

面向自动驾驶的线控转向系统机械结构设计与可靠性分析

张鹏 罗凯

江铃汽车股份有限公司

摘要: 线控转向系统作为自动驾驶汽车的关键执行部件,其机械结构设计与可靠性水平直接决定车辆行驶安全性与控制精度。本文针对自动驾驶应用场景对线控转向系统的特殊需求,系统分析机械结构的构型方案、传动机构设计及冗余配置策略,建立包含功能安全、故障容错与耐久性在内的可靠性分析框架。研究从结构设计角度提出面向失效安全的机械冗余方案,结合典型工况分析系统关键零部件的应力特征与失效模式,探讨结构参数对系统可靠性的影响规律。

关键词: 线控转向; 自动驾驶; 机械结构设计; 可靠性分析; 冗余配置

线控转向系统取消了方向盘与转向轮之间的机械连接,依靠电控单元与执行机构实现转向功能,为自动驾驶车辆的转向控制提供了灵活性与精确性。然而,机械连接的取消使得系统对结构可靠性与故障容错能力提出了更高要求。自动驾驶场景下,转向系统需在无驾驶员干预条件下独立完成转向任务,任何机械故障都可能导致严重安全事故。

1 线控转向系统机械结构的基本构成与功能要求

1.1 系统总体架构与组成单元

线控转向系统的机械结构主要由路感模拟单元、转向执行单元及安全冗余单元三大部分构成。路感模拟单元通过电机与减速机构产生模拟路感力矩,为驾驶员提供转向反馈,在自动驾驶模式下该单元可进入待机状态。转向执行单元是核心执行部件,由转向电机、传动机构与转角传感器组成,负责接收控制器指令并驱动车轮完成转向动作。安全冗余单元包括备用电机、离合器及备用电源等,在主系统失效时介入,确保系统仍具备基本转向能力。

1.2 自动驾驶场景对机械结构的特殊要求

自动驾驶应用对线控转向系统机械结构提出了区别于传统人工驾驶的特殊要求。在可靠性方面,系统必须满足功能安全标准对失效概率的严格限制,机械结构需具备故障后仍能保持基本转向功能的能力。在控制精度方面,自动驾驶系统对转角控制精度要求更高,机械传动机构的间隙与刚度直接影响控制响应的准确性与稳定性。在耐久性方面,自动驾驶车辆持续运行时间长,机械结构需承受更高频次的载荷循环,对材料与热处理工艺提出更高要求。在冗余设计方面,自动驾驶模式下驾驶员无法随时接管,机械结构必须具备足够容错能力,确保单点故障不导致完全转向失

效。

1.3 机械结构设计的关键技术指标

线控转向系统机械结构设计需围绕若干关键技术指标展开。转向响应延迟反映从指令发出到车轮开始转动的机械响应时间,延迟过大将影响自动驾驶控制回路的稳定性。传动间隙指转向电机输出与车轮转角之间的空行程,间隙的存在会引入控制死区,降低控制精度。系统刚度反映机械结构抵抗变形的能力,刚度不足会导致转向响应迟滞与定位偏差。承载能力指系统在极限工况下能够承受的最大转向力矩,需满足满载爬坡、原地转向等极端使用条件。工作寿命指标要求机械结构在整车生命周期内保持性能稳定,关键零部件的疲劳寿命需满足设计目标。

2 线控转向系统机械结构的关键部件设计与选型

2.1 转向电机选型与参数匹配

转向电机是线控转向系统的动力源,其选型直接影响系统性能与可靠性。永磁同步电机因其功率密度高、响应速度快、控制精度好而被广泛采用。电机选型需根据整车参数与转向需求确定额定扭矩与峰值扭矩。额定扭矩应满足常用工况下的转向需求,峰值扭矩需覆盖极限工况如原地转向时的最大阻力矩。电机转子惯量与传动系统惯量匹配影响系统的动态响应特性,惯量过大降低响应速度,过小则易引入高频振荡。电机绕组的耐热等级与散热设计决定电机持续工作能力,在连续转向工况下需确保绕组温度不超过绝缘等级允许范围。

2.2 传动机构构型与减速方案

传动机构将电机输出扭矩放大并传递至转向轮,其构型选择与减速方案设计是机械结构设计的核心内容。行星齿轮减速机构因结构紧凑、传动比大、承载

能力强而广泛应用于线控转向系统。该构型采用太阳轮输入、行星架输出、齿圈固定的传动方式,可在有限空间内实现较高的减速比。传动机构的设计需重点关注齿轮副的侧隙控制,侧隙过大会引入传动空程,影响控制精度;侧隙过小则可能导致齿轮卡滞或效率下降。蜗轮蜗杆减速机构具有自锁特性,在断电情况下能够保持转向轮位置,提供一定的安全冗余,但其传动效率相对较低。谐波减速机构具有零背隙、高精度的特点,适用于对控制精度要求极高的高端应用,但对制造工艺与材料要求较高。

