

# 直流无刷电机位置跟踪的模糊 PID 控制

郭雪梅<sup>1,2</sup>, 贾宏光<sup>1</sup>, 冯长有<sup>1</sup>

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2.中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 为了设计高精度的直流无刷电机伺服控制系统, 性能优良的位置跟踪控制器是其重要保障。基于直流无刷电机的工作原理, 运用 Matlab/Simulink 建立其自动位置跟踪控制系统的计算机仿真模型, 系统的电流和速度环采用 PI 控制, 结合 PID 控制和模糊控制设计了系统位置环的模糊 PID 控制器。数字仿真结果表明, 模糊 PID 控制的动态特性优于传统单一的 PID 控制, 论文的研究工作对设计性能优良的直流无刷电机控制器具有借鉴意义。

**关键词:** 无刷直流电机; 位置跟踪控制; 模糊 PID; 计算机仿真

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1672 - 9870 ( 2008 ) 01 - 0097 - 05

## Fuzzy PID Control of Brushless DC Motor Position Tracking

GUO Xuemei<sup>1,2</sup>, JIA Hongguang<sup>1</sup>, FENG Changyou<sup>1</sup>

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract:** The position tracking controller with good performance is the guarantee of high precision brushless DC motor servo system. Mathematic model based on Matlab/Simulink for position tracking control system was established based on the work principle of brushless DC Motor. We designed PI controller for current and speed loop and designed Fuzzy PID controller which is the collaboration of PID control and fuzzy control for system position loop. The result of simulation shows that, compared with the PID controller, the dynamic performance of fuzzy controller is better. The research work of this paper has meaning for excellent controller design.

**Key words:** brushless DC motor; position tracking control; fuzzy PID; computer simulation

直流无刷电机既具备交流电机的结构简单、运行可靠、维护方便等一系列优点, 又具备直流电机的运行效率高、无励磁损耗及调速性能好等诸多优点, 故其应用范围极其广泛, 遍及国防、航空航天、医疗器械、家用电器、机器人等各个领域。对无刷直流电机位置跟踪控制的研究也一直备受人们的关注。

本文分析了直流无刷电机的工作原理, 运用 Matlab/Simulink 建立直流无刷电机位置跟踪控制系统的计算机仿真数学模型, 设计了系统位置环的模糊 PID 控制器, 对传统单一的 PID 控制与模糊 PID 控制进行了仿真对比分析。

## 1 直流无刷电机工作原理

直流无刷电机的基本构成主要由电机本体和转子位置传感器两部分组成, 电动机本体上安装一台同步电动机, 转轴上装有转子位置监测器, 以测定转子磁极与旋转磁场的相对位置, 为驱动电路提供出发信号。电动机的转子是稀土永磁体, 定子绕组由逆变器供电, 定子电流频率保证定子磁势与转子磁势同步旋转。直流无刷电机的数学模型可表示如下。

电压平衡方程和转矩方程:

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + E, \quad T_e = \frac{P_n(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)}{\omega} \quad (1)$$

收稿日期: 2007-10-10

基金项目: 吉林省杰出青年基金(20060115)

作者简介: 郭雪梅(1983-), 女, 辽宁省铁岭县人, 硕士, 主要从事伺服系统设计与仿真的研究, Email: guoxuemei0410@163.com。

其中 $\omega$ 为电机的角速度,  $p_n$ 为电机的磁对数。

在忽略转动时的粘滞系数的假设下, 直流无刷电机的运动方程可写为:

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

其中 $T_L$ 为电机的负载转矩,  $J$ 为电机的转动惯量。

## 2 控制系统的结构组成

无刷直流电机位置跟踪控制系统由控制器、功率放大器、直流无刷电机、减速器和位置传感器组成。直流无刷电机位置跟踪控制系统结构原理如图1所示, 图2为MATLAB仿真模型。位置跟踪控制系统的工作过程为, 通过给定位置信号 $U_a$ 与反馈位置信号 $U_b$ 产生的偏差信号, 经过位置调节器得到速度的参考值 $V_g$ , 控制器根据测出的电机反馈位置信息计算出当前转速 $V_s$ ,  $V_g$ 与 $V_s$ 进行速率调节计算以得到电流的给定电压参考值 $U_{ig}$ , 电机绕组电流反馈信号经转换得到当前主回路的电流反馈电压值 $U_{if}$ , 将 $U_{if}$ 与 $U_{ig}$ 进行电流调节计算, 用得到的电流调节器的输出去调节PWM波占空比, 进而控制功率开关管的导通与关断, 从而实现对无刷直流电机的位置跟踪控制。

