

Electromagnetic Compatibility Principle, Simulation
Model and Modeling Technique of Electric Vehicle

电动汽车的电磁兼容原理、 仿真模型及建模技术

汪泉弟 郑亚利 著



科学出版社

电动汽车的电磁兼容原理、 仿真模型及建模技术

Electromagnetic Compatibility Principle, Simulation
Model and Modeling Technique of Electric Vehicle

汪泉弟 郑亚利 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书全面系统地讲述了电动汽车电磁兼容的理论、方法及其应用。本书涉及的电磁兼容相关理论、数值计算方法是成熟的,仿真软件也是工程上最常用的,其目的是帮助使用本书的读者容易掌握书中的内容,并能应用于工程实践中。全书共分8章,从第3章开始按汽车各子系统的电磁兼容问题进行撰写,每章内容相对独立自成体系。书中针对汽车各子系统电磁兼容问题的研究所采用的理论、建模方法和抑制技术并不局限于该系统,这些研究方法在各系统之间是可以通用的。

本书适用于汽车电磁兼容、汽车电子电器设计以及相关领域的工程技术人员及科研人员,也可供高等院校相关专业的本科高年级学生、研究生使用。

图书在版编目(CIP)数据

电动汽车的电磁兼容原理、仿真模型及建模技术= Electromagnetic Compatibility Principle, Simulation Model and Modeling Technique of Electric Vehicle /汪泉弟,郑亚利著.—北京:科学出版社,2017.5

ISBN 978-7-03-053108-7

I. ①电… II. ①汪… ②郑… III. ①电动汽车-电磁兼容性-研究
IV. ①U469.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第107488号

责任编辑:范运年/责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩/封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年5月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年5月第一次印刷 印张:22 1/4

字数:448 000

定价:138.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

世界各国政府及汽车产业界对发展新能源汽车的态度从来没有像今天这样统一,对发展新能源汽车的创新从来没有像今天这样强烈,同样,新能源汽车的产业化进程,也没有像今天这样不断在提速。这是因为世界汽车产业(包括中国汽车产业)可持续发展正面临三大挑战:能源供应和能源安全、区域性的空气质量及全球性的气候变暖。有数据表明:2009年我国的原油对外依存度已经达到52%,城市空气污染的50%来自汽车,毫无疑问,这种状况在最近若干年内会进一步恶化。在石油能源危机和环境污染的双重压力下,各国政府几乎一致选择电动汽车作为汽车工业的发展方向,并将电动汽车列为战略性新兴产业,给予了前所未有的资金和政策支持。

电动汽车是针对燃油车辆提出的概念,至少一种动力源为车载电源、全部或部分由电动机驱动、符合道路交通安全法规的汽车。因此,电动汽车是“电气化”和“汽车”的融合产物,集成了机械、能源、材料、电子、信息、计算机等高新技术,是典型的高新技术产品。电动汽车与燃油车辆相比具有能耗低、排放少等典型特征,但随之而来的还有汽车中日趋复杂的电磁环境。电动汽车采用了动力驱动电机、DC/DC电源变换系统、高压动力电缆以及大量的大功率电力电子器件,这些都会使汽车的电磁噪声水平大幅增加,因此限制电磁干扰水平,减小对车内及车外电磁敏感设备的影响显得尤为重要。

本书是一部论述电动汽车电磁兼容理论、方法及应用的学术著作,是重庆大学电气工程学院电磁兼容技术课题组开始涉及汽车的电磁兼容后,在汽车电磁兼容领域近十余年的研究成果。前后参与汽车电磁兼容研究工作的教师和学生近30余人。在这期间,参与该领域研究工作按先后次序进入的教师有:俞集辉教授、汪泉弟教授、李永明副教授、郑亚利讲师、高峰教授、杨永明教授;学生主要有:李旭博士、周尚华硕士、贾晋博士、刘庆升硕士、秦传明硕士、尹华平硕士、梁凌红硕士、安宗裕博士、彭河蒙博士、孙宏硕士、李铁鼎硕士、张飞硕士、马羚媛硕士、顾龙硕士等,研究成果最后由汪泉弟教授和洛阳师范学院郑亚利讲师整理撰写成书。

本书涉及的电磁兼容相关理论、数值计算方法是成熟的,仿真软件也是工程上最常用的,其目的是帮助使用该书的读者容易掌握书中的内容,并能应用于工程实践中。全书共分8章,分别是绪论、电磁兼容基础知识、点火系统传导电磁干扰的仿真建模与抑制、雨刮系统的电磁干扰分析、直流电源变换系统的传导电

磁干扰、电机驱动系统的电磁干扰仿真建模与实验、线束的电磁兼容性研究、汽车电磁辐射多软件联合仿真建模技术。从第3章开始按汽车各子系统的电磁兼容问题进行撰写，因此，每章内容相对独立自成体系，这是本书的一大特色。书中针对汽车各子系统电磁兼容问题的研究所采用的理论、建模方法和抑制技术并不局限于该系统，这些研究方法在各系统之间是可以通用的。

