



目录

项目一 新能源汽车驱动电机系统	1
任务一 新能源汽车驱动电机概述	3
任务二 新能源汽车驱动电机的结构与原理认知	10
任务三 新能源汽车驱动电机拆装	21
任务四 车用电机驱动系统国内发展现状与趋势	23
任务五 车用电机驱动系统国外发展现状与趋势	25
项目二 新能源汽车驱动电机冷却系统	32
任务一 驱动电机冷却系统原理认知	33
任务二 驱动电机冷却系统检测与故障诊断	40
项目三 新能源汽车电机控制技术	48
任务一 新能源汽车直流电机控制技术分析	49
任务二 新能源汽车交流电机控制技术分析	60
任务三 新能源汽车电机控制器拆装与检修	67
项目四 新能源汽车电机驱动系统与驱动控制系统	86
任务一 变速器检测	87
任务二 驱动电机控制系统原理认知	95
任务三 电机控制器结构认知	101
任务四 电机控制系统检测与故障诊断	109

项目五 新能源汽车高压供电系统	117
任务一 新能源汽车高压系统基本组成认知	119
任务二 高压线束检测	125
任务三 高压互锁检测	135
任务四 绝缘检测	139
任务五 高压供电控制系统检测	147
项目六 新能源汽车驱动电机安全技术专业知识	162
任务一 新能源汽车动力电池包拆检防护	163
任务二 新能源汽车安全充电操作	168
任务三 动力电池系统	174
任务四 整车电驱热管理系统控制策略	181
参考文献	202



项目一

新能源汽车驱动电机系统

蓝图导航

驱动电机作为新能源汽车的核心动力部件，其性能直接决定整车的动力性和经济性。本项目从驱动电机系统的基础结构入手，解析定子、转子的工作原理，分类介绍直流电机、交流电机的特性，深入探讨电机的功率密度、效率等关键参数及性能要求。同时，本项目结合国内外发展趋势，分析轮毂电机等前沿技术，帮助读者全面掌握驱动电机的选型、控制及未来发展方向。

学习矩阵

知识目标

1. 掌握驱动电机（直流/交流）的结构组成、分类及工作原理，区分永磁同步电机与异步电机的性能差异。
2. 理解驱动电机的关键参数（如功率密度、效率、额定转速等）及性能要求（如高转矩、宽调速范围等）。
3. 了解驱动电机系统的发展趋势（如轮毂电机、多电机驱动技术等）。

能力目标

1. 能识别不同类型驱动电机的结构特点，分析其在新能源汽车中的应用场景。
2. 能根据电机参数表评估电机性能，对比不同电机的适用车型（如低速电动车与高速乘用车的对比）。

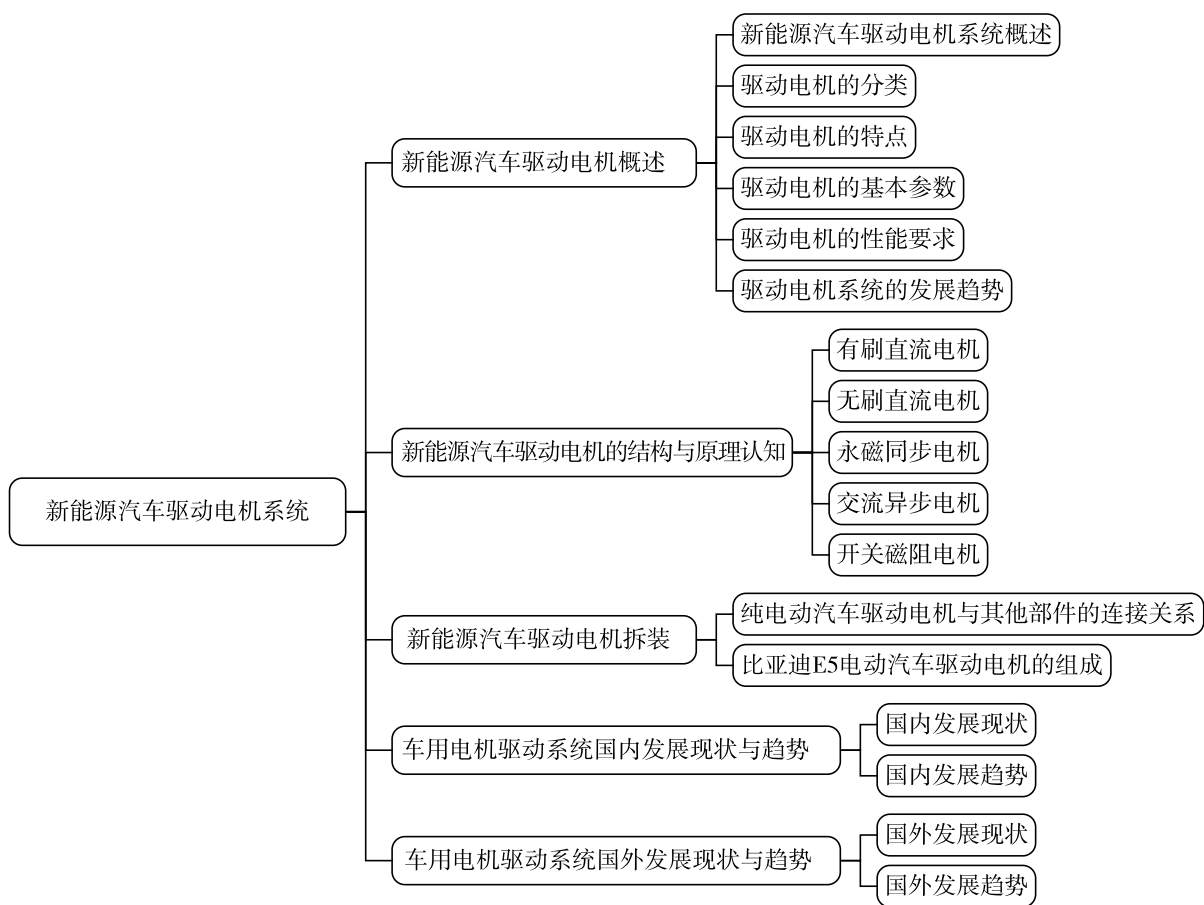


素质目标

1. 严格执行新能源汽车检修操作规范，养成科学严谨的工作态度。
2. 养成总结训练过程和结果的习惯，为下次训练积累经验。
3. 培养虚心向他人学习、尊重他人劳动的意识。
4. 培养团结协作的意识。
5. 养成严格执行 7S 现场管理的习惯。



拓扑图谱





任务一

新能源汽车驱动电机概述

情景触发

小李在试驾纯电动车时发现，车辆起步加速比燃油车更迅猛，售后技师拆解电机后解释：“这得益于驱动电机的高启动转矩特性。”本任务将从电机基本结构切入，对比传统电机，解析新能源汽车驱动电机如何通过定子磁场与转子互动输出动力，介绍直流/交流电机的分类逻辑，如早期低速电动车多用有刷直流电机，而主流车型转向永磁同步电机的技术逻辑，揭示驱动电机为何成为新能源汽车的“心脏”。

拆解引擎

一、新能源汽车驱动电机系统概述

电机是将电能转换成机械能或将机械能转换成电能的装置，能够输出一定的转矩和转速。由于新能源汽车使用电机驱动车辆行驶，因此电机通常被称为驱动电机。驱动电机通常由定子、转子及其他部件组成，定子提供磁场，转子输出动力。

新能源汽车驱动电机系统主要由驱动电机和电机控制器组成，与其他系统及元件相互配合，保证车辆按照驾驶员的意图行驶。驱动电机是新能源汽车的三个核心部件（动力电池系统、驱动电机、电控系统）之一，是车辆行驶的动力源，其特性直接影响到整车的动力性和舒适性。电机控制器为驱动电机提供三相交流电，控制电机的转速、输出转矩等参数。驱动电机系统结构示意图如图 1-1 所示。

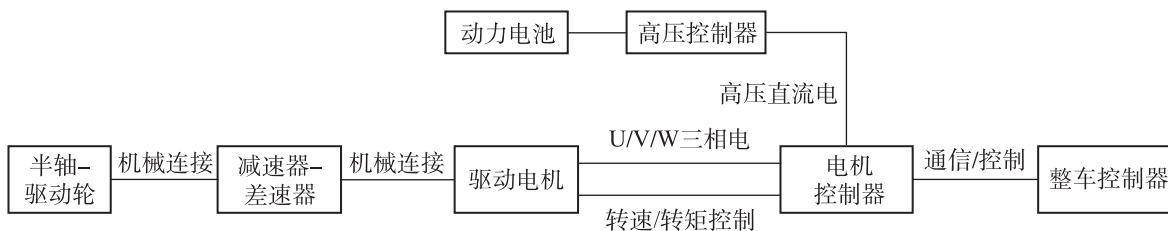


图 1-1 驱动电机系统结构示意图

驱动电机为整车提供动力，通过减速器、差速器、半轴等将动力传递到驱动轮，从而驱动车辆行驶。由于驱动电机具有较高的启动转矩和较宽的调速范围，因此通常与电机配合使用的是固定速比的减速器，一般不需要使用变速器。减速器的主要功能是将驱动电机的转速降低、转矩升高，从而满足整车的速度和转矩要求。在驱动系统布置方案上，由于驱动电机具有体积小特点，因此可以在汽车的前桥和后桥分别布置一台电机，实现四驱（图 1-2）。

