

电动汽车感应电机驱动系统效率优化控制

张承慧, 崔纳新, 李珂, 张承进

(山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 针对电动汽车感应电动机变频驱动系统存在的轻载低效问题, 考虑电机定转子铜损和铁损, 研究了感应电动机变频驱动系统效率优化控制算法. 采用减小磁链搜索范围的方法, 改进了黄金分割法在线搜索控制器, 设计了以数字信号处理器TMS320LF2407为控制电路核心的实验系统, 对损耗模型控制算法、黄金分割法和改进的黄金分割法在线搜索控制算法分别进行了对比实验研究. 实验结果表明, 两类控制策略都能够有效提高感应电动机变频驱动系统的运行效率; 基于损耗模型的控制算法具有寻优速度快、磁链和转矩波动小的优点, 而改进的黄金分割法搜索控制器算法简单, 效率优化效果优于基于损耗模型的控制策略; 在线搜索控制算法不受电机参数变化及建模精度的影响, 具有更为广泛的应用前景.

关键词: 电动汽车; 优化控制; 效率; 感应电动机

中图分类号: TM346 **文献标识码:** A

Efficiency optimization control of induction motor drives for electric vehicles

ZHANG Cheng-hui, CUI Na-xin, LI Ke, ZHANG Cheng-jin

(College of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan Shandong 250061, China)

Abstract: Taking the copper loss and iron loss into account, the efficiency optimization control of induction motor (IM) drives for electric vehicles is studied to improve the motor efficiency under light load. The search-controller based on golden section algorithm is improved by reducing the search scope of rotor flux. An experimental system is built based on TMS320LF2407 DSP. Loss-model control algorithm and search-control algorithm based on golden section method and improved golden section method are compared through experimental research. The experimental results show that both of the control strategies can improve the motor efficiency remarkably. The loss-model controller has good characteristics of fast optimization speed and small torque and flux fluctuation. The algorithm of improved golden section search-controller is simple, and it can achieve higher efficiency than loss-model controller. Search-controller is independent of parameter variations and model precision, and it thus has broad application prospects.

Key words: electric vehicles; optimal control; efficiency; induction motors

1 引言(Introduction)

集多项高新技术于一体的电动汽车(electric vehicles)具有无排放污染、噪声低、维修及运行成本低等优点, 正在引发世界汽车工业的一场革命, 电动汽车电驱动系统及其效率优化成为人们研究的热点问题^[1~4]. 电动汽车电驱动系统不仅要求有良好的动态特性和较宽的调速范围, 而且对能量利用效率的要求相当苛刻. 复杂的运行工况决定了其驱动电机大多运行在非额定状态以满足起动加速、低速爬坡及高速运行的需要, 因此, 电驱动系统效率优化控

制的实质是面向全部转矩转速运行范围保证系统总体效率最优^[4]. 感应电动机由于具有体积小、重量轻、成本低、免维护等优点, 因而成为电动汽车电驱动系统的主流方向. 综合利用矢量控制和效率最优控制, 可以有效扩展电动汽车感应电机的高效运行范围, 延长电动汽车一次充电的行驶里程和电池寿命, 更好地达到节能和环保的目的.

变频驱动感应电动机效率优化控制大致分为3种类型: 最小定子电流控制策略^[1]、最小输入功率在线搜索控制策略^[3]和基于损耗模型的最优励磁控制

收稿日期: 2004-06-23; 收修稿日期: 2005-10-31.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50477042, 60474007); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20040422052); 山东省自然科学基金资助项目(Z2004G04).

