



国际电气工程先进技术译丛

ISTE WILEY

电动汽车 及其驱动技术

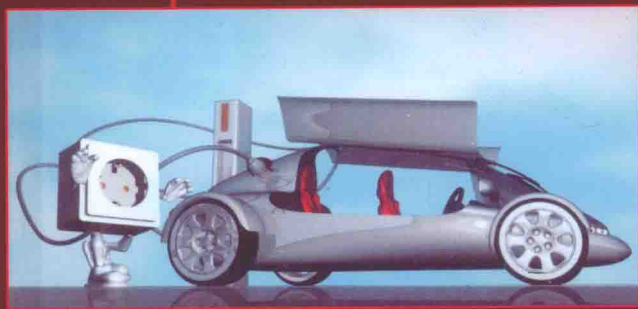
Automotive Electricity: Electric Drives

[法]约瑟夫·贝雷塔 (Joseph Beretta) 著

赵克刚 译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

电动汽车及其驱动技术

[法] 约瑟夫·贝雷塔 (Joseph Beretta) 著
赵克刚 译



机械工业出版社

本书从车辆电动化的角度入手,详细介绍了电动汽车的最新发展,较全面地论述了电动汽车及其关键零部件的主要技术,以及关键总成的技术现状与发展趋势。读者通过本书可以较好地串联起电动汽车相关的机械、电气、化学等多方面知识。本书可以作为电动汽车课程教学的教材,同时也可以作为专业人员的参考书。

真心希望电动汽车领域的同仁,无论是机械工程师还是电气工程师,能够从本书中有所收益。

Copyright © ISTE Ltd 2010.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled < Automotive Electricity: Electric Drive >, ISBN: 9781848210950, by Joseph Beretta, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley-ISTE 授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有,翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2012-8715 号

图书在版编目(CIP)数据

电动汽车及其驱动技术/(法)贝雷塔(Beretta, J.)著;赵克刚译. —北京:机械工业出版社,2015.6

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Automotive Electricity: Electric Drives

ISBN 978-7-111-50831-1

I. ①电… II. ①贝…②赵… III. ①电动汽车-驱动机构
IV. ①U469.720.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第154700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:付承桂 任鑫 版式设计:赵颖喆

责任校对:张玉琴 封面设计:马精明 责任印制:刘岚

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2015年9月第1版第1次印刷

169mm×239mm·11.25印张·214千字

0001—2500册

标准书号:ISBN 978-7-111-50831-1

定价:49.90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

译者的话

在今天中国的汽车工业从业人员看来，电动汽车的未来一片光明。但自电动汽车问世以来，一直是在争议中前行。自20世纪90年代以来，电动汽车进入第三轮发展热潮。译者本人也在此契机下开始接触并进入了这个领域。但受行业内各种观点的影响，译者本人的态度也是像海浪一样，有起有伏。而远在法国的Joseph Beretta先生及其同事们对电动汽车一直充满信心。他们基于科技史发展的全局角度认识到，车辆的电动化是社会发展潮流的一种必然表现，因此也就有了本书的出版。我与我的团队一起有幸完成了本书的翻译工作，希望读者不仅能通过我们的工作较为全面地了解到电动汽车及其关键技术的发展现状及趋势，也能够感受到原作者们对电动汽车的热爱和信念。

本书是集体劳动的结晶。广东工业大学刘延伟博士参与翻译工作并校订了全部章节。我的研究生姚伟浩、常浩同学也为此书付出的辛勤的劳动。

本书的工作受到国家自然科学基金项目（NSFC 51405087）的支持，在此表示诚挚的感谢！

由于水平有限，文中难免存在错漏及不妥之处，恳请广大读者批评指正。

译者

原书前言

自 20 世纪初起，电气工程（电灯、电动机器人等）逐渐融入我们的日常生活。今天，它已经出现在我们日常的大多数事物中。

日前，电气工程与汽车行业之间有了越来越多的交叉与联系。虽然在过去的十年中，这个领域的发展是比较缓慢的，但是在法律法规和市场规律清除了最后的壁垒的推动下，现在已开始加速发展并且我们将会见证这个历史潮流。

