

DOI: 10.3901/JME.2014.18.099

控制分配理论在车辆动力学控制中的应用*

余卓平^{1,2} 杨鹏飞^{1,2} 熊璐^{1,2}

(1. 同济大学新能源汽车工程中心 上海 201804;

2. 同济大学汽车学院 上海 201804)

摘要: 回顾控制分配理论在分布式电驱动车辆动力学控制中的应用。控制分配是解决执行器冗余控制的有效方法, 它可将控制系统的设计分解为基本控制率的设计与控制分配算法的设计, 降低控制系统设计的复杂度。分布式电驱动车辆的执行器数量多于被控物理量, 是一种典型的执行器冗余控制系统。控制分配理论在分布式电驱动车辆中的应用经历了从简单的显式分配到优化分配的过程。在动力学控制方面, 已形成包含各执行器约束, 考虑轮胎横纵向力耦合的控制分配技术, 结合液压系统与电动机系统进行分配是进一步研究方向。在能耗最优控制中, 控制分配算法通过权重系数可以结合稳定性控制目标, 有利于多目标融合的实现。在系统重构控制中, 目前主要采用基于规则的控制分配方法, 通过优化算法实现系统重构是进一步研究方向。目前应用的控制分配算法以二次规划与伪逆法为主, 主要原因在于这两种方法的实时性好, 且具有较高的分配精度。

关键词: 分布式电驱动车辆; 控制分配; 稳定性控制; 系统重构

中图分类号: U46

Application of Control Allocation in Distributed Drive Electric Vehicle

YU Zhuoping^{1,2} YANG Pengfei^{1,2} XIONG Lu^{1,2}

(1. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804;

2. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract: Review the application of control allocation theory in dynamic control of distributed drive electric vehicle. Control allocation is an effective method to solve actuator redundancy control problems, which could decompose the design of control system into basic control rate design and control allocation algorithm design, and reduce the complexity of the control system design. The number of actuators of distributed drive electric vehicle is more than the number of charged physical quantity; it is a typical redundant control system. The application of control allocation has experienced from simple display allocation to complex optimization allocation. In kinetic control aspect, the control allocation considering constrains of the actuators such as tyre force coupling has been studied; combination of hydraulic system and electrical system is the further research direction. In optimal energy consumption control aspect, the stability control targets can be combined in the control allocation algorithm through weight coefficient, which is conducive to the realization of multi-targets integration. In the system reconfiguration control aspect, rule-based control allocation method is used currently; using optimal control allocation to realize system reconfiguration control is the further research direction. The quadratic programming method and pseudo-inverse method are the research focus currently, mainly because the real-time and accuracy of two methods are quite good.

Key words: distributed electric vehicle; control allocation; stability control; system reconfiguration

0 前言

伴随着能源危机与环境污染, 新能源汽车越来越受到重视, 而分布式电驱动车辆因其结构紧凑、

传递效率高等优势, 在过去的十多年中, 已经逐渐成为人们研究的热点^[1]。在分布式电驱动车辆的动力学研究中, 因其可控制的执行器包含四个轮毂电动机(或轮边电动机)与制动系统的四个车轮制动器, 而被控物理量一般为横摆角速度、质心侧偏角与侧倾角等。执行器数量明显多于被控物理量, 因此, 必然涉及如何将控制指令分配给 8 个执行器的

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2011CB711200)和国家自然科学基金(51105278)资助项目。20131106 收到初稿, 20140514 收到修改稿

问题。

目前,控制分配方法是解决执行器冗余控制的有效方法。该方法最先在航空航天领域应用并发展起来,它包含线性控制分配、非线性优化分配、动态控制分配等^[2]。

控制分配理论在分布式电驱动汽车中的应用发展相对较缓慢,一方面因为分布式电驱动车辆的研究近些年才成为热点,另一方面在稳定性控制中如何设计合理的控制率是研究人员首要关心的问题,只有这个问题得到较好的解决,才会注意到控制分配可以进一步提升整体控制性能。

早期研究中,对四个电动机执行器的处理大多采用显式分配的方法,后逐渐引入优化分配的方法,然后是对优化目标及控制约束的详细考虑。本文从三个方面对控制分配在分布式电驱动车辆动力学中的发展进行梳理,即控制分配技术在车辆稳定性控制中的应用、在车辆能耗最优控制中的应用、在执行器失效模式下的系统重构中的应用。

1 问题描述

从数学的角度讲,控制分配问题可描述为求解具有约束的欠定方程组。对于给定的伪控制指令 $\mathbf{v}(t) \in \mathbf{R}^n$, 寻找对各执行机构的实际控制输入 $\mathbf{u}(t) \in \mathbf{R}^m$

$$\mathbf{B}\mathbf{u}(t) = \mathbf{v}(t)$$

式中 $\mathbf{v}(t)$ —— n 维空间矢量;

$\mathbf{u}(t)$ —— m 维空间矢量;

\mathbf{B} —— 效率矩阵, $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{n \times m}$, $m > n$ 。

一般实际控制系统中,执行机构的输出都会受到物理约束,如位置约束与速率约束。即执行器需要满足

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{\min}(t) \leq \mathbf{u}(t) \leq \mathbf{u}_{\max}(t) \\ \dot{\mathbf{u}}_{\min}(t) \leq \dot{\mathbf{u}}(t) \leq \dot{\mathbf{u}}_{\max}(t) \end{cases}$$

