

团 体 标 准

T/GAEPA 006-2024

代替 T/GAEPA 003-2024

线控转向技术要求和试验方法

Steering-by-wire Technical Requirements and Test Methods

2024年05月22日发布

2024年06月01日发布

广东省汽车智能网联发展促进会
珠三角湾区智能网联新能源汽车产业联盟

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 技术要求	3
5 试验方法	9

中国团体标准

前 言

前本文件按照 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。

本文件《线控转向技术要求和试验方法》适用于乘用车线控转向系统。

为统一明确乘用车线控转向系统的技术要求和试验方法，特制定本文件。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布单位不承担识别所涉及专利的责任。

本文件由广东省汽车智能网联发展促进会组织归口。

本文件参加单位：广东汽车检测中心有限公司、东风汽车有限公司东风日产乘用车公司、佛山仙湖实验室、广东省科学院工业分析检测中心。

本文件主要起草人：张宸维、谭敏仪、梁灿彬、孙伟、田韶鹏、吴清锋。

本文件所代替文件的历次版本发布情况为：T/GAEPA 003-2024。

本文件相对 T/GAEPA 003-2024《线控转向技术要求和试验方法》相比，主要区别在于团体标准编号规则调整，其它主要内容没有变化。

线控转向技术要求和试验方法

1 范围

本标准规定了线控转向的技术要求和试验方法。
本标准适用于匹配线控转向系统的所有乘用车。

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。

GB 17675-2021 汽车转向系 基本要求

GB/T 6323-2014 汽车操纵稳定性试验方法

GB/T 34590 道路车辆 功能安全

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。

3 术语和定义

GB/T 6323-2014、GB/T 34590 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 线控转向

线控转向(SBW, steering by wire)是一种新型的转向系统,与传统转向相比,取消了转向盘和转向轮之间的机械连接,其角位移传递和力矩传递都是通过传感器、控制器和电机实现,相互之间可以独立进行,具体结构见下图 1。

