

# 基于系统效率最优的双转子轮毂电机电动汽车 驱动模式能量管理策略

李军民<sup>1,2</sup>, 何仁<sup>1</sup>

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 江苏镇江 212003; 2. 安阳工学院机械工程学院, 河南安阳 455000)

**摘要:** 为了克服传统轮毂电机在电动汽车实际应用中存在的缺点, 提出了一种双转子轮毂电机结构, 可实现内、外电机单独驱动和双电机耦合驱动多种模式。如何选择最适合当前行驶工况的驱动模式和动态分配内外电机的功率是解决整车能耗问题的关键。在分析电机驱动特性的基础上, 基于系统效率最优设计了双转子轮毂电机电动汽车驱动模式的切换规则, 并确定了3种驱动模式的具体工作范围; 在耦合驱动模式下, 根据内、外电机的效率特性, 提出了基于系统能耗最小的转矩分配策略。仿真结果表明: 车辆在爬坡度分别为5%、10%和15%的坡道上行驶时, 与未采用优化策略相比, 采用本文的转矩分配策略时系统功率消耗分别降低了4.1%、2.7%和1.6%。在NEDC循环工况中, 双转子轮毂电机的3种驱动模式能够随着车速和需求转矩的变化自由切换; 内、外电机的大部分工作点均分布在较高的效率范围内, 说明两个电机在承担最佳需求转矩的同时, 均能以最优效率工作, 减小整车能量消耗。双转子轮毂电机动态特性实验结果表明: 内、外电机具有较快的响应速度和较强的定速巡航能力, 验证了电机结构方案的合理性。

**关键词:** 车辆工程; 双转子轮毂电机; 驱动模式; 转矩分配; 效率最优

**中图分类号:** U469.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2024)11-3103-11

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230427

## Energy management strategy of drive mode for dual-rotor in-wheel motor driven electric vehicle based on optimal system efficiency

LI Jun-min<sup>1,2</sup>, HE Ren<sup>1</sup>

(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212003, China; 2. School of Mechanical Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang 455000, China)

**Abstract:** To overcome the shortcomings of traditional in-wheel motor applied in electric vehicles, an integrated dual-rotor in-wheel motor (DRIWM) was proposed, which can realize single inner motor drive, single outer motor drive and dual-motor coupling drive. How to choose the most suitable drive mode for current driving condition and dynamically distribute the power of inner and outer motors is the key to

**收稿日期:** 2023-04-30.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51875258).

**作者简介:** 李军民(1979-), 男, 讲师, 博士. 研究方向: 车用驱动电机优化设计与控制. E-mail: 20160262@ayit.edu.cn

**通信作者:** 何仁(1962-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 汽车机电一体化技术. E-mail: heren@ujs.edu.cn

solve the vehicle energy consumption problem. On the basis of the driving characteristics analysis of the motor, the drive mode switching rules of the DRIWM driven electric vehicle were formulated based on the optimal system efficiency, and the specific working range of each drive mode was determined. In the coupling drive mode, a torque distribution strategy based on the minimal energy consumption of the system was proposed by the efficiency characteristics of inner and outer motors. The simulation results show that, when the vehicle is running on the gradients of 5%, 10% and 15% respectively, the system power consumption is reduced by 4.1%, 2.7% and 1.6% using the proposed torque distribution strategy compared with no optimization strategy. In the NEDC cycle, the three drive modes of the DRIWM can freely switch with the changes of vehicle speed and demand torque. Most of the working points of inner and outer motors are distributed in the higher efficiency range, which indicate that the two motors can work with the best efficiency while bearing the best demand torque to reduce the vehicle energy consumption. The experimental results of dynamic characteristics of the DRIWM show that the inner and outer motors have fast speed response and the ability of cruise control, which verifies the rationality of the motor structure scheme.

**Key words:** vehicle engineering; dual-rotor in-wheel motor; drive mode; torque distribution; optimal efficiency

## 0 引言

近年来,随着一系列国家新能源汽车政策的颁布实施,我国电动汽车行业迎来了快速的发展。轮毂电机电动汽车具有传动结构简单效率高、各电机转矩独立可控、更易于回收制动能量等优点,是下一代电动汽车发展方向的典型代表,其关键技术已成为国内外汽车企业和高校学者们的研究热点<sup>[1,2]</sup>。对于纯电动汽车,驱动系统的能量消耗占整车总能耗的75%以上<sup>[3]</sup>,传动部件的效率基本不变,但驱动电机的效率随其工作点的改变而变化显著,如永磁同步电机的效率在定额转速中等转矩范围内偏高,在低速大转矩和高速小转矩范围内偏低。因此,充分利用电机的效率特性,对其工作点进行合理分配,是提高电池能量利用率,有效延长车辆续航里程的关键。依据轮毂电机的驱动形式,通常分为两类:外转子直接驱动型和内转子减速驱动型。但这两类轮毂电机在实际应用中都还存在着一定的缺点,适用场合受到限制,且驱动模式单一,当车辆行驶工况发生变化时,都不能保持较高的工作效率,电池能量利用率亟需提升。

双转子电机是一种电气式机电能量耦合装置,由2个转子和一个定子组成,具有2个电端口和2个机械端口,其电能和机械能可以在4个端口间自由流动,实现功率分流,被国内外学者认为

是一种潜在的能应用于混合动力电动汽车取代行星齿轮动力耦合机构的装置,可省去起动机、发电机、变速器等部件,简化了传动结构,能实现无级变速、变矩等功能。按其结构形式来分,学者们主要提出了以下3种类型:2001年,荷兰代尔夫特理工大学 Hoesjmakers 等<sup>[4]</sup>基于两台感应电机串联调速原理,最早提出了感应式双转子电机;为了提高电机转矩和功率密度,瑞典皇家理工学院 Eriksson<sup>[5]</sup>、美国俄亥俄州立大学 Xu 等<sup>[6]</sup>、中科院电工所庄兴明等<sup>[7]</sup>在外转子的不同位置布置永磁体,提出了转子永磁类双转子电机,如四象限能量转换器和双机械端口电机等;江苏陈云云等<sup>[8-10]</sup>把永磁体和绕组均布置在定子上,提出了双凸极和磁通切换两种形式的定子永磁类双转子电机。

目前,国内外学者围绕双转子轮毂电机开展的研究还很少,江苏大学何仁等<sup>[11-13]</sup>申请并授权了多项发明专利,专利[11]扩展了电机制动能量回收方法,但其驱动模式仅有外转子驱动;专利[12]可实现驱/制动、在车发电和制动能量回收多种工作模式,但其驱动模式仅有内转子驱动,外转子的作用是回收制动能量;专利[14]和专利[15]未见有具体工作模式论述。以上文献仅给出了不同的结构方案,并未深入进行电机本体设计和控制策略研究。

