

盾构推进液压系统控制分析

龚国芳¹ 胡国良² 杨华勇¹

1. 浙江大学流体传动及控制国家重点实验室,杭州,310027

2. 华东交通大学,南昌,330013

摘要:采用电液比例控制技术设计了一种基于压力流量复合控制的盾构推进液压系统。利用基于CC-Link 现场总线的 PLC 控制实现了盾构推进液压系统速度和压力的协调控制,采用组态王软件开发的盾构推进液压监控系统实现了人机交互。推进液压系统在盾构模拟试验台上进行了实验分析,结果表明:所设计的推进电液控制系统能实时控制推进压力和推进速度,显著减少了速度压力调节的相互干涉,能较好地满足盾构在不同地质情况下推进控制的基本要求。

关键词:盾构;推进液压系统;速度压力控制;复合控制

中图分类号:TH137

文章编号:1004—132X(2007)12—1391—05

Control Analysis of Thrust Hydraulic System for Shield Tunnelling Machine

Gong Guofang¹ Hu Guoliang² Yang Huayong¹

1. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control,
Zhejiang University, Hangzhou, 310027

2. East China Jiaotong University, Nanchang, 330013

Abstract: A thrust hydraulic system of shield tunnelling machine with pressure and flow compound control was designed using electro-hydraulic proportional control technology. The coordinated control of the pressure and the speed for shield thrust hydraulic system was realized with PLC based on the CC-Link Profibus technique, and the man-machine interaction was also developed for the condition monitor of shield thrust hydraulic system with Kingview software. Experimental analysis of thrust system was also carried out on a simulator test rig. The experimental results show that the thrust pressure and the thrust speed can be controlled in real time, and the interference between pressure control and speed control can be reduced obviously, which can meet the tunnelling requirements in different kinds of geologies.

Key words: shield tunnelling machine; thrust hydraulic system; pressure and speed control; compound control

0 引言

盾构是一种集机械、电器、液压、测量和控制

等多学科技术于一体、专用于地下隧道工程开挖的技术密集型重大工程装备。它具有开挖速度快、质量高、人员劳动强度小、安全性高、对地表沉降和环境影响小等优点^[1]。

推进系统是盾构的关键组成部分,主要承担

收稿日期:2006—04—05

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(50425518);国家863 高技术研究发展计划资助项目(2005AA420310)

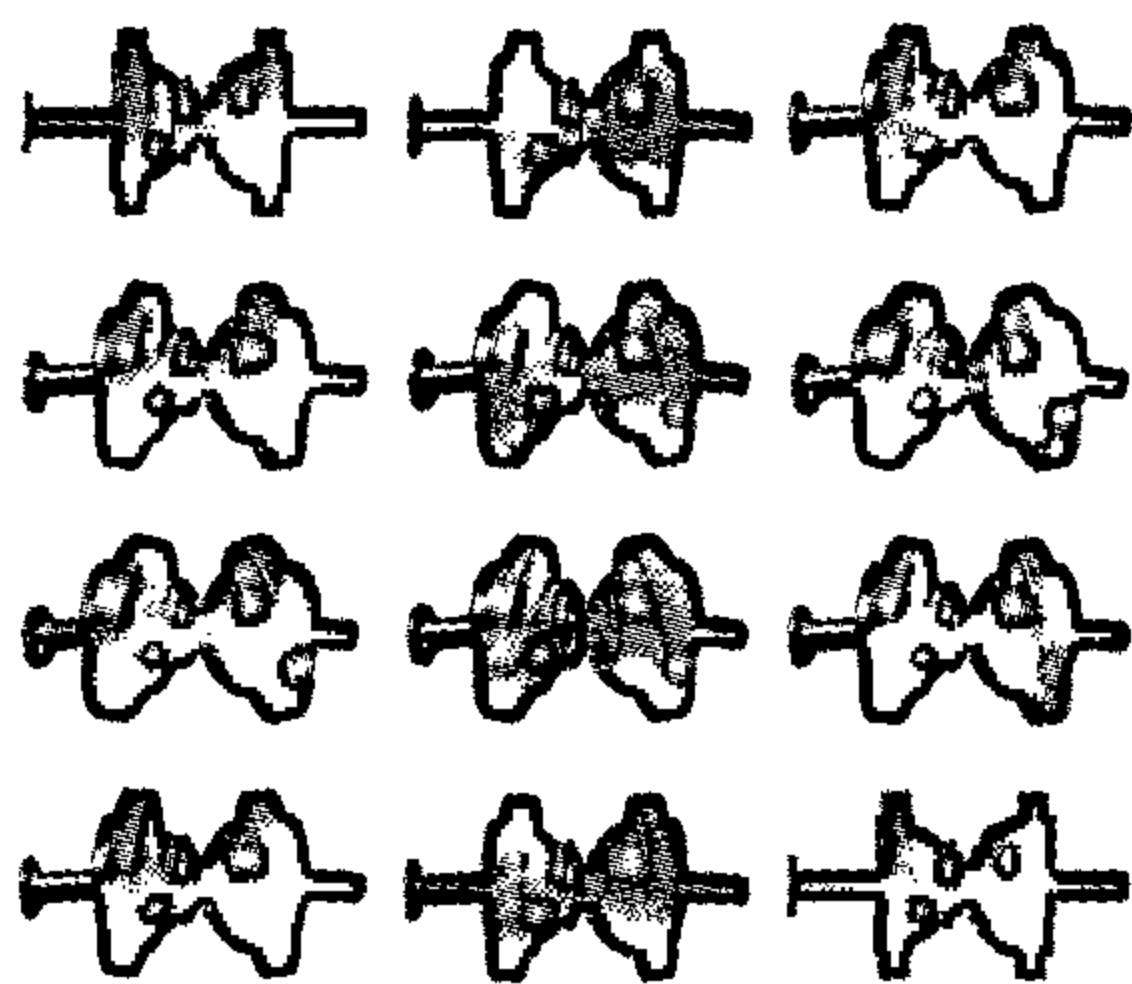


图5 模型仿真

结论形式简单,取值完整,避免了复杂的人工方位判断,提高了计算效率,既从理论上解决了仿生关节运动学问题,又为机构的动力学分析打下良好的基础。

参考文献:

- [1] 潘存云. 渐开线环形齿球齿轮传动原理与运动分析[J]. 机械工程学报, 2005, 41(5): 1-9.
- [2] 张启先. 空间机构的分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984: 75-76.

