

模糊 PID 控制及其 MATLAB 仿真^{*}

贵州省机电研究设计院(550003) 苏明

贵州工业大学机械与自动化学院(550008) 陈伦军 林浩

摘要:模糊PID控制仿真研究表明模糊PID控制器具有在控制过程的前期阶段具有模糊控制器的优点,而在控制过程的后期阶段又具有PID调节器的所有优势,是一种性能优良的控制器的。

关键词:PID控制 模糊控制 模糊PID控制 Simulink 中图分类号:F4 文献标识符:A

Study of Fuzzy PID Control

Su Ming Chen Lun-Jun Lin Hao

Abstract:Simulation indicate that Fuzzy PID Control have both excellences of Fuzzy Control in the course of early period and advantages of PID Control in the course of later period, so Fuzzy PID Control is a kind of excellen controller.

Key words: PID control; fuzzy control; fuzzy PID control; simulink

1 引言

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量和模糊逻辑推理为基础的一种计算机控制方法,作为智能控制的一个重要分支,在控制领域获得了广泛应用,模糊控制与传统控制方式相比具有以下突出优点:

- 不需要精确的被控对象的数学模型;
- 使用自然语言方法,控制方法易于掌握;
- 鲁棒性好,能够较大范围的适应参数变化;
- 与常规PID控制相比,动态响应品质优良。

常规模糊控制器的原理如下:

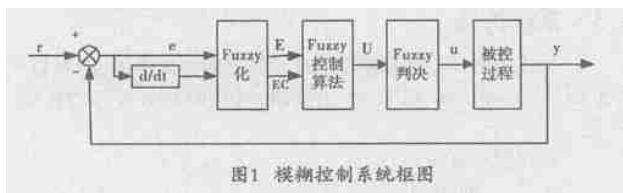


图1 模糊控制系统框图

PID控制规律:

$$u(t) = k_p \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{d}{dt} e(t) \right)$$

式中: k_p —— 比例系数;

T_I —— 积分时间常数;

T_D —— 微分时间常数。

控制输出由三部分组成:

比例环节——根据偏差量成比例的调节系统控制量,以此产生控制作用,减少偏差。比例系数的作用是加快系统的响应速度,比例系数越大,系统响应速度越快,系统的调节精度越高,但容易产生超调,甚至会导致系统的不稳定;比例系数过小,会降低系统调节精度,系统响应速度变慢,调节时间变长,系统动态、静态特性变坏。

积分环节——用于消除静差,提高系统的无差度。积分

作用的强弱取决于积分时间常数 T_I 的大小, T_I 越小,积分作用越强。需要注意的是积分作用过强,可能引起系统的不稳定。

微分环节——根据偏差量的变化趋势调节系统控制量,在偏差信号发生较大的变化以前,提前引入一个早期的校正信号,起到加快系统动作速度,减少调节时间的作用。需要注意的是微分作用过强,可能引起系统的振荡。

模糊PID控制是结合PID控制和模糊控制得出的一种新型控制方式,其基本原理如下:

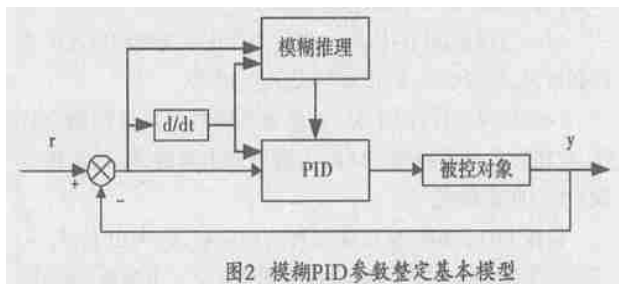


图2 模糊PID参数整定基本模型

众多的学者就此进行了大量的研究,并取得了许多卓有成效的成果,本文对模糊PID调节器与PID调节器进行仿真研究并比较其控制性能,得出模糊PID控制器具有比传统PID调节器优越的性能的结论,最后对PID调节器、三维模糊控制器和模糊PID调节器的调节规律进行了论述。