在汽车电磁兼容的研究过程中，得到了国家自然科学基金委、重庆市科委、重庆长安汽车股份有限公司以及重庆车辆检测研究院有限公司的大力支持和资助；本书的出版得到了重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室的资助，在此，我们一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，不当与疏漏之处在所难免，恳请读者提出宝贵意见。

作 者

2016年11月

目 录

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	汽车电磁兼容	1
1.1.1	电磁兼容含义及三要素	1
1.1.2	汽车电磁兼容的定义	1
1.2	汽车电磁兼容预测分析的必要性	2
1.3	国内外汽车电磁兼容研究概况	4
1.4	汽车电磁兼容标准	6
第 2 章	电磁兼容基础知识	8
2.1	电磁兼容常用术语与分贝制单位	8
2.1.1	常用术语	8
2.1.2	分贝制单位及换算关系	10
2.2	电磁干扰源	14
2.2.1	辐射干扰源	15
2.2.2	传导干扰源	16
2.3	电磁干扰的耦合路径	18
2.3.1	传导耦合	19
2.3.2	辐射耦合	24
第 3 章	点火系统传导电磁干扰的仿真建模与抑制	27
3.1	点火系统的组成及工作原理	27
3.1.1	点火系统的组成	27
3.1.2	点火系统的工作原理	28
3.2	点火系统产生电磁干扰的机理	29
3.2.1	初级电路的瞬态电流	29
3.2.2	次级电路中的火花放电	32
3.3	点火系统的传导电磁干扰模型	34
3.3.1	建模思路与流程	34
3.3.2	各模块电路模型的建模方法与过程	36
3.4	点火系统传导电磁干扰模型的实验验证	56
3.4.1	点火系统传导电磁干扰集总参数电路模型	56

3.4.2	传导电磁干扰模型的时频域验证	58
3.5	点火系统电磁干扰抑制措施	61
3.5.1	火花塞内置电阻参数的优化设计	61
3.5.2	光电隔离技术	64
3.5.3	滤波技术	71
3.5.4	电磁屏蔽技术	83
第 4 章	雨刮系统的电磁干扰分析	91
4.1	雨刮系统的组成及工作原理	91
4.1.1	雨刮系统的组成	91
4.1.2	雨刮系统的工作原理	93
4.2	雨刮系统产生电磁干扰的机理	96
4.2.1	换向产生的电磁干扰	96
4.2.2	雨刮电机启停产生的电磁干扰	102
4.3	雨刮系统的传导电磁干扰模型	104
4.3.1	雨刮电机高频电路模型	104
4.3.2	电磁干扰源的提取	109
4.3.3	雨刮系统传导电磁干扰的电路模型及实验验证	109
4.4	雨刮系统的辐射电磁干扰模型	113
4.4.1	FIT 算法的基本理论	113
4.4.2	Maxwell 网格方程的时域求解	119
4.4.3	雨刮系统辐射电磁干扰仿真建模	122
4.4.4	仿真结果与实验结果的比对	126
4.5	雨刮系统电磁干扰的抑制	128
4.5.1	雨刮系统电磁干扰测试及结果分析	128
4.5.2	传导电磁干扰的抑制措施	133
第 5 章	直流电源变换系统的传导电磁干扰	141
5.1	电磁干扰源的独立测量与特征提取	141
5.1.1	干扰源的独立测量	141
5.1.2	干扰源的特征提取	144
5.1.3	干扰源的特征分析	149
5.2	DC/DC 变换系统的组成及工作原理	151
5.3	DC/DC 变换系统传导 EMI 的产生与耦合机理	152
5.3.1	振荡波形产生机理	153
5.3.2	上升/下降沿产生的干扰	158
5.3.3	干扰耦合路径分析	159
5.4	DC/DC 电源变换系统的传导 EMI 仿真模型	162

