

---

# 分布式驱动电动汽车直接横摆力分析

## 摘 要

汽车行业的迅速发展促进了交通的便利和经济的繁荣，与此同时环境污染、石油危机以及交通安全等问题也随之而来。为迎合时代发展潮流，人们开始推广新能源汽车，其中，四轮独立驱动电动汽车的直接横摆力矩稳定性控制技术是热门领域之一。

本文首先对四轮驱动电动汽车整车模型建模展开分析。在CarSim软件中完成包括对车身、传动、悬架等系统的建模。同时，基于MATLAB/Simulink搭建四轮驱动电机模型和车速控制器，并建立了线性二自由度模型。

进而研究车辆的稳定性，选用横摆角速度和质心侧偏角两种评定车辆稳定性的参数作为本文的控制变量，设计了基于滑模控制策略的上层控制器计算附加横摆力矩，并引入模糊控制策略与之对比；下层控制器采用平均分配方法。

最后进行高速低附着工况的双移线仿真实验。结果显示，滑模控制系统对横摆角速度和质心侧偏角的跟踪效果最好，对参数峰值的削弱最明显，尤其是工况条件恶劣的情况，模糊控制的效果相较于滑模控制较差，滑模控制下的车辆稳定裕度较高。

**关键词：** 分布式驱动，直接横摆力矩控制，滑模控制，平均分配

---

# Direct balancing force analysis of distributed drive electric vehicle

## Abstract

The rapid development of the automotive industry has promoted the convenience of transportation and economic prosperity, while environmental pollution, oil crises and traffic safety problems have also followed. In order to meet the development trend of the times, people began to promote new energy vehicles, among which the direct pendulum torque stability control technology of four-wheel independent drive electric vehicles is one of the hot areas.

In this thesis, the model of four-wheeled electric vehicle is first analyzed. Completed in Carsim software, including the modeling of the body, transmission, suspension and other systems. At the same time, based on MATLAB/Simulink, a four-wheel hub motor model and a vehicle speed controller were built, and a linear two-degree-of-freedom model was established.

In addition, the stability of the vehicle was studied, and the two parameters of evaluating the stability of the vehicle were selected as the control variables of the thesis, and the top controller based on the sliding mode control strategy was designed to calculate the additional pendulum moment, and the fuzzy control strategy was introduced to compare it. The underlying controller realizes the optimal distribution of four rounds of torque based on the quadratic programming algorithm.

Finally, the simulation experiment of double-shifting line of high-speed high adhesion condition and high-speed low attachment limit condition is carried out. The results show that the sliding mode control system has the best tracking effect on the swing angle speed and the center of mass lateral declination, and the weakening of the peak of the parameters is the most obvious, especially in the case of the harsher the working conditions, the effect of the fuzzy control is poorer than the sliding mode control, and the vehicle stability margin under the sliding mode control is higher.

---

**Key Words:** four-wheel independent drive, Direct Yaw moment Control, hub motor, sliding mode control, secondary planning

---

# 目 录

摘 要 .....	i
Abstract .....	ii
目 录 .....	i
第一章 绪论 .....	1
1.1 背景和意义.....	1
1.2 分布式驱动国内外研究现状.....	2
1.3 分布式驱动电动汽车直接横摆力矩控制策略研究现状.....	4
1.4 本文主要工作.....	5
1.5 论文组织结构.....	5
第二章 分布式驱动电动汽车整车动力学建模 .....	6
2.1 CarSim 软件子系统建模 .....	6
2.2 MATLAB/Simulink 与 CarSim 联合建模 .....	8
2.2.1 CarSim 输入输出接口 .....	8
2.2.2 电机模型.....	9
2.3 本章小结.....	10
第三章 横摆稳定性控制策略研究 .....	11
3.1 二自由度模型.....	11
3.2 基于滑模控制策略的附加横摆力矩计算.....	14
3.2.1 滑模控制器.....	14
3.3 基于模糊控制策略的附加横摆力矩计算.....	16
3.3.1 模糊控制理论.....	16
3.3.2 模糊控制器.....	16
3.4 下层控制器.....	19
3.5 本章小结.....	19
第四章 仿真与结果分析 .....	21

