

# 土体改良试验平台液压系统设计与分析

冯欢欢<sup>1,2</sup>, 王助锋<sup>1</sup>, 张合沛<sup>1</sup>

(1. 盾构及掘进技术国家重点实验室, 郑州 450003; 2. 西南交通大学机械工程学院, 成都 610031)

**摘要:** 土体改良试验平台作为我国土压平衡盾构中土体改良剂研发的基础设施, 必须具有完善的控制系统和进行实验分析的能力。介绍土体改良试验平台的功能要求, 分析同步推进技术、螺旋输送技术及泡沫发生技术分别在推进液压系统、螺旋输送液压系统及泡沫发生液压系统中的运用情况, 并对液压系统的主要参数进行计算, 详细阐述各液压系统的工作原理, 并对其控制策略进行分析。所设计的液压系统能够满足试验平台的控制要求。

**关键词:** 盾构; 土体改良; 试验平台; 液压系统; 同步推进系统; 螺旋输送系统; 泡沫发生系统

**DOI:** 10.3973/j.issn.1672-741X.2012.02.005

**中图分类号:** U 455.3<sup>+</sup>9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-741X(2012)02-0156-04

## Design of and Analysis on Hydraulic Systems of Ground Conditioning Test Platform

FENG Huanhuan<sup>1,2</sup>, WANG Zhufeng<sup>1</sup>, ZHANG Hepei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Shield Machine and Boring Technology, Zhengzhou 450003, China;

2. College of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Ground conditioning test platform, which is a basic facility needed to develop ground conditioning agents used in tunneling by EPB shield machines, must have perfect control system and perfect test analysis capability. In the paper, the functional requirements of the ground conditioning test platform are presented, the application of the synchronic propulsion technology, the screw conveying technology and the foam generating technology in the hydraulic systems of the propulsion system, the screw conveying system and the foam generating system are analyzed, the major parameters of the hydraulic systems are calculated, the working principle of each hydraulic system is described in detail and the control strategy of the hydraulic systems is analyzed. The practice shows that the hydraulic systems designed can meet the control requirements of the test platform.

**Key words:** shield machine; ground conditioning; test platform; hydraulic system; synchronic propulsion system; screw conveying system; foam generating system

## 0 引言

土压平衡盾构自身对地层的适应范围相对较窄, 为扩大对地层的适应范围, 必须采用土体改良技术来辅助土压平衡盾构施工。土体改良技术作为土压平衡盾构法施工的一个重要组成部分, 对盾构法隧道的发展有着深远影响。纵观目前国内各盾构的使用工况, 不难发现, 土体改良技术的应用情况, 对降低工程造价和提高工程施工进度都有着决定性作用。发泡剂作为一种优良的土体改良剂, 已经得到广泛的采用<sup>[1-5]</sup>。我国对盾构用发泡剂的研究开发还处于起步阶段, 对改良剂的基本性能及其对开挖土体的改良效果缺乏研究, 造成土压平衡式盾构中气泡原料的浪费。郭涛<sup>[6]</sup>

提出了土压平衡式盾构用发泡剂性能的评价方法; 乔国刚<sup>[7]</sup>进行了泡沫改良砂土和黏土的微观机制研究, 提出了改良土“塑性流动性”特性评价实验室标准和量化指标; 汪国锋<sup>[1]</sup>结合北京地铁十号线一期盾构隧道工程, 对土压平衡盾构土体改良技术的应用进行了系统的研究; 郭胜忠<sup>[8]</sup>以沈阳地铁1号线小什字街站——滂江街站区间为例, 分析了土体改良技术在全断面砂砾地层盾构法施工中的应用情况。他们大多是进行单一的理论分析或工程实际案例分析, 没有将二者有效地结合起来。通过建立土体改良试验平台, 不仅可进一步研究气泡添加量、发泡剂浓度、发泡倍率等参数对土体改良效果的影响, 还能模拟盾构施工环境,

收稿日期: 2012-02-10; 修回日期: 2012-03-13

作者简介: 冯欢欢(1987—), 男, 湖北随州人, 西南交通大学机械电子工程专业在读硕士, 助理工程师, 现从事盾构及掘进液压技术研究工作。

进而能得到更有效的数据和结论。由于试验平台的推进系统、螺旋输送系统及泡沫发生系统均由液压系统来控制,液压控制系统占据了试验平台控制系统的绝大部分,设计出高性能的液压控制系统尤为关键。本文详细分析土体改良试验平台三大液压系统的液压控制原理、主要参数计算及其控制策略。