(编辑 马尧发)

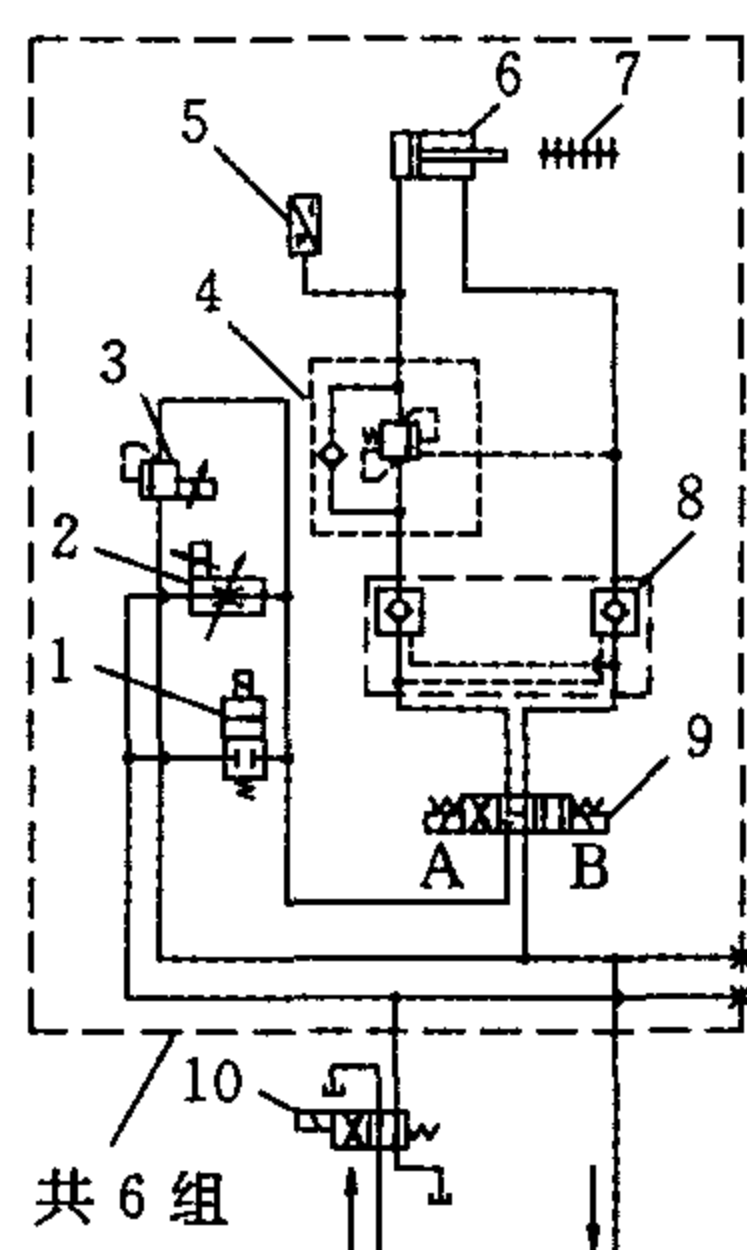
作者简介:张立杰,男,1976年生。国防科学技术大学机电工程与自动化学院博士研究生。研究方向为机械设计及理论。潘存云,男,1955年生。国防科学技术大学机电工程与自动化学院教授、博士研究生导师。陶 涵,男,1982年生。国防科学技术大学机电工程与自动化学院硕士研究生。李明宇,男,1980年生。国防科学技术大学机电工程与自动化学院博士研究生。

着整个盾构的顶进任务。要求完成盾构的转弯、姿态控制、纠偏以及同步运动等。

盾构推进系统的控制目标是在克服推进过程中遇到的推进阻力的前提下,根据掘进过程中所处的不同施工地层土质及其土压力的变化,对推进速度及推进压力进行无级协调调节,从而有效地控制地表沉降,减少地表变形,避免不必要的超挖和欠挖。常规的压力控制能引起流量剧烈波动,导致盾构推进速度不稳定;常规的流量控制又会引起压力振荡,使得液压缸推进压力不一致,从而加剧土体扰动,增加地表变形^[2,3]。因此,单纯的压力控制或流量控制很难同时满足盾构在非线性变负载工况下对推进压力和推进速度的复合控制要求。基于此,本文设计了一种采用压力流量复合控制的盾构推进液压系统,并对其控制特性进行了实验分析。

1 盾构推进液压系统设计

盾构推进液压系统比较复杂,属于变负载、大功率、小流量的应用场合。本系统在主油路上采用变量泵实现负载敏感控制;对于 6 个执行元件——液压缸,则模拟实际盾构的控制方式,将其分为 6 组,进行分组控制。各个分组中的控制模块都相同,均由比例溢流阀、比例调速阀、电磁换向阀、辅助阀及相关检测元件等组成。图 1 为推进液压系统单个分组工作原理简图。



- | | |
|--------------|---------------|
| 1. 二位二通电磁换向阀 | 2. 比例调速阀 |
| 3. 比例溢流阀 | 4. 平衡阀 |
| 5. 压力传感器 | 6. 液压缸 |
| 7. 内置式位移传感器 | 8. 液压锁 |
| 9. 三位四通电磁换向阀 | 10. 二位四通电磁换向阀 |

图 1 推进液压系统工作原理简图

盾构推进时,二位二通电磁换向阀 1 断电,系统压力油经比例调速阀 2 流出,此时三位四通电磁换向阀 9 切换到工作状态 B 位置,液压缸 6 的活塞杆向前运动。推进过程中,液压缸 6 中的内

置式位移传感器 7 实时检测推进位移,转换成电信号反馈到比例调速阀 2 的比例电磁铁上,控制比例调速阀 2 中节流口的开度,从而实现推进速度的实时控制,此时系统中多余的流量可从比例溢流阀 3 中流出。为了实现姿态调整,还必须实时控制推进压力,此时可由压力传感器 5 检测液压缸 6 的推进压力,转换成电信号反馈到比例溢流阀 3 的比例电磁铁上,控制比例溢流阀 3 的节流口开度来实现。分组中的比例溢流阀 3 和比例调速阀 2 与压力传感器 5 和位移传感器 7 一起构成压力流量复合控制,可实时控制推进系统的推进压力和推进速度^[4]。

快速回退时,二位二通电磁换向阀 1 通电,短路比例调速阀 2,系统采用大流量供油,此时三位四通电磁换向阀 9 切换到工作状态 A 位置,液压缸 6 的活塞杆快速回退,以满足管片拼装的要求。

各个分组中的液压锁 8 与具有 Y 形中位机能的三位四通电磁换向阀 9 组成在一起成为锁紧回路,可很好地防止液压油的泄漏。液压缸单独退回时,平衡阀 4 能起到运动平稳的作用。