策略^[2]. 这些效率优化策略各具特点. 定子电流最小策略实现起来较为简单, 但并不能保证效率最优; 最小输入功率在线搜索控制能够实现变频驱动系统的效率全局最优, 且不受电机参数变化的影响; 依据损耗模型来优化变频调速系统效率的方法, 具有性能稳定、寻优速度快的优点, 可实现效率的全局最优. 文[5]和[6]分别研究了有速度传感器和无速度传感器矢量控制感应电动机的效率优化问题, 采用自适应转子磁链观测器调节转子磁链, 这种方法算法复杂, 且没有考虑参数变化对控制效果的影响; 文[7]研究了在不同的转矩和速度条件下采用模糊逻辑在线搜索控制器实现感应电机效率优化, 该方法针对标量控制的变频调速感应电动机, 不适用于要求宽调速范围和快速动态响应的电动汽车电驱动系统. 本文在分析感应电动机损耗模型的基础上, 提出了基于损耗模型的感应电动机变频驱动系统效率优化控制算法; 针对黄金分割法在线搜索控制器在寻优过程中存在磁链和转矩波动大的不足, 采用减小磁链搜索范围的方法对其加以改进. 以TMS320LF2407 DSP为控制电路核心搭建实验系统, 实验结果表明两种控制策略都能够使感应电动机变频驱动系统运行损耗明显降低, 而改进的黄金分割法搜索控制器算法简单、效率优化效果好, 是解决电动汽车驱动系统的经济运行的有效途径之一.

2 电动汽车驱动系统用感应电动机的数学模型(Model for IM in electric vehicle drives)

感应电动机矢量变换控制是基于产生同样的旋转磁场这一等效原则建立起来的, 经过三相至二相(3/2)变换、矢量旋转变换(VR), 感应电动机在 $d-q$ 同步旋转坐标系中的动态数学模型可表示为^[8]:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - \omega_1 \psi_{qs}, \quad (1)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} + \omega_1 \psi_{ds}, \quad (2)$$

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr} - \omega_s \psi_{qr}, \quad (3)$$

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr} + \omega_s \psi_{dr}, \quad (4)$$

$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_r} (i_{qs} \psi_{dr} - i_{ds} \psi_{qr}). \quad (5)$$

其中: v 表示电压, i 表示电流, R 表示电阻, ψ 表示磁链, 下标 d, q 分别表示 d 轴, q 轴变量, 下标 s, r 分别表示定、转子变量, ω_1, ω_s 分别表示同步旋转电角频率和转差角频率, T_e 为电磁转矩, n_p 为电动机极对数.

在磁场定向矢量控制中, $d-q$ 坐标系的 d 轴沿转子磁链 ψ_r 的方向定向, 所以有 $\psi_{dr} = \psi_r, \psi_{qr} = 0$. 因此, 由式(5)可得

$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_r} i_{qs} \psi_r. \quad (6)$$

其中

$$\psi_r = \frac{L_m}{1 + T_r p} i_{ds}. \quad (7)$$

图1给出了感应电动机磁场定向矢量控制系统原理框图. 上标“*”号表示各物理量的参考值. 该系统用于验证本文提出的电动汽车感应电动机效率优化控制策略的性能.

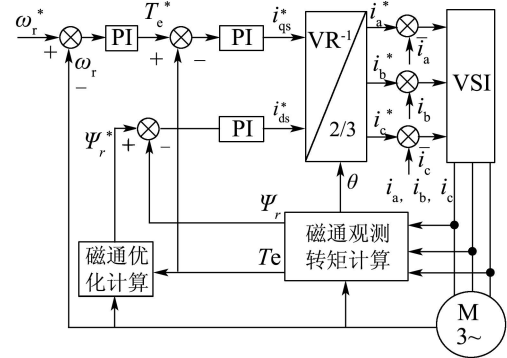


图1 感应电动机磁场定向矢量控制系统原理框图

Fig. 1 Field oriented control scheme for induction motor

3 感应电动机的损耗分析与建模(Loss analysis and modeling of IM)

感应电动机的损耗包括定转子铜损、定转子铁损、杂散损耗和机械损耗4部分. 其中, 前两部分损耗之和占总损耗的80%左右, 称为可控损耗. 铁损包括涡流损耗和磁滞损耗两部分, 与电机铁芯的结构参数、电压频率和磁通密度有关, 严重影响系统的效率.

