

doi: 10.7690/bgzd.2025.01.007

# 基于模糊 PID 的节能型地铁永磁同步电机转速控制

侯佳锐, 李传伟

(深圳市地铁集团有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 为进一步提升永磁同步电机在节能地铁上的应用效果, 提出基于模糊 PID 的节能型地铁永磁同步电机转速控制方法。通过在 PID 控制器之前添加模糊控制器的方式, 构建永磁同步电机转速模糊 PID 控制器, 控制器的输入量为转速误差和误差变化率, 并将其模糊、推理、清晰处理后输出速度调节参数, 完成转速控制。通过 Matlab 软件建立模型并进行试验。结果表明: 永磁同步电机扭矩突变情况下, 该方法控制的转速变化更加平滑, 扭矩输出更加平缓, 电流波形变化稳定; 转速跳变及突降情况下, 可在最短时间内使永磁同步电机转速达到平稳状态, 且不产生超调现象, 转速控制精度较高。

**关键词:** 节能型地铁; 模糊 PID; 转速控制; 扭矩突变; 转速跳变; 超调现象

**中图分类号:** TM341 **文献标志码:** A

## Speed Control of Energy-saving Permanent Magnet Synchronous Motor for Metro Based on Fuzzy PID

Hou Jiarui, Li Chuanwei

(Shenzhen Metro Group Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** In order to further enhance the application effect of permanent magnet synchronous motor (PMSM) in energy-saving subway, a speed control method of energy-saving PMSM in subway based on fuzzy PID is proposed. By adding a fuzzy controller before the PID controller, the speed fuzzy PID controller of permanent magnet synchronous motor is constructed. The input of the controller is the speed error and the error change rate, and the speed adjustment parameters are output after fuzzy, reasoning and clear processing to complete the speed control. The model was established and tested by Matlab software. The results show that the speed change is smoother, the torque output is more gentle, and the current waveform is more stable in the case of the sudden change of the torque of the permanent magnet synchronous motor; the speed of the permanent magnet synchronous motor can reach a stable state in the shortest time without overshoot in the case of the jump and sudden drop of the speed, and the speed control accuracy is higher.

**Keywords:** energy-saving subway; fuzzy PID; speed control; torque mutation; speed jump; overshoot phenomenon

### 0 引言

永磁同步电机为永磁牵引系统最主要的组成部分, 其可显著降低节能型地铁约 27% 的能源消耗, 其通过永磁体对电机进行励磁<sup>[1-3]</sup>, 不但减少了装配费用, 而且提高了电机的可靠性。永磁同步电机提高了电机的效率和功率密度, 促进了节能型电梯应用的可持续发展<sup>[4-5]</sup>。

对于永磁同步电机这些年有许多优化和研究, 例如闫浩安等<sup>[6]</sup>使用神经网络学习完成 PID 参数的优化和自整定, 以此完成电机转速控制。党克等<sup>[7]</sup>为实时减少噪声影响改进了卡尔曼滤波算法, 提高对转子的情况估计精度, 从而控制永磁同步电机转速。高芮等<sup>[8]</sup>将 PI 控制器由 Super-twisting 算法设计的滑模控制器代替, 该控制器的输出端能够接收到负载观测值的等效步长值, 在接收到等效补偿值

后进行永磁同步电机速度的调整, 基于此完成对永磁同步电机的转速控制。虽然上述研究对于永磁同步电机控制进行了优化但仍然具有一些缺点, 例如对于永磁同步电机转速变化响应速度慢, 永磁同步电机输出扭矩恢复时间慢, 电流波动大等问题。