鉴于以上问题,本文提出一种一体化的双转子轮毂电机结构,将其内电机和外电机分别用作

减速驱动型和直接驱动型轮毂电机,能实现内、外电机单独驱动和耦合驱动多种工作模式,满足车辆多变工况行驶需求;在双转子轮毂电机电动汽车行驶期间,如何选择最适合当前行驶状况的驱动模式和动态分配内外电机的功率是解决整车能量消耗问题的关键所在。本文从驱动系统的能耗和效率出发,在分析3种驱动模式下驱动特性的基础上,基于系统效率最优设计双转子轮毂电机电动汽车驱动模式的切换规则;在耦合驱动模式下,根据内、外电机的效率特性,提出基于系统能耗最小的转矩分配策略。

## 1 双转子轮毂电机的结构和驱动模式

### 1.1 结构组成

图1为提出的双转子轮毂电机一体化结构,主要包括双转子电机本体、电磁离合器(I、II)和行星齿轮机构等。双转子电机由内转子、中间定子和外转子组成,内(外)转子、内(外)永磁体和内(外)层绕组构成内(外)电机。通过控制电磁离合器I的接合/断开,可实现外转子和行星架间的动力传递,通过控制电磁离合器II的接合/断开,可实现内转子和太阳轮间的动力传递,内、外电机的动力均通过行星架输出,再经输出轴传递到车轮,齿圈固定连接在电机壳体内壁。

可以看出,在结构形式上,双转子电机可看成

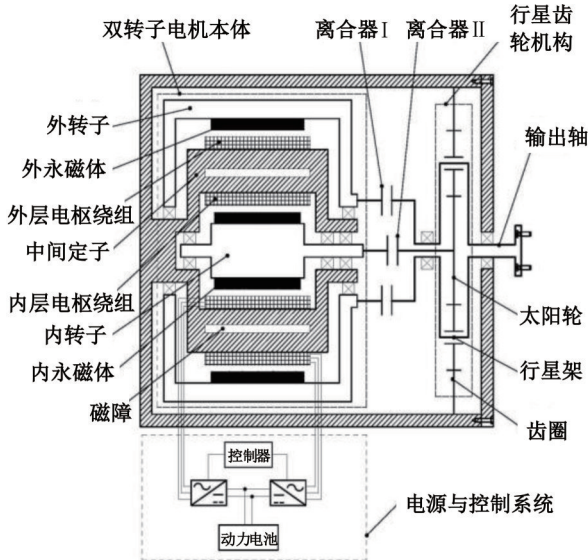


图1 双转子轮毂电机集成结构

Fig. 1 Integrated structure of the DRIWM

是内、外转子电机在径向的级联组合,其性能也是两个电机的叠加。

### 1.2 驱动模式及其特性

由于能对内电机和外电机进行独立控制,当电磁离合器I、II处于不同的接合/断开状态时,双转子轮毂电机能够实现内、外电机单独驱动和双电机耦合驱动3种工作模式,表1列出了各驱动模式下主要部件的工作状态。

表1 双转子轮毂电机的驱动模式  
Table 1 Drive modes of the DRIWM

工作模式	内电机	外电机	电磁离合器 I	电磁离合器 II
内电机单独驱动	●	○	○	●
外电机单独驱动	○	●	●	○
双电机耦合驱动	●	●	●	●

注:“●”表示电机工作,离合器接合;“○”表示电机未工作,离合器断开。

#### 1.2.1 内电机单独驱动

启动内电机,断开电磁离合器I和接合电磁离合器II,内电机的动力依次通过太阳轮、行星架和输出轴传递到车轮,如图2所示。由于行星齿轮机构的减速增扭作用,内电机可看成是内转子减速驱动型轮毂电机,此模式适用于汽车启动、低速行驶等较小转矩需求工况。其驱动特性可表示为:

$$n_{opi} = \frac{1}{1+p} n_i, \quad T_{opi} = -(1+p)T_i \quad (1)$$

式中: $n_{opi}$ 为内电机工作时输出轴的转速; $n_i$ 为内电机转速; $p$ 为行星齿轮机构特征参数; $T_{opi}$ 为内电机传递至车轮处的转矩; $T_i$ 为内电机电磁转矩。

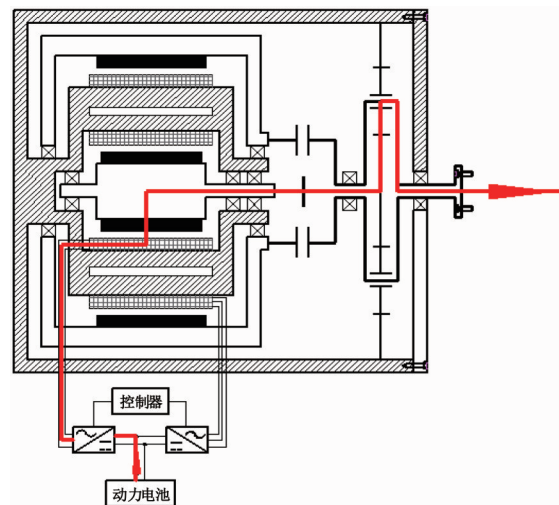


图2 内电机单独驱动时的动力传递

Fig. 2 Power flow in single inner motor drive mode

1.2.2 外电机单独驱动

启动外电机,断开电磁离合器 II 和接合电磁离合器 I,外电机的动力直接通过行星架、输出轴传递到车轮处,如图 3 所示。此时,行星齿轮机构的传动比为 1,外电机可看成外转子直接驱动型轮毂电机,此模式适用于高速轻载工况。其驱动特性可表示为:

$$n_{opo} = n_o, \quad T_{opo} = -T_o \quad (2)$$

式中: $n_{opo}$ 为外电机工作时输出轴的转速; $n_o$ 为外电机转速; $T_{opo}$ 为外电机传递至车轮处的转矩; $T_o$ 为外电机电磁转矩。

