[电机控制]

# 基于模糊PID的直流异步电机转矩自适应调节方法

文/邵斌宇[1, 2]
1. 江苏省惠山中等专业学校；2. 郑州大学

*基于模糊PID构建直流异步电机转矩调节模型，利用模糊逻辑优化PID控制参数，以最小化电机输出转矩与期望值的偏差。采用模糊PID控制器来实现转矩的自适应调节，依据对转矩误差及其变化率的持续监测，灵活调整PID控制器的比例增益、积分时间和微分时间常数，不断迭代和优化控制信号，直到电机的实际转矩与期望转矩达到一致。实验结果表明，该设计方法能够更准确地满足实际应用中的需求。*

在电机调节领域，转矩的精确调节是确保电机稳定运行和提高其工作效率的关键。近年来，众多学者和研究人员致力于开发各种先进的电机控制策略，以期实现对电机转矩的快速、准确和自适应调节。在众多控制策略中，文献[1]通过预测电机的未来状态，依据这些预测数据，选取最佳的电压矢量，以便对电机转矩实施精准调控。文献[2]利用ESO对电机的综合扰动项进行实时观测和补偿，同时分数阶滑模控制器的引入进一步削弱了系统抖振，使得电机转矩的控制更加平稳和精确。然而，这两种方法在实际应用中仍面临一些挑战。在上述背景下，提出一种基于模糊PID的直流异步电机转矩自适应调节方法。该方法结合模糊控制理论和PID控制算法的优点，通过模糊推理[3]实现对PID参数的在线调整和优化。这种自适应调节机制使得电机在不同工况下都能保持最佳的转矩控制性能。与传统的PID控制方法相比，本文方法不仅提高电机的响应速度和稳定性，还降低了对电机模型的依赖程度，增强其在实际应用中的适应性和鲁棒性。

## 计算直流异步电机转矩占空比

在直流异步电机中，转矩的精确调节是至关重要的。为实现这一目标，需要计算并调整每个控制周期内的占空比，以确保电机的实际转矩与期望转矩相匹配。占空比，简而言之，是有效电压矢量作用时间在一个完整控制周期中所占的比例。在直流异步电机的控制中，占空比[4]的大小直接决定电机输出的转矩大小。因此，精确计算占空比是实现电机转矩精确控制的关键。

直流异步电机的转矩输出由有效转矩分量$T_e$和零转矩分量$T_z$在一个控制周期$T_m$内共同作用决定。其中，有效转矩分量作用的时间占比被定义为转矩占空比$\delta$，其取值范围限定在0～1之间。因此，在第$m$个控制周期$T_m$内，合成的转矩$T_t$可以表示为

$$T_m = \delta T_e + (1-\delta) T_z \tag{1}$$

为了最大程度地削弱直流异步电机的转矩波动，理想状态是通过精确调控占空比$\delta$，在本控制周期内精确补偿由传感器反馈的转矩偏差$\Delta T$。具体而言，目标是在每个控制周期$T_m$内，通过占空比$\delta$的调整实现转矩调整量$\Delta T_a$与转矩偏差$\Delta T$的完美匹配，即满足关系式

$$\Delta T_a = Kt\delta T_m = -\Delta T \tag{2}$$

式中，$Kt$表示转矩常数，构成一个更为精细的动态调节方程。

将式（2）代入式（1）中，可以推导出占空比的具体计算公式

$$\delta = \frac{-\Delta T}{KtT_t} \tag{3}$$

利用上述公式，能够即时求解出每个控制周期内直流异步电机所需的占空比数值，从而实现精确调控，有效降低转矩的波动幅度。

## 基于模糊PID构建直流异步电机转矩调节模型

基于模糊PID构建直流异步电机转矩调节模型的核心在于利用模糊逻辑优化PID控制转矩占空比等参数，以实现更精确的转矩调节。根据能量转换与动态响应原理，直流异步电机的瞬时转矩与电流及磁场状态密切相关。通过监测电机相电流和磁链的变化[5]，结合模糊推理系统对PID控制器的比例、积分、微分系数进行动态调整，可以确保电机输出转矩与期望值的偏差最小。其关系可表述为

$$T_s(t) = f_{\mathrm{PID}}\left[I_p(t), \lambda_f(t)\right] \tag{4}$$

式中，$T_s(t)$为直流异步电机在某一时刻$t$的瞬时转矩；$f_{\mathrm{PID}}$为模糊PID调节函数；$I_p(t)$为直流异步电机在某一时刻$t$的相电流；$\lambda_f(t)$为直流异步电机在某一时刻$t$的磁链。

