

声频振动钻机的流量与负载同步结构概述

荣鹤淇^{1,2}, 王瑜^{1,2}, 李炯¹, 吴浩³, 周兢^{1,4}

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部深部地质钻探技术重点实验室, 北京 100083;
3. 中国煤炭地质总局第二勘探局, 河北保定 072750; 4. 中国煤炭地质总局, 北京 100000)

摘要: 声频振动钻机由于其不使用钻井液、对地层无污染等优点, 广泛应用于环境调查领域。声频钻机的双偏心轴若在高速下达到同步状态能够极大地提高钻进效率。从常见的流量与负载同步结构与原理以及其同步精度和优缺点等方面系统分析了声频振动钻机双偏心轴的同步机理, 提出了解决高转速下的同步思路, 以期为其完善和提升提供参考。

关键词: 声频振动钻机; 双偏心轴; 同步结构; 流量同步; 负载同步; 转速同步; 相位

中图分类号: P634.3; X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)S1-0071-06

Overview of flow and load synchronization structure based on sonic drilling rig

RONG Heqi^{1,2}, WANG Yu^{1,2}, LI Jiong¹, WU Hao³, ZHOU Jing^{1,4}

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Key laboratory on Deep GeoDrilling Technology, MNR, Beijing 100083, China;
3. China Coal Geology General Bureau No.2 Exploration Bureau, Baoding Hebei 072750, China;
4. General Bureau of Coal Geology of China, Beijing 100000, China)

Abstract: Sonic drilling rig is widely used in the field of environmental investigation because it does not use drilling fluid and has no pollution to the formation. The drilling efficiency can be greatly improved if the double eccentric shafts of the sonic drilling rig are synchronized at high speed. This thesis systematically analyzes the synchronization mechanism of double eccentric shafts of sonic drilling rig from the common structure and principle of flow and load synchronization, as well as its synchronization accuracy, advantages and disadvantages, and puts forward the synchronization idea at high speed, so as to provide reference for its perfection and promotion.

Key words: sonic drilling rig; double eccentric shaft; synchronous structure; flow synchronization; load synchronization; rotation speed synchronization; phase synchronization

0 引言

从 Hugenii 等^[1]的研究开始, 同步现象已经引起了数学、物理、生物以及机械和电气工程各个领域的许多研究者的注意。根据《韦氏新大学词典》^[2], 同步是指 2 个或 2 个以上进程的对应时间行为。经典的例子是月球轨道运动和自转运动之间的同步。

在某些情况下, 同步机制是由于流程本身的自然属性和它们之间的自然交互而产生的。一个众所周知的例子是振荡或旋转物体的频率同步。

声频振动钻进技术采用液压驱动钻进, 无需泥浆, 通过双偏心轴高频振动进行钻进, 经济环保, 是近年来环境调查领域应用较为广泛的钻进方式^[3]。

收稿日期: 2023-05-30 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.S1.011

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“声频振动钻进系统共振机理及能量传递规律研究”(编号: 41672366)

第一作者: 荣鹤淇, 男, 汉族, 2000 年生, 硕士在读, 地质工程专业, 研究方向包括自供电传感器、声频振动钻机等方面, 北京市海淀区学院路 29 号, rhq258000@163.com。

引用格式: 荣鹤淇, 王瑜, 李炯, 等. 声频振动钻机的流量与负载同步结构概述[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 71-76.

RONG Heqi, WANG Yu, LI Jiong, et al. Overview of flow and load synchronization structure based on sonic drilling rig[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 71-76.

因此,为了保证声频钻进效率,能否使两个偏心轴同步振动是一项关键技术。一旦两个偏心轴不能同步转动,那么较大的水平激振力不能相互抵消,就会造成垂直激振力的能量损失^[4],以及减振结构的失效造成振动头损坏^[5]。本文基于声频钻机同步结构,对常用的流量同步结构与负载同步结构进行了调研与总结,重点介绍各种同步结构的原理。

1 常见的流量与负载同步结构

对于声频钻机双偏心轴来说,为了得到最大的竖直激振力,需要使两偏心轴的转速与相位同步^[6],即达到完全同步状态^[7]。由于声频钻机采用液压控制,因此转速同步依靠于流量同步,相位同步依靠于负载同步。

