



国际电气工程先进技术译丛

# 混合动力汽车 驱动系统 (原书第2版)

**Propulsion Systems for Hybrid Vehicles,  
2nd Edition**

[美]约翰 M. 米勒 (John M. Miller) 著

刘玉梅 赵聪聪 徐振 等译



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术丛书

# 混合动力汽车驱动系统 (原书第2版)

Propulsion Systems for Hybrid Vehicles, 2nd Edition

[美] 约翰 M. 米勒 (John M. Miller) 著

刘玉梅 赵聪聪 徐 振  
徐 凤 卢政旭 刘祖光 译  
乔宁国 杨思航 熊明烨



机械工业出版社

Original English Language Edition published by The IET.

Copyright © 2011, All Rights Reserved.

This title is published in China by China Machine Press with license from the IET. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 the IET 授权机械工业出版社在中国境内地区（不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区）出版与发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2013-3566 号。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

混合动力汽车驱动系统：第 2 版/（美）米勒（Miller, J.M.）

著；刘玉梅等译. —北京：机械工业出版社，2016.1

（国际电气工程先进技术译丛）

书名原文：Propulsion Systems for Hybrid Vehicles, 2nd Edition

ISBN 978 - 7 - 111 - 53019 - 0

I .①混… II .①米…②刘… III .①混合动力汽车 - 驱动机构 IV .①U469.703

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 035170 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：付承桂 责任编辑：郑 彤

版式设计：霍永明 责任校对：刘怡丹

封面设计：马精明 责任印制：常天培

北京京丰印刷厂印刷

2016 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 30.5 印张 · 681 千字

0 001—2 500 册

标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 53019 - 0

定价：150.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010 - 88361066 机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010 - 68326294 机工官博：weibo.com/cmp1952

010 - 88379203 金书网：www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网：www.cmpedu.com

本书重点论述了与点燃式发动机相结合的混合动力驱动系统的原理与技术,内容包括混合动力汽车的相关理论与基础知识、常见混合动力汽车的结构与原理分析、混合动力系统的技术指标与性能分析、混合动力驱动系统的参数设计、电力驱动系统技术与选配、交流驱动电力电子器件的结构与设计、混合动力驱动系统的控制方法与技术、混合动力驱动系统的效率分析与计算、混合动力汽车的使用特性及工况分析、混合动力汽车的储能技术、混合动力汽车的试验与验证方法以及自动电气化运输系统等内容。

本书从整车、动力驱动系统到零部件对混合动力汽车的使用性能、结构特点、设计方法、试验与验证等进行了详实的论述,并通过大量的实例和习题扩充和巩固了各章节讲述的内容,反映了当今混合动力汽车的最新技术和设计方法。

本书主要面向工业、商业、学术机构和政府部门的实践工程师,也可以作为汽车以及交通运输相关专业本、专科学生和研究生的补充教材。

# 译者的话

《混合动力汽车驱动系统》是由 IEEE 院士、麦斯威尔技术部系统开发和软件应用的副总裁、J-N-J Miller 设计服务有限公司的创始人和首席工程师 Dr John M. Miller 撰写的，该专著 2004 年出版发行了第 1 版，2009 年修订出版第 2 版，本书是第 2 版的翻译稿。

本书重点论述了与点燃式发动机相结合的混合动力驱动系统的原理与技术，内容包括混合动力汽车发展现状、单一动力驱动的局限性、多电汽车和混合动力汽车使用性能的计算与评价、并网混合动力汽车的电量保持与消耗等基础性、概述性问题的论述；串联、并联、混联式混合动力汽车，超级电容式混合动力汽车，电动轮式混合动力汽车的结构与原理的分析与阐述；混合动力系统的技术性能与影响因素分析；混合动力驱动系统的参数设计与匹配，储能装置、驱动电动机、电气元件的选型与设计，通信系统的结构类型与选配；电力驱动系统的类型、特点、对比与选配；交流驱动电力电子器件的结构与设计；混合动力驱动系统的控制方法与技术；混合动力驱动系统的效率分析与计算；混合动力汽车的使用特性及工况评价方法；混合动力汽车的储能技术；混合动力汽车的试验与验证以及自动电气化运输系统等内容。

