

文章编号:1671-6833(2013)01-0082-05

管道特性对盾构推进缸位移影响的数值分析

夏毅敏, 何利, 谢敬华, 禹宏云, 朱湘衡

(中南大学机电工程学院, 湖南长沙 410083)

摘要:以海瑞克盾构液压推进系统为研究对象,建立了管道压力波动数学模型,分析了管道特性对液压推进单缸位移传递的影响.基于 AMESim 软件对系统进行了建模和仿真,讨论了盾构推进液压系统的管道特性及管道结构参数对推进缸位移动态性能的影响.结果表明:管道长度与管道直径是影响推进缸位移与值构纠偏距离的关键因素,管道长度越长、管道直径越小,管道特性在推进缸位移上的体现越明显.

关键词:盾构;管道特性;AMESim 仿真

中图分类号: TH137 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2013.01.020

0 引言

盾构是一种集机械、电子、液压、测量和控制等多学科技术于一体、专用于地下隧道开挖的重大工程装备.推进系统是整个盾构的关键部分,主要承担着盾构的顶进、转弯、曲线行进、姿态控制、纠偏以及同步控制等^[1-3].盾构在一定空间轴线的允许偏差范围内前进,严格控制盾构掘进轴线定位走向与设计轴线一致是保证工程进度和施工质量的关键.隧道实际掘进轴线与设计轴线间的偏差大于 30 mm 时,即需要进行纠偏^[4].盾构工作在时变非线性的负载工况,液压推进缸端集成阀块与液压油源的距离较远,可以达到几十米甚至上百米.由于突变载荷和管路长,使得盾构液压推进系统里的管道效应尤为显著,如:响应滞后、压力损失、系统振动等.传统的盾构液压系统分析理论由于不考虑管道特性的影响,给盾构推进缸的位移分析带来了较大误差.因此研究盾构液压长管路阀控系统中管道特性是必要的^[5-6].

笔者以海瑞克盾构液压推进系统为研究对象,采用波动方程描述管路动态特性的影响,选用 HL004 管道分段集中参数子模型进行 AMESim 仿真,通过数值分析验证不同管道结构参数下管道特性对盾构推进缸位移的影响规律.

1 基于 AMESim 的长管道阀控系统模型建立

1.1 流体管道非恒定流波动方程

对充液管道而言,二维管道模型对一般的工程应用有足够的精确度,但是这种精确模型中含有复杂的贝塞尔函数和双曲函数,给理论和仿真分析带来极大的困难,而且模型中考虑了太多的细节问题,而这些问题对大多数工程应用而言是不必要的.低频范围内工作的液压系统,管道一维流动集中参数模型就可以满足工程应用要求.笔者所选用的管道模型 HL004,不仅考虑管道的液阻和容腔效应的影响,而且考虑压力波在管道内传递所带来的管道液感的影响和与频率相关的摩擦项的影响.其一维非恒定流动用管道分段集中参数波动方程描述为^[7-8]

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\rho Q}{A^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\rho}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + f(Q) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{Q}{A} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\rho \alpha^2}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0; \quad (2)$$

$$\alpha = \sqrt{K/\rho}. \quad (3)$$

式中: $f(Q)$ 为与流量有关的摩擦阻力项; x 为沿管轴的坐标距离; A 为过流面积; α 为压力波速; K 为流体有效体积弹性模量; ρ 为流体密度.

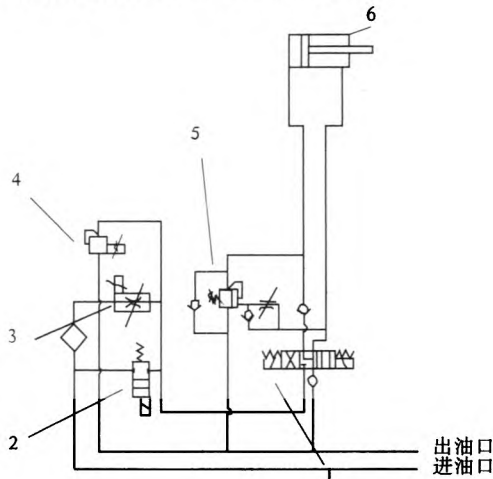
收稿日期:2012-10-11;修订日期:2012-11-20

基金项目:国家“973”重点基础研究发展计划资助项目(2007CB714004)

作者简介:夏毅敏(1963-),男,江西永西人,中南大学教授,主要从事流体传动与控制、大型掘进装备理论与方法、深海采矿装备设计方法研究,E-mail:heli410282899@126.com.

