

# 汽车传动系统平顺性驾驶品质控制

高炳钊<sup>1</sup>, 洪金龙<sup>1</sup>, 陈虹<sup>1,2†</sup>

(1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130025; 2. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130025)

**摘要:** 汽车驾驶性能是现代汽车的主要性能之一, 与汽车动力性、乘员舒适性有很大关系. 发动机、变速器的扭矩输出, 离合器的分离接合过程等对汽车平顺性都有很大影响. 本文介绍了汽车传动系统各组成部分工作原理及其动力学模型, 并对影响汽车平顺性的起步控制、换挡控制、急加减速控制、发动机启停控制和间隙补偿控制及其控制算法进行了详细阐述. 最后总结了汽车传动系统及其控制策略并介绍近段时间内汽车的研究热点, 包括汽车电动化所引起的协调控制问题及智能化对驾驶性能控制的影响等.

**关键词:** 传动系统; 平顺性控制; 汽车电动化; 换挡控制; 离合器控制

中图分类号: TP273 文献标识码: A

## Drivability control of automotive drivetrain

GAO Bing-zhao<sup>1</sup>, HONG Jin-long<sup>1</sup>, CHEN Hong<sup>1,2†</sup>

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun Jilin 130025, China;

2. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130025, China)

**Abstract:** Drivability of automotive drivetrain is one of the main properties of the vehicles, and is closely related to the dynamic performance and comfort of passenger feelings. The change of engine torque and the release and engagement of clutch influence the drivability of automotive drivetrain greatly. This paper introduces the dynamic model of each part of the drivetrain, and demonstrates the working scenarios that affect drivetrain drivability: launch control, gear shift control, anti-jerk control, engine start-stop control and backlash compensation control. For each working scenario, the control method and algorithm are described in detail. Finally, the conclusions are given and the research hotspots in the near future are pointed out, including coordination control of electrified vehicles as well as the effects of intelligent control.

**Key words:** automotive drivetrain; drivability control; electrified vehicles; gear shift control; clutch control

### 1 汽车传动系统简介(Introduction of automotive drivetrain)

汽车传动系统(图1)是指发动机/电机和车轮之间进行动力传递的部件总成. 在驱动模式, 动力传递方向从发动机/电机到车轮; 在发动机反拖和制动能量回收模式, 动力传递方向从车轮到发动机/电机.

从发动机输出端开始, 传动系统依次包括离合器、变速器、传动轴、差速器、驱动半轴、车轮. 离合器可以切断或接合发动机与车辆之间的扭矩传递, 从而完成车辆起步或换挡. 变速器能够改变传动速比, 从而对发动机的转速和扭矩进行降速增扭(超速挡除外), 以实现期望的驱动扭矩特性, 见图2. 以图中低挡为例,

车速/变速器输出转速较低的同时发动机扭矩被放大了较高的倍数.

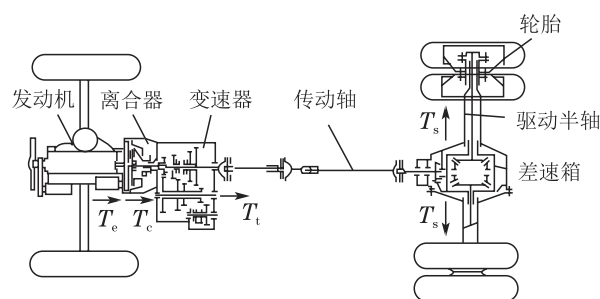


图 1 前置后驱 FR(front engine, rear wheel drive)传动系统  
Fig. 1 FR drivetrain (front engine, rear wheel drive)

收稿日期: 2016-07-29; 录用日期: 2017-07-04.

†通信作者. E-mail: chenh@jlu.edu.cn; Tel.: +86 431-85691900.

本文责任编辑: 胡跃明.

国家自然科学基金项目(61522307, 61520106008, 61374046); 吉林省科技厅重点攻关项目(20150204056GX)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61522307, 61520106008, 61374046) and Key Research Project of Science and Technology Department of Jilin Province (20150204056GX).

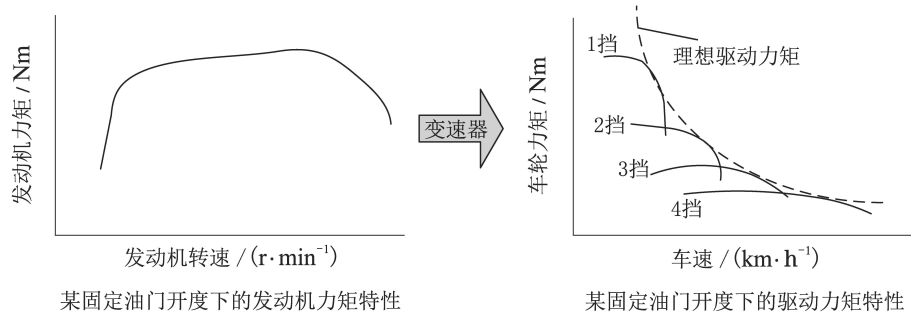


图2 发动机扭矩经过有级式变速器后转化为车轮驱动扭矩

Fig. 2 Engine torque is converted to the wheel drive torque through the step speed transmission

### 1.1 发动机(Engine)

在传动系统控制中,通常将发动机看做一个执行器,用来实现传动系统提出的目标扭矩或目标转速.如果不考虑发动机的复杂动力学特性,可以采用简化的扭矩MAP模型,这样能够大大降低控制系统与控制算法的复杂程度.简化的发动机模型可以描述为

$$I_e \dot{\omega}_e + C_e \omega_e = T_e - T_c, \quad (1)$$

其中:  $I_e$ 是曲轴转动惯量,  $C_e$ 是阻尼系数,  $\omega_e$ 是发动机转速,  $T_e$ 是发动机扭矩,  $T_c$ 是离合器传递扭矩.

发动机扭矩表达为发动机转速和节气门开度的静态MAP表

$$T_e = T_e(\omega_e, \theta_{th}), \quad (2)$$

其中  $\theta_{th}$  是发动机节气门开度.

发动机扭矩MAP是通过静态台架试验获取的.在最大节气门开度下得到的转速-扭矩特性叫做发动机外特性,部分节气门开度下的转速-扭矩特性为部分油门特性.图3为一个典型2000 cc汽油发动机的扭矩MAP图<sup>[1]</sup>.

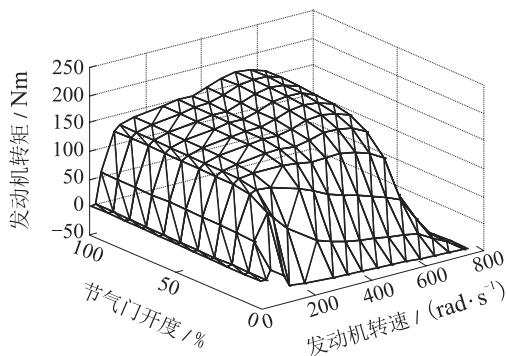


图3 发动机扭矩MAP

Fig. 3 MAP of engine torque

### 1.2 离合器(Clutch)

车用离合器主要包括干式离合器和湿式离合器两类.干式离合器可分为分离、滑摩和锁止3个工作状态:分离状态时,离合器主从动盘分离,传递扭矩

为零;滑摩状态时,主从动盘之间存在转速差,离合器可传递扭矩;锁止状态时,主从动盘接合为一体,具有相同转速.摩擦片上嵌有减振弹簧和阻尼元件,可以衰减发动机燃烧、做功、进排气等离散事件带来的发动机曲轴振动.

当离合器处于滑摩状态时,离合器传递的扭矩  $T_c$  是由压盘夹紧力和动摩擦系数所决定的:

$$T_c = F_c \mu_d R_c \text{sgn}(\Delta\omega), \quad (3)$$

其中:  $F_c$ 是夹紧力,  $\mu_d$ 为动摩擦系数,  $R_c$ 是有效摩擦半径,  $\Delta\omega$ 为离合器前后转速差.需要指出的是动摩擦系数  $\mu_d$  和有效摩擦半径  $R_c$  并不是常数,而是随着主从动部分转速差、摩擦片温度和磨损变化的.

离合器传递的扭矩  $T_c$  也可表达为离合器扭转角度的函数

$$T_c = T_c(\theta_c, \dot{\theta}_c), \quad (4)$$

其中  $\theta_c$  为离合器扭转角度.无论打滑工况还是闭锁工况,这个公式都是适用的.静态的扭矩特性  $T_c(\theta_c, \dot{\theta}_c)$  通常为非线性的,例如图4中给出了一个典型4吨卡车的离合器减振弹簧的扭矩特性<sup>[1]</sup>.

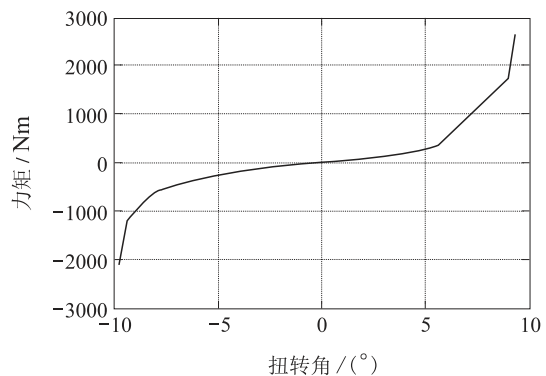


图4 离合器减振弹簧扭力特性

Fig. 4 Torque characteristics of clutch damping spring

湿式离合器模型建立同式(3)一致,但是由于湿式离合器摩擦盘是浸在油液中的,因此离合器摩擦系数要比干式离合器小,关于湿式离合器具体建模过程可参考文献[2-3].

### 1.3 变速器(Transmission)

汽车变速器分为自动变速器和手动变速器,而自动变速器又包含液力式自动变速器(automatic transmission, AT)、电控机械式自动变速器(automated manual transmission, AMT)、双离合式自动变速器(dual clutch transmission, DCT)、无级变速器(continuously variable transmission, CVT)等几种主要类型。

这几种变速器中,除了无级变速器CVT,均存在传动速比的阶跃切换.以结构较为简单的AMT为例,不同的挡位速比通过不同的齿轮对来实现,在短时间内(通常小于1 s)通过啮合齿轮对的切换完成挡位切换。

变速器的主要功能是对发动机的转速和扭矩进行降速增扭(超速挡除外).如果忽略变速器的转动惯量,其动力学特性可描述为

$$T_t = T_c R_i \eta_t, \quad (5a)$$

$$\omega_t = \frac{\omega_c}{R_i}, \quad (5b)$$

其中:  $T_t$ 为变速器输出轴扭矩,  $T_c$ 为离合器输出扭矩/变速器输入轴扭矩,  $\omega_t$ 为变速器输出轴转速,  $\omega_c$ 为离合器输出转速/变速器输入轴转速,  $R_i$ 为*i*挡传动速比,  $\eta_t$ 为变速器传动效率.对于齿轮传动的变速器,传动效率通常大于90%。

换挡前后,发动机转速发生突变,而且速比跨度越大,发动机转速变化量也越大.这种速比切换对换挡品质影响很大,因此需要精心设计控制策略以减少换挡速比突变对驾驶平顺性和动力性的影响。

### 1.4 差速器和驱动半轴(Differential and drive shaft)

差速器作用是保证车辆转弯时内外侧车轮的驱动扭矩保持一致,同时两侧车轮实现相应的转速差,通常与主减速器连接在一起.差速器输出的扭矩和转速满足以下公式

$$T_l = T_r, \quad (6a)$$

$$\omega_l + \omega_r = \frac{2\omega_t}{R_{df}}, \quad (6b)$$

其中:  $T$ 为扭矩,  $\omega$ 为转速,下标l和r分别代表左侧和右侧,  $R_{df}$ 是与差速器集成为一体的主减速器速比。

驱动半轴连接差速器与车轮,见图5.它的刚度较小,能够缓和突变扭矩产生的冲击,也能在极端大负载工况下首先发生破坏,从而保护其他成本较高的零部件不受损坏.然而也正是由于刚度较小,驱动半轴是导致传动系统扭转振动的主要因素之一.其扭矩方程为

$$T_s = K_s \theta_s + C_s \dot{\theta}_s, \quad (7)$$

其中:  $T_s$ 为驱动半轴扭矩,  $K_s$ 和 $C_s$ 分别为半轴的刚度和阻尼,  $\theta_s$ 为半轴扭转角度.扭转角度的变化率满足

$$\dot{\theta}_s = \omega_{l,r} - \omega_w, \quad (8)$$

其中 $\omega_w$ 为车轮转速。

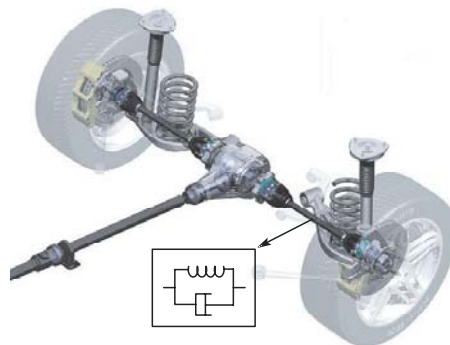


图5 传动系统中的驱动半轴

Fig. 5 Drive shaft in driveline

### 1.5 轮胎与车辆(Tire and vehicle)

汽车传动系统控制中,主要考虑轮胎纵向力 $F_x$ .它可以简化为轮胎纵向滑移率 $S_x$ 的函数.图6为附着系数一定的情况下轮胎纵向滑动摩擦力、滑移率和轮胎垂向载荷之间的关系曲线.当轮胎垂向载荷一定,滑移率 $S_x$ 较小时,驱动力 $F_x$ 与 $S_x$ 基本呈线性关系,当滑移率增加到一定程度时,驱动力不再线性变化,增长速度减缓,直至逐渐减小<sup>[4]</sup>。