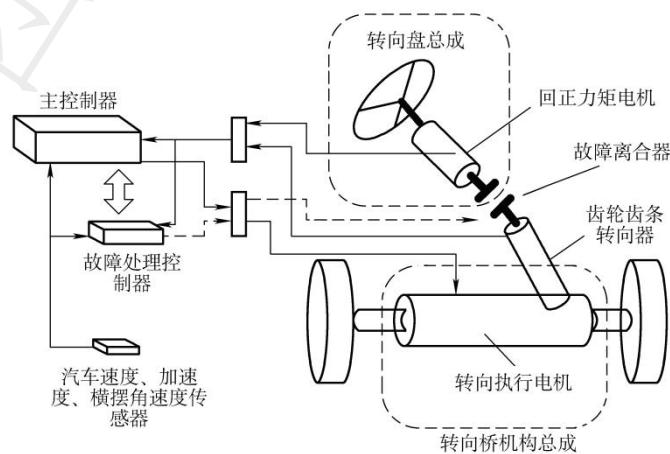


图 1 线控转向结构示意图

3.2 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 2。

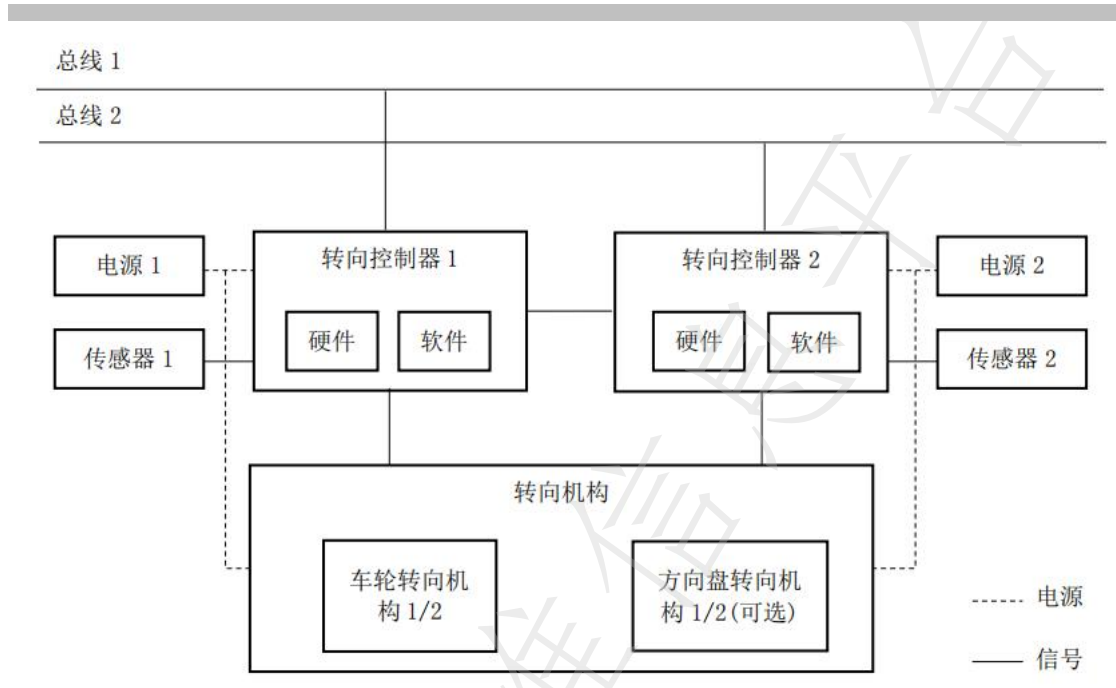


图 2 线控转向系统架构

3.3 路感模拟模块

线控转向的重要组成模块（含机械件和控制器），由于线控转向取消了转向盘与车辆间机械连接，路面负载反馈无法传递到转向盘，路感模拟模块替代该功能，模拟车辆路感信息。

3.4 转向执行模块

线控转向的重要组成模块（含机械件和控制器）其直接与车辆相连，通过控制器间的通讯接收来自路感模拟模块传递的转向盘转角和转矩，并输出相应的转向动作。

3.5 转向盘最大转角 θ_{\max}

从车辆直行位置开始，转向盘向左或向右转动到极限位置时转角。

3.6 最大齿条力 F_{\max}

整车满载情况下，在全车速和整个转向行程范围内，施加在转向器齿条轴向方向上的最大力，通常为原地怠速转向时转向极限位置时的齿条力，可通过理论计算或实车测试获得。

3.7 转向时间

从转向盘开始动作到转向车轮达到特定转向角所需的时间。

3.8 转向传动比

转向盘从一侧极限位置到另一侧极限位置时所转过的角度，与转向车轮转过的平均转角（左右转向车轮转角之和的一半）之间的比值。

4 技术要求

4.1 一般要求

4.1.1 线控转向系统总成应符合本标准规定，并按规定程序批准的图样和技术文件制造。

4.1.2 转向盘操纵的方向应与车辆行驶方式一致，且车轮应与转向盘的偏转连续对应。

4.1.3 在不同的车速条件下，以不同转速在转向全行程范围内转动转向盘，转动过程平滑，无卡滞，无明显噪音或者振动，无明显受力不对称，至任意角度停止输入时不应有惯性延时现象出现。

4.1.4 线控转向系统的功能安全要求，应按照 GB/T 34590 制定。

4.2 工作环境

额定电压及工作温度应符合相关标准要求。

4.3 系统性能

4.3.1 转向手感

4.3.1.1 转向力矩

系统通电工作，在转向全行程范围内，不同车速和齿条力负载条件下，转向盘转速和转向盘输入扭矩之间的关系需满足下表 1。

表 1 转向性能要求

车速 (km/h)	齿条力 (N)	转向盘转速 ($^{\circ}$ /s)	输入扭矩 (Nm)
0	F_{\max}	30	< 3
		300	< 3.5
10	50% F_{\max}	500	< 4
80	40% F_{\max}	800	< 8

4.3.1.2 转向刚度

系统通电工作，在转向中心区范围内，平均转向刚度 (0.2-0.4) Nm/ $^{\circ}$ 。

4.3.1.3 转向摩擦力矩

系统通电工作，转向全行程范围内，摩擦力矩 ≤ 4 Nm。

4.3.1.4 转向行程限位特性

系统通电工作，转向至转向盘最大转角后，转向力矩快速上升，力矩刚度 ≥ 20 Nm/ $^{\circ}$ 。

4.3.1.5 扭矩波动

系统通电工作，扭矩波动不大于平均扭矩的 0.3 倍。

4.3.2 转向传动比特性

线控转向系统可实现定转向传动比和变转向传动比:

- 定转向传动比: 传动比不随车速变化, 传动比应处于 14-16.5 范围内。
- 变转向传动比: 传动比随车速变化而变化, 保持车辆横摆角速度增益不变, 传动比应处于(8-24) 范围内。

4.3.3 助力特性

- 齿条最大输出力 $> F_{\max}$;
- 左右输入扭矩差: 当齿条力 $F_1=95\%F_{\max}$, $F_2=20\%F_{\max}$ 时, 应满足如下要求:
- $|R(F_1)-L(F_1)| \leq 0.59\text{Nm}$ 。
- 输入扭矩滞后: 当齿条力 $F \geq 1000\text{N}$ 时, 应满足输入扭矩 $T_2/T_1 \geq 0.7$, 详见图 3。

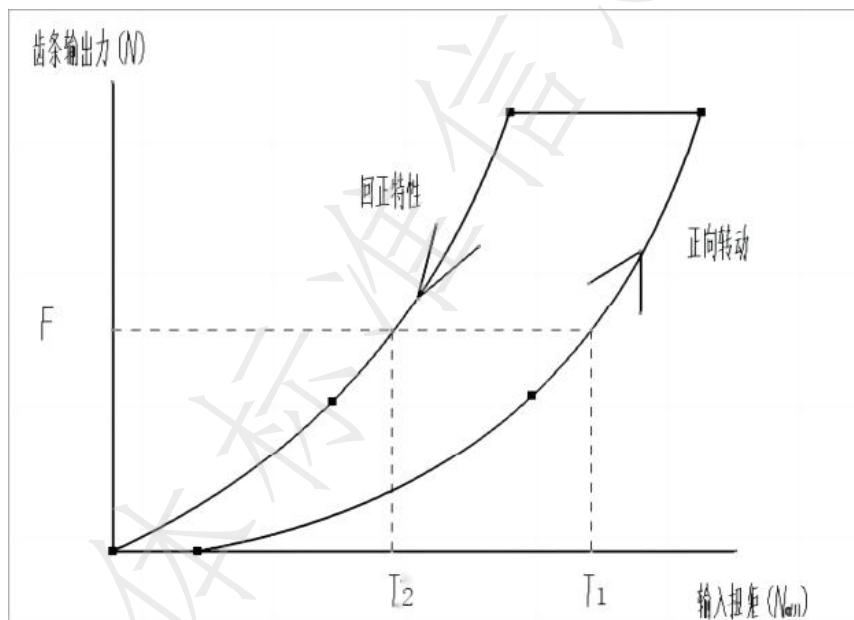


图 3 扭矩-齿条力特性曲线

4.3.4 转向响应

4.3.4.1 阶跃转向

- 响应延迟时间 $T_d \leq 40\text{ms}$
- 稳态响应时间 $T_{ss} \leq 500\text{ms}$
- 稳态响应误差 $e_{ss} \leq 0.1$ 。

4.3.4.2 斜坡转向

- 响应延迟时间 $T_d \leq 40\text{ms}$
- 稳态响应时间 $T_{ss} \leq 700\text{ms}$
- 稳态响应误差 $e_{ss} \leq 0.1$ 。

4.3.4.3 正弦转向

- a) 响应延迟时间 $T_d \leq 400\text{ms}$
- b) 稳态响应时间 $T_{ss} \leq 1\text{s}$
- c) 稳态响应误差 $e_{ss} \leq 0.1$ 。

4.3.5 助力热保护控制

系统通电工作，齿条限位工况下助力电机过热保护不启动，齿条最大输出力 $> F_{\max}$ 。

4.3.6 工作噪音

系统通电工作，对工作噪音进行测试，并满足以下要求：

- a) 齿条无负载， $360^\circ/\text{s}$ 转向盘转速条件下，工作噪音 $< 47\text{dB}$ ；
- b) 齿条加载 $50\%F_{\max}$ ， $400^\circ/\text{s}$ 转向盘转速条件下，工作噪音 $< 48\text{dB}$ ；
- c) 齿条加载 $50\%F_{\max}$ ， $600^\circ/\text{s}$ 转向盘转速条件下，工作噪音 $< 54\text{dB}$ 。