---

---

4.1 双移线低附着系数工况.....	21
4.2 本章小结.....	24
第五章 总结与展望 .....	25
5.1 研究总结.....	25
5.2 研究展望.....	25
参 考 文 献 .....	27
致 谢 .....	29

---

---

# 第一章 绪论

## 1.1 背景和意义

车辆安全是道路交通行驶中最重要的问题之一，而车辆安全的主要内容之一便是车辆的稳定性。车辆稳定性包括行驶过程中车辆行驶路线的轨迹稳定以及车身稳定，最大限度保证汽车不发生大角度漂移甚至是翻车等危险情况。车辆是否稳定受到司机个人操作的影响，当汽车短时间内不停变速行驶会使得车轮压力受力不均，从而造成车身的的不稳定。且汽车在遇到紧急情况时，车辆反应速度往往比司机操作速度慢，这就会导致车辆发生意外。车辆是否能够按照既定运动轨迹运行取决于车辆的横摆角和质心侧摆角，当车辆在平坦路面正常行驶时，主要受到横摆角的影响，结合我国公路条件分析可知，大多数车辆出现稳定性问题均由于航向角出现问题，因此只有控制车辆横摆角才能保证车辆航向偏离幅度较小，对车辆横摆力的分析至关重要。

目前，随着汽车电子控制系统的不断增加和底盘集成化的趋势的不断发展，由于其自身的硬件结构限制，传统的液压制动系统已经不能满足制动系统的发展需要，也限制了车辆制动性能的进一步提升。各国政府、企业与高校研究机构正在积极推广电动汽车技术，这是一种节能环保的先进技术。分布式驱动电动汽车比传统内燃机汽车和集中式驱动电动汽车更容易稳定操作。它具备独立可控的驱动和制动力矩，在响应迅速、精度高的轮毂电机支持下实现了轻便紧凑的结构。这项特殊优势提供了直接控制四个轮毂电机以产生附加横摆力矩来提高车辆操纵稳定性和行驶安全性的新解决方案。因此，分布式驱动电动汽车技术可成为促进交通安全和环境保护的重要方法之一。

与此同时，随着新能源车辆尤其是全电动车的广泛应用，对于刹车系统的要求也越来越高。将线控技术和汽车制动系统相结合而形成的线控制动系统，更好地满足了现代汽车对制动系统发展的新要求，将逐步取代目前的液压制动系统，成为未来汽车制动系统发展的趋势。分布式驱动汽车省去了从动力源到轮毂的所有中间机械传动，使整车的动力传输速度更快，效率更高，但也增加了整车控制的难度。电动汽车是目前世界上最先进的节能环保技术之一 Error! Reference source not found.

---

，已引起了各国政府、企业和大学科研院所的广泛关注。与传统的内燃机和中央驱动型电动车相比，分布式驱动型电动车拥有了独立可控的驱动力和制动扭矩，并且轮毂电机响应迅速、精度高并且结构简单、重量轻。该特性为实现对汽车的侧向振动进行直接控制提供了硬件依据，进而改善了汽车的操控平顺性和行车安全性能。整车的侧向稳定是整车在高速运行中的关键环节，其控制方法具有多样性。为此，论文重点分析了它的偏转扭矩，并扩展了汽车的操纵方式。利用 Matlab/Simulink 和 CarSim 软件，构建了汽车的仿真模型，并对电机子系统进行了选择，在满足汽车的驾驶要求的前提下，完成了对侧向稳定性的控制 Error! Reference source not found.。