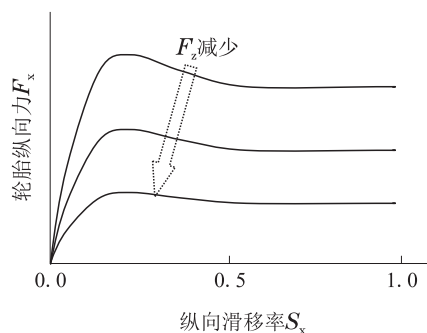


图6 轮胎纵向滑移率-纵向驱动力特性曲线

Fig. 6 Characteristic curve between tire longitudinal slip ratio and tire longitudinal drive force

图6中,  $F_z$ 为轮胎垂向力(轮胎与地面之间的压紧力),随着轮胎垂向力的减小,驱动力特性曲线逐渐下降.轮胎纵向滑移率可以通过下式来计算:

$$S_x = \frac{R_w \omega_w - V}{R_w \omega_w}, \quad \text{驱动时}, \quad (9a)$$

$$S_x = \frac{V - R_w \omega_w}{V}, \quad \text{制动时}, \quad (9b)$$

其中:  $R_w$ 为轮胎半径,  $\omega_w$ 为车轮转速,  $V$ 为车身速度。

### 1.6 新能源汽车传动系统(Drivetrain of new energy vehicle)

新能源汽车的传动系统不断发展,下面对混合动力汽车和纯电动汽车分别进行介绍。

混合动力汽车的传动系统可分为串联、并联、混联等类型<sup>[5]</sup>,如图7所示。图中:ICE(internal combustion engine)为内燃机,EM(electrical machine)为电机,S(sun wheel)为太阳轮,C(carrier)为齿轮架。串联型混合动力汽车用内燃机带动发电机发电,继而通过电动机驱动车轮行驶。并联型混合动力汽车将内燃机和电机的动力通过各种方式耦合在一起,共同驱动车轮行驶。混联型混合动力汽车通过行星齿轮排等机构将内燃机、电动机、发电机连接在一起,工作时兼有串联和并联的模式。未来的发展方向为用于市内短途工况的增程式混合动力汽车和可用于长途工况的插电式混合动力汽车,增程式混合动力汽车通常采用串联方式,而插电式混合动力汽车通常采用并联或混联的方式。

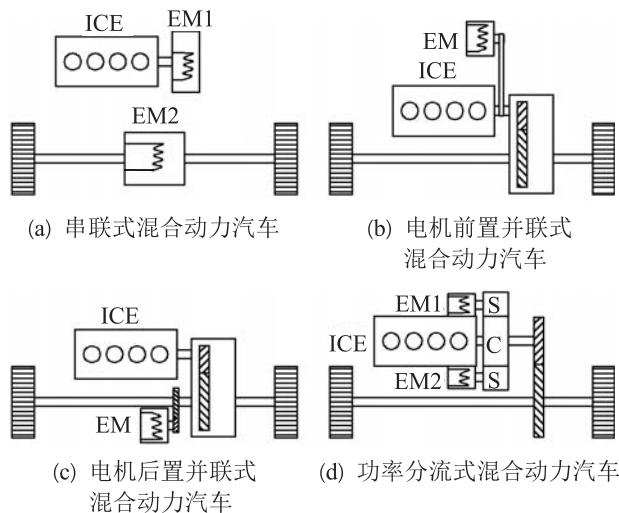


图7 混合动力汽车结构

Fig. 7 Architectures of hybrid electric vehicles

纯电动汽车包括集中驱动、前后桥分布式驱动、四轮分布式驱动等不同形式。集中驱动方式采用一个电机,通过齿轮箱后经差速器驱动左右车轮行驶,如图8所示。图中:M(motor)为驱动电机,GB(gear box)为齿轮箱,D(differential)为差速器。目前市场销售的电动车多为这种形式。文献[6]介绍了关于集中式驱动电动汽车的几种结构方案。前后桥分布式驱动为前后桥分别有各自的电机和减速器/变速器,分别构成独立的驱动桥。四轮分布式驱动<sup>[7]</sup>采用4个电机安放在车轮内部或附近,构成轮毂驱动或轮边驱动的系统,如图9所示。四轮分布式驱动为未来的发展方向,但由于簧下质量大以及安全容错能力的原因,目前还没有大量普及。

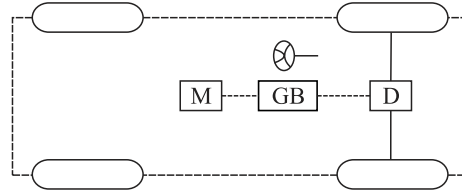


图8 集中式驱动电动汽车结构方案

Fig. 8 Structure scheme of centralized drive electric vehicles

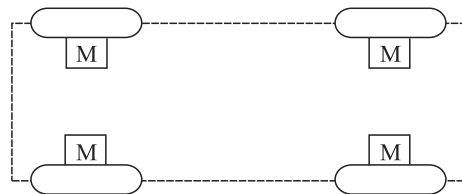


图9 四轮独立驱动轮毂电机电动汽车

Fig. 9 Electric vehicle of four-wheel independent drive with wheel hub motor

### 2 影响传动系统驾驶平顺性的因素分析及典型工况 (Analysis of factors affecting drivability of automotive drivetrain and typical working scenarios)

驱动力传递路线的动态性能品质属于车辆纵向(车辆前进方向)动力学的范畴,车企和开发商通常将其定义为车辆的驾驶性(drivability)(另外两个重要的汽车动态品质分别为侧向的操纵性(handling)和垂向的舒适性(ride comfort)). 本文主要探讨纵向的驾驶平顺性控制。如图10所示,汽车传动系统中主要弹性环节包括离合器的减振弹簧、驱动半轴扭转以及轮胎变形和滑移。这些弹性元件加上各部件串联后累积的齿轮间隙,与平顺性品质直接相关。此外,发动机和变速器构成的动力总成的悬置也会影响驾驶平顺性。

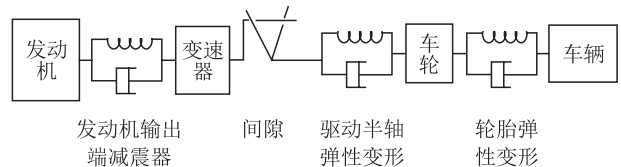


图10 汽车传动系统模型

Fig. 10 Model of automotive drivetrain

传动系统中弹性元件是吸收振动冲击必不可少的部分,这些弹性元件与传动系统的质量元件一起构成了高阶振动系统,随着变速器挡位不同,振动模态(每一个模态具有特定的固有频率、阻尼比和模态振型)也不同。如果不加以控制,在汽车换挡、急加减速等瞬态工况,传动系统会产生严重的振动与冲击,主要包括Shunt, Shuffle和Clonk。Shunt为加速度的突变,也就是常说的“怂车”,通常是由发动机

扭矩突变或离合器接合分离造成的。Shuffle为前冲后座的低频振动,通常跟随Shunt之后发生, Shuffle的频率大致为0~10 Hz。挡位越低(速比越大),发动机飞轮相对于车体的等效转动惯量越大, Shuffle振动频率也就越低、振幅越明显。由于传动系统不可避免地存在间隙,当Shunt和Shuffle发生时,通常伴随着Clonk,即扭振发生时的齿隙撞击(反向打齿),这时乘员会感觉到明显的异响和冲击。

动力总成在垂向也会引起振动,发动机启动或运转引起的抖动频率约为20~30 Hz。动力总成悬置的作用是对发动机振动进行隔离和吸收,其类型包括橡胶悬置、液压悬置、空气悬置、磁流变液悬置等。为避免振动耦合,动力总成悬置的模式频率既要高于驱动轴固有频率又要低于轮胎的固有频率,大致范围在5~15 Hz之间。发动机悬置相关的振动虽然是垂向的,但往往归类于drivability性能。

与传动系统平顺性品质相关,并且需要通过控制来保证性能的典型工况主要包括:

- 起步控制;
- 换挡控制;
- 急加减速控制;
- 发动机启停控制;
- 间隙补偿控制。

这些控制问题涉及到发动机、离合器、变速器的一体化控制,控制难度较大。首先,汽车上新技术的应用,如涡轮增压、双离合变速器、混合动力等技术,增加了传动系统的控制自由度和系统耦合度;其次,系统存在较强的非线性(发动机扭矩特性、轮胎力特性、离合器膜片弹簧特性等)、不确定性(离合器摩擦特性、车辆质量、道路坡度等);此外,汽车运行工况复杂多样(怠速、起步、换挡及高温、高寒等)。这些因素导致控制系统设计需要大量参数标定工作,如何降低标定工作,提高开发效率且能够保证各种工况下传动系统驾驶平顺性对当前的汽车控制来说是一个很大挑战。

下面分别对这些工况的控制问题及控制方法加以介绍。

### 3 平顺性驾驶性能品质控制 (Drivability control)

#### 3.1 起步控制(Launch control)

##### 3.1.1 起步控制问题 (Control problem description of launch control)

起步是车辆将发动机产生的扭矩传递到车轮带动车辆运动的瞬态过程,平顺性和快速性是评价车辆起步过程中驾驶舒适性和动力性的重要指标。由于CVT是无级变速,AT和安装有湿式离合器的DCT

在动力传递过程中离合器之间的油膜缓冲作用能够有效地吸收起步过程中的冲击,因此控制难度较小<sup>[8-9]</sup>;而对于安装干式离合器的AMT和DCT而言,干式离合器的摩擦片与压盘之间的夹紧力变化会直接反映到车身加速度上,所以起步控制难度较大。本文将着重讨论干式离合器的起步控制问题。

如图11所示,干式离合器车辆的起步过程分为3段:空行程阶段(0~ $t_1$ )、滑摩阶段( $t_1$ ~ $t_2$ )和完全接合阶段( $t_2$ ~ $t_3$ )。图中: $\omega_e$ 为发动机转速, $\omega_c$ 为离合器输出转速。其中离合器滑摩阶段对汽车起步过程中的平顺性、滑摩功、起步时间及发动机转速等驾驶性能有很大的影响,是起步控制的关键。因此起步过程的控制问题主要围绕如何控制好离合器滑摩过程展开。

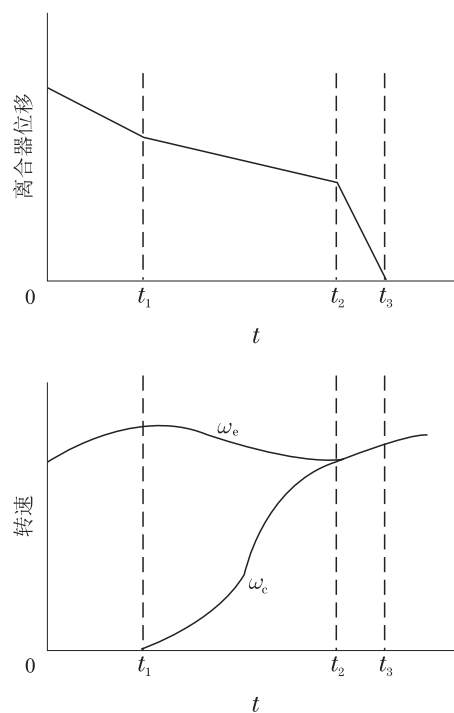


图11 起步过程离合器接合行程、转速变化示意图  
Fig. 11 Engagement process and speed variation of clutch during vehicle launch

#### 3.1.2 起步控制算法(Control algorithms of launch control)

目前应用于干式离合器起步接合控制的算法很多,包括发动机恒转速控制<sup>[10-13]</sup>、模糊控制<sup>[14]</sup>、解耦控制<sup>[15]</sup>、优化控制<sup>[16]</sup>、自适应控制<sup>[17]</sup>和非线性控制等算法。其中发动机恒转速控制算法应用较广泛,而优化控制算法适合多目标控制问题,是干式离合器起步问题比较理想的解决方案。

##### 1) 基于发动机恒转速目标的车辆起步控制。

发动机恒转速控制是在起步过程中根据油门开度确定一个发动机目标转速(一般为某油门踏板开

度下的发动机输出最大扭矩时对应的发动机转速), 并通过控制离合器的接合量、接合速度和油门开度

来减小发动机实际转速和目标转速间的偏差<sup>[10,18]</sup>, 其控制框图如图12所示。

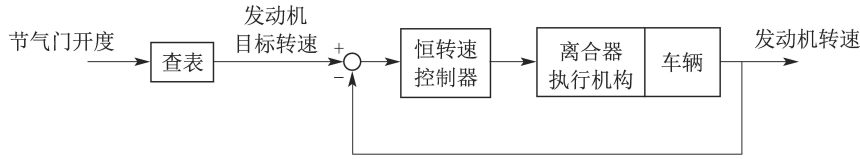


图 12 基于发动机恒转速目标的车辆起步控制框图

Fig. 12 Block diagram of engine lurch control with constant speed

实际上很多情况下油门踏板开度还没有达到目标开度, 离合器就开始接合, 从而没有特定的目标油门开度. 针对这种情况, 文献[19]提出了提前预估出目标油门开度的方法, 用预估出的最终油门开度作为目标油门开度进行起步控制. 目标油门开度确定后, 通常的做法是通过查表的方式确定与当前油门开度对应的发动机和离合器扭矩, 这种方式能够保证汽车起步过程中的平顺性, 但是滑摩时间较长, 滑摩功较大<sup>[18]</sup>. 针对这一问题, 文献[20]通过工业上比较成熟的PID反馈控制来实现发动机恒转速控制. 由于在不同油门开度下, 发动机目标转速不同, 且变化范围较宽, 单独的发动机转速偏差不能很好地反映发动机实际转速跟踪目标转速的程度, 文献[21]用发动机转速偏差与目标转速来表示发动机转速偏差程度, 以节气门开度、发动机转速偏差和发动机转速变化率作为控制量构建模糊控制器来控制离合器的接合速度, 实现发动机恒转速控制, 减小转速波动.

