

# 模糊控制在三相异步电动机 轻载降压节能中的应用<sup>†</sup>

李树江 刘向杰 柴天佑

(东北大学自动化中心 沈阳 110006)

**摘 要** 综合传统 PID 控制与 Fuzzy 前馈补偿思想提出了 Fuzzy 控制+ Fuzzy 前馈补偿复合模糊控制方法, 该方法解决了对象非线性、不确定性条件下工作点的最佳动态控制问题, 并应用在 MCS-51 单片机控制的轻载降压节能器上, 取得了很好的控制效果。

**关键词** 模糊控制, 模糊前馈, 调压节能, 异步电动机

## 1 引言

异步电动机节电装置大致有两类: 一类是调速控制节电, 适合于风机、泵类等负载; 另一类是非调速轻载降压节电。在电气传动中许多电动机要求工作在额定转速下, 但负载是变化的, 如往复采掘设备、起重设备、油田抽油机等长期在空载或轻载下工作。如果能随负载变化而改变施加在电动机的端电压, 可减小电动机损耗, 使电动机始终工作在高效状态下。前一类装置已广泛应用在工业生产中, 而后一类也逐渐受到人们重视。

自从 1975 年美国航天局工程师 Frank Nola 发明世界上第一台功率因数控制器以来, 世界各国都在开始从事这方面的研究工作<sup>[1]</sup>, 但是, 在实用上都存在振荡和失速问题。英国 SUSSEX 大学的 Peter Unsorth 设计的节能器虽然克服了早期 Nola 产品中振荡和电机失速问题, 但它只能是针对确定性负载率。国内也有从事这方面研究工作的, 但它们都没能解决在各负载率下充分节能与动态响应的矛盾<sup>[4-6]</sup>。同时为了提高系统的动态响应而应采用的补偿, 也只能对小波动负载变化有效。另外由于感性负载电流滞后作用, 即使相同控制角在不同负载下所对应输出电压也是不同的, 调压时由于谐波产生的同步附加转矩使电机在某一段电压范围内产生振荡, 形成“振荡带”。而最佳工作点是在过了这段“振荡带”以后的电压值。并且不同负载率下“振荡带”起始电压是不同的。对这样一个非线性不确定性的控制对象<sup>[2-3]</sup>, 现行基于数学模型或基于静态模糊设计的电机轻载降压节电器或功率因数补偿器实用效果不理想, 因此也就影响了在实际中的推广应用。本控制器是基于模糊控制理论, 采用动态设计方法: 通过可变因子提高系统稳态精度; 运用模糊前馈补偿方法, 可以实现在不同负载率下最佳控制, 有效地解决了系统的动态响应问题。

