

文章编号:1674-8190(2015)02-245-07

# 变结构控制在基于脉冲比例阀的燃油调节系统中的应用

郝立中<sup>1,2</sup>

(1. 西安工程大学 计算机科学学院, 西安 710048)

(2. 中航工业西安航空动力控制公司 技术中心, 西安 710077)

**摘要:** 针对航空发动机燃油控制系统中二阶非常执行机构通常出现设计困难的问题, 介绍一种变结构控制方法, 将二阶非常执行机构变成确定的一阶惯性环节, 该方法既充分利用其优点“不变性”又可以规避其突出缺点“抖振”, 特别适用于驱动脉冲比例调节阀; 同时提出脉冲比例阀的变结构调节中遇到的实际问题(例如微分的精度问题)的解决办法, 以及影响该方法可行性的若干必要条件。结果表明: 符合条件时变结构控制在基于脉冲比例阀的燃油调节系统中是可行的。

**关键词:** 变结构控制; 非常系统; 脉冲比例阀; 高速开关阀; 位置伺服

**中图分类号:** TP215; TP273.2

**文献标识码:** A

## Application of Variable-structure Control in Fuel Control System Based on Pulse Proportional Valve

Hao Lizhong<sup>1,2</sup>

(1. Computer Science School of Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

(2. Technology Center, AVIC Xi'an Aero-Engine Controls Corporation, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Considering the difficulties, that the design of fuel control system of aero engine may meet in face of a second-order unsteady actuator, the variable-structure control method, which makes the second-order unsteady actuator into an assured first-order inertial element, is introduced. This method is especially suitable to drive a pulse proportional valve, for it makes full use of its advantage, invariance, while having dodged its inherent disadvantage, chattering. Some key technologies to solve specific problems to implement variable structure control on pulse proportional valve, such as precision problem of differential, and some necessary conditions in relation to the feasibility of this method are also specified. The result shows that variable-structure control in fuel control system based on pulse proportional valve is feasible when it is satisfied with conditions.

**Key words:** variable-structure control; unsteady system; pulse proportional valve; high speed switch valve; position servo

## 0 引言

在航空发动机燃油控制系统的设计中, 获取发动机数学模型后还必须获得执行机构数学模型。

如果采用传统方法控制燃油系统<sup>[1-2]</sup>, 通常希望执行机构是一阶或二阶定常系统。如果执行机构为二阶非常系统, 或者存在不确定的复杂因素, 传统方法控制燃油系统就有一定困难。

如果采用脉冲比例阀控制执行机构, 可通过滑动模态变结构控制(简称变结构控制)<sup>[3-4]</sup>方法来解决可控制问题。

变结构控制是近半个多世纪发展的一种控制

方法。对于变结构控制系统,若外部干扰、参数变化以及建模误差等不确定因素满足“匹配条件”,则滑模面上的运动对上述不确定因素具有完全的不变性。B. Drazenovic<sup>[5]</sup>最早对这种不变性系统进行了研究,O. M. E. EI-Ghezawi 等<sup>[6]</sup>给出了滑模不变性的条件。它因其突出的优点“不变性”(可以克服不确定的复杂因素的影响)而引起重视,但是存在的突出缺点“抖振”,又影响了在某些领域的应用。变结构控制适合于驱动脉冲比例调节阀,因为此时“抖振”不是主要问题。

脉冲比例调节阀的驱动是“二值”的,因此传统的所谓“连续”控制(例如 PID 方法),只能以脉宽调制(PWM)占空比的连续变化实现。“连续”控制只能做到远大于 PWM 周期的“宏观时间”层次平均值的“连续”,而“微观时间”层次则是不连续的。抖振肯定存在,通过对象的惯性来滤掉其作用效果。频率越高,结果抖动幅度就越小。因此,变结构控制方法的抖振,只要其频率不低于传统方法所用的 PWM 频率,相对而言就不是缺点。

本文首先介绍调节阀的工作原理,其次介绍调节阀模型,再次分析变结构控制原理和影响收敛的因素,最后提出具体的实现方案。

## 1 调节阀工作原理

某航空发动机的微机数控装置整体控制如图 1 所示,本文所述是其内层控制——对供油装置脉冲比例调节阀的驱动方法。

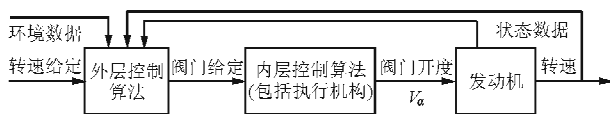


图 1 整体控制示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the whole control system

