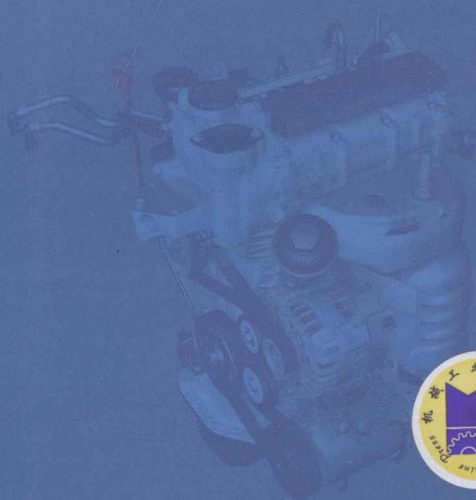


新能源汽车 新型电机的 设计及弱磁控制

A Novel PM Machine Design and Flux-weakening
Control for Renewable Energy Vehicle

王艾萌 著



新能源汽车新型电机的设计及弱磁控制

A Novel PM Machine Design and Flux-weakening
Control for Renewable Energy Vehicle

王艾萌 著



机械工业出版社

本书主要针对当前新能源汽车电驱动系统中所采用的高性能电机及其驱动控制即内置式永磁电机及弱磁控制的关键技术进行了系统全面的论述,主要包括内置式永磁电机及弱磁控制的模型分析、参数计算、电机的优化设计,永磁电机的测试及弱磁控制策略等,最后还给出了内置式永磁电机在各种新能源车中的应用实例及发展趋势。

本书适合于电气工程领域内的工程技术人员和相关专业的大专院校教师、研究生阅读,特别是可作为从事新能源汽车的电动化技术的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

新能源汽车新型电机的设计及弱磁控制/王艾萌著. —北京:机械工业出版社, 2013. 12

ISBN 978-7-111-44808-2

I. ①新… II. ①王… III. ①电动汽车-电动机-研究
IV. ①U469.720.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 273207 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: 张俊红 责任编辑: 赵 任 版式设计: 常天培

责任校对: 樊钟英 封面设计: 路恩中 责任印制: 乔 宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

148mm × 210mm · 7.125 印张 · 224 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-44808-2

定价: 36.00 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

社服务中心: (010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版



推荐序

我们中国人常常讲“衣食住行”为生活基本需要，其中的“行”也印证了移动自由的重要性。但是，受到能源短缺、全球暖化等问题的影响，传统的内燃机汽车面临严峻挑战，而这在中国尤其突出。我国应该主动迎接这一历史性挑战，迎难而上，全面推动以电动汽车为代表的新能源汽车的发展，将我国打造成为电动汽车的王国，实现人类社会与地球的和谐共生。电动汽车的关键技术为三大电，即电机、电控、电池。而电机系统作为插电混合动力和纯电动汽车的“发动机”，成为了直接关系到新能源汽车性能与节能减排的核心零部件，而作者的《新能源汽车新型电机的设计及弱磁控制》一书正是针对新能源汽车电驱动的核心——高性能永磁电机及其控制的研究，是作者近些年来所做的博士课题及科研的主要工作，也是当前电动车的电驱动系统中的国际研究热点，对于学习这一新型电机及其控制的研究人员有很好的借鉴作用。

陳清泉

中国工程院院士、英国皇家工程院院士
世界电动车协会创始主席

序言



在低碳经济的大潮下，新能源汽车成为全球节能与环保领域里最受推崇的新兴产业，汽车的电动化技术更是受人关注。而电机系统作为插电混合动力和纯电动汽车的“发动机”成为了直接关系到新能源汽车性能与节能减排的核心部件。

本书研究的内置式永磁同步电机及其弱磁控制正是当前新能源汽车电驱动系统中所采用的高性能电机，它具有高功率密度、高效率、脉动转矩小和较宽的弱磁调速范围，是节能、环保的新能源车驱动电机的最佳选择。本书系统地从理论上和实践上对内置式永磁电机及其弱磁控制技术进行了研究，其主要内容如下：

1) 第1章介绍了新能源汽车中的电动化技术、电驱动系统的分类及电机和控制器的选型，分析了先进的电控技术中的新型电机及弱磁控制方法。

2) 第2章和第3章是基础部分，分析了内置式永磁电机线性和考虑饱和的数学模型以及电感参数计算模型，建立了矢量控制方法下考虑磁路饱和特点的内置式永磁电机有限元瞬态场模型，分析了考虑磁路饱和的电感参数对控制性能的影响。

