

基于免疫内模控制的钻井电机控制策略

王金玉¹ 聂成¹ 王士勇²

(1. 东北石油大学电气信息工程学院 大庆 163318; 2. 大庆石油管理局电力集团供电二公司 大庆 163711)

摘要:针对矢量控制在参数时变性和非线性的钻井环境中,控制过程存在解耦不彻底的情况,提出用内模控制代替矢量控制,以此解决上述问题。为了进一步提高控制性能,将免疫算法与内模控制相结合,优化相关参数,保证了钻井电机调速系统对快速稳定控制的高要求。通过 MATLAB 平台进行实验,在相同的参数下进行仿真测试,内模控制的调节时间为 15 s,超调量为 300 r/min;免疫内模控制时的调节时间为 3 s,超调量远小于 300 r/min。由此可见,采用免疫内模控制时的超调量小于采用内模控制时,电机在起动时的动态响应更快,调节时间更短,超调量更小。仿真实验检验了所设计的控制方案的可行性。

关键词:内模控制;变频调速;电动钻机;免疫算法

中图分类号: TN773 TM343 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4024

Research on an internal model control strategy for electric drilling machine using the immune algorithm

Wang Jinyu¹ Nie Cheng¹ Wang Shiyong²

(1. School of Electrical Engineering and Information, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;
2. Power Supply Company Electric Power Group Company of Daqing Petroleum Administration Bureau, Daqing 163711, China)

Abstract: For vector control in the parameter of time-varying and nonlinear drilling environment, the existence of decoupling is not completely control process, put forward using internal model control instead of vector control, in order to solve the above problems. In order to further improve the control performance, combining immune algorithm with the internal model control, the optimization of related parameters, drilling motor speed control system to ensure the high demand for fast and stable control. Through the Matlab platform for experiments, simulation test under the same parameters, the adjustment of the internal model control for 15 s, overshoot volume is 300 r/min; the immune regulation of internal model control when time is 3 s, overshoot volume is far less than 300 r/min. It follows that when using immune internal model control, the amount of overshoot less than using internal model control, the dynamic response of the motor when starting faster, shorter regulating time and smaller overshoot. The simulation experiments verify the feasibility of the designed control scheme.

Keywords: internal model control; variable frequency speed regulation; electric drilling machine; immune algorithm

1 引言

交流变频电机在石油行业中的应用越来越广泛^[1],依据“十三五”发展规划,通过新型技术的应用,在低油价的大环境下降低开发成本,提高钻井质量,进而提高采收率和单井产量,是保证油气行业可持续发展的关键性问题^[2]。因此,研究新型高效的钻井电机控制方案,对提高钻井效率、优化钻井过程、处理钻井过程的事故等十分有利^[3]。

钻井现场通常使用的是鼠笼型感应电动机,根据这种

电机所具有的特点,文献[4]提出了一种基于矢量控制的变频调速方案。这种控制策略虽然实现了转矩和磁通的解耦,但仍存在定子电流励磁分量和转矩分量间的交叉电势的耦合作用。为解决上述问题,提出一种基于免疫内模控制的调速控制方案,这种控制策略包含了内模控制良好的鲁棒性以及免疫算法自适应性强的特点。并对所提出的控制方案进行仿真实验验证。

2 感应电机的内模控制

内模控制(internal model control, IMC)是一种从化工

过程控制中逐渐发展起来的控制方案^[5],因其鲁棒性强、设计原理简单等特点,并且不过分依赖于被控对象的准确数学模型,调整方向明确,在工程上容易实现,已成为研究的热点^[6]。

图1所示为内模控制结构图, $R(s)$ 和 $Y(s)$ 分别为系统的输入和输出, $C_{IMC}(s)$ 为内模控制器。 $G(s)$ 为被控制对象, $\hat{G}(s)$ 为被控对象的数学估计模型, $Y_m(s)$ 为内模 $\hat{G}(s)$ 的输出, $e(s)$ 为反馈误差信号, $d(s)$ 为干扰输入。

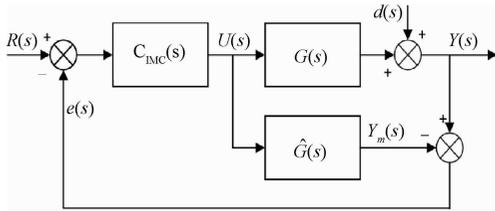


图1 内模控制结构

为了简化控制过程,设内环干扰为0,可将图1中的内模控制其转化为相应的等效反馈控制器,如图2所示。

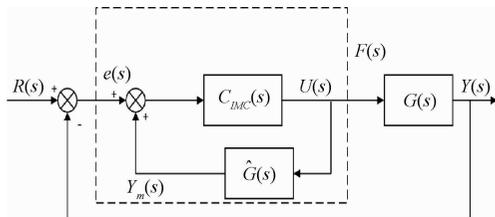


图2 等效反馈结构

其中 $F(s)$ 为经典反馈控制器,其与 $C_{IMC}(s)$ 之间的关系如式(1)所示。

$$C_{IMC}(s) = \frac{F(s)}{1 + \hat{G}(s)F(s)} \quad (1)$$

在设计过程中,通常在理想控制器的前馈通道中引入低通滤波器 $L(s)$,以此来保证系统的稳定性, $L(s)$ 的一般表达式为:

