



# 目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
1 绪论 .....	1
1.1 本文研究背景及意义 .....	1
1.2 混合动力汽车的结构形式 .....	2
1.2.1 串联式混合动力汽车结构 .....	3
1.2.2 并联式混合动力汽车结构 .....	3
1.2.3 混联式混合动力汽车结构 .....	4
1.3 能量管理策略研究现状 .....	4
1.3.1 基于规则的控制策略 .....	6
1.3.2 基于优化算法的控制策略 .....	6
1.4 本文主要内容和结构 .....	7
2 基于规则的逻辑门限能量管理策略的确定 .....	9
2.1 引言 .....	9
2.2 控制策略设计 .....	9
2.2.1 行驶模式流程图 .....	10
2.2.2 纯电驱动模式 .....	10
2.2.3 纯发动机驱动模式 .....	11
2.2.4 行车充电模式 .....	11
2.2.5 混合驱动模式 .....	12
2.2.6 其他情况说明.....	12
2.3 基于 Stateflow 的逻辑门限能量管理策略模型的搭建 .....	12
2.3.1 Stateflow 模型搭建 .....	12
2.3.2 模型中参数的确定 .....	14
2.4 本章小结 .....	15
3 并联式混合动力系统建模 .....	16
3.1 引言 .....	16
3.2 基于 Simulink 整车模型搭建 .....	16
3.2.1 发动机模型 .....	17
3.2.2 电机模型 .....	18
3.2.3 电池组模型 .....	19
3.2.4 整车模型 .....	21
3.2.5 仿真工况选择 .....	22
3.3 本章小结 .....	23
4 并联式混合动力系统模型仿真分析 .....	24
4.1 引言 .....	24
4.2 车辆动力学模型仿真 .....	24
4.2.1 纯电动模式仿真分析 .....	24

4.2.2 发动机驱动模式仿真分析 .....	26
4.2.3 混合驱动模式仿真分析 .....	28
4.2.4 行车充电模式仿真分析 .....	30
4.3 本章小结 .....	31
5 并联式混合动力汽车能量管理策略仿真分析 .....	33
5.1 引言 .....	33
5.2 模型搭建 .....	33
5.3 基于 NEDC 工况的能量管理策略仿真 .....	34
5.4 本章小结 .....	38
6 总结与展望 .....	39
参考文献 .....	40
致谢 .....	43

## 摘 要

作为重要的出行工具，汽车一直在人们生活中占着极为重要的地位。现阶段，寻找更加环保、更加节能、更加经济的汽车发展方案已经成为了迫在眉睫的事情。混合动力汽车兼具传统汽车和纯电动汽车的优点，已经成为未来汽车发展的重要趋势之一。评价混合动力汽车最重要的一个指标是能量管理策略，本文以此为背景，展开对基于规则的并联式混合动力汽车能量管理策略的研究。

首先，本文对混合动力汽车的工作模式进行了分类，主要包括：纯电驱动、发动机驱动、混合驱动、行车充电。在分析完工作模式之后，采用电池荷电状态 SOC、需求转矩  $T_r$ 、车辆行驶速度  $V$  作为逻辑门限并根据经验确定逻辑门限值，将汽车行驶划分为若干个状态。为了梳理清楚各个状态，创建流程图。利用 MATLAB/Simulink 中的 Stateflow 工具包对能量管理策略进行模型搭建。

其次，建立并联式混合动力系统模型。并联式混合动力系统模型主要包括发动机模型、电池组模型、电机模型、变速箱模型、车身模型、轮胎模型。本文使用 MATLAB/Simulink 来搭建模型，主要运用 MATLAB/Simulink 中的 Simscape 工具包进行模型搭建。

最后，本文分别进行了并联式混合动力系统模型仿真和并联式混合动力系统能量管理策略模型仿真。在并联式混合动力系统模型仿真时，搭建的并联式混合动力系统模型可以根据给定的条件分别在纯电驱动、发动机驱动、混合驱动、行车充电模式下工作，且工作情况符合预期和实际情况。在并联式混合动力系统能量管理策略模型仿真时，并联式混合动力系统能量管理策略模型能够按照既定控制策略进行工作，且工作时各性能指标也符合预期。结果表明，本文搭建的整车动力学模型和能量管理策略行之有效。

**关键词：**混合动力汽车；能量管理；逻辑门限；仿真分析

## Abstract

As an important travel tool, cars have always played an extremely important role in people's lives. At this stage, finding a more environmentally friendly, more energy-saving and more economical vehicle development plan has become an urgent matter. Hybrid vehicles have the advantages of both traditional vehicles and pure electric vehicles, and have become one of the important trends in the development of future vehicles. One of the most important indicators for evaluating HEVs is energy management strategy. Based on this background, this paper conducts research on rule-based parallel HEV energy management strategies.

Firstly, this paper classifies the working modes of HEVs, including: pure electric drive, engine drive, hybrid drive, and on-board charging. After analyzing the working mode, use the battery state of charge SOC, the required torque  $T_r$ , and the vehicle speed  $V$  as the logic thresholds and determine the logic thresholds based on experience, and divide the vehicle into several states. To sort out the states, create a flowchart. The energy management strategy is modeled using the Stateflow toolkit in MATLAB/Simulink.

Secondly, a parallel hybrid system model is established. The parallel hybrid system model mainly includes engine model, battery pack model, motor model, gearbox model, body model and tire model. This paper uses MATLAB/Simulink to build the model, and mainly uses the Simscape toolkit in MATLAB/Simulink to build the model.

Finally, the paper carries out the model simulation of the parallel hybrid power system and the energy management strategy model simulation of the parallel hybrid power system respectively. During the simulation of the parallel hybrid power system model, the built parallel hybrid power system model can work in pure electric drive, engine drive, hybrid drive, and vehicle charging mode respectively according to the given conditions, and the working conditions are in line with expectations and actual conditions. . During the simulation of the energy management strategy model of the parallel hybrid power system, the energy management strategy model of the parallel hybrid power system can work according to the established control strategy, and the performance indicators during operation are also in line with expectations. The results show that the vehicle

dynamics model and energy management strategy constructed in this paper are effective.

**Keywords:** hybrid electric vehicle; energy management; logic threshold; simulation analysis

# 1 绪论

## 1.1 本文研究背景及意义

随着社会的不断发展，人们的社会生活得到了翻天覆地改变。作为重要的出行工具，汽车一直在人们生活中占着极为重要的地位。近年来，中国汽车市场应来快速发展时期，截止到 2021 年底，汽车保有量已突破 3 亿辆，其中新能源占有量达 800 多万辆<sup>[1]</sup>。

但随着时间来到 21 世界 10 年代，汽车的发展受到了极大的阻碍。其中汽车发展最大的阻碍因素就是环境问题和能源可持续发展问题。环境问题是一直伴随着汽车行业发展而滋生的。以汽油和柴油为能量源的车辆在燃料燃烧过程为例，该过程会产生一氧化氮(CO)、氮氧化物(NOx)等多种有害物质，对全球环境造成极大的影响。其实，早在汽车商业化之初，这个问题就已经受到了关注。然而，随着《国家第六阶段机动车污染物排放标准》的颁布和《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》中“碳达峰”、“碳中和”的提出。环境问题在中国市场已经被推到了风口浪尖之处。如何解决汽车的环境污染，怎么提升在汽车提升动力性的同时而不增加环境污染已经是一个急需解决的难题。

能源问题方面，内燃机汽车主要以化石燃料为主要能源。现阶段已知的化石能源均为不可再生能源，而且这些化石能源大多产出于中东地区和非洲。据不完全统计，2020 年以后全球石油供需之间已经出现缺口，并呈现出不断扩大的情况，如图 1-1<sup>[2]</sup>所示。

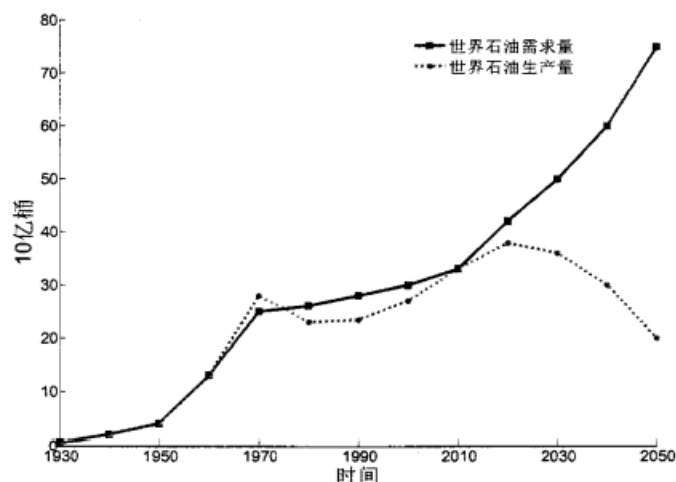


图 1-1 世界石油生产量和消耗量

面对如此严峻的能源与环境问题，各国科学家给出了研发新能源汽车的答案。经过数十年的发展，新能源汽车已经初具规模，形成了以纯电动汽车为主，多种新能源汽车齐头并进地发展格局（EV、HEV、PHEV、FCV）<sup>[3]</sup>。据统计，在 2014-2021 年之间，新能源汽车的销量逐步增长，从 2014 年的 7.85 万辆已经增长至 2021 年的 354.3 万辆，实现了极大幅度的飞跃，并且有望在 2022 突破 500 万的大关。如图 1-2 所示。

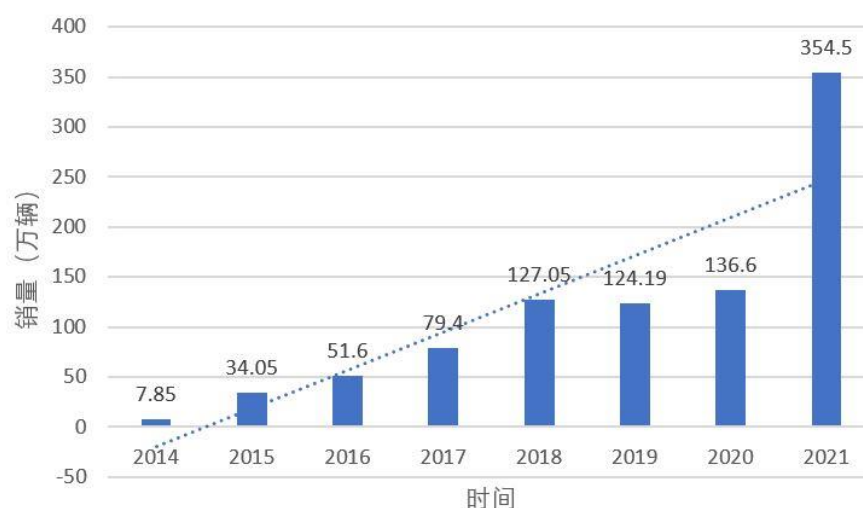


图 1-2 中国新能源汽车产量

作为新能源汽车的一种，混合动力汽车不仅具备传统汽车动力性好、能够长时间工作的优点，而且也具有纯电动汽车基本无尾气排放、环境友好的特点，实现了动力性和经济环保的优势匹配<sup>[4]</sup>。成为了传统车辆向纯电动汽车转型的一种十分重要的过渡车型。混合动力汽车的能量管理策略一直是混合动力汽车发展过程中的核心问题。其技术难点也多在于如何利用适当的能量管理策略使汽车一直处于最佳状态：尽可能少的能量损耗、尽可能长的续驶里程、尽可能小的环境污染。

本文正是以上述背景为基础，以混合动力汽车为主要研究对象。通过对现有的能量管理策略将进行归纳总结然后总结经验，建立一种基于规则的能量管理策略。本课程设计对于能量管理策略进一步发展有着一定的推动作用。

## 1.2 混合动力汽车的结构形式

混合动力汽车按照不同的分类方法可以有很多张分类方式。按照电机所占比重不同可



以将混合动力汽车分为重混合、中混合、弱混合；按照动力源位置关系不同可分为串联式、并联式、混联式；按照动力源连结轴数，可以分为单轴式、双轴式。下边主要以动力源位置不同分类方式来进行介绍。

### 1.2.1 串联式混合动力汽车结构

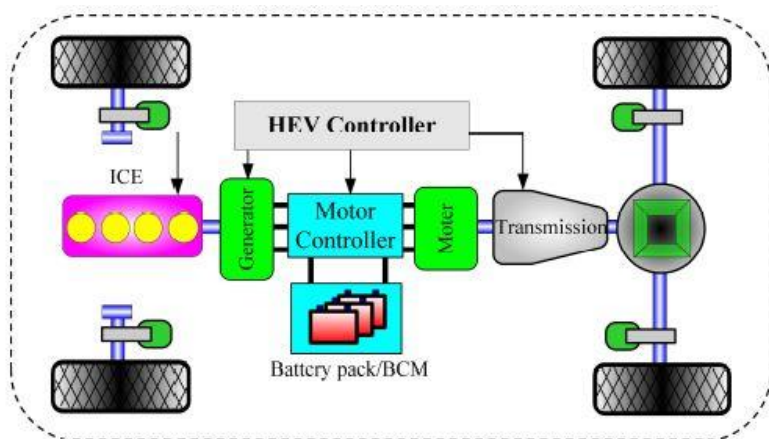


图 1-3 串联式混合动力汽车结构

串联式混合动力汽车电机于驱动桥机械连接，发动机不与驱动桥机械连接。这样的设计使得发动机可以一直保持在稳定、高效、低排放的工作区间。但串联式混合动力汽车能量经过多次转换、成本高占用空间大，所以在轿车上并不常见。

