# 考虑电机额定转矩低温升特性约束的电驱动多轴车辆转矩优化分配控制策略

曾鑫宇[1] 许世维[1,2*] 张小鹏[3] 贺晶晶[1] 魏路路[1] 李学博[1]
1.西安建筑科技大学机电工程学院,西安,710054
2.北京理工大学电动车辆国家工程研究中心,北京,100081
3.江麓机电集团有限公司,湘潭,411199

**摘要**:针对当前电驱动多轴车辆转矩分配难以兼顾经济性和可靠性的问题,提出一种考虑电机额定转矩低温升特性约束的电驱动多轴车辆转矩优化分配控制策略。该策略综合考虑驱动电机效率与温升特性,将电机转速-转矩关系表征的转矩分配修正因子引入优化目标,通过动态优化车辆驱动轴数和电机转矩,将电机工作转矩尽量约束在额定附近的高效率、低发热区域,实现效率与温升速率的最优平衡。硬件在环结果表明,CHTC-HT工况下所提转矩优化分配控制策略较传统的转矩平均分配控制策略能耗降低11.54%,单个电机绕组最高温度最多降低83.4 ℃;台架试验结果表明,NEDC_90工况下使用所提控制策略工况终点电池SOC值提高4.5%,1至4轴电机绕组温度降低3.7~78.6 ℃。该控制策略有效提高了多轴车辆的经济性和可靠性。

**关键词**:多轴车辆;电驱动系统;转矩分配;电机温升;电机效率
**中图分类号**:U463.2
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.08.026 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

# Torque Optimization Distribution Control Strategy for Electric Multi-axle Vehicles Considering the Low Temperature Rise Characteristic Constraint of Motor Rated Torque

ZENG Xinyu[1] XU Shiwei[1,2*] ZHANG Xiaopeng[3] HE Jingjing[1] WEI Lulu[1] LI Xuebo[1]
1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710054
2.National Engineering Research Center of Electric Vehicles, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081
3.JIANGLU Machinery Electronics Group Co., Ltd., Xiangtan, Hunan, 411199

**Abstract**: This paper proposes a torque optimal distribution control strategy for electrically driven multi-axle vehicles, considering the constraints of motor rated torque and low temperature rise characteristics, to address the trade-off between economy and reliability in conventional torque distribution methods. The strategy comprehensively accounts for the efficiency and temperature rise characteristics of the drive motors. A torque distribution correction factor, which is characterized by the motor speed-torque relationship, is incorporated into the optimization objective. The number of active drive axles and the torque of each motor are dynamically optimized to confine the operating torques as close as possible to the rated region, where high efficiency and low heat generation are achieved, thereby realizing an optimal balance between efficiency and temperature rise rate. Hardware-in-the-loop test results indicate that the proposed strategy reduces energy consumption by 11.54% compared with the conventional average torque distribution strategy under CHTC-HT conditions, and the maximum winding temperature of a single motor is reduced by up to 83.4 °C. Bench test results under NEDC_90 conditions show that the battery state of charge (SOC) at the end of the cycle is increased by 4.5% using the proposed strategy, and the winding temperatures of axles 1 to 4 are reduced by 3.7 to 78.6 °C. The proposed control strategy effectively improves both the economy and reliability of multi-axle vehicles.

**Key words**: multi-axle vehicle; electric drive system; torque distribution; motor temperature rise; motor efficiency

## 0 引言

电驱动多轴车辆具有控制灵活度高、传动链

**收稿日期**:2025-02-10
**基金项目**:国家自然科学基金(52002309);陕西省自然科学基础研究计划(2024JC-YBQN-0483, 2024JC-YBQN-0411)

短、结构紧凑、传动效率高、空间布置利用率高等特点[1]，成为大件货物、特殊货物运输的理想载具，近年来受到了越来越多研究者的关注。然而，由于多电机参与驱动，电驱动多轴车辆具有过驱动、多约束等特点，在车辆动力学控制、行驶经济性控制等方面仍面临理论与技术挑战。因此，如何针对电驱动多轴车辆的动力学特性来优化驱动转矩分配，已经成为电驱动多轴车辆控制领域亟待解决的问题。

现阶段关于多轴车辆转矩控制的研究大部分是围绕动力性和经济性进行的。LI等[2]通过驱动模式动态切换策略提高了轮毂电机工作效率，降低了整车能耗。乔帅鹏等[3]提出了一种基于电机系统效率最优的转矩分配控制策略，使得车辆经济性比驱动转矩平均分配策略提高了9.18%。JING等[4]提出了一种利用深度确定性策略梯度(deep deterministic policy gradient，DDPG)算法进行深度强化学习优化的转矩分配控制方法，优化了车辆在不同转向条件下的能量消耗。HUANG等[5]通过遗传算法离线优化四轴纯电商用车各轴转矩分配系数并生成在线查表的方法有效降低了能耗。WANG等[6]提出基于线性时变模型预测控制(model predictive control，MPC)的模糊协同控制方法，通过多目标协调算法有效缓解了人机操纵冲突，同时实现了车辆稳定性与能效的协同优化。LI等[7]建立非线性MPC的多轴电动车辆路径跟踪控制策略，结合梯度投影-增广拉格朗日快速求解算法，在跟踪目标路径的同时有效提高了车辆的安全性和稳定性。BAO等[8]针对12×12全轮驱动车辆提出一种基于HLQR的防滑控制策略，将滑移控制精度提高30%以上。LI等[9]提出了一种用于动态协调车辆高速稳定性和低速机动性的分层控制框架，提高了分布式多轴驱动车辆在各种工况下的综合性能。此外，HEALY等[10]提出的速度矢量算法能够根据不同的转向模式和车辆几何参数精确估计各电驱动轴的轮速和轴速，对提高车辆驱动性能、操纵稳定性及乘坐舒适性具有重要意义。

以上研究有效地提高了多轴车辆的经济性和动力性。然而，对于当前正处于大力发展阶段的分布式多轴车辆，现有研究仍存在一些不足。其中，电驱动多轴车辆由多个电机进行驱动，具有单轴驱动、两轴驱动以及多轴驱动等多种驱动模式。例如，在某些匀速行驶、小加速行驶等低负荷工况下就可以采用多种驱动模式满足车辆动力需求，当前部分研究者倾向于通过减少工作的驱动轴数、提高工作电机转矩负荷分配来提高车辆的经济性[11]，但在此过程中，某轴上电机的负载增大会造成电机发热增加，进而可能对驱动电机以及车辆工作状态和可靠性造成影响。因此，如何针对不同行驶工况下的动力需求，优化处于工作状态的驱动轴数以及对应轴上电机的转矩分配，实现车辆经济性最优的同时有效控制电机温升，是当前电驱动多轴车辆驱动控制领域的一个重要问题。

本文以提高电驱动多轴车辆经济性和可靠性为目的，通过分析不同转矩下永磁同步电机的效率和温升特性，提出了以电机转速、工作转矩、额定转矩、峰值转矩之间的关系表征的转矩分配修正因子，通过优化车辆小负荷时工作的驱动轴数和电机转矩分配控制策略，使得工作电机的转矩尽量接近具有效率和温升最佳平衡的额定转矩曲线，进而实现在提高多轴车辆工作效率的同时降低电机温升。

## 1　电驱动多轴车辆模型的构建

### 1.1　电驱动五轴车辆构型简介

本文研究的电驱动多轴车辆动力系统构型如图1所示。该车辆的能量模块由一组发动机-发电机(APU)与动力电池模组并联构成，经由一体化能源平台整合供能；其驱动系统由10个带有单级减速齿轮的电动轮组成，并且每一个车桥上的左右两个电动轮由一个双通道矢量控制架构控制器控制，构成了5个控制器、10×10形式的分布式五轴驱动构型。车辆的主要结构参数见表1。