式中 $\mathbf{u}_{\min}(t)$ —— 执行器位置下限值;

$\mathbf{u}_{\max}(t)$ —— 执行器位置上限值。

采用计算机控制时,假设控制系统的采样时间为 Δt ,则可将位置约束与速率约束合并为位置约束

$$\underline{\mathbf{u}}(t) \leq \mathbf{u}(t) \leq \bar{\mathbf{u}}(t)$$

式中 $\bar{\mathbf{u}}(t) = \min(\mathbf{u}(t) + \dot{\mathbf{u}}_{\max}(t) \cdot \Delta t, \mathbf{u}_{\max}(t))$

$\underline{\mathbf{u}}(t) = \max(\mathbf{u}(t) - \dot{\mathbf{u}}_{\min}(t) \cdot \Delta t, \mathbf{u}_{\min}(t))$

由此,线性系统(此处指执行机构的输入输出为线性关系)的控制分配问题可以描述如下

$$\mathbf{B}\mathbf{u}(t) = \mathbf{v}(t)$$

$$\text{s.t. } \underline{\mathbf{u}}(t) \leq \mathbf{u}(t) \leq \bar{\mathbf{u}}(t)$$

分布式驱动电动汽车稳定性控制过程中受力分析如图 1 所示,广义力为驾驶员需求的总纵向力与保持车辆稳定性所需要的横摆力矩。执行器的输出为四个车轮的驱制动力。

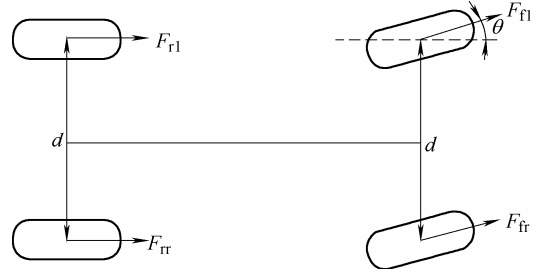


图 1 分布式电驱动车辆受力分析示意图

针对分布式驱动电动汽车

$$\mathbf{u}(t) = (F_{fl} \quad F_{fr} \quad F_{rl} \quad F_{rr})^T \quad \mathbf{v}(t) = (F_x \quad M_z)^T$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\frac{d}{2} & \frac{d}{2} & -\frac{d}{2} & \frac{d}{2} \end{pmatrix}$$

式中 $F_{fl}, F_{fr}, F_{rl}, F_{rr}$ —— 各轮胎纵向力;

F_x —— 车辆的纵向力需求;

M_z —— 车辆的横摆力矩需求。

2 控制分配理论研究进展

控制分配技术最先在飞行控制系统中提出,其发展经历了从简单到复杂,从单目标优化到多目标优化的过程。总体上,控制分配方法分为线性控制分配、优化控制分配、动态控制分配。

2.1 线性控制分配

线性控制分配是指执行器的输出与广义力的需求之间是线性关系。线性控制分配主要包含这些方法:显式分配、直接分配、链式递增法、伪逆法、重新分配伪逆法等。

(1) 显式分配。显式组合法是指预先将执行器按照一定的线性关系进行组合,降低控制分配输出维数,使欠定方程组转化为正定方程组。这种方法比较容易设计,但是缺乏对约束的处理,是一种比较简单的分配思想。

(2) 直接分配。直接分配法最先由 DURHAM^[3]提出,基于可达集的概念,采用面搜索或分边搜索的方式,寻找控制输出 $\mathbf{u}(t)$ 使伪控制指令 $\mathbf{v}(t)$ 的变化幅值最大,如果结果超出了可达集,则按比例缩小增幅。该方法能够有效处理边界约束,但是当执

行器的维数较多时,其可达集的求解运算量会增大,严重降低运算速度^[2]。

(3) 链式递增法。链式递增法的原理是首先将执行器进行分组,依次介入控制,当第一组执行器饱和时,保持饱和输出,计算剩余的广义力,然后第二组执行器介入,直到广义力全部满足为止。该方法的优点是容易实现,缺点是当约束条件动态变化时,会产生较大的广义力误差。

(4) 伪逆法。伪逆法是一种考虑等式约束的优化方法^[4],伪逆法的数学描述为

$$\min J = \frac{1}{2}(\mathbf{u} + \mathbf{c})^T \mathbf{W}(\mathbf{u} + \mathbf{c})$$

$$\text{s.t. } \mathbf{B}\mathbf{u} = \mathbf{v}$$

式中 \mathbf{W} ——权重系数矩阵。

对其构建汉密尔顿函数可求得其解

$$\mathbf{u} = -\mathbf{c} + \mathbf{B}^+(\mathbf{v} + \mathbf{B}\mathbf{c})$$

式中 \mathbf{c} ——执行器的偏移量;

\mathbf{B}^+ —— \mathbf{B} 的广义逆。

伪逆法可求得执行器不饱和时的最优解。当执行器饱和时,该方法无法考虑动态约束,因此无法求得最优解。相关学者在此基础上研究了重新分配伪逆法。

2.2 非线性控制分配

非线性控制分配方法一方面引入优化目标,另一方面可以考虑各种不等式约束,可以有效提高控制分配的精度,但是其算法一般较复杂,当执行器维数增加时,运算量会显著增加,从而降低控制器的实时性。非线性控制分配方法主要包含:二次规划法、序列二次规划法、加权最小二乘法。

