

# 基于改进型模糊自整定 PI 控制的无刷直流电机 PLC 调速系统

刘向辰<sup>1</sup>, 张海燕<sup>2</sup>, 陈磊<sup>3</sup>, 柴乾隆<sup>1</sup>

- (1. 中国航空工业兰州万里航空机电有限公司 航空机电研究院, 甘肃 兰州 730070;
2. 甘肃建筑职业技术学院 环境与市政工程系, 甘肃 兰州 730050;
3. 国家电网甘肃省电力公司武威市供电公司, 甘肃 武威 733000)

**摘要:** 针对无刷直流电机(BLDCM)在中低速运行过程中,电机转速存在波动且动态调速特性较差的问题,提出了一种将改进型模糊自整定 PI 控制与 PLC 相结合的 BLDCM 调速方案。改进型模糊自整定 PI 控制在传统 PI 控制的基础上引入积分重置环节,既能够对参数进行实时调节,又避免了控制过程中积分饱和的问题。用 Visual C++编写控制程序对 PLC 进行模块化编程。通过试验,证明了改进型方法在电机中低速运行过程中,具有响应速度快、稳定性好、无超调量等优点。

**关键词:** 无刷直流电机; 模糊自整定 PI 控制; PLC; Visual C++

中图分类号: TM 341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)06-0012-05

doi: 10.12177/emca.2020.023

## PLC Speed Control System Based on Advanced Fuzzy Self-Tuning PI Control for Brushless DC Motor

LIU Xiangchen<sup>1</sup>, ZHANG Haiyan<sup>2</sup>, CHEN Lei<sup>3</sup>, CHAI Qianlong<sup>1</sup>

- (1. Research Institute of Aviation Mechanical and Electrical Engineering, AVIC Lanzhou Wanli Aviation Electromechanical Co., Ltd., Lanzhou 730070, China;
2. Department of Environmental and Municipal Engineering, Gansu Construction Vocational Technical College, Lanzhou 730050, China;
3. State Grid Gansu Wuwei Power Supply Company, Wuwei 733000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of speed fluctuation and poor dynamic speed regulation characteristic of brushless DC motor (BLDCM) in the low or medium speed status, a control strategy combining advanced fuzzy self-tuning PI control and PLC is proposed for BLDCM speed regulation. On the basis of traditional PI controller, the advanced fuzzy PI control strategy integrates the integral reset link with PI controller, which can not only adjust the parameters in real time, but also avoid the problem of integral saturation in the control process. The PLC is programmed by Visual C++. Experiment results prove that, the proposed control strategy has the advantages of fast response, good stability and non-overshoot when the motor is running in the low or medium speed range.