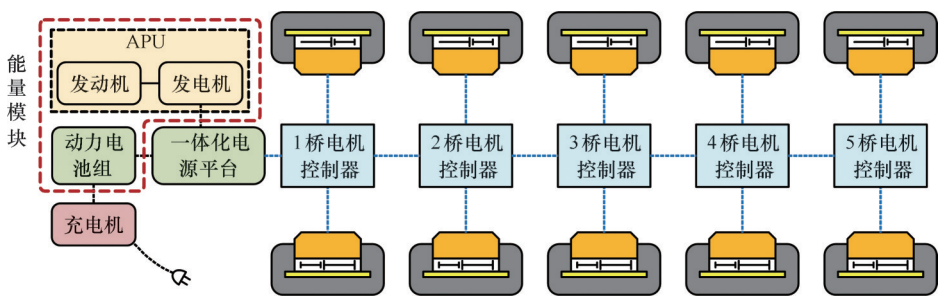



**图1　电驱动五轴车辆驱动构型**

**Fig.1　Electric drive five-axis vehicle drive configuration**

表1 车辆主要结构参数

Tab.1 Main structural parameters of the vehicle

| | | |
|---|---|---|
| 车辆参数 | 整备质量/kg | 19 000 |
| | 满载质量/kg | 47 000 |
| | 风阻系数 | 0.85 |
| | 迎风面积/$m^2$ | 7.62 |
| | 轮胎滚动半径/m | 0.59 |
| | 滚动阻力系数 | 0.016 |
| | 轮边减速器减速比 | 10.81 |
| | 各轴到1轴距离/m | 0/2.3/6.7/9.1/11.5 |
| | 最大速度/(km·$h^{-1}$) | 90 |
| 驱动电机(10组) | 最大功率/kW | 110 |
| | 额定功率/kW | 80 |
| | 最大转矩/(N·m) | 1200 |
| | 最大转速/(r·$min^{-1}$) | 5000 |
| 发动机 | 额定功率/kW | 551 |
| | 额定转速/(r·$min^{-1}$) | 1800 |
| 发电机 | 额定功率/kW | 350 |
| | 额定转速/(r·$min^{-1}$) | 1500 |
| 动力电池 | 最大容量/(A·h) | 196 |
| | 额定电压/V | 591.3 |
| | 最大电流/A | 250 |

### 1.2 整车及其动力驱动系统建模

根据本文研究重点建立的整车及各动力系统部件的模型主要包括轴荷模型、整车纵向动力学模型、驱动电机模型和动力电池组模型。

轴荷模型的建立引入了外心距$R_0$,利用簧载质量系统进行受力分析,基于车体绕簧外瞬心振动的假设,建立了多轴车辆的簧载质量系统负荷分配计算模型:

$$F_{z_i}=\left(1-\frac{l-l_i}{R_0}\right)\frac{C_i}{C}P \tag{1}$$

式中:$F_{z_i}$为第$i$轴的垂向载荷;$l$为质心面至第1簧(轴)的距离;$l_i$为各簧(轴)至第1弹簧(轴)的距离;$R_0$为簧(轴)外瞬心到质心面的距离,简称外心距;$C_i$为各簧(轴)线刚度;$C$为组合线刚度,即簧载质量系统中各簧(轴)线刚度换算到系统簧载质量质心面处的等效线刚度;$P$为整车负荷(悬挂质量负荷)。

整车纵向动力学模型描述为

$$M\dot{v}=F_t-F_b-F_r \tag{2}$$

式中:$M$为车重;$v$为车速;$F_t$为总的车轮驱动力;$F_b$为制动力;$F_r$为车辆行驶过程中需要克服的各种行驶阻力之和。

$F_t$和$F_r$的详细表达式为

$$\left.\begin{aligned}F_t&=\frac{i_0\eta_0}{R_{wh}}\sum_{i=1}^{5}\sum_{j=1}^{2}T_{m_{i,j}}\\F_r&=F_f+F_w+F_i\\F_f&=Mgf_r\cos\theta\\F_w&=\rho C_D A v^2/2\\F_i&=Mg\sin\theta\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中:$i_0$为轮边减速器减速比;$\eta_0$为轮边减速器传动效率;$T_{m_{i,j}}$为第$i$轴左(右)驱动电机输出力矩,$j=1$为左电机,$j=2$为右电机;$R_{wh}$为车轮滚动半径;$g$为重力加速度,本文取9.81 m/$s^2$;$f_r$为路面滚动阻力系数;$\theta$为道路坡度;$\rho$为空气密度;$C_D$为风阻系数;$A$为车辆迎风面积。

动力电池模型用于求解电池荷电状态(state of charge,SOC),本文采用等效内阻模型建模,计算公式为

$$S_{soc}=\frac{U_{oc}-\sqrt{U_{oc}^2-4R_{int}P_b}}{2R_{int}Q_b} \tag{4}$$

式中:$U_{oc}$为电池组开路电压;$R_{int}$为电池组充/放电内阻;$P_b$为电池组功率;$Q_b$为动力电池组最大容量。

驱动电机模型采用实验建模法,通过相关台架实验得到转速-转矩-效率数据,整理后获得电机万有特性图,如图2所示。根据电机的转速和转矩通过查表可以得到电机效率值及外特性转矩,具体的模型为

$$\left.\begin{aligned}T_{m_{i,j}}^{rated}&=f_1(n_{m_{i,j}})\\T_{m_{i,j}}^{max}&=f_2(n_{m_{i,j}})\\\eta_{m_{i,j}}&=f_3(n_{m_{i,j}},T_{m_{i,j}})\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

式中:$T_{m_{i,j}}^{max}$为第$i$轴左(右)电机峰值转矩;$T_{m_{i,j}}^{rated}$为第$i$轴左(右)电机额定转矩;$\eta_{m_{i,j}}$为第$i$轴左(右)电机效率;$n_{m_{i,j}}$为第$i$轴左(右)电机转速。

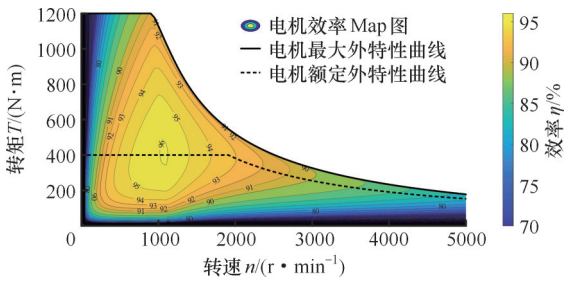



图2 电机万有特性图

Fig.2 Motor universal characteristic diagram

对于目标车辆,假定它在直线行驶时同一轴上两侧电机转速相同、转矩相等。其中,单个电机功率与电机转速、转矩以及效率之间的关系为

$$P_{m_{i,j}}=\begin{cases}T_{m_{i,j}}\omega_{m_{i,j}}/\eta_{m_{i,j}} & T_{m_{i,j}}>0\\T_{m_{i,j}}\omega_{m_{i,j}}\eta_{m_{i,j}} & T_{m_{i,j}}\leqslant 0\end{cases} \tag{6}$$

式中:$P_{m_{i,j}}$为第$i$轴左(右)电机功率;$\omega_{m_{i,j}}$为第$i$轴左(右)电机角速度。

## 2 永磁同步电机效率与温升特性分析

### 2.1 基于集总参数热网络法的永磁同步电机热模型构建

针对目标车辆搭载的液冷永磁同步轮毂电机,本节构建了集成冷却系统的65节点热网络模型,以实现电机温度的动态估计。模型综合考虑铜损、铁损、永磁体涡流损耗及机械损耗等关键热

源作用，各损耗分量计算方法如下。

1）铜耗计算时忽略占比较小的交流损耗，只考虑直流损耗对发热的影响，其计算公式如下：

$$P_{Cu}=mI^2R_s \tag{7}$$

其中，$m$为PMSM绕组相数；$I$为绕组相电流有效值；$R_s$为每相绕组的有效电阻值，其阻值与材料的温度特性相关，具体可由下式计算：

$$R_s=R_{s0}[1+\alpha(T_W^*-T_0)] \tag{8}$$

式中：$R_{s0}$为温度$T_0$时的电阻；$\alpha$为电阻的温度系数；$T_W^*$为绕组的瞬时温度。

2）铁耗计算采用的是改进的Steinmetz方法，计算模型表示为

$$P_{Fe}=K_h f B^{\alpha+\beta B}+2\pi^2 K_{eddy} f^2 B^2 \tag{9}$$

式中：$K_h$为磁滞损耗系数；$f$为频率；$B$为磁通密度；$K_{eddy}$为一个经验参数，可以通过实验或数值拟合得到，其值取决于磁芯材料的特性和激励波形的形状；$\alpha$为磁滞损耗指数。

3）永磁体涡流损耗因受3D效应的影响而难以获得精确解，通常需要借助经验公式近似计算，本文采用的计算公式如下：

$$P_m=\frac{L_a V K_m^2 f_b B_m L_b^2}{12\sigma_1(L_a+L_b)} \tag{10}$$

式中：$L_a$为永磁体轴向长度；$V$为永磁体的体积；$K_m$为电动势比例系数；$f_b$为磁场的交变频率；$L_b$为永磁体在充磁方向上的长度；$\sigma_1$为钕铁硼的电导率。

4）机械损耗计算模型中忽略了滚珠轴承摩擦损耗[12]，主要考虑转子的风磨损耗：

$$P_f=aC_f\rho_0\pi\omega_m^3 r^4 L \tag{11}$$

式中：$a$为转子铁心表面粗糙度，表面光滑时取1；$C_f$为摩擦因数；$\rho_0$为周围气体的密度；$\omega_m$为转子旋转的角速度；$r$为转子半径；$L$为转子轴向长度。

