

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.08.012

开关磁阻电驱动系统机电控协同设计*

刘长钊¹, 王 坤¹, 宋 健¹, 范朔铭¹, 陈祥龙^{1,2}

(1. 重庆大学, 高端装备机械传动全国重点实验室, 重庆 400044; 2. 山东新华医疗器械股份有限公司, 淄博 255086)

[摘要] 提出一种高性能开关磁阻电驱动系统的高效正向协同设计方法, 来提高开关磁阻电驱动系统的功率密度, 同时降低汽车在典型循环行驶工况下的损耗。首先, 建立开关磁阻电机动态转矩模型和径向力模型; 然后, 建立开关磁阻电机损耗模型, 并结合齿轮传动系统损耗模型形成电驱动系统损耗模型, 用于典型循环行驶工况下电驱动系统损耗的计算。最后, 以机械、电气和控制参数为协同设计变量, 以系统的循环行驶工况损耗、质量和转矩波动与径向力脉动为优化目标, 采用了双层嵌套优化方法进行优化设计。基于上述方法对 12/8 级开关磁阻电驱动系统进行优化设计, 经协同优化设计后的开关磁阻电驱动系统总质量减轻了 19.76%; CLTC-P 典型循环工况的系统总损耗减少了 42.45%; 系统综合效率提升 7.66%。

关键词: 纯电动汽车; 开关磁阻电驱动系统; 机电控参数; 协同设计

Electromechanical Control Collaborative Design of Switched Reluctance Electric Drive System

Liu Changzhao¹, Wang Kun¹, Song Jian¹, Fan Shuoming¹ & Chen Xianglong^{1,2}

1. Chongqing University, State Key Laboratory of Mechanical Transmission for Advanced Equipment, Chongqing 400044;

2. Shinva Medical Instrument Co., Ltd., Zibo 255086

[Abstract] In this paper, an efficient forward collaborative design method for high-performance switched reluctance electric drive systems is proposed to enhance the power density and reduce vehicle loss under typical driving cycle conditions. Firstly, dynamic torque and radial force models of the switched reluctance motor are established. Subsequently, a loss model is developed for both the motor and the electric drive system by incorporating the gear transmission system's loss model to evaluate overall loss during typical driving cycle conditions. Finally, using mechanical, electrical, and control parameters as co-design variables and taking cycle loss, mass, torque fluctuation, and radial force fluctuation as optimization objectives, a double-layer nested optimization method is employed to optimize the design. Based on this approach, an optimized 12/8 grade switched reluctance electric drive system achieves a 19.76% reduction in total weight after collaborative optimization design. Moreover, under typical cycle conditions (CLTC-P), the total system loss decreases by 42.45%, while overall system efficiency increases by 7.66%.

Keywords: pure electric vehicles; switched reluctance electric drive system; electromechanical control parameters; collaborative design

* 国家自然科学基金面上项目(52375040)、重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0085)、江苏省科技成果转化专项(BA2022033)和江苏省双创团队项目(JSSCTD202239)资助。

原稿收到日期为 2024 年 02 月 07 日, 修改稿收到日期为 2024 年 04 月 08 日。

通信作者: 刘长钊, 副教授, 博士, E-mail: lczcq@qq.com。

前言

开关磁阻电机(switched reluctance motor, SRM)具有结构简单、坚固耐用、过载转矩大等优点^[1],已经应用于电动汽车、航空工业、新能源发电等各领域。但由于开关磁阻电机存在着功率密度和效率低、转矩及径向力波动大等缺点,限制了其在移动机器尤其是乘用车电动汽车上的广泛应用。由驱动电机和齿轮传动系统组成的电驱动系统是移动机器的核心装置,为提高系统效率和功率密度,电驱动系统向着机电控一体化方向发展。开关磁阻电驱动系统最优设计须综合考虑开关磁阻电机结构参数、控制参数和齿轮传动系统参数。目前针对开关磁阻电驱动系统机电控的协同设计几乎没有,现有研究多将开关磁阻电机和齿轮传动系统分开进行优化设计。

在开关磁阻电机优化设计方面,El-Nemr等^[2]将有限元法(FEM)与多目标遗传算法(NSGA-II)相结合对SRM的尺寸参数进行优化,实现了电机功率密度、效率和平均转矩的提升。Lee等^[3]提出一种SRM定转子拓扑结构优化方法,通过研究定转子形状与平均转矩、转矩脉动和电流限制等目标性能之间的关系,实现SRM在给定电流限制下的高平均转矩和低转矩脉动。Xiu等^[4]采用改进粒子群优化算法获取SRM最优开关角以提高其性能表现。Sun等^[5]提出一种基于顺序子空间优化策略(SSOM)的多目标多物理场优化设计方法,兼顾提高了SRM的热性能和电磁性能。刁凯凯等^[6]提出了一种开关磁阻电机系统级确定性与鲁棒性优化设计方法,基于近似模型和优化算法,利用分层优化的方法使得设计的开关磁阻电机具有最优性能。朱曰莹等^[7]以降低转矩脉动、提高电机效率为目标,提出了一种双指标同步优化开关磁阻电机控制参数的方法,建立了基于负载转矩与电机转速的可变开通角、关断角控制参数模型,对比分析和实验结果表明,能够很好地降低转矩脉动和提高电机效率。

在齿轮传动系统优化设计方面,Kwon等^[8]以电动汽车动力性和能耗为目标,利用代理模型法对双电机电动汽车电驱动系统的速比和双电机之间的转矩分配开展了多目标优化研究。Wu等^[9]针对某电动汽车手动变速器提出一种考虑换挡性能的多目标传动比优化方法,显著提高了车辆的动力性、经济性和舒适性,且具有更好的换挡性能。Sun等^[10]使用模拟退火粒子群优化算法对电动汽车主减速比和

1、2挡传动比进行优化,提高了整车的动力性和经济性。秦兆博^[11]建立基于粒子群的参数快速优化方法对混合动力履带车辆传动系统的动力元件参数和机械传动比参数进行迭代优化。牛继高等^[12]基于Cruise仿真软件建立了两挡电动汽车的整车模型,搭建了Cruise和Isight联合仿真模型,采用改进的非支配排序遗传算法,对传动系统传动比进行了多目标优化,最终获得了兼顾动力性和经济性的最优方案。

基于以上文献可知,现阶段对开关磁阻电驱动系统的参数优化,主要集中在分别对开关磁阻电机和齿轮传动系统进行优化,未在设计阶段有效地考虑电驱动系统机电控参数相互影响、制约关系,优化目标也比较单一。基于此,本文提出了一种开关磁阻电驱动系统机电控参数协同优化设计方法,该方法综合考虑了典型循环工况下开关磁阻电驱动系统的功率密度、总损耗以及转矩波动和径向力脉动。

1 开关磁阻电机建模

1.1 开关磁阻电机动态转矩模型

开关磁阻电机数学模型如式(1)所示:

$$\begin{cases} u_j = R_j i_j + \frac{d\Psi_j(\theta_j, i_j)}{dt} \\ T_e = \sum_{j=1}^3 \left(\int_0^{i_j} \frac{\partial \Psi_j(\theta_j, i_j)}{\partial \theta_j} di_j \right) \sqrt{2} \\ J \frac{d^2\theta}{dt^2} = T_e - K_\omega \frac{d\theta}{dt} - T_L \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_j 为第 j 相电压,V; R_j 为第 j 相电阻, Ω ; θ_j 为第 j 相转子相位角, $^\circ$; i_j 为第 j 相电流,A; Ψ_j 为第 j 相磁链,Wb; T_e 为电磁转矩, $N \cdot m$; J 为转子的转动惯量, $kg \cdot m^2$; K_ω 为摩擦系数; T_L 为负载转矩, $N \cdot m$ 。

