



普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

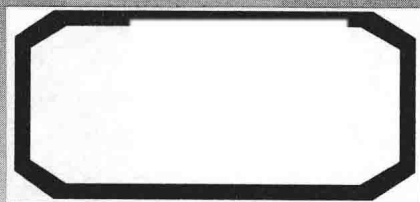
新能源汽车 传动系统智能设计

Intelligent design of new energy vehicle
transmission system

宋朝省 朱才朝 李洪鑫 © 主编



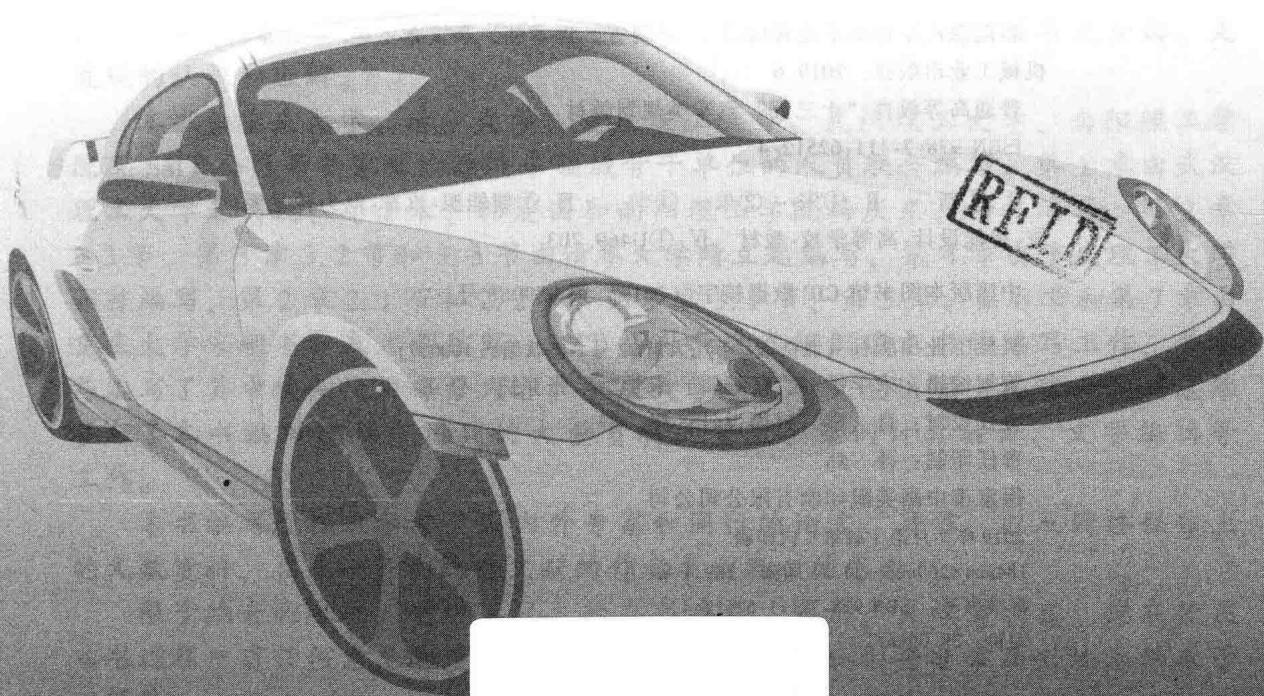
 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

新能源汽车传动系统智能设计

主编 宋朝省 朱才朝 李洪鑫
参编 郭 栋 隋立起 秦训鹏 韩爱国
邓小禾 冯庆东 杨 样



机械工业出版社

本书内容循序渐进,由浅入深,注重理论知识与实际工程案例的紧密结合,叙述简明,图文并茂,易于理解和掌握。全书共7章,主要内容包括:绪论、新能源汽车动力驱动形式与传动系统设计、高速齿轮传动宏观参数设计、高速齿轮传动微观修形设计、高速齿轮系统动态特性分析基础、纯电动汽车轮边减速器实例建模与分析、纯电动汽车差减速器实例建模与分析。全书将相关理论知识与 MASTA (应用软件) 实例相结合,使读者对新能源汽车传动系统设计和分析有更全面、更直观的认识和理解。

本书可作为本科院校、高职院校机械工程类,机械设计、车辆工程等专业所开设的必修课或选修课的教材,也适合新能源汽车开发等相关领域的工作者(大专院校教师、科研人员、企业研发设计人员)阅读。

本书配有 PPT 课件、操作视频、教学大纲、试卷及答案等配套资源,采用本书作为教材的教师,可以登录 www.cmpedu.com 注册下载,或向编辑 (tian.lee9913@163.com) 索取。

图书在版编目 (CIP) 数据

新能源汽车传动系统智能设计/宋朝省,朱才朝,李洪鑫主编. —北京:机械工业出版社,2019.6

普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

ISBN 978-7-111-62512-4

I. ①新… II. ①宋… ②朱… ③李… III. ①新能源-汽车-电力传动系统-智能设计-高等学校-教材 IV. ①U469.703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 089988 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:宋学敏 责任编辑:宋学敏 张亚捷 任正一

责任校对:肖琳 封面设计:张静

责任印制:孙炜

保定市中华美凯印刷有限公司公司

2019年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·11.75印张·289千字

标准书号:ISBN 978-7-111-62512-4

定价:38.00元

电话服务

客服电话:010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

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

机工教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

汽车产业是国民经济的重要支柱产业，在国民经济和社会发展中发挥着重要的作用。面对能源短缺和环境污染的压力，低噪声、低排放、综合利用能源成为当今汽车工业重要的发展方向，其中纯电力驱动是新能源汽车发展和汽车工业转型的主要战略取向。传动系统作为保障新能源汽车动力传递的重要核心，其服役性能直接决定着整车的工作性能、可靠性与舒适性。与传统内燃机汽车相比，新能源汽车简化了离合器、扭转减振器，减速器与电机直接耦合，多采用固定速比。此种集中式驱动方式的传动系统极为紧凑，且电机输入转速高（最高转速在 10000r/min 以上），要求传动系统体积小、噪声低、可靠性高，从而对齿轮传动系统的设计提出了更高的要求。