在此基础上，针对图3所示的内转子永磁同步轮毂电机，采用集总参数热网络（lumped parameter thermal network，LPTN）法建立相应的电机温升模型。如图3c所示，其求解域在轴向上具有明显的区域特征，可划分为前端区域（F）、主体和后端区域（R），且呈现轴向对称分布形式。基于此几何特征，本模型采取1/2对称建模策略，首先，根据电机的物理结构将电机温度场初步划分为定子铁芯、绕组、永磁体、转子、机壳、端盖、气隙等子区域。其次，考虑到局部温升影响、材料热物性以及散热特性，将电机转轴、转子内部、永磁体、转子表面、气隙、定子齿尖、定子齿根、有效绕组、端部绕组、定子轭部、电机壳体、冷却水套等电机关键组成部分从轴向和径向两个维度进一步细化[13]。最终，以各子区域几何结构中心为温度节点，构建了图4所示的温度节点。该节点布置充分考虑了定子铁芯、绕组、永磁体、转子铁芯等关键部位，且涵盖了轴向和径向两个维度的主要传热路径，能够准确表征电机内部各关键部件的空间关联。在保证计算精度的同时显著降低了模型复杂度。

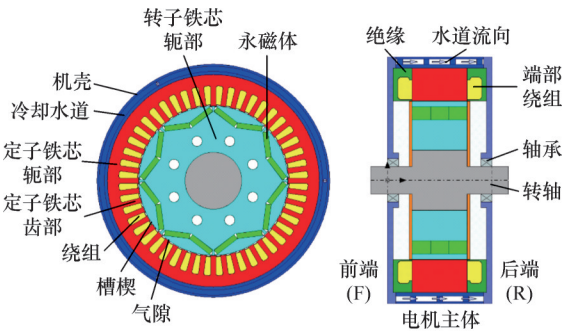



**图3　内转子永磁同步轮毂电机结构示意图**

**Fig.3　Schematic diagram of the structure of inner rotor permanent magnet synchronous hub motor**

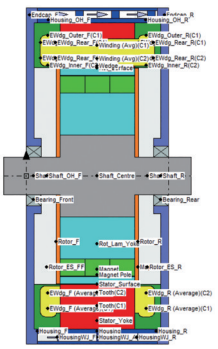


**图4　内转子永磁同步轮毂电机节点分布示意图**

**Fig.4　Schematic diagram of node distribution of inner rotor permanent magnet synchronous hub motor**

基于图4所示的节点分布，根据各相邻部件之间的物理关系，如物理接触部件（如定子铁心与绕组）通过接触热导连接，流体通道相邻节点（如冷却水道与定子外壳）采用对流换热热阻连接，引入对应的传热或散热热阻，并将上述计算得到的各损耗分配到热网络模型的相应节点，作为热源输入。最终基于Motor-CAD电机热仿真平台构建了图5所示的热网络模型。其中，热网络模型中各节点符号意义见表2和表3。

热网络模型中各节点质量热容$C$可根据基本

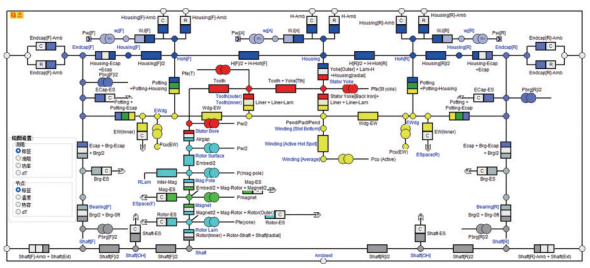


**图5　65节点热网络模型概览**

**Fig.5　Overview of the 65-node thermal network model**

表2 各节点颜色对应的部件

Tab.2 The components corresponding to each node color

| 颜色 | 部件名称 | 颜色 | 部件名称 |
|---|---|---|---|
| | 环境温度 | | 气隙 |
| | 水套 | | 永磁体 |
| | 机壳 | | 转子 |
| | 绕组 | | 轴承 |
| | 定子铁芯 | | 转轴 |

表3 各节点形状对应的物理意义

Tab.3 The physical meaning of different node shapes

| 形状 | 物理意义 |
|---|---|
| | 热源 |
| | 节点 |
| | 节点本身热阻 |
| | 传导热阻 |
| C | 对流热阻 |
| R | 辐射热阻 |
| | 无物理连接标识 |
| | 流体节点(箭头表示流体流动方向) |

传热学理论进行计算[14],计算公式为

$$C=\rho V c_p \tag{12}$$

式中:$\rho$为物体密度;$V$为物体体积;$c_p$为物体的质量定压热容。

电机内传热过程主要分为热传导和对流散热,对应的热阻为传导热阻和对流散热热阻,分别表示为

$$\left.\begin{aligned} R_{tc}&=\frac{l_d}{\kappa A_{tc}}\\ R_{hc}&=\frac{1}{hA_{hc}}\end{aligned}\right\} \tag{13}$$

式中:$R_{tc}$为热传导热阻;$l_d$为两个节点之间的距离;$\kappa$为材料热导率;$A_{tc}$为传导区域的面积;$R_{hc}$为热对流热阻;$h$为对流传热系数;$A_{hc}$为热对流区域的面积。

此外,为进一步提高电机热模型温度估计的准确性,本文基于Simscape多物理场耦合建模平台构建了具有闭环反馈机制的永磁同步电机液冷系统,以模拟车辆运行过程中驱动电机的散热情况。具体模型如图6所示。

该模型将液冷系统的工作过程分为以下两个步骤:①冷却剂与冷却管道壁之间的热交换;②冷却管道壁与外部环境之间的热交换。具体模型如下:

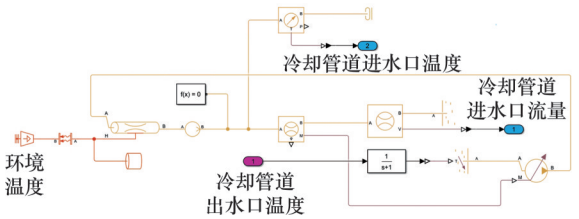



图6 基于Simscape的电机液冷系统模型

Fig.6 Motor liquid cooling system model based on simscape

$$\left.\begin{aligned} Q_H&=Q_{conv}+\frac{kS_H}{D}(T_H-T)\\ Q_{env}&=kA_{cool}(T_A-T_B)\end{aligned}\right\} \tag{14}$$

式中:$Q_H$为冷却剂与管壁之间的净热流速率;$Q_{conv}$为非零流速下的对流部分热流速率;$k$为传热系数;$D$为管道的液压直径;$S_H$为管壁表面积,等于管道周长与长度的乘积;$T_H$为管壁温度;$Q_{env}$为管壁与环境之间的热流速率;$A_{cool}$为管壁表面积;$T_A$、$T_B$为两个物体的温度,分别表示管壁温度与环境温度。

## 2.2 不同驱动工况下电机效率与温升特性分析

作为永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)的关键热源之一,定子绕组的热状态对电机的温升有着直接的影响,且直接影响着电机绝缘材料寿命和运行安全等电机可靠性方面的关键性能[15-17]。对于电动车辆的驱动电机,持续转矩和峰值转矩是两个代表性工况,分别代表车辆在长时间运行和大负载运行情况下电机的工作状态。通过分析不同车速下驱动电机在峰值、额定转矩等转矩工作点的效率及温升变化规律,可以有效地反映大部分工况下电机的效率与温升特性。

本研究选取三个特征转速段(低速区、中高速区、高速区)分别对应的低转矩、额定转矩、峰值转矩共9个典型工况点(图7和表4),可有效覆盖驱动电机在城市道路、高速公路及急加速等典型场景下的运行状态。其中,表4所展示的定子绕组最大稳态温度是通过ANSYS Motor-CAD电机

