

# 摘要

为了转变经济增长方式，为社会构建出一个稳定、清洁、友好的环境。国家对于汽车尾气排放的严格要求正在不断促进新能源出行方式、绿色生活方式的到来。作为新能源汽车的突出代表之一，四驱电机驱动的电动汽车的特点是四个轮毂由四个电机独立控制，具有很大的控制自由度。本文的研究对象是四驱电机驱动的电动汽车，基于其控制系统模型，对车辆的稳定性问题展开研究，并设计实验进行分析。

首先，本文对四轮驱动电动汽车的发展背景与研究现状进行了阐述，指出当今国家的多项经济、文化政策均围绕环境友好的中心展开。因此，作为零排放、少能耗的代表，新能源电动汽车逐渐走向了我们的视野中，受到了各国和政府的大力推广。

其次，在针对车辆动力学的仿真的专业软件CARSIM 中，进行电动汽车的参数匹配与改装，实现了电动汽车的车体建模，其参数来自于传统车辆的动力学模型。而电机模型和主要的控制系统模型在MATLAB-Simulink中搭建，作为转矩控制策略实现的基础。然后通过联合仿真的接口，将CARSIM 中的车体模型与 MATLAB-Simulink 中搭建的电机控制模型连接，组成一个完整的四轮驱动电动汽车的模型，实现联合仿真。

然后，深入分析车辆可能发生失稳的原因，以日常的行驶过程为立足点，研究驱动力的分配，得出了对车辆行驶过程中稳定性产生显著影响的因素——横摆角速度，并研究了改善横摆角速度稳态响应的转矩分配策略。通过合理调整左右车轮各自的力矩，改善了横摆角速度的动态性能，使车辆在行驶过程中的转向稳定性得到显著提高。

关键词：四轮驱动电动汽车，转向稳定性，横摆角速度，仿真实验

# 绪论

## 1.1 论文的研究背景及意义

### 1.1.1 课题研究背景

近百年来，许多大型工厂的兴起和大量煤炭的消耗造成了空前的空气污染，大量的工业化学排放物增加了未经处理的人类废物的负荷。而随着汽车产业的快速是发展，私人汽车越来越普及，汽车尾气的排放也成为环境污染的主要原因之一。而当今世界的发展一直在强调和谐与环保，大量的尾气排放显然与这一趋势相背离，于是新能源汽车逐渐走入了人们的生活。

2019年，中美贸易摩擦与汽车工业的转型压力的影响下，我国汽车销量依然蝉联全球第一，为2576.9万辆。根据市场调查预测评估得出，2025年中国国内汽车销量有望达到3500万辆，其中新能源汽车占比将超过20%。

能源环境与汽车行驶安全问题在不断地提醒人们加速推动汽车领域研究中电动汽车的发展。四轮驱动电动汽车作为汽车发展的新型技术，凭借其特有的优势，正在逐步占领电动汽车研究领域的研究重心。从发达国家的高校和汽车企业开始研究，随着新能源汽车热潮席卷全球，这项技术将会成为我国在汽车大国向汽车强国转变过程中必不可少的一个环节。虽然目前市场上存在许多研发与生产电动汽车的企业，但我国对四轮驱动电动汽车的研究开始的较晚，现在依然处于起步的阶段。

此外，在传统燃油汽车的稳定性设计与研发的过程中，各类技术已经日渐成熟，广泛应用于市场。而作为最新兴起的一类汽车，电动汽车的多轮驱动方式相比燃油汽车的传统机械驱动方式更加新颖，摒弃了燃油汽车传统的底盘控制技术，取而代之的是以轮

毂电机驱动的新型动力方式。其动力学控制可基于转矩而实现快速响应，四个独立可控的轮毂电机赋予了电动汽车更多的可研究性。

汽车是经济发展和交通运输不可或缺的载体，目前我国汽车保有量也在不断增长。在汽车销量带动国家经济发展的同时，我国也成为国际上由于交通问题而导致伤亡最多的几个国家之一。因为交通事故等安全隐患正在日益加重，人们对于汽车的性能提出了更高的要求，包括车身的稳定性，防滑防水的性能等。

