

文章编号: 1002-0446(2001)06-0515-05

分段变结构 Bang-Bang 控制器在 气动脉宽调制位置伺服系统中的研究*

张厚祥 宗光华

(北京航空航天大学机器人研究所 100083)

摘要: 本文提出了一种分段变结构 Bang-Bang 控制方法, 并应用于气动脉宽调制高速开关阀控气缸位置伺服系统, 使得控制性能得到了明显改善, 有实际应用价值。

关键词: 分段变结构; Bang-Bang 控制; 气动脉宽调制

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

A STUDY OF PNEUMATIC PWM POSITION SERVO SYSTEM USING A SEGMENT AND VARIABLE BANG-BANG CONTROLLER

ZHANG Hou-xiang ZONG Guang-hua

(Robotics Research Institute, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 100083)

Abstract In this paper, a method of segment and variable Bang-Bang controller is introduced. This controller is designed to implement the accurately control of the pneumatic PWM position servo system. The experimental results show that the static and dynamic performance is excellent. The method is one of the most possible approaches to control the pneumatic PWM position servo system.

Keywords: segment and vriable structure, bang-bang controller, pneumatic, PWM

1 引言(Introduction)

气动技术是当今工业自动化领域的一个重要分支, 其成本低廉、工作效率高、清洁无污染, 并已经在越来越多的领域中得到广泛的应用。但是由于气体介质的可压缩性使得系统整体的刚度较低, 并且在控制中呈现严重的非线性, 这些特点都使得对气动伺服系统的控制难以收到十分满意的效果。另外, 气动系统精确数学模型建立比较困难, 所有以上因素都使得对于此类系统应用传统经典控制方法是不可行的, 这一点在实际应用过程中已经得到了充分证明。

近年来, 随着微电子及制造技术的不断进步, 高速开关阀由于具有与计算机接口方便、体积小、重量轻、成本低、使用寿命长等优点, 逐渐成为实现气动伺服的主要控制元件。本文以 863 项目“玻璃幕墙擦洗机器人系统开发与实用化”中的全气动机器人运

动、结构元件 X、Y 两个无杆气缸的位置伺服为应用背景, 主要研究和讨论了一种新型的分段变结构 Bang-Bang 控制器在气动脉宽调制位置系统中的应用。实验表明, 该控制器获得了良好的控制性能。

2 控制原理与策略(Control principle and strategy)

2.1 系统组成

图 1 所示为本气动脉宽调制位置伺服系统的组成。图中阀 1 和阀 2 均为高速开关阀, 并处于脉宽调制即 PWM 输出状态。脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation 简称 PWM)技术, 其工作原理如图 2 所示。

T_s 为脉冲周期, T_w 为脉冲宽度, 定义

$$\tau = \frac{T_w}{T_s} \times 100\% \quad (1)$$

τ 称为占空比。PWM 根据输入信号的大小对脉冲宽

度进行调制,使得在一个载波周期内输出占空比是输入的函数。在应用高速开关阀控气动脉宽位置伺服系统中,则是根据位置偏差的大小对脉冲宽度进行调节,即对占空比进行调节,从而使高速开关阀在每一个周期内打开的时间随偏差的大小而变化,这样就实现了对流过阀的气体流量的控制,从而实现对气缸位置的控制。

