

Fuzzy 前馈补偿及应用*

罗 安 熊秋思

(湖南大学电气工程系, 长沙)

摘要 本文提出一种由 Fuzzy 反馈、Fuzzy 前馈补偿构成的 Fuzzy 控制系统, 证明了它的存在性. 提出实现该 Fuzzy 控制方法的计算机算法, 并将此算法运用于数学模型未知和频繁干扰的石英器皿过程控制系统中, 取得令人满意的控制效果.

关键词: Fuzzy 前馈补偿; Fuzzy 反馈; Fuzzy 控制系统; 透烧时间

1. 引 言

1965 年美国著名控制专家 L. A. Zadeh 用 Fuzzy 集合描述模糊事物的数学模型, 1975 年 E. H. Mamdani 在此基础上具体设计出一种 Fuzzy 控制器, 在实际应用中, 证实有良好的控制效果. 随着微计算机的发展, Fuzzy 控制器越来越为人们重视, 在过程控制领域中取得了越来越广泛的应用. Fuzzy 控制器的优点是能较好地控制那些时变的、非线性的和复杂的被控系统. 但是应该指出, Mamdani 和一般的 Fuzzy 控制器基本上都属于反馈控制, 存在一些不足之处. 例如, 当被控对象频繁出现强干扰和系统的输出不允许有过大的超调量时, Mamdani 的 Fuzzy 控制器就往往不能达到令人满意的结果. 针对这种情况, 本文提出了一种 Fuzzy 反馈—前馈补偿控制系统. 此 Fuzzy 控制器已用于未知数学模型和干扰频繁的石英器皿加工过程控制系统中, 实际应用表明, 该 Fuzzy 控制器不但具有 Fuzzy 控制器的所有优点, 而且还明显地提高了 Fuzzy 控制的抗扰动能力和改善其输出特性.

2. Fuzzy 前馈补偿

Fuzzy 前馈补偿的概念和定义在目前国内外文献中还未正式提及讨论过, 据此我们给出有关 Fuzzy 前馈补偿的几个定义:

定义 1 Fuzzy 控制器的工作周期 T : 本次 Fuzzy 控制器的输出到下次 Fuzzy 控制器输出所需的时间, 或者决策 Fuzzy 控制器输出所需的时间 T_1 和 Fuzzy 控制器输出作用于对象的时间 T_2 之和. 即 $T = T_1 + T_2$.

定义 2 干扰 1: 干扰信号的作用时间在 T_1 时间间隔内.

定义 3 干扰 2: 干扰信号的作用时间在 T_2 时间间隔内.

根据以上对于干扰信号的定义, 以及由文献[1]、[2]提出的克服干扰 1 和干扰 2 的方法, 可画出 Fuzzy 反馈—前馈控制器的方框图如图 2 所示.

* 此文的应用成果获电子工业部 1987 年度科学技术进步二等奖, 初稿曾在 1986 年 11 月中国电子技术学会计算机应用学术会议上宣读.

本文于 1988 年 7 月 19 日收到. 1990 年 5 月 14 日收到修改稿.

对于 Fuzzy 补偿干扰 1, 我们推出了如下的定理. 设: ① $F(t), f_v(t, V)$ 是具有相同延时特性的函数, $F(t)$ 在 $[0, T_1+T_2]$ 可积, $F(t)$ 在 $[0, T_1+T_2]$ 连续; ②被控系统在各个工作周期之间的响应无传递性; ③ V 在整个工作周期不变, 且 $T_2 \gg T_1$. 则存在 $f_1(t_1, V) = A = \text{常数}$, 能消除干扰 V 在工作周期 (T_1+T_2) 产生的总干扰作用.

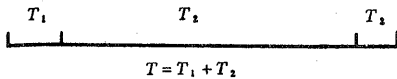


图 1 Fuzzy 控制器工作周期定义图

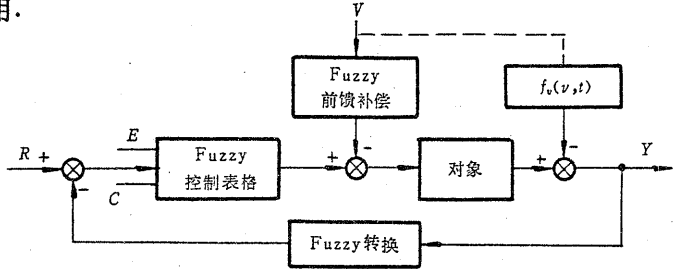


图 2 Fuzzy 反馈-前馈控制器框图

证明要消除干扰 V 在工作周期产生的总干扰作用, 只要使:

$$\int_0^{T_1+T_2} f_v(V, t) dt = \int_0^{T_1+T_2} \left[\int_0^t F(\tau) f_1(t_1 - \tau, V) d\tau \right] dt.$$

