

新能源汽车关键技术研发系列

商用车

混合动力系统关键技术

曾小华 杨南南 王庆年 宋大风 著

机械工业出版社

本书以市场应用最广泛的行星混合动力车为突破口,围绕国内自主开发行星混动商用车的几个主要关键问题:商用车的工况及合成技术、行星式混合动力商用车参数设计方法、混合动力系统能耗分析方法、能量管理优化策略技术、高品质动态协调控制策略,针对物流车行星混合动力系统的设计、节能潜力与整车台架测试技术开展实际工程应用研究。新能源汽车整车开发主要技术难点是混合动力系统,特别是多动力源行星耦合的复杂混动系统,这是整个新能源汽车的重要关键一环。本书从商用车的特定性能需要出发,以整车关键性能以及设计、控制相互关联的技术角度逐步切入,由简而深对该领域进行系统论述。对新能源汽车其他类型车辆开发同样具有指导意义。

图书在版编目(CIP)数据

商用车混合动力系统关键技术 / 曾小华等著. —北京:机械工业出版社, 2019. 6

(新能源汽车关键技术研发系列)

ISBN 978-7-111-62838-5

I. ①商… II. ①曾… III. ①混合动力汽车—动力系统 IV. ①U469.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 101196 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:何士娟 责任编辑:何士娟

责任校对:张薇 封面设计:张静

责任印制:张博

北京铭成印刷有限公司印刷

2019 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·15.75 印张·2 插页·305 千字

0 001—1 900 册

标准书号:ISBN 978-7-111-62838-5

定价:79.90 元

电话服务

客服电话:010-88361066

010-88379833

010-68326294

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

封底无防伪标均为盗版

机工教育服务网:www.cmpedu.com



作者简介

曾小华 教授 / 博士生导师

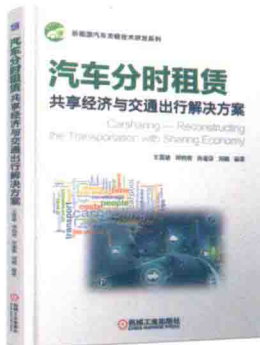
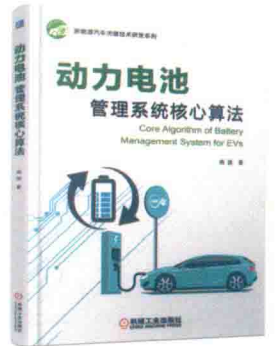
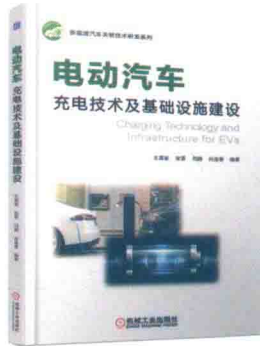
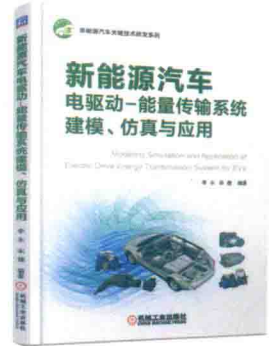
研究领域：电动混合动力/燃料电池汽车关键技术，故障诊断与容错，液压轮毂驱动，汽车电控技术。

社会兼职：20余家国内权威期刊和国际期刊的论文评审专家；国家自然科学基金委员会项目评审专家。

学术成就：在国内权威期刊《汽车工程》等和国际期刊源发表学术论文70余篇，其中EI检索50余篇，SCI检索20余篇；出版专著6部；获国家发明专利授权50余项；主持承担国家级“863”项目、国家自然科学基金项目、省部级项目和国内主流企业项目等50余项。



Key Technologies of Hybrid System for
Commercial Vehicles



Key Technologies of Hybrid System for
 Commercial Vehicles

丛书序



在新能源汽车成为战略新兴产业之一等国家战略的背景下，以纯电动汽车和燃料电池汽车、插电式混合动力汽车为代表的新能源汽车，作为能源网络中用能、储能和回馈能源的终端，成为我国乃至经济新体系中的重要组成部分。我国经过4个五年计划的科技攻关，基本掌握了新能源汽车的整车技术和关键零部件技术，实现了跨越式发展，并逐步实现了产业化。