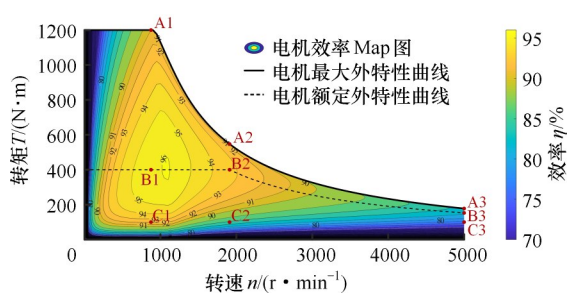



图7 电机工作点示意图

Fig.7 Motor operating point diagram

表4　电机工作点分布统计

Tab.4　Motor operating point distribution statistics

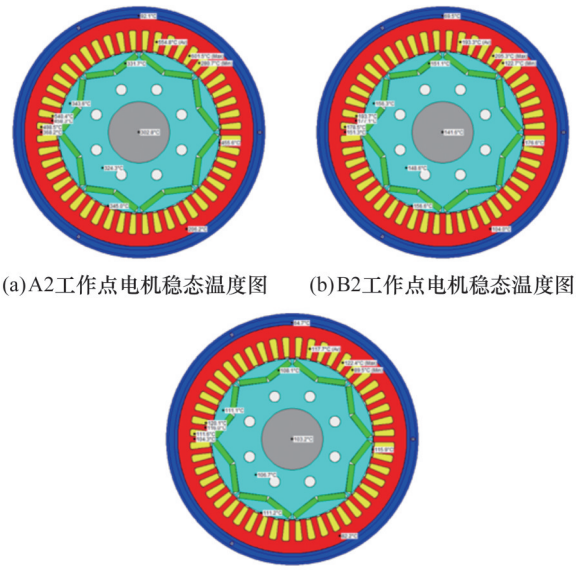
| 工作点 | 转速/(r·min$^{-1}$) | 转矩/(N·m) | 效率/% | 定子绕组最大稳态温度/℃ |
|---|---|---|---|---|
| A1 | 875 | 1200 | 91.01 | ＞180(烧毁) |
| B1 | | 400 | 95.72 | 92.3 |
| C1 | | 100 | 92.1 | 69.2 |
| A2 | 1910 | 547.5 | 90.77 | ＞180(烧毁) |
| B2 | | 400 | 93.3 | ＞180(烧毁) |
| C2 | | 100 | 85.58 | 122.4 |
| A3 | 5000 | 177.8 | 82.8 | ＞180(烧毁) |
| B3 | | 152.8 | 82.48 | ＞180(烧毁) |
| C3 | | 100 | 77.27 | ＞180(烧毁) |

热仿真软件得出的，通过模拟电机正常工作条件下运行一段时间后各项影响因素(如电流、环境温度等)都达到平衡时的温度。

低速、高转矩工作点A1通常对应的是车辆爬坡等整车需求转矩较大的工况，此时电机处于过载状态，绕组中电流需求较大，易导致高温，在制定转矩分配控制策略时应该尽量避免电机长时间工作于该点附近。此外，参考表4中本文列举出的电机低速状态下的A1、B1、C1工作点，位于额定转矩附近的B1工作点电机效率最高，且定子绕组最大稳态温度在安全阈值内，而峰值转矩工作点A1和低转矩工作点C1则会存在定子绕组温度太高或电机效率较低等问题，因此，电机在额定转矩附近工作时具有较优的效率和温升特性。

作为电机运行常态的中高转速工况，根据图8a，利用Motor-CAD软件热仿真结果，电机绕组在该工况下的理论热平衡温度可达601.5 ℃，远超绝缘材料耐温极限，实际运行中当温度超过其最大绝缘温度(本文所使用电机的绕组绝缘材料最大绝缘温度为180 ℃)时，绝缘失效将导致绕组短路，从而终止温升过程。对比同转速下不同转矩工况，若电机工作点接近额定转矩，其稳态温升将大幅减小，B2工作点电机稳态温度图见图8b，此时绕组最大稳态温度为205.3 ℃，较峰值转矩工作点温度下降明显。如图8c所示，电机在低扭工况下，虽然绕组最大稳态温度为122.4 ℃，是本文列举的该转速下3个工作点中最低的，但其效率也是最低的。

此外，当电机进入高转速工作区域时，电机峰值转矩输出特性呈现显著的非线性衰减。此时引起电机发热的主要原因是与转速更为密切的铁损。尽管本文列举的A3、B3、C3工作点的电机绕组最大稳态温度均突破了180 ℃的绝缘阈值，但其瞬态热特性存在本质差异。由图9所示的温升



(a)A2工作点电机稳态温度图　(b)B2工作点电机稳态温度图

(c)C2工作点电机稳态温度图

图8　电机稳态温度图

Fig.8　Motor steady state temperature diagram

曲线可以看出，同样设定以电机定子绕组最大绝缘温度为限制，当负载从C3提高至A3时，热失效时间由353.23 s缩短至251.85 s，电机定子绕组部分更容易达到限制温度。因此，在额定转矩曲线与峰值转矩曲线范围内，电机温升速率与电机转矩成正相关效应，故对于多电机驱动的多轴车辆，可以通过制定合理的转矩分配策略降低该工作范围内的转矩负载来减缓电机的温升速率，从而提高电驱动系统的效率和可靠性。

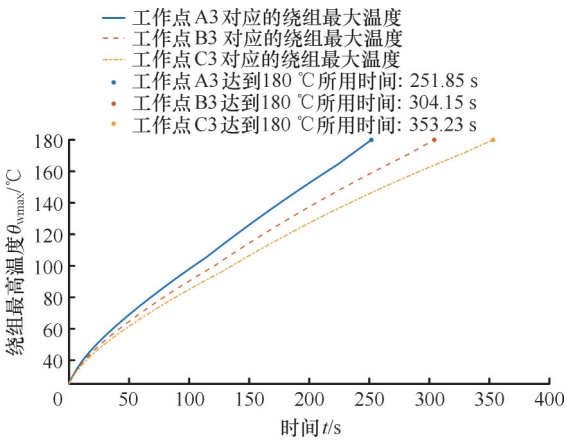



图9　高转速各工作点绕组最高温度瞬态热分析

Fig.9　Transient thermal analysis of the maximum winding temperature at various operating points at high speed

综上所述，额定转矩工况在效率-温升协同优化方面具有显著优势，制定驱动转矩分配控制策略时可以通过控制电机的工作点使其在额定转矩附近运行，不仅能够显著提高电机的运行效率，还能够有效降低电机的稳态温升速率，提高电机的工作时长和稳定性。

## 3 考虑电机额定转矩低温升、高效率特性约束的电驱动多轴车辆转矩优化分配控制策略

本文提出的驱动转矩优化分配控制策略的工作流程如图10所示。

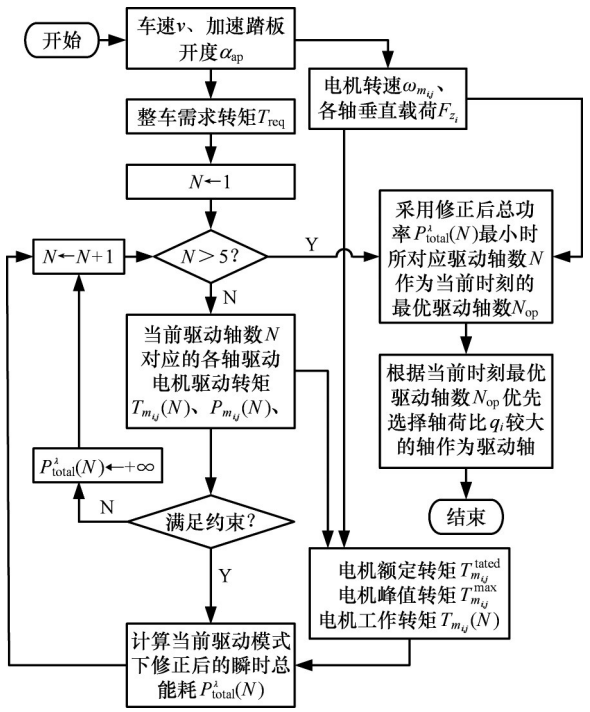



**图10 转矩优化分配控制策略工作流程图**

**Fig.10 Torque optimization distribution control strategy workflow diagram**

1)根据加速踏板开合程度$\alpha_{ap}$、车速$v$求解整车需求转矩$T_{req}$及电机转速$\omega_{m_{i,j}}$,其中,假设总需求转矩与加速踏板开合程度之间成线性关系,则整车需求转矩可由下式计算:

$$T_{req}=\alpha_{ap}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{2}T^{max}_{m_{i,j}}(\omega_{m_{i,j}}) \tag{15}$$

式中:$\alpha_{ap}\in[0,1]$为加速踏板开度;$T_{req}$为总需求驱动转矩;$T^{max}_{m_{i,j}}(\omega_{m_{i,j}})$为转速$\omega_{m_{i,j}}$下第$i$轴左(右)电机对应的峰值转矩;$N=1,2,\cdots,5$为驱动轴数;$j=1$为左电机,$j=2$为右电机。