本书内容循序渐进，由浅入深，注重理论知识与实际工程案例的紧密结合，叙述简明，图文并茂，易于理解和掌握。全书将相关理论知识与 MASTA（应用软件）实例相结合，以使读者对新能源汽车传动系统设计和分析有更全面、更直观的认识和理解。

本书由重庆大学、清华大学、重庆理工大学、武汉理工大学、南阳理工学院及 SMT 公司等多家新能源汽车领域骨干单位的人员联合编写。第 1 章由武汉理工大学秦训鹏、邓小禾、韩爱国和南阳理工学院冯庆东、杨样编写，第 2 章 2.3 节、第 3 章 3.2 节和 3.3 节由清华大学隋立起编写，第 4 章由重庆理工大学郭栋编写，第 2 章 2.1 节和 2.2 节、第 3 章 3.1 节、第 5 章、第 6 章和第 7 章由重庆大学宋朝省和朱才朝编写。SMT 公司李洪鑫组织了本书的编写工作，并参与了编写了其中软件使用部分内容。重庆大学硕士研究生谈聪、孙秋云和周思维参与了本书编写过程中用到的大量资料的整理、案例计算验证、文字编辑等工作。

本书编写过程中参考了国内外专家和同行的论文、著作，以及网络媒体上的文献资料，在此一并向这些文献的作者表示衷心的感谢。

限于编者的水平，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者指正。您在使用本书过程中有任何意见和建议均可直接联系我们，我们将非常高兴地采纳或予以解答。

微信公众号：MASTA 高校合作（15810621271）。邮箱：MASTA_SMT@163.com。

目 录

前 言	
第 1 章 绪论	1
1.1 新能源汽车简介	1
1.2 新能源汽车分类	2
1.3 新能源汽车的发展概况	2
1.3.1 国外新能源汽车的发展概况	3
1.3.2 我国新能源汽车的发展概况	4
1.4 MASTA 概述	6
1.5 MASTA 功能模块介绍	6
1.6 MASTA 安装及界面	8
1.6.1 MASTA 安装步骤	8
1.6.2 MASTA 界面	11
第 2 章 新能源汽车动力驱动形式与 传动系统设计	16
2.1 新能源汽车动力驱动形式	16
2.1.1 纯电动汽车	16
2.1.2 混合动力电动汽车	17
2.1.3 燃料电池电动汽车	19
2.2 新能源汽车传动系统结构	20
2.2.1 混合动力电动汽车传动系统 结构	20
2.2.2 纯电动汽车传动系统结构	23
2.3 新能源汽车传动系统设计	27
2.3.1 齿轮几何参数设计流程	27
2.3.2 齿轮的校核	29
2.3.3 齿轮的材料及热处理	31
第 3 章 高速齿轮传动宏观参数设计	32
3.1 高速齿轮宏观参数设计	32
3.1.1 重合度与滑动率	32
3.1.2 高速齿轮啮合参数的选择	36
3.2 齿轮宏观参数优化设计理论基础	38
3.3 基于 MASTA 齿轮宏观参数 优化设计实例	39
3.3.1 基于 MASTA 的建模	39
3.3.2 基于 MASTA 的宏观参数优化	50
第 4 章 高速齿轮传动微观修形 设计	55
4.1 高速齿轮传动微观修形基本原理	55
4.1.1 受载变形	55
4.1.2 热变形	56
4.1.3 齿向修形	58
4.1.4 齿形修形	59
4.1.5 对角修形	61
4.2 MASTA 微观修形设计	62
4.2.1 MASTA 修形术语和定义	62
4.2.2 微观修形优化设计目标	69
4.2.3 手动修形方法	70
4.2.4 自动修形方法	73
4.3 齿轮微观修形设计实例	80
4.3.1 接触斑点和传动误差	80
4.3.2 齿轮修形实例	80
第 5 章 高速齿轮系统动态特性 分析基础	85
5.1 齿轮系统动力学简介	85
5.2 齿轮系统内部激励	86
5.2.1 传动误差	87
5.2.2 啮合刚度	90
5.3 齿轮传动系统特征频谱计算	95
5.3.1 特征频率计算	95
5.3.2 阶次	99
5.4 齿轮动力学建模	103
5.4.1 牛顿法	103
5.4.2 拉格朗日能量法	103
5.4.3 齿轮系统动力学建模	105
5.5 MASTA 动力学模块与 NVH 分析	109
5.5.1 MASTA 动力学模块简介	109



5.5.2 齿轮 NVH 设计分析实例	110	第 7 章 纯电动汽车差减速器实例	
第 6 章 纯电动汽车轮边减速器实例		建模与分析	148
建模与分析	122	7.1 差减速器建模	148
6.1 轮边减速器建模	122	7.1.1 创建新的设计	148
6.1.1 创建新的设计	122	7.1.2 添加轴	148
6.1.2 添加轴	122	7.1.3 添加轴承	152
6.1.3 添加轴承	125	7.1.4 添加齿轮副	154
6.1.4 添加齿轮副	129	7.1.5 添加差速器	156
6.1.5 添加功率载荷	134	7.1.6 添加功率载荷	165
6.2 轮边减速器啮合分析	136	7.2 差减速器啮合分析	166
6.2.1 功率流分析	137	7.2.1 功率流分析	166
6.2.2 轴和轴承分析	138	7.2.2 系统变形分析	167
6.2.3 齿轮宏观参数分析	141	7.2.3 齿轮副的 LTCA 分析	171
6.2.4 齿轮副的 LTCA 分析	142	7.2.4 差减速器模态分析	176
6.2.5 轮边减速器模态分析	144	7.2.5 差减速器啸叫分析	178
6.2.6 轮边减速器啸叫分析	145	参考文献	181

