

国内外轮毂电机应用概况和发展趋势

褚文强, 辜承林

(华中科技大学, 武汉 430074)

摘要: 首先介绍了轮毂电机相对于燃油汽车和单电机集中驱动系统的优势, 然后介绍了轮毂电机的不同驱动方式和国内外应用概况, 比较了各种电动机的基本性能, 最后提出了轮毂电机的技术发展趋势。

关键词: 轮毂电机; 应用; 发展趋势; 无刷直流电动机; 开关磁阻电动机

Applications and Developing Trend of In-wheel Motors Home and Abroad

CHU Wen-qiang, GU Cheng-lin

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

ABSTRACT: The advantages of in-wheel motor compared with the driving system of traditional motors are described. Then two different driving methods and their application status home and abroad are introduced. The qualitative analysis of several kinds of typical driving motor is made next. Their performance are compared and their advantages/disadvantages are also point out. Finally the developing trend of wheeled motor technology is presented.

KEY WORDS: In-wheel motor; Application; Developing trend; BLDCM; SRM

0 引言

轮毂电机又称为车轮内装式电机。早在 20 世纪 50 年代初, 美国人罗伯特就发明了一种将电动机、传动系统和制动系统融为一体的轮毂装置。该轮毂于 1968 年被通用电气公司应用在大型的矿用自卸车上。近年来, 随着电动汽车的兴起, 轮毂电机重新引起了人们的重视。轮毂电机驱动系统的布置非常灵活, 它可以使电动汽车成为 2 个前轮驱动、2 个后轮驱动或 4 轮驱动。与内燃机汽车和单电机集中驱动电动汽车相比, 轮毂电机具有以下几方面优势: (1) 动力控制由硬连接改为软连接型式, 通过电子线控技术, 实现各电动轮从零到最大速度的无级变速和各电动轮间的差速要求, 省略了传统汽车所需的机械式操纵换挡装置、离合器、变速器、传动轴和机械差速器等, 使得驱动系统和整车结构简洁、有效利用空间大、传动效率提高。(2) 各电动轮的驱动力直接独立可控, 使其动力学控制更为灵活、方便, 能合理地控制

各电动轮的驱动力, 从而提高恶劣路面条件下的行驶性能。(3) 容易实现各电动轮的电气制动、机电复合制动和制动能量回馈, 节约能源。(4) 底架结构大为简化。(5) 在采用轮毂电机驱动系统的 4 轮电动汽车上, 若进一步导入线控四轮转向技术 (4WS), 实现车辆转向行驶高性能化, 并有效减小转向半径, 甚至实现零转向半径, 大大增加转向灵便性。从目前发展趋势以及各种驱动技术的特点来看, 轮毂电机将是电动汽车的最终驱动形式, 也是现阶段电动汽车研究的热点和难点之一。

1 驱动方式

轮毂电机的驱动方式可以分为减速驱动和直接驱动两大类^[1]。

1.1 减速驱动

在这种驱动方式下(图 1), 电机一般在高速下运行, 而且对电机的其他性能没有特殊的要求, 因此可以选用普通的内转子电机。减速机构放置在电机和车轮之间, 起到减速和增加转矩的作用。

减速驱动的优点是电机运行在高转速下, 具

有较高的比功率和效率,体积小、重量轻,通过齿轮增力后,扭矩大、爬坡性能好。另外,能保证汽车在低速运行时获得较大的平稳转矩。不足是难以实现液态润滑、齿轮磨损较快、使用寿命变短、不易散热、噪声偏大,适用于丘陵或山区、要求过载能力较大、旅游健身等场合^[2]。

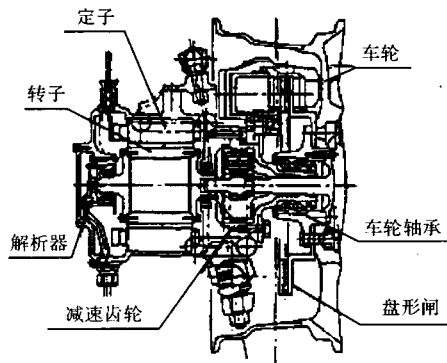


图1 减速驱动示意图

1.2 直接驱动

在这种驱动方式下(图2),电机多采用外转子,即将转子安装在轮辋上。为了使汽车能顺利起步,要求电机在低速时能提供大转矩。此外,为了使汽车有较好的动力性,电机需具有较宽的调速范围。

