

文章编号: 0253-9993(2012)07-1118-05

一种新的盾构机土仓压力控制模式及其实验研究

李守巨¹, 曹丽娟², 刘进宝³

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室 辽宁 大连 116024; 2. 大连海洋大学 机械工程学院 辽宁 大连 116023; 3. 浙江同济科技职业学院 水利系 浙江 杭州 311231)

摘要: 为解决盾构机土仓压力控制的快速性和稳定性问题,提出了一种新的控制策略。该控制策略将螺旋输送机的旋转速度和盾构机的推进速度作为可控变量,采用优化算法实现盾构机土仓压力自适应控制。研究表明:由于刀盘的直径比螺旋输送机的直径大很多,因此通过补充调整盾构机的推进速度控制土仓压力会更有效。试验结果表明,与单独控制螺旋输送机转速控制土仓压力方法相对比,土仓压力控制的快速性和稳定性都得到了提高。

关键词: 盾构机; 土仓压力; 控制模式; 自适应控制

中图分类号: U455.39 **文献标志码:** A

A new pattern for controlling chamber earth pressure in shield tunneling and its experimental investigation

LI Shou-ju¹, CAO Li-juan², LIU Jin-bao³

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Institute of Mechanical Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China; 3. Department of Water Conservancy, Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou 311231, China)

Abstract: A new pattern for controlling chamber earth pressure in shield tunneling was proposed to achieve speediness and stableness in controlling process. The rotating speed of screw conveyor and thrusting speed of shield were determined as controlled variables in this investigation. The chamber earth pressure in shield tunneling is adaptively and automatically controlled. The adjusting thrusting speed of shield can be more effective to control chamber earth pressure because the diameter of shield cutterhead is larger than one of the screw conveyor. The experimental results show that the proposed new control strategy can increase speediness and stableness in comparison with singly adjusting rotating speed of screw conveyor.

Key words: shield machine; chamber earth pressure; control pattern; adaptive control

盾构机是集机械、电气、液压、测量、控制等多学科技术于一体,专用于地下隧道开挖的技术密集型重大工程装备。与传统的隧道施工方法相比,盾构机掘进方法具有施工安全、快速、工程质量高、地面扰动小、劳动强度低等许多优点。盾构机在国外已经有接近 200 a 的发展历史,该专利由法国人布鲁诺(Brunel)于 1825 年首创,而最初的开挖断面为矩形。英国首先应用该方法在伦敦泰晤士河下修建了一条隧道。直到 1869 年,在 Greathead 才首先使用了开挖

圆形断面的盾构施工,并采用了铸铁管片衬砌。自 20 世纪 60 年代,英国首先研制出了泥水加压盾构,日本研制出了土压平衡盾构^[1]。由于盾构机能在含水饱和的松软地层中开挖隧道,因而在地下工程施工中得到了迅速发展,尤其是在欧美国家及日本等国的隧道开挖中得到了广泛的应用。我国从 20 世纪 50 年代就开始研制和应用盾构机修建隧道,但是,由于各种人为和客观因素的制约,目前与世界上的先进技术相比还有较大的差距,尤其在控制软件方面。土压

收稿日期: 2011-07-25 责任编辑: 王婉洁

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2007CB714006); 国家自然科学基金资助项目(51105048)

作者简介: 李守巨(1960—),男,辽宁沈阳人,教授。E-mail: lishouju@dlut.edu.cn

平衡盾构机使得刀具切下的渣土通过添加改性材料呈塑性流动状态, 充满于盾构机土仓, 然后通过螺旋输送机将土仓内的渣土排出, 并且保持刀盘的进土量与螺旋输送机的排土量相平衡, 同时要求土仓内渣土具有一定的压力以控制掘进工作面的稳定性, 进而控制地表的变形。Sramoon 等^[2] 建议土仓压力应该设置为主动土压力与水压力之和, 再加上 10 kPa 的波动压力, Koyama^[3] 将掘进工作面的土水压力近似为梯形分布, 给出了两种掘进工作面压力的计算模式, 即土压力与水压力分开计算模式 (soil-water separated) 和土压力与水压力整体计算模式 (soil-water integrated), 并且根据土质的差异 (砂土和黏土) 分别给出了经验的侧向土压力系数。盾构机土仓压力的大小直接影响到掘进工作面的稳定性和地表的变形, 为此, 国内外对有关于盾构机土仓压力控制的方法进行了大量的研究, 包括自适应控制技术^[4]、自适应模糊控制^[5]、神经网络控制方法^[6-7]、优化控制方法^[8-9]、预测控制方法、PID 控制^[10] 等。目前, 盾构机土仓压力控制大多数将螺旋输送机的转速作为控制变量, 也有将螺旋输送机的转速和盾构机的推进速度同时作为控制变量, 但缺少土仓压力控制的数学模型和优化控制策略, 导致土仓压力控制的快速性和稳定性较差。为此, 本文提出了一种新的土仓压力控制模式, 该控制策略将螺旋输送机的旋转速度和盾构机的推进速度作为可控变量, 采用优化算法实现盾构机土仓压力自适应控制; 并在实验台上验证所提出的新的控制策略的有效性。