但是，在世界这个完全开放的市场中，中国新能源汽车核心关键技术尚未彻底突破，技术竞争压力越来越大，加快新能源汽车持续创新，推进中国汽车产业技术转型升级，是中国科技发展的重大战略需求。尽管我们头顶着全球最大新能源汽车市场的光环，但中国的新能源汽车产业正遭遇成长的烦恼：

1. 与国际先进水平和市场需求相比，中国的新能源汽车技术水平及产品性能需要进一步提高。
2. 推广应用区域的市场发展尚不平衡，高寒地区推广应用新能源汽车存在环境适应性等技术问题。
3. 充电基础设施发展相对滞后，已建成充电桩的总体使用率较低。
4. 推广政策尚需完善。

本套丛书将聚焦于新能源汽车整车、零部件关键技术，以及与新能源汽车配套的科技体系和产业链，邀请行业内各领域一直从事研究和试验工作的产品第一线技术人员编写，内容系统、科学，极具实用性，希望能够为我国新能源汽车的持续发展提供技术支撑和智力支持。

前 言



在能源和环境危机的双重压力下，汽车行业逐渐从传统燃油车向节能与新能源汽车转型，“电动化”已经成为汽车行业公认的未来趋势。然而，电池在成本、性能及安全性等方面的短板，极大限制了纯电动汽车的发展，混合动力汽车仍将在中长期内占据节能及新能源汽车市场的主要份额。在各类混合动力技术方案中，行星式混合动力系统可实现电动无级变速，具备自动变速器功能，且能实现较优的动力性和突出的燃油经济性。国际上，行星式混合动力系统已经在乘用车领域取得巨大成功，截至 2017 年 1 月底，丰田行星式混合动力汽车的全球累计销量已突破 1000 万辆。

相比于乘用车，商用车载重大，行驶里程长，其节能减排的意义更加重大。以城市客车为例，我国 2018 年“新能源汽车重点专项”明确提出，到 2020 年实现“整车混合动力模式下油耗 $\leq 16\text{L}/100\text{km}$ ”的目标。我国已经成为全球第一大商用车制造国，且自主品牌在中国商用车市场占据了统治地位，比例达到 90% 以上，具备很高的国际竞争力。商用车不仅是我国汽车行业自主创新的“主战场”，也是“中国制造”的重要发展领域，迫切需要高效节能混合动力系统的产业化应用。因此，借鉴行星混联混合动力系统在乘用车领域的成功应用，在汽车“电动化”的大趋势下，将行星混联混合动力系统成功应用到商用车，不仅可以突破我国商用车自动变速器的软肋，还可显著提高整车的燃油经济性，是我国新能源汽车关键技术的重要突破口和节能减排的重要途径，也已经成为我国商用车行业发展的共性需求。同时，我国商用车领域良好的自主研发氛围也为行星式混合动力系统的应用提供了重要技术基础。

在此背景下，作者通过长期研究以及与企业的深度合作，实现了行星式混合动力系统在城市公交客车上的成功应用，同时也在积极探索该系统应用于公路客车、重型卡车以及物流车等车型的可行性。不同于国外在乘用车上的应用和相关研究，发展行星式混合动力商用车应该充分探讨商用车的运行工况和能量消耗特性，寻找与之相适应的系统参数设计和控制策略开发方法。基于此，本书以成功产业化应用的行星式混合动力客车为主体，首先开展商用车的工况特性和能耗特性研究，在此基础上，结合系统的动力性、燃油经济性以及平顺性要求，介绍行

星式混合动力商用车系统的参数设计方法、整车节能控制策略开发方法和动态高品质控制方法。此外，本书也将详细介绍作者在行星式混合动力物流车方面取得的最新研究进展，以加深读者对行星式混合动力商用车关键技术的理解。

