

泥水平衡盾构开挖面平衡控制系统仿真设计

宋蕴璞, 奚 鹰, 李万莉

(同济大学 机械工程学院, 上海 201804)

摘要: 在分析工作原理的基础上, 建立了泥水平衡盾构开挖面平衡控制系统的数学模型, 为该系统中的气泡舱气压力调节回路和泥水液位调节回路设计了不同的控制器, 分别在气泡舱气压力单回路调节模式和气、液双回路调节模式下就所设计的不同控制器的控制效果进行了仿真对比, 得出了不同干扰对系统的影响情况, 针对影响较大的干扰, 提出了相应的控制对策, 给出了根据不同的实际应用要求和场合所应选择的最佳控制方式和自动切换方法, 由此设计出该系统的数字化统一控制模型。

关键词: 泥水平衡盾构; 开挖面平衡控制; 数学模型; 模糊PID; 前馈; 干扰抑制

中图分类号: TP 202

文献标识码: A

Simulation Design on Balance Control System for Excavating Face of Slurry Shield

SONG Yunpu, XI Ying, LI Wanli

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on an analysis of the working mechanism, the mathematical model of balance control system for excavating face of slurry shield was founded. Controllers were designed to control the gas pressure in the bubble cabin and the slurry level. Simulation of different controllers was carried out respectively and simulation results were compared. Based on an analysis of the disturbance influence to the control system the way to deal with the influence was given. The best control method and the automatic shift way according to the different situations were also presented, and a unified digital control model was established.

Key words: slurry shield; balance control of excavating face; mathematical model; fuzzy PID; feed-forward; disturbance restrain

引进了大量泥水平衡盾构并进行了许多高难度的施工. 对于此类盾构的泥水平衡控制系统的研究, 国内仅有少量学者提出了采用自动调节微型泥水平衡盾构进、排泥流量控制泥水舱内压力的方法, 并对该控制系统进行了建模仿真^[1], 但是由于其建模的对象是微型泥水平衡盾构, 与实际施工中通常所采用的中大型和超大型泥水平衡盾构的控制方式存在很大的不同; 而这部分内容国外资料则几乎未涉及任何核心问题, 仅仅给出了几种粗略的平衡方式简图以及不同平衡方式控制效果的简单比较^[2].

从国外引进的此类盾构的泥水平衡系统中的气压控制和液位控制均采用模拟控制器进行控制调节, 其气压控制系统和进排泥泵的控制及操作系统各自独立、分散设置, 不但在操作时很不方便, 并且由于未考虑各分系统间的有机关联和相互耦合的影响, 不能做到自动配合、联合控制, 常常只能依赖操作人员的判断分别进行手动调节, 使得操作人员工作强度非常大, 稍有不慎就容易造成操作失误.

因此, 有必要对此类盾构的泥水平衡控制系统进行深入系统的研究, 建立其数字化统一控制模型及具体实施的方法.

1 泥水平衡盾构开挖面平衡系统简析

由于泥水平衡盾构开挖室内的沉浸墙将泥水室分割为泥水舱和气泡舱 2 部分, 气泡舱内压缩空气的压力直接作用在舱内泥水液面上, 因此当气泡舱内的泥水液面发生上下波动而引起开挖面支护压力变化时, 可以通过打开进/排气阀改变气泡舱内压缩空气的气压值来加以平衡. 另外通过液位传感器, 还可以根据气泡舱内泥水液位偏离规定值的情况来控制进/排泥泵的转速, 使气泡舱内的泥水液位快速恢复到要求位置.

自 20 世纪 90 年代以来, 我国从德国、日本等国

具有沉浸墙的泥水平衡盾构开挖面平衡系统如图1所示,图中 h 为泥水液位高度,取泥水舱舱底亦即盾构底径边缘为坐标原点; P_{air} 为气泡舱的气压力值; P 表示压力传感器; H 表示液位传感器.其内部力的传递与作用原理与连通管作用原理相同,满足如下方程:

$$P_{\text{axe}} = P_{\text{air}} + \rho_{\text{ni}} g(h - r) \quad (1)$$

式中: P_{axe} 为盾构切口泥水压力值; ρ_{ni} 为泥水舱的泥水密度; r 为盾构半径.

