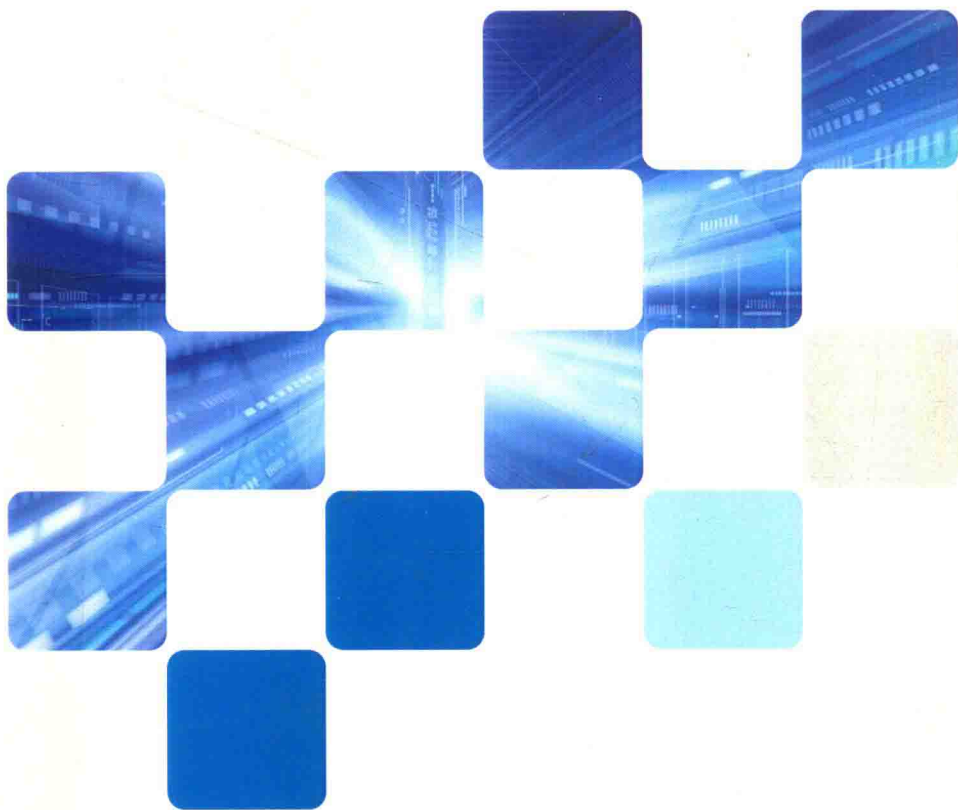


# 前后轴独立驱动电动汽车 动力系统设计与控制

• 孙宾宾 高松 葛文庆 李波 著



 科学出版社

# 前后轴独立驱动电动汽车 动力系统设计与控制

孙宾宾 高松 葛文庆 李波 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书从基本理论与关键技术入手,系统地阐述前后轴独立驱动电动汽车动力系统设计与控制这一关键问题。主要内容包括前后轴独立驱动电动汽车动力学建模理论与方法、系统参数差异化设计方法、双动力源能量优化管理理论与方法、驱动模式切换协调控制机理与策略,以及硬件在环测试技术与应用。本书内容系统、严谨,理论与试验及工程应用相结合。

本书可供广大从事新能源汽车相关领域的工程技术人员和科研人员阅读,也可作为高等院校车辆工程专业研究生的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

前后轴独立驱动电动汽车动力系统设计与控制/孙宾宾等著. —北京:科学出版社, 2019.5

ISBN 978-7-03-061235-9

I. ①前… II. ①孙… III. ①电动汽车-动力系统-系统设计 IV. ①U469.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第092754号

责任编辑:刘 博 霍明亮 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年5月第 一 版 开本:720×1000 B5

2019年5月第一次印刷 印张:9 1/4

字数:180 000

定价:80.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

能源危机与环境污染是当今社会发展面临的两大主要问题,传统燃油汽车作为目前石油能源需求和污染排放增长的主要贡献者之一,其总体数量仍在不断增大。纯电动汽车由于具有舒适低噪声、清洁无污染和能量效率高等综合优势,被认为是解决目前能源和环境难题的有效方案,且具有实际开发意义和产业化前景。依据中国汽车工业协会数据统计,2018年纯电动汽车产销分别完成127万辆和125.6万辆,比上年同期分别增长59.9%和61.7%。然而,续航里程偏短仍是目前多种形式电动车辆急需解决的关键共性问题。能量利用效率是影响电动汽车续航里程的敏感因素,围绕电动汽车能效优化问题开展研究,提高整车能量利用效率并延长续航里程,是目前多种形式电动车辆尤为关注的研究方向,涉及车载能源动力系统参数优化匹配、能量优化管理与协调控制。

前后轴独立驱动电动汽车不仅可依据开发需要实现前后动力系统参数差异化设计,而且可依据车辆运行工况实现单独前轴驱动或再生制动、单独后轴驱动或再生制动以及双轴驱动或再生制动等多种工作模式,具有良好的经济性优化自由度,已成为电动汽车领域新兴研究热点。本书以前后轴独立驱动电动汽车为对象,以与车辆经济性密切相关的动力系统能效优化为目标,阐述系统参数匹配、能量管理与工作模式切换协调控制等理论、方法及技术。

