

# 盾构刀盘驱动的电液比例控制系统的设计与实验

邢彤<sup>1,2</sup>, 龚国芳<sup>1</sup>, 胡国良<sup>1</sup>, 杨华勇<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 流体传动及控制国家重点实验室, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江工业大学 教育科学与技术学院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:**设计了一个盾构掘进机的刀盘驱动液压系统, 该系统是开式液压系统, 应用电液比例控制技术实现了泵排量实时调节。采用二通插装阀技术实现了高压、大流量液压控制系统的集成, 使系统具有结构紧凑、成本低的特点。分析了该液压系统是如何实现泵排量的电液比例控制及其在较大变化负载工况下流量的稳定性。模拟盾构掘进实验时, 电气控制为开环控制方式, 实验表明, 在负载变化较大时, 系统能准确地实现刀盘的比例调速, 系统的能耗低、温升小, 因此, 该系统能够很好地满足现代盾构的技术要求。

**关键词:**盾构掘进机; 刀盘驱动液压系统; 电液比例控制

中图分类号: TH137

文献标识码: A

## Design and experiment of electro-hydraulic proportional control system for the cutter-head drive of the shield tunneling machine

XING Tong<sup>1,2</sup>, GONG Guo-fang<sup>1</sup>, HU Guo-liang<sup>1</sup>, YANG Hua-yong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. School of Educative Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** A hydraulic drive system of cutter head in shield tunneling machine was designed, which is open type hydraulic system and controlled in open-ring. The electro-hydraulic proportional control technique was used to change displacement of pump at real-time. The 2-way cartridge valve technique was also used to assembly hydraulic control valve in the high pressure and high flow hydraulic system with character of compact and lower cost. Analyzed the mechanism of electro-hydraulic proportional control of pump's displacement and the mechanism of holding flow stability during the heavier and changeable load. The test dig showed that the cutter head speed can be proportional adjusted reliably when the load changed in large range, and the system has lower power consume, thus, system temperature ascended little. So, the drive system suits the requests of shield tunneling machine in present-day.

**Key words:** shield tunneling machine; cutter-head drive hydraulic system; electro-hydraulic proportional control

土压平衡 (Earth Pressure Balance, 简称 EPB) 盾构主要用于软土、沙粒和强风化岩层及含水的混合地层隧道掘进, 掘进施工时具有土压平衡模式。掘进操作可自动控制, 也可半自动控制或手动控制。盾构配备了自动导向系统, 可控制和稳定掘进方向, 具有灵活转向纠偏能力, 掘进误差可控制在 20 mm 以内<sup>[1]</sup>。刀盘是盾构的关键部件之一, 其主要功能有: 开挖、稳定和搅拌。因为整个施工段具有不同土质状况, 掘进断面的土质状况变化范围大, 刀盘的切削力矩及转速的变化很大, 刀盘驱动的工况很复杂; 另

收稿日期: 2005-12-26

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目 (50425518); 国家“863”高技术研究发展计划资助项目 (2002AA420120)

作者简介: 邢彤 (1969-), 男, 吉林长春人, 讲师, 博士研究生。Tel: 0571-87952500-234, E-mail: xingtong@zjut.edu.cn

外, 刀盘驱动功率大、耗能大, 因此, 盾构刀盘通常采用液压驱动. 需要解决的问题是: ① 土质条件不变时, 即使刀盘扭矩有较大变化, 刀盘转速保持稳定; 土质条件改变时, 刀盘转速可调. ② 液压系统的节能.

## 1 刀盘驱动液压系统的原理设计

盾构的刀盘直径为 1 800 mm, 刀盘驱动系统主要由液压泵站、阀块组、管路、液压马达、减速器、大小齿轮、主轴承及密封组成. 液压系统如图 1 所示, 设计成开式回路, 可适应两种工况, 即软岩工况时的低速大扭矩和硬岩工况时的高速小扭矩. 两种工况转换可通过控制电磁换向阀 6 来实现, 当电磁铁失电时, 溢流阀 7 确定系统的最大压力, 此时, 系统压力调定为 10 MPa, 输出扭矩小, 但流量大 (最大为 300 L/min), 输出转速高; 当电磁铁得电时, 溢流阀 8 确定系统的最大压力, 此时, 系统压力调定为 20 MPa, 输出扭矩大, 但流量小, 输出转速低. 刀盘转速通过调节变量泵 2 的排量实现, 压力传感器 4 测量液压马达的进油口压力, 压力信号经处理后反馈到变量泵的比例阀上, 构成速度闭环控制系统. 液压马达 9 和 10 的正反转可通过电液换向阀 3 来控制, 电磁铁  $B_1$  得电, 马达正转, 电磁铁  $B_2$  得电, 马达反转, 该阀的开启压力约为 0.85 MPa.