### 1.2.2 并联式混合动力汽车结构

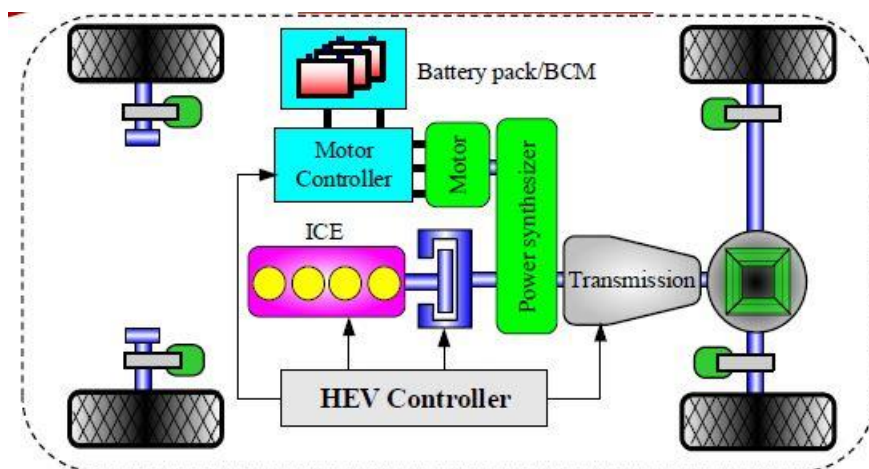


图 1-4 并联式混合动力汽车结构

并联式混合动力汽车由两个或多个独立的驱动系统联合，每个驱动系统至少与一个车载能源连接。并联式混合动力汽车与串联相比，并联结构可采用功率相对较小的驱动电机和电池组，减少汽车的成本和质量，而且整车效率高。因而得到了广泛的应用。本毕业设计之中，就是以并联式混合动力汽车为主要研究对象，来进行能量管理策略的制定和分析。

### 1.2.3 混联式混合动力汽车结构

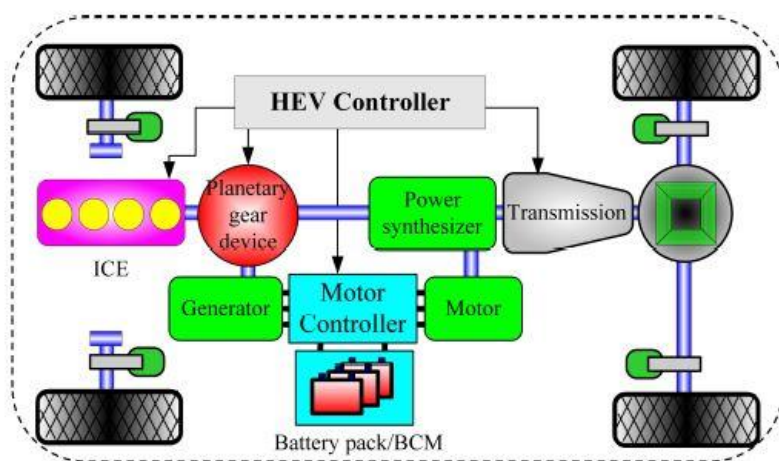


图 1-5 混联式混合动力汽车结构

混联式混合动力汽车之中，发动机和发电机的连接方式为串并联结合。混联式混合动力汽车结合了并联和串联两种结构的优点，在混合动力汽车的所有工况下都有工作效率高、低排放低的特点。但由于其控制系统也相对复杂且要求严格，成本较高。故本课程设计不将其作为主要研究对象。

## 1.3 能量管理策略研究现状

混合动力传动系能量管理系统的主要目标是满足汽车牵引功率的同时，尽可能消耗最少的能源。关于能量管理策略的分类，在不同的文献<sup>[5]</sup>里边有着不一样的分类标准，这里沿用文献<sup>[6]</sup>中的分类方式，将目前混合动力汽车能量管理策略分为基于规则的控制策略、基于优化算法的控制策略，如图 1-6 所示。

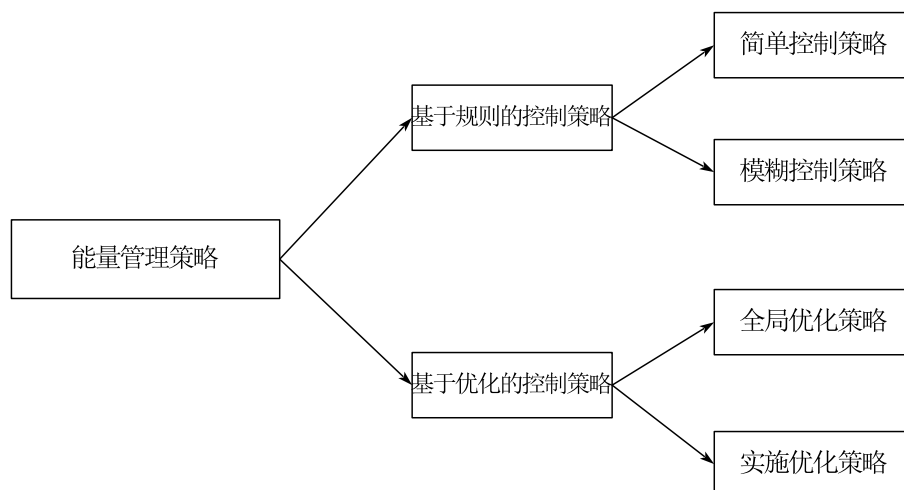


图 1-6 能量管理策略分类

为了清楚近十年之内国内研究的主流方向，本文从知网筛选了 500 篇相关主题文献，文献发布时间分布在 2000 年到 2022 年，保证了数据的广泛性和可参考性。之后利用 Citespce 可视化分析得到如图 1-7 所示结果。

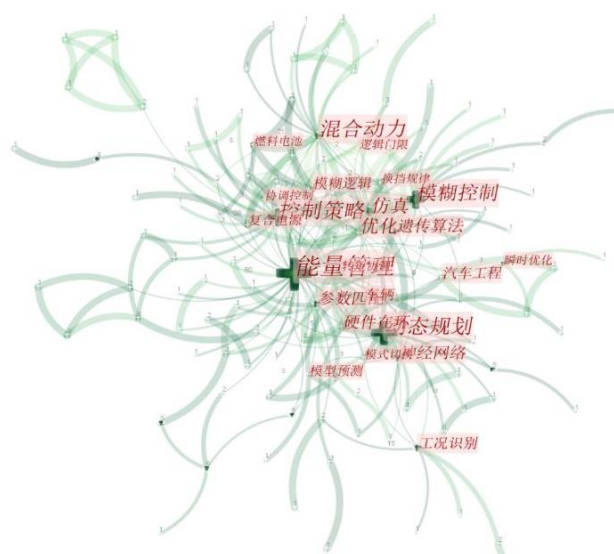


图 1-7 Citespace 分析结果

从图片可以得出，目前混合动力汽车基于优化的能量控制策略是主流研究方向。在上图之中主要体现为动态规划、遗传算法的高出现频率。这类能量控制策略是以基于规则的能量控制策略为基础，以其高精度、高效率而广受科学家们的青睐；基于规则的能量控制策略所在丰田普锐斯、本田 Insight 等车型上已经批量生产，但是因为本身的局限性，并没有得到很大的发展。接下来，我将会对以上各种能量控制策略进行更加详细的分析。

### 1.3.1 基于规则的控制策略

基于确定规则的能量管理策略主要是根据车辆的需求转矩、转速与电池组荷电状态(SOC)条件或其动力源 Map 图,对电机或发动机的工作状态制定相应的规则进行控制。在近年来的能量管理策略的研究中,国内外都提出了许多立意新颖的能量管理方法。

基于规则的简单能量控制策略之中,丰田公司的 Prius 和本田公司的 Insight 采用的是功率跟随能量控制策略是最为典型的一种。在此控制策略中,内燃机作为主要动力源提供大部分需求功率,电动机作为辅助动力源起“削峰填谷”的作用<sup>[7]</sup>。这种控制策略正是因为简单实用,而被广泛应用在如今的混合动力汽车之上。此控制策略将混合动力汽车的工作模式分为若干种情况:当车速低于给定阈值时,发动机关闭,由电动机提供全部需求功率;当所需功率大于内燃机的最大功率时,电动机作为辅助起到补充功率的作用;在汽车制动过程中,汽车会回收能量用来给电机充电;当需求功率低于给定阈值时,发动机为了避免能量浪费,会进行关闭处理;当电池 SOC 低于某一给定阈值时,发动机会强制给电动机能够为电池进行充电。

功率跟随这种基于简单规则的能量管理策略存在的一个主要缺点是难以实现实时控制。为了实现进一步对能量控制策略的把控,模糊逻辑控制策略应用而生。

M.H. Hajimiri<sup>[8]</sup>等提出了一种基于预测车辆未来状态的模糊控制策略,这种控制策略结合现代信息发展,利用大多数车辆中都装载的全球定位系统(GPS)来进行数据反馈,将车辆未来的路径信息产生控制信号,然后根据具体情况选择具体能量管理方式,以此达到节约能源的效果。该能量管理策略的仿真结果表明提高了整车的燃油经济性。

### 1.3.2 基于优化算法的控制策略

基于优化算法的控制策略优化算法可分为全局优化和实时优化,基于优化的能量控制策略主要受到算法本身的限制以及采样时间、模型精度、参数定义等因素的影响。目前比较主流的算法主要有动态规划(Dynamic Programming, DP)、等效燃油消耗最小策略(Equivalent Consumption Minimization Strategy, ECMS)、神经网络算法(Neural Networks, NN)、无导数优化算法——模拟退火(Simulated Annealing, SA)<sup>[9]</sup>等。在近年来的研究之

中，基于优化算法的控制策略一直处于风口浪尖之处，出现了不少研究新方向。

在基于优化的能量控制策略之中，全局最优控制策略也得到了快速发展。动态规划是一种全局最优的控制方法，考虑控制决策当前和未来的成本，使不期望的结果最小化的最优方案。动态规划计算优势大大减少了搜索空间和计算时间，特别适用于汽车行进过程中的能量管理非线性约束动态过程。

肖仁鑫, 李涛, 邹敢<sup>[10]</sup>等为通过随机动态规划确定混联式混合动力汽车的能量管理策略，建立了马尔可夫模型。该模型在维持电池容量的同时以燃油消耗最小为目标，通过随机动态规划获得能量管理策略。在后续的仿真之中，该模型明显提升燃油了经济性。

基于动态规划的能量管理策略可以得到最优的控制结果，但由于汽车的行程不确定性，导致该能量管理策略的实时性较差。刘辉<sup>[11]</sup>等分析发动机和电机的工作原理，通过重新定义功率分配系数，提出了在任何 SOC 下从耗电模式切换到功率维持模式时的实时能量管理策略。在该能量管理策略之中，刘辉等人主要研究了功率分布因子、SOC 对整车燃油经济性的影响。在研究之中，刘辉等人发现了功率因子的重要作用，于是优化了功率分布因子控制线获得 SOC 的变化值。刘辉等人提出的这种实时能量管理策略具有很高的参考价值。

## 1.4 本文主要内容和结构

本文以混合动力汽车为主要研究对象，在了解了混合动力汽车的背景和汽车结构之后，确定以并联式混合动力汽车为主要研究对象，开发制定一套基于规则的额能量管理策略，并进行混合动力汽车车辆动力学模型的搭建，之后利用 MATLAB/Simulink 平台对模型进行 NEDC 工况仿真，来验证汽车制定规则的有效性。主要研究内容如下：

1.建立一种基于逻辑门限的确定规则的能量管理策略。该能量管理控制策略主要利用发动机转矩、汽车车速、发动机转速、电池荷电状态为逻辑门限，将混合动力汽车的行驶工况划分为纯电驱动模式、纯发动机行驶模式、混合驱动模式、行车充电模式。

2.利用 MATLAB/Simulink 平台搭建汽车的并联式混合动力系统模型。该模型主要包括发动机模型、电机模型、电池组模型、传动系模型、驾驶员模型。

3.进行并联式混合动力系统模型仿真分析，主要对并联式混合动力系统模型的可行性进行验证，对各个模式下的汽车进行仿真，分析其结果的真实性和可靠性。

4.进行并联式混合动力系统能量管理策略模型仿真分析。在 NEDC 工况下对汽车进行仿真，检验能量管理策略的可行性。并对相应的不足和错误之处进行修改。

## 2 基于规则的逻辑门限能量管理策略的确定

### 2.1 引言

基于规则的能量管理策略相比于其他能量管理策略而言，实用性较好，结构简单。制定规则的方法也多由实际经验或者专家们来制定，具有很高的实用性和权威性，在现今汽车工程中被广泛应用。常见的基于规则的逻辑门限能量管理策略又可以详细的分成恒温控制策略、功率跟随控制策略和电机助力控制策略。其中恒温器和功率跟随器也可以一起使用形成一种混合使用的能量管理策略<sup>[12]</sup>。

在本文之中。因为主要研究的对象是并联式混合动力汽车，根据在《新能源控制技术》课程之中的总结，使用电机助力控制策略将会有更多的优点<sup>[13]</sup>。本文接下来将使用基于电池荷电状态、车速、需求转矩作为逻辑门限，建立起一种实用性好，结构简单的控制策略。

### 2.2 控制策略设计

一般来说，逻辑门限的确定就算是确定了汽车的不同行驶工况。以丰田普锐斯为例<sup>[14]</sup>，可以将汽车的行驶工况分为：纯电驱动、发动机驱动、行车充电、混合驱动、再生制动、停车。本文将沿用丰田普锐斯的典型行驶工况，主要将汽车分为：纯电驱动、发动机驱动、行车充电、混合驱动四种行驶工况，对停车和再生制动不予考虑。在本次能量管理策略之中可能会用到一些参数，现在下放给予集体说明，如表 2-1 所示：

表 2-1 逻辑门限参数

主要参数	意义
SOC	汽车行驶时的电池荷电状态
SOC_L	电池的 SOC 下限值
Tr	汽车行驶时所需的发动机转矩
T_min	发动机最小工作转矩
Temax	发动机最大转矩
Te_mopt	发动机最优化转矩
V	汽车行驶时的车速
V_min	发动机开启车速
Tm	电机分配转矩
Te	发动机分配转矩

## 2.2.1 行驶模式流程图

选定好逻辑门限值之后，本文对控制策略的逻辑进行了梳理。为了将所有工况清晰明了的表达清楚，且将所有情况都考察进去，本文将控制策略的逻辑整理成流程图，其中包含了每一种可能存在的汽车工作情况，如图 2-1 所示。在下文中将会对流程图的每一条支路进行分析，看其属于那种工作状态且对其对应工作状态下电机和发动机的转矩进行分配处理。

