

基于压力流量复合控制的盾构推进液压系统*

胡国良 龚国芳 杨华勇

(浙江大学流体传动及控制国家重点实验室 杭州 310027)

摘要: 推进系统是盾构的关键系统之一。设计了一种基于压力流量复合控制的盾构推进液压系统,对推进液压缸进行了分区控制,阐述了推进液压系统的工作原理及其控制方式。利用 AMESim 仿真软件对推进液压系统的压力和流量特性进行了仿真分析,并在工程应用中进行了推进试验,仿真和工程实际应用表明所设计的推进液压系统可实时控制推进压力和推进速度,可以满足盾构的掘进要求。

关键词: 盾构 推进液压系统 压力流量复合控制 AMESim 仿真

中图分类号: TH137

0 前言

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^[1-2]。

随着南水北调、西气东输等国家重大工程的开展,迎奥运北京地铁建设速度的加快,上海、广州等其他大中城市轨道交通的迅猛发展,对盾构的需求越来越大。国家下决心要开发利用盾构技术,整合各方面的技术力量,促进盾构技术的发展^[3]。

推进系统承担着整个盾构机械的顶进任务,要求完成盾构的转弯、曲线行进、姿态控制、纠偏以及同步运动,使得盾构能沿着事先设定好的路线前进,是盾构的关键系统之一^[4]。推进系统的控制目标是在克服盾构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水土压力的变化,能够对推进压力和推进速度进行无级协调调节,使盾构在掘进过程中引起的地表沉降量控制在要求范围,且能使施工隧道与隧道设计轴线的偏差控制在允许范围内^[5]。

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,从而导致盾构超挖,加剧土体扰动,增加地表变形。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,设计出一种基于压力流量复合控制的

盾构推进液压系统,能实时调节施工过程中的推进压力和推进速度,并在仿真和工程实际应用的基础上进行了分析研究。

1 盾构推进液压系统设计

1.1 推进液压缸分区的确定

推进液压缸安装在盾构密封仓隔板后部,沿盾体周向均匀分布,作用在管片上,是推进系统的执行机构。其动力源由安装在盾构后部的液压泵提供,并通过液压阀的控制来实现各种功能。

盾构推进动力传递和控制具有大功率和变负载等特点,所需的液压缸数量较多,如果每个液压缸都单独控制的话,成本就很高,而且控制比较复杂。为此采用分区控制,即将为数众多的推进液压缸按圆周均匀分成几个区。对每区的液压缸分别进行控制。如图 1 所示,推进系统将 32 个液压缸分为 A、B、C、D 四个区,根据上下土层和水压的不同,选择 B 区中液压缸个数比 D 区多。通过理论计算^[6],A 区和 C 区各有 8 个液压缸,B 区有 10 个液压缸,

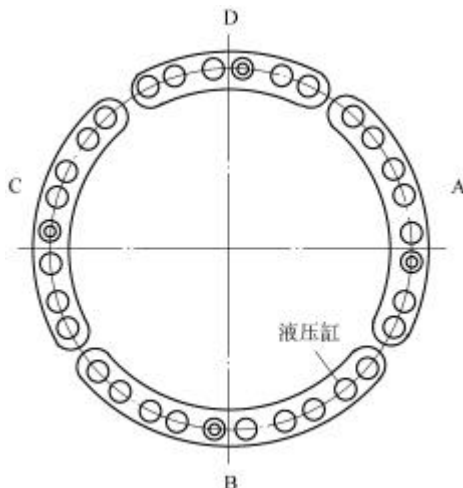


图 1 推进液压缸分区布置图

* 国家杰出青年科学基金(50425518)和国家 863 高技术研究发展计划(2003AA420120)资助项目。20050720 收到初稿,20051210 收到修改稿

D区则有6个液压缸。液压缸分区控制既可以节约成本、减少控制复杂程度，又可以达到盾构姿态调整、纠偏的目的；另外分成四区可以清楚简单的计算总力矩，从而决定盾构的爬坡和转弯的快慢。