本书是作者结合国家自然科学基金项目、大量企业横向课题以及国内外技术积累撰写而成，力求做到文字准确严谨，配图清晰正确，内容丰富翔实，以方便读者阅读和学习。每一章节都包含作者的科研成果和企业横向课题的实例，且对所有实例都进行了深入阐述和详细说明。本书可供汽车相关专业的研究生以及从事节能与新能源汽车工作的研究人员使用，旨在为读者提供一本专门介绍行星混合动力商用车完备开发流程的专业书籍，为我国行星式混合动力商用车的自主开发提供重要理论借鉴与实际参考。

我们相信，具有一定混合动力系统设计方面基础的读者，通过学习本书的研究内容与方法，基本可以掌握行星式混合动力商用车的开发过程及关键技术，从而为自身的科研进程和实际工作提供帮助，这是我们最希望看到的。

本书由吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室课题组组织，由曾小华、杨南南、王庆年、宋大风著写。另外，本书由李广含、王振伟、崔臣、王越、刘通、肖尊元、崔皓勇、李宏程、孙楚琪、王星琦校核，长春大隆电动汽车技术研究所高级工程师宫维钧审阅，在此对他们表示衷心的感谢。

由于本书涉及的研究内容广泛，作者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免。欢迎使用本书的广大读者批评指正。Email: zeng.xiaohua@126.com。

作者

目 录



丛书序

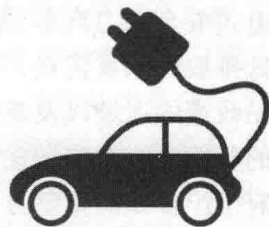
前言

第1章 绪论	1
1.1 行业发展背景	1
1.2 典型商用车混合动力系统	2
1.2.1 构型分类	2
1.2.2 行星式混合动力系统国内外产品现状	4
1.2.3 行星混联系统关键技术	10
1.3 本章小结	14
第2章 商用车行驶工况分析	16
2.1 法规工况分析	16
2.1.1 中国城市客车工况	16
2.1.2 C-WTVC	17
2.2 实车典型工况构造	19
2.2.1 工况数据处理方法	19
2.2.2 统计学评价指标选取	23
2.2.3 原始工况数据特征分析	27
2.2.4 基于马尔可夫的工况合成	30
2.2.5 工况构造结果	35
2.3 本章小结	37
第3章 商用车行星式混合动力系统参数设计方法	38
3.1 行星混联系统动力学分析	38
3.2 参数匹配方法	39
3.2.1 基本控制策略选择	40
3.2.2 基于稳态工况的发动机选型	41
3.2.3 基于效率特性的特征参数确定	41
3.2.4 基于功率分流特性匹配其他部件	43

3.3	基于城市客车的参数设计	45
3.3.1	城市客车基本参数	45
3.3.2	核心控制思想的确定	46
3.3.3	发动机选型	46
3.3.4	基于工况的各部件参数匹配	47
3.3.5	参数匹配总结	53
3.3.6	仿真验证	54
3.4	基于公路客车的行星混动构型与其他构型参数设计	58
3.4.1	公路客车基本参数	58
3.4.2	公路客车 XCVT 构型参数匹配	58
3.4.3	公路客车 C-XCVT 构型参数匹配	68
3.4.4	公路客车 P2 并联构型参数匹配	73
3.4.5	仿真验证	78
3.5	基于重型卡车的参数设计	85
3.5.1	需求及特征分析	86
3.5.2	构型优选	86
3.5.3	匹配计算	87
3.5.4	仿真验证	96
3.6	本章小结	102
第4章	商用车混合动力系统能耗分析方法	104
4.1	基于能量计算的理论油耗模型	104
4.1.1	混合动力系统内部能量流分析	105
4.1.2	平均综合传动效率定义	106
4.1.3	混合动力系统理论油耗计算模型	108
4.2	基于理论油耗模型的节油贡献分析	108
4.2.1	理论综合油耗增量计算模型	109
4.2.2	节油量与节油贡献率定义	109
4.3	不同构型理论油耗模型验证	110
4.3.1	目标构型与整车基本参数	110
4.3.2	基本控制策略——带约束 DP 优化算法	112
4.3.3	理论油耗模型验证	114
4.4	各因素节油贡献率讨论	115
4.4.1	再生制动能量回收节油贡献率	115
4.4.2	发动机平均燃油消耗率节油贡献率	118
4.4.3	平均综合传动效率节油贡献率	120

