

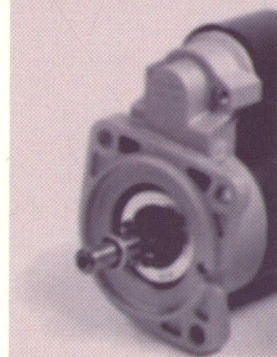


普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

车用电机原理及应用

Principles and
Applications of
Automotive Electric Motors

◎ 袁新枚 范涛 王宏宇 等编著



相关仿真程序下载网址

http://cmpedu.com/zhuanti/qiche/Demo_chap12_1.zip

http://cmpedu.com/zhuanti/qiche/Demo_chap12_2.zip



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

车用电机原理及应用

袁新枚 范 涛 王宏宇 等编著



机械工业出版社

本教材立足于电磁学的基本物理概念,通过理论和实践相结合的方式,重点介绍直流电机及永磁同步电机的原理、设计及控制方法。在直流电机相关章节中,面向电机的建模与转矩控制,建立基本的电机系统控制的概念,同时辅以电力电子基础知识的介绍,使读者可以掌握电机控制系统的基本框架,满足汽车专业相关人员对电机系统了解的需求。在交流电机相关章节中,本教材则详细地分析了现代交流电机的磁场、特性及控制原理,为从事电机系统开发或电动汽车相关开发的人员提供实用的技术支撑。

为了与汽车应用相结合,本教材在最后的章节中还介绍了车用电机的标准及测试方法,以供相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

车用电机原理及应用/袁新枚等编著. —北京:机械工业出版社,2016.6
普通高等教育“十三五”汽车类规划教材
ISBN 978-7-111-53326-9

I. ①车… II. ①袁… III. ①汽车—电机—高等学校—教材 IV. ①U469.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第061479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:何士娟 李军 责任编辑:张利萍 何士娟
责任校对:张薇 封面设计:张静
责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2016年7月第1版第1次印刷
184mm×260mm·10印张·242千字
0001—3000册
标准书号:ISBN 978-7-111-53326-9
定价:35.00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:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

序 1

电动汽车之所以能享受不限购、不限行、财政补贴等优惠政策，是因为它是一种绿色环保、节能减排能为治理雾霾做贡献的新能源汽车。新能源汽车已被我国实施制造强国战略第一个十年的行动纲领《中国制造 2025》列入大力推动的重点发展领域之一。

电动汽车要想替代传统的燃油汽车，还有漫长的路要走。许多关键技术，如电池技术、电动机及其控制技术、整车技术和能量管理技术等，有待于通过不断的创新研究开发得到解决。电动机及其控制系统是电动汽车的关键部件，要使电动汽车具备优良的性能，驱动电机系统应具有调速范围宽、起动转矩大、体积小、重量轻、效率高以及制动性好和能量可回馈等特性。该书正是应电动汽车发展的需求而出版的。

该书的特点是根据电机在汽车系统中的应用，把传统的《电机学》《电力电子技术》和《电机控制系统》课程的相关内容按照电机及其控制种类重新编排整合在一起，有利于读者用较短的时间掌握车用电机的原理、建模与控制，方便学以致用。该书既有理论分析又有实际应用实例。

全书共分 13 章：第 1 章为导论，介绍电机发展简史、电机的基本概念及分类和电机在汽车系统中的应用；第 2~6 章分别介绍直流电机的工作原理、建模与控制，以及车用直流电机实例，还介绍了直流电机控制中用到的 PWM 技术、典型电力电子器件及其损耗散热问题、整流与逆变电路和单极双掷开关实现等电力电子技术；第 7 章主要介绍交流电机的工作原理、结构及分类；第 8~10 章分别介绍永磁同步电机的磁路与电路分析、外特性与效率特性、建模和各类控制等；第 11 章主要介绍感应电机的建模与控制；第 12 章介绍车用永磁同步电机矢量控制系统建模与仿真和纯电动汽车动力学模型与仿真实例；最后一章介绍车用电机测试方法及电动汽车电机系统标准。

该书后面附有参考文献，可供读者拓展学习时参考。

该书可作为普通高等学校和成人高等学校汽车专业及机电一体化专业的教材或参考书，也可供有关科技人员学习参考。

邱阿瑞

2016 年 1 月于清华园

序2 热爱、认同、信心

爱范涛博士邀请，我为《车用电机原理及应用》写序，备感荣幸！

书的内容读者可以自己阅读，而我更多要对袁博士撰写的前言发表自己的看法。

袁博士和范涛博士本科教育都在清华大学完成，从他的字里行间可以读出清华教育的精髓：从表面现象着手，进一步挖掘现象背后的问题，再把问题归类，纵横联系已有知识，最终从物理的本质来认识电机的问题、汽车的问题，感谢伟大的麦克斯韦先生把电机学背后的电磁场理论帮我们都厘清了！

但是，科学理论和工程技术并不是一回事。比如，从科学理论上来说，电机可以有无数种结构形式。但是，考虑到材料特性、制造工艺和经济性，真正实用的电机类型到现在为止也为数不多。因此，我们需要一直跟随材料的进步，不断创造新工艺，去满足新的需要。在这本书里，这个新的需要就是电动汽车。