组成结构简单、反应时间短等是 PID 控制器的天然优点<sup>[9-11]</sup>, 许多的控制理论都是在 PID 的基础上发展而来的, PID 在 1、2 阶控制系统中其拥有极高的性价比, 但在拥有高阶、非线性、多变量的永磁同步电机 PID 控制器则不能发挥其优势。模糊控制理论能够在设计过程中将操作者的经验融入其中<sup>[12-13]</sup>, 将模糊控制理论与 PID 控制理论相结合可以解决 PID 控制理论的缺点, 所以模糊 PID 控制在过去的十几年中得到了飞快的发展, 基于此笔者研究了基于模糊 PID 的节能型地铁永磁同步电机转速

收稿日期: 2024-07-09; 修回日期: 2024-08-13

基金项目: 深圳地铁绿色发展白皮书研究咨询服务项目 (211DA0249846)

第一作者: 侯佳锐 (1987—), 男, 广东人。

控制，利用模糊增益计算方案，建立模糊规则，并利用模糊规则推断出模糊输出，在经过清晰化后输出控制参数到 PID 控制器，完成对节能型地铁永磁同步电机转速控制。

### 1 节能型地铁永磁同步电机转速控制

#### 1.1 节能型地铁永磁同步电机模型

节能型地铁永磁同步电机的转子包括永磁体与转子铁芯 2 部分，而定子从结构上来说是一个三相交流异步电机<sup>[14]</sup>。使用时间长久，基本没有噪声是该电机的特点。永磁同步电机杜绝了因摩擦和火花导致的事故，因为机械式换向器完全被新型电子换向器替换<sup>[15]</sup>，新型电子换向器可以完成从直流到交流的变换。

如图 1 所示，定子以轴对称方式呈现于三相绕组空间中。三相坐标系  $ABC$  的塑造需以三相绕组轴线为依托。在转子上安置  $dq$  坐标系，坐标轴  $d$  为永磁体的磁轴线 N 极，坐标轴  $q$  与其呈  $90^\circ$  夹角。

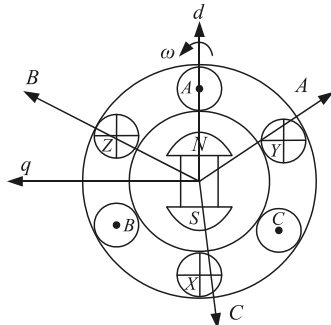


图 1 永磁同步电机绕组结构

忽略永磁同步电机漏磁、磁滞等对电机的影响；电机空载电动势无高次谐波，且呈正弦分布。则磁链方程表达式为：

$$\left. \begin{aligned} \varphi_d &= \varphi_f + L_d i_d \\ \varphi_q &= L_q i_q \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $\varphi_f$  为永磁体磁链； $\varphi_q$ 、 $\varphi_d$  分别为  $q$ 、 $d$  轴磁链； $i_q$ 、 $i_d$  和  $L_d$ 、 $L_q$  分别为  $q$ 、 $d$  轴电流和电感。

电压方程表达式为：

$$\left. \begin{aligned} u_d &= R_1 i_d + p\varphi_d - \omega\varphi_q \\ u_q &= R_1 i_q + p\varphi_q - \omega\varphi_d \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： $u_d$ 、 $u_q$  分别为  $q$ 、 $d$  轴的电压分量； $p$ 、 $\omega$  分别为微分算子、角速度； $R_1$  为定子的相电阻。

转矩方程表达式为：

$$T_e = \frac{3}{2} p [\varphi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

