

用于重型电动卡车的双电机与双行星排 新驱动装置设计及动力学特性研究

郑臻皓^{1,2,3}, 赵升吨^{1,2,3}, 高志杰^{1,2,3}, 曹杨峰^{1,2,3}, 杨啸垠^{1,2,3}

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学西安市智能装备与控制重点实验室, 710049, 西安; 3. 金属成形技术与重型装备全国重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对电动卡车采用的中央电机配合变速箱的驱动形式,造成驱动电机功率偏高、传动系统空间布置困难、传动效率低下等问题,以陕汽德龙 M3000 系列的 18 t 级牵引车为研究对象,提出了一种可以实现双电机转矩耦合驱动和单电机驱动两种工作模式的新型双电机双行星轮系轮边分布式驱动系统。理论计算了新型驱动系统中双永磁同步电机的基本参数;搭建了基于 Workbench 平台与 Maxwell 软件的联合仿真平台,提出了采用遗传算法的双电机参数多目标优化方法,得到了输出转矩、转矩波动率和最大反电动势的最优解;设计、制造、安装和调试了额定功率分别为 60、30 kW,额定转速为 3 500、1 500 r/min 的双电机与双行星排机械结构总成以及计算机实验平台;构建了基于逻辑门限值的整车控制策略和基于矢量控制的电机控制方案,开展了两种工作模式电机性能实验以及工作模式切换实验。研究结果表明,设计的双电机双行星轮系驱动系统在两种工作模式下转速波动率最大为 2.58%、转矩波动率最大为 5.5%,具有较好的输出响应,为该型原理的实际应用提供了参考。

关键词: 电动卡车;驱动与传动;永磁同步电机;行星轮系

中图分类号: TH132.46 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202504002 **文章编号:** 0253-987X(2025)04-0016-11

Research on Design and Dynamics Characteristics of New Drive System with Dual Motors and Dual Planetary Gears for Heavy Electric Trucks

ZHENG Zhenhao^{1,2,3}, ZHAO Shengdun^{1,2,3}, GAO Zhijie^{1,2,3},

CAO Yangfeng^{1,2,3}, YANG Xiaoyin^{1,2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Key Laboratory of Intelligent Equipment and Control, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. State Key Laboratory of Metal Forming Technology and Heavy Equipment, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at electric trucks adopt a driving configuration of a central motor combined with a gearbox, leading to issues such as high-power consumption of the driving motor, difficult spatial arrangement of the transmission system, and low transmission efficiency. Taking the Shaanxi automobile Delong M3000 series 18 t tractor as the research object, a novel dual-motor dual-planetary wheel-side distributed drive system capable of dual-motor torque-coupling drive

收稿日期: 2024-10-31。 作者简介: 郑臻皓(1995—),男,博士生;赵升吨(通信作者),男,教授,博士生导师。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52275373);国家自然科学基金青年基金资助项目(52105397)。

网络出版时间: 2024-12-24

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20241224.1015.005>

and single-motor drive modes is proposed. The basic parameters of the dual permanent magnet synchronous motors in the new drive system are theoretically calculated. A joint simulation platform based on the Workbench platform and the Maxwell software is established, and a multi-objective optimization method for dual-motor parameters using genetic algorithms is proposed to obtain the optimal solutions for output torque, torque fluctuation rate, and maximum back electromotive force. The mechanical structure assembly of dual motors and dual planetary gears with rated powers of 60 and 30 kW, and rated speeds of 3 500 and 1 500 r/min, respectively, is designed, manufactured, installed, and tested along with a computer experimental platform. A vehicle control strategy based on logical threshold values and a motor control scheme based on vector control are developed, and experiments on motor performance in two operating modes and mode switching are conducted. The research results indicate that the designed dual-motor dual-planetary gear train drive system exhibits a maximum speed fluctuation rate of 2.58% and a maximum torque fluctuation rate of 5.5% in both operating modes, showing good output response and providing a reference for practical applications of this principle.

Keywords: electric truck; drive and transmission; permanent magnet synchronous motor; planetary gear train

我国现存的传统燃油车保有量基数大,不仅带来了环境保护方面的问题,也导致我国对石油等化石能源的需求量居高不下^[1]。2020 年,我国石油对外依存度达到历年的最高点 73.7%^[2-3]。为了解决能源与环保问题,近年来我国新能源汽车行业发展迅速,同时国家也对新能源汽车的发展做出了与时俱进的规划^[4-5]。

新能源汽车包括纯电动汽车、燃料电池汽车和混合动力汽车^[6-7]。电驱车辆具有电能效率比燃烧效率更高的优点,而且电能为可再生能源,其获取相对方便。混合动力汽车由于其驱动系统结构较为复杂,车身质量也比一般纯燃油车型和纯电动车型大,所以混合动力商用车一度被认为是商用车从纯燃油车型向纯电动车型的过渡产品^[8-10]。随着纯电动驱动技术的飞速发展以及政府相关政策的快速转变,纯电动商用车在短距离运输市场中扮演者越来越重要的角色,而且纯电动商用车在质量减轻、节约化石能源方面具有无可比拟的优势^[11]。

目前,电动汽车的驱动系统发展呈现出集成化、一体化的特点,常见的是将电机、电控和减速器进行集成一体化来减小体积和质量,方便整车布局^[12-13]。按照驱动电机的数量,电动汽车可以分为单电机驱动系统和多电机驱动系统^[14],多电机驱动系统又可以根据其在车辆中的位置以及分布情况划分为双电机分布式驱动系统、双电机耦合驱动系统

和轮毂式电机驱动系统^[15-16]。双电机耦合驱动形式可以有效提高电机的输出效率,而且相较于单电机驱动对电机的性能要求较低^[17-19];轮边分布式电驱动桥质量小、空间占用少,便于应用在纯电动商用车中^[20]。