感应电动机的可控损耗可以表示为^[9]

$$P_{\text{loss}} = (a_1 + a_2 \omega_r^2) \psi_r^2 + a_3 \frac{T_e^2}{\psi_r^2}. \quad (8)$$

式中

$$a_1 = R_s / L_m^2, \quad a_2 = 1 / (R_r + R_{fe}),$$

$$a_3 = \frac{L_r^2}{n_p^2 L_m^2} \left(R_s + \frac{R_r R_{fe}}{R_r + R_{fe}} \right).$$

由上式可以得出, 假设电动机参数不变, 在一定的转子角频率 ω_r 和一定的负载转矩条件下, 电动机的可控损耗与转子磁链 ψ_r 的大小有关, 也就是说, 在电动机输出功率不变的前提下, 可以通过适当选择和控制在转子磁链 ψ_r 将电动机的损耗降为最小.

忽略机械损耗和杂散损耗, 感应电动机的效率表

示为

$$\eta = \frac{\omega_r T_e}{P_{\text{loss}} + \omega_r T_e} = \frac{\omega_r T_e}{(a_1 + a_2 \omega_r^2) \psi_r^2 + a_3 \frac{T_e^2}{\psi_r^2} + \omega_r T_e}. \quad (9)$$

图2示出了 $\omega_r=1200$ r/min时在不同转矩条件下可控损耗与转子磁链的关系, 图中显示电机损耗随负载转矩的升高而增大. 随着转子磁链的升高, 电机损耗先单调下降, 再单调上升, 损耗最小点随转矩不同而变化. 因此, 通过调节转子磁链 ψ_r 的大小, 可以实现负载转矩运行时的效率最优控制. 图2显示随着负载转矩的减小, 效率优化运行对应的转子磁链随之下降, 尤其在轻载情况下, 通过调节转子磁链 ψ_r , 可以明显地降低电机损耗.

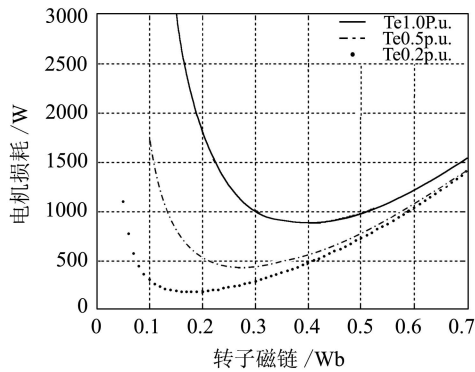


图2 不同转矩时可控损耗与转子磁链的关系

Fig. 2 Relationship between loss and rotor flux under different torques

4 电动汽车驱动系统效率最优控制(Efficiency optimization control in electric vehicle drives)

4.1 基于损耗模型的效率最优控制(Efficiency optimization control based on loss model)

可以证明, 式(9)中的效率函数 η 是一个凸函数, 对于给定的转矩和转速, 由式(9)对磁链 ψ_r 求导并令其等于零, 即

$$\frac{\partial \eta}{\partial \psi_r} = 0. \quad (10)$$

求解上式可得

$$\psi_r^* = \sqrt[4]{\frac{a_3}{a_1 + a_2 \omega_r^2}} \sqrt{T_e}. \quad (11)$$

上式即为效率优化运行对应的转子磁链. 上式表明, 此时的转子磁链 ψ_r^* 是转矩 T_e 和转速 ω_r 的函数. 图3比较了转速为1000 r/min时效率最优控制和恒磁通控制两种情况下的电机损耗. 图中表明轻载时效率最优控制与恒磁通控制相比损耗明显降低, 随着转矩的升高损耗降低的幅度越来越小, 而在额定转矩

附近与恒磁通控制没有明显区别.

