DOI: 10.3901/JME.2020.18.092

汽车转矩定向分配驱动技术发展现状综述*

王军年 杨 斌 王庆年 倪健士

(吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室 长春 130025)

摘要: 直接横摆力偶矩控制被广泛用于维持汽车稳定性,但是存在着降低车速、额外能量消耗的缺点,影响驾驶体验。近年来出现了采用差动驱动的转向定向分配(Torque vectoring, TV)新技术,该技术在控制车辆稳定性的同时减少了动力消耗,兼顾了车辆操纵稳定性和驾驶乐趣的双重需求。为全面了解TV技术发展现状,明确未来技术走向,首先介绍TV技术基本概念和研究热点问题,全面回顾关键总成转矩定向分配差速器的技术发展脉络。接着分析几种现有应用于传统汽车上的代表性转矩定向分配差速器的工作原理和技术特点。最后针对电动汽车,提出一种新型电动转矩定向分配驱动桥的自有专利技术,论证了其力学特性和工作原理。研究可见,TV技术能够一定程度上解决车辆稳定性控制与驾驶乐趣的矛盾;提出的无离合器摩擦元件的新型电动转矩定向分配驱动桥,其灵活自由的轮间转矩分配的特性将会在电动汽车综合动力学性能提升方面发挥重要作用。TV技术将成为未来电动汽车向高性能、高端化方向发展的重要研究方向。

关键词: 电动汽车; 转矩定向分配; 差速器; 稳定性; 操控性; 横摆控制

中图分类号: U469

Review on Vehicle Drive Technology of Torque Vectoring

WANG Junnian YANG Bin WANG Qingnian NI Jiantu

(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025)

Abstract: The direct yaw moment control is now widely used to maintain vehicle stability, but it also has the shortcomings of vehicle speed reduction and additional energy consumption, which affect the driving experience. In recent years, the technology of torque vectoring (TV) by differential drive has been developed. This technology reduces the power consumption while controlling the stability of the vehicle, takes into account the dual needs of vehicle maneuverability, stability and driving pleasure. In order to fully understand the development status of TV technology and clarify its future trend, the basic concept and research hotspots of TV technology is introduced first, and the technological development context of the torque vectoring differential as a key assembly is comprehensively reviewed. Then, the working principles and technical characteristics of several representative torque vectoring differentials currently used in traditional vehicles are analyzed. Finally, a novel electric torque vectoring drive-axle which is our patented technology is proposed for electric vehicles, and its mechanics properties and working principle are demonstrated. The research shows that TV technology can solve the contradiction between vehicle stability control and driving pleasure to a certain extent. The proposed novel torque vectoring drive axle without clutch friction elements will play an important role in improving the overall dynamic performance of electric vehicles. TV technology will become an important research direction for the future development of electric vehicles towards high performance and high-end.

Key words: electric vehicle; torque vectoring; differential; stability; maneuverability; yaw control

0 前言

时至今日,中国汽车产业发展规模巨大、市场成熟,汽车文化逐步形成、新一轮消费升级已经到

来。人们对于汽车的要求已经从最初的经济实用逐渐过渡到了安全环保、智能便捷、个性多元等^[1]。这些催生着各种汽车技术,尤其是先进底盘技术的不断研究和普及应用。

汽车安全性一直以来都是底盘技术研究的重要方向,以主动横摆力偶矩控制(Active yaw control, AYC)为核心原理的汽车动力学稳定性控制(Dynamics stability control, DSC)作为能够改善汽车动态工况下

* 国家自然科学基金(51875235)和吉林省科技发展规划(20180414011GH、20190802015ZG)资助项目。20191017 收到初稿,20200518 收到修改稿

汽车行驶稳定性的主动安全电子系统在现有汽车上大量普及应用^[2], 例如代表性的博世公司的电子稳定程序(Electronic stability program, ESP)^[3-5]。以 ESP 为代表的直接横摆力偶矩控制(Direct yaw-moment control, DYC), 利用差动制动产生绕汽车质心的额外横摆力矩来纠正车辆横摆动力学特性, 相比较以轴间分配力矩的间接横摆力偶矩控制能够更加有效地改善车辆操纵稳定性, 成为 AYC 的主流实施方式。然而这种方式控制车辆的稳定性却有明显的局限性, 表现为当 ESP 程序控制时, 不仅会对车速造成损失, 通过机械制动会额外增加能耗, 而且有明显的介入感, 对驾驶员产生干扰, 影响了汽车的驾驶体验和乐趣^[6]。为解决上述问题, 满足在实施车辆稳定性控制时尽可能维持车速不变, 提高汽车极限过弯能力, 增强操控性、机动性和驾驶乐趣的要求, 近年来国内外出现了一些对于转矩定向分配控制(Torque vectoring control, TVC)技术^[7-10]和转矩定向分配差速器(Torque vectoring differential, TVD)^[11-14]的研究。

转矩定向分配(Torque vectoring, TV)驱动技术是一种可以实现将动力源(传统或新能源均可)产生的驱动转矩在左右两侧车轮、甚至前后两轴之间的任意分配的先进驱动技术。此概念最早来自于近 10 年国外文献, 近几年引入国内后部分学者将其直接翻译为“转矩矢量”技术^[15-16]。一方面为了避免与电机控制理论里的“转矩矢量”控制方法混淆, 另一方面能更加形象地说明其技术属性“转矩分配”和工作特点“定向分配”, 笔者将其首次翻译为“转矩定向分配”^[17], 更加凸显其车轮驱动转矩分配的数值和方向的任意性。

该技术既可以使驱动转矩从低速侧车轮(或车轴)向高速侧车轮(或车轴)转移、亦可以从高速侧向低速侧转移。这样就实现了动力学控制由对各个车轴的转矩控制到面向全轮的转矩分配控制的转变, 提高了控制的灵活性, 均衡了各轮胎的路面附着利用率, 增加了车辆稳定性裕度^[18]。有效增加车辆行驶的操纵稳定性, 还可以根据控制目标的不同, 以节能为目标来分配全轮驱动转矩。

目前转矩定向分配技术主要分为两类: 一类是应用于分布式驱动汽车上的转矩定向分配控制技术, 这里以轮毂电机为驱动单元的典型分布式驱动方式为代表, 被普遍研究其各轮独立驱动优势带动下的转矩定向分配技术对于此类汽车整车性能的改善问题。其独特的底盘布置和动力学性能优势甚至成为未来智能电动汽车的最佳驱动方式, 然而, 受制于轮毂电机功率密度不足、簧下质量增加、电机

工作环境恶劣等问题, 导致转矩定向分配技术并未大规模在数量有限的电动轮驱动汽车上普遍应用; 另一类则是应用于传统高端 SUV 汽车上的集中式驱动转矩定向分配差速器, 但普遍存在结构复杂、成本高、机械损失大等技术问题, 更重要的是普遍存在专利保护, 故并未在各类车型上普及开来, 仅仅在一些传统动力的高端 SUV 或四驱轿车上少有应用。

为更好地了解转矩定向分配技术发展现状, 掌握其核心关键技术原理, 以及获取面向未来新能源智能化电动汽车发展时代^[19]下的高端驱动技术走向, 有必要对上述两类研究内容-转矩定向分配控制技术和转矩定向分配差速器做梳理归纳和系统总结。

1 转矩定向分配控制技术

转矩定向分配控制技术往往是应用在分布式驱动汽车, 并集成在其底盘驱动系统里的非机械结构的软件控制技术。基于控制的整车性能目标的不同, 现有对于 TVC 的研究主要分为以下三个方面。

