



新能源汽车研究与开发丛书

中北大学学科建设经费资助项目

增程式电动汽车 动力总成关键技术

KEY TECHNIQUES FOR POWERTRAIN SYSTEM OF
THE EXTENDED-RANGE ELECTRIC VEHICLE

徐忠四 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



新能源汽车研究与开发丛书

增程式电动汽车动力 总成关键技术

Key Techniques for Powertrain System of the
Extended - range Electric Vehicle

徐忠四 著



机械工业出版社

本书以探索增程式电动汽车动力总成的关键技术为目标,分析了增程器系统专用发动机的振动源和噪声传递路径,通过悬置系统固有频率匹配及解耦率优化、增程器发动机测试工况点选择及多目标优化控制策略、减速器啸叫噪声双目标函数优化等技术手段降低了增程器系统引起的整车噪声,通过增程器系统高可靠性弹性连接技术,建立增程器动力总成可靠性台架试验方法,改善了增程器系统的可靠性。将这些关键技术应用于增程式电动汽车进行整车布置及性能测试,最终实现动力总成关键技术(增程器系统低噪声和高可靠性关键技术、减速器啸叫噪声的优化控制技术)在整车上集成应用,从而改善增程式电动汽车的乘坐舒适性能,满足增程式电动汽车产业化需要。

本书可供从事新能源汽车研究、设计相关的工程技术人员参考,也可供高等院校相关教师和研究生科研和教学时参考。

图书在版编目(CIP)数据

增程式电动汽车动力总成关键技术/徐忠四著. —北京:机械工业出版社, 2018. 9

(新能源汽车研究与开发丛书)

ISBN 978-7-111-60555-3

I. ①增… II. ①徐… III. ①电动汽车—汽车动力学—动力总成—研究 IV. ①U469. 72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 168316 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:杜凡如 责任编辑:杜凡如 徐 霆

责任校对:潘 蕊 封面设计:马精明

责任印制:张 博

北京华创印务有限公司印刷

2018 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 7.5 印张·140 千字

0 001—2 500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-60555-3

定价:39.00 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

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前言

近年来,增程器研发的重点是系统集成控制及关键零部件开发,关于其振动噪声的研究尚未引起足够重视。噪声和振动是影响车辆乘坐舒适性的首要因素,减振降噪是增程器开发和应用中最大的挑战之一。可见,振动噪声的优化在增程器系统设计中占有重要地位。本书全面分析增程器系统振动噪声形成的原因以及噪声控制措施,从振动解耦和悬置系统固有频率优化的角度对动力总成悬置系统进行优化设计,确定引起主振动的阶次和幅值,搞清楚增程式电动汽车振动噪声产生的规律及主要原因,为下一步减振降噪研究奠定基础。

随着国家法规对电动汽车 NVH 性能的要求日益严格和汽车购买者对整车乘坐舒适性要求越来越高,电动汽车减速器的振动噪声控制对电动汽车大规模产业化具有重要意义。减速器噪声主要包括两种:啸叫噪声和敲击噪声。在汽车减速器中,空套齿轮比承载齿轮更容易产生敲击,同时空套齿轮也是最主要的敲击噪声源;减速器啸叫是由内部齿轮在啮合传动中所受的不平稳的激振力引起的一种中高频噪声,由齿轮系统啮合过程中的传递误差而引起。啸叫噪声是一种很容易被人耳识别的中高频纯音,是一种严重的汽车质量问题,必须降低或者消除减速器的啸叫噪声。本书主要讨论应用于小型增程式纯电动汽车减速器的异响问题和啸叫噪声,分析其特点以及产生机理,并且提出双目标函数齿面微观修形优化方案来改善减速器的啸叫噪声。

国内现阶段还没有较为成熟的增程式纯电动汽车产品推向市场,有关产品的研究和开发工作也刚刚起步,在研发过程中,发现增程器系统中发动机与发电机的连接轴经常发生断裂,其可靠性不能满足增程式电动汽车产业化的需求。将电动汽车内燃机增程器连接可靠性技术进行优化和深入研究,建立电动汽车增程器系统安装台架及可靠性评价及试验方法,为开发高性能的增程器产品提供数据支撑,该项研究工作对于开发高可靠性的增程器系统应用于电动汽车具有重要的指导意义。