通过本次研究，使得笔者个人对本科所学知识再次进行回顾，对建模仿真软件有了进一步了解和认知，为笔者日后学习起到了奠定基础。

## 1.2 分布式驱动国内外研究现状

由于分布式驱动汽车具有较新的驱动方式，且相比传统燃油汽车具有显著的优势，如控制灵活、控制响应速度快等，因此，其研究得到广大学者的关注，并且取得了一定的研究成果。

1899 年，保时捷的创始人——费迪南德开发了第一辆四轮轮毂电动汽车，并在 1900 年展出，因此，第一辆轮毂驱动电动汽车由此诞生。

日本是电动汽车研究的先行者之一。1991 年，庆英义塾大学的清水浩教授和他的团队与东京电力公司合作研发了一款名为 IZA 的电动汽车，如图 1.1 所示，使用四个永磁同步轮毂电机作为驱动系统。这是第一辆采用轮毂驱动技术的电动汽车。2001 年，此研发团队研发了一 KAZ 电动汽车，具有八轮轮毂驱动电机，其最高时速和最大续航里程都得到大幅度提升，如图 1.1 所示。2005 年，一款新的燃料电池概念车诞生，其由丰田公司研发，由四个轮毂电机独立驱动，并且可以实现四轮独立、任意转向。2016 年，丰田公司又研发出氢燃料电池概念车 FCV Plus，如图 1.2 所示，也是采用四个轮毂电机驱动四个车轮。同年，三菱公司研发了 I-MIEV 电动汽车，其有两个永磁同步电机，安装在后轮。尽管我国的分布式驱动电动汽车的研发相比于国外较晚，但是近些年来，随着国家的鼓励与支持下，许多高校和车企都进行了深入的研究，在分布式驱动电动汽车领域取得了一定的成绩 Error!

Reference source not found.

---

清华大学在分布式驱动电动汽车领域取得了一定成就。2004 年，他们成功研发了一款名为“哈利”的微型四轮分布式驱动电动车。在 2013 年，在 BJ2023 轻型越野车汽车的基础上，清华大学开发了分布式驱动电动汽车试验平台，其模型图如图 1.1

---

所示，也研究了整车动力学控制和转矩分配控制等方面的理论与方法。多所高校如吉林大学、浙江大学、东南大学和北京理工大学，也研发了分布式驱动电动汽车试验样车。这些试验样车还进行了动力学控制和横摆稳定性控制等方面的改进。国内的一些车企也进行了分布式驱动电动汽车的研发中，2004年，比亚迪研发了轮边电机驱动概念车 ET，如图 1.3 所示。2010年，广汽集团设计了一辆后轮轮毂电机驱动车辆，名为“传祺”。2011年，奇瑞汽车公司研发了一辆四轮独立电驱动车辆瑞麟，名为 X1-EV。2020年，小鹏汽车也研发出一辆四轮轮毂电机驱动车，名为“小鹏 P7”，如图 1.4 所示。



图 1.1KAZ 电动汽车



图 1.3 比亚迪轮边电机驱动概念车 ET



图 1.4 小鹏 P7

---

### 1.3 分布式驱动电动汽车直接横摆力矩控制策略研究现状

---

横摆稳定性控制主要包括两个方面，一个是主动转向控制，一个是横摆力矩控制，当车辆出现严重失稳现象时，由于轮胎受到的侧向力已达到附着极限，因此，地面无法再向轮胎提供更多的侧向力 Error! Reference source not found.。这个时候，改变车轮转角来调整横摆力矩并不能有效实现对车辆稳定性的调节，尤其是在极限工况下。因此，在这种情况下，使用主动转向来提高车辆的稳定性效果并不理想。基于此，横摆力矩控制可以充分利用分布式驱动电动汽车的优势——四轮独立可控，通过让车辆在不同的工况下控制车辆纵向力的大小，产生横摆力矩，这样的控制可以实现对车辆横摆稳定性的较好控制 Error! Reference source not found.。

叶星宇（2022）在基于分布式驱动电动汽车的轨迹跟踪控制算法设计一文中，以分布式驱动汽车作为研究对象，采用 MPC 和 LQR 两种方法构建轨迹跟踪控制器，采用 MATLAB/Simulink 和 CarSim 联合仿真进行仿真测试 Error! Reference source not found.。吴文娟（2022）在基于相平面的车辆稳定性分析与协调控制研究一文中同样以分布式驱动电动汽车为对象，对分布式汽车进行整车动力学建模，通过 Car Sim 和 Matlab/Simulink 联合搭建了整车动力学模型，在不同附着工况下，验证了模型的有效性 Error! Reference source not found.。依据以上在横摆力矩控制的研究文献中，我们可将其分为以下四个方面进行分析：