需要多个液压缸同时动作时,二位四通电磁换向阀 10 断电,主油路暂时断开,待多个液压缸控制信号到位后,再使二位四通电磁换向阀 10 通电,主油路导通,从而使得多个液压缸同时工作。

2 盾构推进液压监控系统开发

根据盾构推进液压系统的功能,兼顾系统的安全性、经济性、相容性以及可扩展性,采用 PLC、工控机以及组态软件组成分布式监控系统。其中,PLC 完成底层设备控制,组态软件完成人机界面接口以及实验数据的采集和管理功能。

2.1 推进液压系统 PLC 硬件结构

推进液压系统监控对象包括 2 个电机、7 个压力传感器、6 个位移传感器、6 个比例调速阀、6 个比例溢流阀、13 个电磁换向阀以及一些传感器和控制按钮。其 PLC 硬件结构如图 2 所示。上位机和下位机 PLC 之间通过串口通信连接,并同盾构其他系统的上位机组成基于 TCP/IP 协议的计算机局域网。上位机控制系统主要用于推进系统的参数设置,各种设备的检测控制,数据的采集、分析和处理,采用液晶触摸屏,方便操作人员的使用和维护。

作为底层控制的 PLC 和下行设备之间采用了 CC-Link 方式进行通信。CC-Link 作为一种包容了最新技术的开放式现场总线,可以将控制和信息数据同时以 10MB/s 高速传输,具有性

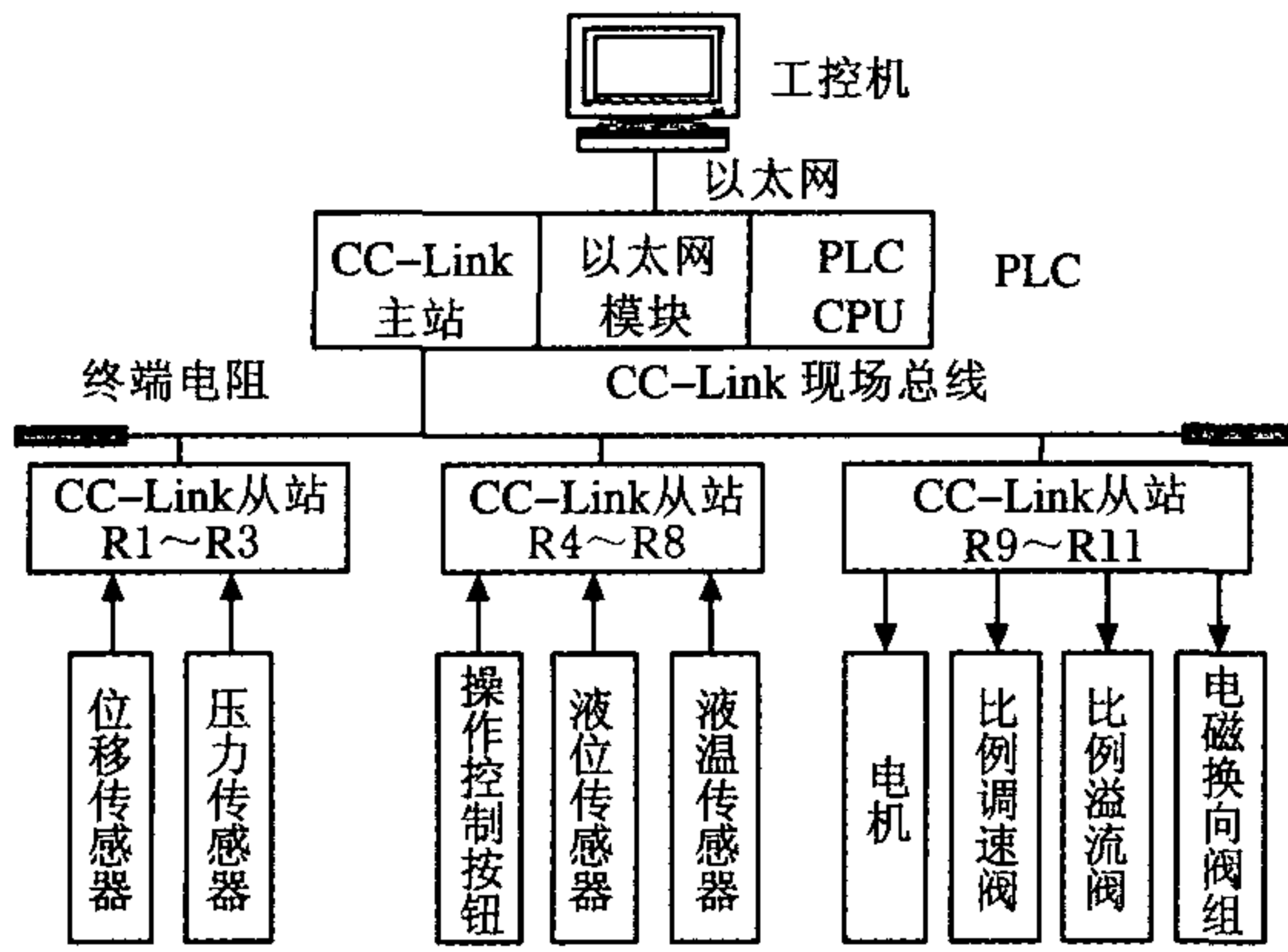


图 2 推进液压系统 PLC 硬件结构图

能可靠、应用广泛、使用简单和节省成本等优点。在硬件方面,只需采用屏蔽双绞线按照总线方式即可连接各控制设备。另外,CC-Link 还提供了 110Ω 的终端电阻,用于避免在总线的距离较长和传输速度较快的情况下,由于外界干扰出错^[5]。系统中 CC-Link 主站与 PLC 的 CPU 模块均安装在主控制柜中。CC-Link 从站按照盾构系统的功能与位置安装在不同的控制柜中,其中推进系统控制柜中安装了 11 个远程模块,用于控制推进设备和采集相关数据,包括控制 6 个液压缸的伸缩、推进总阀的开关和液压缸的比例调速调压,以及采集 6 个液压缸的推进位移、推力速度、推进压力等模拟量和推进过滤器堵塞、推进油箱液位低和极低、推进油箱液温高和极高等状态量数据。

2.2 推进液压系统 PLC 控制设计

推进系统中 PLC 控制元器件选用的是日本 Q 系列产品,CPU 型号为 Q02CPU,支持普通 PID 控制以及浮点运算。通过 RS-232,QCPU 实现了最高 115.2kB/s 的通信,高速通信缩短了程序的读写和监控时间,提高了调试时的通信效率。系统采用 GX Developer V8 进行程序编写。编程过程中采用梯形图方式,并适用模块化结构,使得各部分互不干扰,也便于修改和维护^[6]。