2 模糊PID控制的设计

PID模糊控制重要的任务是找出PID的三个参数与误差 \$e\$ 和误差变化率 \$e_c\$ 之间的模糊关系,在运行中不断检测 \$e\$ 和 \$e_c\$,根据确定的模糊控制规则来对三个参数进行在线调整,满足不同 \$e\$ 和 \$e_c\$ 时对三个参数的不同要求。

比例环节——根据偏差量成比例的调节系统控制量,以此产生控制作用,减少偏差。

^{*} 基金项目:贵州省科学技术基金资助[黔科基金2004-3046号]

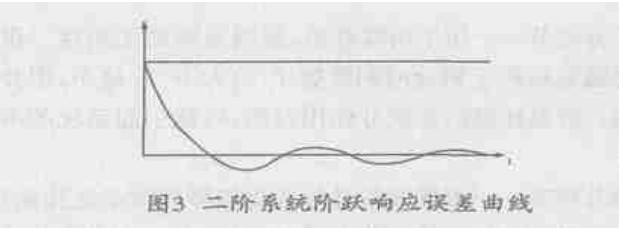
作者简介:苏明,男(1962-),高级工程师、研究生导师,研究方向:模糊控制系统及其应用。

收稿日期:2004-5-28

积分环节——用于消除静差,提高系统的无差度。积分作用的强弱取决于积分时间常数 T_I 的大小, T_I 越小,积分作用越强。需要注意的是积分作用过强,可能引起系统的不稳定。

微分环节——根据偏差量的变化趋势调节系统控制量,在偏差信号发生较大的变化以前,提前引入一个早期的校正信号,起到加快系统动作速度,减少调节时间的作用。需要注意的是微分作用过强,可能引起系统的振荡。

一般来说,不同的偏差 e 和偏差变化率 e_c 对 PID 控制器的参数 k_p 、 k_i 和 k_d 有不同的要求。以典型二阶系统单位阶跃响应的误差曲线为例进行分析如下。



从误差曲线看出：

- (a) 当误差 $|e|$ 较大时,说明误差的绝对值较大,不论误差的变化趋势如何,都应该考虑控制器的 k_p 取较大值,以提高响应的快速性;而为了防止因为 $|e_c|$ 瞬时过大, k_d 应该取较小的值;为控制超调, k_i 也应该取值很小。
- (b) 当误差 $|e|$ 在中等大小时,为保证系统的相应速度并控制超调,应减小 k_p , k_i 值应增大, k_d 应适中。
- (c) 当误差 $|e|$ 较小时,为保证系统具有良好的稳态特性,应加大 k_p 、 k_i 的取值,同时为避免产生振荡, k_d 的取值应该和 $|e_c|$ 联系起来。

模糊 PID 控制根据系统运行的不同状态,考虑 k_p 、 k_d 、 k_i 三者的关联,根据工程经验设计模糊整定这三个参数,选择输入语言变量为误差 e 和偏差变化率 e_c ,语言变量值取 $\{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB\}$ 七个模糊值;选择输出语言变量为 Δk_p 、 Δk_d 、 Δk_i ,语言变量值也取 $\{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB\}$ 七个模糊值,建立 Δk_p 、 Δk_d 、 Δk_i 的模糊规则表如下表 1、表 2、表 3。

表 1 Δk_p 的模糊规则表

Δk_p e_c	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PS	ZO	NS
NM	PB	PB	PM	PM	ZO	NS	NM
NS	PB	PM	PM	PS	NS	NM	NB
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	NB	NM	NS	PS	PM	PM	PB
PM	NM	NS	ZO	PM	PB	PB	PB
PB	NS	ZO	PS	PB	PB	PB	PB

表 2 Δk_i 的模糊规则表

Δk_i e_c	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	NS	NM	NB
NM	PB	PB	PM	PM	NM	NB	NB
NS	PB	PM	PS	PS	NB	NB	NB
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	NB	NB	NB	PS	PS	PM	PB
PM	NB	NB	NM	PM	PM	PB	PB
PB	NB	NM	NS	PB	PB	PB	PB