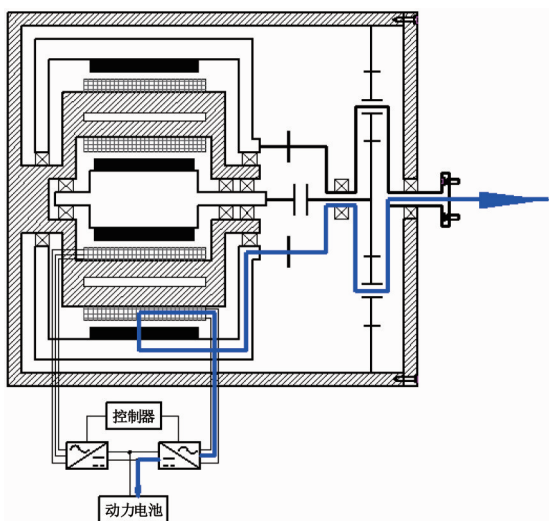


图 3 外电机单独驱动时的动力传递

Fig. 3 Power flow in single outer motor drive mode

1.2.3 双电机耦合驱动

启动内、外电机,电磁离合器 I、II 均处于接合状态,内、外电机转矩在行星架处进行耦合,再通过输出轴传递到车轮,如图 4 所示,此模式适用

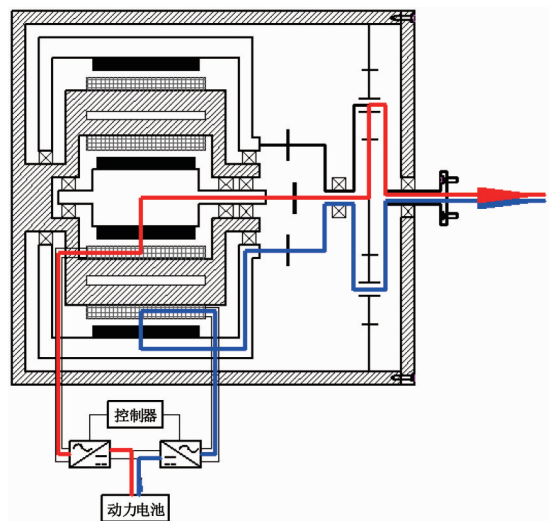


图 4 双电机耦合驱动时的动力传递

Fig. 4 Power flow in dual-motor coupling drive mode

于车辆低速加速或爬坡时大转矩需求工况。其驱动特性可表示为:

$$n_{op} = n_o = \frac{1}{1+p} n_i, \quad T_{op} = -T_o - (1+p)T_i \quad (3)$$

2 基于系统效率最优的双转子轮毂电机电动汽车驱动能量管理策略

2.1 驱动模式能耗分析

2.1.1 内电机单独驱动

在该模式下,行星齿轮机构的传动效率和内电机的效率特性共同影响着驱动系统的效率,系统的能耗即内电机的输入功率,有:

$$\begin{cases} T_{req} = i_p T_i \\ n_i = \frac{v i_p}{0.377 r} \\ \eta_i = f_i(n_i, T_i) \\ P_i = \frac{T_i n_i}{9550 \eta_i \eta_p} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_i$ 为内电机瞬时消耗功率; $T_{req}$ 为电动汽车需求转矩; $\eta_i$ 为内电机效率; $i_p$ 和 $\eta_p$ 分别为行星齿轮机构的传动比和传动效率。

2.1.2 外电机单独驱动

在该模式下,驱动系统的效率仅受外电机的效率特性影响,系统的能耗即外电机的输入功率,有:

$$\begin{cases} T_{req} = T_o \\ n_o = \frac{v}{0.377 r} \\ \eta_o = f_o(n_o, T_o) \\ P_o = \frac{T_o n_o}{9550 \eta_o} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_o$ 为外电机瞬时消耗功率。

2.1.3 双电机耦合驱动

在该模式下,行星齿轮机构的传动效率、内电机和外电机的效率特性共同影响驱动系统的效率,系统的能耗为内、外电机的输入功率之和,有:

$$\begin{cases} T_{req} = i_p T_i + T_o \\ n_i = \frac{v i_p}{0.377 r}, n_o = \frac{v}{0.377 r} \\ \eta_i = f_i(n_i, T_i), \eta_o = f_o(n_o, T_o) \\ P_{all} = \frac{1}{9550} \left( \frac{T_i n_i}{\eta_i \eta_p} + \frac{T_o n_o}{\eta_o} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{all}$ 为内电机和外电机瞬时功耗之和。

### 2.2 驱动模式切换规则

当双转子轮毂电机电动汽车行驶于内电机单独驱动和外电机单独驱动模式时,系统的瞬时效率主要取决于内、外电机的效率特性。在双电机耦合驱动模式下,某一特定车速时,将车辆的需求转矩分配给内、外电机有无数多种方案,若基于系统能耗最小原则来计算分配内、外电机承担的最佳转矩,则内、外电机分别处于最佳工作点时的系统效率必为最优。一旦确定各驱动模式下系统的效率特性,即可根据系统效率最优原则对 3 种驱动模式的具体工作范围进行划分,为车辆能够随行驶工况的改变选择最适合当前状态的驱动模式提供依据。

在双电机耦合驱动模式下,定义内电机的最佳转矩分配比  $\alpha^*$  为:

$$\alpha^* = \frac{T_i^*}{T_{req}} \quad (7)$$

式中:  $T_i^*$  为分配给内电机的最佳转矩。

则驱动系统的瞬时最优效率  $\eta_{sys}^*$  可表示为:

$$\eta_{sys}^* = \alpha^* \eta_i^* + (1 - \alpha^*) \eta_o^* \quad (8)$$

式中:  $\eta_i^*$  和  $\eta_o^*$  分别为内、外电机的瞬时最优效率。

将不同车速换算为电机转速,遍历耦合驱动模式下内电机和外电机的所有转速-转矩工作点,根据下文所提系统能耗最小原则求解不同工况时内电机的最佳转矩分配比,再由式(8)便求得双电机耦合驱动模式下系统的最佳效率特性,如图 5 所示。

将内电机单独驱动时的效率特性(见图 6(a))、外电机单独驱动时的效率特性(见图 6(b))和耦合驱动模式下的系统效率特性绘制在同一坐标系内,可得双转子轮毂电机电动汽车在任意车

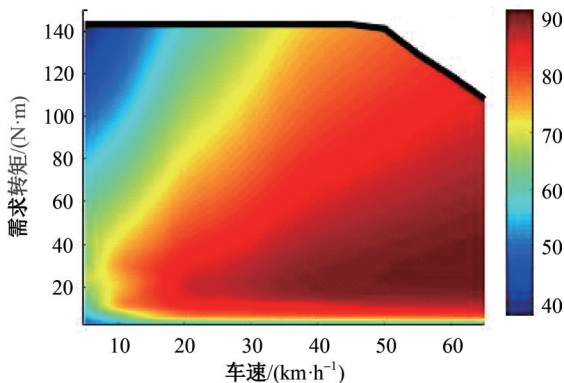


图 5 耦合驱动模式下系统的最佳效率分布  
Fig. 5 Optimal system efficiency in dual-motor coupling drive mode