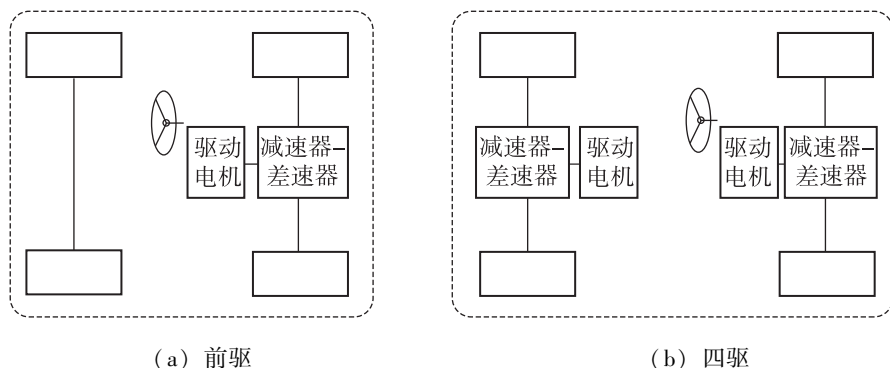


图 1-2 电动汽车驱动系统布置方案 (前驱和四驱)

二、驱动电机的分类

根据工作电源的不同，驱动电机可分为直流电机和交流电机。其中，直流电机又分为有刷直流电机和无刷直流电机（BLDC）；交流电机主要包含单相交流电机、三相交流电机和开关磁阻电机。驱动电机的分类如图 1-3 所示。

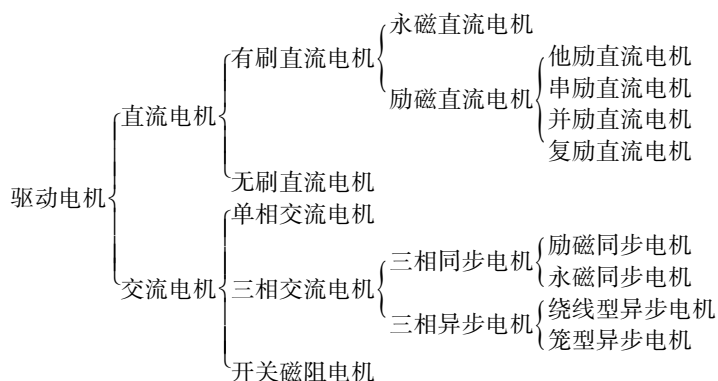


图 1-3 驱动电机的分类

纯电动汽车最早采用的是有刷直流电机，随着电子技术和自动控制技术的发展及纯电动汽车技术要求的提高，无刷直流电机、三相异步电机、永磁同步电机及开关磁阻电机等显示出比有刷直流电机更为优越的性能，因此在纯电动汽车中应用越来越广泛。

目前，直流电机主要用于微型低速电动车。相对于直流电机，交流电机具有更好的综合性能，是目前新能源汽车驱动电机的主流。其中，永磁同步电机和三相异步电机在目前市场上应用更加广泛，国产新能源汽车绝大多数使用永磁同步电机，开关磁阻电机主要应用于部分客车。

三、驱动电机的特点

(一) 直流电机

直流电机（图 1-4）包括有刷直流电机和无刷直流电机两种，具有启动加速时驱动力大、调速控制简单、技术成熟等优点。但是有刷直流电机的电枢电流由电刷和换向器引入。一方面，由于换向时产生电火花，因此换向片

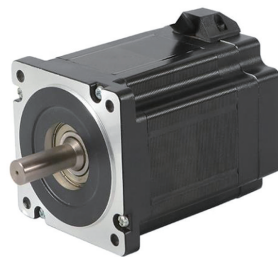


图 1-4 直流电机外观



容易烧蚀，电刷容易磨损，需经常更换电刷和换向片，维护工作量大；另一方面，由于电刷与换向器接触部分存在摩擦作用，因此电机效率较低，电机的工作转速也不高。目前，新能源汽车不采用这种有刷的直流电机。

针对有刷直流电机中电刷和换向器的问题，人们采用电子换向装置代替原有的电刷和换向器，无刷直流电机应运而生。无刷直流电机是一种高性能的电机，它既保留了有刷直流电机优良的调速性能，又具有交流电机结构简单、运行可靠、维护方便等诸多优点。目前，本田汽车公司研发的整体式电动机辅助（IMA）混合动力系统就是采用超薄型无刷直流电机作为动力辅助装置。

1. 有刷直流电机

有刷直流电机就是将直流电能转换成机械能的电机，是电机的主要类型之一，具有结构简单、技术成熟、控制容易等特点，在早期的新能源汽车上得到应用，特别是在场地电动汽车和专用电动汽车上应用更为广泛。

有刷直流电机分为励磁直流电机和永磁直流电机。在新能源汽车所采用的有刷直流电机中，小功率电机采用的是永磁直流电机，大功率电机采用的是励磁直流电机。

励磁直流电机根据励磁方式的不同，可分为他励直流电机、并励直流电机、串励直流电机和复励直流电机四种。

（1）他励直流电机。

他励直流电机的励磁绕组与电枢绕组无连接关系，而由其他直流电源对励磁绕组供电。因此，他励直流电机的励磁电流不受电枢端电压或电枢电流的影响。永磁直流电机也可看作他励直流电机。

他励直流电机在运行过程中励磁磁场稳定且容易控制，容易实现新能源汽车的再生制动要求，但当采用永磁材料时，虽然电机效率高、质量轻且体积较小，但由于励磁磁场固定，电机的机械特性不理想，因此驱动电机产生不了足够大的输出转矩来满足新能源汽车启动和加速时的大转矩要求。

（2）并励直流电机。

并励直流电机的励磁绕组与电枢绕组并联，共用同一电源，其性能与他励直流电机基本相同。并励绕组两端电压就是电枢两端电压，但是励磁绕组用细导线绕成，其匝数很多，因此具有较大的电阻，使得通过它的励磁电流较小。

（3）串励直流电机。

串励直流电机的励磁绕组与电枢绕组串联在直流电路中。串励直流电机在低速运行时，能给新能源汽车提供足够大的转矩，而在高速运行时，电机电枢中的反电动势增大，与电枢串联的励磁绕组中的励磁电流减小，电机高速运行时的弱磁调速功能易于实现。因此，串励直流电机驱动系统能较好地符合新能源汽车的特性要求。但串励直流电机由低速到高速运行时弱磁调速特性不理想，随着新能源汽车行驶速度的提高，驱动电机输出转矩快速减小，不能满足新能源汽车高速行驶时因风阻大而需要输出较大转矩的要求。串励直流电机运行效率低，在实现新能源汽车的再生制动时，由于没有稳定的励磁磁场，因此再生制动的稳定性差。另外，由于再生制动需要增加接触器切换频率，因此驱动电机控制系统的故障率较高，可靠性差。串励直流电机的励磁绕组损耗大，体积和质量也较大。

（4）复励直流电机。

复励直流电机有并励式和串励式两个励磁绕组，电机的磁通由两个绕组内的励磁电流产生。复励直流电机的并励部分容易产生稳定的磁场，因此用该类电机构成驱动系统时易实现再生制动功能。同时，



相比于他励或并励直流电机，复励直流电机能够输出更高的转矩，以满足新能源汽车的爬坡需求，而电机的质量和体积比串励直流电机要小。

小功率（0.1~10 kW）直流电机采用的是小型高效的永磁直流电机，可以应用在小型、低速的搬运设备上，如休闲用电动汽车、高尔夫球车、电动叉车等。

中等功率（10~100 kW）直流电机采用的是他励、复励或串励直流电机，可以用于结构简单、转矩要求较大的电动货车。

大功率（大于100 kW）直流电机采用串励直流电机，可用在要求低速、高转矩的专用电动汽车上，如矿石搬运电动汽车等。

有刷直流电机的启动转矩大，在用作新能源汽车的驱动电机时，新能源汽车的起步和加速性较好。

2. 无刷直流电机

无刷直流电机的外特性好，非常符合新能源汽车的负载特性，尤其是具有低速大转矩特性，能够提供大的启动转矩，满足新能源汽车的加速要求，可以在较宽速度范围内运行。由于无刷直流电机转子具有很高的永久磁场，在新能源汽车下坡或制动时电机可完全进入发电机状态，给动力电池充电，同时起到电制动作用，减轻机械制动负担，因此无刷直流电机过载能力强，再生制动效果好。此外，无刷直流电机体积小、质量轻、比功率大，可有效减轻整车质量，节省空间。