3) 第4章结合新能源车用电机的性能要求，给出了优化设计内置式永磁电机的设计方法，主要分析了永磁体转子结构尺寸优化对电机性能的影响，以及永磁材料及其温度对转矩脉动的影响，抑制脉动转矩的方法等。

4) 第5章主要针对近些年来在新能源车中应用较多的分数槽集中绕组电机，分析了分数槽集中绕组的特征及采用不同的槽极配合对电机性能及转矩脉动的影响，对比分析了分数槽集中绕



组与分布绕组电机的主要性能。

5) 第6章对车用电机的弱磁控制算法及其控制系统进行了研究,重点研究了电机的参数对控制性能的影响,提高控制性能参数辨识方法。

6) 第7章给出了新型永磁电机在新能源车的应用实例及永磁电机的发展趋势及思考。

本书是在笔者所做的博士课题及最近的研究基础上完善的成果,得到了河北省自然科学基金资助项目《用于新能源汽车的高效宽调速永磁电机机理研究》(E2012502018)及华北电力大学中央高校基金课题《高效小型并网风力发电系统的研究》的支持。对以上课题的资助表示感谢。

衷心希望本书的出版能够对广大研究新能源汽车电动化技术的人员有所帮助,以促进我国新能源包括混合动力、电动车电驱动技术的发展。尽管所述内容是作者近期的研究成果,但由于新能源汽车电动化技术的飞速发展及作者学识和能力所限,书中内容难免有不当和错误之处,敬请有关专家和各位读者给予批评指正。

著 者



致谢

本书的出版要感谢华北电力大学电气与电子工程学院领导以身作则的敬业精神及对教师科研工作的大力支持。本书课题的研究起源于我的博士课题《内置式永磁同步电动机的优化设计及弱磁控制研究》，它是我于2006年1月—2007年6月2009年7月—10月间在美国威斯康星-麦迪逊大学（University of Wisconsin-Madison），做访问学者期间所做的工作及回国后工作的延续，得到了美国威斯康星-麦迪逊大学的 Thomas M. Jahns 教授、北京精进电动公司的 CTO William Cai 博士的指导和帮助，特别是 Thomas M. Jahns 教授为我在美国的学习提供了良好的科研环境，这为编写本书打下了敦实的基础。

在完成书稿的时候，非常感谢我的导师李和明教授对我学术道路的指引以及我的家人对我出版该书的鼓励和支持。感谢有着“亚洲电动车之父”的陈清泉院士的积极推荐和撰写书籍的指教，还要感谢我校科技处丁常富处长及徐扬老师联系出版社等相关帮助，感谢新能源实验室王慧的合作，以及我的同事董淑惠老师及我的研究生的共同参与，在我的研究工作中，对给予过我帮助的同事在此一并表示衷心感谢。



目录

推荐序

序言

致谢

第1章 新能源汽车的电动化技术	1
1.1 新能源汽车电动化及新型电机	1
1.1.1 新能源汽车电驱动系统	1
1.1.2 新能源汽车电驱动中的电机选择	3
1.2 新能源汽车电动化的关键技术	7
1.2.1 车用电机及系统的技术要求	7
1.2.2 车用电机的驱动特性及控制方法	9
1.3 内置式永磁同步电机的结构	11
1.3.1 表面式永磁电机转子结构	11
1.3.2 内置式永磁电机转子结构	12
1.3.3 多层内置式永磁转子及与凸极率的关系	14
1.3.4 内置式永磁电机的定子绕组拓扑结构	15
1.4 新能源汽车电控采用的弱磁控制技术	16
1.4.1 弱磁控制的电压、电流限制圆轨迹	16
1.4.2 弱磁运行的三个运行区	20
1.5 新能源汽车电动化的电机及控制器的挑战	22
参考文献	23