(1) 二次规划。二次规划法是指其目标函数为二次型,约束条件是线性函数的规划方法,其数学描述如下

$$\min J = \frac{1}{2}\mathbf{u}^T \mathbf{W}\mathbf{u} + \mathbf{c}^T \mathbf{u}$$

$$\text{s.t. } \mathbf{a}^T \mathbf{u} \geq \mathbf{b}$$

$$\mathbf{a}_m^T \mathbf{u} = \mathbf{b}_m$$

式中 \mathbf{a}, \mathbf{b} ——执行器不等式约束矩阵;

$\mathbf{a}_m, \mathbf{b}_m$ ——执行器等式约束矩阵。

针对具有不等式约束的二次规划问题,求解算法有有效集法、内点法等。

(2) 序列二次规划。序列二次规划法是通过局部线性化,将带有不等式约束的优化问题转化为等式约束的优化问题进行求解。序列二次规划可以保证较好的分配精度,但是计算量大,不利于实时

应用。

(3) 加权最小二乘。加权最小二乘的数学描述如下

$$\mathbf{u} = \arg \min_{\mathbf{u} \leq \mathbf{u} \leq \bar{\mathbf{u}}} (\|\mathbf{W}_u(\mathbf{u} - \mathbf{u}_d)\|_2^2 + \gamma \|\mathbf{W}_v(\mathbf{B}\mathbf{u} - \mathbf{v})\|_2^2)$$

式中 \mathbf{u}_d ——期望控制输入矩阵;

$\mathbf{W}_u, \mathbf{W}_v, \gamma$ ——权重系数。

其求解算法包括有效集法和 KKT 法等。

2.3 动态控制分配

动态控制分配是考虑执行器的动态特性的控制分配方法。当执行器的动态响应频率与被控系统物理量的响应频率接近时,就必须考虑执行器的动态特性了。一般所用方法是基于模型预测控制来实现动态控制分配^[5]。

3 分布式电驱动汽车中的应用现状

3.1 面向车辆稳定性的控制分配策略

分布式驱动电动汽车的稳定性控制多采用分层式模型跟踪控制的方法,因此在初始研究阶段,大部分注意力都在如何设计上层控制器,计算需求的广义力。随着研究的深入,广义力如何分配到四个车轮的问题才逐渐受到研究人员的重视,其发展经历了从简单的显式分配到基于优化的控制分配过程。

3.1.1 基于规则的控制分配策略

文献[6]以同侧车轮驱动力相同为原则进行力矩分配,这种方法计算简单,但是轮胎的合力不均匀,不利于车辆的稳定性。文献[7]采用的是两侧力矩大小相同方向相反的原则,通过动态比例调节前后轴的力矩分配,基于仿真分析了不同比例系数下的控制效果。

文献[8]引入前后轴转矩分配系数与左右侧转矩分配系数,将各个车轮的转矩表示为总的横摆转矩需求与这两个系数的函数。通过设计仿真试验,定量地分析了前后轴转矩分配系数、左右侧转矩分配系数与横摆角速度、侧向加速度的关系,从而根据不同的横摆角速度需求来确定各个车轮的输出转矩。

文献[9]通过变量代换,将优化目标转化为轮胎转矩的二次函数,通过对二次函数求极值来获得最优解。该方法只有在最优解存在的情况下才有控制精度,当最优解不存在时,其分配误差较大。文献[10]为其后续研究成果,采用规则的方法分别设计能效优先与稳定性优先的分配逻辑。总体来说,这种处理方法计算速度快,但分配精度有限。

文献[11]通过稳定性分析得知：不同车轮所能产生的车辆横摆力矩效率是不同的，这与文献[12-13]的研究结果一致。因此，制定了三种基于规则的转矩分配模式：第一种，效率最高的单轮介入；第二种，效率最高与效率次高的两个车轮介入；第三种，多个车轮介入。电动机因为其响应迅速，转矩精确可控，所以一般会选择四个电动机同时介入的策略，该方法未能很好地利用这种驱动形式车辆的优势。

吉林大学的陈禹行^[14]设计了一种新的基于规则的纵向力分配策略。首先通过驾驶员意图识别判断是驱动还是制动工况，然后根据不同轮胎纵向力对转向梯度的影响因子影响不同，选择优先介入轮胎，当一个轮胎达到附着极限仍然不满足横摆力矩需求时，依次增加介入轮胎的个数。该方法实质上为链式递增法，对于边界约束的时变性不具有自适应性能，容易使分配误差变大。

总结以上文献可以看出，基于规则的分配策略是一种比较直接，计算方便的方法。但是这种方法一方面没有考虑执行器的约束，对环境变量不具有自适应性(如路面附着系数的变化)；另一方面不能保证分配精度，容易使整个稳定性控制器的控制效果恶化。

3.1.2 基于优化理论的控制分配

基于优化的控制分配理论在分布式电驱动车上的应用经历了两个阶段：前期是通过引入优化目标，将等式约束代入，通过消元求极值的方法得出最优解；后期是在引入优化目标的前提下，考虑各种约束条件，形成规划问题或最小二乘问题进行求解。