总之，本书从整车、动力驱动系统到零部件对混合动力汽车的使用性能、结构特点、设计方法、试验与验证等都进行了详实的论述，并通过大量的实例和习题扩充和巩固各章节讲述的内容。

本书主要面向工业、商业、学术机构和政府部门的实践工程师，也可以作为汽车相关专业和交通运输相关专业本科、专科学生和研究生补充教材。

在翻译本书的过程中，译者时刻铭记著名翻译家钱歌川先生的教诲：“凡是翻译出来的一字一句，一事一物，都必须合乎逻辑，合乎情理。”译者在尊重原作思想的前提下，用中国人习惯的逻辑语言和思维方式对全书进行了统稿，对原书中的错漏之处进行了修正。

本书内容跨越多个学科领域，翻译有一定难度，殷切期望广大读者对书中错漏之处予以批评指正。

吉林大学 刘玉梅

于长春

# 原书前言

《混合动力汽车驱动系统》在2004年出版发行第1版，本书在第1版的基础上修订而成。在过去的七年时间里，混合动力技术取得了很大程度的提高和改进，本书也体现了这些变化。本书在章节结构方面进行了明显的调整，所有章节的实例都是对前文的进一步阐述和扩充。为了给读者巩固章节知识，每章结尾处附有相应的习题；同时还附有习题答案，以验证解决方法的正确性。

本书重点介绍了与汽油内燃机或火花点火式（SI）发动机相结合的混合动力技术。当火花点火式发动机采用缸内直喷时，更习惯把它称为点燃式缸内直喷发动机（SIDI）。目前，SIDI正被一个新的缩写词GDI（汽油直喷式发动机）代替。燃用柴油的混合压燃直喷式（CIDI）发动机已经得到了广泛应用。但由于柴油机已经是一种高效的能量转换装置，所以在柴油机中加入电驱动所取得的效果并不明显。随着点燃式缸内直喷发动机和混合压燃直喷式发动机尺寸的不断缩小，为了获得更显著的电气增压效果，油电混合化程度不断提高，这也正是丰田汽车公司（TMC）曾提到的电气化的发展进程。伴随电气化发展而来的是电机形式的能量转化和电力电子转换器形式的电力转换等关键技术的发展。本书第1版涵盖了这两个主题，并在第2版中得到了进一步升华。电气化章节的剩余部分由电力驱动控制系统、能量管理和电能存储三个部分组成。本书还论述了标准驱动工况、排放和驱动效率，从而使专题内容更加完整。本书最后的自动电气化运输（AET）部分是一个全新的章节，其中很多观点都指出了混合动力汽车的未来发展方向。

本书可作为汽车专业课程的补充教材，推荐本科四年级和研究生使用第1~4章和第8、9、11章的部分内容。本书的第5~9章与第12章有很大关联度，对混合动力汽车、插电式汽车、纯电动汽车和燃料电池汽车提出了更加深刻的理解，同时也指出了上述技术在未来交通运输系统中的作用。本书第12章介绍的自动电气化交通运输得到了越来越广泛的关注，尤其是在货运交通运输方面。

本书主要面向工业、商业、学术机构和政府部门的实践工程师。正如前文所述，本书可以作为汽车电子和交通运输系统专业大四学生和研究生补充教材。根据实践工程师或在校学生的教育背景，可以适当选择书中内容以满足专业应用或个人兴趣。对不同学科（如电气和机械工程）交叉的领域，任课教师应把重点放在第2~4章，可以灵活安排讲解内容的顺序。书中的很多资料是在作者的项目、会议、座谈会、车间讲解、公司和大学的特约演讲基础之上总结概括的。

在此，感谢我的妻子JoAnn在本书第2版筹备期间的鼓励和协助。同时，还要

感谢车辆及相关供应企业的众多好友，感谢他们为我提供了在混合动力汽车驱动技术方面的学习机会。此外，要特别感谢 Lisa Reading 女士和英国 Stevenage 工程技术学院的全体员工，还有 Macmillan 公司及 MPS 有限公司的 S. Ramya，正是有了他们的帮助，才使本书得以再版。

