



节能减排技术丛书

J I E N E N G J I A N P A I



# 汽车液驱混合动力技术

姜继海 刘涛 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

节能减排技术丛书

# 汽车液驱混合动力技术

姜继海 刘 涛 编著



机械工业出版社

本书系统地介绍了液驱混合动力系统的组成和工作原理、设计、建模与仿真方法、系统控制策略设计和实验方法。主要内容有液驱混合动力汽车的研究概况、配置方式及关键技术；动态特性与建模、仿真；汽车液驱混合动力系统的设计机理、设计方法与参数优化方法；不同驱动形式的液驱混合动力汽车的再生制动策略；基于逻辑门限的能量利用策略及模糊控制理论和最优控制理论在控制策略中的应用；液驱混合动力汽车的实验台及实车实验研究方法和结果。

本书可作为高等院校车辆工程及相关专业研究生教学用书，也可作为车辆工程专业本科生的选修教材，同时可供新能源汽车设计和研究人员阅读参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

汽车液驱混合动力技术/姜继海, 刘涛编著. —北京: 机械工业出版社, 2011. 12

(节能减排技术丛书)

ISBN 978-7-111-36552-5

I. ①汽… II. ①姜… ②刘… III. ①混合动力汽车 IV. ①U469.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 241988 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: 张秀恩 责任编辑: 张秀恩

版式设计: 霍永明 责任校对: 樊钟英

封面设计: 赵颖喆 责任印制: 乔宇

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市胜利装订厂装订)

2012 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 9.5 印张 · 191 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-36552-5

定价: 29.00 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

策划编辑: (010) 88379770

社服务中心: (010) 88361066 网络服务

销售一部: (010) 68326294 门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 教材网: <http://www.cmpedu.com>

读者购书热线: (010) 88379203 封面防伪标均为盗版

# 前 言

目前，能源问题是制约社会可持续发展的关键因素之一，新能源汽车已成为我国解决能源和环境问题的国家发展战略。2010年10月28日我国政府发布的“十二五”规划的建议正式提出，在“十二五”期间培育发展的战略性新兴产业中，新能源汽车名列七大产业之中。

液驱混合动力汽车作为新能源汽车的一种，可有效提高汽车的燃油经济性、降低排放，逐步引起各国政府、研究机构及各大汽车厂商的高度重视，但目前对整车从建模、参数优化、智能控制策略及参数优化、实验台实验到实车实验进行系统研究的还很少。本书旨在在这方面做出较系统的介绍。

本书主要内容取材于作者的相关研究、博士学位论文及在国内外发表的论文，是作者多年研究工作成果的总结，全文共分六章，主要内容包括：液驱混合动力汽车的研究概况、配置方式及关键技术；动态特性与建模、仿真；汽车液驱混合动力系统的设计机理、设计方法与参数优化方法；不同驱动形式的液驱混合动力汽车的再生制动策略；基于逻辑门限的能量利用策略及模糊控制理论和最优控制理论在控制策略中的应用；液驱混合动力汽车的实验台及实车实验研究方法和结果。

由于作者的水平有限，一些新的领域涉足的时间还不长，有些内容只是作为一种尝试，没有来得及对有些内容进行很好地融合、对有些结果作仔细的验证与分析，本书定有错误和疏漏之处，望同业学人不吝指正，本书编著者将不胜感激。感谢本文引用参考文献的作者，由于本书写作时间比较长，有些引用文献可能遗忘或疏漏，恳请有关作者谅解，感谢那些致力于液驱混合动力汽车研究和应用的默默奉献的无名英雄。

参与本书编著的还有：王昕博士、赵立军博士和罗念宁。本书中引用的研究课题及本书的写作过程曾经得到哈尔滨工业大学机电工程学院流体控制及自动化教研室的各位教师和博士生、硕士生的支持与协助，也曾经得到许多同行和朋友的关心与帮助，在此深表感谢。