式中  $L_q$  为  $q$  轴电感。

综合上述公式可以得出：多变量、强耦合、非线性是永磁同步电机系统的特点，需要对变量综合考量后才可对其进行控制。

#### 1.2 永磁同步电机转速的模糊 PID 控制器

##### 1.2.1 模糊 PID 控制器转速控制原理

模糊 PID 控制器结构如图 2 所示。

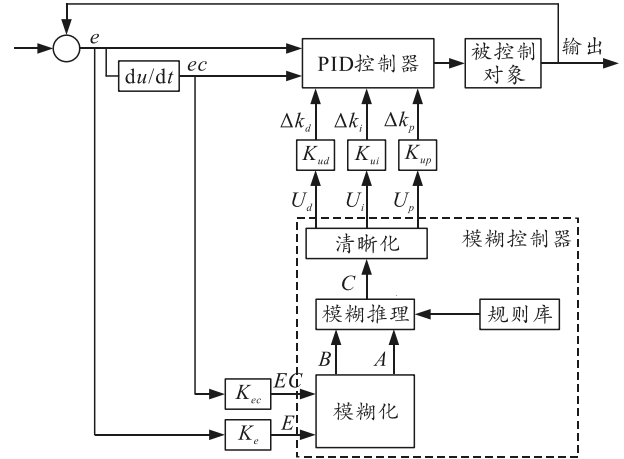


图 2 模糊 PID 控制器结构

模糊 PID 控制器的节能型地铁永磁同步电机转速控制工作流程主要分为：

- 1) 模糊化处理输入的电机转速误差变化率  $ec$  和转速误差  $e$ ；
- 2) 将模糊化后的输入结果进行模糊推理，推理过程需要规则库支持；
- 3) 使用清晰化函数进行清晰化处理；
- 4) 输出永磁同步电机速度调节参数  $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_p$  和  $\Delta k_d$ ，三者分别为积分系数  $k_i$ 、比例系数  $k_p$ 、微分系数  $k_d$  的变化量。

传统 PID 控制的弊端在于需要反复人工调整参数，而模糊 PID 控制器可以实时调整输入 PID 的参数，规避了这一缺点。模糊 PID 控制不仅省去了人工调节步骤，而且提升了节能型地铁永磁同步电机的转速控制效果。

不同情况下的电机转速误差变化率  $ec$  和电机转速误差  $e$ ，对 PID 控制器的参数要求是不同的。为提高被控制对象即节能型地铁永磁同步电机的动态性能，PID 控制器的参数自整后：

$$\left. \begin{aligned} k_p &= k_{p_0} + \Delta k_p \\ k_i &= k_{i_0} + \Delta k_i \\ k_d &= k_{d_0} + \Delta k_d \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中： $k_{i_0}$  为  $k_i$  的初始值； $k_{d_0}$  为  $k_d$  的初始值； $k_{p_0}$  为  $k_p$  的初始值； $\Delta k_p$  为  $k_p$  变化量； $\Delta k_d$  为  $k_d$  变化量； $\Delta k_i$

为  $k_i$  变化量。

### 1.2.2 模糊控制器设计

由图 2 可知，模糊控制器运用流程如下：

1) 模糊化： $ec$  和  $e$  模糊化处理。模糊化需要控制在一定范围内，公式为：

$$\left. \begin{aligned} K_e &= N_e/a_e \\ K_{ec} &= N_{ec}/a_{ec} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： $N_e$ 、 $N_{ec}$  为  $e$ 、 $ec$  的模糊集合个数； $K_{ec}$  为  $ec$  的量化因子； $K_e$  为  $e$  的量化因子； $a_e$ 、 $a_{ec}$  为  $e$ 、 $ec$  的论域范围。

2) 模糊集选择：PB、PM、PS、ZO、NS、NM、NB，代表正大、正中、正小、零、负小、负中、负大；设  $ec$ 、 $e$ 、 $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  的模糊集合为： $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。同时，设  $ec$ 、 $e$ 、 $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  论域为： $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。 $e$ 、 $ec$ 、 $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  隶属度函数如图 3 所示。