(1) 以提高车辆经济性为目的的分配控制方法。WANG 等^[20]对四轮独立驱动电动汽车的能量效率特性进行了分析, 分别在车辆驱动和制动时的转弯能耗进行了优化控制: 驱动时, 由于需求驱动转矩和横摆转矩已知, 使电机总的输出功率最小, 制动时, 进行能量回收, 使电机总输出功率最大, 从而使得四轮独立驱动电动汽车在能量效率上有很大的提高。余卓平等^[21]将四轮驱动电动车的转矩分配问题简化为前后轴转矩分配问题, 理论分析了驱动和制动时的电机效率, 采取电机效率最大化原则, 对前后轴转矩分配系数进行了设计, 使得无论是在驱动还是制动的情况下车辆都有较好的节能效果。NOVELLIS 等^[22]分别以驱动能量消耗最小、各车轮纵向滑移率协方差最小、总的滑移率最小以及轮胎负荷系数最小为优化函数进行转矩分配, 对车辆的经济性和稳定性进行分析, 结果表明, 以总的纵向滑移率最小为优化函数, 不仅可以提高电动轮驱动车辆的运行经济性, 还有助于提高车辆的稳定性。SUZUKI 等^[23]从研究轮胎耗散能最小的角度出发, 同时考虑轮胎的纵滑与侧滑损耗, 提出了轮胎耗散能公式

$$P_i = \bar{v}_{xi} F_{xi} + \bar{v}_{yi} F_{yi} \quad (1)$$

式中, P_i 为第 i 个车轮的轮胎耗散功率; $\bar{v}_{xi}$ 为第 i 个车轮的轮胎纵向滑移速度; F_{xi} 为第 i 个车轮的轮胎纵向力; $\bar{v}_{yi}$ 为第 i 个车轮的轮胎侧向滑移速度; F_{yi} 为第 i 个车轮的轮胎侧向力, 以此式作为优化目标, 提出了基于轮胎耗散能最小的转矩分配控制策略。

SUN 等^[24]也专门针对四轮独立驱动汽车转弯工况提出了转弯阻力系数概念,并研究了综合考虑电机工作点效率和转弯阻力的横向转矩定向分配优化控制技术。指出此种优化转矩分配方法在典型工况下可以提高电动汽车驱动效率达到4%以上。GU 等^[25]针对驱动电机随非驱动轮旋转时的铜损和摩擦损失问题,从电机效率模型入手,对电机的铜损和铁损、逆变器损失及摩擦损失都进行了考量,基于能耗分析的方式,提出无论是在驱动还是制动的情况下,转矩都应该平均分配给所有的车轮,以实现永磁同步轮毂电机的能量效率的最大化。

(2) 以提高车辆操控稳定性为目的的分配控制方法。这也是广大学者广泛研究分布式驱动汽车的最主要方面。SAWASE 等^[26]提到在车辆过弯时合理地分配左右车轮转矩可以增加车辆的转弯侧向力裕度以及优化前后轴的侧向力分布,从而使汽车的转向性能有了提升空间。因此,该类转矩分配控制方法更加适用于追求速度极限的高性能车辆上。CHELI 等^[27]中提出了一种应用于适时四驱车辆上的转矩分配控制方法,即中央差速器和后轴差速器联合控制。当车辆左右车轮轮速差大于阈值时,后轴差速器将控制转矩由高速侧车轮向低速侧重新分配,从而维持车辆稳定性。当车辆高速过弯,后轴侧向力快达到附着极限时,中央差速器将控制一部分驱动转矩由后轴转移到前轴,从而提高总的侧向力裕度。WONG 等^[28]则是采用集成控制的方法,先是以能量最优为目标得到基础的分配转矩值,再考虑驾驶员驾驶意图,同时以轮胎工作点、执行器的极限和牵引力极限等作为约束条件,在得到的基础分配转矩值上进行修正,得到最终的转矩分配值,从而兼顾了车辆的经济性与操作性。另外,在以稳定性为控制目标的控制器设计方面,四轮轮毂电机驱动的电动汽车由于传动系统结构简单,驱动电机转矩指令响应快、延时短等特点^[29],因此各轮间更容易实现转矩分配。现有文献中的运动控制器都普遍采用如图1所示的整车稳定性控制架构。

图1 整车控制架构图

该类控制器往往根据实际状态(横摆角速度和质心侧偏角)和依据线性二自由度汽车平面动力学

模型确立的参考状态之间误差的闭环控制作用来求取目标横摆力矩值,并通过转矩分配模块将得到的横摆力矩合理的分配给4个轮毂电机执行器。由于四轮独立驱动作为单输入多输出的过驱动控制系统,在最后的各轮转矩分配时也往往采用同时考虑轮胎工作区间和执行器的约束条件以及轮胎附着裕度均衡等因素的优化控制的各轮转矩分配方法^[30]。

(3) 部分研究将转矩定向分配控制技术应用到车辆的转向过程中。WANG 等^[31]最早提出利用车辆前轴转向轮之间的转矩分配差,产生绕主销的转向力矩差,实现了一种新型的针对电动轮独立驱动汽车的差动助力转向技术(Differential drive assist steering, DDAS),从而类似于电动助力转向(Electric power steering, EPS)系统一样降低转向手力,提高了转向轻便性。其他国内外学者也对DDAS技术领域的具体控制问题开展后续研究,如赵万忠等^[32]同样针对差动助力转向技术研究了提高其路感的鲁棒PID控制方法;WANG 等^[33]研究了旨在改善整车转向失效时作为应急措施的差动转向的鲁棒H_∞输出反馈控制问题;RÖMER 等^[34]也基于传统EPS控制策略设计了DDAS控制策略,以替代EPS节省助力转向能耗。差动助力转向技术对于智能驾驶汽车主动车道保持和主动变道、维稳方面都具有重要应用价值。但由于差动助力转向技术与传统稳定性控制共用一套执行机构,因而前轴差动助力转向时会产生一个干扰车辆稳定性控制的横摆力偶矩,因此WANG 等^[35]提出了基于相平面划分控制域方法的差动助力转向控制与稳定性控制的协调控制方法,扩大了差动助力转向应用的工作范围。

由此可见,四轮轮毂电机驱动的电动汽车可以在转矩定向分配控制技术的帮助下方便地实现各轮的转矩的分配控制,从而以高集成度和多用途目标的方式提升车辆各项性能。但除此之外,在现有技术中还有一种机械装置——TVD 转矩定向分配差速器也可以实现对于转矩的定向分配。代表性的如本田的超级四驱系统(SH-AWD)^[36-38]、里卡多的转矩定向分配中央差速器(TVCD)^[39-40]、三菱的超级主动横摆控制系统(S-AYC)^[41-43]、奥迪的运动差速器^[44-46]、舍弗勒的电动主动差速器^[47-48]等。

2 现有转矩定向分配差速器

2.1 转矩定向分配差速器技术演变

现代汽车转向机构的设计是依据阿克曼原理^[49]