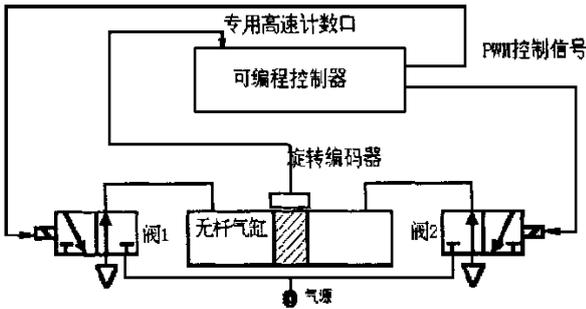


图 1 气动脉宽调制位置伺服系统的组成
Fig.1 The composition of the system

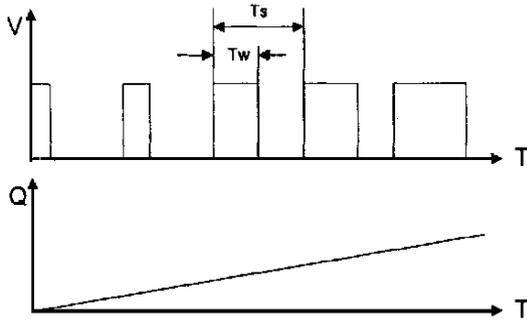


图 2 PWM 工作原理
Fig.2 The principle of the PWM

从图 1 中可以看到,根据反馈信号,控制器产生对气缸两端两个高速开关阀的控制信号 U_k ,当阀 1 与气源接通,阀 2 与大气接通时,气体驱动气缸活塞向右运动;相反,当阀 2 与气源接通,阀 1 与大气接通时,气体驱动气缸活塞向左运动。在需要进行气缸定位控制的时候,可编程控制器向高速开关阀发送 PWM 信号,进行脉宽调制控制。采用这种方法的主要优点是控制精度较高,减小控制滞后,有利于减轻气动系统中非线性因素的影响。图 1 中所示气缸的气动控制结构是一种较为普遍的方案,可以应用的控制方法也比较多。其中活塞的运动反馈由安装在气缸侧面的精密齿轮齿条和旋转编码器共同构成,编码器信号进入可编程控制器的专用高速计数口。在本实验系统中我们将高速开关阀简化为简单的 0-1 开关来处理,忽略了阀的开启和关闭时间。

气缸的位置伺服是本机器人运动控制的核心部分,要求运动速度快,定位精度较高,并针对可编程

控制器的特点要求算法简单实用,计算量小。

2.2 控制原理及策略

2.2.1 变结构的 Bang-Bang 控制器设计

Bang-Bang 控制器是一种时间最优控制,又称为快速控制法。选用此方法进行研究主要是希望实现定位的快速性。我们将气缸的活塞运动表示为如下图 3 所示。



图 3 活塞运动示意图

Fig.3 The sketch map of the piston movement

O 点为期望位置, S 点为运动定位的起点, N 点为运动中的最大超调位置。常规的 Bang-Bang 控制可简述为

$$U_k = - U_{max}(e_s) \tag{2}$$

当 $|e_s| \leq \epsilon$ 结束控制任务,气缸两端同时接通气源。其中 e_s 为位置误差,并认为超调为正误差, ϵ 为控制误差限, U_k 为输出的控制信号,其对应产生气缸两端的控制分量 W_1, W_2 , U_{max} 为输出信号的极值。

从所述可以看出,在控制中仅以位置误差作为控制切换的评价标准,没有考虑活塞运动速度的影响。但是在实际运动过程中,当活塞接近并经过 O 点时,虽然 e_s 已经满足控制的结束条件,但是由于 $V \neq 0$,活塞将不会停止在期望位置处,必然出现运动过冲,因而运动控制也将继续作用,最终造成活塞在目标点左右发生振荡。在整个控制作用过程中由于阀始终处于开关状态,与大气连通的气缸腔内压力为 0,再加之气体的可压缩性,使得系统刚度较低。采用这种控制方法在追求快速性的同时,控制的稳定性变得较差。

理想的气缸位置伺服是要求活塞到达目标点的同时 e_v, e_s 均为 0,正是基于此,本文提出了变结构 Bang-Bang 控制方法。利用如下所示的构造函数作为 Bang-Bang 控制的切换评价函数,如式 3.4 所示。

$$y = e_v + ce_s^2 \text{sgn}(e_s) \tag{3}$$

$$U_k = - U_{max} \text{sgn}(y) \tag{4}$$

其中 e_v 为速度误差, C 为常数, $\text{sgn}()$ 为符号函数。在 e_v, e_s 构成的相平面内,形成由 $y=0$ 的曲线与纵轴划分的 I、II、III、IV 四个区域。从公式 3 中可以看出,如果能够使得 y 收敛于 0,那么就可以保证活塞的运动位置误差和速度误差都收敛于 0,又因为 y 经过 2、4 象限,所以 $e_v \times e_s < 0$,因此 e_v, e_s 将会收敛于