第一，使用传统控制方法的横摆力矩控制方法来保证汽车横摆稳定性，这种方法通常是先建立好车辆的动力学模型，根据具体工况设置合适的自由度，然后再设置控制器来控制横摆力矩，比如有 PID 控制器、模糊控制器、滑膜控制器等 Error! Reference source not found.。第二，使用模型预估控制的横摆力矩去控制汽车的横摆稳定性，又称为 MPC。此方法可达到的效果远高于 PID 控制，相当于是多个 PID 控制器的集成，它主要通过车辆的动力学模型去进行未来时刻车辆状态的预测，并且根据预测结果去优化控制指令，由此来控制汽车的横摆力矩<sup>[14]</sup>。兼顾非线性和时变因素是该方法的优势，但是其需要较高的计算成本。第三，使用神经网络方法控制汽车的横摆力矩保证汽车的横摆稳定性，利用神经网络强大的非线性拟合能力，通过建立大量的数据集去训练神经网络，来实现对横摆力矩的有效控制<sup>[15]</sup>。此方法的优势是不需要我们建立较为精准的动力学模型，但是前期的数据集采集至关重要，其关乎输出效果是否精准，其训练过程，比如说在仿真条件下去收集横摆力矩的数据集，用神经网络去训练。第四，使用分布式控制方法的横摆力矩控制实现车辆横摆稳定性的控制，这个方法主要就是利用电动机，因为其主要是考虑车辆横向运动的控制，因此，就是通过协调各个电动机的输出量，让其达到一个均衡，去控制车辆的横摆力矩<sup>[16]</sup>

---

。虽然说这种方法使用起来有较高的可靠性和鲁棒性，但是由于需要控制多个电动机，其势必会让控制策略变得很复杂，这一点是目前此种方法需要解决的。

总而言之，当前已经有了很多关于分布式驱动电动汽车的横摆稳定性控制中的横摆力矩控制研究，而且有许多已经在实车上得到应用，但是其仍有许多需要改进的地方，因此此部分的研究将集中于提高控制器的精度，以及保证控制器的可靠性，并且需要更进一步的减少计算资源，降低硬件设施的成本等等。

## 1.4 本文主要工作

收集关于本课题的相关资料，研究关于车辆横摆稳定性控制技术的国内外现状，了解国内外采用的控制方法，确定本文采用的控制策略。基于 CarSim 搭建电动汽车整车模型，并设置双移线工况，基于 MATLAB/Simulink 建立电机模型、参考模型、上层控制器、下层控制器，最后进行双移线路面仿真实验，分析结果并总结经验，找出不足之处。

## 1.5 论文组织结构

本论文的组织结构如下：

第一章学习有关课题的研究背景介绍，叙述本人所研究课题的研究现状和来源，并简单交代本人要准备的主要工作。

第二章 介绍整车的建模，培养在建模中设置参数时的全局思维能力；

第三章 重点关注横摆稳定性控制策略，基于 2DOF 模型构建稳定性控制器，上层建立滑模控制器以及模糊控制器，下层采用平均分配法建立 4WD 转矩分配控制器；

第四章 仿真实验分析，采集并处理实验数据，撰写总结报告；

第五章 回顾工作内容，归纳收获成果，对今后的研究做出规划和展望。

---

## 第二章 分布式驱动电动汽车整车动力学建模

### 2.1 CarSim 软件子系统建模

CarSim 软件建模系统主要分为七个子系统: 车身系统模型、制动系统模型、转向系统模型、悬架系统模型、传动系统模型、轮胎系统模型以及空气动力学系统模型。本文采用的车体模型为 CarSim 软件中已有的 D-Class SUV 车型, 所用到的车辆模型主要参数如表 2.1 所示。Error! Reference source not found.其中, 空气动力学系统、制动系统、转向系统、悬架系统采用 CarSim 中默认自带的, 轮胎模型型号为 235/55 R18。