4.3.7 冲击噪音

系统通电工作，冲击噪音 $< 54\text{dB}$ 。

4.3.8 逆向冲击

系统通电助力，对系统施加 $300\%F_{\max}$ 冲击力，各零部件不可以出现裂痕或者断裂，转向拉杆不能有可观察到的弯曲变形，且满足 4.1.2 和 4.1.3 要求。

4.3.9 耐低温

系统通电助力， -40°C 的恒温室内对系统进行 100 个工作循环后，各零部件无损坏、无异常，且满足 4.3.1 和 4.3.4 的要求。

4.3.10 温度冲击

系统不工作，在 $-40^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C}$ 温度范围内对系统进行 20 个循环的温度冲击后，转向系统各零部件无损坏、无异常，且满足 4.3.1 和 4.3.4 的要求。

4.3.11 限位耐久

系统通电助力，对系统向左右两个方向各进行 3×10^4 个循环的限位动作后，系统各零部件不应有过度磨损、断裂、螺栓松动现象，且满足 4.3.1 和 4.3.4 的要求。

4.3.12 扭转耐久

系统通电助力，对系统进行 1.5×10^4 次循环的扭转试验后，系统各零部件应无损坏、无异常，且满足 4.3.1 和 4.3.4 的要求，同时装车评价不允许出现异响。

4.4 功能性能要求

4.4.1 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。

4.4.2 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 2 要求:

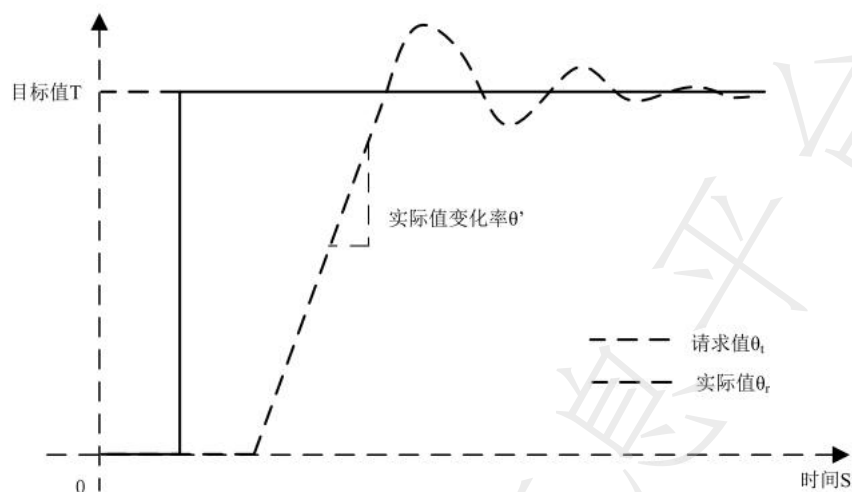
表 2 线控转向系统接口要求

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	-	-	
系统 2	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	
		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		

4.4.3 基础性能

4.4.3.1 线控转向系统应满足 GB 17675-2021 的技术要求。

4.4.3.2 参照图 4, 按照 5.2.13 和 5.2.16 进行测试, 系统应满足表 3 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_r ——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'_r ——线控转向系统转动过程中实际值的变化斜率。