我对电动汽车的热爱是在二十多年的时间里慢慢地酝酿出来的。这些年来，电动汽车的电机驱动从直流电机驱动、交流异步电机驱动到永磁电机驱动，每一次变迁都是为了解决问题。现在，永磁电机以高效、高功率密度以及优良的控制性能成为电动汽车的主流驱动电机，这些电机的工作原理、控制方法都已经写入这本书中。但是，我想提醒读者的是，这些原理和方法之所以被写入书中，是因为它们被证明在过去的一时间段内解决了很多问题，但并不是说，永远是最优。在学习过程中，读者同时需要掌握的是：问题是什么，解决问题的初始想法是什么，是如何推演、如何证明、如何应用的。

在社会发展如此之快的现在，我感叹三位年轻的作者还能从已经十分繁忙的工作、生活中抽出时间来写书。我认同这种努力，这种勤奋还给了我信心！

我感叹屠呦呦老师终于获得了中国第一个科学诺贝尔奖，她还是位女性，她还八十多岁了！以屠老师为参考坐标，再借点你们的年轻锐气，我斗胆放言：让我们憧憬再过一二十年，在我们中将出现国际闻名的大师！他或她，可能就是你们中的一个！

温旭辉

2016年1月

前 言

6年前，我从清华大学电机系博士毕业，来到吉林大学汽车工程学院任教，并承担了车辆工程专业卓越工程师班的本科生选修课《电机与驱动》的教学工作。随着混合动力汽车及电动汽车技术的快速发展，电机及其控制系统的基本知识对于车辆工程专业的学生越来越重要，但车辆工程专业的学生一般缺乏电气工程相关的基础，所以起初这门课让我觉得无从下手。传统的电机学和交流电机传动这两门专业课一般就需要上百学时，而这两门专业课又是建立在电路原理、电磁场、自动控制原理、电力电子技术等一系列专业基础知识体系之上的，这一系列复杂的知识不可能在短短的32学时中讲授给学生。经过几年来与学生们的交流和我在科研课题中的实践体会，我将这门《电机与驱动》的教学思路定位为“抓两头”，即重点强调电机系统中“顶层体系”的介绍和电机系统中“底层物理概念”的介绍。所谓“顶层体系”，就是电机系统的知识框架，让学生知道遇到问题后应该找哪方面的知识。例如：混合动力汽车建模应当去找电机的外特性和效率特性；电机转矩控制应该去看矢量控制；交流电压调制应该去看电力电子技术等。至于这些技术的具体实现和很多工程细节，则定义为需要课外的进一步深化实践。所谓“底层物理概念”，则是介绍电机系统中典型原理的基本物理背景。工程技术的变革日新月异，不断有新技术产生，旧技术淘汰，但物理概念通常不会过时。所以在课程中我愿意更多地强调工程技术背后的物理本质。例如：电机产生转矩的物理背景是什么，开关调制电压的本质是什么，基本的磁路和电路分析方法是什么，交流电机中各种复杂的坐标变换的原因又是什么。对于这样的教学思路，很多选课的同学都给予了高度的肯定，但也表达了该课程学习过程中的难度远远大于传统的专业课程。尤其是该课程知识面非常广，且“抓两头”的讲授体系与电机的专业课有明显的区别，所以很难找到一本合适的参考书用于该课程的复习和拓展。正是在这样的背景下，我萌生了写这样一本教材的想法。

为了让本书更贴近汽车系统工程应用的实际，我邀请了中国科学院电工研究所的范涛副研究员和潍柴动力股份有限公司的王宏宇部长与我共同完成本书的撰写。范涛是我的大学同学，大学毕业后一直在中国科学院电工研究所从事车用电机及其系统的设计和分析工作，已有十余年时间。他在2009年获得中国科学院研究生院博士学位，对车用电机理论有着深刻的理解和丰富的实践经验，所以承担了本书交流电机基本原理相关内容的撰写。王宏宇部长在美国汽车行业工作十余年，曾就职于美国通用汽车公司和德尔福汽车公司。他2011年回到中国，并被评为国家千人计划专家，现任潍柴动力新能源系统工程部部长。王宏宇部长从产业化的角度为本书撰写了车用电机测试及标准的相关内容。本书的成书当然也要归功于我成长道路上各位老师的指点和帮助。我首先要提到的是我在清华大学攻读博士学位时的指导老师——邱阿瑞教授，是他打开了我通往电机及其控制系统领域的大门，让我第一次建立电机模型，第一次控制电机旋转，第一次完整地写一篇学术论文的写作。其次，我要感谢清华大学电机系的诸位老师，他们的辛勤工作为我日后的电机研究打下了扎实的理论基础。我特别要感谢的是威斯康星大学麦迪逊分校的Robert. D. Lorenz教授。2008年，Lorenz教授