虽然电动汽车还没有取得真正的成功，但是目前汽车电力电子设备已经在市场中占有了一个重要的位置。

这本书是献给那些致力于电气工程定位发展的先驱，也献给有着天才创意同时坚信电动汽车的光明前景和为混合动力汽车的发展而欢呼的梦想家们。本书所描述的就是他们的工作。

Joseph Beretta

目 录

译者的话

原书前言

第 1 章 电动汽车发展简介	1
1.1 汽车概述	1
1.2 汽车工业重要数据——来自 CCFA（法国汽车制造商协会）的数据	1
第 2 章 基本定义	3
2.1 基本概念	3
2.1.1 汽车能量的基本知识	3
2.1.2 汽车动力学的基本知识	4
2.2 不同的电气传动系统	6
2.2.1 基本定义	6
2.2.2 驱动系统定义	8
2.2.3 热-电混合动力系统	11
2.2.4 复杂混合系统	12
第 3 章 电动汽车	16
3.1 电动汽车的发展历史	16
3.2 纯电动汽车	18
3.2.1 蓄电池尺寸	18
3.2.2 车辆的指标	19
3.2.3 车辆质量的计算	19
3.2.4 微型车上的应用实例	21
3.3 电动汽车的充电系统	23
3.3.1 什么是电池的充电?	23
3.3.2 不同类型的充电器	24
3.3.3 充电效率	28
3.3.4 充电的安全问题	29
3.4 油电混合动力汽车	31
3.4.1 传统汽车的评估	31

VI 电动汽车及其驱动技术

3.4.2 混合动力传动实施方案	39
3.4.3 混合动力传动系统的研究背景	43
3.4.4 混合动力的功能	47
3.4.5 混合动力汽车的评估	61
3.4.6 第一辆上市的混合动力汽车	65
3.5 燃料电池汽车	80
3.5.1 历史介绍	80
3.5.2 燃料电池种类的选择	81
3.6 参考文献	96
第4章 电动汽车的部件	97
4.1 电动机	98
4.2 功率电子变换器	100
4.2.1 电动汽车特性	100
4.2.2 功率电子元件	101
4.2.3 发电机-接收器-电源	102
4.2.4 整流器	103
4.2.5 斩波器	104
4.2.6 逆变器	111
4.3 电池与静态储能系统	113
4.3.1 各类电化学电池	114
4.3.2 镍氢和锂离子电池不同应用的定位	116
4.3.3 循环回收过程	118
4.4 燃料电池与车载燃料储存	119
4.4.1 燃料电池的历史	119
4.4.2 各种燃料电池技术	120
4.4.3 PEM 燃料电池	121
4.4.4 燃料电池部件的技术与成本	127
4.4.5 燃料电池的外部设备	130
4.4.6 燃料电池的数学模型	133
4.4.7 燃料以及其存储	134
4.4.8 总结	142
4.5 参考文献	143
第5章 电动汽车的前景与演变	144
5.1 机动运输能力	144
5.2 新技术	146

5.2.1 电动机	147
5.2.2 电力系统	148
5.2.3 电力能源	148
5.3 新型汽车	150
附录	168
附录 A 欧洲轻型车排放管理控制	168
附录 B.1 带有飞轮储能的并联式混合传动案例	168
附录 B.2 带有气动储能装置的并联式混合传动案例	169
附录 C 各车型功能集合	170
附录 D 丰田普锐斯发动机	171

第 1 章 电动汽车发展简介

纵观人类历史，人们一直致力于生产活动范围的扩张，同时也伴随了交通运输技术的提高。

每一次运输技术的新发展，都极大地改变了人们的生活和行为方式。在今天，机动运输（MOBILITY）的概念成为了人们关注的焦点。自由移动具有多重含义，包括支撑有利于环境保护的选择、汽车行驶的规则和汽车的设计。我们将致力于汽车的发展工作，特别是在汽车电气化工程方面。

我们将会回顾以前用过的电子技术，在本章将会着重于与电动传动技术有关的内容。

1.1 汽车概述

汽车有着超过 100 年的发展历史，在今天的日常生活中已经成为非常重要的一部分。随着时间的推移，汽车已经从最初的事物成功地在交通运输工具、高科技产品、消费品和社会生活的代表等方面占据一席之地。