## 2 控制系统构成

异步电动机轻载降压节电装置主要由以下几个部分构成: 电流、电压及相位检测; 移相触发; MCS-51 最小应用系统。系统硬件结构如图 1 所示。

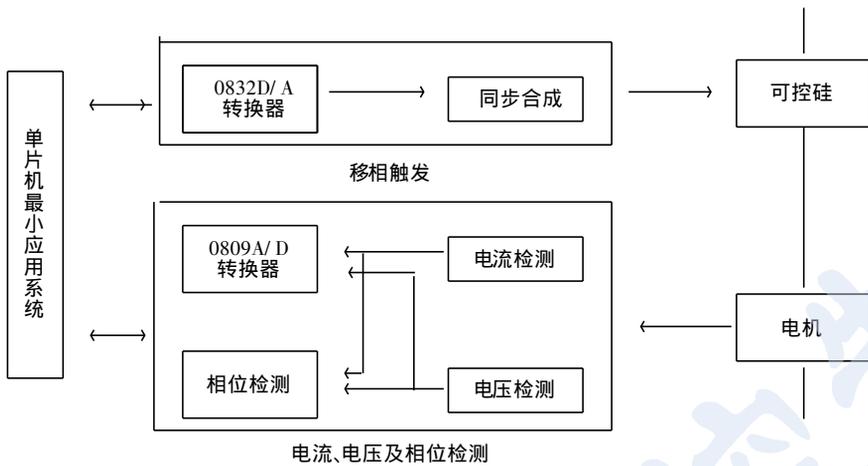


图1 硬件系统结构图

## 2.1 电流、电压及相位检测

电动机的电流、电压信号，通过精密检波电路经 A/D 模数转换器，送入单片机内存单元。由于采用可控硅调压出现斩波，所以利用电流后沿，把电流及电压通过零电压比较器，分别处理成等周期同相位的矩形波，通过与非门把相位信号换算成  $0 \sim 10\text{ms}$  脉宽信号，进入单片机中断输入 INT0 端。

## 2.2 MCS-51 最小应用系统

采用 8031 单片机外扩  $2\text{k}$  数据存储器 6116 和外扩  $8\text{k}$  程序存储器 2764 构成单片机最小应用系统。由于装置还有一些附加功能，如：软起动、电机和可控硅保护电路等，还扩展了并行口。

## 3 控制算法

由于采用 PID 控制算法无法解决充分节能与动态响应矛盾，及同步附加转矩造成振荡问题，同时采用最佳效率和最佳输入功率的常规自适应控制算法均受到过程速度限制，针对这种对象不确定性、非线性特点，我们采用如图 2 所示控制结构。通过带量化因子的 Fuzzy 控

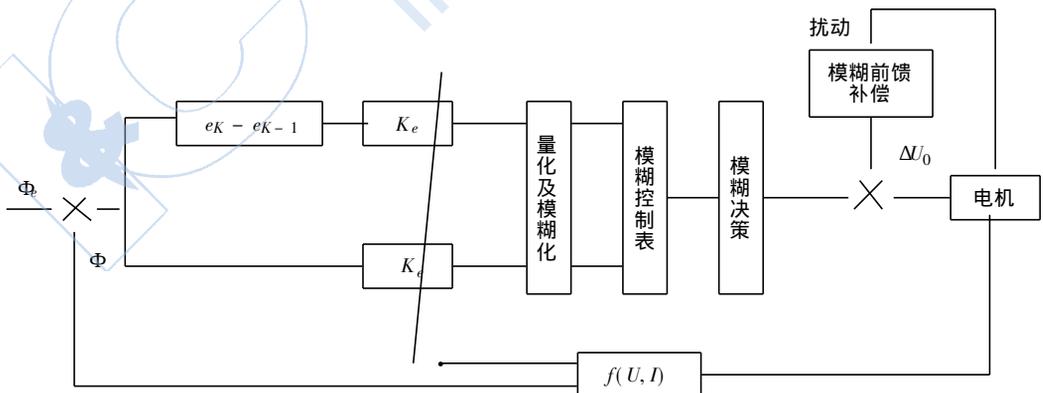


图2 控制系统结构图

制器, 提高系统的稳态精度, 由于控制规则表给出的是这一负载率下越过“振荡带”的最佳电压值, 所以自然就解决了振荡问题. 当负载增加时电流响应速度很快, 所以通过检测电流, 采用模糊前馈方法, 快速提高到相应负载率电压值, 确保电机不失速, 实现了动态补偿, 提高了系统动态响应特性.

### 3.1 参数自调整模糊控制器设计

由于是高速、高精度的控制系统, 因此采用模糊控制算法, 把实际控制经验总结成模糊规则, 通过计算机离线计算出模糊控制表, 存于单片机 ROM 中, 利用计算机快速读取、快速输出特点, 实现高速控制.