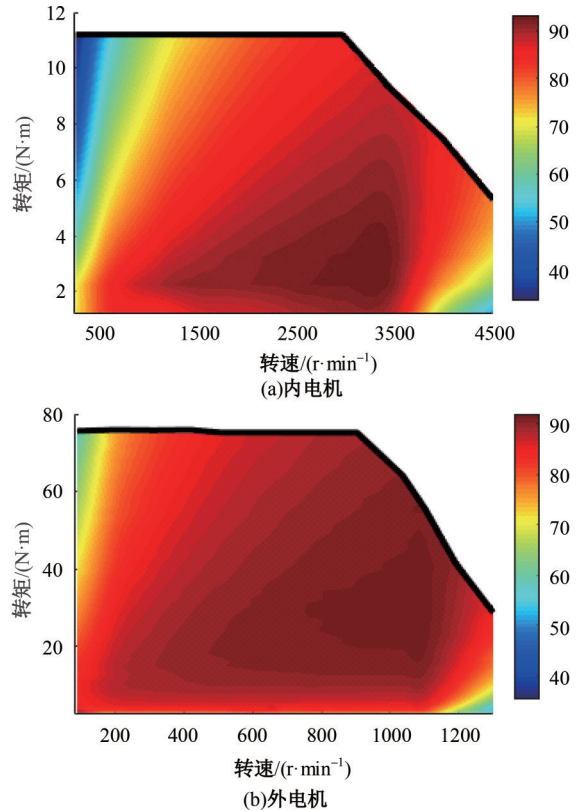


图 6 双转子轮毂电机驱动效率 MAP 图

Fig. 6 MAP diagram of drive efficiency of the DRIWM 速-需求转矩工况点时的最优效率分布情况(见图 7)。可明显看出,3 种驱动模式的效率分布存在重合部分。

将图 7 向需求转矩-车速坐标平面进行投影,可得基于系统效率最优原则双转子轮毂电机电动汽车的 3 种驱动模式在所有车速-需求转矩工况点下的最优分布规律,如图 8 所示。可见,当车速小于 60 km/h 且需求转矩小时,车辆工作于内电机单独驱动模式;当车速小于 60 km/h 且需求转

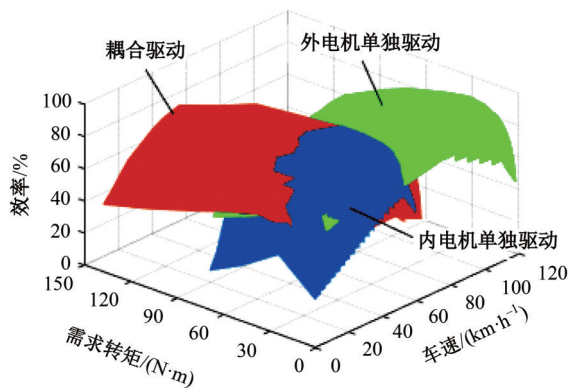


图 7 3 种驱动模式下的系统最优效率  
Fig. 7 Optimal system efficiency under three drive modes

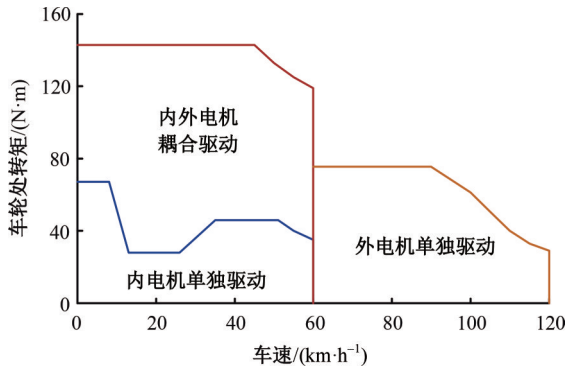


图8 3种驱动模式的工作范围

Fig. 8 Working range of three drive modes

矩较大时,车辆工作于双电机耦合驱动模式;当车速大于60 km/h时,车辆工作于外电机单独驱动模式。表2为双转子轮毂电机电动汽车3种驱动模式工作范围的具体划分情况。

表2 三种驱动模式工作区间的具体划分情况

Table 2 Specific working range division of three drive modes

车速范围 (km·h <sup>-1</sup> )	分配至每个车轮的 需求转矩/(N·m)	内电机 工作	外电机 工作
0 < v ≤ 8	0 < T <sub>req</sub> ≤ 67	●	
	T <sub>req</sub> > 67	●	●
8 < v ≤ 15	0 < T <sub>req</sub> ≤ 5.57v + 110	●	
	T <sub>req</sub> > 5.57v + 110	●	●
15 < v ≤ 26	0 < T <sub>req</sub> ≤ 28	●	
	T <sub>req</sub> > 28	●	●
26 < v ≤ 38	0 < T <sub>req</sub> ≤ 1.5v - 11	●	
	T <sub>req</sub> > 1.5v - 11	●	●
38 < v ≤ 52	0 < T <sub>req</sub> ≤ 46	●	
	T <sub>req</sub> > 46	●	●
52 < v ≤ 60	0 < T <sub>req</sub> ≤ -1.63v + 130.5	●	
	T <sub>req</sub> > -1.63v + 130.5	●	●
60 < v ≤ 120			●

### 2.3 基于能耗最小的转矩分配策略

在耦合驱动模式下,双转子轮毂电机电动汽车的需求转矩将分配至内电机和外电机,由二者共同承担。由于内、外电机的转速成比例,当车速和车辆需求转矩一定时,驱动系统的功率消耗主要由内电机和外电机的输出转矩决定,以最小的内外电机总功率消耗来满足不同车速下车辆的行驶要求作为系统能量消耗最优控制目标,可表示为<sup>[16]</sup>:

$$\mu^* = \arg \min (P_{\text{all}}) = \arg \min (P_i + P_o) \quad (9)$$

式中:μ\*为最优的功率分配指令。

为简化求解,设车轮运动为纯滚动,将内、外

电机的效率特性图中的转速-转矩坐标转化为纵向车速-车轮转矩。

$$\begin{cases} n_{\text{opi}} = \frac{1}{1+p} n_i \approx \frac{v}{r} \\ n_{\text{opo}} = n_o \approx \frac{v}{r} \end{cases} \quad (10)$$