令 $\int_0^{T_1+T_2} f_v(V, t) dt = Q,$

设 $f_1(t_1, V) = A,$

则 $\int_0^{T_1+T_2} \left[\int_0^t F(\tau) A d\tau \right] dt = \int_0^{T_1+T_2} A G(t) dt \quad (\text{令 } G(t) = \int_0^t F(\tau) d\tau).$

根据积分中值定理:

$$\int_0^{T_1+T_2} A G(t) dt = A G(\xi) (T_1 + T_2) \quad 0 \leq \xi \leq T_1 + T_2.$$

因此 $A = \frac{Q}{G(\xi)(T_1 + T_2)}.$

上述定理表明, 在假定成立的条件下 Fuzzy 前馈补偿输出一与干扰 V 相对应的常数 A , 就可抵消这一干扰在 Fuzzy 工作周期中产生的总影响, (即 $\int_0^{T_1+T_2} f_v(v, t) dt$). 但是, 在具体的 Fuzzy 前馈补偿中, 由于 $f_v(t, V), F(t)$ 一般是未知的, 与干扰 V 相对应的 A 值往往是通过根据人们长期的操作经验, 总结和归纳成一个与干扰 V 相对应的 Fuzzy 前馈补偿表, 然后, 在现场调试中不断地修改这个决策表中的参数, 使它逐步达到较好的补偿效果.

上述定理中, 条件 $T_2 \gg T_1$ 的目的是使干扰 V 在 T_1 时间内发生变化时, 对前次 Fuzzy 工作周期的影响可以忽略, 只对下次工作周期产生作用.

在已经得出较理想的 Fuzzy 前馈补偿表之后, 对于在 T_2 时间内的 Fuzzy 干扰信号 V_2 可采用下述 Fuzzy 前馈补偿规则.

Fuzzy 前馈补偿规则: 将 T_2 时间分成 K 等分, 在 T_2 时间内, 每隔 $\Delta T = \frac{T_2}{K}$ 对干扰信号 V 进行一次采样. 假设 V 在 $\Delta T i (i=1 \cdots n)$ 时间间隔内对输出产生的影响相同. 若在 T_1 时间内干扰 V 的值为 V_1 , 由 Fuzzy 补偿表决定的输出为 u_1 , 在 T_2 时间内 ΔT 时间中的 V 值变为 V_2 , 若由 Fuzzy 补偿表决定的输出为 u_2 , 我们应使 Fuzzy 前馈补偿规则在 ΔT 时间内输出为 $\frac{-u_1+u_2}{K}$, 显然, 若在 T_2 时间内, 假若 $V \equiv V_2$, 则前馈补偿规则输出为 $u_1 - u_2$, 所以 Fuzzy 前馈补偿器的实际输出为 $-u_1 - (-u_1 + u_2) = -u_2$, 从而, 消除了 T_2 时间内由于 V 的变动对输出产生的影响.

根据以上讨论得出 Fuzzy 前馈补偿主要由 Fuzzy 前馈补偿表和前馈补偿规则算法组成,

用软件实现的框图如图3所示。

图3中各方块的功能和作用如下：

(1)软件滤波：主要的工作是对计算机采集的干扰信号进行数字滤波，常用的方法有：

1)平均滤波法：在计算机采样时，连续采样 N 次，然后，求采

样量的平均值，即 $V = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N V_j$ 。

2)去大去小求平均值：在采样时，连续采样 N 次，并进行排

序，使得 $V_1 \leq V_2 \leq V_3 \dots \leq V_{n-1} \leq V_n$ ，求 $V = \frac{1}{N-2} \cdot \sum_{j=2}^{n-1} V_j$ 。

3)中位值法：在采样时，连续采样三次，取中间值作为实际采样值。

(2)Fuzzy 前馈补偿表：它是根据干扰信号对输出产生的作用，以及人们在操作实践中如何补偿干扰信号的经验而总结出来的 Fuzzy 控制算表，这种算表在调试过程中需要根据实际情况反复进行修改。

(3)逻辑判断：首先存贮在 T_1 时刻采样得到的干扰信号，记为 V_1 ，然后，在 T_2 时间内每隔 $\Delta T = T_2/K$ 检测干扰信号，记为 V_2 ，判断 $|V_2 - V_1| \leq \delta$ ， δ 为设计者确定的常数，我们认为 δ 应等于 Fuzzy 前馈补偿表中干扰信号的分档间隔。若等式成立，则 Fuzzy 前馈补偿输出 $\frac{-u_1}{K}$ ，反之则输出 $\frac{-u_1}{K} - \frac{-u_1 + u_2}{K} = \frac{-u_2}{K}$ ，其中 u_1 是 V_1 对应的 Fuzzy 补偿表的输出值， u_2 是 V_2 对应的 Fuzzy 补偿表的输出值。