1.1 新能源汽车简介

新能源汽车是指采用非常规的车用燃料作为动力来源（或使用常规的车用燃料、采用新型车载动力装置），综合车辆的动力控制和驱动方面的先进技术，形成的技术原理先进、具有新技术、新结构的汽车。新能源汽车的定义因国家不同其提法也不相同，在日本通常被称为“低公害汽车”，2001年日本国土交通省、环境省和经济产业省制定了“低公害车开发普及行动计划”。该计划所指的低公害车包括5类，即以天然气为燃料的汽车、混合动力电动汽车、电动汽车、以甲醇为燃料的汽车、排污和燃效限制标准最严格的清洁汽油汽车。在美国通常将新能源汽车称作“代用燃料汽车”。

新能源汽车与传统燃油汽车的根本差异在于动力系统，如图1-1所示。

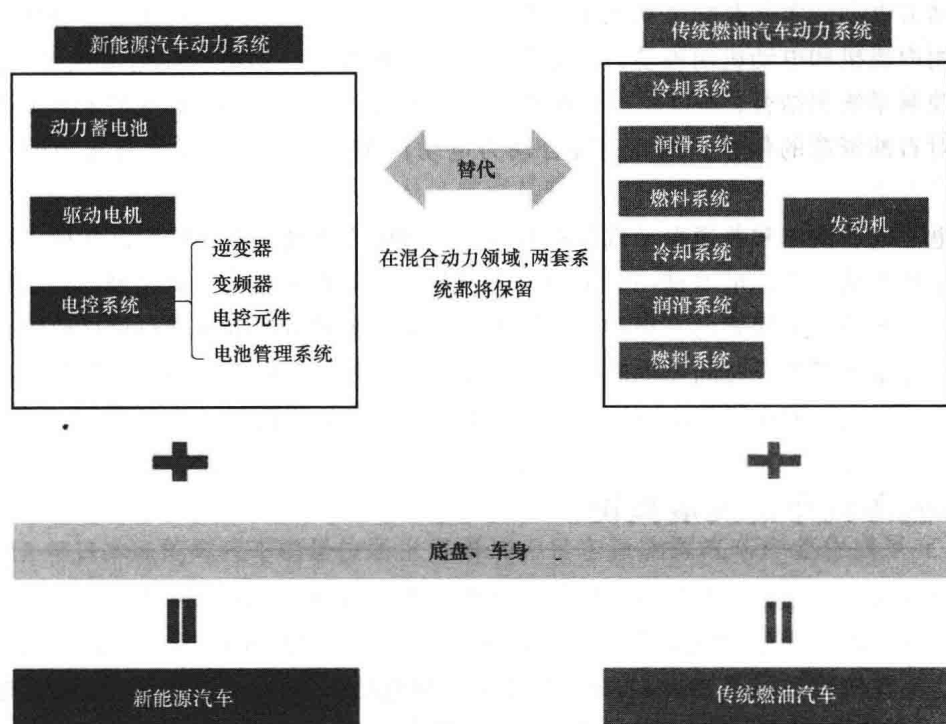


图 1-1 新能源汽车与传统燃油汽车对比



1.2 新能源汽车分类

新能源汽车主要包括混合动力电动汽车、纯电动汽车、燃料电池电动汽车三类，其比较见表 1-1。

表 1-1 混合动力电动汽车、纯电动汽车和燃料电池电动汽车的比较

	混合动力电动汽车	纯电动汽车	燃料电池电动汽车
驱动方式	内燃机+电机驱动	电机驱动	电机驱动
能量系统	内燃机+蓄电池	蓄电池	燃料电池
能量来源与补给	加油站或充电设备	电网充电设备	氢气
排放量	排放较低	零排放	近似零排放
商业化进程	商业化较成熟	有少量产品销售,未形成规模	研发阶段
主要优点	续航里程较长	排放低	效率高,续航长
主要缺点	电池效率	充电站不足,电池安全性有待提高	成本高,技术未突破

纯电动汽车是完全由二次电池（如铅酸蓄电池、镍镉蓄电池、镍氢蓄电池或锂离子电池等）提供动力的汽车。纯电动汽车主要由底盘、车身、蓄电池、电机、传动系统、控制器和辅助设施七部分组成，工作原理可以简要表达为：蓄电池→电流→电力调节器→电机→动力传动系统→驱动汽车行驶。

混合动力电动汽车是在纯电动汽车开发过程中为有利于市场化而产生的一种新车型。一般是指采用内燃机和电动机两种动力，将内燃机与储能器件（如高性能电池或超级电容器）通过先进控制系统相结合，提供车辆行驶所需要的动力。混合动力电动汽车未从根本上摆脱交通运输对石油资源的依赖。因此，混合动力电动汽车是电动汽车发展过程中的一种过渡车型。

燃料电池电动汽车和普通电动汽车有基本一致的电力驱动构造。它们之间的主要区别在于，燃料电池电动汽车的电池是一个小型发电设备——依靠氢和某种氧化物的化学反应产生驱动电能，而无须从电网充电。相较于传统电动汽车，燃料电池电动汽车可以改善传统电池过重、电能容量不足及长时间充电的缺点，行驶里程更长。燃料电池的发电过程可视为水电解的逆反应，发电过程中只有水分的排放，因而是清洁的动力能源。

1.3 新能源汽车的发展概况

一百余年前，由于当时电池和电机的发展较内燃机成熟，而且石油的运用还没有普及，使电动汽车在早期的汽车领域中占有举足轻重的位置。电动汽车的历史可追溯到 1834 年，托马斯·达文波特（Thomas Davenport）制造了一辆电动三轮车，它由一组不可充电的干电池驱动，只能行驶一小段距离。第一辆以可充电的电池为动力的三轮电动汽车（图 1-2）由法国人古斯塔夫·特鲁夫在 1881 年制造出来，此后三四十年间，电动汽车在当时的汽车发展中占据着重要位置。



