

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

刘震宇.
基于关联规则与PLC的同步电机
高精度转角自适应控制方法.
电机与控制应用,2021,48(9):43.

MTST系列 电机型式试验系统



MTST系列 电机型式试验系统①



MTST系列 电机型式试验系统②



MTST系列 电机型式试验系统③



MTST系列 电机型式试验系统④



MTST系列 电机型式试验系统⑤

CS-XY型电机出厂试验测试系统



DZC系列电机定子性能综合测试仪



TZ型电机堵转转矩测试仪



RZJ系列绕组匝间冲击耐电压测试仪



SEARI
上电科



地址: 上海市武宁路505号 传真: 021-62163904

电话: 021-62574990-436、18918357509

邮编: 200063

邮箱: wangcj@seari.com.cn

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.seari.com.cn

基于关联规则与 PLC 的同步电机高精度转角自适应控制方法

刘震宇

(国网冀北电力有限公司 承德供电公司, 河北 承德 067000)

摘要: 常规的转角自适应控制方法未能与同步电机的实际运行数据精准结合, 导致实际控制中精度不足, 因此提出基于关联规则与 PLC 设计的同步电机高精度转角自适应控制方法。计算同步电机的增益效率, 将结果加权处理, 得到同步电机转角理想传动比的计算方法。建立关联数据库, 基于关联规则优化转角控制增益系数。以适应性系数判断算法终止条件, 建立自适应模型结构, 得到同步电机中的转角质心偏离距离, 设计转角模糊自适应算法。在对比试验中, 试验组中适应性系数均值为 $0.48/0.92 \mu\text{m}$, 3 个对照组的均值分别为 $0.27/0.82$ 、 $0.42/0.57$ 、 $0.26/0.86 \mu\text{m}$ 。通过试验数据可知, 基于关联规则与 PLC 的同步电机高精度转角自适应控制方法比常规算法更适应同步电机的实际运行, 具备更高的精度控制效果。

关键词: 关联规则; 可编程逻辑控制器; 同步电机; 高精度转角; 自适应

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)09-0043-05

doi: 10.12177/emca.2021.079

High Precision Angle Adaptive Control Method of Synchronous Motor Based on Association Rules and PLC

LIU Zhenyu

(Chengde Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Chengde 067000, China)

Abstract: The conventional angle adaptive control methods are not accurately combined with the actual operation data of synchronous motor, which leads to the lack of accuracy in the actual control. Therefore, a high-precision angle adaptive control method of synchronous motor based on association rules and PLC is proposed. The gain efficiency of synchronous motor is calculated, and the results are weighted to get the calculation method of ideal transmission ratio of synchronous motor angle. An association database is established to optimize the angle control gain coefficient based on association rules. The end condition of the algorithm is judged by the adaptability coefficient, the adaptive model structure is established, the angular centroid deviation distance of synchronous motor is obtained, and the angular fuzzy adaptive algorithm is designed. In the comparative experiment, the mean value of adaptability coefficient in the experimental group is $0.48/0.92 \mu\text{m}$, and the mean values of the three control groups are $0.27/0.82$, $0.42/0.57$ and $0.26/0.86 \mu\text{m}$, respectively. The experimental data shows that, compared with the conventional algorithm, the high-precision angle adaptive control method of synchronous motor based on association rules and PLC is more suitable for the actual operation of synchronous motor, and has higher precision control effect.

Key words: association rules; programmable logic controller; synchronous motor; high precision angle; self adaptation

收稿日期: 2021-06-18; 收到修改稿日期: 2021-08-03

作者简介: 刘震宇(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为工作电力系统自动化控制、继电保护、电网运行等。

0 引言

在机械领域,同步电机应用十分广泛,在更高效地应用电机的研究与设计中,如何控制其转角的精度成为了一个十分热门的研究领域。然而由于转角对精度的高要求,很多粗略的算法在智能控制转角的过程中,很难保证实际稳定性,因此需要寻找更好的同步电机高精度转角自适应控制方法。

