

# 基于阿克曼转向模型的多轮驱动电子差速研究

边林<sup>1</sup> 刘秀文<sup>2</sup> 张杰<sup>3</sup>

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司信息中心 宁夏银川 750011

**摘要:** 本文基于Ackermann阿克曼转向控制模型, 提出一种采用电子差速装置的电子驱动平台概念设计, 并研究了一种多轮独立驱动的电子差速算法, 从而为未来的电子驱动平台设计提供一种全新的方向。

**关键词:** 电子差速; 轮式机器人驱动平台; Ackermann模型; 电子差速算法

## 1. 背景

随着汽车工业以及商用机器人业对于轮式电动驱动平台需求的不断提升, 其适用性、可靠性的要求不断提高, 必然导致传动、差速、变速结构的复杂度成倍增加。因此, 一种高自由度的、结构简单驱动平台设计已然成为现代工业设计追寻的目标。

相比于以往的机械式差速装置以及差速锁而言, 电子差速锁EDS (Electronic Differential System) 的出现是对差速系统驱动力分配的一种全新设计。它是ABS的一种扩展功能, 用于鉴别汽车的驱动轮是否失去有效摩擦力。总体而言, 仍是一种被动式差速锁方式, 弊端也是显而易见的: 其无法做到精确匹配驱动力分配。

因此, 逐渐摆脱原有变速减速、机械差速装置的束缚, 以集成化、一体化电子变速、差速结构为未来发展方向。本案设计就是基于这种背景下设计的一种电子差速系统, 它由多级直驱电机、高精度编码器(里程计)、数字型电机驱动、集成微控制器车载ECU组成。可以解决现在轮式机器人、电动汽车等需要多轮驱动底盘的动力分配、转向的电子差速需要。

## 2. 研究概述

作为目前电子驱动平台而言, 全轮组驱动(也称全驱动)的发展正逐步被各厂商、研究机构所关注, 因为其较高的环境适应性, 在大坡度、湿滑、沙化等低附着地面应用广泛, 并且正逐步推广实际应用当中。为了实现该设计, 采用主动式的电子差速(动力分配)系统相比老式机械式系统, 有更高的瞬时反应及控制稳定性, 正逐渐成为一种主流的一种设计概念。

本文研究内容基于Ackermann阿克曼转向控制模型,

其也是如今电子驱动平台设计现在通用方案之一, 其原理在于速度型电子差速控制策略。以转向轮转向角 $\delta$ 和目标车速 $V_{x\_tar}$ 为模型输入, 计算出各车轮理论轮速 $V_{i\_ref}$ , 理论轮速与实测各轮轮速 $V_i$ 的差值控制反馈变量, 使用控制模型计算电机输出转矩, 使实际轮组转速更加符合理论控制<sup>[1]</sup>。因其模型主要为概念性模型, 因此, 如何设计简便高效的算法就成为难题之一。

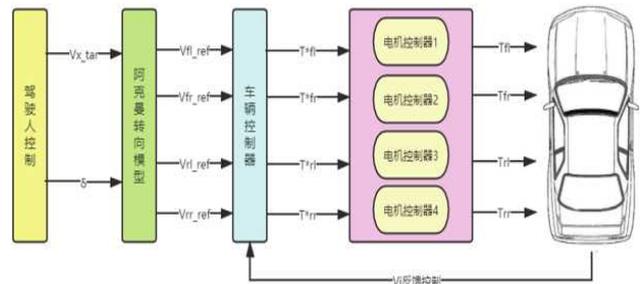


图1 Ackermann阿克曼转向控制模型

在未考虑车辆结构灵活性的情况下, 部分研究以无刷直流电机<sup>[2]</sup>或自感应电机<sup>[3]</sup>为驱动电机建立了便于实验的电子差速平台, 验证了电子差速系统的综合可行型。为了进一步提高电子差速系统的性能。本文基于此提出了一种驱动平台设计, 为算法设计的便利, 下文提供了4轮独立驱动模型。但是, 该驱动模型算法同样适用于多转向轮、多驱动轮的多轮组驱动平台。如图2所示, 驱动模型设计采用了多级调速电机、ECU计算单元等, 以下对主要组成构件进行简单的描述。