因此，汽车的未来发展将是非常有吸引力的研究课题。

当我们驾驶汽车时，这种出行方式可以保留我们的个人自由。在今天已经成了我们生活的一部分，同时汽车已经远远超出了它的职能作用，它更是身份的象征。

在今天，汽车的生产与发展是与技术和市场规律紧密相关的；而在过去，汽车的生产与发展是由工程师决定的。

汽车以消费者期望为目标不断向前，通过推出革新技术从而提供满足顾客潜在需求的产品和服务。

将实用的观点和技术的掌握巧妙结合起来将会在汽车领域取得成功。这其中电气将会起到基础性的作用，而且在汽车工业发展目标（即安全、舒适、环保）中做出重要贡献。

1.2 汽车工业重要数据——来自 CCFA（法国汽车制造商协会）的数据

由于汽车的广泛使用使得汽车工业已经成为第一工业。

2 电动汽车及其驱动技术

对法国而言，在汽车生产部门流动的资金有 1000 亿欧元，占国内生产总值的 5%~6%，同时也聘用了 350000 名员工。

同样地，整个汽车相关行业提供了大概 250 万个工作岗位（其中 45 万在 upstream 产业，60 万在汽车服务行业和 100 万在汽车物流运输和旅游行业）。汽车的研发部门也有 1.7 万人，这也是重要的一部分并且有 80 亿欧元的资金支持。

全球汽车市场自 1998 年来一直在持续稳定增长，在 2007 年乘用车（PV）和商用车（LCV，排量在 3.5T 以下）增长量为 70303 辆（增长率 4.1%）。这种增长在新兴市场（如中国、印度、伊朗、南方共同市场等）较传统上的发达市场（如北美、西欧和日本市场）更加突出。

汽车的全球销售量自 2000 年来一直在稳步提升，即便在西欧和北美市场销售并不那么景气的情况下。这期间亚洲市场自 2000 年来每年都有 100 万辆汽车销售额的提升，这主要得益于中国经济的腾飞。

欧洲汽车市场的处境很大程度上反映了欧盟各国的经济环境。在德国，由于经济的相对萧条，汽车市场在 2000 年以来持续衰落。

在法国，由于家庭消费活力的不足、人们更愿意把钱存入银行和失业率居高不下等因素使得汽车市场仍有轻微的倒退。另一个基本趋势是柴油车的发展，它们在乘用车市场的份额从 1998 年的 24.8% 上升到了 2007 年的 52.6%。

从销售情况来看，北美市场是目前全球第一的地区，在 2007 年有 2380 万辆的销售额。和西欧一样，北美市场（美国、加拿大与墨西哥地区）表现出相对稳定的销售情况。

北美以流行“轻卡（轻型载货汽车）”而著称，比如说皮卡、货车和大型越野车。这几年来北美市场经历了各个汽车生产商间的价格大战。由于日本和韩国生产商的逐步介入，传统意义上北美汽车生产企业“三巨头”——通用公司、福特公司和戴姆勒-克莱斯勒公司的汽车市场占有率都有不同程度的下降。

亚洲太平洋地区的特点则是汽车市场的持续增长，这种繁荣首先体现的是中国汽车市场的活力。中国的 GDP 增长率在 2007 年超过了 11% 并且可以看到它的汽车市场连续几年都保持了大约 40% 的增长。

日本是在亚太地区内最重要的市场并且是全球第二大的汽车市场，同样有汽车市场持续增长的特点。日本市场对国外进口车辆的开放进程是非常缓慢的。

第2章 基本定义

2.1 基本概念

2.1.1 汽车能量的基本知识

车载燃油的能量在转化或转移的过程（摩擦、加热、泵送）中损失了其大部分。汽车制造商不断采取各种可能的措施来减少这些损失。

为了探讨能量的概念，我们需要先探讨一下效率问题。

效率指的是与驱动车辆所用能量相关的能量利用率。这直接影响耗油量，效率越高，汽车耗油量越低。

1. 汽车中的能量损耗的情况

注入发动机的燃油的化学能只有 30% 可转化为驱动车轮的动能。损耗在整个转化过程中一直存在，损耗越多效率就越低。估计 30% 的能量会以热的形式直接在发动机中损失，约 30% 会随尾气排走而损失，还有 10% 会在机械摩擦和驱动附件（水泵、空调器等）的过程中被消耗。