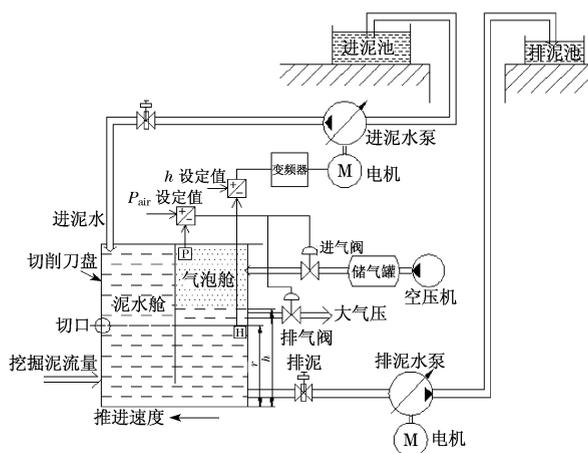


图1 泥水平衡盾构开挖面平衡系统
Fig.1 Balance system of excavating face for slurry shield

2 系统数学模型的建立

盾构气泡舱中压缩空气压力受泥水液位的上下起伏和气泡舱进/排气阀开闭的共同影响,在建立数学模型时,考虑将泥水液位起伏对于气泡舱压缩空气压力的影响看作是控制系统的干扰量,而将进/排气阀对气泡舱进行充放气过程看作主控制回路.

2.1 泥水流量与压缩空气压力之间的传递函数

在气泡舱中泥水液面高度变化的过程中,认为气泡舱中的压缩空气与外界无热量交换,则^[3]

$$PV^k = P_0 V_0^k = C \quad (2)$$

式中: P 为气泡舱压力; V 为气泡舱体积; k 为绝热系数; P_0 为气泡舱初始压力; V_0 为气泡舱初始体积; C 为常数.

将式(2)线性化.令 $F(P, V) = PV^k$,并将 $F(P, V)$ 在工作点 (P_0, V_0) 附近泰勒展开并略去高次项得

$$PV^k = F(P_0, V_0) + \frac{\partial F(P, V)}{\partial P} \Big|_{(P_0, V_0)} \Delta P +$$

$$\frac{\partial F(P, V)}{\partial V} \Big|_{(P_0, V_0)} \Delta V = P_0 V_0^k + V_0^k \Delta P + P_0 k V_0^{k-1} \Delta V \quad (3)$$

将其代入式(2)后整理得

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{P_0 k}{V_0} \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

同时气泡舱中压缩空气体积的变化与舱中泥水流量之间满足如下关系:

$$dV/dt = -(Q_{\text{in}} + Q_{\text{dig}} - Q_{\text{out}}) \quad (5)$$

式中: Q_{in} , Q_{dig} , Q_{out} 分别为进泥泵流量、排泥泵流量和盾构的挖掘泥流量.

令 $Q_{\text{ni}} = (Q_{\text{in}} + Q_{\text{dig}} - Q_{\text{out}})$,将式(5)代入式(4),经拉氏变换后得气泡舱中压缩空气的压力与泥水流量之间的传递函数为

$$P(s) = P_0 k Q_{\text{ni}}(s) / V_0 s \quad (6)$$

2.2 充放气流量与压缩空气压力之间的传递函数

通过控制进/排气阀的开度调节向气泡舱充/放气时的压缩空气流量是气泡舱压缩空气压力控制系统的主控制回路.此充/放气过程满足热力学第一定律方程式^[4]