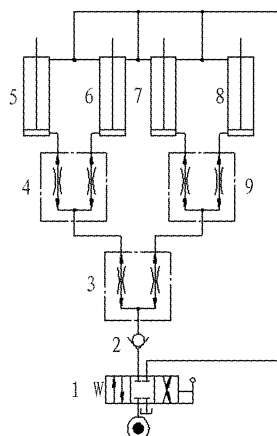
## 1 土体改良试验平台功能简介

试验平台要实现的主要功能有:1)实现土体改良剂的按比例加入,并能通过改变发泡剂的参数,得到泡沫添加量、发泡剂浓度、发泡倍率等与土体改良性能的关系;2)通过分析渣土流塑性情况,得到改良剂各参数与刀盘扭矩、掘进效率等的关系;3)模拟盾构推进过程、密封仓土体搅拌过程、螺旋输送机出土过程及土塞效应实现过程。

## 2 推进液压系统设计

### 2.1 推进液压系统原理

利用同步阀来实现4个液压缸的位置同步控制。推进液压系统的工作原理如图1所示。



1—三位四通电磁换向阀;2—单向阀;3,4,9—分流集流阀;5,6,7,8—液压缸。

图1 推进功能回路原理图

Fig. 1 Principle of loop of propulsion system

推进回路的功能是通过4个相同液压缸给试验筒体内的土体施加推力,并将其缓慢压入土仓。由于筒内的土体质量不断减少,液压缸的负载存在较大的波动,因此采用3个分流集流阀来实现4个液压缸的同步运动。3个分流集流阀按图1所示连接,阀3通过的流量是阀4和阀9的2倍,在阀3分流基础上再经过阀4和阀9分流,即可保证4个液压缸的流量相同,又实现了4个液压缸的同步控制。

### 2.2 推进液压系统参数计算

推进系统的执行机构由4个相同的推进油缸组成。液压系统要求的参数为:行程  $L = 1.2 \text{ m}$ , 推进速度  $v_1 = 0.001 \text{ m/s}$ , 快退速度  $v_2 = 0.001 \text{ m/s}$ , 最大推力  $F = 2600 \text{ kN}$ , 泵的工作压力  $P_1 = 25 \text{ MPa}$ 。

### 2.2.1 液压缸无杆腔直径 $D$ 及活塞杆直径 $d$ 计算

液压缸无杆腔直径

$$D = \sqrt{4F/4\pi P} = 182 \text{ mm}。$$

按 GB/T 2348—1993 圆整后取  $D = 200 \text{ mm}$ ,  $d = 0.7D = 140 \text{ mm}$ 。因此可确定液压缸的尺寸为  $\phi 200/140 \times 1200 \text{ mm}$ 。

### 2.2.2 泵的参数计算与选型

推进油缸所需最大流量为  $Q_{\max}$ , 则推进时

$$Q_1 = 4Av_1 = 4\pi \times 100^2 \times 60 \times 10^{-6} = 7.54 \text{ L/min};$$

快退时

$$Q_2 = 4Av_2 = 75.4 \text{ L/min}。$$

式中  $A = \pi D^2/4$ 。

最终

$$Q_{\max} = 75.4 \text{ L/min}。$$

根据系统工作压力及流量需求,选用轴向柱塞斜盘式变量泵,其排量为  $55 \text{ r/min}$ 。

### 2.2.3 电机的参数计算与选型

电机输出功率

$$N = P_1 Q_{\max} / \eta_{\text{pm}} \eta_{\text{pv}} = 34.8 \text{ kW}。$$

式中:  $\eta_{\text{pm}}$  和  $\eta_{\text{pv}}$  分别为泵的机械效率和容积效率,均取  $0.95$ 。

参考机械设计手册(JB/T 10447—2004),选取电机的功率为  $37 \text{ kW}$ 。

## 3 螺旋输送液压系统设计

### 3.1 螺旋输送液压系统原理

螺旋输送机是试验平台的关键部件之一,其主要作用是将土仓内的渣土排出筒体。土仓内泥土通过螺旋杆输送压缩形成密封土塞,形成一定的阻力,可保持土仓内压力稳定在一定的范围内。试验平台运行时,要求螺旋输送机能根据土仓压力的反馈信号实时精确控制螺旋输送机的转速,进而确保土仓压力处于平衡状态<sup>[9]</sup>。采用电比例反馈控制的螺旋输送机液压系统,可实时控制螺旋机的转速。图2为螺旋输送机液压原理图。

