

无人驾驶方程式赛车转向与制动系统结构设计

吴芳兰

(广西科技职业学院)

DOI: 10.65285/ZRKXLT.V1I1.003

摘要: 电动助力转向 (EPS) 系统是实现自动驾驶的关键执行机构之一。针对大学生无人驾驶方程式赛车比赛要求, 设计了一套在不改变原车转向与制动结构前提下工作的自动转向与制动系统。转向系统在原机械转向机构基础上增加双齿轮齿条并联机构, 由工业舵机 H54-100-S500-R 经电磁离合器驱动, 实现有人/无人驾驶模式切换; 制动系统采用 57 步进电机驱动齿轮齿条, 并通过电磁铁与制动踏板连接。完成了关键零部件选型、强度校核及 NX 三维建模与装配。系统结构紧凑, 与原车机构无机械干涉, 满足赛事规则及强度要求。

关键词: 无人驾驶方程式赛车; 转向机构; 制动机构; 齿轮齿条; 电机

Structural Design of Steering and Braking Systems for Autonomous Formula Racing Cars

Fanglan Wu

Guangxi Vocational College of Science and Technology

Abstract: The electric power steering (EPS) system is one of the core actuators for autonomous driving. According to the technical requirements of the student autonomous formula racing competition, an automatic steering and braking system is designed without changing the original steering and braking structures of the racing car. On the basis of the original mechanical steering mechanism, the steering system is equipped with a dual parallel rack-and-pinion structure, which is driven by the industrial servo H54-100-S500-R through an electromagnetic clutch to realize mode switching between manned driving and unmanned autonomous driving. The braking system adopts a 57-series stepper motor to drive the rack-and-pinion mechanism and connects with the brake pedal through an electromagnet. Key component selection, structural strength verification, and 3D modeling and assembly are completed based on NX software. The proposed system features a compact structure and no mechanical interference with the original vehicle mechanism, which fully meets the competition rules and structural strength requirements.

Keywords: autonomous formula racing car; steering mechanism; braking mechanism; rack-and-pinion; motor

前言:

智能驾驶是汽车工业的重要发展方向。无人驾驶方程式赛车的赛事平台提供了一个独特的机会来测试无人驾驶交通工具所需的软件和机构, 如冗余感知、故障检测和可以在具有挑战性的条件下对机构和控制进行检测^[1]。自动转向执行机构主要包括液压、气动和机电三种形式。液压驱动需要额外布置液压泵及管路, 座舱空间受限; 气动驱动响应速度与控制精度较低, 难以满足转向要求; 机电式驱动因结构紧凑、控制精度高而被广泛采用, 可分为旋转执行器和直线执行器两类。为在保留原车机械结构的前提下实现线控转向与制动, 本文采用齿轮齿条传动方案, 对自动转向与制动系统进行设计、选型与强度校核, 并建立三维装配模型。

一、转向系统设计

(一) 结构与原理

西南交通大学聂哲俊在原有的基础上增加了一套行星齿轮结构, 机械转向结构增加了新的转向功率输入, 用双驱动电机控制涡轮蜗杆结构实现主动转向和动力转向的自

锁功能, 提高了车辆驾驶的安全性^[2]。

吴小邦、刘江等人在没有改变消防车的原转向结构基础上, 在转轴上装上驱动齿轮, 实现主动控制, 转向功能当需要将转向系统转换为手动操舵时齿轮连接需要断开^[3]。

辽宁工业大学李刚和张旭斌等人通过设计了双齿轮齿条结构, 一个用于原机械转向盘输入, 另一个用于线控主动转向机动转向装置实现主动转向, 并提供了一个无人驾驶赛车的线路控制主动转向系统方案^[4]。北京理工大学潘博等人设计了一种双齿面齿轮齿条结构, 从而提供了一种新的齿轮架结构, 提供了一种新的转向输入端给转向电机进行驱动。