表 3 Δk_d 的模糊规则表

Δk_d e_c	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	NB	NB	NM	NS
NM	PB	PB	PM	NM	ZO	PS	PM
NS	PB	PM	PM	NS	PM	PB	PB
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PS	PB	PB	PM	NS	PM	PM	PB
PM	PM	PS	ZO	NM	PM	PB	PB
PB	NS	NM	NB	NB	PB	PB	PB

根据模糊规则表,可以对 k_p 、 k_i 、 k_d 进行动态整定,设 k'_p 、 k'_i 、 k'_d 为采用常规整定方法得到的 k_p 、 k_i 、 k_d 的预整定值,选择适当的模糊化和去模糊化方法,则模糊 PID 参数:

$$k_p = k'_p + \Delta k_p \quad k_i = k'_i + \Delta k_i \quad k_d = k'_d + \Delta k_d$$

3 系统仿真

为比较 PID 控制和模糊 PID 控制器的控制性能,用 MATLAB 中的 Simulink 和 Fuzzy 工具箱,对控制对象进行仿真研究。

设控制对象为:

$$G_1(s) = \frac{\text{num}(s)}{\text{den}(s)} = \frac{1}{50s^2 + 5s + 1}$$
$$G_2(s) = \frac{\text{num}(s)}{\text{den}(s)} = \frac{1}{50s^3 + 15s^2 + 16s + 3}$$

系统仿真模型为(见图 4):