1.2 推进液压系统工作原理

推进液压系统采用带电比例溢流阀的恒压变量泵作为动力源，向四个分区同时供油，由于采用了分区控制，四个分区只是在盾构截面的分布位置不同，其控制方式和工作原理则完全相同。图2为推进液压系统C区工作原理简图。

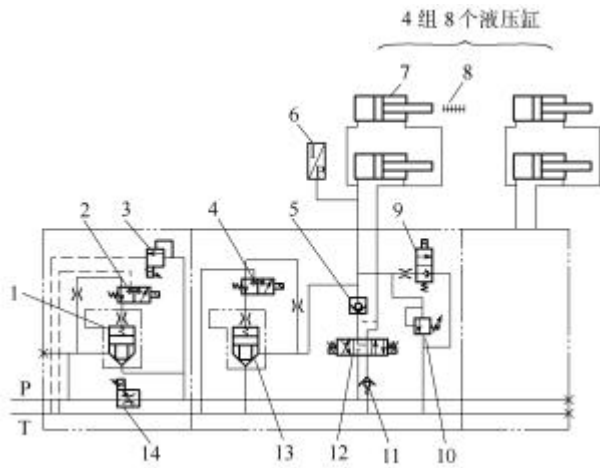


图2 推进液压系统单个分区工作原理简图

- 1. 插装阀 2. 二位三通电磁换向阀 3. 比例溢流阀
- 4. 二位三通电磁换向阀 5. 液控单向阀 6. 压力传感器
- 7. 液压缸 8. 内置式位移传感器 9. 二位二通电磁换向阀
- 10. 溢流阀 11. 单向阀 12. 三位四通电磁换向阀
- 13. 插装阀 14. 比例调速阀

盾构推进时，比例溢流阀3调节液压缸推进压力，与压力传感器6实时检测的压力构成压力闭环反馈控制，实时控制推进压力；比例调速阀14调节进入系统的流量，与安装在液压缸7内的内置式位移传感器8检测到的位移构成速度闭环反馈控制，实时控制推进速度。插装阀1和二位三通电磁换向阀2可短路比例调速阀14，实现推进液压缸的快速运动，从而减少液压油进入液压缸的沿程压力损失。插装阀13和二位三通电磁换向阀4则用来实现推进液压缸快速回退，减小液压油回程阻力。三位四通电磁换向阀12用来完成工作状态的切换，可实现推进液压缸的前进、后退和停止状态。溢流阀10用来实现系统过载保护，推进瞬间液压缸进口口会出现瞬时过载，此时溢流阀10立即开启形成短路，进、回油路自循环，使过载油路得到缓冲。二位二通电磁换向阀9用来实现故障停机时液压缸卸载检修，可减小卸载中的压力冲击。二位二通电磁换向阀9前的阻尼孔可防止二位二通电磁换向阀9卸载时产

生的压力冲击。插装阀前的阻尼孔用来调节插装阀的开启速度，改变插装阀的静动态特性和减小液压冲击。阻尼孔直径一般取0.8~2.5 mm。

1.3 推进液压系统控制方式

图3为推进液压系统控制模式框图，系统中恒压变量泵与四个分区中的比例调速阀组成容积节流调速回路，变量泵根据比例调速阀的设定值自动适应系统需要的流量。四个分区中的推进液压缸压力 P_A 、 P_B 、 P_C 、 P_D 通过压力传感器进入一个比较环节，其最大值为驱动负载所需的最高压力 P_{max} 。在推进模式下，变量泵输出压力 $P = P_{max} + p$ ，其中 p 是保证比例调速阀稳定工作时所需的压力差，该压力差为设定值。变量泵的输出压力 p 跟随负载变化，压力变化是阶段性的。这种反馈控制一定程度上相当于压力自适应，可减少系统压力损失，降低能耗。