因此,本文集合这两种驱动形式的优点,提出了轮边双电机耦合分布式电驱动桥的驱动形式,电驱动桥由两套双电机耦合驱动系统组成,分布在驱动桥两端来驱动车轮。确定了双电机的基本参数以及两套行星轮系的特征参数以及具体齿数,采用 Workbench 平台与 Maxwell 软件进行联合仿真,利用多目标遗传算法对优化目标响应灵敏的参数继续进行响应面的优化分析。研制了新型双电机双行星轮系驱动系统样机,搭建了实验平台对整体构型进行了实验验证与研究。

1 电动重型卡车驱动系统参数匹配

1.1 整车动力性能指标及技术参数

本文针对陕汽德龙 M3000 牵引车进行纯电动设计,其主要的应用场景是港口集装箱运输、城际重货配送等作业,所以主要性能需求为城市低速小扭矩运行和中短途的大扭矩输出。德龙 M3000 牵引车的车身基本结构参数如表 1 所示,后续将用于整车所需求的最大功率匹配。

表 1 陕汽德龙 M3000 牵引车基本参数

Table 1 Shaanxi automobile Delong M3000 tractor basic parameter table

参数	数值
整备质量 m/t	6.6
满载质量 m_a/t	18
风阻系数 C_D	0.7
迎风面积 A_f/m^2	8.52
滚动阻力系数 f	0.02
传动系统效率 η_t	0.93
轮胎滚动半径 r/mm	526
汽车旋转质量换算系数	1.1
轴距 L/mm	3 600
最高车速 $v_{\max}/(km \cdot h^{-1})$	100
最大爬坡度 $\alpha_{\max}/\%$	20
最大爬坡度对应车速 $v_{a_{\max}}/(km \cdot h^{-1})$	20
0~50 $km \cdot h^{-1}$ 加速时间/s	10
50~80 $km \cdot h^{-1}$ 加速时间/s	30
0~100 $km \cdot h^{-1}$ 加速时间/s	70

1.2 整车功率需求和扭矩匹配计算

本文关注的重点是车辆行驶过程中的经济性和动力性,因此只考虑车辆行驶的纵向动力学模型。车辆的行驶阻力包括滚动阻力 $mgf\cos\alpha$ 、坡度阻力 $mg\sin\alpha$ 、加速阻力 F_v 和空气阻力 F_a 。车辆受力示意如图 1 所示,相应的纵向动力学方程为

$$F + F_{brk} = mg \sin \alpha + mgf \cos \alpha + \frac{C_D A_f}{21.15} v^2 + m \frac{dv}{dt} \tag{1}$$

式中: F 为驱动系统提供的牵引力,N; F_{brk} 为机械制动力; g 为重力加速度, m/s^2 ; α 为道路坡度,rad; v 为车速, m/s 。

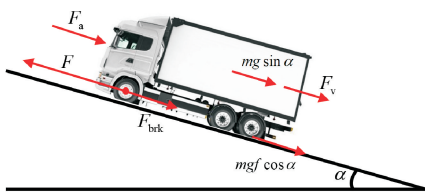


图 1 电动卡车受力分析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electric truck force analysis

根据式(1)可以得到车辆在行驶过程中所需要的功率平衡公式

$$P = \frac{v_{\max}}{3\,600\eta_t} \left(mgf + \frac{C_D A v_{\max}^2}{21.15} + mg \sin \alpha + \delta m \frac{dv}{dt} \right) \tag{2}$$

车辆运行需满足 3 种极限工况:满载下车辆在平直路况以最高车速 $v_{\max}$ 行驶;满载下车辆在最大爬坡度 $\alpha_{\max}$ 爬坡时以最高爬坡车速 $v_{a_{\max}}$ 行驶;车辆按照表 1 所示的 3 种最小加速时间分别完成 0~50 km/h 、50~80 km/h 和 0~100 km/h 这 3 种加速行驶工况。电动卡车所需最大功率 P_v 应为以上 3 种极限工况下计算出的最大功率 P_{v1} 、 P_{v2} 、 P_{v3} 的最大值, P_{v1} 、 P_{v2} 、 P_{v3} 计算方程为

$$\begin{cases} P_{v1} = \frac{v_{\max}}{3\,600\eta_t} \left(m_a g f + \frac{C_D A v_{\max}^2}{21.15} \right) \\ P_{v2} = \frac{v_a}{3\,600\eta_t} \left(m_a g f \cos \alpha_{\max} + m_a g \sin \alpha_{\max} + \frac{C_D A v_{a_{\max}}^2}{21.15} \right) \\ t_a = \frac{1}{3.6} \cdot \int_{v_0}^{v_{\text{end}}} \frac{\delta m_a}{3\,600 P_{v3} \eta_t / v - (m_a g f + C_D A v^2 / 21.15)} dv \\ P_v = \max(P_{v1}, P_{v2}, P_{v3}) \end{cases} \tag{3}$$

式中: v_a 为车辆最大爬坡度情况下对应的车速; v_0 为初始加速时刻的速度; v_{end} 为最终加速时刻的车速; t_a 为从 v_0 加速至 v_{end} 的所需时间。

车辆所需最大扭矩 T_v 为

$$\begin{cases} T_{\max1} = \frac{r}{\eta_t} \left(m_a g f \cos \alpha + m_a g \sin \alpha + \frac{C_D A v^2}{21.15} \right) \\ T_{\max2} = \frac{r}{\eta_t} \left(m_a g f + \delta m \frac{dv}{dt} + \frac{C_D A v^2}{21.15} \right) \\ T_v = \max(T_{\max1}, T_{\max2}) \end{cases} \tag{4}$$