全书共5章,其中第1章围绕动力系统参数优化匹配问题,通过建立整车系统动力学模型,分析车辆循环工况特征规律,提出前后动力系统参数差异化设计方法;第2章围绕前后双同步电机、双异步电机动力系统驱动能量管理问题,通过分析系统能耗特征规律与影响因素,提出基于电机损耗机理及温度修正的转矩分配法;第3章围绕“同步电机+异步电机”动力系统驱动能量管理问题,提出基于响应面法的实时高效转矩分配法;第4章针对电机工作模式切换冲击度问题,分析关键影响因素,提出转矩协调控制策略;第5章从算法的硬件在环测试与实车验证角度论述整车能量管理与协调控制算法的V开发流程。

本书的写作过程经历四年时间,其间得到了张铁柱、葛文庆、李波等教授的

指导，王鹏伟、李鹏程、王永军、颜敬皓等研究生参与撰写、排版、校稿等工作。本书虽经多次修改，但由于作者水平有限，难免存在不足之处，还请读者批评指正。同时，欢迎读者提出宝贵意见，共同致力于推动我国电动汽车技术进步。

孙宾宾  
2019年2月

# 目 录

<b>第 1 章</b>	<b>前后轴动力传动系统参数差异化设计</b>	1
1.1	电动汽车动力学建模	1
1.1.1	能源动力系统建模	2
1.1.2	整车动力学模型	5
1.1.3	控制系统模型	5
1.2	单轴驱动方案参数优化设计	8
1.2.1	电机参数匹配	10
1.2.2	直驱方案速比优化设计	11
1.2.3	两挡速比方案优化设计	12
1.3	前后轴独立驱动方案参数优化设计	16
1.3.1	工况特征规律分析	16
1.3.2	电机参数差异化设计	19
1.3.3	传动比参数差异化设计	22
1.4	方案验证与分析	24
1.4.1	动力性验证与分析	24
1.4.2	单轴驱动方案经济性分析	25
1.4.3	前后轴独立驱动方案经济性分析	26
<b>第 2 章</b>	<b>基于电机损耗机理的能量管理策略设计</b>	31
2.1	双电机系统损耗建模	31
2.1.1	能量优化管理定义	32
2.1.2	逆变器损耗模型	33
2.1.3	电机损耗模型	34
2.1.4	损耗模型建立方法	37
2.2	能效最优能量管理策略设计	40
2.2.1	双永磁同步电机基速区最优能量管理策略	40
2.2.2	双永磁同步电机弱磁区最优能量管理策略	41
2.2.3	双异步电机最优能量管理策略	45
2.2.4	单/双异步电机驱动模式切换条件	48
2.3	能量管理策略台架测试与评价	49

2.3.1	双电机测试台架开发	49
2.3.2	双同步电机驱动方案验证与分析	55
2.3.3	双异步电机驱动方案验证与分析	63
<b>第3章</b>	<b>基于响应面方法论的能量管理策略设计</b>	<b>76</b>
3.1	电机功耗预测模型建模	76
3.1.1	测试工况点设计	76
3.1.2	预测模型建立方法	77
3.2	转矩分配预测模型建模	79
3.2.1	驱动工况数据库设计	80
3.2.2	能效最优转矩分配预测模型设计	83
3.3	预测模型精度分析	87
3.3.1	电机功耗预测模型精度分析	87
3.3.2	转矩分配预测模型精度分析	91
<b>第4章</b>	<b>驱动模式切换协调控制机理分析</b>	<b>94</b>
4.1	模式切换冲击度理论模型	94
4.2	模式切换试验设计	96
4.3	因素影响效应特征规律分析	97
4.3.1	因素主效应特征规律分析	97
4.3.2	因素交互效应特征规律分析	99
4.4	模式切换冲击度机理分析	101
4.4.1	单/单电机模式切换冲击度显著性机理分析	101
4.4.2	负荷交互效应显著性机理分析	103
4.4.3	协调控制时间因素主效应显著性机理分析	106
<b>第5章</b>	<b>整车控制策略硬件在环测试与评价</b>	<b>108</b>
5.1	整车控制器开发	108
5.1.1	整车控制器功能分析	108
5.1.2	整车控制器电路设计	108
5.2	整车CAN通信网络开发	113
5.2.1	CAN通信网络设计	113
5.2.2	CAN网络通信协议	114
5.2.3	整车CAN网络负载率分析	116
5.3	基于模型的整车控制软件开发	118
5.3.1	故障诊断模型	119
5.3.2	高压上电模型	121

---

5.3.3	加速踏板处理策略模型·····	122
5.3.4	挡位选择模型·····	125
5.3.5	整车控制策略软件在环测试·····	126
5.4	整车控制器硬件在环测试·····	130
5.4.1	硬件在环测试平台的搭建·····	130
5.4.2	应用层软件测试·····	131
5.4.3	硬件在环测试结果分析·····	134
	参考文献·····	137