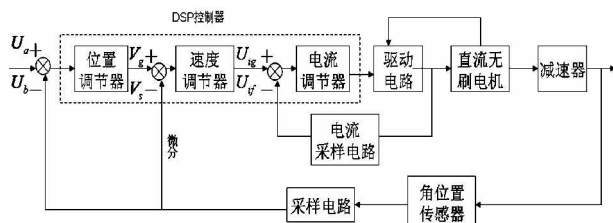


图1 直流无刷电机位置跟踪控制系统结构原理图

Fig.1 Structure schematic of brushless DC motor position tracking control system

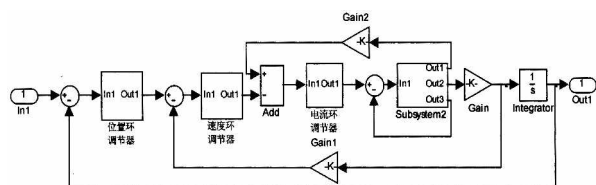


图2 直流无刷电机位置跟踪伺服系统 MATLAB 仿真模型

Fig.2 MATLAB simulation model of brushless DC motor position tracking

### 2.1 电流环设计

电流环的设计必须考虑电流的快速跟随性能, 也就是说, 当电流给定发生变化的时, 控制系统必须迅速作出响应, 使输出电流跟踪给定电流的变化。由于电流环的响应速度很快, 因此采用积分分离的PI控制算法, 并没有引入微分环节, 以避免微

分因子的加入造成电流环的振荡。

### 2.2 速度环设计

速度环作为三环控制中的中间环节, 它与系统硬件部分没有任何直接联系。转速的给定由位置环调节的结果产生, 而转速环的调节结果则作为电流环的给定, 显然, 转速环在三环控制中起着承上启下的作用。由于反馈速度利用反馈的偏转角的微分得到, 这对反馈的角度信号提出了较高的要求; 速度环的控制算法与电流环的控制算法差别不大, 在这里同样采用PI调节。

### 2.3 位置环设计

位置环作为三环控制的最外环, 直接决定伺服控制系统的动、静态性能, 也是控制器设计中最关键的部分之一。传统的PID算法虽然具有结构简单, 鲁棒性较强的特点, 但很难保证系统既具有较快的响应速度, 同时又具有较小的超调量和较好的静态性能, 因此必须对传统的PID控制算法进行改进, 使其尽可能的兼顾各项性能指标。本文采用复合型模糊PID控制器, 即Fuzzy-PID控制器。在偏差较大时采用模糊控制技术, 以提高系统的响应速度, 加快响应过程; 而在偏差较小时采用PID控制技术, 消除静态误差, 提高控制精度。这样既保持了传统PID控制器的优点又克服了模糊控制的稳态静态问题, 从而达到提高系统性能的目的。

## 3 位置跟踪模糊PID控制

传统的PID算法虽然具有结构简单, 鲁棒性较强的特点, 但很难保证系统既具有较快的响应速度, 同时又具有较小的超调量和较好的静态性能, 因此必须对传统的PID控制算法进行改进, 使其尽可能的兼顾各项性能指标。本文采用复合型模糊PID控制器, 即Fuzzy-PID控制器。在偏差较大时采用模糊控制技术, 以提高系统的响应速度, 加快响应过程; 而在偏差较小时采用PID控制技术, 消除静态误差, 提高控制精度。这样既保持了传统PID控制器的优点又克服了模糊控制的稳态静态问题, 从而达到提高系统控制性能的目的。

模糊算法采用双输入、单输出结构, 选取位移误差 $E$ 、误差变化量 $EC$ 作为系统输入, PWM波控制信号作为输出, 模糊控制器根据系数 $K_e$ 、 $K_{ec}$ 和 $K_u$ 对系统性能影响的不同对这三个系数进行调整。确定输入、输出变量的变化范围和量化因子后, 根据