执行机构脉冲比例调节阀是一种基于高速开关阀的位置伺服系统。它通过油压伺服活塞的运动来改变主燃油阀门开度的大小,所谓控制阀门开度就是控制该调节活塞的位置。而活塞两面所受的油压力由一个高速开关阀控制,电磁铁通电/断电驱动高速开关阀改变伺服油路,使活塞受力反转。

下文研究由计算机控制高速开关阀电磁铁通

电/断电的算法。

## 2 调节阀模型

假定电脑输出 1 信号时驱动力为使阀门开度增大的方向,输出 0 信号时驱动力相反。

采用脉宽调制信号驱动电磁铁,即可由信号的占空比决定活塞的平均受力,从而控制阀门的动作。如果电磁铁通电断电时间伺服油对伺服活塞相反作用力对称,则占空比为 50% 时活塞达到动态平衡。

假如活塞有较大的线性阻尼,且惯性较小以致于时间常数可忽略,则粗略将调节阀看作一阶线性模型,其宏观运动速度与实际占空比和平衡占空比之差成正比。但对调节阀的实际辨识结果表明,其阻尼不大,活塞惯性(包括连动机构惯性)不可忽略。因此调节阀不可看作一阶线性,其模型不能低于二阶。对一阶模型,动态平衡时宏观静止;二阶以上的模型,动态平衡时宏观可以并不静止。

采用带有纯延时的二阶模型拟合时,每种假设模型都存在相当的拟合差,表明真实调节阀存在比此类模型更加复杂的因素。因此,将其简化为二阶模型时,不可忽视它所存在的不确定因素,可以看作是在二阶模型基础上添加了一定的未知误差,或者看作非定常。

在这里,凡需要精确知道调节阀性能参数的简单控制方法,显然都难以实现。为此,采用了具有不变性特点的变结构控制方法。

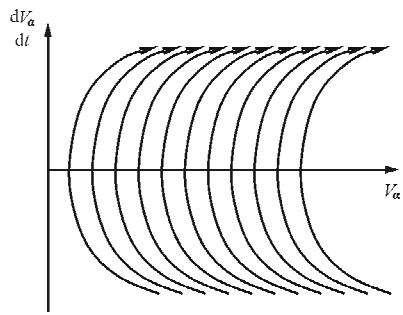
## 3 调节阀的变结构控制原理

其原理如下<sup>[7]</sup>:

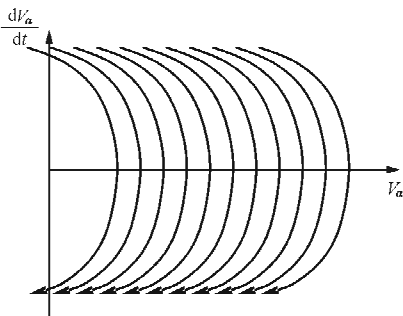
设油门开度为  $V_a$ 。对于二阶模型,可以用  $\frac{dV_a}{dt}$  (纵坐标)和  $V_a$  (横坐标)状态空间中的轨迹来描述其状态变化。

设控制信号为 1/0 时,对象受正方向/负方向的固定驱动力。受正方向的固定驱动力时,状态轨线是一条向右弯曲的曲线;受负方向的固定驱动力时,状态轨线是一条向左弯曲的曲线。

不同初始状态的轨线是一曲线族(如图 2 所示),由上述曲线水平平移而成。



(a) 受正方向驱动力



(b) 受负方向驱动力

图 2 受固定驱动力的状态轨线

Fig. 2 Status trajectories with constant force

如果对象是纯二阶,即无摩擦的纯惯性质量对象,则此曲线的形状是以横轴为对称的抛物线。驱动力越大或惯性质量越小(即加速度越大),曲线开口越大。如果不是纯惯性,则曲线形状有所不同,但趋势相同。

假设调节给定值为点  $G$ ,选取一条经过给定点斜率为负的直线  $\beta$ ,确定滑模变结构控制算法:当状态点在直线  $\beta$  左下方时控制取信号 1,在其右上方时控制信号取 0。