接着采用模糊自调整控制算法。此算法通过引入模糊逻辑的思想，实现了对PID控制器参数的在线智能调整，从而提升了电机瞬时转矩$T_s(t)$的动态与静态性能。在模型中，自适应模糊控制器的输入为转矩误差$e(t)$和误差变化率$ec(t)$，输出为PID控制器参数的调整量$\Delta K_{\mathrm{p}}$、$\Delta K_{\mathrm{i}}$和$\Delta K_{\mathrm{d}}$。直流异步电机转矩调节模型各变量的论域模糊集均设定为{NL，NM，NS，Z，PS，PM，PL}，论域范围则设为{−4，−3，−2，−1，0，1，2，3，4}，直流异步电机转矩调节模型隶属度函数，如图1所示。

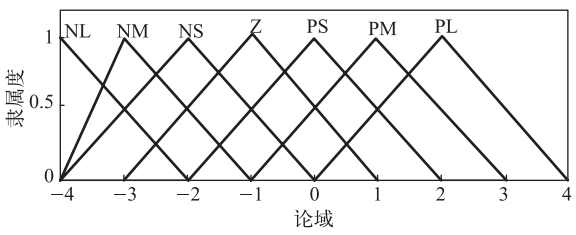


图1　直流异步电机转矩调节模型隶属度函数

直流异步电机转矩调节模型能够根据电机的实际运行状态进行调整，模型可表示为

$$F = T_s(t) \times e(t) + \left[\Delta K_p + \Delta K_i + \Delta K_d\right] \times ec(t) \tag{5}$$

该模型能够应对电机参数变化和外部干扰，结合了模糊逻辑和PID控制的优点，能够应对各种复杂工况。

## 实现直流异步电机转矩自适应调节

在直流异步电机转矩调节模型中，引入模糊PID控制器，它结合模糊逻辑和PID控制的优点，能够根据电机的实际运行状态进行自适应调整。模糊PID控制器通过监测电机的转矩误差$e(t)$和误差变化率$ec(t)$，利用模糊推理系统动态调整PID控制器的比例系数$K_{\mathrm{p}}$、积分系数$K_{\mathrm{i}}$和微分系数$K_{\mathrm{d}}$。这三个系数的调整是实现转矩自适应调节的关键。

转矩误差$e(t)$是期望转矩$T_r(t)$与实际转矩$T_c(t)$之差，即

$$e(t) = T_r(t) - T_c(t) \tag{6}$$

误差变化率$ec(t)$则是转矩误差随时间的变化率，它反映了转矩误差的变化趋势。

模糊PID控制器依据误差$e(t)$及其变化率$ec(t)$的数值，运用模糊逻辑推理机制来确定PID参数的调整量，即$\Delta K_{\mathrm{p}}$（比例增益调整）、$\Delta K_{\mathrm{i}}$（积分增益调整）和$\Delta K_{\mathrm{d}}$（微分增益调整）。随后，这些经过调整的PID参数[6]被采纳于控制信号$u(t)$的计算过程中，公式为

$$u(t) = \Delta K_p e(t) + \Delta K_i ec(t) + \Delta K_d ec(t) \tag{7}$$

控制信号$u(t)$随后被施加到直流异步电机的控制输入端，通过调节电机的电流或电压等参数，实现对电机转矩的调节。

在模型的实际应用中，还需要考虑电机的动态响应和外界干扰等因素。因此，引入一个反馈机制，通过实时监测电机的实际转矩值，并将其与期望转矩值进行比较，计算出新的转矩误差和误差变化率，然后再次通过模糊PID控制器进行调整。这个过程是不断迭代和优化的，直到电机的实际转矩与期望转矩一致或满足一定的精度要求。通过这种方法，实现对直流异步电机转矩的自适应调节。