4.5	本章小结	124
第5章	商用车行星式混合动力系统能量管理优化策略	125
5.1	发动机最优控制策略	125
5.1.1	控制策略顶层模块	126
5.1.2	主控制模块	127
5.2	瞬时最优控制策略	134
5.2.1	系统效率特性分析	134
5.2.2	瞬时最优工作点求解	139
5.2.3	瞬时最优策略验证及分析	141
5.3	全局优化控制	146
5.3.1	优化边界求解	149
5.3.2	全局优化结果	150
5.4	基于规则提取的在线控制方法	153
5.4.1	优化控制规则研究	154
5.4.2	基于二次型调节器的电量修正策略	162
5.4.3	LP-IOC 策略验证	165
5.5	智能优化能量管理策略	173
5.5.1	车联网技术的发展与应用	173
5.5.2	融合智能网联信息的行驶环境预测	175
5.5.3	基于智能优化算法的能量管理策略	177
5.6	本章小结	178
第6章	动态协调控制策略	179
6.1	整车动力学分析	179
6.2	传统 PID 控制器介绍	182
6.3	基于 MPC 的发动机起动阶段控制	185
6.3.1	电机 MG1 转矩协调控制	185
6.3.2	电机 MG2 主动补偿控制	189
6.3.3	仿真验证	190
6.4	基于 EKF 和 MPC 的稳态阶段控制	193
6.4.1	基于 EKF 的发动机响应特性辨识	193
6.4.2	基于 MPC 的稳态阶段控制	195
6.4.3	仿真验证	197
6.5	本章小结	199
第7章	行星式混合动力物流车	201
7.1	物流车行星混动系统方案设计	201

7.1.1	整车参数与动力性指标	202
7.1.2	行星排特征参数选取	203
7.1.3	主减速比选取	205
7.1.4	超级电容匹配	211
7.1.5	参数匹配总结	213
7.2	物流车整车控制策略	214
7.2.1	附件控制策略	214
7.2.2	动态协调控制策略	219
7.3	行星式物流车台架试验	230
7.3.1	行星混联系统台架试验基本介绍	230
7.3.2	行星混联系统台架试验方案	232
7.3.3	台架试验及结果分析	232
7.4	本章小结	237
参考文献		239



1.1 行业发展背景

为应对日益突出的燃油供求矛盾和环境污染问题，世界主要汽车生产国纷纷加快部署，将发展新能源汽车作为国家战略。图 1-1 为《中国制造 2025》节能与新能源汽车技术路线图，可以看到，无论是乘用车还是商用车，其油耗与排放标准日益严苛。因此，加快推进技术研发和产业化，大力发展和推广应用汽车节能技术既是有效缓解能源和环境压力、推动汽车产业可持续发展的紧迫任务，也是加快汽车产业转型升级、培育新的增长点和国际竞争优势的战略举措。

	2020年	2025年	2030年
乘用车目标	乘用车新车整体油耗降低至5L/100km	乘用车新车整体油耗降低至4L/100km	乘用车新车整体油耗降低至3.2L/100km
	乘用车国V排放标准	乘用车国VI排放标准	测试循环调整，乘用车国VII排放标准
商用车目标	商用车新车油耗接近国际领先水平	商用车新车油耗达到国际领先水平	商用车新车油耗国际领先水平
	在城市公交上实现批量应用	在城市公交、长途客车、物流车上实现大规模应用	