1.2 推进液压系统原理图与基于 AMESim 的简化仿真模型

推进液压系统工作原理图如图 1 所示. 盾构推进时,比例溢流阀 4 调节系统推进压力;比例调速阀 3 调节进入系统的流量;二位二通换向阀 2 得电时短路比例调速阀 3,实现推进液压缸 6 的快速运动;三位四通换向阀 1 用来完成工作状态的切换;在推进液压缸 6 单独退回时,平衡阀 5 能起到使推进液压缸 6 运动平稳的作用.



1—三位四通换向阀;2—二位二通换向阀;3—比例调速阀;4—比例溢流阀;5—平衡阀;6—推进缸;7—单向阀

图 1 盾构液压推进系统单缸工作液压系统原理图
Fig.1 The hydraulic thrust system principle figure of shield machine

基于 AMESim 仿真软件建立长管道阀控系统模型,结合管道数学模型,对液压系统包括控制阀、液压缸、油源、负载进行建模如图 2 所示. 其中比例调速阀、比例溢流阀、二位二通换向阀、三位四通换向阀与平衡阀做成集成阀块,位于盾构前

端靠近推进缸处,系统集成度高,集成块与推进缸的管路较短,油箱与集成阀块之间的管路很长,其管路是整个液压系统中最长的管道. 推进液压系统在恒压源工况,考虑到盾构推进过程中土体引起的附加应力极其复杂,采用线性黏弹性 Kelvin 简化模型模拟土方负载^[9]. 采用 AMESim 仿真软件得出在不考虑液容、液阻、液感等管道特性时 direct 管道子模型下与考虑了管道特性,考虑了管道摩擦的分段集中参数管道模型时^[10-11],HL004 管道子模型下,盾构推进缸的位移的变化规律,并通过数值分析,得出考虑和不考虑管道特性时,不同管道结构参数下推进缸位移差的变化规律.

1.3 确定仿真参数

管道的仿真参数如表 1 所示.

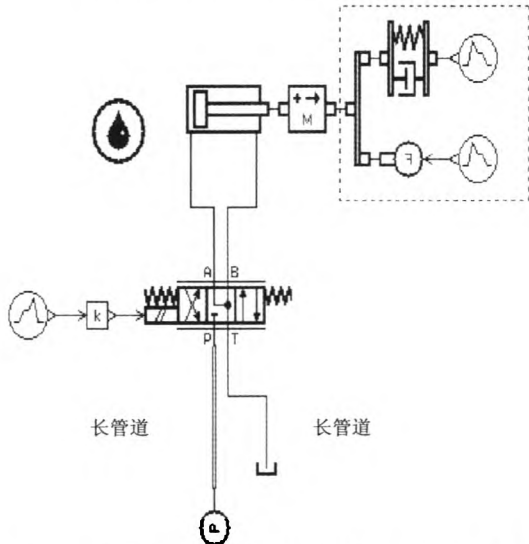


图 2 盾构液压长管道推进系统 AMESim 模型
Fig.2 The AMESim model of long pipeline hydraulic thrust system of shield machine

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
流体体积弹性模量 K/Pa	1.6×10^9	管材弹性模量 E_1/Pa	2.07×10^{11}
流体密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	870	管材密度 $\rho_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 800
流体动力黏度 $\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	0.046	管材泊松比 ν	0.29
液压缸径 D/mm	200	阴尼负载 $b/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	1×10^6
活塞杆径 d/mm	140	负载弹性刚度 $k/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1×10^{10}

2 管道特性对盾构推进缸位移的影响

仿真时推进缸活塞行程设定为 1 m,推进缸在恒压源下工作,其位移线性增加,考虑和不考虑管道特性时推进缸的位移值都达到推进缸设定活塞杆伸出行程.