文献[1]通过设计基于 TIA 和 PLC 的变频恒压供水自动控制系统,并应用于实际生产中,实现仿真软件 360°的低误差旋转,然而由于该模型在电子信号与机械模型之间的连通性能较差,难以保证计算机仿真的结果与实际数据相匹配。文献[2]提出了基于 Super-twisting 算法的永磁同步电机自适应滑模速度控制,通过积分因子的跟踪,计算精度误差,并以自适应的优化算法提高精度的准确性,但是这种控制方法难以保证电机运行的稳定性,十分容易被反向操作的误差控制。文献[3]提出基于气隙磁场调制理论的永磁同步电机磁场分析与特性对比,利用电机的凸起端建立了一个模型参考的滤波器,通过计算电机参数的强度,逐步稳定地实现滑模观测。这种方法的缺点在于计算强度十分大,需要配置较高的计算设备,并且运算速度和算法的响应速度非常慢。本文综合以上文献,通过对数据库中文献资料的对比,基于关联规则算法与 PLC 程序,建立了同步电机高精度转角自适应控制方法,计算同步电机转角理想传动比,基于关联规则优化转角控制增益系数,PLC 则通过将控制指令输入到控制器的存储器中,然后进行存储和执行,完成同步电机高精度转角自适应控制,通过试验验证了该控制方法在实际中的应用效果优于常规方法。

1 基于关联规则与 PLC 设计同步电机高精度转角自适应控制方法

1.1 计算同步电机转角理想传动比

在计算同步电机的理想传动比时,可以将关联规则算法和 PLC 代入其中,目前可将 PLC 技术应用于各个领域,通过与计算机、现代机电等先进技术的结合,为各领域的工作交流奠定基础,突出了在工业生产过程中的重要应用优势。在电气自

动化设置中选择合理的 PLC 技术,可以对此类同步电机工程的设计和应用等具体情况进行实时控制。在运行过程中,PLC 技术的合理应用是对电机、电路、电源等进行合理调整的关键因素,并能在该技术的应用模式下,实现对电机使用具体情况的实时监控,从而根据对电流的要求实时调整变频器,为节能标准的实施与整体工作效率的提高提供基础条件。设增益角速度为 H_k ,则可以得到同步电机的增益效率为

$$H_k = \frac{\eta_i}{\lambda_n} \quad (1)$$

式中: H_k 为同步电机的传动过程中,理想状态下的增益角速度; η_i 为同步电机的高精度转角角度; λ_n 为同步电机在匀速状态下的横向摆动幅度^[4-5]。

将比值加权处理,可以得到:

$$H'_k = \frac{\eta'_i}{\lambda'_n} = \frac{\frac{a_n}{S_n}}{1 + \frac{m_i}{S_n} \left(\frac{X_a}{g_2} - \frac{Y_b}{g_2} \right) f^2} \quad (2)$$

式中: a_n 为同步电机在匀速状态下的侧向加速度; S_n 为同步电机在匀速状态下行走一圈达到的距离; m_i 为同步电机的转子质量; X_a 为同步电机在 X 轴方向的速度分量; Y_b 为同步电机在 Y 轴方向的速度分量; g_2 为同步电机稳态系数; f^2 为同步电机的稳态加速度增益系数^[6-7]。

通过式(1)、式(2)可以看出,理想传动比可以通过同步电机的转角转速而变化,如果转角过于灵敏,则很难判定转角转速的具体数值,因此可以设置一个理性状态,将转角的转速设为 0,则:

$$I_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_{imax}}{\sum_{i=1}^n \lambda_{imax}} \quad (3)$$

式中: $I_{\min}$ 表示当同步电机的转角转速为 0 时,理想传动比的数值; η_{imax} 表示同步电机运行到最大值时,临界状态下的转角转速; λ_{imax} 表示同步电机运行到最大值时,临界状态下的转角移动距离^[8-9]。由此可以得到同步电机的理想传动比。

1.2 基于关联规则优化转角控制增益系数

由上文可知理想传动比的加权组合,可以被称为单项指标的性能评价对象,由此可以建立管理数据库,且计算关联规则中的综合评价指标为

$$Q_z = Q_n \sqrt{\frac{\mu_A q_A^2 + \mu_B q_B^2 + \mu_C q_C^2 + \mu_D q_D^2}{\sum_{i=1}^n \mu_n q_n^2}} \quad (4)$$

式中: Q_z 为关联规则数据库中综合评价指标的评价值; Q_n 为关联规则数据库中综合评价指标的下限值; $\mu_A, \mu_B, \mu_C, \mu_D$ 均为 4 种关联规则的权值属性; q_n^2 为特殊状态下的同步电机转角运行效率^[10]。

