

NO.318

电动汽车驱动系统关键技术

对新能源汽车而言，电池技术、电机技术、电机控制器技术被称为新能源汽车关键三电技术。

当前提高电机驱动系统的效率、功率密度、安全性与可靠性成为新能源汽车电机驱动系统的主要研究方向，也是我国政府和企业进行政策制定和未来发展规划的重点对象。

电动汽车是集汽车技术、驱动控制技术、电机及计算机技术、电化学技术以及能源与新材料技术于一体的高新技术、高度集成的工业化产品，具有无污染、低噪声、效率高等特点。

1 电动汽车电驱系统

电动汽车中，“电池、电机、电控”是其三大关键技术，其中电池技术相对独立，电机与电控结合比较紧密。

电动汽车电机及其驱动控制系统（简称电驱系统）的技术水平直接影响着电动汽车的整车性能，是衡量电动汽车质量的重要指标之一。

就电动汽车动力总成系统而言，现有的电动汽车驱动方式主要有集中式驱动和分布式驱动两种。

1.1 集中式驱动

电动汽车集中式驱动系统就是采用高功率密度的驱动电机取代传统汽车的燃油发动机，同时保留大部分传统汽车原有的整套机械传动、制动系统。集中式电驱系统的电动汽车结构如图2所示。

该类集中式电驱系统在动力结构上继承了传统汽车的变速箱、差速器以及传动轴等机械部件，对整车动力系统布局改动较少，控制技术相对成熟，是现阶段电动汽车的主流驱动模式。

集中式驱动系统采用的驱动电机为传统内转子电机，比如丰田普锐斯所采用的驱动电机转子为V型内置式永磁体结构，如图3所示。

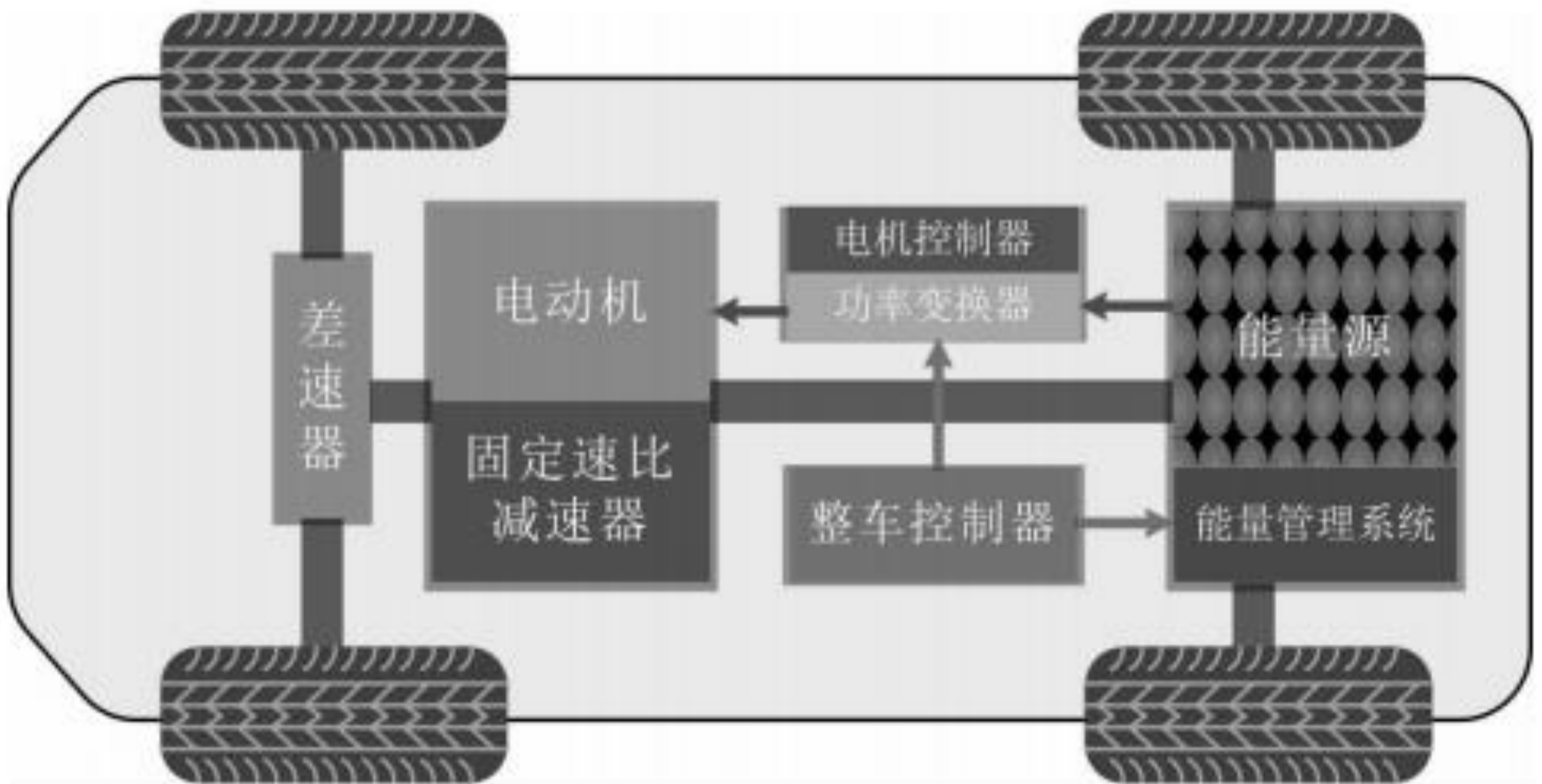


图2 集中式电驱系统结构

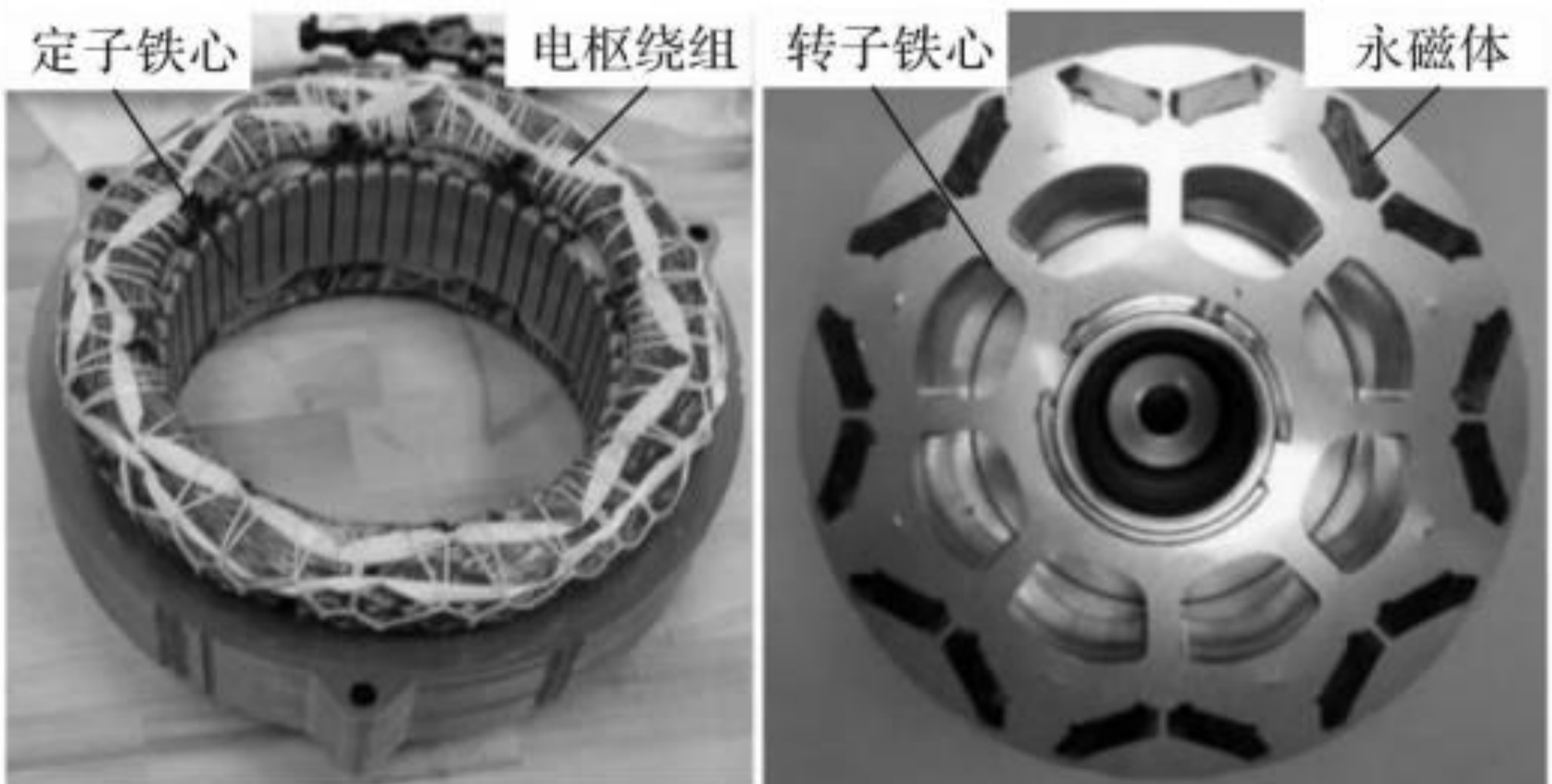


图3 丰田电动汽车驱动电机

1.2 分布式驱动

电动汽车分布式电驱系统的显著结构特点是将多个驱动电机直接安装在车轮侧，并将驱动、传动、制动装置都整合在一起，省去了离合器、变速器、差速器等机械传动总成，能显著减小车辆簧载质量、

缩短机械传递链和提高传动效率，同时大大简化电动汽车底盘结构。

分布式电驱系统又分为轮毂电机驱动与轮边电机驱动两种。