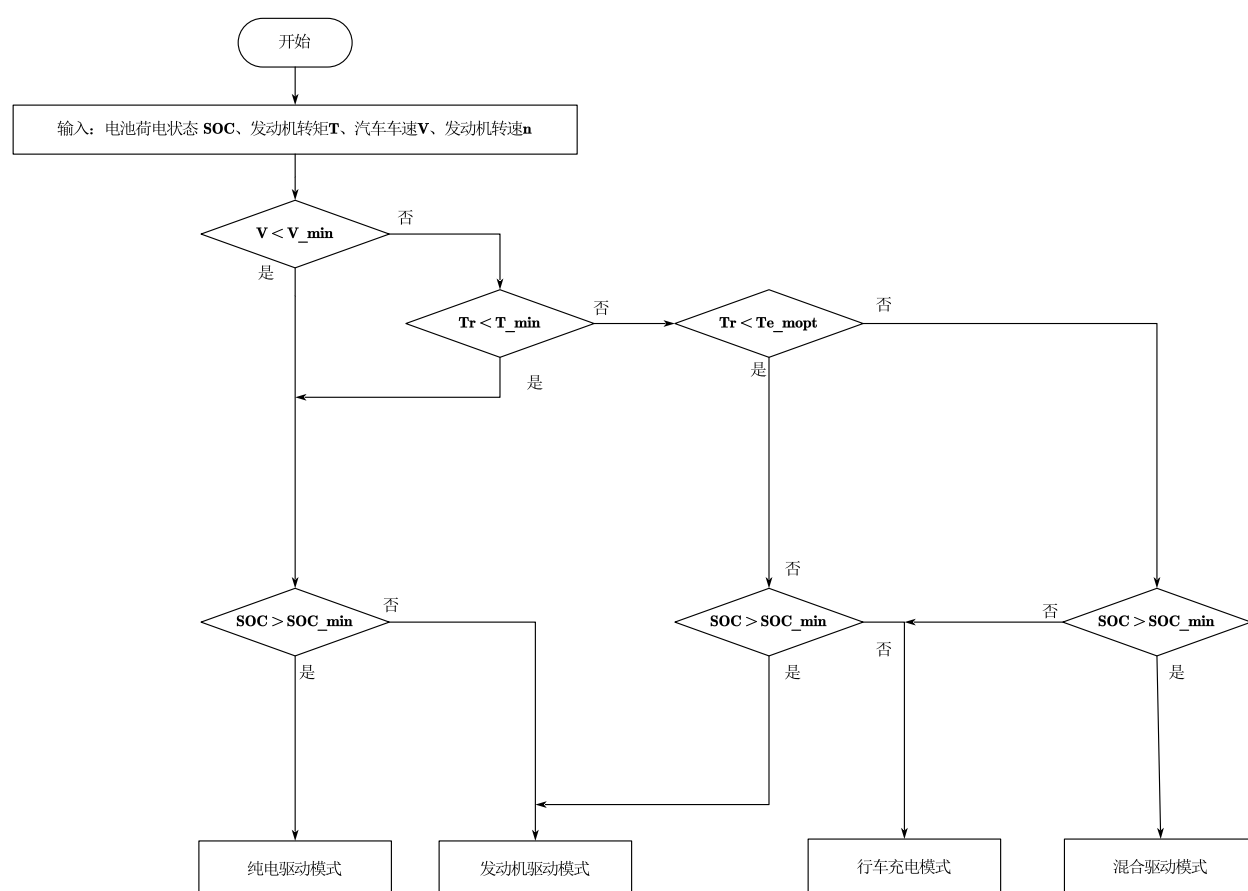


图 2-1 能量管理策略流程图

## 2.2.2 纯电驱动模式

当需求转矩小于发动机最小工作转矩或汽车车速小于发动机开启车速时，若电池的荷



电状态大于设置的下限值。此时汽车进行纯电驱动。在此模式下，发动机若要工作，将在低效率区进行工作，燃油消耗量是十分巨大的。电机在这里起到了“削谷”的作用。

此时：

$$T_m = T_r \quad (2-1)$$

$$T_e = 0 \quad (2-2)$$

### 2.2.3 纯发动机驱动模式

当需求转矩小于发动机最小工作转矩时，若 SOC 小于等于设置的下限值。用纯发动机驱动。

当汽车车速小于发动机开启车速时，若 SOC 小于等于设置的下限值。用纯发动机驱动。

当需求转矩大于发动机最小工作转矩而小于发动机最优化转矩，并且车速大于发动机开启车速时，若 SOC 大于设置的下限值。用纯发动机驱动。

此时的发动机已经达到了工作在高效率区的要求，故此时采用纯发动机工作既可以节省电机工作的能量，还可以最大程度提高发动机的燃油经济性。

此时：

$$T_m = 0 \quad (2-3)$$

$$T_e = T_r \quad (2-4)$$

### 2.2.4 行车充电模式

若电池 SOC 小于等于设置的电池 SOC 下限值，需求转矩大于等于发动机最小工作转矩而小于发动机最优化转矩时。用行车充电模式。再次工作模式下，电机充当发电机的作用来给动力电池组进行充电。发动机的功率一部分用于行车驱动，另一部分则用于电机。

此时：

$$T_m = T_{e\_mopt} - T_r \quad (2-5)$$

$$T_e = T_{e\_mopt} \quad (2-6)$$

## 2.2.5 混合驱动模式

当需求转矩大于等于发动机优化转矩并且车速大于等于发动机开启车速时，若电池 SOC 大于设置的下限值。采用混合驱动。此时汽车行驶所需要的功率很大，电机在这里起到了“填峰”的作用。

此时：

$$T_m = T_{e\_mopt} - T_r \quad (2-7)$$

$$T_e = T_{e\_mopt} \quad (2-8)$$

## 2.2.6 其他情况说明

在上述纯电驱动、纯发动机驱动、行车充电、混合驱动之外，仍存在着一些尚未考虑到的情况<sup>[15]</sup>。从行驶模式流程图中就可以看到（如图）。以下将对这些情况进行一一说明。

- 1) 当需求转矩大于等于发动机优化转矩并且车速小于等于发动机开启车速时，采用纯电驱动。
- 2) 当需求转矩大于等于发动机优化转矩并且车速大于等于发动机开启车速时，若电池 SOC 小于等于设置的下限值。采用行车充电模式。此时汽车行驶所需要的功率很大，电机充当发电机，为电池组充电。

## 2.3 基于 Stateflow 的逻辑门限能量管理策略模型的搭建

### 2.3.1 Stateflow 模型搭建

Simulink 是 MATLAB 最有用的工具包之一。MATLAB 是美国 MathWorks 公司出品的商业数学软件，用于数据分析、深度学习、图像处理与计算机视觉、信号处理、量化金融

与风险管理、机器人，控制系统等领域。

在本次基于 Simulink 的逻辑门限能量管理策略模型的搭建之中。本文主要运用 Stateflow 进行模型的搭建<sup>[16]</sup>。Stateflow 是集成于 Simulink 中的图形设计于开发工具，主要针对控制系统中的复杂逻辑进行建模与仿真，而且必须在 Simulink 环境之下进行运用。在 Simulink 中建立的模型如图 2-2 所示

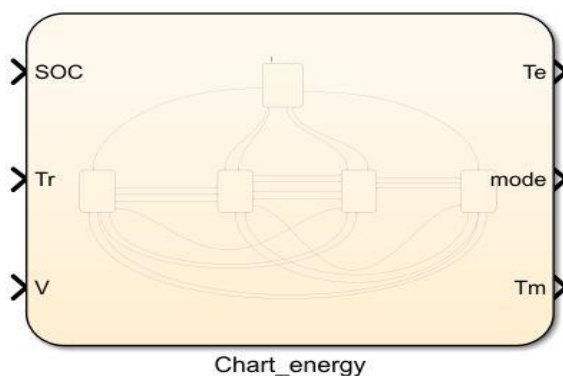


图 2-2 能量管理策略概念图

在利用 Stateflow 建模时，本文主要使用状态、转移来进行模型搭建，即状态图的仿真。在该状态图下，主要包括三部分：信号输入、信号处理、信号输出。能量管理策略模型如图 2-3 所示

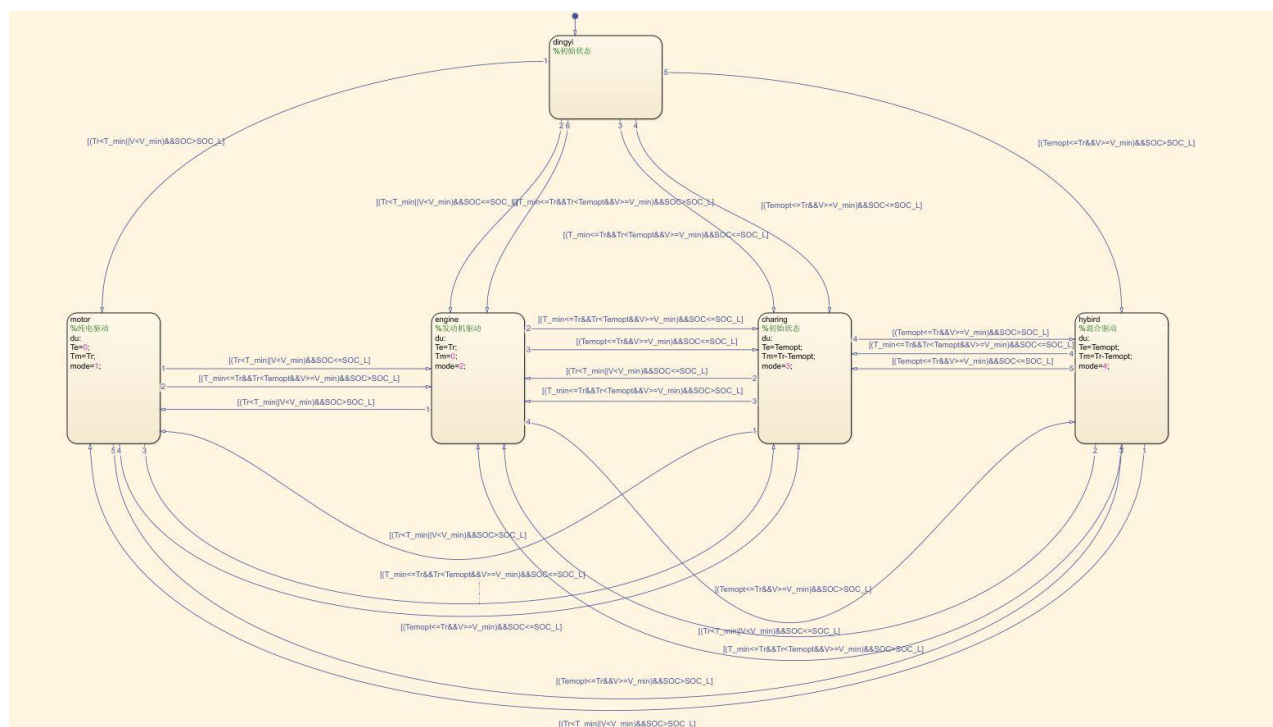


图 2-3 能量管理策略状态转移关系

### (1) 信号输入

在本模型之中，输入共有三个，分别为：行驶需求转矩  $T_r$ 、电池荷电状态 SOC、汽车行驶车速  $V$ 。这些输入均是来自于车辆动力学里边的实时数据，其中有一些数据需要经过适当处理才能得到。不过也是通过车辆动力学模型进行处理得来。在经过 Stateflow 处理之后，选择适当的工作模式进行输出，以达到理想状态下的工作模式。

### (2) 信号处理

在本模型中最核心的部分就是 Stateflow 的信号处理部分。本模型利用状态图来处理汽车的模式识别及后续处理。在本模型之中，模型会根据相应的条件将输入的信号分成纯电驱动模式、发动机驱动模式、行车充电模式、混合驱动模式。然后对电机和发动机的转矩进行重新分配，并将分配好的电机和发动机转矩同分配好的传动比档位进行输出，反馈给车辆动力学模型。

### (3) 信号输出

在本模型之中，将处理完的信号进行输出是最后一步工作。输出信号包括电机提供转矩  $T_m$ 、发动机提供转矩  $T_e$ 、工作模式  $mode$ 。

## 2.3.2 模型中参数的确定

由于本文设计的是基于逻辑门限规则的能量管理策略，所以确定逻辑门下的值是建立能量管理策略的主要任务之一。逻辑门限包括：电池的 SOC 上限值  $SOC_H$ 、电池的 SOC 下限值  $SOC_L$ 、发动机最小工作转矩  $T_{min}$ 、发动机最大做工转矩  $T_{emax}$ 、发动机最优化转矩  $T_{emopt}$ 、发动机开启最小车速  $V_{min}$ 。下面将对这些数据进行一一确定。

### (1) $SOC_H$ 、 $SOC_L$ 的确定

本文所参考的车型是比亚迪唐 2021 款 DM-i52KM 豪华型。因为发行时间距今接近十年。故电池采用现阶段采用较多的磷酸铁锂电池。根据市场上的磷酸铁锂电池的大体参数，初步选定电池 SOC 的下限值为 0.3，电池 SOC 上限值为 1。（后续可以根据实际需求进行修改）。得：

$$SOC_H=1 \quad (2-9)$$

$$\text{SOC}_L=0.3 \quad (2-10)$$

### (2) $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$ 、 $T_{e\_mopt}$ 的确定（单位：N·m）

根据丰田普锐斯的参数配置，可以得到  $T_{\max}=100$ 。电机可提供的最大功率为 60，故将发动机启动的最小转矩初定为 55，即： $T_{\min}=30$ 。然后参考丰田普锐斯的 MAP 图，初定  $T_{e\_mopt}$  为 120。得：

$$T_{\min}=30\text{N}\cdot\text{m} \quad (2-11)$$

$$T_{e\_mopt}=130\text{N}\cdot\text{m} \quad (2-12)$$

### (3) $V_{\min}$ 的确定（单位：km/h）

经过查阅文献<sup>[17]</sup>，可知丰田普锐斯的最高车速为 180km/h。初步选定  $V_{\min}$  为 30。得：

$$V_{\min}=30\text{km/h} \quad (2-13)$$

## 2.4 本章小结

本章选取电池荷电状态、车速、转矩作为逻辑门限参数，根据之前文献的经验确定了逻辑门限值的大小，制定了一种基于逻辑门限规则的能量管理策略。在汽车的各种行驶模式之下，本文还制定了电机和发动机转矩的分配原则。同时，在本章之中，因为资料有限，确定的逻辑门限的值还会在第四章仿真分析之后再次进行优化调整，以期望达到最佳的状态。