上式中, 可以将 4 个 q_n^2 分别建立相应的指标规则, 分别得到 q_A^2, q_B^2, q_C^2 和 q_D^2 并关联到同步电机的转角高精度加权系数中。 q_A 表示 A 项指标在关联规则数据库中综合评价值为

$$q_A = \sqrt{\frac{\mu_{A1} q_{A1}^2 + \mu_{A2} q_{A2}^2}{q_{A1} + q_{A2}}} \quad (5)$$

式中: μ_{A1} 和 μ_{A2} 表示考虑实际情况后的同步电机转角运行惩罚因子; q_{A1} 和 q_{A2} 表示在关联数据库中, A 项指标的跟踪误差。在关联规则数据库中综合评价 q_B 同理可得:

$$q_B = \sqrt{\frac{\mu_{B1} q_{B1}^2 + \mu_{B2} q_{B2}^2}{q_{B1} + q_{B2}}} \quad (6)$$

式中: μ_{B1} 和 μ_{B2} 为考虑实际情况后的同步电机转角运行惩罚因子; q_{B1} 和 q_{B2} 为在关联数据库中 B 项指标的跟踪误差^[11]; q_C 与 q_D 同上。

综上所述, 转角控制增益系数就可以通过关联规则中的综合评价指标求得。

1.3 设计转角模糊自适应算法

通过上文中的增益系数, 可以直接得到自适应算法的模糊最优值, 以此判定对转角控制效果的改善程度, 控制器的搭建自适应模型结构如图 1 所示。

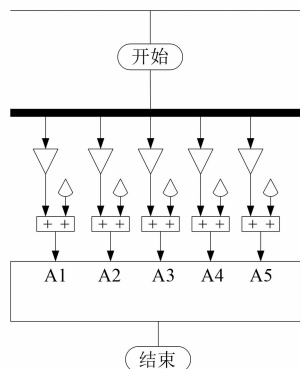


图 1 自适应模型结构

在图 1 中, A1~A5 分别表示 A 项指标中的 5

个指标系数。通过图 1 的模型结构, 可以得到同步电机中的转角质心偏离距离:

$$\theta^r = \frac{g_m - \frac{m_i b_i}{g_2 S_n}}{S_n \times (1 + H_u^2)} \lambda_f \quad (7)$$

式中: θ^r 为在上文的自适应模型结构中, 同步电机的转角偏离距离; g_m 为同步电机转角旋转的离心加速度; m_i 为同步电机的转子质量^[12]; b_i 为转角旋转的速度; S_n 为同步电机转角旋转一周所行走的距离; H_u 为质心偏移角与中心点的角度误差; λ_f 为同步电机的综合稳定系数^[13-14]。

综上, 可以建立同步电机转角的模糊自适应算法结构流程, 此时, 还需要将该算法的适应性系数增加到数据集中, 以便判断同步电机的高精度转角自适应算法是否能够停止迭代。算法结构流程图如图 2 所示。

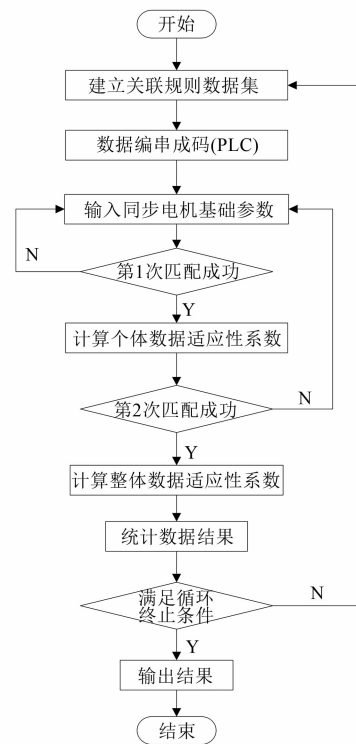


图 2 算法结构流程图

需要建立关联规则数据集, 将同步电机转角理想传动比代入到数据集中, 然后将数据编串成码, 得到同步电机转角的基础参数。通过单一数据的计算与数据集的整体计算, 可以得到整体的数据统计结果, 由式(8)判断是否满足了迭代的

终止条件:

$$|x_t| \leq \frac{\mu_n}{g_m} \quad (8)$$

式中: x_t 为同步电机高精度转角的算法适应性参数; μ_n 为转角周边与同步电机相邻部位的附着系数; g_m 为当地的重力加速度^[15]。若满足以上不等式, 则可以直接退出, 并输出结果, 若不满足条件, 则需要重新建立数据集。