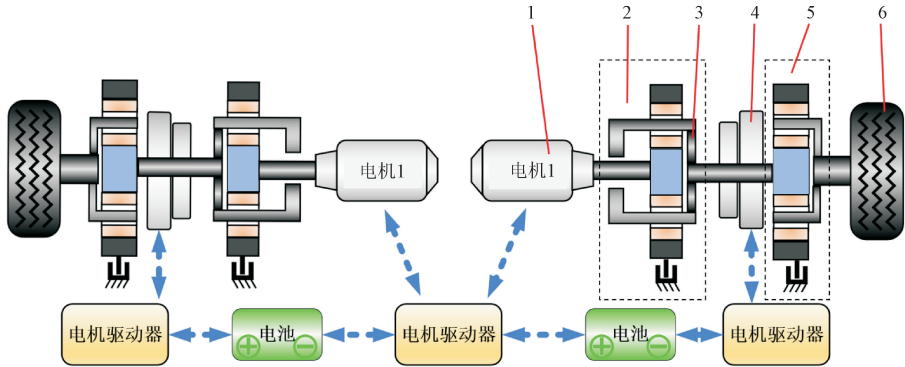
式中: r 为车轮半径。

将表 1 中的相关数据代入式(4),最终确定参数如下:车辆的所需额定功率为 180 kW,峰值功率为 310 kW;驱动电机额定扭矩为 10 293.45 $N \cdot m$,最大扭矩为 15 462.58 $N \cdot m$ 。

2 电动重型卡车驱动系统工作原理

2.1 驱动与传动原理

本文所设计的驱动半桥主要由电机 1、电机 2、第一行星轮系、轮边行星轮系组成,如图 2 所示。电机 1 直接与第一行星轮系的太阳轮连接,通过行星轮系减速从行星架输出,同步器位于第一行星轮系的行星架和输出轴之间,电机 2 通过键连接与输出轴固连,动力直接传输到输出轴,输出轴连接轮边行星轮系的太阳轮,同样由轮边行星轮系的行星架输出,行星架直接连接轮毂,将动力传递至车轮。



1—电机 1;2—第一行星轮系;3—同步器;4—电机 2;5—轮边行星轮系;6—车轮。

图 2 两半桥分布式双电机耦合驱动结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of two-half bridge distributed dual-motor coupling drive structure

2.2 工作模式

由于本文研究对象的主要工况较为单一,大部分为低速大扭矩,还包括城市中平稳运行,所以依此设计了双电机耦合驱动两种工作模式:双电机转矩耦合模式和电机 2 单独工作模式,如图 3 所示。

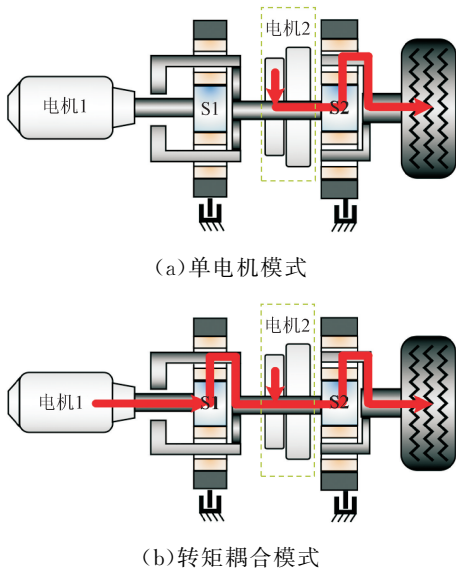


图 3 不同工作模式下系统的能量流

Fig. 3 Energy flow of the system under different working modes

在单电机模式下,电机 1 不工作,液压驱动同步器的接合套向右拨动,将输出轴和星轮系 S1 的行星架分离,此时驱动系统的电机 2 通过行星轮系 S2 直接驱动车轮,电机 2 转子直接驱动轮边行星轮系 S2 的太阳轮,行星轮系 S2 的齿圈固定,从行星架输出驱动车轮。

在双电机耦合模式下,电机 1 动力首先经过行星轮 S1 系减速增矩,行星轮 S1 系齿圈固定,行星架

输出,此时同步器接合套向左拨动,实现行星轮 S1 系的接合套与输出轴同步结合。这样,电机 1 经行星轮系 S1 增大后的扭矩和电机 2 直接输出的扭矩在输出轴实现转矩耦合,耦合后的动力再次经过轮边减速器的减速增矩实现对车轮的驱动。

3 电动重型卡车驱动系统双电机设计

3.1 双电机驱动系统性能参数匹配

根据双电机各自工作的工况,确定两台电机的性能参数匹配,如表 2 所示。

表 2 永磁同步电机输出性能参数

Table 2 Output performance parameters of permanent magnet synchronous motor

参数	数值	
	电机 1	电机 2
额定转速/(r · min ⁻¹)	3 500	1 500
额定功率/kW	60	30
峰值转速/(r · min ⁻¹)	9 000	4 000
峰值功率/kW	100	60
峰值扭矩/(N · m)	159.15	381.96

3.2 基于 NSGA-II 算法的电机结构参数多目标优化

3.2.1 电机优化模型的建立

为提高整车舒适性,电机转动波动率应尽可能小;为提高整车动力性,电机输出扭矩应尽可能大;为防止电机过载受损,应限制电机反电动势。因此,本小节以电机电磁结构参数为特征,以额定工况下的输出扭矩平均值 T_{avg} 最大、额定工况下的输出扭矩波动率 K_T 最小为优化目标,建立优化模型

$$\min[-T_{\text{avg}}, K_T]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_A \leq 313 \text{ V} \\ \delta_e \in [0.5, 2.5] \text{ mm} \\ \alpha_e \in [0.6, 0.9] \\ b_M \in [2.5, 6.5] \text{ mm} \\ B_{s0} \in [1, 3] \text{ mm} \\ H_{s0} \in [0.5, 1.5] \text{ mm} \end{array} \right.$$

s. t.