无刷直流电机的控制系统比较复杂，如果逆变器输出波形不理想，会出现较大的转矩脉动，影响电机的低速性能，电流损耗大，噪声较大。永磁体材料在高温时，会发生退磁现象。由于永磁体的作用，转子在高速旋转时电机会产生与转速成正比的反电动势，这个反电动势通过逆变器反接二极管施加在高压母线上，因此会造成一定的安全隐患。

3. 直流电机的优缺点

总体上讲，相对于交流电机，直流电机具有以下优点。

（1）调速性能良好。

直流电机具有良好的电磁转矩控制特性，可实现均匀平滑的无级调速，且具有较宽的调速范围。

（2）启动性能好。

直流电机具有较大的启动转矩，能适应新能源汽车起步驱动特性的需要，可实现快速起步。

（3）具有较宽的恒功率范围。

直流电机恒功率输出范围较宽，可确保新能源汽车具有良好的低速启动性能和高速行驶能力。

（4）控制较为简单。

直流电机可采用斩波器实现调速控制，具有控制灵活且高效、质量轻、体积小、响应快等特点。

（5）价格较为便宜。

直流电机的制造技术和控制技术都比较成熟，虽然直流电机本身的价格不低，但是其控制装置简单、价格较低，因此整个直流电机驱动系统的价格较为便宜。

同时，直流电机的主要缺点体现在以下几个方面。

（1）效率较低。

总体上，有刷直流电机的效率低于单相交流电机、三相交流电机和开关磁阻电机。

（2）维护工作量大。

有刷直流电机工作时电刷与换向器之间会产生换向火花，换向片容易被烧蚀，电刷也容易磨损，因



此电机的工作可靠性较差，需要经常进行维护。

(3) 转速低。

有刷直流电机转速越高，电刷与换向器之间产生的换向火花就越大，严重时形成火花环，这就限制了直流电机转速的提高。

(4) 质量和体积大。

有刷直流电机的结构较为复杂，功率密度低，质量大，体积也大。

(二) 交流电机

1. 交流异步电机

交流异步电机又称感应电机，其转子和定子部分都包含绕组，是由气隙旋转磁场与转子绕组感应电流相互作用产生电磁转矩，从而实现电能转换为机械能的一种交流电机。

按照转子结构来分，交流异步电机可分为笼型异步电机和绕线型异步电机；按照定子绕组相数来分，交流异步电机可分为单相异步电机、两相异步电机和三相异步电机。

交流异步电机在特斯拉纯电动汽车上应用较多（图 1-5）。交流异步电机很容易实现正反转，再生制动能量的回收也更加简单。当采用笼型转子时，交流异步电机还具有结构简单、坚固耐用、价格便宜、工作可靠、效率高和免维护等优点。

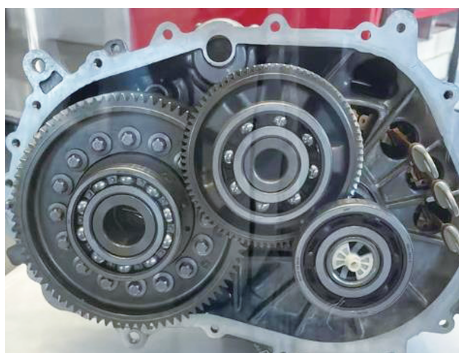


图 1-5 特斯拉交流异步电机

2. 永磁同步电机

新能源汽车使用的永磁同步电机大多为交流永磁同步电机（permanent magnet synchronous motor, PMSM）。永磁同步电机的转子中包含永磁体，结构上与无刷直流电机相似。不同之处在于，永磁同步电机采用正弦波驱动，而无刷直流电机多采用方波驱动。此外，永磁同步电机采用定子磁场定向矢量控制（field oriented control, FOC），并利用转子的连续位置反馈信号来实现精确的调速和换向。这种控制方式使得 PMSM 在运行时更加平滑，效率更高，且能提供更好的动态性能。

根据转子与定子的相对位置不同，永磁同步电机可以分为外转子式、内转子式和盘式三种。

(1) 外转子式。

定子位于轴心位置，转子位于定子外圆处，围绕轴心旋转。

(2) 内转子式。

转子位于轴心位置，定子位于转子外圆处，转子绕轴心旋转。

(3) 盘式。

定子、转子均为圆盘形，在电机中对等放置。

新能源汽车更多采用内转子式永磁同步电机。

永磁同步电机主要具有以下优点。

①采用永磁体产生转子磁场，无须励磁，结构相对简单，转子可以在很低的转速下保持同步运行。

②功率密度大、工作效率高，采用磁能密度高的永磁体材料，提高了气隙磁通密度和能量转化效率，减少了电机的体积和质量。

③瞬态特性好，转子使用永磁体材料，降低了转子质量，使电机具有更好的瞬态响应速度。



④结构多样化，可以实现内转子式或外转子式，以适应不同的应用场合。

因此，永磁同步电机受到世界各大汽车生产厂商的重视。中国、日本等国家的新能源汽车广泛应用永磁同步电机。

3. 开关磁阻电机

开关磁阻电机是一种新型电机，定子与转子通常由普通硅钢片叠压构成，形成了双凸极结构。开关磁阻电机具有结构简单、成本低廉、性能可靠、启动性能好等特点，同时结合了交流感应电机的变频调速能力和直流电机的调速优势。然而，开关磁阻电机存在较大的转矩波动，导致噪声问题严重，从而限制了其在新能源汽车领域的应用。国内的一些学者已经对减少开关磁阻电机的转矩波动和噪声问题进行了研究，并取得了一系列成果。因此，凭借其卓越的性能，开关磁阻电机被认为是新能源汽车驱动电机系统发展的一个潜在方向。

随着电子技术和计算机技术的飞速发展，新的电机理论与控制方式层出不穷，正推动着新的电机驱动技术迅猛发展。高密度、高效率、轻量化、低成本、宽调速牵引的电机驱动系统已成为各国研究和开发的主要热点，如永磁式开关磁阻电机、转子磁极分割型混合励磁结构同步电机及永磁无刷交流电机等。

各种电机的性能比较见表 1-1。

表 1-1 各种电机的性能比较

项目	直流电机	交流电机		
		交流异步电机	永磁同步电机	开关磁阻电机
转速范围/($r \cdot \min^{-1}$)	4 000~6 000	4 000~20 000	4 000~10 000	>15 000
功率密度	低	中	高	较高
功率因数			0.90~0.93	0.60~0.65
峰值效率/%	9	94~95	95~97	85~90
负荷效率/%	7	90~92	85~97	78~86
过载能力/%		300~500	300	300~500
电机质量	重	中	轻	轻
电机外形尺寸	大	中	小	小
可靠性	一般	好	优良	好
结构坚固性	差	好	一般	优良
控制操作性能	最好	好	好	好
控制器成本	低	高	高	一般

四、驱动电机的基本参数

电机的各项参数是根据国家标准以及电机的设计、试验数据而确定的额定运行数据，是电机运行的基本依据。电机的基本参数主要包括以下几项。

1. 额定功率

额定功率是指额定运行情况下轴端输出的机械功率，单位为 W 或 kW。

2. 额定电压

额定电压是指外加于线端的电源线电压，单位为 V。



3. 额定电流

额定电流是指电机额定运行（额定电压、额定输出功率）情况下电枢绕组（或定子绕组）的线电流，单位为 A。

4. 额定频率

额定频率是指电机额定运行情况下定子绕组的通电频率，单位为 Hz。

5. 额定转速

额定转速是指电机额定运行（额定电压、额定频率、额定功率）的情况下电机转子的转速，单位为 r/min。

6. 功率密度

功率密度是指电机的输出功率与其质量之比，单位为 kW/kg。

电机在额定运行情况下输出额定功率时，称为满载运行，这时电机的运行性能、经济性及可靠性等均处于优良状态。电机的输出功率超过额定功率时，称为过载运行，这时电机的负载电流大于额定电流，这种情况将会引起电机过热，从而缩短电机的使用寿命，严重时甚至烧毁电机。电机的输出功率小于额定功率时，称为轻载运行，轻载运行时电机的效率和功率因数等运行性能均较差。因此，电机应尽量避免轻载运行。

五、驱动电机的性能要求

新能源汽车在行驶过程中经常需要频繁地启动、停车、加速、减速，这些操作对电机性能提出了更高的要求。与一般工业用途的电机相比，新能源汽车所使用的电机需要具备以下性能特点。