控制器采用

IF  $A$  and  $B$  Then  $C$

语言控制规则. 选相位角  $\Phi$  为被控量.  $e$  和  $\dot{e}$  分别为偏差及偏差变化率.  $U$  为控制器输出电压,  $K_e, K_{\dot{e}}$  分别为可调量化因子. 实际测得  $e$  和  $\dot{e}$  变化范围分别为  $(-0.8\text{ms} \sim 4\text{ms})$  和  $(-1.1\text{ms} \sim 0.9\text{ms})$ ,  $U$  的变化范围为  $[0.25U_e, 1.2U_e]$ . 将其分别转化为相应论域上的模糊子集  $\underline{e}, \underline{\dot{e}}, \underline{U}$ , 各变量的模糊隶属度如表 1. 控制规则如表 2.

表 1 各变量模糊隶属度

	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
NB	1.0	0.7	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NM	0.2	0.7	1.0	0.8	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0.2	0.6	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0
PS	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.6	0.2	0	0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.6	0.2
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.7	1.0

表 2 Fuzzy 控制规则表

$\frac{u}{e}$	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PS	0	0
NM	PB	PB	PB	PS	PS	0	0
NS	PB	PM	PS	PS	0	NS	NS
0	PM	PS	PS	0	0	NM	NS
PS	PS	PS	0	NS	NM	NB	NB
PM	0	0	NS	NM	NB	NB	NB
PB	0	0	NM	NB	NB	NB	NB

根据表 1 和表 2 按文[7] 模糊推理原则, 采用最大隶属度方法, 并根据实验数据反复修正, 得到模糊控制表 3, 该表为模糊控制器的在线查寻表.

本控制器采用了可调量化因子, 根据文献[8], 系统稳态时,  $e, \dot{e}$  取值范围为

$$e(\text{ )} < \frac{1}{2K_e} \quad \dot{e}(\text{ )} < \frac{1}{2K_{\dot{e}}} \quad (1)$$

由(1)式可见,在系统接近稳态时,通过适当增大  $K_e, K_i$  的取值,可以使误差和误差变化减小,本系统采用文[10]中的参数校正规则,根据检测的电机变化信息,自动进行参数调整.

表3 Fuzzy 控制表

$\frac{u}{e}$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	6	6	6	6	5	5	4	3	3	1	0	0	0
-5	6	6	5	5	5	5	3	3	3	1	0	0	0
-4	6	6	5	5	5	4	3	3	1	0	0	0	0
-3	5	5	5	5	5	4	2	1	0	0	-1	-1	-1
-2	3	3	3	4	3	3	2	0	0	-1	-1	-1	-1
-1	3	3	3	2	2	2	1	0	-1	-1	-1	-2	-1
0	3	3	2	2	1	0	0	-1	-1	-2	-3	-3	-3
1	2	2	2	2	0	0	-1	-2	-3	-2	-3	-3	-3
2	1	1	1	0	-1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-4	-4
3	0	0	0	-1	-1	-2	-5	-4	-5	-5	-5	-5	-5
4	0	0	0	-1	-3	-2	-5	-6	-6	-6	-5	-6	-6
5	0	0	0	-1	-3	-3	-6	-6	-5	-6	-6	-5	-5
6	0	0	0	-2	-3	-3	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-6

### 3.2 Fuzzy 前馈补偿

由于电动机所带负载的不同,所以电机最佳工作点是不同的,只简单采用 PID 或模糊控制方法不能保证系统在整个轻载范围内都工作在最佳状态,因此我们把电动机负载变化看成是扰动,采用前馈方法进行补偿.在负载变化频繁条件下传统补偿方法超调量大,难以很好实现对系统的跟踪,采用 Fuzzy 前馈补偿方式<sup>[9]</sup>,实现对系统工作点的平移,保证系统在各负载下都能工作在最佳状态.