文献[15]以输出力的加权平方和最小为优化目标，用广义逆设计转矩分配控制，通过仿真对比得出优化分配算法能够较好地完成工况

$$J = \min \sum_{i=1}^4 F_i^2$$

之后 PENG 等^[16]通过试验验证了所设计的算法的有效性。该研究的缺陷是未考虑约束条件，因此在系统可能出现退化的情况时，导致广义逆无解。文献[17]提出以纵向力之和最小为优化目标，把轮胎的附着椭圆作为横纵向力的约束进行考虑。

$$J = \min(F_1 + F_2 + F_3 + F_4)$$

日本神奈川工科大学的 MOKHIAMAR 等^[18-23]对四轮独立驱制动与四轮独立转向的车辆动力学集成控制进行了大量的研究。文献[20-23]比较了各种执行器组合形式下，其稳定性优劣。底层的力矩分

配控制中，通过垂向载荷系数，对总横摆力矩进行比例分配。这些研究对早期的动力学控制上层控制器设计及集成控制的研究起到了积极的作用。紧接着，文献[19]首次对轮胎应该如何最优的输出横纵向力进行了探讨，提出了以轮胎利用率最小为代价函数的分配优化目标，并通过消元代换的方法对目标函数求极值从而获得最优解

$$J = \min \sum_{i=1}^4 \frac{F_{xi}^2 + F_{yi}^2}{(u_i F_{zi})^2}$$

式中 u_i ——各轮对应的路面附着系数；

F_{xi} ——各轮纵向力；

F_{yi} ——各轮侧向力；

F_{zi} ——各轮垂向力。

文献[18, 24]进一步提出了以带权重系数的轮胎附着利用率之和最小的优化目标。该文献并未对权重系数的选择进行进一步研究。文献[25]通过驾驶模拟器对所设计的优化算法进行了硬件在环试验，结果表明其可以有效改善车辆的操纵稳定性。

$$J = \min \sum_{i=1}^4 C_i \frac{F_{xi}^2 + F_{yi}^2}{(u_i F_{zi})^2}$$

式中 C_i ——权重系数。

文献[26]在前期研究基础上，研究了不同优化权重系数对稳定性控制的影响。仿真结果表明：当前轴分配权重系数大于后轴分配权重系数时，车辆响应更灵敏；当后轴分配权重系数大于前轴时，车辆更趋于稳定，有利于驾驶员控制。文章只给出了定性的分析，未给出定量结果。

综上所述可以发现 ABE 教授对优化目标有比较深入的研究，但是其并没有考虑轮胎附着约束，所以算法无法保证每个车轮都在附着圆内。底层分配算法也比较简单，其求解过程近似于无约束的伪逆法。

文献[27]在借鉴 ABE 教授研究成果的基础上，定义了轮胎附着余量，并以各轮附着余量最小为优化目标，以各轮附着余量相等为约束条件。文章考虑轮胎附着约束，未考虑执行器的约束，采用序列二次规划法对力矩进行优化分配。仿真试验表明：通过对每个车轮的驱制动及转向控制，达到了轮胎附着余量近似相等的目的。

$$\gamma_i = 1 - \varepsilon_i = \frac{\sqrt{F_{xi}^2 + F_{yi}^2}}{F_{zi}} \quad \gamma_i = \gamma_j \quad i \neq j$$

为了对集成控制中的底层分配策略进行深入的分析，文献[28]从非优化分配与优化分配两个方面对其进行了研究。文献以滑移率与车轮转角为控

制变量, 设计了如下所示的综合优化指标: 控制能量、控制增量与控制误差加权之和最小。文章采用二次规划对问题进行求解, 利用逆轮胎模型将求解出来的变量转化为响应的车轮转矩与转向盘转角。

$$J = \mathbf{u}^T \mathbf{W}_u \mathbf{u} + (\mathbf{u} - \mathbf{u}_0)^T \mathbf{W}_{\Delta u} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_0) + \mathbf{E}^T \mathbf{W}_E \mathbf{E}$$

式中 \mathbf{W}_u —— 控制输入权重系数;

$\mathbf{W}_{\Delta u}$ —— 控制增量权重系数;

\mathbf{W}_E —— 控制误差权重系数;

\mathbf{u}_0 —— 上一步长控制输入矩阵。

随着规划方法的工程实践应用越来越广泛, 越来越多的研究人员将这种方法应用于分布式驱动电动汽车稳定性控制中。不足之处多在于约束条件的考虑不够全面。如文献[29-30]利用序列二次规划方法求解控制分配问题。文献[31]采用线性规划的方法设计控制分配模块。文献[32-35]将轮胎的椭圆约束简化为线性约束进行处理, 采用二次规划法求解, 文章对二次规划法的实时性给予了肯定。文献[32]通过改进有效集算法, 进一步减少了迭代次数, 提高了二次规划算法的实时性。文献[36]将二次规划问题转化为加权最小二乘问题进行求解, 取得了较好的分配精度及实时性。