在发动机恒转速控制中, 离合器的接合速度和接合位置是控制的关键. 普通的控制算法都是将离合器的接合速度和接合位置设为定值, 但当设定值与发动机工作条件不匹配时离合器会产生较大的滑摩功. 文献[22]设计了起步过程中离合器接合MAP图, 利用该MAP图实现离合器快—慢—快的接合过程, 使起步过程更加平顺且降低了滑摩功. 在文献[23]中, 离合器输出转速达到一定值时, 令发动机转速线性增长, 使离合器接合快速平顺. 文献[24]提出了局部恒转速理论, 在离合器起车的前半部分与发动机恒转速控制原则相同, 但当离合器从动盘转速

大于某一设定值时, 离合器将根据油门开度和主从动盘转速差值按某一控制速度加快接合, 使接合时间更短, 产生的滑摩功亦将进一步减少.

汽车起步时, 发动机恒转速控制的方式简单易施, 然而对起步性能要求较高时, 需要大量的控制参数标定工作, 开发效率低. 因此可采用优化控制算法将平顺性和经济性指标都考虑进来保证汽车起步过程中的综合性能.

## 2) 优化控制.

车辆起步时对于干式离合器接合过程的控制是一个多目标控制过程, 所以适合采用优化控制算法. 常用的优化算法有模型预测控制(model predictive control, MPC)<sup>[25]</sup>和线性二次型调节器(linear-quadratic regulator, LQR)<sup>[26]</sup>.

模型预测控制的基本原理是, 应用模型预测被控系统的未来动态, 通过求解优化问题, 即“使得预测输出与给定参考输入尽可能地接近, 精确地考虑系统的控制变量及状态变量约束”, 获得优化控制量序列, 将第1个控制量作用于系统, 在下一时刻, 应用系统新的采样信息刷新优化问题, 重新求解, 反复进行<sup>[27]</sup>. 文献[28]采用基于数据的预测控制实现车辆起步过程的控制, 解决了机理建模难的问题, 同时采用预测控制能够显式地考虑约束.

由于模型预测控制对模型的变化和扰动比较敏感, 严重时会导致控制算法失效. 相比之下, 文献[29]中提出的分段线性二次型控制对模型变化的适应性更强. 线性二次型优化控制算法应用于干式离合器车辆的起步控制框图如图13所示.

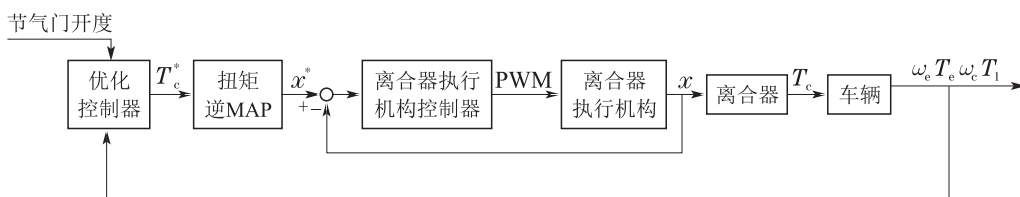
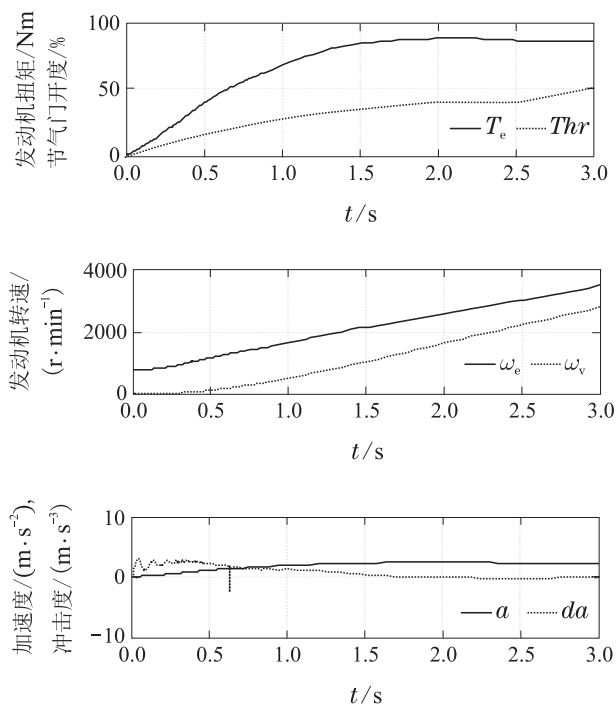


图 13 干式离合器起步的优化控制算法框图

Fig. 13 Optimal algorithm control of dry clutch starting process

图中:  $\omega_e$ 为发动机转速,  $\omega_c$ 为离合器输出转速,  $T_e$ 为发动机输出扭矩,  $T_c$ 为离合器输出扭矩,  $T_l$ 为车辆阻力矩,  $T_c^*$ 为离合器目标输出扭矩,  $x^*$ 为离合器目标位置, PWM为占空比,  $x$ 为离合器实际位置. 通过对传动系统模型的状态变量和控制变量构成的二次型目标函数进行最优求解, 可以得到最优控制下的离合器输出扭矩 $T_c^*$ , 再通过离合器传递扭矩与离合器位置关系MAP图查得相应的离合器目标位置 $x^*$ .

文献[30]利用线性二次型算法对干式离合器接合过程进行控制并通过仿真验证了其有效性, 但文献中的问题描述为终端固定的形式, 并且起步过程中的发动机转速也认为是不变的, 这种假设与实际有出入. 为解决这一问题, 文献[31]对装有AMT车辆的传动系建立了二质量模型, 运用一种改进的线性二次型优化控制策略实现对离合器接合时间、滑摩功和起步冲击度的优化, 提出的控制律中的参数可以通过离线计算获得, 具有在线计算量小等优势. 由于汽车运行工况复杂, 离合器摩擦片的摩擦系数随温度的改变会发生变化, 车重等参数也不是固定的, 这些参数的变化会导致优化算法的效果变差甚至丧失控制能力. 文献[32]在文献[30]的基础上设计了模型误差观测器对控制模型的误差进行观测, 误差观测值作为反馈控制变量, 可以使二次型优化控制算法更好地处理模型误差及扰动, 适应模型不确定性, 图14为仿真结果.



(a) 无误差估计器

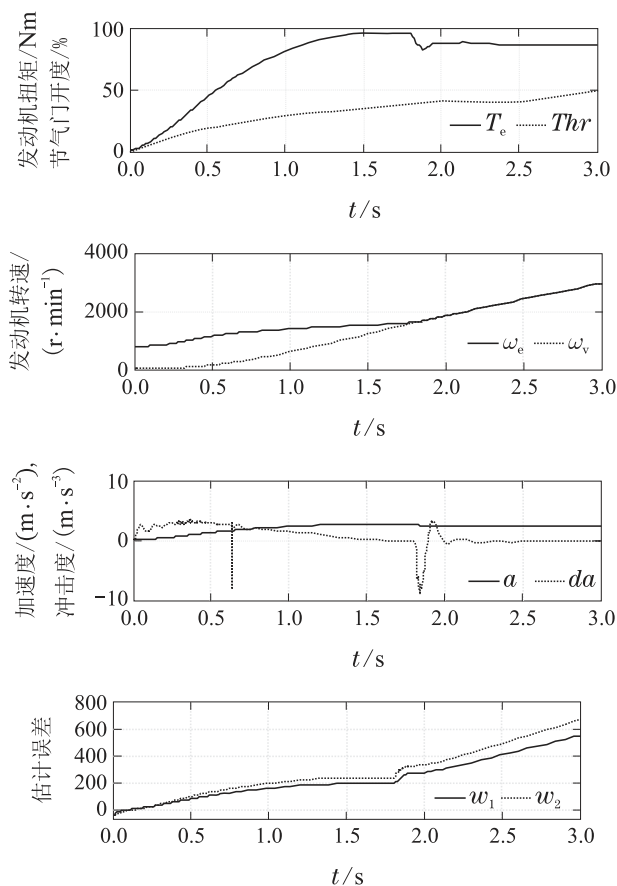
(b) 有误差估计器<sup>[32]</sup>

图14 离合器摩擦系数从0.4降低到0.3时二次型优化控制策略的起步过程

Fig. 14 Quadratic optimal control strategy during vehicle lunch when clutch friction coefficient reduced from 0.4 to 0.3

从图中可以看出, 当离合器摩擦系数随温度升高而降低时, 普通的二次型优化控制已经不足以使干式离合器完全接合, 也就是丧失了控制能力. 而带有模型误差估计的优化算法依然可以使离合器完全接合, 并在1.7 s左右完成接合, 接合快速、平顺.

### 3) 干式离合器控制的其他问题.

离合器连接着发动机与传动系统, 起到动力传递的作用, 同时也往往是整个动力传动系统中最薄弱的环节<sup>[36]</sup>. 城市工况下, 车辆始终处于走走停停的状态, 这种情况下, 离合器盘长期处于半接合滑摩状态, 导致离合器内部温度升高和离合器盘的磨损<sup>[33]</sup>. 而干式DCT由于是通过干式离合器起步且通过离合器的相互切换进行换挡, 离合器滑摩产生热量更大, 加之其散热性能不好, 上述所述的离合器升温 and 磨损现象更为严重<sup>[34]</sup>. 离合器升温 and 磨损使得离合器摩擦系数和摩擦片位置发生变化, 影响离合器的传递扭矩特性, 如何解决该问题对离合器控制

十分重要.传统方式中,都是将离合器分离轴承位置和离合器摩擦片位置一一对应来处理的,但是当离合器发热或磨损时这两者之间关系是变化的<sup>[35]</sup>,因此基于机理建立可靠、自主的温度传感器模型对于改进起步控制性能和降低离合器的磨损很有必要.文献[36]介绍了基于现代仿真工具(AMESim, MATLAB/Simulink, Abaqus等)进行仿真、实验和设计的流程,对离合器压盘内外表面的温度场进行了仿真分析.实验表明,当离合器温度升高时,离合器的磨损速率以指数形式上升,因此必须避免离合器在高温区域工作过长时间以保证其热稳定性.文中指出,当离合器长时间处于高温工况时,离合器温度不应超过 $250^{\circ}\text{C}$ ,短时间处于高温工况时则不应超过 $300^{\circ}\text{C}$ .这些曲线的变化趋势和量化指标对以后关于干式离合器发热磨损等研究具有指导意义.文章[37]基于傅里叶导热定律和能量守恒定律,通过理论分析建立了双离合器的温度模型及其灰色预测模型,预测离合器温度发展趋势,进而修正离合器控制策略.

针对由于离合器滑摩引起的发热和磨损等问题,目前很多文献的解决方法都是研究离合器温度与离合器扭矩传递特性或离合器部件特性之间的关系,使离合器特性适应当前工作工况,如文献[35]研究了离合器膜片弹簧特性与离合器发热及磨损之间的关系,文献[38]通过一系列的数值分析研究了弹簧载荷挠曲变形特性曲线与其温度之间的关系,得出随着温度的升高,弹簧刚度变小,从而载荷挠曲变形特性曲线减小的结论.文献[39-40]则分别通过离合器台架实验测试了离合器温度与其传递扭矩特性或离合器膨胀等轴向动力学的关系,并建立了相应的数学模型.除上述方法外,文献[41]在离合器建模时将离合器磨损作为一个状态量,并基于此模型设计了拓展卡尔曼滤波器来预测温度变化时离合器的传递扭矩特性,从而在控制离合器时,不仅可以采用反馈形式,还可根据预测的信息采用前馈方法.