**John M. Miller**

# 目 录

译者的话

原书前言

第 1 章 混合动力汽车 .....	1
1.1 2010 年混合动力发动机现状 .....	10
1.2 发动机单一驱动的限制性 .....	13
1.3 车辆电气化和多电汽车 .....	14
1.4 道路运行车辆的性能特点 .....	16
1.4.1 新一代汽车合作伙伴计划 .....	16
1.4.2 发动机小型化 .....	18
1.4.3 驱动工况特性 .....	20
1.4.4 混合动力汽车的性能指标 .....	24
1.4.5 车辆动力学基础 .....	25
1.5 道路行驶载荷的计算 .....	29
1.5.1 道路行驶载荷的组成 .....	29
1.5.2 摩擦力与车轮滑移 .....	34
1.6 燃油经济性预测 .....	36
1.6.1 车辆排放 .....	37
1.6.2 制动燃油消耗率 .....	37
1.6.3 燃油经济性与燃油消耗率之间的换算 .....	38
1.7 内燃机简介 .....	40
1.7.1 什么是制动平均有效压力 .....	41
1.7.2 制动燃油消耗量对制动平均有效压力的灵敏度 .....	43
1.7.3 ICE 基础知识：燃油消耗率曲线 .....	45
1.7.4 排放法规 .....	46
1.8 并网混合动力汽车 .....	49
1.8.1 并网汽车：汽车到电网 .....	49
1.8.2 并网汽车 HEV20 和 HEV60 .....	52
1.8.3 电量保持和电量消耗 .....	55
1.9 练习 .....	56
参考文献 .....	57



第 2 章 混合动力汽车结构 .....	59
2.1 串联式结构 .....	62
2.1.1 机车驱动 .....	63
2.1.2 串-并联混联结构 .....	65
2.1.3 负荷跟踪结构 .....	67
2.2 前传动式并行结构 .....	68
2.2.1 能量回收系统 .....	69
2.2.2 微混合动力结构 .....	70
2.2.3 轻混合动力结构 .....	71
2.2.4 动力辅助 .....	74
2.2.5 双模式混合动力 .....	75
2.3 前传动式混联结构 .....	76
2.3.1 功率分流 .....	77
2.3.2 变速功率分流器 .....	81
2.3.3 无级自动变速器 .....	84
2.3.4 集成混合动力辅助变速器 .....	85
2.4 后传动式并行结构 .....	87
2.4.1 后传动式结构 .....	88
2.4.2 轮毂电机混合动力 .....	89
2.5 液压后传动式结构 .....	90
2.5.1 液压辅助起动系统 .....	90
2.5.2 液-电后传动式结构 .....	91
2.5.3 高压电驱动 .....	91
2.6 飞轮储能系统 .....	93
2.6.1 德克萨斯 A&M 大学的反式电机 .....	93
2.6.2 汽油电动传动系统 .....	93
2.6.3 瑞士联邦理工大学的飞轮概念 .....	95
2.7 超级电容器混合动力汽车 .....	96
2.7.1 使用超级电容器的接触网供电车辆 .....	96
2.7.2 使用道旁超级电容器的接触网供电车辆 .....	97
2.7.3 使用超级电容器的无轨电车 .....	98
2.8 电动四轮驱动 .....	99
2.8.1 电动四轮驱动系统 .....	99
2.8.2 大霸王厢式货车 .....	100
2.9 练习 .....	101
参考文献 .....	102

<b>第3章 混合动力装置性能参数</b> .....	105
3.1 坡度和巡航目标 .....	109
3.1.1 爬坡能力 .....	112
3.1.2 全负荷状态 .....	112
3.2 初始起动及加速 .....	113
3.2.1 前两秒 .....	113
3.2.2 变换车道 .....	113
3.3 制动和能量再生 .....	114
3.3.1 串行 RBS .....	114
3.3.2 并行 RBS .....	117
3.3.3 RBS 与 ABS 的交互作用 .....	117
3.3.4 RBS 与 IVD/VSC/ESP 的交互作用 .....	118
3.4 行驶工况的影响 .....	118
3.4.1 行驶工况类型 .....	119
3.4.2 PHEV 的 EV 及 REV 工况 .....	120
3.4.3 平均车速及其对燃油经济性的影响 .....	122
3.4.4 加速/减速过程动力学 .....	122
3.4.5 全负荷起动 .....	123
3.5 电气部分 .....	123
3.5.1 发动机小型化 .....	123
3.5.2 续航里程和车辆性能 .....	124
3.6 使用需求 .....	124
3.6.1 客户使用情况 .....	124
3.6.2 电气负荷 .....	125
3.6.3 坡道停车和蠕滑 .....	125
3.6.4 空档怠速 .....	125
3.7 练习 .....	126
参考文献 .....	126
<b>第4章 驱动系统的参数设计</b> .....	127
4.1 电力驱动系统与内燃机的匹配 .....	128
4.1.1 变速器的选择 .....	130
4.1.2 传动比的选择 .....	130
4.1.3 自动变速器构造 .....	132
4.2 驱动电机的参数设计 .....	136
4.2.1 第1步 .....	137