0。

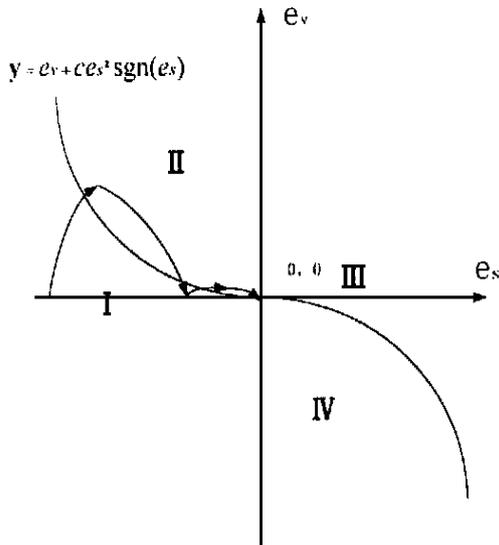


图 4 相平面图

Fig. 4 The sketch map of the phase

设 flag 为运动切换标志, 当 flag= 0 时表明运动曲线从 I 进入 II, 或是由 III 进入 IV, 控制应当进行切换。控制信号的输出方向则进一步由 y 的符号函数进行控制, 设 W1 为阀 1 的控制信号, W2 为阀 2 的控制信号, 并满足 W1 + W2 = U_{max}。整个控制过程可表述为下式

$$\begin{aligned} & \text{if } y \leq 0 \text{ then flag} = 1, \\ & \quad W_1 = U_{max}, W_2 = 0 \\ & \text{if } y > 0 \text{ then flag} = 0, \\ & \quad W_1 = 0, W_2 = U_{max} \end{aligned} \quad (5)$$

又令

$$\epsilon = \sqrt{e_s^2 + e_v^2} \quad (6)$$

并当 |ε| < ε_{max} 时满足运动精度要求, 结束控制任务。

针对图 4, 面向整个运动过程进行讨论:

- 当活塞从 S 点开始运动时, v = 0, e_s < 0, e_v = v - 0 ≥ 0,

$$\begin{aligned} & \therefore y = e_v + ce_s^2 \text{sgn}(e_s) \leq 0 \\ & \therefore \text{flag} = 1, W_1 = U_{max}, W_2 = 0 \end{aligned}$$

又 ∵ ma = (p1 - p2)A - F_s

$$\therefore a = \frac{(p1 - p2)A - F_s}{m} \quad (7)$$

其中 m 为活塞质量, a 为加速度, p1、p2 分别为气缸左右腔内的气压, A 为活塞截面积, F_s 为各种摩擦力总和。活塞全速向右运动, 运动速度不断增加。

- 当运动轨迹从 I 进入 II 后, 即 y = e_v + ce_s²sgn(e_s) > 0

$$\therefore \text{flag} = 0, W_1 = 0, W_2 = U_{max}$$

又 ∵ ma = (p1 - p2)A - F_s

$$\therefore a = \frac{p1 - p2}{m} A - \frac{F_s}{m}$$

但由于此时的加速度方向与上一阶段相反, 因此活塞切换控制后有一个减速过程, 之后迅速向目标点靠近。

随后的运动切换控制与上述相同, 当 |ε| < ε_{max} 时满足运动精度要求, 结束控制任务。由于采用了 y 曲线作为切换的标准, 在沿 y 曲线向目标点收敛的同时, 位置误差和速度误差也同时收敛于 0, 从而使得气缸的运动性能得到改善。