2.3 转向执行机构的结构形式

转向执行机构将传动机构的旋转运动转化为车轮的转向运动,主要包括齿轮齿条式与循环球式两种结构形式。齿轮齿条式结构简单、传动效率高、响应直接,适用于乘用车平台。齿条与齿轮的啮合间隙需进行精确控制,间隙过大导致转向空行程,间隙过小增加摩擦阻力。齿条支撑轴承的刚度设计影响系统整体刚度,支撑不足会导致齿条弯曲变形,影响传动精度。循环球式结构承载能力强、工作平稳,适用于商用车或重型车辆平台。该结构通过钢球在螺杆与螺母之间的循环滚动实现传动,具有较高的传动效率与较长的使用寿命。转向横拉杆与转向节臂的连接设计需考虑运动学匹配,确保车轮转向过程中主销参数在合理范围内变化。

3 面向失效安全的机械冗余结构设计

3.1 冗余架构的分类与选择

机械冗余是保障线控转向系统功能安全的核心手段,根据冗余层级可分为部件冗余与系统冗余两类。部件冗余指在关键部件上设置备份,如采用双绕组电机、双位置传感器等,当主部件失效时自动切换至备份部件。系统冗余指设置两套独立的转向执行系统,每套系统均具备完整的转向功能,当主系统失效时备用系统完全接管。部件冗余结构紧凑、成本相对较低,适用于对空间要求严格的乘用车平台。系统冗余可靠性更高,但占用空间大、成本高,适用于全自动驾驶等级要求较高的车型。冗余架构的选择需结合目标自动驾驶等级、整车布置空间与成本目标综合确定。

3.2 双电机冗余结构设计

双电机冗余结构采用两台电机并联驱动同一传动机构的设计方案。两台电机通过离合器与传动机构连接,正常工作状态下主电机工作,备用电机处于待机状态。当主电机发生故障时,控制系统迅速接合备用电机离合器,使备用电机投入工作,实现不间断转向输出。双电机方案的关键在于离合器设计,离合器需

具备响应速度快、接合平稳、可靠性高的特点。电磁离合器响应迅速、控制简单,适用于快速切换需求。湿式多片离合器接合冲击小、寿命长,适用于高频切换场景。两台电机的参数匹配需考虑一致性,避免因性能差异导致切换瞬间输出突变。电机的热管理设计需兼顾备用电机长期待机状态下的热平衡。

3.3 机械离合器与解耦装置设计

机械离合器与解耦装置用于实现故障状态下的系统切换与机械隔离。在冗余结构中,离合器负责断开故障部件与传动系统的连接,防止故障部件卡滞拖累正常部件工作。离合器设计需考虑脱开后的彻底解耦,确保脱开后无残余扭矩传递。解耦装置的形式包括牙嵌式离合器、摩擦式离合器与单向离合器。牙嵌式离合器脱开后无相对转动摩擦,但接合时需满足严格的相位同步要求。摩擦式离合器可实现任意相位接合,但脱开后存在微小残余摩擦扭矩。单向离合器允许单向自由转动,适用于特定故障模式下需要自由转动脱离的场合。解耦装置的控制需与系统故障诊断联动,在检测到故障后毫秒级时间内完成解耦动作,保障备用通路快速启用。

4 机械结构可靠性分析与失效评估

4.1 关键零部件应力分析与强度校核

关键零部件的应力分析与强度校核是可靠性评估的基础工作。齿轮作为传动机构的核心零件,在转向过程中承受交变弯曲应力与接触应力。齿根弯曲应力随负载变化而周期性变化,长期作用可能引发疲劳断裂。齿面接触应力在啮合过程中反复作用,可能导致齿面点蚀与剥落。有限元分析可用于获取齿轮在实际工况下的应力分布特征,识别高应力区域与应力集中位置。转向电机输出轴承受扭矩与弯矩的复合作用,在急转与回正工况下承受冲击载荷。轴的强度校核需考虑静强度与疲劳强度两个方面,对于应力集中的轴肩部位需进行圆角优化。壳体结构承受来自内部传动部件的反作用力,其刚度直接影响齿轮啮合精度与轴承定位稳定性。

4.2 典型工况下的失效模式分析

线控转向系统在不同工况下呈现不同的失效模式,需针对典型工况开展失效分析。原地转向工况下,系统承受最大转向阻力矩,电机输出扭矩达到峰值,传动机构承受最高载荷,齿轮与轴承面临极限应力状态。该工况下的失效模式包括电机过载烧毁、齿轮断齿及轴承压溃。高速直线行驶工况下,系统承受小角度频繁修正载荷,电机与传动机构处于高频次、小幅值循环工作状态,主要失效模式为齿轮磨损与电机轴

