一种用于异步电机效率优化的混合搜索方法

李延峰[1,2], 于海斌[1]
(1. 中国科学院沈阳自动化研究所 工业信息学重点实验室, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 针对异步电机效率优化问题,提出了一种混合搜索方法。该方法起始于模糊自适应搜索,然后切换至黄金分割法以获取确定收敛速度。这样的搜索步骤能够降低转矩波动,避免在最优点附近发生振荡。利用一个包含铁损和机械损耗的异步电机模型,对该方法进行了矢量控制下的性能验证。仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词: 异步电机; 效率优化; 搜索控制; 模糊搜索; 黄金分割法; 混合搜索
中图分类号: TM343 **文献标识码**: A **文章编号**: 1007-449X(2009)03-0337-05

Hybrid search method for efficiency optimization control of induction motor drives

LI Yan-feng[1,2], YU Hai-bin[1]
(1. Key Laboratory of Industrial Informatics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A hybrid search method is proposed for the efficiency optimization of vector controlled induction motors. This method gives fuzzy logic based adaptive search steps and then switches to the golden section technique to obtain a fixed convergence rate. Such a procedure reduces torque pulsation and avoids search oscillation around the optimal flux. Simulation results with a lossy model of a vector controlled induction motor show the feasibility of the method.

Key words: induction motors; efficiency optimization; search control; fuzzy logic based search; golden section technique; hybrid search

1 引 言

常规方式的异步电机运行只有在额定工作点附近才有最优的效率。当运行点下移后,绕组中过多的励磁储能所伴生的损耗将使效率降低。对于大量的变速变负载应用,异步电机的效率优化运行都是一个重要问题[1]。一个解决方法是控制定子电流励磁分量调节转子磁链进行效率优化,这是由于异步电机轻载稳态运行时只需要一个小于额定值很多的气隙磁场。这样的磁场既能够满足输出转矩要求,又能充分降低电磁损耗提高轻载运行效率。

迄今为止的各种效率优化方法可归结为两类,即基于电机损耗模型效率寻优和在线搜索寻优[2-12]。其中前一类方法建立损耗模型求取对应最优效率的控制量以实现效率最优,由于损耗模型复杂、参数准确值难以获得,限制了这种方法的应用[5]。搜索方法则不依赖电机参数,具有明显优势[2,3,7]。这种搜索是在稳态运行时,调节至电机输入功率最小。由于输出功率不变,输入功率最小即为效率最优。

效率搜索问题,关键在于对步长的选择。过大

收稿日期: 2008-08-06
基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(CX07-03-003)
作者简介: 李延峰(1968-),男,博士研究生,主要研究方向为电机检测与节能控制;
于海斌(1964-),男,博士,研究员,主要研究方向为工业通信与实时系统、分布式控制系统、网络协同与智能制造。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的搜索步长将引起输出转矩波动[8]。模糊搜索法[3,12]在效率最优点处可能出现振荡,但是由于能够自适应地给出较小的步长,对输出转矩影响很小。黄金分割法[7,8,10]具有确定的较快的收敛速度,但是其步长对转矩的影响较大。本文提出一种效率优化混合搜索方法,用以解决搜索方法中收敛速度和转矩波动的矛盾。

2 两种典型的效率优化搜索

本节主要分析模糊搜索和黄金分割法。一般性地讨论效率优化搜索方法问题,可参考文献[5,9]。图 1是一个效率优化异步电机传动系统的构成,反映出异步电机传动系统中基于在线搜索方式的效率优化方法与速度控制部分的关系。类似结构见于文献[2-4,6-8,10-12]。图 1中,效率优化单元的输入量为主电路直流环节的电流和电压,并在单元内部计算出逆变器的输入功率。