文献[37-42]通过设计动态更新率, 将非线性控制分配问题转化为优化控制问题, 避免了在每一个采样点的迭代计算, 提高运算速度。但该方法没有考虑外部扰动与未建模动态的影响, 鲁棒性有待进一步验证^[43]。文献[44]首先对各纵向力、各侧向力、各垂向力分别设计比例系数进行约束, 然后通过构建汉密尔顿函数, 根据 KKT 条件求解最优解, 该方法在比例系数的选取方面尚需要进行理论分析。

吉林大学的陈国迎^[45]对四轮驱动电动汽车的集成控制进行了研究。控制分配器的设计中, 考虑了各等式约束与不等式约束, 并引入加权轮胎利用率平方和最小为优化目标, 但其处理方法不同于二次规划法。为简化求解过程, 先对等式约束进行处理, 通过求偏导可得出最优解; 当最优解触碰约束边界时, 将其值固定, 然后对剩余的执行器进行最优求解, 直到所有执行器都饱和。该方法的缺点是需要把所有的组合方式都进行最优值求解, 并且非线性约束是时变的, 其运算量比较大, 文章也未对其实时性进行考察。

文献[36, 46]通过对附着椭圆进行拟合, 充分考虑了轮胎的横纵耦合特性。通过对效率矩阵进行实时更新, 使其控制更精确。仿真结果显示, 该方法可以有效地降低执行器的能耗。不足之处是文章未对附着椭圆的拟合精度进行说明。

3.2 面向能耗最优及执行器失效模式下的控制分配策略

分布式驱动电动汽车中, 除了稳定性研究是一大热点外, 经济性亦是人们关注的重要领域。针对分布式驱动电动汽车的能效最优控制策略, 俄亥俄州立大学的 CHEN 等^[47-54]做了大量的研究工作。以能效最优为优化目标, 分别采用全局最优方法及自适应方法设计了控制分配模块。

$$J = \min \sum_{i=1}^4 \frac{P_i(u_i)}{\eta_i(u_i)}$$

式中 $P_i(u_i)$ —— 各轮输出功率;

$\eta_i(u_i)$ —— 各轮效率。

文献[55-56]针对分布式驱动电动汽车, 以能耗最优为控制目标, 研究了其分配策略。其中文献[55]得出的结论是四轮转矩平均分配时, 其能量效率最优。且全时四驱比分时四驱或分时两驱的效率都高。文献[56]得出的结论与上述结果不同, 该文献仿真结果表明, 通过调节前后轴的驱动转矩分配系数, 可有效提高整车的能效。

文献[57]以系统能效为主要优化目标, 同时引入权重因子对稳定性加以考虑。其目的是在车辆稳定性的前提下, 提高系统的能效。文章提出了优化目标及约束条件, 但是未对如何求解该问题进行详细叙述。

文献[58]设计了基于规则执行器失效处理模式, 分别制定了在单轮, 双轮及多轮失效情况下的控制策略。文献[59]基于优化方法设计失效处理策略, 当某个车轮失效时, 剩余的车轮可以通过优化分配来实现车辆的稳定性控制。

文献[60-61]采用基于二次规划的控制分配方法对不同执行器的组合情况下, 车辆的稳定性控制进行了研究。所采用的执行器组合包括以下几方面: ① 前轮转向与前后轴差动制动; ② 前后轮转向与前后轴差动制动; ③ 前后轮转向与四轮独立转矩驱动。文献分析了失效情况下控制性能, 得出的结论是第三种组合形式最优。

3.3 电动机与液压力复合的控制分配策略

液压系统制动力矩较大, 但响应频率较低, 电动机系统制动力矩较小但响应频率高。两套系统各自有优缺点, 如何利用其各自的优点提升车辆的稳定性是研究的热点。目前电液复合控制多用于车辆的复合制动过程, 在车辆的操纵稳定性控制中研究较少。

针对制动力矩的分配, 一些学者提出了根据各执行器的特点设计考虑执行器约束的优化分配策

略。如文献[62-63]针对前后轴电动机驱动的混合动力汽车(发动机前置),考虑电动机与制动系统的约束设计了模糊控制器来求解需求制动力矩,利用优化算法以横摆角速度与质心侧偏角跟踪误差最小为优化目标来分配电动机与液压制动力矩。文献[64]针对电动机转矩响应迅速但幅值小;液压系统响应慢但幅值大的特点,采用平行搜索(Parallel quest, PQ)方法设计了电液复合控制器。双级驱动系统的控制方法主要有主从控制与平行控制两大类, PQ方法属于平行控制方法,因其比较复杂作者又设计了频率分离法,利用电动机对液压制动系统进行补偿,从而减少控制误差。

在电液复合制动策略的研究中比较有借鉴意义的是分层控制策略。文献[65]通过分层控制结构将滑移率控制与力矩分配解耦。设计鲁棒自适应滑移率控制器来求解各轮的总制动力矩,然后通过控制分配模块将该力矩分配给电动机与液压制动系统。在制动力分配模块,文章设计了基于优化的控制分配策略,考虑了电动机与液压系统的位置约束,速率约束以及电池的充放电速度约束。