(5)

式中: E_A 为 A 相相电压反电动势最大值,V; δ_e 为气隙长度; α_e 为极弧系数; b_M 为永磁体厚度; B_{s0} 为定子槽口宽度; H_{s0} 为定子槽口高度。

本文基于 ANSYS Workbench 的 optiSLang 模块对式(5)模型进行优化。

3.2.2 径向磁场电机设计

径向磁场电机 1 经过理论计算初步得到的设计参数如表 3 所示。

表 3 径向磁场电机 1 初步设计参数

Table 3 Preliminary design parameters of radial magnetic field motor 1

参数	数值	参数	数值
定子内径/mm	160	定子槽口宽度/mm	3
定子外径/mm	250	极弧系数	0.8
铁心有效长度/mm	200	绕组层数	2
转子内径/mm	80	线径/mm	1.45
转子外径/mm	158	节距	4
气隙/mm	1	槽满率/%	73.07
永磁体厚度/mm	5	效率/%	95.45

电机的性能指标由多种结构参数共同影响,而且评价电机的性能参数也是多样的。考虑到这些结构参数的影响是非线性的,所以应用简单的单输入单输出形式的变量分析方法^[21]难以求解出最优解。因此,本文采用 Workbench 平台和 Maxwell 软件进行联合仿真,基于这种跨平台的仿真分析方法对驱动电机结构参数先后进行灵敏度分析和多目标的联合优化,确定出电机的最优结构参数。

设定空载工况(求取相电压反电动势最大值)、空载工况、额定工况(求取转矩波动率、转矩平均值)3 个子项目,并在总项目中将 δ_e 、 α_e 、 b_M 、 B_{s0} 、 H_{s0} 等参数设置为全局变量。将以上项目导入 Ansys Workbench 平台,搭建实验模型。

(1)结构参数灵敏度分析。本文首先通过灵敏度分析^[22]研究了响应参数的变化对输入参数变化灵敏程度,确定了不同结构参数的影响因子,同时也

可以舍弃对响应参数灵敏度较小的结构参数,减小后续响应面优化分析的数据量。本次仿真采用拉丁超立方采样^[23],可以更大程度保证对电机优化参数数据量的全覆盖。经过联合仿真得到输入输出参数的灵敏度关系,如图 4 所示。从中可以看出:气隙长度、永磁体厚度和宽度对电机的输出参数影响较大,而极弧系数和槽口宽度的灵敏度很小,可以忽略不计。

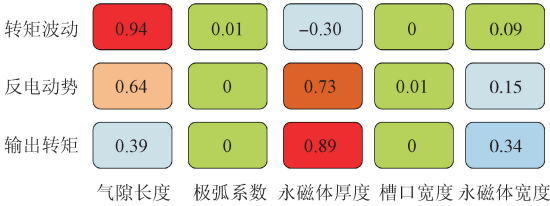


图 4 输入输出参数的相关系数

Fig.4 Correlation coefficients of input and output parameters

(2)多目标优化与结果分析。在 Workbench 平台中的 Response Surface 模块搭建响应面设计与优化平台,并与 Maxwell 软件联合仿真,进行基于响应面的多目标优化。优化时采用多目标遗传算法(MOGA)^[24-25]。多目标遗传算法是第二代非支配遗传算法(NSGA-II)的变体,可以支持多个优化目标以及施加约束,以此寻找约束的全局最优解,具体流程如图 5 所示。

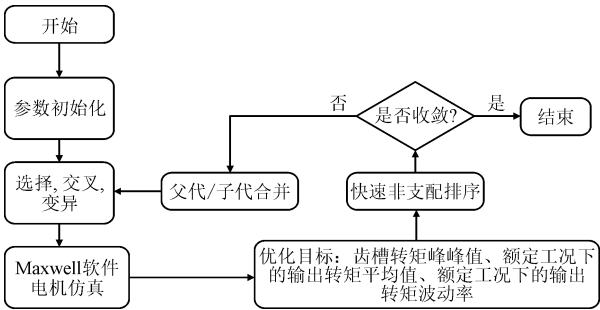


图 5 NSGA-II 多目标优化流程图

Fig.5 Flowchart of NSGA-II multi-objective optimization

在联合仿真优化过程中,最初生成 3 000 个样本,每次迭代生成 600 个样本。迭代次数到 20 左右时,目标函数的范围变化趋于平稳,将此时得到的解集中目标函数最小值对应的优化结果作为优化后的驱动系统参数。在 20 次迭代后找到 3 个候选点,其对应的电机参数如表 4 所示。最终,选定候选点 3 对应的电机参数进行后续的优化后分析。

表 4 电机 1 的 MOGA 最优候选点

Table 4 Optimal candidate points for MOGA of motor 1

参数	数值		
	候选点 1	候选点 2	候选点 3
转子外径/mm	156.5	156.5	156.5
永磁体厚度/mm	5.506	5.324	5.386
永磁体宽度/mm	40.351	40.535	40.737
平均转矩/(N·m)	85.125	85.034	85.131
转矩波动率	0.422	0.415	0.312

将优化后的输入参数重新在 Maxwell 软件中进行参数化建模,并对生成的电机二维模型施加三相额定电流激励,得到额定工况下电机 1 的输出转矩图,如图 6 所示。可以看出,输出转矩平均值为 85.49 N·m,转矩波动率为 3.03%,满足车辆驱动电机转矩波动不超过 5%的要求。此外,为后续整车仿真中便于对电机模型的建立,利用 Maxwell 软件中的 Toolkit 插件生成电机 1 满载工况的电机效率云图,如图 7 所示。