5.4.1	独立 DC/DC 变换系统的实验平台	162
5.4.2	DC/DC 变换系统的仿真建模	163
5.4.3	DC/DC 系统传导电磁干扰模型的实验验证	174
5.5	DC/DC 变换系统传导 EMI 的抑制措施	179
5.5.1	EMI 滤波器设计	180
5.5.2	干扰耦合路径的优化设计	195
5.5.3	变压器绕线方式优化设计	212
第 6 章	电机驱动系统的电磁干扰仿真建模与实验	216
6.1	永磁同步电机高频电路模型	216
6.1.1	矢量匹配法基本原理	216
6.1.2	网络函数对应的等效电路	220
6.1.3	基于矢量匹配法的永磁同步电机高频模型	226
6.2	电机驱动系统的组成及工作原理	236
6.2.1	电机驱动系统的组成	236
6.2.2	电机驱动系统的工作原理	236
6.3	电机驱动系统 EMI 产生机理及耦合路径	237
6.3.1	传导电磁干扰产生机理	237
6.3.2	传导 EMI 耦合路径分析	238
6.4	电机驱动系统传导 EMI 仿真建模	240
6.4.1	实验平台	240
6.4.2	电机驱动系统传导 EMI 仿真模型	241
6.4.3	电机驱动系统传导 EMI 仿真模型及实验验证	251
6.5	仿真模型在不同工况下的实验验证	255
6.5.1	驱动系统不同工况下的传导 EMI 实验设计	255
6.5.2	传导 EMI 仿真模型对不同工况的分析	260
6.6	电机驱动系统辐射电磁干扰	264
6.6.1	电机驱动系统辐射 EMI 实验与结果分析	264
6.6.2	电机驱动系统辐射 EMI 仿真	269
第 7 章	线束的电磁兼容性研究	273
7.1	多导体传输线方程及电磁参数	274
7.2	线束的等效原理与等效模型	276
7.2.1	线束的等效原理	276
7.2.2	线束等效模型的建立	280
7.3	线束辐射发射敏感度分析	289
7.3.1	导线感应电流的计算	289
7.3.2	平面电磁波对导线的耦合方式	291

7.3.3	线束等效模型的电磁辐射敏感度仿真分析	292
7.3.4	线束等效模型的电磁辐射敏感度实验验证	300
7.4	线束辐射发射的等效模型及实验验证	303
7.4.1	导线的电磁辐射发射原理	303
7.4.2	线束等效模型的电磁辐射发射仿真及分析	305
7.4.3	线束等效模型的电磁辐射发射实验验证	309
7.5	车内线束对点火系统辐射发射的敏感度分析	312
第 8 章	汽车电磁辐射多软件联合仿真建模技术	315
8.1	主要仿真软件简介	315
8.1.1	HFSS 软件概述	315
8.1.2	Hypermesh 软件概述	318
8.2	多软件联合建模方法	319
8.3	车体有限元建模流程	320
8.3.1	汽车 CAD 模型的处理及剖分	320
8.3.2	节点信息的提取	324
8.3.3	组建车体有限元模型	325
8.3.4	材料属性与边界条件设置	327
8.4	整车级点火系统电磁辐射仿真	328
8.4.1	点火系统辐射源模型	328
8.4.2	整车级点火系统辐射模型及实验验证	329
8.4.3	车内外电场空间分布及车壳面电流密度	332
8.5	整车级雨刮系统电磁辐射仿真	335
8.5.1	干扰源测量	335
8.5.2	整车级雨刮系统辐射干扰仿真模型	336
8.5.3	仿真和实验验证	338
8.6	整车级电机驱动系统电磁辐射仿真	339
8.6.1	电机驱动系统的辐射干扰	339
8.6.2	电动汽车的有限元仿真模型	341
8.6.3	整车级电机驱动系统电磁辐射仿真模型及实验验证	342
参考文献		344

第1章 绪 论

1.1 汽车电磁兼容

1.1.1 电磁兼容含义及三要素

电磁兼容(electromagnetic compatibility, EMC)是一门与电磁环境和频谱资源有着密切关系的新兴学科,它是研究在有限的空间、时间和频谱资源等条件下,各种用电设备(广义的还包括生物体)可以共存,并不致引起降级的一门科学。根据 GB/T 4365-2003《电工术语电磁兼容》中给出的电磁兼容的定义为:“设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力”。从电磁兼容的观点出发,在设计电子设备、系统时,除按要求进行功能设计外,还必须基于电子设备、系统所处的电磁环境进行电磁兼容的分析和设计,一方面使它具有规定的抗电磁干扰能力,另一方面使它不产生超过限值的电磁干扰。

研究电磁兼容问题应从电磁干扰的形成方面着手。根据电磁干扰产生机理的不同,一般可将电磁干扰划分为自然电磁干扰和人为电磁干扰两类。在自然电磁干扰现象中,静电、雷电和自然辐射是一种最重要的干扰源;人为电磁干扰可以分为功能性发射和非功能性发射两大类,其产生的根本原因是导体中有电压或电流的变化能够使导体产生电磁发射。无论是哪种方式产生的电磁干扰都将以传导或辐射的方式传播到敏感设备上,所谓敏感设备既可以是各式各样的电气设备及元件,也可以是人体。因此,但凡电磁干扰问题必然存在三个方面的要素:干扰源、耦合途径及敏感设备,三者相辅相成,缺一不可。

1.1.2 汽车电磁兼容的定义

在 EEC 指令 72/245/EEC(现修改为 2004/104/EC)中,汽车电磁兼容(automotive electromagnetic compatibility)定义为:“车辆或零部件或独立技术单元在其电磁环境中能令人满意的工作,又不对该环境中任何事物造成不应有的电磁骚扰的能力”。也就是,汽车的电磁兼容问题就是研究在汽车及其周围的空间中,在一定的时间内(运行的时间),在可用的频谱资源条件下汽车本身及其周围的用电设备可以共存,不致引起其功能发生降级。对汽车电磁兼容问题的研究则是围绕形成电磁干扰的三要素以及如何抑制干扰的发射而进行的,即研究干扰产生的机理、