文献[66]对电液复合控制分配进行了探索性研究,制定了电动机与液压力在稳定性控制中的介入逻辑。优先使用电动机进行稳定性控制,当电动机失效或达到能力上限时,液压介入。仿真结果表明其逻辑能够较好地控制车辆的稳定性。由于其分配算法采用的是电动机平均分配,液压力单轮介入,不是基于优化的分配算法,故在极限工况下的性能有待进一步验证。文献[67]采用优化分配的方法,将电动机与液压力作为平行的执行器进行考虑,通过增加约束,使其能够有效处理电动机力与液压力的协调。仿真结果显示其性能优于单纯电动机介入的稳定性控制。

4 结 论

本文对控制分配理论进行了简单的概述,主要总结了控制分配理论在分布式电驱动汽车中的应用发展进程。通过以上文献分析,概括为以下几个方面。

(1) 在车辆稳定性控制中,目前应用较广的主要是伪逆法与二次规划法。这主要是由于稳定性控制对算法的实时性要求较高,目前二次规划法通过改良有效集解法,可以大大提高运算速度,满足实时性的需求,尤其是对于中小规模的控制分配问题。对约束的全面考虑,包括对轮胎横纵耦合特性的考虑,进一步提高了控制分配精度。纯电动机的控制

分配应用已经较成熟,需要进一步考虑与滑移率控制的结合。

(2) 在车辆能耗最优控制中,通过对各种约束条件的考虑,能够有效提高车辆在综合工况下的能源利用效率。针对分布式电驱动汽车的系统重构控制,目前研究处于发展初期,大部分采用的是简单的逻辑法则;公开文献中有提及到利用二次规划法可进行系统重构,但未见仿真及试验结果。

(3) 电液复合稳定性控制作为分布式电驱动汽车一个重要的发展方向,目前仍处于发展初期,研究重点是如何合理地协调电动机与液压力的介入。进一步研究可考虑电动机与液压系统的不同特性,针对不同的执行器特性,设计不同的控制分配策略。

参 考 文 献

- [1] MURATA S. Innovation by in-wheel-motor drive unit[C/CD]//The 10th International Symposium on Advanced Vehicle Control. August 22-26, 2010, Loughborough, UK.
- [2] 马建军. 过驱动系统控制分配理论及其应用[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2009.
MA Jianjun. Research and application of control allocation theory for over actuated systems[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- [3] DURHAM W. Constrained control allocation[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 1993, 4(16): 717-725.
- [4] OPPENHEIMER M W, DOMAN D B, BOLENDER M A. Control allocation for over-actuated systems[C/CD]//The 14th Mediterranean Conference on Control and Automation. 2006.
- [5] ZACCARIAN L. Dynamic allocation for input redundant control systems[J]. Automatica, 2009, 45(6): 1431-1438.
- [6] SAKAI S, SADO H, HORI Y. Dynamic driving/braking force distribution in electric vehicles with independently driven four wheels[J]. Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, 2002, 138(1): 79-89.
- [7] 徐凌凡. 基于轮胎非线性特性的四轮驱动电动汽车操纵稳定性控制方法研究[D]. 广州:华南理工大学, 2012.
XU Lingfan. Research on four wheel drive electric vehicle handling and stability control method based on tire nonlinear characteristic[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [8] OSBORN R, SHIM T. Independent control of all-wheel-drive torque distribution[C/CD]//SAE 2004

- Automotive Dynamics, Stability & Controls Conference and Exhibition. 2004, Detroit, USA.
- [9] 邹广才, 罗禹贡, 李克强. 基于全轮纵向力优化分配的4WD车辆直接横摆力矩控制[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 1-6.
- ZOU Guangcai, LUO Yugong, LI Keqiang. 4WD vehicle DYC based on tire longitudinal forces optimization distribution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 1-6.
- [10] 褚文博, 罗禹贡, 赵峰, 等. 分布式驱动电动汽车驱动转矩协调控制[J]. 汽车工程, 2012(3): 185-189.
- CHU Wenbo, LUO Yugong, ZHAO Feng, et al. Driving torque coordination control of distributed drive electric vehicles[J]. Automotive Engineering, 2012(3): 185-189.
- [11] 张缓缓. 采用电动轮驱动的电动汽车转矩协调控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- ZHANG Huanhuan. Research on the torque coordinating control of in-wheel motor driving electric vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [12] van ZANTEN A T. Bosch ESP systems: 5 years of experience[R]. SAE, 2000-1-1633, 2000.
- [13] van ZANTEN A T, ERHARDT R, PFAFF G, et al. Control aspects of the Bosch-VDC[C/CD]//International Symposium on Advanced Vehicle Control. Aachen, Germany: Aachen University of Technology, 1996.
- [14] 陈禹行. 布式驱动电动汽车直接横摆力矩控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- CHEN Yuxing. Study of direct yaw moment control for in-wheel motor electric vehicles[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [15] HORI Y, PENG H. Optimum traction force distribution for stability improvement of 4WD EV in critical driving condition[C]// The 9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control. 2006: 596-601.
- [16] PENG H, HORI Y. Experimental evaluation of dynamic force distribution method for EV motion control[C/CD]//Power Conversion Conference, Nagoya, 2007.
- [17] PENG H, HU J. Traction/braking force distribution for optimal longitudinal motion during curve following[J]. Vehicle System Dynamics, 1996, 26(4): 301-320.
- [18] MOKHIAMAR O, ABE M. Simultaneous optimal distribution of lateral and longitudinal tire forces for the model following control[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2004, 126(4): 753-763.
- [19] MOKHIAMAR O, ABE N. Effects of an optimum cooperative chassis control from the viewpoint of tire workload[J]. Transaction of Society of Automotive Engineers of Japan, 2004, 35(3): 215-221.
- [20] MOKHIAMAR O, ABE N. Examination of different models following types of yaw moment control strategy for improving handling safety of a car-caravan combination[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering, 2003, 217(D7): 561-571.
- [21] MOKHIAMAR O, ABE M. Effects of model response on model following type of combined lateral force and yaw moment control performance for active vehicle handling safety[J]. JSAE Review, 2002, 23(4): 473-480.
- [22] MOKHIAMAR O, ABE M. Active wheel steering and yaw moment control combination to maximize stability as well as vehicle responsiveness during quick lane change for active vehicle handling safety[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering, 2002, 216(D2): 115-124.
- [23] MOKHIAMAR O, ABE M. Combined lateral force and yaw moment control to maximize stability as well as vehicle responsiveness during evasive maneuvering for active vehicle handling safety[J]. Vehicle System Dynamics, 2002, 37: 246-256.
- [24] ABE M, MOKHIAMAR O. An integration of vehicle motion controls for full drive-by-wire vehicle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 2007, 221(1): 117-127.
- [25] MOKHIAMAR O, ABE M. Experimental verification using a driving simulator of the effect of simultaneous optimal distribution of tyre forces for active vehicle handling control[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers part d-Journal of Automobile Engineering, 2005, 219(D2): 135-149.
- [26] MOKHIAMAR O, ABE M. How the four wheels should share forces in an optimum cooperative chassis control[J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(3): 295-304.
- [27] ONO E, HATTORI Y, MURAGISHI Y, et al. Vehicle dynamics integrated control for four-wheel-distributed steering and four-wheel-distributed traction/braking systems[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(2): 139-151.
- [28] 李道飞. 基于轮胎力最优分配的车辆动力学集成控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- LI Daofei. Study on integrated vehicle dynamics control