轮毂电机驱动是将动力、传动和制动装置都整合到轮毂内，使电动车辆的机械部分大大简化。而轮边电机驱动是将驱动电机装在车轮内侧通过传动轴单独驱动该车轮，而不是集成在车轮内。

轮毂电机驱动系统一般采用外转子驱动电机（图4），轮边电机驱动系统采用与集中式驱动相同的内转子驱动电机，但其功率要比集中式驱动小得多。分布式驱动系统结构如图5所示。

采用分布式驱动系统的电动汽车可以根据不同的驱动要求，灵活采用“前轮驱动”、“后轮驱动”以及“四轮独立驱动”等多种模式，还可以通过左右车轮的不同转速或反转实现类似履带式车辆的差动转向，对于特种车辆具有较高的应用价值。



图4 轮毂电机拓扑结构

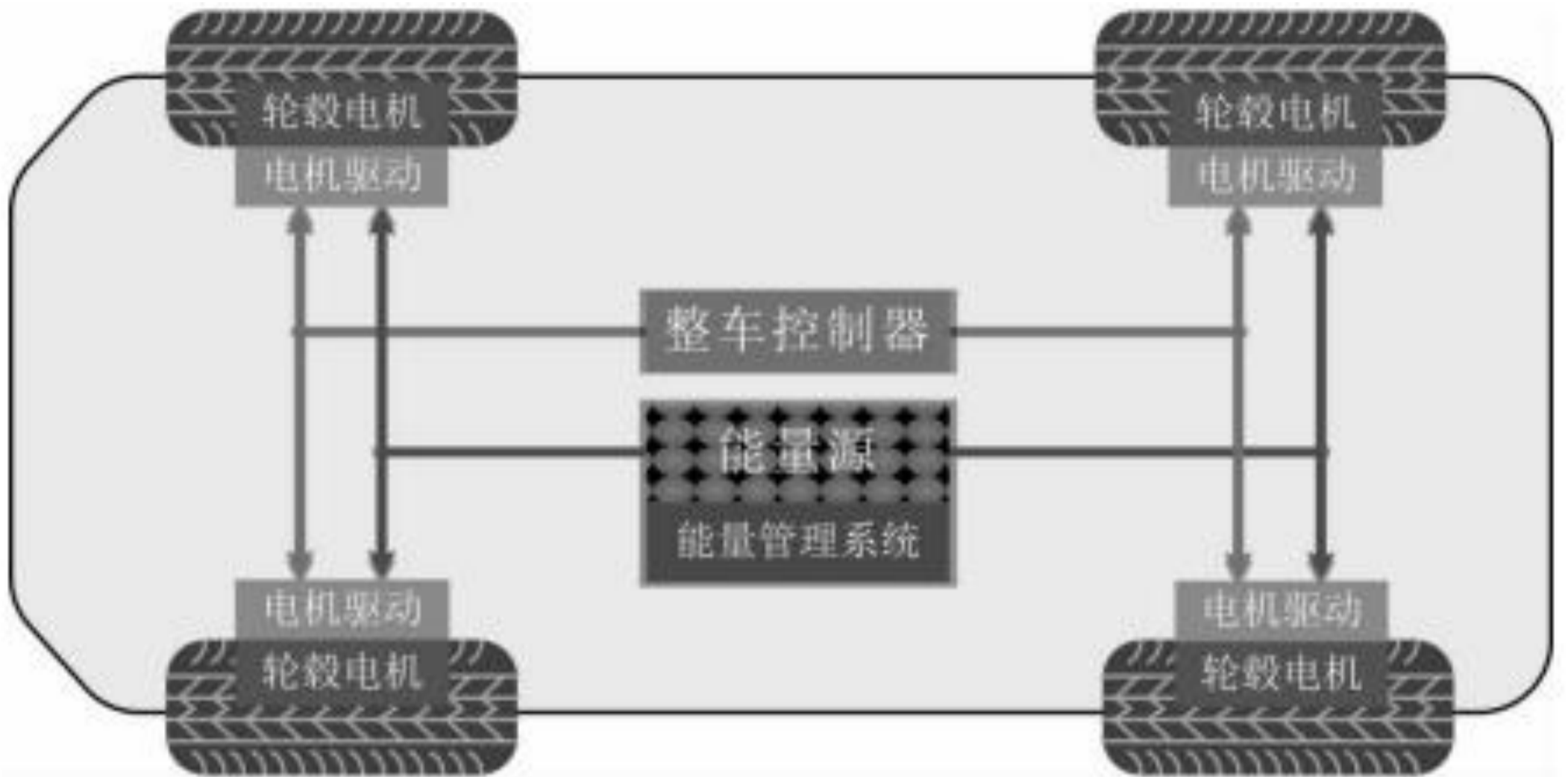


图5 分布式电驱系统结构

2 电动汽车驱动电机

2.1 电动汽车驱动电机分类

电机是电动汽车电驱系统的关键核心部件，其性能的优劣，是衡量电动汽车是否具备优良动力性能的关键因素之一。

根据电动汽车驾驶性能包括加速性能、最大车速、爬坡能力等的要求，以及车辆性能（车重、载重等）和车载能源系统的约束，电动汽车用驱动电机与工业电动机有明显区别，通常要求电动汽车驱动电机具有较高的过载能力以满足短时间加速和爬坡需求；高效率和高功率密度以降低车重，延长续航里程；可控性高、稳态精度高和动态性能好以满足汽车的协调运行。

电动汽车可以采用的驱动电机有直流电动机、PM无刷直流电动机、开关磁阻电动机、交流感应电动机、永磁同步电动机等，如图6所示。电动汽车电机及其应用车型如表1所示。

直流电动机控制简单，通常采用他励直流电动机和串励直流电动机，早期的电动汽车普遍采用此类电动机。

表1 电动汽车用电机分类

电机类型	电动汽车车型
串励直流电动机	菲亚特 PanDa ElettRa
并励直流电动机	马自达 Bongo
他励直流电动机	ConcePtoR G-Van、菲亚特 Seicento ElettRa
交流感应电机	通用 EV1、TeSla、宝马 i3
永磁同步电机	丰田 比亚迪
开关磁阻电机	ChloRiDe LUca