1 盾构机土仓压力控制模式

盾构机土仓压力受到推进速度和螺旋输送机排土速度的影响, 当从刀盘开口进入到土仓的渣土量与螺旋输送机排土量相平衡时, 土仓压力将保持不变。考虑到渣土本构关系的非线性和螺旋输送机排土效率与土仓压力的相关性, 非线性、时变土仓压力系统数学模型^[9] 为

$$p(i+1) = p(i) + \frac{E_t(p)}{V_c} \left[Av(i) - \frac{A_s \omega(i) h \eta(p)}{2\pi} \right] \Delta t \quad (1)$$

式中 $p(i)$ 和 $p(i+1)$ 分别为当前时刻和下一时刻土仓压力; Δt 为采样间隔时间; v 为盾构机的推进速度; A 为盾构机的横截面积; h 为螺旋输送机的螺距; η 为螺旋输送机的排土效率; ω 为螺旋输送机的转速; A_s 为螺旋输送机的有效排土面积; V_c 为盾构机土仓体积; E_t 为渣土的等效切线变形模量。

如图 1 所示, 土仓渣土的切线变形模量与土仓压

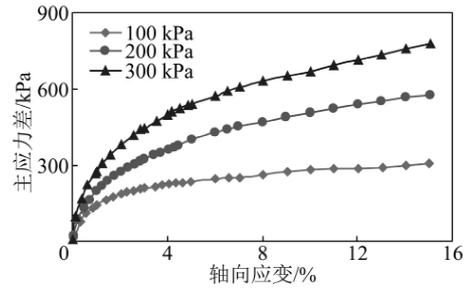


图 1 渣土的非线性本构关系

Fig. 1 Relationship between principal stress differences and strains

力近似为如下形式

$$E_t(p) = a \left(\frac{p}{p_0} \right)^n \quad (2)$$

其中 p_0 为常数, 其数值取大气压力 $p_0 = 100$ kPa; a 和 n 为待定参数, 它们与渣土的力学性能有关。实验室试验中, 发现螺旋输送机的排土效率与土仓压力相关

$$\eta(p) = b + cp \quad (3)$$

其中 b 和 c 为需要根据观测数据通过系统辨识方法确定的模型参数。盾构机土仓压力控制的可控变量为

$$\mathbf{u} = \{ \omega \ p \}^T \quad (4)$$

土仓压力自适应控制的目标函数

$$\min J = [p_b(i+1) - p_r(i+1)]^2 \quad (5)$$

其中 p_b 为土仓隔板观测的土压力; p_r 为土仓隔板设定的土压力, 它与掘进工作面的土压力 p_f 有关

$$p_r = kp_f \quad (6)$$

其中 k 为压力传递系数, 它与刀盘的开口率相关^[9]; p_f 与盾构机掘进过程中地质条件和埋深有关, 它是经过有限元分析设定的掘进工作面的合理土压力, 也可以采用式 (7) 近似估算。

$$p_f = (1 - \sin \phi) \gamma h \quad (7)$$

其中 ϕ 为掘进工作面前方土体的内摩擦角; γ 为土体的容重; h 为盾构机轴线埋深。为了高效和稳定地控制盾构机土仓压力, 提出了一种基于优化算法的土仓压力控制策略。由于被控系统的输出数目为 1 个 (土仓压力), 而可控变量的数目为 2 个 (螺旋输送机转速和盾构机推进速度), 属于冗余控制^[11]。该控制策略包含两部分内容: 首先确定可控变量调整的先后次序; 然后, 确定每个可控变量的优化值。与调整盾构机推进速度相对比, 螺旋输送机转速的调整容易得多, 调整螺旋输送机转速控制土仓压力也是工程中最习惯采用的方法, 因此, 将调整螺旋输送机转速作为控制土仓压力的首选; 只有当土仓压力观测值与期望值相差较大时, 才考虑调整盾构机的推进速度, 实现