计算仿真技术、振动噪声控制理论、有限元分析技术为上述增程式电动汽车动力总成关键技术的解决提供了理论基础,国内新能源汽车产业的蓬勃发展又为之提供了实践场所。在国家“863”项目“转子增程/充换兼容电动轿车技术攻关及产业化”和国家科技支撑计划项目“三角转子式乘用车增程器”的支持下,作者用了近三年(2014—2017年)时间在企业从事博士后研究,取得的研究成果具有前瞻性和实用性。作者在奇瑞新能源技术有限公司从事博士后研究期间,



得到了不可多得的学习、研究、试验、运用和反复实践、认识、提高的机遇，逐步积累了本书的基本内容，现在通过整理、提炼写成本书。书中的内容以工程实践为依据，其中包含了合作单位的同仁以及朋友、同事们的共同劳动，现借此机会对他们表示感谢。

本书叙述了作者对增程式电动汽车动力总成关键技术问题的见解，以及最终如何实现动力总成关键技术（增程器系统低噪声和高可靠性关键技术、减速器啸叫噪声的优化控制技术）在整车上的集成应用。从全面和发展的观点来看，书中一定会有值得讨论的问题，希望读者提出批评和建议。

奇瑞新能源技术有限公司的王一戎、王经常、承忠平等主管工程师协助本书作者做了大量的试验并且提供了部分试验数据和插图，谨对他们为本书付出的辛勤劳动表示衷心的感谢。

徐忠四

2018年2月

目 录

前 言

第 1 章 增程式电动汽车动力总成概述	1
1.1 增程式电动汽车的定义	1
1.2 增程式电动汽车动力总成的结构组成	3
1.3 国内外增程式电动汽车发展现状和趋势	5
1.3.1 国外增程式电动汽车发展现状	5
1.3.2 国内增程式电动汽车发展现状	7
1.3.3 国内外增程式电动汽车研究及发展趋势	8
1.4 增程式电动汽车动力总成存在的问题分析	8
1.4.1 增程器系统存在的问题分析	8
1.4.2 电机和减速器存在的噪声问题分析	9
1.5 增程器产品市场应用前景分析	10
1.6 本书工作简介	11
1.6.1 主要研究内容	11
1.6.2 重点解决关键技术	11
1.6.3 本书的技术路线	12
第 2 章 增程器系统振动噪声分析与悬置系统优化	13
2.1 概述	13
2.2 增程器系统振动噪声分析与控制措施	13
2.2.1 增程器系统振动噪声分析	13
2.2.2 增程器系统振动噪声的控制措施	14
2.3 增程式电动汽车动力总成悬置系统优化	15
2.3.1 增程式电动汽车动力总成及悬置系统布置	16
2.3.2 增程式电动汽车悬置系统优化分析	17
2.3.3 悬置系统优化以后的增程式电动汽车的 NVH 性能测试	21
2.4 小结	23



第3章 增程式电动汽车减速器异响问题分析及啸叫噪声优化与控制 ... 25

3.1 概述	25
3.2 减速器存在的异响问题分析与测试	25
3.2.1 减速器振动噪声试验台及测试环境	25
3.2.2 减速器异响问题分析	27
3.2.3 减速器阶次分析	30
3.2.4 减速器异响过程推测及建议	31
3.3 电动汽车减速器啸叫噪声产生机理分析	32
3.4 电动汽车减速器啸叫噪声的优化与控制	33
3.4.1 齿面微观修形参数的确定	33
3.4.2 减速器啸叫噪声的优化模型	34
3.5 齿轮微观修形及仿真分析	36
3.6 减速器噪声试验	40
3.7 小结	41

第4章 增程器发动机工况点标定方法及多目标优化控制策略 43

4.1 概述	43
4.2 增程器发动机工况点的标定方法	43
4.2.1 增程器初始工况点的选择	45
4.2.2 增程器系统台架试验	45
4.2.3 试验数据处理	50
4.3 增程器发动机多目标优化控制策略	52
4.3.1 增程器控制策略分析	52
4.3.2 增程器多目标优化控制策略	52
4.4 小结	55

第5章 增程器系统连接技术可靠性研究 56

5.1 概述	56
5.2 膜片弹簧离合器连接方案	56
5.2.1 膜片弹簧离合器结构组成及优缺点分析	56
5.2.2 膜片弹簧离合器连接方案的可靠性分析	57
5.3 弹性联轴器连接方案	61
5.3.1 弹性联轴器连接方案的结构组成及工作原理	62
5.3.2 弹性联轴器连接方案的可靠性分析	64