$$dQ + h_i dM_i = dU + dW + h' dM \quad (7)$$

式中: dQ 为气泡舱内气体与外界交换的热量; h_i 为流进气泡舱1 kg 气体所带进的能量; dM_i 为流进气泡舱的气体质量; dU 为气泡舱内气体内能增量; dW 为气泡舱内气体所作的膨胀功; h' 为流出气泡舱1 kg 气体所带出的能量; dM 为从气泡舱流出的气体质量.根据式(7)中各项的物理含义将其变化为

$$dQ + kRT_i dM_i = V_0 dP + kP_0 dV + h' dM \quad (8)$$

式中: R 为气体常数; T_i 为流入气泡舱内气体的绝对温度; dP 为气泡舱内气体的压力增量; dV 为气泡舱内气体的体积增量.

由于充气过程很快,气泡舱内气体来不及与外界进行热交换,可以将这一过程看作为绝热充气过程,于是有 $dQ = 0$;且由于充气过程中只充气无放气,因此 $dM = 0$;同时由于充气过程中气泡舱中压缩空气体积不变,所以有 $dV = 0$.则式(8)简化为

$$kRT_i dM_i = V_0 dP \quad (9)$$

另外,流进气舱室的气体质量与充气流量 Q_{ain} 之间满足如下的数学关系:

$$dM_i/dt = Q_{\text{ain}} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9),并经拉氏变换得气泡舱中压缩空气的压力与充气流量间的传递函数 $P(s)$

$$P(s) = kRT_i Q_{\text{air}}(s)/V_0 s \quad (11)$$

同理可得气泡舱的气压力与排气流量 Q_{out} 之间的传递函数为

$$P(s) = -kRT_i Q_{\text{out}}(s)/V_0 s \quad (12)$$

系统其他环节传递函数的推导在此不再一一赘述,所建立的系统数学模型如图2所示^[5-6].图中 k_i 为增益, $i=0\sim 10$; e 为偏差; $u(1)$ 为盾构半径与实际液位函数的差值; $u(2) = P_{\text{axe}}$.