快速和稳定地控制土仓压力。令目标函数对可控变量之一的螺旋输送机转速的导数等于 0。

$$\frac{\partial J}{\partial \omega} = 0 \quad (8)$$

得到优化的螺旋输送机转速为

$$\omega(i+1) = \frac{2\pi [p(i+1) - p_r(i+1)] V_c}{A_s h \eta E_t \Delta t} \alpha + \frac{2\pi A v(i+1)}{A_s h \eta} \quad (9)$$

其中 α 为控制螺旋输送机转速比例因子,其大小直接影响到土仓压力的调整速率和控制系统的稳定性, $0 < \alpha < 1.0$ 。当 $\alpha = 0$ 时,螺旋输送机从土仓中的排土量与从刀盘开口进入土仓的渣土量相平衡,土仓压力将保持不变;当 $\alpha = 1.0$ 时,土仓压力的调整速率最大,带来的问题是螺旋输送机的转速可能不稳定。螺旋输送机转速的约束条件为

$$0 \leq \omega \leq \omega_{\max} \quad (10)$$

式中 ω_{\max} 为选螺旋输送机的最大转速,由所选螺旋输送机的性能确定。

如果预测的下一个时间步盾构机土仓压力仍然没有达到期望值,接着调整盾构机的推进速度使土仓压力跟踪期望值。令

$$\frac{\partial J}{\partial v} = 0 \quad (11)$$

由式(5)得到

$$v(i+1) = \frac{[p_r(i+1) - p(i+1)] V_c}{A E_t \Delta t} \beta + \frac{A_s \omega(k+1) h \eta}{2\pi A} \quad (12)$$

盾构机推进速度的约束条件为

$$v_{\min} < v < v_{\max} \quad (13)$$

式中 v_{\min} 和 v_{\max} 为盾构机的最小和最大推进速度,根据地质条件和盾构机推进系统的性能确定; β 为控制盾构机推进速度比例因子,其大小直接影响到土仓压力的调整速率和控制系统的稳定性 $0 < \beta < 1.0$ 。

2 盾构机土仓压力控制新模式的实验研究

为了验证所提出新的控制模式的有效性,在大连理工大学机械工程学院的盾构机推进模拟试验台上进行了实验研究(图2)。实验模拟的盾构机所超越地层埋深为 12~15 m,分别穿越含泥含砾粗砂、砂质黏土和砾砂 3 种不同力学性质的土层,其物理力学特性见表 1,表 2 为刀盘和土仓的主要参数,表 3 为螺旋输送机的主要参数。土仓压力控制实验时,取 $\alpha = 0.4$ $\beta = 0.6$ 。

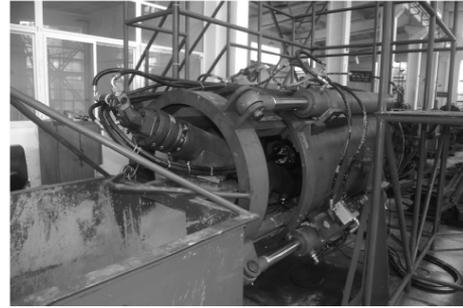


图 2 盾构机推进模拟试验台

Fig. 2 Layout of test device for simulating shield tunneling

表 1 模拟土层的物理力学特性参数

Table 1 Main mechanical parameters of different layers

参数	粗砂	砂质黏土	含砾粗砂
容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	19.0	20.0	18.5
摩擦角/($^\circ$)	28	17	34
内聚力/kPa	0	36	7
压力设定值/kPa	53	71	31

表 2 刀盘和土仓的主要参数

Table 2 Main parameters of cutterhead

直径/ mm	宽度/ mm	刀盘开口 率/%	横截面 积/ m^2	体积/ m^3
900	128	25.8	0.636	0.081 4

表 3 螺旋输送机的主要参数

Table 3 Main parameters of screw conveyor

内径/mm	螺杆直径/mm	螺距/mm	有效面积/ mm^2
160	50	128	18 142.7

如图 3 所示,在土仓的隔板上共布置 4 个土压力观测点,实时观测土仓土压力的变化,并且根据观测的压力值,通过控制螺旋输送机转速和盾构的推进速度,自动跟踪预先设定的期望压力值。图 4 的土仓压力控制曲线是图 3 中最左侧观测点采集的土仓压力数据。