5.4 小结	66
第6章 电动汽车增程器系统可靠性评价及试验方法	68
6.1 概述	68
6.2 增程器系统机械连接机构的可靠性分析	68
6.2.1 功能分析	69
6.2.2 失效后果分析	69
6.2.3 失效机制分析	70
6.2.4 增程器系统失效模式的评价指标	70
6.2.5 现有设计控制采取的措施及持续改进	71
6.2.6 生成 DFMEA 表格文件	71
6.3 增程器系统总成安装台架	73
6.4 增程器系统可靠性试验方法	74
6.5 增程器系统可靠性试验方法的创新点	77
6.6 小结	77
第7章 增程式电动汽车整车布置及性能测试	78
7.1 概述	78
7.2 增程式电动汽车紧凑化整车布置方案	78
7.2.1 增程式电动汽车整车布置方案	79
7.2.2 增程式电动汽车前舱布置方案	81
7.3 增程式电动汽车 NVH 性能测试	83
7.3.1 排气噪声性能匹配测试	83
7.3.2 车内振动噪声测试	94
7.4 增程式电动汽车可靠性测试	99
7.4.1 试验对象的基本信息	99
7.4.2 试验条件及设备	100
7.4.3 试验结果及分析	100
7.4.4 可靠性试验结论	102
7.5 小结	102
第8章 总结和展望	104
8.1 总结	104
8.2 研究展望	106
参考文献	107

第 1 章 增程式电动汽车动力总成概述

随着石油资源的日益枯竭和环境的日益恶化，新能源汽车成为现代交通领域的必然发展趋势。在国家及各级政府的政策扶持及资金支持下，目前国内的新能源汽车行业取得了长足的进步，但是纯电动汽车动力电池的能量密度不高、电池寿命短，导致续驶里程短，是当前市场推广的最大瓶颈。纯电动汽车续航里程无法满足人们的心理需求，在这种情况下，在电动汽车上增加增程器系统能够消除人们的里程焦虑，成为新能源汽车破冰的一种选择。

增程器系统是增程式电动汽车用于提高续驶里程的关键零部件，主要应用于电动汽车领域。为了解决电动汽车续驶里程短的问题，各种增程式电动汽车应运而生。增程式电动汽车是在纯电动汽车的基础上加载车载充电器，从而大大延长了电动汽车的续驶能力。增程式电动汽车以其效率高、所需要的电池容量比同档次的纯电动汽车小，以及不会因缺电导致抛锚等优点受到了广泛的关注^[1]。目前，增程式电动汽车采用动力电池为主要驱动能源，而车载充电器一般采用小型汽油或柴油发动机，在电量充足的情况下采用纯电机驱动，只使用电能，不需要消耗燃油，实现了零污染物排放。在汽车起步或制动时，可以充分利用电机的特性实现快速启动和制动能量回收。在电池电量不足的情况下，增程器系统运行，维持整车的能量需求，弥补目前纯电动汽车续驶里程短的不足^[2-5]。

1.1 增程式电动汽车的定义

根据美国通用汽车公司 Tate 等人^[6]给出的定义，增程式电动汽车（Extended Range Electric Vehicle, E-REV）是指整车在纯电动模式下可以达到其所有的动力性能，而当车载可充电电池无法满足续驶里程要求时，打开车载辅助发电装置为动力系统提供电能，以延长续驶里程。根据该定义，增程式电动汽车在本质上属于纯电动汽车，在续驶里程要求较低的情况下，可使用纯电动模式行驶，只有当需求续驶里程超过纯电动范围时才启动发电单元，进入混合动力模式。

混合动力汽车在结构形式上可以分为串联式、并联式、混联式和复杂式四种^[7]，增程式电动汽车属于串联式混合动力汽车，其基本构型如图 1-1 所示。串联式混合动力结构较为简单，由驱动电机直接驱动车轮，而发动机和发电机组成辅助发电单元（Auxiliary Power Unit, APU）与动力电池联合为驱动电机提供电能。由于增加了续驶里程，APU 系统又称为增程器系统（Ranger-Extender，



RE)，由发动机和发电机以及它们之间的弹性连接装置组成。

如果从可插电式混合动力向纯电动方向继续延伸，增加在行驶过程中对可充电电能的使用，即是近年来出现的增程式电动汽车。目前，普遍的观点认为，增程式电动汽车虽然属于插电式电动汽车的一种，但是其也有着较为独立的特征。