记内电机的转矩分配比为α,有:

$$\begin{cases} T_{\text{op}} = T_{\text{req}} = T_{\text{opi}} + T_{\text{opo}} \\ T_{\text{opi}} = \alpha T_{\text{op}} \\ T_{\text{opo}} = (1 - \alpha) T_{\text{op}} \end{cases} \quad (11)$$

基于内、外电机的效率特性,在耦合驱动模式下,驱动系统的总瞬时消耗功率可进一步表示为:

$$\begin{aligned} P_{\text{all}} &= P_i + P_o = \\ &= \frac{1}{9550} \left( \frac{n_i T_i}{\eta_p \eta_i(n_i, T_i)} + \frac{n_o T_o}{\eta_o(n_o, T_o)} \right) = \\ &= \frac{1}{9550} \left( \frac{v T_{\text{opi}}}{\eta_p \eta_i(v, T_{\text{opi}}) \cdot r} + \frac{v T_{\text{opo}}}{\eta_o(v, T_{\text{opo}}) \cdot r} \right) = \\ &= \frac{v T_{\text{op}}}{9550 r} \left[ \frac{\alpha}{\eta_p \eta_i(v, T_{\text{opi}})} + \frac{1 - \alpha}{\eta_o(v, T_{\text{opo}})} \right] = \\ &= P_{\text{all}}(v, T_{\text{op}}, \alpha) \end{aligned} \quad (12)$$

其中,

$$\begin{cases} 0 \leq v \leq v_{i,\text{max}} \\ T_{\text{op}} > T_{i,\text{max}}(v_i) \end{cases}$$

式中:v<sub>i,max</sub>为内电机驱动时能达到的最高车速;T<sub>i,max</sub>(v<sub>i</sub>)为不同车速下内电机能提供的最大转矩。

由式(12)可见,车辆处于双电机耦合驱动模式时,车速、需求转矩和内电机的转矩分配比决定着驱动系统的功率消耗。因此,可通过在每个车速-需求转矩工况点选择合适的内电机转矩分配比得到该模式下系统的最优效率,即:

$$\alpha^* = \arg \min \{ P_{\text{all}}(v, T_{\text{op}}, \alpha) | 0 \leq \alpha \leq 1 \} \quad (13)$$

求解式(13)优化问题,图9为双转子轮毂电机电动汽车在耦合驱动模式下不同行驶工况点时的内电机最佳转矩分配比。可见,当车辆需求转矩较小时,内电机承担的转矩比例较大,原因是当车速较低时,内电机的高效率工作范围大,在行星齿轮机构的增扭作用下,也可提供较大的输出转矩,而外电机的效率相对偏低。当车辆需求转矩增大时,外电机承担的转矩比例增大,而内电机承担的转矩有所减小,原因是内电机输出大转矩时受其转矩输出能力限制,且效率也有显著下降,此时综合考虑并兼顾了内、外电机的效率均要达到

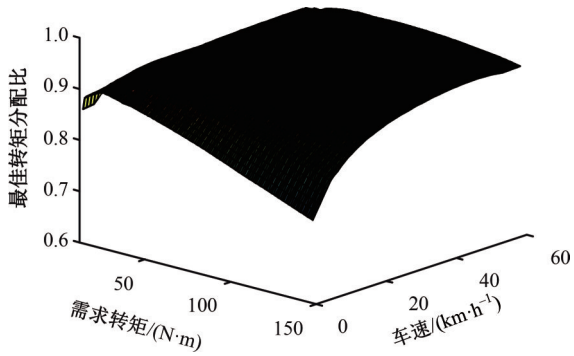


图 9 不同行驶工况点的内电机最佳转矩分配比

Fig. 9 Optimal torque distribution ratio of inner motor at different driving conditions

最优值,以实现系统功率消耗最小的目的。

### 3 仿真分析

#### 3.1 仿真车型的基本参数

本文所设计的双转子轮毂电机的应用对象为小型电动汽车,该车型的基本参数列入表 3 中。

#### 3.2 两种策略下系统功率消耗比较

将本文转矩分配策略与未优化转矩分配策略进行比较以验证其有效性,假设汽车在双电机耦合驱动模式下,以 10 km/h 恒定车速在 3 种不同

表 3 电动汽车的基本参数和性能指标

Table 3 Basic parameters and performance indicators of electric vehicles

项目	参数	数值
基本参数	整车整备质量/kg	1 040
	迎风面积/m <sup>2</sup>	1.913
	空气阻力系数	0.33
	车轮半径/m	0.277
	滚动阻力系数	0.015
性能指标	最高车速/(km·h <sup>-1</sup> )	120
	行星齿轮机构的传动比	6
	0~50 km/h 加速时间/s	8
	50~80 km/h 加速时间/s	10
	爬坡度/%	15

爬坡度(5%、10% 和 15%)的坡道上行行驶,将其系统功率消耗计算结果作为对比依据。

计算结果列于表 4 中,可见,在不考虑因车辆制动回收的部分能量时,与未优化的转矩分配策略相比,双转子轮毂电机电动汽车采用基于系统能耗最小转矩分配策略时在以上 3 种爬坡工况下的系统功率消耗均有所减小,提升了电池的电能利用率。

表 4 两种策略下驱动系统消耗功率对比

Table 4 Power consumption comparison of the drive system under two strategies

爬坡度 /%	总需求转矩 /(N·m)	未优化策略		所提转矩分配策略		能耗降低/%
		内/外电机转矩/(N·m)	功率消耗/kW	内/外电机转矩/(N·m)	功率消耗/kW	
5	56	4.67/28	0.74	2.99/38.08	0.71	4.1
10	98	8.17/49	1.49	6.7/57.82	1.45	2.7
15	138	11/72	2.47	10.8/73.14	2.43	1.6

#### 3.3 NEDC 工况仿真

利用 MATLAB/Simulink 搭建双转子轮毂电机电动汽车多模式驱动仿真模型,在 NEDC 标准循环工况下进行性能仿真。由于本文主要研究车辆的驱动能量管理策略,故不考虑多种驱动模式之间切换时产生的影响,即认为切换过程平顺,且无持续时间。图 10 给出了实际车速跟随测试工况目标车速的变化情况,可见在整个 NEDC 工况下,车速跟随良好。

图 11 为双转子轮毂电机电动汽车在 NEDC 工况不同测试阶段需求转矩的变化情况,可见汽车在低速起步加速行驶时需要更大的驱动转矩,若内电机单独提供的驱动力不足时,外电机启动,两个电机共同驱动车辆;而车辆在等速、郊区工况超车加速行驶时的需求转矩相对较小。图 12 展