来设计的, 因此, 车辆在转向行驶时, 内侧车轮的行驶路径必然会小于外侧车轮的行驶路径。若两侧的驱动轮用一根刚性轴连接在一起, 则必然会导致内侧车轮滑转, 外侧车轮滑移的情况, 即使是车辆的直线行驶工况, 也会因为路面的凹凸不平而导致左右侧车轮出现转矩差, 出现左右侧车轮的滑转和滑移现象。这种现象会使车轮磨损加剧, 增加燃油消耗, 也会因为车轮滑转而降低了抗侧滑能力, 导致车辆操纵稳定性下降。为了克服上述弊端, 保证车轮与路面间的纯滚动行驶状态, 差速器的发明使得左右车轮摆脱了刚性连接, 解决了左右车轮运动干涉的问题。时至今日, 几乎所有汽车都安装了差速器, 可以说差速器是汽车的必备部件之一。然而, 这些普通差速器虽然可以解决车轮在运动学上的干涉问题, 但是它们还存在一个很大的弊端, 即普通差速器可以实现车辆在正常行驶状态下左右车轮的纯滚动, 却不能按照路面状况动态分配转矩, 它们总是将转矩平均分配给左右车轮, 即所谓“差速不差扭”的特性。当左右车轮的路面附着系数相差较大时, 就可能造成低附着路面上的车轮打滑的情况。

为解决上述弊端, 实现驱动转矩的在差速器两端的可转移性, 出现了托森差速器^[50-51]、黏性联轴差速器^[52]、限滑差速器^[53]等被动差速器。这类被动差速器在左右半轴转速差超过一定阈值时, 便自动的锁紧左右半轴, 使驱动转矩进行重新分配, 由打滑侧车轮转移到非打滑车轮, 解决了普通开放式差速器平均分配转矩特性造成的对开路面汽车无法脱困或单侧车轮打滑失稳的问题。虽然这些被动差速器解决了转矩分配的问题, 但却只能在左右半轴转速差达到一定阈值时才能起作用, 启动也不灵活。因而又出现了半主动差速器——电子限滑差速器(Electronic limited-slip differential, ELSD)^[54]。除了具有用于转矩传递的附加路径的离合器外, ELSD 与传统开放式差速器具有相同的部件, 结构简单可靠。如图 2 所示 Dana 公司的主动限滑差速器就是典型代表^[55], 实现了转矩的可控单向转移。

图 2 Dana 公司的主动限滑差速器(ELSD)

其结构简图如图 3 所示, 假设左侧车轮在地附着路面打滑, 此时差速器壳所受离合器摩擦力矩 T_{CT_L} 与差速器壳转速方向相同, 故为正值, 则有转矩关系式

$$T_{diff} = T_{CT_L} + T_r \quad (2)$$

式中, T_{diff} 为差速器壳总转矩, T_r 为主减速器传入差速器壳的输入转矩。由于差速器平均分配差速器壳转矩于左右半轴, 因此左半轴输出转矩 T_{lr} 为

$$T_{lr} = \frac{T_{diff}}{2} - T_{CT_L} = \frac{T_r}{2} - \frac{T_{CT_L}}{2} \quad (3)$$

右半轴的输出转矩 T_{rr} 为

$$T_{rr} = \frac{T_{diff}}{2} = \frac{T_r}{2} + \frac{T_{CT_L}}{2} \quad (4)$$

因此, 通过控制离合器所传递转矩 T_{CT_L} 的值即可等大反向改变左右车轮的转矩。电子限滑差速器中的离合器可用扭转弹簧阻尼单元^[56]计算得到

$$T_{CT_L} = \text{sat} \left\{ c\Delta\omega + \int_{t_0}^{t_0+t} k\Delta\omega dt \right\} \quad (5)$$

式中, $T_{CT_{rmax}}$ 表示离合器能传递的最大转矩, c 是离合器的阻尼系数, k 是离合器扭转的弹性系数, t_0 是离合器动作时刻, t 是离合器作用的时间, $\Delta\omega = (\omega_{rr} - \omega_{lr})/2$ 表示左右半轴的转速差。

图 3 电子限滑差速器结构简图

由式(3)~(5)可以看出, 虽然电子限滑差速器可以解决被动差速器无法灵活可控的问题, 但是仍然具有只能单向转移转矩的局限性, 即只能由高速侧半轴向低速侧半轴转移转矩。

由上述技术演变可见, 虽然上述差速器在一定程度上解决了转矩分配的问题, 但是这种分配只能让驱动转矩从转速快的一侧车轮向转速慢的一侧车轮转移, 这种只能单向转移转矩的局限性大大降低了差速器进行转矩分配的效果, 影响了装配此类差速器车辆的机动性。为此, 为了提高车辆高速过弯能力和驾驶员的驾驶乐趣, 近年来出现了一些对于新型差速器的研究, 即 TVD 转矩定向分配差速器。

2.2 现有汽车转矩定向分配差速器

不同于前述主动电子限滑差速器, 转矩定向分

配差速器能够任意方向分配左右车轮转矩,即既可以像电子限滑差速器一样将总驱动转矩从高速侧车轮转移至低速侧车轮,亦可以从低速侧车轮转移至高速侧车轮。这样既可以满足湿滑越野路面改善车辆通过性和湿滑铺装路面安全性的要求,又可以在良好铺装路面转弯时向外侧转移更多驱动转矩从而改善车辆操控特性。该技术在海外高端四驱 SUV 以及近几年的高端四驱轿车或跑车上开始使用,如前所述,代表性专利技术不少。这些技术大大改善了这些车辆的高速操控能力和极限过弯能力。

该技术最早的应用见于本田公司的超级操控四驱系统(SH-AWD)^[36-37],并在最近又推出了应用于混合动力四驱汽车的 Hybrid SH-AWD^[38]。SH-AWD 可根据行驶条件将最佳转矩量分配给四个车轮。前后轴的转矩分配量可由电磁离合器控制分配比在 30:70~70:30 变化,而后轴左右两侧车轮的转矩分配比可通过 TVD 在 100:0~0:100 的范围内变化,其结构简图如图 4 所示。

图4 SH-AWD 结构简图

SH-AWD 通过左右两个电磁离合器中电磁螺线管产生的电磁力压紧摩擦片来传递转矩^[37],其转矩传递过程与上述电子限滑差速器类似,在此不再赘述,唯一不同的是由于左右两侧半轴上各有一对行星排传动装置,因此摆脱了转矩只能单向传递的限制^[57]。另外,为了提高汽车后轮的寻迹能力,在主减速器输入轴齿轮前设计了一套行星齿轮增速换挡机构。在正常行驶时传动比为 1,后轴转速与传统汽车一致;在转弯行驶时,档位可以切换到高速挡 0.96,转速提高约 4%,提高后轮循迹能力。在车辆高速转弯时,SH-AWD 系统根据驾驶员的输入来确定合适的转矩分配,使得车辆过弯时始终保持中性转向的特点,提高车辆稳定性和驾驶舒适性。

然而,本田 SH-AWD 系统在汽车匀速或减速过弯工况时存在一定的应用局限性。由于没有额外的

驱动转矩传递至车辆后轴,SH-AWD 系统便无法对内外侧车轮进行转矩分配。此外,在进行后轴左右转矩定向分配时,需要对控制左右两侧的离合器结合程度的液压系统注入能量,无形中增加了多余能量消耗,而且离合器的使用也降低了系统可靠性。

三菱公司生产研发的超级主动横摆控制系统(S-AYC)则可以在任意行驶工况下进行转矩分配。S-AYC 系统主要由差速器、速度增减三联齿轮机构和左右离合器机构构成^[41],结构简图如图 5 所示。

图5 S-AYC 结构简图

如图 5 所示,当差速器的左离合器接合时,传递到左侧车轮的转矩

$$T_l = \frac{T_i}{2} + G_l T_{cl} \quad (6)$$

传递到右侧车轮的转矩

$$T_r = \frac{T_i}{2} - T_{cl} \quad (7)$$

则两侧车轮转矩差

$$T_l - T_r = (G_l + 1)T_{cl} \quad (8)$$

式中, T_i 为输入差速器的总转矩, T_l 为左侧车轮转矩, T_r 为右侧车轮转矩, T_{cl} 为左侧离合器传递转矩, G_l 为左侧离合器接合时,速度增减机构的传动比, $G_l = Z_1 Z_6 / (2Z_3 Z_4)$ ^[58]。转矩分配线路如图 6 所示。