干式离合器控制的另一个问题是离合器半接合点的辨识问题.离合器的半接合点位置不是固定的,会随着离合器的磨损、路面情况和载荷变化而变化<sup>[42]</sup>,如何准确地判断离合器半接合点也是控制离合器时需要考虑的一个问题.文献[43]通过试验得到了离合器半接合点的变化特点,离合器半接合点确定后,选择发动机转速和离合器主从动部分转速差作为控制参数控制车辆起步过程,保证车辆起步综合性能.文章[44]根据离合器本身特性及其接合过程设计了离合器半接合点的学习方法,在离合器

接合的空行程阶段以一定速度接合,消除空行程,直到发动机转速明显下降,之后离合器接合的动作改成每次移动一定的距离,移动后保持一段时间,当离合器输出转速发生突变则将该位置标记为离合器半接合点,通过多次计算求平均值来确定离合器半接合点位置.

### 3.2 换挡控制(Gear shift control)

由于AT中液力传动的缓冲作用和CVT无级变速的功能,这两者在速比切换过程中的平顺性较好,从而能够保证较好的汽车驾驶性能.因此,本节点重点介绍AMT和DCT的换挡过程控制.

#### 3.2.1 AMT换挡过程控制(Gear shift control of AMT)

AMT在换挡过程中,离合器有分离接合过程,传动比也会发生改变,造成离合器主从动部分产生转速差,使车辆不可避免地出现动力中断和换挡冲击<sup>[45-46]</sup>.AMT换挡过程根据离合器动作或者发动机扭矩变化过程可分为3个阶段<sup>[47-48]</sup>.以升挡为例(降挡与之类似,详见文献[49]),其换挡过程如图15所示.

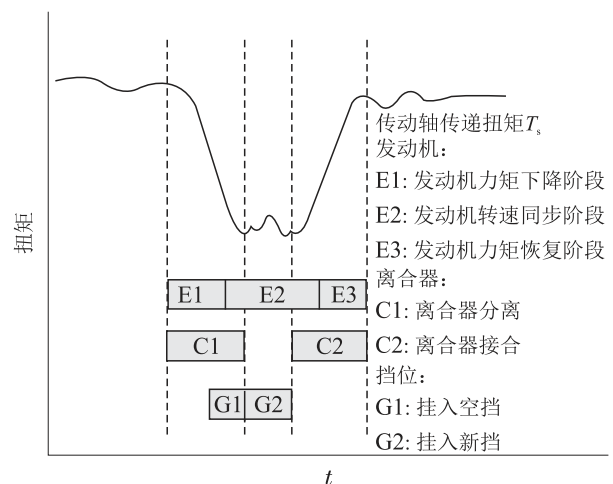


图15 AMT升挡过程<sup>[49]</sup>

Fig. 15 Gear upshift of AMT<sup>[49]</sup>

**第1阶段(E1)** 发动机扭矩下降阶段.汽车正常行驶时,在传递扭矩的作用下驱动轴会有扭转并在传动系统中积累有一定的势能.如果离合器分离过快,这些势能会在很短的时间内被释放出来,造成剧烈的振动和冲击,因此离合器的分离时间对整车的驾驶性与舒适性影响很大,甚至会影响到下一阶段发动机转速的同步过程<sup>[50]</sup>.为保证离合器分离时的平顺性,应在离合器传递扭矩降为零时将其完全分离<sup>[46,50-52]</sup>.为方便控制起见,可利用传动轴传递扭矩 $T_s$ 来代替上述的离合器传递扭矩<sup>[52]</sup>,即在 $T_s$ 下降



为零时完全分离离合器,可大大减小汽车的振动且使换挡过程耗时最短<sup>[46]</sup>,保证换挡品质。

由于扭矩传感器成本高,耐久性短等原因使得其很少应用于实际汽车的生产<sup>[46,49]</sup>,这就需要采用适当的控制算法对驱动轴传递扭矩进行估计来获取离合器传递扭矩的信息,基于扭矩观测器的控制结构框图如图16所示。图中: $\hat{T}_s$ 为驱动轴扭矩估计值, $F_c$ 为施加在离合器盘上的压力, $\hat{T}_e$ 为发动机扭矩, $\omega_c, \omega_w$ 分别为传动系统输入转速和车轮转速。

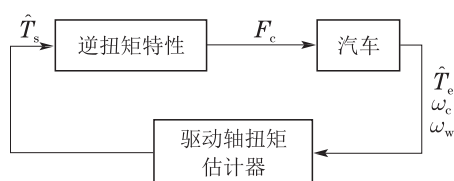


图 16 采用驱动轴扭矩观测器对离合器分离过程进行控制<sup>[48]</sup>

Fig. 16 Control of clutch disengagement with drive shaft torque observer<sup>[48]</sup>

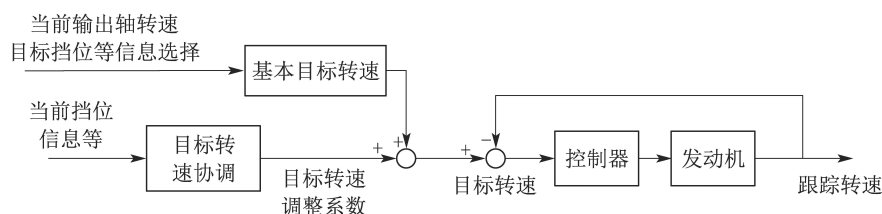


图 17 发动机转速控制框图

Fig. 17 Block diagram of engine speed control

汽车降挡时发动机转速需升高,可通过加油等方式来实现,容易控制;升挡时发动机转速需降低,由于发动机只能通过自身惯性和摩擦特性来降速,减速度有限,所以此过程中发动机转速控制比较困难<sup>[53]</sup>。文献[53]在降挡过程采用前馈控制与PID协调控制方式,而在升挡过程中采用前馈控制、bang-bang和PID结合的方式对发动机进行主动调速。文献[54]为了快速调节发动机转速,减少换挡时间,在升挡过程采用发动机断油控制和PID闭环控制相结合的控制模式;而在降挡过程采用PID闭环控制,并通过试验验证了其有效性。

**第3阶段(E3)** 发动机转速在同步阶段加/减速度有限,所以当挡位同步阶段完成后,发动机转速还没有达到新挡位的目标转速,离合器主从动部分有较大的转速差,此时离合器接合时处于滑摩状态;另一方面,发动机输出扭矩在该阶段也逐渐恢复至所需水平,如果离合器滑摩过程与发动机扭矩恢复之间的关系配合不好,会出现换挡冲击等影响换挡品质的现象。因此,该阶段的控制目标是协调离合

器传递扭矩与发动机输出扭矩,保证车辆无换挡冲击,具有良好的平顺性和动力性<sup>[54-56]</sup>。

文献[52]利用传动系统集中模型和测量的发动机转速和车轮转速搭建了一个卡尔曼滤波器控制模型,采用Tustin算法使该模型离散化,并利用扭矩估计器和PID控制器保证当驱动轴上扭矩为零时汽车挂入空挡。为估计驱动轴的扭矩并保证观测器的鲁棒性,文献[46]在文献[52]的基础上,采用变增益观测器对驱动轴扭矩进行短时间内的估计,并根据估计出的驱动轴扭矩制定离合器分离策略,使离合器在驱动轴传递扭矩达到零时完全分离以减小换挡冲击并保证较短的换挡时间。

**第2阶段(E2)** 该阶段为发动机转速同步、同步器挂入新挡位阶段,控制框图如图17所示。由于离合器处于分离状态,发动机动力不能通过离合器传递给汽车,所以动力中断发生在这一阶段,应使这一阶段耗时尽量短以减少动力中断的时间。该阶段主要对发动机转速进行调节,使发动机转速能够快速平稳跟踪上新挡位所需的目标转速,这样可尽量减小动力中断时间和发动机扭矩恢复阶段由于离合器接合而引起的滑摩功。

器传递扭矩与发动机输出扭矩,保证车辆无换挡冲击,具有良好的平顺性和动力性<sup>[54-56]</sup>。

文献[52]在MPC框架下处理多目标控制问题,在离合器同步之前,通过前馈控制和开环控制使得发动机扭矩恢复至车辆所需水平,同时控制离合器传递扭矩使其与发动机扭矩协调,满足上述控制目标,但是MPC控制算法具有运算量大,实时性不强等缺点。文献[55]根据离合器特性,将离合器接合过程分成快-慢-快3个阶段进行控制,同离合器控制相对应,发动机扭矩恢复过程也分为3个阶段分别进行控制,这种方法实施简单,但由于其中某些参数需要通过离合器特性确定或试验台架标定,当性能要求较高时,需要的标定量较大。

### 3.2.2 DCT 换挡过程控制 (Gear shift control of DCT)

DCT有两个离合器,奇数挡位和偶数挡位分别位于变速器的一侧,由两个离合器分别控制每一侧。DCT均采用离合器切换式换挡方式(clutch-to-clutch

shift), 以升挡为例, DCT换挡过程如图18所示.

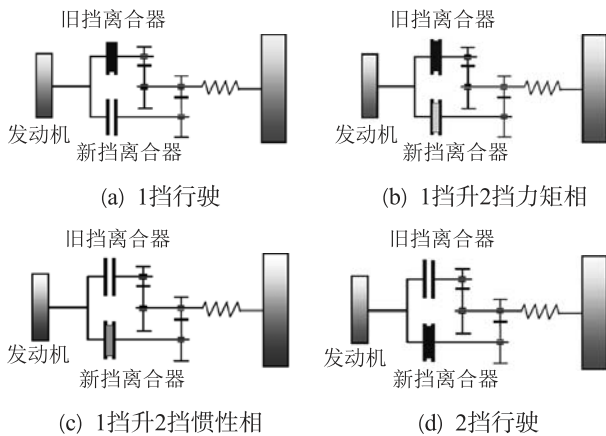
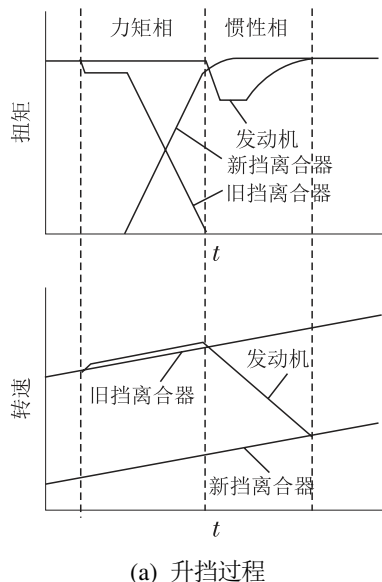


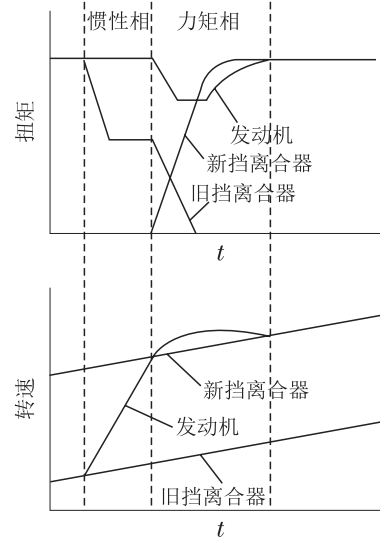
图 18 DCT换挡过程

Fig. 18 Gear shift process of DCT

对DCT换挡过程控制主要从力矩相与惯性相两个阶段<sup>[57-59]</sup>进行考虑. 力矩相阶段, 发动机输出扭矩从旧挡离合器(off-going clutch)转移到新挡离合器(on-coming clutch), 此时, 各个构件之间只存在扭矩的分配与变动, 并无急剧的转速变化, 速比仍然保持旧挡速比. 当扭矩转移到新挡离合器之后, 旧挡离合器完全分离, 惯性相开始, 此时发动机降低扭矩以便配合目标齿轮同步, 同时通过新挡离合器的滑摩逐渐使其同步闭锁. 新挡离合器闭锁后, 速比由旧挡速比完全变为新挡速比. 惯性相伴有转速和传动比的急剧变化<sup>[57-58, 60]</sup>, 对换挡品质有很大影响<sup>[59]</sup>. 此阶段中离合器的滑摩对换挡冲击、离合器磨损和寿命等都有很大的影响, 因此滑摩过程控制是该阶段的主要控制问题. 由于升挡过程发动机转速降低, 降挡过程发动机转速需升高, 所以升挡过程是先力矩相后惯性相, 降挡过程是先惯性相后力矩相<sup>[57-58, 61]</sup>, 如图19所示.