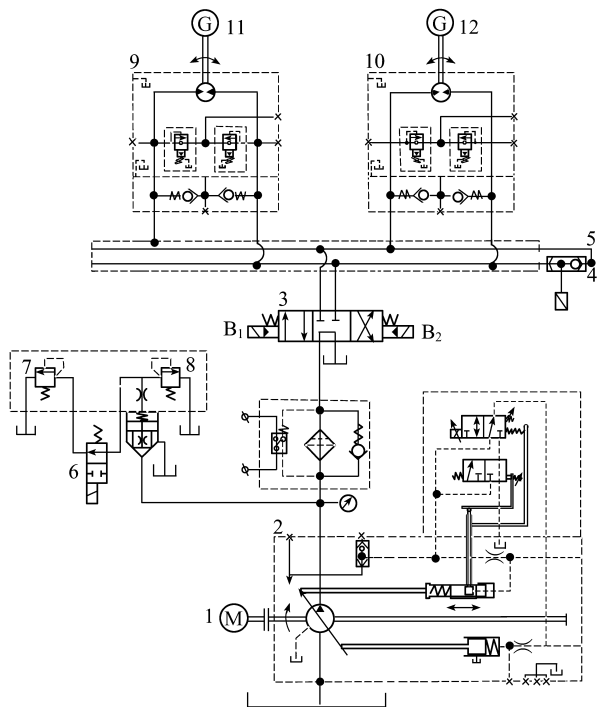


图 1 液压系统原理

Fig. 1 Hydraulic system principle

## 2 动力元件的选择与计算<sup>[2]</sup>

刀盘驱动主要设计参数: 刀盘扭矩为 117 kN · m (3.5 r/min 时), 刀盘转速为 0 ~ 6 r/min.

### 2.1 液压马达与泵的选择

液压马达的最大输出扭矩  $T_{\max} = T/i_c i_j z_m \eta_j = 117\,000 / (5.93 \times 80.4 \times 2 \times 0.8) = 153.4 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 其中  $i_c$  为齿圈速比;  $i_j$  为减速机的减速比;  $z_m$  为马达的个数;  $\eta_j$  为减速机及齿轮总的机械效率. 液压马达进出口工作压差  $\Delta p = 2\pi T_{\max} / q_m \eta_{mm} = 2\pi \times 153.4 / (45.6 \times 0.9) = 23.5 \text{ MPa}$ , 其中  $q_m$  为马达的排量;  $\eta_{mm}$  为马达的机械效率. 所以系统最大工作压力确定为 24 MPa. 液压马达选用的是 Rexroth 公司的 A2FE45/61W - NZL191. 其标称数据:  $q_m = 45.6 \text{ mL/r}$ ,  $n_{\max} = 6\,200 \text{ r/min}$ ,  $Q_{V\max} = 255 \text{ L/min}$ ,  $T_k = 0.072\,5 \text{ N} \cdot \text{m/MPa}$ , 当  $\Delta p = 40 \text{ MPa}$  时, 扭矩  $T = 290 \text{ N} \cdot \text{m}$ .

液压马达实际流量  $Q_m = z_m n_{\max} q_m / 1\,000 \eta_{mV} = 2 \times 2\,860.7 \times 45.6 / (1\,000 \times 0.9) = 289.9 \text{ L/min}$ , 其中  $\eta_{mV}$  为马达的容积效率. 泵所需最大排量  $q_p = Q_m / n_d \eta_{pV} = 289.9 \times 10^3 / (1\,500 \times 0.9) = 214.7 \text{ mL/r}$ , 其中  $\eta_{pV}$  为泵的容积效率. 选用 Rexroth 公司的 A11VO 260 LRDU2/11R - N2D12K01 变量泵.

### 2.2 系统主驱动用电机的选择

单台马达输出的功率  $N_m = 2\pi T_m n_m / 60\,000 = 2\pi \times 153.4 \times 1\,668.7 / 60\,000 = 26.8 \text{ kW}$ , 电机的输出功率  $N_E = 2N_m / \eta_{mm} \eta_{mV} \eta_{pm} \eta_{pV} = 2 \times 26.8 / (0.9 \times 0.9 \times 0.9 \times 0.9) = 81.7 \text{ kW}$ . 电机选择 ABB 公司的 M2QA - 90 kW - 4B35, 280M4A,  $n = 1\,480 \text{ r/min}$ .