随着互联网和人工智能技术的兴起与发展，未来，汽车领域将出现智能控制驾驶与无人驾驶模式，真正实现汽车驾驶的智能化。在这之前，轮毂电机电动汽车的发展还有很长的一段路要走，因此深入研究轮毂电机的转矩分配系统显得尤为重要。

## 1.1.2 研究的目的是与意义

轮毂电机驱动方式被广泛的应用于四轮驱动电动汽车，车轮与电机直接相连，实现车轮与电机一一对应的驱动，将传统的动力控制方式转变为电气控制，替换掉了传统汽车中大量的传动机构，简化了汽车的结构，可以实现对整车灵活快捷的控制。

除了力矩非常精确，易于控制和极高的响应速度外，四轮驱动使电动汽车与传统的集中驱动的电动汽车不同之处的是，它获得的控制自由度更大，拥有单轮层面的控制力矩，可以实现多种主动式的安全控制。包括ABS控制，车身稳定性控制等，以最大程度地提高汽车在驾驶过程中的稳定性。但若应用了不当的控制，汽车将容易失稳，甚至引发交通事故。

新能源汽车有四大类型，其中包括燃料电池电动汽车、纯电动汽车、混合动力电动汽车、其他新能源汽车等。作为重要成员之一，纯电动汽车在能源的利用方面，采用的驱动方式为纯电力驱动，具有环保高效、噪声低的优点，以顺应未来全球新能源汽车发

展的大趋势。与传统燃油驱动式汽车和集中驱动式电动汽车相比，分布驱动式电动汽车拥有极大的控制方面的优势，主要体现在以下几个方面：

### **(一) 具有紧凑的结构和优越的传动效率。**

许多动力传动机构，如差速器、传动轴、离合器、变速箱等，在分布驱动式电动汽车中不再出现。因此其拥有更加紧凑的动力结构，同时也大大降低了汽车的重量，向汽车轻量化的目标迈进。在动力传递的过程中可以避免大量的机械损失，进而提高传动效率。

### **(二) 实现快速且准确的动力学控制**

轮毂集成了驱动电机，可控制直接作用于车轮的驱动力。克服了传统燃油汽车由于机械传动或变速箱、离合器等磨损造成的时间损失，也避免了集中驱动式电动汽车传动轴减速器的传动延迟，因而它的响应速度和响应精度更好。每个车轮的运动状态都可由四个轮毂电机独立控制，通过合理分配四个车轮的力矩，对车辆进行快速又准确的运动控制。

### **(三) 易于获得行驶状态中的参数**

受传动效率的影响，传统汽车的四个车轮各自的受力无法被准确计算。而四轮驱动电动汽车的控制系统，轮毂电机的转矩易于控制且传递精确，可以实时查询施加在每个车轮上的转速与转矩，进而计算出四个车轮的动力学状态以及行驶状态参数等。

### **(四) 可以实现驱动力自由分配**

在传统汽车中，只能在特定的比例范围内调整轴间动力分配量，因此驱动力分配余度较低。而在四轮驱动电动汽车中，同轴车轮以及前后轴车轮之间的扭矩分配为“无极”分配，可以根据控制目标的不同而对转矩分配实现动态的调节，不断优化驱动力之间的分配，实现更多的要求。

针对汽车在行驶过程中由于驱动力过大或过小而产生的一系列问题，需要研究车身的稳定性控制策略，可防止汽车由于路面光滑而造成的失稳、失衡以及动力损失等现象，在安全的前提下保证车辆动力充足。这样的方式仍然存在许多需要改进的问题，控制自由度的增加会使电动汽车难以协调电动轮之间的控制。为了保证电动汽车可靠的运行，需要使用更加可靠的转矩控制系统，并进行精确的仿真实验。而目前依然没有出现完善且通用的四轮驱动电动汽车的仿真模型，因此通过研究四轮驱动电动汽车的转矩控制系统与仿真，实现对四轮驱动电动汽车的扭矩协调优化分配与控制具有十分重要的工程实际意义。