干扰源的发射特性、干扰以何种方式、通过什么途径传播以及如何抑制干扰或切断传播通道。同时也需要研究敏感设备对干扰产生何种响应及如何降低其干扰敏感度,增强抗干扰能力。

根据 GB/T19596-2004《电动汽车术语》的定义,电动汽车包括混合动力汽车(hybrid electric vehicle, HEV)、纯电动汽车(blade electric vehicles, BEV)和燃料电池汽车(fuel cell electric vehicle, FCEV)。与传统燃油汽车相比,电动汽车的驱动系统有很大的不同,均集成了大功率的电力电子装置构成的电气动力系统,因此,电动汽车的电磁兼容问题既具有传统燃油汽车电磁兼容的共性,又有其特殊性。

1.2 汽车电磁兼容预测分析的必要性

当前,我国汽车产业正处在空前快速的增长时期,按照我国汽车产业发展的战略目标,到 2020 年,中国将由汽车消费大国发展成为汽车产业强国。汽车工业的快速发展和汽车市场的激烈竞争极大地促进了电子设备在汽车上的应用,对于今天的汽车产业,应用电子技术的程度已成为提升汽车技术水平的重要标志之一,汽车上 70%的创新来源于汽车电子。

目前,电子设备广泛应用于汽车发动机控制系统、自动变速系统、制动系统、调节系统以及行驶系统中,对汽车的安全性、可靠性、舒适性起着决定性作用。随着汽车电子设备应用的不断增加,由此产生的电磁干扰已成为除排放、噪声之后的第三大污染。车内电磁干扰不仅影响汽车电子设备的工作特性,严重时可能引起车内控制系统失灵、通信中断等事故,直接影响到汽车的安全行驶。当安全防盗控制(聪明钥匙、指纹识别)、人身安全控制(碰撞警告、夜视系统、安全制动)、远程通信系统(数字/蜂窝技术)、卫星导航控制(巡航控制、智能交通、紧急救护)等再应用于汽车时,电子设备的相互干扰将愈加严重,汽车运行的电磁环境也更加恶劣。

与传统燃油汽车相比,电动汽车的电磁环境更复杂。电动汽车(以混合动力汽车为例)有高低压两套电气系统,如图 1.2.1 所示。低压电气系统与传统燃油汽车的作用相同,为照明系统、雨刮系统、点火系统、控制设备等提供电能;高压电气系统则是电动汽车的核心装置,为电动汽车提供动力能源。从图 1.2.2 可以看到,电动汽车动力驱动系统的电压已超过 500V,由于对效率和续驶里程的更高要求,动力驱动系统电压增高的趋势是显而易见的。这种高电压、大电流、大功率系统会严重恶化汽车狭小空间的电磁环境,尤其是高压系统中功率器件的高 dv/dt 、 di/dt 开关特性、驱动电机的速度或转矩变化等都将产生高幅值和宽频带的电磁干扰。