$$L(s) = 1/(\alpha s + 1)^n \quad (2)$$

式中: α 为滤波器的时间常数。

则控制器可改写为:

$$C_{IMC}(s) = \hat{G}^{-1}(s)L(s) \quad (3)$$

由此可以看出,该控制效果的好坏,很大程度上取决于滤波器时间常数的取值。为了进一步提高控制系统的性能,本文将免疫算法与内模控制相结合,通过免疫算法的自适应性对上述滤波器的时间常数进行优化。

3 基于免疫内模控制的的钻井电机控制策略

免疫算法是一种通过模仿生物免疫系统抗体多样性和自我调节保护功能的智能优化算法。免疫算法通过模仿免疫系统的机制,仿照抗体的自适应性来解决相应问题。将免疫算法与内模控制相结合,使这种混合控制算法

同时包含这两者的优点^[7],免疫算法良好的自适应性可以很好的克服感应电机模型非线性以及控制变量的时变性。

3.1 免疫算法在内模控制中的应用

根据免疫系统 T 细胞的反馈调节机制^[8],设第 K 代的抗原数量为 $\epsilon(k)$,由抗原刺激产生的 T_H 细胞浓度为 $C_{T_H}(k)$, T_S 抑制细胞浓度为 $C_{T_S}(k)$,则 B 细胞所接收到的刺激 $S(k)$ 为:

$$S(k) = C_{T_H}(k) - C_{T_S}(k) \quad (4)$$

$$C_{T_H}(k) = k_1 \epsilon(k), C_{T_S}(k) = k_2 f[\Delta u(k)] \epsilon(k) \quad (5)$$

偏差 $e(k)$ 用来表示抗原数量 $\epsilon(k)$,控制输出 $u(k)$ 用来表示 B 细胞接收的总刺激 $S(k)$,将式(5)代入式(4),得到对应的反馈控制方程:

$$u(k) = \{k_1 - k_2 f[\Delta u(k)]\} e(k) = K_p e(k) \quad (6)$$

式中: $K_p = K\{1 - \eta f[\Delta u(k)]\}$; $K = k_1$ 代表增益; $\eta = k_2/k_1$ 表示控制稳定效果; $f(\cdot)$ 为一选定的非线性函数。从式(6)可以看出,免疫控制的反馈机制在实质上是一个比例增益为 K_p 的非线性比例控制器 P ,其取值与控制器的输出有关。综上所述, K 、 η 和 $f(\cdot)$ 的取值决定着所设计控制器的性能。

下面就 $f(\cdot)$ 的函数特性进行分析。由免疫机制可知, T 细胞在免疫响应过程中发挥着十分重要的作用,这一过程中抗原浓度变化对抗体产生的影响,有如下对应关系:

$$f(\Delta u) = 1 - \exp(-\Delta u^2/b) \quad (7)$$

无论 b 取何值,对于 $0 < f(\Delta u) < 1$ 。 b 的取值决定了 $f(\Delta u)$ 的输入和输出关系,并且决定着函数曲线的形状, b 越大 $f(\Delta u)$ 的曲线越平滑。

3.2 免疫内模控制策略的系统结构

感应电机控制策略的实现是通过通过对电动机供电方式的控制进行的^[9],对于只能从定子单边供电的感应电机,矢量控制在坐标变换后,仍然存在着 M 轴和 T 轴之间的交叉耦合电势的作用。为解决上述问题,本文用内模控制器作为电流环的控制器。免疫内模控制的结构如图3所示。选用PI控制器作为转速环, i_q^* 为转矩电流的期望值,其取值由速度自动调节器(ASR)的输出值确定。 i_a, i_b, i_c 为电流传感器测得的定子电流,经过 $3/2$ 变换和Park变换,分别得到两相静止坐标系下的电流 i_α, i_β 和两相旋转坐标系下的电流 i_d, i_q 。选用空间矢量脉宽调制(SVPWM)输出的信号作为逆变器供电方式。逆变器将直流母线上的电压 U_{dc} 以PWM波的形式输出给感应电机。

3.3 免疫内模控制器的设计

根据免疫控制的原理,将式(3)进行优化。根据实际工作环境中, $\hat{G}(s)$ 总会存在误差的特点,将 $\hat{G}(s)$ 分解成 $\hat{G}(s) = \hat{G}_+(s)\hat{G}_-(s)$,式中, $\hat{G}_+(s)$ 为非最小相位部分^[10], $\hat{G}_-(s)$ 是最小相位部分,这里取 $G_{IMC}(s) = \hat{G}^{-1}(s)$ 。将免疫控制与内模控制器相结合,将式(2)改写为含有免疫算法调节因子的1阶滤波器,其形式如下:

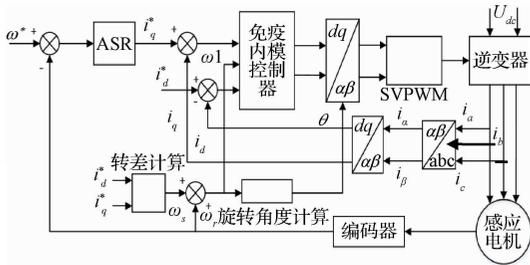


图3 免疫内模控制结构

$$L(s) = 1 / (k_p s + 1) \quad (8)$$

式中: k_p 为免疫调节因子, 令:

$$C_{IMC}(s) = \hat{G}^{-1}(s) \frac{1}{k_p s + 1} \quad (9)$$

当 $G(s) = \hat{G}^{-1}(s)$, 则由式(1)、(9)可得到免疫内模控制器:

$$F(s) = \frac{C_{IMC}(s)}{E - C_{IMC}(s)\hat{G}(s)} = \frac{1}{k_p s} \begin{bmatrix} \hat{\sigma}\hat{L}_s + \hat{R}_s/s & -\omega\hat{\sigma}\hat{L}_s/s \\ \omega\hat{\sigma}\hat{L}_s/s & \hat{\sigma}\hat{L}_s + \hat{R}_s/s \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: E 为单位矩阵, $r(s) = [i_{M1}^*, i_{T1}^*]^T$, $\hat{R}_s, \hat{\sigma}, \hat{L}_s$ 分别为定子电阻、漏感系数和定子自感的估计值。免疫内模控制的结构如图4所示。

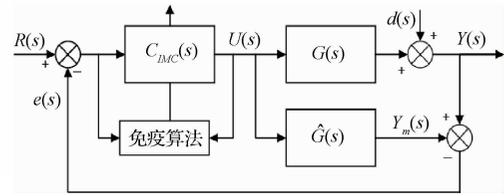


图4 免疫内模控制结构

4 免疫内模控制的仿真与分析

以钻井现场常用的 YJ 系列交流变频电机为例, 通过 MATLAB/Simulink 对本文提出的免疫内模控制在钻井电机中的应用的可行性进行仿真实验。相关参数如表 1 所示。

图 5 所示为两种不同控制方法下, 电机的转速波形图, 图 5(a)、(b) 所示为分别采用内模控制和免疫内模控制时的转速波形图。在相同的参数下进行仿真测试, 给定转速为 1 500 r/min。内模控制的调节时间为 15 s, 超调量为 300 r/min; 当采用免疫内模控制时的调节时间为 3 s, 超调量远小于 300 r/min。由此可见, 采用免疫内模控制时的超调量小于采用内模控制时, 电机在起动时的动态响应更快, 调节时间更短。

表 1 电机及控制器参数

参数	数值	参数	数值	参数	数值
功率/kW	1 200	额定转速/(r · min ⁻¹)	1 500	转子电感/mH	0.302 7
额定电压/V	600	极对数	2	额定转矩/(N · m)	11 460
额定电流/A	1 354	定子电阻/Ω	0.014 85	互感/mH	10.46
额定频率/Hz	50	转子电阻/Ω	0.009 295	K_{p1}	0.1
K	0.05	η	0.2	b	100

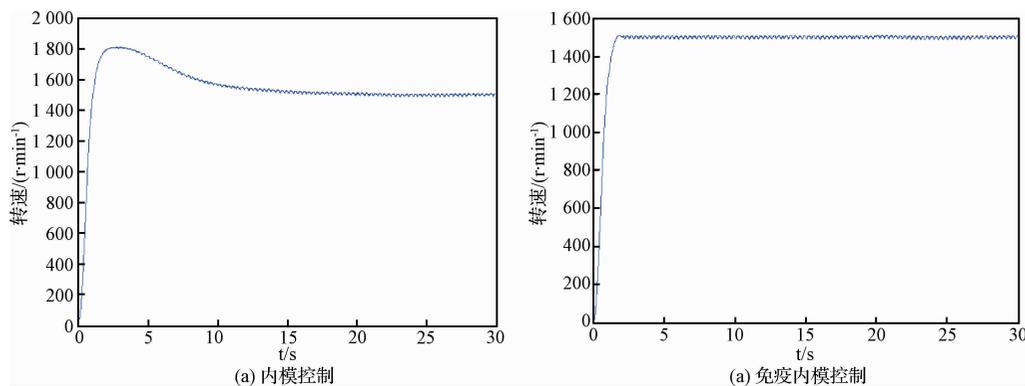


图5 两种控制方法下电机转速波形

5 结论

针对钻井电机采用矢量控制存在的不足, 将内模控制应用到钻井电机的变频调速系统中, 并运用免疫算法进一步优

化相关控制参数, 提出基于免疫内模控制的钻井电机控制策略。仿真表明, 采用免疫内模控制时, 系统响应速度更快、超调量更小、调速精度更高, 验证了该控制方案的有效性。

(下转第 58 页)