2.1 不考虑管道特性时各参数对推进缸位移变化的影响

AMESim 仿真时选用 direct 管道子模型,direct 管道子模型不需设置管道参数,恒压源与方向阀直接连接. 其不考虑管道特性时,在 $F = 80 \text{ kN}$ 岩土阻力下盾构推进缸位移变化如图 3 所示,对应不同岩

土阻力推进缸位移的变化如图 4 所示。

2.2 考虑管道特性时各参数对推进缸位移变化的影响

AMESim 仿真时选用 HL004 管道子模型, HL004 管道子模型为分段集中参数模型,在不同管道结构参数及岩土阻力下推进缸位移变化如图 5 所示. 图 5(a)反映了管道越长,推进缸位移响应越慢,滞后越明显;图 5(b)反映不同管壁厚,位移变化趋于一致,由于液压源为恒压源,管道直径

越大则系统压力损失减小,液压缸速度响应时间减少;图 5(c)反映了管道直径越大,推进缸位移响应越快,滞后时间越短;图 5(d)反映了岩土阻力越大,推进缸位移响应越慢,滞后时间越长。

2.3 不考虑与考虑管道特性时对应的推进缸位移差变化规律

通过对应的不同管道结构参数和岩土阻力下,不考虑与考虑管道特性下推进缸位移求得差值,如图 6 所示。

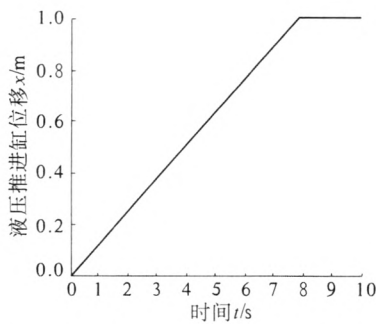


图 3 不考虑管道特性时推进缸位移变化
Fig.3 The thrust cylinder displacement without considering pipeline effect

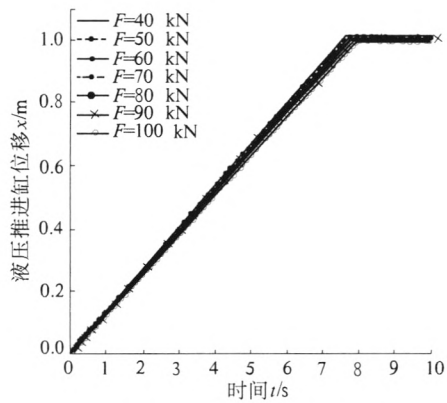
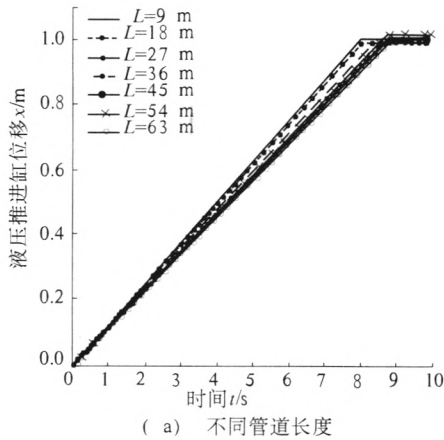
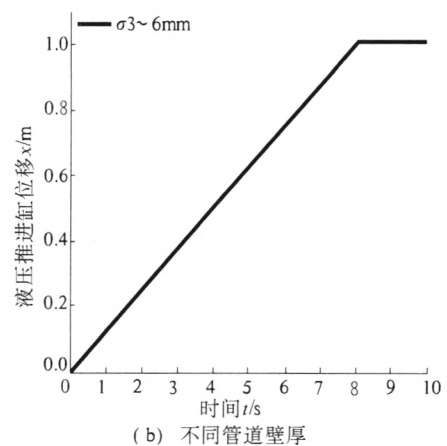


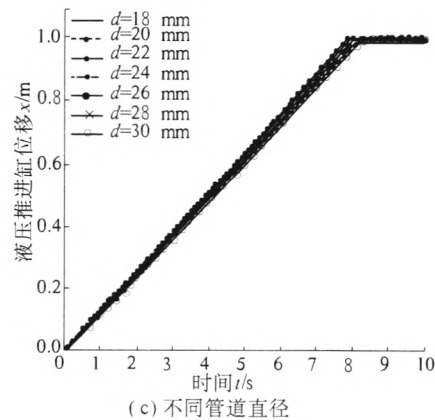
图 4 不同岩土阻力下推进缸位移变化
Fig.4 The thrust cylinder displacement under different geotechnical resistance