滑模变结构控制的状态轨线如图 3 所示。

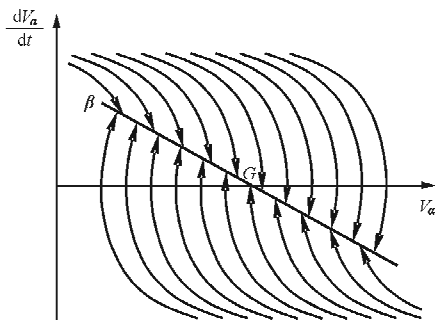


图 3 滑模变结构控制的状态轨线

Fig. 3 Status trajectories of sliding mode variable-structure control

当对象状态点处于直线  $\beta$  左下方时,取图 2(a)所示的状态轨线;当对象状态点处于直线  $\beta$  右上方时,取图 2(b)所示的状态轨线;直线  $\beta$  是控制切换线。

如果阀门的初始状态在点  $A$ ,则其运动时的状态轨迹如图 4 所示。当状态点穿越直线  $\beta$  时,控制信号在 1 和 0 之间切换,其轨线交替取图 2(a)和图 2(b)所示的轨线,使其沿着直线  $\beta$  滑动趋向于给定点  $G$ 。

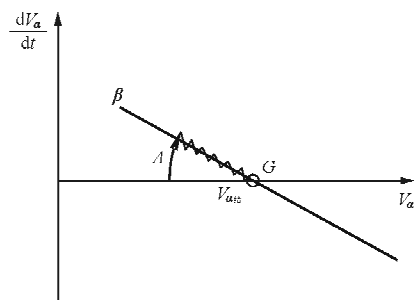


图 4 起点为  $A$  的运动状态轨线

Fig. 4 Status trajectory from  $A$  to  $G$

设  $T_f$  是直线  $\beta$  斜率的负倒数,则直线  $\beta$  的方程为

$$T_f \times \frac{dV_a}{dt} + V_a - V_{a\text{给}} = 0 \quad (1)$$

将方程(1)的左边称作切换函数,即控制信号按切换函数的正负号来切换。

假设阀门的延时量无穷小,则滑动过程中状态点以无穷高频率和无穷小幅度反复穿越直线  $\beta$  两侧,滑到给定点后环绕给定点沿无穷小环振荡。

因实际延时,滑动时穿越直线  $\beta$  颤动(抖振)的频率不是无穷高,幅度也不是无穷小。抖振时电脑的输出形成脉宽调制信号,此信号的频率主要取决于延时量。

状态点近似地在直线  $\beta$  上,故运动过程中  $\frac{dV_a}{dt}$  和  $V_a$  之间近似地满足线性关系,该关系可以通过方程(1)来表示,是一阶微分方程。

微分方程(1)的解写为拉氏变换形式,即

$$V_a = V_{a\text{给}} \times \frac{1}{T_f \times s + 1} \quad (2)$$

式中:  $s$  为拉氏变换象函数中的参数。

式(2)是一阶惯性环节,时间常数  $T_f$  已知(因

直线  $\beta$  是设计者自定的), 因此构成的小闭环具有接近于理想的外特性。

如果不是给定油门开度, 而是给定阀门开度的速率, 则只需要在此前增加一个时间常数为  $T_f$  的比例积分环节即可。

### 4 影响收敛性的因素

(1) 状态点是否可以尽量保持在  $\beta$  线附近, 而不是远离  $\beta$  线(假设控制延时很小, 单因为延时的因素不会远离  $\beta$  线)。

选取经过给定点  $G$  的状态轨线, 上半平面取控制信号为 0 时的状态轨线, 下半平面取控制信号为 1 时的状态轨线, 拼成曲线  $\gamma$ , 如图 5 所示。

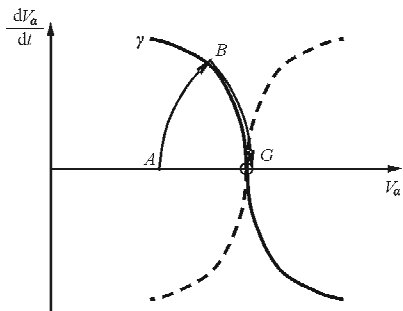


图 5 曲线  $\gamma$  及时间最优控制的状态轨线  
Fig. 5 Curve  $\gamma$  and the status trajectory of time optimal control