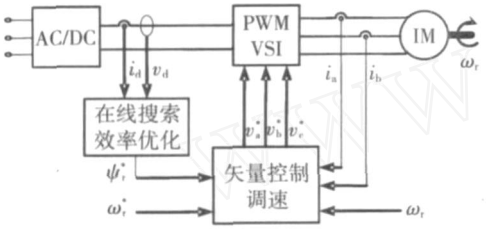

图 1 具有效率优化功能的异步电机传动系统

Fig 1 Efficiency optimization in induction motor drive

2.1 模糊搜索方法

异步电机效率优化模糊搜索方法具有不依赖电机参数、步长自适应调整等优点。继文献[3]之后,针对这个搜索方法进行了很多的后续研究,如文献[12]提出了新的比例因子确定方法并设计出不对称隶属度函数。值得注意的是,后续研究[4,6,11,12]均使用与文献[3]完全相同的模糊规则表,如表 1所示。

表 1 模糊搜索规则表

Table 1 Rules for the fuzzy search

$\Delta P_{d(k)} \backslash \Delta i^*_{sd(k-1)}$	N	P
NB	NB(1)	PB(8)
NM	NM(2)	PM(9)
NS	NS(3)	PS(10)
ZE	ZE(4)	ZE(11)
PS	PS(5)	NS(12)
PM	PS(6)	NS(13)
PB	PM(7)	NM(14)

模糊搜索方法的主要局限性在于在搜索过程的后半程,在效率最优点处存在振荡问题。

2.2 黄金分割法

另外一个高性能的异步电机效率优化寻优算法使用黄金分割法调节定子电流励磁分量,这种寻优方式没有在最优点附近振荡的问题[7]。因为黄金分割搜索是一个不断缩短搜索区间的过程,试点均取在区间的两个黄金分割点上,具有对称消去区间的优点。记两个黄金分割点 $F_1 = \Phi \approx 0.618$, $F_2 = \Phi^2 \approx 0.382$,并将寻优起始时的搜索区间长度记为单位长度 1。经过第一次搜索,目标区间长度即减至 $\Phi \approx 0.618$,第二次搜索后区间长度变为 $\Phi^2 \approx 0.382$,以后为 $\Phi^3 \approx 0.236$, $\Phi^4 \approx 0.146$, $\Phi^5 \approx 0.090$, $\Phi^6 \approx 0.056$, …, $\Phi^9 \approx 0.0132$, …。设搜索精度为 1%,则取第九次搜索确定的区间的中心为最优点,即完成寻优过程,且精确度大于 0.7%。可见,该寻优过程具有确定的收敛速度,能够消除搜索振荡问题。

由于确定步长的影响,搜索引起的转矩波动问题比较明显,需要在效率优化单元后续串联低通滤波器对转矩波动进行抑制[7,8]。

3 效率优化混合搜索方法

在分析前述两种搜索方法的局限性的基础上,提出一种混合搜索方法以综合这两种方法的优点来获得合理步长和良好的收敛性。

对于模糊搜索效率优化,额定磁链条件下的调速过程结束后,系统进入稳态,此后根据表 1开始效率优化。在效率优化的起始阶段,步长给定使得励磁电流单方向下降,输入功率变化为负。这种情况下,规则表中只有规则 (1)、(2)和 (3)发生作用,此时 $L\Delta i_{ds}$ (pu) = N, ΔP_d (pu) = NB、NM 或 NS,直至 ΔP_d (pu) = PS, PM 或 PM 时引起励磁电流增加。此后, $L\Delta i_{ds}$ (pu) = P条件下的三条规则发生作用。由于最优点附近区域输入功率变化不显著,搜索可能发生振荡。这个模糊规则表给出的自适应步长产生的转矩波动很小。

由此可见,模糊搜索方法的性能在励磁分量给定小于最优值之前是比较好的,而且在此过程中只使用了表 1中的 3条规则。方法的局限性在于搜索的后半程。

对于黄金分割法效率优化,在消减第一个目标区间之前,定子电流励磁分量从额定值 (标幺值) 1降至 0.618,然后又降至 0.382。可见该算法的第一个步长固定在 $\Phi^2 = 1 - 0.618 = 0.382$,第二个步长固定在 $\Phi^3 = 0.618 - 0.382 = 0.236$。对于不同的负载情况,对应的励磁调整步长序列可能为 $\Phi^2, \Phi^3, \Phi^4, \Phi^3, \Phi^5$, …或者 $\Phi^2, \Phi^3, \Phi^2, \Phi^3, \Phi^4$, …等不同的组合,并且可能产生后一个步长大于前一个步长的