控制系统中,PLC 的输入主要是控制按钮和传感器信号,输出则主要为电磁阀线圈控制信号。由于推进液压系统中要控制的元器件比较多,而且每个液压缸均有推进、回退动作,多个液压缸的同步推进、回退等动作,并有比例调速调压等要求,因此在控制面板上设置了推进电机启动/停止按钮,推进总阀(即原理图 1 中的二位四通电磁换向阀 10)合/分按钮、液压缸前进/回退开关以及 6 个液压缸的调速及调压开度旋钮。6 个液压缸的单缸或多缸动作状态则通过触摸屏在组态王中进

行选择,冷却电机的启动可通过 PLC 程序自动触发,也可在组态王中通过触摸屏手动选择。

系统通电后,PLC 采用循环扫描方式。首先是模块初始化,主要包括 A/D 转换模块以及 D/A 转换模块的初始化;接着启动推进电机;然后是故障报警判断,故障报警包括推进油箱油温极高、推进油箱液位极低、压力管路过滤器堵塞以及主油路油压高 4 种情况,通过相应的传感器检测到的数据与组态王中预先设置的极限值进行比较,通过后接着在触摸屏上进行液压缸选择,此时可选择 1 号~6 号液压缸的任何一个或多个。

图 3 为采用 PLC 编译的一段关于液压缸推进速度 PID 闭环控制程序图。图 3 中,左侧数据为行号,第 10 行起的一段程序为推进调速模式选择,其中 0 为自动,1 为手动。选中旋钮 X12 后,自动调速模式起作用。第 30 行起为 PID 控制运行前控制数据设定,其中,第 1 行和第 2 行是设定为 1 个闭环调节回路使用数量和执行数量,第 3 行是设定调节回路执行方式,第 4 行是设定采用周期为 100 ms,第 4 行到第 7 行是设定好 PID 的比例常数、积分常数和微分常数值,最后两行是设定 PID 输出值的上限和下限定值。第 120 行是设定好 PID 控制数据区从 D500 到 D511。第 130 行为 PID 运行时相应的输入输出数据设定,其中,第 1 行是设定好速度设定值为 800,第 2 行是把检测到的速度值放入数据寄存器 D4081 中,第 3 行是进行自动/手动方式旋转。第 160 行表示 PID 正式运行。

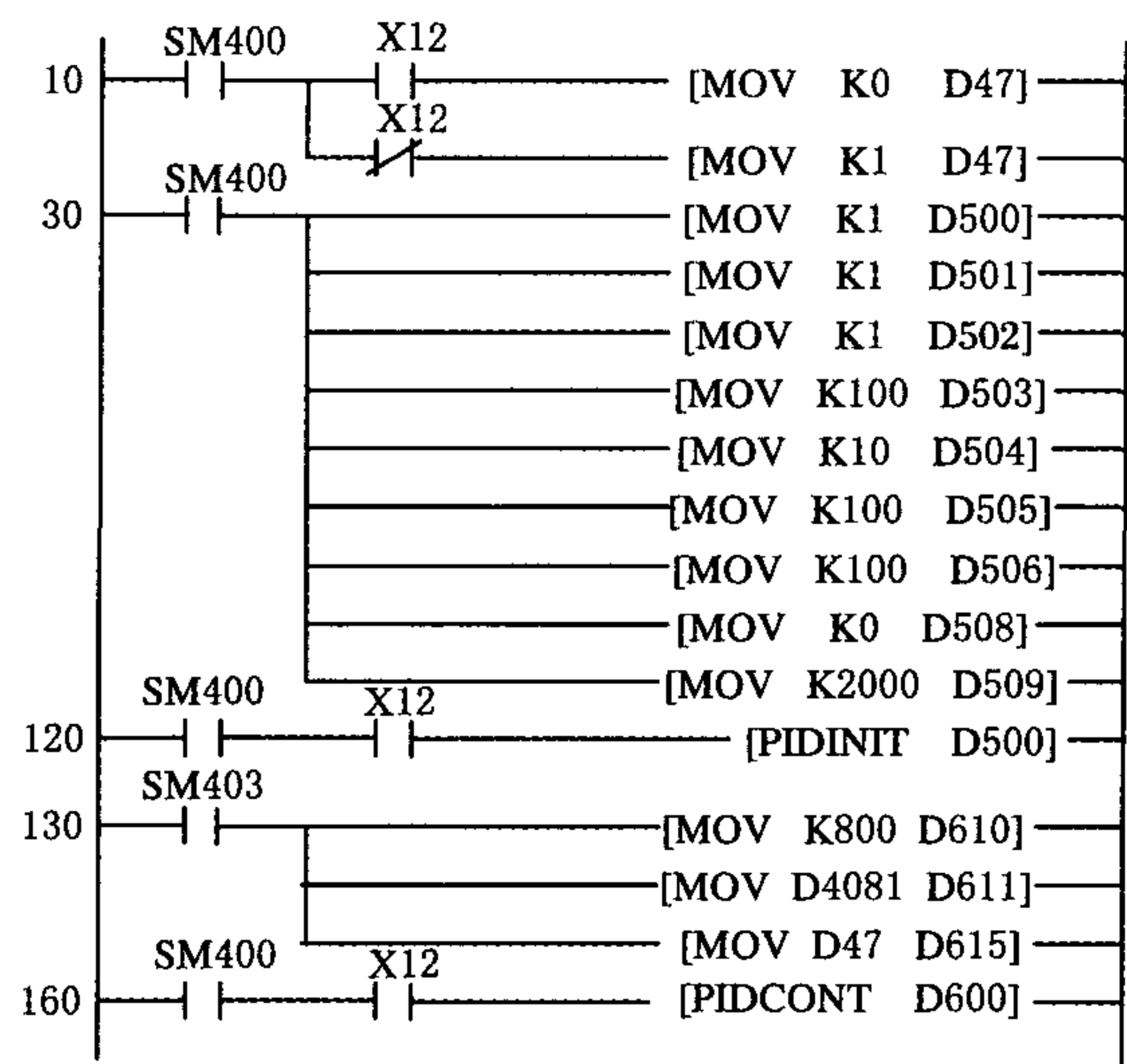


图 3 PID 闭环控制 PLC 程序

2.3 推进控制系统软件组态

上位机中使用的组态软件是国内自行开发的工业组态软件——组态王。组态王具有图形、动画功能,使用组态王可以方便地构造适合需要的

数据采集管理系统^[7]。

使用组态王进行推进控制系统软件组态时,其监控界面主要包括系统结构、推进画面、参数设置界面、实时曲线界面、报警界面以及历史曲线界面等。通过监控画面、报表、报警数据库等方式,操作人员可以及时了解系统当前工作状态、出现的故障及其产生原因,根据需要对比当前情况,并进行适当的调整,以保证推进工作稳定进行。