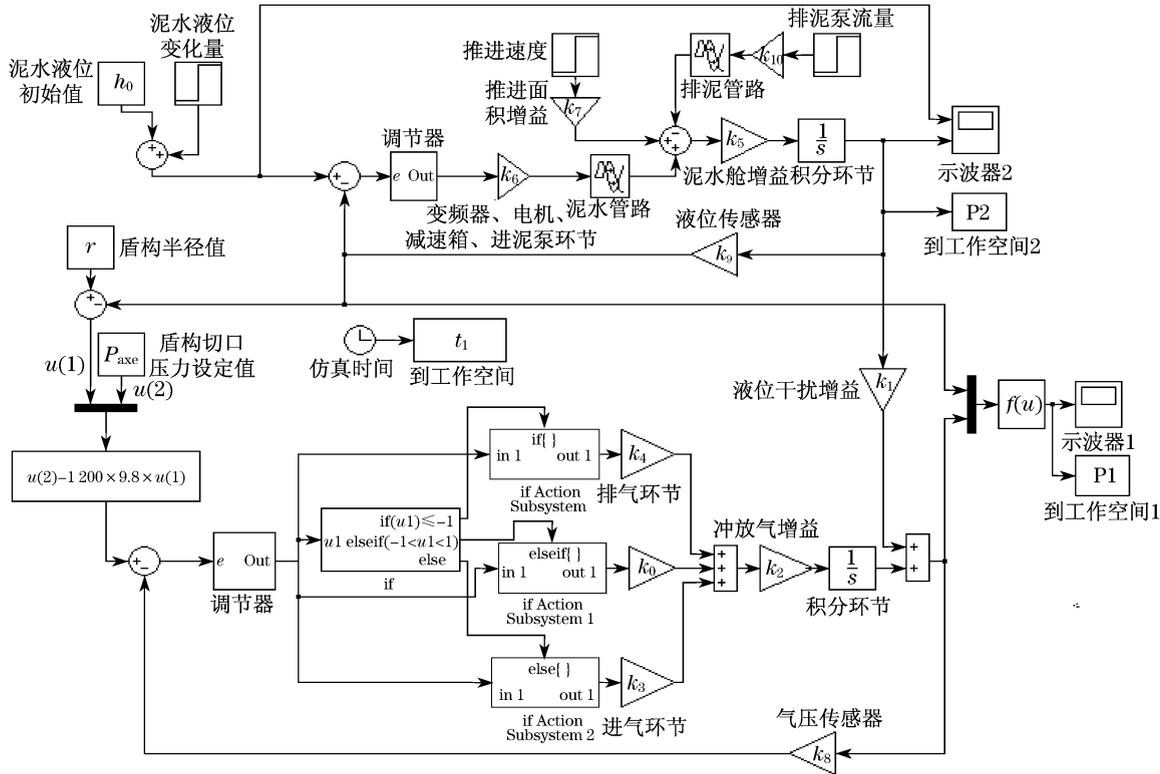


图2 泥水平衡盾构开挖面平衡控制系统数学模型

Fig.2 Mathematical model of balance control system for excavating face of slurry shield

3 气压调节回路控制器设计与仿真

考虑到泥水平衡盾构的开挖面平衡系统中主要需保证的是切口泥水压力的稳定,而切口泥水压力、泥水液位、气泡舱气压力三者之间满足式(1)的关系,因此在正常掘进过程中,无论泥水液位 h 发生多大变化,可以让系统仅对 P_{air} 调节以保持 P_{axe} 的稳定,从而在盾构工作的大多数时间内避开了液位调节的大延迟过程,同时也可以减少频繁地改变进/排泥水泵组的转速的情况,使控制系统简化,由于气压控制响应迅速,因此较易实现所需达到的控制效果.此时,盾构开挖面泥水气压平衡控制系统转化为气泡舱气压力调节的单回路控制系统,该回路将气泡舱中泥水液位的波动既作为回路的输入量也作为外部干扰量加入.通过调节器的控制,使气泡舱中气压力的实际值能快速补偿由泥水液位改变而导致的压力波动,以达到稳定盾构切口压力的目的.

本文中为盾构气泡舱气压力调节回路分别设计了数字增量式PID控制器(比例增益系数 $K_p = 50$,积分增益系数 $K_i = 10$,微分增益系数 $K_d = 0$)和模糊PID控制器^[7-8].

将所设计的控制器模型分别加入气泡舱气压力控制回路中进行仿真.仿真条件设置:系统输入盾构切口压力的设定值为 6×10^5 Pa,计算机采样周期为 25 ms,在第 20 s 时给切口压力设定值加 0.2×10^5 Pa 的阶跃信号,以模拟因土层改变等所导致的压力变化,在第 35 s 时给泥水液位值加 0.2 m 的阶跃信号,以模拟因超挖或泥水泵速度突然变化等所导致的气泡舱中泥水液位的极限变化,此阶跃信号同时作为系统的扰动量加入系统,仿真时间为 50 s,为使曲线对主要信息显示得更清晰,截取 15~40 s 的仿真输出曲线如图3~5所示.

由图3的仿真结果可以看出,在跟随输入的阶跃变化时,模糊PID控制与数字增量式PID控制的输出均可获得良好的动态性能.对于泥水液位变化

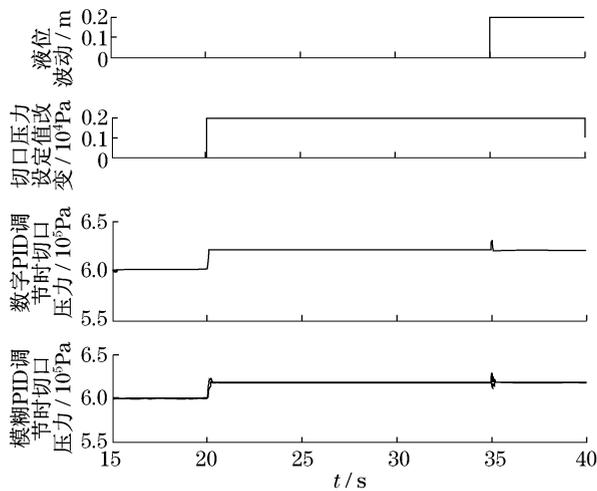


图 3 跟随输入阶跃变化和存在阶跃扰动时的输出响应
Fig. 3 Output response following the step change of the input and the disturbance