1. 功率密度大

由于新能源汽车整车空间有限，意味着驱动电机和电机控制器的尺寸将受到限制，因此要求驱动电机结构紧凑、体积小，同时具备足够的功率密度，以满足车辆轻量化的要求。

2. 功率大

瞬时功率大、带负载启动性能好、过载能力强，以提供较好的加速性能，使车辆具备足够的爬坡性能。

3. 效率高

工作效率高、高效区广。汽车在行驶过程中，车速变化范围广，驱动电机转速范围也大，电机应能在较广的转速范围内保持高的工作效率。

4. 长续航

驱动电机应能在汽车减速时实现能量回收，以提高车辆的续航里程。

5. 结构强

结构坚固，适合批量生产。汽车行驶过程中面临振动冲击，驱动电机应满足可靠性好、能够在较恶劣的环境下长期工作、使用寿命长等要求。

6. 噪声低

运行时噪声低，以使车辆具有良好的驾乘舒适性。



六、驱动电机系统的发展趋势

目前的驱动电机系统主要采用集中式驱动，利用驱动电机体积小、功率密度高的特点，电机布置较为灵活，可以通过电机前置、电机后置和双电机实现前驱、后驱或四驱。电机的诸多优点使新能源汽车可以实现多电机驱动，多电机驱动为驱动系统构型创新带来了巨大的机遇。技术上，正在由电机单一动力源驱动向电机多动力源驱动转变，轮毂电机就是下一代驱动系统发展的重要方向。轮毂电机是一种将电机集成在车轮内、能直接驱动车轮运行的电机，能实现 90°转向、原地掉头等操作。轮毂电机可以直接驱动车轮，省去了机械差速器、传动轴等部件，传动效率进一步提高，驱动系统的结构得以简化。同时，轮毂电机的使用增大了簧下质量，降低了整车的舒适性和稳定性，对电机的稳定性、散热性能和耐冲击性能提出了更高的要求。

基于轮毂电机的分布式驱动控制策略及关键技术仍然需要突破，包括分布式驱动电机构型与结构优化设计、驱动电机总成设计及效率优化控制、车身姿态控制与多动力学间协调控制、驱动电机车辆动力与能量控制。

我国的电动汽车轮毂电机在技术和设计开发方面已取得了阶段性成果。例如，比亚迪公司已发布了全新核心技术“易四方”。这项技术能够实现高附着力原地掉头、应急浮水脱困等功能，四个电机分别独立驱动四个车轮，通过感知力更强的驱动电机系统，以毫秒级的速度独立调整四轮的轮端动态，从而更精准地控制车身姿态。未来，我国轮毂电机的发展也将取得更多的突破性成果。

任务二

新能源汽车驱动电机的结构与原理认知



情景触发

维修车间里，技师拆解一台故障电机时，指着换向器说：“有刷电机的电刷磨损是常见问题，无刷电机则用电子换向解决了这个痛点。”本任务以有刷与无刷电机的结构差异为故事线，通过对比定子绕组、转子永磁体的设计，结合比亚迪 E5 永磁同步电机案例，详解旋转变压器如何精准定位转子位置，让读者理解不同电机的工作原理和技术演进逻辑。



拆解引擎

一、有刷直流电机

（一）有刷直流电机的结构

有刷直流电机主要由定子、转子、换向器和电枢绕组四部分组成。



1. 定子

定子（图 1-6）主要由主磁极、换向磁极、电刷和机座等部分组成。定子的功能是产生磁通和进行机械固定。

2. 转子

转子（图 1-7）主要由电枢铁芯、电枢绕组及换向器等部分组成。端盖上装有轴承以支撑电机转子旋转，端盖固定在机座两端。

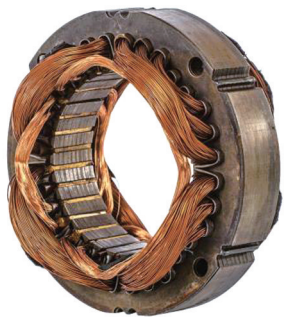


图 1-6 有刷直流电机的定子

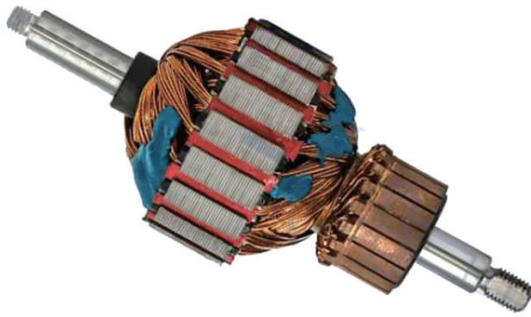


图 1-7 有刷直流电机的转子

3. 换向器

换向器是由许多换向片组成的整体，装在转子的一端，换向片之间相互绝缘，转动的换向器与固定的电刷滑动接触，使转动的电枢绕组与静止的外电路相连接。

4. 电枢绕组

转子电枢绕组按一定规律缠绕在转子铁芯槽内，与换向器连接，形成闭合回路。其作用是在运动中切割磁力线。

（二）有刷直流电机的工作原理

有刷直流电机的工作原理涉及定子与转子的相互作用。定子上的绕组通电后，会产生一个磁场。同时，转子上的线圈也通电，受安培力的作用，这个线圈在定子产生的磁场中受到力的作用，导致转子开始旋转。当转子上的线圈与磁场平行时，为维持转子的持续旋转，需要改变通过转子线圈的电流方向，这一过程是通过电刷与换向器的接触实现的。随着转子的旋转，电刷在换向器的不同片上交替接触，从而及时切换电流的方向。这种电流方向的适时改变确保了转子线圈始终受到与旋转方向一致的安培力，使得电机能够持续且稳定地沿一个方向转动。这种机制是有刷直流电机能够实现连续旋转的关键。

通电线圈在磁场中要受到磁场力的作用。如图 1-8（a）所示，电机中的电流从左侧向前绕一圈后从右侧绕回，根据左手定则，“S”极磁铁侧线圈受力向上转动，“N”极磁铁侧线圈受力向下转动。这样就形成一个转矩，使电枢顺时针旋转。当电枢转过 90° 时，通电线圈虽然受到电磁力的作用，但转矩为零，如图 1-8（b）所示。电枢受机械惯性的作用也能转过一定的角度，这时线圈中电流的方向也发生了改变。当电枢转过 180° 时，线圈内电流的方向发生了改变，根据左手定则，“S”极磁铁侧线圈受力向上转动，“N”极磁铁侧线圈受力向下转动，仍然形成一个逆时针转动的转矩，电枢按同一方向继续旋转，这样电机就可以连续旋转。有刷直流电机的工作原理如图 1-8 所示。

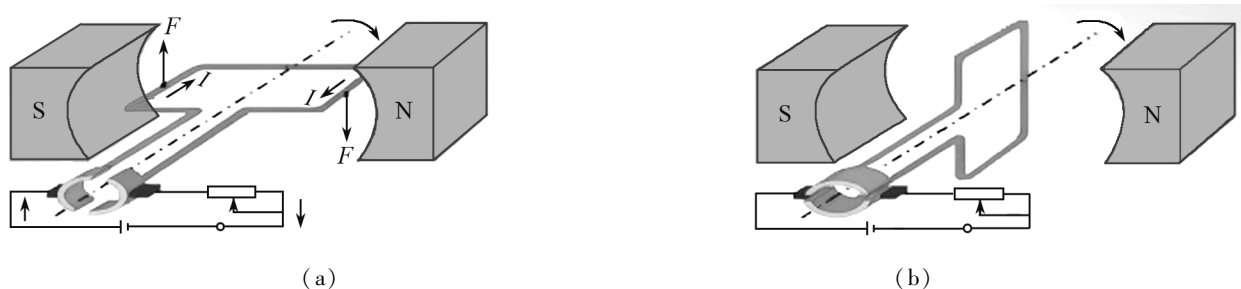


图 1-8 有刷直流电机的工作原理

二、无刷直流电机

(一) 无刷直流电机的结构

无刷直流电机是指无电刷和换向器的电机。其运行原理与有刷直流电机基本相同，但换向动作是通过电子换向器来完成的。无刷直流电机主要由电机本体（定子和转子）、电子换向器和位置传感器三部分组成。

1. 电机本体

无刷直流电机的电机本体由定子和转子两部分组成。

定子是电机本体的静止部分，它由导磁的定子铁芯、导电的电枢绕组，以及固定铁芯与绕组用的一些零部件、绝缘材料、引出部分等组成，如机壳、绝缘片、槽楔、引出线及环氧树脂等。

转子是电机本体的转动部分，是产生激磁磁场的部件，由永磁体、导磁体和支撑零部件组成。

2. 电子换向器

电子换向器由功率开关和位置信号处理电路构成，主要用来控制定子各绕组通电的顺序和时间。

3. 位置传感器

位置传感器在无刷直流电机中起着检测转子磁极位置的作用，为功率开关电路提供正确的换向信息，即将转子磁极的位置信号转换成电信号，经位置信号处理电路处理后控制定子绕组换向。由于功率开关的导通顺序与转子转角同步，因此位置传感器与功率开关一起，起着与传统有刷直流电机的机械换向器和电刷类似的作用。

(二) 无刷直流电机的工作原理

无刷直流电机的工作原理是利用电机转子位置传感器输出信号控制电子换向线路去驱动逆变器的功率开关器件，使电枢绕组依次馈电，从而在定子上产生跳跃式的旋转磁场，拖动电机转子旋转。