1.1 流量同步结构

常用的流量同步结构主要有自同步结构、同步分流马达、同步阀以及液压同步回路等。其中同步分流马达与同步阀结构多应用于液压同步回路中来达到流量同步的目的。

1.1.1 自同步结构

自同步一般指2个或者多个相对独立的激振器在一定的分布方式、振动条件下^[8],能够对转速与相位的差值进行自动调节,并最终达到稳定状态^[9]。在很多振动结构中自同步结构都有应用^[10],这些相对独立的振动结构中存在着能够交换能量的柔性公共基础是实现转速与相位的差值相对稳定的前提^[11]。

北京探矿工程研究所研制的TGSD-50型声频振动取样钻机,两偏心轴同步,提高了声频钻机的效率。该钻机的同步结构如图1所示。该同步结构主要由外壳体、2个规格相同的液压马达以及减振结构组成。其工作原理为:2个液压马达同时驱动偏心轴转动,一旦两偏心轴产生相位或者转速的不同步,这时会通过柔性公共基础均匀分配能量,最后达到两偏心轴同步^[12]。

1.1.2 同步分流马达

液压同步分流马达又称同步马达,是由若干个规格相同、性能参数接近、加工精度高的液压马达组成的,从而实现同步运动。主要有2种形式,一种是柱塞式同步马达,另一种是齿轮式同步马达,两者实物如图2所示。

图3是柱塞式同步马达的结构图,其基本结构

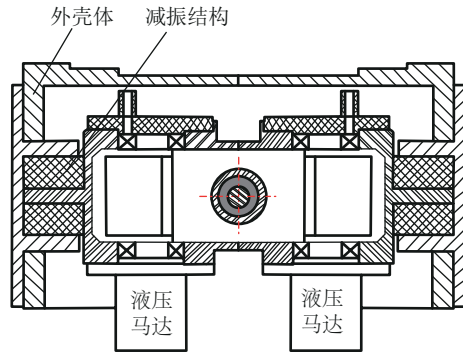


图1 TGSD-50型声频振动钻机自同步结构

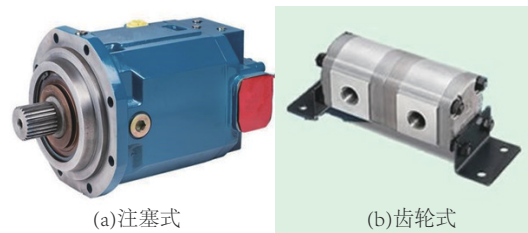


图2 液压同步分流马达

由壳体、活塞、曲轴、配油盘和进出油口阀块组成,其特征在于相邻的两液压马达中间设有隔板,通过螺栓连接,液压马达的曲轴轴端设有内花键,2个液压马达内曲轴经花键轴刚性连接,配油盘置于壳体上的配油盘端盖内^[13]。

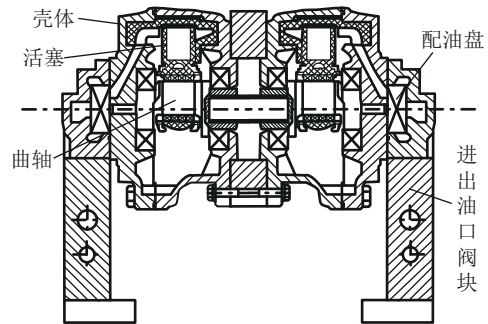


图3 柱塞式同步马达结构

图4是齿轮式同步马达的结构图,其基本结构主要是通过各种花键、轴、螺栓连接在一起的多对外啮合齿轮,根据需要可以组成两联、三联或更多联的形式。由于在端盖与齿轮之间存在着轴向间隙,通常为了提高同步马达的容积效率,会在齿轮的两侧加上带有压力槽的浮动侧板^[14]。主动齿轮上带有内花键孔,2个液压马达的主动齿轮通过花键轴刚性连接,然后所有液压马达通过螺柱连接成齿轮式液压同步马达组^[15]。