SRM在运行过程中的磁链与电路具有高度非线性,所以本文通过有限元法与插值法来建立SRM整体的非线性动态仿真模型。图1所示为12/8极开关磁阻电机二维有限元模型,铁芯材料设置为硅钢片,绕组材质为铜,绕组匝数为20;仿真采用全模型;网格采用自动剖分方式,类型为滑移网格。

为得到SRM在运行过程中任意时刻的电磁转矩 T_e ,首先须计算SRM的相电感 $L_j(\theta_j, i_j)$ 数据。本文采用自动化脚本实现SRM相电感数值矩阵的获取,该自动化脚本实现了相电流和转子转角的自动划分,并在有限元软件中完成对SRM的自动建模,后

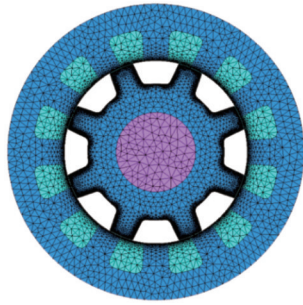


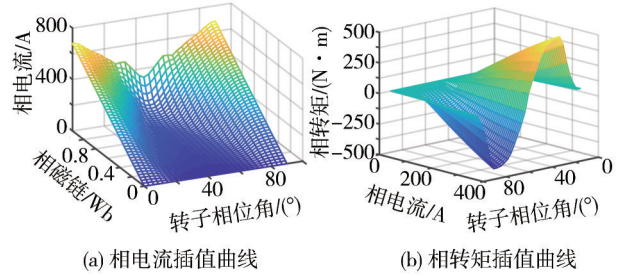
图1 SRM二维有限元模型

将划分好的 (θ, i) 组合导入有限元模型中并进行逐步设置和计算,完成后自动导出所有划分点的相电感数值矩阵。

联立式(2)及相电感数值矩阵得到相磁链 $\Psi_j(\theta_j, i_j)$ 数值矩阵,将相磁链数据矩阵利用矩阵变换和插值计算处理成以等分转子角度和相磁链值为网格采样点,相电流值为函数值的相电流插值矩阵,如图2(a)所示。通过相电感数值矩阵利用数值微分方法,可以得到在不同相电流和转子转角下的相电感变化率数值矩阵,进而通过式(1)中的机电联系方程计算得到相转矩数值矩阵,如图2(b)所示,通过

该矩阵,输入任一时刻转子转角和相电流值,即可利用插值计算输出此时的相转矩值。

$$\Psi_j(\theta_j, i_j) = L_j(\theta_j, i_j) \cdot i_j \tag{2}$$



(a) 相电流插值曲线 (b) 相转矩插值曲线

图2 相电流和相转矩插值曲线

图3为SRM动态转矩计算过程示意图。对相电压进行积分得到相磁链值,与转子相位角一并输入至相电流插值矩阵获取此刻对应的相电流值,对相电压与相电阻分压的差值积分可以获得下一时刻的相磁链值,以此循环。插值出的相电流值联同转子相位角通过相转矩二维插值矩阵获取各相转矩,将各相电磁转矩进行求和处理即可获取SRM的动态转矩。

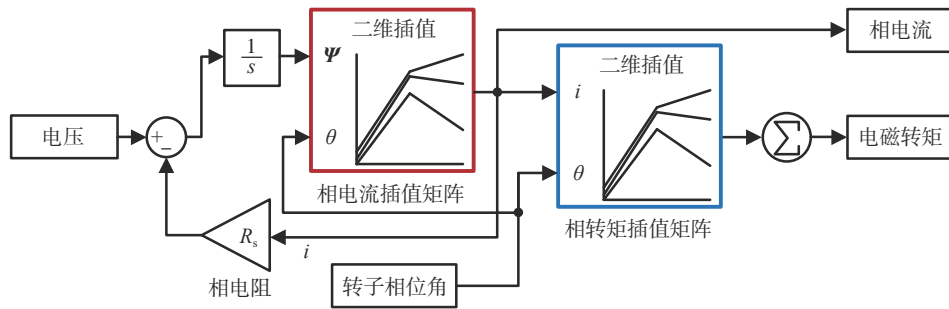


图3 开关磁阻电机动态转矩计算示意图

图4为设置SRM开通角为 10° 、关断角为 25° 、转速保持在 2000 r/min 、电压为 320 V 时,SRM动态转矩模型的仿真结果与有限元结果对比。图示二者输出电磁转矩非常接近,验证了本文的SRM动态转矩建模方法的正确性。

1.2 开关磁阻电机径向力模型

杨艳等^[13]和Chen等^[14]基于麦克斯韦张量法和磁路原理,考虑铁芯磁饱和,建立了开关磁阻电机径向力模型。SRM在运行过程中转子极和定子极有重叠与不重叠两种位置状态,图5为SRM定转子极存在重叠时的气隙磁路分析,其重叠区和非重叠区的磁路方程分别如式(3)和式(4)所示。

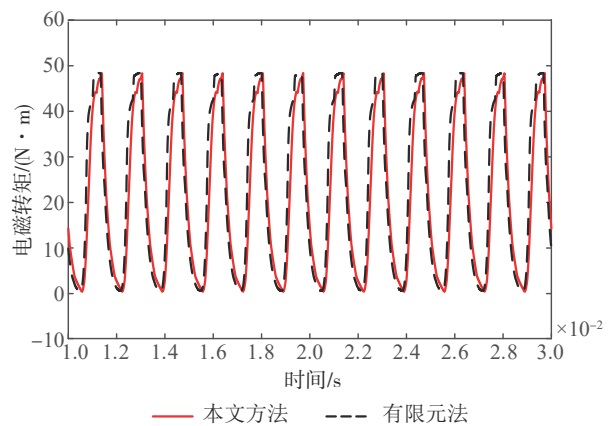


图4 本文方法和有限元法电磁转矩对比

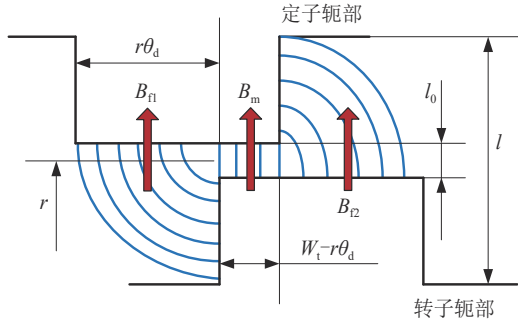


图5 定转子磁极重叠时的气隙磁通密度

$$\begin{cases} N \cdot i = H_g l_0 + H_s (l - l_0) \\ B_m = \mu_0 H_g \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} N \cdot i = H_{n1} l_{n1} + H_s (l - l_{n1}) \\ l_{n1} = l_0 + \frac{\pi r |\theta_d|}{4} \\ B_{n1} = \mu_0 H_{n1} \end{cases} \quad (4)$$

式中: N 为绕组线圈匝数; i 为相电流, A; H_g 、 H_{n1} 分别为定转子极重叠区与非重叠区气隙的磁场强度, A/m; H_s 为铁芯中的磁场强度, A/m; B_m 、 B_{n1} 分别为定转子极重叠区与非重叠区磁通密度, T; l_0 为定转子极之间的距离, m; l 为定转子极之间的距离, m; l_{n1} 为边缘磁路的平均长度, m; r 为气隙中线半径, m; θ_d 为定转子极之间的偏差角, rad。