模糊关系<sup>[4]</sup>推理合成规则计算  $U_{ij}=(E_i \times EC_j) \cdot R$ 。

### 3.1 模糊控制输入变量的确定和设计

模糊算法采用双输入、单输出结构，这里取系统位移误差 $E$ 、位移误差变化量 $EC$ 作为模糊系统输入，PWM 波控制信号作为输出。模糊控制器是利用这三个量的系数 $K_e$ 、 $K_{ec}$ 和 $K_u$ 各自对系统性能的不同影响，根据误差范围的不同对这三个系数进行调整，即当误差较大时，误差权重 $K_e$ 较大，从而实现快速消除误差；误差较小时，误差变化量权重 $K_{ec}$ 较大，减小超调量，尽快使系统稳定。 $K_u$ 相当于系统总的放大倍数<sup>[5]</sup>。通过合理设置三个系数，从而实现系统的优化。

### 3.2 确定输入、输出变量的变化范围和量化因子

位移误差 将检测模块传出的对象实际位置信号与上位机传来的位置控制信号相比较，从而得到位移误差量。位移误差基本论域为  $[-10, +10]$ ，选取 7 个语言变量，取量化论域为  $[-6, 6]$ ，量化因子为  $K_c=6/10=3/5$ 。其模糊子集为{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。

位移误差变化量 通过位置误差可计算出此值。由于位置误差变化较大，取  $[-20, 20]$  为基本论域，取量化论域为  $[-6, 6]$ ，量化因子为  $K_c=6/20=3/10$ 。同样用 7 个语言变量来定义偏差变化量，模糊子集与位移误差  $E$  模糊子集相同，为{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。

输出 PWM 波控制信号 $U$ 通过去模糊化，给出相应 PWM 波指令。其归一化基本论域为  $[-1, 1]$ ，取量化论域为  $[-6, 6]$ ，量化因子为  $K_c=6/1=6$ 。模糊子集同样为{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。在 MATLAB 的模糊控制器设计界面，分别建立 $E$ 、 $EC$ 、 $U$ 的隶属度函数，本文选用高斯型隶属度函数，如图 3 所示。

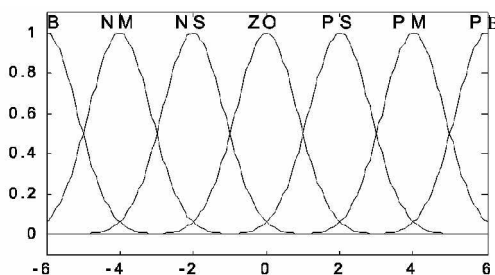


图 3 高斯型隶属度函数曲线

Fig.3 Gaussian curve membership function

### 3.3 模糊控制规则的确定

模糊控制器是按一定的语言规则进行工作的，而这些控制规则是建立在总结操作员控制经验基础上的。目前大多数模糊逻辑推理方法采用 Mamdani 极大极小推理法。本文采用目前流行的 Mamdani 推理法。

考虑模糊推理形式

规则 1 :  $A1 \text{ and } B1 \Rightarrow C1$

规则 2 :  $A2 \text{ and } B2 \Rightarrow C2$

.....

规则 n :  $An \text{ and } Bn \Rightarrow Cn$

前提 :  $x0 \text{ and } y0$

结论 :  $C$

由于模糊关系矩阵  $R$  是一个高阶矩阵，如果对于任何瞬间的  $E$  和  $DE_j$  都合成计算以及及时得到控制输出，显然要花费大量的计算时间。也将会导致系统实时控制性能变差，为了克服实时计算量大的缺点，通常主要采用查表法。查表法的基本思想是通过离线计算取得一个模糊控制表，以保证控制器的输出能够使系统输出响应的动态特性达到最佳。