### 3.2 螺旋输送液压系统参数计算

根据设计指标及功能要求,对螺旋输送机液压系统的主要技术参数进行设计计算。螺旋输送机液压系统主要设计参数为:螺旋输送机转速  $0 \sim 25 \text{ r/min}$ ;螺旋输送机额定转矩  $2500 \text{ N} \cdot \text{m}$ ;螺旋输送机最大驱动转矩  $3200 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

#### 3.2.1 马达

马达最大转速

$$n_{\max} = ni_j = 140 \text{ r/min}。$$

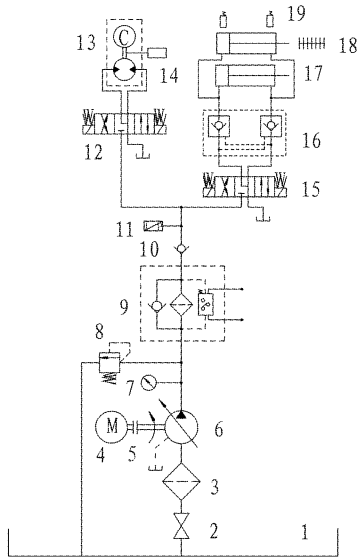
式中:  $n_{\max}$  为螺旋输送机最大转速;  $i_j$  为齿轮箱传动比,取  $5.6$ 。

马达最大输出转矩

$$T_{\max} = T/i_j \eta_j = 602 \text{ N} \cdot \text{m}。$$

式中： $T_{\max}$ 为螺旋输送机最大输出转矩； $\eta_j$ 为齿轮箱的机械效率，取为 0.95。

根据马达最大转速和最大输出转矩，选择马达的排量为  $400 \text{ cm}^3/\text{r}$ 。



1—油箱；2—球阀；3—吸油过滤器；4—电机；5—联轴器；6—变量泵；7—压力表；8—安全阀；9—压力管路过滤器；10—单向阀；11—压力传感器；12、15—三位四通电磁换向阀；13—马达；14—接近开关；16—液压锁；17—液压缸；18—位移传感器；19—行程开关。

图 2 螺旋输送机液压系统原理图

Fig. 2 Principle of hydraulic system of screw conveyor

### 3.2.2 主驱动泵

马达进出口压差

$$\Delta P = 2\pi T_m / V_{gm} \eta_{mm} = 10 \text{ MPa}。$$

式中： $V_{gm}$ 为马达的排量； $\eta_{mm}$ 为马达的机械效率，取 0.95。由于液压系统为开式回路，马达出口直接接油箱，因此可认为系统的工作压力约为 10 MPa。

马达实际所需流量

$$Q_m = n_m V_{gm} / \eta_{mv} = 58.9 \text{ L/min}。$$

式中  $\eta_{mv}$ 为马达的容积效率，取 0.95。

根据系统工作压力及流量需求，选用轴向柱塞斜盘式变量泵，其排量为  $25 \text{ mL/r}$ 。

### 3.2.3 电机

泵的实际输出功率

$$N = P_{\max} Q_m = 10 \text{ kW}。$$

式中  $P_{\max}$ 为泵的工作压力。

电机的输出功率

$$N_E = N / \eta_{pm} \eta_{pv} = 11.1 \text{ kW}。$$

式中： $\eta_{pm}$ 为泵的机械效率，取 0.95； $\eta_{pv}$ 为泵的容积效率，取 0.95。

根据计算可选用额定功率为 15 kW 的电机。

### 3.3 螺旋输送液系统控制策略

螺旋输送液系统根据位于密封仓内的上压传感器的实测值调整螺旋输送机的转速。当土压力超过目标上压设定的上限时，螺旋输送机的转速增大，加大排土量；当土压力低于目标土压设定的下限时，螺旋输送机的转速减小，减少排土量；当土压力位于目标土压设定的范围内时，螺旋输送机以定速旋转排土。图 3 为土仓内土压平衡调节流程。