工作原理为:由于负载压力的影响,在工作时每

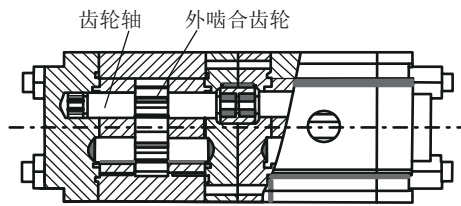


图 4 齿轮式同步马达的结构

联马达都具有马达或泵的功能。整个同步马达有一个共同的进油口以及各自的出油口,2个出口流量之和与进油流量相同^[16]。由于各个马达与液压执行元件的规格相同,加工精度相似,因而保证了2个马达的流量相同,达到速度相同进而同步的目的。

1.1.3 同步阀

同步阀又称分流集流阀,主要应用于双缸及多缸同步控制液压系统中。按照液流方向可以分为分流阀、集流阀、分流集流阀。3种同步阀的图形符号如图5所示。分流阀作用是在液压系统中由一个液压油源向2个或多个液压执行元件提供等量流量或一定比例的流量,由此可以实现液压执行元件的速度同步或一定比例同步;集流阀作用是从2个或多个液压执行元件收集等流量或一定比例的回油量,由此实现其速度的同步或成一定比例。分流集流阀作用则是兼有上述2种阀的功能^[17]。

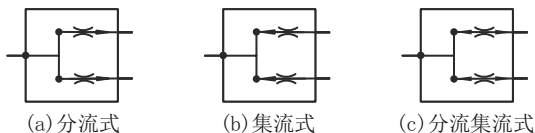


图 5 三种同步阀图形符号

图6是实现分流或集流单向功能的同步阀与分流集流阀实物图。按照结构则可以将同步阀分为换向同步阀、挂钩式同步阀、可调式同步阀、自调式同步阀。活塞式换向阀是以活塞来使阀芯开合,挂钩式换向阀则是换成了挂钩,两者的工作原理相同,节流口的面积是固定的。可调式换向阀^[18]则是把固定节流口改成了可调节节流口,使用者可以在使用时根据实际流量来调节开口面积,进而达到同步的目的。自调式换向阀则是将固定节流口用定差减压阀来替代。它可以根据回路的流量大小自行调整节流口开口面积。

图7是同步阀的基本结构图,它由阀体、阀芯、弹簧、端盖构成,阀体是同步阀的主体部分,其他部分在其内部形成流量通道;阀芯的内部有左右两个

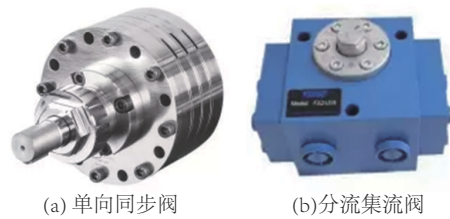


图 6 单向功能的同步阀与分流集流阀

相互独立的阀腔,两个腔体的一侧由固定节流口与进油口相连,另一侧由可变节流口与出油口相连,阀芯是可以在阀体内来回滑动来改变节流口面积大小的,以此来实现对流量与方向的控制;弹簧可以通过克服阻力来推动阀芯在阀体内滑动;端盖主要是对整体进行密封同时与阀体共同承压^[19]。