2 测试与分析

2.1 算法模型

对同步电机的高精度转角自适应控制进行测试, 将上文中设计的自适应控制方法与常规的 3 种方法进行对比, 通过检验算法与同步电机的适应性, 得到控制算法的检验结果。试验用同步电机内部结构如图 3 所示。



图 3 同步电机结构

建立算法模型, 其中计算机设备的操作系统为 Windows 10, 并使用 intel i5-2240@ 3.42 GHz 以上的中央处理器 (CPU) 作为设备的主频, 内存 4 GB 以上, 储存空间大于 600 GB, 通过结构化查询语言 (SQL) 建立一个数据库作为试验过程中使用的数据来源, 最后使用 MATLAB 作为计算工具计算试验得到的数据结果。在计算算法与实际结构的适应度时, 需要通过以下算式:

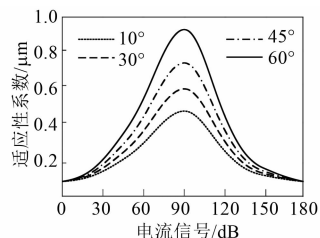
$$\mu_H = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - a_0)(b_i - b_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - a_0)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (b_i - b_0)^2}} \quad (9)$$

式中: μ_H 为以上进行测试的 4 种算法对于实例分析的适应度, 其值域区间为 $[0, 1]$; a_i 为在电流信

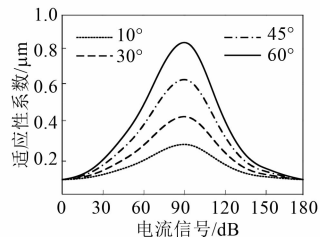
号的刻度为 i 时, 算法的适应度; a_0 为算法适应度的极值; b_i 为当电流信号的刻度为 i 时, 该算法的适应度; b_0 为算法适应度的极值^[16]。通过式 (9) 计算 4 种算法的适应度系数, 并以转角的度数为变量, 进行试验分析。

2.2 算法适应性测试

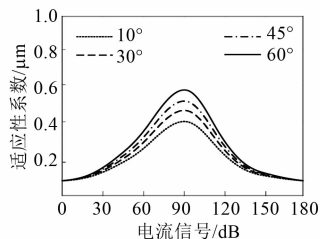
使用上文中设计的试验方法, 设定转角的度数为 10° 、 30° 、 45° 、 60° , 将文中设计的算法作为试验组, 将文献 [1-3] 方法作为对照组, 进行算法效果的测试。最后通过 MATLAB 软件进行计算, 将计算结果绘制成图像如图 4 所示。



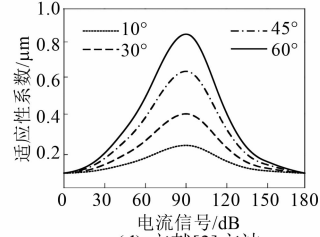
(a) 本文方法



(b) 文献[1]方法



(c) 文献[2]方法



(d) 文献[3]方法

图 4 算法效果测试

由图 4 可知, 四幅图像的极值点均在电流信号为 90 dB 时, 且均有转角度数作为变量的 4 个曲线。在试验组本文方法的图像中, 当转角度数

为 10° 时,适应性系数的极值为 $0.93 \mu\text{m}$,当转角度数为 30° 时,适应性系数的极值为 $0.72 \mu\text{m}$,当转角度数为 45° 时,适应性系数的极值为 $0.58 \mu\text{m}$,当转角度数为 60° 时,适应性系数的极值为 $0.49 \mu\text{m}$ 。在文献[1]方法中,适应性系数分别为 0.82 、 0.63 、 0.41 、 $0.29 \mu\text{m}$,文献[2]方法的适应性系数分别为 0.58 、 0.53 、 0.48 、 $0.40 \mu\text{m}$,文献[3]方法的适应性系数分别为 0.86 、 0.63 、 0.40 、 $0.25 \mu\text{m}$ 。由此可见,随着转角度数的增加,适应性系数会相应减小。为了保证试验结果的准确性与稳定性,不受到随机数据的干扰,反复进行 10 次以上试验,计算平均值,如表 1 所示。