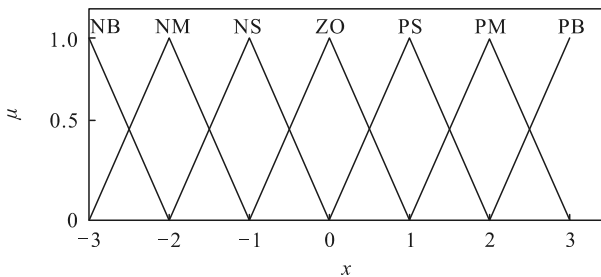


图 3  $e$ 、 $ec$ 、 $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  隶属度函数

3) 规则库：3 个参数相互之间的关系以及它们作用需要首先考虑，如此才能对  $k_p$ 、 $k_i$  和  $k_d$  3 个参数进行整定。

根据参数关系建立  $\Delta k_p/\Delta k_i/\Delta k_d$  模糊规则如表 1 所示。表达行为  $\Delta k_p/\Delta k_i/\Delta k_d$ ，其中用  $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$  表示模糊集合中的  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。

表 1  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_d$  规则

	1	2	3	4	5	6	7
1	7/1/5	7/1/3	6/2/1	6/2/1	5/3/1	4/4/2	4/4/5
2	7/1/5	7/1/3	6/2/1	5/3/2	5/3/1	4/4/3	3/4/4
3	6/1/4	6/2/3	6/3/2	5/3/2	4/4/2	3/5/3	3/SP/4
4	6/2/4	6/2/3	5/3/2	4/4/3	3/5/3	2/6/3	2/6/4
5	5/2/4	5/3/4	4/4/4	3/5/4	3/5/4	2/6/3	2/7/4
6	5/4/7	4/4/3	3/5/5	2/5/5	2/6/5	2/7/5	1/7/7
7	4/4/7	4/4/6	2/5/6	2/6/6	2/6/5	1/7/5	1/7/7

4) 模糊推理：表 1 中任意条规则  $R$  均可用  $R_i$ :if( $e$  is  $A_i$ )and( $ec$  is  $B_i$ )then  $u$  is  $C_i$  表示，整个规则库可形成 49 条模糊控制语句，每条语句均含有 1 条模糊关系。模糊集由  $A_i, B_i, C_i \in \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$  表示，其中  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$  由  $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$  表示，由于采用“与”进行

逻辑连接，所以模糊关系  $R=e^T ec$  存在于误差变化率  $ec$  和检测误差  $e$  的隶属度函数之间，且  $r_{ij}(i, j=1, 2, 3, \dots, 7)$  为关系矩阵  $R$  中的元素。由规则库形成 7 阶规则矩阵  $Q$ ，以  $\Delta k_d$  为例，矩阵可表示为：

$$Q_{\Delta k_d} = \begin{bmatrix} 5 & 3 & 1 & 1 & 1 & 2 & 5 \\ 5 & 3 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 \\ 4 & 3 & 2 & 2 & 3 & 3 & 4 \\ 4 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 4 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 7 & 5 & 5 & 5 & 6 & 6 & 7 \\ 7 & 6 & 6 & 6 & 6 & 7 & 7 \end{bmatrix} \quad (6)$$

将矩阵分解：

$$Q = \sum_{m=1}^7 Q_m \quad (7)$$

并且保证矩阵  $Q_m$  中元素满足：

$$q_{m,j} = \begin{cases} q_{ij}, & q_{ij} = m \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (8)$$

将关系矩阵  $R$  与规则矩阵  $Q_m$  按列顺序形成矢量，通过计算矢量  $R$  和  $Q_m$  可得出输出模糊值  $C_i$ 。

$$C_i = R \times Q_m^T / m \quad (9)$$

5) 清晰化处理式(9)获取的  $C_i$ ，可以得出 PID 精确输出值  $U_p$ 、 $U_i$  和  $U_d$  ( $U_p$ 、 $U_i$  和  $U_d$  为经语言变量转换的  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$  和  $\Delta k_d$  值)。计算公式为：

$$U = \left[ \sum_i \mu C_i(U_i) * U_i / \sum_i \mu C_i(U_i) \right] \quad (10)$$