图6 S-AYC 左离合接合后转矩分配路径

当右离合器接合时,传递到左侧车轮的转矩

$$T_l = \frac{T_i}{2} - (G_r)T_{cr} \quad (9)$$

传递到右侧车轮的转矩

$$T_r = \frac{T_i}{2} + T_{cr} \quad (10)$$

则两侧车轮的转矩差

$$T_r - T_l = (G_r + 1)T_{cr} \quad (11)$$

G_r 为右侧离合器接合时, 速度增减机构的传动比, $G_r = Z_1 Z_5 / (2Z_2 Z_4)$ 。转矩分配线路如图 7 所示。

图 7 S-AYC 右离合接合后转矩分配路径

虽然 S-AYC 系统可以通过选择接合左或右离合器实现转矩的双向分配, 但其限制条件却是只有当左右两侧车轮的转速差在一定范围之内才能按式(6)~(11)将转矩双向分配, 否则转矩只能实现单向分配。为了更好地说明以上问题, 采用如图 8 所示转速杠杆分析图法来予以说明^[59]。

图 8 S-AYC 系统转速图

图 8 中 L 和 R 分别表示左右两侧车轮, 差速器壳 I 位于左侧车轮 L 和右侧车轮 R 连线的中点处, 当车辆直线行驶时, 三者转速相同。A 轴由于速度增减机构中的 Z_5/Z_2 齿轮副转速会高于左侧车轮 L, B 轴由于速度增减机构中的 Z_6/Z_3 齿轮副转速会低于左侧车轮 L, 右离合器 CR 和左离合器 CL 分别位于点 AR 和点 BR 的连线上。当车辆转弯, 左侧车轮 L 与右侧车轮 R 的转速将不再相等, 但只有右侧车轮 R 的转速位于 A 轴转速和 B 轴转速之间时, 接合离合器 CL 或者 CR, 才能按式(6)~(11)实现转矩的双向分配。这是因为离合器接合时只能将转矩

由转速高的一侧传递给转速低的一侧, 因此当右侧车轮 R 转速高于 A 轴转速时, 无论接合右离合器 CR 或者左离合器 CL 均只能将转矩由右侧车轮 R 传递至左侧车轮 L, 破坏了转矩向高速侧车轮转矩分配来改善过弯机动性的初衷。同样, 当右侧车轮 R 转速低于 B 轴转速时道理相同。

奥迪公司生产研发的运动型差速器也是这样一类具有转矩定向分配功能的转矩定向分配差速器。该系统主要由主减速器、差速器, 左侧速度调节单元, 右侧速度调节单元和液压执行机构构成^[44], 结构如图 9 所示。

图 9 运动型差速器结构简图

运动型差速器中最核心的结构便是两侧的速度调节单元。速度调节单元主要由多片式离合器, 齿圈 1, 太阳轮 1, 齿圈 2, 太阳轮 2 构成, 其中太阳轮 1 与差速器壳固连, 太阳轮 2 与半轴固连, 齿圈 1 和齿圈 2 分别和多片式离合器的主动片和从动片用花键连接, 固定周向位移, 两对齿圈与太阳轮均为偏心布置, 结构如图 10 所示。

图 10 运动型差速器耦合传动机构剖面图

当车辆在行驶工况下需要进行转矩分配时, 液压执行机构利用油泵将对应侧的耦合传动机构管路中的油液增压, 驱动压盘压紧多片离合器, 减速器

主轴传递的转矩便从差速器壳体分流,一部分通过太阳轮 1 和齿圈 1 减速(传动比 $i_A = 1.152$),再通过齿圈 2 和太阳轮 2 增速(传动比 $i_B = 0.793$),分配到对应侧车轮;两级传动的总结果依旧是使对应侧车轮转速提高(总传动比 $i_A \times i_B = 0.914 < 1$);另一部分则直接通过差速器均等的分配至两侧车轮,然而左右轮的转速实际上受制于转弯几何的约束,轮速差并不能因为离合器的结合发生变化,于是转化为对外侧车轮的转矩转移,从而实现了如图 11 所示的转矩定向分配。当车辆在加速转弯出现不足转向的情况时,运动型差速器便将转矩由内侧车轮转移到外侧车轮,产生一个正向横摆力矩来提高转弯机动性。当车辆在低附着路面行驶出现一侧车轮打滑时,运动型差速器可以将转矩由低附着一侧车轮转移到高附着侧,从而维持车辆稳定性^[60]。

图 11 运动型差速器转矩分配路径

里卡多公司生产研发的转矩定向分配中央差速器(TVCD)则是一种可以将发动机产生的转矩分配至前后车轴的轴间转矩定向分配差速器。该装置包括中央差速器,转矩定向分配机构和一个 TV 电机(转矩分配电机)^[40],其中转矩定向分配机构包括两个相邻的行星排,这两个行星排的行星排特性参数相近,并且齿圈和行星架均为一体化结构,结构简图如图 12 所示。前后轴的转矩分配可由下式表示^[39],传递到前轴的转矩

图 12 TVCD 结构简图

$$T_F = T_E \times R_T \times (1 - R_{CD}) - T_{TV} \times i_{TV} \quad (12)$$

传递到后轴的转矩

$$T_R = T_E \times R_T \times R_{CD} + T_{TV} \times i_{TV} \quad (13)$$

式中, T_E 发动机输出转矩, R_T 为变速器传动比, R_{CD} 为中央差速器的转矩分配比, 后轴比前轴为 60:40, 故 R_{CD} 取值为 0.6, T_{TV} 为 TV 电机转矩, i_{TV} 为 TV 电机转矩通过行星排传递力矩的传动比。

因此, 当车辆直线行驶时, TV 电机不输出转矩, 前后轴转矩按 40:60 分配; 当车辆出现不足转向时, TV 电机输出正向转矩, 增加后轴转矩; 当车辆出现过度转向时, TV 电机输出负向转矩, 增加前轴转矩。

综上, 上述几种转矩定向分配差速器技术均已较为成熟, 并在传统内燃机汽车上得到了应用, 取得了较为不错的效果。但是一方面现阶段该技术只应用在传统内燃机汽车上, 而电动汽车上的应用却少见。另外更重要的是上述 TVD 机构基本上都是采用电磁离合器、液压多片离合器作为执行器的, 这些利用摩擦原理的执行机构的采用, 一方面增加了滑磨损失能, 另一方面降低了系统可靠性、增加了维护成本。而且执行器件一般成对布置在差速器左右两侧, 导致机构复杂、成本高。相比于传统内燃机汽车, 电动汽车虽起步较晚, 但近年来在动力学控制方面却得到了迅速发展^[61], 也逐步出现了一些可用于电动汽车的转矩定向分配差速器的研究。

3 电动转矩定向分配差速器

纵观国内外, 电动汽车的发展基本都起步于对于经济性提升的使用需求。然而随着电动汽车的普及, 电动汽车除了更好的经济性以外, 其个性化需求愈加明显。以特斯拉为代表的高端高性能电动汽车逐渐成为各个车企角逐的主战场。能够提升电动汽车底盘性能的电动转矩定向分配差速器正是提升产品性能、驾驶乐趣、满足个性化需求的重要驱动技术。目前, 还尚未引起广大车企的研发重视。代表性的仅有舍弗勒电动主动差速器和吉林大学双电机电动转矩定向分配驱动桥。