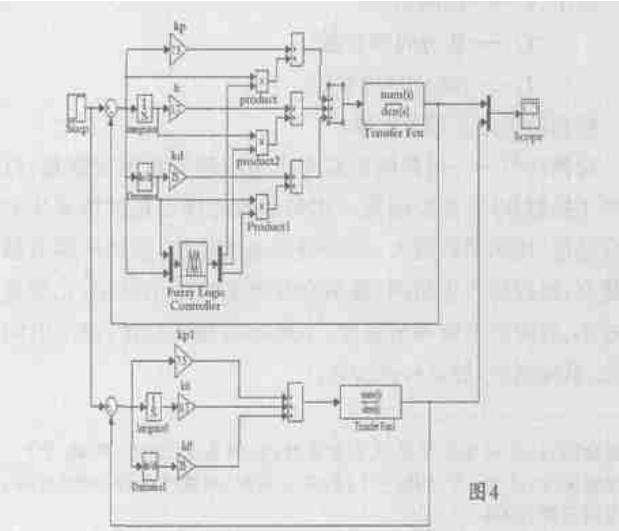


图 4

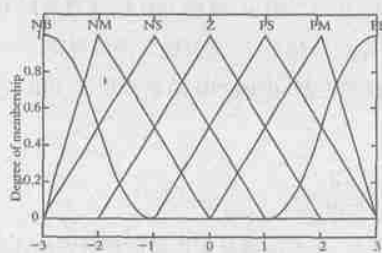


图5 隶属度函数

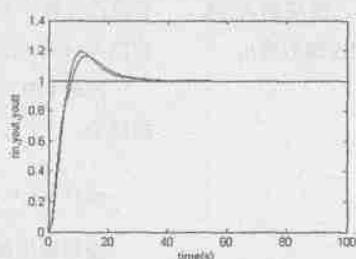


图6 $G_1(s)$ 的阶跃响应曲线

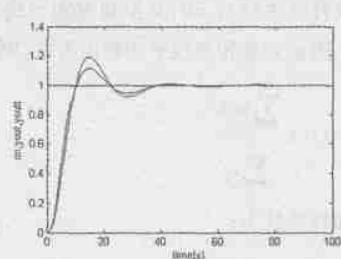


图7 $G_2(s)$ 的阶跃响应曲线

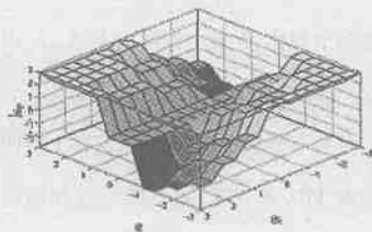


图8 Δk_p 的非线性对应关系

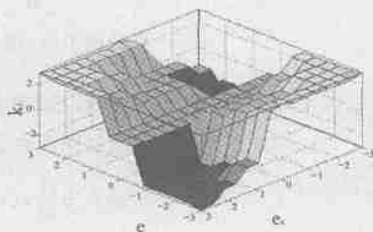


图9 Δk_i 的非线性对应关系

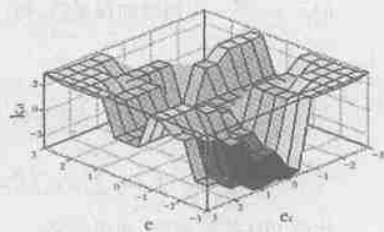


图10 Δk_d 的非线性对应关系

k_p, k_i, k_d 的预整定值, 系统输入: 幅值为 1 的阶跃信号。

k_p, k_i, k_d 误差和误差变化率的隶属度函数 (图 5)。

阶跃响应如图 6、图 7 所示。

从阶跃响应曲线可以看出, 模糊 PID 控制比 PID 控制有更好的动态特性。

模糊控制器的非线性对应关系为图 8、图 9、图 10:

$$\text{当 } G_1(s) \text{ 度为: } G_{11}(s) = \frac{1}{80s^2 + 5s + 1}$$

$$\text{当 } G_2(s) \text{ 度为: } G_{21}(s) = \frac{1}{80s^3 + 155s^2 + 16s + 1} \text{ 时}$$

阶跃响应为图 11、图 12 所示。

可以看出: 模糊 PID 控制比 PID 控制具有更好的适应性和鲁棒性。

4 调节规律比较

李洪兴在文献^[7]中对模糊控制器与 PID 调节器的关系进行了论述, 指出“普通 PID 调节器在 $xyzu$ 四维空间中是一张通过原点的超平面, 即具有线性调节规律; 模糊控制器在该空间中则是一张通过原点的分片三次曲面, 整张曲面逼近一个 (阶数可以很高的) 非线性调节规律, 故其整体效果要比 PID 调节器好得多。然而, 在原点附近, 模糊控制器近似为 PID 调节器。不难看出, 这种模糊控制器在控制过程的前期阶段具有模糊控制器的全部优点, 而在控制过程的后期阶段又具有 PID 调节器的所有优势, 因此是一种性能良好的控制器。”文献^[7]是用三维模糊控制器与 PID 控制器比较得出的结论, 在本节中, 我们对 PID 控制器、三维模糊控制器和模糊 PID 控制器的调节规律进行简要的分析。

(a) PID 控制规律

PID 控制规律为:

$$u(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \\ = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{d}{dt} e(t)$$

控制输出根据误差、误差的微分和误差的积分产生作用,

在 $(e(t), \frac{d}{dt} e(t), \int_0^t e(t) dt, u(t))$ 四维空间中是一张通过原点的超平面, 即具有线性调节规律, 在整个空间内 k_p, k_d, k_i 保持定值。

(b) 三维模糊控制规律

三维模糊控制器一般采用输入为 $e(t), \frac{d}{dt} e(t), \frac{d^2}{dt^2} e(t)$,

输出为 $u(t)$, 设其对应的语言变量为 $\tilde{E}, \dot{\tilde{E}}, \ddot{\tilde{E}}$ 和 U, A_i, B_j, C_k 分别是 $\tilde{E}, \dot{\tilde{E}}, \ddot{\tilde{E}}$ 的语言变量值, 采用 T-S-K 模型的模糊控制规则为:

$$R^i: \text{If } \tilde{E} \text{ is } A_i \text{ and } \dot{\tilde{E}} \text{ is } B_j \text{ and } \ddot{\tilde{E}} \text{ is } C_k$$

$$\text{Then } U^i = b_0^i + b_1^i \tilde{E} + b_2^i \dot{\tilde{E}} + b_3^i \ddot{\tilde{E}}$$