### 3 刀盘驱动液压站的设计

为满足系统高压、大流量的需求,集成控制阀块采用二通插装阀结构,先导控制元件包括安全阀 7, 8 和换向阀 6. 插装件为锥阀结构,是 D 型带阻尼孔的 NG32 通径插件. 通过合理设计控制盖板的流道,与先导控制阀组合后可以控制插装件的工作状态,控制盖板内还配置一个阻尼螺塞,调整插装件的响应时间. 所有插件安装在符合 DIN24342 的安装孔内.

该液压站满足盾构刀盘及螺旋机的驱动. 由于希望液压站将来放置在盾体内部,决定了液压站的布局为串联式,即泵与电机在前,油箱在后. 单节盾体长为 3 m,限制了油箱的长度,为了尽可能增大油箱的容积,油箱设计成具有最大截面的异形油箱. 通常刀盘驱动液压系统的能耗较大,需要散发的最大热功率可按主驱动电机的功率损失全部转化成热量计算. 根据要求,液压系统需要对油箱液面、温度实现自动监控,在油箱上安装了液位控制继电器和温度控制继电器. 液位控制继电器的高位触发,系统报警;低位触发,系统停机. 温度控制继电器既能输出开关信号,又能输出模拟信号. 当温度达到 55 ℃,继电器触发,冷却系统启动;当温度低于 40 ℃,继电器触发,冷却系统关闭.

### 4 电液比例控制原理分析

A11VO 260 LRDU2 泵的变量控制原理如图 2 所示,变量调节特性如图 3 所示( $q_g/q_{g\max}$  为实际输出排量与最大排量之比),泵的排量在其整个范围内可无级调节,并与比例电磁铁的控制电流成比例.

变量控制机构包括带比例电磁铁的流量控制先导阀 1、压力适应先导阀 2、压力反馈油缸 3、推杆 4、折形杆 5、带弹簧的推杆 6、变量缸 7、梭阀 8. 这是一个压力-位移-力反馈式排量调节机构. 先导级的位移输入由比例电磁铁给出,先导级的力平衡方程决定阀口开度,变量缸的力平衡方程决定变量活塞的位移.

若泵的 G 油口没有外接控制油,泵刚开启时,系统没有压力,推杆 6 上的弹簧推动它到最左侧位置,这时斜盘倾角最小,泵的排量最大. 此时,变量缸 7 的活塞在最右侧位置,将其右侧的弹簧压缩到最短,安装在推杆 6 上的油缸 3 和杆 4 处在最左侧位置,先导阀 1 的阀芯在右位,右侧杆 4 上的弹簧压缩到最大,先导阀 2 的阀芯处在右位. 随着系统逐渐建立压力,推动梭阀 8 的阀芯上移,液压油经比例阀 1 流入变量缸 7 的右腔,当变量缸 7 右腔压力及其弹簧力与先导阀 1 右侧弹簧力之和大于推杆 6 的弹簧力时,推杆 6 右移,同时变量缸 7 活塞左移,泵的排量变小. 当系统压力达到 3 MPa 时,变量缸 7 的活塞在最左侧位置,推杆 6 在最右侧位置,斜盘倾角最大,泵的排量为零,只有少量内泄漏. 此时,油缸 3 和杆 4 处在最右侧位置,油缸 3 的活塞有微小的伸出. 先导阀 1 右侧杆 4 上的弹簧压缩量最小,阀芯仍在右位,先导阀 2 的阀芯处在右位. 若泵的 G 油口外接控制油,控制油压力达到 3 MPa,则泵在控制油压的作用下,变量缸 7 的活塞在最左侧位置,斜盘倾角最大,排量输出为零. 当系统处于某一工作压力下,油缸 3 的下腔压力推动活塞使其处于某个位置,使折形杆 5 转动,因而,先导阀 2 的阀口开度与泵出口压力相适应. 当外加比例信号大于 200 mA 时,先导阀 1 的比例电磁铁推力大于其右侧的弹簧力,阀芯右移,阀口开度减小,进出口压差增大,因而,变量缸 7 右腔的压力减小,活塞右