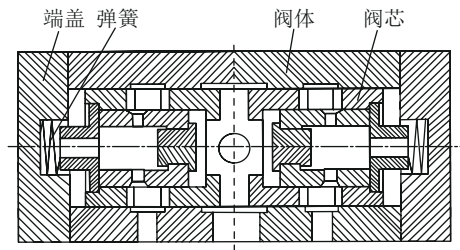


图 7 同步阀的基本结构

同步阀的基本原理可以概括为阀芯通过移动来改变2个可变节流口的压力差或两支路总阻尼,最终达到2个节流口的流量相等或两支路总阻尼与负载相等即达到同步^[20]。

1.1.4 液压同步回路

以两联式同步马达为例,采用液压同步马达的同步回路,如图8所示。

其中溢流阀起到安全阀的作用,它会保证在回路中出现高压使得一个液压缸到达行程终点时,另一个液压缸仍可以继续上升,直到2个液压缸都

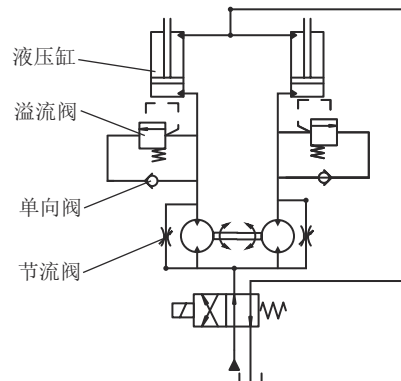


图 8 采用液压同步马达的同步回路

完成举升动作。单向阀的作用是维持回路的最小压力,当在液压缸工作时,保持住回路的最小压力可以在2个液压缸没有同时到达终点时,使先到达终点的液压缸不会发生吸空现象。节流阀的作用除了可以调节液压缸上升的速度外,当液压缸下降时,因为同步马达的作用是收集回油保持流量一致,它可以防止同步马达以先到达终点的液压缸的速度运行,不至于另一个液压缸跟不上^[21]。

采用同步阀的同步回路如图9所示。

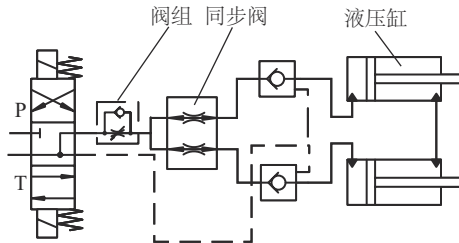


图9 采用同步阀的同步回路

其中单向阀与节流阀组成的阀组作用与上述同步马达的节流阀相同,同样为保证回路的最小压力,使系统进行及时补油。

1.2 负载同步结构

负载同步结构主要包括带同步与齿轮同步。在声频钻机双偏心轴中,二者均是通过本身结构特点使得两偏心轴强制同步,即达到相位同步的目的。

1.2.1 带同步

带传动具有100多年的历史,由于其经济性与操作简便等特点,是机械传动中比较具有竞争力的一种传动方式。带传动具有多种种类,主要有摩擦形式与啮合形式。诸如圆带传动、平带传动、V带传动等摩擦形式,以及同步带传动的啮合形式^[22]。

带同步的实现离不开带轮与带的相互配合,相对简单的带同步结构主要由主动带轮、传动带、从动带轮组成。对于带同步来说,足够的摩擦力是实现同步的主要条件。因此对于传动结构的优化、传动带本身材料^[23]及传动带结构参数^[24]的研究以此来增加摩擦力是近年来的发展趋势。

图10是一种使用了压紧带轮的带同步结构,该结构由一组主从动带轮、压紧带轮、两个换向带轮以及支撑主体组成。其工作原理为:在压紧带轮处存在一个处于压紧状态的弹簧结构,一旦传动带因长期使用而变得松弛时,通过弹簧伸缩改变压紧带轮的移动使传动带一直处于紧绷状态,这样便可以保

证带轮与带之间具有足够的摩擦力,从而保证同步精度^[25]。

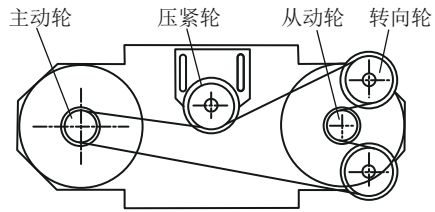


图10 采用压紧带轮的带同步结构

为了进一步加强带轮与带之间的摩擦力,图11不仅采用了压紧带轮并且使用了啮合型同步带。啮合型同步带通过带上面的凸齿与带轮上凹陷的齿槽相啮合进行传动,兼顾带传动与齿轮传动的优点,使整体结构拥有足够的摩擦力^[26]。