本文章的转向机构保留原车机械转向系统, 在其基础上增加双齿轮齿条并联机构, 形成驾驶员方向盘输入与转向电机输入两种动力源。两齿条通过传动销机械并联, 由转向限位块固定在转向底板上。转向电机经电磁离合器、齿轮驱动齿条, 进而带动横拉杆实现车轮转向。有人驾驶时离合器断开, 消除电机附加阻力; 无人驾驶时离合器结合, 由电机实现主动转向, 如图 1 所示。

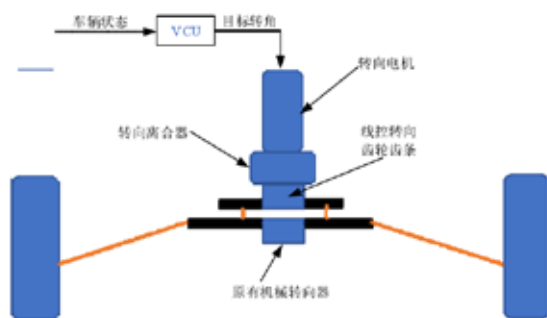


图1 无人驾驶赛车线控转向结构

(二) 参数设计与电机选型

赛车整车质量 234kg，轴距 1565mm，方向盘直径 230mm。原地转向时方向盘最大阻力 $F=113\text{N}$ ，考虑摩擦余量后取 $F=133\text{N}$ ；方向盘半径 $r=0.23\text{m}$ ，计算转矩 $M_0=Fr=30.59\text{Nm}$ ，取安全系数 1.5，得设计转矩 $M=45.885\text{Nm}$ 。齿轮齿条传动比为 4，要求车轮角速度大于 $30^\circ/\text{s}$ 。

表1 无人方程式赛车基础设计参数

赛车整体质量	234kg
轴距	1565mm
前后配重	45:55
方向盘直径	230mm
前 / 后侧偏刚度	228/270.1

综合考虑安装空间、控制精度与输出转矩，选用工业舵机 H54-100-S500-R 作为转向电机，其主要参数见表 2。该电机输出扭矩 25.3Nm，转速 29.2rpm，减速比 501.9:1，分辨率 $0.0004^\circ/\text{脉冲}$ ，通信接口 RS-485，可满足转向精度要求。

表2 工业舵机 H54-100-S500-R 参数

扭矩 [Nm]	转速 [rpm]	电流 [A]	电压 [V]	分辨率 $[\circ/\text{脉冲}]$	传动比
25.3	29.2	5.5	24.0	0.0004	501.9:1

(三) 参数设计与电机选型

传动齿轮选用斜齿圆柱齿轮，压力角 $\alpha=20^\circ$ ，初选螺旋角 $\beta=15^\circ$ ，8 级精度；小齿轮材料为 45 钢正火，齿面硬度 162~217HBS。分别按齿面接触疲劳强度和齿根弯曲疲劳强度进行设计并调整，最终确定：齿数 $z_1=15$ 、 $z_2=18$ ，模数 $m_n=2\text{mm}$ ，螺旋角 $\beta=19.438^\circ$ ，中心距 $a=35\text{mm}$ ，齿宽 $B_1=30\text{mm}$ 、 $B_2=25\text{mm}$ ，主要几何尺寸见表 3。强度校核表明，齿面接触疲劳强度和齿根弯曲疲劳强度均满足要求。

表3 齿轮主要几何尺寸

名称和代号	计算公式	小齿轮	大齿轮
中心距 a	—	35mm	35mm
齿数 z	—	15	18
模数 m	—	2mm	2mm
齿宽 B	—	30mm	25mm
螺旋角 β	—	左旋 19.438°	右旋 19.438°
齿顶高 h_a	$m \times h_a^*$	2mm	2mm
齿根高 h_f	$m \times (h_a^*+c^*)$	2.5mm	2.5mm
分度圆直径 d	—	29.692mm	38.176mm
齿顶圆直径 d_a	$d+2 \times h_a$	33.692mm	42.176mm
齿根圆直径 d_f	$d-2 \times h_f$	24.692mm	33.176mm