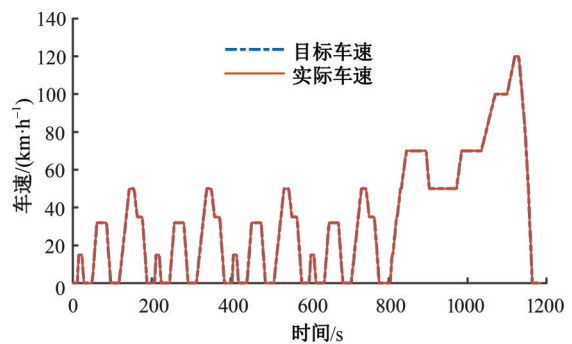


图 10 目标车速跟随变化情况

Fig. 10 Tracking change in the target vehicle speed

示了在 NEDC 工况下双转子轮毂电机电动汽车 3 种驱动模式的切换变化,可见,在整个循环工况下,随着不同测试过程的变化,双转子轮毂电机电动汽车能够自由切换相应的驱动模式。在市区、市郊工况的起步加速测试阶段,需求转矩大,车辆

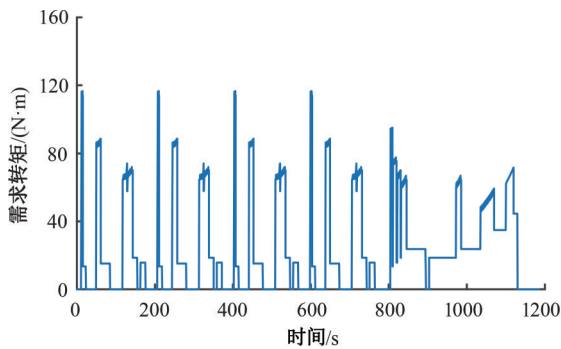


图 11 车辆需求转矩

Fig. 11 Demand torque of the vehicle

运行于双电机耦合驱动模式;在低速等速行驶( $\leq 50$  km/h)测试阶段,需求转矩较小,车辆运行于内电机单独驱动模式;在市郊循环工况的高速等速和超车加速( $\geq 70$  km/h)测试阶段,车辆运行于外电机单独驱动模式,与设计的双转子轮毂电机 3 种驱动模式的工作范围具有较好的一致性。内、外电机的转速和转矩随工况时间的变化如图 13 和图 14 所示,在耦合驱动模式下,内、外电机的转速成比例,各自按所设计的转矩分配策略承担相应转矩。

图 15(a)(b)为在 NEDC 循环工况下,内、外电机的工作点在各自效率 MAP 图中的分布情况,明显发现,无论双转子轮毂电机电动汽车运行

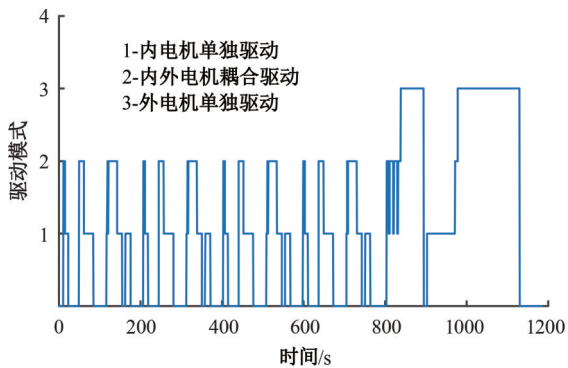


图 12 双转子轮毂电机驱动模式的切换变化

Fig. 12 Drive mode switching changes of the DRIWM

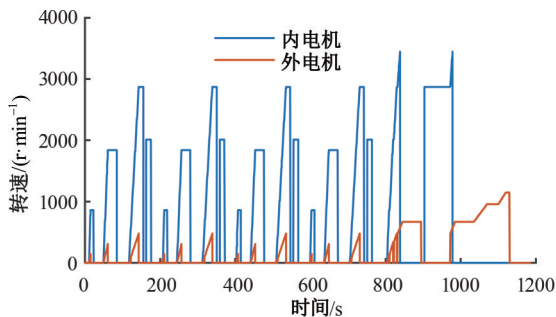


图 13 内、外电机的转速变化

Fig. 13 Speed changes of inner and outer motors

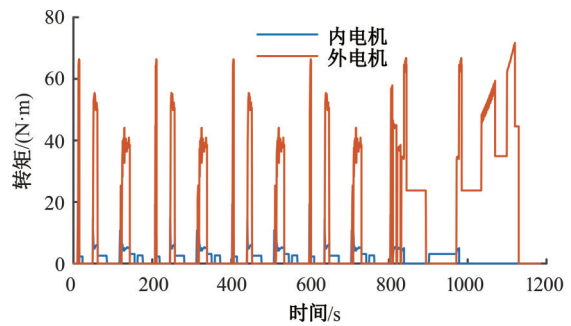
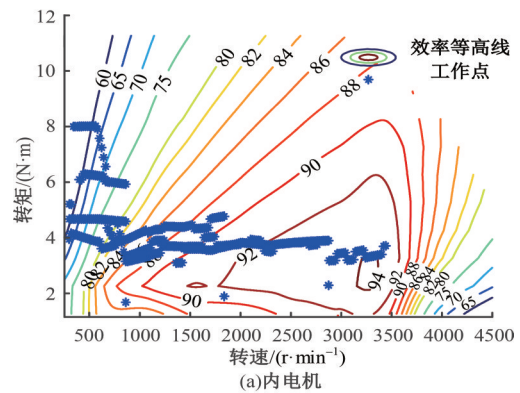
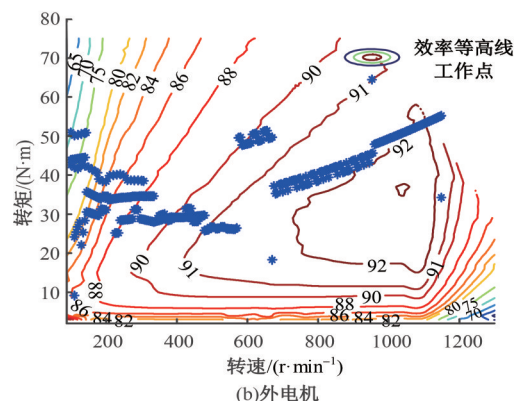