## 实验

### 1. 实验对象

为验证基于模糊PID的直流异步电机转矩自适应调节方法的有效性，选用实验电机，并配置

STM32F407型号的微控制器作为核心控制板。直流异步电机的具体结构如图2所示，直流异步电机的具体参数见表1。

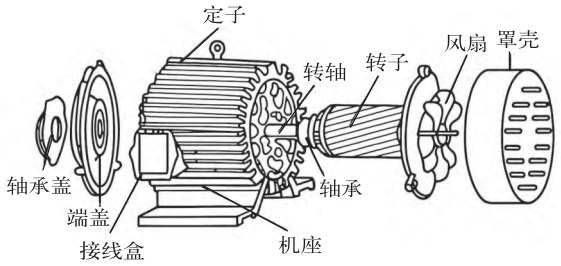


图2　直流异步电机具体结构

表1　直流异步电机的具体参数

| 序号 | 参数名称 | 数值 |
|---|---|---|
| 1 | 额定功率/kW | 2.2 |
| 2 | 额定电压/V | 230 |
| 3 | 额定电流/A | 10 |
| 4 | 额定转速/（r/min） | 1 500 |
| 5 | 极对数 | 4 |
| 6 | 额定转矩/（N·m） | 14.7 |
| 7 | 效率(%) | 85 |
| 8 | 功率因数 | 0.8 |
| 9 | 绝缘等级 | B级 |
| 10 | 工作温度范围/℃ | −20～60 |

本次实验以表1中的直流异步电机为对象，旨在通过精确的控制策略，实现对电机转矩的快速、稳定和自适应调节，从而进一步提升电机运行的效率和性能。

2. 实验准备

为实施基于模糊PID的直流异步电机转矩自适应调节方法实验，需精心准备各项硬件连接。将直流异步电机、转矩测量仪、转速探测器、模糊PID调控器及数据采集卡妥善连接，确保信号传输稳定可靠。在电机轴上安装转矩测量仪与转速探测器，以实时监测电机的转矩输出与旋转速度。电机的转矩和旋转速度动态响应曲线，如图3所示。

在图3中，可以清晰观察到实验的一个关键阶段，旋转速度0～500 r/min，电机转矩在预设的启动电阻作用下迅速达到8.6 N·m。当旋转速度达到500 r/min后，模糊PID控制系统介入，电机转矩持续攀升，并在旋转速度1 000 r/min时达到最高值14.7 N·m，随后开始降低，最终归零。

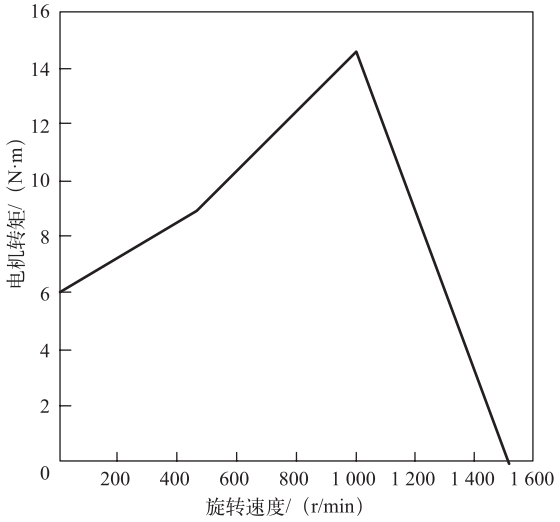


图3　电机转矩与旋转速度动态响应曲线

在MATLAB中，利用模糊逻辑工具箱来构建模糊PID控制器时，选取转矩误差及其变化率作为输入变量，而该控制器的输出则是针对PID控制器三个关键参数的调整值，具体取值范围见表2。