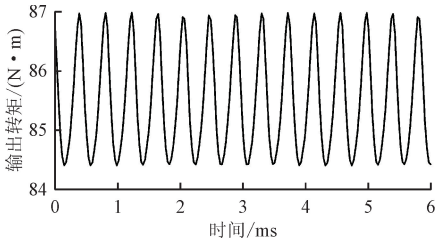


图 6 额定工况下电机 1 的输出转矩

Fig. 6 Output torque of motor 1 under rated working conditions

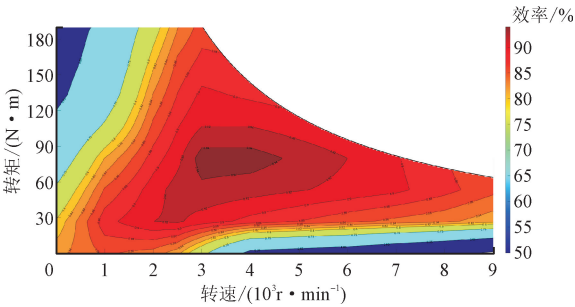


图 7 电机 1 满载工况效率云图

Fig. 7 Efficiency cloud map of motor 1 under full load

从图 7 可以看出:电机最大输出扭矩达到 180 N·m,满足整车扭矩需求,电机的高效率区集中在额定转速前后区域,因此驱动系统中电机 1 在额定工况下工作效率较高,有益于提升车辆的能耗经济性。

3.2.3 轴向磁场电机仿真计算

采用同样的方法,轴向磁场电机 2 经过联合仿真优化之后最终的参数如表 5 所示。

表 5 径向磁场电机 2 最终设计参数

Table 5 Final design parameters of axial magnetic field motor 2

参数	数值	参数	数值
定转子内径/mm	218	槽口宽度/mm	5.60
定转子外径/mm	400	极弧系数	0.86
定子铁心长度/mm	70	绕组层数	2
转子铁心长度/mm	30	线径/mm	1.22
电流密度/(A·mm ⁻²)	4.46	节距	1
气隙/mm	2	槽满率/%	70.08
永磁体厚度/mm	5	效率/%	97.56

对优化后的电机 2 施加额定三相电流激励,得到电机额定状态下的输出转矩情况,如图 8 所示。可以看出,电机输出转矩的平均值为 193.21 N·m,转矩波动率为 4.67%,输出转矩较为平稳,满足电动汽车驱动电机输出转矩不高于 5%的要求。

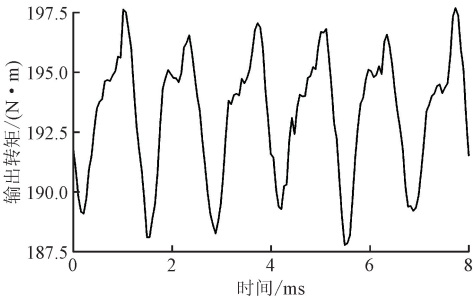


图 8 额定工况下电机 2 的输出转矩

Fig. 8 Output torque of motor 2 under rated working conditions

优化过后电机的电机效率云图如图 9 所示。将电机设置为满载工况,可以看到高转速和高扭矩下的电机效率也较高,符合电机设计的要求。

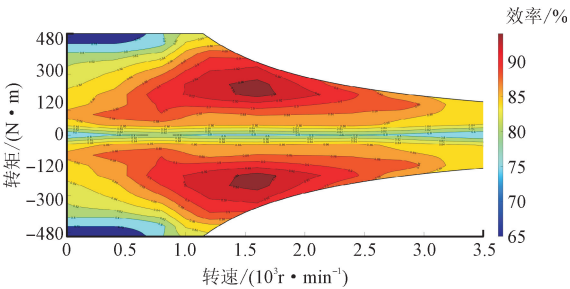


图 9 电机 2 满载工况效率云图

Fig. 9 Efficiency cloud map of motor 2 under full load

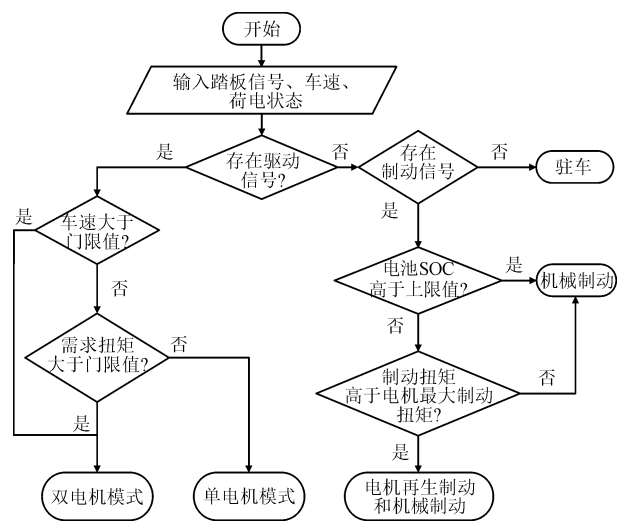


图 12 基于规则的逻辑门限值控制策略流程图

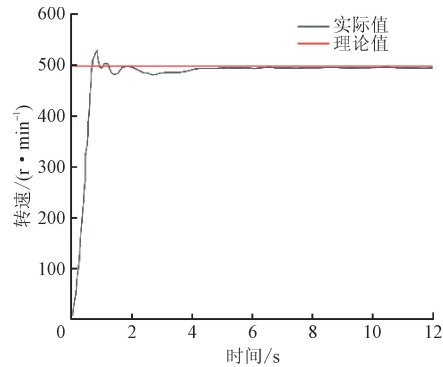
Fig. 12 Flowchart of a rule-based logical threshold control strategy

4.4 盘式电机单独驱动实验

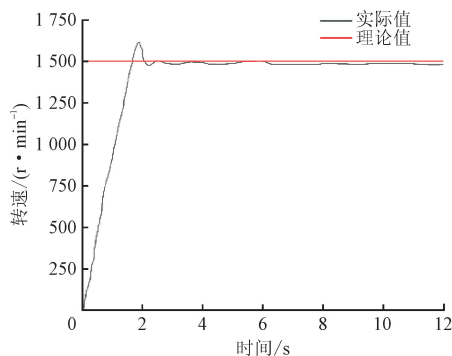
盘式电机 2 驱动工作模式下,整车控制器采集驾驶员踏板信号以及车速信号,通过控制液压缸驱动模式切换同步器的接合套向与第一行星轮系的行星架啮合齿轮分离,避免盘式电机带动电机 1 反转。