- based on optimal tire force distribution[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [29] 王博. 四轮独立电驱车辆实验平台及驱动力控制系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- WANG Bo. Study on experiment platform of four-wheel-independent-drive EV and its driving force control system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [30] HATTORI Y. Optimum vehicle dynamics control based on tire driving and braking forces[J]. R&D Review of Toyota CRDL, 2003, 4(38): 23-29.
- [31] FREDRIKSSON J, ANDREASSON J, LAINE L. Wheel force distribution for improved handling in a hybrid electric vehicle using nonlinear control[C/CD]// The 43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2004.
- [32] SCHOFIELD B. On active set algorithms for solving bound-constrained least squares control allocation problems[C/CD]//American Control Conference, 2008.
- [33] SCHOFIELD B, HAGGLUND T. Optimal control allocation in vehicle dynamics control for rollover mitigation[C/CD]// American Control Conference, 2008.
- [34] SCHOFIELD B, HAGGLUND T, RANTZER A. Vehicle dynamics control and controller allocation for rollover prevention[C/CD]//IEEE International Conference on Control Applications, 2006.
- [35] SCHOFIELD B. Vehicle dynamics control for rollover prevention[D]. Lund: Lund University, 2006.
- [36] XIONG L, YU Z, WANG Y, et al. Vehicle dynamics control of four in-wheel motor drive electric vehicle using gain scheduling based on tyre cornering stiffness estimation[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(6): 831-846.
- [37] TJONNAS J, JOHANSEN T A. Stabilization of automotive vehicles using active steering and adaptive brake control allocation[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(3): 545-558.
- [38] JOHANSEN T A, FUGLSETH T P, TØNDEL P, et al. Optimal constrained control allocation in marine surface vessels with rudders[J]. Control Engineering Practice, 2008, 16(4): 457-464.
- [39] TJØNNÅS J, JOHANSEN T A. Adaptive control allocation[J]. Automatica, 2008, 44(11): 2754-2765.
- [40] TØNDEL P, JOHANSEN T A. Control allocation for yaw stabilization in automotive vehicles using multiparametric nonlinear programming[C/CD]//Proceedings of American Control Conference, 2005.
- [41] JOHANSEN T A. Optimizing nonlinear control allocation[C/CD]//The 43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2004.
- [42] TØNDEL P, JOHANSEN T A. Lateral vehicle stabilization using constrained nonlinear control[C/CD]// Proceedings of European Control Conference, 2003.
- [43] 范金华, 马建军, 郑志强, 等. 基于控制分配的过驱动系统稳定性设计方法综述[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(增刊 1): 7-11.
- FAN Jinhua, MA Jianjun, ZHENG Zhiqiang, et al. An overview of stability design methods for over actuated systems based on control allocation[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(Suppl.1): 7-11.
- [44] 杨建森. 面向主动安全的汽车底盘集成控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- YANG Jianshen. Research on integrated chassis control strategy for vehicle active safety[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [45] 陈国迎. 四轮独立线控电动汽车试验平台搭建与集成控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- CHEN Guoying. Research on experiment platform of by-wire electric vehicle with four wheels independent control and its integrated chassis control strategy[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [46] XIONG L, YU Zhuoping. Control allocation of vehicle dynamics control for a 4 in-wheel-motored EV[C/CD]// The 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System, 2009, Shenzhen.
- [47] CHEN Y, WANG J. Design and experimental evaluations on energy efficient control allocation methods for over actuated electric vehicles[J]. Longitudinal Motion Case, 2013, 19(2): 1-11.
- [48] LI Xiaodong, CHEN Yan, WANG Junmin. In-wheel motor electric ground vehicle energy management strategy for maximizing the travel distance[C/CD]// American Control Conference, 2012, Montreal.
- [49] CHEN Yan, WANG Junmin. Design and evaluation on electric differentials for overactuated electric ground vehicles with four independent in-wheel motors[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(4): 1534-1542.
- [50] CHEN Yan, WANG Junmin. A branch-and-bound algorithm for energy-efficient control allocation with applications to planar motion control of electric ground vehicles[C/CD]//American Control Conference, 2012, Montreal.
- [51] CHEN Yan, WANG Junmin. Fast and global optimal