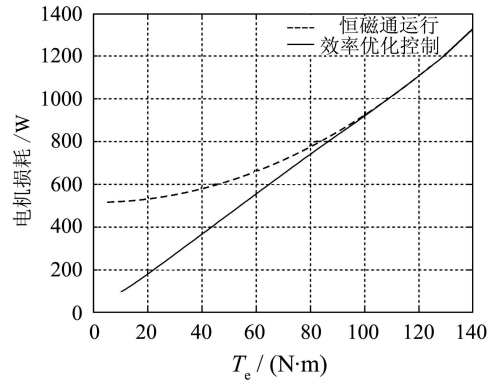


图3 效率优化控制和恒磁链控制的电机损耗比较

Fig. 3 Comparison of the motor loss between efficiency optimization control and constant flux control

4.2 改进的黄金分割法搜索控制器(Improved search-controller based on golden section technique)

基于损耗模型的效率优化策略控制精度易受电机参数变化的影响, 而最小输入功率在线搜索控制器对参数变化鲁棒性强. 采用黄金分割法的搜索控制器具有收敛速度快的优点^[2], 其思路是首先设定转子磁链的初始搜索区间 $[\psi_{r\min}, \psi_{r\max}]$, 一般将额定磁链作为区间上限, 即 $\psi_{r\max} = \psi_{rn}$, 为避免磁链过低引起系统的不稳定, 并使磁场运行在线性区, 取 $\psi_{r\min} = 0.1\psi_{rn}$ 为区间下限. 搜索区间确定后, 分别计算两个插入点:

$$\psi_{r1} = \psi_{r\min} + \alpha(\psi_{r\max} - \psi_{r\min}), \quad (12)$$

$$\psi_{r2} = \psi_{r\min} + \beta(\psi_{r\max} - \psi_{r\min}). \quad (13)$$

式中: $\alpha = 0.618$, $\beta = 0.382$. 检测在这两点的输入功率 P_{in1} 和 P_{in2} 并比较 P_{in1} 和 P_{in2} 的大小, 确定下一步的搜索区间 $[\psi_{r\min}, \psi_{r\max}]$. 设定容许误差 ε , 当 $|\psi_{r1} - \psi_{r2}| < \varepsilon$ 时停止搜索, 并令

$$\psi_r^{\text{op}} = \frac{\psi_{r2} + \psi_{r1}}{2},$$

此时的 ψ_r^{op} 为最小输入功率对应的磁链给定值.

黄金分割法在线搜索效率优化控制器虽然收敛速度较快, 但在搜索过程中磁链的波动程度较大. 分析其原因, 这是由于黄金分割法的初始搜索区间过大造成的. 一般为了保证最优磁链位于搜索区间内, 将搜索区间的上、下限分别设为 ψ_{rn} 和0(或10% ψ_{rn}), 这样采用黄金分割法搜索时磁链命令值的瞬时变化将达到额定磁链的38.2%甚至61.8%, 这样大的磁链变化必然使电磁转矩产生较大的波动, 在重载运行时甚至可能会产生异常停

车现象。

通过分析可知,如果已知电机负载转矩的大小,效率优化控制对应的磁链范围就能够相对缩小。因此,可以根据矢量控制算法中估计的电磁转矩来限制磁链的搜索范围,即

$$\psi_r^{\text{op}} \in [\psi_{r\min,i}, \psi_{r\max,i}], T_{e,i} \leq T_e \leq T_{e,i+1}. \quad (14)$$

式中 $\psi_{r\min,i}$ 和 $\psi_{r\max,i}$ 分别是当 $T_{e,i} \leq T_e \leq T_{e,i+1}$ 时磁链搜索区间的上、下界,可根据离线计算或仿真结果确定。此时磁链的搜索范围可小于 $50\%\psi_{rn}$,即比原黄金分割法的搜索范围缩小近一半。当搜索区间减小时,达到同样精度需要的搜索次数也会相应减小,即可以缩短寻优时间。诚然,改进的黄金分割法用电机的损耗模型作为先验知识确定磁链搜索区间的大致范围,但由于它对搜索区间上下限要求十分粗略,因此对电机损耗模型精度和参数变化没有严格要求。这与基于损耗模型的算法对电机损耗模型和参数精度过度依赖的情形大不一样。