4.4.1 空载工况

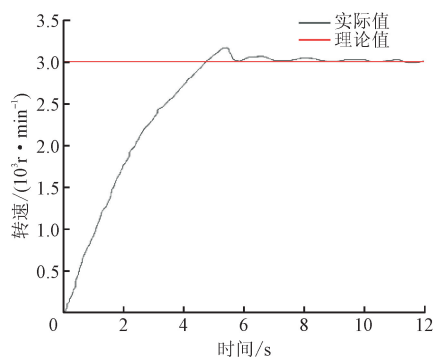
设置盘式电机 2 的目标转速分别为 500、1 500、3 000 r/min,编码器测得电机 2 的空载输出转速曲线如图 13 所示。



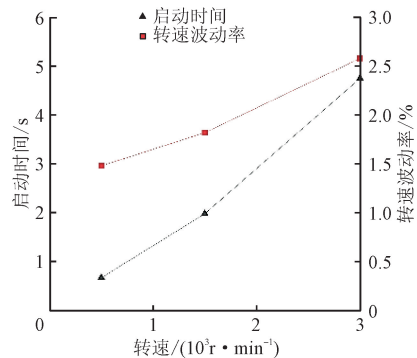
(a) 目标转速为 500 r/min



(b) 目标转速为 1 500 r/min



(c) 目标转速为 3 000 r/min



(d) 不同目标转速下的启动时间和转速波动率

图 13 单电机驱动空载转速响应曲线

Fig. 13 No-load speed response curve of single motor drive

从图 13 可以看出,电机 2 在空载工况下启动,达到目标转速的所用时间与目标转速基本呈线性关系。在达到目标转速之后,都会有一定程度的超调量,然后趋于稳定,电机的最终稳定转速在目标转速附近轻微波动。电机的转速越高,转速波动率也随之略微升高。在 3 种转速下,当传动系统到达稳态后,传动系统效率分别为 98.92%、99.12%、98.80%。电机 2 在 3 种目标转速下达到目标转速的时间分别为 0.67、1.98、4.75 s,转速稳定后的转速波动率分别为 1.46%、1.82% 和 2.58%。综上所述,电机 2 在空载工况启动时间较短,启动性能良好,波动范围较小。

4.4.2 负载工况

给电机施加电流激励,设定电机转速为额定转速 1 500 r/min,然后通过施加稳流电源使得磁粉制动器输出负载转矩,并在单电机驱动的输出端施加 730、1 095 N·m 的负载转矩。由于电机 2 经过轮边减速器减速增矩,所以换算到电机的输出扭矩分别为 100、150 N·m。观测电机在负载情况下的运行状态,如图 14 所示。

从图 14 可以看出,电机所带负载增大时,达到目标转速的时间也会相应增加,而且电机启动的加

速度也明显降低。当电机输出 100 N·m 转矩时,达到目标转速的时间约为 2.5 s,相比空载启动,达到相同的目标转速所用时间也会增大。

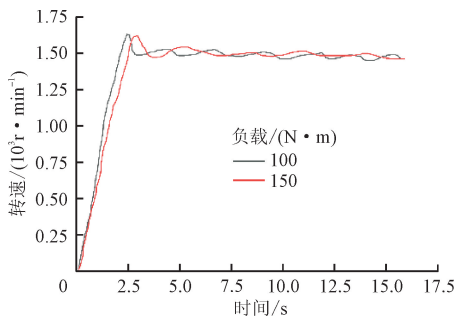
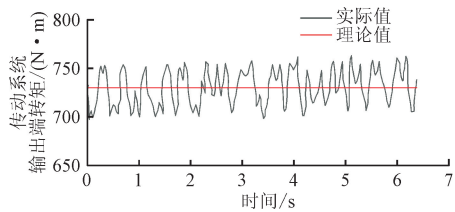


图 14 不同负载转矩下的转速曲线

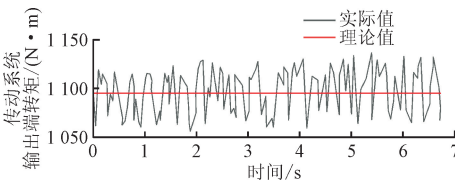
Fig. 14 Speed curves under different load torques

4.4.3 稳定性测试

为检验电机的转矩输出稳定性,对单电机驱动系统的输出端转矩进行稳定性测试,利用实验台的转速转矩传感器对输出端的输出转矩进行观测。当电机目标转速为 1 500 r/min,电机输出转矩为 100、150 N·m 时,传动系统输出端目标转矩分别为 726、1 089 N·m。传动系统输出端实际转矩如图 15 所示。



(a) 电机输出转矩 100 N·m



(b) 电机输出转矩 150 N·m

图 15 电机 2 输出转矩稳定性测试结果

Fig. 15 Output torque stability test results of motor 2

从图 15 可以看出:传动系统输出端转矩均在目标转矩上下波动,而且随着输出转矩的增大,转矩的波动也有所增大。电机输出 100 N·m 下的输出端转矩波动率为 4.6%,电机输出 150 N·m 下的输出端转矩波动率为 5.1%。

4.5 双电机转矩耦合驱动

对双电机转矩耦合驱动模式进行分析,在这种

工作模式下,模式切换同步器的接合套向左拨动,和第一行星轮系的右行星架啮合齿轮接合,实现将电机 1 的动力通过第一行星轮系传输到输出轴与电机 2 进行转矩耦合。

为模拟双电机转矩耦合模式在车辆启动时的场景,利用磁粉制动器给输出端施加负载转矩,电机 1 和电机 2 的输出扭矩分别为 30、80 N·m,同时通过驱动器控制两电机共同驱动车辆起步,设置电机耦合的最终转速分别为 500、1 500、3 000 r/min,通过磁编码器得到耦合后的不同转速输出情况,如图 16 所示。可以看出:随着转速的增大,达到目标转速的时间也随之增大,而且达到目标转速的时间与目标转速基本呈正比关系;由于带负载工作,达到目标转速之后的转速波动也随着转速的增大而增大。在 3 种耦合模式下,当系统稳定时,齿轮系的传动效率分别为 97.23%、97.84%、96.85%。