假如控制规则为: 在曲线  $\gamma$  左下输出 1, 在曲线  $\gamma$  右上输出 0, 可以实现时间最短控制<sup>[8]</sup>(图中轨迹  $A \rightarrow B \rightarrow G$ )。如果再晚切换控制信号(即图中  $B$  点再向右), 就会出现宏观超调。然而, 时间最优控制要求精确已知曲线  $\gamma$ , 不适合本文讨论的存在不确定因素导致曲线  $\gamma$  形状也不确定的情况。

而本文方法采用  $\beta$  线作为控制信号切换界限, 实际工作区域上半平面应在曲线  $\gamma$  左下方, 下半平面应在曲线  $\gamma$  右上方, 才能得到上文描述的性能, 因此  $\beta$  线不宜过陡, 否则性能略有差别。

$\beta$  线有两个临界点, 一个是与曲线  $\gamma$  的交点  $V$ , 另一个是曲线  $\gamma$  水平平移后(下文简称为“平行”)与  $\beta$  线的切点  $W$ 。

状态高于点  $W$  时, 穿越  $\beta$  线后不能立即回到线上, 而是沿一条和  $\gamma$ “平行”的轨迹运动一段才回到  $\beta$  线, 如图 6 所示。

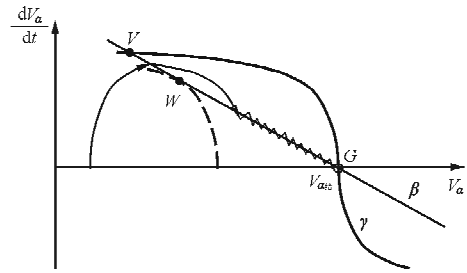


图 6 状态高于点  $W$  的情况  
Fig. 6 The state higher than  $W$

若状态穿越  $\beta$  线时高于点  $V$ , 则同样先沿一条和曲线  $\gamma$ “平行”的轨迹运动一段才回到  $\beta$  线, 但是此时已经在曲线  $\gamma$  之右, 故回到  $\beta$  线时已在下半平面, 即出现一次宏观超调, 如图 7 所示。

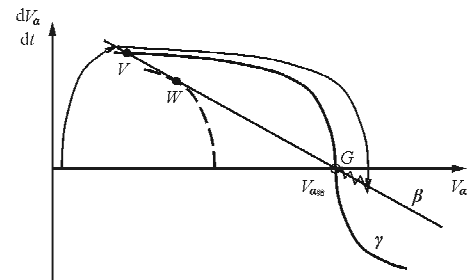


图 7 状态高于点  $V$  的情况  
Fig. 7 The state higher than  $V$

从图 6~图 7 可以看出: 上述情况只有在大偏差时才会出现, 并且状态以尽可能快的方式返回  $\beta$  线。

如果给定值连续变化(变化率不超出一定限度), 则通常不会出现脱离  $\beta$  线的情况。

给定值由点  $A$  均匀连续变化到点  $G$  的情况, 如图 8 所示。给定值连续变化相当于  $\beta$  线连续平移, 忽略其状态点颤动幅度, 其轨迹与理想的一阶惯性相同。

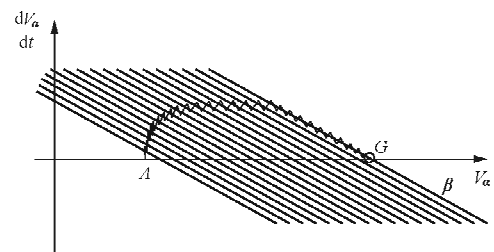


图 8 给定值连续变化的情况  
Fig. 8 The condition of given value changing evenly

图 8 中水平颤动段的高度相当于  $\frac{dV_a}{dt}$  值, 等于给定值的变动速率。故给定值变动越快, 此轨迹越高, 甚至可能高于上文所说的临界点。

在图 6 和图 7 中, 状态穿越  $\beta$  线后之所以脱离  $\beta$  线, 是因为  $\frac{dV_a}{dt}$  值高, 状态点以较高速度右移。但是图 8 中  $\beta$  线本身以此速度右移, 因此不存在状态脱离  $\beta$  线。

如果  $\beta$  线移到过点  $G$  时突然停止不前, 假如此时状态点高于临界, 仍会出现与图 7 和图 8 后段一样的轨迹。但是如果不是高速时突然停止, 而是先连续减速, 当状态不高于临界时再停止, 也不存在脱离  $\beta$  线的情况。