同时，随着电机转子的转动，转子位置传感器不断送出位置信号，以不断地改变电枢绕组的通电状态，使得在某一磁极下导体中的电流方向保持不变，这样电机就旋转起来了。无刷直流电机的工作原理如图 1-9 所示。

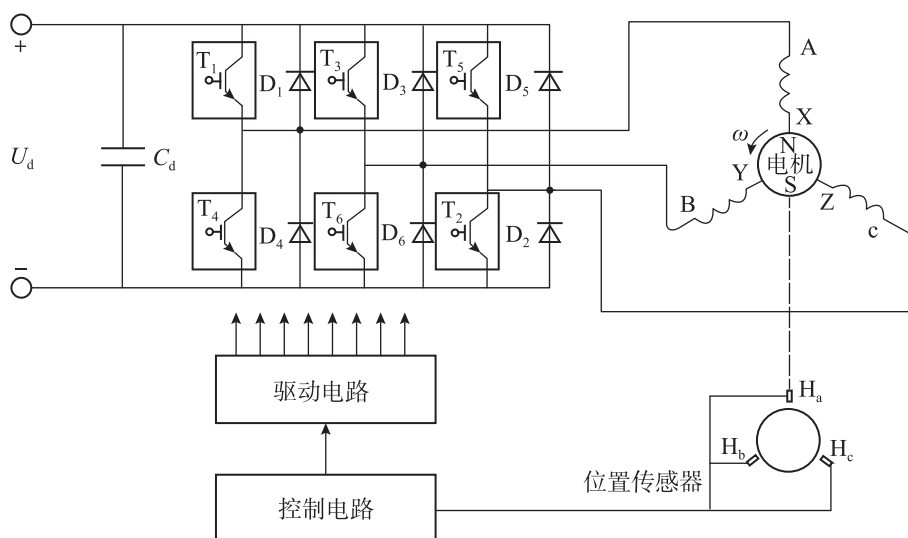


图 1-9 无刷直流电机的工作原理

三、永磁同步电机

永磁同步电机分为使用三相正弦波电流的永磁同步电机和使用方波电流的永磁同步电机。下面主要介绍使用三相正弦波电流的永磁同步电机，也是目前电动汽车普遍使用的电机类型。

（一）永磁同步电机的结构

永磁同步电机由定子、转子、位置传感器、温度传感器、机壳、机座等组成。下面对几个主要结构进行介绍。

1. 定子

定子主要由定子绕组和定子铁芯两部分组成（图 1-10）。

定子绕组一般制成多相（三、四、五相等），通常为三相绕组。三相绕组沿定子铁芯对称分布，在空间互差 120° 电角度，通入三相交流电时，可以产生旋转磁场。

定子绕组用带有绝缘层的导线（漆包线或纱包线）绕成。定子绕组均匀分成三组，按一定规律嵌放在定子内表面的下线槽内。每组绕组称为一相，每相有两个出线端。 U_1 、 V_1 、 W_1 称为三相绕组的首端， U_2 、 V_2 、 W_2 称为三相绕组的末端。定子绕组的连接方式主要有星形连接和三角形连接两种（图 1-11）。



图 1-10 永磁同步电机定子

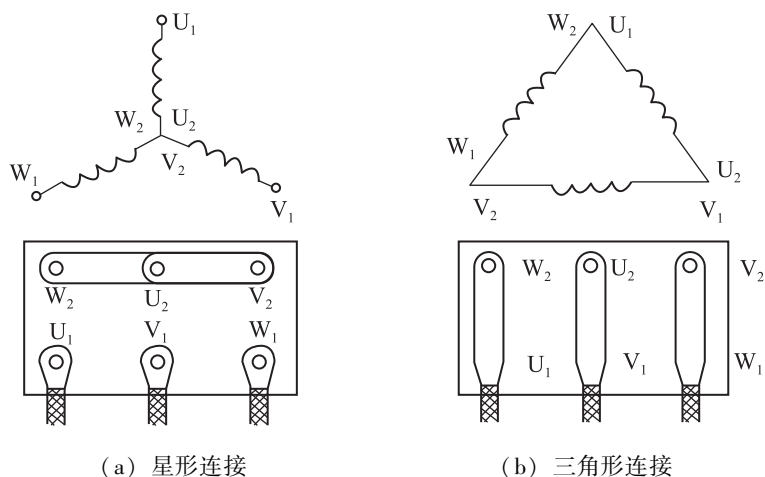


图 1-11 永磁同步电机定子绕组连接方式

定子铁芯由互相绝缘的硅钢片叠压而成，内表面有凹槽（下线槽），用于嵌放绕组。

2. 转子

永磁同步电机转子主要由永磁体和转子铁芯两部分组成。其中，永磁体主要由铁氧体永磁材料和钕铁硼永磁材料制成；转子铁芯根据磁极结构的不同，可选用实心钢制成，也可采用钢板或硅钢片冲制后叠压而成。

与普通电机相比，永磁同步电机还必须装有转子永磁体位置传感器，用来检测转子磁极的位置，并以此对电枢电流进行控制，达到对永磁同步电机驱动控制的目的。按照永磁体在转子上位置的不同，永磁同步电机的转子结构可分为内置式和外置式两种。

内置式永磁同步电机按永磁体磁化方向的不同，可分为径向式、切向式和混合式，如图 1-12 所示。内置式永磁同步电机的转子设计中，由于嵌入了永磁体，因此具有明显的凸极特征，这一结构特点在机械构造上尤为显著。

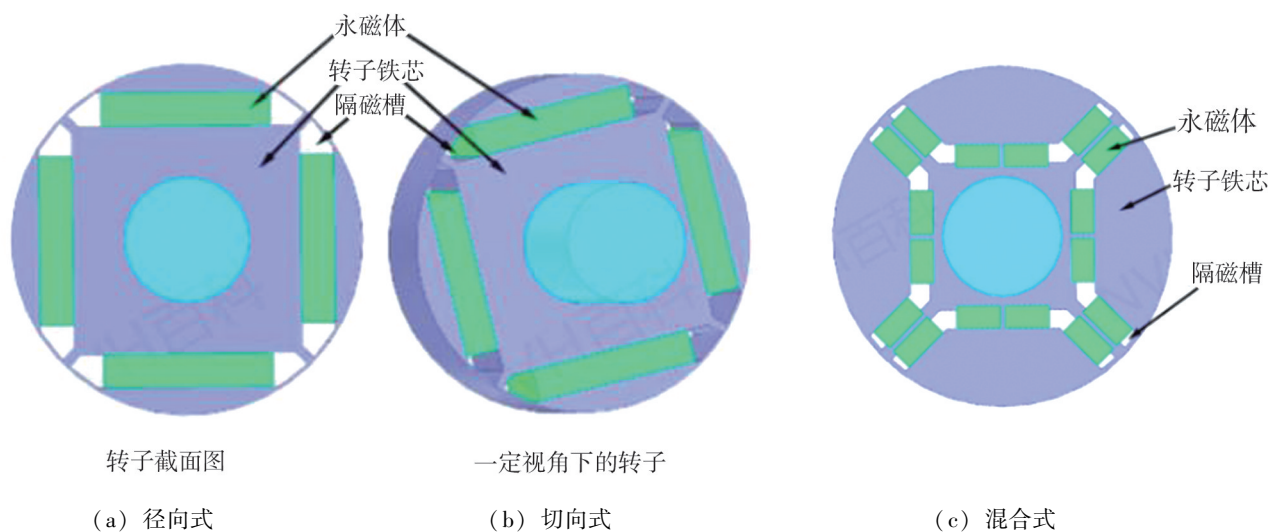


图 1-12 内置式永磁同步电机



外置式永磁同步电机根据永磁体是否嵌入转子铁芯中,可分为面贴式和插入式两种,如图 1-13 所示。

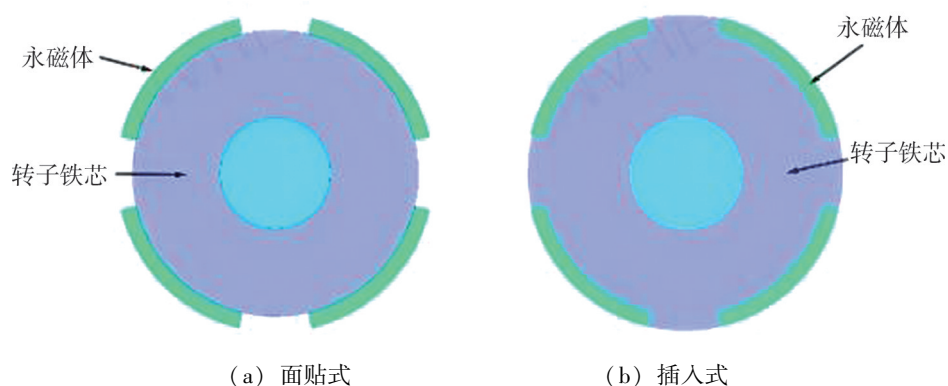


图 1-13 外置式永磁同步电机

3. 位置传感器

永磁同步电机主要使用的是旋转变压器。旋转变压器简称旋变,是一种输出电压随转子转角变化的器件。当励磁绕组以一定频率的交流电压励磁时,输出绕组的电压幅值与转子转角呈余弦函数关系,或保持一定比例关系,或在一定转角范围内与转角呈线性关系。