本书中内容的研究及本书的出版是在国家自然科学基金、车辆传动国防科技重点实验室基金及浙江大学流体传动及控制国家重点实验室开放基金的资助下完成的，在此一并表示感谢。

姜继海 刘 涛  
2011年6月

# 目 录

## 前言

<b>第1章 绪论</b> .....	1
1.1 液驱混合动力汽车的提出 .....	1
1.2 混合动力技术方案对比分析 .....	3
1.2.1 能量转化技术 .....	3
1.2.2 环保效果 .....	6
1.2.3 安全稳定性 .....	6
1.3 液驱混合动力汽车配置方式 .....	7
1.4 国内外液驱混合动力汽车的研究概况 .....	10
1.4.1 国外液驱混合动力汽车研究概况 .....	10
1.4.2 国内液驱混合动力汽车研究概况 .....	13
1.5 液驱混合动力汽车关键技术 .....	13
参考文献 .....	15
<b>第2章 液驱混合动力汽车参数优化</b> .....	19
2.1 液驱混合动力汽车能量流、功率流需求分析 .....	19
2.2 发动机的选择 .....	20
2.3 恒压变量泵的选择 .....	21
2.4 液压泵/马达功率的选择 .....	23
2.5 液压蓄能器的选择 .....	26
2.6 变速器传动比的确定 .....	28
2.7 主传动比的选择 .....	29
2.8 转矩耦合器传动比的选择 .....	30
2.9 关键元件参数的优化匹配 .....	30
参考文献 .....	39
<b>第3章 液驱混合动力汽车动态特性与建模</b> .....	41
3.1 概述 .....	41
3.1.1 系统模型 .....	41
3.1.2 车辆仿真技术 .....	42
3.2 驾驶员建模 .....	44
3.3 发动机模型 .....	45
3.4 液压泵/马达建模 .....	47
3.5 液压蓄能器建模 .....	49
3.6 传动系模型 .....	51
3.6.1 离合器建模 .....	51

3.6.2	变速器模型	52
3.6.3	耦合器模型	52
3.6.4	驱动桥模型	53
3.7	车辆动力学模型	53
3.7.1	车轮模型	53
3.7.2	汽车行驶动力学模型	54
3.8	整车控制策略模型	56
3.8.1	功能分层控制	56
3.8.2	整车控制策略	56
3.8.3	牵引力控制	57
3.8.4	制动能量回收	58
3.8.5	制动力控制	58
3.9	混合动力系统建模	59
3.10	并联式液驱混合动力汽车结构分析	60
3.10.1	双轴并联式结构	60
3.10.2	转矩合成式动力传动系统	61
3.10.3	转速合成式动力传动系统	62
3.10.4	牵引力合成式动力传动系统	63
3.10.5	单轴并联式结构	63
3.10.6	并联式液驱混合动力汽车后向仿真模型	64
3.10.7	整车模型验证	64
	参考文献	66
<b>第4章</b>	<b>液驱混合动力汽车的制动控制策略</b>	<b>68</b>
4.1	概述	68
4.2	液压再生制动策略	68
4.2.1	车辆制动系统的要求	68
4.2.2	再生制动基本策略	69
4.2.3	制动系统数学模型	71
4.3	并行复合制动系统再生制动控制策略	73
4.3.1	并行再生制动控制算法约束条件分析	73
4.3.2	后轮驱动时的并行再生制动控制算法设计	74
4.3.3	后轮驱动时的并行复合制动控制策略	82
4.3.4	前轮驱动时的并行再生制动控制算法设计	82
4.4	线控复合制动系统再生制动控制策略	91
4.4.1	最优能量回收算法	91
4.4.2	最优能量回收控制策略	92
4.5	再生制动仿真分析	94
4.5.1	不同控制策略的制动能回收效果	94
4.5.2	不同制动模式仿真分析	94

4.5.3 城市行驶工况下制动能回收效果研究 .....	98
参考文献 .....	99
<b>第5章 液驱混合动力汽车能量利用策略 .....</b>	<b>100</b>
5.1 概述 .....	100
5.2 基于逻辑门限的能量利用策略 .....	100
5.2.1 系统工作原理 .....	100
5.2.2 控制系统结构 .....	102
5.2.3 逻辑门限参数的选择及工作模式分析 .....	103
5.3 能量利用策略参数优化方法 .....	106
5.3.1 参数优化数学模型 .....	106
5.3.2 能量利用策略参数离线优化 .....	107
5.3.3 基于逻辑门限的能量利用策略仿真 .....	109
5.4 模糊逻辑转矩控制策略 .....	111
5.4.1 最佳工作模式切换规律 .....	112
5.4.2 模糊逻辑转矩控制策略的实现 .....	113
5.4.3 仿真结果及分析 .....	115
5.5 基于动态规划的全局最优控制 .....	116
5.5.1 功率管理策略选择 .....	117
5.5.2 随机动态规划法简介 .....	118
5.5.3 仿真分析 .....	120
参考文献 .....	123
<b>第6章 液驱混合动力实验 .....</b>	<b>125</b>
6.1 液驱混合动力模拟实验平台设计 .....	125
6.1.1 模拟实验台总体结构 .....	125
6.1.2 控制系统设计 .....	127
6.2 模拟实验台数值关系 .....	128
6.3 模拟实验 .....	129
6.3.1 转速控制模拟实验 .....	129
6.3.2 再生制动及复合制动模拟实验 .....	131
6.3.3 循环工况模拟实验 .....	135
6.4 液驱混合动力实车实验 .....	137
6.4.1 再生制动实验 .....	138
6.4.2 能量转换效率实车实验 .....	141
6.4.3 道路实验结果 .....	141
参考文献 .....	143