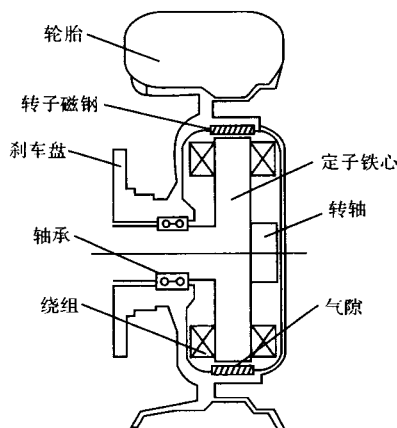


图2 直接驱动示意图

直接驱动的优点是没有减速机构,不但使得整个驱动轮结构更加简单、紧凑,轴向尺寸也减小,而且效率进一步提高,响应速度也变快。缺点是起步、顶风或爬坡等承载大转矩时需大电流,易损坏电池和永磁体;电机效率峰值区域很小,负载电流超过一定值后效率急剧下降,适用于平路、负载较轻、代步等场合^[2]。

2 应用概况

2.1 电动汽车

电动汽车最早于1834年问世,但因一次充电续航里程不能满足要求而于20世纪30年代退出历史舞台。20世纪70年代,由于环境恶化和能源危机的出现,人们重新展开了对电动汽车的研究开发。

作为比较先进的驱动技术,国外有很多研究所和公司都对轮毂电机进行了专项研究,并已经开始将其应用到实际产品中。

位于美国加州的通用汽车高级技术研发中心成功地将自行研制的轮毂电机应用到雪佛兰s-10皮卡中。该电机给车轮增加的重量只有约15 kg,却可产生约25 kW的功率,产生的扭矩比普通的雪佛兰s-10四缸皮卡车高出60%,加速性能也有所提高。

日本对轮毂电机研究起步早,技术在世界上处于领先^[3]。日本庆应义塾大学清水浩教授领导的电动汽车研究小组在过去10年中,研制的IZA、ECO、KAZ等电动汽车均采用轮毂电机驱动技术。其中后轮驱动电动汽车ECO采用的永磁无刷直流电机,额定功率6.8 kW,峰值功率可达20 kW。日本的各大公司在2003年东京汽车展上纷纷推出自己的轮毂驱动产品,如:普利司通公司的动力阻尼型车轮内装式电机系统、丰田公司的燃料电池概念车FINE-N等等。

法国的TM4公司设计的一体化电动轮,采用外转子永磁无刷直流电动机,额定功率为18.5 kW,额定转矩为950 r/min,额定工况下的平均效率可达96.3%,峰值功率可达80 kW,峰值扭矩为670 N·m,最高转速为1385 r/min。

我国的轮毂电机技术虽然起步较晚,但近几年随着国家“863”计划电动汽车重大课题研究的深入,各高校对该技术的研究也有所加强。同济大学汽车学院在2002年和2003年独立研制的“春晖一号”和“春晖二号”就采用4个低速永磁无刷直流轮毂电机直接驱动系统。中国科学院北京三环通用电气公司开发出了电动汽车专用的7.5 kW轮毂电机。哈工大-爱英斯电动汽车研究所开发的EV96-I型电动汽车采用了多态轮毂电机的轮毂驱动系统(图3)。该轮毂电机采用双边混合式磁路结

构,兼有同步电动机和异步电动机的双重特性。驱动轮额定功率 6.8 kW,最大功率 15 kW,最大扭矩 25 N·m。

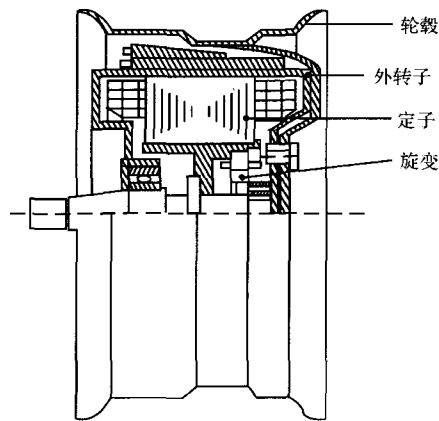


图3 哈工大多态轮毂电机示意图

2.2 电动自行车

目前,国内外电动自行车的生产厂家众多,品牌繁杂,但是绝大部分电动自行车都采用轮毂电机驱动方式。因为采用这种方式,厂家不用对车型作较大的改变即可装配,且没有传动机构,结构十分简单^[4]。