图 14 内、外电机的转矩变化

Fig. 14 Torque changes of inner and outer motors



(a)内电机



(b)外电机

图 15 双转子轮毂电机工作点分布情况

Fig. 15 Working point distributions of the DRIWM

于哪种驱动模式下,内、外电机的工作点大多都分布于较大的效率范围,说明内、外电机在承担最佳需求转矩的同时,均能以最高效率工作,实现整车能量消耗最小的目标。

## 4 实验验证

### 4.1 实验平台

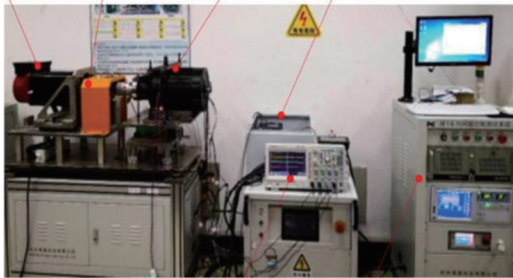
研制了一台额定功率为 4.7 kW 的双转子轮毂电机样机,其规格参数列入表 5 中。搭建的双转子轮毂电机驱动特性测试平台如图 16 所示,主要包括被测双转子轮毂电机样机、伺服电机、转

表 5 双转子轮毂电机的规格参数

Table 5 Specification parameters of the DRIWM

参数	数值	
	内电机	外电机
额定功率/kW	1	3.7
额定转矩/(N·m)	3.2	40
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	3 000	960
永磁体极对数	2	4
转矩常数/(Nm·A <sup>-1</sup> )	1.729	5.001
反电动势常数/(V·krpm <sup>-1</sup> )	0.627	0.581

伺服电机 转速转矩传感器 被测电机 控制单元



示波器 测控系统

图 16 双转子轮毂电机性能测试平台

Fig. 16 Performance test platform of the DRIWM

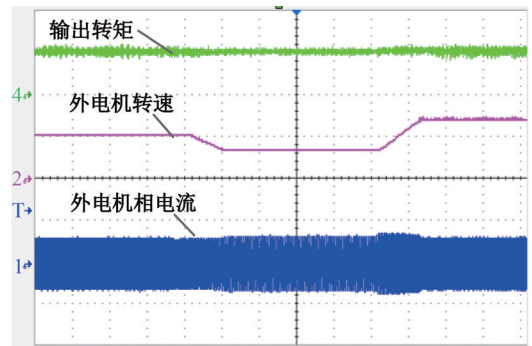
速/转矩传感器、电机驱动控制单元和测控显示系统等。双转子轮毂电机样机内布置有两个编码器,通过转速/转矩传感器可实时测量内、外电机的转速;交流伺服电机为驱动负载模拟装置,操作测控系统可改变模拟负载大小。

## 4.2 动态特性测试

### 4.2.1 外电机单独驱动

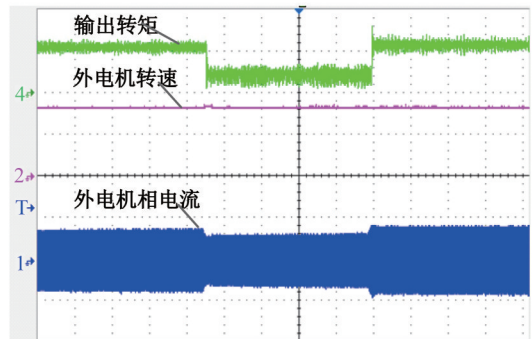
图 17(a)为恒载变速特性测试波形,设定负载为 14 N·m 且保持不变,在驱动控制单元作用下,外电机完成带载启动,转速稳定在 400 r/min,并保持数秒,然后将其转速降低到 260 r/min,再保持数秒,最后增速到 550 r/min。外电机在整个变速过程表现出较快的速度响应,可满足车辆频繁加减速行驶需求。

图 17(b)为恒速变载特性测试波形,设定初始负载为 20 N·m,在驱动控制单元作用下,外电机完成带载启动,转速稳定在 650 r/min,并保持数秒,然后将其负载降低至 8 N·m,再保持数秒,最后调节负载增加至 24 N·m。可以看出,外电机的输出转速在整个变载过程几乎保持不变,说明系统输出转速不受负载变化影响,外电机具有定速巡航能力。



CH1-5A/格 CH2-400(r/min)/格 CH4-15 N·m/格 时间-100 ms/格

(a)恒载变速



CH1-6A/格 CH2-1000(r/min)/格 CH4-20 N·m/格 时间-2 s/格

(b)恒速变载

图 17 外电机动态特性测试

Fig. 17 Dynamic characteristic test of outer motor

### 4.2.2 内电机单独驱动

图 18(a)为恒载变速特性测试波形,设定负载为 9 N·m 且保持不变,在驱动控制单元作用下,内电机完成带载启动,转速稳定在 260 r/min,并保持数秒,然后将其转速降低至 120 r/min,再保持数秒,最后增速到 400 r/min。可发现,内电机在整个变速过程也表现出较快的速度响应,可满足车辆启动和频繁加减速行驶需求。

图 18(b)为恒速变载特性测试波形,设定初始负载为 10 N·m,在驱动控制单元作用下,内电机完成带载启动,转速稳定在 220 r/min,并保持数秒,然后将其负载降低至 4 N·m,再保持数秒,最后增加负载至 14 N·m。可以发现,系统的输出转速在整个变载过程同样几乎保持不变,说明内电机也具有定速巡航能力。

### 4.2.3 双电机耦合驱动

图 19 为在耦合驱动模式下双转子轮毂电机的恒速变载特性测试波形,设定初始负载为 30 N·m,在驱动控制单元作用下,内、外电机完成带载启动,系统的输出转速稳定在 220 r/min,并保持数秒,然后将其负载增加到 46 N·m。可以看出,系