效率优化控制算法使感应电动机轻载效率提高,但突加负载时存在动态响应较慢的问题,而电动汽车的运行要求有良好的动态特性。因此,必须采取措施予以解决。最简单的方法是保持励磁电流分量不变,将逆变器输出的所有电流增量用于增大转矩电流^[10],但采用这种方法电机的瞬态响应仍较慢。考虑到变频器额定电流的限制,采用在突加负载的动态过程中将定子电流励磁分量恢复为额定值,而使剩余电流全部用于转矩电流分量,即

$$\begin{cases} I_{ds} = I_{dsn}, \\ I_{qs} = \sqrt{I_{s\max}^2 - I_{dsn}^2}. \end{cases} \quad (15)$$

控制励磁电流对于标量控制的变频调速系统来说是较难实现的,但电动汽车电驱动系统一般采用磁场定向矢量控制的变频调速系统,其控制策略中已将定子电流分为力矩电流和励磁电流分别进行控制,因此对励磁电流的控制不成问题。如图1所示,磁链调节器的输出为励磁电流,动态过程中可以方便地将励磁电流 i_{ds}^* 给定设为额定值。

5 实验研究(Experiment research)

以上理论分析结果通过基于TMS320F2407的变频调速效率优化实验系统得到了验证。实验系统中的DSP通过RS-232接口与PC机通讯,在PC机上可以方便地观察运行结果。实验电机参数:额定转矩 $T_n=1.3 \text{ N}\cdot\text{m}$, 额定转速 $n_n = 2800 \text{ r/min}$, 额定电流 $i_n = 1.7 \text{ A}$, $n_p = 1$, $R_s=24.6 \Omega$, $R_r=16.1 \Omega$, $L_m=0.97 \text{ H}$, $L_{ls}=0.02 \text{ H}$, $L_{lr}=0.02 \text{ H}$,

$J=3.5 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。速度反馈信号通过光电编码器检测,光电编码器型号为HEDS5640。

图4为基于损耗模型的效率优化控制稳态运行实验结果,转速为 1500 r/min ,在 $t=1.2 \text{ s}$ 时启动效率优化控制算法。负载转矩为 $0.26 \text{ N}\cdot\text{m}$ (0.2p.u.)。优化前后电机输入功率由 132 W 下降为 78 W ,效率由 30.38% 上升为 51.41% 。图4显示启动效率优化控制算法后磁链 ψ_r 迅速下降,转矩电流 i_{qs} 略有上升,电磁转矩和转速波动很小。图5为电机加速过程的实验结果。电机启动后稳态转速为 900 r/min , 1.2 s 时启动基于损耗模型的效率优化控制算法; 2 s 时突加转速至 1800 r/min 。实验结果显示系统转速响应快,可迅速达到稳态且误差较小。