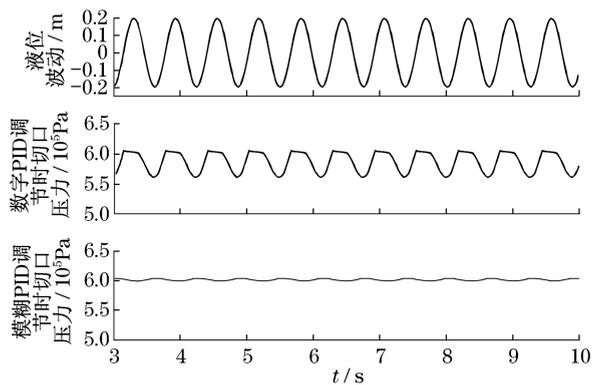


图 4 存在正弦扰动时的输出响应
Fig. 4 Output response with the presence of sinusoidal disturbance

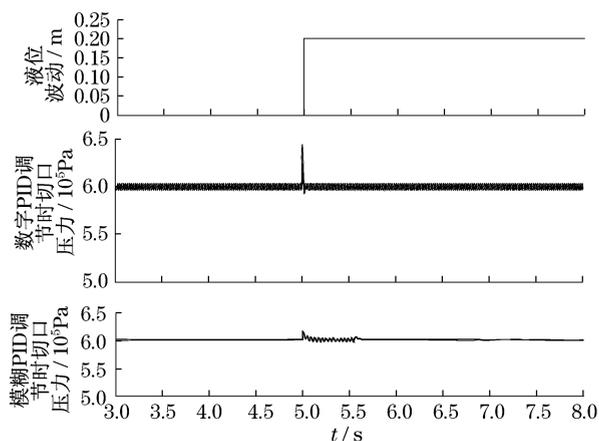


图 5 系统参数变化时的输出响应
Fig. 5 Output response following the change of system parameters

所产生的干扰,模糊 PID 控制的输出响应幅值比数字增量式 PID 要低,响应速度两者接近.对于不超过 0.2 m 的泥水阶跃变化量,系统输出压力的波动值均能保持在 $\pm 0.1 \times 10^5$ Pa 的目标范围之内.

但是,对于在系统中加入以正弦信号形式出现的液位波动,并且其频率大于 $10 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,模糊 PID 控制输出波动的幅值明显小于数字增量式 PID 的控制输出波动幅值,只有 $\pm 3 \times 10^5$ Pa. 并且模糊 PID 控制输出波动的幅值能够在较宽的频率范围内一直保持较小的波动幅值.

同时当盾构气泡舱气压力控制回路的参数如泥水液位、气泡舱中压缩空气的气压力等发生变化、偏离工作点较远时,模糊 PID 控制器的控制输出效果也明显好于数字增量式 PID 控制.图 5 所示为当气泡舱初始参数从 $h_0 = 7.5 \text{ m}$, $V_0 = 106.03 \text{ m}^3$, $P_0 = 6.00 \times 10^5 \text{ Pa}$ 改变为 $h_0 = 9.0 \text{ m}$, $V_0 = 79.21 \text{ m}^3$, $P_0 = 5.82 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,切口压力输出对于系统存在 0.2 m 液位阶跃扰动的响应.由仿真曲线可以发现,模糊 PID 控制器输出响应的幅值不像数字 PID 控制那样激烈增加,而是基本维持不变,在扰动后经 0.5 s 的小幅波动恢复原值,稳态时也没有高频振动.