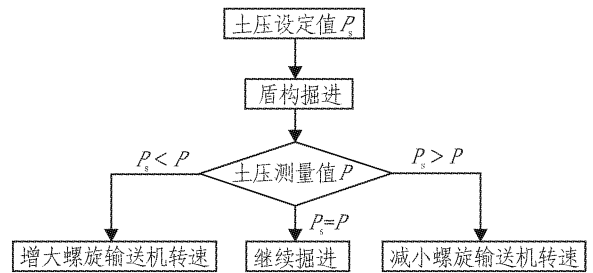


图 3 土压平衡机制工作流程

Fig. 3 Working process of earth pressure balance mechanisms

系统根据实时测量的土压信号计算出需要的螺旋输送机转速，然后通过调整变量泵的排量以改变控制螺旋输送机的马达转速，安装在马达输出轴上的转速传感器将测得的转速信号反馈到控制器完成闭环控制，进而使得马达转速与土压的变化相适应。图 4 为螺旋输送机转速控制框图<sup>[10]</sup>。

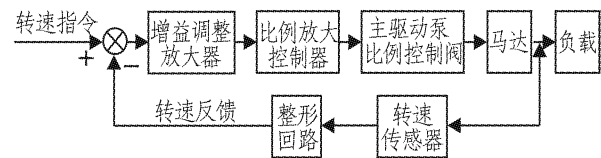


图 4 螺旋输送机转速控制框图

Fig. 4 Control of rotation speed of screw conveyor

## 4 泡沫发生液压系统设计

### 4.1 泡沫发生液系统原理

泡沫发生系统的工作原理是分别利用 2 条可以控制压力和流量的系统向发泡枪内注入发泡剂溶液和压缩空气，在压缩空气的作用下，发泡剂溶液在发泡枪内形成稳定而又致密的泡沫，并将其注入到土仓中<sup>[6]</sup>。其主要液压系统原理如图 5 所示。

### 4.2 泡沫发生液系统参数计算

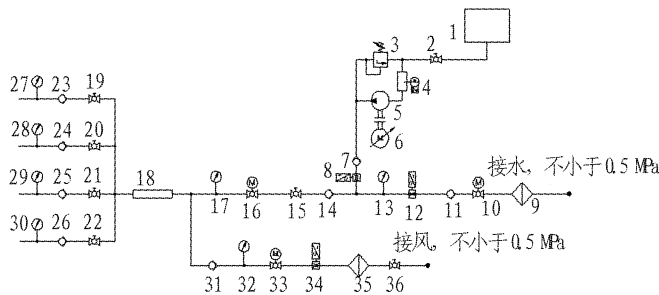
经过计算与分析得出泡沫发生系统主要元器件的技术参数值为：接入水压力、风压力  $\geq 0.5 \text{ MPa}$ ；发泡剂容器体积为  $1 \text{ m}^3$ ；泡沫泵压力为  $0.9 \text{ MPa}$ ，排量为  $5 \sim 300 \text{ L/h}$ ；变频电机功率为  $0.37 \text{ kW}$ 。

### 4.3 泡沫发生液系统控制策略

土体改良试验平台泡沫发生系统不仅能够向土仓内注入泡沫进行土体改良，还要求能够通过实验分析出泡沫添加量、发泡剂浓度、发泡倍率参数等与土体改良



性能的关系。因此,必须借助 PLC 实现对发泡剂、水和空气流量的比例控制以及水和空气压力的可控制。



1—发泡剂容器;2,15,19,20,21,22和36—手动球阀;3—溢流阀;4—液位开关;5—液压泵;6—变频电机;7,11,14,23,24,25,26,31—单向阀;8,12,34—流量传感器;9,35—过滤器;10,16,33—电动球阀;13,17,27,28,29,30,32—压力表;18—泡沫发生器;35—油水分离器。