但是直流电动机可靠性低、设备维护困难，随着交流电机的开发和调速技术的发展，电动汽车用直流电动机逐渐被性能更加优越的开关磁阻电动机、交流感应电动机和永磁同步电动机取代。

开关磁阻电动机定子与转子皆有普通硅钢片叠压而成的双凸极结构，具有结构简单、成本低、可靠、起动性能好（无过大的冲击电流）、同时具备交流感应电动机变频调速和直流电动机调速的优点。

但是开关磁阻电机磁极端部有比较严重的磁饱和以及磁极和沟槽的边缘效应，转矩波动大且经常引起噪声问题。

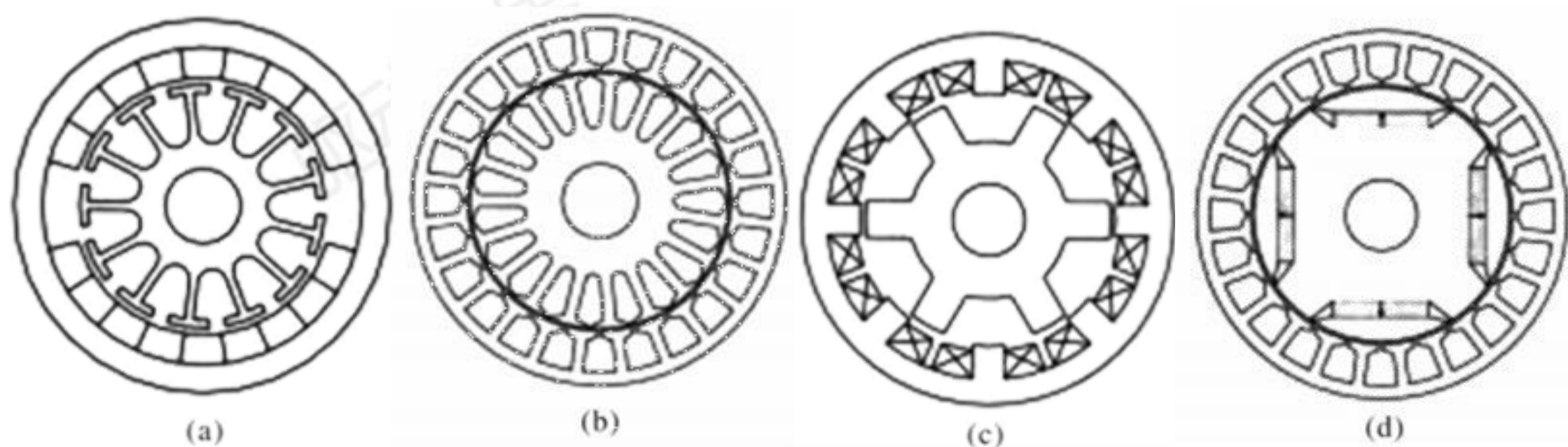


图6 电动汽车驱动电机主要结构

交流感应电机主要有三种转子结构：实心转子、绕线转子和鼠笼（一般为铜或铝）转子。实心转子感应电机主要应用于起重设备等场合，机械特性并不适用于电动汽车驱动系统。绕线转子感应电机成本相对较高、维护量大、缺乏坚固性，所以也不适用于电动汽车。

鼠笼转子感应电机（主要指铜笼）凭借其成本低、坚固可靠、效率相对较高等优点成为电动汽车驱动电机的一种选择。比如，Tesla 前置驱动电机就是采用的铜心鼠笼感应电机，其转子结构如图 7 所示。



图 7 铜心鼠笼转子

永磁同步电机采用永磁体励磁，具有高功率密度、起动转矩大、电流小、调速性能好和效率高等优点。对于降低家用汽车重量（轻量化），提高车辆续航里程来讲，永磁同步电机高起动转矩和效率具有很大的优势，如今已成为电动汽车驱动电机的主流选择。然而，永磁同步电机成本较高，高温下永磁体存在退磁风险。目前，常用电动汽车驱动电机性能如表 2 所示。

表 2 电动汽车驱动电机性能

比较项	直流电机	交流感应电机	永磁同步电机	开关磁阻电机
功率密度	低	中	高	较高
功率因数%	/	82-85	90-93	60-65
峰值效率%	85-89	90-95	95-97	80-90
负荷效率%	80-87	90-92	85-97	78-86
过载能力%	200	300-500	300	300-500
转速范围 10 ³ RPM	4-6	12-15	4-15	> 15
恒功率区	/	1:5	1:2.25	1:3
过载系数	2	3-5	3	3-5
可靠性	中	较高	高	较高
结构坚固性	低	高	较高	高
体积	大	中	小	小
重量	重	中	轻	轻
调速控制性能	很好	中	好	好
电机成本	低	中	高	中
控制器成本	低	高	高	中

2.2 电动汽车驱动电机结构

2.2.1 永磁同步电机

永磁同步电机具有高功率密度、效率高优点，有助于降低电动汽车整车质量，提高续航里程、增加汽车内部空间等，是目前电动汽车驱动电机的研究热点。典型的永磁同步电机结构包括表贴式、插入式、径向内嵌式和切向内嵌式四种，如图 8 所示。

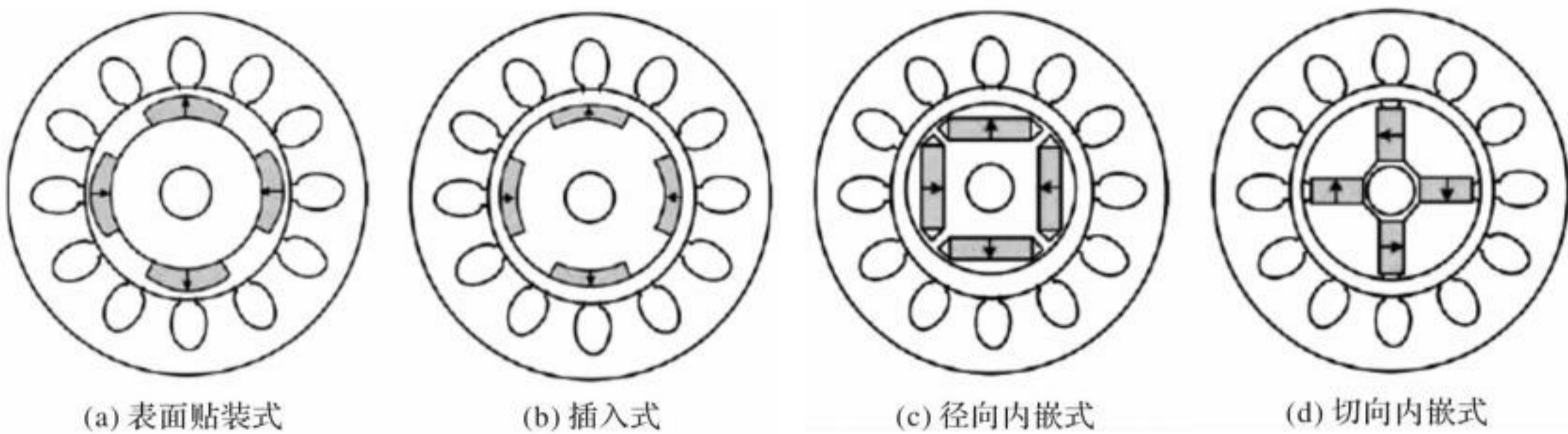


图 8 典型转子永磁型电机结构

但电动汽车特殊的运行环境和条件，要求驱动电机即能在低速运行时有较大转矩输出，高速运行时较大的输出功率，表贴式、插入式和切向内嵌式永磁电机转子难以满足电机高速运行时结构强度要求，所以电动汽车永磁同步驱动电机多采用径向内嵌式永磁同步电机。比如宝马i3（图9）、丰田 PURiS等电动汽车永磁同步驱动电机均采用采用的是径向内嵌式永磁同步电机。