### 3 并联式混合动力系统建模

#### 3.1 引言

本文中搭建车辆动力学模型所使用的软件为 MATLAB/Simulink。经查阅，同样用于仿真的软件还有 AVL CRUISE、Carsim、GT suite 等软件，相比于其他仿真软件，MATLAB/Simulink 有许多显著的优点<sup>[18]</sup>。基于以上优势和毕业设计要求，本文选用 MATLAB/Simulink 进行汽车动力学模型进行搭建。本文分别就并联式混合动力系统的各个部分的结构进行模型的搭建，其中包括发动机模型、电机模型、电池组模型、车身模型。

#### 3.2 基于 Simulink 整车模型搭建

在本文之中，选用的车型为并联式混合动力汽车。在搭建整车动力学模型之时，忽略汽车在横向方面的影响，只搭建汽车的纵向动力学模型<sup>[19]</sup>。此时应满足公式（3-1）

$$F_t = fmg\cos\theta + C_D A u^2 / 21.15 + mgs\sin\theta + \delta ma \quad (3-1)$$

其中主要参数值如表 3-1 所示：

表 3-1 汽车主要参数

主要参数	意义
$F_t$	驱动力
$f$	滚动阻力系数
$m$	汽车整备质量
$\theta$	道路坡度
$C_D$	风阻系数
$A$	迎风面积
$u$	车辆行驶速度
$\delta$	旋转质量换算系数

在所搭建的车辆动力学模型之中，主要包括发动机模型、电机模型、电池组模型、车身模型、驾驶员模型、仿真工况的选择等几部分。

此外，本文中搭建好的车辆动力学模型参数取自一款并联式混合动力汽车（比亚迪唐 2021 款 DM-i52KM 豪华型），不依赖于 Simspace 中默认的参数。搭建好的模型如图 3.1 所示

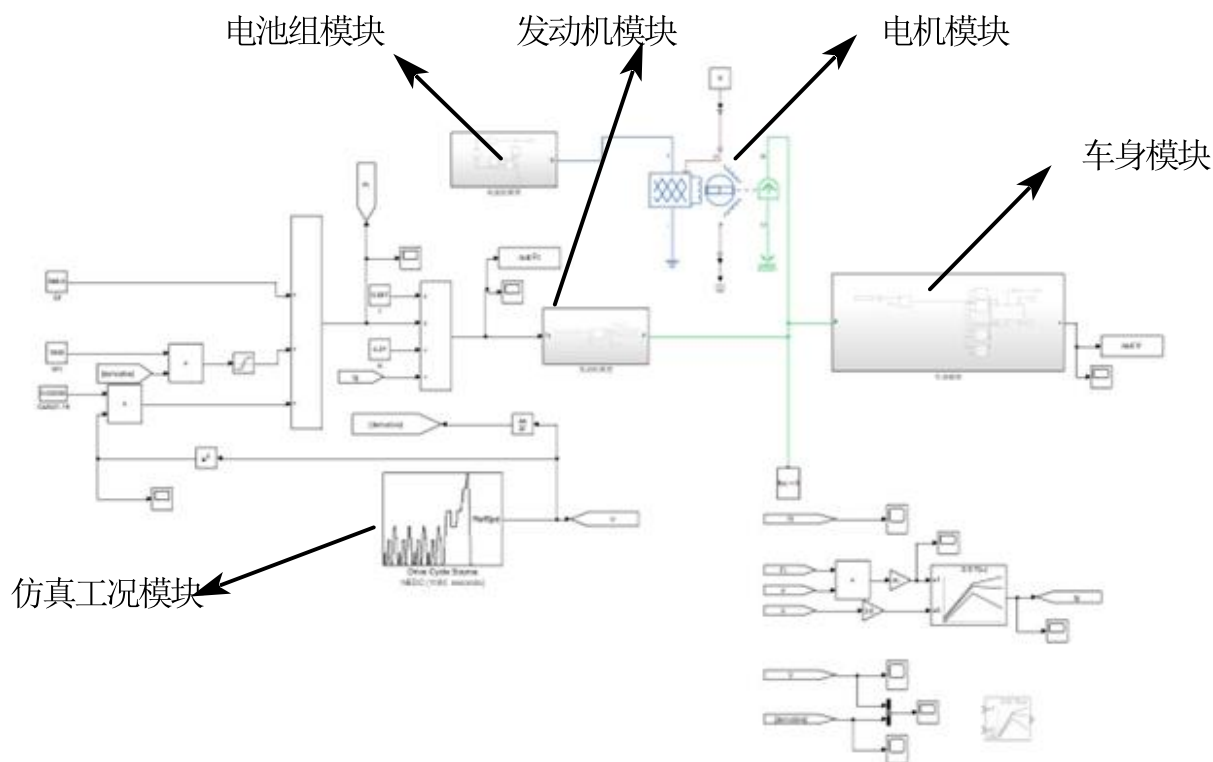


图 3.1 整车动力学模型

### 3.2.1 发动机模型

在搭建发动机模型之前，本文搜集到的发动机模型参数如表 3-2 所示：

表 3-2 内燃机参数

气缸数	最大功率/Kw	排量/L	最大功率转速/r/min
4	102	1.5	5500

发动机是并联式混合动力汽车的动力源之一，其主要作用就是将化石燃料的化学能转化为机械能以满足汽车功率的需求。基于 MATLAB/Simulink 发动机模型的建立有线性性和非线性两大类，其中非线性中流程十分复杂且其控制方法也难以控制，故本文采用的是线性模型的建立<sup>[20]</sup>。

本文直接使用 Simscape 模块之中的发动机模型，并以此为基础，建立起更加实用的模型。搭建的模型大体如图 3-2 所示：

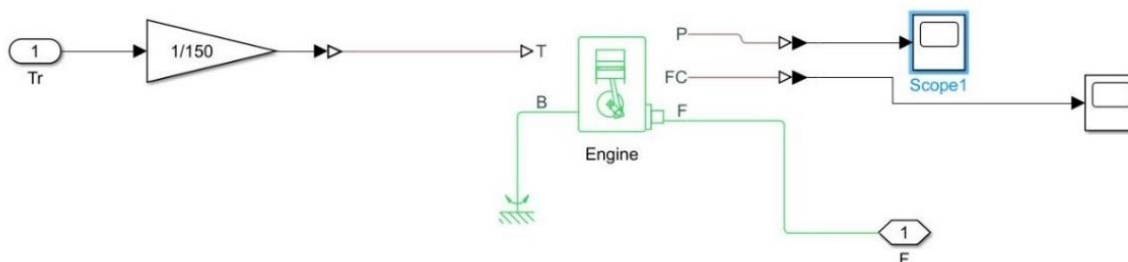


图 3-2 内燃机模型

该模型之中，输入主要为节气门开度  $T$ ，因为无法直接得到节气门开度的数据，故本文中这一数据是通过需求转矩和发动机、电机最大转矩之和的比值计算而来的。计算公式如公式 3-2。

$$\alpha = Tr / (T_{emax} + T_{mmax}) \quad (3-2)$$

该模型中，输出端口主要为  $P$ 、 $FC$ 、 $F$ 。其中  $P$  为当前时刻的功率， $FC$  为当前的燃油消耗率，这两个模块经过处理之后，将作为检验课程设计的重要指标。 $F$  为与后续变速箱相连接的一个输出端，主要作用就是向前传递当前的运动状态。

### 3.2.2 电机模型

在搭建电机模型之前，本文搜集到的电机模型可能会用到的参数如表 3-3 所示：

表 3-3 电机参数

主要参数	参考值
电机类型	永磁同步电机
电机总扭矩 (Nm)	316
电机功率 (Kw)	145
驱动电机数	单电机
电机布局	前置

随着混合动力汽车的技术越来越成熟和市场内对排放标准要求的日益增长，电机在在并联混合动力电动汽车中扮演着的角色越来越重要。作为并联混合动力系统至关重要的动力源，近年来比亚迪开发的并联式混合动力汽车电机所能提供的功率已经超过发动机提供的功率。电机的主要作用就是协助发动机起到“填谷削峰”的作用，根据实际工况，不断



调整自己的运行状态，从而使自身作用最大化。传统的电机模型中主要分为三个部分，分别为逆变器、电机控制器、驱动电机。在建立模型之前，本文寻找到了传统永磁同步电机的模型。但是在 R2021b 版本的 MATLAB/Simulink 中存在着集成度很高的电机模型。本文不再选用由逆变器、电机控制器、驱动电机搭建成的电机模型，而是直接选用集成度较高的电机模型，搭建的模型如图 3-3 所示

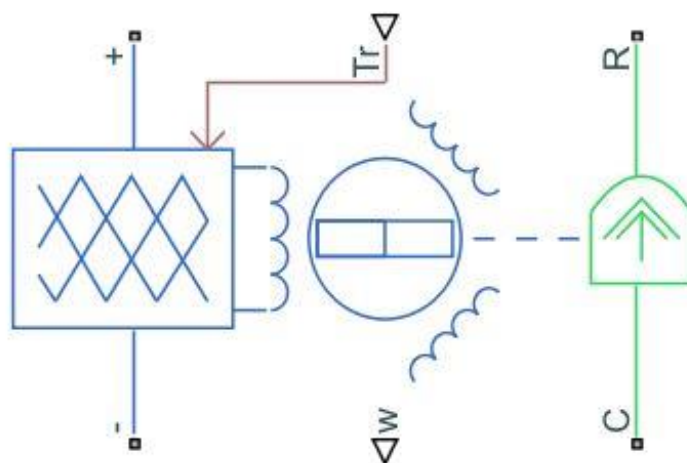


图 3-3 电机模型

通过建好的电机模型可以看出，该电机模型的输入是能量管理策略分配的电机转矩和经过电池组模型作用后的电池直流电压电压，以及物理参考端 C。在经过内部逆变器模块、电机控制器模块、永磁同步电机作用，整个模块的输出端分别为电机的角速度  $\omega$  和物理输出端 R。 $\omega$  可以用于测量电机的转矩、功率等参数，而物理输出端 R 则是用来与模型的下一部分进行连接。

该电机模型最底层的物理基础主要是由 IGBT 组成的逆变器、电机方程及合成的永磁同步电机 PMSM、simscape 模块集成的电机控制器<sup>[21]</sup>。

### 3.2.3 电池组模型

在搭建电池组模型之前，本文搜集到的电池组模型参数如表 3-4 所示

表 3-4 电池组参数

电池类型	NEDC 续驶里程/Km	电池能量/Kwh	百公里耗电量 Kwh100Km
4	102	1.5	5500

由于本文建立的是并联式混合动力汽车的电池组模型，其中会有很多次要的影响因素，如果要完全真实的建立反应混合动力汽车的电池组的模型是需要巨大的工作量的。以电池在 NEDC 工况下运行稳定放电这一方面考虑，此过程就涉及到十分复杂的电化学反应，且反应过程相当复杂，并且随着温度的不同而变化。正是由于多种因素的影响，在现阶段建立电池组模型主要有两种办法：

- 1) 考虑尽可能多的因素影响，然后根据经验确定每一种因素的加权系数，最后建立非线性化的电池组模型。
- 2) 根据实际经验，适当忽略次要因素，建立线性电池组模型

正是这种实时数据不断地变化，我在本文中决定忽略掉这一部分次要因素的影响，建立线性电池组模型。则电池在每一时刻的 SOC 值数值变化可以通过公式 3-3 表示出来<sup>[22]</sup>

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t_0) - \frac{1}{Q} \int_0^t \eta I dt \quad (3-3)$$

式中，SOC (t<sub>0</sub>) 代表电池组初始 SOC 值，Q 为电池组最大容量，I 为电池组总电流， $\eta$  为效率值，此处取值为 1。则建立电池组模型如图 3-4、3-5 所示：

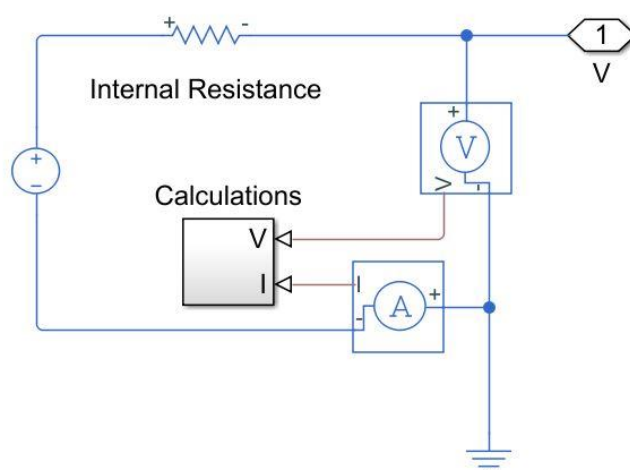


图 3-4 电池组模型外层

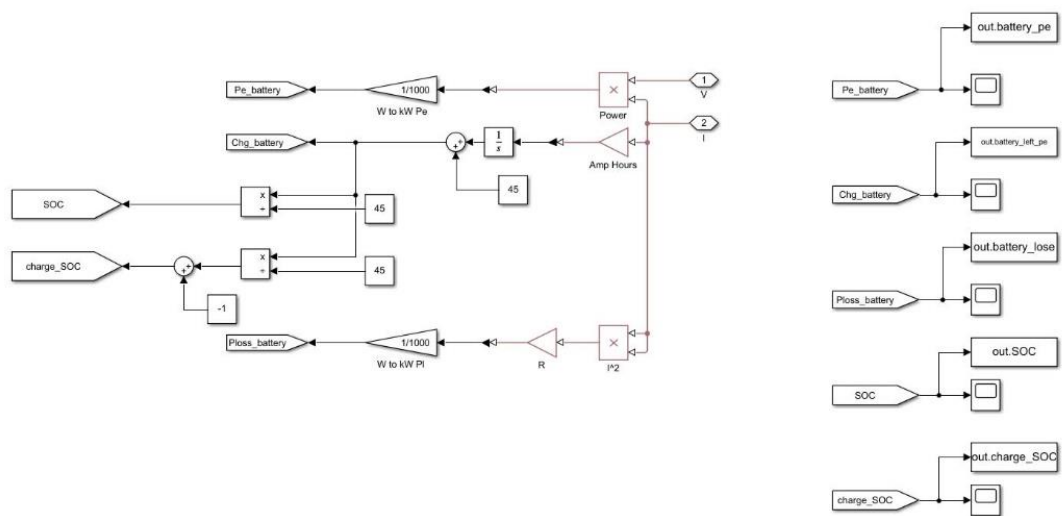


图 3-5 电池组模型内层

电池组输出为电压  $V$ ，作用主要是为了连接后续模型。在电池组模型之中，本文中又添加了计算电池组在各个时刻输出功率、损失功率等指标，为后续研究整车仿真结构提供了必要的基础。同时引出 SOC 端口，作为能量管理策略输入端之一。