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 液驱混合动力汽车的提出

随着人类对物质产品需求的不断扩大，世界范围内工业生产、交通运输等产业迅速发展。生产必消耗能源，而能源利用效率低则产生超标的污染排放，由此而产生的环境污染问题日益严重，而现有石油、煤矿资源储量的不断减少及其不可再生特性与能源的高度需求量之间的矛盾也日益凸显。能源已经成为影响世界政治局势的一个重要因素，能源与环境问题已成为实现人类社会可持续发展亟待解决的关键问题。

从能源角度来看，目前对能源的需求以石油产品为主，而根据世界汽车制造商协会的统计，汽车每年消耗的石油量约占世界石油年消耗总量的 50%。以目前的开采水平，地球上已探明的石油资源仅可供开采 60 ~ 100 年。2006 年美国 Oak Ridge 国家重点实验室一项调查分析指出，未来的生产耗能比重将逐渐下降，家用小汽车耗能水平持平，而重型卡车、轻型卡车、航空、海运、铁路运输的耗能将持续增加，而其中以汽车耗能所占比例最大，如图 1-1 所示。与世界发达国家相比，中国的汽车油耗和尾气排放水平偏低。

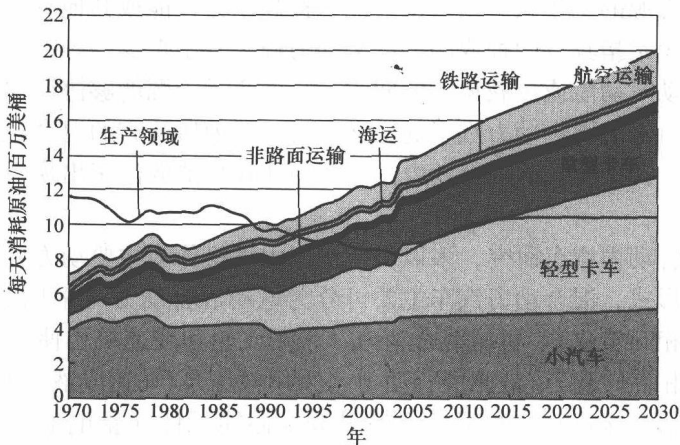


图 1-1 生产和交通领域石油产品消耗趋势 (1 美桶约为 159dm<sup>3</sup>)

从环境角度来看，由严重恶化的大气状况所引起的光化学污染、酸雨以及非正常气候等因素严重破坏和影响了人类赖以生存的地面生态环境。环境问题不仅是一



国一地的问题，更是关系到全球人类生存的重要问题。早在 1967 年，美国加利福尼亚州就颁布了世界上第一部限制排放法案《1967 空气质量法案》，并在其后推广至全美。2009 年 11 月 26 日，我国提出了控制温室气体排放行动目标——到 2020 年全国产生的二氧化碳总值比 2005 年下降 40% ~ 45%。能源利用的效率低下导致排放污染水平上升，能源消耗总量的不断提高则加重了这一污染。2010 年，汽车尾气排放已占空气污染源 64%。

能源和环境问题迫切要求发展节能环保汽车，这已成为世界共识。传统内燃机汽车技术已经非常成熟，因而通过提高内燃机和传动系统的效率来减少油耗和降低污染已很难获得实质性的效果。新能源汽车成为世界各国节能环保汽车的主要研究方向。

从能源问题的最终解决途径来看，新能源汽车必然是未来的最终研究内容。目前的新能源汽车主要有太阳能电池汽车、蓄电池汽车、混合动力汽车和新燃料汽车。太阳能作为一种无限资源的能量，其储备量完全能够满足人类需求。但目前太阳能的转化和利用成本高且效率低，无法满足大功率汽车的使用要求，因而只在一些概念车和专门比赛中应用；蓄电池汽车的主要能量来源是电网电能，而目前电网中的电能主要来源仍是不可再生资源，因此其生命周期内总效率较传统内燃机汽车很难有质的飞跃；新燃料汽车目前研究最多的是液氢燃料技术，其技术方案具有价格昂贵、质量体积过大、危险性高等缺点。

在新型能源尚未找到安全、稳定和低成本的解决方案之前，能够延缓能源消耗和降低污染排放的混合动力汽车成为世界各国首要的研究重点。广义上的混合动力汽车是指具有两种或两种以上动力源的汽车。根据汽车的工作情况，混合动力汽车可以调整各动力源的工作状态以获得节能、提高动力性能或其他有益的效果。狭义的混合动力汽车是指具有两种或两种以上动力源，其中至少一种动力源的能量是来自于对汽车制动时动能或负载势能的回收，且多个动力源能够协调工作的汽车。从目前世界各国对电动混合动力汽车的定义来看，目前所研究的混合动力汽车属于狭义概念的范畴。狭义概念的混合动力汽车，即使在新能源汽车出现后仍具有巨大的发展潜力。