# 第1章 前后轴动力传动系统参数差异化设计

设计合理的动力传动系统是实现电动车高效运行的前提。基于车辆构型特征,寻求与之相匹配的动力传动系统,是参数优化设计的基本原则。对于常见的单电机直驱和两挡变速方案,其动力传动系统的参数优化设计方法可概括为:首先,依据整车动力性能及最大续航里程设计指标,确定电机峰值特性参数(峰值功率、转矩、转速);然后,依据电机峰值特性参数完成电机的匹配选型;最后,结合离线最优算法,完成传动系统速比优化设计。

上述基于单电机构型方案所提出的参数匹配方法,往往无法完全适用于双电机前后轴驱动方案:对于前后轴独立驱动电动汽车而言,基于其构型优势,理论上可实现“小电机驱动系统+大电机驱动系统”参数差异化设计,以提高电机高效区与车辆循环工况的匹配度。但是,现有的单电机参数设计方法(依据车辆动力性能指标),仅能够完成双电机系统基本峰值特性参数设计,无法实现双电机额定参数、前后轴传动比等关键参数的差异化设计。因此,针对前后轴独立驱动电动汽车独特构型特征,寻求与之相匹配的参数差异化动力传动系统参数,是前后轴独立驱动电动汽车能效优化急需解决的关键问题之一。

为此,本章将针对单电机直驱、两挡变速及双电机前后轴驱动方案,开展动力传动系统参数优化设计,提出能够发挥前后轴独立驱动电动汽车构型优势的参数差异化设计方法;分析和比较上述3类方案驱动效率特征,明确前后轴独立驱动电动汽车在参数设计方面的优势,并分析其根本原因。

## 1.1 电动汽车动力学建模

为了分析电动汽车动力传动系统参数设计的合理性,揭示驱动能效特征规律,基于MATLAB/Simulink,本节建立了如图1.1所示的电动汽车动力学仿真模型,主要包括:驾驶员、动力传动系统、信号传输及控制系统等模块。其中,驾驶员模块主要用于计算并输出整车需求的驱动、制动转矩,核心算法为基于PID的车速跟随控制;动力传动系统模块主要用于实现整车及其各部件运动状态更新;信号传输模块主要用于实现各子模块以及子模块内部模型的信号传输;控制系统模块通过采集驾驶员动作信号、动力传动系统状态参数等,结合相关控制策略,实现整车驱动及制动控制。

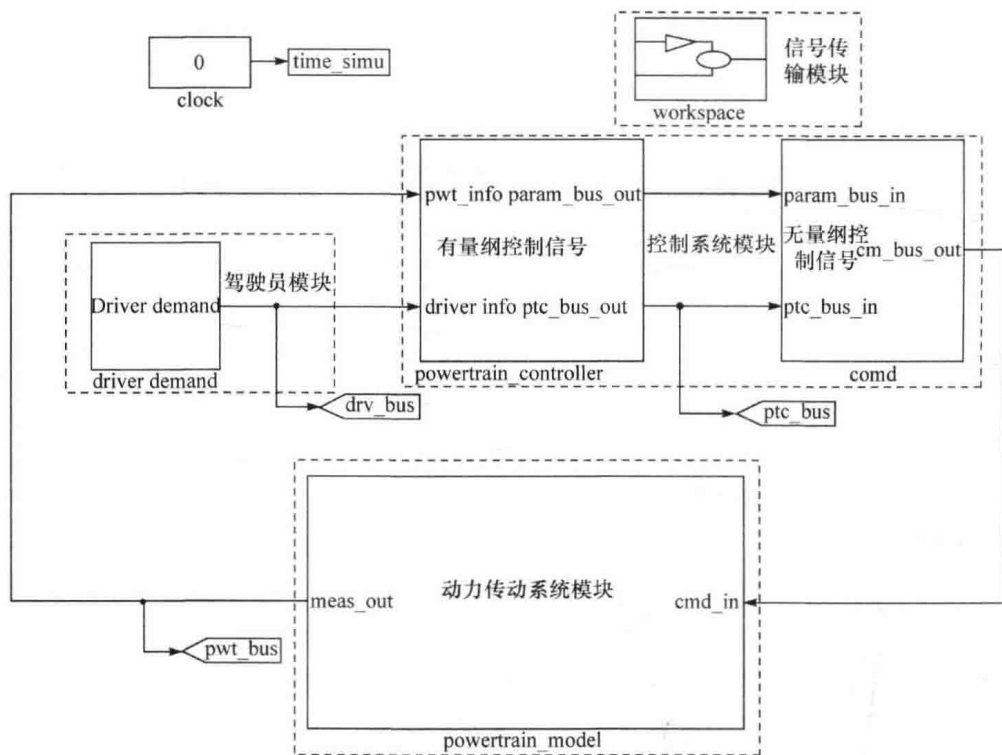


图 1.1 电动汽车动力学仿真模型

### 1.1.1 能源动力系统建模

以双电机前后轴独立驱动方案为例，图 1.2 为所构建的前后轴独立驱动电动汽车能源动力系统模型，其主要包括：电池、电机、减速-差速系统及车轮等子模型。能源动力系统模型能够依据输入的驱动、制动控制信号，完成整车及部件状态的更新与输出控制。其中，离合器模块主要用于切断单电机驱动模式下非工作电机拖转。