图 1-2 1881 年的三轮电动汽车

1.3.1 国外新能源汽车的发展概况

2008 年以来,以美国、欧盟、日本为代表的国家和地区相继发布实施了新的电动汽车发展战略,更加明确了产业的发展方向,进一步加大了研发投入与政府扶持力度。日本,以产业竞争力为第一目标,全面发展混合动力、纯电动、燃料电池三种电动汽车,研发和产业化均走在世界前列。美国,以能源安全为主要目标,强调插电式电动汽车发展。欧盟,以二氧化碳排放法规为主要驱动力,重视发展纯电动汽车。

世界上第一辆电动汽车是 1834 年在美国诞生的。美国在新能源汽车技术研发和政策上一直走在世界前列。1991 年,美国通用汽车公司、福特汽车公司和克莱斯勒汽车公司共同协议,成立了“先进电池联合体”(USABC),共同研发新一代电动汽车所需要的高能电池。1991 年 10 月美国电力研究院也参加了先进电池联合体来参与高能电池与电动汽车的开发。美国通用汽车公司还在底特律建成 EV-1(纯电动汽车)电动轿车总装线,每天生产 10 辆电动轿车。美国电动汽车联盟提出了电动汽车发展目标和行动计划,主要内容有:①到 2040 年美国将拥有 2.5 亿辆电动汽车,全美国 3/4 的轻型车需求由电动汽车提供,届时美国轻型车耗油量将减少 75%,美国基本上摆脱进口石油依赖;②争取到 2020 年,全美拥有电动汽车 1400 万辆,届时近 1/4 的轻型汽车需求由纯电动汽车或插入式电动汽车提供;③呼吁联邦政府拨款 1300 亿美元,资助电动汽车电池开发生产和传统汽车厂商的转型;呼吁出台有吸引力的鼓励民众使用电动汽车和建设电动汽车基础设施的税收激励或财务补助政策措施,先行在美国 33 个重点城市展开。

2012 年日本新能源汽车销量位居世界第二。日本新能源汽车产业化成果在全球范围内是最好的。以丰田普锐斯为代表的日本混合动力电动汽车,在世界低污染汽车开发销售领域已经占据了领头地位。丰田和本田汽车公司已成为当今世界燃料电池汽车市场上的重要企业。为推广新能源汽车及环保汽车,日本从 2009 年 4 月 1 日起实施“绿色税制”,其适用对象包括纯电动汽车、混合动力电动汽车、清洁柴油汽车、天然气汽车以及获得认定的低排放且燃油消耗量低的车辆。

法国是石油资源缺少的国家,汽油昂贵,油价约为美国的四倍,每年从国外进口大量的



石油。在政府积极发展新能源汽车政策的带动下，各个汽车厂商也纷纷加大投资力度，雷诺-日产联盟、标致-雪铁龙和日本三菱汽车公司合作，相继推出了多款环保电动汽车。

德国在新能源汽车方面也做出了重要贡献。宝马也是氢动力发动机车型研究的先行者。在2009年德国政府批准的500亿欧元的经济刺激计划中，很大一部分资金用于电动汽车研发、“电动汽车充电站”网络建设和可再生能源的开发。

21世纪以来，国外各大汽车厂商纷纷制订了新的新能源汽车发展规划。在这个“新能源环保竞技场”上，包括通用、奔驰、大众、宝马、日产、本田、丰田、克莱斯勒、福特等先行者，更是争先恐后地扮演了新能源汽车开发的主角。

本田公司推出了百分之百纯电力驱动汽车，包括在1997年推出的EV+电动汽车和2009年推出的FCX Clarity燃料电池汽车。朝着减少二氧化碳排放和提高代替能源使用效率的目标，本田公司的设计师利用在电力驱动系统和能源管理技术方面的专业知识，设计出的小型电动汽车的电力驱动系统具有卓越的能源转换效率和极佳的动态性能。

2013年，本田公司为电动汽车设计了一套新的动力系统。为了获得比原有的电动汽车更好的市场竞争力，这个动力系统兼具有高功率和低损耗的特点，具备世界上最先进的能源转化效率和比同类电动汽车更卓越的动态性能。为了实现高的能源转换效率，这种动力系统还配备了新开发的电动伺服制动系统进行协同控制；为了实现高动态性能，电动机装配了新形状的转子，动力控制单元也装配了具有高导热散热性能的部件。因为配备了三重并行模块组和一个制冷系统，电池系统虽结构紧凑，但支持大功率输出。这个创新的动力系统带来了优良的结果，汽车一次行驶里程数可以达到82英里（1英里=1609.344m），能源转化力达到世界先进水平29千瓦时/100英里；同时，它的加速性能相当于2.0排量的汽车的性能。

由Ford和GE公司联合开发的ETX轿车，把两档变速器、电机和差速器设计成一个整体。德国的达姆施塔特技术大学把高速感应电机和两档变速器组成了驱动系统，证明了该系统可以极大改善纯电动汽车的性能。

英国桑德兰大学通过仿真模拟对安装两档变速器和固定速比减速器的两种纯电动汽车进行了对比，结果表明安装了两档变速器的纯电动汽车不仅可以减少能量消耗，还可以减少整个驱动链的尺寸和重量。美国印第安纳波利斯大学针对一款5档手动变速器的纯电动公交车，研究了在换挡过程中的电机控制问题，该方案适合直接耦合集成动力系统的电动汽车。

1.3.2 我国新能源汽车的发展概况

我国政府着眼长远，超前部署，长期以来积极开展新能源汽车的自主创新。“九五”期间，新能源汽车列入国家重大科技产业工程。“十五”“十一五”“十二五”期间新能源汽车列入国家863计划。在自主创新过程中，坚持了政府支持，以核心技术、关键部件和系统集成为重点的原则，确立了以混合动力电动汽车、纯电动汽车、燃料电池电动汽车为“三纵”，以整车控制系统、驱动电机系统、动力蓄电池/燃料电池为“三横”的研发布局，通过产学研紧密合作，我国新能源汽车的发展取得了重大进展（图1-3）。