(a) 升挡过程



(b) 降挡过程<sup>[61]</sup>

图 19 换挡过程中离合器和发动机的控制

Fig. 19 Control of clutch and engine during gear shift

力矩相阶段是发动机输出扭矩在两个离合器上转移的过程, 这个阶段应控制好两个离合器的分离接合以减少扭矩突变和动力中断. 力矩相阶段离合器转速变化不会很大, 为使两离合器上的扭矩平顺转移, 应使旧挡离合器模拟出单向离合器(one-way clutch)的动作, 当其传递扭矩方向改变时能够自动分离<sup>[57]</sup>. 当旧挡离合器传递扭矩为零时离合器完全分离效果最好, 能够保证在离合器切换换挡过程中没有较大的冲击振动, 平顺性好. 如果离合器分离时刻过早或过晚, 则可能会出现clutch tie-up或扭矩干涉现象, 并由此引发换挡冲击和滑摩损失的增大<sup>[62]</sup>.

如果旧挡离合器上传递扭矩为零时完全分离离合器, 可保证离合器分离的平顺性. 如前所述, 由于成本及耐久性的原因, 扭矩传感器很少应用在实际的汽车生产上, 这是力矩相控制的难点. 某些DCT汽车上安装有压力传感器, 可以通过压力传感器对离合器进行控制, 而同样采用clutch-to-clutch shift的AT汽车通常不安装压力传感器, 无法直接控制离合器. 为解决这一问题, 需要估计驱动轴传递扭矩来控制离合器分离过程, 控制框图如图20所示. 图中:  $\hat{T}_a$ 为旧挡离合器扭矩估计值,  $i_a$ 为控制旧挡离合器电磁阀电流,  $i_b$ 为控制新挡离合器电磁阀电流,  $\omega_e, \omega_t, \omega_w$ 分别为发动机转速、涡轮转速和车轮转速. 其中新挡离合器采用前馈控制, 而利用扭矩观测器对旧挡离合器进行估计, 根据估计的旧挡离合器传递扭矩值确定其分离时刻并通过与新挡离合器的协调配合保证力矩相扭矩平顺转移<sup>[62]</sup>. 换挡力矩相阶段一般采用开环控制, 文献<sup>[63-64]</sup>通过数学模

型来描述离合器切换换挡过程并在此模型基础上通过离线优化计算得到期望扭矩轨迹. 采用开环控制能够避免出现clutch tie-up现象, 但是可能会导致旧挡离合器的粘滑振动. 目前采用闭环反馈来控制力矩相的相关研究较少, 文献[62]设计观测器估计出旧挡离合器传递扭矩, 并通过估计出的扭矩信息采用闭环控制形式保证换挡力矩相品质.

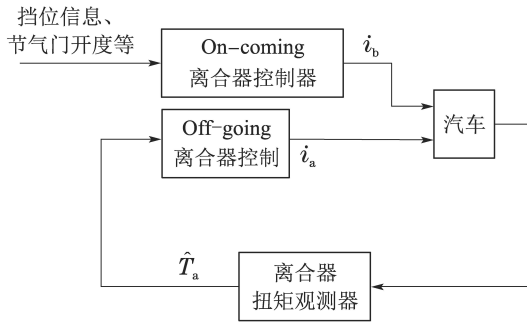


图 20 离合器分离控制框图<sup>[62]</sup>

Fig. 20 Block diagram of clutch disengagement control<sup>[62]</sup>

惯性相阶段为新挡离合器的同步过程, 该阶段中离合器滑摩过程对换挡冲击、离合器磨损和寿命等都有很大的影响, 因此滑摩过程控制是首要问题<sup>[65-67]</sup>. 惯性相阶段主要通过通过对新挡离合器的滑摩过程进行控制来保证换挡品质, 由于该阶段离合

器转速变化较大, 并且由于转速传感器的通用性, 通常采用闭环控制策略. 常用的控制方法是转速差跟踪控制方法, 通过协调各换挡评价指标设计出合理的离合器主从动盘转速差目标轨迹, 然后设计控制器使实际转速差跟踪目标轨迹, 从而达到期望的换挡品质, 该方法具有控制量单一且易于实现的优点, 非常适合于解决换挡问题<sup>[58]</sup>. 图21中的 $\Delta\omega_{up}$ 和 $\Delta\omega_{down}$ 分别代表离合器主从动盘在升挡和降挡过程中惯性相阶段的转速差目标轨迹<sup>[58,68]</sup>. 图22为控制框图, 主要由前馈控制和反馈控制组成, 前馈控制根据系统的动力学特性确定出控制量的主要变化趋势及数值, 但由于并未考虑模型的不确定性及干扰的存在, 实际控制量与期望的控制量间存在偏差, 反馈控制的作用正是对该偏差进行校正. 最终, 在两者的共同作用下, 得到期望的控制量.

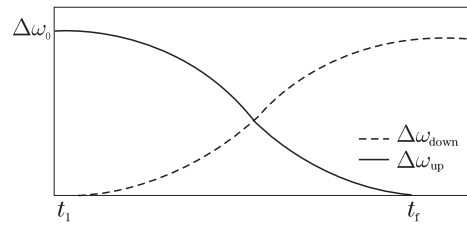


图 21 离合器滑摩转速的目标轨迹<sup>[58]</sup>

Fig. 21 Reference trajectory of clutch speed difference<sup>[58]</sup>

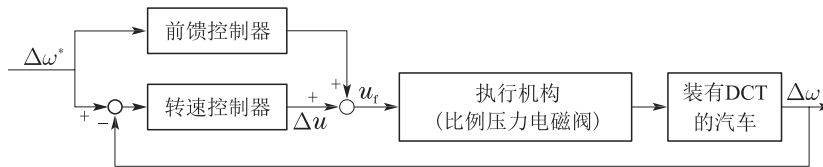


图 22 离合器滑摩转速控制框图

Fig. 22 Block diagram of clutch slip speed control

文献[69-70]均采用线性控制理论来保证换挡过程惯性相的控制目标. 近年来, 非线性理论也被用来控制换挡过程惯性相, 文献[58]采用backstepping方法控制离合器在惯性相中的滑摩过程来保证换挡过程中的no-lurch条件, 并在输入到状态稳定(input-to-state stability, ISS)框架下讨论了模型的鲁棒性. 文献[71]采用非线性前馈和线性反馈方式来控制换挡过程惯性相离合器滑摩过程, 该方式能够较好地处理系统非线性、模型误差和扰动.

除通过控制离合器滑摩过程来控制换挡惯性相外, 还可控制发动机来配合离合器的动作保证换挡品质<sup>[72-73]</sup>, 使在力矩相和惯性相交过渡过程中不产生扭矩急降(torque hole)并保证离合器在接合分离过程中不产生扭矩突变, 保证平顺性<sup>[60-61,65]</sup>. 文献[57]针对DCT换挡时的惯性相阶段利用PID控制

器使变速器输出扭矩和发动机扭矩跟踪上期望值以保证汽车在不影响动力性能的情况下保证换挡时的平顺性.

### 3.3 急加减速控制(Anti-jerk control)

在汽车急加速急减速过程中, 由于传动系统中的某些元件如离合器弹簧、传动轴和驱动轴的弹性作用, 可能会引起传动系扭振<sup>[49,74]</sup>. 这些振动对驾驶员来说是一种干扰, 并且可能会导致应力过大而损坏传动系统的部件. 因此在汽车急加速急减速过程中应尽量避免这种传动系扭振的发生.

很多原因可导致车辆在行驶过程中的冲击和振动. 首先, 缸内直喷技术的应用使得发动机能在较低的转速下产生很大的扭矩, 发动机扭矩传递到传动系统时可能会产生振动和冲击, 加上现代汽车传动系统质量的降低, 这种振动和冲击得不到有效地

抑制<sup>[75-77]</sup>;另外,当汽车在急加减速时,驾驶员急踩或急松加速踏板使得发动机扭矩骤升(tip-in)或者骤降(tip-out),这两种情况都会使车辆产生振动和冲击<sup>[65,74,76-78]</sup>;再次,汽车处于加速工况时负载的突变会使汽车纵向加速度产生横向振动(shuffle)<sup>[76-78]</sup>;最后,如果汽车运行时离合器接合过程不平顺或者离合器主从动部分同步时传递的扭矩突变也会造成汽车的冲击<sup>[18]</sup>.通常,汽车上发动机和车轮的转速差与汽车在行驶过程中的振动形状相似,可利用发动机和车轮转速差来表示车辆的振动<sup>[75,78]</sup>.上述振动和冲击会对车辆的驾驶性能和乘

坐舒适性产生很大影响.为减小这些振动和冲击,需要对车辆进行冲击抑制控制.

可通过控制发动机扭矩来减小传动系在瞬态工况下(如急加减速)的扭振.基本思路为:首先给定发动机一个转速参考值,然后监测发动机实际转速与目标转速的差值,再利用该差值来控制发动机产生一个与振动相位差 $180^\circ$ 的附加扭矩以抑制传动系扭振,控制框图如图23所示.这种控制方式虽然能够较好地消除传动系扭振,但是由于需要知道传动系统振动的信息(振动幅值、相位等),需要设计额外的算法来提取这些信息<sup>[79]</sup>.

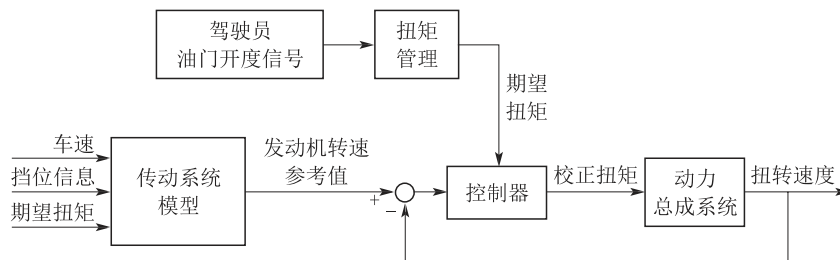


图 23 Anti-jerk控制框图

Fig. 23 Block diagram of anti-jerk control

除此之外,还可通过其他方法来抑制汽车振动,如文献<sup>[58,77]</sup>采用双质量飞轮(dual mass flywheel, DMF)结构,通过第二飞轮来减小变速器输入轴上的振动冲击和齿轮之间的冲击和噪声.但是DMF有着很强的非线性,增加了传动系统的复杂性,控制起来也要复杂得多.文献<sup>[77]</sup>采用Riccati方法设计冲击抑制观测器以再现实际振动和冲击并通过闭环系统来减小振动,由于所设计的观测器比被控对象响应快很多,所以观测器模型可以精确地再现实际振动和冲击.文献<sup>[78]</sup>针对发动机扭矩骤升或骤降过程产生的振动冲击设计了一个时域上有约束的多目标MPC控制器.仿真结果表明MPC控制器能够在保持车辆动力性良好的前提下很好地抑制车辆振动冲击,提高其平顺性,在存在模型不确定性和干扰的情况下,通过控制器内的闭环系统也能保证控制系统的鲁棒性.文献<sup>[74,80]</sup>则将发动机作为执行机构,设计主动振荡控制器来控制发动机的扭矩或转速,使发动机输出扭矩与传动系统当前工况相协调,减小传动系扭振.其他控制算法如 $H_\infty$ 优化算法<sup>[81]</sup>、最优控制<sup>[82-83]</sup>等也被用在汽车传动系扭振和冲击抑制的控制系统中,但是这些控制算法同样面临着在线计算量大,实时性不强等问题.

### 3.4 发动机启停控制(Engine start-stop control)

在拥挤的城市交通中,采用发动机启停控制是减少废气排放、提高燃油经济性的有效方法.在混

合动力汽车中,当汽车停止运动或者以纯电动模式低速运行时,发动机停止运转,而当汽车处在充电模式或者大负荷工况下运行时,发动机重新启动运行<sup>[84-85]</sup>.对于不同行驶工况,汽车发动机启停的频率也会相应改变.美国维恩州立大学曾采用联邦城市行驶工况(federal urban driving schedule, FUDS)对汽车发动机启停次数进行过估计,得出每个循环发动机启动65次<sup>[86]</sup>,由此可见发动机启停控制的重要性.

启停系统是通过挡位、离合器位置、电池电量、车速等信息进行综合判断后,决定是否发出停机或起动控制指令<sup>[87]</sup>.现在,关于发动机启停的研究主要围绕燃油经济性综合评估、排放控制、驾驶性能以及舒适性优化等方面展开<sup>[88]</sup>,由于发动机启停过程中发动机、电机和离合器扭矩协调控制对汽车的驾驶性能影响很大,所以本节主要介绍这方面的控制策略.