根据误差和误差变化量得到驱动电机转动的 PWM 波控制信号，模糊控制规则表如表 1。

表 1 模糊控制规则表

Tab.1 Fuzzy control rules table

|       |    | 误差 E |    |    |    |    |    |    |
|-------|----|------|----|----|----|----|----|----|
|       |    | PB   | PM | PS | ZO | NS | NM | NB |
| 误差变化量 | PB | NB   | NB | NM | NM | NS | NS | PM |
|       | PM | NB   | NM | NS | NS | NS | ZO | PM |
|       | PS | NB   | NM | PM | PM | PS | PS | PB |
|       | ZO | NB   | NS | NS | ZO | PS | PS | PB |
| EC    | NS | NB   | NS | ZO | PS | PS | PM | PB |
|       | NM | NM   | ZO | PS | PS | PM | PM | PB |
|       | NB | NM   | PS | PS | PM | PM | PB | PB |

### 3.4 反模糊化过程

对观测值偏差和偏差变化率，分别利用各自的量化因子化为论域中的元素把其模糊化，可求得模糊控制量。模糊推理结果都是模糊值，不能直接用于控制被控对象，需要先转化成一个执行机构可以接受的精确量，实际上是从模糊空间到清晰空间的一种映射。常用的反模糊化计算方法主要有最大隶属度函数法、重心法、加权平均法。本文采用重心法。重心法是取模糊隶属度函数曲线与横坐标围成面积的重心作为模糊面积的重心为模糊推理最终输出值，即：

$$v_0 = \frac{\int v \mu(v) dv}{\int \mu(v) dv} \tag{3}$$

对于具有  $m$  个输出量化级数的离散论域情况：

$$v_0 = \frac{\sum_{k=1}^m v_k \mu(v_k)}{\sum_{k=1}^m \mu(v_k)} \tag{4}$$

表 2 是根据控制规则采用重心法反模糊化计算的结果，模型输出曲面如图 4 所示。

表 2 反模糊化结果  
Tab.2 Results of the anti-fuzzy

|             |    | 误差 E |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------|----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|             |    | -6   | -5    | -4    | -3    | -2    | -1    | 0     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
| 误差变化量<br>EC | -6 | 5.84 | 5.34  | 5.36  | 4.40  | 4.10  | 3.96  | 3.94  | 3.70  | 1.98  | 0.99  | 0.15  | 0.05  | 0.00  |
|             | -5 | 5.35 | 5.36  | 4.99  | 4.41  | 3.99  | 3.99  | 3.82  | 2.98  | 1.97  | 0.99  | 0.34  | 0.02  | 0.00  |
|             | -4 | 5.35 | 5.34  | 5.10  | 4.31  | 3.98  | 3.84  | 3.69  | 2.98  | 1.94  | 0.86  | 0.00  | -0.10 | -0.11 |
|             | -3 | 5.41 | 5.34  | 4.9   | 4.62  | 4.22  | 3.81  | 2.98  | 2.6   | 1.86  | -0.76 | -1.25 | -1.65 | -1.66 |
|             | -2 | 5.36 | 5.36  | 5.1   | 4.84  | 4.06  | 2.80  | 2.02  | 1.44  | 0.00  | -1.46 | -3.94 | -3.52 | -4.01 |
|             | -1 | 5.33 | 5.34  | 4.89  | 4.48  | 4.00  | 1.99  | 0.82  | -0.73 | -1.52 | -2.46 | -3.85 | -4.22 | -4.21 |
|             | 0  | 5.22 | 5.16  | 5.0   | 4.76  | 3.99  | 1.96  | 0.00  | -1.96 | -3.99 | -4.76 | -5.0  | -5.16 | -5.24 |
|             | 1  | 4.21 | 4.22  | 3.85  | 2.46  | 1.52  | 0.73  | -0.82 | -1.99 | -4.00 | -4.88 | -4.89 | -5.34 | -5.33 |
|             | 2  | 4.01 | 3.52  | 3.94  | 1.46  | 0.00  | -1.44 | -2.02 | -2.80 | -4.06 | -4.84 | -5.1  | -5.36 | -5.36 |
|             | 3  | 1.66 | 1.65  | 1.25  | 0.76  | -1.86 | -2.6  | -2.98 | -3.81 | -4.22 | -4.62 | -4.9  | -5.34 | -5.41 |
|             | 4  | 0.12 | 0.10  | 0.00  | -0.86 | -1.94 | -2.98 | -3.39 | -3.84 | -3.98 | -4.31 | -5.10 | -5.34 | -5.36 |
|             | 5  | 0.01 | -0.02 | -0.34 | -0.99 | -1.97 | -2.98 | -3.82 | -3.99 | -3.99 | -4.41 | -4.99 | -5.36 | -5.45 |
|             | 6  | 0.02 | -0.05 | -0.15 | -0.99 | -1.98 | -3.70 | -3.94 | -3.96 | -4.10 | -4.40 | -5.36 | -5.34 | -5.84 |