H_s 与 B_m 、 B_{n1} 之间的关系可以用磁化曲线表示。考虑铁芯材料磁饱和, 根据材料的磁化曲线对式(3)和式(4)通过数值计算的方法进行求解, 求得 B_m 与 i 的关系曲线如图6(a)所示, B_{n1} 与 i 和 θ_d 之间的关系曲线如图6(b)所示, 通过相电流信号和转子相位角信号, 即可插值得到定转子齿在重叠时任一时刻下的 B_m 和 B_{n1} 。

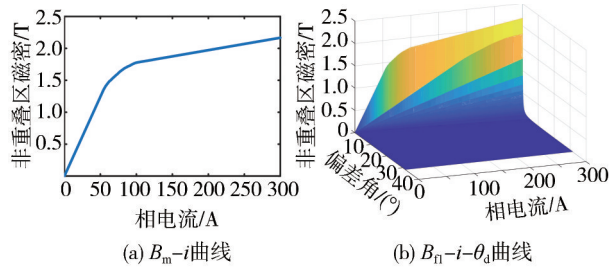


图6 重叠区和非重叠区磁通密度曲线

SRM定转子齿存在重叠和完全不重叠时的径向力可通过式(5)来计算:

$$\begin{cases} F_{\text{overlap}} = \frac{h}{2\mu_0} (B_m^2 (W_t - r\theta_d) + 2B_{n1}^2 r\theta_d) \\ F_{\text{monoverlap}} = \frac{1}{2} i^2 \frac{L_u}{l_{u0}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: W_t 为齿宽; h 为SRM定转子硅钢片的堆叠高度, m; L_u 为定转子极在非重叠时的相电感, H; l_{u0} 为定转子极在非重叠时转子极到定子极之间的气隙长度, m。

图7为设置SRM开通角为 10° 、关断角为 25° 、转速保持在2000 r/min、励磁电压为320 V时, 本文方法和有限元法的径向力比较。可以看出两种方法得出的径向力非常接近, 验证了此方法的正确性。

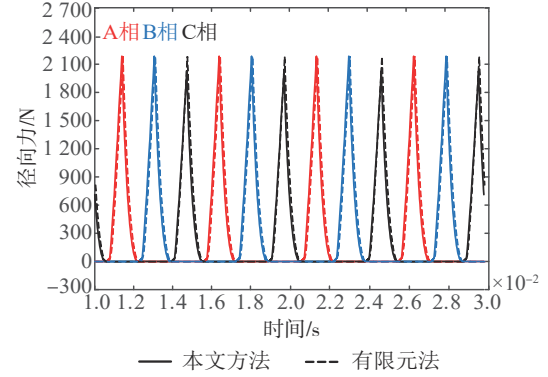


图7 本文方法和有限元法径向力对比

1.3 开关磁阻电机损耗模型

开关磁阻电机的损耗主要包括铁耗、铜耗、机械损耗和杂散损耗。本文基于解析算法与数值插值法建立了开关磁阻电机损耗快速计算模型。

1.3.1 开关磁阻电机铁耗计算

在计算SRM的铁耗时, 首先须计算SRM在运行过程的磁通密度分布。图8为三相12/8极开关磁阻电机结构原理图, 其各相绕组线圈匝数为 N , 各相绕组的磁链分别为 Ψ_A 、 Ψ_B 、 Ψ_C 。定义磁通方向在定、转子极内沿半径从圆心向外为正, 在定、转子极内沿顺时针方向为正。SRM励磁顺序为A→B→C→A, 则转子以顺时针方向旋转, 依据等效磁路融合法各定子极的磁通密度可表示为

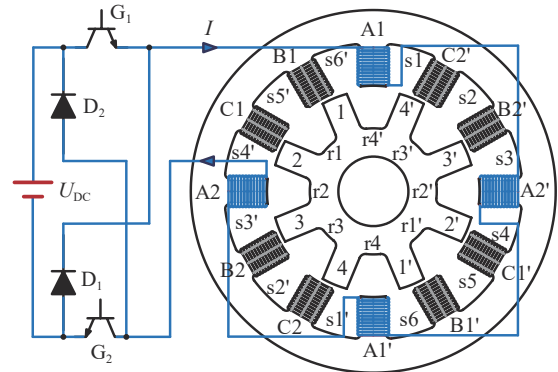


图8 三相12/8极开关磁阻电机结构原理图

$$\begin{bmatrix} B_{spA1} \\ B_{spB1} \\ B_{spC1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{spA1'} \\ B_{spB1'} \\ B_{spC1'} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} B_{spA2} \\ B_{spB2} \\ B_{spC2} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} B_{spA2'} \\ B_{spB2'} \\ B_{spC2'} \end{bmatrix} = \frac{1}{2N \cdot S_{ps}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} \quad (6)$$

定子轭部各段磁通密度为

$$\begin{bmatrix} B_{sc1} \\ B_{sc2} \\ B_{sc3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{sc1'} \\ B_{sc2'} \\ B_{sc3'} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} B_{sc4} \\ B_{sc5} \\ B_{sc6} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} B_{sc4'} \\ B_{sc5'} \\ B_{sc6'} \end{bmatrix} = \frac{1}{4N \cdot S_{cs}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} \quad (7)$$

各转子极磁通密度为

$$\begin{cases} B_{rp1} = B_{rp1'} = -B_{rp3} = -B_{rp3'} = \frac{1}{2N \cdot S_{pr}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} \\ B_{rp2} = B_{rp2'} = -B_{rp4} = -B_{rp4'} = \frac{1}{2N \cdot S_{pr}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

转子轭部各段磁通密度为

$$\begin{cases} B_{rc1} = B_{rc1'} = -B_{rc3} = -B_{rc3'} = \frac{1}{4N \cdot S_{cr}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} \\ B_{rc2} = B_{rc2'} = -B_{rc4} = -B_{rc4'} = \frac{1}{4N \cdot S_{cr}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

SRM的铁耗主要包括磁滞损耗 P_h 和涡流损耗 P_e ,可由下式计算得到:

$$\begin{cases} P_h = K_h C_h f_c B^\alpha \\ P_e = K_e C_e (f_c B)^2 \\ P_{Fe} = K_h P_h + K_e P_e \end{cases} \quad (10)$$

式中: B 为各次谐波的磁通密度,T; K_h 和 K_e 分别为磁滞修正因子和涡流修正因子,其表达式为

$$\begin{cases} K_h = 1 + \frac{k}{B_p} \sum_{i=1}^N \Delta B_i \\ K_e = \left(\frac{B_1}{B_p} \right)^2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{iB_i}{B_1} \right)^2 \end{cases} \quad (11)$$

利用叠加原理将定子极、定子轭、转子极、转子轭的磁滞损耗与涡流损耗相加得到整体的磁滞损耗和涡流损耗,如式(12)所示。

$$\begin{cases} P_h = \sum_{m=1}^{\infty} P_{hspm} + \sum_{m=1}^{\infty} P_{hsm} + \sum_{m=1}^{\infty} P_{hrpm} + \sum_{m=1}^{\infty} P_{hrm} \\ P_e = \sum_{m=1}^{\infty} P_{espm} + \sum_{m=1}^{\infty} P_{esm} + \sum_{m=1}^{\infty} P_{erpm} + \sum_{m=1}^{\infty} P_{erm} \end{cases} \quad (12)$$

1.3.2 开关磁阻电机其他损耗计算

SRM在运行过程中除因交变磁场产生的铁耗外,还存在铜耗、机械损耗和杂散损耗等,以下为这3种损耗的分析和计算模型。

铜耗 P_{Cu} 的计算公式为

$$\begin{cases} P_{Cu} = q I_{jms}^2 R_j \\ I_{jms} = \sqrt{\frac{N_r}{360} \sum_{\theta_{on}}^{\theta_p} i^2(\theta)} \end{cases} \quad (13)$$