接受我作为联合培养博士生，在 WEMPEC (Wisconsin Electric Machines and Power Electronics Consortium, 威斯康星州电机和电力电子协会) 学习生活。在 WEMPEC 的一年时间里，Lorenz 教授的言传身教对我影响巨大，让我终身受益。我还要感谢与 Lorenz 教授同在 WEMPEC 的 Johns 教授和 Giri 教授，他们所讲授的《ECE711—交流电机瞬态与控制》和《ECE412—电力电子电路》，让我对电机与电力电子的理解有了大幅度的提升。本书也加入了部分我在这两门课中的所学内容。当然我还要感谢清华大学、威斯康星大学和吉林大学一路走来的同学、同事以及我的研究生和朋友们，正是与他们的讨论、交流才会有我目前对电机系统的一点理解，正是他们一直以来的帮助，才促成了本书的成稿。感谢我的研究生邢增臻、孙科和李海湘，他们对本教材的整理和校对工作做出了重要的贡献。最后，我还要感谢我的父母和妻子，正是他们无微不至的关怀和陪伴，才让我能安心努力的工作，完成本书的写作，他们是这本书最大的功臣。

本书首先简要地介绍了电机的基本概念及其与汽车相关的应用，接下来的内容主要分为四个部分：第一部分为 2~4 章，介绍直流电机；第二部分为 5、6 章，介绍电力电子技术；第三部分为 7~12 章，介绍交流电机；最后一部分为 13 章，介绍车用电机的测试与标准。本书由袁新枚主编，范涛、王宏宇任副主编。参编人员有徐跃、周锦利、王闯、孙科、孙巍、邢增臻、刁庆华、李海湘和张建。其中第 7、8 章由范涛撰写，第 13 章由王宏宇撰写，第 12 章中矢量控制的仿真模型是基于中国科学院电工研究所博士生李鸿扬的大量实验和仿真工作完成的，其余内容由本人完成。

第一部分的核心内容可分为电机的原理与控制两方面。在电机原理方面，着重强调电机转矩产生的基本原理，以及定子、转子、电枢和励磁等概念；在控制方面，着重强调电机系统的建模和模型参数的物理意义及其对控制的影响，希望使读者了解基本的电磁及机械运动系统的建模方法和电流/转速双闭环的基本控制结构与原理。在第 4 章中选取的汽车系统中的起动机和节气门实例，主要希望使读者更好地理解以上的电磁/机械系统建模方法的应用。第一部分的内容从某种意义上并非是特别针对直流电机的介绍，而是可通用于常见电磁控制系统的。

第二部分介绍电力电子技术。在电气工程中，电力电子技术是独立的教程，相关内容也极为广泛，仅两章的内容很难触及电力电子技术的核心。但电力电子技术与现代交流电机的控制不可分割，所以笔者在这部分内容中只期望阐述“PWM”和“单极双掷开关”两个电力电子的基本概念。“PWM”面向电压的调制算法，是矢量控制中的空间矢量 PWM (SVPWM) 算法的介绍奠定基础；“单极双掷开关”面向电路拓扑，是三相逆变电路的原理和实现提供基本的理论支撑。

第三部分介绍交流电机，这部分内容是当前电机控制的热点。具体到车用驱动电机，目前多以交流永磁同步电机为主，所以在该部分内容的设置上也主要集中于交流永磁同步电机。这部分内容本书也有自身的特色，第 7 章讲解了交流电机的基本概念，包括工作原理、结构及分类。在介绍电机结构时，引用了作者在长期电机研发过程中的大量实物照片，力图使读者更加容易地建立起电机的形象概念，为第 8 章讲解电机的模型建立一个感观基础。第 8 章将对电机的感观认识提升为理性认知层面，即电机的数学模型。从电路和磁路两个视角对电机进行建模。考虑到国内电机学教材在磁路方面介绍的相对欠缺，而磁路相比电路能更加本质地反映电机内部的物理构成，在本章中用更多的磁路语言描述电机原理。同时，通过

有限元仿真的方法使电机磁场形象化，特别是在电机学和电机控制理论中占有重要地位的“ dq 轴”概念，使其不再是一个抽象的数学概念，而是一个实在的物理存在。以相量模型为基础，本章还介绍了电机的转矩特性、外特性和效率特性，掌握这些特性对应用电机大有帮助。第9章利用长达一章的篇幅推导得到了永磁同步电机在转子同步坐标系下的“ dq 轴”模型，重点希望读者看到交流电机坐标变换的思路及“任意”坐标系下交流电机模型的表达形式，从而能对“ dq 轴”模型在第8章的基础上从控制角度进行更为深刻的认识；关于交流永磁同步电机矢量控制相关的算法和电路都汇集于第10章，从该章中可以相对集中地获得实际车用驱动电机控制系统的基本原理；第11章介绍了感应电机的建模与控制，对于磁场定向控制，感应电机和永磁同步电机没有本质区别，所以该章相比传统电机专业教材中对感应电机大篇幅的介绍，内容是相对简略的。第12章中给出了两个交流电机的实例，第一个模型详细地描述了旋转坐标系下的交流永磁同步电机模型及其矢量控制算法，该模型可以直接应用于实际矢量控制算法开发；第二个电机模型是从能量角度出发对电机外特性的建模，这种建模方法也是实际在电动汽车及混合动力汽车系统开发中经常使用的。