第2章 内置式永磁同步电机的数学模型	26
2.1 内置式永磁同步电机线性模型	26
2.1.1 旋转坐标系下的永磁同步电机模型	26



2.1.2	旋转坐标系下的 dq 轴电感的计算	30
2.1.3	永磁体磁链的计算	38
2.1.4	损耗的计算	40
2.1.5	功率、转矩及效率的计算	45
2.2	考虑饱和的内置式永磁同步电机非线性模型	46
	参考文献	51
第3章 内置式永磁同步电机的有限元建模及参数模型		53
3.1	有限元法及有限元设计软件	53
3.1.1	有限元法简介	53
3.1.2	Ansoft Maxwell 简介	53
3.2	内置式永磁同步电机的有限元建模	54
3.3	内置式永磁同步电机瞬态场有限元分析	56
3.3.1	55kW 内置式永磁同步电机的参数设计及建模	56
3.3.2	电流控制角、转矩、转速和功率特性分析	56
3.3.3	内置式永磁电机磁路饱和特性有限元分析	58
3.4	有限元计算电感参数模型	61
3.4.1	解耦的线性和非线性电感计算模型	61
3.4.2	考虑交叉耦合的电感计算模型	63
3.4.3	修正的考虑交叉耦合的电感计算模型	66
3.5	非线性电感模型对电机输出性能影响分析	68
3.6	四种电感参数模型对电机输出性能影响的比较分析	72
	参考文献	74
第4章 内置式永磁同步电机优化设计		75
4.1	新能源汽车车用电机的设计要求	75
4.2	电机定子几何尺寸和极对数确定	78
4.3	永磁体转子拓扑结构的优化	79
4.3.1	永磁体的设计	79
4.3.2	内置式永磁体分段结构设计	81
4.3.3	内置式永磁体 V 形与 $\overline{W}$ 形结构设计	81

4.4 定子绕组的优化	83
4.4.1 定子绕组的设计	83
4.4.2 适合的分数槽定子绕组	84
4.5 五种永磁体拓扑结构的电机性能比较	88
4.5.1 五种永磁转子结构电机的性能比较	88
4.5.2 五种永磁转子电机的退磁特性分析	102
4.5.3 V 字形多层永磁体结构的优化设计	104
4.6 不同型号钕铁硼永磁体材料的优化设计	109
4.6.1 永磁体材料的选择	109
4.6.2 五种永磁材料在不同温度下转矩性能比较	112
4.6.3 电机损耗及效率比较	117
4.7 抑制齿槽转矩和纹波转矩的方法	118
4.7.1 齿槽转矩的抑制	118
4.7.2 优化永磁转子结构抑制纹波转矩	124
4.8 设计结果及分析	128
4.8.1 设计结果	129
4.8.2 性能分析	130
4.9 样机制作及测试	139
参考文献	144
第 5 章 分数槽集中绕组内置式永磁电机	147
5.1 分数槽集中绕组表贴式永磁电机	147
5.2 分数槽绕组的特征与约束条件	149
5.3 槽极配合的优化	153
5.4 分数槽集中绕组对转矩脉动影响的研究	155
参考文献	160
第 6 章 内置式永磁同步电机控制策略研究	162
6.1 弱磁控制的定子电流矢量轨迹图	162
6.2 电流控制策略	163
6.2.1 单位电流最大转矩控制 (MTPA) 方程	163



6.2.2	弱磁控制 (Flux-Weakening) 方程	164
6.3	电机参数对控制性能影响分析	165
6.3.1	电感参数分析	165
6.3.2	参数变化对电机输出性能的影响	167
6.4	内置式永磁同步电机控制系统建模及控制算法	168
6.4.1	具有磁路饱和特性的内置式永磁同步电机建模	168
6.4.2	电压空间矢量 PWM 模型实现	168
6.4.3	基于 SVPWM 的永磁电机电流矢量控制算法	170
6.4.4	基于 SVPWM 的内置式永磁电机电流矢量控制 仿真实现	172
6.5	提高内置式永磁电机驱动系统性能的控制方法——参数 辨识方法	177
6.5.1	不考虑电机磁路饱和影响的控制仿真	177
6.5.2	非线性插值补偿磁路饱和影响的系统仿真	180
6.5.3	在线参数估计模型补偿磁路饱和影响的控制系统 仿真	182
6.6	内置式永磁电机控制系统硬件设计	186
6.6.1	硬件系统设计	186
6.6.2	控制算法软件设计	190
6.6.3	系统调试及实验结果	194
	参考文献	199
第7章	永磁同步电机在新能源汽车中的应用及发展	200
7.1	永磁电机在新能源汽车中的应用实例	200
7.2	各种新型电机在新能源汽车中的应用	205
7.3	永磁材料及永磁同步电机的发展思考	210
	参考文献	217