现有的混合动力汽车研究，多以传统汽车内燃机作为主要动力源。根据内燃机之外的动力源形式，混合动力汽车主要可分为电动混合动力（采用电动机/发电机使动能和电能相互转化）、机械混合动力（采用飞轮和变速机构使机械能在飞轮和汽车传动系间相互转化）、液驱混合动力（采用液压泵/马达或液压变压器使动能、势能与液压能相互转化）三种形式。通过改变储能元件（蓄电池、超级电容、液压蓄能器、飞轮等）与执行元件（电动机/发电机、液压泵/马达、变速机构）的配置关系，还可以形成其他形式的混合动力方案，如飞轮储能型液驱混合动力方案等。

近年来，液驱混合动力汽车的研究取得了很大进展，逐步引起各国政府、研究

机构及各大汽车厂商的高度重视。该技术利用液压泵/马达可工作于四象限的特性，回收传统汽车在制动时浪费的动能，并存储于液压蓄能器中，所回收的能量可以在汽车起动或加速时提供辅助动力，从而减小发动机装机功率或提高汽车短时驱动能力，使发动机更多地工作在经济区域，降低油耗，减少有害尾气排放。液压系统大功率密度的特点使得该技术尤其适用于具有频繁起停工况的中、重负载汽车中。液驱混合动力汽车已被美国环境保护署（EPA）列为节能环保汽车三大关键研究内容之一（电动混合动力汽车、液驱混合动力汽车和清洁柴油机技术）。

我国对于液驱混合动力汽车的研究起步较晚，研究范围较小，技术进步较慢。根据目前国际商业惯例，首先研发出新技术的企业往往将该技术进行规范化，使后人者不得不承受高昂的技术使用费用，从而形成事实上的技术垄断。在国际汽车和制造业厂商对该技术进行大量研究试制，并形成技术垄断之前，尽快开展相关的理论和应用基础研究，掌握自主知识产权，具有重要的经济价值。汽车液压混合动力技术的研究对节约有限的石油资源，保护环境，提高汽车性能，实现社会可持续发展具有重要和深远的意义。

## 1.2 混合动力技术方案对比分析

目前汽车混合动力技术的研究主要有三种方案，即电动混合动力、机械混合动力和液驱混合动力。三种方案各自的优势和缺点决定了混合动力方案的选取。下面针对汽车传动系部分，从能量转化、环保效果、安全稳定性等方面对三种方案进行比较。

### 1.2.1 能量转化技术

混合动力汽车将制动时汽车的动能进行回收并存储的过程称为再生制动，被存储的能量称为再生能量。

混合动力汽车再生制动和再生能量释放的过程，本质上是能量由一种形式向另一种形式的转化过程。能量的转化效率和转化能力很大程度上决定了混合动力汽车的总体效率。决定能量转化效率和能力的关键元件有能量转化元件（设备）和能量存储元件两种。

电动、机械和静液传动三种方案的能量转化元件（设备）分别为电动机/发电机、齿轮减速机和液压泵/马达。三种元件（设备）的效率分别约为80%~90%，95%~98%和80%~90%。从转化设备对比来看，机械传动损失较小，效率最高，而电动机/发电机或液压泵/马达除机械效率之外还要包含电磁效率或容积效率，因此总效率偏低，但三种方案差别不大。

从能量存储装置的角度进行比较，目前常用的储能装置为蓄电池、超级电容、飞轮组和液压蓄能器。蓄电池以电化学能的方式储存能量，是电动汽车和电动混合

动力汽车中最常用的储能元件，其中主要有铅酸蓄电池、镍氢电池和锂离子电池。铅酸电池技术成熟、价格低廉，但其能量密度较低，耐过充过放能力差，高效率充放电窗口小，并且其性能对温度变化较为敏感。镍氢电池具有较好的耐过充电特性，安全性较好，充放电效率较高，成本较低，适合混合动力汽车。锂离子电池能量密度约为  $100\text{Wh/kg}$ ，功率密度约为  $300\text{W/kg}$ ，充放循环寿命长，但成本较高，安全性能也有待提高。

超级电容是近年来新兴起的电储能元件，相对蓄电池产品，超级电容功率密度大 ( $2\sim 4\text{kW/kg}$ )、循环效率高 ( $92\%\sim 98\%$ )，具有全充和全放特性。由于超级电容的储能原理为物理变化而不经化学反应，其充放循环承受能力强、寿命长。但其能量密度低于蓄电池 ( $7\sim 10\text{Wh/kg}$ ) 且成本高。