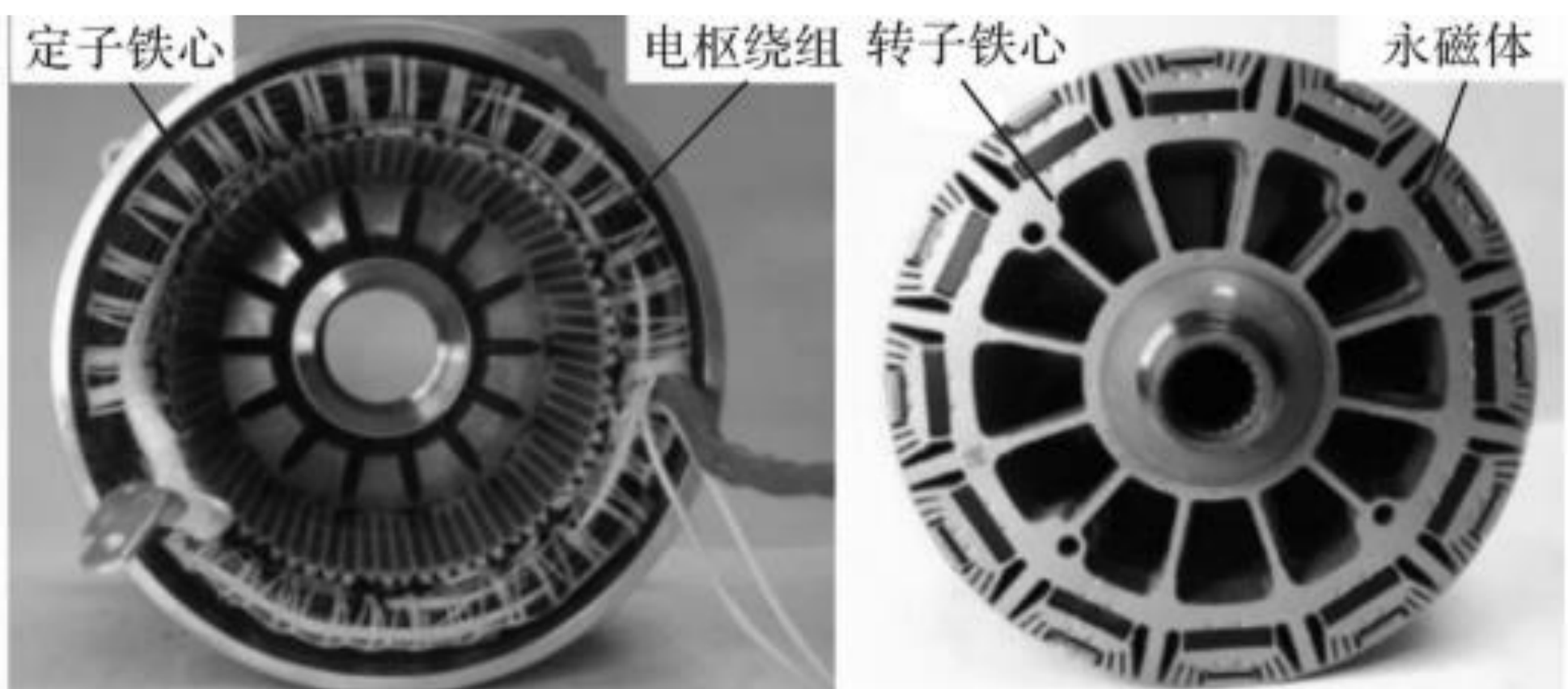


图 8 宝马 i3驱动电机结构

研究内置式永磁电机四种不同转子永磁体布置结构对定子铁心损耗的影响，发现通过增加转子永磁体层数可以降低转子磁动势谐波以减少定子铁心损耗。通过增加第一层永磁体深度和不同层永磁体之间的距离可以增加承载电枢反应磁通的硅钢材料面积，从而降低永磁体涡流损耗。

通过设置不同形状的磁极以及多种形状磁极的组合，比如 $\Delta + U$ 型永磁体转子（图10），可以降低谐波含量，减小铁耗，提高电机效率。

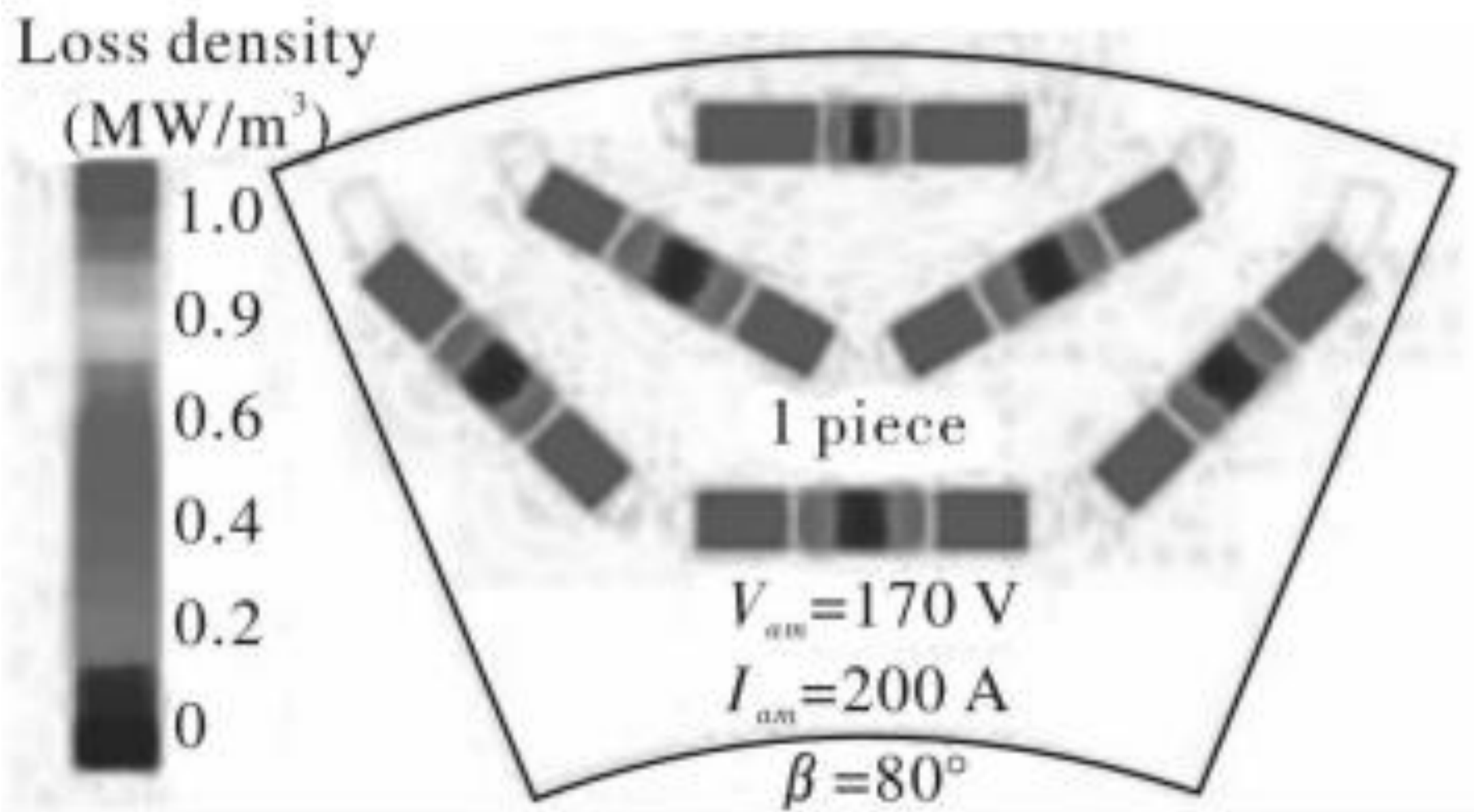


图 10 转子永磁体损耗密度

一种新颖的转子永磁型同步电机（图11a），其转子上永磁体具有相同的充磁方向，如图11所示。该电机的运行原理类似于磁通切换电机，但是相比于传统的磁通切换电机，该电机具有较小的齿槽转矩、较高的弱磁能力等优点。用于电动汽车轮毂电机的外转子电机（图11b），进一步拓宽了该类电机在电动汽车驱动系统的应用。