表 2.1 车辆主要参数

名称	数值	单位	符号
整车质量	1550	kg	$m$
簧上质量	1430	kg	$m_0$
轴距	2.65	m	$L$
质心高度	0.670	m	$h$
前轴轮距	1.56	m	$t_f$
后轴轮距	1.56	m	$t_r$
轮胎滚动半径	0.357	m	$R$
质心至前轴的距离	1.08	m	$a$
质心至后轴的距离	1.57	m	$b$
绕 z 轴转动惯量	1765	kg · m	$I_z$
前轮侧偏刚度	-78160	N · rad <sup>-1</sup>	$C_f$
后轮侧偏刚度	-85040	N · rad <sup>-1</sup>	$C_r$

---

在车身系统里定义车辆的长宽高、轴距、簧载质量、整车（簧上质量）转动惯量等参数, 如图 2.1 为实验车型的车体参数信息。CarSim

软件中车辆模型是以发动机作为动力源的，动力依次经过发动机、离合器、变速器、万向传动装置、主减速器、差速器、半轴，最后传递到车轮 **Error! Reference source not found.**，对于 4WD 驱动形式的电动汽车模型，CarSim 软件还未做开发，本文基于 MATLAB/Simulink 建立电机模型，在 CarSim 车辆模型里中断传动系统，切断其动力传递，在传动系统中选择四轮驱动，内部模型均采用外部的，其传动系统设置如图 2.2 所示。