3.1 电动主动差速器

舍弗勒公司研发推出的电动主动差速器系统^[48]便是一种可用于纯电动汽车的转矩定向分配差速器。电动主动差速器系统结构简图如图 13 所示。

如图 13 所示, 电动主动差速器主要由驱动电机, 主减速器, 正齿轮差速器, 耦合传动机构和控制电机构成^[47]。整个装置由驱动电机驱动, 控制电

图 13 电动主动差速器结构简图

机起到调节左右侧车轮转矩分配的作用。耦合传动机构由从左到右 3 个行星排耦合构成，其中行星排 1 的行星轮与正齿轮差速器的右侧行星轮固连，行星排 1 与正齿轮差速器行星排共架。行星排 1 的齿圈与行星排 3 的齿圈相连，行星排 1 的太阳轮与行星排 2 的齿圈相连。行星排 2 和行星排 3 共架，行星排 2 的太阳轮于车架固连，行星排 3 的太阳轮与控制电机的输出轴相连，三个行星排具有相同的特征参数 k 。电动主动差速器的转矩分配的根本原理就是通过耦合传动机构将控制电机产生的转矩叠加于正齿轮差速器的行星轮上，迫使行星轮强行自转差速，自转力矩与左右半轴齿轮经差速器壳传递力矩叠加后输出，从而改变左右车轮的转矩分配。

为了便于分析，定义车辆前进时，车轮的旋转方向为正方向。当控制电机输出转矩进行转矩分配时，控制电机输出转矩 T_{con} 通过行星排 3 中的齿圈输入到行星排 1 中齿圈的转矩

$$T_{R31} = -kT_{con} \quad (14)$$

控制电机通过行星排 3 中的支架输入到行星排 2 中支架的转矩

$$T_{PC32} = (k+1)T_{con} \quad (15)$$

故行星排 2 中齿圈输入到行星排 1 中太阳轮的转矩

$$T_{S21} = \left(\frac{k}{k+1} \right) T_{PC32} = kT_{con} \quad (16)$$

故控制电机输入到行星排 1 中行星齿轮的转矩

$$T_{P1} = T_{R31} - T_{S21} = -2kT_{con} \quad (17)$$

由于正齿轮差速器中的小圆柱行星齿轮与行星排 1 的行星齿轮为一体，因此输入正齿轮差速器中行星齿轮的转矩同样为 T_{P1} ， T_{P1} 迫使正齿轮差速器中的行星齿轮发生自转，而车辆的左右车轮由于运动学约束会抑制这样的自转发生，所以传入至差速

器中行星齿轮的转矩就会被传递给左右两侧的车轮。

此时右侧车轮的输出转矩

$$T_{rw} = \frac{T_t}{2} - \frac{T_{P1}}{2} \frac{Z_h}{Z_p} = \frac{T_t}{2} + \frac{kZ_h}{Z_p} T_{con} \quad (18)$$

式中， T_t 为驱动电机输出转矩， Z_h 为正齿轮差速器半轴齿轮齿数， Z_p 为正齿轮差速器行星齿轮齿数。

左侧车轮的输出转矩

$$T_{lw} = \frac{T_t}{2} + \frac{T_{P1}}{2} \frac{Z_h}{Z_p} = \frac{T_t}{2} - \frac{kZ_h}{Z_p} T_{con} \quad (19)$$

式(18)、(19)中，等号右侧的第一项表示驱动电机输出转矩经差速器平均分配至左右车轮的转矩，第二项表示控制电机分配的转矩。对比式(18)、(19)可知，舍弗勒的电动主动差速器可在不改变总驱动转矩的情况下，仅通过改变控制电机输出转矩，就可以实现左右半轴输出转矩的等大反向任意分配。

3.2 新型电动转矩定向分配差速器

吉林大学提出的转矩定向分配电动驱动桥专利技术，其核心部件也是一种可用于纯电动汽车的具有自主知识产权的新型转矩定向分配差速器^[62-63]。其结构简图如图 14 所示。该转矩定向分配电动驱动桥主要由主驱动电机、主减速器、转矩分配电机、TV 减速机构和行星排耦合机构构成。主驱动电机采用平行于驱动桥轴线布置，并采用双级圆柱齿轮减速器作为主减速器，此种布置可以有效减小驱动桥体积，便于集成式设计。TV 减速机构由第 I 行星齿轮系和第 II 行星齿轮系构成，第 I 行星齿轮系的行星架 1 与第 II 行星齿轮系的太阳轮 2 连接，第 I 行星齿轮系的齿圈 1 与第 II 行星齿轮系的齿圈 2 固定在驱动桥壳体上。行星排耦合机构由第 III 行星齿轮

图 14 转矩定向分配电驱动桥

1. 太阳轮 1 2. 行星架 1 3. 齿圈 1 4. 太阳轮 2 5. 齿圈 2
6. 行星架 2 7. 行星架 3 8. 齿圈 3 9. 太阳轮 3 10. 齿圈 4
11. 行星架 4 12. 太阳轮 4 13. 太阳轮 5 14. 行星架 5 15. 齿圈 5
16. 从动齿轮 2 17. 主动齿轮 2 18. 从动齿轮 1 19. 主动齿轮 1

系、第Ⅳ行星齿轮系和第Ⅴ行星齿轮系构成,第Ⅲ行星齿轮系的齿圈 3 与第Ⅱ行星轮系的行星架 2 连接,行星架 3 与左半轴花键连接,实现径向动力的传递;第Ⅳ行星轮系的齿圈 4 与壳体固连,行星架 4 与第Ⅴ行星轮系的行星架 5 为一体化设计;第Ⅲ行星轮系与第Ⅳ行星轮系的太阳轮为一体化设计,且两排行星轮系特征参数完全相同。第Ⅴ行星轮系为双级行星齿轮系,齿圈 5 与减速器的壳体为一体化设计,太阳轮 5 与左半轴花键连接。

该电动驱动桥能够进行转矩定向分配的根本原因就是第Ⅲ、第Ⅳ和第Ⅴ行星齿轮系构成的行星排耦合机构与原有减速器的基本结构产生了转矩耦合关系,为了便于分析,定义车辆前进时,车轮的旋转方向为正方向。主减速器的减速比 i_0 和 TV 减速机构的减速比 i_1 可表示为

$$i_0 = m \times n \quad (20)$$

$$i_1 = (k_1 + 1) \times (k_2 + 1) \quad (21)$$

式中, m 、 n 、 k_1 、 k_2 分别为主减速器第一级减速比、主减速器第二级减速比、第Ⅰ行星齿轮系和第Ⅱ行星齿轮系的行星排特性参数。

由于 TV 减速机构实际上是一个双排行星轮系减速器,因此,转矩分配电机输出转矩通过 TV 减速机构传递至第Ⅲ行星齿轮系齿圈 3 的转矩

$$T_{R3} = T_0 \times i_1 \quad (22)$$

式中, T_0 为转矩分配电机输出转矩; T_{R3} 为转矩分配电机输出转矩通过 TV 减速机构传递至齿圈 3 的转矩。因此,第Ⅲ行星齿轮系的支架 3 传递至左半轴的转矩

$$T_1 = -\left[\frac{-(k_3 + 1)}{k_3}\right] \times T_{R3} = \frac{(k_3 + 1)}{k_3} i_1 T_0 \quad (23)$$