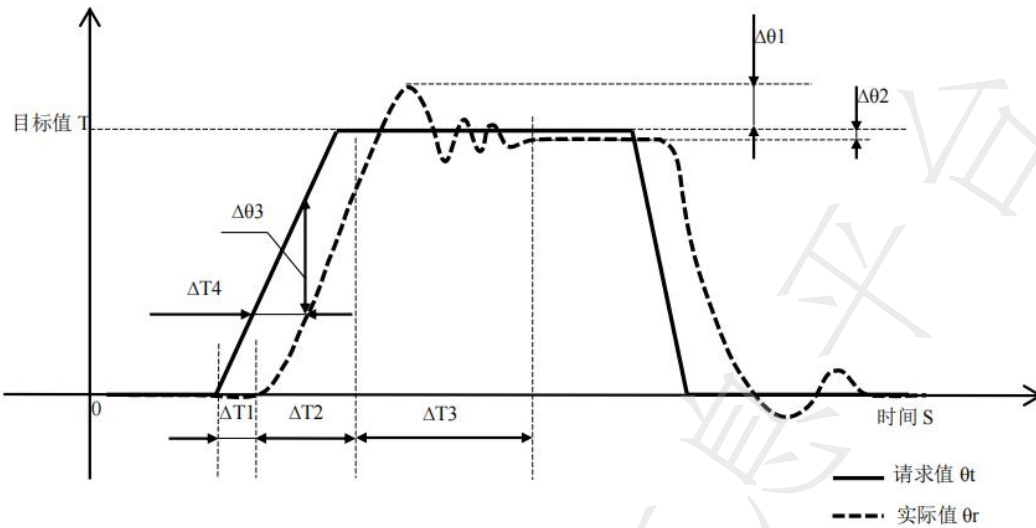
图 4 行程测试指标示意图

表 3 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 $\theta'_r \max$ (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。

4.4.3.3 参照图 5, 按照 5.2.14、5.2.16 进行测试, 系统应满足表 4 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。

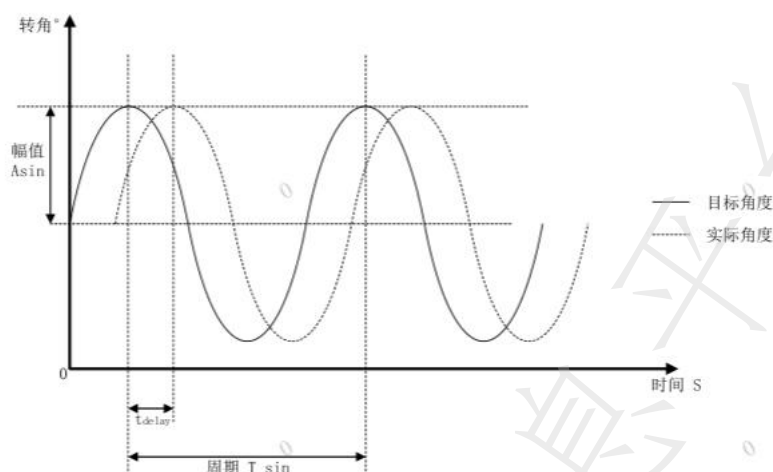
图 5 斜坡测试指标示意图

表 4 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 $\Delta\theta_1$ (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 $\Delta\theta_2$ (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 $\Delta\theta_3$ (deg)	≤ 100	≤ 100
4	响应延迟时间 ΔT_1 (ms)	≤ 80	≤ 80
5	执行时间 ΔT_2 (ms)	$\leq \text{Min}(\theta_t / \theta', 900)$	$\leq \text{Min}(2\theta_t / \theta', 1800)$
6	稳定控制时间 ΔT_3 (ms)	≤ 150	≤ 150
7	动态跟随时间 ΔT_4 (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。

4.4.3.4 参照图 6, 按照 5.2.15 和 5.2.16 进行测试, 应满足表 5 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 6 正弦测试指标示意图

表 5 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

4.4.3.5 切换性能

按照 5.2.17 进行测试, 系统切换时间应不大于 50 ms。

5 试验方法

5.1 试验条件

除另有规定外, 所有试验应按下列条件运行。

- 环境温度: $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$;
- 相对湿度 $\leq 95\%$;
- EPS 工作电源电压: $12\text{V} \pm 0.3\text{V}$;
- 相关线束电阻: $28\text{m}\Omega \pm 0.7\text{m}\Omega$;
- 转向速度: $12^{\circ}/\text{s} \pm 1^{\circ}/\text{s}$ 。

5.2 试验方法

5.2.1 转向手感

按实车布置位置将转向系统固定安装于试验台架上并确保不扭动，系统通电，按表 1 中规定，在不同的模拟车速信号下，通过转向拉杆在转向器齿条上加载不同的齿条力，按不同转速转动方向盘并测量方向盘上的输入扭矩。

5.2.2 转向传动比特性

按实车布置位置将转向系统固定安装于试验台架上并确保不扭动，系统通电，转动转向盘，从一侧极限位置至另一侧极限位置，过程中测量转向盘转角和车轮内外转角，得出转向传动比，要求满足 4.3.2 的要求。

5.2.3 助力特性

按实车布置位置将转向系统固定安装于试验台架上并确保不扭动，系统通电。转向执行机构(转向器齿条)位于中间位置，其一端连接力传感器并固定，另一端空载，转动转向盘，从一侧极限位置到另一侧极限位置，获得助力曲线(齿条力 VS 输入扭矩)。