2.2.2 分段控制策略

即使是在变结构的基础上, 当运动接近目标点时, 在一个非常小的区间内仍然会有振荡现象发生。造成这种结果的原因是, 变结构的 Bang-Bang 控制器本质上对于气缸两端高速开关阀采用的仍然是 0 - 1 开关控制。在离目标点较远的位置, 该方案有利于快速性, 但是在 O 点附近, 活塞仍具有一定的速度, 因而有可能从 II 进入 IV 区域, 从而造成运动的超调, 而后由于控制的作用, 又返回 II 区域。反之如果活塞的速度较低时, 一旦由于摩擦力的影响使得活塞不能到达 O 点而停下来, 气缸左腔持续进气而腔体的容积不变, 使得该腔内的气压升高, 直到左右腔的气压差能够克服摩擦力的影响, 活塞又开始运动。由于此时静摩擦力的突然消失, 活塞启动瞬间将具有较大的加速度, 再加之气压的滞后效应, 活塞也将冲过期望位置, 从而会使控制曲线从 II 进入 IV 区域, 并最终发生振荡现象。总而言之气动系统的低刚度和气体的可压缩性是控制复杂性的主要原因, 因此提高系统的刚度是改善综合性能的主要突破口。

针对上面的问题, 提出对于整个控制过程进行分段, 活塞接近目标点时, 采用非 0 - 1 控制的变结构 Bang-Bang 控制的策略。当满足下式 8 时, 对于原来 Bang-Bang 控制中为 0 输出的气缸腔施加背压 (为背压误差限)。所谓背压简言之就是使气缸的腔体内有一定的初始压力。当满足

$$|e_s| \leq e_b \quad (8)$$

st. W1 + W2 = U_{max},

- IF y ≤ 0 THEN flag = 1; W1 = U_{max} (即 35Hz 的 PWM 信号), W2 = U_{max} - Δu (Δu 为背压调整量, 即 15Hz 的 PWM 信号)。

- IF y > 0 THEN flag = 0; W1 = U_{max} - Δu (Δu 为背压调整量, 即 15Hz 的 PWM 信号), W2 = U_{max} (即 35Hz 的 PWM 信号)。

将阀的关状态改为 20Hz 的 PWM 信号, 主要目的就是在运动接近目标点时使气缸左右两个腔体内的气压升高, 一边完全进气, 另一边不是与大气连通, 从而提高系统的刚度, 减小了气缸两腔的压力差, 这样有利于减小和消除运动超调, 降低活塞对于气源压力波动的敏感程度。上述两个部分相结合最终形成对气缸进行控制的完整方法。

3 控制器的设计 (The design of the controller)

以上述的理论为依据, 结合气动系统的特点, 设计了新型的控制器的。由此将图 3 进一步修正为图 5 所示, 其中 $|b_0| = e_b$, 并形成图 6 所示的程序控制框图。

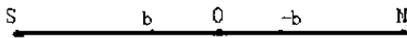


图 5 气缸运动示意图

Fig. 5 The sketch map of the cylinder movement

此方法中有以下几点需要说明:

- 对于构造函数 $y = e_v + ce_s^2 \text{sgn}(e_s)$ 可以用下式 9 来表示

$$y = e_v + ce_s^2 \text{sgn}(e_s)^{\text{mod}(\frac{n+1}{2})} \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (9)$$

n 值的变化对于控制性能有显著的影响。该值越小越有利于向目标点收敛的快速性, 但是也易在期望位置附近发生小幅振荡; n 值变大, 则收敛的快速性会逐渐下降。综合以上两点, 在本实验中选择 $n = 2$, 这样在远离目标点的位置沿 y 曲线收敛速度比较快; 当在期望位置附近时, 由于曲线变化比较平缓, 因而有利于避免振荡的发生。 y 曲线随 n 的变化趋势如图 7 所示。