图5 泡沫发生液压系统原理图

Fig. 5 Principle of hydraulic system of foam generating system

#### 4.3.1 发泡剂浓度的控制

发泡剂溶液为发泡剂与水按一定配合比混合所得溶液,发泡剂与混合液的质量配合比为发泡剂浓度。液压泵5控制发泡剂的流量,溢流阀3控制发泡剂的压力,电动球阀10控制水的流量,流量传感器8和12分别监测发泡剂和水的流量。通过5和10能够有效地控制发泡剂和水的混合比例,即实现了发泡剂浓度的控制。

#### 4.3.2 发泡倍率的控制

发泡倍率即单位体积的发泡剂溶液所发出气泡的体积,利用流量传感器8,12和34可监测发泡剂溶液和空气的流量,通过电动球阀16和33分别调节发泡剂溶液和和压缩空气的相对流量,进而控制气泡的发泡倍率。

#### 4.3.3 泡沫添加量的控制

泡沫添加量可以通过手动球阀19,20,21和22进行控制。

泡沫发生系统由控制台设置或维持操作,可通过3种方式来实现:1)手动控制——完全由工作人员根据经验来调节水、气的压力和流量来完成泡沫剂的注入;2)半自动控制——在半自动操作方式中,要求的泡沫流量将根据开挖仓中的支撑压力注入(此种控制方式下,需要将电动调节阀一直保持在要求的设定值并显示在指示表上);3)自动控制——在系统自动操作中,泡沫生产可以自动实现,不需外部干涉,仅依据推进速度、泡沫公式及土仓中的压力条件即可实现。

## 5 结论与建议

分析得出,本文所设计的推进液压系统、螺旋输送液压系统及泡沫发生液压系统通过合适的控制策略能满足土体改良试验平台的动力驱动及控制要求。本研究不仅为该土体改良试验台的制造提高了理论依据,

还能对其他类似试验平台的研制提供一定的参考。但由于3个液压系统是分开控制的,增加了控制元件的数量,提高了试验台的制造成本。鉴于系统集成控制技术的发展现状与趋势,应该针对如何实现3个子液压系统的集成控制作进一步研究。

#### 参考文献(References):

- [1] 汪国锋. 北京地铁十号线土压平衡盾构土体改良技术应用研究[J]. 现代隧道技术,2009(4):77-82. (WANG Guofeng. Soil improvement technologies and implementation for EPB shield in Beijing Subway Line 10[J]. Modern Tunneling Technology,2009(4):77-82. (in Chinese))
- [2] 马连丛. 富水砂卵石地层盾构施工渣土改良研究[J]. 隧道建设,2010,30(4):411-415. (MA Liancong. Study on ground conditioning for EPB shield in water-rich cobble ground[J]. Tunnel Construction,2010,30(4):411-415. (in Chinese))
- [3] 朱伟,郭涛,魏康林. 盾构用气泡的性能及对开挖土体改良效果影响[J]. 地下空间与工程学报,2006(4):571-577. (ZHU Wei, GUO Tao, WEI Kanglin. The performance of foams in shield tunneling method and its effect on the soil conditioning[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2006(4):571-577. (in Chinese))
- [4] 刘波,黄俐,杨丹丹,等. 盾构法施工中泡沫剂效能及改良土体的试验研究[J]. 市政技术,2009(2):154-156,164. (LIU Bo, HUANG Li, YANG Dandan, et al. Experimental research on efficiency of foaming agent and its modified-soil in shield tunneling construction [J]. Municipal Engineering Technology,2009(2):154-156,164. (in Chinese))
- [5] 黄德中. 超大直径土压平衡盾构施工土体改良试验研究[J]. 现代隧道技术,2011(4):65-71. (HUANG Dezhong. Research of soil improvement during super-large diameter earth pressure balanced shield[J]. Modern Tunneling Technology,2011(4):65-71. (in Chinese))
- [6] 郭涛. 盾构用发泡剂性能评价方法研究[D]. 江苏:河海大学土木与工程学院,2005. (GUO Tao. Study on the performance evaluation of foaming agents in PBS[D]. Jiangsu: Civil Enginesenyg, Hohai University,2005. (in Chinese))
- [7] 乔国刚. 土压平衡盾构用新型发泡剂的开发与泡沫改良土体研究[D]. 北京:中国矿业大学力学与建筑工程学院,2009. (QIAO Guogang. Development of new foam agent for EPB shield machine and foamed-soil modification [D]. Beijing: Mechanics and Architecture Engineefng, China University of Mining and Technology,2009. (in Chinese))
- [8] 郭胜忠. 全断面砂砾地层盾构法施工土体改良技术[J]. 都市快轨交通,2011(2):73-75. (GUO Shengzhong. soil improvement techniques for full-face shield tunneling through sand and gravel stratum[J]. Urban Rapid Rail Transit,2011(2):73-75. (in Chinese))