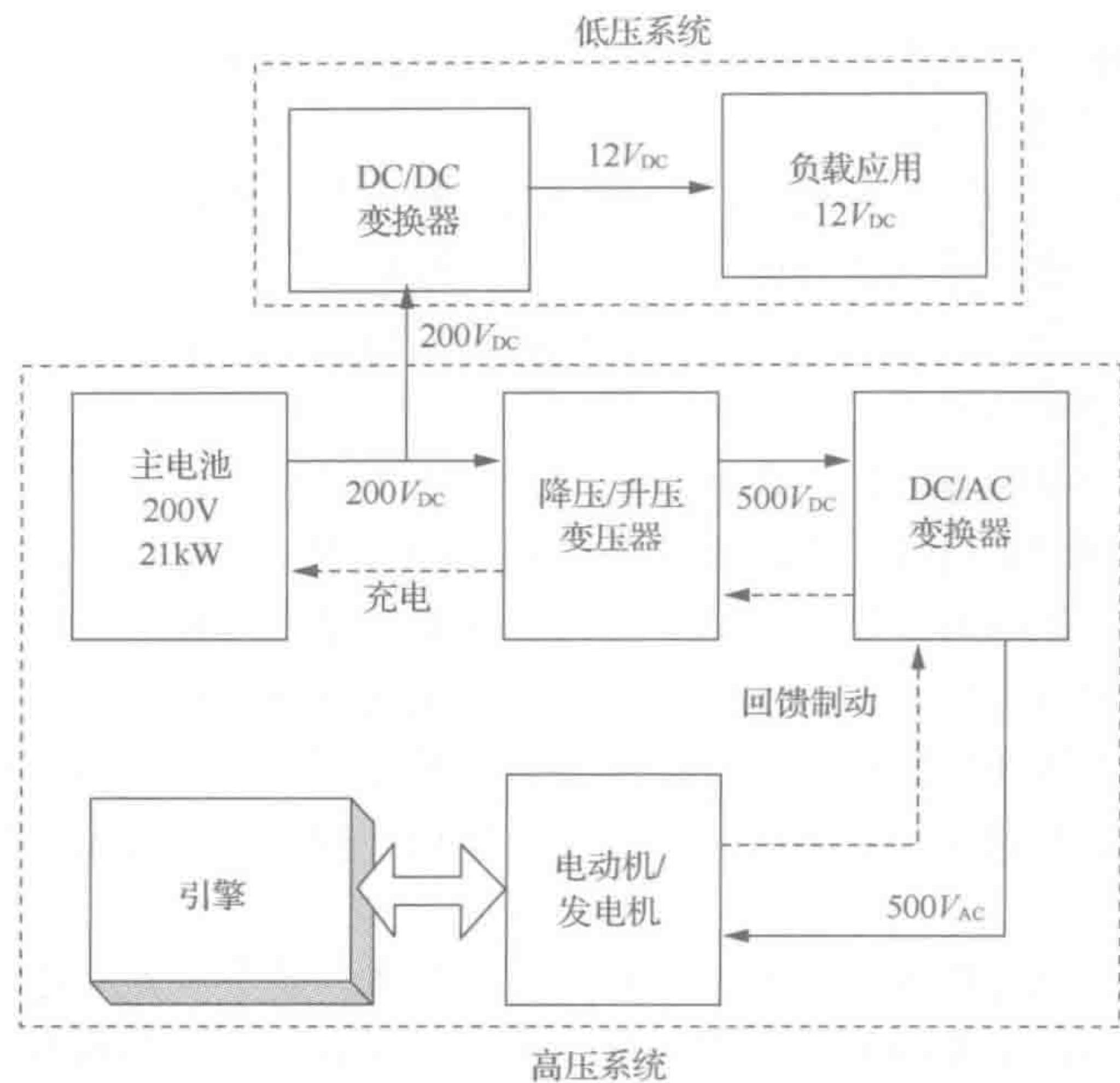


图 1.2.1 混合动力汽车电气系统构成

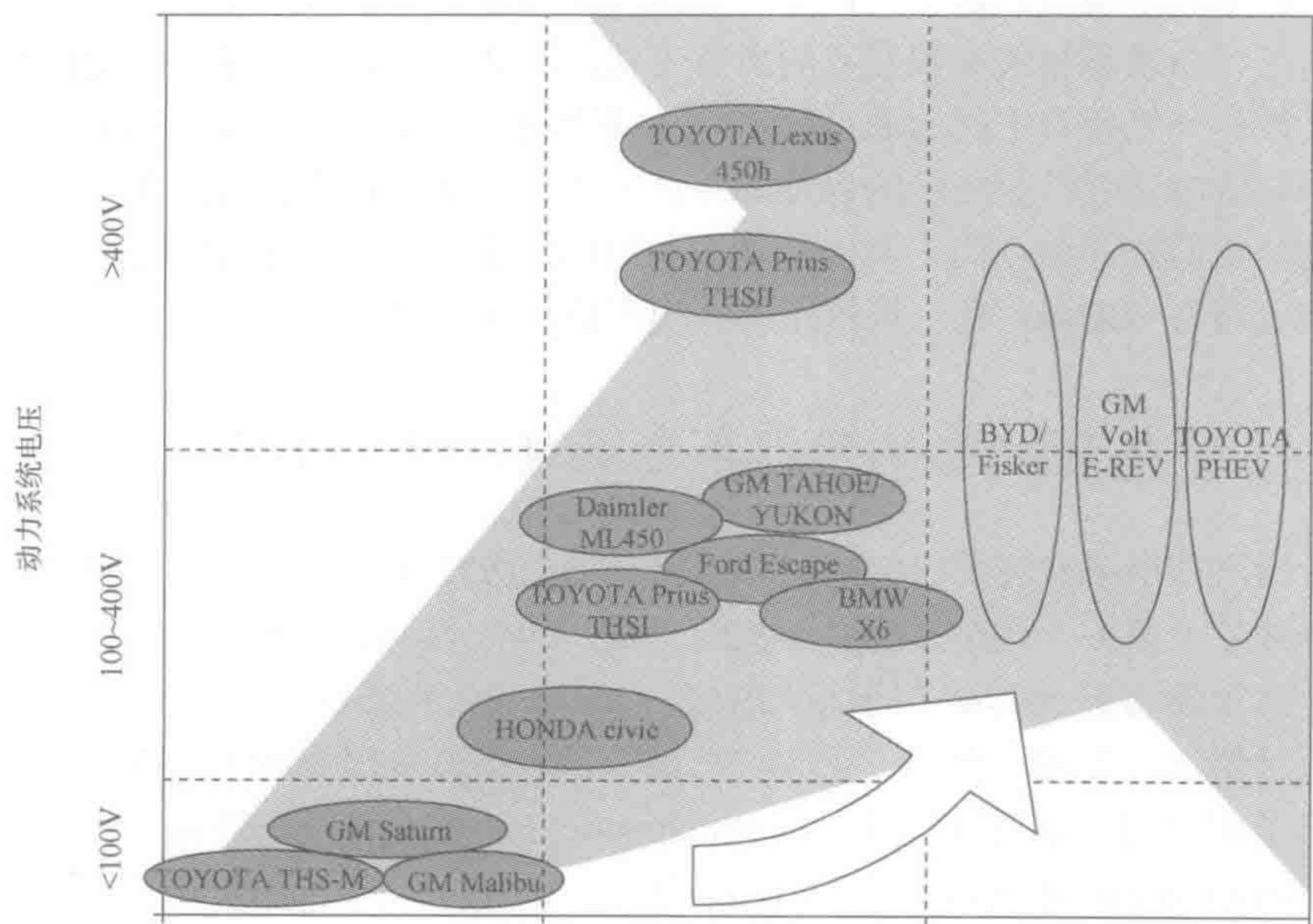


图 1.2.2 混合动力汽车动力系统电压

汽车电磁环境是指汽车在行驶过程中，车上电子设备承受来自车内、车外各种各样的电磁干扰，以及汽车电子设备向外界辐射的电磁干扰。对于汽车的安全

行驶来说,电磁干扰源主要是指汽车内部的干扰源,如来自发动机点火系统、电机驱动系统、雨刮系统、电源变换器系统以及控制系统中的各种执行机构,干扰信号通过传导或空间辐射方式给汽车电子设备的工作带来影响,特别是对汽车内的敏感设备如传感器等造成性能下降甚至永久性破坏。因此,汽车电子设备的电磁兼容问题是一个非常重要和迫切需要解决的问题,汽车电磁兼容技术与汽车排放技术、汽车安全技术同为汽车共性技术。

汽车良好的电磁兼容性来自良好的设计,而不是事后检测,在汽车设计阶段进行电磁兼容预测是进行合理的电磁兼容设计的基础。在设计阶段通过对汽车电磁干扰的预测,能够对可能存在的干扰进行定量的估计和模拟,以避免采用过高的防护措施,造成不应有的浪费,同时也可以避免系统建成后才发现不兼容而带来的难题。在系统建成后再修改设计,重新调整布局,即使花费很大的代价,有时也未必能彻底解决不兼容问题,因此在汽车设计阶段开展电磁兼容预测是十分必要的。

电磁兼容预测分析方法是采用计算机仿真技术,将各种汽车电器设备的电磁干扰特性、传输函数和敏感特性全都用数学模型描述,并编制成程序,然后根据预测对象的具体状态,运行预测程序来获得潜在的电磁干扰计算结果。预测分析的关键在于数学模型的建立和计算机分析程序的编制。