第四部分内容面向车用电机的产业化，介绍车用电机的测试方法与标准。由于相关内容更新较快，且不同国家体系标准也存在着一定差异，所以该部分内容旨在起到一个索引的作用，使读者在需要面向产业化应用时，可以方便快速地找到所需的电机测试要求及标准。

本书的使用不仅局限于车辆工程专业，对其他专业了解电机及其控制系统同样是适用的，所以它既可以作为本科高年级及研究生的课程教材，也可以作为电气工程专业及相关领域工程师的参考书。

由于时间有限，书中内容难免有不当之处，敬请有关专家和各位读者给予批评指正。

袁新枚

2016年2月 长春

目 录

序 1	
序 2	
前言	
第 1 章 导论	1
1.1 电机发展简史	1
1.2 电机的基本概念及分类	2
1.3 电机在汽车中的应用	4
第 2 章 直流电机概述	5
2.1 直流电机及其用途	5
2.2 电、磁、力与速度	6
2.3 直流电机的工作原理	8
第 3 章 直流电机的建模与控制	11
3.1 等效电路与励磁分类	11
3.2 数学模型	12
3.3 转矩控制	13
3.4 速度/位置控制	18
3.5 状态反馈控制	20
第 4 章 车用直流电机实例	22
4.1 起动机建模与特性分析	22
4.2 电子节气门建模	25
第 5 章 PWM 技术	28
5.1 PWM 原理	28
5.2 将模拟信号转化为 PWM 的方法	30
5.3 PWM 的实现	31
5.4 PWM 在直流调制中的应用	33
第 6 章 电力电子技术	36
6.1 电力电子技术概述	36
6.2 典型的电力电子器件	38
6.2.1 二极管	38
6.2.2 MOSFET	39
6.2.3 IGBT	40
6.2.4 小结	41
6.3 单极双掷开关的实现	42
6.4 整流电路与逆变电路	43
6.4.1 整流电路	44
6.4.2 逆变电路	45
6.5 电力电子器件的损耗与散热	46
第 7 章 交流电机概述	49
7.1 交流电机的概念及其用途	49

7.2	交流电机的工作原理	50
7.3	交流电机的结构及分类	52
7.3.1	交流电机的结构	52
7.3.2	交流电机的分类	54
第8章	永磁同步电机分析	56
8.1	永磁同步电机的模型观	56
8.2	永磁同步电机的磁路分析	56
8.2.1	简单磁路分析	56
8.2.2	电机磁路分析	59
8.3	永磁同步电机的电路分析	68
8.3.1	电机电感模型	68
8.3.2	电机相量模型	68
8.3.3	电机转矩模型	73
8.4	永磁同步电机的效率特性与外特性	74
8.4.1	永磁同步电机的效率特性	74
8.4.2	永磁同步电机的外特性	76
第9章	面向控制的永磁同步电机的建模	78
9.1	自然坐标系下的电机电压方程	78
9.2	正交坐标系与旋转坐标系的变换	80
9.3	旋转坐标系下的电机模型	84
第10章	永磁同步电机的控制	87
10.1	永磁同步电机矢量控制原理	87
10.1.1	直流电机的转矩控制与永磁同步电机的转矩控制	87
10.1.2	永磁同步电机的矢量控制方法	88
10.2	永磁同步电机磁场的控制	89
10.2.1	最大转矩电流比控制	90
10.2.2	弱磁控制	90
10.3	交流电机控制的功率电路与 SPWM	93
10.3.1	三相逆变电路拓扑	93
10.3.2	三相逆变电路的实现	94
10.3.3	三相逆变电路的六阶梯波调制	94
10.3.4	三相逆变电路的 PWM	97
10.4	空间矢量 PWM 技术	98
10.4.1	电压空间矢量原理	98
10.4.2	电压空间矢量 PWM 原理	99
10.4.3	SVPWM 与 SPWM	101
10.4.4	电压空间矢量 PWM 的常见软件实现算法	102
第11章	感应电机的建模与控制	105
11.1	传统感应电机的描述及控制方法	105
11.1.1	感应电机的稳态等效电路	105
11.1.2	感应电机的机械特性曲线	106
11.1.3	传统感应电机的调速方法	108

11.2 感应电机的矢量控制原理	110
11.2.1 感应电机与永磁同步电机控制上的区别	110
11.2.2 感应电机在同步旋转坐标系下的等效电路与数学模型	111
11.2.3 感应电机的直接矢量控制原理	114
11.2.4 感应电机的间接矢量控制原理	116
11.3 感应电机的直接转矩控制原理	117
第12章 车用交流电机应用实例	120
12.1 车用永磁同步电机矢量控制系统建模与仿真	120
12.1.1 电机系统及模型框架	120
12.1.2 派克变换与克拉克变换	121
12.1.3 电机模型	122
12.1.4 逆变器模型	123
12.1.5 控制器模型	124
12.1.6 模型的初始化与仿真结果的处理	127
12.1.7 仿真结果	127
12.2 纯电动汽车纵向动力学模型	129
12.2.1 纯电动汽车系统及模型框架	130
12.2.2 电池模型	130
12.2.3 电机系统模型	131
12.2.4 传动系统模型	133
12.2.5 整车动力学模型	133
12.2.6 驾驶员模型	134
12.2.7 仿真结果	134
第13章 车用电机测试及标准	137
13.1 车用电机测试方法	137
13.1.1 电机测试台架的基本组成	137
13.1.2 车用电机的技术要求及试验方法	138
13.2 车用电机标准	142
13.2.1 标准组织简介	142
13.2.2 电动汽车电机系统标准汇总	144
参考文献	146