**Key words:** brushless DC motor; fuzzy self-tuning PI control; PLC; Visual C++

## 0 引言

无刷直流电机(BLDCM)依靠电子换向代替了传统的机械换向,因而比交流电机和有刷直流

电机在可靠性和耐磨损性方面均有了大幅度的提高,是未来电机发展的方向之一<sup>[1-2]</sup>。BLDCM 在汽车、船舶、航空航天等领域应用广泛。

作为新一代的工业控制设备,PLC 通过软件

收稿日期: 2020-02-26; 收到修改稿日期: 2020-04-03

作者简介: 刘向辰(1989—),男,硕士,工程师,研究方向为电力电子与电力传动。

编程实现了对机电系统的自动化控制,在控制的过程中,PLC 程序可以随时修改,而无需变动其他部件,这大大提升了其实际应用能力,从而可以满足众多场合的需求。

为了满足小口径固体火箭发动机舱绝热层的自动化打磨要求,文献[3]基于三菱 FX3U 系列 PLC,设计了一种具有正常打磨和断点打磨的 PLC 控制系统,该系统能够在正常打磨情况下实现绝热层的自动化打磨,也可在系统发生故障、急停、停电的情况下实现断点打磨。实际应用结果表明,该方法具有系统运行安全可靠、操作简单等优点。为了实现选煤厂破碎机的全自动化运行,文献[4]采用西门子 S7-400 PLC 作主站,3 个 ET200 作从站,通过 PROFINET-DP 总线进行主站-从站通信,运用网络系统与 PLC、变频调速系统、位置伺服系统、张力控制系统进行数据实时交换,实现了各项参数在线修改和整套系统的实时监控,提高了系统的运行稳定性,保证了高效生产。文献[5]为了提高钻井平台的自动化能力,设计了一种基于 PLC 控制的机械手臂控制系统,通过对系统逻辑、PLC 控制电路进行分析与设计,实现了钻井平台操作简单、运行可靠、定位精度高等诸多要求,是智能钻井平台控制系统。在传统锅炉控制过程中,存在资源利用率低、设备运行不可靠等问题,文献[6]通过西门子 PLC S7-200<sup>[7-8]</sup>、远程 I/O 模块、A/D 模块以及 D/A 模块等设计了 PLC 模糊控制方法,通过测试验证了该方法性能突出、效果显著,能在很大程度上减少设备维护人员的工作量。由于对逆变器开关频率<sup>[9]</sup>的传统控制方法误差较大,文献[10]提出了一种基于 PLC 的逆变器脉宽调制(PWM)控制方法,该方法通过检测输出电流得到各个控制量的开关状态和开断时间,进而引入 PLC 电流传感器<sup>[11-12]</sup>,实现逆变器开断的有效控制。

本文在以上研究的基础上,提出一种基于改进型模糊自整定 PI 控制的 BLDCM PLC 调速系统,该系统将引入积分重置环节的模糊自整定 PI 控制并与 PLC 相结合。引入积分重置环节的模糊自整定 PI 控制既能保证电机转速调节的快速性和稳定性,又能避免 PI 控制过程中的积分饱和问题;PLC 具有操作简单、实用性强、扩展性和可靠性高、处理并发能力强的优势。充分发挥两者

的优势,使 BLDCM 实现快速、稳定运行。

## 1 系统设计思路

本文选用西门子 S7-1511 型 PLC 作为 BLDCM 控制的核心,用于完成逻辑信号的采集、处理、指令的下发以及与外部设备通信等功能。S7-1511 型 PLC 的 CPU 选择高性能的 1516-3 PN/DP 处理器,工作内存为 1 MB、数据存储空间 5 MB、位处理时间为 10 ns;1516-3 PN/DP 系列 CPU 带有 2 个 PROFINET 网口,通过 PROFIBUS 和主站的 PLC-DP 接口可以实现电机的实时控制和 PLC 程序的下载、上传。此外,在 CPU 的左边配置 1 块 CM PTP (RS422/485) 模块,用于对电机母线电压、电机母线电流以及 IGBT 温度进行实时检测,若电压、电流以及 IGBT 温度超过阈值,则发出报警信号。PLC 控制系统结构框架如图 1 所示。

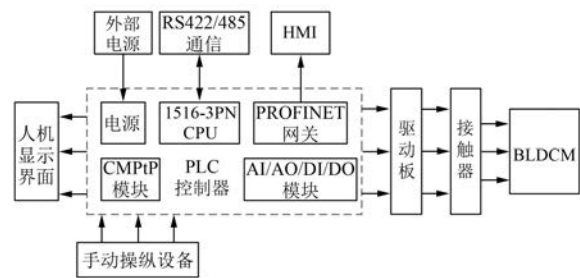


图 1 PLC 控制系统结构框架

BLDCM 控制系统采用转速闭环控制,通过霍尔传感器检测到电机的实际转速并反馈至输入端,与输入端的参考给定转速作差后,将差值按照一定的控制规律控制驱动板,从而对 BLDCM 进行转速控制。BLDCM 转速控制原理如图 2 所示。