- 参数 c 的选择很重要, 其值应该适中。 c 值越大, 在接近目标点的位置 y 曲线越陡, 因而越容易发生振荡; c 值较小时, 活塞运动速度显著下降。在实际应用中选择 c 值为 5。

- 关于背压误差限的选择。背压误差限选择过大则会使得活塞在远离目标点的位置运动速度显著降低, 从而影响控制的收敛速度; 而背压误差限选择过小则分段作用不明显。在实际应用中选择 10mm 为该门限值。

- 关于控制频率的选择。从理论上讲, 一般控制信号的频率越高越有利于提高控制的性能, 而由于高速开关阀的使用频率上限约为 40Hz, 因而限制了其进一步提高。

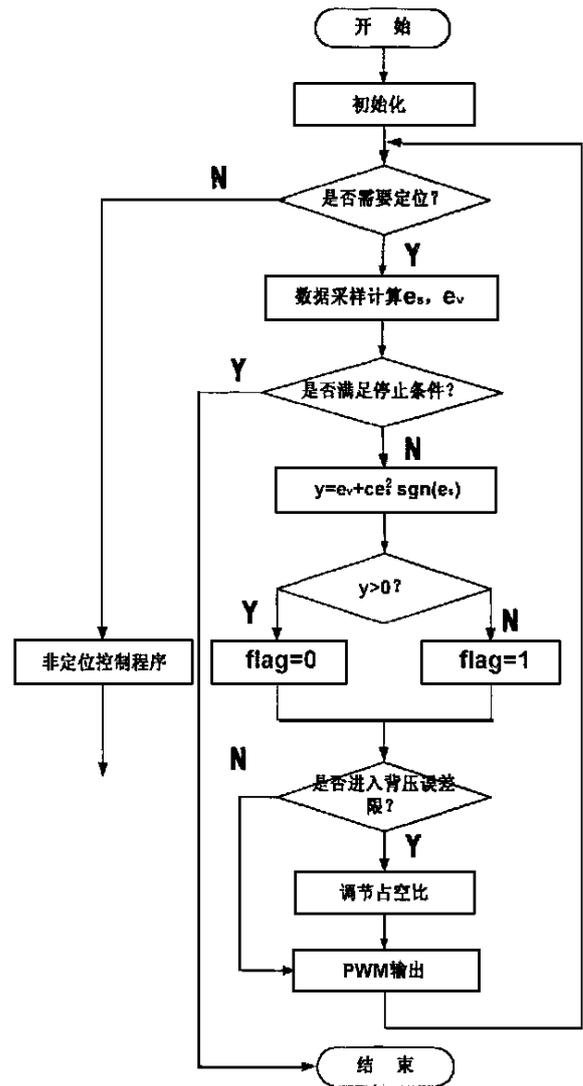


图 6 程序流程

Fig. 6 Flow chart

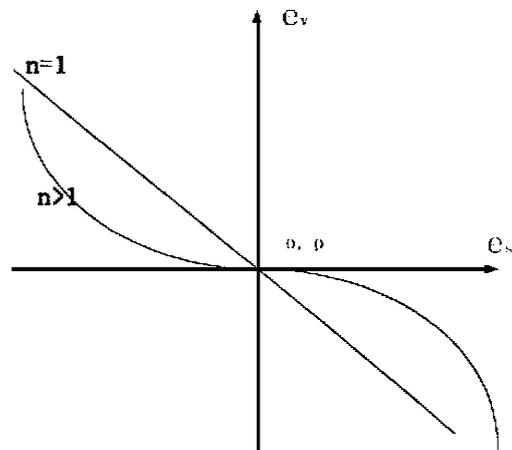


图 7 n 对控制曲线的影响

Fig. 7 The effect of the n parameter to the controller

4 实验结果(Experimental results)

表 1 气缸位置伺服实验数据 (Table 1 Experimental results)