(1) 燃料电池电动汽车 均采用电—电混合驱动方案，在整车操控性能、行驶性能、安全性能、燃料利用率等方面均已得到较大提高。2004年5月在北京召开的世界氢能大会上，我国自主研发的燃料电池轿车和客车样车与世界领先的奔驰公司样车同堂展示，引起了

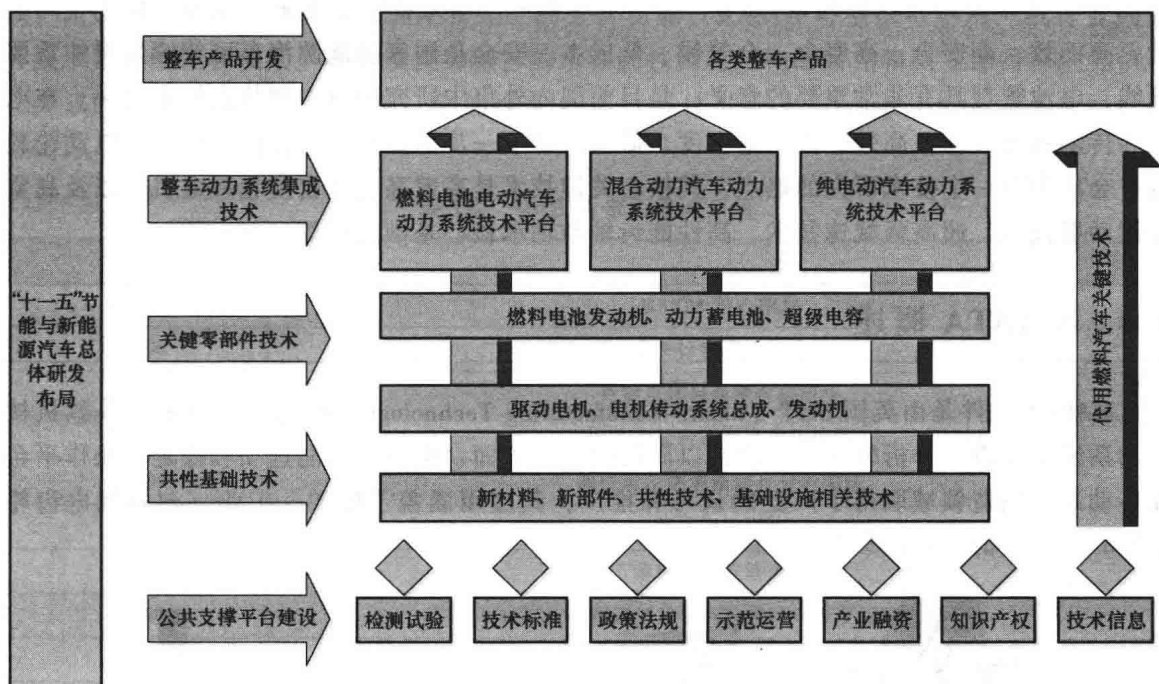


图 1-3 新能源汽车“三纵三横”研发布局（资料来源：国家“863”计划节能与新能源汽车重大项目办公室）

世界的惊赞。在 10 月举行的必比登世界清洁汽车挑战赛上，我国自主研发的燃料电池轿车在 7 个单项奖中获得 5 个 A（在高速蛇行障碍赛、噪声、排放、能耗、温室气体减排 5 个单项指标方面的最高等级）的好成绩，燃料电池城市客车也以较高的技术性能和可靠性在挑战赛中取得了良好的成绩。

(2) **混合动力电动汽车** 一汽、东风、长安、奇瑞等汽车公司对此都投入了较大的人力、物力。各车型均已完成功能样车开发。2003 年 11 月 8 日，湖北省启动武汉电动汽车试验示范运行工作，先后投入 6 辆由东风电动车辆股份有限公司研制的混合动力电动客车，已累计运行 14 万 km，载客 15 万人次；混合动力电动轿车按 ECE 城市工况与基本车型进行的对比试验显示，其燃料经济性提高 40% 左右，达到了节油的目的。长安汽车公司采用同轴 ISG 轻度混合方案，成功开发了第二轮功能样车和第三轮性能样车，并在国内率先开展了混合动力专用发动机开发。经过国家检测机构测试，动力性能接近参考车的水平，综合油耗降低接近 17%，排放达到欧Ⅲ标准。

(3) **纯电动汽车** 目前纯电动轿车和纯电动客车均已通过国家质检中心的型式认证试验，各项指标均符合有关国家标准和企业标准的规定：天津清源电动车辆有限公司等单位研发的纯电动轿车，其整车的动力性、经济性、续驶里程、噪声等指标已超过法国雪铁龙公司赠送的纯电动轿车和厢式货车，初步形成了关键技术的研发能力；北京理工大学等单位初步完成了北京理工科凌电动车辆股份有限公司密云电动车辆产业化生产基地的建设，并于 2003 年 12 月 30 日顺利通过北京市公共交通总公司组织的示范运行车组验收，小批量研发生产的 4 种车型、近 40 辆公交车投入到北京市奥运电动示范车队的示范运行。

总体来讲，当前我国新能源汽车全球销量第一，全国的充电站和充电桩数量已经超过



60 万个，其中公共充电桩约 28 万个，处于全球第一。动力蓄电池未来的发展，体现在高能量、高效率、高安全、高寿命、全气候、低成本。安全是国家新能源汽车可持续发展的重要底线，电池管理具有非常重要的意义，是目前国内外集中研究的重点和热点技术之一。在电机和传动系统方面，高效、高功率密度、低噪声是下一步的重点发展方向。同时，电动轮毂也将会成为下一个技术研究的热点，其核心关键技术是高速高功率密度轮毂电机，以及高紧凑制动器技术、超高强减速技术、高性能齿轴与轴承核心基础元件等。