图2 装置结构组成设计

**作者简介:** 边林, 198410, 汉族, 男, 山东郓城, 国家能源集团宁夏煤业有限责任公司信息技术中心, 网络技术人员, 高级工程师, 研究生, 邮编: 750011, 机器人及网络通信技术, Email: xecotykew@msn.com。

本方案设计采用ECU (Electronic Control Unit 车载电子控制单元) 来进行数据处理和控制信号输出, 其优点在于技术成熟可靠, 现有技术已可以完成本方案中算力要求, 其集成度更高, 且可使用同缓存RTOS (Real Time Operating System 实时系统) 控制, 满足高速数据计算与控制的要求。其接收来自编码器、IMU、压力传感器等传感器数据, 输出电机驱动器控制数据, 其可以采用集成PID电子差速控制算法, 使驱动电机输出转矩变化更平稳<sup>[4]</sup>。

### 3. 系统基本算法简述

该设计方案基本算法适用于多轮驱动平台, 以下仅使用四轮驱动平台进行描述, 但该方案同样适用于6轮、8轮等多种含转向轮组的多轮独立驱动平台。下图举例一种四轮驱动平台的转向移动轨迹示意, 如图3所示:

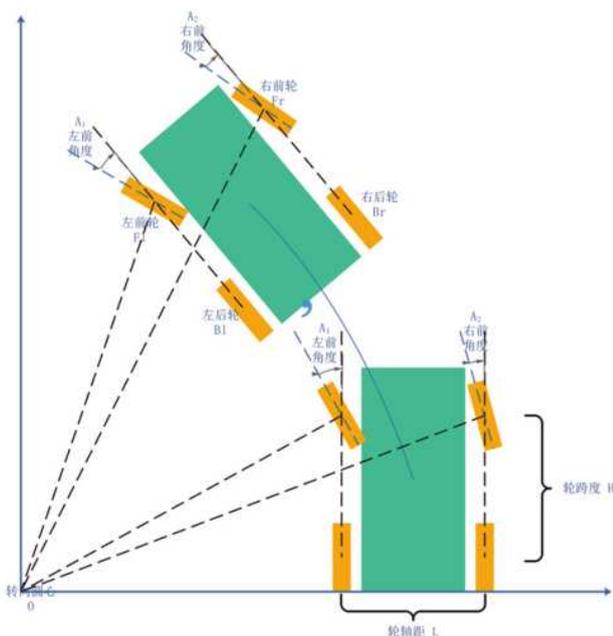


图3 车辆移动轨迹示意图

这其中: 左前轮转向角度, 以下以  $A_1$  表示该角度; 右前轮转向角度, 以下以  $A_2$  表示该角度; 四轮驱动平台的左前轮、右前轮、左后轮、右后轮, 以下计算中使用  $Fl$ 、 $Fr$ 、 $Bl$ 、 $Br$  来指代四个轮组名称; 车辆转向圆心位置, 以下使用  $O$  表示该位置; 车辆纵向轮轴距, 以下使用  $H$  表示该数值; 车辆横向轮跨度, 以下使用  $L$  表示该数值。

本算法原理采用最接近圆心的转向轮组 (上图为左前轮) 瞬时线速度为基础速度  $V_0$ , 其原因在于便于解释推算, 其可以使用车辆转向时的其他基准点作为基础速度值, 并不影响整体的原理推导。

由此, 可以得出各轮组在二维状态下的瞬时线速度关系 (角速度相同), 使用  $V_i$  表示各轮组目标车速  $V_{x\_tar}$ , 其中  $i$  为  $Fl$ 、 $Fr$ 、 $Bl$ 、 $Br$ ; 使用  $A_x$  表示转向角角度  $\delta$ ,

其中  $x$  为 1、2 (或在多转向轮情况下的其他转向轮转向角度):

$$V_{Fl} = \frac{c \sin A_1}{c \sin A_1} V_0; \quad V_{Fr} = \frac{c \sin A_2}{c \sin A_1} V_0;$$

$$V_{Bl} = \frac{c \tan A_1}{c \sin A_1} V_0; \quad V_{Br} = \frac{c \tan A_2}{c \sin A_1} V_0;$$