#### 1. 电机模型

图 1.3 为本书所设计的电机模型，其主要依据控制系统及电池状态参数，计算并输出电机驱动、制动转矩，即

$$T_m = C_{dp} T_{cr\_tem\_max} - J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.1)$$

式中， $C_{dp}$  表示无量纲转矩控制信号参数，该值的有效取值范围为 $[-1,+1]$ ，其中，当  $C_{dp}$  小于 0 时，表示电机工作于发电状态，当  $C_{dp}$  大于 0 时，表示电机工作于电动状态； $J$  表示电机转动惯量； $d\omega/dt$  表示电机角加速度； $T_{cr\_tem\_max}$  为基于电机温度的峰值转矩修正值，具体可表述为

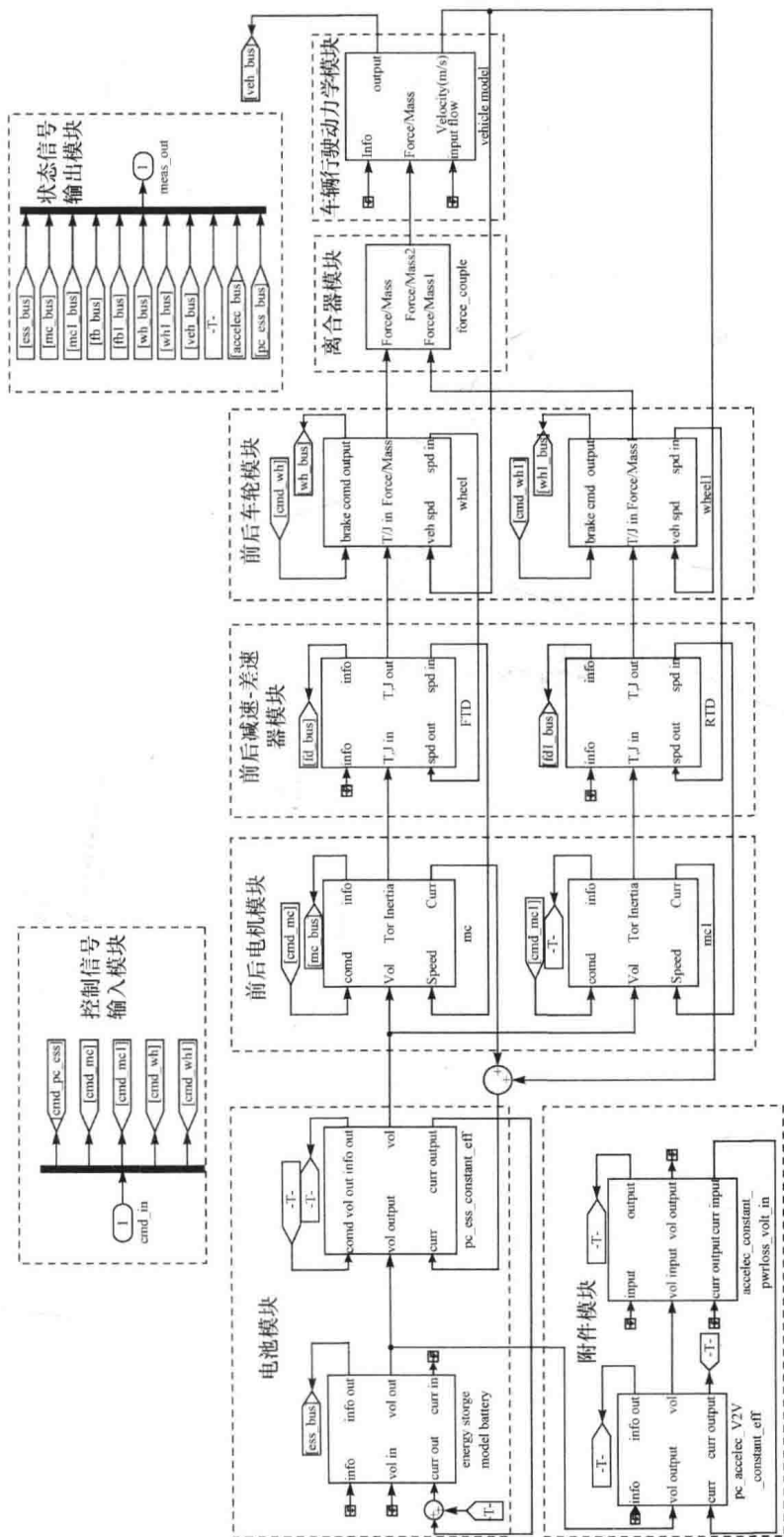


图1.2 前后轴独立驱动电动汽车能源动力系统模型

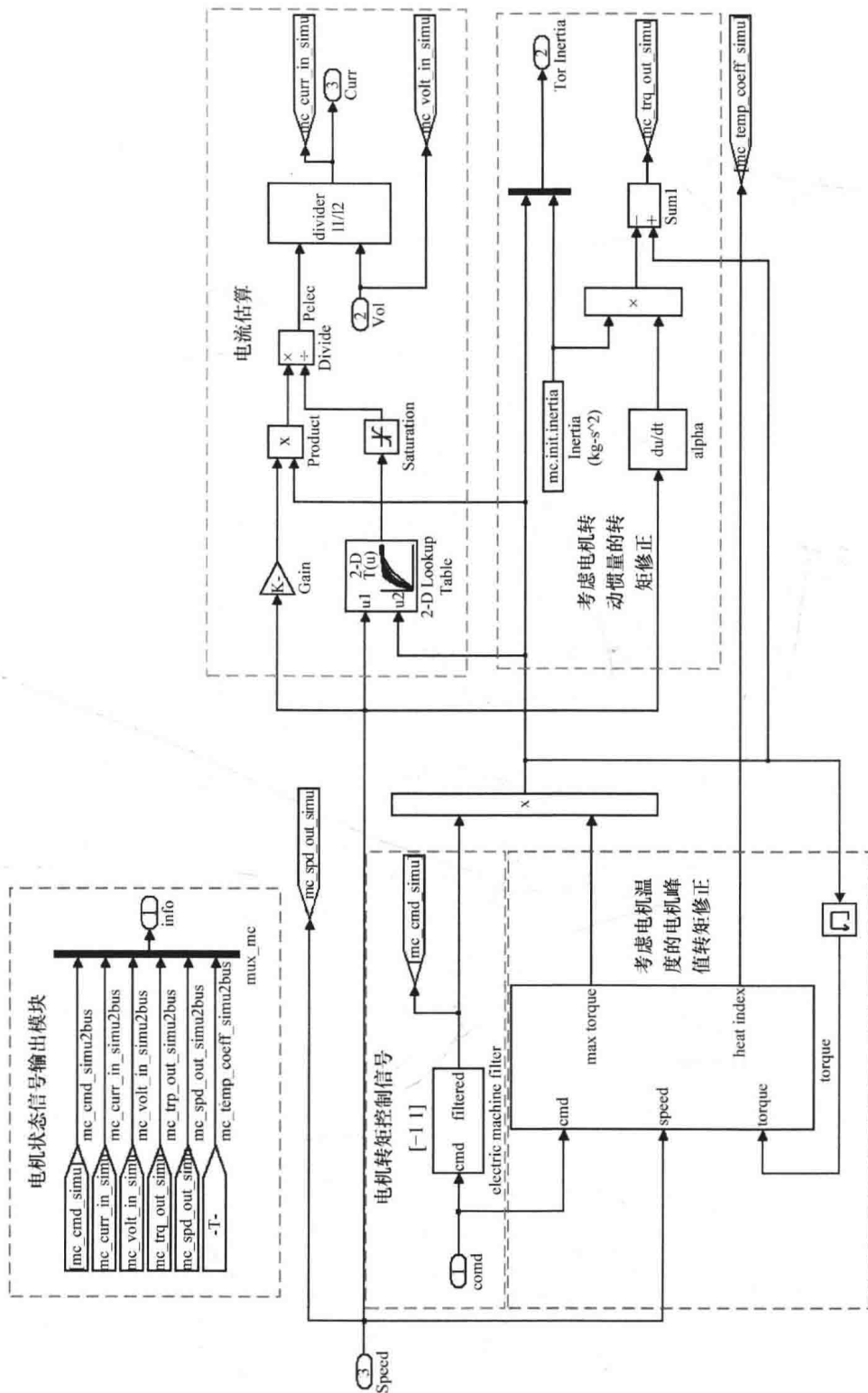


图1.3 电机模型

$$T_{cr\_tem\_max} = T_{max} + C_{tem}(T_e - T_{max}) \quad (1.2)$$

式中,  $T_e$  为电机额定转矩;  $C_{tem}$  为温度修正系数。

## 2. 电池模型

如图 1.4 所示, 电池模型主要用于估算电池荷电状态(state of charge, SOC)、端电压、充放电功率等。

其中, 可参考式(1.3)进行 SOC 估算。

$$SOC = SOC_0 - \frac{\int I_{dis} dt}{C_{c\_tem\_max}} = SOC_0 - \frac{\int I_{dis} dt}{C_{max} \frac{1}{1 - k_c(t_{bat} - t_a)}} \quad (1.3)$$

式中,  $SOC_0$  为电池荷电状态初始值;  $I_{dis}$  为电池充电或放电电流;  $C_{c\_tem\_max}$  为给定温度下电池最大容量;  $C_{max}$  为标定条件下最大容量;  $k_c$  为电池容量修正系数;  $t_a$  为环境温度;  $t_{bat}$  为电池温度, 可通过电池温度估算模块求得, 即

$$t_{bat} = \int \frac{Q_{ess\_gen} - Q_{air} - Q_{rad}}{m_{bat} C_{bat\_p}} dt \quad (1.4)$$