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

现象。可见,搜索过程开始阶段的几个步长基本上是固定不变,这容易引起转矩波动。该法另一个问题在于,即使最优点离额定值不远时,依该方法仍然会按确定的起始路径搜索到励磁电流为标幺值 Φ^2,使电机运行到深度弱磁区。这些都是算法步长没有自适应性引起的。

上述分析表明,黄金分割法搜索引起转矩波动的原因在搜索的起始阶段。如果黄金分割法能够在一个大大缩小的范围内进行,就能够既保持其不发生寻优点附近振荡的优点,又能够相当程度上降低对输出转矩的影响。

综合以上对比研究,可以发现这两种搜索方法具有很好的优势互补性。对于同一个异步电机稳定运行状态进行效率优化搜索,模糊搜索给出的初始步长明显小于黄金分割法的初始步长,而且后续步长单调下降,说明模糊寻优从起始到越过最优点的过程中,步长给定更加合理。在效率优化搜索的前半程应该使用模糊搜索。由于黄金分割法的优势在于具有确定的收敛速度,在效率优化搜索的后半程应该采用黄金分割法进行寻优。由此得出本文提出的混合搜索方法。这种结合了前述两种搜索方式优点搜索方法的基本构成如图 2所示。

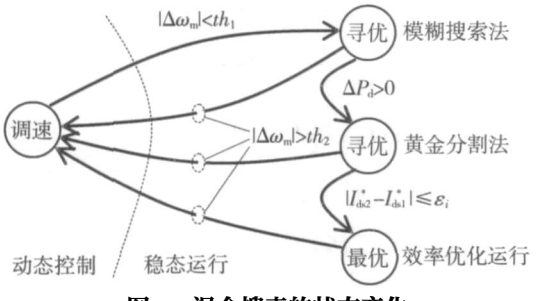

图 2　混合搜索的状态变化

Fig. 2　State changes for the hybrid search

对图 2所示的搜索过程为

1)当系统发出调速指令或负载转矩发生变化,都使得电机进入调速过程,此时转子磁链被提升至额定值以满足转矩输出要求,系统运行在标准的矢量控制方式。

2)以转速偏差 $|\Delta\omega_m| < th_1$ (th_1 为偏差阈值)为判据,系统进入稳态,开始模糊搜索效率优化。

3)经过若干步长,电机运行点越过效率最优点,输入功率变化值从负变正,即 $\Delta P_d > 0$。由此开始黄金分割法寻优,直至励磁电流变化小于设定的最小值:$|I^*_{ds2} - I^*_{ds1}| \leq \varepsilon_i$,其中 I^*_{ds2}和 I^*_{ds1}为最后两次搜索步骤的励磁电流给定值。令最优励磁电流为 I^*_{ds2}和 I^*_{ds1}的平均值。至此,形成一个完整的效率优化过程。

4)在寻优过程中,当负载变化或转速调整使得转速偏差 $|\Delta\omega_m| > th_2$ (th_2 为偏差阈值),立即中止寻优步骤,并恢复额定励磁,开始相应的调速过程。在动态过程结束后,进入新的稳态,开始新的一轮效率优化。

混合搜索中的模糊寻优的模糊规则数量大为减少。如果选择与文献[3]同样的模糊变量,混合搜索只需要表 1中的规则(1)～(4)共 4条规则。这是由于寻优一定是从磁链额定值开始,并且起始的若干搜索步骤使输入功率降低,直至寻优试点越过效率最优点,令此试点为 $i_{ds}(1)$,$i_{ds}(1)$前一个试点为 $i_{ds}(0)$,$i_{ds}(0)$前一个试点为 $i_{ds}(-1)$。由于试点 $i_{ds}(0)$的输入功率比它前后的输入功率都小,效率最优点必在($i_{ds}(-1)$,$i_{ds}(1)$)邻域之中。以这个大大减小的邻域为新的搜索区间进行黄金分割法寻优。由于搜索步长相应减小,对转矩的影响大为削弱。这个效率优化方法性能的提高使得在很多应用场合中都可以将原来的后续串联低通滤波器取消,使系统结构得到简化。