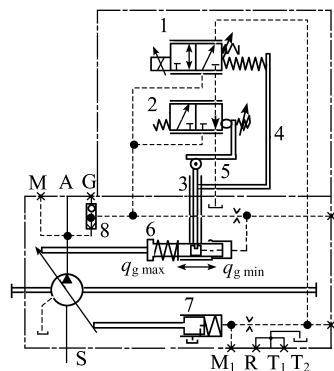


图 2 变量控制原理

Fig. 2 The displacement control principle of motor

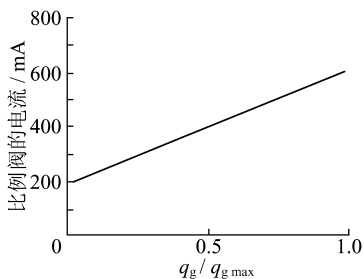


图 3 变量调节特性

Fig. 3 The characteristic of displacement control

移,斜盘倾角变小,泵的排量增大.当比例信号达到 600 mA 时,先导阀 1 的阀芯到最右侧,变量缸 7 右腔接油箱,活塞处于最右端,泵的排量达到最大.若设定流量不变,当负载增大,系统压力变大,变量缸右腔压力增大,活塞左移,排量变小.同时,推杆 6 带动推杆 4 右移,推杆 4 上作用在先导阀 1 右侧的弹簧力减小,使先导阀 1 的阀芯右移,阀口开度变小,压差变大,使得变量缸的右腔压力变小,变量缸活塞又恢复到原位置,泵排量不变.如果实际功率超过泵的功率曲线,油缸 3 的活塞伸出,推动折形杆 5 转动,使先导阀 2 右侧弹簧大大压缩,先导阀 2 的阀芯到左位,进入到先导阀 2 的液压油全部进入到先导阀 1,使变量缸 7 的右腔压力上升,活塞左移,斜盘倾角变大,排量变小<sup>[3]</sup>.

总之,恒功率控制优先于变量控制,如果实际功率超过泵的功率曲线,则恒功率控制取代电控变量并按照恒功率曲线减小排量.当低于功率曲线时,排量受控制电流的调整,泵输出的流量只与输入控制信号相关,而不受负载压力变化的影响,即在功率限制范围内能适应负载的变化.所以,泵始终能工作于与负载匹配的工况,具有明显的节能效果.

## 5 刀盘驱动实验

实验装置如图 4 所示,包括模拟土箱、模拟盾构机、主顶、土体加压泵站、模拟盾构机泵站和控制室.模拟土箱内的土通过水囊进行加压,模拟盾构机由主顶推进,模拟盾构泵站包括刀盘与螺旋机驱动泵站和主顶驱动泵站.模拟土箱内的多个断面布置有压力传感器,实现对不同土压的模拟.刀盘转速通过在刀盘上布置 2 个接近开关进行测量,主顶的位移通过布置在油缸内的位移传感器测量.刀盘驱动实验时,主顶间歇推进,刀盘转速连续调节,实验结果如图 5~7 所示.

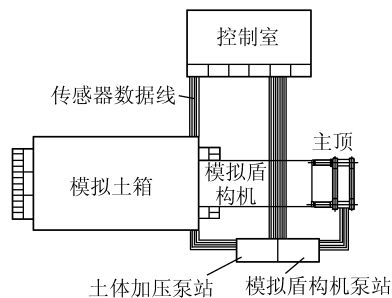


图4 盾构实验台

Fig. 4 The test set

实验时,一个操作员调节螺旋机的转速和推进速度控制旋钮使盾构前进并保持正面土压力与盾构土仓内压力平衡,另一操作员调节刀盘转速控制旋钮.