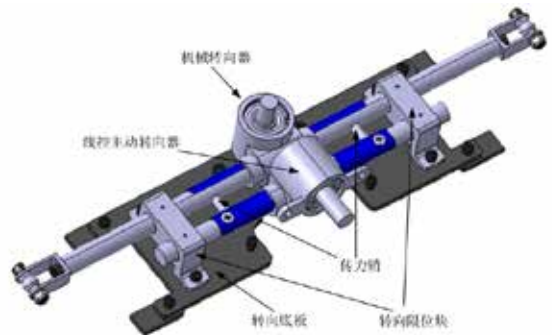


图2 双齿轮齿条机构三维模型

(四) 离合器与电位器选型

根据电机输出轴尺寸及转矩要求，选用 DLD6-40/B 型电磁离合器，额定扭矩大于电机最大扭矩 25.3Nm。为保证有人 / 无人驾驶切换后转向角度复位的准确性，在齿轮轴上安装线绕电位器 M22S10，测量范围 3600° ，阻值 100Ω ，可覆盖赛车最大转向角 240° ，通过反馈校正消除转向误差。

(五) 传动力校核

由齿条上转向柱力测试曲线（图 3）可知，最大转向柱力取 $F=197\text{N}$ 。电机转矩 $M=25.3\text{Nm}$ ，电机到中间齿轮的距离为大齿轮分度圆直径 $L=42.176\text{mm}$ ，电机作用在中间齿轮上的力 $F=M/L=602.38\text{N}$ ，大于最大转向柱力，故转向机构能够可靠驱动车轮转向。

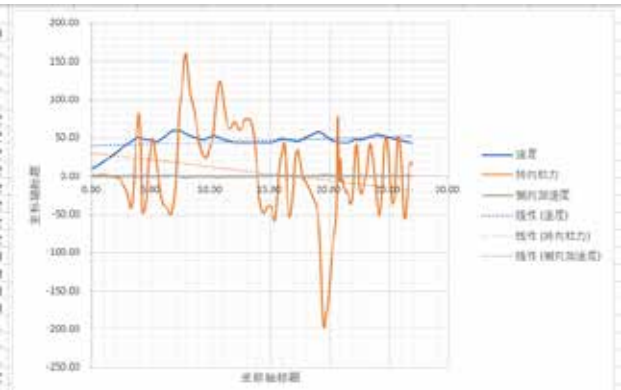


图3 转向柱力关系曲线

二、制动系统设计

(一) 方案分析

中国大学生无人驾驶赛事规则要求赛车保留原有制动结构。在不改变原制动系统的前提下,增加齿轮齿条传动机构和电磁铁连接装置。有人驾驶时电磁铁断电,齿条与制动踏板分离;无人驾驶时电磁铁通电,齿条与踏板吸合,电机通过齿轮齿条下压制动踏板实现制动。原车制动机构如图4所示。

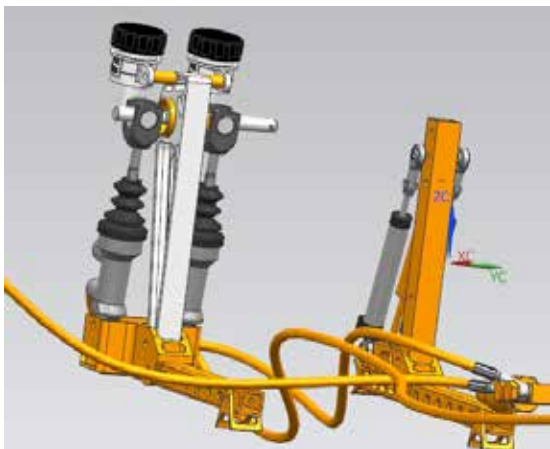


图4 赛车原有制动机构

(二) 齿轮齿条设计与计算

试验测得赛车四轮完全抱死所需最大踏板力 $F=390\text{N}$, 有效踏板行程角度 0.181rad (约 11°)。制动机构选用直齿圆柱齿轮齿条传动, 7级精度; 小齿轮材料为 40Cr 调质 (280HBS), 齿条材料为 45 钢调质 (240HBS)。分别按齿面接触强度和齿根弯曲强度计算, 取模数 $m=6\text{mm}$; 同时验证 $m=2\text{mm}$ 、 $d=32\text{mm}$ 的齿轮亦满足强度要求。制动齿轮几何尺寸如图5所示。