2)根据当前时刻整车需求驱动转矩$T_{req}$,分别求解驱动轴数$N=1,2,\cdots,5$时各驱动电机对应的驱动转矩$T_{m_{i,j}}(N)$,并计算对应的功率$P_{m_{i,j}}(N)$。具体表达式如下:

$$T_{m_{i,j}}(N)=T_{req}/(2N) \tag{16}$$

$$P_{m_{i,j}}(N)=\omega_{m_{i,j}}T_{m_{i,j}}(N)\eta_{m_{i,j}} \tag{17}$$

式中:$T_{m_{i,j}}(N)$、$P_{m_{i,j}}(N)$分别为$N$个轴驱动时单个电机的输出转矩、输出功率。

3)从工程实现角度出发,以电机转速、工作转矩、额定转矩、峰值转矩之间的关系表征转矩分配修正因子$\lambda$,得到修正后的电驱动系统功率$P^{\lambda}_{total}(N)$。具体表达式为

$$P^{\lambda}_{total}(N)=\begin{cases}\dfrac{T_{m_{i,j}}(N)-T^{rated}_{m_{i,j}}(\omega_{m_{i,j}})}{T^{max}_{m_{i,j}}(\omega_{m_{i,j}})-T^{rated}_{m_{i,j}}(\omega_{m_{i,j}})} & T_{m_{i,j}}(N)\geqslant T^{rated}_{m_{i,j}}(\omega_{m_{i,j}})\\ \dfrac{T^{rated}_{m_{i,j}}(\omega_{m_{i,j}})-T_{m_{i,j}}(N)}{T^{rated}_{m_{i,j}}(\omega_{m_{i,j}})} & T_{m_{i,j}}(N)<T^{rated}_{m_{i,j}}(\omega_{m_{i,j}})\end{cases} \tag{18}$$

$$P^{\lambda}_{m_{i,j}}(N)=\lambda P_{m_{i,j}}(N) \tag{19}$$

4)分别计算驱动轴数$N=1,2,\cdots,5$时对应的修正后的整车电驱动系统总功率$P^{\lambda}_{total}(N)$,选择使修正后总功率$P^{\lambda}_{total}(N)$最小的驱动轴数$N$作为当前时刻车辆驱动模式,该驱动模式下对应的驱动转矩$T_{m_{i,j}}(N)$作为电机输出转矩。具体表达式为

$$P^{\lambda}_{total}(N)=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{2}\frac{\lambda T_{m_{i,j}}(N)\omega_{m_{i,j}}}{\eta_{m_{i,j}}} \tag{20}$$

式中:$P^{\lambda}_{total}(N)$为$N$个轴驱动时电机输出的修正后的总功率。

5)根据车辆各轴垂直载荷$F_{z_i}$优先选择轴荷比$q_i$较大的车轴作为驱动轴[18],即

$$q_i=\frac{F_{z_i}}{mg}=\left(1-\frac{l-l_i}{R_0}\right)\frac{C_i}{C} \tag{21}$$

式中:$q_i$为第$i$轴的轴荷比,即第$i$轴上的法向反作用力与车辆重力的比值。

此外,在上述寻优过程中,为保证动力系统平稳运行,需要满足以下基本物理约束:

1)为保证动力性,分配至各轴驱动电机上的驱动转矩应该等于当前时刻整车需求驱动转矩,即

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{2}T_{m_{i,j}}=T_{req} \tag{22}$$

2)分配至各轴驱动电机上的驱动转矩不得超过其最大外特性限制,否则将是无意义的[19],即

$$\left.\begin{aligned}&0\leqslant\omega_{m_{i,j}}\leqslant\omega^{max}_{m_{i,j}}\\&0\leqslant T_{m_{i,j}}(\omega_{m_{i,j}})\leqslant T^{max}_{m_{i,j}}(\omega_{m_{i,j}})\end{aligned}\right\} \tag{23}$$

3)为避免轮胎打滑等问题,应当保证各轴驱动电机提供给轮胎的驱动力不超过地面提供的最大附着力,否则会出现轮胎打滑等问题,即

$$\frac{1}{2}F_{z_i}\varphi\geqslant F_{t_{i,j}}=i_0\eta_0T_{m_{i,j}}/R_{wh} \tag{24}$$

式中:$\varphi$为路面附着系数;$F_{t_{i,j}}$为$i$轴左(右)轮胎驱动力。

4)求解过程要满足能量源物理特性限制,具体约束条件如下:

$$\left.\begin{aligned}&P^{min}_{b}\leqslant P_b\leqslant P^{max}_{b}\\&I^{min}_{b}\leqslant I_b\leqslant I^{max}_{b}\\&U^{min}_{b}\leqslant U_b\leqslant U^{max}_{b}\\&S^{min}_{soc}\leqslant S_{soc}\leqslant S^{max}_{soc}\end{aligned}\right\} \tag{25}$$

最终,根据以上内容得到优化模型如下:

$$\left.\begin{aligned}
&\min_{N} \quad P^{\lambda}_{\text{total}}(N)=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{2}\frac{\lambda T_{m_{i,j}}(N)\omega_{m_{i,j}}}{\eta_{m_{i,j}}}\\
&\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{2}T_{m_{i,j}}=T_{\text{req}}\\
&\qquad T_{m_{i,j}}\leqslant\frac{F_{z_i}\varphi R_{\text{wh}}}{2i_0\eta_0} \qquad 0\leqslant n_{m_{i,j}}\leqslant n_{m_{i,j_\max}}\\
&\qquad 0\leqslant T_{m_{i,j}}(n_{m_{i,j}})\leqslant T_{m_{i,j_\max}}(n_{m_{i,j}})\\
&\qquad P_{\text{b_min}}\leqslant P_{\text{b}}\leqslant P_{\text{b_max}} \qquad I_{\text{b_min}}\leqslant I_{\text{b}}\leqslant I_{\text{b_max}}\\
&\qquad U_{\text{b_min}}\leqslant U_{\text{b}}\leqslant U_{\text{b_max}} \qquad S^{\min}_{\text{soc}}\leqslant S_{\text{soc}}\leqslant S^{\max}_{\text{soc}}
\end{aligned}\right\} \tag{26}$$

由以上数学模型可以求出所有可行工况点下的最优驱动模式，在降低电驱动系统能耗的同时尽可能使各电机工作点分布在额定曲线附近，提高车辆经济性和安全性。

## 4　仿真与试验结果

### 4.1　硬件在环仿真结果分析

为验证本文控制策略的计算实时性以及在实车硬件环境应用下的控制效果，在前文建模工作的基础上搭建了图11所示的硬件在环仿真(hardware-in-the-loop，HiL)测试平台。该平台主要由宿主机、Speedgoat实时仿真系统以及搭载了MPC5744P微控制器的RapidECU-U3H整车控制器(vehicle control unit，VCU)三部分组成。其中，宿主机主要用于运行基于MATLAB/Simulink搭建的五轴电驱动车辆动力学模型，通过Ethernet网络通信将编译后的实时仿真模型部署至Speedgoat实时仿真系统，实现车辆动力学模型的实时仿真运行，为VCU的闭环测试提供车辆运行的实时参数反馈。同时，本文控制策略同样在MATLAB/Simulink环境下编写，并通过快速代码生成技术将其部署到VCU。VCU与实时仿真机通过CAN总线建立双向通信链路，实现控制信号和车辆状态信号的实时传输。其处理器与基本参数信息记录在表5中。




**图11　硬件在环仿真系统**

**Fig.11　Hardware-in-the-loop simulation system**

针对电驱动多轴车辆驱动转矩优化分配控制策略的综合性能验证，本文选择中国重型商用车循环工况(CHTC-HT)作为仿真工况。如图12所示，该工况涵盖低速、中速和高速三个速度区间，可以全面且准确地反映中国道路环境下车辆的多种行驶工况。此外，为了直观体现本文控制策略的性能，将常用的驱动转矩平均分配控制策略、驱动转矩最优平均分配控制策略(基于瞬时能耗最优的驱动转矩平均分配控制策略)作为对比组，从电机工作点分布、能耗及温升三个方面进行定量化对比与分析。

**表5　整车控制器处理器基本参数**

**Tab.5　Basic parameters of vehicle controller processor**

| 处理器 | 参数 |
|---|---|
| 主处理器 | MPC5744P，32位，双核，主频160 MHz，硬件浮点单元，ISO26262 |
| 存储器 | Flash 2.5 MB，RAM284 KB，EEPROM 64 KB |
| CAN | 3路，符合CAN2.0B，ISO11898 |
| 程序刷写 | 基于CAN总线的Bootloader |
| 功能安全 | ASIL D |