式中: I_{jms} 为第 j 相励磁电流的有效值,A; R_j 为相集中绕组电阻值, Ω ; θ_{on} 为开通角,(°); θ_p 为相绕组电流归零时对应的转子相位角,(°); $i(\theta)$ 为当转子相位角为 θ 时对应的相电流瞬时值,A。

开关磁阻电机在运行过程中所产生的机械损耗一般包括通风损耗 P_w 与轴承摩擦损耗 P_b ,根据Greenwood公式来计算。

$$P_w + P_b = 17n_e D_a^2 l_a \quad (14)$$

式中: n_e 为电机额定转速,r/min; D_a 为转子外径长度,m; l_a 为铁芯叠长,m。

对于开关磁阻电机运行过程中的杂散损耗,其影响因素十分复杂,本文取铁耗、铜耗和机械损耗三者之和的7%计为杂散损耗^[15]。

1.3.3 开关磁阻电机损耗模型验证

通过上述方法可以快速获得SRM在运行过程中的铁耗、铜耗、机械损耗与杂散损耗,从而得到SRM任意工作点下的损耗值,实现SRM损耗的快速计算。其中机械损耗与杂散损耗是利用经验公式和比重计算获得,故只须对铁耗计算与铜耗计算进行准确性验证。

分别通过本方法和有限元法对开关磁阻电机铁耗以及铜耗进行了计算,结果如表1所示。两种方法计算出的铁耗和铜耗误差值分别为2.16%和3.31%,均在5%以内,验证了本方法中铁耗和铜耗计算模型的准确性。

1.4 开关磁阻电机质量计算

开关磁阻电机的质量计算公式为

$$m_{sm} = (V_s + V_r) \rho_{st} + V_{cu} \rho_{cu} \quad (15)$$

式中: V_s 、 V_r 分别为开关磁阻电机定、转子体积; ρ_{st} 为

表1 本方法与有限元法铁耗及铜耗对比

损耗类型	本方法/W	有限元法/W	误差/%
铁耗	244.14	238.98	2.16
铜耗	54.12	55.91	3.31

定、转子叠压硅钢片材料密度,当材料为10JNEX90 0时经查表可取 $7\,490\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; V_{cu} 为定子各极上的集中绕组体积; ρ_{cu} 为铜线的密度,取 $8\,960\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2 齿轮传动系统损耗模型及质量计算

图9为开关磁阻电驱动系统结构示意图。本文选择驱动电机+两级平行轴变速器作为电驱动系统构型。

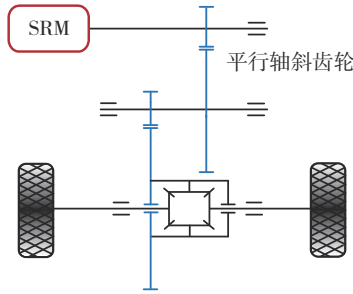


图9 开关磁阻电驱动系统结构示意图

2.1 齿轮传动系统损耗计算模型

2.1.1 斜齿轮啮合损耗计算

图10为一对斜齿轮副传动过程中啮合轨迹线。单位啮合线长度下一对斜齿轮的滑动摩擦功率损耗计算公式可通过式(16)计算。

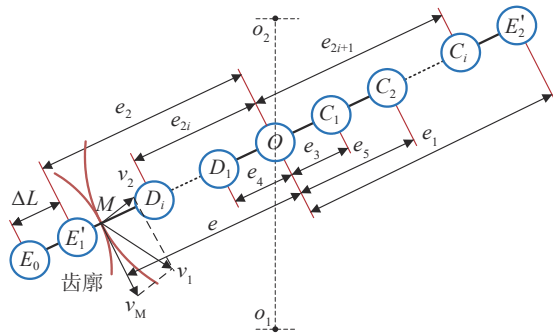


图10 啮合点的啮合轨迹与相对滑动速度

$$\begin{cases} dP_{SM} = F_n f v_M dt \\ v_M = e(\omega_1 + \omega_2) \\ de = r_{b1} \omega_1 dt = r_{b2} \omega_2 dt \end{cases} \quad (16)$$

式中: F_n 为法向载荷, N; f 为齿面摩擦因数, 这里采

用简化方法, 根据《齿轮手册》取 $f=0.03\sim 0.07$ ^[16], 本文取 $f=0.05$; v_M 为两斜齿轮啮合点M处瞬时相对滑动速度, m/s; ω_1 、 ω_2 分别为主、从动轮的角速度, r/min。

一对斜齿轮在啮合过程中产生的滚动摩擦功率损耗计算公式为

$$P_r = F_r v_r \quad (17)$$

式中: F_r 为轮齿啮合过程中的滚动摩擦力, N; v_r 为相对滚动速度, m/s。

2.1.2 轴承摩擦损耗计算

轴承的摩擦功率损耗为

$$\begin{cases} P_{bearing} = \frac{2\pi n M}{60} \times 10^{-3} \\ M = M_0 + M_1 \\ M_0 = \begin{cases} f_0 d_m^3 (vn)^{2/3} \times 10^{-7}, & vn \geq 2000 \\ 160 f_0 d_m^3 \times 10^{-7}, & vn < 2000 \end{cases} \\ M_1 = f_1 p_1 d_m \end{cases} \quad (18)$$

式中: n 为轴承工作转速, r/min; M 为轴承的摩擦转矩, 采用较为准确的Palmgren公式来计算; M_0 为与轴承类型、润滑油性质和工作转速有关的摩擦力矩, N·m; M_1 为与载荷有关的摩擦力矩, N·m; d_m 为轴承的平均直径, m; p_1 为轴承受到的压力载荷, N。

2.1.3 齿轮风阻损耗计算

在高速齿轮传动系统中, 齿轮的风阻损耗占比较大, 加入风阻损耗计算能够使得齿轮传动系统的损耗模型更加准确完善, 本文采用Anderson等提出的风阻损耗经验公式, 如式(19)所示。

$$P_{wind} = 2.04 \times 10^{-8} \left(1 + \frac{2.3b}{R}\right) n^{2.8} R^{4.6} \rho_{eq}^{0.8} \mu_{eq}^{0.2} \quad (19)$$

式中: n 为齿轮工作转速, r/min; ρ_{eq} 为变速器内油气混合密度, kg/m³; μ_{eq} 为油气混合黏度, m²/s。

2.1.4 齿轮搅油损耗计算

标准ISO 14179-1给出了适用于高速齿轮的搅油损耗经验公式。

$$\begin{cases} P_{oil} = P_{c1} + P_{c2} + P_{c3} \\ P_{c1} = \frac{7.37 f_g v n_i^3 D^{4.7} L}{A_g \times 10^{26}} \\ P_{c2} = \frac{1.474 f_g v n_i^3 D^{5.7}}{A_g \times 10^{26}} \\ P_{c3} = \frac{7.37 f_g v n_i^3 D^{4.7} B \left(\frac{R_f}{\sqrt{\tan \beta}}\right)}{A_g \times 10^{26}} \end{cases} \quad (20)$$

式中: P_{c1} 、 P_{c2} 、 P_{c3} 分别为与齿轮轴、齿轮双侧和齿轮齿面有关的搅油功率损耗; f_g 为齿轮浸油深度系数; v 为环境温度时润滑油的运动黏度, m²/s; n_i 为齿轮转

速, r/min; L 为齿轮轴的长度, m; A_g 为配置常数, 取 0.2; R_f 为粗糙度系数, 可通过公式 $R_f = 7.93 - 4.648/m$ 近似计算, m_z 为齿轮端面模数。