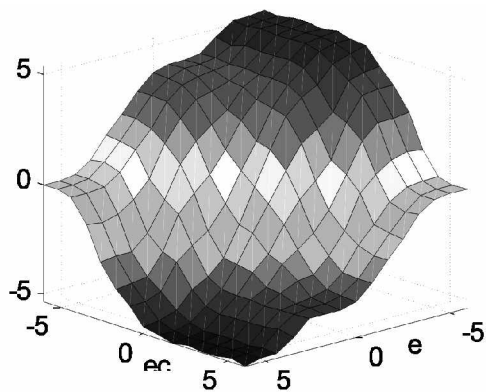


图 4 模糊控制的模型输出曲面

Fig.4 Fuzzy control surface model output

直流无刷电机位置跟踪模糊 PID 控制的 MATLAB/Simulink 仿真框图如图 5 所示，仿真系统中主要包括：电机模型、位置 PID 控制器、位置模糊控制器、电流控制模块、速度控制模块等。

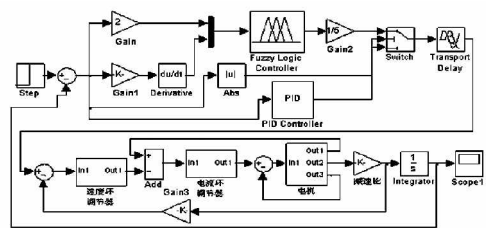


图 5 直流无刷电机位置跟踪模糊 PID 控制 MATLAB 仿真框图

Fig.5 Brushless DC motor position tracking fuzzy PID control block diagram of MATLAB simulation

### 4 仿真结果及分析

本文所选电机参数：额定电压 24V，额定转速 8040r/

min，反电动势系数  $K_e = 0.0223V / r \cdot \min^{-1}$ ，额定转矩为  $0.0613N \cdot m$ ，转子转动惯量为  $2.19 \times 10^{-6} kg \cdot m^2$ ，相间电阻为  $1.27\Omega$ ，相间电感为  $0.0143mH$ 。传统单一 PID 控制与模糊 PID 控制的阶跃响应比较如图 6 所示，对正弦信号的位置跟踪如图 7 所示。图 8 为连续方波跟踪结果，跟踪误差如图 8 所示。

对比传统单一的 PID 控制和模糊 PID 控制器阶跃响应曲线可以得出，单一 PID 控制的超调较大，达到 10%，调节时间以达到  $\pm 5\%$  误差为准，大约为 0.1 秒。对比之下模糊 PID 控制器的超调很小，为 0.2%，调节时间为 0.06 秒。而且从模糊 PID 正弦位置跟踪结果可以看出，模糊 PID 的跟踪精度更高，其最大误差小于 0.09%。通过以上研究表明，采用模糊 PID 控制的直流无刷电机位置伺服控制具有优良的动静态伺服特性。