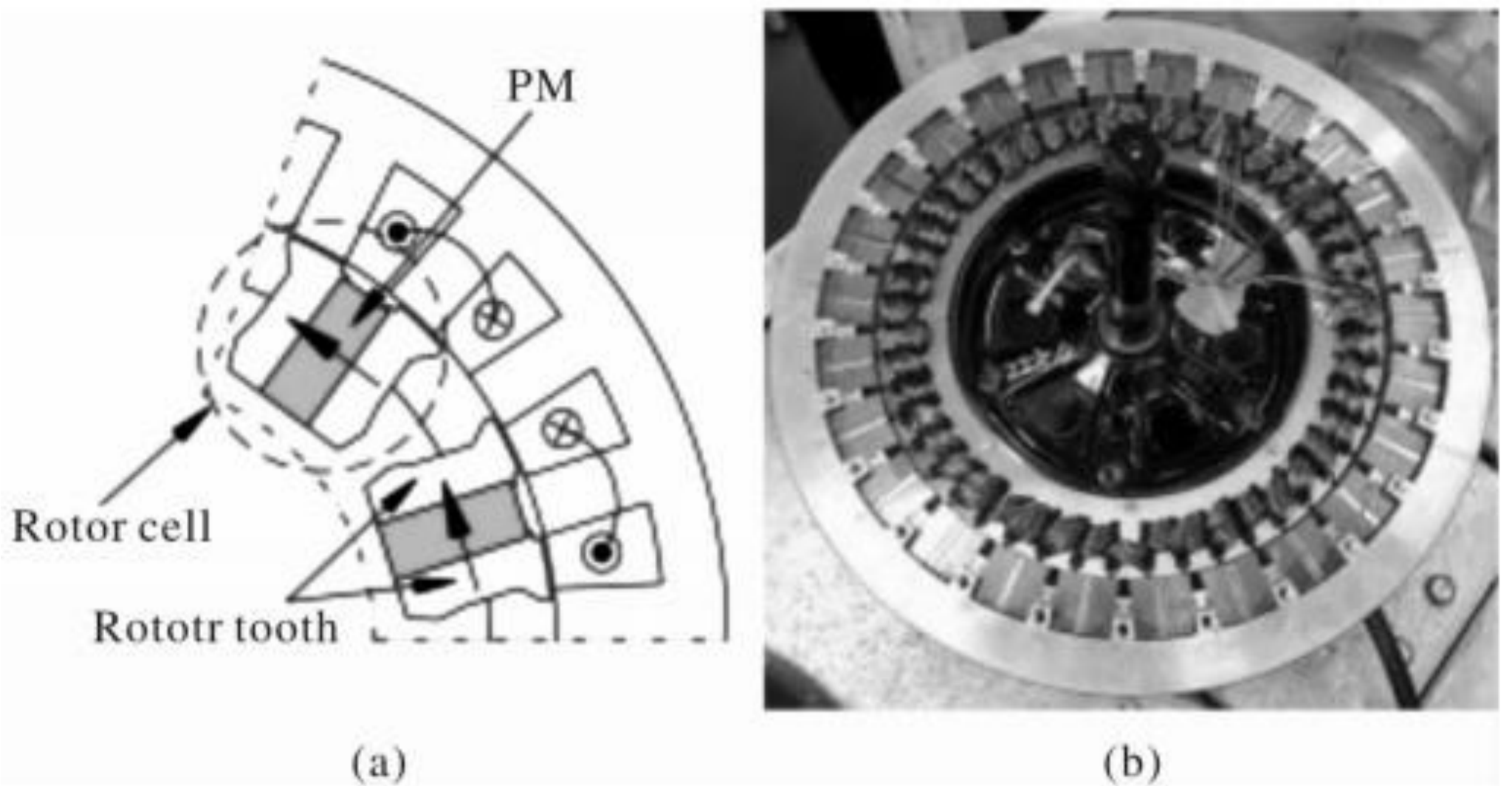


图11 转子永磁型磁通切换电机

2.2.2 新型永磁电机

传统永磁电机电枢磁场与永磁磁场相互耦合较大，永磁体退磁风险较高；永磁体位于转子侧，高速运行需要考虑转子导磁桥的机械强度；分布式绕组端部较长，增加铜耗且使电机轴向长度大，电机体积较大，一定程度上限制了永磁同步电机在电动汽车领域的应用。

而定子永磁型同步电机因为其转子结构简单，机械强度高，适合高速运行；空载感应电动势正弦度高，电枢磁场与永磁磁场并联，电枢反应较小；采用集中绕组，端部长度小，有助于减小电机体积等优点，得到广泛的关注。

定子永磁型同步电机包括双凸极永磁电机（DSPM）、磁通反向永磁电机（FRPM）和磁通切换永磁电机（FSPM），如图12所示。

不同于传统永磁电机永磁体置于转子侧，转子散热能力差，易导致永磁体退磁，定子永磁型同步电机永磁体和电枢绕组均置于定子侧，易于对永磁体和绕组进行直接冷却，所以适合于电动汽车。除了上述三种基本结构的定子永磁型同步电机之外，定子电励磁以及定子混合励磁同步电机也得到关注，并对其应用于电动汽车进行了探索。

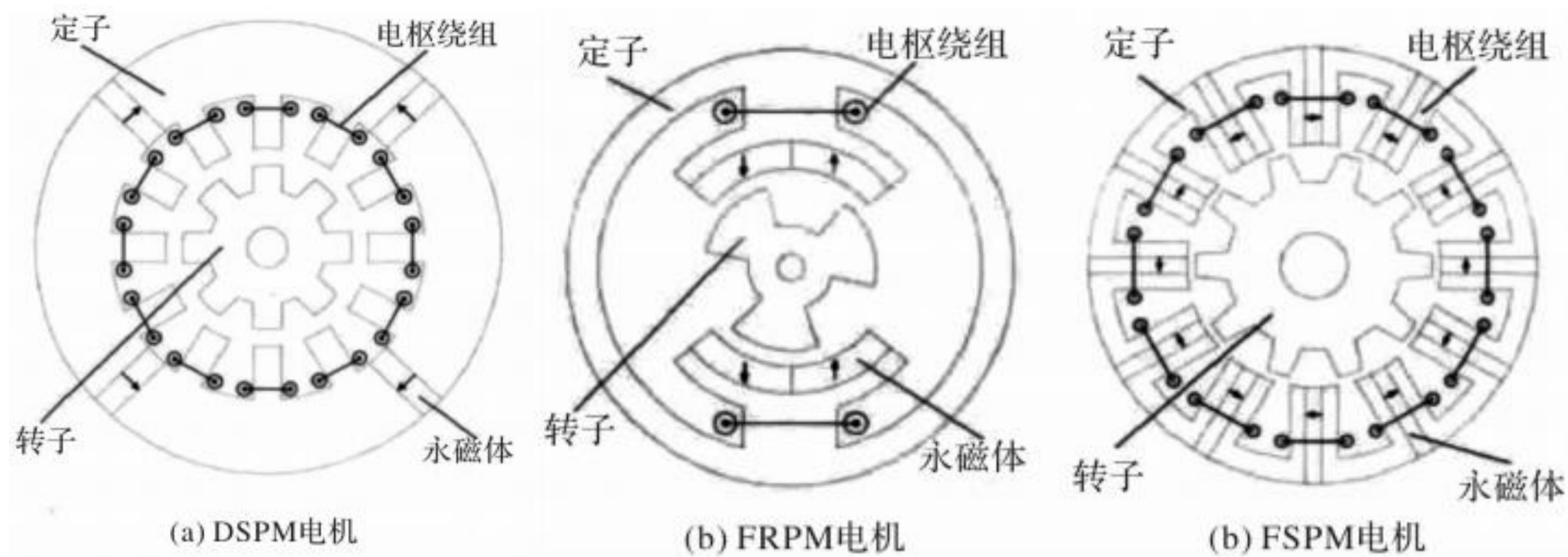


图 12 定子永磁型电机结构

2.3 驱动电机关键技术

新能源汽车采用电动机取代传统的内燃机作为动力输出部件。随着新能源汽车对驱动电机宽调速范围、高功率密度、高效率等性能要求的提高，稀土永磁体励磁的永磁同步电机技术逐渐取代传统直流电机、感应电机驱动技术作为新能源汽车的主流驱动电机解决方案。但是，随着驱动电机功率密度和效率的不断提高，传统结构和传统工艺制造的永磁同步电机也逐渐难以满足当前市场的竞争需求，各大传统主机厂和新兴造车势力迫切需要寻找新的技术解决方案。