飞轮组储能是将汽车动能转化为飞轮组的转动动能，不改变能量的形式，因此效率很高。对于较为简单的混合动力系统，采用普通金属飞轮成本低，易于加工，但其能量密度很低，在汽车中使用不具有实用价值。混合动力汽车所用飞轮组目前多采用超级飞轮技术。超级飞轮材料选用比强度（抗拉强度/密度）较高的碳纤维材料作为轮毂，外圈使用钢环，将其封闭于真空环境下高速运转（约  $200000\text{r/min}$ ），具有较高的功率密度 ( $2\sim 4\text{kW/kg}$ ) 和能量密度 ( $125\text{Wh/kg}$ )。有研究将其用作重型卡车混合动力传动系统的储能元件，F1 赛车联合会 (FIA) 的迈凯伦车队研发了使用该技术的 KERS（动能回收系统），但其造价高于使用电储能技术的 KERS。

液压蓄能器以液压能的方式来存储能量，具有高功率密度、高循环效率、长时间储能以及全充全放能力强等特点。液压蓄能器采用物理方式存储能量，具有优越的工作循环承受能力和寿命，但其能量密度较低。液压蓄能器可分为重力式、弹簧式和充气式三种。其中充气式中的囊式液压蓄能器因其响应快速、稳定性好、充放寿命长等优点而被广泛使用。囊式蓄能器的效率受皮囊内气体比热容的影响较大，为提高比热容，有研究者向气囊内充入橡胶材质泡沫，使囊式蓄能器的效率提高至  $98.2\%$ 。采用纤维缠绕技术制作蓄能器壳体使其壳体重量只有传统液压蓄能器的  $1/2\sim 1/10$ ，能够极大地提高其功率和能量密度。

蓄电池、超级电容、飞轮和液压蓄能器等储能装置的功率密度和能量密度如图 1-2 所示。

相同功率的传统汽车改造成并联混合动力汽车所增加的重量和改造成串联混合动力汽车后传动系统的总重比较如图 1-3 所示。

图 1-3 表明了对传统汽车改造时采用静液传动方案所增加的重量最小，因而在汽车正常行驶时由于载重增大所增加的油耗最少。混合动力汽车回收的能量主要来源于制动时汽车的动能，而通常期望的制动时间随车重的增加变化不大，即储能装置所需的功率密度随车重增加而增大，亦即表明液压蓄能器更加适合质量较大的汽车。

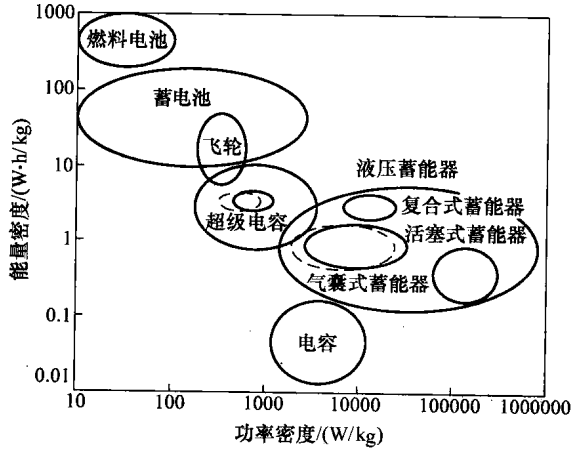
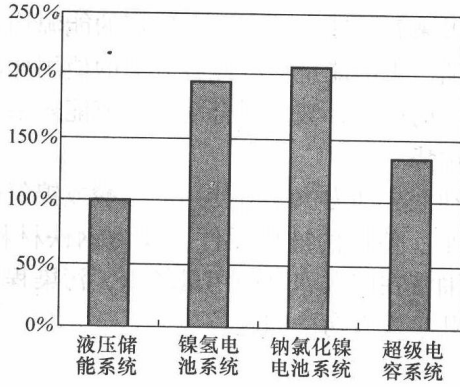
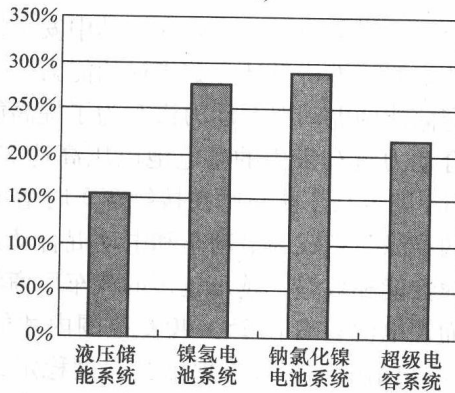


图 1-2 储能装置的能量密度和功率密度



a)



b)

图 1-3 混合动力系统重量对比

a) 并联混合动力改造增加车重对比

b) 串联混合动力系统重量对比

### 1.2.2 环保效果

对环保的评价应该涵盖产品全生命周期，即对混合动力技术从原料制备→生产加工→使用期→报废处理周期，结合使用耗能造成的当量能源消耗和污染排放进行综合评价。单独从产品使用阶段进行评价，往往结论与实际情况相差较大。