## 1.2 轮毂电机电动汽车国内外发展现状概述

### 1.2.1 国外发展概况

分布式四轮独立驱动系统在电动汽车应用方面的优势与潜力十分明显，因此国外有许多高校与企业对四轮驱动电动汽车的研究中投入了大量的科研成本。目前，在四轮驱动电动汽车技术的研究中，欧美国家和日本占据主导地位。上世纪90年代，日本便开始着手研究轮毂电机在汽车中的应用，并取得了许多显著的成效。

美国的Protean Electric公司，作为世界著名的轮毂电机生产商之一，许多逆变器、电力电子器件都被集成到他们研发的轮毂电机中，如图1.1所示。他们公司研发的轮毂电机同时实现了轮毂与外转子直接相连的结构，不再需要减速器，大大减小了体积和重量，转矩峰值达到了1250Nm，而功率峰值达到了80KW，可以满足大多数汽车在动力性能方面的要求。

图1.1 Wheel motor developed by Protean Electric

东京大学的研究团队从21世纪初起，开展了有关四轮驱动电动汽车稳定性的多项研究，随后研发出轮毂电机电动汽车“UOT Electric March 1”和“UOT Electric March 2”。目前，该团队正在研究电动汽车的四轮转向的稳定性控制。

此外，韩国义阳大学，美国俄亥俄州立大学，东京农工大学等高校团队都在不断推进电动汽车中转矩分配策略的研究，努力向轮毂电机四轮驱动的时代迈进。

## 1.2.2国内发展概况

和国外电动汽车技术水平的差距，让我国必须在轮毂电机电动汽车的研究中投入更多的成本，付出更多的心血努力。目前，政府与国家日益重视起电动汽车的发展，明确态度，鼓励和支持电动汽车领域相关技术的研发，并下达了一系列相关的文件，落实到各大高校与企业研发部门。从搭建实验平台开始，到电控技术的研究，到算法设计与开发，再到现在融入人工智能技术，攻克了许多技术上的难关，在这个过程中，国家的政策起到了很大的作用。

大量的人力与物力财力被注入电动汽车的研发中，生活中可以看到许多公交车已经换成了纯电力驱动的客车，可见电动汽车的发展受益于国家的鼓励与政策的支持。电动汽车、电动公交车不仅更加轻便环保，而且少了燃油味道之后，乘客也获得了更好的乘坐体验。

与国外各高校与企业相比，我国较晚开启研究电动汽车领域的大门。但我国的研究进展极为迅速，主要以高校为主，其次是各大企业的研发部门。其中包括同济大学与上海燃料电池汽车动力系统公司，二者共同研发了“春晖”系列车型。春晖三号动力系统采用混合驱动方式，即同时存在电机与发动机两种动力装置，使用永磁无刷直流轮毂电机驱动每个车轮。

## 图1.2 BYD Tang EV600

在国内的车企中，比亚迪汽车公司最新研发并实现了一体化动力总成式电机减速器，并在2019年发布了全新一代智能电四驱唐 EV 系列车型，如图1.2所示。而在国内的车企中，首先采用高压集成系统的公司为北汽新能源。此外，奇瑞、吉利、长城等国内汽车企业也在不断加快新能源四轮驱动汽车研究的脚步。但目前看来，大多数研究都处于样机阶段，未来的电动汽车行业依然具有广阔的探索空间。

### 1.3 集中驱动式与分布驱动式电动汽车的对比

目前市面上存在两种结构的电动汽车驱动系统，包括集中式驱动系统和分布式驱动系统。

#### 1.3.1 集中驱动式电动汽车

在驱动结构上，集中驱动式电动汽车沿用了和传统燃油汽车极为相似的布置方式。除了内燃机被电机等部件代替外，其他机械传动结构均类似。转矩经电动机输出后，再经减速器后传入差速器，由差速器分配转速与转矩后输入左右车轮。由于研究开始的年代久远，集中式电动汽车的技术早已十分成熟，多年来汽车的上路实况也反映出其可靠性与安全性。但其缺点也显而易见，沿袭了传统内燃机汽车车体笨重的特点，相对来说效率提供不足。集中驱动式电动汽车的控制系统结构如图1.3所示：