根据预先设定的土仓压力,如图 4 所示,0~120 s 土仓压力设定值为 53 kPa,121~240 s 土仓压力设定值为 71 kPa,241~360 s 土仓压力设定值为 31 kPa。开始控制时,土仓压力为 30 kPa,小于期望值 51 kPa,为了增加土仓压力,盾构机的推进速度达到其较大值 0.5 mm/s,而螺旋输送机的转速接近 0,如图 5(a)和图 6 所示,经过 10 s 时间,土仓压力达到期望值。

在土仓压力达到第 1 个平衡点之后,在 11~120 s 时间段,螺旋输送机的转速基本为常数,控制的

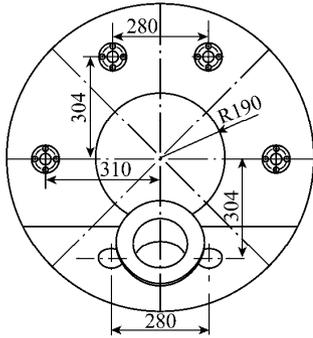
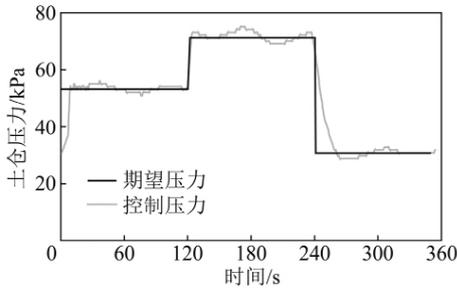
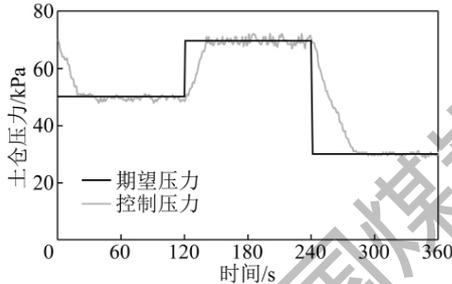


图 3 土仓隔板压力观测点布置

Fig. 3 Location of measuring points on board of soil chamber



(a) 新策略



(b) 原策略

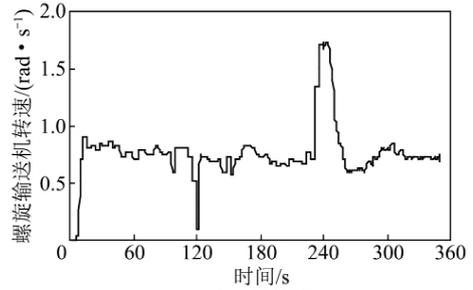
图 4 土仓压力控制值与设计值的对比

Fig. 4 Comparison between controlled pressures and designed ones

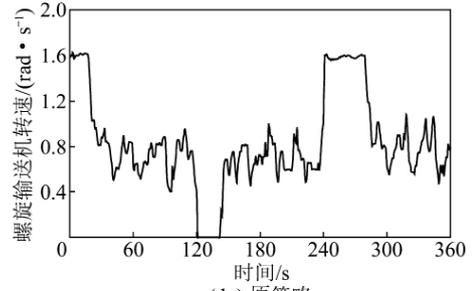
螺旋输送机转速稳定性较好。在时间为 121 s 时,设计的土仓压力增加到 71 kPa,螺旋输送机的转速从 0.80 rad/s 下降到 0.13 rad/s,盾构机推进速度从 0.5 mm/s 增加到 0.9 mm/s(图 5(a)和图 6),目的是减少螺旋输送机排土速度,增加从刀盘进入土仓的渣土速度,快速提高土仓压力,使其在短时间内达到设计值。

在 241 s 时,设计的土仓压力下降到 31 kPa,螺旋输送机的转速从 0.70 rad/s 增加到 1.67 rad/s,盾构机推进速度从 0.5 mm/s 降低到 0.01 mm/s,降低从刀盘进入土仓的渣土速度,增加螺旋输送机排土速度,快速降低土仓压力。从图 4(a)中可以看到,无论是在土仓压力增加还是减少时,所建立的控制方法都是十分有效的。