日本电动自行车业十分发达,2003年日本国内电动自行车销量为21.1万辆。日本很多大公司都推出了各自的品种:雅马哈公司的“YAMAHA PASS”、松下的“VIVI”、丰田的“LACDIS”、三洋的“ENAKURU”等等。

在我国,电动自行车发展迅速,近5年的销售量成长率均超过30%,2002年销售规模突破100万台,2003年销售量已突破400万台的规模,目前,电动自行车年销量早已突破1500万台。电动自行车的生产厂家已多达几百家。年产量超万辆的就有近50家,如:北京新日、金华绿源、苏州小羚羊、上海千鹤等等。就国内电动自行车行业现状看,电动自行车均采用轮毂驱动方式,驱动电机均采用永磁电机,常见有有刷高速、有刷低速、无刷高速和无刷低速4种。电机功率多为135 W~350 W,电压36 V、48 V,时速为(18~40) km/min,整车效率可达75~85%。

2.3 其他领域

轮毂电机还广泛应用于其他领域,如电动摩托车、电动轮椅车、电动滑板车、高尔夫球车、大型矿用自卸车,等等。

3 驱动电机比较

电动机与驱动系统是电力交通的关键部件。要使电动汽车有较好的使用性能,驱动电机应具有较宽的调速范围及较高的转速,足够大的起动扭矩,体积小、重量轻、效率高,且有强动态制动和能量回馈等特性^[5]。目前,电动汽车用电动机主要有异步电动机(IM)、永磁无刷电动机(PMBLM)和开关磁阻电动机(SRM)及横向磁场电机(TFPM)4类^[5]。

3.1 异步电动机

异步电机在4类电机中发展历史最为长久。电机的设计、制造以及控制都相对成熟,具有结构简单、制造容易、成本低、可靠性高、控制技术成熟等优点,受到欧美国家的青睐。但是异步电机缺点是效率不高,特别是在低速时,功率密度较小。异步电机是一个强耦合、多变量、非线性的系统,需采用矢量控制和直接转矩等控制手段,控制成本较高。

3.2 永磁无刷电动机

永磁无刷电动机可以分为由方波驱动和由正弦波驱动两种。与其他电机相比,永磁无刷电机具有功率密度高、效率高、体积小、结构简单、输出转矩大、可控性好、可靠性高、噪声低等一系列优点,在电动车领域颇受青睐。日本绝大多数电动汽车采用永磁无刷电机驱动系统。当然,永磁无刷电动机也存在一些缺点。首先是受到永磁材料的限制,目前最大功率也只有几十千瓦。其次,永磁转子的励磁无法调节,导致电机调速困难,调速范围不宽。

3.3 开关磁阻电动机

开关磁阻电机(SRM)是近20年才发展起来的一种新型调速电机,具有简单可靠、可在较宽转速和转矩范围内高效运行、四象限运行、响应速度快和成本较低等优点。但是其缺点也很多:转矩存在较大波动、振动大、噪音大;系统非线性,建模困难,控制成本高,功率密度低,等等。

3.4 横向磁场电机

横向磁场电机(TFPM)最早是由德国著名电机专家H. Weh教授于上世纪80年代末提出,并将之使用到电力舰船和电动汽车上。与其他电机相

比, 横向磁场电机的优点十分突出: 电路和磁路解耦, 设计自由度大大提高; 高转矩密度, 大约是标准工业用异步电机的 5-10 倍, 且特别适用于要求低速、大转矩等场合; 绕组型式简单, 不存在传统电机的端部, 绕组利用率高; 各相间相互独立; 效率高; 控制电路与永磁无刷电动机相同, 可控性好。目前, 国外已成功开发了很多电动汽车用横向磁场电机, 国内也正在积极开展相关研究。当然横向磁场电机也存在不少缺点: 永磁体数目多, 用量大, 结构复杂, 工艺要求高, 成本高, 漏磁严重, 功率因素低, 自定位转矩较大, 等等。

综合比较以上各类电机的各项指标, 永磁无刷电机将是电动汽车的最佳选择, 而横向磁场电机则因其能量密度高、适合低速大转矩场合等特点, 将成为直驱式电动汽车的首选部件。各类电机的性能比较见表 1。