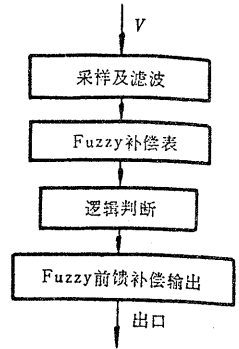


图3 Fuzzy 反馈补偿软件方框图

3. Fuzzy 前馈补偿在石英器皿过程控制中的应用

下面我们以石英器皿过程中透烧延时^[1,2]的 Fuzzy 前馈补偿为例，进一步说明本文提出的 Fuzzy 前馈补偿在实际中的具体应用。图4示出了石英器皿过程控制中 Fuzzy 反馈—前馈补偿控制的方框图，图中 Y 和 L 形成 Fuzzy 反馈控制，获得在正常情况下的透烧延时时间，Fuzzy 前馈补偿对氢气、氧气压力变化补偿透烧延时时间。由于 Fuzzy 反馈、Fuzzy 转换控制在文献 [1]、[2] 中已有详细的研究，在此，我们只着重讨论透烧时间 Fuzzy 前馈控制算法。

1)软件滤波：采用去大去小求平均值算法，设采样次数 $N=10$ 则氢气压力 $P_H = \frac{1}{8} \sum_{j=2}^9 P_{Hj}$ ，

氧气压力 $P_O = \frac{1}{8} \sum_{j=2}^9 P_{Oj}$ 。

2)Fuzzy 前馈补偿表：根据 P_H 、 P_O 压力对透烧时间影响的先验知识和现场调试过程中的经验，决定与氢气、氧气压力相对应的透烧时间。

3)逻辑判断：在 T_1 时间内将采样的 P_H 、 P_O 值存入计算机内存中，记为 P_{H1} 、 P_{O1} 并把与 P_{H1} 、 P_{O1} 相对应的透烧时间（记为 u_1 ）也存入内存中，在 T_2 时间内，每隔 $\Delta T = T/K$ 采样 P_H 、 P_O 值，滤波，记为 P_{H2} 、 P_{O2} ，计算 $P_H = P_{H2} - P_{H1}$ ， $P_O = P_{O2} - P_{O1}$ ，判断是否 $|P_H| < \delta_H = 0.1$ ， $|P_O| < \delta_O = 0.2$ （ δ_H 取 0.1， δ_O 取 0.2 是根据 P_H 、 P_O 的分档选取的）。例如，在 T_1 时间内， $P_H = 0.8\text{kg}$ ， $P_O = 2\text{kg}$ ，相对应的透烧延时为 28 秒，而在 T_2 时间内，氢气、氧气压力发生了变化，如 $P_H = 1\text{kg}$ 、 $P_O = 2.5\text{kg}$ ，它们

相对应的透烧延时时间为9秒,则 Fuzzy 前馈补偿输出为 $28 - [(9 - 28)/K]K = 9$ 秒,透烧延时时间 $u = u_1 + 9$ (秒). 而若不加 Fuzzy 前馈动态补偿时, $u = u_1 + 28$ (秒),因此,增加 Fuzzy 前馈补偿能较好地克服由于 P_H 、 P_O 在 T_2 时间内的波动对石英管加工质量的影响。

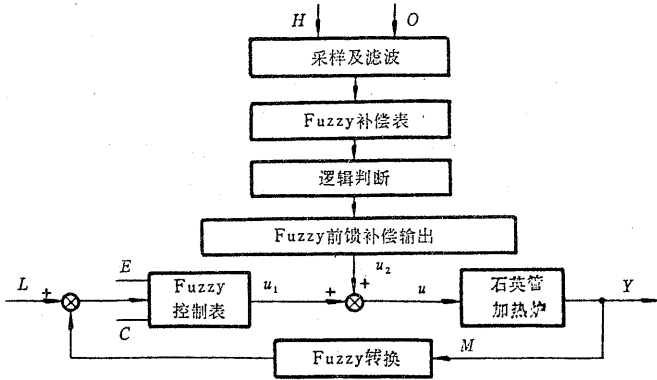


图 4 石英器皿加工过程 Fuzzy 反馈—前馈控制框图

L : 石英玻璃管每次加工伸长量给定值; Y : 石英管伸长到位信号; M : 使石英管伸长到位的充气次数; u_1 : 由 L 、 Y 、 M 得出 E 、 C 后,查 Fuzzy 控制表得出透烧时间; u_2 : 根据 P_H 、 P_O 压力,由 Fuzzy 前馈补偿得出透烧时间