以电动车的环保评价为例：单独从使用期来看，电动车的排放几乎为零（视电池类型有区别）；从原料制备阶段和使用耗能来源来看，其主要使用电能，在我国电能主要来源为火电站，而我国火电站的污染水平相对较高。对当量能源消耗进行比较，效率较高的电动车综合能源效率约为 20.8%，略高于燃油汽车的 12%，对传统太阳能电池来说，其综合能源效率甚至为负值；从报废处理周期来看，目前在电动车上应用最多的铅酸电池、镍氢电池中所含的重金属如果处理不当会造成严重且永久性的土地毒化，尤其铅粉尘浓度过大可造成生物死亡，其污染危害较通常所知的尾气污染有过之而无不及，而对废旧电池的处理目前仍缺乏高效的手段和相关法规。

从使用期的环保效果来看，混合动力汽车使用的能源均为汽油或柴油，其回收的能量也可以追溯至燃油产生的能量，因此各方案的使用耗能和污染排放主要受汽车节能效果的影响。如此前所述，液驱混合动力在节能效果上，尤其是在中、重负载汽车中应用具有一定优势。

与电动车类似，电动混合动力汽车所使用的铅酸或镍氢电池同样存在后期处理问题；液驱混合动力汽车所使用的液压元件主要为钢铁材料，具有成熟的回收技术，而其所使用的液压油液在闭式回路中用量较少，污染程度有限；飞轮储能混合动力汽车的后期处理则几乎没有污染问题。

### 1.2.3 安全稳定性

安全稳定性包括安全性和稳定性两方面内容，其中安全性主要指对与汽车相关人员的安全保障，稳定性主要指维持设计参数指标的能力。

采用电池或超级电容储能的电动混合动力汽车为了提高能量回收率必须使用高电压，如丰田普锐斯混合动力汽车采用的蓄电池电压高达 273.6V，更大功率汽车的电压数值将会更高。FIA 的宝马车队技师在接触赛车时遭电击的事故警示了高电压造成的危险，高电压的绝缘防护成为电动车和电动混合动力汽车安全性的关键问题之一。为了提高蓄电池性能和效率，越来越多的汽车厂商将未来的电动汽车储能装置定位在锂电池上。而锂电池只有在 25 ~ 40℃ 范围内才能发挥最大效率并保持最长寿命，高电压输入/输出情况下则很难保证其温度稳定，并且过量高电压充电会导致其内部自燃，同样是 FIA 成员的红牛车队研发实验室储能电池引发的火灾就是锂电池自燃造成的事故之一。电动汽车或电动混合动力汽车，尤其是采用电动轮或轮边电机驱动的汽车在涉水时的绝缘问题也不易得到保障。

从稳定性考虑，由于目前电池技术水平限制，单体蓄电池和超级电容都无法储

存足够的能量和功率。为了使电池或超级电容的容量与再生制动相匹配，目前采用的方式是将单体电池或超级电容进行串联。这样就涉及到单体电池或超级电容的不一致性问题。不一致性问题是指电池组在长期充放电过程中，由于电池组内各单体电池间充电接受能力的差异、自放电率的差异、容量衰减速率的差异，电池组内各单体荷电量差距越来越大，呈发散趋势，造成电池组内部电池离散性加大，个别电池性能衰减加剧，从而导致整组电池失效。对于锂离子电池组，由于其必须对单体电池的电压进行单独管理，电压管理设备复杂程度和成本也将随电池组的规模呈几何级数增加，而其可靠性则呈几何级数下降。

与电动混合动力相似，液驱混合动力汽车也会尽可能使用更高的系统压力来提高系统性能和效率。液压蓄能器在超过其安全压力的冲击下最主要的失效形式也往往是液压蓄能器皮囊破裂造成氮气与油液混合。即便如此，高压液压系统的管路元件连接部分等仍具有一定的危险性，但液压系统的抗振动和冲击性能以及防水密封性能均显著高于电器元件。液压蓄能器在充放过程中效率基本保持不变且全充全放不影响其性能和使用寿命，因而不存在充电窗口和充电阈值等限制，具有更高的实用价值。液压元件功率密度大，采用的储能元件较少，因此可靠性较高，并且按照其功率密度，在相同功率下采用静液传动混合动力系统使汽车增加的重量仅为电动混合动力系统所增加的重量的一半左右。

宝马赛车电击事件的出现，使更多 F1 车队转而开始寻求购买雷诺车队的飞轮储能 KERS 技术，相比之下，采用飞轮储能的混合动力汽车的安全性更高。在解决了其真空密封和润滑等技术难题后，飞轮储能混合动力系统较电动混合动力系统的功率密度更大。在相同功率下，飞轮储能 KERS 比电动 KERS 的重量小 1/2，而造价低 3/4。但目前其相关技术无法获取或成本过高，因此国内的飞轮储能混合动力系统仍多采用功率密度小、重量大的钢质飞轮，系统在以较高速运行时空气扰动阻力造成的能量损失较大，而且对轴承和飞轮动平衡要求很高，具有一定危险性。转动惯量较大的飞轮或飞轮组旋转时所产生的陀螺效应对汽车高速过弯转向力矩的影响是其控制中的难点问题。