综上所述, 要保证较好的特性, 阀门开度给定值尽可能不要有过大的突变。

状态点远离  $\beta$  线的情况只出现在较大偏差时, 因此通常并不影响在给定点附近的宏观传递函数, 不改变其稳定性。

(2) 状态点是否可以较快地收敛到给定点附近, 而不出现增幅的自激振荡。

虽然在第(1)部分允许状态点暂时超过临界, 但接近给定点处的  $\beta$  线仍必须满足“上半平面在曲线  $\gamma$  左下方, 下半平面在曲线  $\gamma$  右上方”的条件。若上述条件不满足, 例如  $\beta$  线过于陡峭, 上述两个临界点就会变低, 再加上延时因素的影响, 则可能达不到上述结果, 出现超调振荡。

影响该条件的三个因素为: 一是延时量, 二是目标时间常数  $T_f$  的值(极端情况下, 若令  $T_f=0$ , 则  $\beta$  线成为过点  $G$  的竖直线), 三是阻尼(阻尼不同, 则曲线  $\gamma$  的形状不同)。

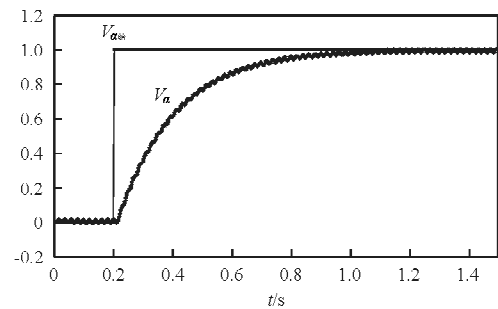
极端情况: 设无阻尼无延时且  $T_f=0$ , 结果是等幅振荡, 轨迹为环绕点  $G$  的环(由两半抛物线组成), 振幅取决于初始值, 这种振荡的特点是: 振幅越大, 频率越低。使其趋于减幅的因素有两个: ①  $T_f$  增大; ② 阻尼增大。使其趋于增幅的因素亦有两个: ① 延时量增大; ② 阻尼出现负值。

如果阻尼较大, 可能在  $T_f=0$  时仍收敛(减幅振荡)。而取  $T_f=0$  可以简化下文的实现方案(省去微分电路), 故具有一定意义。曾采用  $T_f=0$  的简化方案反复进行试验, 结果表明, 若能采取机械

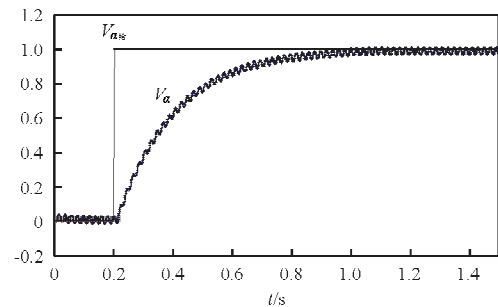
措施保证阻尼, 则简化方案也是实用的。

## 5 仿真试验

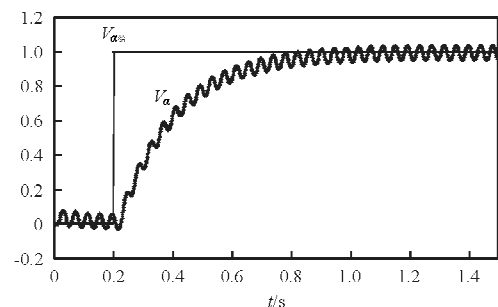
假设调节阀是一个带有纯延时的纯二阶模型, 采用本文方法进行控制, 所做的单位阶跃响应的计算机仿真曲线如图 9 所示。  $T_f$  均取 0.2 s, 采用不同活塞参数进行仿真, 以验证参数变动对结果的影响。



(a) 一个典型参数活塞的仿真结果



(b) 活塞两面所受油压力均比第一个曲线加大 1 倍



(c) 动作延时量比第一个曲线加大 1 倍

图 9 变结构控制仿真试验结果

Fig. 9 Curves of simulation results variable-structure control

从图 9 可以看出, 不同活塞参数变化仅仅影响抖振的细节, 而未影响宏观的曲线形状。

## 6 实现方案

控制算法如图 10 所示,  $V_a$  取自调节阀的位置传感器(LVDT),  $V_{a2}$  接到电脑 A/D 转换的输入口,  $V_{a\text{给}}$  是软件内部数据,“比较”由软件实现(结果为逻辑值)。