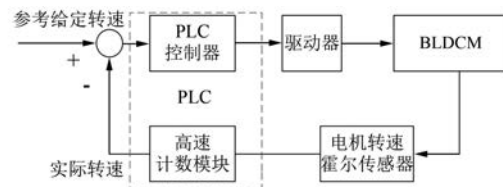


图 2 BLDCM 转速控制原理

## 2 改进型模糊自整定 PI 控制

### 2.1 模糊自整定 PI 控制

根据被控对象的实际变化,通过计算机的模

模糊推理对 PI 参数进行实时调节。模糊自整定 PI 控制原理如图 3 所示。

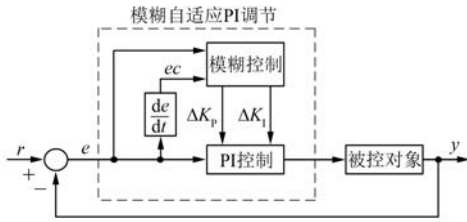


图 3 模糊自整定 PI 控制原理

模糊自整定 PI 控制首先要设定一组初始 PI 参数(即  $K_{p0}$ 、 $K_{i0}$ )；然后,建立误差信号  $e$ 、误差信号变化率  $ec$  与  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  之间的模糊推理关系;最后,对误差信号  $e$ 、误差信号变化率  $ec$  进行实时观测,并根据相应的模糊规则实现模糊推理,再通过查询模糊规则矩阵的方式对  $K_p$ 、 $K_i$  进行实时整定,以提高系统的动态特性。

经过模糊自整定 PI 控制整定后的  $K_p$ 、 $K_i$  可以写成:

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \end{cases} \quad (1)$$

### 2.2 改进型模糊自适应 PI 控制

模糊自整定 PI 控制的基础仍然是 PI 控制。PI 控制在离散状态下的表达式可以写成:

$$u(m) = K_p e(m) + K_i \sum_{l=0}^m e(l) \quad (2)$$

式中: $u(m)$ 为第  $m$  次采样时刻的输出控制信号; $e(l)$ 为第  $l$  次采样时刻系统的输入误差。

通过分析式(2)可以看出,PI 控制的输出与 0 和  $m$  之间所有的采样时刻状态量均相关,考虑到误差累积的影响,积分环节比较容易出现过饱和,随着时间的延长,之前的累积效应对系统造成的影响越来越明显,导致电机调速过程中出现超调和振荡。为了消除积分饱和对系统造成的不利影响,本文在模糊自整定 PI 控制中加入积分重置环节,即系统若检测到参考转速发生变化时,将  $m$  归零,即将积分环节从本时刻起重新进行累积计算,有效避免了之前累积量过大给系统造成的不利影响。

改进型模糊自整定 PI 控制规则的  $\Delta K_p$  和  $\Delta K_i$  如表 1、表 2 所示。

表 1  $\Delta K_p$  模糊自整定 PI 控制规则

$ec$	$e$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	NS	ZO	PS	NM	NB	PS
NM	PM	NM	ZO	PS	NM	NB	PS
NS	PM	NM	ZO	PM	NS	NM	PM
ZO	PS	NB	NS	PB	NS	NS	PM
PS	PS	NB	NS	PM	ZO	ZO	PB
PM	PS	NB	NM	PS	ZO	PS	PB
PB	PS	NB	NM	PS	ZO	PS	PB

表 2  $\Delta K_i$  模糊自整定 PI 控制规则

$ec$	$e$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NM	ZO	PB	PB	ZO	NM
NM	NB	NM	ZO	PB	PM	ZO	NM
NS	NB	NS	PS	PB	PM	ZO	NB
ZO	NB	NS	PS	PB	PS	ZO	NB
PS	NB	ZO	PM	PB	PS	ZO	NB
PM	NB	ZO	PM	PB	ZO	NS	NB
PB	NB	ZO	PB	PB	ZO	NS	NB

### 2.3 改进型模糊自整定 PI 控制 Simulink 分析

引入积分重置环节的模糊自整定 PI 控制的隶属度函数曲线,如图 4 所示。

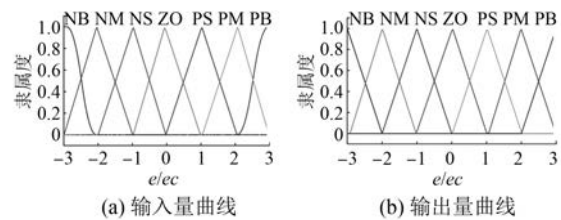


图 4 改进型模糊自整定 PI 控制输入、输出的隶属度函数曲线

本文所采用的改进型模糊自整定 PI 控制应用于速度环,输入为转速误差  $e$  及转速误差变化率  $ec$ ,模糊控制的输出为  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 。输入量和输出量的计算机语言为 NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB;归一化论域为  $[-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3]$ 。