目前，在电动汽车领域的市场中，集中驱动式电动汽车凭借其成熟的技术水平和较高的完成度，成功进入市场。以北汽E150EV、 日产Leaf 为代表。

## 图1.3 Centralized drive electric vehicle

### 1.3.2 分布驱动式电动汽车

而分布驱动式电动汽车包括两种类型，即轮边电机电动汽车和轮毂电机电动汽车。其中在副车架上安装驱动电机的为轮边电机电动汽车，车轮对应侧输出轴为其提供驱动力。而轮毂电机控制的电动汽车是在汽车轮毂中安装减速机构和电机，去掉了传动轴、变速箱等结构部件。总的来说，分布驱动式电动汽车具有轻量环保、车身结构紧凑、行驶稳定性强等优点。分布驱动式电动汽车控制结构如图1.4所示：

**图1.4 Centralized drive electric vehicle**

### 1.4 四轮驱动电动汽车转矩分配的研究现状

交通压力日益严峻，汽车的保有量依然每年都在增加，汽车销量在带来经济增长的同时也使得交通事故频发，交通事故对许多家庭带来沉痛的打击与伤害。这样的社会问题已不容忽视，因此汽车的安全性被放到了车辆研发过程中最重要的位置。分布式驱动电动汽车的多个执行器可以实现先进优越的实时操纵功能，表现在主动安全性控制和主动稳定性控制等。

**图1.5 Torque control strategy of pure electric vehicle**

目前电动汽车领域较为常用的控制策略如图1.5所示。由于轮毂电机电动汽车的控制精度与自由度有很大的提高，但其驱动力控制与分配策略的研究却一直没有突破瓶颈，其中包括车身防滑及稳定性问题和转矩分配等问题。转矩分配策略分为左右轮转矩分配和前后轮转矩分配两类，通过合理安排可以提高车辆的安全性和转向操作稳定性。电动汽车非常重要的一个特点是它的响应非常迅速，可以实时控制输出转矩的大小。此外，

轮毂电机支持四轮独立的稳定性控制，可以基于此特点研发出更多更加优化的协调控制策略。

因为拥有电动汽车领域中典型的过驱动系统，分布驱动式电动汽车的转矩分配控制算法的性能就显得尤为重要。接下来就横摆力矩控制研究现状和前后轴驱动力分配研究现状两个方面进行综述：

### 1.4.1 横摆力矩控制研究现状

横摆力矩控制的研究分为两个方面：首先是选择适当的控制变量和参考模型；其次是研究控制横摆运动的算法。在汽车的线性区域中，仿真参考模型大多数时候选用二自由度模型，与汽车的状态参数相结合，包括车辆重量、体积尺寸、行驶速度，再结合驾驶员的操作等，可以推导出所需要的控制变量。之后紧接着分析二自由度模型，可以得出横摆角速度和质心侧偏角是影响汽车行驶过程中横摆运动稳定性的最重要的两个指标，因此它们常常被选择作为控制变量。

东京大学的科研人员们建立了汽车的三自由度模型，利用的控制思想为模型跟踪应用质心侧偏角和横摆角速度，计算其偏差值，可以实现反馈控制。为了计算控制横摆力矩的实际数值，该团队在此基础上结合了前馈补偿。而控制模型建立之前，理想的质心侧偏角需要被设为零，并且线性化理想横摆角速度的二阶传递函数模型。其中，时间常数可从高频域内通过线性化得到，而横摆角速度的稳态增量可以从低频域线性化得到。最后，在实验中得到验证，大多数工况下，前馈控制足以保证汽车稳定特性，但如果需要保证更加优化的瞬态响应，则需要应用反馈控制修正。

由于在极限位置时，对轮胎施加的转向角控制已经难以发挥其重要的效果，因此需要直接控制横摆力矩和采取主动转向策略。仿真结果表明，这种控制模式可以提高车辆在极限位置处的转向操作稳定性。