图 1-1 《中国制造 2025》节能与新能源汽车技术路线图

按照我国汽车行业的定义，新能源汽车可以分为三类：纯电动汽车、插电式混合动力汽车以及燃料电池电动汽车，纯混合动力汽车属于节能汽车。受现有电池技术的限制，纯电动汽车目前难以满足大功率、远距离运输的需求，其市场化推广进程还需要一定的时间；燃料电池电动汽车存在反应起动速度慢、催化剂效能较低和燃料储存安全性等技术难点，目前还处于开发阶段（未能大批推广）；介于纯电动汽车与传统燃油汽车之间的混合动力汽车（包含纯混合动力汽车和插

电式混合动力汽车)结合了传统燃油汽车高比能量、高比功率和纯电动汽车节能、低排放的双重优点,在当前环境与能源问题背景下具有很大优势。此外,随着补贴政策退坡以及新补贴政策对续航里程、电池密度的更高要求,以纯电动为主的新能源汽车市场在一定程度上受到很大冲击。相比之下,混合动力汽车作为政府推广普及的重要方向,由于对电池等技术的依赖相对较小,受补贴政策的影响甚微,更容易实现产业化和为消费者所接受。

相比于乘用车,商用车由于自重大、油耗高、行驶时间和距离长,具有更迫切的节能减排需求,其混合动力化是汽车行业发展的机遇和必然要求。近年来,随着商用车节能指标的日益严格,节能潜力的挖掘难度也逐渐增加。根据科技部最新发布的《“新能源汽车”重点专项 2018 年度项目申报指南》,针对 12m 公交客车,以混合动力模式在中国典型城市工况下的整车油耗要达到 16L/100km 以下,该指标对商用车的开发增加了难度与挑战。因此,进行混合动力商用车开发过程的关键技术研究,对混合动力商用车的产业化应用具有重要意义。

1.2 典型商用车混合动力系统

混合动力汽车具有不同的分类方法,按照电机功率占运行总功率的比例,可以分为弱混、中混和重混;按照动力系统结构与布置分类,则可以分为串联式、并联式和混联式混合动力汽车。本节首先对混合动力系统构型进行分类,确定最具综合性能优势的混合动力系统。

1.2.1 构型分类

按照整车动力系统结构的不同,混合动力系统可以分为串联、并联和混联三类构型,其中,混联构型又可分为开关混联构型和行星混联构型。

1. 串联构型

串联式混合动力电动汽车是由发动机、发电机、蓄电池组、电机、机械传动装置等组成,基本构型如图 1-2 所示。发动机-发电机组与蓄电池组为供能装置,电机作为唯一的动力输出装置,提供车辆动能。

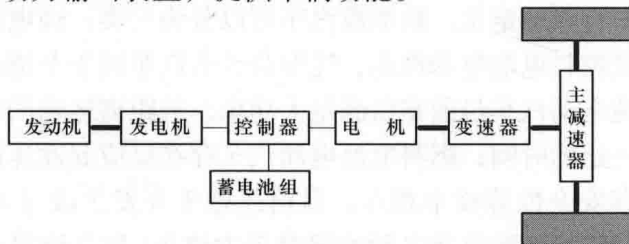


图 1-2 串联基本构型

串联式构型的发动机与汽车驱动轮之间无机械连接，具有独立于汽车行驶工况对发动机进行控制的优点，可以使发动机稳定于高效区或低排放区附近工作。但由于系统中存在二次能量转换，系统综合效率较低，另外，三大动力总成（发动机、发电机、电机）设备规模比较庞大，布置难度和成本增加。在多停车-起步的市区行驶工况以及车辆低速行驶时，串联式混合动力系统的优点得以体现，但由于能量的二次转化伴随大量损耗，系统综合效率不高，节油能力有限。