在以下车速信号下进行试验，要求满足 4.3.3 的要求。

1)0km/h; 2)20km/h; 3)40km/h; 4)80km/h; 5)120km/h。

5.2.4 转向响应

按实车布置位置将转向系统固定安装于试验台架上并确保不扭动，系统通电，按 GB/T 6323 试验方法分别进行阶跃转向、斜坡转向和正弦转向操作。

5.2.4.1 通过转向拉杆在转向器齿条上加载 $40\%F_{\max}$ 以 $800^\circ/\text{s}$ 转速转向至 90° ，记录过程中转向盘转角与车轮转角，并将转向盘转向转化为目标车轮转角，得出目标车轮转角-时间、实际车轮转角-时间的曲线，从曲线上得出响应延迟时间、稳态时间和稳态精度，要求满足 4.3.4.1。

5.2.4.2 通过转向拉杆在转向器齿条上加载 $100\%F_{\max}$ 以 $360^\circ/\text{s}$ 转速转向至 180° ，记录过程中转向盘转角与车轮转角，并将转向盘转向转化为目标车轮转角，得出目标车轮转角-时间、实际车轮转角-时间的曲线，从曲线上得出响应延迟时间、稳态时间和稳态精度，要求满足 4.3.4.2。

5.2.4.3 通过转向拉杆在转向器齿条上加载 $100\%F_{\max}$ 以 $500^\circ/\text{s}$ 转速转向至 $\pm 360^\circ$ ，记录过程中转向盘转角与车轮转角，并将转向盘转向转化为目标车轮转角，得出目标车轮转角-时间、实际车轮转角-时间的曲线，从曲线上得出响应延迟时间、稳态时间和稳态精度，要求满足 4.3.4.3。

5.2.5 助力热保护控制试验

按实车布置位置将转向系统固定安装于试验台架上并确保不扭动，齿条无负载，系统通电，分别在 20°C 和 65°C 环境温度下，以 $100^\circ/\text{s}$ 的速度转动方向盘，按 8 个齿条限位持续 3S 和 1 个齿条限位持续 30S 为一个循环，每个循环之间暂停 20S，共运行 10 个循环的齿条限位工况后，要求满足 4.3.5 的要求。

5.2.6 工作噪音试验

按实车布置位置将转向系统固定安装于试验台架上并确保不扭动，系统通电。通过一侧的拉杆对转向器齿条加载被动负载，另一端空载。转动转向盘使系统工作，在系统关键位置布置麦克风，测量相应频段的噪音，测试分以下 3 种工况，具体见表 6，要求测试结果满足 4.3.6 的要求。

表 6 工作噪音测试工况

项目	模式 1	模式 2	模式 3
----	------	------	------

齿条力	50% F_{max}		0
旋转方向	CW, CCW		CW, CCW
噪音频段	0.25KHz~2KHz		3KHz~7KHz
麦克风位置 L(见图 9)	150mm ± 4mm		100mm ± 2.5mm
转向盘转速	400 °/s ± 10 °/s	600 °/s ± 10/s	360 °/s ± 10 °/s

5.2.7 冲击噪音试验

按实车布置位置将转向系统固定安装于试验台架上并确保不扭动，在系统关键位置布置麦克风，系统通电助力，转动转向盘使系统工作，测量 0KHz~12.8KHz 频段内的噪音，要求满足 4.3.7 的要求。

- 转角输入波形：±(180 ± 20 °)，见图 7。
- 施加扭矩：标准波形(0.04Hz ± 0.001Hz)+叠加正弦波形(15Hz ± 0.4Hz)，大小为 ±(5Nm ± 0.5Nm)。