表 1 各种电动机基本性能比较

项目	异步电机	永磁无刷电机	开关磁阻电机	横向磁场电机
功率密度	中	高	中	最高
转矩/转速特性	好	好	好	好
效率/%	79-85	90-92	78-86	91-93
功率因数/%	82-85	90-93	60-65	35-55
调速范围	1: 5	1: 2.25	1: 3	1: 2.25
可靠性	好	一般	优秀	一般
电机重量	重	轻	一般	轻
电机成本/ \$/kW	8-12	10-15	6-10	12-17
可控性	好	好	好	好
控制成本	3.5	2.5	4.5	2.5
综合性能	差	最好	中	好

4 发展趋势

虽然轮毂电机早在 50 年代就已发明, 而且相比其它驱动方式有很大的优势, 然而人们真正研究轮毂电机技术的时间还是很短, 加上轮毂电机的设计与车辆的车轮结构设计紧密相关, 所以还有很多问题需要解决。下面以电动汽车用外转子式永磁无刷直流轮毂电机为例, 探讨轮毂电机研究的难点和热点。

4.1 无位置传感器控制技术

目前常用的无位置传感器位置信号检测方法有以下几种^[6]:

(1) 反电动势法。该方法是迄今为止最成熟、

最有效、最常见的方法。其基本原理是将检测到的断开相反电动势过零信号延时 30° 电角度来得到功率管的开关信号。由于电机静止或转速较低时, 反电动势信号没有或较弱, 因此反电动势法一般与“三段式”起动技术配套使用^[7]。

(2) 续流二极管法。该方法通过检测反并联于逆变桥功率开关管上的续流二极管的导通状态来确定转子的位置。

(3) 电感法^[8]。该方法通过检测绕组电感随转子位置的改变而发生的变化, 再通过一定的计算, 可得到转子位置信号。

(4) 状态观测器法。该方法是将电机的三相电压、电流作坐标变换, 在派克方程的基础上估算出电机的转子位置。由于坐标变换只考虑基波分量, 该方法主要用于正弦波反电动势的 PMBLDCM。

4.2 转矩脉动抑制

永磁无刷直流电动机在理想情况下运行时应满足: 三相绕组完全对称, 气隙磁场为方波, 定子电流为方波, 反电动势为梯形波, 且在每半个周期内, 方波电流持续时间为 120° 电角度, 梯形波反电动势平顶部分也为 120° 电角度, 两者严格同步, 此时电机将产生恒定的电磁转矩^[9]。但在实际运行中, 电机总存在转矩脉动, 产生转矩脉动的原因和抑制方法有以下几种:

(1) 电磁因素产生的转矩脉动。该类型的转矩脉动是由定子电流和转子磁场的相互作用而产生。抑制的方法有: 电机优化设计法、最佳开通角法、谐波消去法和转矩闭环控制法。

(2) 电流换向引起的转矩脉动。该类型的转矩脉动是由于电机绕组电感阻碍了电流的瞬时变化, 因而在电枢电流从某一相切换到另一相时就会引起转矩脉动。抑制方法有: 电流反馈法、重叠换向法和 PWM 斩波法。

(3) 齿槽引起的转矩脉动。该类型的转矩是由永磁体磁场和定子铁心的齿槽作用在圆周方向产生的转矩, 又可称为定位转矩或磁阻转矩。抑制齿槽转矩的方法有: 磁性槽楔法和闭口槽法、辅助槽法、辅助齿法和分数槽法、斜槽法和斜极法。

4.3 弱磁扩速

由于永磁体的励磁恒定不变, 电机在基速以下采用 PWM 调制实现调压调速, 此时电机的反电动势与转速、气隙磁通成正比。基速及基速以上运

行时端电压已调至最大,随着转速的升高,电机反电势增大,电枢电流减小。当反电势等于端电压时,电枢电流为零,无法产生电磁转矩,电机将停转。为了在基速以上端电压不变的条件下保持一定的电枢电流,以产生电磁转矩,要实行弱磁控制,而对方波无刷直流电机而言,传统的弱磁控制不能直接使用,需要新的控制策略。文献[7]提出可通过提前开通功率器件,使得绕组的变压器反电势抵消一部分旋转反电势,从而满足电压平衡关系,实现等效的弱磁控制。目前恒功率弱磁调速范围为基速的2.8倍左右。

4.4 电机本体设计

(1) 定子绕组设计。具体又可分为以下两个方面:(a)多相绕组。从理论上说:绕组相数越多,越接近直流电机换向,电机的绕组利用率也越高,但此时控制线路、策略也越复杂,成本越高,所以目前一般都以三相、四相为主^[10]。(b)分数槽绕组。采用分数槽绕组能显著地缩短电枢绕组的端部长度,节省铜材,减小电枢漏抗,增加电机出力,提高灵敏度和效率,也有利于电子换向,同时也减少了冲片的齿槽数,方便制造^[11]。