图 4 为采用组态王软件设计的推进控制系统的推进画面,画面中使用各种动画和文字信息描述了推进过程中的工作状态,主要分为 4 个部分。其中,部分 1 为 6 个液压缸的工作状态,可分别显示 6 个液压缸的推进压力、推进位移、推进速度以及比例调速调压的百分比等;部分 2 为模拟量 PID 闭环控制信息,可在线显示设定值、反馈值以及输出值,从而方便操作者进行调整;部分 3 为显示推进电机的运行状态;部分 4 为在线显示当前工作的液压缸个数。把这些信息放在同一个画面有利于操作者迅速定位信息。

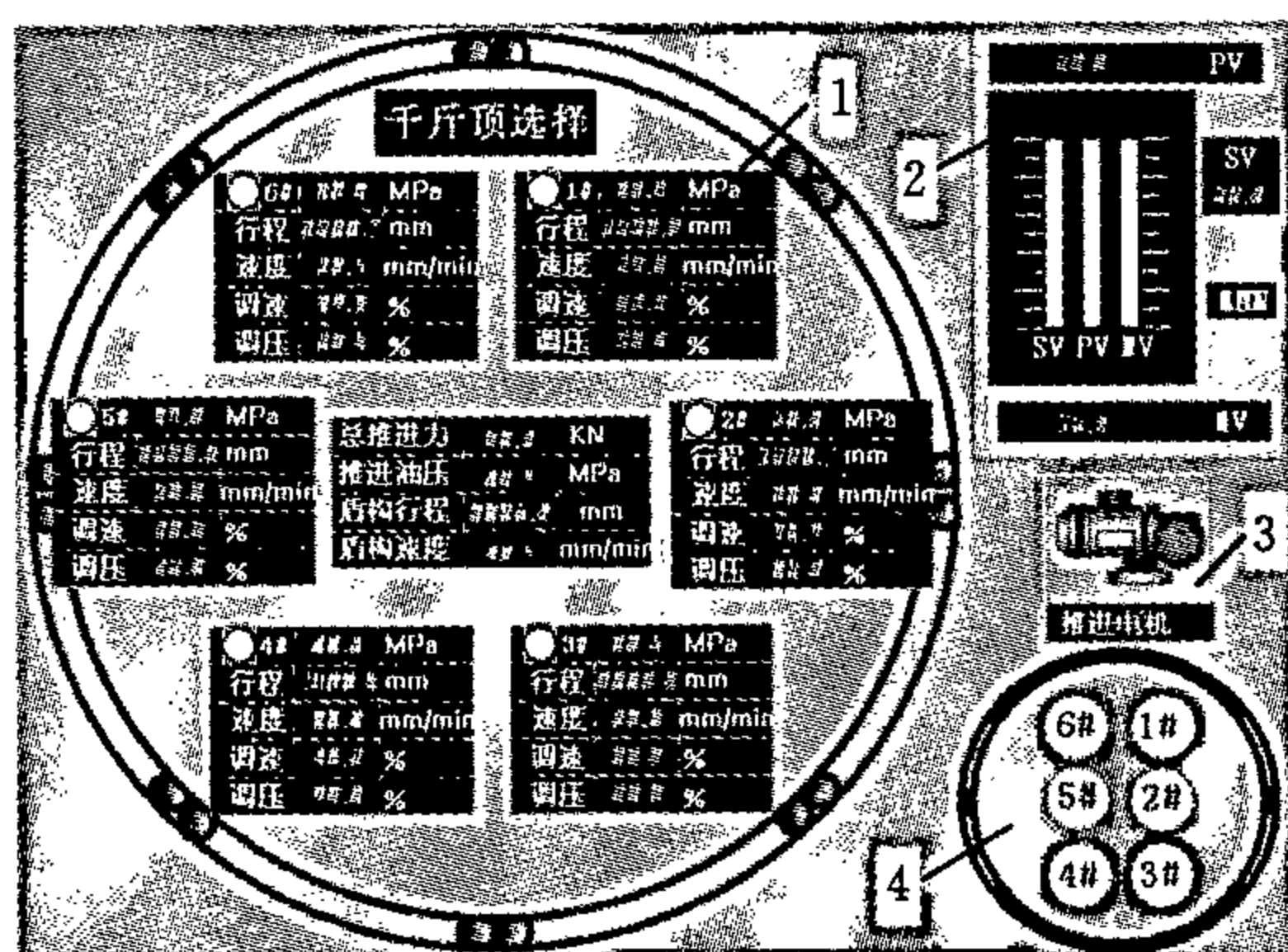


图 4 推进控制系统组态画面

从图 4 还可以看出,推进画面中包含了所有推进过程中要用到的操作按钮以及所有重要参数与状态的显示,这使得在推进过程中不用进行频繁的画面切换。

各个画面之间的切换是通过动画连接来实现的。例如系统要切换到推进画面时,在组态王开发环境下双击推进画面按钮,出现动画连接对话框,点击动画连接中的命令语言连接选项弹起时,出现命令语言显示窗口,然后在命令语言窗口中输入命令语句 ShowPicture(推进画面),即可实现画面动画连接。

对于控制而言,可以把按钮的动作关联到脚本语言,在脚本语言中对 I/O 变量进行赋值等操作,从而把控制命令发送到底层控制器 PLC,再由 PLC 完成相关的控制动作。例如,在用按钮进行控制时,所使用的 I/O 变量是 b , b 所关联的

PLC 寄存器是 M300。而 PLC 程序中把 M300 作为按钮进行处理,即认为 M300 被置为 1 以后,会马上变为 0。这样,如果在组态程序中控制时仅仅使变量 b 置位就会出现这个问题。在这种情况下,按钮应该关联两个动作:按钮按下时,变量 b 置为 1;按钮弹起时,变量 b 置为 0。

3 推进控制实验分析

实验在盾构模拟试验台上进行,该模拟试验台由一个直径为 1.8m 的盾构机和一个长 8.6m 的模拟土箱组成。盾构由推进系统驱动向前推进;模拟土箱采用囊袋加压的方法来模拟地下 10m 深的掘进情况。由于实验是在粘土层中进行的,所需推进力并不大,所以只采用了 3 号和 4 号两个左右对称的液压缸进行推进,此时刀盘转速控制在一定值切削泥土,根据检测到的密封仓内压力值来实时控制螺旋输送机的转速进行排土操作。