4　仿真实验

针对提出的混合搜索方法,利用 Simulink仿真工具进行了计算分析。其中的异步电机模型引入了表征铁损的两个磁链绕组以反映铁损的变化[13],仿真系统还包含了风阻摩擦损耗和杂散损耗[14]。异步电机参数为:$P = 1.1$ kW,$R_1 = 5.27\Omega$,$L_{s1} = 18.8$ mH,$U = 380$ V,$R_2 = 5.07\Omega$,$L_{s2} = 33.1$ mH,$p = 2$,$R_{fe} = 722\Omega$,$L_m = 463.1$ mH,$f = 50$ Hz,$J = 0.02$ kg·m^2,$B_m = 0.001$。

仿真包括基频以下调速和基频以上调速之后两种效率优化搜索。在基频以下,系统运行过程是起始时,$t = 0$ s,系统处于稳态,转速 $\omega_m = 1\,200$ r/min,负载转矩 $T_L = 4.0$ N·m。在 $t = 0.2$ s时,负载转矩降至 $T_L = 0.37$ N·m,PI调节器输入端的速度偏差信号增大,传动系统进入动态过程,同时速度偏差信号的作用使得转子磁链恢复额定值。当调速过程结束进入稳态后,开始效率优化混合搜索。在效率优化完成后,当 $t = 3.7$ s时,转速给定由 $\omega_m = 1\,200$ r/min降为 $\omega^*_m = 1\,000$ r/min,同时负载转矩变为 $T_L = 0.74$ N·m。转速给定的变化使气隙磁通恢复额定值,实现动态过程的快速性。当这一个动态过程结束后,在新的稳态,又开始新的效率优化混合搜索以优化转子磁链。由于负载变大,新的优化磁链比上一个稳态的优化磁链值大。这一部分的仿真

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

结果如图 3所示。

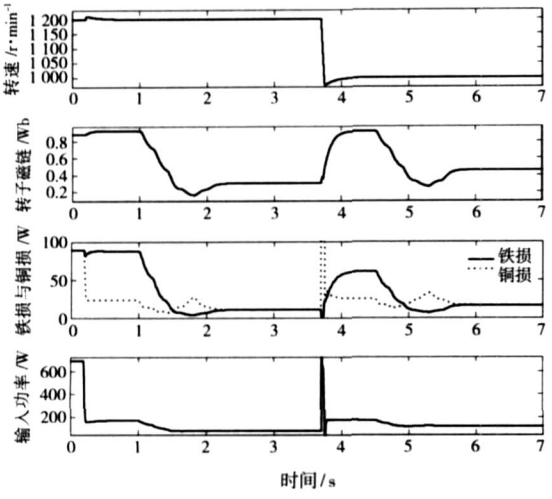

图 3 基频以下的混合搜索方法仿真结果

Fig. 3 Simulation results for the hybrid search below base frequency

图 3给出了 0～7 s时间内的电机转速、转子磁链、铁损和铜损以及输入功率的变化。在 $t=0.2$ s以后,由于负载转矩下降,实际转速增加,系统的动态调节表现为转速出现了明显的波动,但是在约 0.5 s的时间内系统进入新的稳态。在随后的效率优化过程中,转速平稳,系统稳态得以维持。同样可以看出,在 $t=3.7$ s开始的调速过程结束后,稳态效率优化搜索过程依然保持了转速的稳定。

仿真中,不论是根据转速给定变化将定子电流励磁分量恢复至额定值,还是依靠速度给定和速度实际值的偏差提升电机励磁,都忽略了电机的机械动态过程以简化分析,这样电机励磁恢复时间只受转子时间常数影响,这一点可以从转子磁链变化曲线中看出。但是实际效率优化中的励磁恢复还要受机械时间常数影响,使得实际的励磁恢复更加滞后。这样实际调速过程起始段由于励磁尚未恢复至额定值,PI调节器输出饱和,定子电流转矩分量过大,铜损急剧增加。因此,对于系统给定速度变化的情况,直接根据给定变化恢复励磁至额定值,使磁链恢复更快速,降低动态过程的功耗。