(2) 定子裂比、齿槽数的优化。当以最大转矩密度为优化目标时,最佳裂比的变化规律如下:气隙磁密越大,最佳裂比应越小,对于相同的气隙磁密时,槽数、极数越多,最佳裂比也越大;铁心磁密越大,最佳裂比也越大^[12]。对齿槽数的研究最主要还是为了减小转矩脉动,这里不再重复。

(3) 磁钢尺寸的优化。磁钢的设计将影响电机的各项性能。此外,磁钢对永磁电机的成本影响也很大。为了能在达到额定性能指标的前提下,降低成本,提高电机的利用率,科学合理地设计磁钢尺寸是尤其重要的。

4.5 永磁材料研究和保护

首先,由于永磁材料工艺的影响和限制,使得永磁无刷直流电机的功率较小,最大功率仅几十千瓦^[5]。目前,国产化的钕铁硼最大剩磁为1.42 T,最大内禀矫顽力为2 388 kA/m,最大磁能积为400 kJ/m³,最高工作温度为200 ℃。其次,当永磁材料在高温、振动以及电流过载时,都可能出现退磁现象,使得电机的性能降低,因此必须对电机的电流和温度加以严格的控制。文献

[13]提出了3种电路实施保护:(1)电流限幅和反限电路。因为电流超过限幅值越大,则允许的工作时间就越短,这样就有效防止过流导致的温度过高。(2)堵转电流限幅。在堵转甚至低速时,反电势相当低,端电压就完全加在绕组电阻上,此时电流很大,温升相当大,要及时控制。(3)温度传感器检测电路。

5 结 语

在能源和环境问题不断凸显,电动交通工具的研发已成为各国重点研究项目。轮毂电机驱动系统是一种全新的驱动型式,但因其所具有的明显优势,已成为电动交通工具发展的一个重要方向。目前,轮毂电机已在电动自行车的应用上取得巨大成功。可以预见,随着研发的不断深入,电动机性能的不断提高,以及电池技术、动力控制系统和整车能源管理系统等相关技术的突破,轮毂电机也将在电动汽车上取得更大的成功。

参考文献

- [1] 宋佑川, 金国栋. 电动轮的类型与特点[J]. 城市公共交通, 2004, (4): 16-18.
- [2] 杨邦鼎, 杨雷. 减速驱动方式在电动车中的应用[J]. 电器工业, 2002, (6): 7-8.
- [3] 顾云青, 张立军. 电动汽车电动轮驱动系统开发现状与趋势[J]. 汽车研究与开发, 2004, (12): 27-30.
- [4] 陈家新. 两轮电动车用电机及驱动方式[J]. 电机电器技术, 2002, (1): 16-19.
- [5] 闫大伟, 陈世元. 电动汽车驱动电机性能比较[J]. 汽车电器, 2004, (2): 4-6.
- [6] 董富红, 沈艳霞, 纪志成. 永磁无刷直流电机无位置传感器估计方法综述[J]. 微电机, 2003, 36(5): 39-46.
- [7] 沈建新, 陈永校. 无位置传感器方波无刷直流电机弱磁控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 1999, (6): 633-638.
- [8] 吕志勇, 江建中. 永磁无刷直流电机无位置传感器控制综述[J]. 中小型电机, 2000, (4): 33-36.
- [9] 纪志成, 姜建国, 沈艳霞, 等. 永磁无刷直流电动机转矩脉动及其抑制方法[J]. 微电机, 2003, 36(5): 39-43.
- [10] 曹荣昌. 无刷直流电动机的绕组联接和相数选择[J]. 电机技术, 2001, (1): 17-20.
- [11] 叶金虎. 无刷直流电动机的分数槽电枢绕组和霍尔元件的空间配置[J]. 微特电机, 2001, (4): 8-14.
- [12] 沈建新, 陈永校. 永磁无刷直流电动机定子裂比的分析与优化[J]. 电机与控制学报, 1998, (2): 80-83.
- [13] 刘方铭, 姚震, 李优新, 等. 混合动力电动汽车直流无刷机的高温保护措施[J]. 电机技术, 2004, (8): 56-57.

作者简介: 褚文强(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为轮毂式永磁无刷直流电机。

辜承林(1954-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型特种电机及其驱动控制系统。