图 5 和图 6 是调速时单个分区液压缸的推进速度和推进压力曲线图。选择的是 4 号液压缸,实验开始时调节面板上的调速旋钮,将推进速度调节到 30mm/min,200s 后继续逆时针方向调节速度旋钮,将速度调节到 42mm/min。

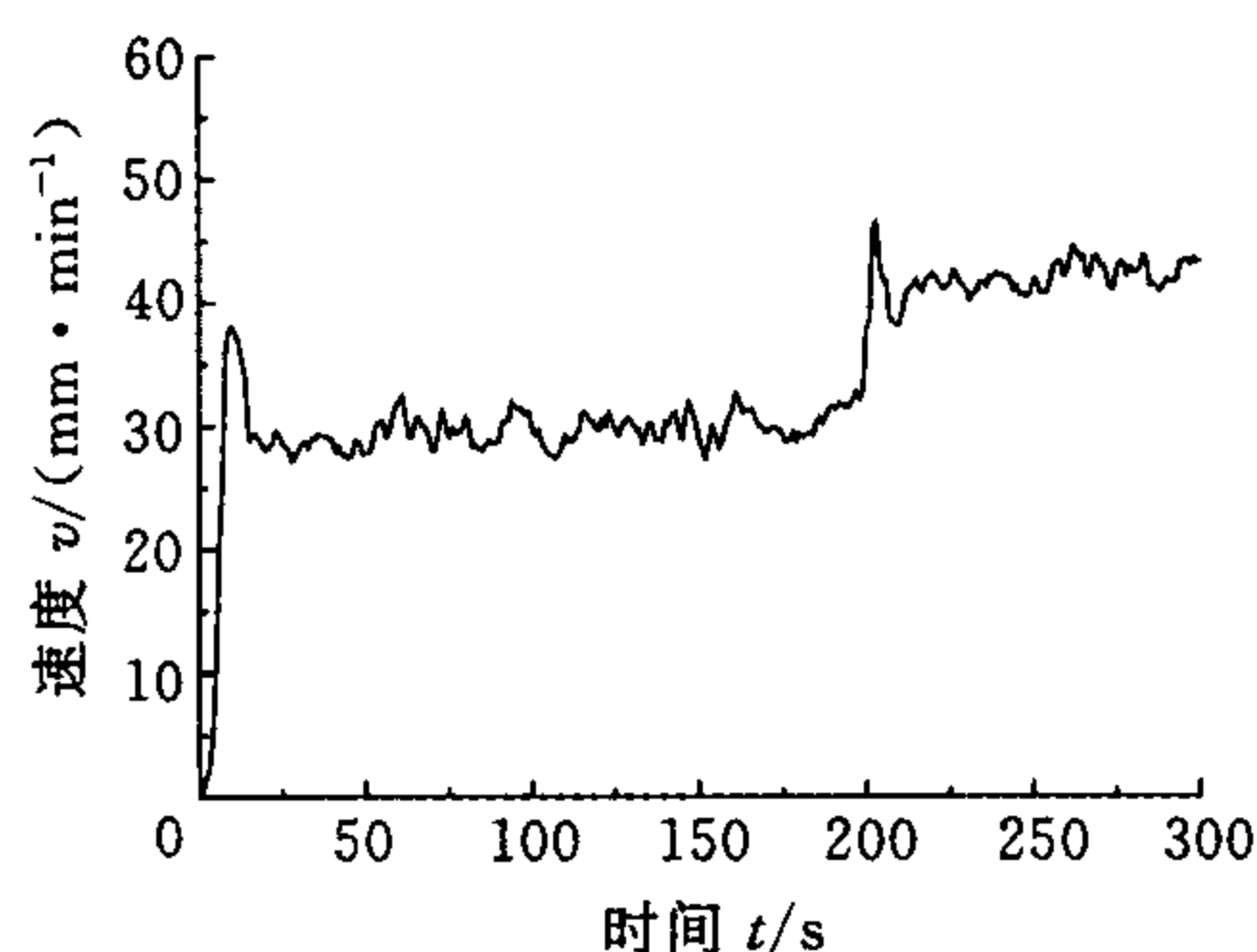


图 5 液压缸推进速度

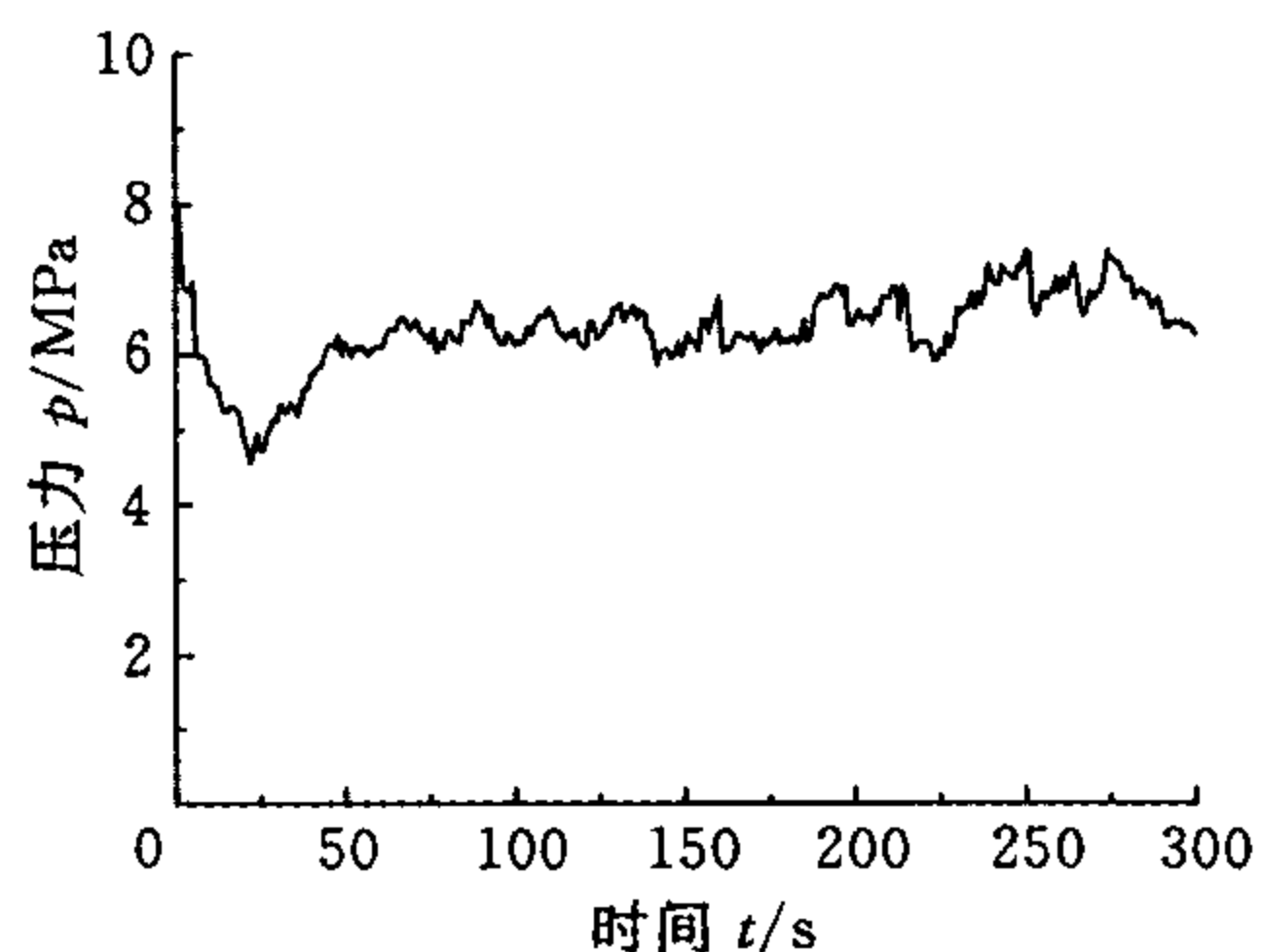


图 6 液压缸推进压力

从图 5 可知,盾构推进速度从 0 到 30mm/min 的调节过程中,有一个超调,在 10s 左右达到最大 40mm/min。这是因为推进过程中前方负载为软土层土体,若把土体假定为一个粘弹

性系统的话,其刚度和粘性都比较大,这是影响推进速度的一个重要因素,另外整个盾构机总体质量大,惯性大,因此响应较慢。在 200s 进行调速时,从图 5 可以看出,推进速度由原来的速度 30mm/min 变为 42mm/min,实现了速度的调节,但由于诸多不可预见的影响因素,推进速度还会在一定范围内波动。