第1章 导论

本章简要介绍了电机技术的发展、电机的基本概念与分类，并针对其在汽车领域的应用及未来的发展趋势进行了讨论。

1.1 电机发展简史

19世纪初，伴随着对电磁现象研究的深入和电池的发明，如何利用电磁现象实现电能和机械能的转换成为当时物理学界研究的一大热点，大批科学家和发明家投身于该项技术的研究。由于早期的电机设计不成熟，与现代电机也有较大不同，所以在大量的探索研究中，很难明确定义哪项研究是世界上第一台电机。一种说法认为著名英国物理学家、化学家法拉第(Michael Faraday)发明了世界上第一台电机。因为法拉第发现的电磁感应现象是电机学的基础，所以这里简单介绍法拉第的电机发明。1821年，法拉第设计了一套装置用于实现电动机的基本原理——“电磁转动”，他将导线放置于内嵌磁铁的汞池之中，利用化学电池在导线中通入持续电流，此时导线绕着磁铁旋转，从而实现了电能向机械能的转化。虽然这个装置的原理与后来的单极电动机是一致的，但这一装置当时还无法实用化。1831年，法拉第利用电磁感应现象，发明了法拉第圆盘发电机(也称为法拉第盘)。

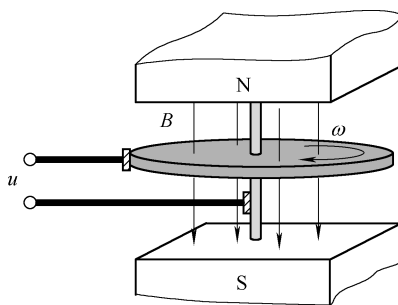


图 1-1 法拉第盘原理示意图

法拉第盘的主体是一个导电圆盘，当该导电圆盘在垂直于磁场的平面内旋转时，其半径切割磁场的磁力线，在圆心与圆周之间产生感应电动势。法拉第盘原理示意图如图 1-1 所示。该电动势可以使电流计的指针发生偏转，从而证明了发电过程的实现。法拉第圆盘电机也是典型的单极发电机^[1]。

1833年，俄籍物理学家楞次(Lenz, Heinrich Friedrich Emil)发表了一篇题为《电动机与发电机的可逆性》的文章，揭示了发电机和电动机本质上的一致性^[2]。这一原理的发现对电机技术的发展具有重要的意义。例如在汽车行业，电动汽车相比传统内燃机汽车的一大优势在于电机可以在制动过程中将车辆行驶的动能转换为电能储存在电池中，提高整车行驶的经济性，也就是所谓的制动能量回收。从电动机与发电机可逆性的角度，汽车的驱动电机必然也可以作为发电机使用，在行驶过程中产生负转矩回收动能，所以可以认为电动汽车制动能量回收的优点早在 19 世纪已被楞次预测。电动机与发电机可逆运行的原理在本书的后续章节中还有讨论。

在法拉第发明电磁感应定律之后的近 50 年间，一大批著名的发明家如斯特金、雅可比、达文波特、西门子等人一直在改进电机的设计。这些设计通过电机结构的不断创新，使电机的输出功率越来越大，越来越接近实用化。但这些电机都属于直流电机，所以需要电池供电。受到电池成本、能量密度等因素的限制，电机的供电系统成为直流电机应用推广的主要

障碍。需要指出的是，伴随着电机技术的发展，发明家们一直尝试着采用电机来驱动汽车，同样是受到电池的限制，19世纪发明的电动汽车没有得到持续的发展，最终在20世纪初被内燃机汽车所取代。

第一次真正意义上电机技术的长足发展得益于交流输电技术的广泛应用。为了摆脱电池供电的束缚，人们开始尝试远距离输电，其中最为著名的是美国科学家爱迪生一直大力推动的直流输电方式。但是，若要降低直流输电的损耗，就需要有更高的直流输电电压，但随着电压的升高，直流发电机变得越来越不适用。19世纪80年代，美籍物理学家特斯拉发明了交流电以克服直流发电不适用于远距离传输的问题，交流输电开始逐步被接受。1888年，俄国电工科学家多利沃-多布罗沃利斯基制成了一台功率为2.2kW的交流发电机，这是世界上第一台实用化的三相交流异步发电机。自此，通过输电网供电的交流电机迅速发展起来。在其后的100多年间，三相交流异步电机以其结构简单、性能优异的特点，成为生产生活中最常用的电机种类。在现代工业生活中，60%的电能被用在电机上，而其中的80%都被交流异步电机所利用^[3]。