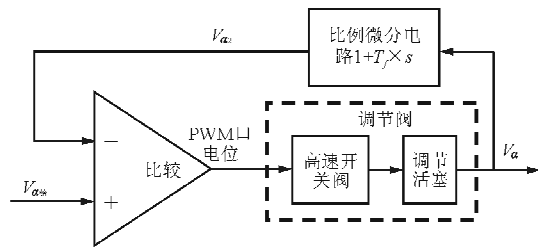


图 10 变结构控制算法

Fig. 10 Implementation of variable structure control

若该方案包括比例微分,全部采用软件实现,则主要的技术困难在于微分的精度。

软件处理周期必须远小于上述抖振的周期,故如果以实测  $V_a$  的差分来代表微分,需要极高的分辨精度,普通的 A/D 转换精度远远不能达到要求,将产生极大的量化误差。如果为了缩小误差而加大差分间隔,又会引入严重的延时。

在普通线性系统中,量化误差是一个直流成分为 0 的加性干扰,可以被目标本身的惯性作用滤掉。而高度非线性的算法,如此量化误差会使调节崩溃。

因此,微分环节只能采用硬件模拟电路实现。运算放大器电路(如图 11 所示)可以实现相当于图 10 中“ $1 + T_f \times s$ ”比例微分环节的功能。

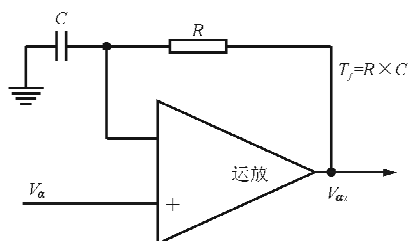


图 11 比例微分电路理论模型

Fig. 11 Theory model of PD-circuit

电路也可改成只产生纯微分,由软件计算比例、微分之和。然而需要考虑微分小于 0 的情况,电路更加复杂。

微分电路具有高通特性,容易引入干扰。在图 11 的基础上增加抗干扰滤波环节,如图 12 所示。滤波环节会引入寄生延时,延时主要由  $R \times C'$ 、 $R' \times C$  以及前面所加的低通滤波决定。该延时远小于  $T_f$ ,则不影响宏观性能。但是从图 9 可以看出,延时作用对振荡形成的脉宽调制信号的频率(也是输出抖振的频率)产生影响。

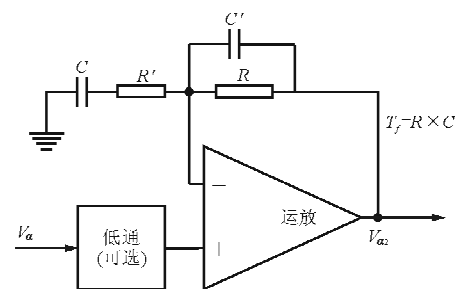


图 12 增加了抗干扰的滤波器

Fig. 12 Anti interference filters added

PWM 信号的频率越高,控制效果就越好,但高速开关阀的磨损加大,寿命缩短,而频率过低,控制效果变差,故技术上对此频率有一定的范围限制。

在实际实现时,可以先选择尽可能小的滤波时间常数试验,如果抖振频率高于最优的需要,则用加大滤波时间常数的办法降低频率,使其符合技术要求。

机械硬件的延时因素不可过大,否则导致抖振频率过低,将没有调整的余地,这是决定本方法是否可行的必要条件之一。

实际实现时,电磁铁未吸合时须较大电流吸合,而吸合后可用较小电流继续吸合,可用软硬件配合解决。上述“PWM 口电位”信号可以分为两个,以控制大小两种驱动电流。由软件判定:在电磁铁由不吸合转为吸合的一个固定时间间隔内,采用较大驱动电流;持续吸合超过此时间间隔后,改用较小驱动电流。时间间隔大小及电流的具体值依据电磁铁的技术参数选定。

## 7 结束语

变结构控制算法中,参数的不确定性仅仅影响上述状态轨线的形状,而所得结果特性则主要由  $\beta$

线决定,  $\beta$  线由设计者确定, 即将二阶非定常执行机构环节变成了一阶惯性环节, 并且此惯性环节的时间常数可由设计者自定(具有不变性), 因此该法有很宽的适应性。

本文的方法是将调节阀看作一个带有纯延时的二阶系统, 但是实际的调节阀是一个更高阶的系统。虽然粗略分析时, 某些高阶因素近似可以纳入“延时”, 但它和真正的纯延时仍然是不同的。如果实际二阶的系数较小(即活塞的惯性质量较小), 相对地高阶因素变得不可忽略, 则仍然会有更加复杂的结果, 甚至影响本方法的可行性。在阀门机械结构的设计中, 应当注意到这一点。