式中  $\mu$  为权系数，通过公式获取 PID 精确输出值后，可以计算获取  $\Delta k_p$ 、 $\Delta k_i$  和  $\Delta k_d$ ，并根据式(4)输出结果，调整 PID 控制器的 3 个参数  $\Delta k_i$ 、 $\Delta k_p$  和  $\Delta k_d$ ，实现节能型地铁永磁同步电机转速控制。

## 2 实验验证

为验证本文中方法实际控制效果，笔者选取型号为 TYC 的能型地铁永磁同步电机作为研究对象，功率大小为 3 kW 定子电阻大小取值为  $R=1.753 \Omega$ 。记录其转速、扭矩等参数信息，将其输入 Matlab 仿真平台，对节能型地铁永磁同步电机转速控制效果进行研究。电机详细参数可见表 2。永磁同步电机实物如图 4 所示。

设定节能地铁永磁同步电机转速 1 200 rad/s，由空载启动，仿真时长 0.20 s，在 0.12 s 之后突加扭矩至 15 N·m，在 0.16 s 时减少扭矩至 5 N·m 并采用笔者方法与传统 PID 控制方法进行电机转速控制对比，结果如图 5-7 所示。

表 2 电机详细参数

参数	数值
极对数	4.000 0
额定功率/kw	3.000 0
定子电阻/ $\Omega$	1.735 0
采样时间/s	0.020 0
d 轴电感/mH	4.330 0
q 轴电感/mH	13.000 0
母线电压/V	320.000 0
阻尼系数/ $N \cdot m \cdot s$	0.001 3
额定转速/rpm	1800.000 0
磁链/Wb	0.202 4



图 4 永磁同步电机实物

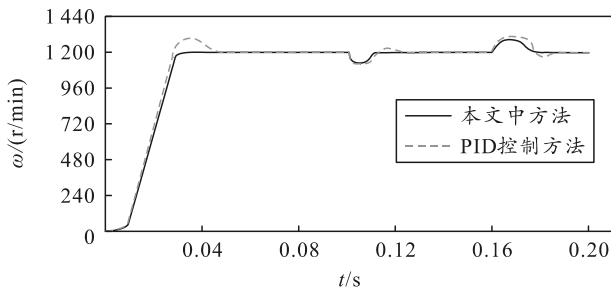


图 5 改变扭矩转速变化

由图 5 可以看出：对节能型地铁永磁同步电机突然施加扭矩的情况下，本文中方法转速控制时对电机转速改变幅度小，响应时间短，采用 PID 控制方法进行转速控制时永磁同步电机启动时转速达到要求转速后还会上升一段后再下降至正常运转转速，当施加扭矩时也是如此，转速会上升至超过规定转速后在下降至规定转速后平稳运行，扭矩减小时节能型地铁永磁同步电机转速变换与之相反，且相较于 PID 控制方法，本文中方法的控制效果优势显著。

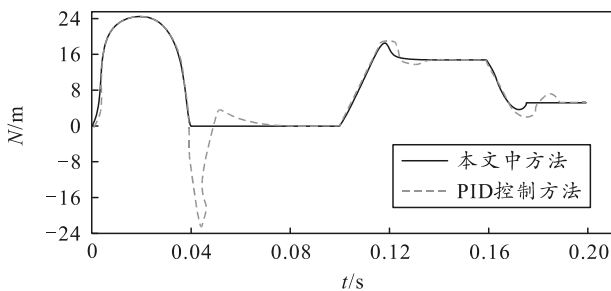
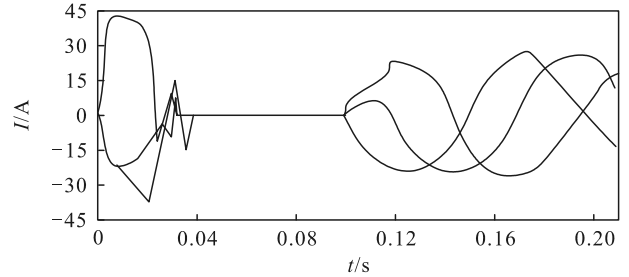