综合上述比较结果，液驱混合动力系统具有如下优势：

- 1) 液压元件具有功率密度大的优势。
- 2) 液驱混合动力系统循环效率高，全充全放能力强，充放循环寿命长。
- 3) 采用液驱混合动力系统在全生命周期内对能源的利用效率较高，对环境造成的污染较小。
- 4) 液驱混合动力系统安全性较高，系统可靠性和稳定性较强。

### 1.3 液驱混合动力汽车配置方式

根据主动力源与液压泵/马达的连接方式，液驱混合动力汽车的配置方式可以

分为串联式和并联式两种基本形式，如图 1-4、图 1-5 所示。

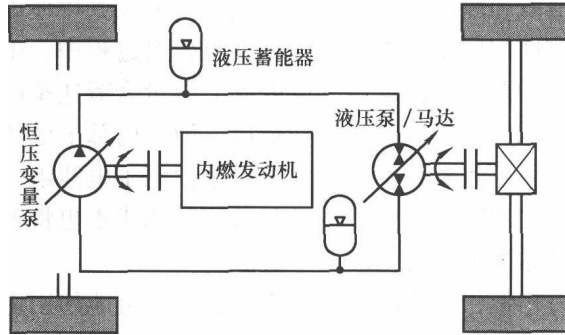


图 1-4 液驱混合动力汽车串联式配置

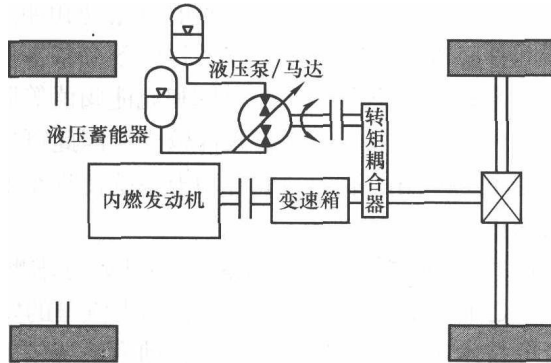


图 1-5 液驱混合动力汽车并联式配置

从图 1-4 和图 1-5 中可以看出，串联式配置的主要特点是发动机只驱动恒压变量泵，为液压系统供油液形成恒压系统（CPS），而不直接驱动传动系统，连接在恒压系统中的液压泵/马达用来驱动车桥，从而使车轮克服阻力转动，储能用的液压蓄能器连接在恒压系统的高压油路中；并联式配置则不需要建立恒压系统，发动机直接驱动主传动轴并将动力传递至车桥，液压泵/马达与主传动轴并联，并可以切断其间的连接。

并联式配置保留了传统汽车的传动系，传统汽车不改变其主体结构而额外增加一套混合动力系统即可实现该配置，因此易于实现对传统汽车的改装。并联式汽车的混合动力系统非全时工作，因此对液压泵/马达的功率要求较小，持续运行时间短，混合动力系统的故障不会造成整车无法运行。并联式混合动力系统成本低，便于改造，可靠性高，但不易控制，节能效果较串联式差。

串联式配置用液压传动系统取代了传统汽车的传动结构，使用液压泵/马达直接驱动车桥。发动机只驱动恒压变量泵，因而其工作状态基本独立于外界负载，可以使其在一个相对经济的区域进行工作。串联式配置可以通过液压泵/马达的变量调节实

现汽车的无级变速，易于实现起动/制动控制，对制动能的回收再利用效率较高。但在正常运行状态下效率相对较低（此结论是对双桥或单桥驱动汽车而言的，对多驱动桥汽车未必如此），并且混合动力系统的故障将导致整车无法运行。