第 1 章

新能源汽车的电动化技术



1.1 新能源汽车电动化及新型电机

随着科学技术的发展和人类文明的进步,汽车已经成为各行各业及人民生活中必不可少的有效工具。据统计,到 2050 年人口将增加到 100 亿,汽车将增加至 2.5 亿辆,如图 1-1 所示^[1]。若这些车辆都采用内燃机,那么所需燃油从何而来?其排出的废气又如何处置?我们赖以生存的地球正承受着汽车排放的二氧化氮的污染,其增加的趋势非常迅猛,造成空气质量严重污染。图 1-2 所示为北京的雾霾天气与道路状况。

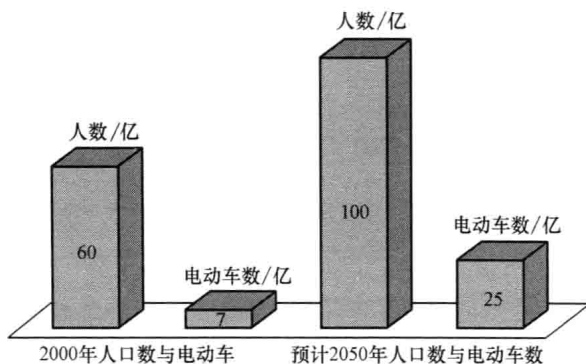


图 1-1 人口增加与汽车的需求

1.1.1 新能源汽车电驱动系统

为使我们的天空变成蓝色,必须开发清洁、高效、智能的交通工具,即新能源汽车。新能源汽车包括纯电动、混合动力和燃料电池三类;最主要的部件是动力电池,电机和能量转换控制系统。它是将传统的内燃机、电力驱动装置和储能装置结合在一起进行匹配和优化控制。近些年汽车电动化的电机及电池技术的发展一览如图 1-3 所示^[2]。



图 1-2 汽车尾气与雾霾天气

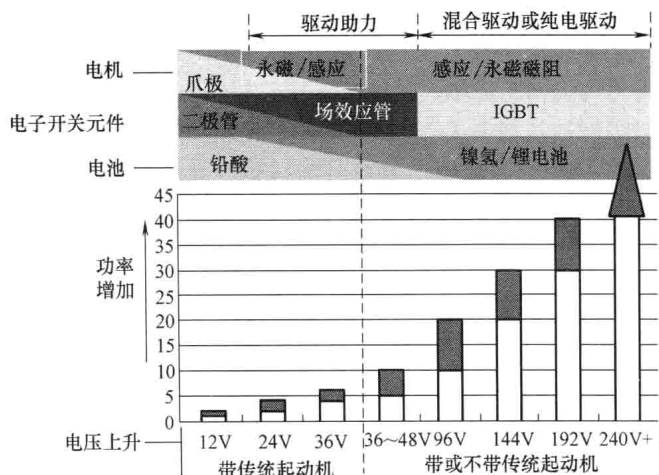


图 1-3 汽车电动化的电机及电池技术一览

图 1-3 说明在新能源汽车电动化系统中，由带传统起动机到不带传统起动机，随着功率逐渐地增大，电压在不断地上升，电力电子开关元件由不可控器件变为可控器件，系统中所采用的电机，当对应低电压时采用爪极电机，随着功率的增大，采用感应电机或永磁电机。

图 1-4a 和图 1-4b 分别给出了新能源汽车中常用的弱/强混合动力系统构成。

弱混合动力系统是皮带驱动起停系统 (Belt-driven Starter/Generator 皮带传动起动/发电一体化电机, BSG)，电机不能单独驱动车运行，BSG 混合动力系统能实现怠速停机 (发动机)、车辆起动时快速拖动发动机到怠速转速、制动回收能量的作用。由于没有配备耦合装置，故无