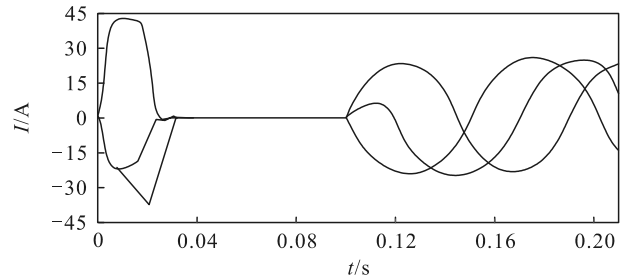
图 6 改变扭矩时永磁同步电机输出扭矩

由图 6 可以看出：节能型地铁永磁同步电机启

动时 2 种方法的扭矩提升速率一致，但采用本文中方法转速控制的节能型地铁永磁同步电机扭矩恢复稳定速度高。PID 控制方法控制下节能型地铁永磁同步电机扭矩在到达地铁启动后扭矩会有巨大下降后再上升，下降最终恢复平稳，在施加扭矩后也是如此，扭矩减小时 PID 控制方法会先减小小于于设定扭矩，在增加至超过规定扭矩后，减小至规定扭矩并平稳运行。本文中方法在控制过程中不存在上述超调现象。



(a) PID 控制方法



(b) 本文中方法

图 7 增加扭矩定子电流变化

由上图可以看出：当节能型地铁永磁同步电机启动后，采用本文中方法转速控制下的定子电流恢复平稳的时间快，当施加扭矩和减小扭矩时，本文中方法的定子电流呈正弦波形变换，且几乎无波动。PID 方法在施加运行中施加扭矩后电流变换波形波动剧烈，电流在启动后恢复平稳运行时间长。

设定节能地铁永磁同步电机转速跳变实验，实验过程中永磁同步电机转速由 600 rad/s 在 0.04 s 跳变为 1 300 rad/s，采用 PID 控制方法与本文中方法进行转速控制，控制结果如图 8 所示。

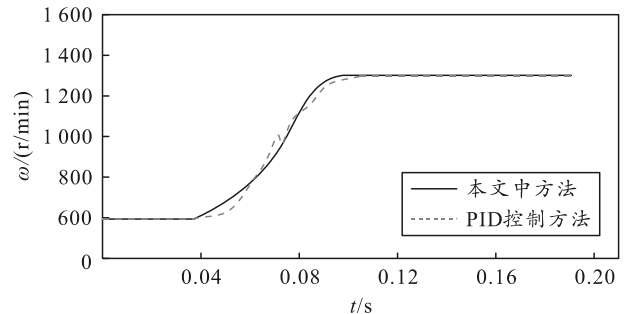


图 8 电机转速跳变时转速控制效果比较

由图 8 可以看出：当节能型地铁永磁同步电机转速发生跳变时，本文中转速控制方法能够更加快速的作出反应达到跳变后的转速，并平稳运行。PID 控制方法在转速跳变时速度上升不稳定，且到达规定转速时间慢。

设定节能地铁永磁同步电机以转速 1 400 r/min 运行，并在运行 0.04 s 后转速突降至 600 r/min，采用 PID 控制方法与本文中方法进行对比实验，结果如图 9 所示。

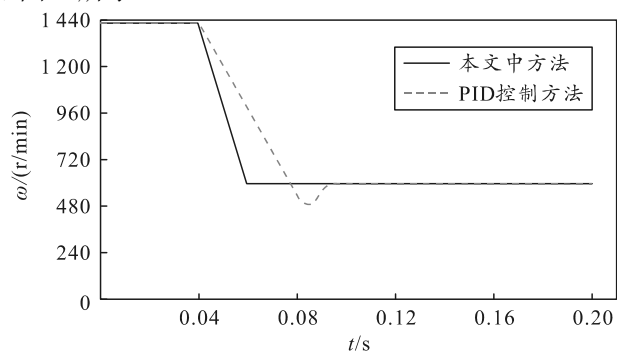


图 9 转速突降时不同方法变化

由上图可以看出：当转速突然下降时，本文中方法可以快速做出反应，使转速在极短时间内可以达到规定速度并平稳运行。PID 控制方法在转速突降时转速下降控制缓慢，且存在控制超调现象。