参数输入			
齿数:	16	变位系数:	
模数:	2	齿顶高系数 h_{an} :	1
压力角:	20	径向间隙系数 c_{an} :	0.25
螺旋角:	0	☒ 计算跨齿数 ☐ 自选跨齿数	
计算 OK			
结果输出			
分度圆直径 d :	32	分度圆弧齿厚 S_n :	3.142
基圆直径 d_b :	30.07	跨齿数 k :	2
基圆螺旋角 B_b :	0	公法线长 W_k :	9.305
齿顶高 h_a :	2	量棒直径 d_p :	3.464
齿根高 h_f :	2.5	跨棒距 M_k :	36.78
全齿高 h :	4.5	固定弦齿厚 S_c :	2.774
齿顶圆直径 d_a :	36	固定弦齿高 h_c :	1.495
齿根圆直径 d_f :	27		

图5 制动齿轮几何尺寸

(三) 制动电机确定

电机输出轴与制动踏板连接板距离 $L=0.016\text{m}$, 取安全系数 1.5, 最大制动转矩 $M_{\max}=1.5FL=3.12\text{Nm}$ 。系统响应时间 $t=200\text{ms}$, 所需最小车速 16rad/min , 减速器传动比 20。当电机最大转矩为 1.35Nm 时, 所需转速约 320rad/min 。选用 57 步进电机, 功率 150W , 极限转速 1000rad/min , 最大转矩 2.2Nm , 满足制动条件。

(四) 总装

制动系统由原有制动机构、57 步进电机、齿轮齿条、电磁铁和联轴器组成, 在 NX 环境下完成三维建模与装配, 如图6所示。

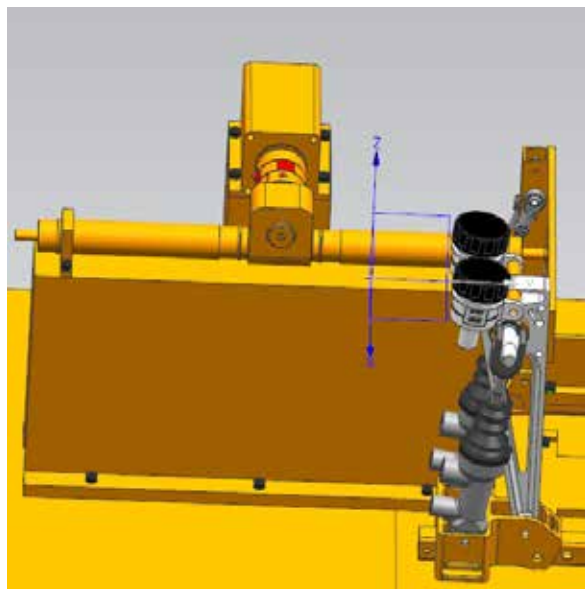


图6 线性制动系统总装

三、系统安装

(一) 转向系统安装

驾驶舱空间有限, 转向系统采用竖直布置, 齿轮、离合器与电机通过支架固定, 不改变原车转向机构。双齿轮齿条与原有齿条平行布置, 通过传动销机械并联, 实现两种转向动力的切换, 如图7所示。