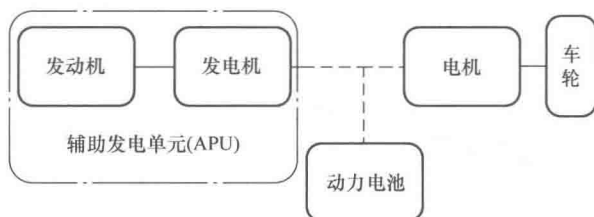


图 1-1 增程式电动汽车的基本构型

增程式电动汽车主要由整车控制系统、动力电池系统、动力驱动系统以及 APU 共同组成^[5]。增程式电动汽车从根本上改善了整车的排放性能和燃油经济性，弥补了电动汽车续航里程的不足^[6]。增程式电动汽车是克服当前动力电池缺陷、纯电动汽车向燃料电池汽车过渡，实现交通领域节能环保的最佳技术方案。

2

增程式电动汽车以电力驱动为主，小型发动机与发电机组成增程器系统作为电力补充。据统计 80% 用户日出行里程低于 80km，增程式电动汽车在纯电动驱动模式下行驶 80km 所配备的电池数量与续航里程 200km 以上的纯电动汽车相比大幅降低，可以减轻整车重量、节约成本。增程器可弥补电动汽车超出常用纯电里程情况下的电力供给，并且电力不依赖于高功率充电站，方便了用户的使用。增程器可连续工作在最佳转速下，输出的功率和转矩也基本恒定，因而其效率、排放、可靠性等均处在最佳状态，实现了未配备大容量动力电池时有效延长续航里程的目标。因此，在国际竞争日趋激烈的环境下，随着新能源汽车产业化的不断深入，在电池技术无法满足续航里程需求等关键问题的背景下，增程式电动汽车以其成本不高、节能且最易推广的优势，成为我国向纯电动汽车过渡期间的最佳电动车型，开发增程式电动汽车迫在眉睫。

增程式电动汽车与插电式混合动力汽车（PHEV）有所区别，其中增程式电动汽车的发动机不直接参与驱动车轮，其系统构型一般为串联式，且在运行中存在连续的纯电动区域。因此，该构型对电驱动系统的输出功率、转矩要求较高，同时对电池容量需求较大；而 APU 的需求功率较小，且工况较为固定，APU 系统中发电机和发动机的性能匹配以及工况点选择对系统效率尤为重要。对于插电式混合动力汽车，其构型可为并联式或混联式，发动机可直接参与驱动车轮，且可以不设计连续的纯电动区域。因此，该方案对电池容量和电驱动系统输出功



率、转矩要求较低，而发电机、发动机、驱动电机、电池之间的综合匹配优化是提高系统效率的重要途径。

在能量管理方面，插电式混合动力汽车和增程式电动汽车有共同点。传统混合动力以优化发动机工况点、提高混合动力的经济性为主要目的，而插电式混合动力汽车和增程式电动汽车则同时兼顾提高混合动力经济性和增加电池能量使用两方面。因此，相比于传统混合动力，插电式和增程式电动汽车能够更最大限度地使用外部的电能替代化石燃料。而相对于纯电动汽车，增程式电动汽车可以通过车载发电单元的工作，弥补由于电池能量密度较低导致续航里程不足的缺陷，同时在电池电量较低时保证车辆行驶的动力性，防止对动力电池进行深充电或深放电。因此，增程式电动汽车是介于纯电动汽车和传统混合动力汽车之间的一种构型^[8]。

1.2 增程式电动汽车动力总成的结构组成

本书的研究对象为增程式电动轿车。因此，本书针对一辆 A00 级的小轿车设计了增程式动力总成系统，其系统结构如图 1-2 所示。与串联式混合动力类似，该动力总成系统主要由驱动电机、动力电池、发电机、发动机和减速器等组成，驱动电机通过减速器直接驱动车轮，而发动机和发电机组成 APU 系统为整车提供动力电池之外的能量需求。整车动力总成系统采用了模块化的设计思想，即所有零部件和外界通过标准的通信接口以及标准的电气接口进行交互。APU 系统作为整车的独立子系统，相当于一个独立的零部件。因此，整车动力总成系统相当于一个串联混合动力平台，无论 APU 系统是燃油发电机组、天然气发电机组还是燃料电池，只要满足标准的通信接口和电气接口，都可以用于该串联混合动力平台。