### 3.2.4 整车模型

在搭建车身模型之前，本文搜集到的车身模型参数如表 3-5 所示

表 3-5 整车参数

主要参数	参考值
长 (mm)	4870
宽 (mm)	1950
高 (mm)	1725
重心高 (mm)	--
前轮距 (mm)	1650
后轮距 (mm)	1650
转动惯量	--
阻尼系数	0.3
风速 (Km/h)	0
车轮半径 (mm)	20

整车模型模型主要包括车身模型、汽车车轮模型和变速箱模型三部分。车身模型在 Simspace 中有对应的模型，可以直接运用。汽车车轮模型的建立，在传统的建模过程之中，需要根据魔术公式进行车轮模型的建立。然而在 Simspace 中则已经有集成好的车轮模型，

因为魔术公式模型更加贴合实际的轮胎，故本文直接调用魔术轮胎模型。变速箱模型在 Simspace 中有对应的模型，也可以直接运用。

变速箱的输入输出都是包含一定转矩转速的轴。变速箱的作用就是根据输入当前的情况来确定传动比进而实现轴的转矩转速的变化。本文中采用无级变速器来进行传动。

在经过变速箱之后，变速箱的输出量来到车身和轮胎的部分。在该部分，车身和轮胎不仅仅受到变速箱输出的影响，还有风速、路面坡度都会对整车的输出速度产生一定程度的影响。故需要根据 NEDC 工况运行工况的要求，设定风速和路面坡度的值。

配置完车身模型、汽车车轮模型和变速箱模型的相关参数之后，搭建好的模型如图 3-6 所示。

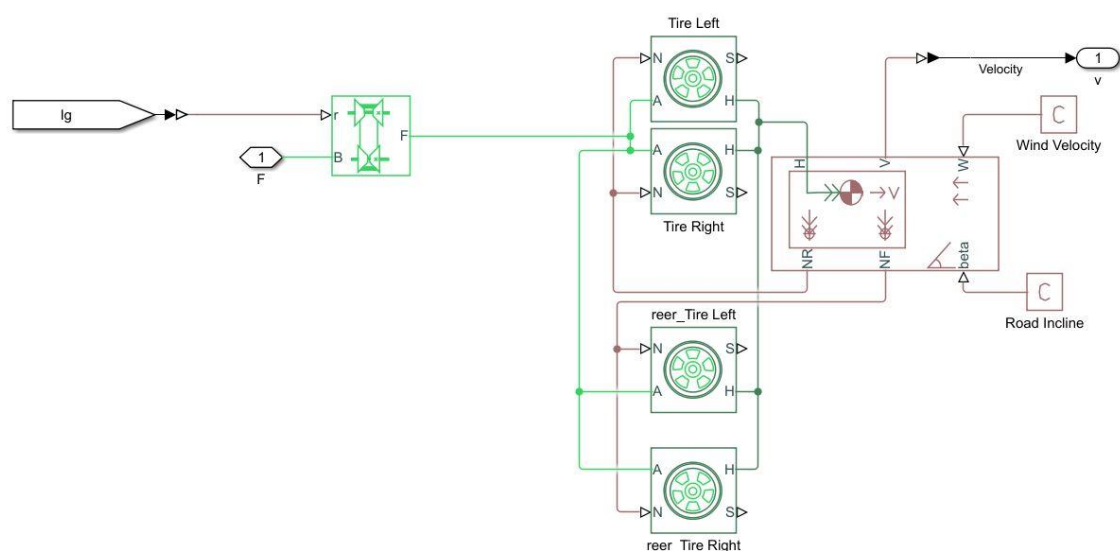


图 3-6 整车模型

### 3.2.5 仿真工况选择

仿真工况是建立车辆动力学模型必不可少的一部分。在现在世界上，主要的仿真工况主要有 NEDC 工况、WLTC 工况、商用车六工况、EPA 等工况。NEDC，全称是 New European Driving Cycle（新欧洲驾驶循环测试）。最初是为了基于汽油的公路车而设计，用于评估汽车发动机的排放水平和燃油经济性，现在也用于柴油车，以及估算混合动力和纯电动汽车的电能消耗和行驶范围。虽然名称是欧洲标准，但主要应用国家、地区还有澳大利亚和中国，我国工信部对新能源汽车的综合续航里程也是采用这种测试标准。故本次仿真工况也

将采用这种工况，工况如图 3-7 所示<sup>[23]</sup>。

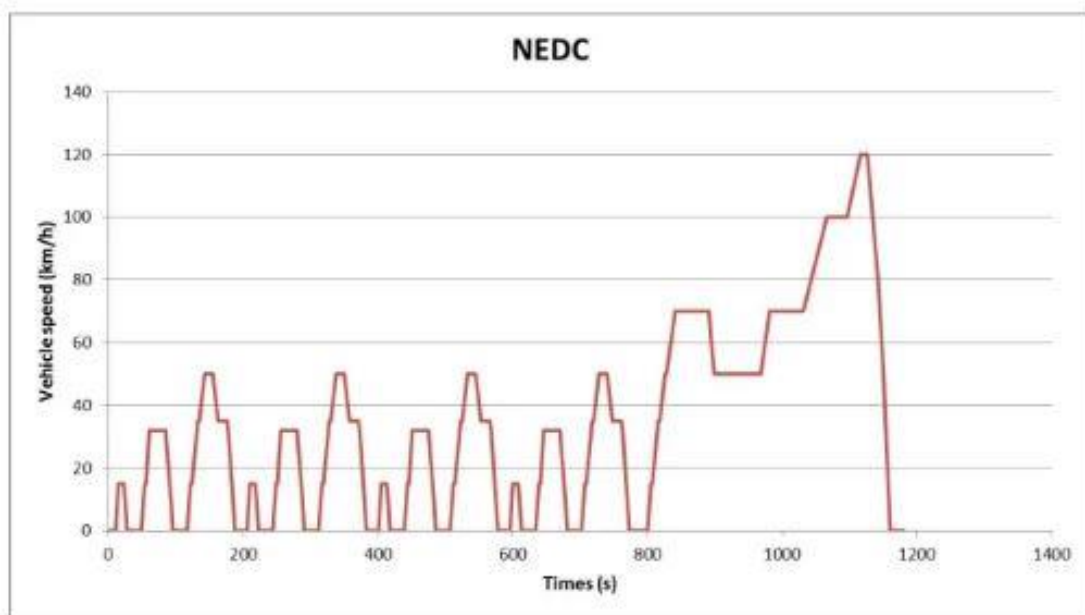


图 3-7 NEDC 行驶工况

### 3.3 本章小结

本章主要完成的工作就是车辆动力学模型的建立。在选定仿真软件之后，本文先后建立了发动机模型、电机模型、电池组模型、车身模型、仿真工况的选择及驾驶员模型的建立等部分性的工作，最后每个部分连接成一整个车辆动力学模型。该车辆动力学模型将为后续进行仿真实验建立良好的基础。

## 4 并联式混合动力系统模型仿真分析

### 4.1 引言

在本章仿真分析中，主要对之前建立好的模型进行运行分析。分别分析不同工况下汽车的行驶情况。

车辆动力学模型仿真分析之中，并没有涉及到能量管理策略的作用。在该种情况下，根据基于规则的逻辑门限值，给定发动机和电机的一定的行驶工况，仍然可以使得车辆名义上工作在纯电驱动模式、纯发动机工作模式、混合驱动模式、行车充电模式。

### 4.2 车辆动力学模型仿真

#### 4.2.1 纯电动模式仿真分析

纯电动模式下，电机作为唯一的能量源为整车提供动力以满足车辆行驶的需求。为了更好的模拟纯电动模式，我们将发动机的输入等于 0，而让电机在 ECE 工况之下进行仿真。ECE 是一种典型的行驶工况，全长共 195s<sup>[24]</sup>。仿真之后结果如图 4-1、4-2、4-3、4-4 所示。

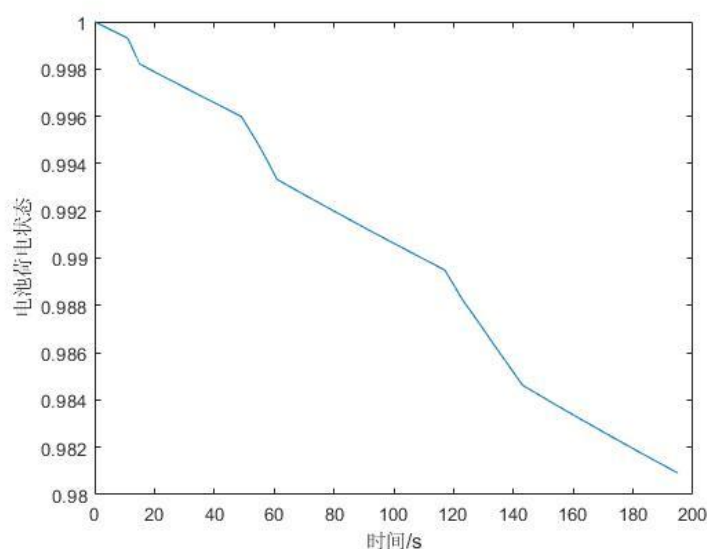


图 4-1 SOC 变化曲线

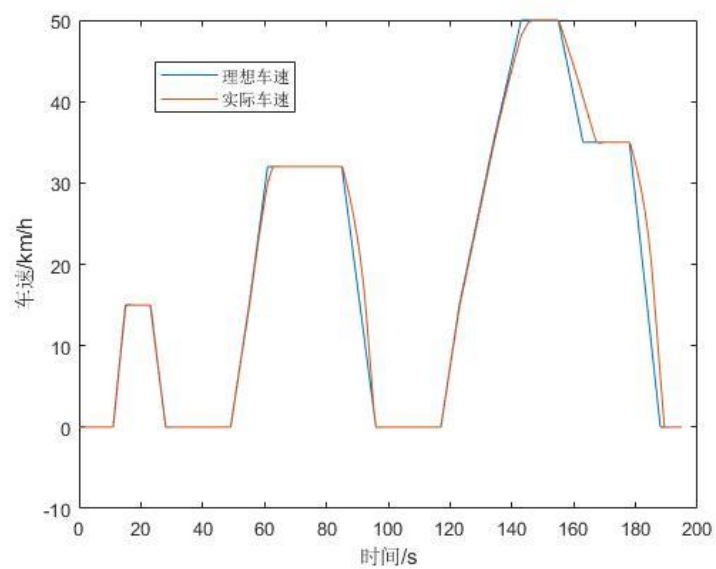


图 4-2 车速变化曲线

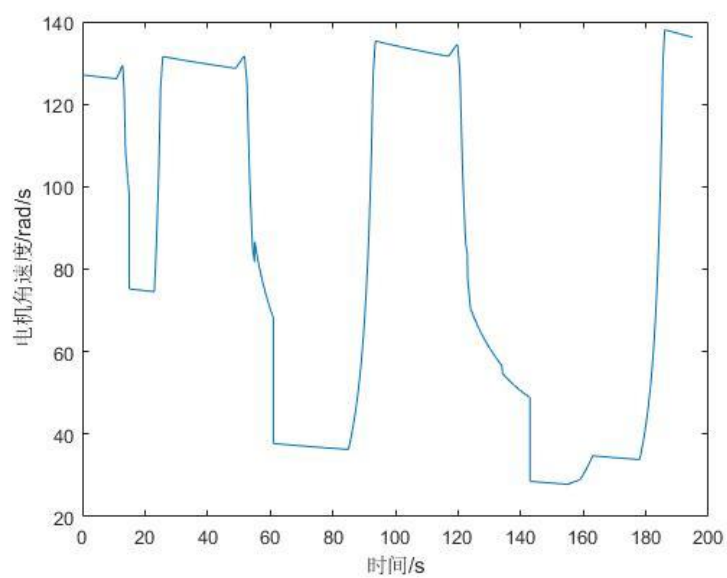


图 4-3 电机角速度变化曲线

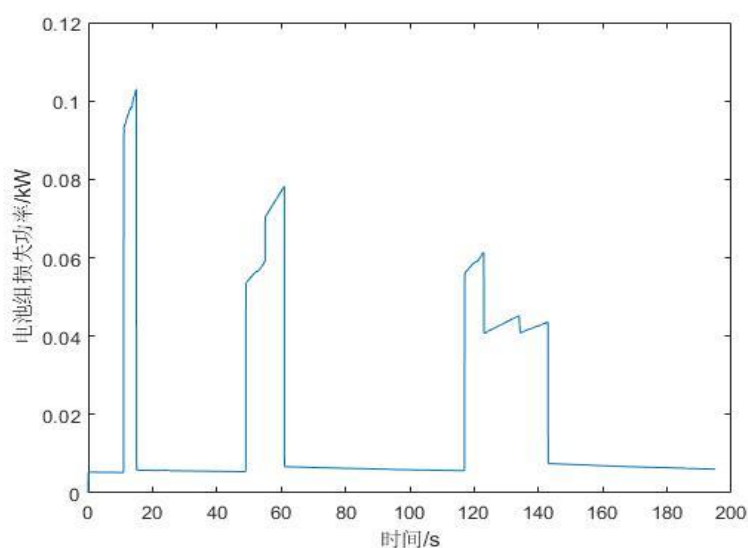


图 4-4 电池组功率损失变化曲线

在纯电动模式下，电池组提供能量，所以说电池荷电状态的值会一直下降，这一点与实验结果完全一致。因为模型是工作在 ECE 工况下运行的，持续时间只有 195s，所以 SOC 的下降的程度有限。与图 4-1 趋势相同。