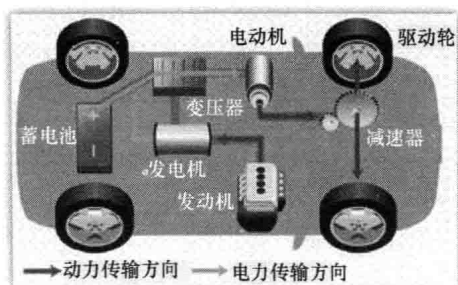
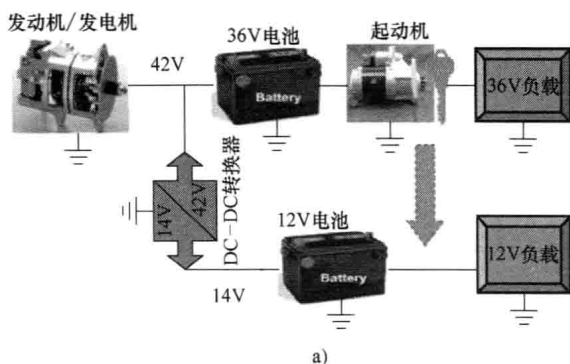


图 1-4 新能源汽车中常用的弱/强混合动力系统构成

a) DC 42V 弱混合动力系统构成 b) 强混合动力系统构成

法为车辆加速提供辅助功率。

强混合动力使用内燃机作为初始动力，电机提供辅助动力。例如，当在车辆滑行及下坡时，电机运行在发电状态为电池充电；而当车辆在起步、低速加速这些最为耗油的时刻通过储存在电池中的电能驱动电机工作，此时电机运行在电动机状态。将内燃机适合高速、电动机适合低速这两个特性结合，各取所长，低速时由电动机负责驱动，中高速时由汽油发动机介入驱动，从而发挥各自最佳的动力性和经济性。

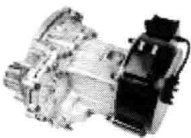
1.1.2 新能源汽车电驱动中的电机选择

混合动力或纯电动汽车中最早采用的是电机单独驱动的直流电机系统，其优点是成本低、控制简单，但是质量大，效率低，电刷和换向器使得其需要定期维护，故障率较高。目前异步电机、永磁电机和开关磁阻电机是电动汽车中常用的三大类型的交流电机。



目前用于新能源汽车的电机类型主要有交流感应电机、永磁电机和开关磁阻电机,其电机特点与工业电机的主要区别如表 1-1 所示^[2]。

表 1-1 车用电机与工业电机的主要区别

项目	车用电机 	工业电机 
外界温度及工作环境	-40 ~ 125℃ 行车中剧烈振动	-20 ~ 40℃ 一般固定应用,振动较小
冷却温度/℃	90 ~ 140	< 40
绕组温度/℃	160 ~ 200	75 ~ 100
速度范围/(r/min)	0 ~ 7000 ~ 21000	< 3600
电机尺寸和质量	车内空间有限,需紧凑设计,减少尺寸及质量	空间不受限制
冷却方式	通常为水冷,也有油冷	通常为风冷
功率密度/(kW/kg)	2.8	0.2
振动和噪声	在全速范围内振动小,噪声低	在固定速度下振动小,噪声低
可靠的行驶距离/km	230 ~ 280	固定不动
整个系统的性价比	较高	一般

用于混合动力汽车的电机还必须要有良好的可控性和容错能力,以及低噪声、高效率,同时具有对电压波动不敏感等性能。异步电机、内置式永磁同步电机、开关磁阻电机的性能比较如表 1-2 所示。

表 1-2 新能源汽车用交流电机的性能比较

参数	电机类型		
	异步电机	内置式永磁同步电机	开关磁阻电机
功率密度	一般	好	一般
恒功率区	1:5	1:3	1:3
转速范围/(r/min)	9000 ~ 15000	4000 ~ 15000	> 15000
电机损耗	大	小	最小
可靠性	好	好	好



(续)

参数	电机类型		
	异步电机	内置式永磁同步电机	开关磁阻电机
坚固性	好	一般	好
噪声和振动	一般	小	大
尺寸及质量	一般,一般	小,轻	小,轻
成本	低	高	低于感应电机
控制器成本	高	高	一般

表 1-3 给出了用于新能源汽车中的 400kW 感应电机与内置式永磁电机的性能比较。

**表 1-3 用于新能源汽车中的 400kW 感应电机
与内置式永磁电机的性能比较^[2]**

参数	感应电机	内置式永磁电机
直流母线电压/V	DC375	DC300
电流(有效值)/A	860 ~ 900	880
效率/(%)	95	99
质量/kg	71	62