模糊前馈补偿采用 max-min 重心法进行模糊推理.

$$R_1 \quad A_1 \quad \text{and} \quad B_1 \Rightarrow C_1$$

$$R_2 \quad A_2 \quad \text{and} \quad B_2 \Rightarrow C_2$$

(2)

$$R_n \quad A_n \quad \text{and} \quad B_n \Rightarrow C_n$$

其中  $A_i$  是  $E$  的模糊集合,  $B_i$  是  $EC$  的模糊集合,  $C_i$  是  $\Delta U$  的模糊集合. 用  $\mu_{A_i}, \mu_{B_i}, \mu_{C_i}$  分别代表各模糊集合的隶属度,则由规则  $R_i$  所得出输出的隶属度为

$$\mu_{C_i}(\Delta U) = \mu_{A_i}(E) \quad \mu_{B_i}(EC) \quad \mu_{C_i}(\Delta U) \quad (3)$$

式中“ $\wedge$ ”为 min 运算. 则(2)式最终输出的隶属度为

$$\mu_C(\Delta U) = \mu_{C1} \quad \mu_{C2} \quad \dots \quad \mu_{Cn} \quad (4)$$

式中“ $\vee$ ”为 max 运算. 则最后输出  $\Delta U_0$  为

$$\Delta U_0 = \left[ \bigvee_{i=1}^n \Delta U_i \times \mu_C(\Delta U_i) \right] / \bigvee_{i=1}^n \mu_C(\Delta U_i) \quad (5)$$

在这里我们取所测电流与额定电流比  $I/I_e$  做为  $E, I_k - I_{k-1}$  做为  $EC$ , 补偿输出为  $\Delta U_0$ . 根据实际系统,按(3), (4), (5)式算出在各状态下补偿输出电压值  $\Delta U_0$ .

## 4 实验结果与结论

### 4.1 实验结果

本系统用在 J0232-4 3kW 三相异步电动机, 额定电压为 220V/380V, 额定电流为 11.2/6.49A。负载为同轴连接 Z2-32 2.5kW 复励直流发电机。通过调整发电机的励磁电流和所带负载电阻值来改变异步机的负载。表 4 给出发电机输出不同功率  $P$  时, 应用复合模糊控制和 PID 控制时电动机输入功率、电动机端电压值及额定电压下电动机输入功率。

表 4 两种调压方案与额定电压下功率及电压对照表

$P$	负载 $W$	0	200	300	480	750	1080	1350	1500	1800	2190	2550
额定电压	电压 $V$	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380
	功率 $W$	237	495	668	913	1266	1687	2029	2221	2616	3132	3594
PID 控制	电压 $V$	214	273	285	301	344	354	363	363	363	363	363
	功率 $W$	151	354	490	768	1151	1622	2279	2771	3432	3420	3998
复合控制	电压 $V$	120	198	241	280	331	354	370	378	380	380	380
	功率 $W$	95	324	471	736	1132	1622	2004	2215	2650	3221	3683

当采用复合模糊控制、PID 控制在发电机输出不同功率条件下, 电动机实验系统的效率, 与同条件下额定电压时效率比较如图 3。

图中横坐标给出的是发电机输出功率与电动机额定功率的比值。纵坐标是实验机组的效率。可以看出采用 PID 控制时, 由于把工作点设计在 0.4 倍额定功率左右, 所以在这一点才充分节能。但是在较重载时, 由于电压低反而使效率下降很快; 而复合模糊控制由于采用了前馈补偿, 实现了最佳工作点的平移, 在整个轻载范围内都工作在最佳效率。但是当负载大于 0.55 倍额定负载时, 由于 3 个可控硅消耗功率增大, 会使效率有所下降。