在纯电动模式下，车速的变化主要与电机有关。搭建好的模型采用了负反馈环节，使得最后的结果能够与 ECE 工况相契合。结果如图 4-2 所示，运行出来的车速和 ECE 之间存在着较高的契合度，符合预期。

同时，为了更加了解电机在运行过程中起到的作用，本文对电机的输出端之一：电机转速做了测量，其结果如图 4-3 所示。

此外，本次运行模型对电池组的损失功率也做了统计。在搭建模型时，为了能够较好的还原实际混动车电池组的情况，本文考虑了电池组的内阻。因为模型存在电阻，所以说损失功率也是可以通过计算而得出的，其结果如上图 4-4 所示。

## 4.2.2 发动机驱动模式仿真分析

发动机驱动模式下，发动机作为唯一的能量源为整车提供动力以满足车辆行驶的需求。本文对纯发动机模式进行 EUDC 工况的仿真。在 EUDC 工况下，发动机受到需求转矩的作用，用相应的功率以满足车辆行驶的需要。仿真之后结果如图 4-5、4-6、4-7 所示。



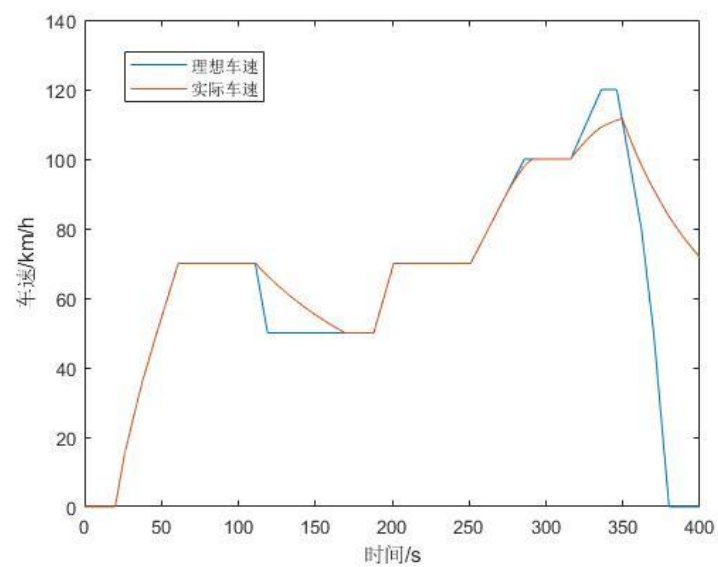


图 4-5 车速变化曲线

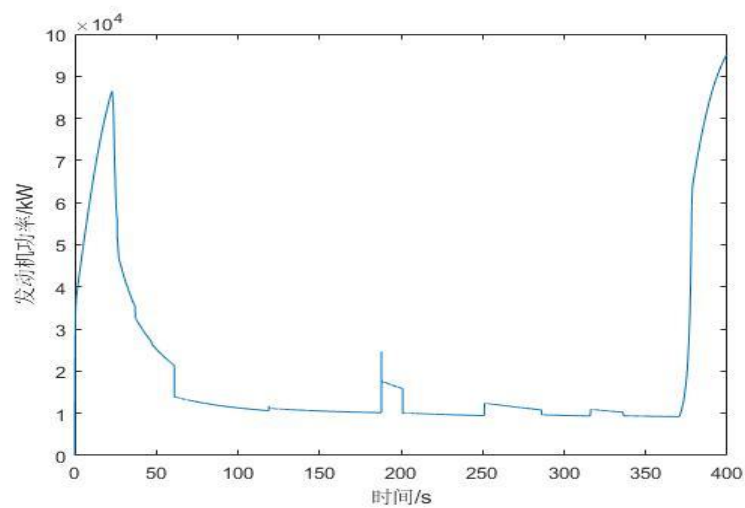


图 4-6 发动机功率变化曲线

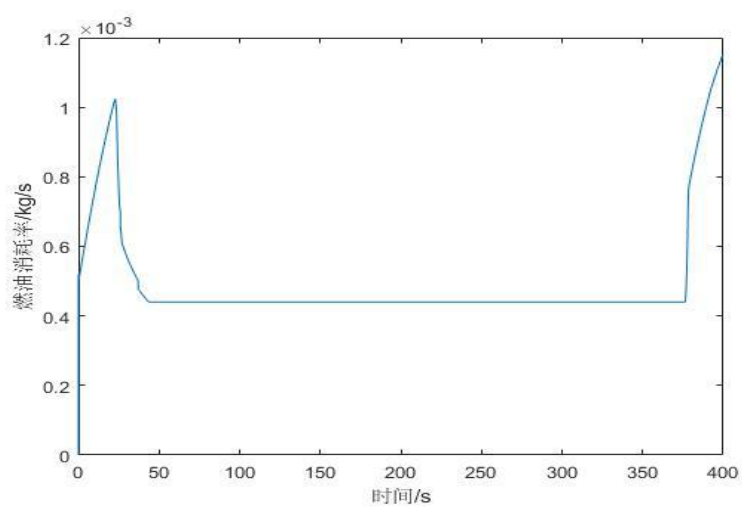


图 4-7 燃油消耗率变化曲线

发动机模式下，发动机根据 EUDC 工况所得到的需求转矩来提供功率，以使汽车能够在各种情况下进行工作。在发动机工作模式下，本文主要测得了车速变化曲线、燃油消耗率变化曲线和发动机功率变化曲线。

在车速变化曲线之中，可以看到车速随着转矩需求的变化而变化，如图 4-5 所示。在本文模型中，发动机模式下，车速变化和 EUDC 工况之间拟合度不是很理想，在查阅相关文献<sup>[25]</sup>以及多次重复仿真之后，本文认为这种误差主要由节气门开度、传动比变化而引起。在车速变化之中，传给发动机的需求转矩在传递到发动机的时候，受到节气门开度的影响，会产生一些误差。

发动机模式下，燃油消耗率也是发动机的一个重要指标，本文对其进行了测量统计，如图 4-7 所示。在发动机功率变化曲线和燃油消耗率变化曲线中，可以看到峰值功率为 102Kw 的发动机在每个功率下都有工作的情况，说明发动机得到了很好的利用。

### 4.2.3 混合驱动模式仿真分析

混合驱动模式下，汽车行驶需要的功率由发动机和驱动电机一起提供。因为没有介入能量管理策略，故本次的仿真中，需要单独对电机和发动机进行转矩输入。在纯电驱动模式和发动机驱动模式之中，本文分别利用 ECE 工况和 EUDC 工况进行了仿真。故在混合驱动模式下，为了简化仿真过程，让发动机在 EUDC 工况下进行工作，而给电机一定值转矩。得到的仿真结果如图 4-8、4-9、4-10 所示

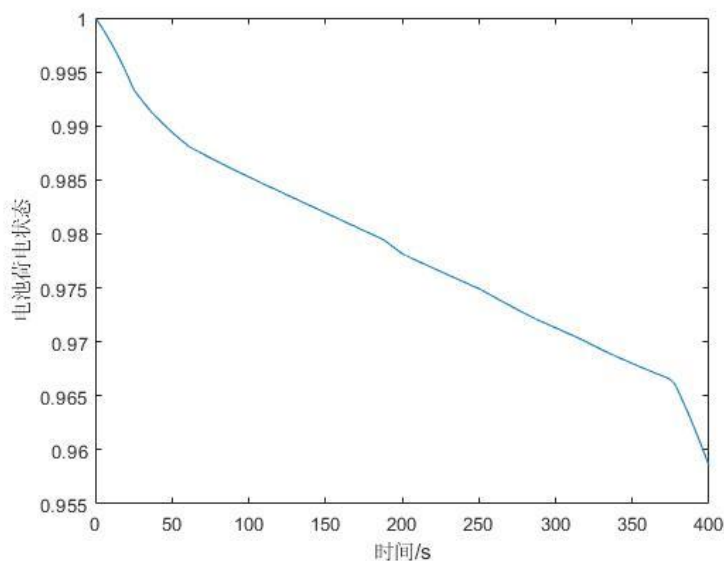


图 4-8 电池 SOC 变化曲线

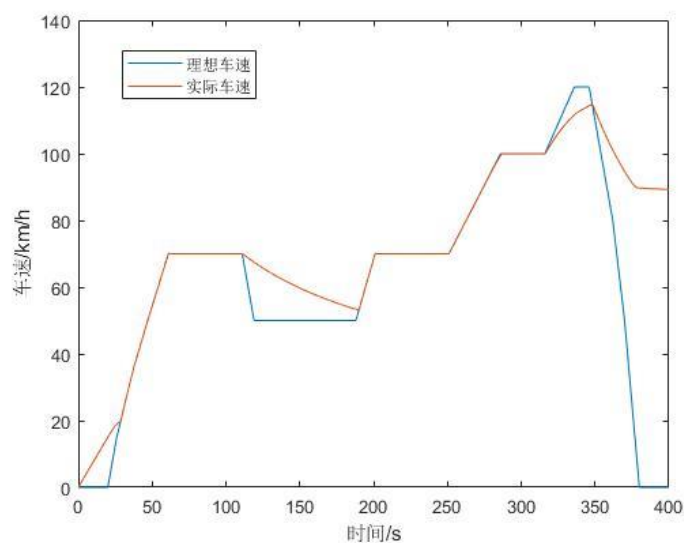


图 4-9 车速变化曲线

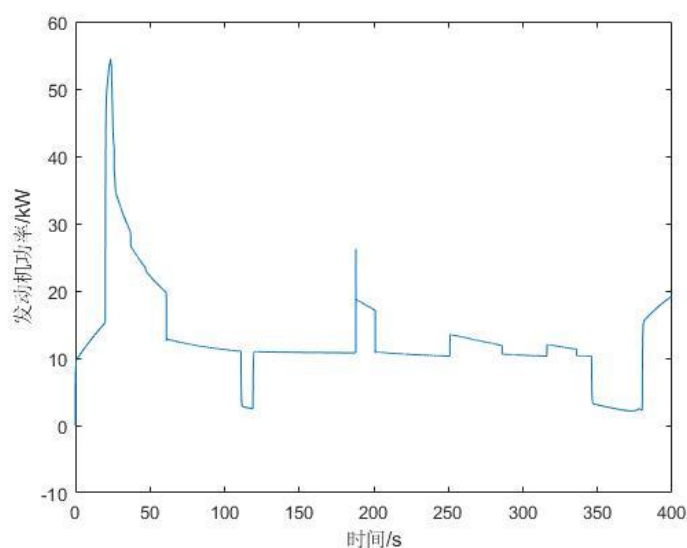


图 4-10 发动机功率变化曲线

混合驱动模式下的车辆，电机转矩为定值，仿真过后 SOC 必定会呈一定的下降趋势。如图 4-8 所示。

不难看出，在混合驱动情况下，发动机、电池组、电机都会工作。这时对于车速变化曲线而言，相对于 NEDC 工况对应的车速会有上升。在 NEDC 前边，NEDC 下车速对应的需求转矩相对较小，此时电机的定值转矩会对车速的变化起到明显的影响，当 NEDC 工况进行到 800s 以后，需求转矩变大，电机的定值转矩对整车车速的影响变小。仿真出来的结果如图 4-9 所示。

本文还对混合驱动时，发动机的功率做了测量，其结果如图 4-10 所示。

#### 4.2.4 行车充电模式仿真分析

行车充电模式下，发动机作为唯一的能量源为整车提供动力以满足车辆行驶的需求，同时，发动机还为电机进行充电。

为了对行车充电模式进行仿真，在了解行车充电时电机和发动机分配的关系之后<sup>[26]</sup>。本文让发动机模式进行 NEDC 工况的仿真，而给电机以定值转矩（转矩小于 0）。此时，发动机受到需求转矩的作用，用相应的功率以满足车辆行驶的需要。仿真之后结果如图 4-11、4-12、4-13 所示。