4.2.2	第2步	139
4.2.3	第3步	142
4.2.4	转矩和功率	144
4.2.5	恒功率转速比	146
4.2.6	电机尺寸规格	148
4.3	电力电子器件的参数设定	151
4.3.1	开关的工艺选择	153
4.3.2	$kV \cdot A/kW$ 和功率因数	153
4.3.3	纹波电容的设计	157
4.3.4	开关频率和脉宽调制	159
4.4	选择储能技术	161
4.4.1	铅酸蓄电池技术	168
4.4.2	镍氢电池	169
4.4.3	锂离子电池	170
4.4.4	金属-空气电池	172
4.4.5	燃料电池	172
4.4.6	超级电容器	177
4.4.7	飞轮	180
4.5	电气线束	180
4.5.1	对线束的要求	181
4.5.2	逆变器母线	183
4.5.3	高压分离技术	185
4.5.4	配电中心	186
4.6	通信系统	186
4.6.1	通信协议: CAN	188
4.6.2	电网和数据网络	189
4.6.3	未来通信协议: TTCAN	191
4.6.4	未来通信协议: 车载网络	192
4.6.5	未来通信协议间的竞争	195
4.6.6	诊断测试代码	196
4.7	辅助子系统	196
4.7.1	转向系统	197
4.7.2	制动系统	197
4.7.3	客舱气候控制系统	198
4.7.4	热管理系统	198
4.7.5	人机界面	201
4.8	成本和重量预算	201

4.8.1 成本分析	202
4.8.2 质量预算	203
4.9 练习	204
参考文献	205
<b>第5章 电力驱动系统技术</b>	<b>209</b>
5.1 永磁材料	209
5.1.1 永磁材料简介	210
5.1.2 铝镍钴材料	212
5.1.3 稀土永磁体	213
5.2 无刷电机	216
5.2.1 无刷直流电机	218
5.2.2 无刷交流电机	222
5.2.3 表面式永磁电机的设计要点	226
5.2.4 双模式逆变器	233
5.3 内置式永磁体	236
5.3.1 内埋式磁体设计	237
5.3.2 压缩通量式设计	240
5.3.3 机械式磁场削弱	243
5.3.4 多层设计	245
5.4 异步电机	246
5.4.1 传统异步电机	246
5.4.2 绕组重构	249
5.4.3 变极式异步电机	250
5.5 可变磁阻电机	259
5.5.1 开关磁阻电机	260
5.5.2 同步磁阻电机	263
5.5.3 径向叠片同步磁阻电机	265
5.6 不同电机技术的优缺点比较	265
5.6.1 电机动态性能比较	265
5.6.2 电机应用于纯电动汽车驱动系统时的性能比较	267
5.6.3 电机应用于混合动力汽车驱动系统时的性能比较	268
5.7 练习	270
参考文献	271
<b>第6章 交流驱动的电电子器件</b>	<b>275</b>
6.1 半导体设备技术	276