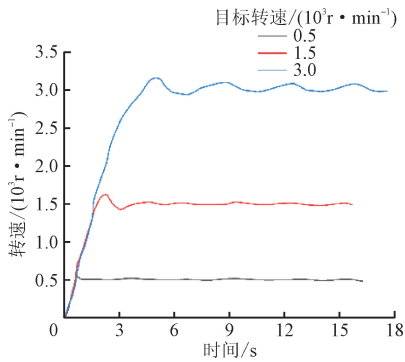


图 16 双电机转矩耦合下的输出转速

Fig. 16 Speed output of dual motor torque coupling

对双电机转矩耦合工作模式的切换过程进行实验。首先,将同步器与第一行星轮系分离,对电机 2 和电机 1 进行转矩控制,使得电机 2 和电机 1 的输出转矩分别为 80、30 N·m。由于电机 1 初始时还未与电机 2 进行耦合,所以初始时即为电机 2 的单电机驱动模式,如图 17 所示。此时,输出端的输出扭矩在 584 N·m 上下波动。然后,推动同步器的

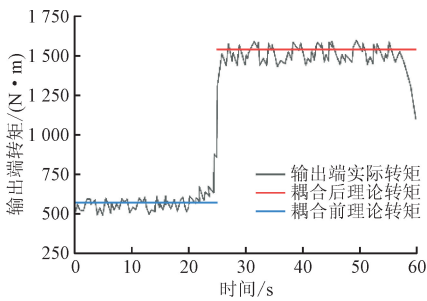


图 17 双电机转矩耦合模式切换过程

Fig. 17 Dual motor torque coupling mode switching process

接合套与第一行星轮系的接合齿轮啮合,实现单电机驱动转向双电机转矩耦合。

从图 17 可以看出,刚开始拨动接合套时,输出端的输出转矩小范围线性增加,然后急速增大。这是由接合套推动锁环与齿圈的锥面进行摩擦然后实现锁环和啮合齿轮接合而造成的。对耦合后的输出转矩进行分析可知,输出后的转矩在 $1\,569\text{ N}\cdot\text{m}$ 上下波动,与两电机分别输出 $30\text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $80\text{ N}\cdot\text{m}$ 相吻合。此外可以看出,耦合后的转矩波动比耦合前增大,大约为 5.5% 左右,可能是因为实验平台的振动和双电机转矩耦合的影响。

综上所述可知,本文研制的双电机双行星轮系驱动机构系统的两种工作模式均可以较为平稳地输出转矩和转速,双电机转矩耦合产生的波动可以通过后续的电机来进行减弱和消除。驱动系统构型设计合理,可以平稳输出。

5 结 论

(1)本文通过对比国内外不同类型的电动重型卡车驱动系统构型,提出了一种双电机双行星轮系驱动新构型。采用双电机驱动两个行星齿轮机构,并具有轮边的鼓式制动器和模式切换同步器,其中电机 1 输出的转矩经过第一行星轮系的放大后与电机 2 输出的转矩进行耦合,然后经过第二级轮边行星轮系驱动车轮,在两个驱动电机的动力输出下可以实现单电机驱动和双电机转矩耦合驱动两种工作模式。

(2)选取陕汽德龙 M3000 系列的 18 t 重型牵引车作为设计原型,根据该车型的结构参数以及动力需求进行整车的功率和扭矩匹配,确定电机 1 和电机 2 的峰值转速分别为 $9\,000\text{ r/min}$ 、 $4\,000\text{ r/min}$,峰值转矩分别为 $159.15\text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $381.96\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

(3)根据驱动系统中两个电机的动力匹配,对电机 1 和电机 2 的结构参数进行设计与仿真。其中电机 1 选取为 60 kW 的 48 槽 8 极径向磁通永磁同步电机,电机 2 选取为 30 kW 的 12 槽 10 极的轴向磁通永磁同步电机。采用 Workbench 平台和 Maxwell 软件联合仿真,先后完成了结构参数灵敏度分析和基于 NSGA-II 的多目标优化分析,优化后电机 1 和电机 2 的转矩波动分别为 3.03% 和 4.67% ,最大输出转矩分别为 $180\text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $480\text{ N}\cdot\text{m}$,满足整车转矩设计需求。

(4)制作了新型双电机双行星轮系驱动系统原型机,搭建了双电机双行星轮系驱动系统的实验平

台,对加工的电机 2 样机进行性能测试。通过液压驱动同步器拨叉实现单电机到双电机转矩耦合驱动实验,得到两种工作模式、不同负载下的双电机驱动系统输出转矩和转速。设计的双电机双行星轮系驱动系统在两种工作模式下转速波动率最大为 2.58% 、转矩波动率最大为 5.5% ,具有较好的输出响应。

参考文献:

[1] 杨华磊,杨敏. 碳达峰碳中和:中国式现代化的能源转型之路 [J]. 经济问题, 2024(3): 1-7.
YANG Hualei, YANG Min. Peak carbon emission and carbon neutrality: China's path to energy transition in modernization [J]. On Economic Problems, 2024(3): 1-7.

[2] 郭剑锋,张雪美,曹琪,等. 电动汽车助力我国能源安全与“碳达峰、碳中和”协同推进 [J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(2): 397-407.
GUO Jianfeng, ZHANG Xuemei, CAO Qi, et al. Electric vehicles contribute to China's energy security and carbon peaking and carbon neutrality [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(2): 397-407.