图 5 (a) 是盾构共推进 1.5 m, 平均推进速度为 2.5 cm/min. 图 6 (a) 所示的刀盘转速有较大的波

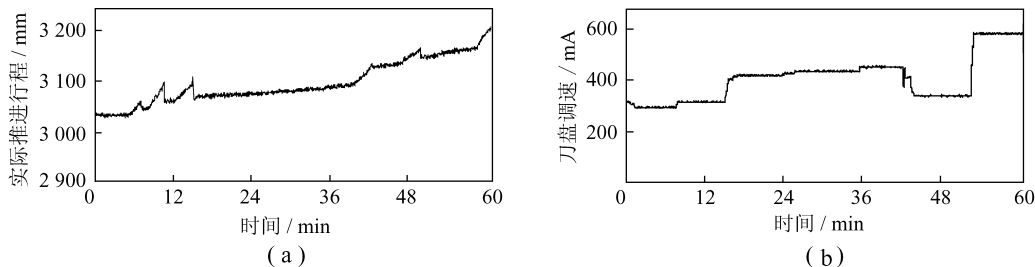


图5 推进行程及刀盘调速

Fig. 5 The shield distance and control current

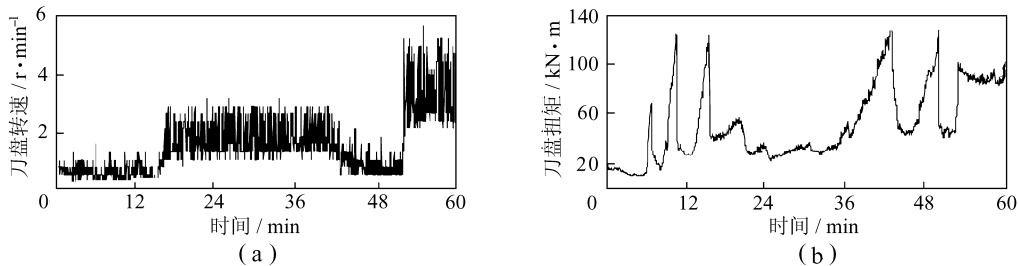


图6 刀盘转速及扭矩

Fig. 6 Speed and torque of the cutter head

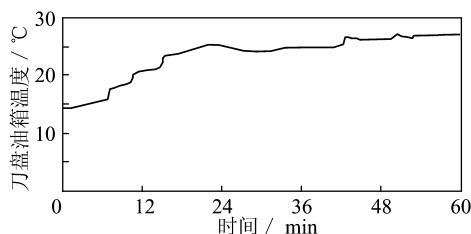


图 7 油箱温度

Fig. 7 The tank temperature

动, 原因是由于没有及时加注泡沫且土质较黏, 刀盘有卡住的现象, 另外, 刀盘转速较低, 用 2 个接近开关测量精度不高. 但是, 刀盘转速曲线的趋势表明, 刀盘转速能够按照操作员的调节作出相应的变化. 图 6 (b) 的刀盘扭矩曲线表明, 刀盘扭矩变化大, 可能是螺旋机的排土速度没有及时调节的原因. 对比图 6 (a) 与 (b), 说明在刀盘扭矩有较大波动下, 刀盘转速能够根据调速信号按比例调速. 油箱的升温曲线如图 7 所示, 液压系统的升温仅 10 °C, 并达到温度平衡, 说明该液压系统的能量损失小, 效率高.

## 6 结 论

电液比例泵控马达调速系统能够实现盾构刀盘驱动的调速要求, 在刀盘扭矩变化较大的情况下, 刀盘转速稳定; 系统采用二通插装阀技术实现了高压、大流量液压系统的控制, 变量泵能很好地与负载匹配, 系统能量损失小, 节能效果明显.

### 参考文献:

- [1] 刘仁鹏. 土压平衡盾构技术综述 [J]. 世界隧道, 2000 (1): 1~7.
- [2] 路甬祥. 液压气动技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] 吴根茂, 邱敏秀, 王庆丰, 等. 实用电液比例技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1993.

## 2007 年《JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING (CHINA)》(《煤炭学报》英文版) 征订启事

《JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING (CHINA)》是中国煤炭学会主办的刊物, 是向国内外公开发行的英文版煤炭科学技术方面的综合性学术刊物. 主要刊载煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护等方面的研究成果论著和学术论文, 以及煤矿生产建设、企业管理经验的理论总结, 也刊载重要学术问题的讨论及国内外煤炭科学技术方面的学术活动简讯.

《煤炭学报》英文版《JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING (CHINA)》是向世界传播我国煤炭科学技术的重要媒体, 对加强中外科学技术交流, 宣传我国煤炭科学成就, 提高我国煤炭科学技术的国际地位将起到重要的作用. 及时报道我国煤炭科技新理论、新技术、新经验也是《煤炭学报》英文版的主要任务. 《煤炭学报》英文版和中文版具有不同的刊登内容和各自的特点.

《煤炭学报》英文版是季刊, 每期 112 页, 每册国内订价 28 元, 全年共收费 112 元. 订阅者可直接和本编辑部联系, 订单函索即寄, 编辑部随时办理订阅手续.

本刊地址: 北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部 邮政编码: 100013

联系电话: (010) 84262930, E-mail: mtxbhjp@126.com, mtxb@vip.163.com