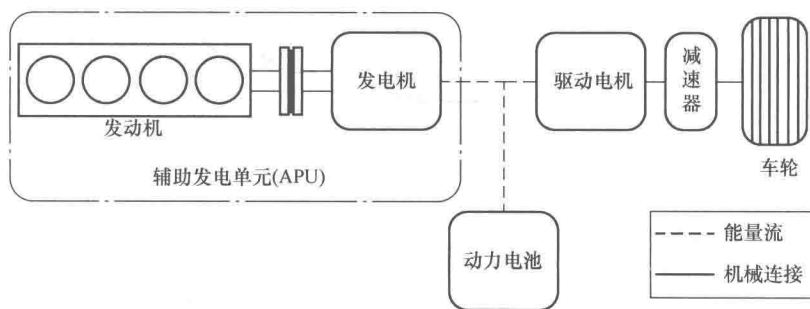


图 1-2 增程式电动汽车动力总成结构



图 1-3 所示为奇瑞增程式电动汽车动力总成前舱总体布置方案，发电机组布置采用奇瑞 272 发动机和 8kW 发电机同轴布置方案，法兰盘 2 把两缸发动机 1 和发电机 3 连接起来，组成增程器系统，永磁同步电机作为电动汽车的驱动电机 5，和一个固定减速比的减速器 4 组成电动汽车的集成式动力总成。



图 1-3 增程式电动汽车动力总成前舱布置方案

1—发动机 2—法兰盘 3—发电机 4—减速器 5—驱动电机

4

整车可以实现纯电动和增程工作模式，无论是纯电动工作模式还是增程工作模式，都是由驱动电机完成对整车的驱动：纯电动工作模式时，由动力电池包通过逆变器把直流电转换为交流电来驱动电机，由驱动电机 5 完成对整车的驱动；当动力电池的电量较低或耗完时可以打开发动机 1，整车进入增程模式，此时发动机 1 带动发电机 3 发电，电能可以带动驱动电机 5 工作或给动力电池包充电。

增程式电动汽车可根据不同的运行工况灵活转换其工作模式。具体而言，增程式电动汽车有 4 种运行模式：纯电动模式、并行驱动模式、行车发电模式和制动能量回收模式，如图 1-4 所示。

(1) 纯电动 (EV) 模式：在动力电池容量允许范围内运行纯电动 (EV) 模式，车辆行驶时，APU 不参与工作，车辆消耗能量全部来源于动力电池组，电池组电量不断消耗，SOC 值不断减小，同时也达到零排放。

(2) 并行驱动模式：当电池 SOC 值不断减小不足以单独驱动车辆行驶时，APU 起动工作，提供功率需求不足的部分，运行并行驱动模式。

(3) 行车发电模式：此模式下，APU 单独驱动车辆行驶，并且发动机输出功率超出整车需求部分向动力电池充电，提高了整车能量利用率和发动机工作效率。

(4) 制动能量回收模式：电机制动系统利用驱动电机产生的反向力矩对制动轮施加制动力矩来实现制动。对于制动能量的回收，除了电机能够产生制动力矩外，动力电池组还需要有容纳电能的能力。同时，回收的电流也不能对电池形



成较大的冲击, 损害其寿命。另外, 当电机参与制动时, 为避免驾驶人感觉不适而产生误操作, 控制制动的策略还要考虑驾驶人和乘客的制动感觉。

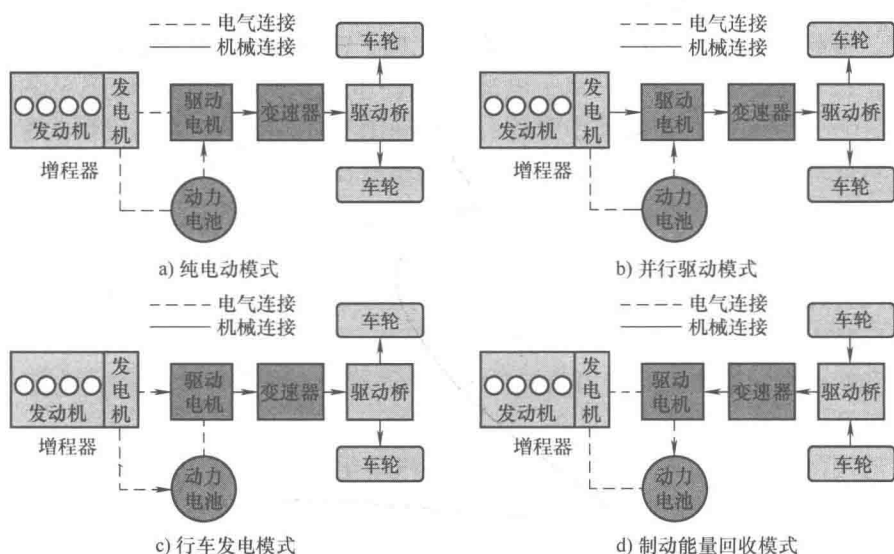


图 1-4 增程式电动汽车的四种运行模式

发动机主要在并行驱动模式和行车充电模式下参与工作, 并行驱动模式经常出现在中低速加速或高速行驶时, 行车充电模式则主要出现在中低速平稳行驶且电池 SOC 值较低时^[9]。而车辆中低速行驶时的空气噪声和轮胎噪声均不显著, 增程器运行噪声尤为突出。