承疲劳。连续弯道工况下,系统承受持续变化的转向力矩,电机绕组温升显著,绝缘材料老化加速,是电机热失效的主要场景。

4.3 可靠性指标分配与寿命预测

可靠性指标分配需根据系统功能安全目标,将整系统可靠性要求分解至各机械部件。关键部件如转向电机、传动齿轮、离合器等失效概率需严格控制,分配时需考虑部件的技术成熟度与失效后果的严重程度。寿命预测基于零部件疲劳特性与载荷谱数据进行。齿轮寿命预测采用名义应力法与局部应力应变法相结合的方式,基于材料S-N曲线与载荷谱计算累积损伤,确定齿轮的安全寿命。轴承寿命预测依据轴承基本额定动载荷与实际当量动载荷计算,考虑润滑条件与清洁度对寿命的影响。

5 结构优化与系统集成验证

5.1 结构轻量化与紧凑化设计

结构轻量化与紧凑化设计是线控转向系统机械结构优化的重要方向。轻量化通过材料替代与结构拓扑优化实现,高强度铝合金替代传统铸铁可显著降低壳体质量,碳纤维复合材料在非承载部件上的应用进一步减轻系统重量。拓扑优化在给定约束条件下寻求最优材料分布,去除冗余材料,使结构在满足刚度与强度要求的前提下质量最轻。紧凑化设计体现为电机与减速机构的高度集成,采用电机轴与齿轮轴一体化设计,取消联轴器与中间支撑,缩短轴向尺寸。执行机构与转向器的集成将转向电机与齿轮齿条机构整合为单一模块,减少连接件数量,提升系统整体刚度。

5.2 系统集成中的接口匹配

机械结构与控制系统、整车的接口匹配是系统集成验证的关键环节。机械接口包括与转向节的连接方式、与副车架的安装点布置以及与电控单元的安装位置。转向节连接需保证足够的连接刚度,避免连接松动引入控制偏差。安装点设计需考虑装配工艺的可行性,预留调整空间以补偿制造公差。电气接口包括电机电源线、传感器信号线与控制单元连接器的布置,线束走向需避开高温区域与运动干涉区域,同时考虑电磁兼容要求。热接口设计需规划电机与控制单元的

散热路径,确保在持续工作工况下温度在允许范围内。接口匹配验证需通过台架试验与整车搭载试验完成,验证装配工艺性与系统功能兼容性。

5.3 台架试验与耐久性验证

台架试验是验证机械结构可靠性的重要手段,通过模拟实际使用工况对系统进行加速测试。功能性能试验验证系统在不同输入条件下的转角响应、传动效率与滞后特性,测试涵盖常温工况与极限温度工况。疲劳耐久试验按照标准工况谱对系统施加循环载荷,考核零部件在长期使用条件下的疲劳寿命。疲劳试验过程中需定期检测传动间隙变化、效率衰减及噪声水平,评估性能退化趋势。环境适应性试验包括高低温存储、湿热循环、盐雾腐蚀及振动冲击试验,验证结构在不同环境条件下的稳定性。故障注入试验模拟电机失效、传感器失效与电源中断等故障模式,验证冗余结构在故障条件下的响应能力与功能保持能力。试验结果用于设计迭代优化,确保机械结构满足整车生命周期的可靠性要求。

6 结束语

线控转向系统机械结构设计与可靠性分析是保障自动驾驶转向安全的关键技术领域。本文从系统架构、关键部件设计、冗余配置、可靠性评估及优化验证等方面系统分析了线控转向机械结构的技术特征与设计要点。机械结构设计与控制策略的深度耦合是提升系统整体性能的发展方向,未来研究应进一步关注结构轻量化、集成化以及智能故障诊断技术在工程应用中的深化。

参考文献:

- [1] 陈慧. 线控转向系统机械冗余结构设计与可靠性分析[J]. 汽车工程, 2022,44(5):712-720.
- [2] 崔晓楠. 面向自动驾驶的线控转向系统功能安全设计与验证[J]. 中国公路学报, 2023,36(3):245-256.
- [3] 孟德建. 汽车线控转向系统关键零部件疲劳寿命预测方法研究[J]. 机械工程学报, 2021,57(12):178-188.
- [4] 王春燕. 线控转向系统双电机冗余结构协同控制策略[J]. 机械科学与技术, 2023,42(7):1052-1060.
- [5] 殷承良. 自动驾驶汽车线控底盘关键技术发展综述[J]. 上海交通大学学报, 2022,56(1):1-12.