[3] ZHANG Min, QIU Yan, LI Chunling, et al. A habitable earth and carbon neutrality: mission and challenges facing resources and the environment in China: an overview [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(2): 1045.

[4] 刘凯迪. 新能源汽车产业发展现状及策略 [J]. 产业创新研究, 2023(21): 42-44.
LIU Kaidi. Development status and strategy of new energy automobile industry [J]. Industrial Innovation, 2023(21): 42-44.

[5] 巩浩,钟洪伟,孙梦凯,等. 新能源电动汽车节能减排效应及发展 [J]. 能源与节能, 2023(12): 80-84.
GONG Hao, ZHONG Hongwei, SUN Mengkai, et al. Energy conservation and emission reduction effect and development of new-energy electric vehicles [J]. Energy and Energy Conservation, 2023(12): 80-84.

[6] LI Wei, CHENG Rongguo, GARG A, et al. Batteries boost the internet of everything: technologies and potential orientations in renewable energy sources, new energy vehicles, energy interconnection and transmission [J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2024, 37: 101273.

[7] 尹彪,段鹏飞. “双碳”背景下我国新能源汽车产业发展对策 [J]. 上海节能, 2023(8): 1048-1052.

- YIN Biao, DUAN Pengfei. Development strategies for China's new energy vehicle industry under background of "double carbon" [J]. Shanghai Energy Saving, 2023(8): 1048-1052.
- [8] 王品. 中国新能源汽车发展现状及对策建议 [J]. 汽车实用技术, 2024, 49(8): 187-191.
- WANG Pin. China's new energy vehicle development status and countermeasures suggestions [J]. Automobile Applied Technology, 2024, 49(8): 187-191.
- [9] REN Bo, LI Huajiao, LIU Xiaojie, et al. Identifying the decarbonization paths for new energy passenger cars in China [J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2024, 38: 101327.
- [10] 尤晓庆, 王士波, 董晓岚. 我国新能源商用车发展现状综述 [J]. 汽车文摘, 2023(12): 27-33.
- YOU Xiaoqing, WANG Shibo, DONG Xiaolan. Review on the development status of new energy commercial vehicles in China [J]. Automotive Digest, 2023 (12): 27-33.
- [11] 蔡浩浩, 徐晓美. 电动货车及其相关技术研究进展 [J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(5): 50-54.
- CAI Haohao, XU Xiaomei. Progress in research of electric trucks and related technologies [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2022, 60(5): 50-54.
- [12] DE PINTO S, CAMOCARDI P, CHATZIKOMIS C, et al. On the comparison of 2-and 4-wheel-drive electric vehicle layouts with central motors and single-and 2-speed transmission systems [J]. Energies, 2020, 13 (13): 3328.
- [13] DE CARLO M, MANTRIOTA G. Electric vehicles with two motors combined via planetary gear train [J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 148: 103789.
- [14] 马贺龙. 电动汽车双电机耦合驱动系统模式切换控制策略研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
- [15] AHMED S, AHMAD N, KHAN S, et al. Rotor Pole analysis of five-phase outer rotor field excited switched flux motor for in-wheel application [J]. Electrical Engineering, 2022, 104(6): 3983-3992.
- [16] TIAN Yang, ZHANG Nong, ZHOU Shilei, et al. Model and gear shifting control of a novel two-speed transmission for battery electric vehicles [J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 152: 103902.
- [17] TIAN Yang, WANG Zihao, JI Xiaoyu, et al. A concept dual-motor powertrain for battery electric vehicles: principle, modeling and mode-shift [J]. Mechanism and Machine Theory, 2023, 185: 105330.
- [18] NGUYEN C T, WALKER P D, ZHOU Shilei, et al. Optimal sizing and energy management of an electric vehicle powertrain equipped with two motors and multi-gear ratios [J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 167: 104513.
- [19] HONG Xianqian, WU Jinglai, ZHANG Nong, et al. The dynamic and economic performance study of a new Simpson planetary gearset based dual motor powertrain for electric vehicles [J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 167: 104579.
- [20] CAO Kaibin, HU Minghui, CHEN Shuang, et al. Dynamic torque coordination control of dual-motor all-wheel drive axles to suppress the longitudinal jerk of the vehicle [J]. Energy, 2024, 288: 129787.
- [21] FENG Lin, LIU Weibin, CHEN Xinwei, et al. Design and optimization of high-speed permanent magnet synchronous motors [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2741(1): 012032.
- [22] 顾思芸, 沈建新. 高速永磁同步电机解耦控制: 复矢量解耦及参数灵敏度分析 [J]. 微电机, 2023, 56(12): 17-24.
- GU Siyun, SHEN Jianxin. Decoupling control of high-speed PMSM: complex vector decoupling and parameter sensitivity analysis [J]. Micromotors, 2023, 56(12): 17-24.
- [23] 张忠元, 矫承轩, 桑涛, 等. 车身响应面模型参数的拉丁超立方采样仿真 [J]. 计算机仿真, 2021, 38(7): 123-127.
- ZHANG Zhongyuan, JIAO Chengxuan, SANG Tao, et al. Latin hypercube sampling simulation of response surface model parameters of vehicle body [J]. Computer Simulation, 2021, 38(7): 123-127.
- [24] 杨慧荣, 张洪良. 基于改进 NSGA-II 的电动汽车复合电源多目标参数优化 [J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(6): 580-584.
- YANG Huirong, ZHANG Hongliang. Multi-objective parameter optimization of electric car composite power supply based on improved NSGA-II algorithm [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2023, 21(6): 580-584.
- [25] ZUO Wei, LI Feng, LI Qingqing, et al. Multi-objective optimization of micro planar combustor with tube outlet by RSM and NSGA-II for thermophotovoltaic applications [J]. Energy, 2024, 291: 130396.

(编辑 陶晴)