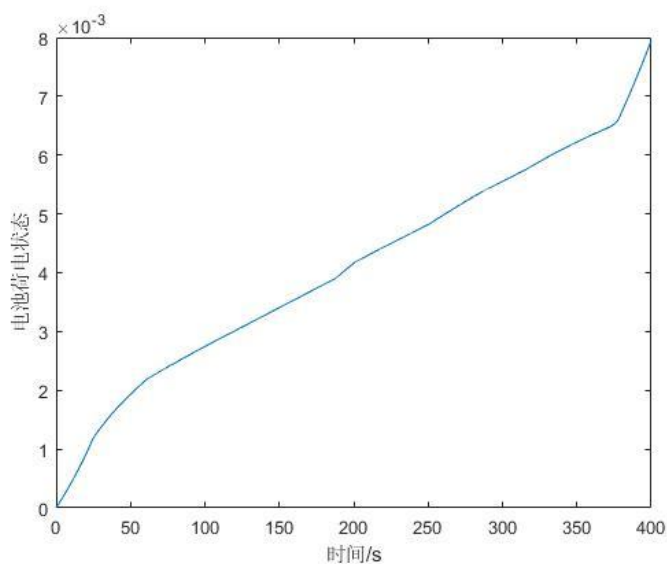


图 4-11 SOC 变化曲线

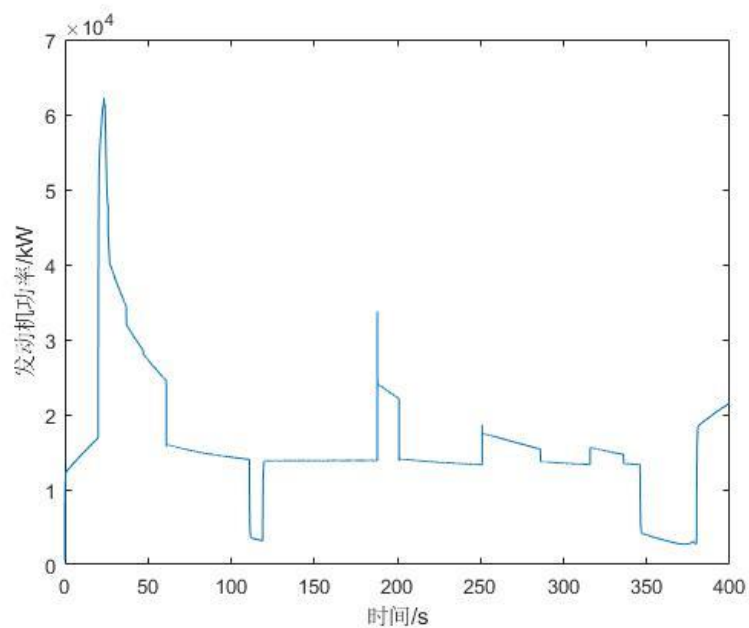


图 4-12 发动机功率变化曲线

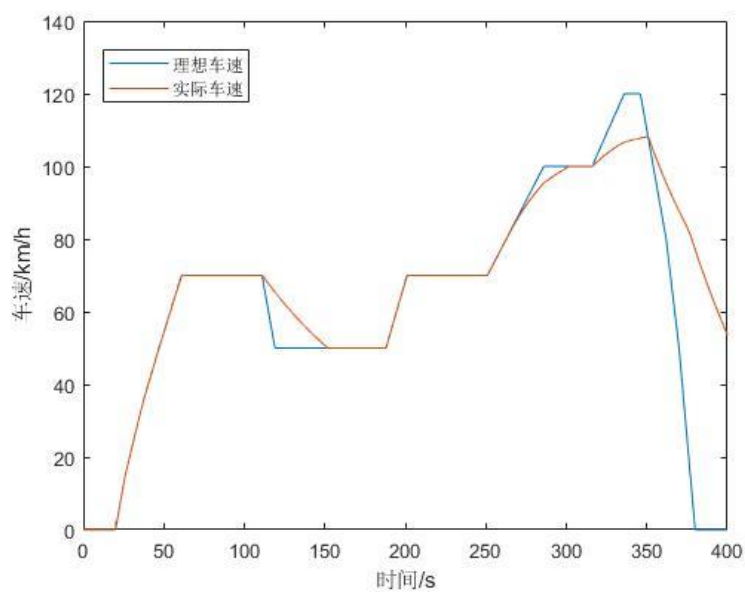


图 4-13 车速变化曲线

在行车充电模式下，电池组接受发电机所传递的电量，对电池进行充电，所以 SOC 变化曲线是呈现上升趋势的。此时发动机承担起唯一动力源的作用，其功率较上述情况都有所增加，如图 4-12、4-13 变化一样，其结果是比较合理的。

### 4.3 本章小结

本章主要对车辆动力学模型进行了仿真，分别给定不同的初始条件，让车辆工作在不

同的行驶工况下。在不同工况下，本章针对发动机功率、燃油消耗率、电池组功率、车速、电池荷电状态进行了测量。在测量之后，发现跟预想的结果相差无几。可以得出，车辆动力学的模型搭建是比较成功的。这为第五章并联式混合动力汽车能量管理策略仿真分析提供了较好的基础。

# 5 并联式混合动力汽车能量管理策略仿真分析

## 5.1 引言

本章在第四章的基础之上加入了第二章制定的能量管理策略，是在一定工况下进行仿真。其主要目的是看能量管理策略能否起到应有的作用，根据汽车的实际情况让汽车在不同的模式运行。

## 5.2 模型搭建

将能量管理策略添加进入整车动力学模型之后，其模型如图 5-1 所示。

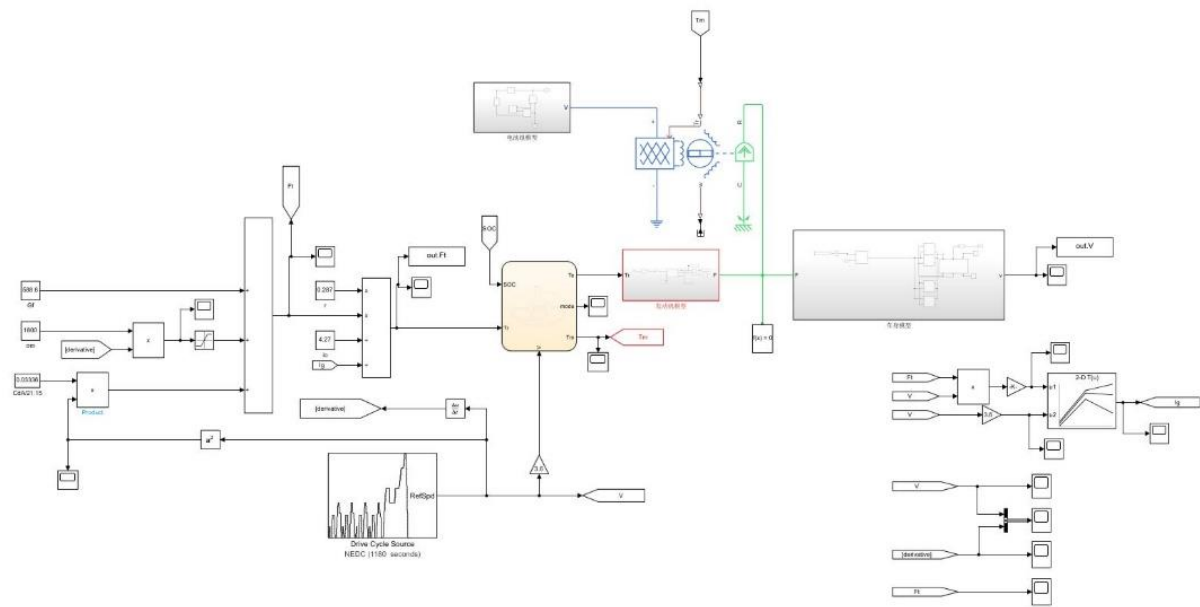


图 5-1 带有能量管理策略的整车动力学模型

加入了能量管理策略的整车动力学模型，其主要改变就算是将电池模型中的 SOC 和在 NEDC 工况下某一时刻的需求转矩  $T_r$  和车速  $V$  的信号作为能量管理策略的输入。为了能够判断能量管理策略起到作用，本文在模型中加入额外的能量管理策略数据输出信号  $mode^{[27]}$ 。这样做一方面可以直观的看出某一时刻的工作模式，另一方面也可以对异常工作模式进行分析，方便找出错误的地方。其主要定义方式如表 5-1 所示。

表 5-1 工作模式

mode 输出值	意义
1	纯电驱动模式
2	发动机驱动模式
3	行车充电模式
4	混合驱动模式

### 5.3 基于 NEDC 工况的能量管理策略仿真

NEDC 工况下，汽车车速分布在 0-120Km/h 之间。其中 30Km/h 的时间段占据了一大部分时间。此时，还可以根据公式（5-1）、（5-2）求出在某车速下汽车行驶所需要的转矩值 [28]。

$$F_t = F_f + F_w + F_i + F_j \quad (5-1)$$

$$T_{tq} = F_t * r / (i_g * i_o) \quad (5-2)$$

以上信息可以根据 simulink 中的模块进行仿真，得到需求转矩  $T_r$  和车速  $V$  的分布曲线如图 5-2、5-3 所示。

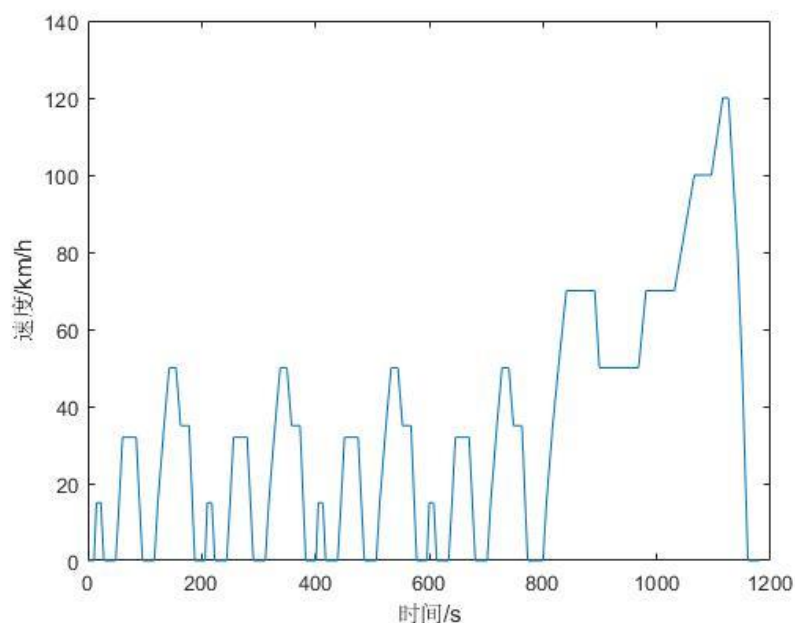


图 5-2 NEDC 车速分布曲线



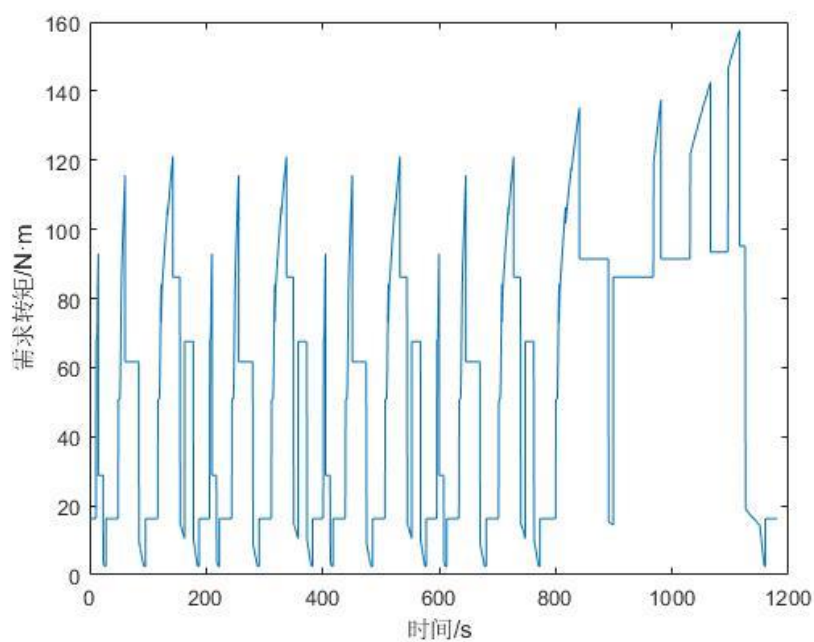


图 5-3 需求转矩分布曲线

根据得到的速度和转矩图像，结合之前在第四章设定的逻辑门限值可以得知：该车因为只执行了一个 NEDC 工况，SOC 一直处于一个较高的状态，所以汽车会多处于纯电驱动、发动机驱动和混合驱动，绝不会存在行车充电的情况<sup>[29]</sup>。

在分析完可能出现的情况之后，对该模型进行仿真，可以得到如图 5-4、5-5 、5-6、5-7、5-8 所示结果。

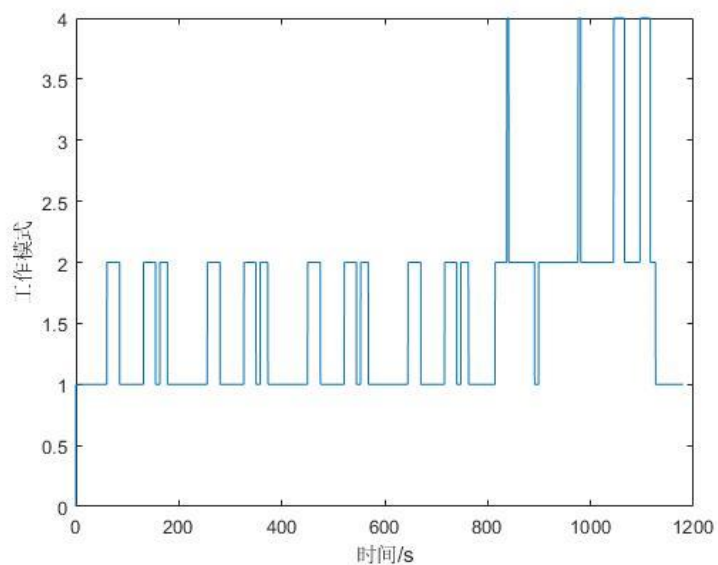


图 5-4 工作模式分布曲线

从图 5-4 中数据可以直观地看出，在 NEDC 仿真工况下，汽车的工作模式一直在纯电驱动、发动机驱动、混合驱动来回变动，且没有出现行车充电模式，是符合仿真之前的预测结果的。