取特殊情况 $b_0^i = 0$, 其控制规则表现为一三维规则表, 选取极小蕴涵关系和加权平均输出方法, 则模糊控制器输出:

$$u(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \omega^i U^i}{\sum_{i=1}^N \omega^i}$$

加权系数为:

$$\omega^i = \min(\mu_{A_i}(E), \mu_{B_j}(E), \mu_{C_k}(E))$$

记 $p^i = \frac{\omega^i}{\sum_{i=1}^N \omega^i}$ 为相对加权系数, 则:

$$u(t) = \sum_{i=1}^N p^i U^i = \sum_{i=1}^N (p^i (b_1^i E + b_2^i \dot{E} + b_3^i \ddot{E}))$$

$$= (\sum_{i=1}^N p^i b_1^i) E + (\sum_{i=1}^N p^i b_2^i) \dot{E} + (\sum_{i=1}^N p^i b_3^i) \ddot{E}$$

比较 PID 控制规律, 如果定义:

$$k_{fzp} = \sum_{i=1}^N p^i b_1^i, k_{fzi} = \sum_{i=1}^N p^i b_2^i, k_{fzi} = \sum_{i=1}^N p^i b_3^i$$

则上式记为:

$$u(t) = k_{fzp} E + k_{fzi} \dot{E} + k_{fzi} \ddot{E}$$

与 PID 控制具有相同的形式, 可见三维模糊控制在 $(E, \dot{E}, \ddot{E}, u(t))$ 四维空间中是一张通过原点的分片曲面, 如果模糊控制规则只有一条, 实际上就在形式上等同于普通意义上的 PID 控制器。三维模糊控制器可以看成一种输入为 E 的复合 PID 控制器:

$u(t) = F(U^1, U^2, \dots, U^N)$

其中:

$$U^i = b_1^i E + b_2^i \dot{E} + b_3^i \ddot{E}$$

(c) 模糊 PID 控制规律

模糊 PID 控制器的控制规律为:

$$u(t) = k_{fp} e(t) + k_{fd} \frac{d}{dt} e(t) + k_{fi} \int_0^t e(t) dt$$

其中:

$$k_{fp} = F U_1(e(t), \frac{d}{dt} e(t), \int_0^t e(t) dt)$$

$$k_{fd} = F U_2(e(t), \frac{d}{dt} e(t), \int_0^t e(t) dt)$$

$$k_{fi} = F U_3(e(t), \frac{d}{dt} e(t), \int_0^t e(t) dt)$$

即: 其 PID 控制的三个系数 k_{fp}, k_{fd}, k_{fi} 表现为 $e(t), \frac{d}{dt} e(t), \int_0^t e(t) dt$ 的模糊函数, 在 $(e(t), \frac{d}{dt} e(t), \int_0^t e(t) dt, u(t))$ 四维空间中, 模糊 PID 控制器是一张通过原点的分片曲面, 即具有非线性调节规律, 但在 k_{fp}, k_{fd}, k_{fi} 的每一模糊分段中,

具有分段线性调节规律, 在原点附近, 模糊 PID 控制器等同 PID 控制器, 是一张通过原点的超平面, 具有线性调节规律。

比较 PID、三维模糊控制、模糊 PID 的调节规律, PID 控制规律为:

$$u(t) = k_p e(t) + k_d \frac{d}{dt} e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt$$

控制输出根据误差、误差的微分和误差的积分产生作用, 在 $((e(t), \frac{d}{dt} e(t), \int_0^t e(t) dt, u(t)))$ 四维空间中是一张通过原点的超平面, 即具有线性调节规律, 在整个空间内 k_p, k_d, k_i 保持定值; 三维模糊控制在 $(E, \dot{E}, \ddot{E}, u(t))$ 四维空间中都是一张通过原点的分片曲面, 都具有非线性调节规律, 实际上等同于输入为 $\frac{d}{dt} e(t)$ 的变参数 PID 调节器, 随着调节过程的进行, 不断调整 PID 参数, 同时引入 $\frac{d^2}{dt^2} e(t)$, 使得其动态特性和鲁棒性变好, 优于普通 PID 调节器。但三维模糊控制 E, \dot{E}, \ddot{E} 的依然由模糊化的过程获得, 控制输出仍然不能排除去模糊化的处理, 存在模糊控制固有的缺陷, 量化误差的存在使得稳态存在静差, 严重时可能产生颤振现象; 模糊 PID 控制器的控制规律表现为:

$$u(t) = k_{fp} e(t) + k_{fd} \frac{d}{dt} e(t) + k_{fi} \int_0^t e(t) dt$$

其 PID 参数表现为 $e(t), \frac{d}{dt} e(t), \int_0^t e(t) dt$ 的模糊函数, 在 $(e(t), \frac{d}{dt} e(t), \int_0^t e(t) dt, u(t))$ 四维空间中, 模糊 PID 控制器是一张通过原点的分片曲面, 即具有非线性调节规律, 但在 k_{fp}, k_{fd}, k_{fi} 的每一模糊分段中, 具有分段线性调节规律, 在原点附近, 模糊 PID 控制器等同 PID 控制器, 是一张通过原点的超平面, 具有线性调节规律。因此, 模糊 PID 控制器具有模糊控制器动态特性和鲁棒性好的优点, 其动态特性和鲁棒性可以同三维模糊控制器媲美。同时由于模糊 PID 控制器实质上就是变参数的 PID 控制器, 因此具有 PID 控制稳态性能好的优点, 可以克服常规模糊控制器稳态存在静差的缺陷。即模糊 PID 控制器在控制过程的前期阶段具有模糊控制器的优点, 而在控制过程的后期阶段又具有 PID 调节器的优势。

5 结束语

根据本文研究, 可以得出: 模糊 PID 控制器在 $(e(t), \frac{d}{dt} e(t), \int_0^t e(t) dt, u(t))$ 四维空间中是一张通过原点的分片曲面, 即具有非线性调节规律; 普通 PID 调节器在 $(e(t), \frac{d}{dt} e(t), \int_0^t e(t) dt, u(t))$ 四维空间中是一张通过原点的超平面, 即具有线性调节规律; 在原点附近, 模糊 PID 控制器等同 PID 控制器, 因此, 模糊 PID 控制器具有比 PID 控制器更好的动态特性, 而稳态特性等

同 PID 控制器。同时,可以得出:模糊 PID 控制器在 $(e(t), \frac{d}{dt}e(t), \int_0^t e(t) dt, u(t))$ 四维空间中是一张通过原点的分片曲面,三维模糊控制器在 $(E, E, E, u(t))$ 四维空间中都是一张通过原点的分片曲面,都具有非线性调节规律。但模糊 PID 控制器实质上仍然是 PID 控制,在原点附近具有 PID 控制的线性调节规律。而三维模糊控制器实质上仍然是模糊控制器,具有模糊控制器固有的缺陷,即稳态存在静差。因此,模糊 PID 控制器具有可以三维模糊控制器的控制性能比美的动态特性,而稳态性能优于三维模糊控制器。我们认为:模糊 PID 控制器在控制过程的前期阶段具有模糊控制器的优点,而在控制过程的后期阶段又具有 PID 调节器的优势,因此是一种性能优良的控制器的。

参考文献

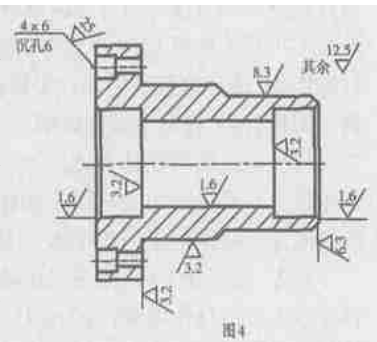
1 Vance J. VanDoren. PID :控制领域的常青树. *Control Engineering China*, 2004, 2.