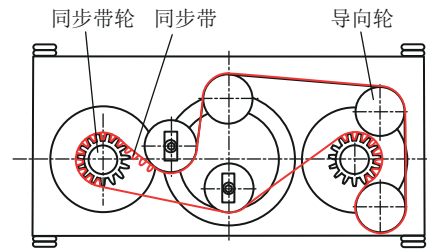


图11 采用压紧带轮与齿形带的带同步结构

1.2.2 齿轮同步

齿轮传动是机械传动中应用最广泛的传动形式,齿轮传动的种类很多,按照装置形式可分为开式、闭式、半开式齿轮传动;按照使用情况可分为低速、高速、重载、轻载齿轮传动等;按照热处理方式又有较软与较硬之分^[27]。因此,齿轮同步结构也是一种非常重要的同步形式。

图12是一种采取齿轮同步结构的同轴式振动器。该振动器结构为内转动轴、外转动轴(两者共轴心)、安装在内轴上的一个大偏心块、安装在外轴上的2个小偏心块、连接内外转动轴的一组锥齿轮。振动器的工作原理为:首先动力装置将动力输入到内轴上,再通过内轴上的锥齿轮传动到外轴上的锥齿轮。2个小偏心块随着外轴同步同向转动,大偏心块则随着内轴与2个小偏心块同步异向转动,从而水平力抵消,产生竖直激振力^[28]。

图13则是另一种采取齿轮同步结构的机械式振动器。该振动器结构主要由外壳体、4个偏心块、4个锥齿轮、中心轴构成。其工作原理为:位于中心

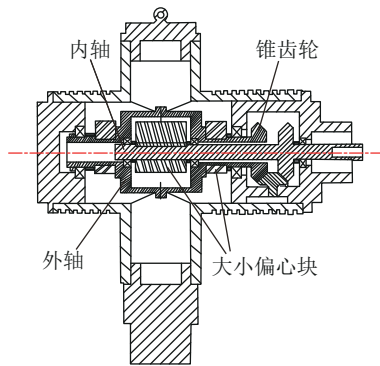


图12 采取齿轮同步结构的同轴式振动器

轴对侧的2个偏心块为一组并同轴,当中心轴转动时,通过锥齿轮带动2组偏心块同步异向旋转,由此产生竖直激振力^[29]。

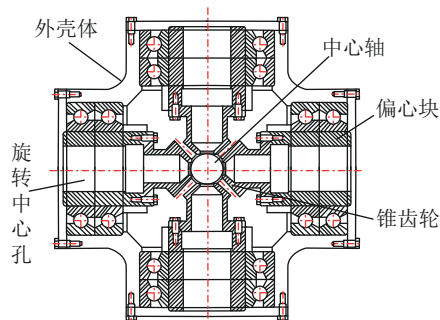


图13 采取齿轮同步结构的机械式振动器

2 同步结构的同步精度与优缺点

自同步结构具有能在初始转速与相位存在差值时进行自我调节的优点,但自同步结构实现的前提是存在柔性公共基础传递能量,同步条件要求较高^[30],更难以实现相位同步^[31]。用并联液压马达方式驱动两偏心轴同步时,会因液压马达安装差异等导致液压油不能同步供给^[32],即使通过自同步特性使得偏心轴转速相同,但是相位的不同步无法避免。

同步阀多是应用于液压同步回路中。在开环液压同步回路中,同步精度是评价其性能好坏的主要因素^[33]。现在市场上流通的同步阀同步精度大多为3%~6%^[34]。同步阀的优点有结构简单、容易加工、可靠性强、成本较低等。缺点是在实际工作中同步阀经常会出现负载压差和入口流量不等于额定流量的情况,从而产生同步误差。

液压同步马达的同步精度主要取决于负载的均匀性以及马达与液压缸的加工精度,据调查,柱塞式同步马达的精度为 $\pm 0.4\% \sim \pm 0.9\%$,齿轮式同步马

达的精度为 $\pm 1.5\% \sim \pm 2.5\%$ 。

柱塞式同步马达适用于压力较大、同步精度要求较高的场合,优点是速度广,流量脉动小,密封性好;缺点是结构复杂,成本高,加工难度高,并且必须保证使用之前液压油充满壳体,使用的时候也要外接泄油管^[35]。齿轮式同步马达的优点是结构简单,体积小,工艺性好,内部压力损失小,成本较低,使用时无需外接泄油管;缺点是低速时不稳定,运动时有脉动现象,分口流量的均匀性较差,容积效率较低^[36]。虽然齿轮式同步马达有如上缺点,但是在实际工况中需要控制多组液压缸,柱塞式同步马达加工难度大,且成本远高于齿轮式同步马达,因此在各行业中广泛使用齿轮式同步马达^[37]。