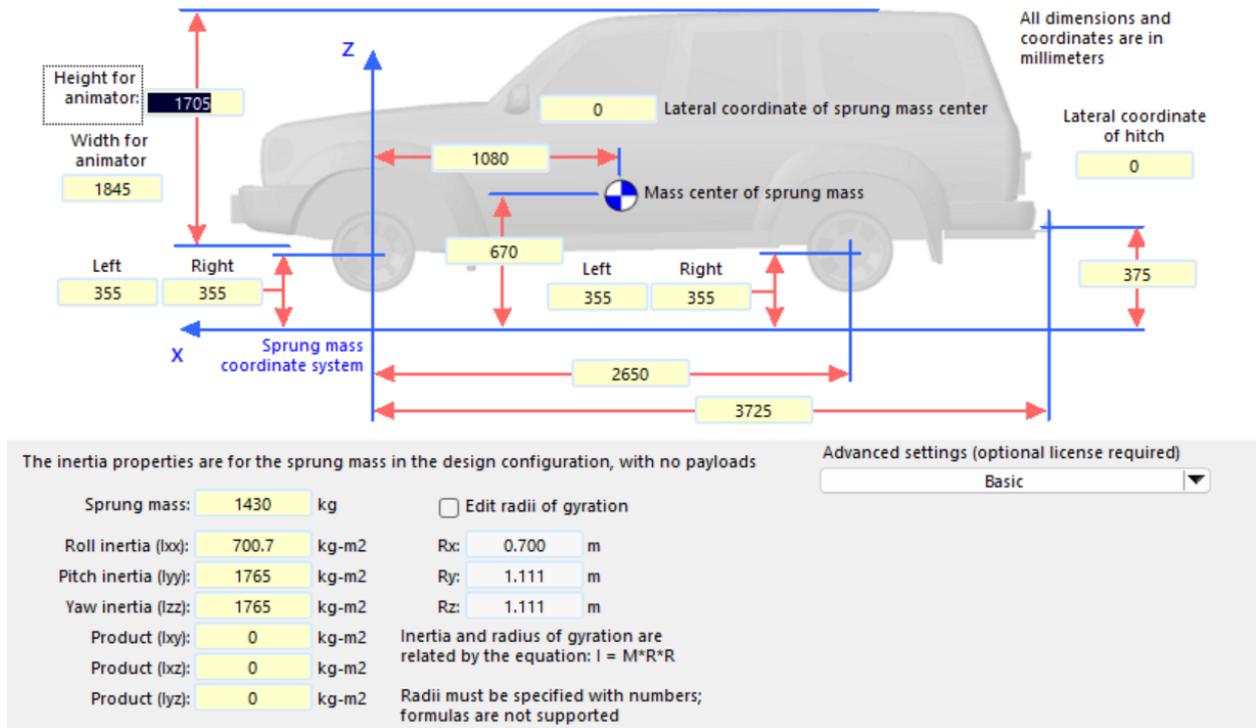


图 2.1 车身系统模型

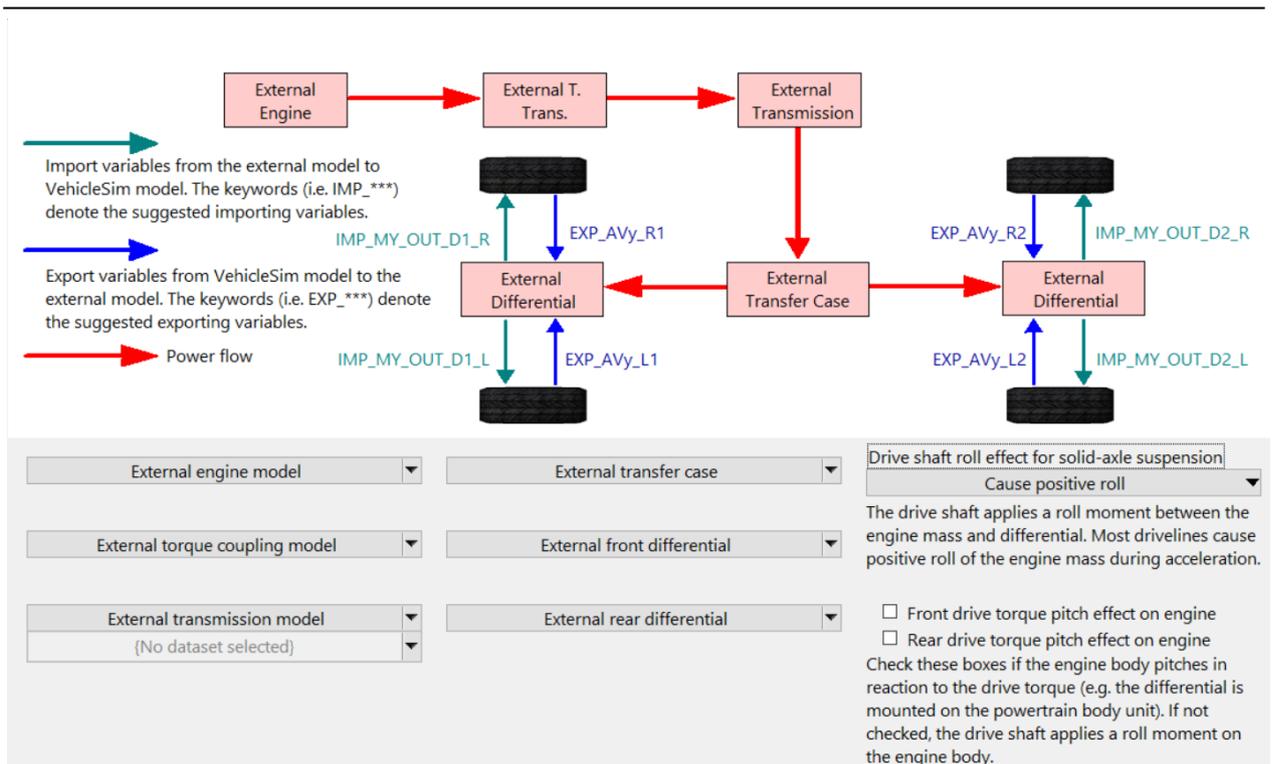


图 2.2 传动系统模型

## 2.2 MATLAB/Simulink 与 CarSim 联合建模

### 2.2.1 CarSim 输入输出接口

在联合仿真时，因为采用外置动力，在 Simulink 中搭建的电机模型在与 CarSim 联合时需要进行接口输入的设置，即输入四轮的转矩，CarSim 软件输出车辆的四轮转速、四轮的垂直力、车辆的纵向车速、质心侧偏角、横摆角速度、方向盘转角这十二个变量。如表 2.2 所示。