也有许多国内团队将轮毂电机电动汽车的转矩分配选做主要研究方向，其中包括吉林大学的宗长富团队。他们研发出了集成式控制系统，包括下层力分配器和使用终端滑膜控制思想设计出的上层运动控制器。为了对车辆运动目标实现实时定位，驾驶员的操作行为将输入运动控制器中进行分析，得到广义控制量。而受到轮胎附着极限的影响，基于伪逆矩阵的下层力分配器会将总转矩按照一定的分配策略，为各个车轮提供分配力矩。角阶跃实验的结果表明，控制前期由于无约束，横摆角速度的振荡现象十分明显；而在有约束的终端滑模控制的全程，横摆角速度都未出现大幅振荡现象，并且在很短的时间内接近理性特性。实验结果证明了相比于普通滑模控制，终端滑膜控制的控制误差拥有短小时内迅速收敛的优点。

## 1.4.2 驱动力分配应用于前后轴的研究现状

吉林大学的团队在稳态转向特性与分布式驱动电动汽车前后轴驱动力分配关系的实验中，深入分析了实验机理。以数值优化为目标建立了目标函数，基于摩擦椭圆理论寻找出路面消耗最小的方法；随后进行离线优化，在电机效率图的基础上，以最优分配系数为主要内容，制作MAP表，推出驱动效率最高的方法；学习制动性能最好的“T”曲线分配方式，并且参考侧向需求，得到使前轴和后轴一起到达附着极限的方法。以此分析得出影响汽车侧偏特性与车辆转向特性的主要原因，是轮胎的滑动和载荷的转移。其中，载荷转移主要在高附路面产生较大的影响，轮胎的滑动主要在低附路面产生较大的影响。

国外在前后轴驱动力分配与车辆稳定性控制的研究的路上已经走了很远，许多研究人员为了达到车辆稳定性的控制，在减少偏差的参考模型的基础上，估计并跟踪控制变量。如东京大学的科研团队，在Hori Y.教授的带领下，详细叙述了电力驱动的技术，并且在车轮滑转率和电机驱动力分配的方式上展开了很多研究，研究出一种分配电动汽车

四个车轮驱动力的方法。驾驶员控制电机为四个车轮提供驱动力，而四个车轮在控制下，发生侧滑的概率降低。他们的控制方法可以保持车辆在瞬态低附着路面的稳定驾驶。

## 1.5 本文主要研究内容

本文基于国内与国际上先进的研究成果，以合理分配转矩并加强车辆转向稳定性为目标，从四轮驱动电动汽车的动力学模型搭建开始展开设计工作。四轮驱动电动汽车可通过灵活分配转矩而提高车辆行驶过程中的许多性能，因此研究轮毂电机的转矩分配控制策略，可以充分发挥出四轮驱动电动汽车转矩控制时的潜力，控制汽车在行驶过程中的侧偏特性与横摆特性，从而提高车辆的转向稳定性。本文的主要研究内容如下：

首先，查阅了大量的参考文献，学习与分析了四轮驱动电动汽车的结构特点，总结了轮边电机与轮毂电机的区别，确定了轮毂电机应用于四轮驱动电动汽车上的优缺点。之后参考了某型号汽车的参数结构，在专业动力学建模软件CARSIM 上根据所选的参数匹配并建立了实验所需的电动汽车动力学模型。为验证在CARSIM 中建立的模型的正确性，设计验证试验，在MATLAB-Simulink 中建立车辆的外部驾驶员模型，然后通过CARSIM和MATLAN-Simulink的接口进行联合仿真，得到一个完整的外部驾驶员联合仿真模型，证明了本实验中建立的汽车动力学模型的可行性。

第二，通过分析四轮驱动电动汽车的电机转矩分配外特性在MATLAN-Simulink上建立了轮毂电机控制的模型。研究在车辆不失稳的前提下提高汽车转向性能的转矩分配策略。确定了分配驱动力研究的主要内容，建立了保持车辆转向稳定性能的横摆力矩控制模型。