2. 并联构型

并联式混合动力系统中，发动机与电动机同时与驱动轮机械连接，行驶时发动机和电动机可以单独或共同向整车提供动力，其基本构型如图 1-3 所示。

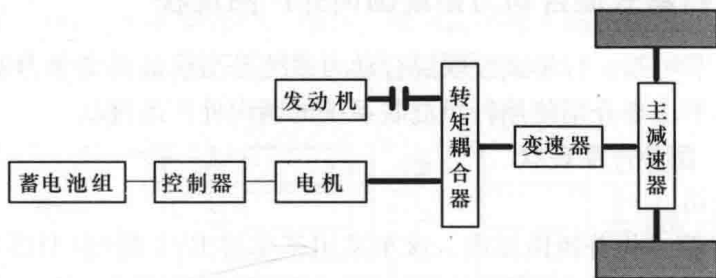


图 1-3 并联基本构型

并联构型中发动机通过机械传动机构直接驱动汽车，其能量利用率相对较高；电动机同时作为发电机使用，因此系统仅有发动机和电动机两个动力总成，相比于串联构型，整车质量和成本大大减少。但由于发动机与车辆驱动轮间有直接的机械连接，发动机工作区不可避免地要受到汽车具体行驶工况的影响，因此，要维持发动机在最佳区域内工作，则需要复杂的控制系统和控制策略。

3. 混联构型

混联式混合动力系统基本构型如图 1-4 所示，具体可以分为开关混联和行星混联两种类型。

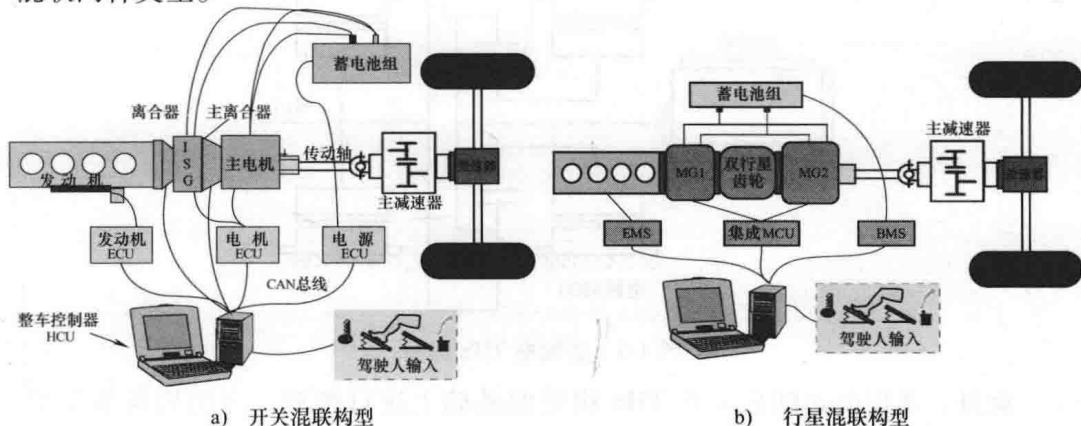


图 1-4 混联基本构型

开关混联构型无变速器，结构简单。主离合器结合时，发动机与系统输出轴直连，具有更好的传动效率。但其缺点也十分明显，发动机输出转矩没有变速器的调节，系统动力性较差，从而缩小了该构型的适用范围。

行星混联构型通过对两台电机的调节作用实现发动机到车轮的电动无级变速(EVT)，相比于同样没有传统变速器的开关混联构型，该构型能够显著提升系统动力性。此外，行星混联构型能够在约束范围内实现发动机转速、转矩与路载的解耦，从而易于实现发动机的最优控制，能够获得良好的燃油经济性，具有突出的竞争力。当前销量最好的混合动力汽车——丰田普锐斯(Prius)便是行星式混联系统。