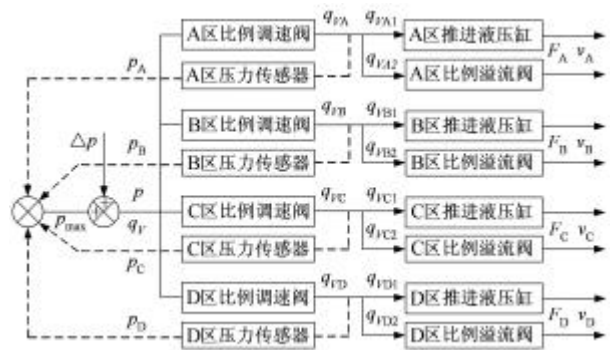


图3 推进液压系统控制模式框图

对于各个分区来说，推进液压缸的输入压力受比例溢流阀调定压力的限制。比例溢流阀的电位器安装在操作室的控制面板上，根据激光导向系统反馈的盾构机姿态情况，操作人员可随时调整推进液压缸的压力。系统中四个分区比例调速阀输入信号始终相等，即同线输入。在某一静态，比例调速阀的输入输出流量为定值，相当于定量系统，比例调速阀的输入信号决定液压缸的最大推进速度，负载阻力的大小是决定推进速度的另一个因素。四个分区的液压缸推进力共同作用在刀盘上，推进力大的区域有使推进速度加快的趋势。因此在最大推进速度确定的前提下，推进液压缸的推进速度与总推进力的大小有关系，如对推进液压系统C区来说，有 $q_{VC} = q_{VC1} + q_{VC2}$ ，其中 q_{VC2} 为比例溢流阀的溢流量，该溢流量受推进压力的影响，而推进压力又与总推进力有关。

由上面分析可知，推进系统既要满足盾构推进力的要求又要完成盾构推进速度的控制任务，单纯的压力控制系统或速度控制系统均无法满足其要求，必须把两种控制方式综合起来共同完成盾构的控制任务。故此，将电液比例控制技术应用于推进

系统，对各分区中的推进液压缸进行压力流量复合控制，其控制原理如图 4 所示。

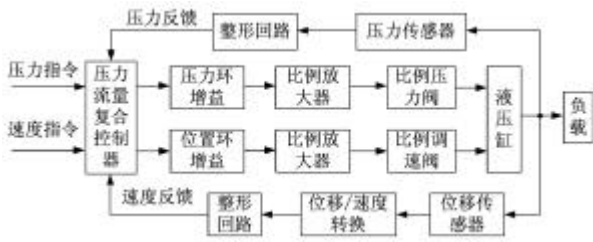


图 4 推进液压系统压力流量复合控制原理图

考虑电液比例阀本身的控制特性，采用比例电磁铁作为电—机械转换器，元件具有复杂的控制特性，死区、滞环和非线性等现象较为严重^[7]。若在电气控制系统中把它们当成理想的线性环节来处理的话，就不可能达到控制目的；另外实际施工过程中工况也非常复杂。因此推进过程中，在压力流量复合控制器中采用了在线自调整模糊 PID 控制策略，使得推进压力和推进速度实时可调。

2 盾构推进液压系统仿真分析

盾构推进时，系统的插装阀 1 处于关闭状态，三位四通电磁换向阀 12 切换到右位，液压油通过比例调速阀 14 和三位四通电磁换向阀 12 进入液压缸无杆腔，液压缸有杆腔的压力油通过三位四通电磁换向阀 12 和比例溢流阀 3 流回油箱。因此，建模仿真时可省略插装阀 1，插装阀 13 以及三位四通电磁换向阀 12，主要分析比例溢流阀、比例调速阀、液压缸以及负载间的动态关系。

图 5 为应用 AMESim 建立的推进液压系统 C 区仿真模型。图中 1 为采用 HCD(液压零件设计)库中基本零件搭建好的比例溢流阀机械模型，2 为比例调速阀的机械模型。仿真中液压缸的推进速度设定为 46 mm/min，320 s 后调为 52 mm/min；液压缸的推进压力设定为 5.2 MPa，负载力为 12 361 N。