式中,  $m_{bat}$  为电池质量;  $C_{bat\_p}$  为电池热容;  $Q_{ess\_gen}$  为电池产生的热量;  $Q_{air}$  为空气带走的热量;  $Q_{rad}$  为通过热辐射散发的热量。

### 1.1.2 整车动力学模型

汽车纵向动力学模型主要用于计算车辆行驶阻力, 并结合驱动/制动转矩, 实时更新车辆运动状态参数, 具体可表述为

$$\begin{cases} a = \frac{F_{whe} - (F_f + F_w + F_g)}{(1 + \delta)m} \\ v = \int_{t_0}^{t_1} a dt \end{cases} \quad (1.5)$$

式中,  $a$  为加速度;  $F_{whe}$  为车轮处驱动/制动力, 其中,  $F_{whe}$  为正表示驱动力,  $F_{whe}$  为负表示制动力;  $F_f$  为滚动阻力;  $F_w$  为风阻;  $F_g$  为坡道阻力。

### 1.1.3 控制系统模型

#### 1. 信号传输模型

如图 1.5 所示, 信号传输模块主要用于实现各子模块以及子模块内部模型的信号传输, 具体包括控制信号和系统状态信号总线。前者主要传输驾驶员及整车控制器的控制指令; 后者主要反馈各部件状态信号, 为整车控制策略提供参考。