1.2.2 行星式混合动力系统国内外产品现状

由 1.2.1 节可知，行星式混联混合动力系统是当前最具竞争力的混合动力系统，因此，本节主要介绍使用行星混联系统的国内外产品现状。

1.2.2.1 国外产品现状

• 丰田公司

1997 年，第一代普锐斯面市，该车采用了单排 EVT 构型(THS 构型)，可通过发电机调速实现无级变速功能，是世界上首款行星混联式混合动力汽车，其基本构型如图 1-5 所示。2003 年，第二代普锐斯问世。2009 年，第三代普锐斯上市。这两代相对于第一代普锐斯在 EVT 构型方面并未发生改变。2016 年，基于丰田最新开发的 TNGA 平台打造的第四代普锐斯上市，该车的混合动力系统由一个 1.8L 发动机和主电机及发电机构成，其中发动机的热效率高达 40%，机械结构的简化也使得系统效率进一步提高。相较于之前的版本，2016 款普锐斯最高可节省燃油 20% 左右，百公里综合油耗达到 2.5L。

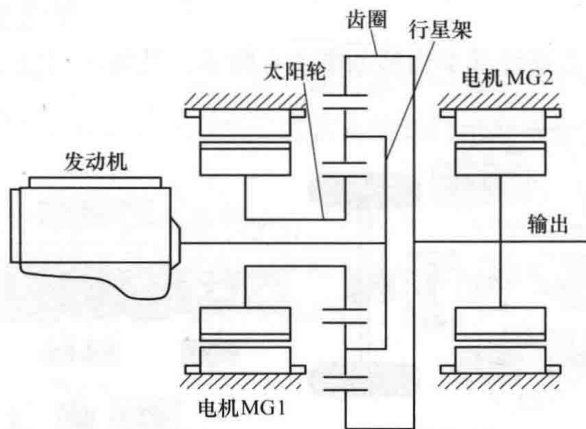


图 1-5 普锐斯 THS 构型

此外，丰田公司随后又在 THS 构型的基础上进行拓展，应用到高端车型，主要包括两种构型：

- 1) THS+拉维纳式构型，主要应用到 Lexus GS450h、Lexus LS600h 等车型。
- 2) THS+4AT 构型，应用到 Lexus LC500h 车型。

• 通用公司

通用公司推出的 AHS(Allison Hybrid System) 系列行星混联构型相比于丰田公司的 THS 构型更为复杂，多数集中于对双排和多排的研究。

2003 年，AHS 的一款三排双模构型(AHS3PG)被广泛应用到多家客车厂商，如英国 Optare 公司的 Tempo 车型、波兰 Solaris 公司的 Urbino 18 Hybrid 车型以及荷兰 APTS 公司的 Phileas 车型等，其基本结构如图 1-6 所示。在此基础上，为满足全尺寸 SUV 的要求，通用公司在 AHS3PG 的基础上增加了四个固定速比，该构型应用到 Yukon SUV、Tahoe SUV 等车型。随后，通用公司将上述构型进行改进，推出了能够应用于前驱 SUV 的“2MT70”构型，先应用到 Saturn Vue Green Line 构型。

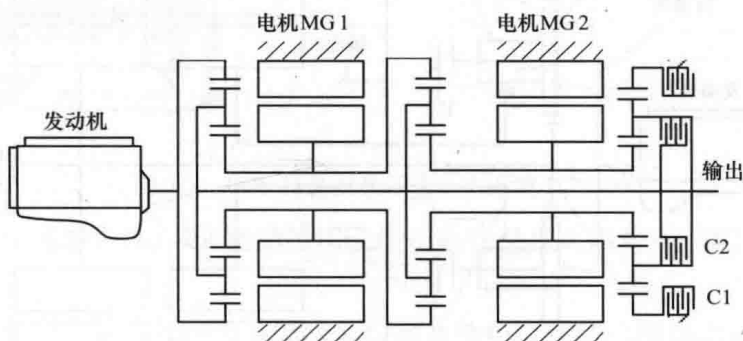


图 1-6 AHS3PG 系统构型

近年来，随着通用行星混动技术的进一步发展，开发出一种新的行星混联混合动力系统，其结构原理如图 1-7 所示，主要应用在 2016 款沃蓝达、君越 30H 以及 Velite 5 车型上。

图 1-7 VOLTEC 系统结构