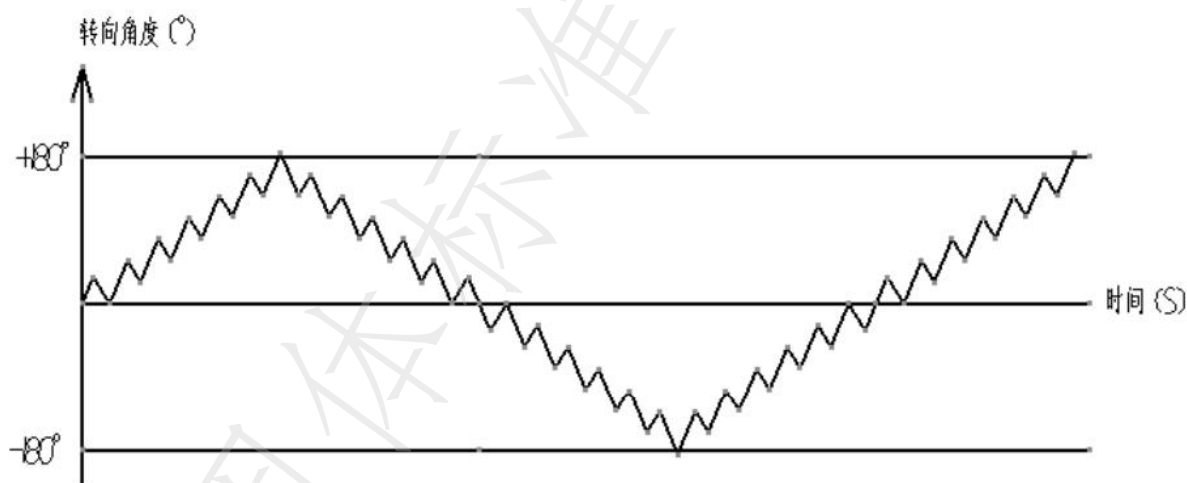


图 7 转角动作示意图

5.2.8 逆向冲击试验

按实车布置位置将转向系统固定安装于试验台架上并确保不扭动，系统通电，转向器齿条处于中间位置，对转向拉杆左右两端施加冲击载荷，冲击载荷在 0.1s 需达到 3 倍的最大齿条力 F_{max} ，要求冲击完成后满足 4.3.8 的要求。

5.2.9 耐低温试验

按实车布置位置将转向系统固定安装在-40℃的恒温室内，系统通电，按以下条件进行试验，试验后需满足 4.3.9 的要求。

- 转角输入波形：见图 8；
- 方向盘施加扭矩：进行循环 1 时，电机工作电流 45A；

- c) 车速: 5km/h;
- d) 试验周期: 100 个 (1 个周期=循环 1+循环 2)。

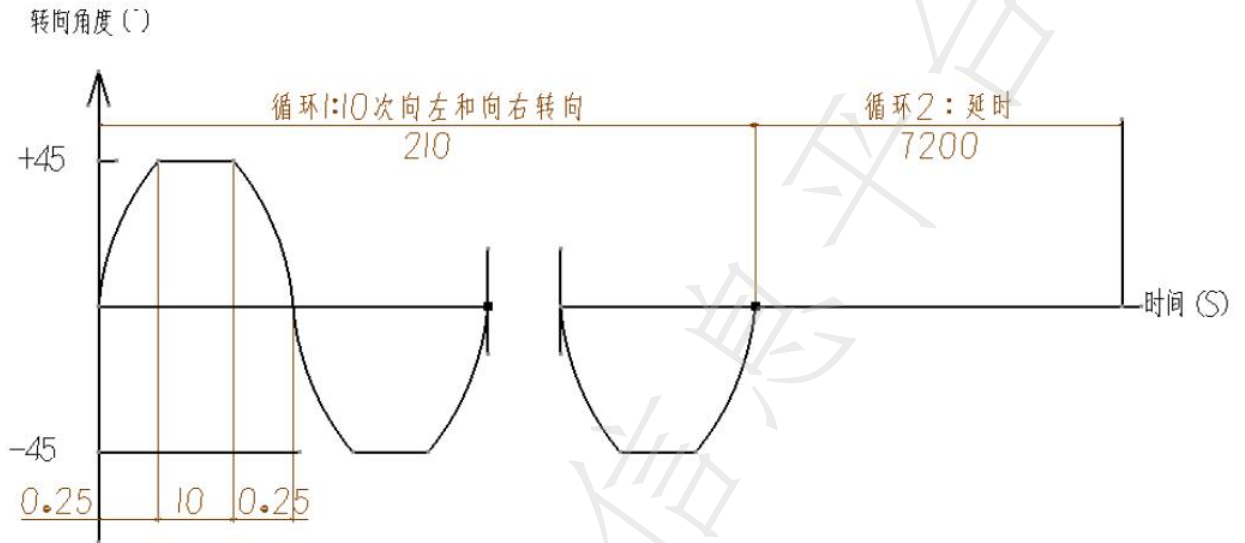


图 8 低温循环定义图

5.2.10 温度冲击试验

将转向系统放置到如下条件中进行试验, 试验期间系统不工作, 试验后需满足 4.3.10 的要求。

- a) 最高温度: $85^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$;
- b) 最低温度: $-40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$;
- c) 持续时间: 180min;
- d) 温度变化时间: 5min 以内;
- e) 试验周期: 20 个。