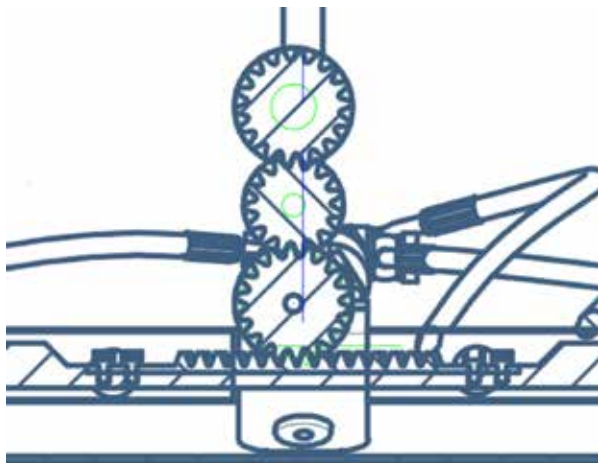


图7 齿轮齿条安装位置

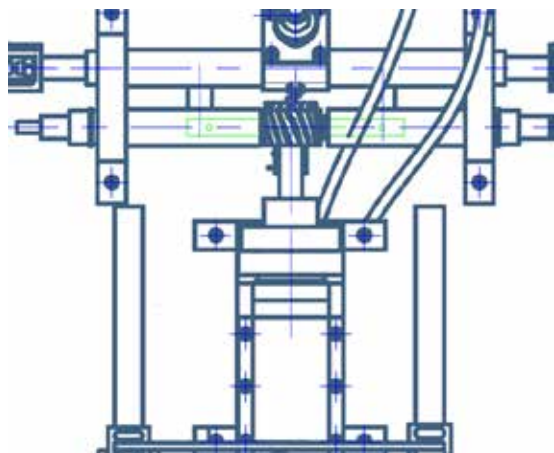


图 8 线性转向系统整体安装

（二）制动系统安装

制动踏板与地板之间存在间隙，设计专用支架支撑并固定电机和齿轮齿条机构。齿条与踏板之间通过电磁铁连接，无人驾驶模式通电吸合，有人驾驶模式断电分离，避免相互干扰，如图 9 所示。

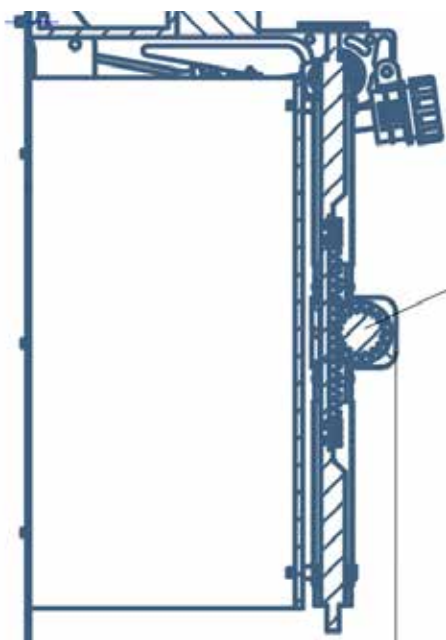


图 9 制动系统安装

结语：

针对大学生无人驾驶方程式赛车，完成了自动转向与制动系统设计。转向系统在原机械转向机构基础上增加双齿轮齿条并联机构，由工业舵机 H54-100-S500-R 经电磁离合器驱动，实现有人 / 无人驾驶模式切换；制动系统由 57 步进电机驱动齿轮齿条，并通过电磁铁与制动踏板连接。关键零部件已完成选型、强度校核及 NX 三维建模与装配。系统结构紧凑，与原车机构无机械干涉，满足赛事规则及强度要求。

参考文献：

- [1] 李理光. 中国大学生方程式汽车大赛规则 [S]. 北京：中国汽车工程学会, 2017.
- [2] 聂哲俊. 城市电动快速公交车辆智能转向控制及轨迹跟踪仿真分析 [D]. 成都：西南交通大学, 2018.
- [3] 吴小邦, 刘江, 徐先良, 等. 消防车自动转向集成控制装置 [P]. 中国专利, 102092415.2011-06-15.
- [4] 李刚, 张旭斌, 佟绍成, 等. 一种无人驾驶电动赛车线控转向系统 [P]. 中国专利.

作者简介: 吴芳兰(1999.04-), 女、汉族、广西省南宁市、本科学士、研究方向：机械设计、系统设计、智能制造。