最后经过传动系统时，齿轮箱和传动链的机械传动效率会导致剩余 30% 能量中的小部分被进一步损耗。

所有这些损耗中的一小部分也被用来支持其他功能，如冷却系统所释放的热量被用来加热驾驶室，排气过程中所释放的热量用于支持排气后处理机制的运行。

2. 每个转换装置具有自己的效率

发动机的总效率（最高为 0.3）指的是供给曲轴的能量和燃油提供的能量之间的关系。更加准确地讲，是两个输出效率的乘积，即

1) 化学反应的效率，可以分解为

① 发动机循环工况的理论热力学效率，取决于压缩比。

② 考虑额外损耗情况下的效率，这表达了理论损耗所没有考虑的部分实际损耗（包括惯性、黏性、泵送等）。

③ 燃烧效率（燃烧过程使用不到燃油可提供的全部化学能）。

2) 机械效率，这是发动机中运动零件的摩擦以及驱动所有附件（水泵、喷油器、空调等）所造成的。

3. 根据发动机的类型不同（汽油机或柴油机），效率会产生变化

理论上讲，汽油机应具有更高的热力学效率。但实际上，柴油机总体效率更

高, 因为其压缩比较高 (约为 18:1, 而汽油机则为 10:1), 并具有较小的泵气损耗。

4. 如何提高效率

1) 提高汽油机的压缩比[⊖], 以提高热力学效率。

2) 降低损耗 (热损耗或由泵气导致的损耗)。

3) 优化燃烧室的形状, 尤其是其内部空气动力学特性, 以优化燃烧效率。

在接下来几年, 由于结合了各种技术, 可以把效率提高 10% ~ 20%: 汽油缸内直喷、强劲涡轮增压器以及可变配气所导致发动机排量小型化[⊖] (动力性不变的前提下, 在同一款车上可采用较小排量的发动机)。

2.1.2 汽车动力学的基本知识

2.1.2.1 汽车动力学知识回顾

汽车行驶阻力可以通过以下方程计算:

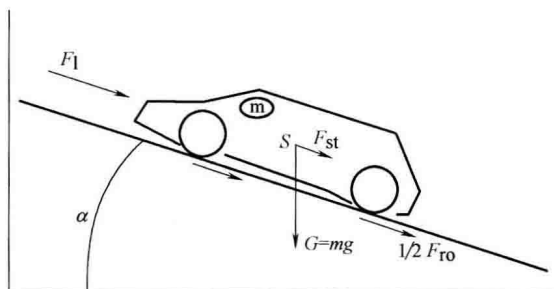
$$F_w = F_{ro} + F_{st} + F_1$$

式中 F_w —— 行驶阻力;

F_{ro} —— 滚动摩擦;

F_{st} —— 坡度阻力;

F_1 —— 空气阻力。



可以通过以下方式计算各个力:

$F_{ro} = fmg$, 其中 f 为滚动摩擦系数, 近似为 0.025。

$F_1 = 0.5\rho S_{cx} (v + v_o)^2$, 其中, $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $S_{cx} \approx 0.3 \text{ m}^2$ 。

$F_{st} = mg \sin\alpha \approx mg p\%$ 。

$F_w = fmg + mg p\% + F_1$ 。

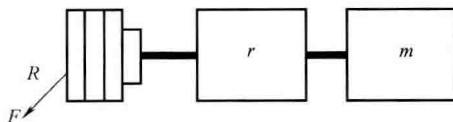
$S_{cx} = (\text{空气阻力系数} \times \text{迎风面积})$ 。