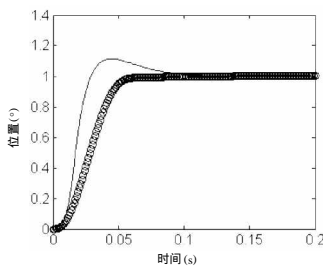


图 6 两种控制方法仿真对比结果  
Fig.6 Two Control Simulation comparison

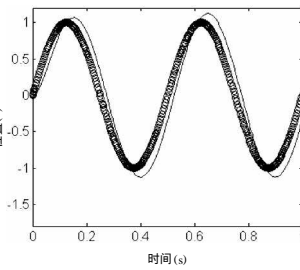


图 7 正弦参考输入跟踪结果  
Fig.7 Sine reference input tracking results

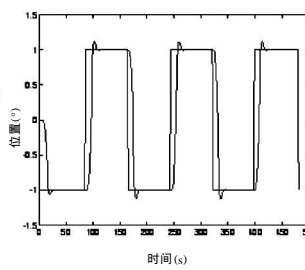


图 8 方波参考输入跟踪结果  
Fig.8 Reference input square wave tracking results

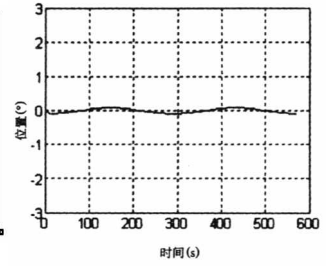


图 9 连续方波跟踪误差曲线  
Fig.9 Square continuous tracking error curve

### 参考文献

- [1] 张友鹏, 范子荣. 基于自适应模糊 PID 控制器的非线性系统仿真[J]. 计算机仿真, 2007, 24(6): 42-44.
- [2] 王建立. 光电经纬仪电视跟踪、捕获快速运动目标技术的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院博士论文, 2002.
- [3] 彭飞. 基于 DSP 的无刷直流电机控制系统设计[D]. 长沙: 国防科技大学研究生院硕士论文, 2004.
- [4] 曾光奇. 模糊控制理论与工程应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000.
- [5] 吴琼, 张晨洁, 于浩. 时滞系统的自适应模糊控制研究[J]. 长春理工大学学报, 2007(3): 30-34.

(上接第 110 页)

价标准, 通过一个调度算法来判断出哪部电梯来响应各厅层召唤。在此我们构造一个评价函数, 综合以上四个评价标准, 评价函数如式(3)所示:

$$S_i = W_1 S_{AWTi} + W_2 S_{ARTi} + W_3 S_{LWPI} + W_4 S_{RPCi} \quad (3)$$

其中:  $W_i$ —根据交通模式确定的权重系数,  $W_i$  ( $0, 1$ ), 且  $W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = 1$ 。

一般说来, 不同的电梯运行环境各权重系数是不一样的, 而在不同环境下的权重系数一般由专家或专业技术人员提供。

$S_i$ —评价函数值, 表示第  $i$  台电梯响应楼层召唤信号的可信度, 其值越大表示第  $i$  台电梯响应信号的可能性越大;

$S_{AWTi}$ —平均候梯时间短的隶属度, 其值越大说明候梯时间短的可能性越大;

$S_{ARTi}$ —平均乘梯时间短的隶属度, 值越大说明乘梯时间短的可能性越大;

$S_{LWPI}$ —长时间候梯率低的隶属度, 值越大说明长时间候梯的可能性越小;

$S_{RPCi}$ —能耗低的隶属度, 值越大说明电梯能耗低的可能性越大。

综上所述, 设计一种电梯群控模糊算法, 流程图如图 9 所示。

## 5 结论

本文通过对电梯四个评价标准的输入量进行计算优化, 实现对四个评价标准的优化, 进而提高电

梯群的运行效率, 满足人们的要求。这种方法经过实验室 4 台 8 层电梯模型的模拟仿真, 各项指标都得到了一定程度的提高, 取得了良好的实验效果, 达到了控制要求。

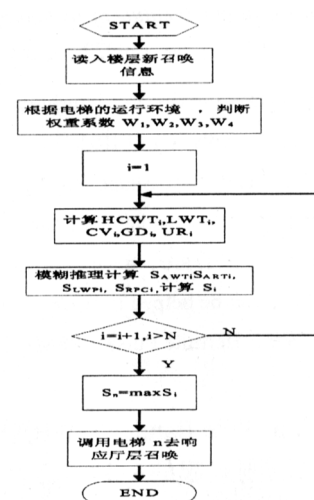


图 9 电梯群控调度算法流程图  
Fig.9 Flowchart of elevator group dispatching algorithm

### 参考文献

- [1] 王松青. 基于模糊控制技术的电梯群控最优调度策略研究[D]. 重庆大学, 2005: 21-50.
- [2] 张建民, 王涛, 王忠礼. 智能控制原理及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004: 50-70.
- [3] 张苗苗, 张学军, 谢剑英. 基于模糊推理的电梯群控系统的研究与仿真实现[J]. 测控技术, 2000, 19(3): 56-57.
- [4] 张昆, 段其昌. 基于模糊控制的多目标电梯群控技术[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 248.