1.4 MASTA 概述

MASTA 软件是由英国 SMT (Smart Manufacturing Technology) 公司自主研发的一款机械传动系统专业设计分析软件。该软件以简易的操作界面、全面的功能选项和稳定的操作平台在传动系统制造领域取得了广泛的认可和推广，其应用涵盖了船舶、工业（包括风电齿轮箱等）、车辆和航空等领域（图 1-4）。

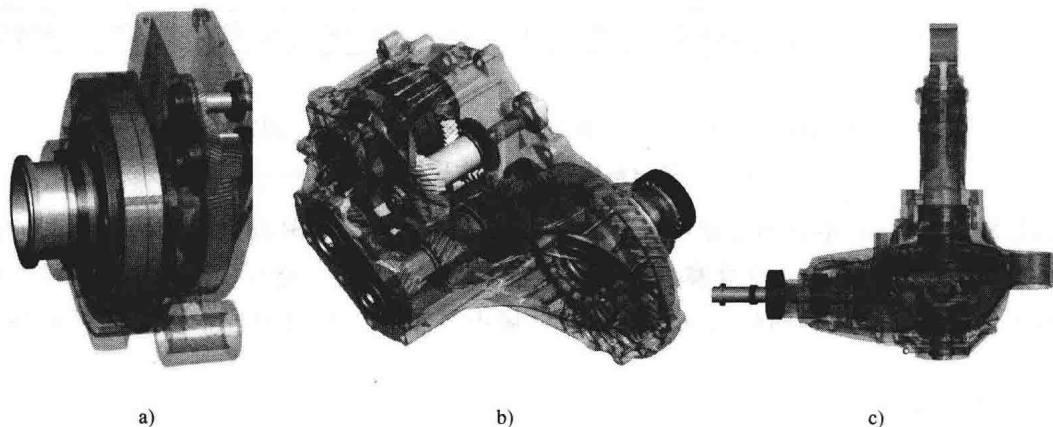


图 1-4 MASTA 分析案例

a) 风电齿轮箱 b) 汽车齿轮箱 c) 车桥差速器

MASTA 根据不同的设计分析需求有不同的模块，主要可以分为传动系统设计分析优化模块和齿轮制造模块。针对车辆，还有整车匹配部分。对于传动系统设计分析优化模块，其核心功能是运用零部件和设计数据库的综合选择设计整个传动系统和动力传动系统，即包含：齿轮参数优化；齿轮、轴承、轴和花键的耐久性分析；系统变形分析和优化；系统 NVH 分析和优化；齿轮加载接触分析；轴疲劳和应力分析；换挡性能和质量分析；系统动力学；齿轮刀具设计和制造工艺仿真；壳体 and 轴变形；齿轮变形分析；传动链仿真；行星轮均载；多参数全局优化界面等。

1.5 MASTA 功能模块介绍

MASTA 软件所提供的计算机辅助工程软件环境，从概念设计到传动系统的仿真、优化及分析，MASTA 都会为使用者提供最优方案。MASTA 由核心模块和超过 75 个附加模块组



成，附加模块具有额外的设计组件和先进的分析功能。MASTA 可根据特定用户或行业的具体要求进行配置和使用。核心模块为轴、轴承和圆柱齿轮结构的齿轮箱或变速器系统提供一个集成的计算机辅助设计环境；附加模块可进行零件的高级设计和分析。表 1-2 列出了 MASTA 部分模块介绍。

表 1-2 MASTA 部分模块介绍

模块代号	模块说明
MC101	MASTA 核心模块
MC104	非平行轴设计模块
MC105	花键设计与强度校核模块
MC108	圆柱齿轮宏观参数优化模块
MC109	圆柱齿轮微观修形与分析模块
MC201	行星齿轮模块
MC301	锥齿轮差速器模块
MC302	AGMA/格里森弧齿锥齿轮设计与强度校核模块
MC401	AGMA/格里森准双曲面齿轮设计与强度校核模块
MA101	箱体的有限元模型导入模块
MA102	非对称轴的有限元模型导入模块
MA105	NVH 分析(非行星齿轮)模块
MA108	带有有限元模型的 NVH 分析模块
MA205	行星齿轮 NVH 分析模块

核心模块中的设计功能包括：

- 1) 2D 设计视图，同时具有交互式的 3D 视图。
- 2) 综合轴承数据库，目录中包含 44000 多个轴承。
- 3) 可以添加圆柱齿轮、轴、轴承、离合器、同步器、花键和其他联轴器等。
- 4) 可以指定功率和点载荷并配置工况。
- 5) 可以通过导入二维 CAD 绘图来编辑轴的轮廓。

核心模块中的分析功能包括：

- 1) 功率流分析。
- 2) 系统变形分析。
- 3) 圆柱齿轮和轴承的载荷和错位量分析。
- 4) 可以根据 ISO6336、DIN3990 和 AGMA2101-D04 来校核圆柱齿轮，根据 ISO 76、ISO 281 和 ISO/TS16281 来校核轴承，根据 DIN743、AGMA 或 SMT 来校核轴。
- 5) 从强度和重合度方面进行齿轮宏观参数优化。

附加模块中的高级设计和分析功能包括：

- 1) 基于 AGMA 925-A03 或 ISO/TR 13989 进行圆柱齿轮胶合分析。
- 2) 圆柱齿轮齿根应力分析。
- 3) 基于 Gleason 或 AGMA 2005-C96 (设计)/2003-B97 (校核) 进行弧齿锥齿轮设计和