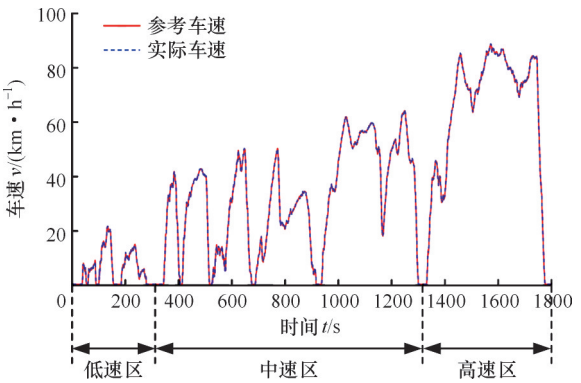


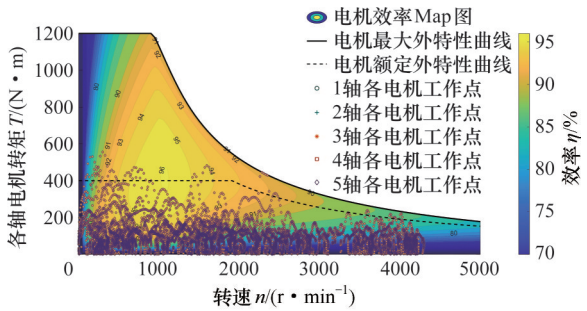

**图12　CHTC-HT工况特征图**

**Fig.12　CHTC-HT working condition characteristic diagram**

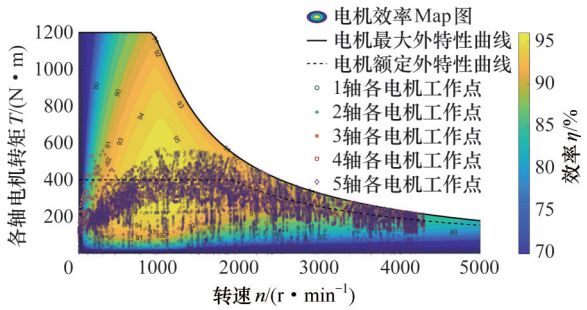
1)工作点分布对比与分析。为了有效体现采取不同驱动转矩分配控制策略下的电机工作点分布状况，本文以0.1 s的采样时间记录了车辆行驶在CHTC-HT工况下的各电机工作点，其中，剔除了各驱动电机处于非工作状态下的零转矩数据点。最终得到图13所示的三种不同驱动转矩分配控制策略下的电机工作点分布情况示意图。

由图13a可知，在传统驱动转矩平均分配控制策略下，10台驱动电机始终处于相同的转速和转矩状态，且大多数工作点分布于低效率区域。相较而言，图13b所示的驱动转矩最优平均分配控制策略与图13c所示的本文控制策略均显著提高了工作点在高效率区域的集中度。这是因为当整车需求转矩较小时，会优先使用较少的驱动轴进行驱动，从而提高单个电机的驱动效率，降低整车电驱动系统能耗。并且，随着整车需求转矩的变化，驱动轴数的选择也会相应变化，使得电驱动系统始终以最经济的模式运行。

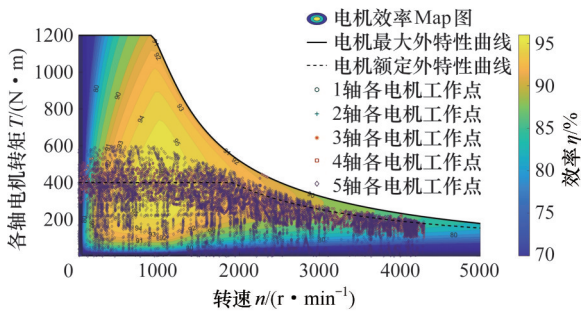
此外，进一步对比图13b与图13c可发现，驱动转矩最优平均分配控制策略虽能提高系统效率，但会导致在车辆高速行驶所对应的驱动电机




(a)转矩平均分配控制策略下电机工作点分布




(b)转矩最优平均分配控制策略下电机工作点分布




(c)本文控制策略下电机工作点分布

**图13 不同转矩分配策略下电机工作点分布情况示意图**

**Fig.13 Schematic diagram of motor operating point distribution under different torque distribution strategies**

高转速工况下较多的工作点处于峰值转矩，加重了处于工作状态电机的损耗发热，进而可能会导致电机可靠性和寿命的下降。而本文控制策略通过引入转矩分配修正因子$\lambda$，使其更集中于额定转矩附近，能够避免达到高速峰值转矩所带来的缺点。

采取本文控制策略时，能够有效地将电机工作点限制在额定工作点附近的高效率区域，使得工作点具有更优的分布集中性，降低电机工作在峰值转矩附近的概率。

2)能耗对比与分析。在整车电驱动系统能耗方面，图14、图15结果表明，在CHTC-HT标准工况循环结束时，采取本文控制策略时电驱动系统累计能耗为231 678 kJ，较传统驱动转矩平均分配控制策略减少30 248 kJ，降低11.54%，同时，工况终点SOC值为44.7%，提高7.5%。与驱动转矩最优平均分配控制策略相比，工况终点SOC值微降0.2%，总能耗增加1101 kJ，增幅仅为0.48%，该差异主要源于本文控制策略在保持电机热管理性能优势的同时难以避免地错过最佳效率工作点，但能耗水平仍与最优平均分配控制策略保持同一量级，证明其节能效果也十分显著。

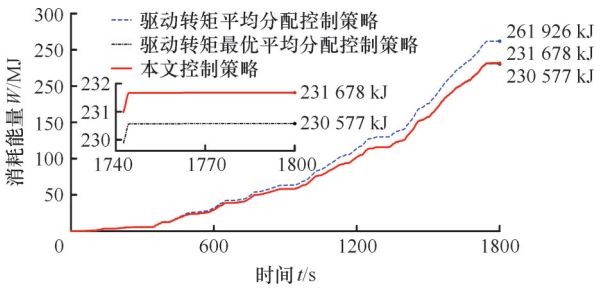



**图14 各控制策略能耗对比**

**Fig.14 Comparison of energy consumption of various control strategies**

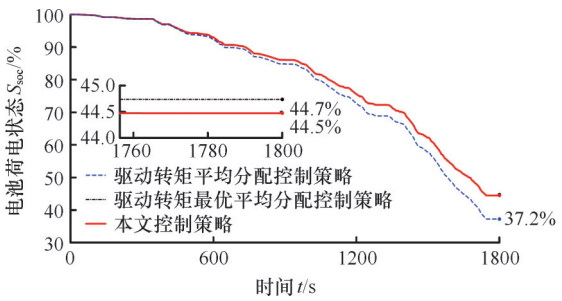


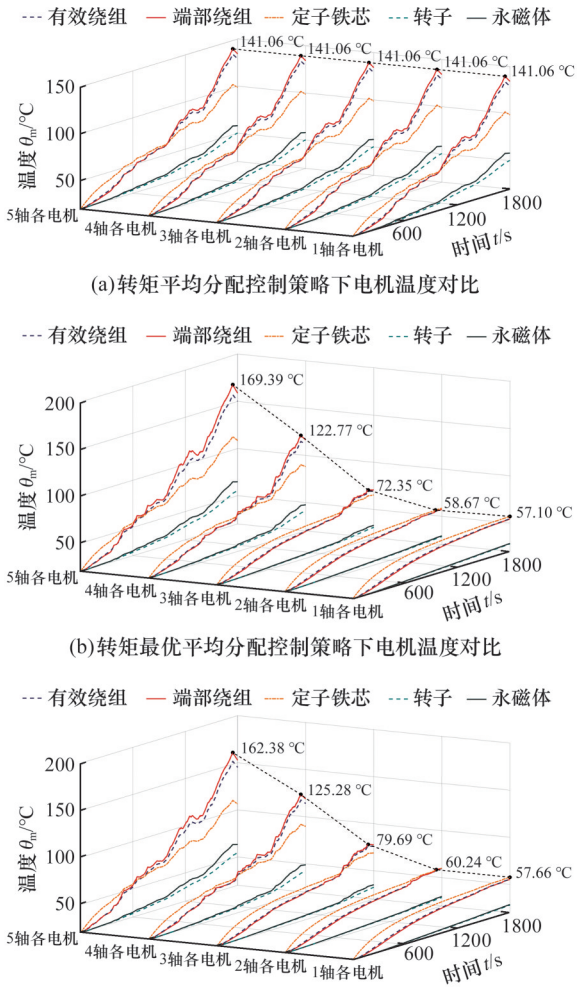

**图15 各控制策略SOC对比**

**Fig.15 SOC comparison of various control strategies**

3)电机主要温升部件温升对比与分析。CHTC-HT循环工况下不同控制策略对电驱动多轴车辆各驱动电机关键温升部件(有效绕组、端部绕组、定子铁芯、转子及永磁体)的温度影响规律如图16所示，图中特别标注了各驱动轴电机的峰值温度分布。