第三，在已建立的MATLAB-Simulink 模型的基础上进行仿真实验。讨论引起车辆失稳的因素，分析保证车辆行驶稳定性的条件，研究横摆角速度等因素对汽车转向的影响，并在稳态响应的实验过程中验证了本文所建模型对横摆角速度的稳态控制能力。

最后，对所有的工作进行总结，客观的评价该实验过程中的缺陷，并规划未来将攻克的技术难题。

# 基于CARSIM 的电动汽车动力学建模与仿真

随着软件能力的增强，实验的前期往往需要在计算机平台上进行软件仿真的工作，然后建立出一个用于控制和开发汽车驱动力分配策略的车辆动力学模型。本章将分析电动汽车的结构，在CARSIM 上建立四轮驱动电动汽车的动力学模型，并在MATLAB-Simulink 上建立外驾驶员模型，实现联合仿真以证明CARSIM 中建立的汽车动力学模型的可行性。其中CARSIM 平台将为实验提供电动车动力学仿真基础模型，MATLAB-Simulink 软件将为实验提供外驾驶员模型，作为验证实验的外部支持。

## 1.6 四轮驱动电动汽车结构及其分析

### 1.6.1 整车自由度分析

如图2.1所示，汽车的轮胎坐标系、车辆坐标系、大地坐标系常常被用于车辆的动力学建模，也可表现车辆的运动状态。坐标系的原点为车辆的质心位置，由右手法则可以得到。正向X轴为与车辆前进方向平行的地面，正Y轴为车辆前进方向平移至质心处的左侧方向，而正Z轴为车辆质心处的垂直向上方向。

由图2.1的车辆坐标系可知，六个方向的运动同时存在于空间上车辆的运动之中。包括沿Z轴垂直方向的空间运动、沿Y轴方向的车辆侧向运动、沿X轴的纵向空间运动、绕Z轴的横摆运动、绕Y轴上的俯仰运动以及绕X轴的侧倾运动。

**图2.1 Distributed drive electric vehicles**

本文将对车辆在空间坐标系中的横摆、侧向和纵向运动进行研究分析，此处忽略车辆的俯仰运动、侧倾运动、垂向运动。在理想状态下，即假设复杂的运动不会发正在车

辆的悬架系统上，并且在垂向运动中，车身与底盘只做俯仰和侧倾运动；同时，假设车辆的四轮均不做垂向运动，即默认汽车行驶的水平路面不会在垂直方向上冲击单个或多个车轮。在这样的前提下，建立一个理想状态下模拟整车车辆动力学模型的七自由度模型，同时推导得出代表车辆转向操纵性能的动力学方程。

本文的七自由度车辆动力学模型如图2.2所示，包括：Y轴方向上车辆的侧向运动、Z轴方向上车辆的横摆运动、X轴方向上车辆的纵向运动，以及车辆四个轮子各自的转动。

### 图2.2 Kinematic modeling of a vehicle

车辆沿X轴纵向运动的方程：

(2.1)

车辆沿Y轴侧向运动的方程：

(2.2)

因此，式(2.3)可以计算出侧向加速度和纵向加速度：

(2.3)

绕Z轴的车辆的做横摆运动的运动方程：

(2.4)

垂向分配在各个车轮上的载荷：

(2.5)

在上述方程式中

---

\_\_\_\_\_ :表示汽车前轮中左侧的轮子的  
 转角； \_\_\_\_\_ :表示汽车前轮中右侧的轮子的转角； (j=1~4): \_\_\_\_\_ 代表汽车的各个车轮所受来自纵向方向上的力的大小； (j=1~4): \_\_\_\_\_ 代表汽车的各个车轮所受来自侧向方向上的力的大小； (j=1~4): \_\_\_\_\_ 代表汽车的各个车轮所受来自垂直方向上的力的大小； (j=1~4): \_\_\_\_\_ 代表汽车的各个车轮在滚动过程中所受的滚动阻力的大小； \_\_\_\_\_ :代表车辆在行驶过程中所