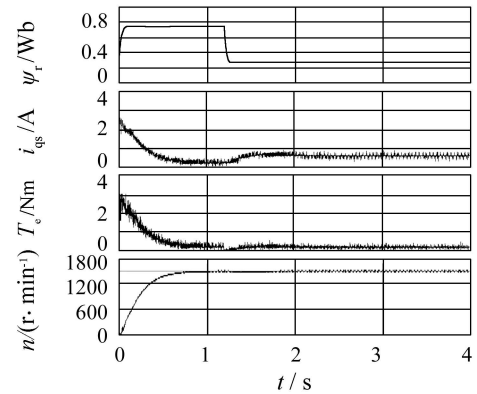


图4 损耗模型控制稳态运行实验结果

Fig. 4 Experiment results of loss-model control under steady state

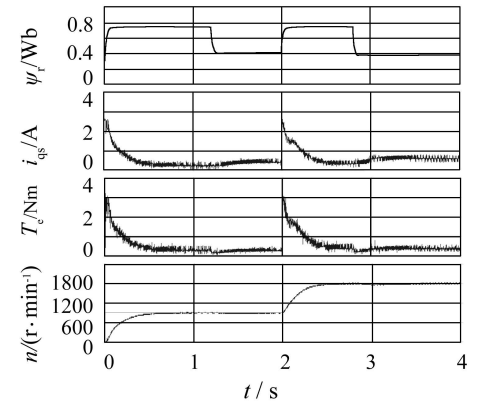


图5 损耗模型控制动态响应实验结果

Fig. 5 Experiment results of loss-model control for dynamic response

为验证改进的黄金分割法实际运行结果,由实验电机参数和式(11)可得到各种运行工况下的效率最优控制对应的转子磁链如图6所示。由此可得磁链搜索范围如表1所示。将表1存在控制系统程序存储器中,运行时根据矢量控制算法中估计的转矩查表得到磁链搜索的上、下限。该表是简单的一维结构,占用存储空间很小,编程实现和查表简单。

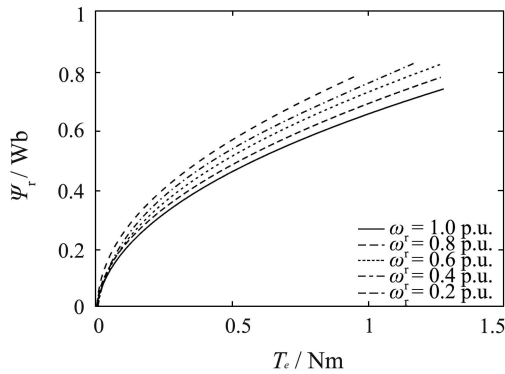


图 6 不同运行工况下效率最优控制对应的最优磁链
Fig. 6 Optimal flux linkage for efficiency optimization control under various operation condition

表 1 改进的黄金分割法磁链搜索范围
Table 1 Search domain of improved golden section algorithm

转矩范围	$\psi_{rmin,i}/\text{Wb}$	$\psi_{rmax,i}/\text{Wb}$
$0 \leq T_e \leq 0.2T_n$	0.08	0.46
$0.2T_n < T_e \leq 0.4T_n$	0.25	0.58
$0.4T_n < T_e \leq 0.6T_n$	0.42	0.75
$0.6T_n < T_e \leq 0.8T_n$	0.55	0.80
$0.8T_n < T_e \leq T_n$	0.65	0.80

实验电机以给定转速 1500 r/min 启动, 负载转矩为 0.26 N·m(0.2p.u.)并在 1.2 s 加入在线搜索算法. 分别采用原黄金分割法和改进的黄金分割法稳态运行实验结果如图7、图8所示. 由实验结果可以看出, 与原黄金分割法相比, 改进后不仅转矩和转速的波动明显减轻, 搜索时间也由 1.2 s 缩短为 0.8 s, 控制性能得到明显改善. 效率优化前后系统输入功率由 132 W 下降为 76 W, 由于电机为轻载运行(0.2p.u.), 效率较低, 优化前为 30.38%, 优化后上升为 52.63%, 提高了 22.25%.