从图 3的铁损和铜损变化曲线可以看出,磁链调节与铁损变化表现出强相关性。当铁损和铜损获得新的平衡时,电机运行至效率最优点。从曲线上可以看出,在 $t=3.7$ s后,电机弱磁运行开始向额定励磁恢复但是还没有建立额定励磁,有一个短暂的铜损峰值出现,这个峰值约为 1 800 W。这是应用效率优化后的动态调速所付出的代价。对于转速给定变化的情况,直接依据转速给定变化确定对励磁的恢复,能够提早开始励磁恢复,减低铜损增大程度。

图 4是对基频以上调速仿真结果。仿真从 $t=7$ s开始,在 $t=7.2$ s时,电机转速给定从 $\omega_m^*=1\,000$ r/min变为 $\omega_m^*=1\,650$ r/min,负载转矩变为 $T_L=0.89$ N·m。

在动态调速过程中,同样要提升转子磁链,但是由于电机基频以上调速属于恒功率调速,转子磁链恢复值小于额定值以避免磁饱和。系统进入稳态后,开始效率优化的混合搜索以调节气隙磁链至效率最优水平。

表 2是仿真过程中效率优化前后的功率变化。可以看出经过效率优化混合搜索,输入功率明显降低,获得了很好的节能效果。

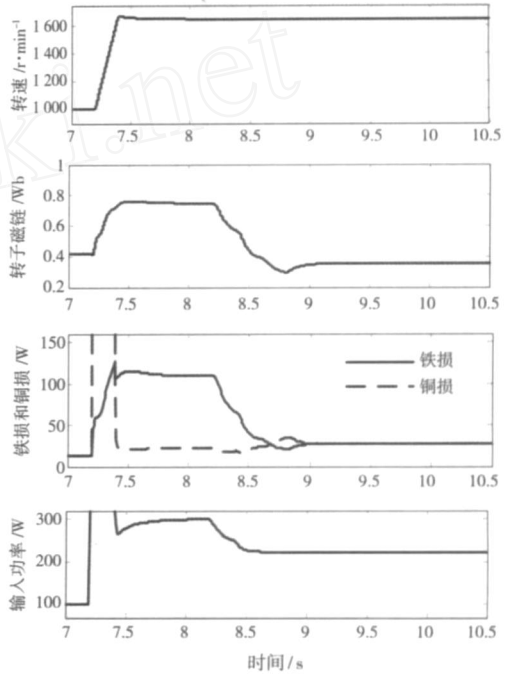

图 4 基频以上转速时的混合搜索方法的仿真结果

Fig. 4 Simulation results for the hybrid search above base frequency

表 2 模寻优前后输入功率变化

Table 2 Input power comparisons before and after the hybrid searches

运行条件	矢量控制 /W	混合搜索 /W	功率降低 /%
ω_m=1 200 r/min T_L=0.05pu	170	100	41
ω_m=1 000 r/min T_L=0.10pu	165	108	35
ω_m=1 650 r/min T_L=0.12pu	300	220	27

对混合搜索法和黄金分割法效率优化的性能进行了对比分析。图 5给出了分别采用这两种搜索时的电机电磁转矩波动,可见黄金分割法搜索时前两个转矩波动峰值是采用混合搜索法时的相应转矩波动峰值的 170%以上。采用混合搜索法可以更好地

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

满足传动系统对动态的要求。

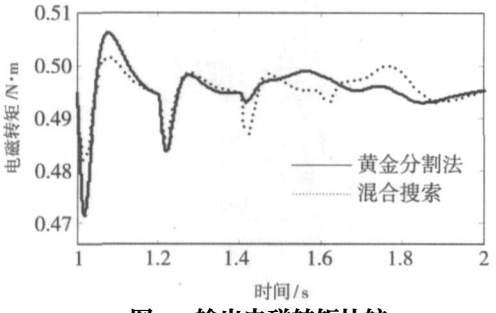

图 5　输出电磁转矩比较

Fig. 5　Comparison of output electromagnetic torques

5　结　语

在对比分析模糊搜索和黄金分割法这两种效率优化策略的特性的基础上,本文提出了一种混合搜索方法。这种方法将寻优过程分为两部分,在前半部分使用较小的搜索步长以避免出现明显转矩波动问题;在后半部分使用黄金分割寻优保证了收敛的确定性。当搜索越过最优点后,模糊搜索即切换为黄金分割搜索,以发挥两种寻优策略的互补优势。这种新方法降低了对输出转矩的影响,在多数应用中可以取消效率优化输出的低通滤波环节,简化系统结构。仿真分析表明这种混合搜索方法的可行性。