对上述两种基本连接形式进行组合可以获得混联式结构，如图 1-6 所示。而对串联式连接进行变化可以得到轮边驱动式的配置方式，如图 1-7 所示。

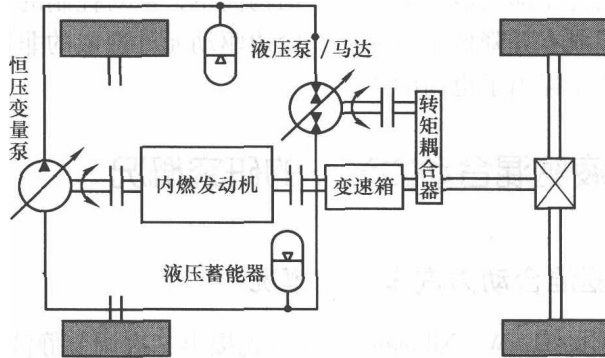


图 1-6 液驱混合动力汽车混联式配置

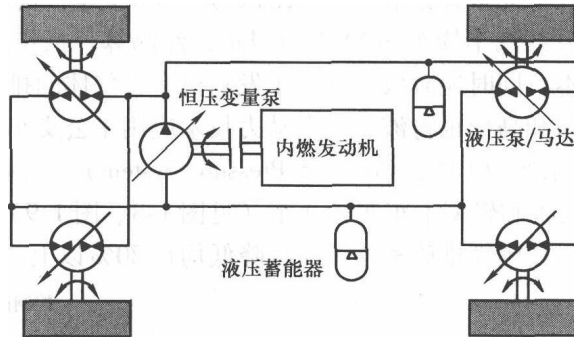


图 1-7 液驱混合动力汽车轮边驱动式配置

混联式配置理论上可以实现串联式和并联式配置的协调组合，从而实现混合动力汽车节能性和动力性的最优状态。但是其复杂的结构导致了整车运行可靠性降低，同时还导致车体重量、设计和安装成本大幅增加。混联式配置对串、并联两种工作模式的切换控制也更为复杂。从所获得的资料来看，目前混联式混合动力汽车仍停留在理论研究阶段，尚未出现相关的实验平台和样车。

轮边驱动式配置。本质上属于串联形式，所不同的是其将驱动元件直接作用于单独的车轮。各驱动元件并联在恒压系统中，利用恒压系统下各并联元件可以互不干涉独立工作的特性，可以独立调节其转矩或转速。轮边驱动式配置使得车体的布局可以更加自由灵活，在一些特种汽车（如飞机牵引车、葡萄收割机）中可以使其双侧车轮中部空间能够安装执行机构和装载空间设备，在需要多轮组驱动的载重



汽车中可以增加有效装载空间并减少多级机械传动/分动造成的能量损失。相对传统汽车的传动系，轮边驱动式配置能够从原理上避免车桥差速器在地面附着力不足情况下打滑甚至失控的发生而不增加额外的能量损失，适合应用于行驶路面条件不固定或较为恶劣的城市-野外两用汽车。对驱动轮采用独立的驱动形式也能降低集中驱动对传动系强度的要求，因而在一些大功率工程和运输汽车中均使用液压马达轮边驱动方式。轮边驱动式混合动力汽车结构简单，但对控制的要求很高，使用驱动元件多，增加了成本并降低了可靠性。轮边驱动元件造成的非簧载质量增加对车体悬挂方式的设计也提出了更高的要求。

## 1.4 国内外液驱混合动力汽车的研究概况

### 1.4.1 国外液驱混合动力汽车研究概况

1977年，德国的 H. W. Nikolaus 教授首先提出二次调节静液传动概念。其后，德国的 W. Backé 教授和 H. Murrenhoff、F. Metzner、R. Kodak 等学者对二次调节静液传动技术的控制及节能规律进行了深入的研究。1985年，德国生产出液压蓄能器储能的复合传动公共汽车样车 MAN Hydrobus，经测算，三年内汽车节省的开支就可以收回改装成本，同时还有效地降低了发动机有害气体的排放。

日本的汽车公司和高校也将液驱混合动力技术应用于公交车领域，并称液驱混合动力系统为恒压系统（CPS，Constant Pressure System）。三菱公司生产了基于 CPS 的混合动力公交车和轻型卡车实验样车（见图 1-8、图 1-9），前者在东京等城市试运营，数据显示其尾气排放和燃油消耗降低均在 20% 以上。

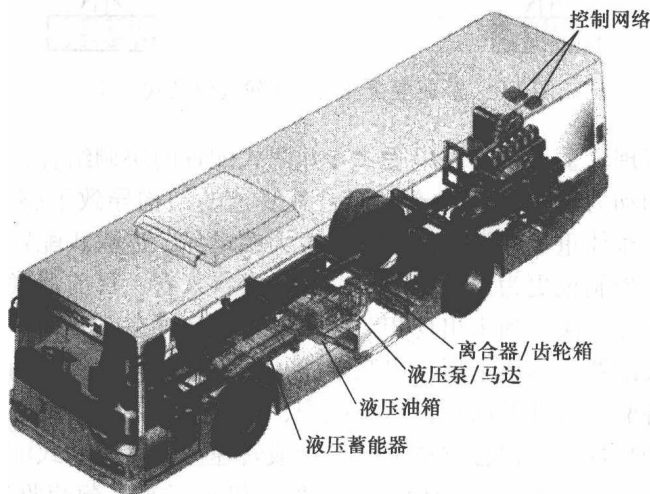


图 1-8 三菱公司 CPS 混合动力公交车