2.3.1 扁铜线技术

发卡式（也称为扁铜线）定子绕组如下图所示。采用发卡式定子绕组可以提高电机定子的槽满率，从而提高电机的功率密度。此外，发卡式定子绕组的端部尺寸较短，因而拥有更低的铜损以及更好的散热性能。

从2018年开始，国内的华域、汇川、松正等电动汽车零部件供应商也陆续发力，推出了自己的扁铜线电机产品。

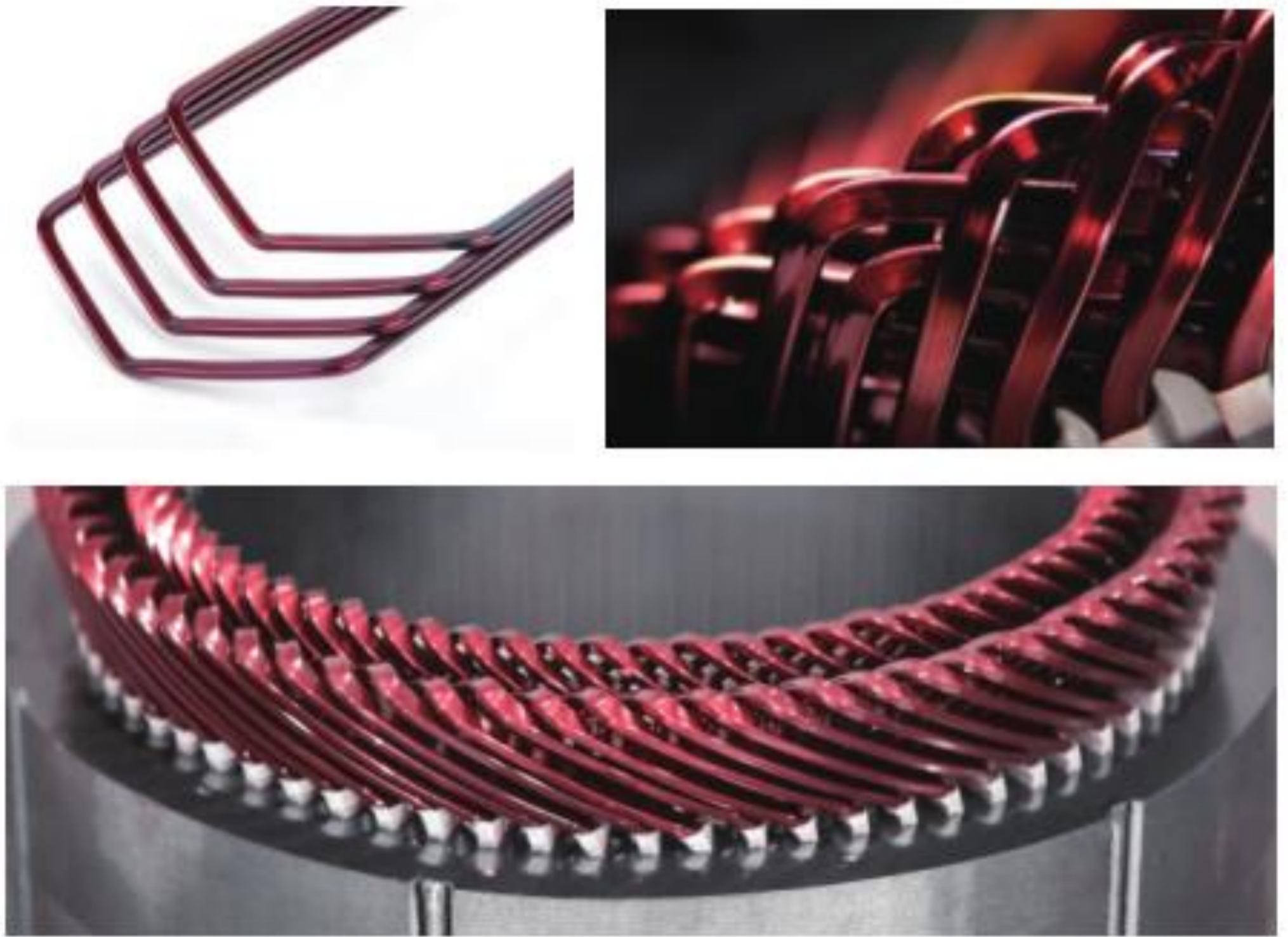


图 1 发卡式（扁铜线）定子绕组

然而，相对于传统圆铜线绕组而言，扁铜线绕组的高频趋肤效应显著。对于大功率驱动电机，发卡式定子绕组带来的环流损耗也更加突出。发卡式绕组的生产工艺复杂，扁铜线弯折后绝缘层容易损坏产生缺口或破面。降低发卡式定子绕组的趋肤效应和涡流损耗是当前研究的热点。提高发卡式定子绕组的材料加工技术和制造精度将有利于该项技术的推广。

2.3.2 多相永磁电机技术

多相电机在输出相同功率时的母线电压低于传统的三相电机，且具有更小的转矩脉动和更强的容错能力，因此适用于对噪声、振动、声振粗糙度（NVH）要求高的新能源汽车电驱系统。

以双三相永磁同步电机为例，电机的两套绕组在空间上相距 30° 电角度，消除了5次与7次谐波磁势，大大减少了电机的转矩脉动。

同时，双三相永磁同步电机两套绕组采用隔离中线设计，相比4相与5相电机，降低了系统的阶次，便于分析与控制，在电机与控制器发生故障时，控制算法不需要大的更改即可实现电机系统的容错运行控制，因此双三相永磁同步电机也成为了新能源汽车电机驱动系统研究的热点。

2.3.3 永磁同步磁阻电机技术

永磁同步磁阻电机是“永磁同步电机+磁阻电机”的融合，与传统永磁同步电机相比，其永磁体磁链较小、磁阻转矩较大，是一种少稀土/无稀土永磁电机方案。同时，其不但拥有很高的扭矩电流比、很高的功率密度、较低的磁饱和问题，还具有更宽广的高效率调速范围。因此，该技术路线已经被应用于宝马公司的i3和i8系列车型（见下图2）。