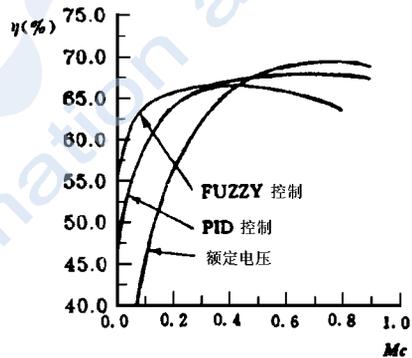


图 3 不同控制策略在各负载下效率

### 4.2 结论

- (1) 采用模糊控制有效地解决了充分节能与系统振荡问题, 使电机在空载状态下节能率达到 59% 以上。
- (2) 通过量化因子的自动调整, 提高了模糊控制系统的稳态精度和响应速度。
- (3) 采用模糊前馈补偿方法可以很好地对连续变化负载进行补偿, 保证最佳工作点的平行移动, 同时提高了系统的动态响应速度, 因此这种采用复合模糊控制算法的电机轻载降压节能器比针对某一固定轻载设计的节能器更具有实用性。
- (4) 此类控制器应用在电动机长期工作在轻载状态下或轻载占空比较大的变化负载情况下, 将获得很好节能效果。

注: 在油田抽油机由于电机启动时要考虑“举平衡锤”不得不把电机选得功率很大, 所以在正常工作时一般油井即使是重载下, 负载也只有额定负载的 60% 左右, 有时甚至处于发电状态, 而目前所采用的节能装置, 由于不适合连续变化负载, 所以并没真正实用起来。所以

本装置在采油上应用前景是乐观的,再加上本装置的附加功能如软起动及对电机的过载、断相过压、欠压等保护,可以说本系统是一个性能价格比很高的节能装置。

### 参 考 文 献

- 1 Noia F. Power Factor Controller—An Energy Saver. Proc IEEE IAS/ANNU Meeting, 1980: 194 ~ 198
- 2 Jain T W, Schmit N L, Novctny D W. Characteristic Induction Motor Slip Values for Variable Voltage Partial Performance Optimization. Presented at the IEEE Power Engineering Soc, Winter Meeting, 1982
- 3 Rowm T, Lopo T. A Quantitative Analysis of Induction Motor Performance Improvement by SCR Voltage Control. IEEE Trans on Industry Applications, 1983, IA-19(4): 545 ~ 553
- 4 陈伯时等. 异步电动机轻载降压节能器. 清华大学研究报告, 1982
- 5 陆荣南等. 最佳功率因数控制器的微机实现. 中国自动化学会应用专委会全国计算机控制与管理学术会议论文集(上册), 1989
- 6 许宏纲等. 一种新型固态交流电机节能起动器. 第一届中国交流电机调速传动学术会议论文集, 1989
- 7 水本 雅晴著, 石 岩译. 模糊工学现状与展望. 日本大阪电气通信大学工学部, 1994
- 8 鲍新福等. 自调整比例因子模糊控制器. 自动化学报, 1987
- 9 罗 安, 熊秋思. FUZZY 前馈补偿及应用. 控制理论与应用, 1990
- 10 张化光. 复杂系统的模糊辨识与模糊自适应控制. 东北大学出版社, 1993

## THE APPLICATION OF FUZZY CONTROL FOR THE LIGHT-LOAD VOLTAGE REDUCING AND POWER-SAVING IN THREE PHASE ASYNCHRONOUS MOTOR

LI Shujiang LIU Xiangjie CHAI Tianyou

(Research Center of Automation, Northeastern University, Shenyang 110006)

**Abstract** Considering both traditional PID control and fuzzy feedforward compensation, this paper proposes a compound approach of fuzzy control + fuzzy feedforward compensation. This approach solves the problem of optimal control while the dynamic plants are nonlinear, time-varying and uncertain. The approach found application in light-load, voltage reducing and power-saving apparatus controlled by MCS-51 chip microprocessors. The result is satisfactory.

**Key words** fuzzy control, fuzzy feedforward compensation, motor

### 作者简介

李树江, 男, 28岁, 讲师, 博士生. 研究领域为神经网络及模糊控制在复杂工业过程中的应用.

刘向杰, 男, 29岁, 博士生. 研究领域为模糊控制, 智能控制.

柴天佑, 男, 49岁, 博士生导师. 研究领域为智能控制, 自适应控制, 机器人控制.