为了分析改进型模糊自整定 PI 控制的性能,在 MATLAB/Simulink 中作出  $\Delta K_p$  及  $\Delta K_i$  的曲面图,通过观察参数  $\Delta K_p$  及  $\Delta K_i$  随输入量的变化,可以比较明显地展现出改进型自整定 PI 控制的特性。变化曲面分布图如图 5 所示。

通过以上分析,首先设定 PI 初始参数  $K_{p0}$  和

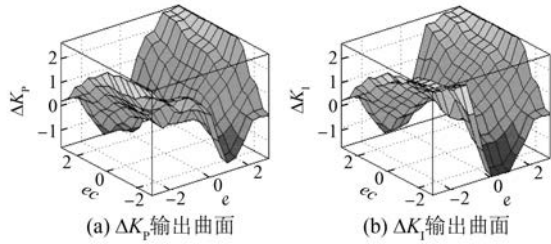


图5 变化曲面分布图

$K_{10}$ ,由模糊规则计算得到 PI 参数变化量  $\Delta K_p$  及  $\Delta K_1$ ,最后由方程式  $K_p = K_{p0} + \Delta K_p$ 、 $K_1 = K_{10} + \Delta K_1$  得到所需要的  $K_p$  和  $K_1$ 。

为了验证改进型模糊自整定 PI 控制的动态控制性能,采用阶跃信号作为系统仿真激励,改进型模糊自整定 PI 控制的动态特性如图 6 所示。

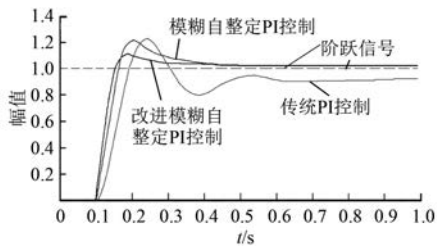


图6 动态特性曲线

分析图 6 可以看出,与传统 PI 控制和模糊自整定 PI 控制相比,改进型模糊自整定 PI 控制具有良好的动态特性。

### 3 系统软件设计

基于改进型模糊自整定 PI 控制的 BLDCM PLC 调速系统软件分为直流电机起动程序和直流电机停机程序。

#### 3.1 起动软件程序

当按下电机起动按钮时,PLC 按照设定好的电机起动程序起动。电机起动程序软件流程如图 7 所示。

在电机起动程序流程图中,先对电机变量以及运行状态进行初始化,接着检测电机控制系统是否存在故障,若无故障,则进行起动。

#### 3.2 停止软件程序

电机停机程序流程如图 8 所示。

当电机起动后,PLC 按照写入的程序进行循环,在控制周期的执行过程中,系统实时对电机的

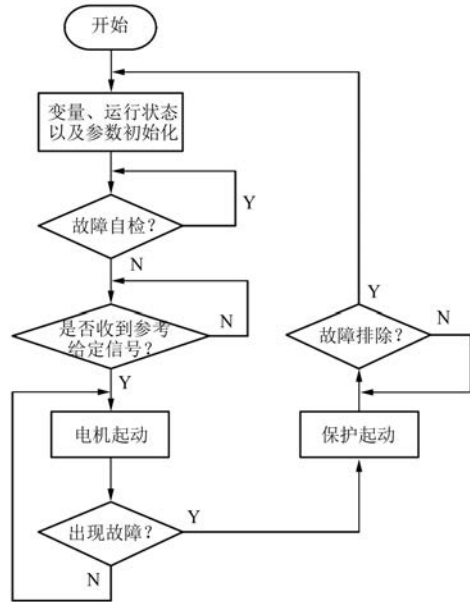


图7 电机起动程序软件流程图

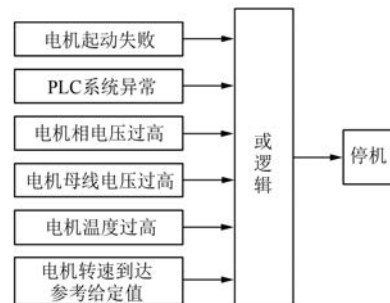


图8 电机停机程序流程图

运行状态进行监测,当系统出现电机起动失败、PLC 系统异常、电机相电压过高、母线电压过高、电机温度过高、电机转速达到参考给定转速时,电机停机,以上故障采用或逻辑运算。