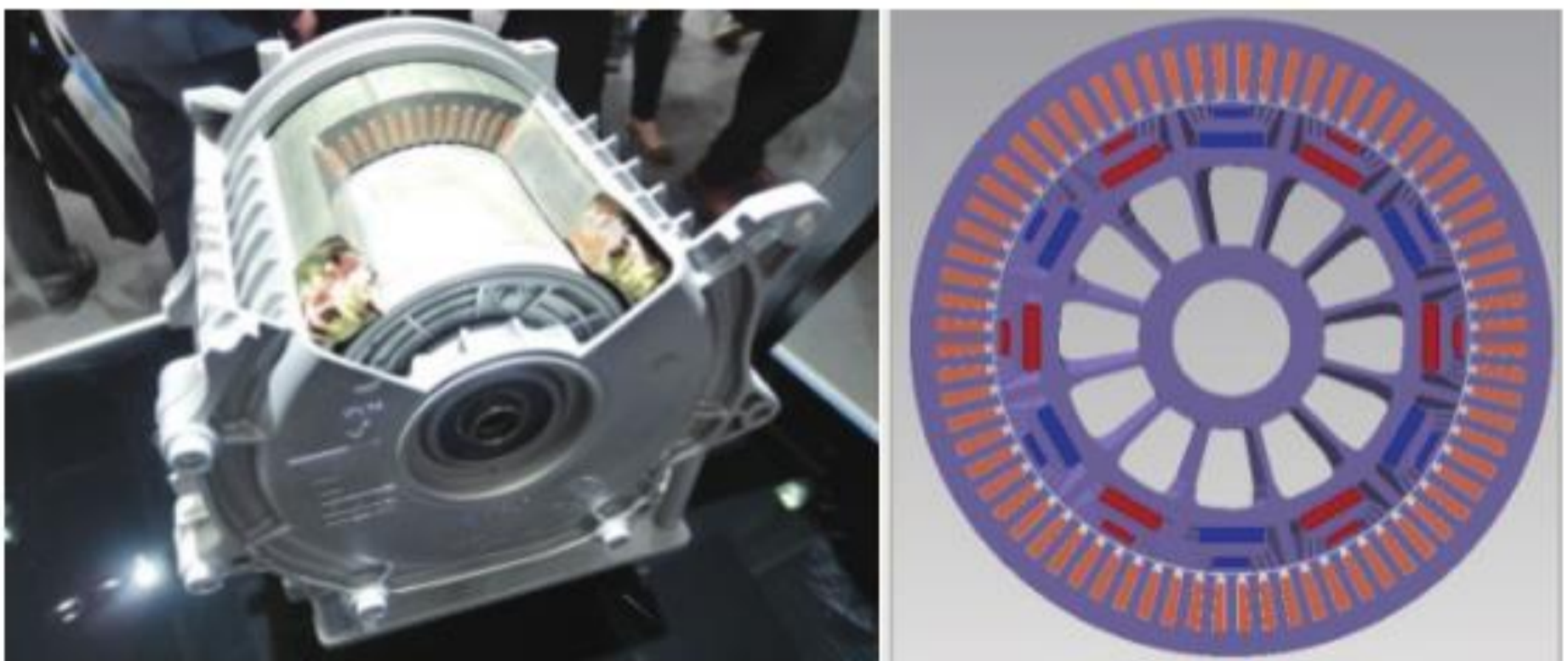


图 2 宝马 i3 车用永磁同步磁阻电机

永磁同步磁阻电机是当前行业普遍看好的技术路线。但是其也面临着转子结构设计复杂、制造工艺复杂、制造设备成本高、最优电流角度变化大等问题，是当前研究的重点和难点。因此，该技术的发展对于一些严重依赖廉价稀土永磁体、研发能力和制造加工能力差的企业将是不小的冲击。

2.3.4 轮毂电机技术

轮毂电机的形式多样，但国内外的研究多集中在外转子轮毂电机。轮毂电机的应用能够给新能源汽车带来一系列明显优势：省掉了变速器、传动轴、差速器等机械传动部分，可以实现四轮分布式驱动，且留下更多的底盘空间给电池包。但是，驱动电机的轮毂化目前还面临着一系列新的挑战，比如：大大增加了簧下质量和车轮的转动惯量、较难处理电机的防水和防尘问题、散热问题和较复杂的驱动控制算法等。

Protean、Elaphe 等国外企业推出了一系列产品样机（见图3），并和国内亚太机电股份有限公司、万安科技股份有限公司等企业进行了国产化合作。而国内以湖北泰特机电有限公司为首的企业也紧随其后推出了一系列针对大型商用车辆和特种车辆的轮毂电机方案。



图 3 Elaphe 设计制造的 110kW 液冷轮毂电机

2.3.5 永磁体散热技术

永磁体性能的稳定对于车用驱动电机的输出性能具有至关重要的作用。而工作温度的升高往往会永磁体产生退磁，从而降低驱动电机的转矩输出能力。过高的永磁体工作温度还会导致驱动电机的

高效率运行区域缩小、功率因数减小。针对该问题，国内外学者在永磁电机的永磁体温度监测技术方面做了较多理论研究。

但是在新能源汽车驱动电机中，使用性能稳定的低成本温度传感器来提供必需的温度监测功能依然是当前唯一的可靠选择。

目前针对电机散热方式的研究，往往都是基于定子和端部绕组的分析，若能从电机转子的角度来研究电机的散热结构和散热方式，对于提高新能源汽车的动力稳定性有重要意义。

此外，研制应用于高功率密度电机的耐高温永磁体则能从根本上解决永磁体高负荷、高温工况下的磁性能退化问题。

3 电动汽车控制技术

电动汽车运行环境复杂，所以对其驱动系统要求较高，比如启动和爬坡时要求低速高转矩，巡航要求高速低转矩，车辆超车时具有瞬时超负载能力。传统的线性控制，如PID，不能满足高性能电机驱动的苛刻要求。

近几年，出现了许多先进的控制策略，适用于电动汽车驱动电机的控制策略的发展，包括自适应控制、变结构控制、模糊控制和神经网络控制等。

自适应控制包括自调节控制和模型参考自适应控制，相比于传统的PID等控制方式，具有无需调制器、动态响应快、非线性控制等优点。根据被控对象的数学模型来预测未来系统状态的变化，并对每个预测状态进行评估，选出能使代价函数取最小值的控制动作作为控制器的下一个输出。

变结构控制通过系统提供不敏感的参数特性，规定动态误差并简化所执行的操作。通过一系列的开关控制原理，系统在预先设定的

轨道相平面内运行，而不管系统参数的变化，具有鲁棒性好、可靠性高等特点。

模糊控制和神经网络等新技术也被引入驱动电机控制领域。模糊控制实质上是一种语言过程，它基于人类行为所使用的先前经验和试探法则。利用神经网络控制策略，控制器有可能解释系统的动态行为，然后自学并相应地进行自我调整。

此外，先进的控制策略还能结合其他控制策略形成新的控制模式，比如自适应模糊控制、模糊神经网络控制、模糊变结构控制等。

电机驱动控制器作为新能源汽车中连接电池与电机的电能转换单元，是电机驱动及控制系统的核心。其中高性能功率半导体器件、智能门极驱动技术以及器件级集成设计方法的应用，将有助于实现高功率密度、低损耗、高效率电机控制器设计；同时，高性能、高可靠电机控制器产品，还要求具有高标准电磁兼容性（EMC）、功能安全和可靠性设计。

3.1 功率半导体器件技术

电机控制器的发展以功率半导体器件为主线，正从硅基绝缘栅双极型晶体管（IGBT）、传统单面冷却封装技术，向宽禁带半导体（如SiC、GaN等）、定制化模块封装、双面冷却集成等方向发展。

同时，得益于成熟的技术迭代，以及相比于宽禁带半导体器件更低的成本，硅基IGBT仍然是当前与未来较长时间内电机控制器产品的主要选择。在硅基IGBT芯片技术上，英飞凌科技公司针对新能源汽车市场高功率密度需求，已研发出EDT2芯片技术，实现了750V/270A IGBT芯片量产，富士集团等日本厂商也都相继研发出了高功率密度IGBT芯片技术，并已批量应用于汽车IGBT模块产品。

此外，与硅基器件（如IGBT、MOSFET等）相比，SiC器件属于第三代半导体材料功率器件，具有高导热率、耐高温、禁带宽度大、击穿场强高、饱和电子漂移速率大等优势，结温耐受可以达到225℃甚至更高，远高于当前硅基IGBT 175℃的最高应用结温。

SiC器件开关速度更快，可应用于更高的开关频率，更适用于高速电机的控制。同时，相比硅基IGBT，SiC器件的开关损耗和导通损耗均大幅降低，有助于降低整车耗电量，提升整车续航里程。