数学模型包括根据实际设备的电路、布线和相关参数建立的所有干扰源、传播途径和敏感设备的模型,应用仿真软件计算所有干扰源通过可能的传播途径对每个敏感设备的影响,并判断这些综合影响是否符合相应的标准和设计要求。目前真正能够对汽车电磁兼容进行预测分析的软件至今尚未出现,其根本原因在于,汽车电磁兼容是一个大系统的复杂电路与电磁场问题,很难用简单模型描述和一般方法求解。

1.3 国内外汽车电磁兼容研究概况

针对汽车电磁兼容的研究率先在美国开始,1932年美国广播工程师协会论文集上登载了一篇关于汽车接收机干扰的文章,1947年11月美国公布了第一个关于减少汽车发动机点火噪声的标准(SAE J551)。20世纪60年代以后,汽车电气设备大量增加,美国、德国、英国、法国、日本等许多国家和国际性组织针对汽车推出了相应的产品骚扰发射(electromagnetic sensitivity, EMS)标准和电磁敏感度(electromagnetic interference, EMI)标准。

除此之外,各大汽车厂商也都投入资金建立了相应的电磁兼容研究中心。早从1965年起,德国大众便着手开始建立露天的汽车防无线电干扰试验台,之后于1987年成立了自己的汽车电磁兼容中心,对其车载电子零部件进行检测并对整车

电磁环境进行分析,提升了企业内部整车电气系统和汽车电子产品电磁兼容性设计的技术要求。但在20世纪80年代以前,国外发达国家主要通过反复试验的方法来改善汽车 EMC 问题,因此,除德国大众汽车公司外,宝马汽车公司、法国 U-TAC、英国 MIRA、意大利的菲亚特公司,美国的通用汽车公司、福特汽车公司、戴姆勒-克莱斯勒汽车公司,日本的丰田汽车公司、三菱公司、韩国的三星、现代、大宇等公司拥有大型或超大型 EMC 实验室。这些汽车公司的 EMC 实验室不但规模大而且试验设备先进、装备齐全,能模拟非常恶劣、特殊的电磁现象,能进行汽车 EMI 和 EMS 的各类试验。