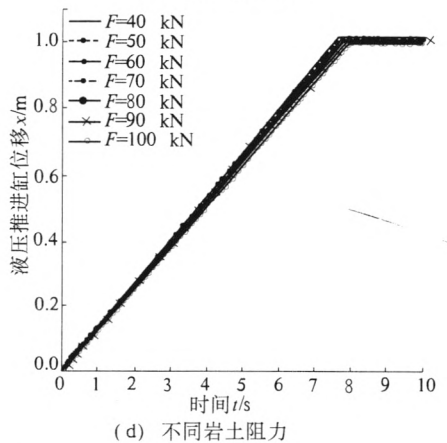
(a) 不同管道长度



(b) 不同管道壁厚



(c) 不同管道直径



(d) 不同岩土阻力

图 5 不同参数下推进缸位移变化

Fig.5 The thrust cylinder displacement under different parameters

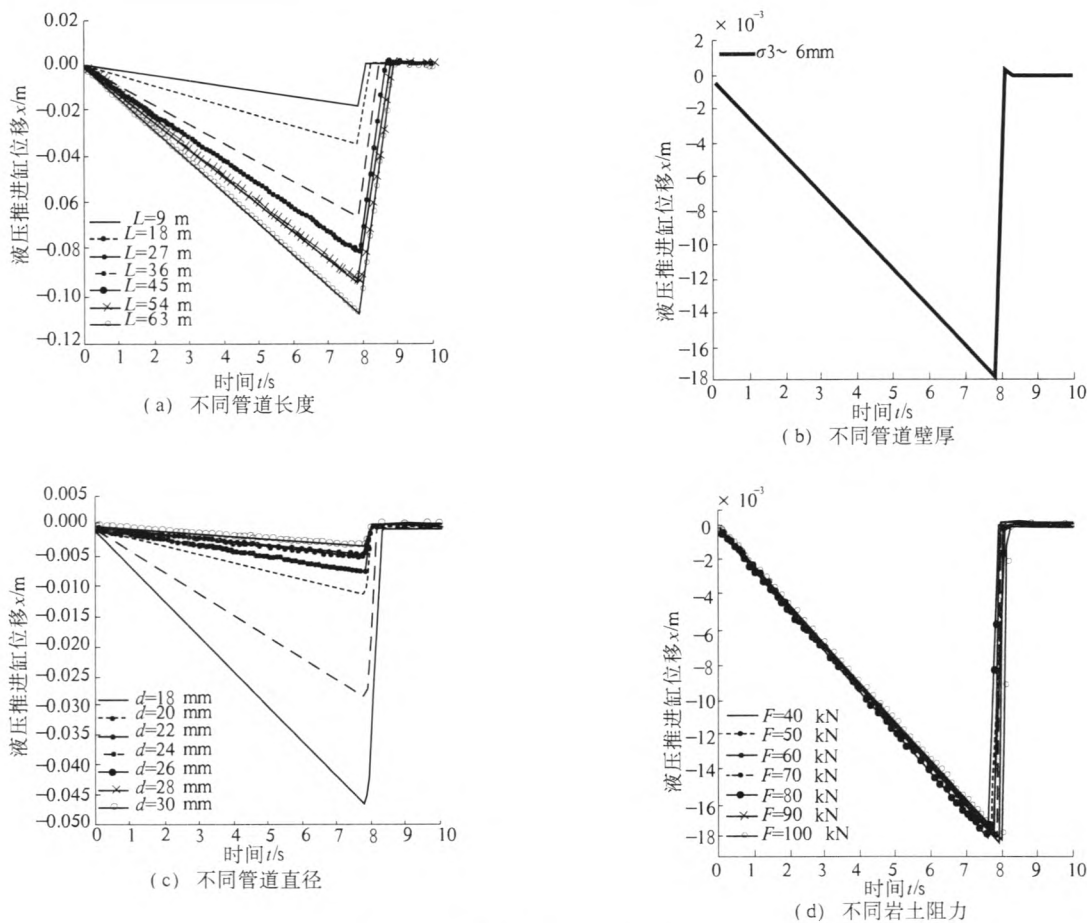


图 6 不同参数下推进缸位移差变化

Fig. 6 The trust cylinder displacement difference under different parameters

由图 6 得出,管道长度、管道直径对推进缸的位移影响最大,管道壁厚及小范围变化的岩土阻力对推进的位移影响比较小;随着管道长度的增加,管道特性在推进缸位移上的体现越显著,管道长度 9 ~ 63 m 变化时,其不考虑与考虑管道特性得出的推进缸位移差变化率控制在 1.9% ~ 11% 范围;随着管道直径的增大,管道特性在推进缸位移上的体现越不明显,管道直径 18 ~ 30 mm 变化时,其不考虑与考虑管道特性得出的推进缸位移差变化率控制在 0.4% ~ 4.8% 范围;不同管道壁厚和岩土阻力条件下,对应的不考虑与考虑管道特性时的推进缸位移差变化率大概控制在 1.8% .

