率				
	90	4A/最大实际值变化率				
	180	4A/最大实际值变化率				
	270	4A/最大实际值变化率				
	360	4A/最大实际值变化率				
	450	4A/最大实际值变化率				
	最大实际值	4A/最大实际值变化率				

表A.4 系统切换测试

故障系统	转动方向	方向盘转角 (deg)	方向盘转角变化率 (deg/s)	系统报出故障的时刻	系统工作状态变化时刻	系统切换时间	车速	备注
系统1	左转							
	右转							
系统2	左转							
	右转							