参 考 文 献:

[1] LORENZ R D. Key technologies for future motor drives[C]//*ICEMS* 2005. Nanjing: [s n.], 2005, 1: 1 - 6.

[2] KIRSCHEN D S, NOVOTNY D W, LIPO T A. On-line efficiency optimization of a variable frequency induction motor drive [J]. *IEEE Trans on Ind Applicat*, 1985, 21(4): 610 - 616.

[3] SOUSA G C D, BOSE B K, CLELAND J G. Fuzzy logic based on-line efficiency optimization control of an indirect vector-controlled induction motor drive [J]. *IEEE Trans on Ind Electron*, 1995, 42(2): 192 - 198.

[4] MORENO J, CIPOLLA M, PERACAULA J, *et al*. Fuzzy logic based improvements in efficiency optimization of induction motor drives[C]//*FUZZ - IEEE* 1997. Barcelona: IEEE Press, 1997: 219 - 224.

[5] ABRAHAMSEN F, BLAABJERG F, PEDERSEN J K, *et al*. On the energy optimized control of standard and high-efficiency induction motor in CT and HVAC applications [J]. *IEEE Trans on Ind Applicat*, 1998, 34(4): 822 - 831.

[6] SOUSA G C D, SIMONETTI D S L, NORENA E E C. Efficiency optimization of a solar boat induction motor drive[C]//*IEEE 35th IAS Annual Meeting*. Rome: IEEE Press, 2000: 1424 - 1430.

[7] 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.

[8] 郭鹏义,杨耕,孙梅生,等. 电动汽车驱动用感应电机在线效率最优控制的算法研究[J]. 电机与控制学报, 2003, 7(4): 290 - 293.
GUO Pengyi, YANG Geng, SUN Meisheng, *et al*. Online efficiency optimization control algorithms for induction motors applied in electrical vehicle drive [J]. *Electric Machine and Control*, 2003, 7(4): 290 - 293.

[9] 崔纳新,张承慧,杜春水. 变频调速异步电动机效率优化控制的研究进展[J]. 电工技术学报, 2004, 19(5): 36 - 42.
CUI Naxin, ZHANG Chenghui, DU Chunshui. Advances in efficiency optimization control of inverter-fed induction motor drives [J]. *Trans on China Electrotechnical Society*, 2004, 19(5): 36 - 42.

[10] 刘小虎,谢顺依,郑力捷. 一种改进的感应电机最大效率控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 95 - 98.
LIU Xiaohu, XIE Shunyi, ZHENG Lijie. Improvement of efficiency-optimization control of induction motor drives [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(6): 95 - 98.

[11] RAMESH L, CHOWDHURY S P, CHOWDHURY S, *et al*. Efficiency optimization of induction motor using a fuzzy logic based optimum flux search controller[C]//*PEDES* 2006. New Delhi: [s n.], 2006: 1 - 6.

[12] 张立伟,温旭辉,郑琼林. 异步电机用混合式模糊搜索效率优化控制研究[J]. 中国电机工程学报. 2007, 27(27): 83 - 87.
ZHANG Liwei, WEN Xuhui, ZHENG Qionglin. Fuzzy logic based hybrid search control strategy for efficiency optimization control of induction motors [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(27): 83 - 87.

[13] LEVI E. Impact of iron loss on behavior of vector controlled induction machines [J]. *IEEE Trans on Ind Applicat*, 1995, 31(6): 1287 - 1296.

[14] LU B, HABETLER T G, HARLEY R G. A survey of efficiency-estimation methods for in - service induction motors [J]. *IEEE Trans on Ind Applicat*, 2006, 42(4): 924 - 933.

(编辑:于智龙)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net