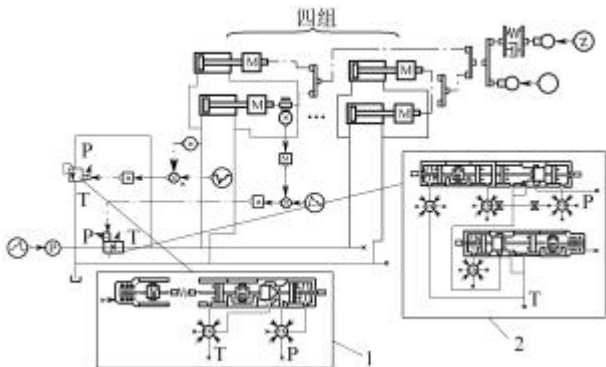


图 5 推进液压系统 C 区 AMESim 仿真模型

1. 比例溢流阀机械模型 2. 比例调速阀机械模型

图 6 为 C 区液压缸推进速度仿真图，从图 6 中可以看出，推进速度刚开始有些振荡，最大超调速度接近 60 mm/min，50 s 后推进速度稳定在 46 mm/min，320 s 后推进速度调为 52 mm/min 时，推进速度有些波动，但波动时间不超过 30 s，然后继续以调定好的速度推进。图 7 为 C 区液压缸推进压力仿真图，从图 7 中可以看出在 320 s 后推进压力有所上升，350 s 左右又稳定在 5.2 MPa，这是由于推进速度从 46 mm/min 升高到 52 mm/min 时，必须要有推进液压缸提供动力，只有更大的推力，才能提高盾构加速度，使盾构速度增大，当速度达到调定值后推进压力下降，最终稳定在初始设定值。

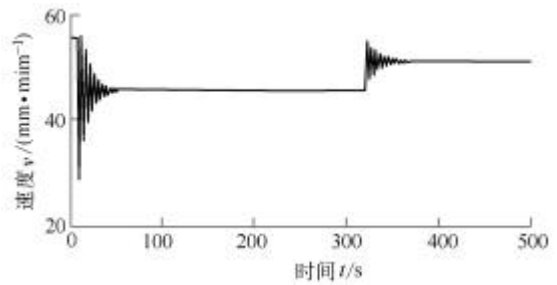


图 6 C 区液压缸推进速度

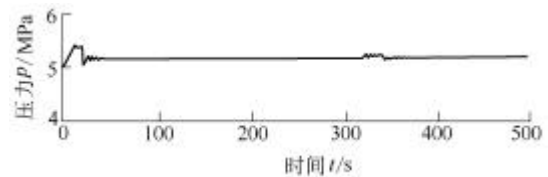


图 7 C 区液压缸推进压力

3 工程实际应用

现场施工中，盾构主司机会根据当前工作环境实时调节盾构运行的各个参数。从盾构一环掘进开始计时，主司机先将推进速度调为 46 mm/min，在 320 s 时将推进速度调大，调为 52 mm/min。图 8 为推进液压系统 C 区液压缸推进速度。

由图 8 可知，推进速度从 0 到 46 mm/min 过程中，有一个超调，在 60 s 时达到最大 60 mm/min，然后在 100 s 左右逐渐达到平衡。与图 6 仿真相比，盾构推进速度响应较慢，而且达到稳定时有超调，这主要是因为盾构推进过程中，其负载为前方土壤，若把土壤看成粘弹性系统，那么其刚度小，粘性大，这是影响盾构推进速度响应慢的一个重要原因；另外一个原因是盾构总体质量大，惯性大。在 320 s 时主司机把推进速度调到 52 mm/min，由图知，推进速度由原来的 46 mm/min 变为 52 mm/min，实现了盾构推进速度的调节。但由于诸多不可预见的影响因素，推进速度还会在一定的范围内波动。