经过上述分析比较发现,对于气泡舱气压力的控制,由于系统参数的时变性以及被控对象存在一定的非线性,单纯使用 PID 控制难以取得很好的控制效果,而采用结合数字 PID 控制和模糊控制两者优点的模糊 PID 控制方式,既能够保证被控制量气泡舱压缩空气压力的控制精度和响应速度,又能够较好地适应盾构气泡舱系统参数的变化,很好地抑制扰动,使结合在其中的数字 PID 控制和模糊控制两者优势互补,完全达到使盾构切口压力波动范围控制在 $\pm 0.1 \times 10^5$ Pa 以内的要求.

4 泥水液位调节控制器设计与气、液双回路控制系统仿真

在多数情况下,采用第 3 节所述的气泡舱气压力单回路的调节方式已足以保持盾构切口压力的稳定,但是如果气泡舱中泥水液位值持续变化直至超出一定范围之后,将导致气泡舱中压缩空气对系统外部压力的吸收作用大幅度降低,同时会削弱系统控制器对压力的调节作用,因此,在实际应用中,需要在盾构气泡舱内泥水液位超出上述规定范围值

时,对泥水液位也加以调节控制.

由于调节泥水液位会导致式(1)中2项影响盾构切口压力的因素同时发生变化,从而引起切口泥水压力的大幅度波动,因此在调节泥水液位的同时,必须同时配合气泡舱气压力的调节,以补偿由液位调节引起的压力波动.此时,考虑采用如图2所示的广义比例调节系统的控制方式,将泥水液位调节回路与气泡舱气压力调节回路之间的耦合作用梳理成泥水液位调节回路的输出响应,即液位变化与气泡舱气压力调节回路的输入设定值满足式(1)的广义比例关系.

根据该广义比例关系,无论泥水液位调节回路如何调节泥水液位,其控制输出的结果即泥水液位的实测值均会立即反映给气泡舱气压力调节回路中气泡舱的气压设定值,使气压设定值迅速根据液位的变化作出相应的变化.

在泥水液位控制回路中,选取进泥泵的转速作为调节量,此时该回路存在2个干扰量,即由盾构推进速度变化造成流进泥水舱中的泥水流量的变化和排泥泵排泥流量的变化.在设计该回路的控制器时,分别选择采用数字增量式PID、PID加前馈、PID加前馈加Smith调节器对该回路进行调节控制.其中PID调节器参数整定的结果为 $K_p = 10$, $K_i = 0.5$, $K_d = 25$.

对气泡舱泥水液位的扰动量即排泥泵流量的变化实现补偿的前馈调节器的传递函数 $D_q(s)$ 为

$$D_q(s) = \frac{K_{out} e^{-\tau s}}{T_s} \frac{K_{in}}{1 - e^{-T_s s}} = K \approx \frac{K_{out}}{K_{in}} \quad (13)$$

式中: K_{out} , K_{in} 分别为排泥环节和进泥环节的增益系数; τ 为进排、泥管路的滞后时间; T 为采样周期.

对于管路输送滞后的计算机纯滞后补偿器即Smith控制器的传递函数 $D_s(Z)$ 为

$$D_s(Z) = (1 - Z^{-n}) G'_0(Z) \quad (14)$$

式中: $n = \tau/T$; $G'_0(Z)$ 为保持器和被控对象不包含纯滞后的传递函数.

将泥水液位控制回路与气泡舱气压力控制回路结合在一起进行综合效果仿真,其中气泡舱气压力控制回路的调节器选择第3节所设计的模糊PID控制器.