- energy-efficient control allocation with applications to over-actuated electric ground vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(5): 1202-1211.
- [52] CHEN Yan, WANG Junmin. Energy-efficient control allocation with applications on planar motion control of electric ground vehicles[C/CD]//American Control Conference (ACC), 2011, San Francisco.
- [53] CHEN Yan, WANG Junmin. An adaptive energy-efficient control allocation on planar motion control of electric ground vehicles[C/CD]// The 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, 2011, Orlando.
- [54] CHEN Yan, WANG Junmin. A global optimization algorithm for energy-efficient control allocation of over-actuated systems[C/CD]//American Control Conference, 2011, San Francisco.
- [55] 卢东斌, 欧阳明高, 谷靖, 等. 四轮驱动电动汽车永磁无刷轮毂电机转矩分配[J]. 清华大学学报, 2012(4): 451-456.
LU Dongbin, OUYANG Minggao, GU Jing, et al. Torque distribution algorithm for a permanent brushless DC hub motor for four-wheel drive electric vehicles[J]. Journal of Tsinghua University, 2012(4): 451-456.
- [56] 姜男. 轮毂电机电动汽车动力学建模与转矩节能分配算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
JIANG Nan. Study on dynamics modeling and energy-efficient torque allocation algorithm for in-wheel motor electric vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [57] 续丹, 王国栋, 曹秉刚, 等. 独立驱动电动汽车的转矩优化分配策略研究[J]. 西安交通大学学报, 2012(3): 42-46.
XU Dan, WANG Guodong, CAO Binggang, et al. Study on optimizing distribution strategy for independent 4WD electric vehicle[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012(3): 42-46.
- [58] 褚文博, 罗禹贡, 韩云武, 等. 基于规则的分布式电驱动车辆驱动系统失效控制[J]. 机械工程学报, 2012, 48(10): 90-95.
CHU Wenbo, LUO Yugong, HAN Yunwu, et al. Rule-based traction failure control of distributed electric drive vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(10): 90-95.
- [59] WANG R, WANG J. Fault-tolerant control for electric ground vehicles with independently-actuated in-wheel motors[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-transactions of the ASME, 2012, 134(2): 021014.1-021014.10.
- [60] PLUMLEE J H. Multi-input ground vehicle control using quadratic programming based control allocation techniques[D]. Auburn: Auburn University, 2004.
- [61] PLUMLEE J H, BEVLY D M, HODEL A S. Control of a ground vehicle using quadratic programming based control allocation techniques[C/CD]//Proceedings of the American Control Conference, 2004.
- [62] KIM D, HWANG S, KIM H. Vehicle stability enhancement of four-wheel-drive hybrid electric vehicle using rear motor control[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(2): 727-735.
- [63] KIM D, KIM J, HWANG S, et al. Optimal brake torque distribution for a four-wheel-drive hybrid electric vehicle stability enhancement[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering, 2007, 221(11): 1357-1366.
- [64] OKANO T, SAKAI S, UCHIDA T. Braking performance improvement for hybrid electric vehicle based on electric motor's quick torque response[C/CD]//Process of the 19th. Electric Vehicle Symposium, 2002.
- [65] de CASTRO R, ARAUJO R E, TANELLI M, et al. Torque blending and wheel slip control in EVs with in-wheel motors[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(1): 71-94.
- [66] 孙勇. 分布式驱动电动汽车横摆稳定性控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
SUN Yong. Research on yaw stability control of distributed drive electric vehicles[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [67] 杨鹏飞, 熊璐, 余卓平. 四轮轮毂电机驱动电动汽车电机/液压系统联合控制策略[J]. 汽车工程, 2013(10): 10-15.
YANG Pengfei, XIONG Lu, YU Zhuoping. Motor/hydraulic systems combined control strategy for four in-wheel motor driven electric vehicle[J]. Automotive Engineering, 2013(10): 10-15.

作者简介: 余卓平, 男, 1960年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。

主要研究方向为车辆动力学与控制。

E-mail: yuzhuoping@tongji.edu.cn

杨鹏飞, 男, 1987年出生, 博士研究生。主要研究方向为车辆动力学控制与控制分配应用。

E-mail: alexander.pf.yang@gmail.com

熊璐(通信作者), 男, 1978年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。

主要研究方向为车辆动力学与控制。

E-mail: xionglu.gm@gmail.com