为了比较新方法的有效性,图 4(b)给出了单独控制螺旋输送机转速优化控制策略时实测土压力与



(a) 新策略



(b) 原策略

图 5 螺旋输送机转速随时间的变化

Fig. 5 Variation of conveyor rotation speed versus time

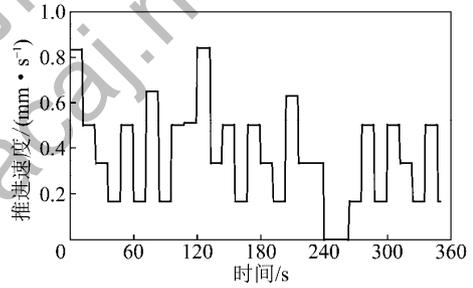


图 6 盾构机推进速度随时间变化

Fig. 6 Thrusting speed of shield versus time

期望设计值的对比^[12]。对比图 4(a) (b) 发现,土仓压力从 50 kPa 上升到 70 kPa,单独控制螺旋输送机转速策略调整时间为 40 s,而新策略只需要 10 s。对比图 5(a) (b) 可以发现,新策略螺旋输送机的转速更加平稳。

3 结 论

(1) 考虑到渣土本构关系的非线性和螺旋输送机排土效率与土仓压力的相关性,提出了非线性、时变土仓压力系统数学模型。基于数学模型的土仓压力控制系统,具有控制精度高和调整速度快等特点。

(2) 根据土仓压力数学模型,建立了土仓压力优化控制策略。实验确定了控制螺旋输送机转速与推进速度的比例因子。

(3) 实验结果表明,与单独调整螺旋输送机转速控制土仓压力方法相对比^[12],所提出的新的控制策略具有较好的快速性和稳定性,螺旋输送机的波动较小,并且土仓压力控制精度高。

参考文献:

- [1] Naitoh K. The development of earth pressure balanced shields in Japan[J]. *Tunnels & Tunnelling International*, 1985, 17(5): 15-18.
- [2] Aphichat Sramoon, Mitsutaka Sugimoto, Kouji Kayukawa. Theoretical model of shield behavior during excavation II: application[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128(2): 156-165.
- [3] Yukinori Koyama. Present status and technology of shield tunneling method in Japan[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2003, 18: 145-159.
- [4] 刘 峰, 龚国芳, 石元奇. 基于自适应控制技术的盾构掘进监控系统[J]. *工程设计学报*, 2010, 17(4): 302-306.
Liu Feng, Gong Guofang, Shi Yuanqi. Monitoring system of shield tunneling machine based on adaptive control technology[J]. *Journal of Engineering Design*, 2010, 17(4): 302-306.
- [5] 罗力维, 王守城, 王 雪. 盾构机掘进过程的自适应模糊控制[J]. *机械设计与制造*, 2003(3): 125-126.
Luo Liwei, Wang Shoucheng, Wang Xue. Fuzzy control technique in tunneling process of shield machine[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2003(3): 125-126.
- [6] 曹丽娟, 上官子昌, 李守巨. 基于神经网络的盾构机密封舱压力控制研究[J]. *广西师范大学学报*, 2010, 28(3): 175-182.
Cao Lijuan, Shanguan Zichang, Li Shouju. Pressure control for headchamber of shield machine based on neural network[J]. *Journal of Guangxi Normal University*, 2010, 28(3): 175-182.
- [7] Yeh I-Cheng. Application of neural networks to automatic soil pressure balance control for shield tunneling[J]. *Automation in Construction*, 1997, 5(5): 421-426.
- [8] Yang Huayong, Shi Hu, Gong Guofang. Electro-hydraulic proportional control of thrust system for shield tunneling machine[J]. *Automation in Construction*, 2009, 18(7): 950-956.
- [9] 上官子昌, 李守巨, 栾茂田. 土压平衡盾构机密封舱土压力控制方法[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(3): 402-405.
Shangguan Zichang, Li Shouju, Luan Maotian. Controlling earth pressure of head chamber of earth pressure balance (EPB) shield machine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(3): 402-405.
- [10] 周如林, 龚国芳, 汪 慧. 盾构推进系统专家 PID 同步控制分析[J]. *中国机械工程*, 2010, 21(18): 2202-2206.
Zhou Rulin, Gong Guofang, Wang Hui. Expert-PID synchronization control of thrust hydraulic system[J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(18): 2202-2206.
- [11] Duan Zhisheng, Huang Lin, Yang Ying. The effects of redundant control inputs in optimal control[J]. *Sciences in China Series F: Information Science*, 2009, 52(11): 1973-1981.
- [12] 李守巨, 屈福政, 曹丽娟. 土压平衡盾构机密封舱压力控制实验研究[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(6): 934-937.
Li Shouju, Qu Fuzheng, Cao Lijuan. Experimental investigation about chamber pressure control of earth pressure balance shield[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(6): 934-937.