图 6 为液压缸推进压力曲线图。盾构开始掘进时压力比较大,然后有一个减小再逐渐稳定的过程,这是由于盾构开始掘进时,需要克服盾构前进的静摩擦力,并且需要克服盾构整个惯性系统,开始掘进后,系统只有动摩擦力,这时盾构惯性系统的速度超过设定速度,液压缸压力因此减小,最终达到稳定。在 200s 进行推进速度调节时,推进速度能很好地跟随调节信号运行,然而这时液压缸压力出现波动,波动均值比调节前大,这是由于推进速度要上升,必须有液压缸推进压力提供动力,只有更大的力,才能提高盾构加速度,使盾构速度增大,当速度达到设定值后压力下降,最终稳定在一定范围内。

图 7 和图 8 是调压时左右两个对称分组中液压缸的推进压力和推进速度曲线图。选择的是 3 号和 4 号两个液压缸。实验刚开始时调节面板上的调压旋钮,100s 后开始进行调压实验,根据加载情况将 3 号液压缸的推进压力从 4MPa 调节到 7.5MPa。从图 7 可以看出,推进系统在 100s 调压时,压力有一个超调,大约在 170s 后推进压力逐渐达到稳定状态。在 100s 进行压力调节时,推进压力基本上能跟随调节信号运行,此时液压缸推进速度有个瞬间增大的过程。这是由于推进压力要上升,必须有系统提供更大的流量,使推进系统加速度增大,当压力达到设定值后推进速度逐渐下降,最终稳定在一定的范围内。