数据显示，传统的驱动转矩平均分配控制策略导致各驱动电机呈现相同的温升特征，其中端部绕组作为主要热源部位，其最高温度达到141.06 ℃。当采取驱动转矩最优平均分配控制策略和本文控制策略时，电机温度依次为5轴最高，其次是4轴，再次为3轴、2轴和1轴。这种温度梯度分布源于车辆动力学约束条件下的转矩再分配机制，在为了充分利用轮胎-地面附着力的目标下，控制算法会动态调整转矩分配权重，使负荷较大的驱动轴承受更高的功率输出，进而导致该轴驱动电机产生更显著的热积累现象。其中，在最优平均分配控制策略下，5轴驱动电机端部绕组温度达到169.39 ℃，较基准策略升高28.33 ℃，4轴对应部位温度为122.77 ℃，其余各轴电机温度较低。

当采取本文控制策略时，5轴驱动电机端部绕组温度较转矩最优平均分配控制策略降低




(a)转矩平均分配控制策略下电机温度对比

(b)转矩最优平均分配控制策略下电机温度对比

(c)本文控制策略下电机温度对比

**图16　各控制策略下绕组电机温度对比**

**Fig.16　Comparison of motor winding temperature under various control strategies**

4.14%(162.38 ℃),同时其余各轴温度呈现可控上升态势。其中,3轴电机温度增幅最大(约高8 ℃),但相较基准策略仍降低43.5%,1轴驱动电机绕组峰值温度较基准策略降低59.12%($\Delta T$=83.4 ℃)。验证了本文策略在热负荷均衡方面的有效性。

### 4.2　台架试验结果与分析

为进一步验证本文控制策略在实际硬件下的控制性能,将目标车辆搭载的内置式永磁同步电机在图17所示的试验台上进行台架试验。该试验台架可以根据实车参数有效模拟指定工况下的动态响应特性,更加接近实际运行工况,能够进一步验证所提控制策略的真实性能。

如图17所示,测试台架以转速控制,电机以转矩控制,采用高精度转矩传感器测量电机转矩。电机冷却条件为冷却液入口温度65 ℃,冷却液流量25 L/min,电机控制器冷却条件为冷却液入口温度65 ℃,冷却液流量为20 L/min。

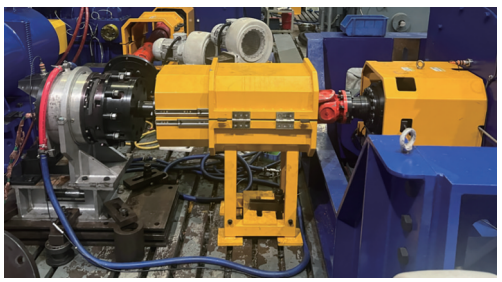


**图17　电驱动系统试验台**

**Fig.17　Electric drive system test bench**

针对绕组温度监测需求,有效绕组和端部绕组温度通过PT100铂电阻温度传感器(精度等级A级,测温范围−200~850 ℃)进行精确测量。其中,有效绕组部分的传感器埋置于定子绕组叠片轴向中心,采取轴向分层布置策略,沿轴向前、中、后三个截面各布置一个传感器,周向按120°间隔分布三相,形成3个轴向断面、3个周向相位的立体测温,探头表面填充导热硅脂以确保与导体的热耦合。端部绕组区域采用同类型传感器,以耐高温环氧胶水粘贴于端部绕组弯曲半径几何中心处,每相绕组端部内外两侧对称布置,且沿周向120°间隔,共布置6支传感器。传感器防护方面,引线采用双层屏蔽结构,埋入式探头外覆绝缘带,端部传感器通过弹簧卡箍固定并注入硅橡胶密封,确保电磁兼容性与机械可靠性。由于篇幅限制,文中最终展示数据为最热点温度。

此外,受限于供电条件约束,本研究设计并采用了单台架多轴时序等效模拟试验方案。基于同轴双侧电机转速、转矩及热特性的一致性假设,试验中通过单电机台架模拟单轴系统工作情况,即每次试验以左侧单电机表征同轴双电机的等效工作状态。通过分别进行5次试验完成本文控制策略的性能验证。其中,为确保试验过程中热边界条件一致性,每次试验间隔留有充分的冷却时间(大于50 min),直至关键部位温度降至室温后才启动后续试验。该方案在克服供电限制的同时能够精确复现多轴协同工作情况,确保了试验数据的准确性。

由于电驱动试验台中负载模拟系统加载速度的限制,本文台架试验工况采用用于表征商用车辆行驶特性但没有较大瞬态变化的NEDC_90标准工况(图18),将转矩平均分配控制策略作为基准策略,最终试验结果如图19所示。

对比图19a和图19b发现,在低转矩需求工况(如中低速巡航及小加速阶段),采取本文控制策略能够通过动态调节驱动轴数及各轴转矩,使得部分驱动电机转矩输出显著高于基准策略,这种

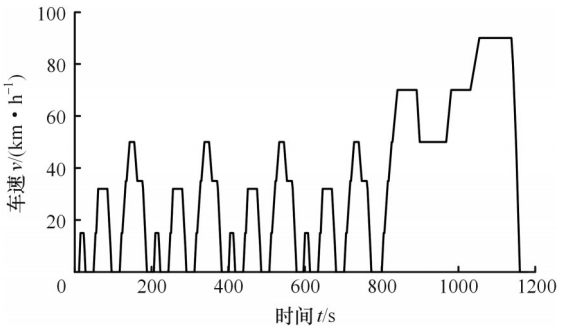



**图18 NEDC_90工况特征图**

**Fig.18 CHTC-HT working condition characteristic diagram**

控制策略有效提高了系统整体效率，进而反映在能量指标的改善上，如图19c所示，本文控制策略的电池荷电状态终值达62.2%，较基准策略的57.7%提高4.5%，验证了本文控制策略的节能优势。

此外，对比图19d和图19e所示的电机有效绕组和端部绕组温度结果发现，采取本文控制策略能够有效平衡多轴系统的热负荷。具体而言，工况结束时，较基准策略，1至4轴电机有效绕组温度降幅达3.7～78.6 ℃，端部绕组温度降低4.1～77.4 ℃，而5轴上电机有效绕组与端部绕组温度分别升高15 ℃和15.8 ℃，此现象源于该轴在优化策略中承担了更高频次的驱动任务。尽管如此，所有测点温度均严格控制在绝缘允许温升范围内，充分保证了系统运行安全性。

## 5 结论

1）电驱动多轴车辆运行工况复杂，对其电驱动系统的经济性和可靠性要求较高。本文通过构建基于集总参数热网络法的永磁同步电机热模型，分析了不同转矩下永磁同步电机的效率和温升特性，并在此基础上提出了一种考虑电机额定转矩低温升特性约束的电驱动多轴车辆转矩优化分配控制策略。该策略通过将以电机转速、工作转矩、额定转矩、峰值转矩之间的关系表征的转矩分配修正因子引入整车电驱动系统总功率中，优化了车辆小负荷时工作的驱动轴数和电机转矩，使得处于工作状态的电机达到了效率和温升平衡。

2）硬件在环仿真和台架试验结果表明，本文控制策略能够有效地控制电机工作点在额定转矩外特性曲线附近，CHTC-HT工况仿真循环结束时的能耗比传统的驱动转矩平均分配控制策略的能耗降低11.54%，且部分电机的主要温升部件温度显著降低；台架试验结果表明，NEDC_90工况下本文控制策略较转矩均分控制策略工况终点电池SOC值提高4.5%，且1至4轴电机有效绕组温