虽然电网供电解决了电机的持续大功率供电，但也给电机高性能运行提出了新问题。传统的直流电机只需要控制直流供电电压的幅值，就可以实现电机转矩的控制，但交流供电涉及供电电压的频率和相角，且频率和相角对于电网来说是不可调节的，所以交流电机的高性能控制成为电机领域的一个新难题。20世纪中叶，随着电力电子技术的快速发展，电能控制技术发生了新一次的革命。得益于MOSFET、IGBT等高速功率半导体器件的发明，利用PWM电压调制技术可以同时实现交流电压幅值和相位的精确控制，这就意味着可以通过精确控制交流电机中定转子磁场的幅值和相位实现转矩的精确控制。所以在20世纪80年代，交流电机的高性能控制得以实现，也就是所谓的矢量控制^[4,5]和直接转矩控制^[6,7]。矢量控制和直接转矩控制算法已被广泛地应用于交流传动系统控制。在汽车系统的应用中，混合动力汽车和纯电动汽车技术也都是基于交流电机的矢量控制技术发展起来的。

随着电机技术的发展，电机已被应用到工业生活的各个领域。小到电子表中微瓦量级的驱动电机，大到水力发电系统中几百兆瓦级的水力发电机。因为电机具有设计灵活、调速范围广、动态响应快、控制性能好、效率高、无排放等一系列的优点，越来越多的动力设备正在被电机所取代。在舰船领域，电力推进成为现代舰船的新趋势。2007年，美国成功研制成了世界首台36.5MW的高温超导电机作为其新一代航母的动力驱动。在铁路方面，传统的内燃机车也已逐步被电力牵引所取代，法国的TGV、德国的ICE、日本的新干线及我国的高铁均已采用全电驱动的形式。在航空领域，虽然目前商用客机仍均采用传统的航空涡轮发动机，但波音787客机的设计上已呈现了明显的“电气化”的趋势，大量机械和液压部件被电机所取代。与此同时，以丰田普锐斯为代表的混合动力汽车和以日产聆风、特斯拉为代表的纯电动汽车也开始向传统内燃机车发出挑战。相信随着电机、电池技术的不断进步，电机的应用也将变得越来越广阔。

1.2 电机的基本概念及分类

从电机的发展历史可以看到，无论是哪种形式的电机，它的本质都是用于电能与机械能之间的相互转换。一般地，我们把用于将电能转换为机械能的电机称为电动机，把用于机械

能转换为电能的电机称为发电机。当然根据上节介绍的发电机与电动机的可逆性^[2]，电动机和发电机的工作状态并不是绝对的。一般用平面坐标系的四个象限描述电机的工作状态，如图 1-2 所示。

在该坐标系中，横轴为电机转速，纵轴为电机输出电磁转矩。一般定义：转速转矩之积为正时，代表电机输出机械功率为正，反之为负。当输出机械功率为正时，电能转化为机械能，为图中第一、三象限，电机处于电动机运行状态；反之，第二、四象限电机输出机械功率为负，处于发电机运行状态。

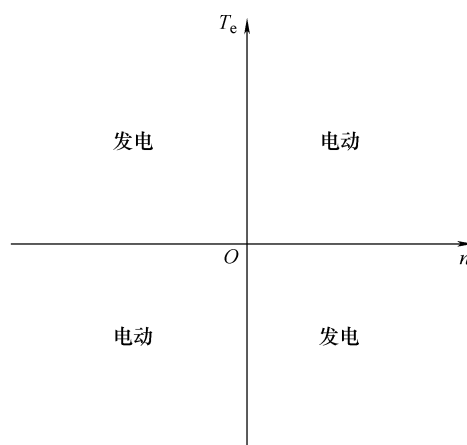


图 1-2 电机工作的四象限

电机除了可以被分为电动机和发电机之外，还有多种分类方式。

根据电机的运动形式，可以将其分为旋转电机和直线电机。我们一般见到的电机属于旋转电机，它通过转子旋转输出或输入机械能；在直线电机中，其运动部件由转子变为了定子，定子通过直线运动输出或输入机械能。直线电机在自动控制领域应用较广，因为一般的运动控制都是直线运动，所以若由直线电机直接驱动，则可以获得更快的动态响应速度。我们在生活中看到的磁悬浮列车也是直线电机的典型代表，可以发现磁悬浮列车上并没有如车轮等的旋转部件，它直接通过轨道磁场与列车磁场的相互作用，实现列车的悬浮和驱动。

按照电机的原理或者电源分类，可以将其分为直流电机和交流电机。直流电机即直接用直流电源供电的电机。直流电机虽然控制简单，但受到机械换向器的限制，这种电机并不适用于高速、大功率的场合，且可靠性和耐久性也不如交流电机，所以正在逐步被交流电机所取代。交流电机即直接用交流电源供电的电机，交流电机又分为交流异步电机(车用一般为感应电机)和交流同步电机。交流电机的分类将在 7.3 节中详细讨论。

不同类型电机优缺点的比较一直是电机应用领域关注的一个焦点，这里给出一组对车用驱动电机的评估结果，见表 1-1。该结果参考了 2006 年文献[8]的研究，笔者根据近年来技术变化的趋势对个别评分项进行了改动。表中分数越高，代表该项性能越具优势。电机的各项性能不仅与其类型有关，还与设计、材料、工艺及控制策略等一系列复杂的因素相关，所以不同类型电机之间的比较没有明确的界限，该表中的结果只是总体趋势的一个参考比较数值。