为验证本文中方法的可靠性，以控制精准度为标准，设定将其转速控制在 1 200 rad/s 为标准值，对比不同方法下的转速控制效果。其对比结果如表 3 所示。

表 3 不同方法转速控制精准度 %

本文中方法	PID 控制方法
98.9	89.2

分析上表可知：本文中方法在对电机控制时的精准度较高，其在 98% 以上，而 PID 控制方法的精准度仅为 89.2%。可以说明，本文中方法更具可靠性。

### 3 结论

通过与传统 PID 方法进行对比可知，本文中方法对节能地铁电机进行控制时，反应迅速，消耗时间短，转速和扭矩超调能够得到有效控制，克服了传统 PID 方法在扭矩突变时产生较大振荡的特点。

与传统 PID 方法相比较，本文中方法有更好的鲁棒性，能更好地完成对节能型地铁永磁同步电机转速控制。

### 参考文献：

- [1] 滕鸿达, 师蔚. 永磁电机流固耦合仿真及损耗影响分析[J]. 计算机仿真, 2020, 37(4): 243-249.
- [2] 刘坤, 高琳. 永磁同步电机的改进模型预测直接转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(1): 10-17.
- [3] 刘凡, 王凯, 李健, 等. 交流励磁混合励磁电机的调磁稳压控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13): 4955-4963.
- [4] 杨玺, 叶伟玲, 汤铭华, 等. 谐波影响下的三相感应电机效率研究[J]. 微特电机, 2020, 48(3): 29-32.
- [5] 骆苗, 王洪武, 张东宁, 等. 高功率密度电机的热仿真分析[J]. 微特电机, 2020, 48(5): 17-19.
- [6] 闫浩安, 李建冬. 基于改进神经网络PID的永磁同步电机控制研究[J]. 现代防御技术, 2021, 49(4): 43-48.
- [7] 党克, 刘子源, 田勇, 等. 基于 AEKF 的永磁同步电机转速控制方法[J]. 微特电机, 2020, 48(12): 32-35.
- [8] 高芮, 宗学军, 何戡. 基于 Super-Twisting 滑模观测器的永磁同步电机转速控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022, 581(7): 62-65.
- [9] 余米森, 钱玉宝, 黄华宝, 等. 连续工况下基于 PID+LQR 算法的自动驾驶车辆纵向耦合控制[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(30): 13490-13496.
- [10] 李禄源, 毛伟伟. 基于多目标优化PID的纸浆浓度控制系统[J]. 包装工程, 2021, 42(21): 247-253.
- [11] 王文成, 邱胜朋, 姚金峰, 等. RBF 模型预测 PID 在两级 AO 污水处理中的改进研究[J]. 现代电子技术, 2020, 43(3): 104-108.
- [12] 陆晨旭, 高海东, 高林, 等. 基于粒子群算法的模糊控制器设计及其在烟气脱硝中的应用[J]. 热力发电, 2022, 51(4): 188-193.
- [13] 陈红星, 林维明, 曾涛. 一种高增益双向 Cuk 电路及其模糊控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 6025-6039.
- [14] 白国振, 王录, 李炳初, 等. 基于三相交流异步电机定子电流信号分析的机电传动系统齿轮箱裂纹故障非侵入式诊断[J]. 机械强度, 2022, 44(5): 1186-1193.
- [15] 周应旺, 应浩, 曲鹏. 基于 LTC3789 的高功率密度电源变换器[J]. 兵工自动化, 2020, 39(6): 30-33.