校核。

- 4) 基于 Gleason 或 2003-B97 进行零度锥齿轮设计和校核。
- 5) 直齿锥齿轮设计和校核。
- 6) 准双曲面齿轮设计和校核。
- 7) 按照 GB/T 10085—2018、GB/T 10087—2018 和 GB/T 10088—2018 进行蜗轮蜗杆设计。
- 8) 克林贝格齿轮设计和强度校核。
- 9) 基于 KN 3029 (设计) 和 KN 3030 (强度校核) 进行准双曲面齿轮设计和强度校核。
- 10) 行星齿轮设计和分析。
- 11) 传动带、链、液力变矩器、CVT、联轴器设计和分析。
- 12) 基于 DIN 7190 进行紧配合设计和尺寸设计。
- 13) 花键设计和强度校核。基于 DIN 5480、GB/T 3478、ISO 4156、JIS B1603 和 SAE (ANSI B92.1) 进行花键设计。基于 SAE 设计指南进行花键强度校核。
- 14) 微观修形分析和对轮齿自动进行网格化分或采用基于有限元/赫兹公式的 LTCA 分析。
- 15) 传递效率分析。根据 ISO/TR 14179-1 计算轴承、齿轮和密封件的功率损失。
- 16) 高级系统变形分析。
- 17) NVH 分析和模拟。基于有限元动力学模型, 对于壳体和异形轴, 通过从有限元软件 (ABAQUS/ANSYS/NASTRAN) 导入缩聚刚度矩阵和质量矩阵, 建立完全的动力学模型, 进行耦合系统模态分析。根据 MASTA 计算得到或用户输入的 TE , 进行系统响应的齿轮啸叫分析, 在设计阶段即可发现并解决潜在的 NVH 问题。
- 18) 圆柱齿轮滚、插、剃、磨模拟。
- 19) 圆柱齿轮插齿刀或滚齿刀轮廓与刀尖优化, 得到最大齿轮弯曲强度。
- 20) 圆柱齿轮滚齿、插齿、剃齿工艺模拟。在精确考虑齿坯误差、机床精度、刀具误差以及切削用量的影响情况下, 预测加工后齿轮的齿廓、齿向和齿距误差。
- 21) 弧齿锥齿轮和准双曲面齿轮齿面形状模拟和优化。

1.6 MASTA 安装及界面

1.6.1 MASTA 安装步骤

- 1) 从 SMT 官网获得 MASTA 软件的安装包, 其为一个压缩文件夹 (MASTA 8.0.iso)。
- 2) 将其解压, 得到包含如图 1-5 所示的安装文件 (请注意, 文件夹的内容可能会与图 1-5 所示有所不同, 取决于用户使用的软件版本)。
- 3) 双击文件夹中的 autorun.hta 文件, 弹出如图 1-6 所示的安装界面。
- 4) 根据用户计算机的操作系统是 32 位还是 64 位选择不同的安装程序。如果操作系统为 32 位的, 单击 “Launch MASTA (x86) Installer”; 如果为 64 位单击 “Launch MASTA (x64) Installer”。下面以选择 64 位操作系统为例加以介绍。

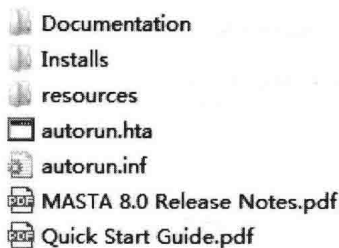


图 1-5 安装包文件



图 1-6 安装界面

5) 单击“Launch MASTA (x64) Installer”进行软件的安装，弹出如图 1-7 所示的对话框，单击 **Next >** 按钮继续。

6) 选择软件所要安装的目标文件夹。单击 **Browse...** 按钮用户可以自己查找并确定某个文件夹，也可以选择程序默认的文件夹。现选择安装在 D 盘下，如图 1-8 所示，单击 **Next >** 按钮继续。



图 1-7 MASTA 软件安装界面

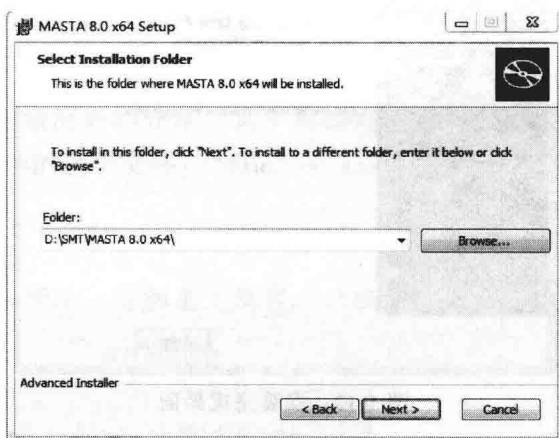


图 1-8 安装盘选择界面

7) 此时会弹出让用户做出是否接受软件的许可协议的对话框，如图 1-9 所示，在选择接受之前，用户应充分了解其协议内容。选择“I accept the terms in the License Agreement”后，单击 **Next >** 继续。