⊖ 压缩比指的是活塞在下止点和上止点时燃烧室的容积之比。该参数直接影响发动机输出特性。

⊖ 在相同性能表现的前提下, 减小发动机排量可减少油耗。通过增压的办法可以提高发动机性能比 (功率除以排量)。

2.1.2.2 驱动力

简单的传动链示意图（减速器-轮胎）如下：



驱动力可通过下式表达：

$$F = \frac{C_m r \eta}{R}$$

式中 F ——驱动力；

R ——车轮半径；

m ——电动机；

r ——传动比 V_m/V_r ，其中 V_m 为发动机转速， V_r 为车轮转速；

C_m ——发动机转矩；

η ——传动效率，一般为 0.90 ~ 0.98。

如果 $F > F_w$ ，那么汽车在加速；如果 $F < F_w$ ，那么汽车在减速。

我们可以很方便地计算出车轮处的功率为

$$P_w = F_w v$$

式中 P_w ——车轮处的功率；

v ——车辆速度；

F_w ——运动阻力。

我们再观察一下电动机转矩/速度的特性：

Ω_r 为车轮旋转速度；

C_r 为车轮处的转矩；

R 为车轮半径；

η 为齿轮箱效率；

r 为齿轮箱传动比；

Ω_m 为动力源转速；

C_m 为动力源扭矩。

为了确定电动机“m”的关键参数，应满足的条件为

根据坡道起步的要求确定 C_r ， $C_r = FR$ ；

根据最高速度的要求确定 Ω_r ， $\Omega_r = V/R$ 。

这使得我们可以对动力源主要参数（即 Ω_m 和 C_m ）的进行选择。

2.2 不同的电气传动系统

2.2.1 基本定义

1. 能量

指描述一个系统及改变其他系统状态的性能的（物理）量，用来表征物理系统做功的本领。

2. 能量属性

描述各种形式的承载能量的表现形式（机械、电气、化学、液压、热力、辐射或核能）。

3. 能量的类型定义

描述同一属性能量的参数（例如对电能来说，电压、电流、频率）。

4. 能量链

在基础设施和车辆之间可以进行交换的能源物质（如汽油、天然气、电等）。

5. 能量存储设备

可以用来存储能量的系统，而不会改变能量流（输入和输出）的属性和类型定义。

6. 一次能量来源

可用于生成能量的原材料或自然现象。

7. 能量发生器或能量源

用来产生（能量发生器）或传输（能量源）能量的系统，其能量来源于一次能源（如碳氢化合物、煤炭、铀等原材料，或者风、太阳、重力等自然现象）。

8. 车载能量发生器或能量源

用来产生和/或传输能量的系统，该能量被用于驱动车辆；带有能量载体，至少包括存储系统。

9. 能量传送器

保留能量属性，但是改变其类型定义的系统（齿轮箱、交流/直流转换器）。

10. 能量转换器

改变能量属性的系统（如电动机、散热器等）。

11. 单一能量链车辆

仅由唯一的能量链供能的车辆。

12. 多能量链车辆

由多于一个能量链供能的车辆。

13. 单一能量系统车辆

驱动系统只使用一个能量发生器和一个能量转换器的车辆。

14. 多能量系统车辆

驱动系统使用多个能量发生器和至少一个能量转换器的车辆。

15. 混合动力汽车

多能量系统车辆，其中至少一个能量发生器是可逆的。

16. 非混合动力汽车

多能量系统车辆，所有能量发生器均不可逆。

17. 能量途径

能量从能量源或存储单元到达车轮或另外一个存储单元的途径。

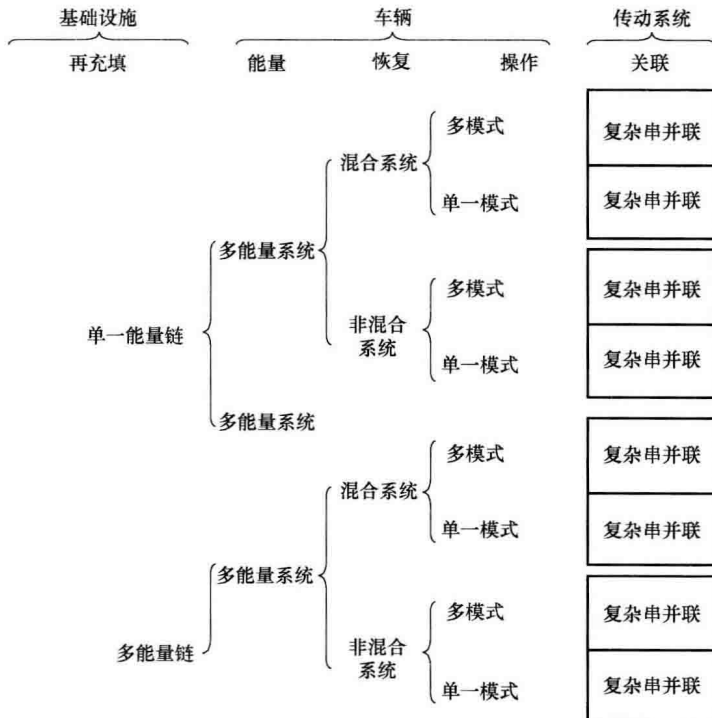
18. 单一模式车辆

车辆的模式（指用于传输驱动力的能量途径）由车辆管理系统自动进行选择。

19. 多模式车辆

车辆的模式（指用于传输驱动力的能量途径）由用户或车辆外部系统进行选择。

下图是由上述概念组成的树形结构，在此图中我们划分了不同层级，即基础设施（车辆动力系统的基本构造）、车辆、驱动系统和部件。



基础设施层面确定车辆和这个基础设施之间的连接关系（在此基础设施中

连接的数量和类型)。

在车辆层面,对各种能量系统是如何作用驱动车辆进行了详细说明(混合系统、这些系统的操作程序等)。

传动系统层面确定车辆的驱动力是如何产生的。

当然,这些层面是互连的,由于一些名词的误用,我们通常在讨论混合系统时会弄错层面。

一些例子:

热电混合动力车属于多能量系统,如果既能在电网取电给电池充电,又有油箱能填充碳氢燃料,则属于多能量链类型。

动力辅助系统无法在电网充电,因此属于单一能量链种类。

传统内燃机汽车和纯电动汽车是单一能量链和单一能量系统。

双燃料内燃机车属于多能量链/多能量系统/非混合/双模式/串联系统。

使用存储氧气和氢气的燃料电池汽车属于多能量链/多能量系统/非混合/单模式/串联系统。如果有车载驱动电池组,则变成多能量链/多能量系统/混合/混联系统。

在本章剩余部分,我们将主要探讨驱动系统,并详细介绍其组成部件。

2.2.2 驱动系统定义

1. 驱动系统

驱动系统是由一些可以传送能量流的部件组成的,驱动车辆前行的系统。其包括一个牵引系统和一个车载能量发生器。

2. 牵引系统

它是驱动系统的一个组成部件,提供车辆运动所需机械传动功能。由车轮及变速器,变速装置或齿轮箱以及发动机把来自能量发生器的能量转换为机械能。

3. 能量发生器或车载能量源

传动系统的一个组件,用来确保能量的存储和转换;由存储系统和转换系统构成(转换器和/或传送器)。

当发动机能直接接收存储在燃料箱中燃料的能源属性时,可能就不需要转换器了。

根据以上定义,可以做出驱动系统的结构图,如图 2.1 所示。

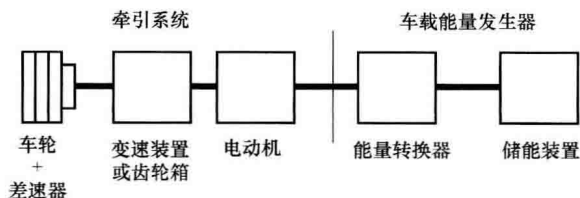


图 2.1 驱动系统

对上述信息进行了详细说明且呈现了驱动系统图后，将介绍混合驱动系统有关概念，如图 2.2 所示。

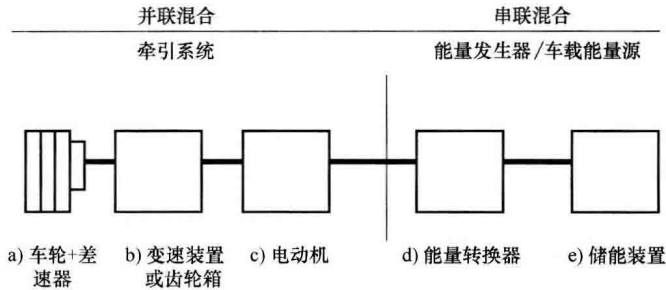


图 2.2 混合类型

混合驱动系统：

这是一个通过混合两个或两个以上单驱动系统而创建的驱动系统。

基于上述定义，我们现在来定义串联和并联混合驱动系统。

串联混合驱动系统：

—该系统为能量发生器混合系统。

—驱动力仅来源于单个原动机。

—通过两个或两个以上能量发生器混合来建立车载能量发生器。

并联混合驱动系统：

—该系统为牵引系统混合。

—通过混合两个或两个以上牵引系统来建立该牵引系统。

—当然，每个牵引系统需结合一个合适的能量发生器。

—车辆的运动性能由数个原动机保证。

但是，为了更好地将这些混合功能付诸实施，有必要引入耦合部件的概念。

耦合部件：

这是一个混合驱动系统部件，可以与多个单独驱动系统连接，从而构成混合系统。

为了完成这些详细说明的细目表（细目表和后面的 sub-category 相对应），现在，我们将对混合传动系统的子类进行分析。

因此，如果我们在分析一个驱动系统的标准图时，可以想象每个部件都可能转化为耦合部件。

1) 如果耦合部件放置在车轮处，就会获得双驱动链并联混合动力系统，如图 2.3 所示。

道路和车轮起到耦合部件的作用。

2) 如果把耦合部件放置在齿轮箱，就获得了双轴并联混合动力系统，如图