6.1.1 功率半导体发展趋势 .....	277
6.1.2 宽带隙器件 .....	277
6.2 脉宽调制的本质 .....	279
6.3 谐振脉冲调制 .....	283
6.4 空间矢量脉宽调制 .....	285
6.5 多电平逆变器 .....	293
6.6 脉宽调制技术的比较 .....	293
6.7 DC/DC 转换器 .....	295
6.8 热设计 .....	297
6.9 可靠性研究 .....	301
6.10 电流调节器的传感器 .....	303
6.11 最小纹波的交错式脉宽调制 .....	305
6.12 练习 .....	306
参考文献 .....	308
<b>第7章 驱动系统控制技术 .....</b>	<b>310</b>
7.1 磁场定向控制的本质 .....	311
7.2 磁场定向控制动力学 .....	315
7.3 无传感器控制 .....	321
7.4 效率优化 .....	324
7.5 直接转矩控制 .....	327
7.6 练习 .....	329
参考文献 .....	330
<b>第8章 驱动系统效率 .....</b>	<b>332</b>
8.1 牵引电机 .....	332
8.1.1 铁心损耗 .....	334
8.1.2 铜损和趋肤效应 .....	338
8.2 逆变器 .....	340
8.2.1 传导损耗 .....	341
8.2.2 开关损耗 .....	342
8.2.3 反向恢复损耗 .....	343
8.3 配电系统 .....	343
8.4 储能系统 .....	345
8.5 效率映射图 .....	345
8.6 练习 .....	349
参考文献 .....	350

<b>第9章 混合动力汽车的使用特性</b> .....	352
9.1 市区循环工况 .....	359
9.2 公路循环工况 .....	360
9.3 联合工况 .....	360
9.4 新欧洲驱动工况 .....	361
9.5 日本10-15模式 .....	363
9.6 混合动力汽车的常规驱动工况 .....	364
9.7 练习 .....	365
参考文献 .....	367
<b>第10章 储能技术</b> .....	369
10.1 电池系统 .....	370
10.1.1 铅酸电池 .....	375
10.1.2 镍氢电池 .....	376
10.1.3 锂离子电池 .....	381
10.2 电容器储能系统 .....	386
10.2.1 对称超级电容器 .....	390
10.2.2 非对称超级电容器 .....	394
10.2.3 超级电容器与蓄电池结合 .....	395
10.2.4 混合电池举例 .....	402
10.2.5 超级电容器电池均衡技术 .....	404
10.3 氢气存储 .....	410
10.3.1 金属氢化物 .....	412
10.3.2 高压气体 .....	412
10.4 飞轮系统 .....	414
10.5 气动系统 .....	415
10.6 储能系统建模 .....	415
10.6.1 电池模型 .....	416
10.6.2 燃料电池模型 .....	420
10.6.3 超级电容器模型 .....	422
10.7 练习 .....	429
参考文献 .....	432
<b>第11章 混合动力汽车试验及验证</b> .....	436
11.1 汽车滑行试验 .....	437
11.2 运动型多功能汽车的滑行试验 .....	440

11.3 SUV 牵引拖车的滑行试验 .....	441
11.4 Class-8 牵引车试验 .....	444
11.5 Class-8 牵引车加挂车的滑行试验 .....	446
11.6 练习 .....	450
参考文献 .....	451
<b>第 12 章 自动电气化交通运输 .....</b>	<b>452</b>
12.1 个人快速交通 .....	454
12.2 自动化高速公路系统 .....	455
12.3 非接触式电力传送 .....	457
12.3.1 电感耦合技术 .....	458
12.3.2 近场辐射的功率传输 .....	459
12.4 货物运输 .....	460
12.5 练习 .....	468
参考文献 .....	468
<b>附录 .....</b>	<b>470</b>
参考文献 .....	472

# 第 1 章 混合动力汽车

本书第 1 版发行时就曾在书中做过这样的描述：“随着内燃机（Internal Combustion Engine, ICE）逐步发展成为更加清洁、有效的动力装置，越来越多有远见的公司把混合动力汽车视为解决环境问题的长期可行方案”。时隔六年本书再版时，书中提到的参考文献充分证明了上述观点的正确性。在参考文献 [1] 中，Rishi 等人指出：“改变个人移动性定义的新时代正在到来。届时，多种动力形式的混合运输将会更加普遍，智能车辆也将满足不同客户对信息、环境责任及安全性能的需求。”此外，还有一个更为振奋人心的消息，混合动力在未来十年发生的变化足以超越过去五十年发生的所有变化。混合动力驱动的变化进程正在加速，这也是出版发行《混合动力汽车驱动系统（第 2 版）》的原动力。