仿真条件设置:系统输入的仿真条件与前述气泡舱气压力单回路控制时相同;泥水液位回路的输

入即液位的初始设定值为 $h_0 = 7.5$ m,该回路的计算机采样周期为50 ms,在第120 s时给液位设定值加入0.2 m的阶跃信号;在第220 s时给系统加入排泥泵流量从 $0.68 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 到零的阶跃变化扰动信号,模拟排泥泵突然停止的极限状态;在第300 s时给系统加入盾构推进速度从 $6.67 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 到零的阶跃变化扰动信号,模拟盾构突然停止推进的极限状态.分别将泥水液位控制回路设定为:数字PID控制、数字PID加前馈控制、数字PID加前馈加Smith控制方式进行仿真,仿真时间为500 s,系统第45~350 s的仿真输出曲线如图6所示.

仿真结论:

(1) 气泡舱内的气压力变化与液位的变化两者中,后者是盾构切口压力的主导影响因素.

(2) 3种控制方式的液位输出值都能跟随液位输入设定值的阶跃变化,稳态时液位输出无静差,只是在采用泥水液位的数字PID控制和采用数字PID加前馈控制时的响应时间较长,需要50 s左右,而加入Smith控制后,输出液位响应时间缩短为20 s.

(3) 仿真结果表明,泥水液位输出响应的速度并不影响综合系统的压力输出值,且液位变化的速度适当放慢,实际上会更有助于气室吸收由液位变化所带来的压力波动.由综合控制结果可以看到,在气压与液位同时控制时,液位输出50 s左右的响应时间能被系统所接受,为加快液位输出响应速度而增加的Smith控制器实际上是没有必要的.

(4) 液位设定值的调整幅度对综合压力输出会产生影响,当液位输入设定值的阶跃信号为从0~0.2 m跳变时,综合压力输出值的波动已将近 $\pm 0.1 \times 10^5$ Pa,因此为保证盾构切口压力的稳定,并给调节留一定余量,应该在调整液位达到限制范围之内的过程中,尽量减小每次液位调节的量,使其小于0.2 m.

(5) 在就系统干扰量对综合控制系统的影响的分析中发现,由盾构推进速度变化造成的干扰量对泥水液位和综合压力输出均无明显影响,只有当最大推进速度增加到目前允许的最大推进速度 $6.67 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的5倍以上时才会对泥水液位和综合压力输出产生较明显影响.而由排泥泵流量变化造成的干扰量对泥水液位和综合压力输出均会产生明显影响,但当在调节回路中加入前馈控制后,此干扰量对系统的影响得到很大消除,说明设计前馈控制器的必要性.