旋转变压器的主要功能是精确检测电机转子的位置。通过对控制器进行编码处理,不仅能确定电机的转速,而且能掌握其旋转方向。

旋转变压器实物如图 1-14 所示。传感器线圈固定在壳体上,信号齿圈固定在转子上。传感器线圈由励磁线圈、正弦线圈、余弦线圈三组线圈组成。

旋转变压器的工作原理是,当励磁绕组通以高频的激励信号后,输出绕组会感应出一定幅值和频率的电压信号,其输出电压是由正弦包络的高频信号,包含转子位置信息。

旋转变压器的结构组成如图 1-15 所示。



图 1-14 旋转变压器实物

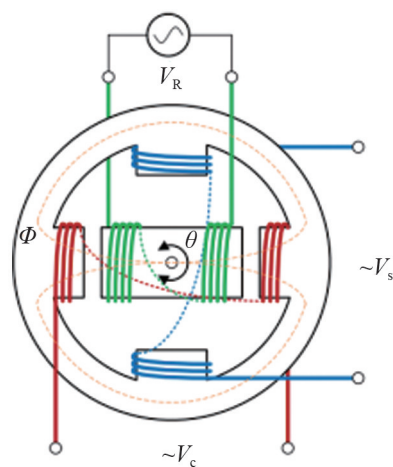


图 1-15 旋转变压器的结构组成

4. 温度传感器

温度传感器的作用是感知电机及其控制器的温度变化，并把温度信号转换为电子信号输送给电机控制模块。

常用的温度传感器主要有热电偶式温度传感器、热敏电阻式温度传感器、数字温度传感器（RTD）、半导体温度传感器（IC）四种类型。常用的为热敏电阻式温度传感器，其电阻值随温度的变化而发生变化。

热敏电阻式温度传感器分为两种类型：正温度系数（PTC）热敏电阻型和负温度系数（NTC）热敏电阻型。PTC 热敏电阻的电阻值与温度成正比，即温度升高，电阻值增加；NTC 热敏电阻的电阻值与温度成反比，即温度升高，电阻值减小。

对电机过热保护常用的方法是在电机定子的绕组里埋设体积小、NTC 热敏电阻。电机温度传感器主要由热敏电阻晶体、烧结电极、引线、探头结构等部件组成（图 1-16）。

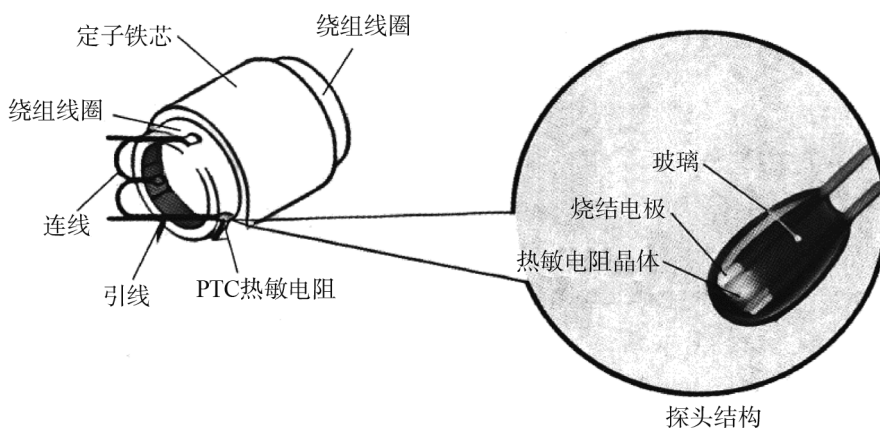


图 1-16 温度传感器的结构

图 1-17 所示为吉利帝豪 EV450 驱动电机温度传感器电路原理图。可以看出，为保证驱动电机的运行安全，系统设置了两个温度传感器，驱动电机控制器（MCU）对两个温度传感器信号进行实时检测并比对，以达到精确控制电控系统散热的目的。如果有一个温度传感器出现故障，MCU 将使用另一个进行替代。如果两个温度传感器同时出现故障，MCU 将启动整车限功率保护功能，车辆最高速度及加速性能将受限，同时仪表将点亮限功率指示灯，警示驾驶员尽快维修。

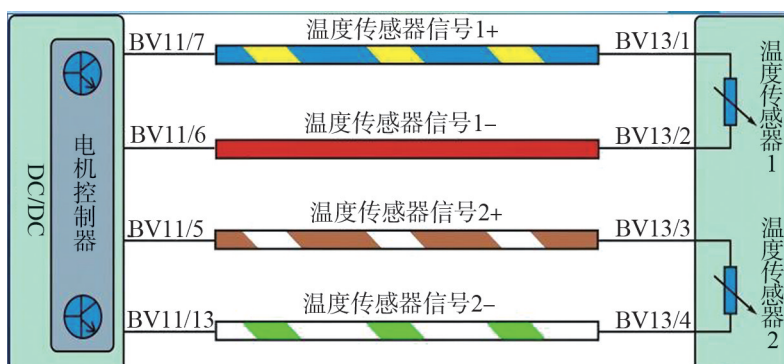


图 1-17 吉利帝豪 EV450 驱动电机温度传感器电路原理图



（二）永磁同步电机的工作原理

在电动汽车的应用中，永磁同步电机扮演着双重角色：一方面，它作为电动机，为车辆提供必要的动力输出；另一方面，在制动过程中，它又能够转换为发电机模式，实现制动能量的有效回收。这种多功能性使得永磁同步电机成为电动汽车中不可或缺的关键组件。

1. 电动原理

永磁同步电机的定子绕组通入三相交流电后会产生旋转磁场，转子上因有永磁铁而自带恒定磁场，根据磁场与磁场间同性相斥、异性相吸的原理，定子的旋转磁场带着转子的恒定磁场旋转，从而输出转矩（图 1-18）。

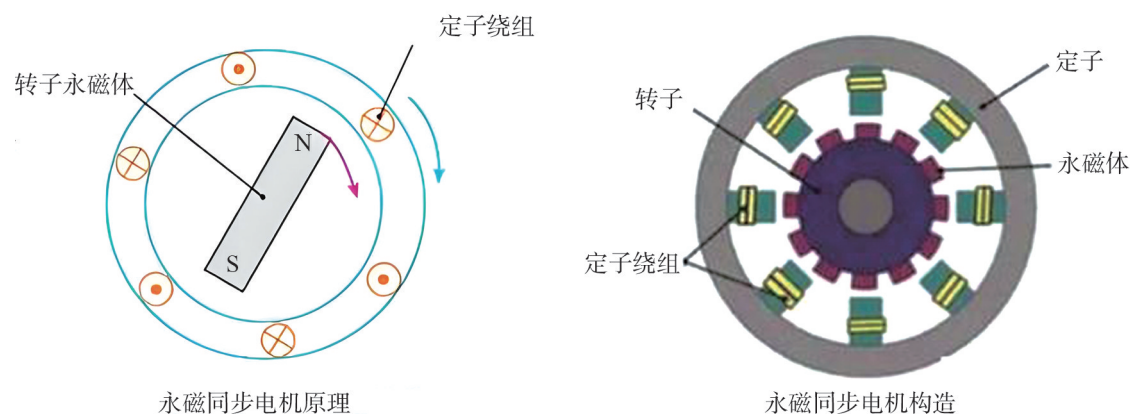


图 1-18 永磁同步电机的原理及构造

2. 发电原理

永磁同步电机在电动汽车制动时，车轮的惯性带动永磁同步电机的转子旋转，同时转子上有永磁体的恒定磁场，定子的三相对称绕组做切割转子磁场磁力线运动，发生电磁感应现象，在定子绕组中产生感应电动势，从而就有了感应电流（图 1-19）。

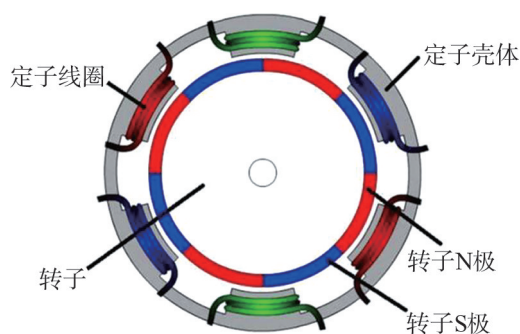


图 1-19 永磁同步电机的发电原理

四、交流异步电机

按所需交流电源相数的不同，交流异步电机又可分为单相和三相两大类。目前使用最广泛的是三相异步电机，这是因为三相异步电机具有结构简单、价格低廉、坚固耐用、使用维护方便等优点。