发动机启停分为怠速启动发动机和汽车行进间启动发动机.发动机怠速启停是混合动力汽车重要的工作模式之一,如城市工况下红灯变绿灯汽车起步等,该工况主要控制电机提供足够大的扭矩以快速平稳启动发动机;汽车行进间启动发动机工况电机提供的扭矩一部分驱动汽车行驶,一部分启动发动机,应同时协调发动机、电机和离合器扭矩之间

的关系。

### 1) 怠速启动发动机工况。

发动机怠速启停工况要求电机能够提供足够的扭矩,使发动机在较短时间内快速平稳的达到目标转速,提供车辆运行的需求扭矩。对电机的控制是启动发动机过程中很重要的一部分,控制框图如图24所示。由于电机低速旋转时具有恒扭矩特性,因此可以采用最大扭矩/电流控制<sup>[89]</sup>或转速/电流双闭环矢量控制来控制电机。文献[90]根据滑模变结构的控制方法设计了转速调节器和电流调节器,保证电机提供最大扭矩,文献[91-92]分别针对集成

启动/发电一体化电机(integrated starter generator, ISG)和皮带传动启动/发电一体化电机(belt driven starter generator, BSG)的过程进行了控制。发动机启停过程中由于发动机启动或熄火频率较高,因此可能会引起传动系扭振。现在大部分研究都是通过控制电机扭矩来抑制此类振动,如文献[93-95]提出基于模型的方法来设计闭环控制器,结合扭矩前馈-发动机转速反馈控制电机扭矩,减小发动机扭矩波动。文献[96-97]在估计发动机扭矩波动的基础上,建立脉冲对消算法,通过电机施加反向扭矩,抵消发动机产生的扭矩波动。

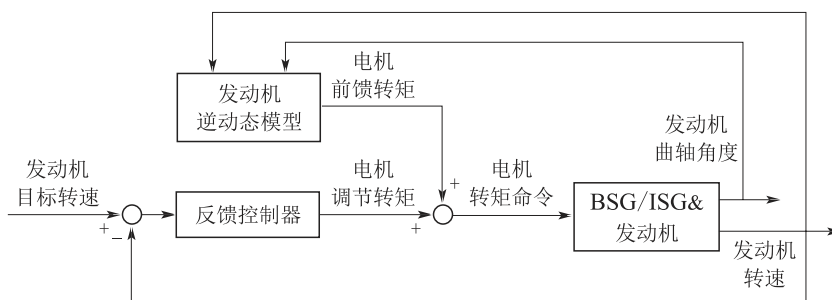


图 24 怠速启动发动机控制框图

Fig. 24 Block diagram of engine start control during idle process

### 2) 汽车行进间启动发动机工况。

具有纯电动工作模式的混合动力汽车低速运行时,发动机处于停机状态,由电机提供动力驱动汽车行驶,在中高速运行时切换至发动机单独驱动或电机与发动机共同驱动行驶<sup>[98]</sup>。启动发动机时,电机的扭矩一部分用于驱动车辆正常行驶,一部分通过离合器的接合,提供发动机启动所需扭矩<sup>[98]</sup>。根据离合器传递的扭矩和变速器输入端需求扭矩确定电机目标扭矩,并将目标扭矩值直接送给电机控制器,通过控制电流大小实现电机扭矩控制。汽车在行进间启动发动机时,协调控制电机、发动机和离合器之间的扭矩分配关系对发动机的快速启动,车辆的平稳运行十分重要,如果该过程控制不当,会造成传动系统传递扭矩的中断或者突变,从而引起冲击,影响整车的乘坐舒适性和平顺性<sup>[99]</sup>。可以采用模型参考控制算法(model reference control, MRC)<sup>[99]</sup>、模型预测控制算法<sup>[100]</sup>、线性前馈-反馈控制<sup>[101]</sup>以及二次型最优控制算法<sup>[102]</sup>等,实现三者之间扭矩的合理控制和分配。

汽车行进间电机启动发动机过程中,离合器分为分离、滑摩和锁止3个工作状态:分离状态时,离合器主从动盘分离,传递扭矩为零;滑摩状态时,主从动盘之间存在转速差,电机扭矩补偿离合器扭矩

并启动发动机;锁止状态时,主从动盘接合为一体,具有相同转速。如果离合器滑摩过程或模式切换控制不好,会降低汽车驾驶性能<sup>[99]</sup>,为解决这一问题,文献[103]提出了两种控制离合器滑摩过程的方法:一是调整离合器的目标传递扭矩;二是通过控制离合器压力来控制离合器主从动盘的转速差,通过以上两种方法实现对离合器的精确滑摩控制。文献[104]提出了3种不同的方式来控制发动机、离合器扭矩和转速以减小混合动力汽车离合器接合过程中的扭矩波动。

从发动机控制方面来看,可以根据发动机转速和节气门开度以MAP表形式建立发动机稳态数值模型<sup>[60]</sup>,或者采用遗传算法对按照误差进行反向传播训练算法(back propagation, BP)的神经网络进行优化,可建立较为准确的发动机扭矩模型,得到发动机实时扭矩<sup>[105]</sup>。文献[105]对比发动机实时扭矩与需求扭矩之间的关系,通过PID算法控制节气门开度,从而实现对发动机扭矩的控制。

### 3.5 间隙补偿控制(Backlash compensation control)

当对驾驶平顺性要求严格时,就不能再忽略传动系间隙对车辆驾驶平顺性的影响。车辆传动系间隙主要由变速器中齿轮啮合间隙和整个传动系的结

构间隙组成. 车辆传动系间隙是控制系统中的难题. 为了精确描述齿轮间隙现象, 研究人员提出了许多数学模型, 比如基于迟滞周期的反向齿隙模型<sup>[106]</sup>、基于死点特性的微分模型<sup>[107]</sup>、描述方程模型<sup>[108]</sup>等. 同时也提出了一些控制策略, 包括速度控制、位置控制和扭矩控制等. 大多数关于齿轮间隙控制的文献都着重于速度<sup>[109]</sup>和位置<sup>[110]</sup>的控制, 但是在传动系应用中, 对间隙的控制最好是扭矩(或者加速度)控制. 因为相对于车辆的车速瞬态, 间隙的瞬态明显要快, 在间隙控制时间范围内, 转速通常被认为是常值<sup>[110]</sup>; 此外, 齿隙分离过程中动力传递瞬时中断, 若此时对扭矩不施加主动控制, 则其将全部加载在驱动侧系统惯量上, 主从动齿轮转速差迅速增大, 进而在接触重新建立时造成齿轮高速撞击, 加剧轴系扭振. 另一方面, 在实际车辆传动系统中, 齿隙位移无法利用传感器进行在线测量. 因此齿隙位置估计以及扭矩控制是车辆传动系统间隙补偿控制的一个研究方向. 文献<sup>[111]</sup>针对电动汽车驱动和制动状态切换过程中的传动系统扭振问题, 建立了包含齿隙与弹性轴系在内的电驱动系统耦合非线性动力学模型. 在此基础上, 文献<sup>[112]</sup>基于混杂系统理论, 设计了半轴扭矩与齿隙位置同步在线观测器, 并提出了针对轴系弹性及齿隙非线性的主动补偿控制方法, 可有效抑制扭矩瞬态变化过程耦合非线性环节引发的系统冲击.

#### 4 结论与展望(Conclusions and perspective)

本文介绍了汽车传动系统各组成部分及其动力学模型和影响汽车传动系统驾驶品质的起步控制、换挡控制、急加减速控制、发动机启停控制和间隙补偿控制, 其中: 1) 针对通过干式离合器滑摩带动车辆起步的过程, 分别对当前采用的发动机恒转速控制和优化控制做了详细介绍, 并讨论了城市工况下离合器发热磨损和半接合点辨识问题的国内外解决方案; 2) 详细介绍了装有干式离合器的AMT和DCT换挡过程, 针对换挡的各个阶段, 通过控制离合器传递扭矩、离合器滑摩过程和发动机转速和扭矩等来满足换挡过程平顺性、动力性等要求; 3) 急加减速是瞬态工况, 可能会引起传动系扭振等问题, 可通过控制发动机转速或扭矩来抑制这些振动冲击; 4) 发动机启停分为怠速启动发动机工况和汽车行进间启动发动机工况, 怠速启动发动机工况主要通过控制电机使发动机快速平稳启动, 汽车行进间启动发动机工况下电机除要启动发动机外, 还要驱动车辆正常行驶, 应协调发动机、电机和离合器之间的扭矩分配关系保证整车的乘坐舒适性和平顺性; 5) 由于齿轮间隙的存在, 齿轮接触时会产生高

速撞击和传动系扭振, 目前主要通过速度控制、位置控制和扭矩控制等方式来处理这类问题. 今后, 在该领域还应注重以下工作:

#### 汽车电动化带来的协调控制问题:

由于电机有响应快、调速范围大、无污染等特点<sup>[113]</sup>, 混合动力汽车和纯电动汽车在能源、环保等方面都显示出了其优越性和竞争力<sup>[114]</sup>, 近年来的发展越来越广泛. 但汽车电动化会带来协调控制问题: 混合动力汽车方面, 复杂的混合动力汽车驱动工况和动力总成会引起传动系统不确定性<sup>[115]</sup>和发动机、电机和离合器传递扭矩的协调控制<sup>[100, 102]</sup>等问题, 并且不同驱动模式的平顺切换过程对汽车平顺性也有很大影响<sup>[99, 116]</sup>; 纯电动汽车方面, 新型的结构可以解决传统传动系统的一些缺陷, 如传统AMT汽车换挡动力中断等<sup>[113]</sup>, 但也带来了电机工作模式和AMT换挡执行机构协调控制精度等问题<sup>[117]</sup>. 针对这些问题, 文献<sup>[118-119]</sup>通过控制电机使得车辆在加速时获得平顺的加速响应、制动时分配给前后轮合适的制动力矩来保证车辆平顺性, 减小电机直接驱动带来的扭转振动冲击. 汽车电动化带来的新的协调控制问题需要在现有工作基础上进行深入研究.

#### 智能化对驾驶平顺性控制的影响:

云计算在计算能力和储存能力上具有巨大的优势, 基于云计算的汽车智能化控制是未来研究的一个重要方向<sup>[120]</sup>, 近年来云计算在能量优化<sup>[121]</sup>、汽车安全<sup>[122]</sup>和汽车参数自适应调整<sup>[120, 123]</sup>等方面的研究日益广泛. 对车辆驾驶品质控制来说, 云计算可以自动识别驾驶路况和驾驶风格来提供任务数据量大、实时性强的个性化汽车驾驶性能需求. 传统汽车电子控制单元(electronic control unit, ECU)受到其储存能力和计算性能等限制, 不能够有效地实现这种汽车个性化功能, 因此可通过无线网络来实现汽车和云端之间的数据传递, 云端通过检测车辆的行驶状态判断汽车所应采取的控制策略, 并将对应驾驶性能需求的参数MAP表下载到ECU、变速器控制单元(transmission control unit, TCU)等来满足汽车的驾驶需求<sup>[124]</sup>.

汽车传动系统具有结构复杂、非线性强、状态变化迅速、控制目标相互矛盾及有约束等特点, 其平顺性品质的控制难度较大. 考虑到工程应用上的要求和限制, 当前的控制理论研究如何应用于传动系统也是从理论向工程转化的一个难点. 如本文综述文献可见, 基于模型的汽车控制(model-based design for automotive control)为控制理论研究转化为

工程应用搭建了一个桥梁,减少控制器参数标定工作量的同时可以保证动态性能要求。然而这种方法在汽车企业界还没得到广泛应用,今后基于模型的汽车控制会越来越多地成为多领域协作和系统集成化研究的有效手段。在此基础上,很多现在难以解决的汽车控制问题都会快速有效地得到解决。