2.2 齿轮传动系统质量

齿轮传动系统包括单挡平行轴减速器和主减速器, 其质量计算公式为

$$\begin{cases} m_h = \pi \rho_{gear} \left[\left(\frac{m_{nh} z_{h1}}{2 \cos \beta_h} \right)^2 + \left(\frac{m_{nh} z_{h2}}{2 \cos \beta_h} \right)^2 \right] b_h \times 10^{-9} \\ m_z = \pi \rho_{gear} \left[\left(\frac{m_{nz} z_{z1}}{2 \cos \beta_z} \right)^2 + \left(\frac{m_{nz} z_{z2}}{2 \cos \beta_z} \right)^2 \right] b_z \times 10^{-9} \\ b_h = \frac{\varphi_{dh} m_{nh} z_{h1}}{\cos \beta_h}; \quad b_z = \frac{\varphi_{dz} m_{nz} z_{z1}}{\cos \beta_z} \\ m_{gear} = m_h + m_z \end{cases} \quad (21)$$

式中: m_h 、 m_z 、 m_{gear} 分别为单挡减速器齿轮质量、主减速器齿轮质量、齿轮传动系统总质量; m_{nh} 、 m_{nz} 分别为单挡减速器和主减速器齿轮法向模数; ρ_{gear} 为齿轮的材料密度, 当材料为 45 号碳素钢时, ρ_{gear} 取 $7\,850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; b_h 、 b_z 分别为单挡减速器、主减速器齿宽; φ_{dh} 、 φ_{dz} 分别为单挡减速器、主减速器齿轮齿宽系数。

3 开关磁阻电驱动系统机电控协同设计方法

以 12/8 极开关磁阻电驱动系统为优化设计实例, 充分考虑机电控参数之间的相互制约、影响关系, 提出一种开关磁阻电驱动系统机电控协同设计方法。

3.1 协同设计流程

开关磁阻电驱动系统机电控参数协同设计流程分为内外双层进行, 如图 11 所示。外层首先对开关磁阻电驱动系统机电参数进行初始赋值, 判断初始参数是否满足约束条件, 包括系统结构约束、齿轮承载能力约束和动力性约束, 如果不满足约束条件, 采用智能优化算法对电驱动系统机电参数重新赋值。满足约束条件后进入内层, 首先对控制参数(开关角和控制电流参考值)进行初始赋值, 根据此组机电控参数建立开关磁阻电驱动系统转矩-径向力模型, 结合电驱动系统典型循环工况下各工况点数据, 以电机转矩波动和径向力脉动最小为优化目标, 对其动态性能进行迭代优化。动态性能达到最优后, 按此最优机电参数和控制参数计算开关磁阻电驱动系统的总质量和整个循环工况下的总损耗, 以系统损耗

最低和总质量最小为优化目标, 通过优化算法循环迭代直至收敛, 获得开关磁阻电驱动系统机械、电气参数及其在典型循环工况下最优控制参数的帕累托解集, 根据实际需求在帕累托解集中选择最优设计方案, 实现高性能开关磁阻电驱动系统机电控参数协同优化设计。

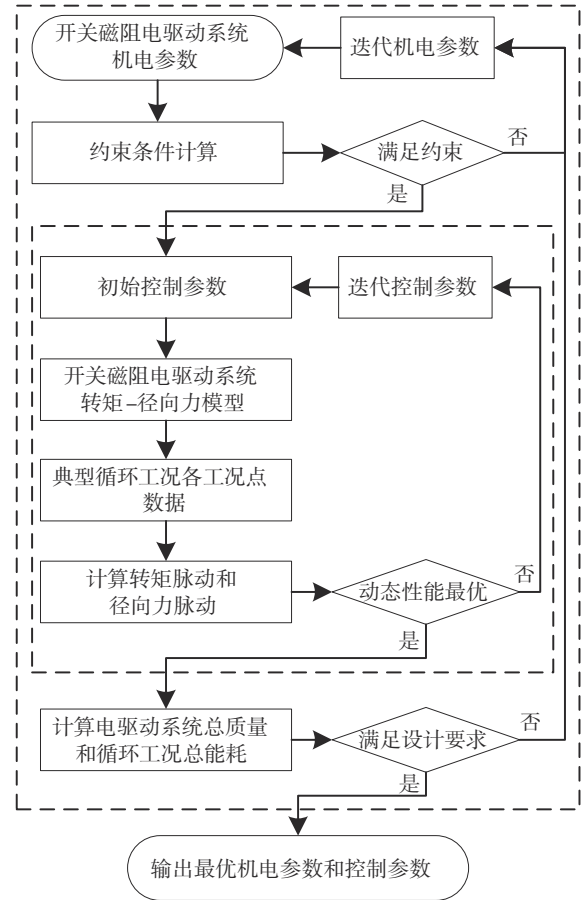


图 11 开关磁阻电驱动系统机电控协同设计流程

3.2 电驱动系统典型循环工况总损耗

在优化开关磁阻电驱动系统时不仅须考虑额定工况, 还要考虑到整个行驶工况下系统的综合性能。因此有必要对电动汽车行驶工况进行研究, 选定中国乘用车循环行驶工况 (CLTC-P) 作为典型循环行驶工况。

为获取某电动汽车在典型循环行驶工况下的电驱动系统最优控制参数和总损耗, 将驱动电机的转速-时间数据及转矩-时间数据进行耦合, 得到典型循环行驶工况下驱动电机的工作点。为减少计算量, 提高优化效率, 基于整个典型循环工况区域, 固定步长划分工作转速和转矩, 生成采样工作点, 如图 12 所示。

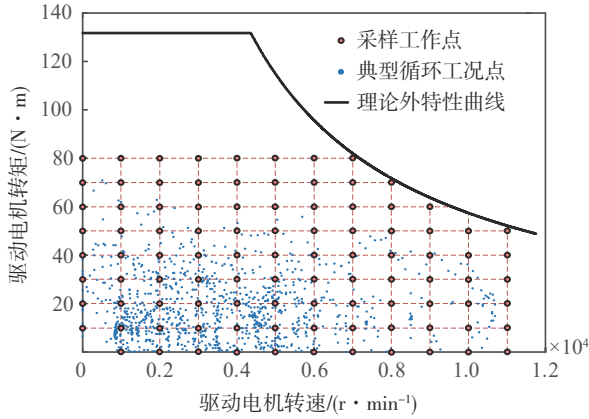


图12 典型行驶工况区域的采样工作点

对于开关磁阻电驱动系统而言,相同工作点所产生的系统损耗还与开关磁阻电驱动系统的控制参数有关。对各个采样工作点的控制参数进行多目标优化,并基于最优控制参数计算各个采样工作点的系统功率损耗。接着,基于采样工作点功率损耗结果利用二维插值法对典型循环工况的各工况点进行插值计算,得到每个典型循环工况点的控制参数和功率损耗,各点功率损耗积分得到整个典型循环工况的系统总损耗,如式(22)所示。

$$W = W_{\text{sm}} + W_h + W_z = \int_0^T (P_{\text{sm}} + P_h + P_z) dt \quad (22)$$

3.3 协同设计变量

开关磁阻电驱动系统机电控参数协同设计中所要考虑的设计变量包含3个部分,分别是关于电机结构的电气参数、电机不同工况下的控制策略参数以及关于齿轮传动结构的机械参数。表2给出了开关磁阻电驱动系统机电控参数协同设计中所要考虑的设计变量。