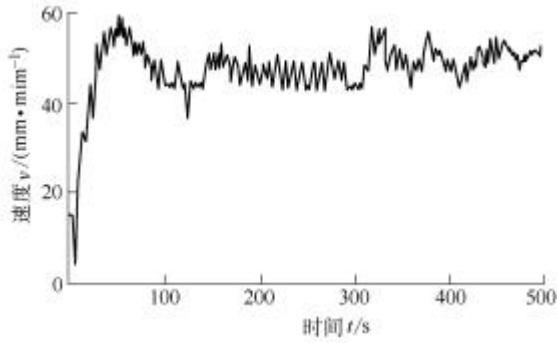


图8 C区液压缸推进速度

图9为C区液压缸推进压力,与图7仿真相比,盾构开始的推进压力比较大,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,而且还需要克服整个盾构的惯性系统,所以需要的推进压力大。掘进一段时间后,盾构主要克服的只有动摩擦力,这时盾构惯性系统的速度超过设定速度,液压缸推进压力因此减小,最终达到稳定。在320s时盾构推进系统进行速度调节时,推进速度能很好地跟随调节信号运行,相应这时,C区液压缸推进压力出现波动,与仿真相比,波动范围比较大,但最终还是稳定在某一小范围内。

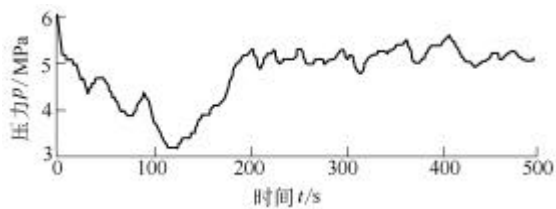


图9 C区液压缸推进压力

除了进行现场推进试验外,在上海地铁二号线西延伸工程某地段还对盾构推进液压系统等关键技术进行了综合性工程实际应用。盾构掘进总里程为2650m,平均月进尺350m,单月最高进尺470.6m,成果鉴定达到了国际先进水平。在2650m长的试验段中,地表沉降基本控制在+10~-30mm之间,最大爬坡度为2%,最小曲线转弯半径为350m,完全满足施工设计要求。

4 结论

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。仿真和工程实际应用证明推进液压系统中推进液压缸采用分区控制,各分区液压缸采用压力流量复合控制是可行的。该系统能实时调节推进压力和推进速度,满足盾构施工要求。

参 考 文 献

- [1] 刘仁鹤. 土压平衡盾构技术综述[J]. 世界隧道, 2000(1): 1-7.
- [2] NAITOH K. The development of earth pressure balanced shields in Japan[J]. Tunnels & Tunnelling, 1985(5): 15-18.
- [3] 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.
- [4] 胡国良, 龚国芳, 杨华勇, 等. 盾构模拟试验平台液压推进系统设计[J]. 机床与液压, 2005(2): 92-94.
- [5] HU G L, GONG G F, YANG H Y, et al. Electro-hydraulic control system of shield tunnel boring machine for simulator stand: LU Y X, WANG Q F, LI W, et al. Proceedings of the Sixth International Conference on Fluid Power Transmission and Control (ICFP' 2005)[C]. Hangzhou, China: International Academic Publishers, 2005: 94-99.
- [6] 庄欠伟. 土压平衡式盾构电液控制系统集成技术及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [7] 路甬祥, 胡大紘. 电液比例控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.

THRUST HYDRAULIC SYSTEM OF SHIELD TUNNEL BORING MACHINE WITH PRESSURE AND FLOW COMPOUND CONTROL

HU Guoliang GONG Guofang YANG Huayong
(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: Thrust system is a key system of shield tunnel boring machine. A thrust hydraulic system with pressure and flow compound control is designed. Distributed control of thrust hydraulic cylinders is carried out, working principle and control method of the thrust hydraulic system are also expounded. In order to investigate the pressure and flow characteristics of the thrust hydraulic system, simulation analyses are carried out with the AMESim simulation tool. At the same time, the experiments are done in the engineering application. The simulation results and the practical applications show that the designed thrust hydraulic system can real-time control the thrust pressure and the thrust speed, which can also meet the thrust requirements of the shield.

Key words: Shield tunnel boring machine

Thrust hydraulic system

Pressure and flow compound control

AMESim simulation

作者简介: 胡国良, 男, 1973年出生, 博士研究生。主要研究方向为工程机械的电液控制, 发表论文10余篇。

E-mail: hugl99@sohu.com