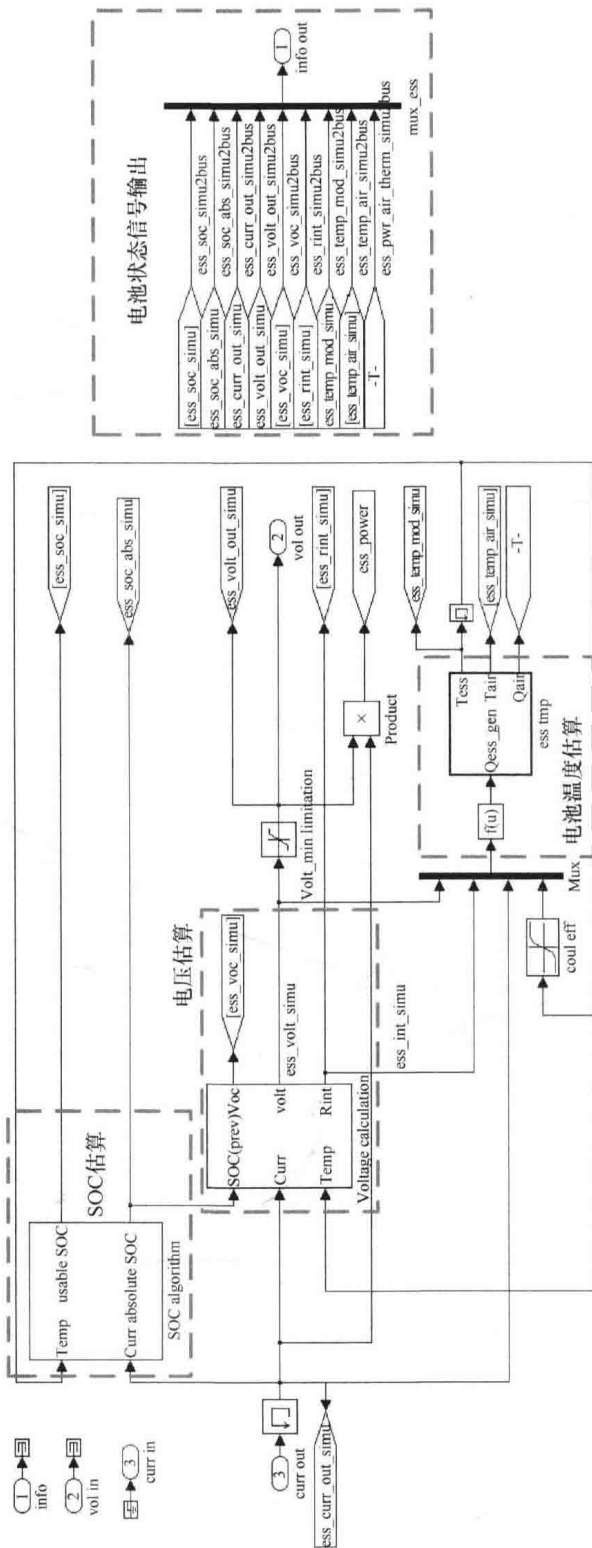


图 1.4 电池模型

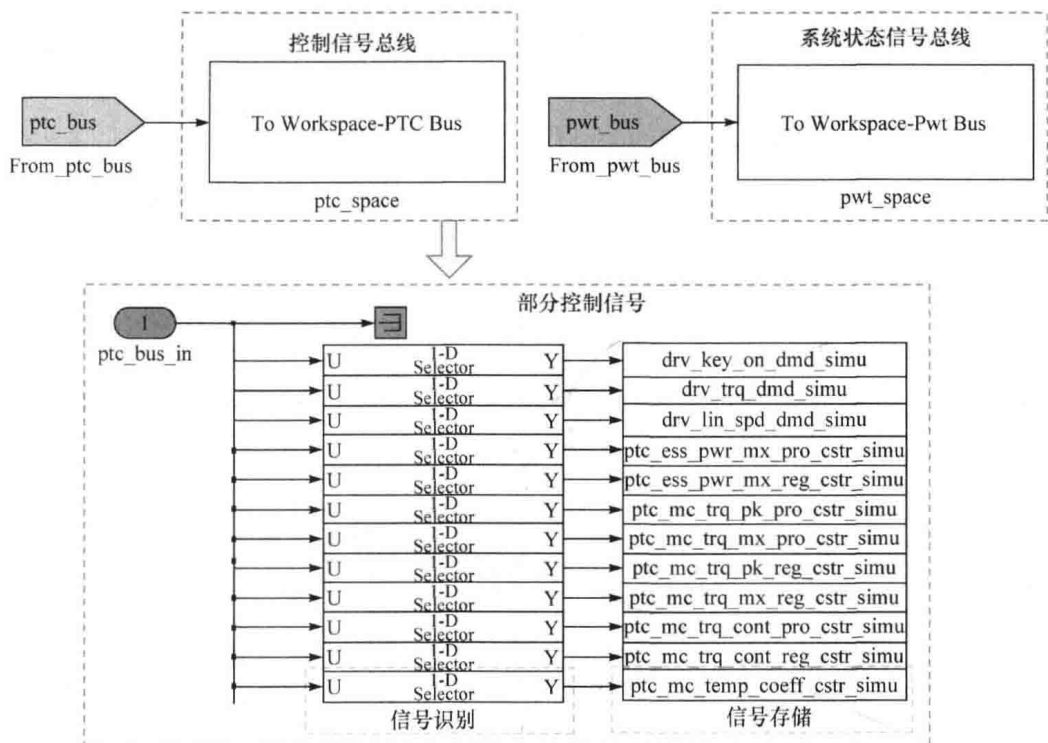


图 1.5 信号传输模型

## 2. 控制系统子模型

如图 1.6 所示，控制系统模块主要设计用于整车驱动转矩及制动力分配控制。其中，功率/转矩限制子模块主要设计用于限制电池充电、放电功率，以及电机驱动、再生制动转矩，以保证电机、电池系统安全可靠运行。电池最大放电、充电功率主要受 SOC 影响，可依据式(1.6)、式(1.7)进行修正计算，即

$$P_{dis\_max\_cr} = \begin{cases} P_{dis\_lim} = 0.1P_{dis\_max}, & SOC \leq 0.3 \\ \frac{SOC - 0.2}{0.65} P_{dis\_max}, & 0.3 < SOC < 0.85 \\ P_{dis\_max}, & SOC \geq 0.85 \end{cases} \quad (1.6)$$

$$P_{char\_max\_cr} = \begin{cases} P_{char\_lim} = 0.1P_{char\_max}, & SOC \geq 0.85 \\ \frac{0.95 - SOC}{0.65} P_{char\_max}, & 0.3 < SOC < 0.85 \\ P_{char\_max}, & SOC \leq 0.3 \end{cases} \quad (1.7)$$

式中， $P_{dis\_max\_cr}$ 和 $P_{char\_max\_cr}$ 分别为依据 SOC 修正后的最大放电、充电功率； $P_{dis\_max}$ 和 $P_{char\_max}$ 分别为标定状态下电池最大放电、充电功率。

考虑电机温度影响因素, 可依据式(1.8)对电机峰值驱动、制动转矩进行修正, 即

$$\begin{cases} T_{\text{pro\_max\_cr}} = C_{\text{tem}} (T_{\text{pro\_e}} - T_{\text{pro\_max}}) + T_{\text{pro\_max}} \\ T_{\text{reg\_max\_cr}} = C_{\text{tem}} (T_{\text{reg\_e}} - T_{\text{reg\_max}}) + T_{\text{reg\_max}} \end{cases} \quad (1.8)$$

式中,  $T_{\text{pro\_max\_cr}}$  和  $T_{\text{reg\_max\_cr}}$  分别为依据电机温度系数修正后的峰值驱动、制动转矩;  $T_{\text{pro\_e}}$  和  $T_{\text{reg\_e}}$  分别为标定状态下电机驱动、制动转矩额定值;  $T_{\text{pro\_max}}$  和  $T_{\text{reg\_max}}$  分别为标定状态下电机驱动、制动转矩峰值。