（一）交流异步电机的结构

交流异步电机主要由定子、转子、机壳、机座等组成，定子与转子之间存在气隙（图 1-20）。下面主要介绍定子和转子。

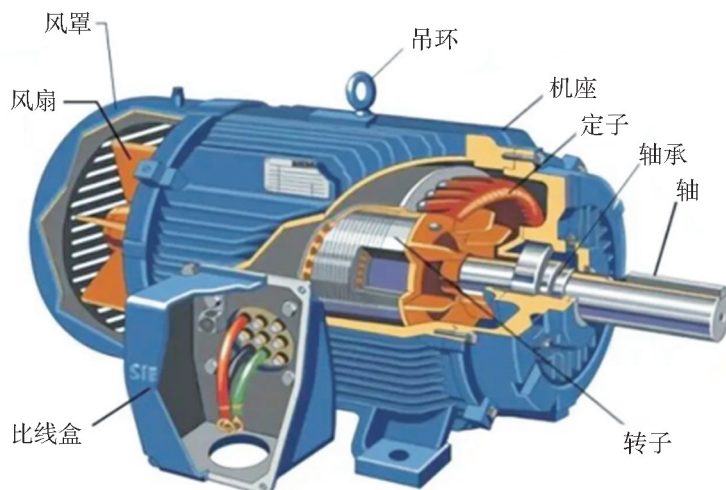


图 1-20 交流异步电机的结构

1. 定子

定子主要由定子绕组和定子铁芯两部分组成。交流异步电机的定子绕组与永磁同步电机的结构和控制原理都是相同的。交流异步电机定子铁芯是电机磁路的一部分。定子绕组是三相电机的电路部分，三相电机有三相绕组，通入三相对称交流电流时，就会产生旋转磁场。

2. 转子

转子主要由转子绕组和转子铁芯两部分组成。转子铁芯是电机磁路的一部分，它由 0.5 mm 厚的硅钢片叠压而成，转子铁芯固定在转轴或转子支架上，整个转子的外表呈圆柱形。

转子绕组分为笼型绕组和绕线型绕组两类。

(1) 笼型绕组。

笼型绕组是一个自身短路的绕组。在转子铁芯的每个槽里嵌放一根导体，在铁芯的两端用端环连接起来，形成一个短路的绕组。若把转子铁芯拿掉，则剩下的绕组形状看起来像个松鼠笼子，因此又称鼠笼转子（图 1-21）。导条的材料采用铜或铝。

(2) 绕线型绕组。

绕线型绕组的槽内嵌放用绝缘导线组成的三相绕组，一般都连接成星形（图 1-22）。转子绕组的三根引线分别接到三个集电环上，用一套电刷装置引出来，这样就可以把外接电阻串联到转子绕组回路，改善电机的启动性能或调节电机的转速。

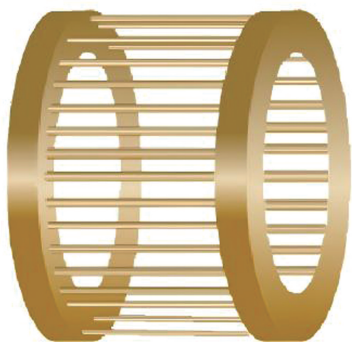


图 1-21 笼型绕组

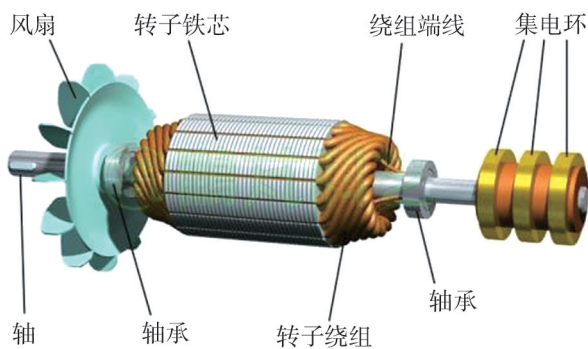


图 1-22 绕线型绕组



（二）交流异步电机的工作原理

与永磁同步电机一样，交流异步电机在电动汽车中既要充当电动机产生动力，又要在制动时作为发电机使用，实现制动能量的回收。

1. 电动原理

交流异步电机的定子绕组通入三相交流电后会产生旋转磁场，该旋转磁场切割转子绕组，从而在转子绕组中产生感应电动势，电动势的方向由右手定则来确定。转子绕组是闭合通路，转子中便有电流产生，电流方向与感应电动势方向相同，载流的转子导体在定子旋转磁场中将受到电磁力的作用，电磁力的方向可用左手定则确定。由电磁力产生的电磁转矩将驱动电机旋转，并且电机旋转方向与旋转磁场方向相同（图 1-23）。

2. 发电原理

交流异步电机在电动汽车制动时，车轮的惯性带动交流电机的转子旋转，当电机转子的转速大于定子旋转磁场的转速时，定子的三相对称绕组做切割转子磁场磁力线的运动，产生电磁感应现象，在定子绕组中产生感应电动势，从而就有了感应电流（图 1-24）。

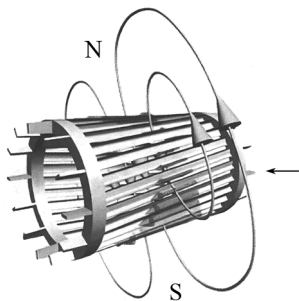


图 1-23 交流异步电机的电动原理

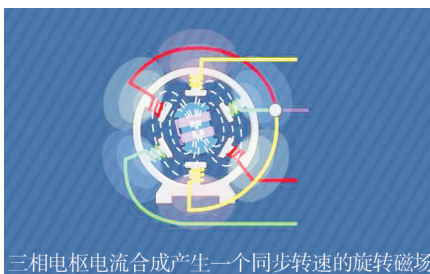


图 1-24 交流异步电机的发电原理

五、开关磁阻电机

开关磁阻电机是一种新型调速电机，是继变频调速系统之后的最新一代调速系统。它的结构简单坚固，调速范围宽，系统可靠性高。英国、美国等国家对开关磁阻电机的研究已取得显著效果，产品功率等级从数瓦到数百千瓦，广泛应用于家用电器、航空、航天、电子、机械及电动汽车等领域。我国对开关磁阻电机调速系统的研究与试制起步于 20 世纪 80 年代末 90 年代初，取得了从基础理论到设计制造技术多方面的成果与进展。

（一）开关磁阻电机的结构

开关磁阻电机由定子、转子、位置传感器、机壳、机座等组成。下面对几个主要结构进行介绍。

1. 定子

开关磁阻电机的定子主要由定子绕组和定子铁芯两部分组成。定子铁芯由导磁良好的硅钢片叠压而

成，内部有多个凸齿极，通常有偶数个（图 1-25）。直径方向上相对应的两个齿极上绕有串联在一起的线圈，这组线圈组成一相，并且绕向相同。

2. 转子

开关磁阻电机的转子只有转子铁芯，转子上既没有绕组也没有永磁材料。开关磁阻电机转子铁芯如图 1-26 所示，转子铁芯由导磁良好的硅钢片叠压而成，外部有多个凸齿极，通常也是偶数个，但是比定子铁芯中凸齿极个数少（通常少两个），这样才能产生步距角，从而产生磁阻力矩。

步距角为每一拍转子转过的角度，通常用 θ 表示，即转子的相邻两齿间夹角与定子的相邻两齿间夹角的差值（图 1-27）。

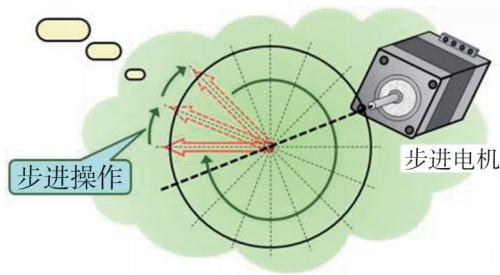
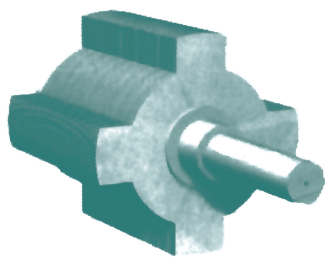
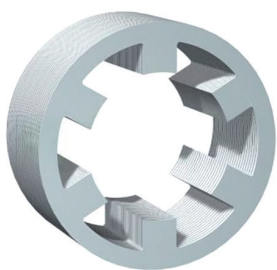


图 1-25 开关磁阻电机定子铁芯

图 1-26 开关磁阻电机转子铁芯

图 1-27 步距角示意图

开关磁阻电机的相数、定子转子极数、步距角三者之间的组合关系见表 1-2。目前应用较多的是四相（8/6）结构和六相（12/10）结构。

表 1-2 开关磁阻电机的相数、定子转子极数、步距角三者之间的组合关系

相数	3	4	5	6	7	8	9
定子极数	6	8	10	12	14	16	18
转子极数	4	6	8	10	12	14	16
步距角/（°）	30	15	9	6	4.28	3.21	2.5