### 参考文献(References):

- [1] CHEN H, GAO B Z. *Nonlinear Estimation and Control of Automotive Drivetrains* [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 2013.
- [2] DEUR J, PETRIC J, ASGARI J, et al. Modeling of wet clutch engagement including a thorough experimental validation [J]. *SAE Paper*, 2005-01-0877.
- [3] IQBAL S, AL-BENDER F, OMPUSUNGGU A P, et al. Modeling and analysis of wet friction clutch engagement dynamics [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, (60/61): 420 – 436.
- [4] ZHUANG Jide. *Tire of Automobile* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996.  
(庄继德. 汽车轮胎学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.)
- [5] GUZZELLA L, SCIARRETTA A. *Vehicle Propulsion Systems* [M]. Berlin: Springer, 2012.
- [6] CHEN Qingquan, SUN Fengchun, ZHU Jianguang. *Modern Electric Vehicle Technology* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002.  
(陈清泉, 孙逢春, 祝嘉光. 现代电动汽车技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.)
- [7] WANG R, CHEN Y, FENG D W, 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.
- [8] GE Anlin. *Theory and Design of Vehicle Automatic Transmission* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1993.  
(葛安林. 车辆自动变速理论与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.)
- [9] KITABAYASHI H, LI C Y, HIRAKI H. Analysis of the various factors affecting drag torque in multiple-plate wet clutches [J]. *SAE Paper*, 2003-01-1973.
- [10] LEI Yulong, GE Anlin, LI Yongjun. Clutch control strategy in starting process [J]. *Automotive Engineering*, 2000, 22(4): 266 – 269.  
(雷雨龙, 葛安林, 李永军. 离合器起步过程的控制策略 [J]. 汽车工程, 2000, 22(4): 266 – 269.)
- [11] ZOU Hui, ZHOU Yunshan. The starting control research of DCT based on fuzzy control and the simulation analysis [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2010, 21(16): 5102 – 5106.  
(邹慧, 周云山. DCT起步模糊控制研究及仿真分析 [J]. 机械传动, 2010, 21(16): 5102 – 5106.)
- [12] QIN Datong, LIU Yonggang, HU Jianjun, et al. Control and simulation of launch with two clutches for dual clutch transmissions [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(18): 121 – 127.  
(秦大同, 刘永刚, 胡建军, 等. 双离合式自动变速器两离合器起步控制与仿真 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 121 – 127.)
- [13] YAO Xiaotao, QIN Datong, LIU Zhenjun. Simulation and analysis of the dual-clutch transmissions starting control [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2007, 30(1): 13 – 17.  
(姚晓涛, 秦大同, 刘振军. 双离合自动变速器起步控制仿真分析 [J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(1): 13 – 17.)
- [14] MINH V T, RASHID A A. Automatic control of clutches and simulations for parallel hybrid vehicles [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2012, 13(4): 645 – 651.
- [15] GAROFALO F, GLIELMO L, LANNELLI L, et al. Smooth engagement for automotive dry clutch [C] // *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*. Orlando, USA: IEEE, 2001, 12: 529 – 534.
- [16] GAO B Z, HONG J L, QU T, et al. Linear-quadratic output regulator for systems with disturbance: application to vehicle launch control [C] // *The 31st Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC)*. Wuhan: IEEE, 2016: 135 – 140.
- [17] CHEN Li, XI Gang, LUO Laijun, et al. Model referenced adaptive control during improve engagement [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(16): 5102 – 5106.  
(陈俐, 刁纲, 罗来军, 等. 离合器接合过程的参考模型自适应控制 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(16): 5102 – 5106.)
- [18] DOLCINI P, WIT C C D, BÉCHART H. Lurch avoidance strategy and its implementation in AMT vehicles [J]. *Mechatronics*, 2008, 18(5): 289 – 300.
- [19] SUN Dongye, ZHANG Xuefeng, ZHANG Lei. AMT automobile starting control based on opening prediction target accelerograph [J]. *Internal Combustion Engines*, 2012(4): 19 – 22.  
(孙冬野, 张学锋, 张磊. 基于目标油门开度预估的AMT汽车起步控制 [J]. 内燃机, 2012(4): 19 – 22.)
- [20] LI Jun, LU Xintian, XIANG Yu, et al. Dynamic simulation and its application of the AMT for heavy trucks [J]. *Automotive Engineering*, 2015, 37(7): 813 – 818.  
(李骏, 卢新田, 向羽, 等. 重型载货车机械式自动变速器的动态仿真与应用 [J]. 汽车工程, 2015, 37(7): 813 – 818.)
- [21] WANG Xudong, XIE Xianping, WU Xiaogang, et al. Fuzzy control of automatic clutch during starting process [J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2008, 39(12): 18 – 22.  
(王旭东, 谢先平, 吴晓刚, 等. 自动离合器起步模糊控制 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 18 – 22.)
- [22] LEI Y L, GAO B Z, TIAN H, et al. Throttle control strategies in the process of integrated powertrain control [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 2005, 18(3): 429 – 433.
- [23] CHEN Haijun, ZHAO Zhiguo, WANG Qi, et al. Dry dual clutch transmission' optimal and coordinating launching control with two clutches based on the minimum principle [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(22): 150 – 164.  
(陈海军, 赵治国, 王琪, 等. 干式DCT双离合联合起步最优协调控制 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(22): 150 – 164.)
- [24] SUN Dongye, QIN Datong. Clutch starting control with a constant engine speed in part process for a car [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(11): 108 – 112.  
(孙冬野, 秦大同. 汽车离合器局部恒转速起步自动控制研究 [J]. 机械工程学报, 2003, 39(11): 108 – 112.)
- [25] BEMPORAD A, BORRELLI F, MORARI M. Robust model predictive control: piecewise linear explicit solution [C] // *2001 European Control Conference (ECC)*. Porto, Portugal: IEEE, 2001: 939 – 944.
- [26] DAVID J, NATARAJAN N. Plant identification and design of optimal clutch engagement controller [J]. *SAE Paper*, 2006-01-3539.
- [27] CHEN Hong. *Model Predictive Control* [M]. Beijing: Science Press, 2013.  
(陈虹. 模型预测控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.)
- [28] LU X H, CHEN H, WANG P, et al. Design of a data-driven predictive controller for start-up process of AMT vehicles [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2011, 22(12): 2201 – 2212.
- [29] HEIJDEN A C V D, SERRARENS A F A, CAMLIBEL M K, et al. Hybrid optimal control of dry clutch engagement [J]. *International Journal of Control*, 2007, 80(11): 1717 – 1728.
- [30] GLIELMO L, VASCA F. Optimal control of dry clutch engagement [J]. *SAE Paper*, 2000-01-0837.

- [31] GAO B Z, CHEN H, LU X H, et al. Improved optimal controller for start-up of AMT trucks in consideration of driver's intention [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2013, 14(2): 213 – 220.
- [32] WANG B, GAO B Z, CHEN H. Optimal launch control of automated manual transmissions in consideration of modeling error estimation [C] // *Proceedings of the 26th Chinese Process Control Conference*. Nanjing: CPCC, 2015: 3000 – 3006.
- [33] CZÉL B, VÁRADI K, ALBERS A, et al. Fe thermal analysis of a ceramic clutch [J]. *Tribology International*, 2009, 42(5): 714 – 723.
- [34] SUN Hongyun. Development and research of dry dual clutch transmission [J]. *Science and Technology*, 2016, 26(17): 77. (孙红运. 干式双离合变速器的发展及研究现状 [J]. 科技展望, 2016, 26(17): 77.)
- [35] MATTIAZZO G, MAURO S, VELARDOCCHIA M, et al. Measurement of torque transmissibility in diaphragm spring clutch [J]. *SAE Paper*, 2002–01–0934.
- [36] PRZYBILLA M, KUNZE C, CELIK S, et al. Combined simulation approach for dry clutch systems [J]. *SAE Paper*, 2011–01–1232.
- [37] NIU Mingkui. *Research on clutch temperature model and gray prediction control of dry clutch* [D]. Jilin: Jilin University, 2008. (牛铭奎. 干式DCT离合器温度模型及其灰色预测控制研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2008.)
- [38] CAPPETTI N, PISATURO M, SENATORE A. Modelling the cushion spring characteristic to enhance the automated dry-clutch performance: the temperature effect [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2012, 226(11): 1472 – 1482.
- [39] VELARDOCCHIA M, ERCOLE G, MATTIAZZO G, et al. Diaphragm spring clutch dynamic characteristic test bench [J]. *SAE Paper*, 1999–01–0737.
- [40] HOIC M, HEROLD Z, KRANJCEVIC N, et al. Experimental characterization and modeling of dry dual clutch thermal expansion effects [J]. *SAE International Journal of Passenger Cars–Mechanical Systems*, 2013, 6(2): 775 – 785.
- [41] MYKLEBUST A, ERIKSSON L. Modeling, observability, and estimation of thermal effects and aging on transmitted torque in a heavy duty truck with a dry clutch [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(1): 61 – 72.
- [42] SUN Dongye, QIN Datong. Compensation control of clutch starting based on environment variation [J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2005, 36(3): 8 – 11. (孙冬野, 秦大同. 基于环境变化的离合器起步补偿控制 [J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 8 – 11.)
- [43] HE Zhongbo, LI Guozhang, ZHANG Peilin, et al. Experimental study of clutch half joint in the starting process [J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2002, 14(2): 43 – 47. (何忠波, 李国章, 张培林, 等. 起步过程中离合器半接合点的试验研究 [J]. 机械工程学院学报, 2002, 14(2): 43 – 47.)
- [44] ZHONG Zaimin, WANG Zhisong. Vehicle clutch kisspoint self-learning method research [J]. *Mechatronics*, 2013, 19(8): 19 – 25. (钟再敏, 王治松. 汽车起步离合器半接合点自学习方法研究 [J]. 机电一体化, 2013, 19(8): 19 – 25.)
- [45] YE Ming, QIN Datong, LIU Zhenjun. Shift performance control for mild hybrid electric vehicle equipped with automatic manual transmission [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(5): 108 – 114. (叶明, 秦大同, 刘振军. 轻度混合动力AMT系统换挡品质控制 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 108 – 114.)
- [46] GAO B Z, LEI Y L, GE A L, et al. Observer-based clutch disengagement control during gear shift process of automated manual transmission [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2011, 49(5): 685 – 701.
- [47] GLIELMO L, LANNELLI L, VACCA V, et al. Gearshift control for automated manual transmissions [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2006, 11(1): 17 – 26.
- [48] GAO B Z, LU X H, CHEN H, et al. Dynamics and control of gear upshift in automated manual transmissions [J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2013, 63(1): 61 – 83.
- [49] GAO B Z, CHEN H. Model-based control of automotive step-ratio transmissions [J]. *International Journal of Powertrains*, 2014, 3(2): 197 – 220.
- [50] FREDRIKSSON J, EGARDT B. Nonlinear control applied to gear-shifting in automated manual transmissions [C] // *2000 IEEE Conference on Decision & Control*. Sydney, Australia: IEEE, 2000, 1: 444 – 449.
- [51] YU H L, XI J Q, ZHANG F Q, et al. Research on gear shifting process without disengaging clutch for a parallel hybrid electric vehicle equipped with AMT [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 16(3): 597 – 618.
- [52] PETERSSON M, NIELSEN L. Gear shifting by engine control [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2000, 8(3): 495 – 507.
- [53] ZHONG Z, KONG G L, YU Z, et al. Shifting control of an automated mechanical transmission without using the clutch [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2012, 13(13): 487 – 496.
- [54] HUANG Ying, WAN Guoqiang, CUI Tao, et al. Research on engine control strategy in AMT shift process [J]. *Automotive Engineering*, 2012, 34(3): 245 – 248. (黄英, 万国强, 崔涛, 等. AMT换挡过程发动机控制策略研究 [J]. 汽车工程, 2012, 34(3): 245 – 248.)
- [55] XIE Xianping, MEI Jinren, LI Jun, et al. AMT shift control strategy based on combined engine control [J]. *Automotive Technology*, 2012, 44(6): 28 – 32. (谢先平, 梅近仁, 李君, 等. 基于发动机联合控制的AMT换挡控制策略 [J]. 汽车技术, 2012, 44(6): 28 – 32.)
- [56] LI Yong, CHANG Siqin, WEI Yingjun. AMT shift strategy based on speed/torque control [J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(15): 1880 – 1885. (李勇, 常思勤, 魏英俊. 基于转速/矩控制的AMT换挡策略 [J]. 中国机械工程, 2011, 22(15): 1880 – 1885.)
- [57] GOETZ M, LEVESLEY M, CROLLA D A. Dynamics and control of gearshifts on twin-clutch transmissions [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2006, 219(D8): 951 – 963.
- [58] HU Y F, TIAN L, GAO B Z, et al. Nonlinear gearshifts control of dual-clutch transmissions during inertia phase [J]. *Isa Transactions*, 2014, 53(4): 1320 – 1331.
- [59] GAO B Z, CHEN H, ZHAO H Y, et al. A reduced-order nonlinear clutch pressure observer for automatic transmission using ISS [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 18(2): 446 – 453.
- [60] LU X H, CHEN H, GAO B Z, et al. Data-driven predictive gearshift control for dual-clutch transmissions and FPGA implementation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(1): 599 – 610.
- [61] LIU Y G, QIN D T, JIANG H, et al. Shift control strategy and experimental validation for dry dual clutch transmissions [J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2014, 75: 41 – 53.
- [62] GAO B Z, CHEN H, LI J, et al. Observer-based feedback control during torque phase of clutch-to-clutch shift process [J]. *International Journal of Vehicle Design*, 2012, 58(1): 93 – 108.
- [63] YOON A, KHARGONEKAR P, HEBBALE K. Design of computer experiments for open-loop control and robustness analysis of clutch-to-clutch shifts in automatic transmissions [C] // *Proceedings of the 1997 American Control Conference*. Albuquerque, USA: IEEE, 1997, 5: 3359 – 3364.