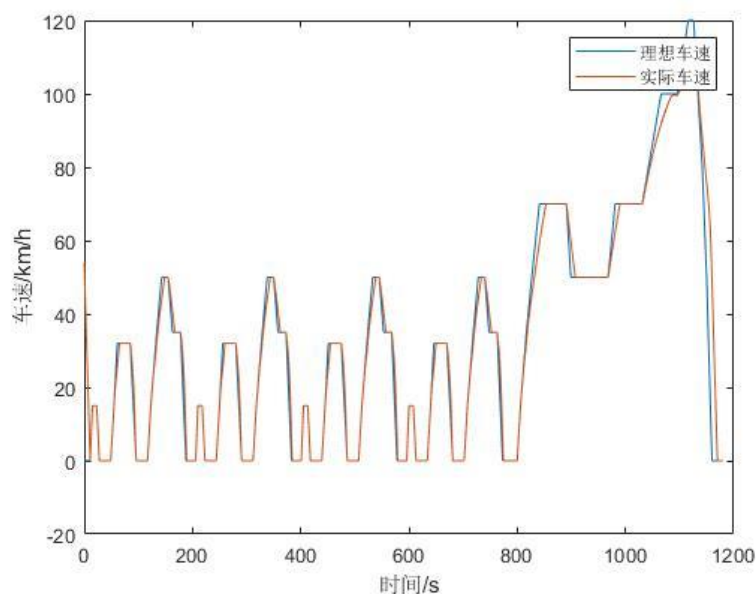


图 5-5 车速变化曲线

从图 5-5 中数据可以直观地看出，本文所搭建的模型，车速具有很高的拟合度。这一方面说明了模型的正确性，另一方面也验证了能量管理策略的正确性。

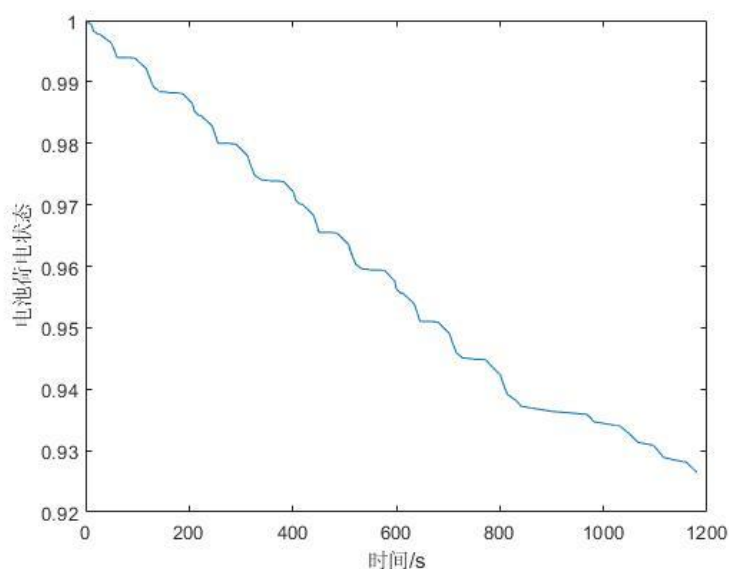


图 5-6 电池 SOC 变化曲线

可以从图 5-6 看出，在 NEDC 工况下，汽车在能量管理策略的作用下，其汽车速度的变化曲线。变化大致是符合实际变化情况的。由于整车动力学模型只在仿真工况下运行

了一次，所以其 SOC 的变化并不明显。而且由于初始值是 1，这也说明了汽车是不会运行在行车充电模式的。

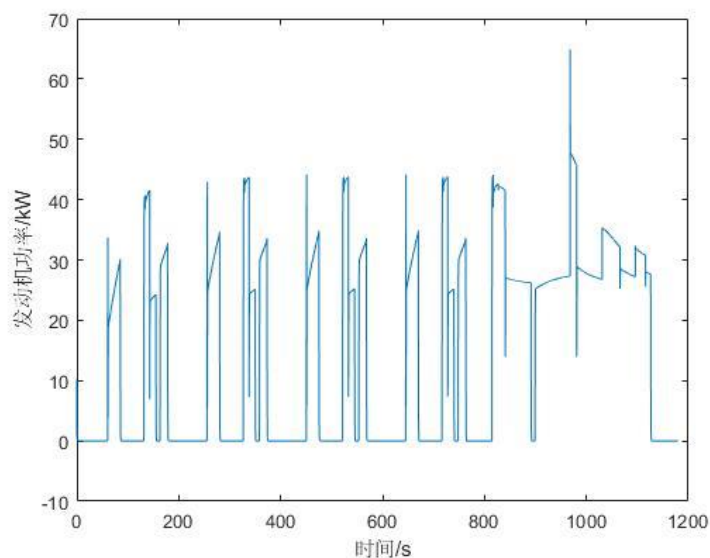


图 5-7 发动机功率变化曲线

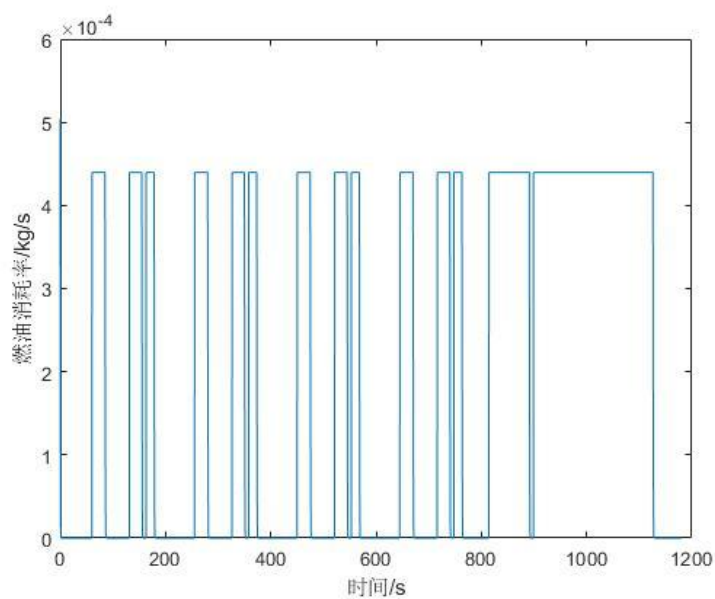


图 5-8 燃油消耗率变化曲线

在能量管理策略的影响下，汽车大多数时候都是运行在纯电驱动模式下的，这就使得运行在发动机工作模式下时，发动机工作在效率较高的区域，且发动机的燃油消耗率也会相比于没有能量管理策略时要小不少。图 5-7、5-8 都印证了这些情况，说明能量管理策略起到了预期的作用。

## 5.4 本章小结

本章主要对加入能量管理策略的整车动力学模型在 NEDC 工况进行了仿真。仿真结构和在仿真之前做出的预测基本一致。说明了本文涉及的能量管理策略是行之有效的。

## 6 总结与展望

本文选择并联式混合动力汽车为研究对象，创建基于逻辑门限规则的能量管理策略。首先对能量管理策略国内外现状做了了解；其次本文搭建了基于逻辑门限的能量管理策略，并利用 Stateflow 作为平台，将能量管理策略进行了模型搭建；再次，本文利用了 MATLAB/Simulink 搭建整车动力学模型，在这个模型之中，包含了发动机模型、电池组模型、车身模型、电机模型；再次，本文利用 ECE、EUDC 工况对搭建的整车动力学模型进行了仿真处理，验证了整车动力学模型可以根据既定条件工作在纯电驱动、发动机驱动、混合驱动、行车充电模式；最后，本文对带有能连管理策略的车辆动力学模型进行了仿真，发现，基于逻辑门限规则的能量管理策略能够根据不同的形式条件工作在不同的模式之下。

对于本文所研究的基于逻辑门限规则的能量管理策略的研究，还是有一定的不足之处。首先就是没有考虑行车制动时的能量回收问题，这一点使得本文所搭建的模型所仿真而得车速曲线并没有达到预期的效果，会有一部分的误差。这一点是克服的。其次，本文对于 PID<sup>[30]</sup>控制的使用比较基础，也导致本文模型的车速跟随曲线并没有达到预期的效果，也是一个需要改进的地方。再者就是，关于基于规则的能量管理策略的研究在许多学者眼中都是有更加严谨的研究方法，可以导入更加多的影响因素、更详尽的管理策略。

## 参考文献

- [1]邓富昌. 并联混合动力汽车能量管理策略研究[D]. 重庆理工大学, 2021.
- [2]ChrisMi, M.AbulMasrur, DavidWenzhongGao,等. 混合动力电动汽车原理及应用前景[M]. 机械工业出版社, 2014.
- [3]欧阳明高. 中国新能源汽车的研发及展望[J]. 科技导报, 2016, 34(6):8.
- [4]朱翔. 基于动态规划的并联混合动力汽车能量管理策略研究[D]. 合肥工业大学, 2017.
- [5]张毅. 并联混合动力汽车能量控制策略仿真研究[D]. 重庆大学, 2014.
- [6]吴剑. 并联式混合动力汽车能量管理策略优化研究[D]. 山东大学, 2008.
- [7]孙远涛, 张金柱, 王云龙, 范德会, 朱荣福. 丰田普锐斯典型工况测试及控制策略分析[J]. 交通科技与经济, 2014,16(05):114-118.
- [8] Hajimiri M H , Salmasi F R . A Fuzzy Energy Management Strategy for Series Hybrid Electric Vehicle with Predictive Control and Durability Extension of the Battery[C]// Electric and Hybrid Vehicles, 2006. ICEHV '06. IEEE Conference on. IEEE, 2007.
- [9]吴剑, 张承慧, 崔纳新. 基于粒子群优化的并联式混合动力汽车模糊能量管理策略研究[J]. 控制与决策, 2008(01):46-50.
- [10]肖仁鑫, 李涛, 邹敢, 等. 基于随机动态规划的混联式混合动力汽车能量管理策略[J]. 汽车工程, 2013, 35(4):317-321.
- [11]王伟达, 项昌乐, 韩立金, 刘辉, 刘晓亭. 基于电池 SOC 保持的混联式混合动力车辆能量管理策略的研究[J]. 汽车工程, 2011,33(05):373-377.
- [12] 余捷, 黄键. 3 种类型混合动力汽车控制策略的分析[J]. 福建工程学院学报, 2008,6(S1):96-101.
- [13] 万鹤高. 并联混合动力系统能量管理策略研究[D]. 河北工程大学, 2021.DOI:10.27104/d.cnki.ghbjy.2021.000555.
- [14] 孙远涛, 张金柱, 王云龙, 范德会, 朱荣福. 丰田普锐斯典型工况测试及控制策略分析[J]. 交通科技与经济, 2014,16(05):114-118.
- [15] 史成君. 基于 DM-i 技术的 EHS 电混系统研究[J]. 时代汽车, 2022(08):124-125.
- [16] Bakht Muhammad Paend, Salam Zainal, Bhatti Abdul Rauf, Anjum Waqas, Khalid Saifulnizam

A.,Khan Nuzhat. Stateflow-Based Energy Management Strategy for Hybrid Energy System to Mitigate Load Shedding[J]. Applied Sciences,2021,11(10).

[17] 吴杨. 混联式混合动力汽车模糊逻辑能量管理与传动比优化研究[D]. 河北工程大学, 2016.

[18] 邹渊, 孙逢春, 王军, 何洪文. 电动汽车用仿真软件技术发展研究[J]. 机械科学与技术, 2004(07):761-764.

[19] 罗勇, 陈国芳, 韦永恒, 邓云霄, 任淋, 徐利吉. P2 构型 PHEV 的规则型能量管理策略[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022,36(03):28-35.

[20] 宫唤春. 插电式混合动力汽车控制策略与建模[J]. 机械设计与制造, 2021(03):106-109+113.DOI:10.19356/j.cnki.1001-3997.2021.03.023.

[21] 陈致西, 周金应, 龙军, 张明德, 高越. 基于负荷跟随阈值变化规则的并联混合动力汽车能量管理策略[J]. 河南科技, 2021,40(15):77-81.

[22] 孔泽慧, 熊继芬. 基于动态规划的混合动力汽车能量管理策略研究[J]. 时代汽车, 2021(17):14-15.

[23] Demuynck J, D B ost ee ls, MD Paepe, et al. Recommendations for the new WLTP cycle based on an analysis of vehicle emission measurements on NEDC and CADC[J]. Energy Policy, 2012, 49(OCT.):234-242.

[24] 李耀华, 刘鹏, 杨炜, 刘晶郁. 西安市纯电动城市客车行驶工况研究[J]. 中国科技论文, 2016, 11(7):6.

[25] 资新运, 杜常清, 张增建, et al. 用于混合动力控制的汽油机动态转矩建模仿真[J]. 公路交通科技, 2008, 25(10):146-149.

[26] 巴特, 高印寒, 王庆年, 等. 并联混合动力客车行车充电控制规则的研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(7):8.

[27] 郑竹安, 蒋伟康, 吕红明, 等. 混合动力电动汽车动力学模型仿真[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2019(3):8.

[28] 万海桐. 纯电动汽车整车驱动控制策略研究[D]. 北京理工大学.

[29] Kristien C, Edwin H, D Johan. The Impact of Uncontrolled and Controlled Charging of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on the Distribution Grid. 2008.

[30] Xue-Bin W U , Zhang X , Chen H W , et al. Torque Tracking PID Control for HEV Automatic Diaphragm Spring Clutch[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017.



## 致谢

时间如白驹过隙，从我第一次选定这个毕业设计到现在差不多完成已经足足过了 5 个月有余。我从没想到让自己从一个半门外汉到一个比较精通能量管理的同学竟然要花费这么长时间。科研之路，路漫漫其修远矣，我一定会再接再厉，在研究生阶段继续提升自己，希望能在自己的研究方向做出一番成果。

在我为期 5 个月，安安心心做科研的路上，我是十分感谢我的指导老师李明老师的谆谆教诲。可以说，我这期间的每一次进步，每一次小有所成都是在李老师的指导下完成的。桃李不言，下自成蹊，李老师给了我很多动力，也将会是以后我科研路上的榜样，衷心地感谢李老师。

之前一直觉得自己可能写不完毕业论文了，就老是想在致谢部分大展拳脚。可恍惚至此，便再无满腹言语诉诸而出，确实是一大怪事。真的不知道在这个地方想要写一些什么或者怎么样来对帮助过自己的人和我爱的人进行致谢。

思来想去，很难接受四年弹指一挥间的事实，感觉自己真的变化了很多。从一个有些许自卑的农村高中生到一个自强日新的新时代大学生；从一个写学科论文都要东抄西抄地科研小白到现在已经可以独立完成科研任务的学生。纸短情长，思绪万千，可偏偏每念于此又言尽于此。希望和我一起奋战 4 年的朋友、同学都能成就一番事业，一起努力创造属于我们自己的大写的青春。