3. 位置传感器

位置传感器的功用主要是检测电机转子凸齿的位置，确定定子凸齿与转子凸齿的相对位置，从而为各相绕组的导通和关断提供准确的信号。

（二）开关磁阻电机的工作原理

开关磁阻电机是一种利用“磁阻最小原理”产生磁阻转矩而工作的电机，磁力线在磁铁的外部从 N 极出发回到 S 极会形成一个闭合回路，而磁力线有选择“最畅通路径”的趋势。正如电流会选择电阻最小的支路通过，磁力线会主动“创造”磁阻最小的路径，因为空气的磁阻较大，它会把附近磁阻小的物体吸引过来。

图 1-28 所示为三相 6/4 结构磁阻电机的结构示意图。定子六个齿极上绕有线圈，径向相对的两个线圈连接在一起，

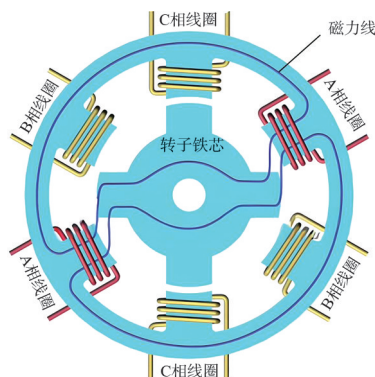


图 1-28 三相 6/4 结构磁阻电机的结构示意图



组成一相，该电机有三相，结合定子与转子的极数就称该电机为三相 6/4 结构。图 1-28 中标注的 A 相、B 相、C 相线圈仅为后面分析磁路带来方便，并不是连接普通的三相交流电。

A 相线圈接通电源产生磁通，磁力线从最近的转子齿极通过转子铁芯，磁力线可看成极有弹力的线，在磁力的牵引下转子开始逆时针转动。磁力一直牵引转子转到 30° 为止，到了 30° 转子不再转动，此时磁路最短。

为使转子继续转动，在转子转到 30° 前已切断 A 相电源，在转子转到 30° 瞬间接通 B 相电源，磁通从最近的转子齿极通过转子铁芯，于是转子继续转动。磁力一直牵引转子转到 60° 为止。

在转子转到 60° 前切断 B 相电源，在转子转到 60° 瞬间接通 C 相电源，磁通从最近的转子齿极通过转子铁芯。转子继续转动，磁力一直牵引转子转到 90° 为止。

当转子转到 90° 前切断 C 相电源，转子转到 90° 的瞬间接通 A 相电源，转子的转动状态与 0° 时一致，这样不停地重复下去，转子就会不停地旋转，这就是磁阻电机的工作原理。由于运用了磁阻最小原理，因此称其为磁阻电机。又由于电机磁场并非由正弦交流电产生，其线圈电流通断和磁通状态直接受开关控制，因此又称其为开关磁阻电机。

任务三

新能源汽车驱动电机拆装



情景触发

小陈在维修时发现，某车型驱动电机与控制器集成设计（电驱三合一），拆卸需先断开高压互锁回路。本任务以比亚迪 E5 为例，模拟拆装场景：从断电验电、拆卸冷却管路到分离电机与减速器，强调高压安全规范与机械对位要点，通过“旋变传感器安装偏差导致电机异响”的案例，说明拆装精度对电机性能的影响。



拆解引擎

一、纯电动汽车驱动电机与其他部件的连接关系

纯电动汽车驱动电机对外有低压线束连接、高压线束连接和散热水管连接三种连接关系。驱动电机通过低压线束将电机当前的转速、转子位置、定子绕组温度等信息传送给电机控制器，再由电机控制器传送给整车控制器。电机控制器接收来自动力电池的高压直流电，通过 U、V、W 三相高压线束控制驱动电机的运转速度、转矩、正反转，以及切换驱动和发电两种工作模式。冷却液经电动水泵被输送至电机控制器的冷却水道，再通过管路流入驱动电机的冷却水道对电机控制器和驱动电机进行冷却，冷却液再由驱动电机冷却水道流向冷却液散热器，冷却液经散热后再进入电动水泵，如此往复循环。电机及控制系统连接图如图 1-29 所示。

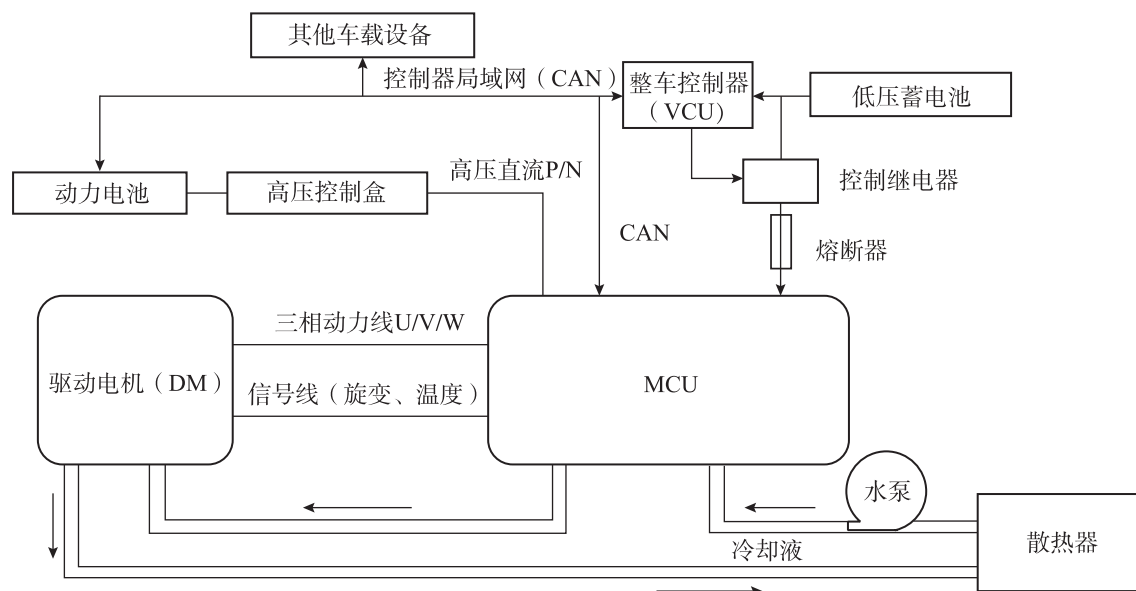


图 1-29 电机及控制系统连接图

二、比亚迪 E5 电动汽车驱动电机的组成

比亚迪 E5 电动汽车采用永磁同步电机，永磁同步电机的结构示意图如图 1-30 所示。

机壳中含有冷却水道，电机端盖上有旋转变压器（简称旋变），用以监测转子位置，转子位置信号经控制器解码后可以获知电机转速。定子上有两个温度传感器，埋设在定子绕组中，用以监测电机的绕组温度，控制器可以通过增加冷却风扇运转速度和降低运行功率等措施保护电机，避免过热。

永磁同步电机的速度-转矩特性非常适合汽车驱动的需求。电机转子采用永磁体，旋转磁场和定子线圈共同作用产生转矩。与传统汽油机不同，永磁同步电机没有怠速，即使在车辆由静止到起步的临界状态，电机也可产生最大驱动转矩，可保证车辆的加速性能。

旋转变压器是转子位置传感器，用于确定电机转子的位置，便于电机控制器输出正确相位和频率的电压以控制电机运转。旋转变压器转子安装在电机转子上，随电机共同转动，旋转变压器定子安装在驱动电机后盖上。

旋转变压器用来测定转子磁极位置，从而为电机控制器内的逆变器（如绝缘栅双极型晶体管（IGBT）模块）提供正确的换向信息。作为角度位置传感器，常用的类型有光学编码器、磁性编码器和旋转变压器。由于考虑到制造成本和精度，因此磁性编码器并没有像光学编码器和旋转变压器那样得到广泛应用。光学编码器的输出信号是脉冲信号，这种信号本质上是数字信号，因此在数据处理方面相对简单，这也是它得到广泛应用的原因之一。然而，光学编码器的信号处理电路较为复杂，且成本较高。旋转变

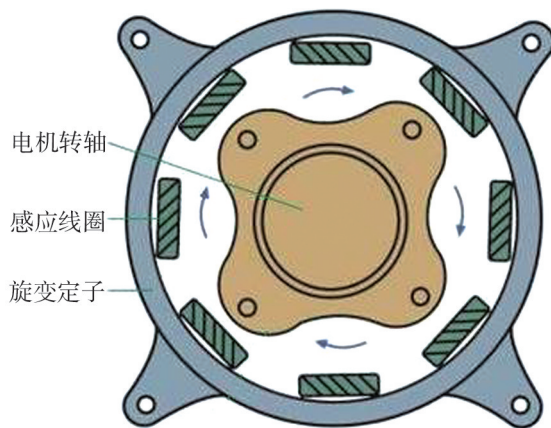


图 1-30 永磁同步电机的结构示意图