但是,汽车 EMC 试验费用是昂贵的,而且通过事后检测改善汽车 EMC 的方式增加了新产品的开发周期和成本,因此,20世纪80年代初期国外有学者开始对汽车点火系统干扰进行仿真研究,在早期仿真研究中主要采用高频电路模型来模拟汽车电子设备产生的无线电噪声。随着计算机功能的不断增强和电磁场数值计算方法的进步,从20世纪90年代以来国外研究者采用多种数值计算方法研究汽车 EMC,如有限元法(FEM)、矩量法(MoM)、时域有限差分法(FDTD)以及传输线法(TLM)等,已从单个汽车电子电器部件的电磁兼容性研究进入到整车电气系统级的研究,并强调电磁兼容预测分析,提出了汽车电磁兼容专家系统。

目前,汽车发达国家对汽车电磁兼容研究取得一些成果,形成了一套汽车电磁兼容体系。主要体现在:①具有较为完善的汽车电磁兼容测试标准和规范;②具有有效的对汽车整车和零部件进行电磁兼容检测、管理和认证的机构;③具有高精度的汽车电磁兼容测试系统;④研制出了汽车电磁兼容预测、分析和设计软件;⑤第三方测试认证机构、汽车研究机构等也都开展了汽车电磁兼容方面的研究,并相继建立了自己的电磁兼容实验室。

我国汽车工业过去长期处于落后地位,汽车 EMC 问题一直未受到足够的重视,直到20世纪80年代初,有关机构才开始对汽车电磁干扰特性进行摸底测量试验。1992年我国颁布了 GB14023—92《车辆、机动船和火花点火发动机驱动装置无线电干扰特性的测试方法及允许值》强制性国家标准,两年后,中国汽车技术研究中心在国内开展了对汽车无线电干扰特性的测量,并对全国各型汽车(新车)进行了摸底普查。普查统计结果显示合格率仅为24%,相当部分不合格的车辆属于严重超标。2003年按当年3月1日起执行的 GB 18655-2002 标准对我国生产的汽车进行了一次较全面的摸底,其结果见表 1.3.1,可见当时我国车载电气设备 EMC 的合格率是非常低的。

针对严重的汽车电磁兼容问题,国内汽车行业加强了对电磁兼容性能的要求和控制,经过二十多年的努力,目前,我国的整车 EMC 合格率已大大提高。特别是进入21世纪后,汽车产业成为我国的支柱产业,汽车电磁兼容问题日益受到

表 1.3.1 车内骚扰测量结果(2003 年)

产品名称	数量	评定原则	测量结果		
			合格	不合格	合格率/%
整车发动机	71	整车限值	2	69	2.82
暖风电机	96	部件传导/辐射 1 级	20	76	20.83
闪光继电器	85	部件传导/辐射 1 级	24	61	28.24
雨刮器电机	85	部件传导/辐射 1 级	5	80	5.88

汽车生产厂家、汽车研究机构和大学科研团队的重视。如上海汽车集团、天津一汽、重庆长安汽车集团等，拥有了自己的研发人员，可以从事汽车电磁兼容的整改工作；还成立了第三方认证机构，如天津汽车检测中心、重庆车辆检测研究院、上海机动车检测中心等，可以对汽车整车和零部件进行电磁兼容检测；高校从事汽车 EMC 研究的则有同济大学、清华大学、吉林大学、中科院、重庆大学等。但是总的来说，我国的汽车电磁兼容水平与发达国家相比还存在很大的差距，尤其在制定汽车电磁兼容标准方面，相比 ISO(International Organization for Standardization)、IEC(International Electrotechnical Commission)等国际先进标准，我国汽车电子标准化工作总体相对于电子技术的应用程度和水平明显滞后。

1.4 汽车电磁兼容标准

汽车电磁兼容标准分为国际标准、地区标准、国家标准和企业标准。国际上制定电磁兼容标准的组织有国际标准化组织(ISO)、国际电工委员会(IEC)、国际电工委员会无线电干扰特别委员会(International Special Committee on Radio Interference, CISPR)。有代表性的地区标准主要是欧洲 ECE 法规和 EEC 指令。国家性标准协会有美国国家标准协会(American National Standards Institute, ANSI)、美国联邦通讯委员会(Federal Communications Commission, FCC)、美国汽车工程师协会(Society of Automotive Engineers, SAE)、德国邮电部(Fernmel-decechnisches Zentralamt, FTZ)、德国电气工程师协会(Verband Deutscher Elektro-techniker, VDE)、英国标准协会(British Standard Institution, BSI)、日本民间干扰控制委员会(Voluntary Control Council for Interference, VCCI)，上述国家性标准协会的作用是与国际标准组织协调，并且制定各自国家的标准。我国的汽车电磁兼容标准化组织为“汽车电子与电磁兼容分技术委员会(SAC/TC114/SC29)”，其任务是组织行业进行汽车 EMC 标准的研究与制定。