式中, k_3 为第Ⅲ行星齿轮系和第Ⅳ行星齿轮系的行星排特性参数。因为第Ⅳ行星齿轮系与第Ⅲ行星齿轮系行星排特征参数相同,且第Ⅳ行星齿轮系的太阳轮 4 和第Ⅲ行星齿轮系的太阳轮 3 为一体化设计,由此可得第Ⅳ行星齿轮系的行星架 4 传递至第Ⅴ行星齿轮系的转矩与行星架 3 传递至半轴的转矩等大反向,即为 $-T_1$ 。因此,第Ⅴ行星齿轮系的太阳轮 5 传递至左半轴的转矩 T_2 和第Ⅴ行星齿轮系的齿圈 5 传递至变速器壳体的转矩 T_3 分别为

$$T_2 = -\frac{1}{(k_5 - 1)} \times (-T_1) = \frac{(k_3 + 1)}{k_3(k_5 - 1)} i_1 T_0 \quad (24)$$

$$T_3 = -\left[\frac{-k_5}{(k_5 - 1)}\right] \times (-T_1) = -\frac{(k_3 + 1)k_5}{k_3(k_5 - 1)} i_1 T_0 \quad (25)$$

式中, k_5 为第Ⅴ行星齿轮系的行星排特性参数。所以差速器壳体由于第Ⅴ行星齿轮系齿圈 5 的转矩作用额外传递至左半轴和右半轴的转矩 T_4 为

$$T_4 = \frac{T_3}{2} = -\frac{(k_3 + 1)k_5}{2k_3(k_5 - 1)} i_1 T_0 \quad (26)$$

通过上述分析可知,在转矩分配电机输出转矩时,左半轴输出的转矩由以下几个部分构成,分别是主驱动电机传递至左半轴的转矩、第Ⅲ行星轮系的支架 3 传递至左半轴的转矩 T_1 、第Ⅴ行星齿轮系的太阳轮 5 传递至左半轴的转矩 T_2 、差速器壳体额外传递至左半轴的转矩 T_4 。最终左半轴输出的转矩为上述转矩之和

$$T_{lw} = \frac{i_0 T_M}{2} + T_1 + T_2 + T_4 = \frac{i_0 T_M}{2} + \frac{(k_3 + 1)k_5}{2k_3(k_5 - 1)} i_1 T_0 \quad (27)$$

式中, T_{lw} 为左轮输出转矩; T_M 为主驱动电机输出转矩。

同理可得,在转矩分配电机输出转矩时,右半轴输出的转矩由以下几个部分构成,分别是主驱动电机传递至右半轴的转矩、差速器壳体额外传递至右半轴的转矩 T_4 。最终右半轴输出的转矩为上述转矩之和

$$T_{rw} = \frac{i_0 T_M}{2} + T_4 = \frac{i_0 T_M}{2} - \frac{(k_3 + 1)k_5}{2k_3(k_5 - 1)} i_1 T_0 \quad (28)$$

式中, T_{rw} 为右半轴输出转矩。

式(27)、(28)两式中等号右边的第一项表示差速器平均分配的主驱动电机输出转矩,第二项表示转矩分配电机分配的转矩。对比式(27)、(28)可见,等号右边的第二项等大异号,表明该转矩定向分配电动驱动桥可在不改变总驱动转矩的情况下,仅通过改变转矩分配电机输出的转矩 T_0 ,就可以实现左右半轴输出转矩的等大反向任意分配。通过计算左右半轴输出转矩之差即可求得转矩横向分配(转移)值 ΔT

$$\Delta T = T_{lw} - T_{rw} = \frac{(k_3 + 1)k_5}{k_3(k_5 - 1)} i_1 T_0 = k_{TV} T_0 \quad (29)$$

当 $T_0 > 0$, 转矩分配电机输出正向的转矩时,主驱动电机输出的驱动转矩由右半轴向左半轴分配;当 $T_0 < 0$, 转矩分配电机输出反向的转矩时,主驱动电机输出的驱动转矩由左半轴向右半轴分配^[17]。转矩横向分配(转移)值为 T_0 的 k_{TV} 倍。通过相应的参数匹配和控制,极限情况可以将全部转矩分配值一侧车轮,实现驱动轴的单轮驱动。

由此可见,只要控制 TV 转矩分配电机输出力矩大小,即可满足整车上层控制器对于直接横摆力偶矩的力学需求。而该力学需求既可以根据操控性指标确定,亦或根据节能性指标确定。满足整车在

不同行驶工况或不同驾驶模式下的多样性能需求。具有广泛的应用价值。

4 结论

(1) 基于制动的直接横摆力偶矩控制虽然应用广泛,但是通过这种差动制动方式控制车辆的稳定性有明显的局限性,会对车速造成损失,并且有明显的介入感,会对驾驶员产生干扰。为了解决这些局限性,近年来出现了广泛采用差动驱动的转矩定向分配控制技术的研究。

(2) 转矩定向分配控制技术主要分为两个方面,分别从提高车辆经济性和提高车辆操纵稳定性两个方面去进行转矩分配,在分布式驱动电动汽车上有较好的应用。

(3) 电控限滑差速器/差速锁等有效地改善了车辆的低附着通过性,但是其仅能单向转移差速器两侧车轮驱动转矩的特性限制了其在良好路面对于改善车辆操控特性的作用。为此近年来在高端四驱汽车上出现了转矩定向分配差速器技术的应用。

(4) 电动汽车未来也将趋向高端高性能、多样个性化方向发展,因此对于能够改善车辆底盘性能的先进驱动技术的需求在持续增加。新型的电动转矩定向分配差速器(或驱动桥)能够在不改变总驱动转矩的前提下,等大反向地再分配左右驱动轮转矩。而且无离合器、制动器等摩擦元件,系统可靠。

展望未来智能化电动汽车驱动技术发展,分布式驱动形式亦可通过对轮毂电机(或液压马达等)的控制容易地实现本文所述的转矩定向分配控制技术。但是需要强调的是,分布式驱动其核心优势本质上并不是“分布”布置,而是各轮转矩独立可控的技术优势。如果某项技术能避开轮毂电机功率密度限制和簧下质量增加等技术瓶颈,保留其各轮转矩独立可控的技术特点,为实施转矩定向分配提供条件,则无疑是最佳的电动汽车未来动力传动技术。

总之,电动化的转矩定向分配驱动技术正是现阶段轮毂电机功率密度等技术瓶颈无法显著突破前,能同时具备单电机集中驱动优势和多电机分布式驱动优势的最佳可行解决方案,因而才是继传统动力高端汽车以后可以持续在新能源汽车上发挥技术优势的最佳先进底盘驱动技术之一。