3.4 协同设计约束条件

3.4.1 系统结构约束

为避免产生结构干涉的不可行参数以及不合理的极端尺寸,从而减少协同设计过程中的计算量,在优化过程中分别建立开关磁阻电机和齿轮传动系统两个部分的结构约束,如式(23)和式(24)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{2\pi}{qN_r} \leq \min(\beta_s, \beta_r); \frac{2\pi}{N_r} \geq \beta_s + \beta_r \\ 0.25 \leq \frac{D_{s2} - D_{r1}}{2} \leq 2; \frac{W_{s2}}{2} \leq \frac{D_{s2} - D_{r2}}{2} \\ 0.6W_{r1} \leq \frac{D_{r2} - D_{r3}}{2} \leq 0.85W_{r1} \\ 0.6W_{s2} \leq W_{s4} \leq 0.85W_{s2} \\ D_{r3} \leq D_{r2}; D_{r2} + \frac{D_{r2} - D_{r3}}{4} \leq D_{r1} \\ D_{s2} + 2W_{s4} \leq D_{s1} \end{array} \right. \quad (23)$$

表2 电驱动系统协同设计变量

分类	设计变量
开关磁阻电机	线圈匝数
	铁芯堆叠长度
	定、转子外径
	定、转子内径
	定、转子轭高
	定、转子极宽
	轴径
	气隙宽度
	硅钢片厚度
齿轮传动系统	主、从动轮齿数
	模数
	齿宽系数
	螺旋角
	压力角
控制策略参数	开通角
	关断角
	相电流控制参考值

式中: β_s 为定子极弧; β_r 为转子极弧; D_{s1} 为定子外径; D_{s2} 为定子内径; D_{r1} 为转子外径; D_{r2} 为转子内径; D_{r3} 为轴径; W_{r1} 为转子极宽; W_{s2} 为定子极宽; W_{s4} 为定子轭高。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min(Z_1, Z_2) \geq \frac{2h_{at}^*}{\sin^2 \alpha_1}, 2 \leq \frac{Z_2}{Z_1} \leq 6 \\ \varepsilon_\gamma = \frac{1}{2\pi} [Z_1(\tan \alpha_{at1} - \tan \alpha_1) + Z_2(\tan \alpha_{at2} - \tan \alpha_1)] + \frac{b \sin \beta}{\pi m_n} \geq 1.2 \end{array} \right. \quad (24)$$

式中: Z_1, Z_2 为齿轮副主、从动轮齿数; h_{at}^* 为齿轮端面齿顶高系数; α_1 为齿轮端面压力角; ε_γ 为齿轮副总重合度; $\alpha_{at1}, \alpha_{at2}$ 分别为主、从动轮齿顶圆端面压力角; b 为齿轮副齿宽; β 为齿轮副螺旋角; m_n 为法向模数。

3.4.2 齿轮承载能力约束

齿轮传动系统的承载能力可以用轮齿齿面接触强度安全系数和轮齿齿根弯曲强度安全系数来表征,如式(25)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} S_H = \frac{\sigma_{HC}}{\sigma_H} = \frac{\sigma_{Hlim} Z_{NT} Z_L Z_V Z_R Z_W Z_X}{Z_H Z_E Z_\epsilon Z_\beta \sqrt{\frac{F_t}{d_1 b} \frac{u \pm 1}{u}} K_A K_V K_{H\beta} K_{H\alpha}} \\ S_F = \frac{\sigma_{FG}}{\sigma_F} = \frac{\sigma_{Flim} Y_{ST} Y_{NT} Y_{\sigma_{relT}} Y_{RrelT} Y_X}{K_A K_V K_{F\beta} K_{Fa} \frac{F_t}{b m_n} Y_F Y_S Y_\beta} \end{array} \right. \quad (25)$$

式中: σ_{Hlim} 为齿面接触疲劳极限; σ_{Flim} 为齿根弯曲疲

劳极限; F_t 为端面分度圆切向力, N; d_1 为小齿轮的分度圆直径, m; b 为工作齿宽, m; u 为齿轮副传动比; 其他参数为各类系数, 由工况以及齿轮参数确定。

3.4.3 动力性约束

开关磁阻电驱动系统的动力性约束指的是系统计算外特性曲线包含理论外特性曲线。系统的计算外特性曲线是根据某组开关磁阻电驱动系统结构参数仿真所得, 理论外特性曲线是通过电动汽车整车基本参数以及动力性要求指标计算得到, 两类外特性曲线如图 13 所示。

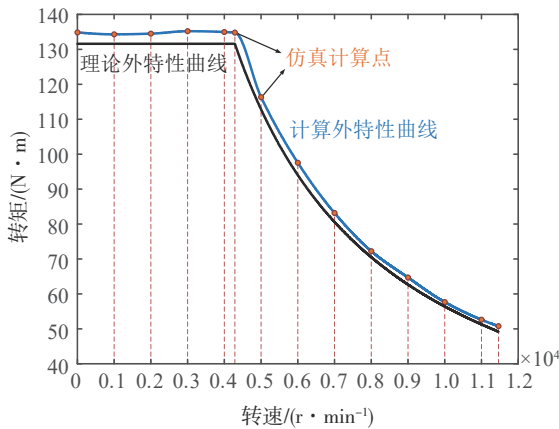


图 13 动力性约束条件

3.5 目标函数

3.5.1 内层优化目标

内优化层针对典型循环工况各工况点, 以开关

磁阻电机控制参数(开通角、关断角、控制电流参考值)为优化设计变量, 以开关磁阻电驱动系统转矩波动、径向力脉动最小为多目标进行迭代优化。

$$\gamma_{in} = \min \left(\omega_1 \frac{T_{fit}}{T_{fst}} + \omega_2 \frac{F_{fit}}{F_{fst}} \right), \sum_{i=1,2} \omega_i = 1 \quad (26)$$

式中: γ_{in} 为内优化层综合设计目标; ω_1 、 ω_2 为各优化目标的权重系数, 取两个优化目标重要度一致, 各为 0.5; T_{fit} 、 T_{fst} 分别为某次迭代参数和初始参数计算的转矩波动; F_{fit} 、 F_{fst} 分别为某次迭代参数和初始参数计算的径向力脉动。

3.5.2 外层优化目标

对于外优化层而言, 以开关磁阻电驱动系统的各机电参数为优化设计变量, 以系统典型循环工况总损耗最低、系统总质量最小为多目标进行迭代优化。

$$\gamma_{out} = \min \left(\omega_1 \frac{W_{it}}{W_{st}} + \omega_2 \frac{m_{it}}{m_{st}} \right), \sum_{i=1,2} \omega_i = 1 \quad (27)$$

式中: W_{it} 、 W_{st} 分别为某次迭代参数和初始参数计算的系统总损耗; m_{it} 、 m_{st} 分别为某次迭代参数和初始参数计算的系统总质量。

3.6 协同设计实例

采用 NSGA-II 算法作为协同设计流程中的多目标优化算法, 其中种群数量设置为 24, 最大迭代种群数设置为 70, 整个优化迭代过程总计产生了 436 个满足约束条件的可行设计解, 本文所选最优解下的开关磁阻电驱动系统的机电参数如表 3 所示, 典型循环工况下各工况点的最优控制参数如图 14 所示。

表 3 电驱动系统机电参数协同优化结果

电机设计参数	协同设计结果	齿轮传动系统设计参数	协同设计结果
线圈匝数	21	单挡减速器齿轮模数/mm	2.75
铁芯堆叠长度/mm	282.00	单挡减速器小齿数	19
定子外径/mm	325.24	单挡减速器大齿数	76
转子外径/mm	185.18	单挡减速器齿轮齿宽系数	0.38
定子内径/mm	188.00	单挡减速器齿轮螺旋角/(°)	9.53
转子内径/mm	133.48	单挡减速器齿轮压力角/(°)	25.64
定子轭高/mm	21.15	主减速器齿轮模数/mm	3.22
转子轭高/mm	22.09	主减速器小齿数	23
定子极宽/mm	26.32	主减速器大齿数	78
转子极宽/mm	26.79	主减速器齿轮齿宽系数	0.43
轴径/mm	89.30	主减速器齿轮螺旋角/(°)	9.87
硅钢片厚度/mm	0.31	主减速器齿轮压力角/(°)	24.33