表2　模糊PID控制器参数取值范围

| 序号 | 参数 | 模糊PID控制器值 |
|---|---|---|
| 1 | 比例增益$K_p$ | 0.8～1.2 |
| 2 | 积分增益$K_i$ | 0.01～0.1 |
| 3 | 微分增益$K_d$ | 0.001～0.01 |
| 4 | 转矩误差论域 | [−3,3] |
| 5 | 误差变化率论域 | [−3,3] |
| 6 | 输出变量$K_p$论域 | [0,1] |
| 7 | 输出变量$K_i$论域 | [0,1] |
| 8 | 输出变量$K_d$论域 | [0,1] |
| 9 | 模糊子集 | NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB |
| 10 | 隶属度函数 | 三角形 |
| 11 | 模糊规则数量/条 | 49 |
| 12 | 采样时间/s | 1 |

为此，选用文献[1]的基于虚拟电压矢量的永磁同步电机模型预测转矩控制方法，以及文献[2]的基于ESO分数阶滑模调节的PMSM模型预测转矩控制方法，作为所提基于模糊PID的直流异步电机转矩自适应调节方法的对比对象。在实验中，特别关注了旋转速度在500～1 000 r/min内电机的响应情况，主要观察电机转矩是否能够实现快速且稳定的调节。通过对比，得到三种方法下电机转矩的波动曲线，如图4所示。

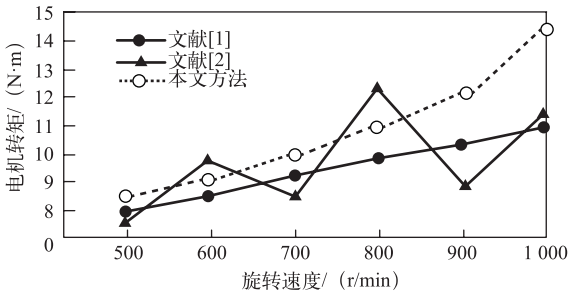


图4　三种方法下电机转矩波动曲线

3. 实验结果分析

根据表4可知，在旋转速度从500 r/min逐渐提升至1 000 r/min的过程中，文献[1]中的电机转矩虽然呈现稳定递增的趋势，但与预期目标值相比，仍存在一定的偏差。具体而言，在旋转速度为500 r/min时，文献[1]和文献[2]所得转矩分别为8.0 N·m和7. 5N·m，而本文方法与实际值一样为8.6 N·m。随着旋转速度的增加，这种偏差在整体上呈现出逐渐扩大的趋势。当旋转速度达到1 000 r/min时，文献[1]和文献[2]的方法所得转矩分别为10.4 N·m和10.5 N·m，而本文方法则达到了14.7 N·m，明显更接近实际所需的转矩值。这一结果表明，本文方法在电机转矩的快速响应和稳定调节方面表现出色，能够更准确地满足实际应用中的需求。这一优势在旋转速度较高时尤为明显，进一步验证本文方法的有效性和实用性。

## 结束语

通过对基于模糊PID的直流异步电机转矩自适应调节方法的研究，成功实现对电机转矩的快速、准确和自适应调节。该方法还具有较强的适应性和灵活性，能够满足不同工况下的电机控制需求。因此，本文所提的模糊PID自适应调节方法有望为电机转矩控制领域的研究和应用提供新的思路和方法。**EA**

（收稿日期：2025-06-25）

## 参考文献

[1] 杨狂彪，马静子，叶云翀，等．基于虚拟电压矢量的永磁同步电机模型预测转矩控制[J]．微特电机，2024，52(8)：48-52，57．

[2] 侯利民，李锐，王巍，等．基于ESO分数阶滑模调节的PMSM模型预测转矩控制[J]．控制工程，2024，31(3)：433-438，449．

[3] 任军，曾庆军，刘子豪，等．基于模糊PID型代价函数的永磁同步电机模型预测电流控制[J]．电子器件，2024，47(4)：1015-1021．

[4] 段晓伟，叶小晖．基于模糊WMR优化PID方法的电机转速控制优化分析[J]．机械制造与自动化，2024，53(2)：239-242．

[5] 申向杰，胡宏锦，魏静波，等．一种直流侧电压调节的反作用飞轮直接转矩控制方法[J]．航天控制，2022，40(5)：79-86．

[6] 李昊宇．基于SVPWM调制的异步电机的矢量控制仿真[J]．电子元器件与信息技术，2022，6(9)：48-52．