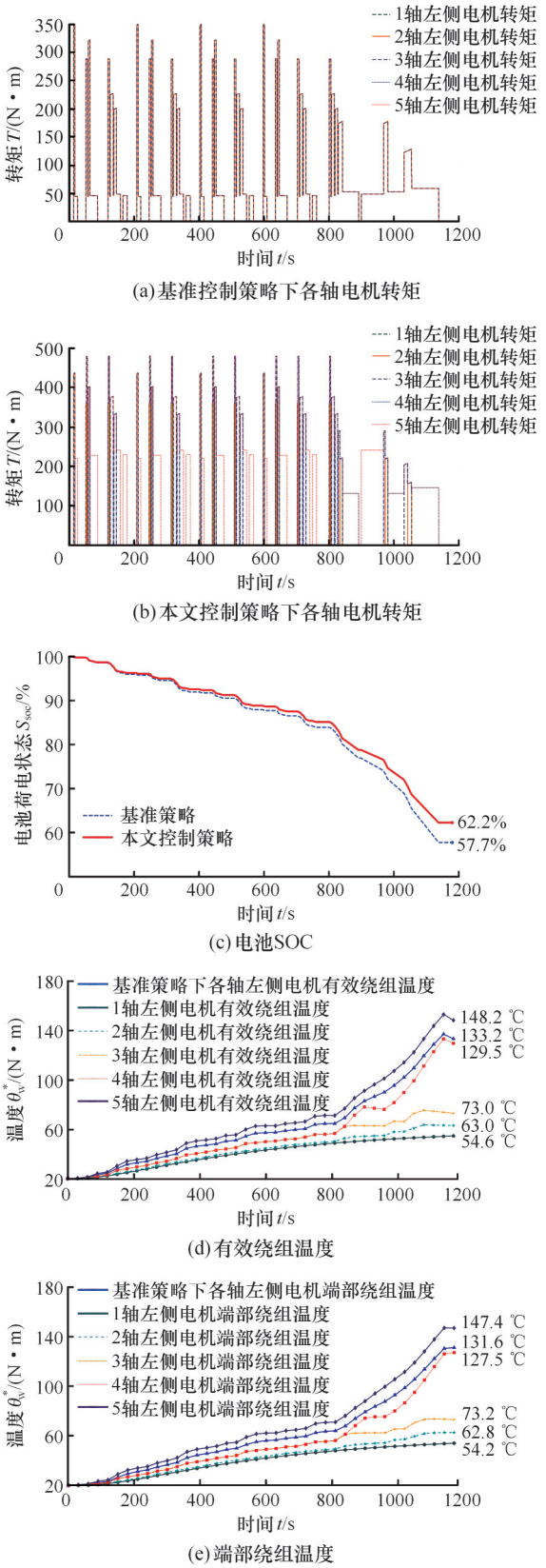



**图19 台架试验结果**

**Fig.19 Bench test results**

度降低3.7～78.6 ℃，端部绕组温度降低4.1～77.4 ℃，有效地提高了电驱动多轴车辆的经济性和可靠性。

3）本文控制策略主要是从工程实现角度出

发，以电机转速、工作转矩、额定转矩、峰值转矩之间的关系表征的转矩分配修正因子引入整车电驱动总功率，该方法具有计算量小、容易实现等特点。但是，由于电机额定转矩曲线仅仅是一个粗略的效率与温升的平衡点，难免会在某些时刻未能达到电机效率与温升的最优平衡点，因此，未来将重点研究能够综合表征电机效率与温升的参数矩阵组，从而更加精确、有效地优化电驱动多轴车辆的转矩分配。

**参考文献：**


[1] LI Zixian, PAN Shiju, MAO Kang, et al. Combined Acceleration Slip Regulation for Multi-wheel Distributed Electric Drive Vehicles Considering Torque Loss Factor[J]. Control Engineering Practice, 2024, 146: 105893.

[2] LI Junqiu, YANG Sen, LI Zhichao, et al. An Energy Conservation Strategy Based on Drive Mode Switching for Multi-axle In-wheel Motor Driven Vehicle[J]. Energy Procedia, 2019, 158: 2580-2585.

[3] 乔帅鹏，胡明辉，曹开斌，等. 多轴电驱动车辆驱动力优化分配策略[J]. 重庆大学学报，2021，44(6)：31-42.
QIAO Shuaipeng, HU Minghui, CAO Kaibin, et al. Optimal Driving Force Distribution Strategy for Multi-axle Electric Vehicles[J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(6): 31-42.

[4] JIN Liqiang, TIAN Duanyang, ZHANG Qixiang, et al. Optimal Torque Distribution Control of Multi-axle Electric Vehicles with In-wheel Motors Based on DDPG Algorithm [J]. Energies, 2020, 13(6): 1331.

[5] HUANG Bin, WANG Qizheng, PENG Dengzhi, et al. Research on Economic Torque Distribution Control of Distributed Drive Four-axle Pure Electric Commercial Vehicles [J]. SAE Technical Paper Series, 2024, 1: 2024-1-5040.

[6] WANG Weichen, LI Junqiu, LI Xiaohan, et al. Multi-objective Collaborative Control Method for Multi-axle Distributed Vehicle Assisted Driving[J]. Applied Sciences, 2023, 13(13): 7769.

[7] LI Zhichao, LI Junqiu, MIN Qingyun, et al. A Fast-computing Path Tracking Control Strategy for Autonomous Multiaxle Electric Vehicle Considering Safety and Stability [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(3): 6024-6038.

[8] BAO Yutong, DU Changqing, WU Dongmei, et al. Coordinated Slip Control of Multi-axle Distributed Drive Vehicle Based on HLQR[J]. Mathematics, 2023, 11(8): 1964.

[9] LI Luoquan, WANG Hongliang, PI Dawei, et al. Research on Torque Distribution Control of High-performance Distributed Drive Multi-axle Special Vehicle[C]//2022 6th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI). Nanjing, 2022: 1-8.

[10] HEALY C, HAYES J G. Speed Vectoring Algorithms for Drivelines with Multiple Modular E-Axles[C]//2024 24th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Kouty nad Desnou, 2024: 1-6.

[11] XU Shiwei, LI Junqiu, ZHANG Xiaopeng, et al. Research on Optimal Driving Torque Control Strategy for Multi-axle Distributed Electric Drive Heavy-duty Vehicles [J]. Sustainability, 2024, 16(16): 7231.

[12] 谢皖滇，李国丽，孙泽辉，等. 基于热磁耦合的永磁同步电机温升预测[J]. 传感器与微系统，2023，42(5)：130-134.
XIE Wandian, LI Guoli, SUN Zehui, et al. Temperature Rise Prediction for PMSM Based on Thermomagnetic Coupling [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42(5): 130-134.

[13] 汤勇，孙亚隆，郭志军，等. 电机散热系统的研究现状与发展趋势[J]. 中国机械工程，2021，32(10)：1135-1150.
TANG Yong, SUN Yalong, GUO Zhijun, et al. Development Status and Perspective Trend of Motor Cooling Systems[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(10): 1135-1150.

[14] 师蔚，骆凯传，张舟云. 基于热网络法的永磁电机温度在线估计[J]. 电工技术学报，2023，38(10)：2686-2697.
SHI Wei, LUO Kaichuan, ZHANG Zhouyun. On-line Temperature Estimation of Permanent Magnet Motor Based on Lumped Parameter Thermal Network Method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(10): 2686-2697.

[15] HAN Jie, SHU Hong, TANG Xiaolin, et al. Predictive Energy Management for Plug-in Hybrid Electric Vehicles Considering Electric Motor Thermal Dynamics[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 251: 115022.

[16] ZHANG Xinhua, YANG Liu, SUN Xiaodong, et al. ECMS-MPC Energy Management Strategy for Plug-in Hybrid Electric Buses Considering Motor Temperature Rise Effect[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(1): 210-221.

[17] YANG Chao, ZHA Mingjun, WANG Weida, et al. Motor-temperature-aware Predictive Energy Management Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicles Using Rolling Game Optimization[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 2209-2223.

[18] 陈浩，袁良信，郑四发，等. 基于能耗优化的电动轮汽车转矩动态分配[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2020，60(2)：132-138.
CHEN Hao, YUAN Liangxin, ZHENG Sifa, et al. Dynamic Torque Allocation for In-wheel Motor Driven Vehicle Based on Energy Consumption Optimization[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2020, 60(2): 132-138.

[19] 钟恒，李广含，曾小华，等. 多轴特种混动车辆工况自适应驱动力分配控制[J]. 中国机械工程，2019，30(5)：528-534.
ZHONG Heng, LI Guanghan, ZENG Xiaohua, et al. Distribution Control of Drive-cycle Adaptation Driving Forces for Multi-axis Special Hybrid Vehicles[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(5): 528-534.


（编辑　陈　勇）


**作者简介：曾鑫宇**，男，2000年生，硕士研究生。研究方向为智能电驱动车辆技术。**许世维***（通信作者），男，1987年生，副教授、博士。研究方向为智能电驱动车辆、电动车辆智能底盘技术等。E-mail：xusw@xauat.edu.cn。



**本文引用格式：**

曾鑫宇，许世维，张小鹏，等. 考虑电机额定转矩低温升特性约束的电驱动多轴车辆转矩优化分配控制策略[J]. 中国机械工程，2026，37(8)：2068-2079.

ZENG Xinyu, XU Shiwei, ZHANG Xiaopeng, et al. Torque Optimization Distribution Control Strategy for Electric Multi-axle Vehicles Considering the Low Temperature Rise Characteristic Constraint of Motor Rated Torque[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(8): 2068-2079.