5.2.11 限位耐久试验

按实车布置位置将转向系统固定安装于试验台架上并确保不扭动, 系统通电, 在转向器齿条上加最大齿条力 F_{\max} , 以 $600^{\circ}/\text{s}$ 的角速度转向至极限位置(齿条限位), 然后回转角度 $40^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 为一个周期, 向左和向右各转动 3×10^4 周期。

在以下 4 种温度条件下进行试验, 试验结果满足 4.3.11 的要求。

- a) 在 $+85^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 绝对干燥的条件下试验;
- b) 在 $-40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 绝对干燥的条件下试验;
- c) 在 $-40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 且蜗轮吸水率 2.5% 的条件下试验;
- d) 在 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 的常温条件下试验。

5.2.12 扭转耐久试验

按实车布置位置将转向系统固定安装于试验台架上并确保不扭动, EPS 通电助力。由伺服电机接管柱输入轴加载输入扭矩和转角, 由伺服液压缸对横拉杆加载齿条力, 进行 1.5×10^4 次工作循环试验(相当于整车 300000km 寿命), 一个工作循环包括表 7 内所有工况, 每个工况中转角和齿条力按正弦波加载, 见图 9, 试验结果满足 4.3.12 的要求。

表 7 工作循环定义

工况	工况循环次数	转角(%最大转向角度)	齿条力(%最大齿条力)
1	2	80%	60%
2	1	80%	80%
3	1	100%	80%
4	1	100%	100%
5	2	100%	100%
6	1	100%	80%
7	1	100%	60%

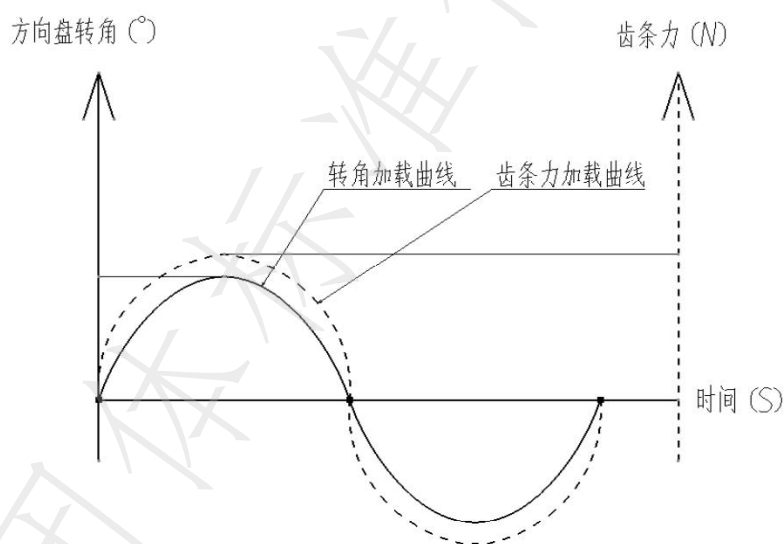


图 9 扭转耐久工况图

5.2.13 行程测试

按照如下步骤进行行程测试:

- 安装、调试测试设备, 开始信号采集;
- 使车辆保持 10 km/h 稳定行驶;
- 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 $500^\circ/\text{s}$ 的测试指令, 持续到车辆响应稳定;
- 停止发送测试指令, 车辆方向盘回正;
- 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 $600^\circ/\text{s}$ (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;
- 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 5 要求。
- 注: 对称性= $|\text{左转测量值}-\text{右转测量值}|/\text{测试请求值}$ 。

5.2.14 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 6 要求。

5.2.15 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 $\geq 4 \times \text{幅值}/\text{最大实际值变化率}$ 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 8 要求。

表 8 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

5.2.16 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 5.2.13、5.2.14 和 5.2.15 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 5、表 6 和表 7 要求。

5.2.17 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 4.4.3.5 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。