图 15 为协同设计前后各工况点下驱动电机输出电磁转矩波动与径向力脉动的对比情况。协同设计

前典型循环工况各工况点的电磁转矩波动范围处于 0~8 N·m, 径向力脉动范围处于 0~800 N; 协同设计后

电磁转矩波动范围处于0~4 N·m,径向力脉动范围处于0~600 N,相较于协同设计前均有明显下降。

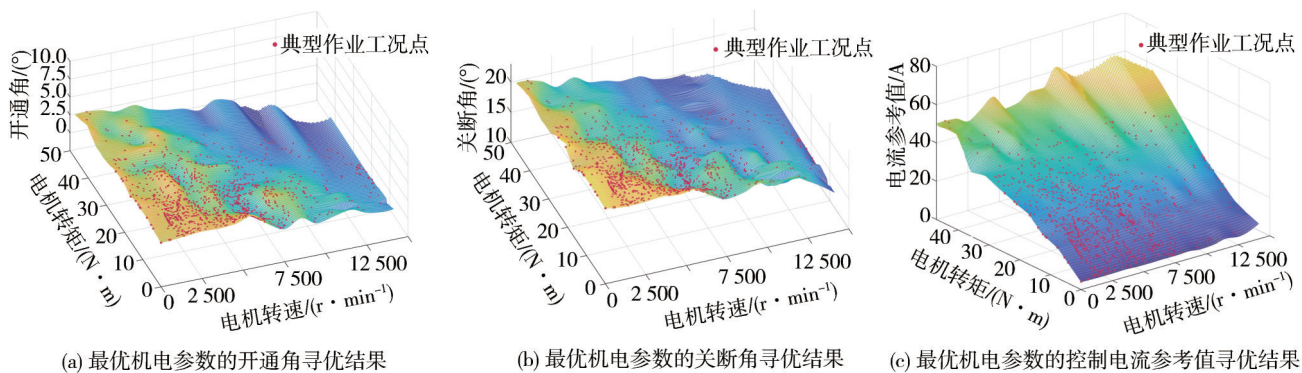


图14 电驱动系统控制参数协同优化结果

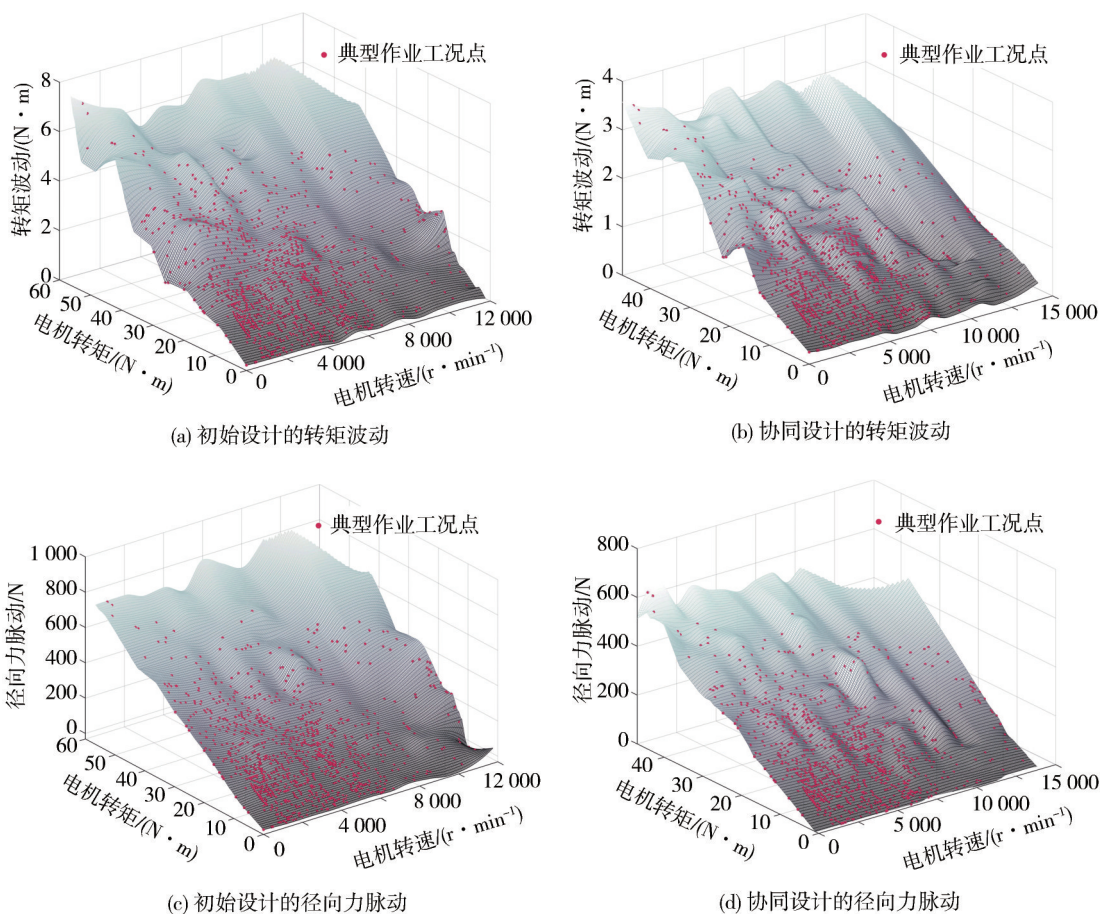


图15 最优控制策略对应的转矩和径向力波动对比

图16为优化前后开关磁阻电驱动系统典型行驶工况下损耗功率曲线及效率MAP。如图16(a)所示,经协同设计后的电驱动系统相较于初始设计的电驱动系统,在整个循环行驶工况下的损耗功率明显下降。为直观地表示系统损耗降

低对效率的影响,绘制了优化前后开关磁阻电驱动系统的效率MAP,如图16(b)和图16(c)所示。初始设计的电驱动系统几乎一半的工况点对应的系统效率小于80%,其次处于80%~85%区间,较少的工况点对应的系统效率处于85%以上;经