参 考 文 献

- [1] 工业和信息化部. 汽车产业中长期发展规划[EB/OL]. [2017-04-25]. http://www.xinhuanet.com/auto/2017-04/25/c_1120869697.htm.
- [2] 李亮, 贾钢, 宋健, 等. 汽车动力学稳定性控制研究进展[J]. 机械工程学报, 2013, 49(24): 95-107.
LI Liang, JIA Gang, SONG Jian, et al. Progress on vehicle dynamics stability control system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(24): 95-107.
- [3] VAN ZANTEN A. Bosch ESP systems: 5 years of experience[R]. SAE, 2000-1-163, 2000.
- [4] LIEBEMANN E K, MEDER K, SCHUH J, et al. Safety and performance enhancement: The Bosch electronic stability control (ESP) [R]. SAE, 2004-21-0060, 2004.
- [5] VAN ZANTEN A, ERHARDT R, PFAFF G, et al. Control aspects of the Bosch-VDC[C]// International Symposium on Advanced Vehicle Control, June 24-28, 1996, Aachen University of Technology, Aachen, Germany. Yokohama: AVEC, 1996: 573-607.
- [6] WEDLIN J, TILLBACK L R, BANE O. Combining properties for driving pleasure and driving safety: a challenge for the chassis engineer[R]. SAE, 921595, 1992.
- [7] CHELI F, KAKALIS L, ZORZUTTI A. A Torque vectoring control logic for active high performance vehicle handling improvement[C]// International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, September 4-7, 2007, Las Vegas, Nevada. New York: ASME, 2007: 1223-1232.
- [8] SIAMPIS E, MASSARO M, VELENIS E. Electric rear axle torque vectoring for combined yaw stability and velocity control near the limit of handling[C]// 52nd IEEE Conference on Decision and Control, December 10-13, 2013, Florence, Italy. New York: IEEE, 2013: 1552-1557.
- [9] SABBIONI E, CHELI F, VIGNATI M, et al. Comparison of torque vectoring control strategies for a IWM vehicle[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems, 2014, 7(2): 565-572.
- [10] NOVELLIS L D, SORNIOTTI A, GRUBER P. Wheel torque distribution criteria for electric vehicles with torque-vectoring differentials[J]. IEEE Transactions on

- Vehicular Technology, 2014, 63(4): 1593-1602.
- [11] PIYABONGKARN D, LEW J Y, RAJAMANI R, et al. Active driveline torque-management systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2010, 30(4): 86-102.
- [12] VILLANI E. Simulation and control of active differential for improving vehicle handling and lateral performance[C]// 8th International Conference on Engines for Automobiles, September 16-20, 2007, Capri, Italy. Detroit: SAE, 2007: 12-19.
- [13] SAWASE K, INOUE K. Maximum acceptable differential speed ratio of lateral torque-vectoring differentials for vehicles[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2009, 223(8): 967-978.
- [14] KATO T, SAWASE K. Classification and analysis of electric-powered lateral torque-vectoring differentials[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2012, 226(6): 713-724.
- [15] 余卓平, 刘军, 熊璐, 等. 分布式驱动电动汽车操纵性改善控制策略设计[J]. 同济大学学报, 2014, 42(7): 1088-1095.
- YU Zhuoping, LIU Jun, XIONG Lu, et al. Control strategies of handling improvement of distributed drive electric vehicle[J]. Journal of Tongji University, 2014, 42(7): 1088-1095.
- [16] 谢伟东, 徐威, 付志军, 等. 分布式驱动电动汽车的近似最优转矩矢量控制[J]. 汽车工程, 2018, 40(11): 1308-1316.
- XIE Weidong, XU Wei, FU Zhijun, et al. Approximate optimal torque vectoring control for distributed drive electric vehicles[J]. Automotive Engineering, 2018, 40(11): 1308-1316.
- [17] 王军年, 杨斌, 王庆年. 转矩定向分配电驱动桥建模与可行性分析[C]// 中国汽车工程学会越野车技术分会第十一届学术年会, 20180802-04, 中国, 包头. 北京: 中国汽车工程学会, 2018: 773-777.
- WANG Junnian, YANG Bin, WANG Qingnian. Modeling and feasibility analysis of an electric drive axle with torque vectoring function[C]// 11th Annual Meeting of Off-road Vehicle Technology Branch of China Society of Automotive Engineering, August 2-4, 2018, Baotou, China. Beijing: SAE-China, 2018: 773-777.
- [18] 李洋, 张建伟, 郭孔辉, 等. 四轮驱动电动汽车轴间驱动力和制动力分配[J]. 吉林大学学报, 2015, 45(3): 703-710.
- LI Yang, ZHANG Jianwei, GUO Konghui, et al. Driving and braking force distribution between front and rear axles for 4WD electric vehicle[J]. Journal of Jilin University, 2015, 45(3): 703-710.
- [19] 欧阳明高. 迎接新能源智能化电动汽车新时代[J]. 科技导报, 2019, 37(7): 1.
- OUYANG Minggao. Welcome the new era of new energy intelligent electric vehicle[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(7): 1.
- [20] WANG R, CHEN Y, FENG D, et al. Development and performance characterization of an electric ground vehicle with independently actuated in-wheel motors[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8): 3962-3971.
- [21] 余卓平, 张立军, 熊璐. 四驱电动车经济性改善的最优转矩分配控制[J]. 同济大学学报, 2005, 33(10): 1355-1361.
- YU Zhuoping, ZHANG Lijun, XIONG Lu. Optimal torque distribution control to achieve higher fuel economy of 4WD electric vehicle with four in-wheel motors[J]. Journal of Tongji University, 2005, 33(10): 1355-1361.
- [22] NOVELLIS L D, SORNIOTTI A, GRUBER P. Optimal wheel torque distribution for a four-wheel-drive fully electric vehicle[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2013, 6(1): 128-136.
- [23] SUZUKI Y, KANO Y, ABE M. A study on tyre force distribution controls for full drive-by-wire electric vehicle[J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(Suppl): 235-250.
- [24] SUN Wen, WANG Junnian, WANG Qingnian, et al. Simulation investigation of tractive energy conservation for a cornering rear-wheel -independent-drive electric vehicle through torque Vectoring[J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61(2): 257-272.
- [25] GU J, OUYANG M, LU D, et al. Energy efficiency optimization of electric vehicle driven by in-wheel motors[J]. International Journal of Automotive Technology, 2013, 14(5): 763-772.
- [26] SAWASE K, USHIRODA Y, INOUE K. Effect of the right-and-left torque vectoring system in various types of drivetrain[R]. SAE, 2007-01-3645, 2007.
- [27] CHELI F, CIMATTI F, DELLACHÀ P, et al. Development and implementation of a torque vectoring algorithm for an innovative 4WD driveline for a high-performance vehicle [J]. Vehicle System Dynamics,