表 2.2 CarSim 输入输出接口设置

输入输出变量	变量	名称
输入	IMP_MY_OUT_D1_L	左前轮转矩
输入	IMP_MY_OUT_D1_R	右前轮转矩
输入	IMP_MY_OUT_D2_L	左后轮转矩
输入	IMP_MY_OUT_D2_R	右后轮转矩
输出	AVy_L1	左前轮转速
输出	AVy_R1	右前轮转速
输出	AVy_L2	左后轮转速
输出	AVy_R2	右后轮转速
输出	Vx	车辆纵向速度
输出	Beta	车辆质心侧偏角

输出	AVz	车辆横摆角速度
输出	Steer_SW	方向盘转角

### 2.2.2 电机模型

四轮独立驱动电动汽车在 CarSim 中无法单独搭建，需要在 MATLAB/Simulink 软件中搭建，前面在 CarSim 软件传动系统中已做了动力中断处理，只需在通过 CarSim 的接口输入设置，就可以实现二者的联合。本文是针对四轮独立驱动电动汽车的横摆稳定性研究，故所要搭建的电机对精度要求不高，因此利用查表法对电机建模，电机的峰值扭矩为 350Nm。轮毂电机模型通过每个时刻输入车轮的轮速，从而输出该转速下对应的最大转矩，为了保持汽车在行驶时其速度的稳定，使其能够维持在期望的车速行驶，如图 2.3 所示，利用 PID 算法建立速度控制器，控制各轮的电机转矩输出。通过比较电机输出转矩和计算转矩大小，取最小的值。

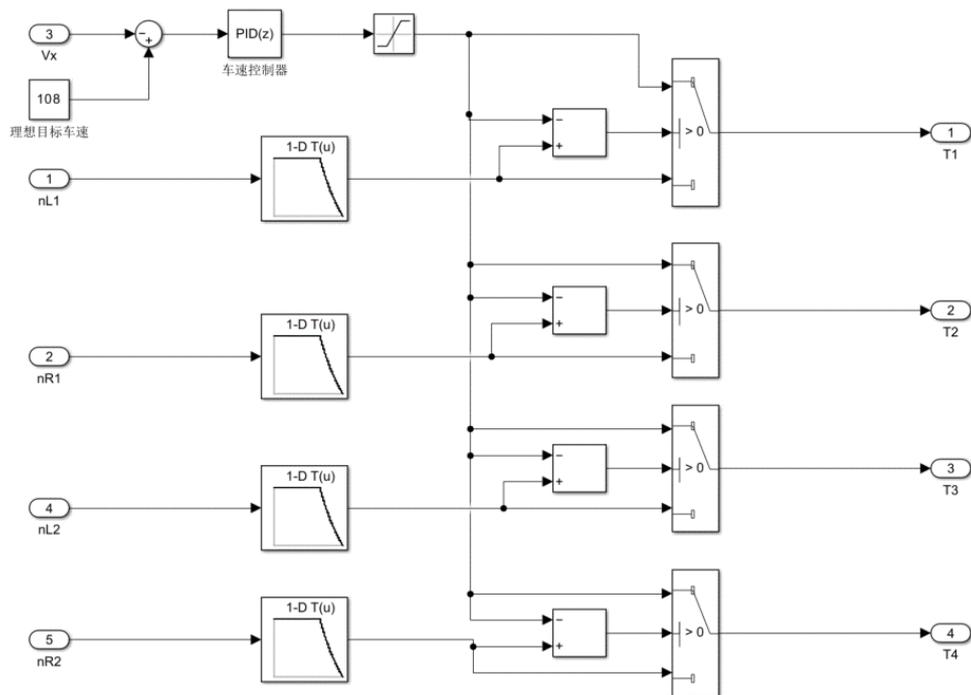


图 2.3 电机模型及速度控制器模块

### 2.3 本章小结

---

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/835031102312011140>