(下转第168页)

应合理的措施。

### 3 结论与讨论

隧道涌突水是常见的施工灾害之一,造成涌突水的原因很多。为准确地找出某隧道涌突水的可能原因,应对涌突水条件进行充分的掌握和全面分析,这样才能更好地运用各种隧道涌水的计算方法并选用合适的预报方法,制定合适的预报方案,避免勘察、预报时出现漏洞。超前地质预报不仅仅是对掌子面前方地质情况进行预报,也应该对已经开挖段、可能存在的危害进行预测预报。因埋深浅、宽张裂隙或岩溶管道发育等原因,隧道与地表联系密切的,应考虑水文与气候的变化;地下水发育是季节性变化的,预报手段在不同季节也应有所差别,水量计算也应在不同季节做调整;不同性质的断层,相同隧道段不同的开挖方向遇到的情况可能会有变化,预报方法也应有所不同。

由于目前的认知能力有限,勘察和地质预报的结论与实际常有一定的误差,尤其是对地下水水量及涌水形式判断不准会造成比较严重的危害。勘察工作中应增加对地下水调查的投入,勘察报告中应对涌水构造做专门的涌突水分析报告,包括含水量、水压等定量指标;对应的施工超前地质预报方案建议,应该建立在具体物性指标的基础上;应进一步研究钻探技术,选用新型钻探设备,广泛使用孔内成像技术,提高物探方法定量判断的能力,建立物探指标与空隙率和含水率等地质参数之间的关系;成立区域地质资料库,不断丰富汇集区域工程地质资料,为工程类比提供依据。

### 参考文献(References):

- [1] 铁道部第一勘察设计院. 铁路工程地质手册[K]. 北京: 中国铁道出版社,1999.
- [2] 张炜,李治国,王全胜. 岩溶隧道涌突水原因分析及治理技术探讨[J]. 隧道建设,2008,28(3):257-260. (ZHANG Wei, LI Zhiguo, WANG Quansheng. Cause analysis and countermeasures for water gushing of karst tunnels[J]. Tunnel Construction, 2008,28(3):257-260. (in Chinese))
- [3] 方俊波. 圆梁山隧道向斜段地表及地下连通性分析[J]. 隧道建设,2004,24(5):16-20.
- [4] 利奕年,王国斌. TRT隧道地质超前预报系统的改进与优化[C]//自主创新与持续增长第十一届中国科协年会论文集. 重庆:中国科学技术协会,2009.
- [5] 范占锋,李天斌,孟陆波. 探地雷达在公路隧道超前地质预报中的应用[J]. 物探与化探,2010,34(1):119-122. (FAN Zhanfeng, LI Tianbin, MENG Lubo. Advanced geological forecast of application of GPR in road tunnel[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(1): 119-122. (in Chinese))
- [6] 窦顺,韩成海,赵常要. 瓦窑坡隧道岩溶地质超前预报综合技术[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(2):366-370. (DOU Shun, HAN Chenghai, ZHAO Changyao. Synthetic prediction technology of karst geology in Wayaopo tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011,7(2):366-370. (in Chinese))
- [7] 铁建设[2008]105号 铁路隧道超前地质预报技术指南[S]. 北京:中国铁道出版社,2008.
- [9] 石前列,吴向东,黄贵川. 电液比例柱塞泵控制仿真分析[J]. 液压气动与密封,2011(6):20-22. (SHI Qianlie, WU Xiangdong, HUANG Guichuan. Simulation analysis of electro-hydraulic proportional variable displacement piston pump[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2011(6): 20-22. (in Chinese))
- [10] 胡国良,龚国芳,杨华勇,等. 盾构螺旋输送机液压驱动及控制系统[J]. 液压与气动,2004(12):33-36. (HU Guoliang, GONG Guofang, YANG Huayong, et al. Hydraulic drive and control system of shield screw conveyor[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2004(12): 33-36. (in Chinese))

(上接第159页)