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
实验条件	$P_0=6.5\text{Mpa}, C=5, e_b=10\text{mm}, T_s=35\text{ms}, \epsilon_{\text{max}}=\pm 0.5$									
期望值 $s(\text{mm})$	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
实际值 $s_i(\text{mm})$	50.0	50.1	49.8	50.2	49.8	50.5	49.7	49.9	49.9	50.0
平均值 (mm)	$\bar{s} = \sum_{i=1}^n s_i/n = 49.99(\text{mm}) \quad n=10$									
方差 σ	$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2 / (n-1)} = 0.23(\text{mm}) \quad n=10$									
重复定位精度	$V_r = \pm 3\sigma = \pm 0.69(\text{mm}) < \pm 1(\text{mm})$									

图 8 和图 9 为在上述条件下进行 50mm 定位时的一组位置和速度响应曲线。从表 1 和下图中可以看出, 采用分段变结构的 Bang-Bang 控制方法使得气缸的运动速度显著提高, 最高速度可达到

700mm/s, 并且运动过程平稳, 消除了定位过程中的振荡现象, 运动精度较高。另一方面, 面向可编程控制器, 该方法计算量少, 简单实用。

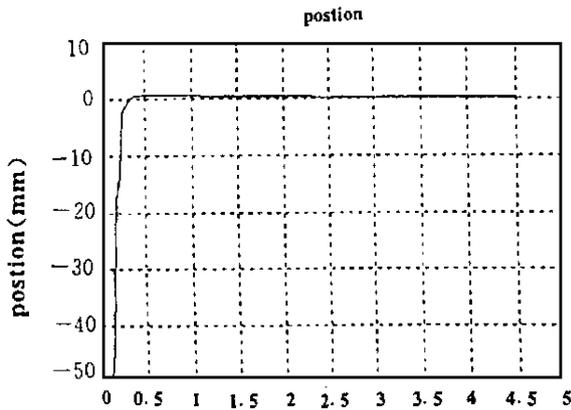


图 8 气动伺服位置响应曲线
Fig. 8 The position response curve

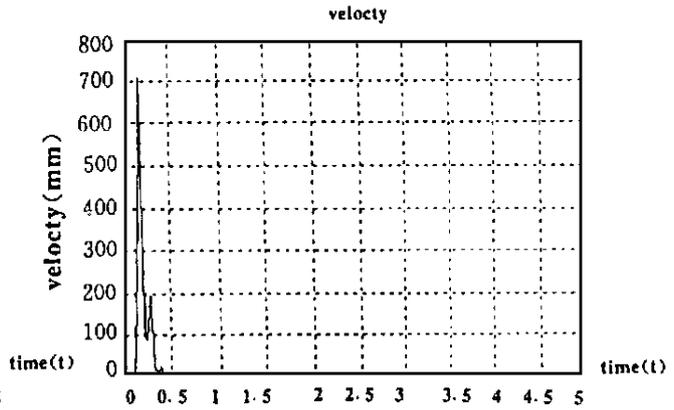


图 9 气动伺服速度响应曲线
Fig. 9 The velocity response curve

5 结论(Conclusion)

气动伺服系统的高精度控制一直是一个比较复杂的问题。本文提出了分段变结构 Bang-Bang 控制方法, 并应用于气动脉宽调制高速开关阀控气缸位置伺服系统。实验结果表明, 该方法是有效的, 系统的性能得到了明显改善, 运动速度快, 收敛速度快, 超调小, 有实际应用价值。

参考文献 (References)

- 1 段运波. 气动脉宽调制位置伺服的研究. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1996
- 2 李华斌, 刘荣, 周延武, 宗光华. 气动脉宽调制位置伺服系统分段控制器的研究. 机床与液压, 1999 第 2 期

作者简介:

张厚祥 (1974-), 男, 26 岁, 博士生。研究领域: 自主移动机器人控制技术、气动伺服技术。

宗光华 (1973-), 男, 博士生导师, 教授。研究领域: 机器人视觉、自主移动机器人技术、精细操作系统。