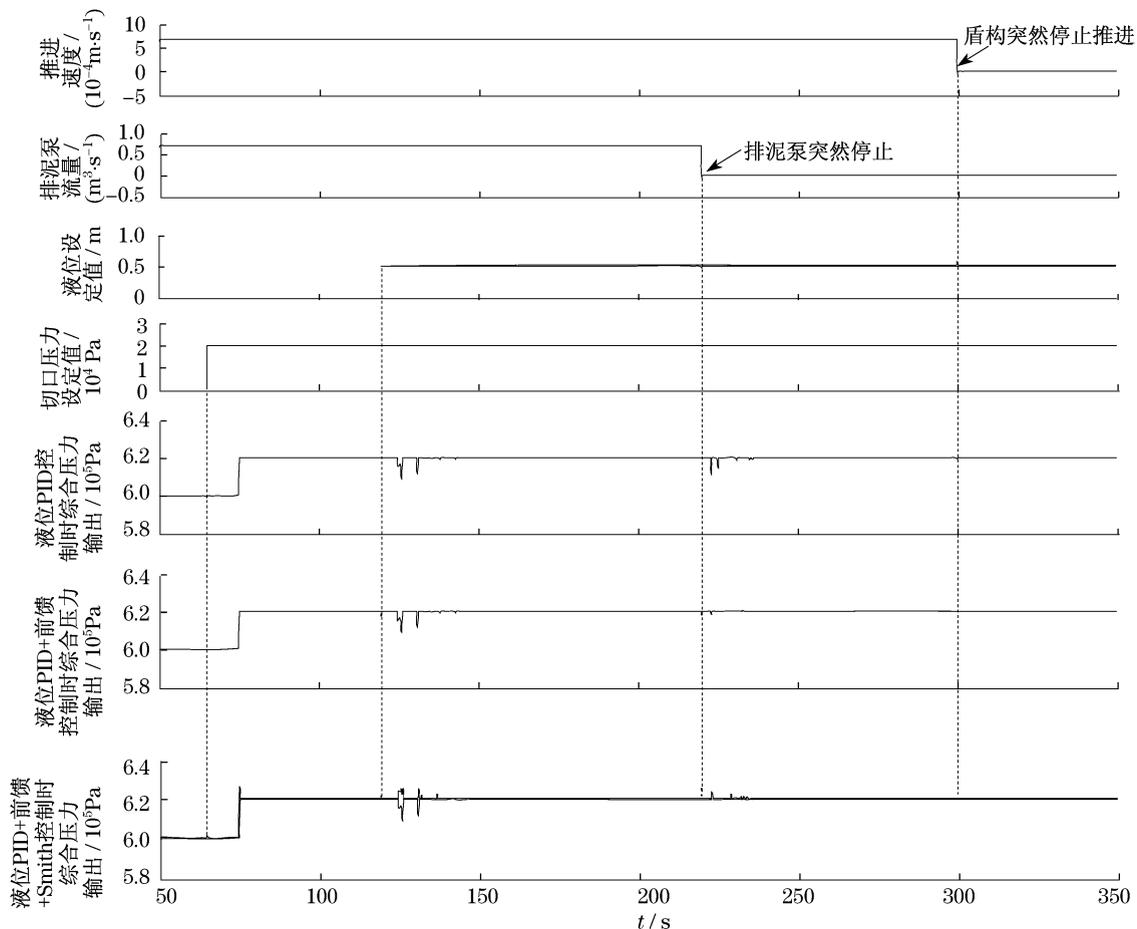


图6 跟随输入阶跃变化和存在阶跃扰动时的输出响应

Fig.6 Output response following the step change of the input and the disturbance

5 结语

在实际控制时,应根据液位传感器的测量值编写判断程序,当液位实测值处于限值范围之内时,选择单独的气泡舱气压力控制,而当液位实测值超过限值时,则转入气泡舱气压力与泥水液位的联合控制模式。

当泥水液位与气泡舱气压力同时调节时,气泡舱气压力调节回路采用模糊PID控制,泥水液位调节回路采用数字PID加前馈的控制已可以完全满足控制要求,此时系统具有较好的响应跟随性,受干扰的影响小。

参考文献:

[1] 陈传灿. 泥水式微型盾构挖掘面稳定系统设计[J]. 筑路机械与施工机械化, 2002, 19(2): 1.
CHEN Chuancan. Design of excavating surface stable system for slurry mini-shield [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2002, 19(2): 1.

[2] Chambon P, Corte J F. Shallow tunnels in cohesionless soil: Stability of tunnel face[J]. Journal of Geotechnical Engineering, American Society Civil Engineers, 1994(120): 1148.
[3] 吴振顺. 气压传动与控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1995.
WU Zhenshun. Pneumatic transmission and control[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1995.
[4] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
CHENG Daxian. Handbook of mechanical design [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
[5] 余成波, 张莲. 自动控制原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
YU Chengbo, ZHANG Lian. Principles of automatic control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
[6] SAMSON. Product description[EB/OL]. [2009-04-03]. <http://www.samson.de/main/depro001.htm>.
[7] 宋蕴璞. 超大直径泥水平衡盾构主要机构的控制系统研究[D]. 上海: 同济大学机械工程学院, 2009.
SONG Yunpu. Research on control system for the main organs of large diameter slurry shield[D]. Shanghai: Tongji University. College of Mechanical Engineering, 2009.
[8] 曾光奇, 胡均安. 模糊控制理论与工程应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.
ZENG Guangqi, HU Jun'an. Fuzzy control theory and engineering applications[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2006.