1.3 国内外增程式电动汽车发展现状和趋势

1.3.1 国外增程式电动汽车发展现状

目前, 国外开展增程式纯电动汽车开发的公司较多, 包括美国三大汽车公司, 日本的丰田、本田, 以及德国的大众汽车公司等国际汽车巨头, 都在进行增程式电动汽车的开发。1990 年, UC Davis 的 Andy Frank 教授开始研制增程式电动汽车原型车, 2001 年, Department of Energy (DOE) 在 UC Davis 成立了增程式电动汽车国家工程中心。2004 年 9 月, CalCars 和 Energy CS 开始改装丰田 Prius, 研制增程式电动汽车原型车。目前, 国际上开发增程式纯电动汽车的主要厂家是通用汽车公司和 FEV 等。通用最初开发的电动汽车 Volt, 可以通过家用电源插座充电, 也可用一种车载的小型汽油、乙醇或柴油发电机发电, 仅需 $16\text{kW} \cdot \text{h}$ 锂



离子电池所存储的电能, Volt 就可以行驶长达 64km 的路程, 足以达到美国人日常驾驶里程的 80%。超过 64km 的长途驾驶, 当电池电能耗尽时, 车载发电机发动, 并对电池组进行充电^[6]。FEV 已先后完成过 4 个轮次增程式纯电动汽车的开发, 目前在菲亚特 500 车型基础上开发完成了锂离子可外插充电增程式纯电动样车, 该车装备 12kW·h 锂离子电池 (40A·h 模块)、峰值功率 70kW 的永磁电机, 0—100km/h 加速时间小于 10s, 最高车速为 120km/h, 纯电动模式市区工况下可以行驶 100km, 另外配备了 20kW 的小型发动机, 可以提供总共 300km 的续驶里程^[7]。对比国内外增程式或双模汽车整车的核心技术, FEV 等国外公司开发的产品在整车动力系统匹配、标定、电磁兼容设计等方面, 技术水平远远高于国内公司。除此之外, AVL 在欧洲进行行星齿轮两档位的增程电动汽车的研发设计, 其中增程器和电驱动系统为一体化设计, 结构较紧凑, 发动机采用两缸发动机和转子发动机的匹配。而英国的 Lotus 公司在增程器研发上处于领先地位, 其增程器即将量产^[8-10]。

通用汽车公司雪佛兰 Volt 增程式电动汽车于 2010 年底上市, 并不断升级, 最新一代 2016 款雪佛兰 Volt 所搭载的动力系统由 1.5L 发动机和电机组成, 并匹配 18.4kW·h 的电池组。2016 款雪佛兰 Volt 在纯电动模式下的续驶里程为 80km 左右, 综合最大续驶里程约为 676km。同时, 2016 款 Volt 也具备制动能量回收等新能源汽车常见的功能, 进一步节省了能量。

宝马 i3 2016 款包括电动版和增程式混合动力版两款车型, 这两款车在电力驱动系统上的配备是完全相同的, 都装备有一台最大功率 125kW、最大转矩 250N·m 的电机, 其中, 增程版车型比纯电动车型额外多了一个排量为 0.65L 的双缸汽油发动机, 在电量不足时能够用于给电池充电, 但不直接参与车辆的驱动。根据厂家公布的 0—100km/h 加速成绩, 纯电动版 i3 为 7.3s, 增程式车型为 8.1s, 两车的极速均为 150km/h, 官方给出的增程式续驶里程为 355km, 而纯电动车型为 245km。

AVL 公司提出两种用于纯电动汽车的增程器方案。一种为使用转子发动机的增程发动机 “AVL Pure Range Extender”。该发动机配备于奥迪电动概念车 A1 e-tron 上, 电机输出功率高达 75kW, 充满电时可行驶 50km 以上。转子发动机配置在行李箱下面, 当动力电池电量不足时, 转子发动机启动为电池充电。使用增程器与仅使用电池行驶相比, 续驶距离可延长 200km, 燃油消耗率为 52km/L, CO₂ 排放量为 45g/km。AVL 针对增程式电动汽车的使用特点, 特别设计了第二种增程器方案, 其发动机为直列两缸四冲程汽油机, 整体系统大为简化。