2 刘金琨. 先进 PID 控制及 $MATLAB$ 仿真. 电子工业出版社, 北京, 2003.
3 The MathWorks. *Simulink Model-based and System-based Design* (Using Simulink Version 5). www.mathworks.com
4 The MathWorks. *Fuzzy Logic Toolbox For Use with MATLAB* (User's Guide Version 2). www.mathworks.com
5 吴望名等. 应用模糊集方法. 北京师范大学出版社, 1985 年.
6 张思勤等. 模糊控制与 PID 控制方法的比较. 上海交通大学学报, 1999, 4.
7 李洪兴. 模糊控制器与 PID 调节器的关系. 技术科学, 1999, 2.
8 李洪兴. 模糊控制的插值机理. 中国科学, E 辑, 1998, 28(3): 259~267.
9 李娟. 三维模糊控制器的分析. 工业仪表与自动化装置, 2002, 1.
10 常满波等. 基于 $MATLAB$ 的模糊 PID 控制器设计与仿真研究. 机电传动, 2002, 5.
11 刘素芹等. PID 与模糊控制算法的比较及其改进. 系统工程, 2003, 1.
12 霍志宏等. PID 参数的模糊整定. 电站系统工程, 2002, 2.
13 孙宗毅等. 一种改进的模糊 PID 控制器及其仿真. 计算机仿真, 2003, 2.

(上接第 42 页)

上述用 $Block$ 命令定义的块, 只能在当前图形文件中使用。要想该块可以被引用至其他图形中, 还需要把该块以文件的形式保存起来(即写块)。

我们新建一个名为“粗糙度标注”的文件夹, 将文件以 Ra 为主名存入该文件夹中。确定后, 输入的文件名一定要与块名一致, 否则不会成功建立块文件。到此, 就完成了用一个去除材料方法获得表面的粗糙度符号的创建,



其它粗糙度符号可按上述方法分别创建。为了以后方便调用, 可将这些符号块文件设置在 $AutoCAD$ 的搜索路径之中。具体设置过程如下: 点击 $Tools \ Preferences$, 在 $Preferences$ 对话框 $File$ 属性页下的 $Support file search path$ 后点击 Add 按钮, 然后选择 $Browse$ 按钮, 通过浏览选择刚刚建立好的粗糙度标注文件夹, 这样粗糙度标注文件夹就设在 $AutoCAD$ 的搜索路径之中了。

3.4 属性块的标注实例

如图 4 所示零件图, 在需要标注表面粗糙度的位置, 插入已定义的属性块。其过程如下:

选择下拉菜单 $Insert \ Block$, 弹出插入对话框, 在对话框中选择 $Browse$ 按钮, 拾取欲插入的块(如 Ra), 插入点、缩放

比例、旋转均根据需要确定是否在屏幕上指定。

命令: $-insert$ (选择指定块 Ra)

指定插入点或 [比例(S)/X/Y/Z/旋转(R)/预览比例(PS)/PX/PY/PZ/预览旋转(PR)]: $-nea$ 到(零件表面指定点)

输入 X 比例因子, 指定对角点, 或 [角点(C)/XYZ] <1>: \downarrow

输入 Y 比例因子或 <使用 X 比例因子>: \downarrow

指定旋转角度 <0>: nea 到(零件表面指定点)

输入属性值

Ra 的值是: 25 \downarrow

4 结束语

$Autocad$ 提供了强大的绘图功能, 但在具体领域的应用中, 我们必须根据本专业的特点采用适合本专业的方法和技巧, 在这里我们通过创建定义属性标签、创建块等一系列的操作, 建立了表面粗糙度属性块, 实现了符合国家标准要求的多种形式表面粗糙度快速标注方法。这种操作技巧对于工程制图中的标题栏、常用件和标准件等同样适用, 既节省了绘图时间, 又提高了图面质量。

参考文献

1 肖军. $AutoCAD2002$ 看图速成[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
2 大连理工大学工程画教研室. 机械制图. 北京: 高等教育出版社, 2001
3 刘虹. 略谈 $AutoCAD$ 中的块的使用[J]. 安徽科技, 2002, (4): 45.