通过表 1-3 可以看出,内置式永磁同步电机较其他电机的功率密度和转矩—转速特性都好,在可靠性、低噪声、低振动以及高转矩密度等方面具有明显的优势,但是由于永磁材料的价格高,且控制策略较为复杂,导致内置式永磁同步电机及其控制器的生产成本增高。

图 1-5 给出了在新能源汽车中的 6kW ISA (Integrated Starter/Alter-

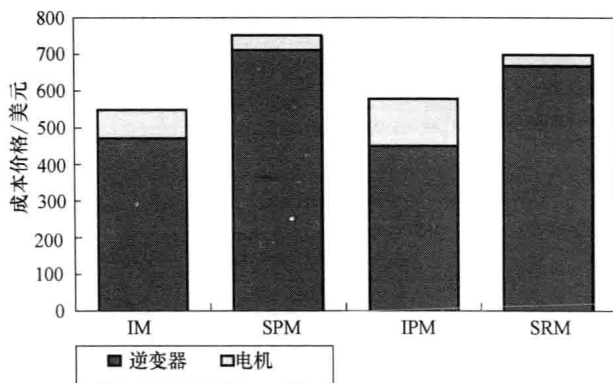


图 1-5 四种永磁同步电机及控制器的成本价格比较

IM—感应电机 SPM—表贴式永磁电机 IPM—内置式永磁电机 SRM—开关磁阻式电机



nater, 集成起动机) 中所选异步电机、表贴式永磁电机、内置式永磁电机、开关磁阻式电机及控制器在 2000 年时成本价格的比较。

图 1-5 所示四种电机系统的机械结构成本认为相似, 主要比较的是电机及其驱动系统的成本。从图 1-5 中的分析可知, 感应电机和内置式永磁电机及控制器成本均低于表贴式和开关磁阻式电机, 由于内置式永磁电机较感应电机有较高的效率、较小的质量, 因此有较小的惯性, 且可以得到高的功率、转矩密度和良好的弱磁能力, 所以内置式永磁电机及逆变器系统是最佳选择^[3]。

日本丰田汽车公司于 1997 年成功开发了实用的混合动力汽车 Prius I 并投入市场销售, 它是世界上第一种大批量生产的混合动力汽车。它采用四缸发动机 (4500r/min) 和两台内置式永磁电机 (MG1 和 MG2)、永磁同步电机 (1040 ~ 5600r/min, 33kW) 共同驱动, 之后在 2003 年、2007 年分别推出了 Toyota Prius II 和 Prius III, 其内置式永磁电机结构如表 1-4 所示。Prius III 中所使用的电机转速可达 13500r/min。因为混合动力汽车中的布置空间有限、宽速的恒功率运行范围以及运行平稳等要求, 内置式永磁电机设计及驱动的控制是其核心技术。图 1-6 所示为 (Toyota Prius II) 丰田普锐斯驱动系统示意图^[9]。

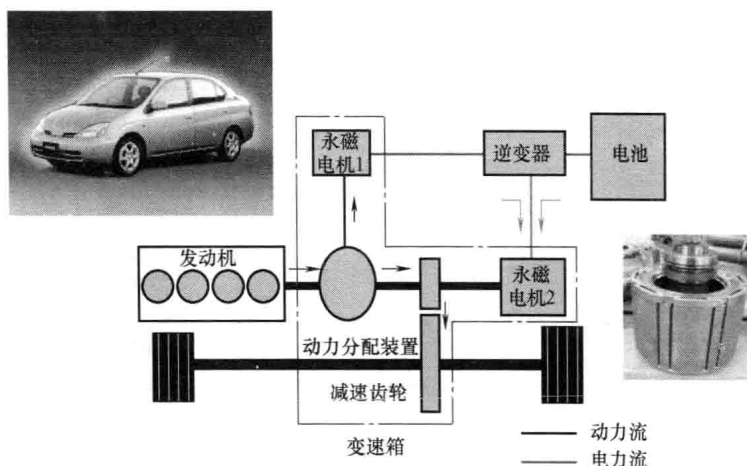


图 1-6 (Toyota Prius II) 丰田普锐斯驱动系统示意图