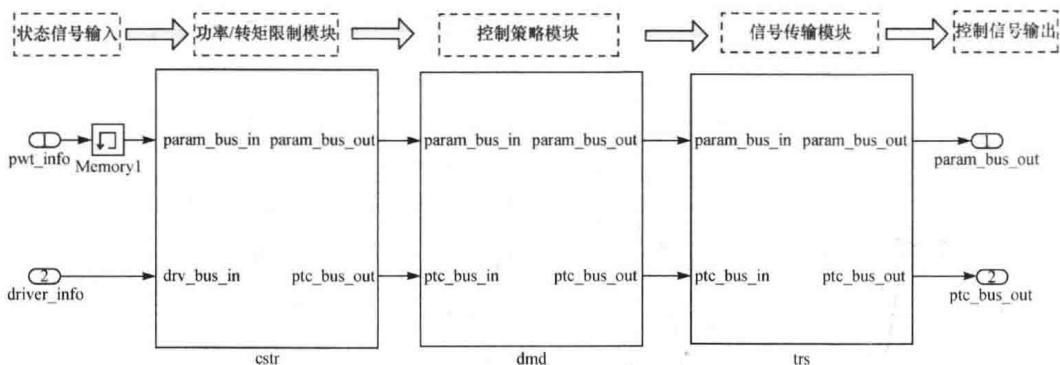


图 1.6 控制系统结构框架

以前后轴独立驱动电动汽车为例, 构建了如图 1.7 所示的驱动、制动转矩分配控制模型。其中, 依据前后电机峰值转矩温度修正值、电池最大充放电转矩及附件转矩损耗等完成前后电机峰值转矩的修正计算; 基于 s-function 编写了用于能效分析的驱动力与制动力分配策略。

## 1.2 单轴驱动方案参数优化设计

表 1.1 给出了某款电动车基本参数及动力性能指标, 本章将参考该车辆参数, 开展单电机直驱、单电机两挡及双电机前后轴驱动方案的参数优化设计。

表 1.1 电动车基本参数及动力性能指标

基本参数	参数	动力性能指标	参数
整备质量/kg	1100	最高设计车速/(km · h <sup>-1</sup> )	<110
装载质量/kg	200	最大设计爬坡度/%	>20
迎风截面积/m <sup>2</sup>	2.2	0~50km · h <sup>-1</sup> 加速时间/s	<6

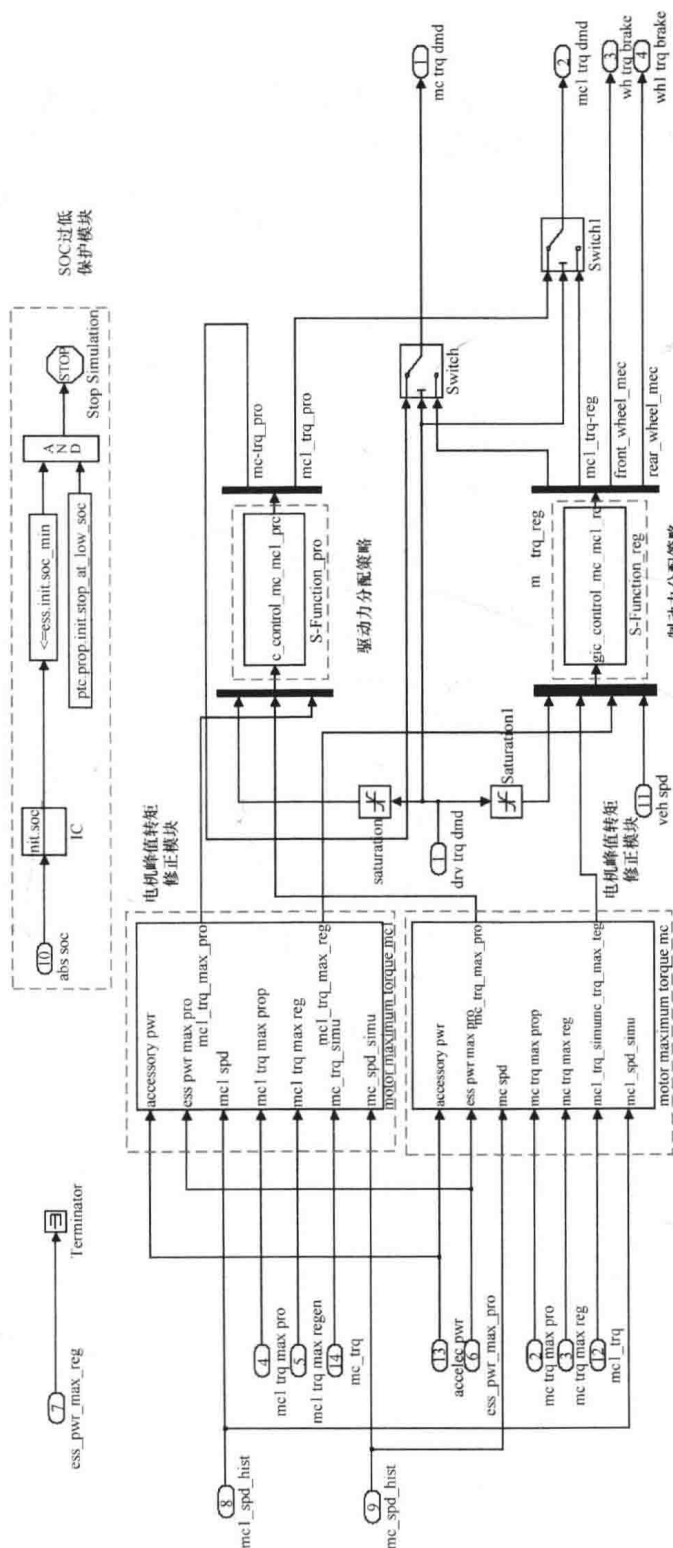


图1.7 转矩分配结构框架