受风的阻力的大小； $a_x$ 代表车辆在x轴即纵向方向上的加速度； $a_y$ 代表车辆在y轴即侧向方向上的加速度； $J$ 表示转动惯量。

## 1.6.2 车辆四轮转速差及其协调关系

在车辆转向的过程中，为了确保稳定性，分别位于车辆左侧和右侧的车轮转速一定不相等，存在适当的差值。为了保证平稳的转向，速度分别在轮毂边缘与轮心上的大小符合协调关系。传统意义上我们使用的内燃机汽车使用基于机械原理的差速器，来实现汽车左右轮转速差。而因为电动汽车取消了传统内燃机汽车内复杂的机械系统，所以四轮独立驱动的轮毂电机电动汽车实现转速差协调分配的方式是控制汽车四个车轮各自的转速。作为汽车转向系统领域的一大新的技术突破，电子差速已经跻身目前车辆控制行业的一个研究热点。

和传统机械差速系统比较，在车辆转向稳定性方面，电子差速计的控制优势非常可观。它支持对车辆转向行驶时进行实时操作状态控制，通过分析准确的传动比来实现，可以大大提高车辆转向时的稳定性。除此以外，驾驶员在车内进行转向操作时无需操纵传统机械差速系统，从而减轻了驾驶人员的注意力负担。在提高转向稳定性的同时，也提高了驾驶人员的舒适度与操纵性，进而确保行驶过程中的安全性。电子差速计不仅可以直接控制车轮的转矩，而且能够与包括Electronic Stability Program、Anti-Lock Brake System在内的各类主动安全控制系统实现联合控制。

汽车转向时，为了克服地面与车轮发生滑动摩擦导致的轮胎磨损而降低轮胎的“抓地”能力，尽量要保证车轮处于纯滚动状态。对于轮毂电机驱动的电动汽车，各个车轮需要具备转速差，并且符合一定的条件，才能稳定、安全地完成转向过程。图2.3为转向差速系统的模型，此模型是基于阿克曼的转向差速模型，用于推导出汽车四轮转速差之间的关系。

### 图2.3 Ackerman steering model

基于下列四个假设，本文将对阿克曼模型做出分析：

- (1) 车轮始终接触地面，不会因为突发情况离开地面；
- (2) 始终保持刚性的车体；
- (3) 作用于车轮的侧向力正比于车轮所受的侧向变形量；
- (4) 轮胎的状态始终为纯滚动，即不与地面产生滑移。

在图2.3中， $\delta_1$ ：表示内侧前轮转角； $\delta_2$ ：表示外侧后轮转角； $\delta$ 为转向轴前轴的中心转角； $V$ ：表示后轮轴中心位置处的向前行驶方向上的速度； $v_{1L}$ ：表示左侧的前轮向前行驶方向上的速度； $v_{1R}$ ：表示右侧的前轮向前行驶方向上的速度； $v_{2L}$ ：表示左侧的后轮向前行驶方向上的速度； $v_{2R}$ ：表示右侧的后轮向前行驶方向上的速度； $R_{1L}$ ：表示左侧前轮的转向半径（绕）； $R_{1R}$ ：表示右侧前轮的转向半径（绕）； $R_{2L}$ ：表示左侧后轮的转向半径（绕）； $R_{2R}$ ：表示右侧后轮的转向半径（绕）； $R$ ：表示后轮轴中间位置上的转向半径（绕）； $B$ ：表示左右两侧车轮的距离；\_\_\_\_\_

由上述四个假设可知，首先，在车辆转向的过程中，车身上任意一点位置处的角速度在它的旋转轨迹上都相同，用 $w$ 表示。而且所有的质点均以车体的质心为旋转中心做旋转运动。第二，质心CG是汽车的各个轮胎的转动中心线都必须通过的一个点，也是车辆四个车轮的两个转向轴线相交的点。其中，位于内侧的车轮转向时的转角与外侧车轮转向角度始终符合以下关系式：

$$(2.6)$$

由Fig.3.1.3 中的关系可以推导出(2.7)，在转向操作的过程中，四个车轮及后轮轴中间位置上的转向半径：

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/568051024106006123>