8) 单击 **Install** 按钮开始进行安装。如果需要修改先前的设置，可以单击 **< Back** 按钮返回，如图 1-10 所示。

9) 等待程序安装完毕，如图 1-11 所示。

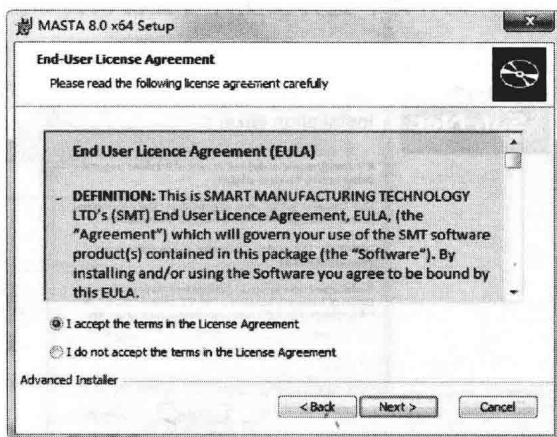


图 1-9 许可文件界面

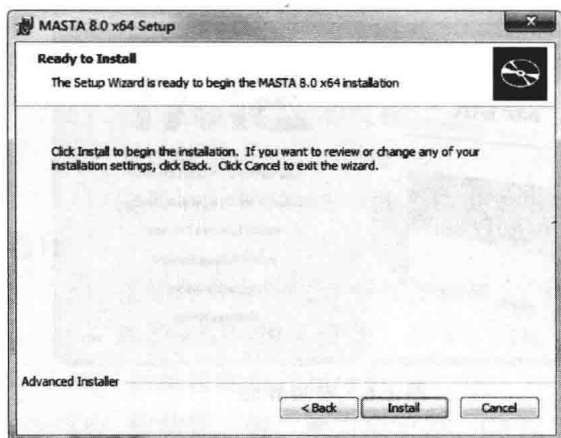


图 1-10 准备安装界面

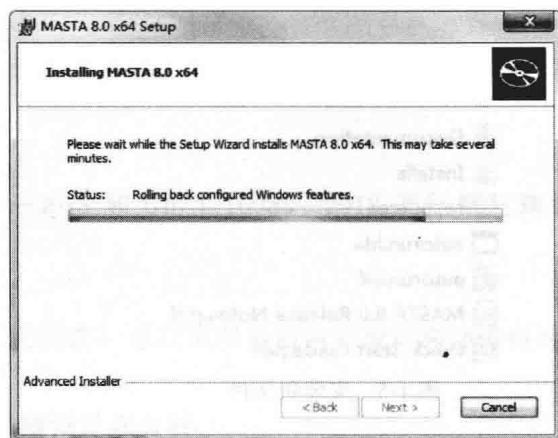


图 1-11 安装过程界面

10) 单击 **Finish** 按钮完成安装，如图 1-12 所示。

11) 回到图 1-6 所示界面，单击“Install License Drivers”（安装许可证驱动程序），如图 1-13 所示。



图 1-12 安装完成界面



图 1-13 许可证驱动程序安装界面

12) 弹出如图 1-14 所示对话框，单击 **Next >** 按钮继续。

13) 同样地，选择接受许可证协议，如图 1-15 所示，单击 **Next >** 按钮继续。



图 1-14 许可证驱动程序中间界面

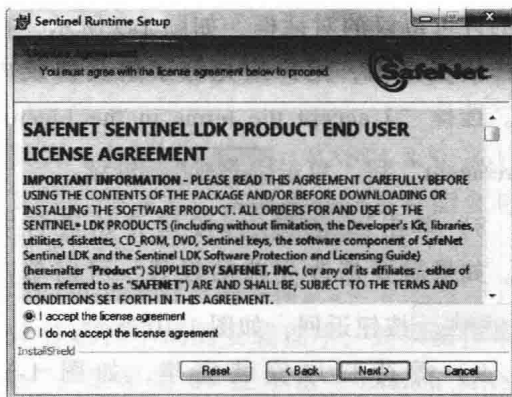


图 1-15 接受许可界面



14) 弹出如图 1-16 所示对话框, 单击 **Next >** 按钮继续。

15) 等待程序完成安装, 然后单击 **Finish** 按钮完成安装, 如图 1-17 所示。至此 MASTA 就安装成功了。单击图 1-6 中的“EXIT”按钮退出。

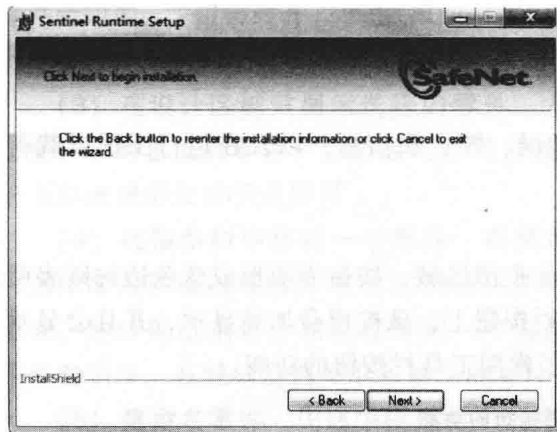


图 1-16 安装中间界面



图 1-17 程序安装完成界面

1.6.2 MASTA 界面

本小节将对 MASTA 用户界面和核心工作模式做简要的介绍。为了帮助理解, 推荐打开一个例子并按照本小节讲述的步骤操作。打开推荐的例子文件: “File”→“Examples”→“Automotive”→“Car Transaxle Gearbox”→“Full Model”。

1. 主界面介绍

MASTA 的主界面包含 5 部分区域, 如图 1-18 所示, 分别是工具栏、总成模型树、属性

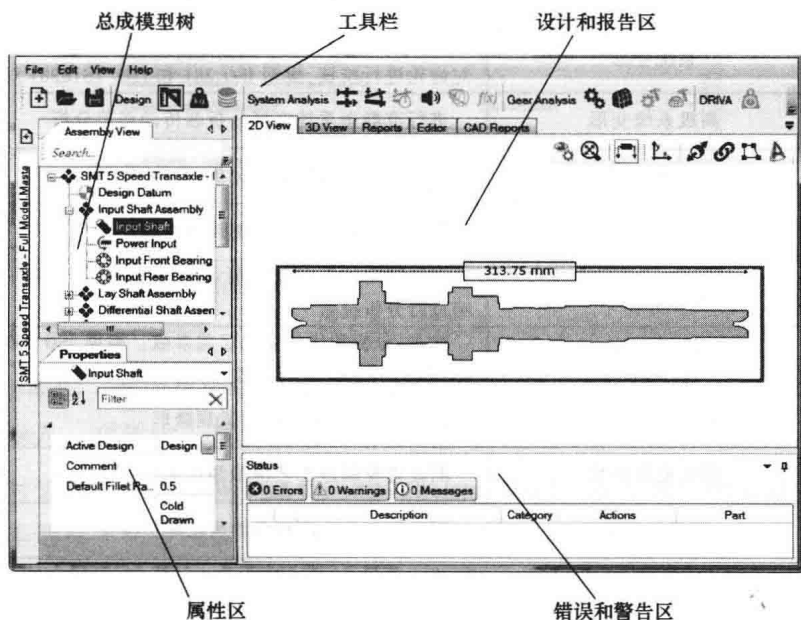


图 1-18 MASTA 软件主界面