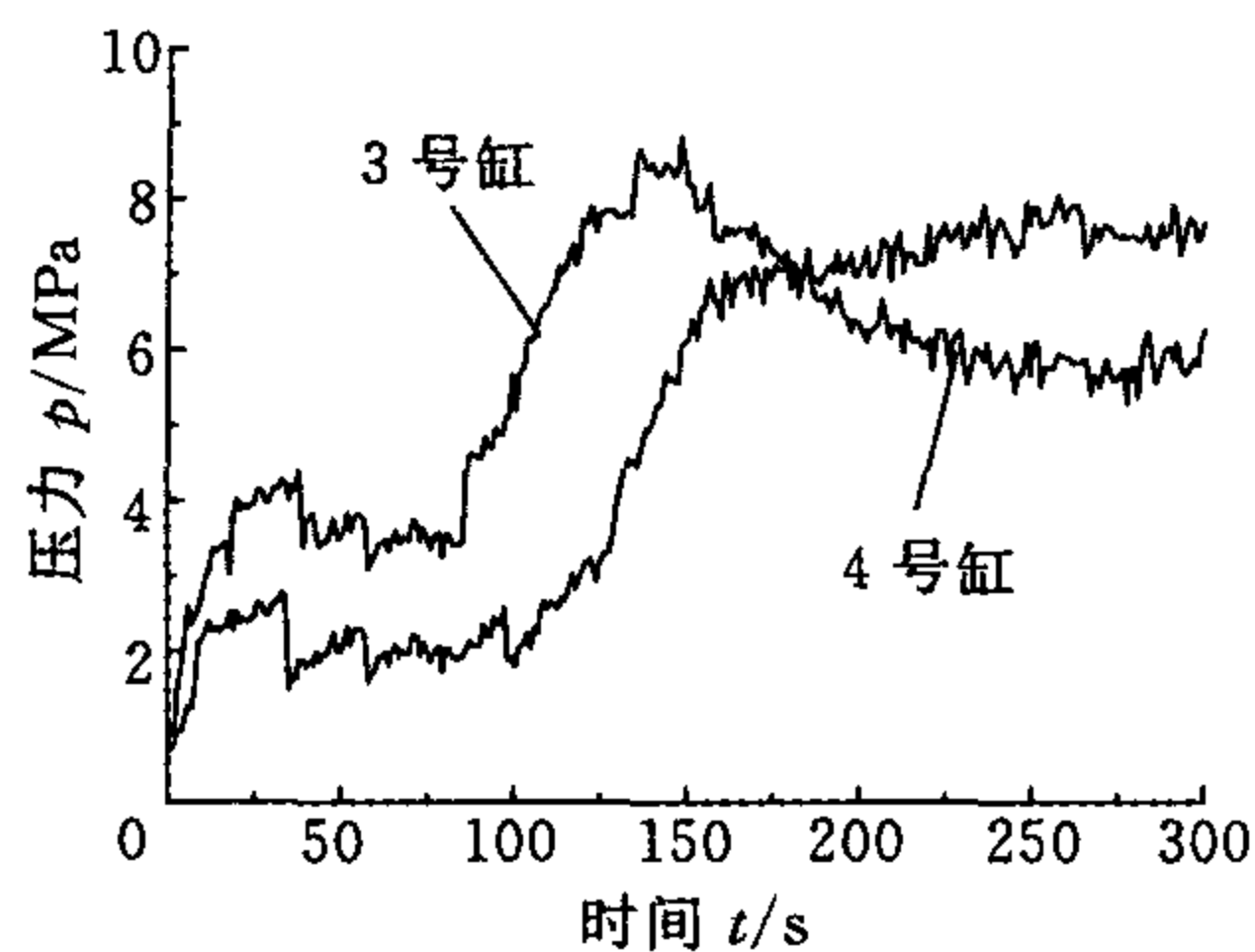


图 7 液压缸推进压力

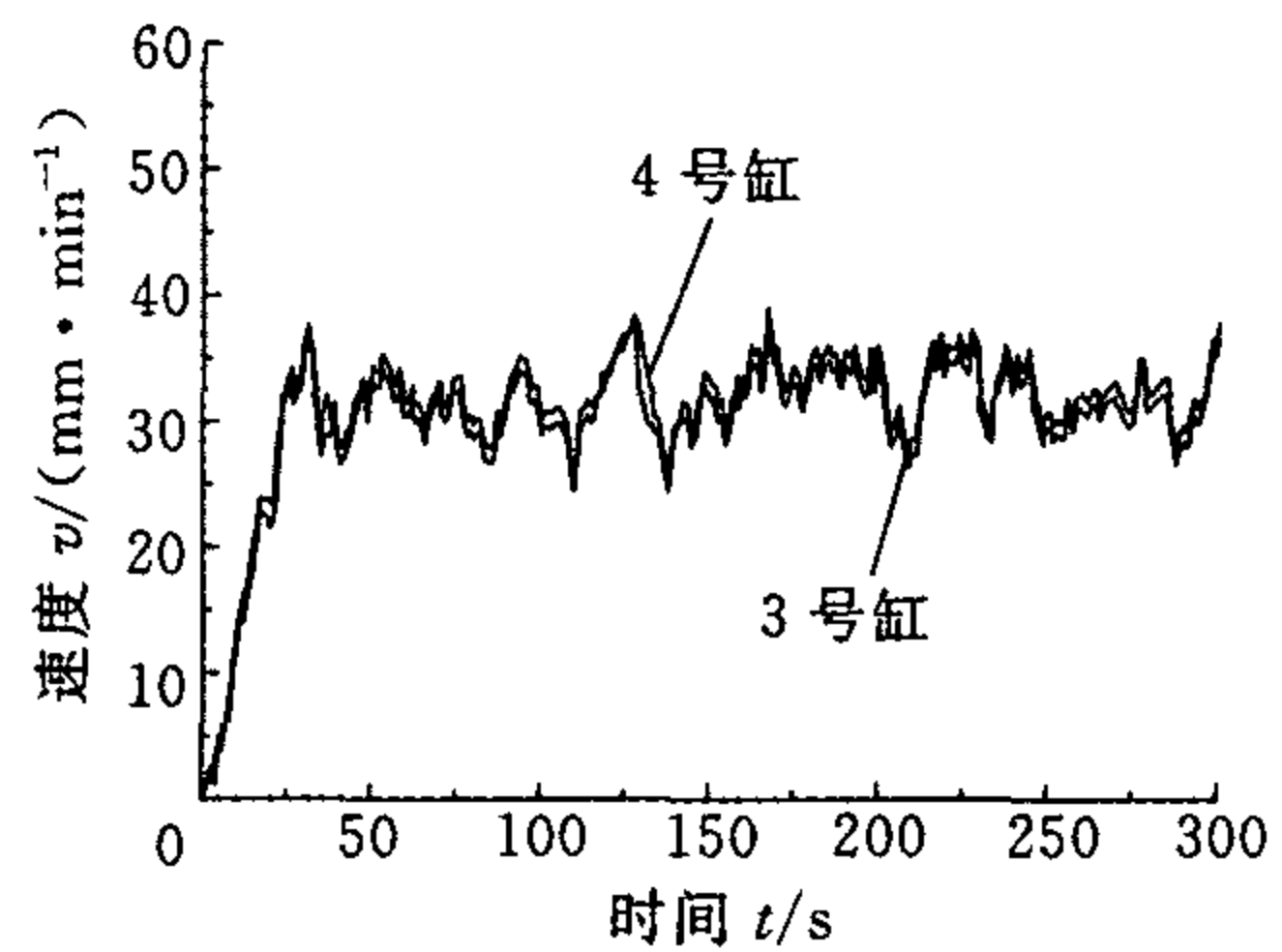


图 8 液压缸推进速度

统的推进压力和推进速度。对推进速度进行调节时,推进速度能根据调节信号很好地进行响应,而推进压力没有受到影响。反之,对推进压力进行调节时,推进压力也能根据调节信号很好地进行响应,而推进速度的波动较小。本文所设计的推进电液控制系统能实时控制推进压力和推进速度,同时可显著减少速度压力调节的相互干涉,能较好地满足盾构在不同地质情况下推进控制的基本要求。

参考文献:

- [1] 杨华勇,龚国芳. 盾构掘进机及其液压技术的应用[J]. 液压气动与密封,2004(1):27-29.
- [2] 刘东亮. 电液比例技术在盾构推进系统中的应用[J]. 建筑机械,2005(8):93-95.
- [3] 阳军生,刘宝琛. 城市隧道施工引起地表移动及变形[M]. 北京:中国铁道出版社,2002.
- [4] 胡国良,龚国芳,杨华勇,等. 盾构掘进机推进液压系统压力流量复合控制分析[J]. 煤炭学报,2006,31(1):125-128.
- [5] 覃强,刘长发. 开放式现场总线 CC-Link 综述[J]. 仪器仪表标准化与计量,2003(1):114-13.
- [6] 杨扬,龚国芳,胡国良,等. PLC 在模拟盾构推进液压系统中的应用[J]. 液压与气动,2005(5):45-47.
- [7] 马国华. 监控组态软件及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2001.

(编辑 马尧发)

作者简介:龚国芳,男,1963 年生。浙江大学流体传动及控制国家重点实验室教授。主要研究方向为电液控制系统集成、工程材料摩擦学特性及其在液压元件中的应用等。获国家科技进步二等奖 1 项、省部级科技进步一等奖 2 项。发表论文 30 余篇。
胡国良,男,1973 年生。华东交通大学机电工程学院讲师、博士。
杨华勇,男,1961 年生。浙江大学流体传动及控制国家重点实验室教授、博士研究生导师。

4 结论

采用压力流量复合控制可很好地控制推进系