Lotus 公司也非常重视增程式电动汽车的发展, 推出配备 1.2L 三缸汽油发动机的概念车 Evora 414E Hybrid。该概念车的发电机转子和发动机曲轴直接相连, 并且发电机具有输出功率在 15kW 和 35kW 两档切换功能。2010 年巴黎车展上,



捷豹公司展出了 C - X75 增程式超级跑车,其电机功率为 70kW,且配备两台,续驶里程可达 900km,其中,纯电动行驶距离 110km,增程行驶距离可达 790km。

1.3.2 国内增程式电动汽车发展现状

国内增程式纯电动汽车技术刚刚起步,首届“2006 年增程式纯电动汽车技术研讨会”把增程式电动汽车的概念引入中国,探讨增程式电动汽车的技术路线和技术特点,分析增程式电动汽车在中国的可行性和应用前景。目前国内一些研究机构和企业都处于预研阶段或试制开发阶段,没有成熟的技术或产品面世。

在国内,早在 2010 年广东深圳举行的第二十五届世界电动车大会上,国内第一款增程式电动汽车奇瑞 S18D 首度亮相。奇瑞在 A21 (奇瑞 A5) 和 S18 (即瑞麒 M1) 平台上开发了两款增程式纯电动汽车,这两款车可单独依靠动力电池驱动,当电池下降到一定限值时,增程器启动,为整车提供持续驱动能力,其一次充电加油可行驶 350km。S18D 搭载了目前奇瑞公司研发的转子发动机增程型发电机动力源驱动系统,该发动机具有振动小、油耗低等特点,当行驶里程在 100km 以内时,S18D 可完全依靠车载电池所储备的电能来驱动。在车载电池电量消耗到最低临界限值时,增程汽油发电机组可自动启动并为其继续提供电能或直接驱动电机,从而为车辆电驱系统提供持续的电能。

吉利帝豪 GPECs - EC7 是以帝豪 EC 系列车型为基础研发的增程式纯电动汽车,采用输出功率为 50kW 的 1.0L 排量直列 3 缸发动机,搭配使用最高输出功率为 70kW 的电机,以及 336V 电压、40A · h 容量的磷酸铁锂电池,纯电动模式续驶里程为 60km。长城汽车也有自己的增程动力系统,该系统匹配的电池容量为 17.5kW · h,以 60km/h 的速度等速行驶时的纯电动续驶里程为 85km。一汽集团、上汽集团等国内汽车企业都在投入大量的人力和物力进行增程式纯电动汽车的研发,目前还没有较成熟的样车面世。

广汽传祺推出中国首款 B 级增程式电动汽车——GA5 增程式电动汽车,其动力系统由一台永磁同步电机、1.0L 发动机和 31kW 发电机组成。其中,永磁同步电机的额定功率为 45kW,峰值功率为 94kW,最大扭矩 225N · m。GA5 采用三元锂电池,电池容量为 13kW · h。官方数据显示,GA5 PHEV 纯电续驶里程为 80km,油电综合最大续驶里程可超过 600km,实际测试 0 - 100km/h 加速用时 10.9s。作为一款增程插电式混动车型,GA5 的 1.0L 发动机不直接驱动车辆,仅在电池电量消耗到一定程度时启动,给电池充电。GA5 PHEV 设定了两种工作模式:在普通模式下,当电池电量低于 50% 时,发动机就会介入;在 ECO 节能模式下,发动机只有在电池电量低于 25% 时才会介入。

总之,国内现阶段还没有较为成熟的增程式纯电动汽车产品推向市场,有关



产品的研究和开发工作也刚刚起步,但各主要汽车生产企业、科研机构纷纷将增程式纯电动汽车作为新能源汽车发展的重要方向和近期开发计划的重要产品予以关注。

1.3.3 国内外增程式电动汽车研究及发展趋势

从国内外研究路线及研究现状可以看出,增程式纯电动汽车主要发展趋势可分为如下几个方面:

(1) 驱动动力传动系统一体化设计:主要集中在发动机、变速器的结构一体化,可以实现体积减小、重量减轻的目标。

(2) 增程器的模块化设计、标准化设计:根据不同的用户,可以设计出不同输出功率等级的增程器,并且该模块结构、连接达到标准化。

(3) 控制器集成化设计:目前整车控制器较多,较分散,需要把控制器结构及硬件电路集成化设计,进一步提高可靠性,降低成本。

(4) 系统高效安全化设计:整车系统的安全设计,主要集中在高压、碰撞等安全保护。

(5) 智能化及轻量化设计:新兴技术应用到新能源汽车上,节能减排的较好途径是整车轻量化设计。

(6) 低成本开发:主要是指开发流程,匹配的优化设计。

(7) 快速智能充电、适应性设计:基础设施的配套工作、高效智能充电设备的应用,对推广电动汽车有一定的支撑作用。

1.4 增程式电动汽车动力总成存在的问题分析

1.4.1 增程器系统存在的问题分析

2015年12月8日,杨裕生院士在《中国科学报》上发表了题为《“十三五”电动汽车展望》一文,文章指出:十三五期间,以电池水平为依据,大力发展增程式电动汽车。增程式电动汽车可以比相同功能的燃油汽车节油一半以上,当前成熟的、高安全性的电池完全可以用作其电源;电池始终处于半充半放的运行状态,不会过充,保障了安全性,不致过放,延长了使用寿命;增程式电动汽车可以不用充电(免建充电桩)而可长途行驶并保持接近50%的节油率。因此,发展增程式电动汽车不仅可以节约燃油和控制环境污染,而且保证了车辆电池的安全,延长了使用寿命,对于促进新能源汽车行业的发展具有重要的意义。

在增程器系统研制过程中,发现采用现有技术研制的增程器系统存在振动噪声大(驾驶人右耳的平均声压级达到85dB)、增程器系统中发动机与发电机的连



接轴经常发生断裂现象而可靠性低（连续开启增程器的可靠运行时间不大于200h）等缺点而无法实现增程式电动汽车大规模的产业化。因此，研制低噪声高可靠性的增程器系统有很大的必要性。通过制订增程器动力总成台架总体布置方案，规范增程器系统振动、噪声和可靠性试验仪器设备的布置及安装方案，获取增程器各测试工况下正常运行时的机体振动烈度，辐射噪声声压，发动机油耗率、转速及转矩数据，为全面评估增程式电动汽车动力总成 NVH 性能和优化增程器发动机工况点提供依据。该项目的研究对于开发低噪声高可靠性的高性能增程器产品应用于电动汽车具有重要的指导意义，为增程式电动汽车早日实现产业化提供了一定的帮助。

1.4.2 电机和减速器存在的噪声问题分析

汽车车的振动噪声作为汽车乘坐舒适性的重要评价指标，很大程度反映了生产厂家的设计和工艺水平。近年来，随着国家法规对电动汽车 NVH 性能的要求日益严格和汽车购买者对整车乘坐舒适性要求越来越高，电动汽车减速器的振动噪声作为电动汽车主要噪声来源，对其进行分析、优化与控制对电动汽车大规模产业化具有重要意义。

电动汽车整车振动噪声比同等燃油车低 3 ~ 6dB。由于电机磁场力波高阶激励，中低速车内噪声频谱成分以中高频为主，人耳对 1000 ~ 2000Hz 中高频噪声非常敏感，电动汽车噪声虽然不大，但很容易产生恼人的尖锐噪声^[10]。

对应用于电动汽车的永磁同步电机，电机的振动噪声主要由定子转子谐波磁场相互作用引起，电机制造加工过程存在的误差和定子开槽等原因使气隙磁场无法满足理想正弦分布，因此，电机主要振动中不仅包括气隙基波磁场引起的振动阶次，还包括倍电流基频成分，如果定子槽数是电机极数的整数倍，也会产生相应阶次的振动噪声。调速永磁同步电机还会产生正弦波脉宽调制（PWM）变频器载波频率附近的高频振动噪声，PWM 输出的并不是标准的正弦波，而是等幅不等宽的周期性电压或电流脉冲，经过傅里叶级数分解可以得到一系列谐波，因此会产生基于开关频率的谐波频率噪声^[12-14]。

减速器噪声主要包括两种：啸叫噪声和敲击噪声。在汽车减速器中，空套齿轮比承载齿轮更容易产生敲击噪声，同时空套齿轮也是最主要的敲击噪声源；减速器啸叫是由内部齿轮在啮合传动中所受的不平稳的激振力引起的一种中高频噪声，由齿轮系统啮合过程中的传递误差而引起^[11,12]。啸叫噪声是一种很容易被人耳识别的中高频纯音，是一种严重的汽车质量问题，必须降低或者消除减速器的啸叫噪声。在齿轮传动过程中，由于存在齿轮传动误差、弹性变形等因素，使得齿轮副在相互啮入、啮出时，偏离了理论啮合线，从而导致轮齿干涉、冲撞，进而产生激振力，引起传动机构的振动，在振动传动到变速器外部结构的过程中