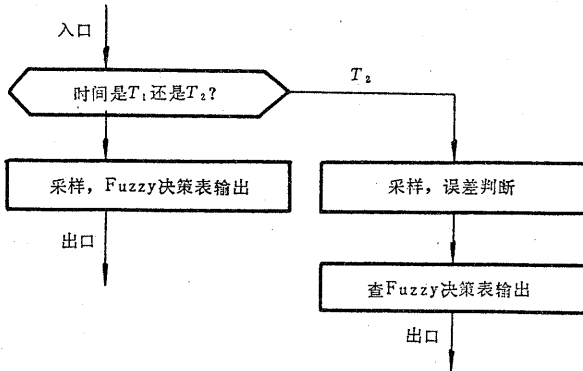


图 5 透烧时间 Fuzzy 前馈补偿程序框图

图5示出了石英器皿过程控制中透烧时间 Fuzzy 前馈补偿的程序框图。

4. 结 论

本文提出了一种新型的 Fuzzy 前馈补偿控制系统,并用理论证明它的存在性,提出实现 Fuzzy 前馈补偿控制的控制算法. 此控制算法已在以微机为主体的石英器皿过程控制系统的应用中,对未知数学模型的透烧时间控制取得了满意的控制效果. 现场运行情况表明,该 Fuzzy 前馈补偿大大地提高了 Fuzzy 控制的抗扰动能力,其成果已于1986年11月通过湖南省电子局组织的技术鉴定,获电子工业部1987年度科技进步二等奖。

参 考 文 献

[1] 熊秋思、罗安、杨杰、刘一江,石英器皿工艺过程控制系统,中国自动化学会电气自动化专业委员会论文集,(1986).

- [2] 罗安、熊秋思、杨杰、刘一江,以微机为主体的气炼机控制系统,中国计算机、自动化、电子学会计算机应用学组学术论文集,(1986).
- [3] 陆道政、李新宝,自动控制原理及设计,上海科学技术出版社,(1987).

Fuzzy Feedforward Compensation and Its Application

Lou An, Xiong Qiusi

(Department of Electrical Engineering, Hunan University, Changsha)

Abstract: A fuzzy control system made up of fuzzy feedback and fuzzy feedforward compensation is presented and its existence is proved. Fuzzy control algorithm realized by microcomputer is also presented, and this algorithm has obtained satisfactory control results in the process control system of quartz vessel with unknown mathematical model and frequent interference.

Key words: fuzzy feedforward compensation; fuzzy feedback; fuzzy control system; transparent burning time

1990 年全国控制理论及其应用年会在杭州举行

1990 年全国控制理论及其应用年会于 11 月 10 日至 15 日在杭州浙江大学举行。来自全国各科研单位、高等院校的 150 多名代表出席了这次会议。这次年会由中国自动化学会常务理事、控制理论专业委员会主任陈翰馥研究员主持。

会议期间,北京航空航天大学高为炳教授、北京大学黄琳教授、中国科学院系统科学研究所韩京清研究员、程代展副研究员、清华大学郑大钟副教授代表其研究小组分别就非线性控制系统,鲁棒控制及离散事件系统做了专题性报告。报告内容材料翔实,分析精辟,使与会者得到启迪,印象深刻。会议分 21 个分组共宣读了论文 170 多篇。其内容涉及控制理论及其应用的各个领域。本次年会有如下两个特点:

第一,前沿性研究领域普遍受到关注。

目前控制理论研究的世界趋势主要集中在适应性控制,离散事件系统,鲁棒控制和非线性控制系统等方面。这些前沿性研究领域已受到我国控制理论研究者的普遍重视,表现在:除在会议上分别宣读了上述四个领域的数量相当的论文外,还应与会者的强烈要求于业余时间(晚上)分别组织了鲁棒控制、非线性控制及适应性控制的圆桌讨论会。参加者踊跃,与会者畅谈了对今后发展看法和意见。既生动活泼,又有启发性。可以预料,这些活动必将推动我国在这些前沿性领域中的研究工作健康发展。

第二,青年人已成为年会的基本力量。

本次年会的另一特点是年轻的博士、硕士研究生,已成为会议的骨干力量。他们约占代表总数的 60%。有这样一大批年青人处在科研第一线,从事着前沿性领域中的科学研究,这是我国控制理论研究兴旺发达的标志,是中国的希望所在。

会议期间,召开了两次控制理论专业委员会会议。对本届年会及今后的工作进行了认真又热烈的讨论。一致认为,本届年会的成功所在,是抓准了控制理论的研究方向,组织了有代表性的大会综述报告。对我国控制理论的研究起了导向作用。同时还建议,在下届年会时,除继续组织好大会综述报告外,还应增加一些小组会上的专题综述报告,以推动我国控制理论研究的更深入发展。

据悉,控制理论专业委员会已决定下届年会,将于 1991 年 11 月中旬在山东威海(或烟台)召开。目前已发出征文通知。

(中国科学院系统科学研究所 王朝珠)