表 1 适应性系数的平均值对比结果 μm

本文方法	文献[1]方法	文献[2]方法	文献[3]方法
0.48/0.92	0.29/0.82	0.42/0.58	0.24/0.86
0.48/0.92	0.28/0.82	0.41/0.58	0.27/0.86
0.47/0.93	0.27/0.83	0.40/0.57	0.25/0.85
0.48/0.89	0.28/0.84	0.46/0.59	0.26/0.87
0.46/0.92	0.25/0.81	0.43/0.55	0.28/0.88
0.48/0.88	0.28/0.80	0.44/0.56	0.24/0.86
0.49/0.87	0.29/0.83	0.38/0.58	0.26/0.85
0.47/0.93	0.26/0.81	0.41/0.57	0.25/0.84
0.48/0.95	0.27/0.84	0.40/0.59	0.29/0.88
0.46/0.96	0.26/0.83	0.43/0.56	0.25/0.84

表 1 所示为 10 组试验中适应性系数的极大值与极小值。通过计算,可以得到本文方法适应性系数的平均值为 $0.48/0.92 \mu\text{m}$,文献[1]方法的平均值为 $0.27/0.82 \mu\text{m}$,文献[2]方法的平均值为 $0.42/0.57 \mu\text{m}$,文献[3]方法的平均值为 $0.26/0.86 \mu\text{m}$ 。综上所述,试验组中适应性系数的极大值与极小值均高于 3 个对照组,文中设计的转角自适应控制方法优于常规方法,能够在实际中拥有更高的精度。

3 结 语

本文在计算理想传动比的基础上,将实际同步电机中基于关联规则的数据代入到模型中,并建立了一个自适应的补偿策略,以控制实际精度变量。综合所有公式,建立了相应的算法,并通过对比试验验证了该算法的实际效果,所设计基于关联规则与 PLC 的同步电机高精度转角自适应控制方法随着转角度数的增加,适应性系数会逐渐减小,其适应性系数极大值与极小值均高于文献方法。

【参 考 文 献】

- [1] 淮文军,沈炜栋,吴伟伟,等. 基于 TIA 和 PLC 的变频恒压供水自动控制系统设计[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(5): 118.
- [2] 汤成,胡继胜. 基于 Super-twisting 算法的永磁同步电机自适应滑模速度控制[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(5): 94.
- [3] 刘亚平,胡青璞,刘朝阳. 基于气隙磁场调制理论的永磁同步电机磁场分析与特性对比[J]. 微特电机, 2021, 49(5): 25.
- [4] 韦玉庭,耿婷,罗俊,等. 一种线齿轮传动摆动减速电机设计与分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2020, 45(5): 1101.
- [5] 张健,夏加宽,李文瑞,等. 热声横向磁通永磁直线电机结构及运行特性分析[J]. 微电机, 2019, 52(8): 6.
- [6] 梅杨,易高. 间接矩阵变换器-异步电机调速系统模型预测控制权重系数自整定方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(18): 3938.
- [7] 潘正,张宇,龙远强,等. 微电机动态力矩波动系数测试系统的设计与实现[J]. 自动化与仪器仪表, 2020(10): 73.
- [8] 杨小聪. 永磁同步电机高精度转角自适应定位仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(10): 219.
- [9] 杨小青,王永嘉,王佳. 点火器用有限转角电动机设计与仿真[J]. 微特电机, 2019, 47(9): 35.
- [10] 曹嘉豪,刘津瑜,许辉,等. 基于灰色神经网络高速永磁电机试验效率评估[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(4): 251.
- [11] 李键,牛峰,黄晓艳,等. 永磁同步电机有限控集模型预测电流控制预测误差分析[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(4): 1.
- [12] 周生通,朱经纬,周新建,等. 组合载荷作用下动车牵引电机转子系统弯扭耦合振动特性[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(1): 159.
- [13] 徐坤,曾京,黄彩虹,等. 牵引电机架悬参数对动车转向架稳定性的影响[J]. 铁道学报, 2019, 41(8): 32.
- [14] 耿聪,张欣,姜涛,等. 轮毂电机驱动纯电动汽车的车体侧偏角观测与稳定性控制[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(4): 96.
- [15] 刘福才,曹志琼,张晓,等. 不同重力环境下空间机构电机驱动力差异[J]. 宇航学报, 2020, 41(11): 1456.
- [16] 秦瑜,文明浩,白宇,等. 在线估计判据极值的高压直流线路新型距离保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3888.