当盾构向前顶进,其隧道实际掘进轴线与设计轴线间的偏差大于 30 mm 时,即需要进行纠偏.通过数值分析得知,当不考虑与考虑管道特性得出的推进缸位移差为 30 mm 时,盾构需进行掘进纠偏.不同管道结构参数下,所对应的推进缸纠偏推进距离为表 2 所示.管道越长则纠偏推进距离越短,管道直径对纠偏距离的影响很大.其他的管道结构参数与岩土阻力变化,不考虑与考虑管

道特性得出的推进缸位移差控制在纠偏标准内,但是经过多次推进后,也会带来很大的累积位移偏差.

表 2 纠偏推进距离

Tab. 2 The correct thrusting distiance

管道直径/mm	管道长度/m	推进距离/m
22	18	0.827 6
22	27	0.551 1
22	36	0.410 9
22	45	0.333 4
22	54	0.281 3
22	63	0.230 7
18	9	0.614 5

3 结论

- (1) 笔者建立长管道波动数学模型,采用 AMESim 软件建立了不考虑与考虑管道特性下精确的仿真模型,分析得出了不同管道结构参数与岩土阻力对盾构推进缸位移的影响.
- (2) 管道长度与管道直径对盾构推进缸的位

移影响最大,管道越长,推进缸响应越慢,滞后时间越长;管道直径越大,推进缸响应越快,滞后时间越短。

(3)通过对不考虑和考虑管道特性得到的盾构推进缸位移差进行数值分析得出,管道长度和管道直径是影响盾构推进纠偏距离的最关键因素。

参考文献:

- [1] 刘宣宇,邵诚. 盾构机自动控制技术现状与展望[J]. 机械工程学报, 2010, 46(20): 152 - 158.
- [2] ZHANG Kai-zhi, YU Hai-dong, LIU Zhong-po. Analysis for dynamic load behavior of shield thrust system considering variable boundary constraints[J]. Intelligent Robotics and Applications, 2009, 5928: 307 - 316.
- [3] 胡国良,龚国芳,杨华勇. 基于压力流量复合控制的盾构推进液压系统[J]. 机械工程学报, 2006, 42(6): 124 - 127.
- [4] 孙继亮. 盾构液压推进系统的控制仿真研究[D]. 合肥: 安徽理工大学机械工程学院, 2006.
- [5] 杨务滋,王长春,王贺剑. 管道效应对液压冲击器系统影响的研究[J]. 机床与液压, 2008, 36(5): 73 - 75.
- [6] 刘伟,杨华勇. 高压断路器液压操动机构管道特性研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 182 - 187.
- [7] 李洪人,陈照弟. 新的液压管路分段集中参数键图模型及其试验研究[J]. 机械工程学报, 2000, 36(3): 61 - 64.
- [8] 田树军,张宏. 液压管路动态特性的 Simulink 仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(5): 1136 - 1139.
- [9] 庄欠伟,龚国芳,杨华勇. 盾构机推进液压系统比例压力流量复合控制仿真[J]. 液压气动与密封, 2006, 42(6): 37 - 39.
- [10] WANG Xiao-jian, MARTIN F L. Behavior of short lateral dead ends on pipeline transients: A lumped parameter model and an analytical solution[J]. Journal of Fluids Engineering, 2010, 132: 529 - 535.
- [11] DRAGO M, GERHARD G, WITHOLD G. Verification of various pipeline models[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2000, 53: 303 - 308.

Numerical Analysis of Pipeline Effect on Shield Thrust Cylinder Displacement

XIA Yi-min, HE Li, XIE Jing-hua, YU Hong-yun, ZHU Xiang-heng

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: This paper studies the hydraulic thrust system of Herrenknecht shield machine, establishes the mathematical model of pressure fluctuations of pipeline and analyses the pipeline effect on the shield thrust cylinder displacement. Modelling and simulation of the hydraulic system based on the AMESim software. It also discusses the influence of pipeline effect on the shield hydraulic thrust system are made and pipeline structure parameters on the dynamic performance of shield thrust cylinder displacement. The results show that the pipe length and diameter are key factors influencing the thrust cylinder displacement and shield correction distance, what's more, the longer the pipeline length and the smaller the pipe diameter, the pipeline effect is more obvious on the thrust cylinder displacement

Key words: shield machine; pipeline effect; AMESim simulation