国际上几乎所有大型汽车公司都设有企业内部的电磁干扰标准或技术要求，

其制定的技术要求往往高于国际通用标准。如：美国福特公司、通用公司，德国大众、宝马、梅塞德斯-奔驰公司，法国的标致-雪铁龙公司等，其企业标准比国际标准要严格很多，例如国际标准对汽车抗扰度的要求通常为 24V/m，而一些汽车公司则规定该数值为 100~200V/m。

国际标准化组织在所有电工标准化方面与国际电工委员会按照共同协商确定的条件密切合作。在汽车电磁兼容标准方面，ISO/TC22 主要制定汽车整车和零部件的电磁抗扰度标准，如 ISO 11451、ISO 11452、ISO 7637 和 ISO 10605 这四个标准都是由 ISO/TC 22 道路车辆技术委员会、SC3 电气和电子设备分技术委员会制定的。而 IEC/CISPR 则负责制定汽车整车和零部件的无线电骚扰特性标准。CISPR 的汽车电磁兼容标准 CISPR 12 和 CISPR 25 是关于汽车和车载电子骚扰特性的测量规范，内容涵盖了辐射及传导测试以及各项测试的方法要求、测试布置、极限等，这两项标准都是由 CISPR D 分会（关于机动车辆和内燃发动机的干扰）制定的。我国汽车电磁兼容标准与对应的国际标准见表 1.4.1。

表 1.4.1 中国汽车 EMC 标准

标准名称	实验类型	对应国际标准	适用范围
GB 14023《车辆、船和由内燃机驱动的装置无线电骚扰特性 限值和测量方法》	骚扰测试	CISPR 12	整车、零部件
GB 18655《用于保护车载接收机的无线电骚扰特性的限值和测量方法》	骚扰测试	CISPR 25	整车、零部件
GB/T 18387《电动车辆的电磁场发射强度的限值和测量方法，9kHz~30MHz》	骚扰测试	SAE 551-5	整车
GB/T 21437《道路车辆由传导和耦合引起的电骚扰》系列	抗扰性测试	ISO 7637 系列	零部件
GB/T 19951《道路车辆 静电放电产生的电骚扰试验方法》	抗扰性测试	ISO 10605	整车、零部件
GB/T 17619《机动车电子电器组件的电磁辐射抗扰限值和测量方法》	抗扰性测试	95/54/EC 中零部件的内容	零部件

电动汽车属于汽车范畴，仍须执行传统燃油车的 EMC 测试标准。针对其特殊性，还必须增加新的测试内容，制定专门的测试项目或标准，通常均要求被测车辆(设备)在典型的或最严酷的工作状态下进行测试。表 1.4.1 中，GB/T 18387-2008 是专门针对电动汽车而制定的 EMC 测试标准，其他标准则可与传统燃油车通用。

第2章 电磁兼容基础知识

2.1 电磁兼容常用术语与分贝制单位

2.1.1 常用术语

电磁兼容常用术语有以下这些：

(1) 电磁兼容性 (electromagnetic compatibility)：在不损失有用信号所包含的信息条件下，信号和干扰共存的能力。

(2) 电磁环境 (electromagnetic environment)：存在于给定场所的所有电磁现象的总和。“给定场所”即“空间”，“所有电磁现象”包括了全部“时间”与全部“频谱”。

(3) 电磁噪声 (electromagnetic noise)：由电磁场交替变化而引起某些机械部件或空间容积震动而产生的噪声，称为电磁噪声。它可能与有用信号叠加或组合。电磁噪声通常是脉动和随机的，但也可能是周期的。

(4) 电磁骚扰 (electromagnetic disturbance)：任何可能引起装置、设备系统性能降低及对生命或无生命物质产生损害作用的电磁现象。电磁骚扰仅仅是电磁现象，即指客观存在的一种物理现象，它可能引起降级或损害，但不一定形成后果。

(5) 电磁干扰 (electromagnetic interference)：电磁干扰是由电磁骚扰引起的后果。

以前在术语上并未将物理现象与其造成的后果明确划分，故统称为干扰 (interference)。进入 20 世纪 90 年代，IEC60050(161)发布后，才明确引入了“骚扰” (disturbance)这个术语，与过去惯用的“干扰”一词明确分开。

(6) 传导干扰 (conducted interference)：沿着导体传播的电磁干扰。

(7) 辐射干扰 (radiated interference)：通过空间以电磁波形式传播的电磁干扰。

(8) 干扰源 (interference source)：任何产生电磁干扰的元件、器件、装置、设备、系统或自然现象。

(9) 电磁发射 (electromagnetic emission)：从源向外发出电磁能的现象，即以辐射和传导形式从源发出的电磁能量。

此处“发射”与通信工程学中常用的“发射”含义并不完全相同。电磁兼容中的发射既包含传导发射，也包括辐射发射，而通信中的发射主要指辐射发射。