谈到混合动力汽车的发展变化，Raskin 和 Shah<sup>[2]</sup>提到：“混合动力汽车采用高效电机来提高内燃机车辆的燃油经济性；目前世界正处于向混合动力汽车转变的巅峰时刻”。他们也是这样形容：“除交通运输业外，其他工业在过去 30 年或者显著提高能源利用效率，或者朝着替代燃料资源的方向发展”。这句话是令人深思的，因为它揭示了汽车行业在接受混合动力方面是如此不情愿，到目前为止依旧没有改善。

气候变化已经成为提高能源效率和减少排放的强有力促进因子。业内人士充分意识到政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）调查结果的重要性，特别对人为排放温室气体（Green House Gases, GHG），主要是（CO<sub>2</sub>）引起气候剧变这一调查结果有了更加充分的了解。气候剧变主要表现为全球冰川融化、极地冰帽以超过预期的速度消融以及其他方面的变化。IPCC 估算为了使 2050 年全球气温上升幅度小于 2.4℃，全球 CO<sub>2</sub> 排放量需降低为 2000 年的 85%。2005 年 CO<sub>2</sub> 累积含量为 380ppm<sup>⊙</sup>，为保持这一温度上升幅度，2050 年 CO<sub>2</sub> 累积含量应小于 450ppm<sup>[3]</sup>。

正如前言部分所述，第 2 版在保留第 1 版内容的基础上，会增添新的内容以说明混合动力电动汽车（Hybrid Electric Vehicles, HEV）在过去六年内所取得的成就。第 1 版提到世界主要汽车制造商已经发布了 HEV 的引进计划。目前，他们正转向生产多电混合动力汽车（More Electric Vehicles, MEV），如插电式混合动力汽车和蓄电池混合动力汽车。

目前，日本在混合动力技术领域仍处于主导地位。据美国国家研究委员会调查表明<sup>[4]</sup>，在混合动力驱动及相关技术支持领域，北美几乎处于最后。表 1.1 摘自本章参

⊙ 1ppm = 1 × 10<sup>-6</sup>，后同。——译者注



考文献 [4], 简要介绍了各国混合动力汽车技术先进程度的排列顺序。

表 1.1 支持混合动力驱动先进汽车技术地域的排列顺序

技 术	北 美	欧 洲	亚 太 地 区
内燃机: 混合压燃直喷式发动机 (Compression Ignited Direct Injection, CIDI)	3	1	2
内燃机: 火花点火式	2	2	1
燃气轮机	1	1	1
燃料电池	2	2	1
飞轮	1	1	3
先进电池	1	2	1
超级电容器	3	3	1
轻质材料	2	1	1

北美在能源存储技术方面有较高的等级是借助于美国国家实验室在航空探测器中对储能技术的应用, 以及先进电池联盟 (US Advanced Battery Consortium, US ABC) 的发展。

前文提到的汽油—电力混合动力概念汽车<sup>[5]</sup>及其生产计划, 表明了世界主要汽车制造商在于 2003~2007 年引进混合动力汽车技术。前文诸多介绍内容成为第一代混合动力驱动技术, 以丰田汽车公司 (Toyota Motor Co., TMC) 为例, 混合动力驱动技术已发展形成第三代产品, 并于 2010 年形成第四代产品。混合动力电动个人运载车辆的现行系统电压是 300V, 同时也是众多汽车制造商所遵循的法律标准。因为当功率达到 100kW 以上时, 300V 电压水平不仅能够满足电力电子设备 (现行 600V) 和电解母线电容 (450V) 的要求, 还能为车辆提供有效的动力输送。在雷克萨斯 RX330 混合动力协同驱动 (Hybrid Synergy Drive, HSD) 概念车中, 丰田电机公司没有遵循这一系统电压标准。图 1.1 所示模型为使用 V6 发动机实现 V8 发动机性能的混合动力汽车。V6 发动机使用镍金属氢化物 (NiMH) 电池技术, 系统电压为 550V。



图 1.1 丰田 HSD 概念车<sup>[5]</sup> (左) 及 2010 款普锐斯 IV (右)

继丰田汽车公司混合动力系统 THS1、THS2 及无级变速器 (Continuously Variable