协同设计后的电驱动系统进行工况测试时,大部分工况点的系统效率处于85%以上,少部分工况

点的系统效率处于90%以上,系统综合效率得到提升。

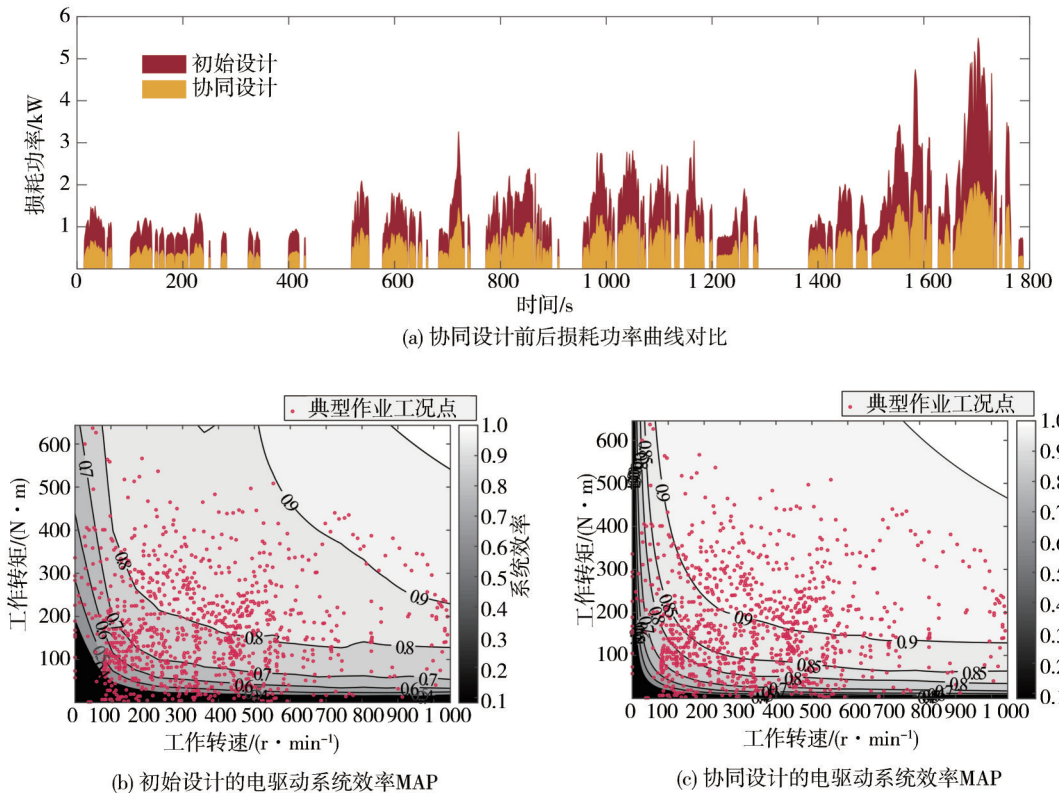


图16 基于典型循环工况下的电驱动系统功率曲线

表4给出了12/8极开关磁阻电驱动系统机电控参数协同设计前后的各项设计效果指标的对比情况。由表可见,经协同设计后的开关磁阻电驱动系统总质量减轻了37.82 kg,轻量幅度达到19.76%;CLTC-P典型行驶工况的系统总损耗下降了 7.54×10^5 J,下降幅度达到42.45%;典型行驶工况的系统综合效率从先前的79.24%上升到86.90%,提升了7.66%。

表4 协同设计效果指标对比

指标类型	初始设计	协同设计
SRM质量/kg	95.05	85.91
齿轮传动系统质量/kg	96.35	67.67
系统总质量/kg	191.40	153.58
最大功率密度/(kW·kg ⁻¹)	0.30	0.37
系统总损耗/J	1.776×10^6	1.022×10^6
系统效率/%	79.24	86.90

4 结论

基于建立的开关磁阻电驱动系统各子模型计算得到的系统各项性能参数,结合电驱动系统适配的典型循环行驶工况点数据,提出了一种开关磁阻电驱动系统机电控参数协同设计方法。

该方法采用双层嵌套优化的设计思路,在外优化层根据初始机电参数计算约束条件,满足约束条件进入内优化层后,以电机转矩、径向力波动最小为优化目标,优化典型循环行驶工况各工作点处的电机控制参数(开通角、关断角、控制电流参考值)。外优化层基于上述优化得到的机电控参数计算系统典型循环工况总损耗及系统总质量,以系统总损耗与总质量最小为多优化目标进行迭代优化。整个过程通过脚本自动化进行,在保证模型计算精度要求的前提下极大提升了设计效率。

采用该方法对12/8极开关磁阻电驱动系统进行

机电控参数协同优化,经协同设计后的开关磁阻电机驱动系统总质量减轻 19.76%,典型循环行驶工况下的系统总损耗下降 42.45%,系统综合效率上升 7.66%,验证了该优化设计方法的有效性。

参考文献

- [1] DIAO K, SUN X, BRAMERDORFER G, et al. Design optimization of switched reluctance machines for performance and reliability enhancements: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 168: 112785.
- [2] EL-NEMR M, AFIFI M, REZK H, et al. Finite element based overall optimization of switched reluctance motor using multi-objective genetic algorithm (NSGA-II)[J]. *Mathematics*, 2021, 9(5): 576.
- [3] LEE C, LEE J, JANG I G. Shape optimization-based design investigation of the switched reluctance motors regarding the target torque and current limitation[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2021, 64(2): 859-870.
- [4] XIU J, WANG S, XIU Y. Optimum firing angles control for switched reluctance motor based on IPSO at steady state [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2023.
- [5] SUN X, WAN B, LEI G, et al. Multiobjective and multiphysics design optimization of a switched reluctance motor for electric vehicle applications [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, 36(4): 3294-3304.
- [6] 刁凯凯, 孙晓东, 杨泽斌. 开关磁阻电机系统级确定性与鲁棒性优化设计方法的对比分析[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(9):3575-3586.
- DIAO K K, SUN X D, YANG Z B. Comparative analysis of system-level deterministic and robust optimization design methods for switched reluctance motors [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(9):3575-3586.
- [7] 朱曰莹, 赵桂范, 杨娜. 电动汽车用开关磁阻电机驱动系统设计及优化[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(11): 88-98.
- ZHU Y Y, ZHAO G F, YANG N. Design and optimization for switched reluctance motor drive system in electric vehicles [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(11): 88-98.
- [8] KWON K, SEO M, MIN S. Efficient multi-objective optimization of gear ratios and motor torque distribution for electric vehicles with two-motor and two-speed powertrain system [J]. *Applied Energy*, 2020, 259: 114190.
- [9] WU P, QIANG P, PAN T, et al. Multi-objective optimization of gear ratios of a seamless three-speed automated manual transmission for electric vehicles considering shift performance [J]. *Energies*, 2022, 15(11): 4149.
- [10] SUN G B, CHIU Y J, ZUO W Y, et al. Transmission ratio optimization of two-speed gearbox in battery electric passenger vehicles [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2021, 13(6): 16878140211022869.
- [11] 秦兆博. 混合动力履带车辆机电复合传动系统优化设计方法 [D]. 北京:清华大学, 2018.
- QIN Z B. Optimal design methodology of the electro-mechanical transmission system for hybrid tracked vehicles [D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.
- [12] 牛继高, 王招君, 张朋播, 等. 基于 Cruise 和 Isight 的两挡电动汽车传动系统匹配与优化 [J]. *机械传动*, 2021, 45(5): 133-138.
- NIU J G, WANG Z J, ZHANG P B, et al. Matching and optimization of two-speed electric vehicle transmission system based on cruise and isight [J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2021, 45(5): 133-138.
- [13] 杨艳, 邓智泉, 曹鑫, 等. 无轴承开关磁阻电机径向电磁力模型 [J]. *电机与控制学报*, 2009, 13(3): 377-382.
- YANG Y, DENG Z Q, CAO X, et al. Magnetic radial force model of bearingless switched reluctance motors [J]. *Electric Machines and Control*, 2009, 13(3): 377-382.
- [14] CHEN R, LIU C, QIN D, et al. Electromechanical dynamic analysis of the integrated system of switched reluctance motor and planetary gear transmission [J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2022: 1-19.
- [15] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- WU J H. Design and application of switched reluctance motor [M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [16] 王成, 高常青, 崔焕勇. 基于啮合效率下斜齿圆柱齿轮设计参数的选择 [J]. *燕山大学学报*, 2012, 36(2): 126-130.
- WANG C, GAO C Q, CUI H Y. Selection of design parameters of helical gear based on meshing efficiency [J]. *Journal of Yanshan University*, 2012, 36(2): 126-130.