### 参考文献

- [1] 绪方胜彦. 现代控制工程[M]. 卢英, 等, 译. 北京: 科学出版社, 1984.  
Ogata Katsuhiko. Modern control engineering[M]. Translated by Lu Ying, et al. Beijing: Science Press, 1984. (in Chinese)
- [2] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.  
Hu Shousong. The principle of automatic control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1994. (in Chinese)
- [3] 高为炳. 变结构控制基础[M]. 北京: 科学出版社, 1989.  
Gao Weibing. A variable structure control foundation[M]. Beijing: Science Press, 1989. (in Chinese)
- [4] 王丰尧. 滑模变结构控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.  
Wang Fengyao. Sliding mode variable structure control [M]. Beijing: China Machine Press, 1995. (in Chinese)
- [5] Drazenovic B. The invariance, conditions in variable structure systems[J]. Automatica, 1969, 5: 287-295.
- [6] El-Ghezawi O M E, Zinober A S I, Billings S A. Analysis and design of variable structure systems using a geometric approach[J]. International Journal of Control, 1983, 38 (3): 657-671.
- [7] C J 哈里斯, S A 比林斯. 自校正和自适应控制理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 267-269.  
Harris C J, Billings S A. Self-tuning and adaptive control theory and application[M]. Beijing: Science Press, 1986: 267-269. (in Chinese).
- [8] 秦寿康, 张正方. 最优控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 1984: 75-80.  
Qin Shoukang, Zhang Zhengfang. The optimal control [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 1984: 75-80. (in Chinese)
- [9] Zhang Gaofeng, Zhang Jingyu, Liu Shu. Design and realization of radar EW simulation visual system[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2010(3): 263-268.
- [10] MultiGen-Paradigm. Creating models for simulations versoin2.5 for windows and IRIX[S]. Montréal, Quebec, Canada; MultiGen-Paradigm, 2001.
- [11] MultiGen-Paradigm. Creating terrain studio for simulation versoin2.5 for windows and IRIX[S]. Montréal, Quebec, Canada; MultiGen-Paradigm, 2001.
- [12] 李丽丽, 史智博, 张国辉, 等. 浅析 Creator 视景仿真模型建模技术研究与应用[C]//第二届中国指挥控制大会论文集. 北京, 2014: 392-394.  
Li Lili, Shi Zhibo, Zhang Guohui, et al. Research on simply analyzing of creator visual simulation modeling and implement[C]//Second China Proceedings of Command and Control Conference. Beijing, 2014: 392-394. (in Chinese)

### 作者简介:

郝立中(1944—),男,教授,高级工程师。主要研究方向:微型计算机系统及应用。

(编辑:赵毓梅)

### 作者简介:

刘岩(1971—),男,工程师。主要研究方向:三维仿真与飞行模拟机视景。

(编辑:马文静)

(上接第244页)

- Civil Aviation Administration of China. Visual and instrument flight procedure design specification [S]. Beijing: CAAC, 2006. (in Chinese)
- [8] Villagra M R. Managing industrial simulator visual databases using geographic information systems, computer modeling and simulation(UKSim)[C]. 2011 UkSim 13th International Conference. IEEE; 2011.
- [9] Zhang Gaofeng, Zhang Jingyu, Liu Shu. Design and realization of radar EW simulation visual system[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2010(3): 263-268.
- [10] MultiGen-Paradigm. Creating models for simulations versoin2.5 for windows and IRIX[S]. Montréal, Quebec, Canada; MultiGen-Paradigm, 2001.
- [11] MultiGen-Paradigm. Creating terrain studio for simulation versoin2.5 for windows and IRIX[S]. Montréal, Quebec, Canada; MultiGen-Paradigm, 2001.
- [12] 李丽丽, 史智博, 张国辉, 等. 浅析 Creator 视景仿真模型建模技术研究与应用[C]//第二届中国指挥控制大会论文集. 北京, 2014: 392-394.  
Li Lili, Shi Zhibo, Zhang Guohui, et al. Research on simply analyzing of creator visual simulation modeling and implement[C]//Second China Proceedings of Command and Control Conference. Beijing, 2014: 392-394. (in Chinese)