使用  $G$  表示转向角函数, 其可以简单表示:

$$V_i = G(A_x) V_0 \quad (1)$$

不难得出各轮组的瞬时目标转速  $RPM_i$ , 这其中  $q$  参数表示在真实环境下轮组传动、传感器误差、路面角度等参数的补偿, 这里不做详细描述:

$$RPM_i = V_i \cdot q_i \quad (2)$$

由于基础速度可由里程编码器实时获得 (其他基准点时可由相应附加传感器获取), 可以得出轮组瞬时转速变化的偏导函数依然与  $G$  的偏导相关。因此, 可以得出各轮组动力分配应符合, 这其中  $q$  表示误差补偿 (可由 IMU 辅助计算),  $m$  表示平台质量常数,  $w$  表示电机驱动力常数:

$$F_i = \partial G(A_x) \cdot q_i \cdot m + w_i \quad (3)$$

至此, 我们可以精确地计算出平台转向过程中, 每一个轮组适时转速与匹配驱动力的一个空间集合, 可以记作:

$$\phi_i = [RPM_i, F_i] \quad (4)$$

而在真实环境下, 多级调速电机的转速、驱动力是符合反比关系的, 但并非所有的品牌的型号都是相同的, 而且其空间集合通常并非一个完全平滑的函数曲线。

这里, 我们可以将其记作真实电机驱动力空间, 其中  $RPM_{Ri}$ ,  $F_{Ri}$  表示该空间中每个转速对应的驱动力:

$$\lambda_i = [RPM_{Ri}, F_{Ri}] \quad (5)$$

由此可见, 当车辆或者轮式平台在行驶、转向时, 其轮组动力分配和转速调整应符合转向角度、电机动力曲线的相应关系。因此, 应根据车辆各轮组里程编码器数据、转向编码器数据为基础, 来调节误差修正  $q$  参数、电机驱动力  $w$  参数来使两个转速、驱动力空间尽量契合。从而得到精确的轮组转速  $RPM$  和动力分配  $F$ , 最终达到完美的差速和动力分配闭环控制的要求。

所以, 本方案算法将其简化为一个寻找最优化解的过程:

$$\text{设: } \gamma_i = | \lambda_i - \phi_i |$$

$$\text{Ext. min } \gamma_i \quad \begin{cases} \lim q = 1 \\ \lim w = 0 \\ 0 < q \leq 1 \\ 0 < w < F_{Ri} \end{cases}$$

#### 4. 结论及展望

本文所设计的电子驱动平台系统可实现多轮组的独立控制和反馈,提高了平台设计的自由度,增加了平台动态可调整范围,为未来电子驱动的发展助力。但同时,也对平台安全性和稳定性提出了设计上的挑战。本文通过提高电机驱动速度的控制精度,针对原阿德曼模型提出了新型的算法设计,提高了反馈计算新概念,从而提高了整体稳定性。但作为一种算法而言,其发展的方向是不确定且多变的,在现如今相关的研究中,存在了很多的优化方向:

比如以Takagi-Sugeno模糊神经网络理论为基础,将模糊神经网络调速算法用于电子差速控制系统的研究<sup>[5]</sup>,可以使驱动轮的实际转速和理论转速的误差大幅降低;又比如径向基神经网络(RBNN)的电子差动系统的参数估计方法,采用RBNN和反向规划前馈神经网络(BP-FFNN)来估计用户端转向角和油门的配合控制<sup>[6]</sup>。本文将在下一步的研究中,进一步地对此类基于神经网络算法进行优化,从而在驱动平台的稳定性和算法便利性上进行深入研究。

#### 参考文献:

[1]唐丛辉.基于电子差速的4WID电动汽车轮毂电机

协调控制研究[D].西安理工大学,2020.

[2] Yildirim M, Öks ü ztepe E, Tanyeri B, et al. Design of Electronic Differential System for an Electric Vehicle with in-wheel motor[C]//2016 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), Urbana, Usa: IEEE, 2016: 1-5.

[3] 祁新梅, 郑寿森, 付青. 电动汽车后轮轮毂电机驱动的操纵控制[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2019, 58(1): 83-90.

[4] 李多扬, 王军政, 马立玲, 等. 轮足机器人全轮转向电子差速控制方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(5): 1140-1146.

[5] 陈永飞, 雷良育, 潘汉明. 基于Takagi-Sugeno模糊神经网络的电子差速控制系统[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(3): 30-35.

[6] Yildirim M, Catalbas MC, Gulden A, et al. Modelling and estimation parameters of electronic differential system for an electric vehicle using radial basis neural network[C]//2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence, Italy: IEEE, 2016: 1-5.