表 1-1 车用驱动电机评估表

	直流电机	感应电机	永磁同步电机	开关磁阻电机
功率密度	2.5	4.5	5	3.5
效率	2.5	4.5	5	3.5
可控性	5	5	4.5	3
可靠性	3	5	4	5
技术成熟度	5	5	4.5	4
成本	4	4	4.5	4.5

1.3 电机在汽车中的应用

提到电机在汽车中的应用，人们往往会首先想到混合动力汽车和电动汽车。利用电机相对均匀的效率特性及制动能量回收特性，混合动力汽车可以有效地提高传统汽车的燃油经济性。丰田普锐斯以其实际行驶工况下 5L/100km 左右的平均油耗和其在日本及美国市场上的成功证明了混合动力汽车的市场竞争力。在混合动力汽车中，目前弱混是应用最广且最为成熟的产品。所谓弱混，即通过集成起动发电机(ISG)实现汽车的起停功能，该技术已成为中高档轿车的重要配置。据统计，通过 ISG 电机的起停功能，传统汽车的油耗率可下降 5%~10%。同时，近年来，包括奥迪、宝马、奔驰、保时捷等汽车厂商正在加速推动采用直流 48V 低压供电系统取代传统的直流 12V 低压供电系统^[9]。直流 48V 系统推广的主要目的就在于加大车载电机及用电器的功率。所以在直流 48V 系统下，ISG 电机将在整车中起到更为重要的作用，直流 48V 系统的推广也代表着混合动力技术将得到大范围推广和普及的趋势。

在目前的电池技术下，纯电动汽车的续驶里程还不能达到传统汽车的水平，但已完全可以满足中短途行驶的需求^[10]。纯电动汽车完全靠电机驱动，要求驱动电机有较大的功率，但也可以更为有效地进行制动能量回收。由于电机的调速范围远大于发动机，所以纯电动汽车的动力总成中往往无须加入变速器。

无论是纯电动汽车还是混合动力汽车，其驱动电机目前多采用永磁同步电机，因为永磁同步电机具有转矩密度高、效率高等优点。但目前的永磁体均采用稀土永磁，稀土资源有限且价格昂贵，不利于未来大规模生产，所以欧美一些国家也在研究采用高效的交流异步电机替代永磁同步电机。

其实电机的应用远远不局限于整车的驱动，随着汽车电子控制技术的发展，传统的机械结构越来越多地被电控装置所取代。一个典型的概念就是“x-by-wire”。x 代表汽车中各个系统，“x-by-wire”指的就是用线控的手段控制整车系统中的部件，如线控转向(steering-by-wire)、线控换挡(shifting-by-wire)、线控制动(brake-by-wire)、线控油门(throttle-by-wire)等。这些部件是如何实现线控的呢？答案就是电机！因为“线”里只能走电，而这些部件又必须动作，根据电机的定义可知这些连接电与动作的机构就是电机。例如：电动助力转向(EPS)多采用交流电机，电子节气门采用直流电机，而最简单的燃油喷嘴本质上也可以认为是一种直线电机。据统计，目前的一辆高档内燃机驱动轿车中安装有多达 120 台的电机^[11]。这些电机遍布整车的不同应用，从底盘系统中的电动转向助力(EPS)、主动悬架、制动防抱死系统(ABS)、电子驻车系统，到发动机系统中的发电机、起动机、各类风扇、水泵、电控阀，再到前照灯随动(AFS)、车窗刮水器、电动车窗、电动后视镜、电动座椅等，电机已成为汽车电控系统中最为重要的执行器部件。可以预见，未来更多更高性能的车用电控执行器也都将通过电机来完成，电机技术已成为汽车工程学科的重要组成部分。

第2章 直流电机概述

本章介绍了直流电机的基本特点、结构及用途，回顾了电、磁、机械等基本物理量间的转换关系，并利用洛伦兹力的原理推导了通电线圈在磁场中受力的表达式，最终引出了直流电机的基本工作原理。

2.1 直流电机及其用途

直流电机一般指有刷直流电机，即通过机械换向器进行电流换向的直流电机，这种电机通过直流电源供电，因此得名。虽然有刷直流电机由于其电刷需要定期维护、寿命相对较低等问题，在很多场合正逐渐被交流电机所取代，但考虑到其控制简单、成本低等优点^[12]，在汽车电控系统中仍有广泛的应用。

直流电机由定子和转子两部分组成。定子上的绕组称为励磁绕组，用于产生恒定磁场，称为励磁磁场，所以励磁绕组也可以用永磁体取代(此时称为永磁有刷直流电机)。转子上的绕组称为电枢绕组，其中的电流与励磁磁场相作用，产生转矩。所以，一般直流电机通过调节作用在电枢绕组上的电流，控制直流电机的转速与转矩。电枢绕组接头引出到转子转轴，分别连接在相互绝缘的触片上，这些触片称为换向器。电源连接在电刷上，通过与换向器接触，向电枢绕组供电。直流电机的主要组成部分如图 2-1 所示。