但是当前SiC器件成本仍高于硅基IGBT，这成为阻碍SiC器件推广的重要因素。同时，铜线键合、芯片倒装、银烧结、瞬态液相焊接等新型封装技术可以提高IGBT功率模块的载流密度与寿命，因此也成为当前的研究热点。

目前，电装、德尔福、英飞凌、株洲中车时代等已研制出基于双面冷却的IGBT模块与电机控制器产品，部分已随整车产品获得批量应用。

基于硅基IGBT的电机控制器设计在未来相当长一段时间内仍将为市场的主流选择，硅基IGBT器件芯片与功率模块封装技术将在不断的优化迭代中获得提升。

3.2 智能门极驱动技术

门极驱动技术是电机控制器中高压功率半导体器件和低压控制电路的纽带，是驱动功率半导体器件的关键。IGBT门极驱动除具有基本的隔离、驱动和保护功能外，还需结合IGBT自身特性，精确地控制开通和关断过程，使IGBT在损耗和电磁干扰（EMI）之间取得最佳的折衷。

智能门极驱动的两大主要特点分别为：主动门极控制和监控诊断功能。主动门极控制是根据工作运行环境和工况，对IGBT开关过程进行主动精细化最优控制的一种方法。

主动门极控制技术是当前 IGBT应用领域的研究热点，其基本思路是把IGBT开通过程和关断过程分别划分为几个不同的阶段，针对某一问题只需对相应的阶段进行独立的门极调控，对其他参数产生很小的（甚至不产生）负面影响。

综上所述，智能门极驱动的应用，将有助于充分发挥功率半导体器件性能，如降低损耗、提升电压利用率等，并实现功率半导体器件的健康状态在线评估，满足电机控制器高安全性、高可靠性设计的目标。

3.3 功率组件的集成设计

国际上典型的电机控制器产品为适应新能源汽车高功率密度、长寿命与高可靠性的要求，大多数的功率半导体模块封装均为定向设计，功率半导体器件与其他电子部件之间的界限日趋融合，基于器件的集成设计已成为新能源汽车电机控制器发展的新趋势。

器件级集成设计技术主要分为物理集成与需求集成设计。物理集成设计是通过电机各个器件之间物理结构的集成设计方法，实现寄生参数、散热、机械强度等的平衡优化，实现机、电、热、磁等的最优设计，最终达到电机控制器高功率密度、高可靠性的设计目标。

需求集成设计技术是指将整车和电驱动系统需求向前延伸至 IGBT芯片设计、功率模块封装领域，根据整车设计与性能需求，建立以整车需求为导向，由系统向核心零部件自上而下的优化设计方法。其所带来的优势将是整车续航里程的增加或电池容量需求的降低。

3.4 其他关键技术

除上文所述三大关键技术以外，还有下述几个关键技术需要在未来的新能源汽车产业引起重视。

(1) EMC与可靠性设计也是实现新能源汽车电机控制器产业化的关键技术。

EMC 与可靠性设计是评价电力电子产品的关键指标。进行更有效的EMC 设计是业内一直在追寻的目标。其中，基于有限元分析的方法建立“元件-部件-控制器”的EMC高频仿真模型，研究失效机理，并结合试验验证，最终实现电磁兼容的正向设计，将逐渐成为主流的技术路线。

(2) 汽车功能安全设计可以消除或显著降低由电子与电气系统的功能异常而引起的各类整车安全风险。

当前电机控制器功能安全需求多为 ASIL C等级，但在未来，电机控制器功能安全需求或将提升为 ASIL D 级，这需要复杂度更高、冗余性更强、可靠性指标更高的电机控制器产品设计。

(3) 电机控制器产品的可靠性设计。

电机控制器作为新能源汽车的核心驱动单元，其可靠性指标直接影响着整车的驾乘体验与市场口碑。德国和美国汽车电子厂商联合提出了鲁棒性验证（RV）方法，该方法已经被英飞凌科技公司、博世集团广泛应用于半导体分立器件的可靠性设计分析，对于诸如电机控制器等的复杂系统，其适用性与有效性还在进一步探索中。

4 电动汽车驱动系统现存问题与策略

虽然电动汽车驱动技术近年来得到高速的发展，到目前为止，其驱动技术依然存在着许多亟待解决的问题。

4.1 永磁体退磁

永磁同步电机永磁体的热退磁问题一直是永磁电机研发过程中的热点和难点。特别是电动汽车用永磁同步电机，因为其驱动系统结构紧凑，速度快，电机发热较高，极易引起转子永磁体退磁。

对“一”字型“V”字型、双层永磁体三种不同布置方案的永磁体退磁现象就行了比较，结果表明双层永磁体布置结构的永磁同步电机具有较高的抗退磁能力；对永磁同步电机驱动系统提出一种优化控制策略，该方法通过识别最佳的弱磁电流来调整铜损和铁损，使永磁同步电机在整个工作范围内降低损耗。

对于永磁电机退磁问题的主要策略有：①考虑永磁体退磁对永磁同步电机转子结构做进一步优化；②采用抗退磁能力更强的永磁同步电机转子永磁体布置结构，提高永磁同步电机抗退磁能力；③研发更高性能的新型永磁体材料，提高永磁体抗热退磁能力。

4.2 驱动电机温升问题

由于电动汽车驱动电机运行工况复杂多变，驱动电机极易出现冷却和散热不足导致电机温升过高，从而影响整车性能。

电动汽车驱动电机采用水冷结构，水冷系统的水路结构对电机散热有较大影响，对比“Z”字型和周向螺旋形水路的散热能力，结果表明“Z”字型水路有更强的散热能力。采用在空气冷却结构壳体表面开设冷却槽的方法，使轮毂电机散热面积变大，冷却效果有所提升。

针对电动汽车温升的主要解决方案有：①设计更加合理的电机结构，降低电机热损耗，从而降低电机发热；②设计更加合理的水道结构，增加电机散热能力，降低电机温度；③采用更加合理的冷却模式，比如水冷与风冷相结合的方案等。

5 结语和发展趋势

经过近年来的研究与技术发展，电动汽车驱动技术基本满足现今电动汽车驱动的基本技术指标。但是，电动汽车作为一种新兴事物，其驱动系统仍有许多问题和关键技术有待更加深入的研究：

1) 高功率密度、高效率永磁同步电机技术：电动汽车用高功率密度、高效率永磁同步电机有助于降低整车质量，提高续航里程，对于电动汽车驱动系统来讲具有重要意义。如何生产更高功率密度、高效率的永磁同步电机，这不仅仅是电机拓扑结构设计的问题，更涉及到电机磁性材料、加工工艺等先进技术，例如开发更低损耗硅钢、高性能磁钢等磁材料以及成型绕组、磁钢定位封装等先进加工技术。

2) 集成化、智能化和数字化：集成化可以有效的降低驱动系统体积，这对电动汽车有限空间来讲非常重要。其次，随着人工智能等技术的发展，智能化、数字化电动汽车驱动系统将会得到进一步的发展，比如无人驾驶，智能控制等。

3) 基于传统硅基IGBT的电机控制器在未来相当长一段时间内仍将是市场主力，但是随着SiC器件生产成本的降低，高可靠性的 800V 高压SiC驱动系统将是未来乘用车驱动控制器发展的方向。

我国需警惕对“稀土永磁红利”的依赖，提前布局前沿的电机设计技术、材料技术、先进制造加工技术和高精度加工设备，以应对未来西方发达国家利用其先进的少稀土/无稀土永磁电机技术路线来建立针对稀土永磁电机的技术壁垒。

在新能源汽车领域，未来还需要具体关注的领域有：超级铜线技术，串并联绕组切换电机技术，高耐压绝缘材料技术，局部去磁化技术。此外，我国在高速轴承技术、无刷电励磁同步电机技术、电机电控深度集成等多个方面和西方发达国家仍然有着较大的差距，需要我国在未来产业布局和科研项目中进行重点攻关。

驱动视界

驱动视界