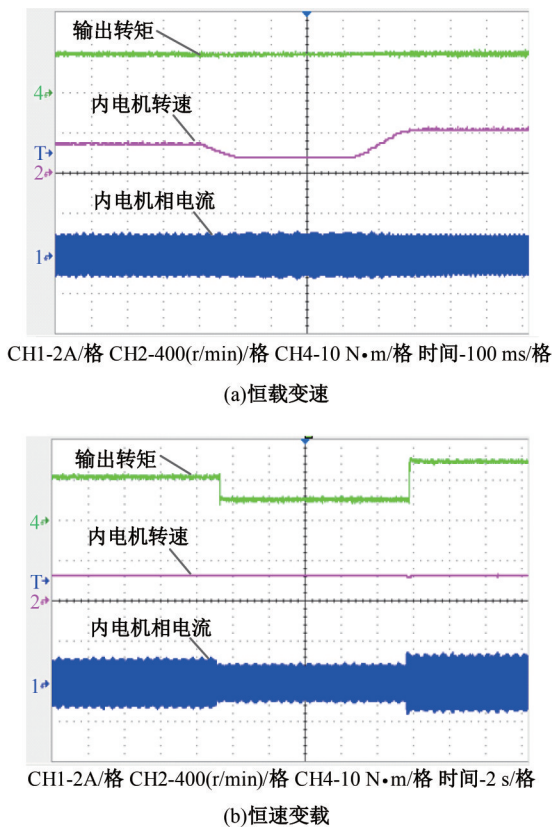


图 18 内电机动态特性测试

Fig. 18 Dynamic characteristic test of inner motor

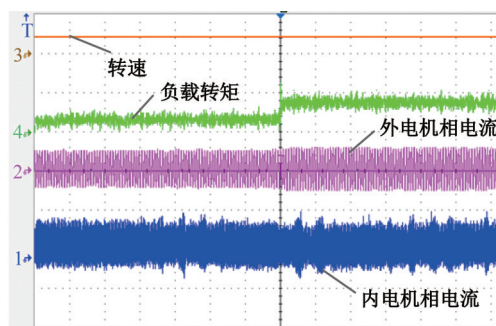


图 19 内外电机耦合驱动时的恒速变载特性

Fig. 19 Constant speed and variable load characteristic in dual-motor coupling drive mode

统的输出转速在负载改变时同样几乎保持不变,说明车辆处于双电机耦合驱动模式时也具有定速巡航能力。

## 5 结 论

(1)本文提出一种适合于纯电动汽车的双转子轮毂电机结构方案,能实现内电机单独驱动、外电机单独驱动和耦合驱动3种驱动模式,可满足车辆的多变工况行驶需求。

(2)从整车能耗问题出发,基于系统效率最

优设计了双转子轮毂电机电动汽车驱动模式切换规则,划分了3种驱动模式的具体工作范围。仿真结果表明:在NEDC工况下,车辆能够根据车速和需求转矩的变化自由切换驱动模式。

(3)在内外电机耦合驱动模式下,基于内、外电机的效率特性,提出了基于系统能耗最小的转矩分配策略。仿真结果表明:车辆在爬坡度分别为5%、10%、15%的3种坡道上行行驶时,与未采用转矩分配优化策略相比,采用本文转矩分配策略时系统消耗功率分别降低了4.1%、2.7%和1.6%。在整个NEDC循环工况下,内、外电机的大部分工作点均分布在较高的效率范围内,说明内、外电机在承担最佳需求转矩的同时,均能以最高效率工作,有效降低整车能量消耗。

(4)双转子轮毂电机的动态特性测试结果表明:在恒载变速过程中,内、外电机均表现出较快的速度响应,以满足车辆频繁加减速行驶需求;在恒速变载过程中,系统输出转速不受负载变化影响,内、外电机具有定速巡航能力。

## 参考文献:

- [1] Lu D B, Ouyang M G, Lu L G, et al. Theoretical performance of a new kind of range extended electric vehicle[J]. World Electric Vehicle Journal, 2011, 4(1): 655-661.
- [2] He R, Wang J C. Vertical vibration control of an in-wheel motor-driven electric vehicle using an in-wheel active vibration system[J]. Asian Journal of Control, 2020, 22(2): 879-896.
- [3] 王震坡, 孙逢春. 电动汽车能耗分配及影响因素分析[J]. 北京理工大学学报, 2004(4): 306-310. Wang Zhen-po, Sun Feng-chun. Analysis of energy consumption distribution and factors of influence in electric vehicles[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2004(4): 306-310.
- [4] Hoeijmakers M J, Rondel M. The electrical variable transmission in a city bus[C]// 35th IEEE Power Electronics Specialist Conference, Aachen, Germany, 2004: 2273-2278.
- [5] Eriksson S, Sadarangani C. A four-quadrant HEV drive system[C]// 56th Vehicular Technology Conference, Vancouver, Canada, 2002: 1510-1514.
- [6] Xu L, Zhang Y, Wen X. Multioperational modes and control strategies of dual-mechanical-port machine for hybrid electrical vehicles[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(2): 747-

- 755.
- [7] 庄兴明, 宋强, 温旭辉, 等. 辐型磁钢双机械端口电机的解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(33): 5925-5933.  
Zhuang Xing-ming, Song Qiang, Wen Xu-hui, et al. Decoupling control of dual mechanical ports machine with spoke type permanent-magnet arrangement [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(33): 5925-5933.
- [8] 陈云云, 全力, 朱孝勇, 等. 新型定子永磁式双转子电机运行模式分析与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(33): 5895-5901.  
Chen Yun-yun, Quan Li, Zhu Xiao-yong, et al. Analysis and experimental study on operational modes of a novel stator permanent magnet double rotor motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(33): 5895-5901.
- [9] 莫丽红, 全力, 朱孝勇, 等. 定子永磁式双转子电机设计与实验研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 74-82.  
Mo Li-hong, Quan Li, Zhu Xiao-yong, et al. Optimal design and experiment of a novel double-rotor machine with PMs in stator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 74-82.
- [10] Xiang Z X, Zhu X Y, Quan L, et al. Multi-level design optimization and operation of a brushless double mechanical ports flux-switching permanent magnet motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6042-6054.
- [11] 何仁, 胡东海. 基于双转子电机的电动轮及其控制方法[P]. 中国: ZL201410162607. X, 2016-03-02.
- [12] 何仁, 倪赞磊. 用于车辆轮毂驱动的双转子电机结构及其动力传递模式[P]. 中国: ZL201310659506. 9, 2016-01-20.
- [13] 何仁, 杨祺. 四轮驱动电动汽车的双转子轮毂电机及其动力传递方法[P]. 中国: ZL201510453976. 9, 2018-02-27.
- [14] 邢杰, 马士奔, 叶辉, 等. 用于电动汽车的双转子电机轮毂驱动系统[P]. 中国: CN106627101A, 2017-05-10.
- [15] 孟德建, 陈辛波, 张立军, 等. 一种双转子电机集成鼓式制动器的轮毂电机驱动系统 [P]. 中国: CN109435676A, 2019-03-08.
- [16] 陈龙, 朱斌, 孙晓东, 等. 基于模型预测控制的多电机驱动系统能量最优分配策略[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 403-409.  
Chen Long, Zhu Bin, Sun Xiao-dong, et al. Optimal allocation strategy for multi-motor drive system based on model predictive control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 403-409.