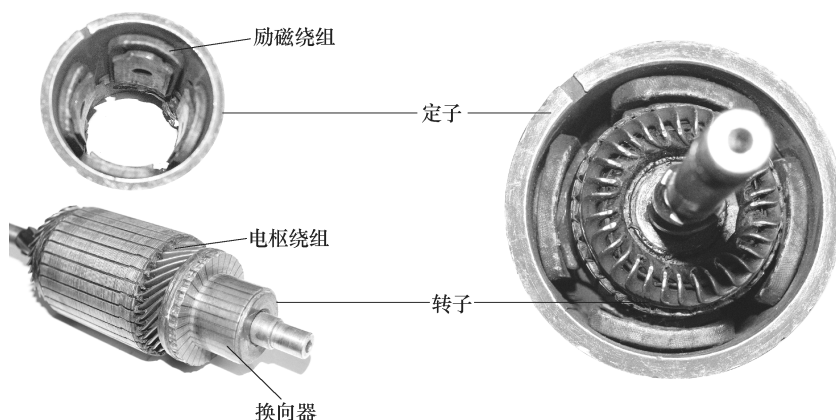


图 2-1 直流电机的组成

有刷直流电机在汽车电控中多被作为小功率执行器使用，一个典型的应用就是发动机的节气门。发动机节气门一般采用“直流电机+减速齿轮”的驱动结构，只需在对应电枢绕组上施加直流电压，就可以实现对节气门阀片开度的控制。本书 4.2 节将对发动机节气门的建模与控制进行更为详尽的介绍。

有刷直流电机另一个典型应用是发动机系统中的起动机。与节气门不同的是，起动机的驱动电流要求极大，可达几百安培，所以其绕组需要较大的截面积，由粗铜线绕制而成，起

动机的特性将在 4.1 节中讨论。因为起动机不要求实时精确的转矩或转速控制，所以一般直接采用继电器控制起动机的起停。当然，随着现代交流电机控制技术 & 混合动力汽车技术的发展，发动机启动和发电过程的控制要求也越来越高，直流启动电机也正在被集成的启动发电机(ISG)所取代^[13]。

2.2 电、磁、力与速度

电磁感应和电磁力是电磁学中最基本的概念。

1831 年，英国科学家法拉第首次发现了电磁感应现象。电磁感应现象指出，如果磁通穿过闭合线圈，则线圈中会感应出电动势，且该感应电动势的大小与线圈交链磁通相对时间的变化率成正比。法拉第发现产生在闭合回路上的电动势(EMF)和通过任何该路径所包围的曲面上磁通量的变化率成正比。这意味着，当通过导体所包围的曲面的磁通量变化时，受到感应电动势的作用，电流会在任何闭合导体内流动。电磁感应现象的发现不仅揭示了电与磁之间的内在联系，而且为电与磁之间的相互转化奠定了实验基础。电磁感应电动势一般分为感生电动势和动生电动势，由于与线圈相交链的磁场发生变化而产生的电动势，称为感生电动势；而由于导体以垂直于磁感线的方向在磁场中运动所产生的电动势，称为动生电动势。考虑到运动的相对性，两种电动势的本质也可以看作是统一的。图 2-2a 描述了导体以垂直于磁感线方向运动产生动生电动势的情况。在均匀磁场中，导体中产生的电动势可以表示为

$$e = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \tag{2-1}$$

式中， \mathbf{v} 为导体相对运动速度； \mathbf{B} 为磁感应强度； \mathbf{l} 为导体长度。 $(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ 矢量积(也称为叉积)的方向通过右手定则确定，而该矢量积结果与 \mathbf{l} 的运算为数量积(也称点积)，为标量。

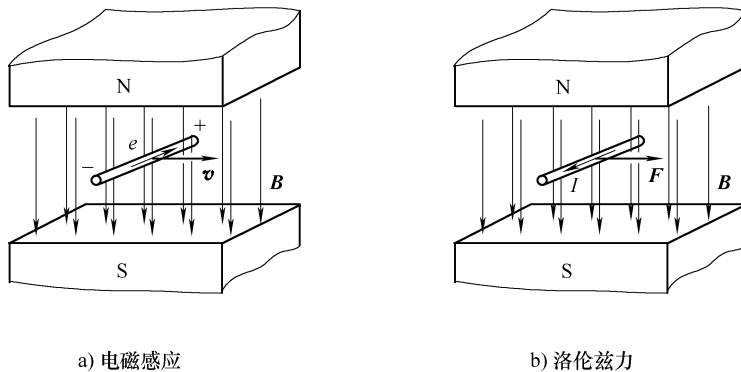


图 2-2 电磁感应与洛伦兹力

在电磁学中，电磁力一般泛指电荷在电磁场中受力的总称，它是由荷兰物理学家洛伦兹(Lorenz)于 1892 年首先提出的。因为电机中不存在独立电荷，为了方便讨论，下文中电磁力专指载流导体在磁场中的受力。在均匀磁场中，电磁力可以表示为

$$\mathbf{F} = I(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \tag{2-2}$$

式中， I 为导体中的电流。 $(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$ 的矢量积方向同样通过右手定则确定(当公式用标量形式 $F = BIl$ 表示时，一般习惯用左手定则确定力的方向，读者可以自行证明两种表达形式求得力的