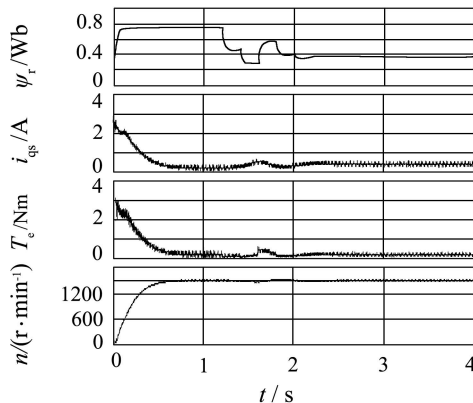


图 7 黄金分割法实验结果
Fig. 7 Experiment results of golden section algorithm

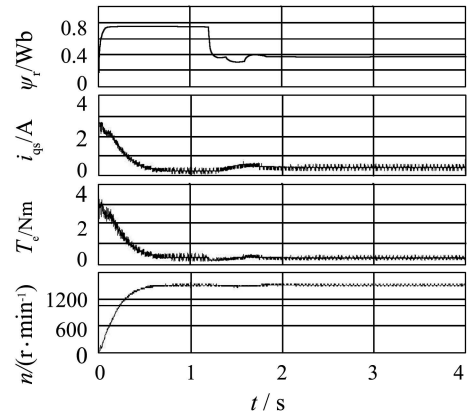


图 8 改进的黄金分割法实验结果
Fig. 8 Experiment results of improved golden section algorithm

上述采用损耗模型控制(LMC)和改进的黄金分割法在线搜索控制(SC)效率优化前后电机的输入输出功率及效率对比如表2所示. 由实验结果可知, 在相同的运行工况下, 改进的黄金分割法对应的优化后的电机效率高于损耗模型控制法. 原因在于在线搜索控制不受电机参数变化及建模精度的影响.

表 2 LMC和SC的对比
Table 2 Comparison of between LMC and SC

对比变量	LMC	SC
输出功率/W	40.1	40.1
优化前输入功率/W	132	132
优化后输入功率/W	78	76
优化前效率/%	30.38	30.38
优化后效率/%	51.41	52.63

6 结论(Conclusion)

针对电动汽车感应电动机变频驱动系统存在的轻载低效问题, 研究了基于损耗模型的优化控制策略和改进的黄金分割法在线搜索控制策略, 得到以下结论:

- 1) 基于损耗模型的优化控制策略和改进的黄金分割法在线搜索控制策略均能通过优化转子磁链明显提高电机运行效率;
- 2) 通过利用电机的损耗模型这一先验知识可大致确定并减小磁链搜索区间的范围, 可以明显改善黄金分割法搜索控制器的性能, 改进的搜索控制器的效率优化效果优于基于损耗模型的控制;
- 3) 改进的黄金分割法搜索控制器不但可以避免电机参数变化对效率优化效果的影响, 而且有效降低了寻优过程中转子磁链和转矩的波动程度, 缩短了寻优时间, 因而具有良好的推广应用前景.

参考文献(References):

- [1] WASYN CZUK O, SUDHOFF S D, HANSEN I G, et al. A maximum torque per ampere control strategy for induction motor drives[J]. *IEEE Trans on Power Conversion*, 1998, 13(2): 163 – 169.
- [2] TA C M, HORI Y. Convergence improvement of efficiency- optimization control of induction motor drives[J]. *IEEE Trans on Ind Applicat*, 2001, 37(6): 1746 – 1753.
- [3] 张承慧, 李爱文, 张庆范. 感应电动机新型最小损耗控制策略[J]. 电工技术学报, 1998, 13(4): 25 – 38.
(ZHANG Chenghui, LI Aiwen, ZHANG Qingfan. A novel loss minimization control strategy of an induction motor drive[J]. *Trans of China Electrotechnical Society*, 1998, 13(4): 25 – 38.)
- [4] 许家群, 朱建光, 邢伟, 等. 电动汽车驱动用永磁同步电动机系统效率优化控制研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(7): 81 – 85.
(XU Jiaqun, ZHU Jianguang, XING Wei, et al. Study of efficiency optimization control of permanent magnet synchronous motor drives for electric vehicle[J]. *Trans of China Electrotechnical Society*, 2004, 19(7): 81 – 85.)
- [5] MATSUSE K, YOSHIZUMI T, KATSUTA S, et al. High response flux control of direct-field-oriented induction motor with high efficiency taking core loss into account[J]. *IEEE Trans on Ind Applicat*, 1999, 35(1): 62 – 69.
- [6] MATSUSE K, TANIGUCHI S, YOSHIZUMI T, et al. A speed-sensorless vector control of induction motor operating at high efficiency taking core loss into account[J]. *IEEE Trans on Ind Applicat*, 2001, 39(3): 548 – 557.
- [7] SPIEGEL R J, TURNER B M W, MCCORMICK V E. Fuzzy-logic-based controllers for efficiency optimization of inverter-fed induction motor drives[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2003, 137(3): 387 – 401.
- [8] BOSE B K. *Modern Power Electronics and AC Drives*[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [9] CUI N X, ZHANG C H, ZHAO M. Optimal efficiency control of field-oriented induction motor drive and rotor resistance adaptive identifying[C]//*Proc of the 4th Int Power Electronics and Motor Control Conference(IPEMC)*. Xi'an: [s.n.], 2004: 414 – 419.
- [10] KIM G S, HA I J, KO M S. Control of induction motors for both high dynamic performance and high power efficiency[J]. *IEEE Trans on Ind Electron*, 1992, 39(1): 323 – 333.