### 4 试验验证

为了验证仿真的正确性和实用性,搭建了基于模糊自适应 PI 控制的 BLDCM PLC 控制系统试验平台,如图 9 所示。

电机选用额定功率为 2.3 kW、极对数为 2、定子电阻为 0.6  $\Omega$ 、定子电感为 3.27 mH、额定转速为 2 000 r/min 的 BLDCM。

令电机参考给定转速由 1 000 r/min 下降至 500 r/min,运行 80 ms 之后,再由 500 r/min 恢复至 1 000 r/min,传统 PI 控制下的电机转速动态试

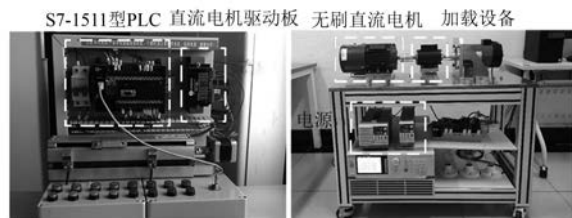


图9 PLC控制试验平台

验波形和改进型模糊自整定 PI 控制下电机转速动态试验波形如图 10 所示。

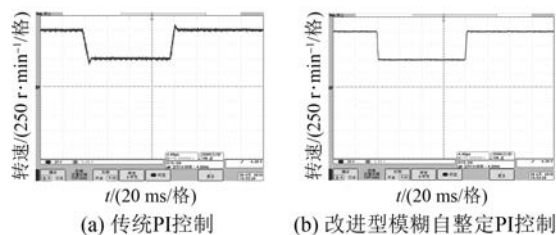


图 10 电机转速动态试验波形

从图 10(a)、图 10(b) 的试验波形可以看出,当参考给定转速发生阶跃突变时,传统 PI 控制下的电机转速存在超调,调节时间较长,且电机转速存在一定程度的抖动;而基于改进型模糊自整定 PI 控制下的电机转速无超调,调节时间明显降低,且电机转速抖动问题也明显降低。

## 5 结 语

本文所提出的基于改进型模糊自整定 PI 控制的 BLDCM PLC 调速系统,能够对控制参数实时调节,避免了控制过程中积分饱和的问题。同时,兼备了 PLC 操作简单、实用性强、处理并发能力强等优势。在实际控制过程中,电机具有转速

响应速度快、稳定性好、无超调量等优点。

## 【参考文献】

- [ 1 ] 沈朝萍,尚金秋,胡超,等.基于无刷直流电机的电动车控制器研究与设计[J].电机与控制应用,2019,46(7): 76.
- [ 2 ] 尤钱亮,陆佳琪.无刷直流电机高精度换相控制[J].电机与控制应用,2019,46(10): 46.
- [ 3 ] 陆波,盛强.基于 PLC 的绝热层打磨机控制系统设计[J].制造技术与机床,2020(3): 32.
- [ 4 ] 王广元.基于 PLC 的选煤厂破碎机电气系统设计与实现[J].自动化应用,2019(11): 111.
- [ 5 ] 鲍泽富,胡广珊.基于 PLC 的二层台自动排管机械手控制系统设计[J].制造业自动化,2019,41(12): 86.
- [ 6 ] 薛艳.锅炉分布式控制系统设计中的 PLC 与模糊控制分析[J].工业加热,2019,48(6): 23.
- [ 7 ] 张绘敏.基于 S7-200 PLC 的远控智能家居控制系统[J].机电信息,2019(35): 82.
- [ 8 ] 王浩,闫伟腾,朱兆森.基于 S7-200 PLC 的液体灌装及搬运系统的实现[J].电子制作,2019(23): 64.
- [ 9 ] 祝新,汪山林,刘影.三电平 ANPC 逆变器优化开关序列模型预测控制[J].电力电子技术,2019,53(12): 94.
- [ 10 ] 廖肇毅,汪献忠,张伟平,等.基于 PLC 的 PWM 逆变器开关频率控制方法[J].自动化与仪器仪表,2019(12): 196.
- [ 11 ] 邢印.大功率多相变频驱动系统设计[J].电机与控制应用,2019,46(8): 82.
- [ 12 ] 张磊,刘闯,韩守义.基于全周期电流包络线开关磁阻电机无位置传感器技术[J].电机与控制学报,2019,23(11): 109.

## 声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部