- [64] KULKARNI M, SHIM T, ZHANG Y. Shift dynamics and control of dual-clutch transmissions [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2007, 42(2): 168 – 182.
- [65] LU Xiaohui. *Moving horizon optimal control for automotive driveline systems* [D]. Jilin: Jilin University, 2013.  
(卢晓晖. 汽车传动系的滚动优化控制研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2013.)
- [66] LIU Zhenjun, DONG Xiaohong, QIN Datong, et al. Quality analysis and control of dual clutch automatic transmission [J]. *Journal of Chongqing University*, 2010, 33(5): 29 – 34.  
(刘振军, 董小洪, 秦大同, 等. 双离合自动变速器换挡品质分析与控制 [J]. 重庆大学学报, 2010, 33(5): 29 – 34.)
- [67] DOLCINI P, DE WIT C C, BÉCHART H. Improved optimal control of dry clutch engagement [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2005, 38(1): 25 – 30.
- [68] YE K Y, LIU Q F, GAO B Z, et al. Weight scheduling model predictive control for gear shift of a 2-speed electric vehicle [C] // *The 34th Chinese Control Conference (CCC)*. Hangzhou: IEEE, 2015: 8120 – 8125.
- [69] GAO B Z, CHEN H, SANADA K. Two-degree-of-freedom controller design for clutch slip control of automatic transmission [J]. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, 2008, 1(1): 430 – 438.
- [70] SANADA K, KITAGAWA A. Study of two-degree-of-freedom control of rotating speed in an automatic transmission, considering modeling errors of a hydraulic system [J]. *Control Engineering Practice*, 1998, 6(9): 1125 – 1132.
- [71] GAO B Z, CHEN H, HU Y F, et al. Nonlinear feedforward-feedback control of clutch-to-clutch shift technique [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2011, 49(12): 1895 – 1911.
- [72] WALKER P D, ZHANG N, TAMBA R. Control of gear shifts in dual clutch transmission powertrains [J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2011, 25(6): 1923 – 1936.
- [73] NI C S, LU T L, ZHANG J W. Gearshift control for dry dual-clutch transmissions [J]. *Wseas Transactions on Systems*, 2009, 8(11): 1177 – 1186.
- [74] PETTERSSON M, NIELSEN L. Diesel engine speed control with handling of driveline resonances [J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(3): 319 – 328.
- [75] GROTHJAHN M, QUERNHEIM L, ZEMKE S. Modelling and identification of car driveline dynamics for anti-jerk controller design [C] // *IEEE International Conference on Mechatronics*. Málaga, Spain: IEEE, 2006: 131 – 136.
- [76] BAUMANN J, TORKZADEH D D, RAMSTEIN A, et al. Model-based predictive anti-jerk control [J]. *Control Engineering Practice*, 2006, 14(3): 259 – 266.
- [77] WALTER A, KIENCKE U, JONES S, et al. Anti-jerk & idle speed control with integrated sub-harmonic vibration compensation for vehicles with dual mass flywheels [J]. *SAE International Journal of Fuels & Lubricants*, 2009, 1(1): 1267 – 1276.
- [78] LU X H, CHEN H, ZHANG H Y, et al. Design of model predictive controller for anti-jerk during tip-in/out process of vehicles [C] // *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*. Yantai: IEEE, 2011: 3395 – 3400.
- [79] KIM Y S, PARK J, PARK T W, et al. Anti-jerk controller design with a cooperative control strategy in Hybrid Electric Vehicle [C] // *The 8th International Conference on Power Electronics – ECCE Asia*. Jeju, South Korea: IEEE, 2011: 1964 – 1968.
- [80] BERRIRI M, CHEVREL P, LEFEBVRE D. Active damping of automotive powertrain oscillations by a partial torque compensator [J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 16(7): 874 – 883.
- [81] LEFEBVRE D, CHEVREL P, RICHARD S. An H-infinity-based control design methodology dedicated to the active control of vehicle longitudinal oscillation [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2003, 11(6): 948 – 956.
- [82] LAGERBERG A, BO S E. Evaluation of control strategies for automotive powertrains with backlash [C] // *International Symposium on Advanced Vehicle Control*. Hiroshima, Japan: AVEC, 2002.
- [83] HAJ-FRAJ A, PFEIFFER F. Optimal control of gear shift operations in automatic transmissions [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2001, 338(2): 371 – 390.
- [84] CAI W. Comparison and review of electric machines for integrated starter alternator applications [C] // *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference*. Seattle, USA: IEEE, 2004: 386 – 393.
- [85] OHN H, MIN K. Combustion stability analysis during engine stop and restart in a hybrid powertrain [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2009, 10(2): 241 – 249.
- [86] HENEIN N, TARAZA D, CHALHOUB N, et al. Exploration of the contribution of the start/stop transients in HEV operation and emissions [J]. *SAE Paper*, 2000-01-3086.
- [87] YU Jun, ZHOU Xiaolei, SHU Yuehong, et al. Development and application of start stop system [C] // *Proceedings of the Annual Conference of China Automotive Engineering Society*, 2013.  
(喻骏, 周晓磊, 舒月洪, 等. 启停系统的开发与应用研究 [C] // 中国汽车工程学会年会论文集, 2013.)
- [88] WANG Haibin, YU Shui, LI Liguang. Control strategy of parallel hybrid electric vehicle and optimization of its engine [J]. *Small Internal Combustion Engine and Motorcycle*, 2008, 37(5): 6 – 11.  
(王海滨, 于水, 李理光. 并联式混合动力汽车控制策略及其发动机的优化 [J]. 小型内燃机与摩托车, 2008, 37(5): 6 – 11.)
- [89] LI Hongpeng, QIN Datong, YANG Yang, et al. Dynamics simulation of ISG-HEV engine during starting [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2005, 28(6): 4 – 8.  
(李红朋, 秦大同, 杨阳, 等. 汽车发动机启动过程的动力学仿真 [J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2005, 28(6): 4 – 8.)
- [90] XU Xiaodong. Experimental study of control strategy for engine intelligent idling stop and start system [J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2013, 36(2): 133 – 137.  
(徐小东. 发动机怠速自动起停系统控制策略的试验研究 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版). 2013, 36(2): 133 – 137.)
- [91] ZHUANG Jie, DU Aimin, XU Ke. An analysis on quick start of engine in ISG HEV [J]. *Automotive Engineering*, 2008, 30(4): 305 – 308.  
(庄杰, 杜爱民, 许科. ISG型混合动力汽车发动机启动过程分析 [J]. 汽车工程, 2008, 30(4): 305 – 308.)
- [92] Prucka M J. Development of an engine stop/start at idle system [J]. *SAE Paper*, 2005-01-0069.
- [93] DAVIS R I, LORENZ R D. Engine torque ripple cancellation with an integrated starter alternator in a hybrid electric vehicle: implementation and control [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, 39(6): 1765 – 1774.
- [94] CANOVA M, GUEZENNEC Y, YURKOVICH S. On the control of engine start/stop dynamics in a hybrid electric vehicle [J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement & Control*, 2009, 131(6): 636 – 650.
- [95] CANOVA M, SEVEL K, GUEZENNEC Y, et al. Control of the start/stop of a diesel engine in a parallel HEV with a belted starter/alternator [J]. *SAE Paper*, 2007-24-0076.
- [96] CHEN J S, HWANG H Y. Engine automatic start - stop dynamic analysis and vibration reduction for a two-mode hybrid vehicle [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile*, 2013, 227(9): 1303 – 1312.

- [97] HWANG H Y. Minimizing seat track vibration that is caused by the automatic start/stop of an engine in a power-split hybrid electric vehicle [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2013, 135(6): 2627 – 2637.
- [98] DU Bo, QIN Datong, DUAN Zhihui, et al. An analysis on the power switching dynamic process in a new type of HEV [J]. *Automotive Engineering*, 2011, 33(12): 1018 – 1023.  
(杜波, 秦大同, 段志辉, 等. 新型混合动力汽车动力切换动态过程分析 [J]. *汽车工程*, 2011, 33(12): 1018 – 1023.)
- [99] CHEN L, XI G, SUN J. Torque coordination control during mode transition for a series-parallel hybrid electric vehicle [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(7): 2936 – 2949.
- [100] BECK R, RICHERT F, BOLLIG A, et al. Model predictive control of a parallel hybrid vehicle drivetrain [C] // *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference*. Seville, Spain: IEEE, 2005: 2670 – 2675.
- [101] KOPRUBASI K. *Modeling and control of a hybrid-electric vehicle for drivability and fuel economy improvements* [D]. Columbus, OH: Ohio State University, 2008.
- [102] YAN Xiaolei, ZHONG Yong, ZHONG Zhihua. A research on optimal control for power smooth shifting in HEV [J]. *Automotive Engineering*, 2008, 30(4): 309 – 311.  
(闫晓磊, 钟勇, 钟志华. HEV传动系统动力平顺切换最优控制的研究 [J]. *汽车工程*, 2008, 30(4): 309 – 311.)
- [103] KIM S, PARK J, HONG J, et al. Transient control strategy of hybrid electric vehicle during mode change [J]. *SAE Paper*, 2009-01-0228.
- [104] HWANG H S, YANG D H, CHOI H K, et al. Torque control of engine clutch to improve the driving quality of hybrid electric vehicles [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2011, 12(5): 763 – 768.
- [105] QIN Datong, LIU Dongyang, DU Bo, et al. Coordinated torque control of power sources for driving mode switch of full hybrid electric vehicle [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2012, 29(7): 151 – 158.  
(秦大同, 刘东阳, 杜波, 等. 重度混合动力汽车驱动模式切换动力源转矩协调控制 [J]. *公路交通科技*, 2012, 29(7): 151 – 158.)
- [106] TAO G, KOKOTOVIC P V. *Adaptive Control of Systems with Actuator and Sensor Nonlinearities* [M]. New York: Wiley, 1996.
- [107] NAKAYAMA Y, FUJIKAWA K, KOBAYASHI H. A torque control method of three-inertia torsional system with backlash [C] // *The 6th International Workshop on Advanced Motion Control*. Nagoya, Japan: IEEE, 2000: 193 – 198.
- [108] THOMAS C. Stability characteristics of closed loop systems with dead band [J]. *Transactions of the ASME*, 1954: 1365 – 1382.
- [109] BRANDENBURG G, GEISSENBERGER S, KINK C, et al. Multi-motor electronic line shafts for rotary offset printing presses: a revolution in printing machine techniques [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1999, 4(1): 457 – 462.
- [110] GELB A, VANDER VELDE W E. *Multiple-Input Describing Functions and Nonlinear System Design* [M]. New York: McGraw-Hill, 1968.
- [111] LV C, ZHANG J Z, LI Y T. Extended-Kalman-filter-based regenerative and friction blended braking control for electric vehicle equipped with axle motor considering damping and elastic properties of electric powertrain [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2014, 52(11): 1372 – 1388.
- [112] LV C, ZHANG J Z, LI Y T, et al. Mode-switching-based active control of a powertrain system with nonlinear backlash and flexibility for electric vehicle during regenerative deceleration [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2015, 229(11): 1429 – 1442.
- [113] LIANG Q, GAO B Z, CHEN H. Gear shifting control for pure electric vehicle with inverse-AMT [C] // *Applied Mechanics and Materials*. Guangxi, China: Trans Tech Publications, 2012: 1286 – 1289.
- [114] CAO Binggang, ZHANG Chuanwei, BAI Zhifeng, et al. Technology progress and trends of electric vehicles [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2004, 38(1): 1 – 5.  
(曹秉刚, 张传伟, 白志峰, 等. 电动汽车技术进展和发展趋势 [J]. *西安交通大学学报*, 2004, 38(1): 1 – 5.)
- [115] YANG C, ZHANG Y H, ZHANG L P, et al. Robust coordinated control for hybrid electric bus with single-shaft parallel hybrid powertrain [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2015, 9(2): 270 – 282.
- [116] LHOMME W, TRIGUI R, DELARUE P, et al. Switched causal modeling of transmission with clutch in hybrid electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(4): 2081 – 2088.
- [117] HU Jianjun, LI Kangli, HU Minghui, et al. Coordinated control method of AMT shifting process of EV [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2012, 25(1): 152 – 158.  
(胡建军, 李康力, 胡明辉, 等. 纯电动轿车AMT换挡过程协调匹配控制方法 [J]. *中国公路学报*, 2012, 25(1): 152 – 158.)
- [118] KARIKOMI T, ITOU K, OKUBO T, et al. Development of the shaking vibration control for electric vehicles [C] // *2006 SICE-ICASE International Joint Conference*. Busan, Korea: IEEE, 2006: 2434 – 2439.
- [119] MUTOH N, HAYANO Y, YAHAGI H, et al. Electric braking control methods for electric vehicles with independently driven front and rear wheels [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(2): 1168 – 1176.
- [120] LI Z J, KOLMANOVSKY I, ATKINS E M, et al. Cloud aided semi-active suspension control [C] // *2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Vehicles and Transportation Systems (CIVTS)*. Nashville, USA: IEEE, 2014: 76 – 83.
- [121] OZATAY E, ONORI S, WOLLAEGER J, et al. Cloud-based velocity profile optimization for everyday driving: a dynamic-programming-based solution [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(6): 2491 – 2505.
- [122] GUSTAFSSON F. Automotive safety systems [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2009, 26(4): 32 – 47.
- [123] FILEV D, LU J, HROVAT D. Future mobility: integrating vehicle control with cloud computing [J]. *Mechanical Engineering*, 2013, 135(3): 18 – 24.
- [124] LU J B, FILEV D, HROVAT D, et al. Vehicle-specific computation management system for cloud computing: U.S. Patent, 9,231,998 [P]. Dearborn, MI, USA: Ford Global Technologies, LLC, 2016-1-5.

### 作者简介:

**高炳钊** (1977-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为汽车传动系统理论与控制, E-mail: gaobz@jlu.edu.cn;

**洪金龙** (1991-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为汽车传动系统平顺性控制, E-mail: hongjl16@mails.jlu.edu.cn;

**陈虹** (1963-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为预测控制、优化和鲁棒控制、非线性控制及其在汽车机电一体化系统中应用, E-mail: chenh@jlu.edu.cn.