作者简介:

- 张承慧** (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事工程优化控制、电机与控制等方面的研究, E-mail: zchui@sdu.edu.cn;
- 崔纳新** (1968—), 女, 博士, 副教授, 从事控制理论应用、电力电子与电力传动等方面的研究, E-mail: cuinx@sdu.edu.cn;
- 李珂** (1978—), 男, 博士研究生, 主要兴趣为控制理论与应用;
- 张承进** (1962—), 男, 教授, 主要从事适应控制、电机控制等方面的研究。

(上接第772页)

参考文献(References):

- [1] HENSON M A. Nonlinear model predictive control: current status and future directions[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1998, 23(2): 187 – 202.
- [2] LIN Y C, LO J C. Robust H/sub 2/fuzzy control via dynamic output feedback for discrete-time systems[C] // *IEEE Int Conf on Fuzzy Systems*. St Louis, USA: [s.n.], 2003, 2: 1384 – 1388.
- [3] KIRIAIDIS K. Nonlinear control system design via fuzzy modeling and LMIs[J]. *Int J of Control*, 1999, 72(7): 676 – 685.
- [4] LEE H J, PARK J B, CHEN G. Robust fuzzy control of nonlinear system with parametric uncertainties[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2001, 9(2): 369 – 379.
- [5] TONG S C, LI H X. Observer-based robust fuzzy control of nonlinear systems with parametric uncertainties[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2002, 131(2): 165 – 184.
- [6] ROUBOS J A, MOLLOV S, BABUSKA R, et al. Fuzzy model based predictive control using Takagi-Sugeno models[J]. *Int J of Approximate Reasoning*, 1999, 22(1-2): 3 – 30.
- [7] 王寅, 荣冈, 王树青. 基于模糊模型的非线性预测控制策略[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(4): 599 – 603.
(WANG Yin, RONG Gang, WANG Shuqing. Nonlinear predictive control strategy based on T-S fuzzy model[J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(4): 599 – 603.)
- [8] 师五喜, 霍伟, 吴宏鑫. 一类未知非线性离散系统的直接自适应模糊预测控制[J]. 自动化学报, 2004, 30(5): 664 – 670.
(SHI Wuxi, HUO Wei, WU Hongxin. Direct adaptive fuzzy predictive control for a class of unknown nonlinear discrete systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(5): 664 – 670.)
- [9] KOTHARE M V, BALAKRISHNAN V, MORARI M. Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities[J]. *Automatica*, 1996, 32(10): 1361 – 1379.
- [10] BOYD S, GHAOUY L E, FERON E, et al. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*[M]. Philadelphia: SIAM, 1994.

作者简介:

- 苏成利** (1977—), 男, 博士研究生, 研究方向为智能控制、模型预测控制、工业过程的先进控制, E-mail: sclwind@sina.com;
- 王树青** (1939—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为工业生产过程模型化与优化控制、先进控制等, E-mail: sqwang@iipc.zju.edu.cn.