- 2009, 47(2): 179-193.
- [28] WONG A, KASINATHAN D, KHAJEPOUR A, et al. Integrated torque vectoring and power management framework for electric vehicles[J]. *Control Engineering Practice*, 2016, 48: 22-36.
- [29] 李刚, 宗长富. 四轮独立驱动轮毂电机电动汽车研究综述[J]. *辽宁工业大学学报*, 2014(1): 47-52.
- LI Gang, ZONG Changfu. Review on electric vehicle with four-wheel independent drive in-wheel motors[J]. *Journal of Liaoning University of Technology*, 2014(1): 47-52.
- [30] 余卓平, 姜炜, 张立军. 四轮轮毂电机驱动电动汽车扭矩分配控制[J]. *同济大学学报*, 2008, 36(8): 1115-1119.
- YU Zhuoping, JIANG Wei, ZHANG Lijun. Torque distribution control for four wheel in-wheel-motor electric vehicle[J]. *Journal of Tongji University*, 2008, 36(8): 1115-1119.
- [31] WANG J, WANG Q, JIN L, et al. Independent wheel torque control of 4WD electric vehicle for differential drive assisted steering[J]. *Mechatronics*, 2011, 21(1): 63-76.
- [32] 赵万忠, 王春燕, 张宗强, 等. 轮毂电机独立驱动电动汽车差速转向路感控制研究[J]. *中国机械工程*, 2014, 25(1): 87-91.
- ZHAO Wanzhong, WANG Chunyan, ZHANG Zongqiang, et al. Study on road feel control of differential steering for in-wheel electric vehicle[J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(1): 87-91.
- [33] WANG R, JIN H, HU C, et al. Robust H-infinity output-feedback yaw control for in-wheel motor driven electric vehicles with differential steering[J]. *Neurocomputing*, 2016, 173: 676-684.
- [34] RÖMER J, KAUTZMANN P, FREY M, et al. Reducing energy demand using wheel- individual electric drives to substitute EPS-systems[J]. *Energies*, 2018, 11(1): 1-11.
- [35] WANG Junnian, LUO Zheng, WANG Yan, et al. Coordination control of differential drive assist steering and vehicle stability control for four-wheel-independent-drive EV[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(12): 11453-11467.
- [36] KUNII R, IWAZAKI A, ATSUMI Y, et al. Development of SH-AWD (super handling-all wheel drive) system[J]. *Honda R&D Technical Review*, 2004, 16(2): 9-16.
- [37] IWAZAKI A, KUNII R. Development of a direct electromagnetic clutch[J]. *Review of Automotive Engineering*, 2006, 27(2): 251-257.
- [38] HONDA T. Development of handling performance control for sport hybrid SH-AWD[R]. SAE, 2015-01-1575, 2015.
- [39] WHEALS J C. Torque vectoring driveline: SUV-based demonstrator and practical actuation technologies[R]. SAE, 2005: 631-648.
- [40] WHEALS J C, BAKER H, RAMSEY K, et al. Torque vectoring AWD driveline: Design, simulation, capabilities and control[R]. SAE, 2004-01-0863, 2004.
- [41] USHIRODA Y, SAWASE K, TAKAHASHI N, et al. Development of super AYC[J]. *Mitsubishi Motors Technical Review*, 2003(15): 73-76.
- [42] MIURA T, USHIRODA Y, SAWASE K, et al. Development of integrated vehicle dynamics control system[J]. *Mitsubishi Motors Technical Review*, 2008 (20): 21-25.
- [43] USHIRODA Y, SAWASE K, MIURA T, et al. Integrated vehicle dynamics control for high performance all wheel drive vehicle[C]// *International Symposium on Advanced Vehicle Control*, October 6-9, 2008, Kobe, Japan. Yokohama: AVEC, 2008(143): 863-868.
- [44] MEISSNER T, PINSCHMIDT U, SCHWARZ R, et al. Sport differential for four-wheel drive[J]. *ATZextra Worldwide*, 2010, 15(11): 100-105.
- [45] SCHWARZ R, DICK W, MEISSNER T. Dynamic steering and Quattro with sport differential-two perfect partners for highest agility and active safety[C]// *Proceeding of the 2008 FISITA World Automotive Congress*, September 14-19, 2008, Munich, Germany. Stansted: FISITA 2008: 9-15.
- [46] STRASSER S, BÄR M, SCHWARZ R. The all-wheel drive in the Audi R8 and Audi TT combination of vehicle dynamics and efficiency[J]. *ATZ Worldwide*, 2015, 117(12): 30-33.
- [47] SMETANA T, BIERMANN T, ROHE M, et al. E-Drive with electrically controlled differential[J]. *ATZautotechnologie*, 2011, 11(5): 4-9.
- [48] SMETANA T, BIERMANN T, HÖHN B R, et al. Schaeffler active eDifferential-the active differential for future drive trains[C]// *9th Schaeffler Symposium*, April 13-14, 2010, Baden-Baden, Germany. Herzogenaurach: Schaeffler Technologies AG, 2010: 233-243.
- [49] 郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1991.
- GUO Konghui. *Vehicle handling dynamics*[M]. Changchun:

- Jilin Science and Technology Press, 1991.
- [50] SUHANE A, RANA R S, PUROHIT R. Prospects of torsen differential in four-wheel drive automobile transmission system[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(2): 4036-4045.
- [51] 侯运丰, 刘雨. 托森差速器的传动特性分析[J]. *机械设计*, 2008, 1(3): 33-35.
- HOU Yunfeng, LIU Yu. Transmission characteristics analysis on the torsen typed differential gear[J]. *Journal of Machine Design*, 2008, 1(3): 33-35.
- [52] 马天飞, 王云成, 林洪月. 粘性联轴节在 4WD 汽车上的应用[J]. *兵工学报*, 1999, 20(1): 49-54.
- MA Tianfei, WANG Yuncheng, LIN Hongyue. The application of viscous coupling on 4WD vehicle[J]. *Acta Armamentarii*, 1999, 20(1): 49-54.
- [53] KINSEY J. The advantages of an electronically controlled limited slip differential[R]. SAE, 2004-01-0861, 2004.
- [54] IVANOVIĆ V, HEROLD Z, DEUR J, et al. Experimental setups for active limited slip differential dynamics research[R]. SAE, 2008-01-0302, 2008.
- [55] PARK J, DUTKIEWICZ J, COOPER K. Simulation and control of Dana's active limited-slip differential e-Diff [R]. SAE, 2005-01-0409, 2005.
- [56] 顾福勇, 张代胜, 席彦肇. 离合器接合过程中的汽车传动系扭转振动分析[J]. *合肥工业大学学报*, 2006, 29(7): 809-813.
- GU Fuyong, ZHANG Daisheng, XI Yanbo. Analysis of torsional vibration in clutch's jointing process[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2006, 29(7): 809-813.
- [57] KUNII R, IWAZAKI A, ATSUMI Y, et al. Development of SH-AWD (super handling-all wheel drive) system[J]. *Honda R&D Technical Review*, 2004, 16(2): 9-16.
- [58] 冀杰, 黄岩军, 李云伍, 等. 面向车辆操纵稳定性的主动差速器模型预测控制[J]. *汽车工程*, 2018, 40(2): 206-213.
- JI Jie, HUANG Yanjun, LI Yunwu, et al. Model predictive control for vehicle handling and stability using active differential[J]. *Automotive Engineering*, 2018, 40(2): 206-213.
- [59] SAWASE K, INOUE K. Maximum acceptable differential speed ratio of lateral torque-vectoring differentials for vehicles[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2009, 223(8): 967-978.
- [60] MAKOTO Y, JYUNYA T, SHINJIRO S, et al. Improvement in vehicle agility and stability by G-Vectoring control[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2010, 48(Suppl1): 231-254.
- [61] 余卓平, 冯源, 熊璐. 分布式驱动电动汽车动力学控制发展现状综述[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(8): 105-114.
- YU Zhuoping, FENG Yuan, XIONG Lu. Review on vehicle dynamics control of distributed drive electric vehicle[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(8): 105-114.
- [62] 王军年, 张焱, 李修森, 等. 带有双排行星齿轮转矩定向分配机构的电动差速器: 中国, ZL201510072654.X[P]. 2015-06-03.
- WANG Junnian, ZHANG Yao, LI Xiuse, et al. Electric differential with torque vectoring mechanism having double row planetary gear sets: China, ZL201510072654.X[P]. 2015-06-03.
- [63] WANG Junnian, SUN Nana, LI Xiuse. Drive axle of electric distribution torque: US, US10, 065, 489 B2[P]. 2017-01-26.
-
- 作者简介: 王军年, 男, 1981 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电动汽车动力学与控制。
E-mail: wjn@jlu.edu.cn
- 杨斌, 男, 1994 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为电动汽车动力学与控制。
E-mail: yangbinjlu@163.com
- 王庆年, 男, 1952 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为节能与新能源汽车设计与控制。
E-mail: wqn@jlu.edu.cn
- 倪健士, 男, 1996 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为电动汽车动力学与控制。
E-mail: nijt18@mails.jlu.edu.cn