带同步结构具有成本较低、容易安装与更换、结构简单的优点,在相对较低的转速下,通过调整结构与传动带类型确实能较精确地传递扭矩。但在高转速工况下,传动带即使在有压紧装置的情况下,依旧会发生弹性滑动导致打滑与跳齿问题^[38]。

齿轮同步结构具有承载能力大,传动精度高的优点,但由于齿轮本身的特性使得初始相位存在误差。由于声频钻机是在较高转速工况下工作,因而存在初始相位误差会导致两个偏心轴振动时水平激振力难以抵消,最后造成能量损失。

3 解决同步技术的思路

目前声频钻机中常用的同步结构,主要包括带同步^[39]、齿轮同步^[40]、自同步^[41]3种。每种同步结构都有其优缺点,总的来说解决双偏心轴同步问题主要有如下2点。

3.1 使双偏心轴转速相同

为使2偏心轴转速相同离不开液压油的同步供给,因此能同时进行相同的流量供给是研究双偏心轴转速相同的重点。解决转速不同步的手段可从液压管线与液压马达安装、完善的隔振系统、更加合理的液压回路设计等方面着手。精准的管线与液压马达安装与完善的隔振系统可从结构上保证流量供给同步,合理的液压回路可从原理上提高同步精度。

3.2 使双偏心轴相位相同

由于达到相位同步的难度过大,因此无论是带同步还是齿轮同步结构,都是采用强制负载同步使得两偏心轴在旋转过程中达到相位同步的目的。对于带同步来说,更加不易打滑且耐磨的传动带与结

构的调整是必要的;对于齿轮同步来说,则需要降低齿轮本身所带来的初始相位误差。

4 结语

声频振动钻机双偏心轴达到同步可以使水平激振力完全抵消,竖直激振力达到最大,从而使得钻进效率得到提高。但是在高转速下还存在转速与相位不能同步的关键问题。需要进一步对流量同步与负载同步结构展开深入研究,这对达到完全同步的目标至关重要。

参考文献:

- [1] Hugenii C. The Horoloqium Oscilatorium[M]. Parisiis: F. Muquet, 1673.
- [2] Merriam-Webster Inc. Merriam-Webster's Collegiate Encyclopedia[M]. Merriam-Webster, 2000.
- [3] 颜纯文. 声波钻进和宝长年LS250声波钻机[J]. 地质装备, 2016, 17(5): 11-15.
- [4] Qian Yonghang, Wang Yu, Wang Zhiqiao, et al. The rock breaking capability analyses of sonic drilling[J]. Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control, 2021, 40(4): 2014-2027.
- [5] 赵晓冬, 吴浩, 陆卫星, 等. SZ-50型声频振动钻机动力头减振方案的改进[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(12): 1-3.
- [6] Blekhman Ii, Fradkov AL, Tomchina OP, et al. Self-synchronization and controlled synchronization: General definition and example design[J/OL]. Mathematics and Computers in Simulation, 2002, 58(4-6): 367-384.
- [7] Perlikowski P, Stefański A, Kapitaniak T. 1:1 mode locking and generalized synchronization in mechanical oscillators [J/OL]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 318(1-2): 329-340.
- [8] 张学良, 闻邦椿, 赵春雨. 双机及多机驱动振动系统同步理论的研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(6): 87.
- [9] 张学良. 双机及多机驱动振动系统同步理论的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [10] 赵春雨, 王立, 任杰, 等. 共振振动系统中两激振器的自同步[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(12): 1754-1757.
- [11] 赵春雨, 王得刚, 张昊, 等. 同向回转双机驱动振动系统的频率俘获[J]. 应用力学学报, 2009, 26(2): 283-287.
- [12] 张培丰, 贾绍宽, 朱文鉴, 等. TGSD-50型声频振动取样钻机的研制[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(1): 35-38, 70.
- [13] 李耀红. 一种柱塞式液压同步马达[P]. 中国: CN201599064U, 2010-10-06.
- [14] 常久洋. 同步马达压力补偿阀的结构优化设计与流场仿真[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- [15] 丁青. 齿轮式液压同步马达[P]. 中国: CN207033646U, 2018-02-23.
- [16] 文明, 周黎, 赵明岗, 等. 液压分流马达特性分析与应用研究[J]. 液压气动与密封, 2013, 33(1): 37-40.
- [17] 汪泽波. 液压同步阀的创新研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
- [18] 张强. 浅谈可调式同步阀在HXY-800QT拖车钻机中的应用[J]. 地质装备, 2015, 16(2): 19-21.
- [19] 蒋淋. 原理性误差全补偿的新型同步阀的分析与研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [20] 许立, 庞海军, 施志辉, 等. 基于AMESim的液压同步阀集流工况仿真与分析[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(9): 1535-1538.
- [21] 王莉, 钟浩. 架桥机对称升降液压缸的同步性研究[J]. 中国高新技术企业, 2013, 245(2): 22-24.
- [22] 秦书安, 周鹏, 周玉杰, 等. 带传动行业发展状况综述[J]. 机械传动, 2020, 44(8): 1-7.
- [23] Bai Su, Jones Mitchell P, Pech de Laclause, et al. Towards robust synchronous belts: Influence of surface characteristics on interfacial adhesion[J]. Composite Interfaces, 2022, 29(10): 1-15.
- [24] Zhang Z, Pang M, Teng C. Research on measurement of tooth profile parameters of synchronous belt based on point cloud data[J]. Sensors, 2022, 22: 6372.
- [25] 吴浩, 陆卫星, 任晓飞, 等. YSZ-50型声频振动钻机的研制[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(1): 9-13.
- [26] 赵晓冬. MGD-S50 II型声频振动钻机场地试验及钻探工艺研究[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(2): 76-79.
- [27] 刘金平. 浅析齿轮传动中轮齿的失效形式及预防[J]. 机电产品开发与创新, 2023, 36(2): 141-143.
- [28] 周裕民. 同轴式声频物探钻机振动器的动力学分析与优化[D]. 西安: 西安石油大学, 2018.
- [29] 张燕. 声波钻进振动器的结构原理浅析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(7): 77-80.
- [30] Balthazar J M, Felix J L P, Brasil R. Short comments on self-synchronization of two non-ideal sources supported by a flexible portal frame structure[J/OL]. Journal of Vibration and Control, 2004, 10(12): 1739-1748.
- [31] Zhang X L, Yue H L, Li Z M, et al. Stability and coupling dynamic characteristics of a vibrating system with one internal degree of freedom and two vibrators[J/OL]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 143: 106812.
- [32] Zhang T X, Wen B C, Fan J. Study on synchronization of two eccentric rotors driven by hydraulic motors in one vibrating system[J/OL]. Shock and Vibration, 1997, 4(5-6): 305-310.
- [33] 邱敏秀, 何才太. 机械反馈式液压同步阀的研究与应用[J]. 液压气动与密封, 2000(5): 8-10.
- [34] 杨世祥. 独树一帜的液压同步, 兼谈创新的体会[J]. 液压气动与密封, 2015, 35(11): 4-6.
- [35] 陈德国, 李慧忠, 柏峰, 等. 多流液压同步马达应用研究[J]. 机床与液压, 2010, 38(8): 55-56, 80.
- [36] 闻德生, 甄新帅, 陈帆, 等. 液压同步多马达与传统同步马达的对比分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(1): 173-177.
- [37] 王东升. 齿轮式同步马达压力补偿阀的设计与特性分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- [38] Khattab M., Wasfy T. Prediction of dynamic stick-slip events in belt-drives using a high-fidelity finite element model[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2022, 17(6): 064501.
- [39] 孙允旺, 王瑜, 吴浩, 等. 声频振动头同步机构设计与试验研究[J]. 现代制造工程, 2022, 500(5): 9-17.
- [40] Lange James E, Smith Brian. Sonic drilling head[P]. 中国: CN2439459(A1). 2002-09-06.
- [41] 张培丰, 贾绍宽, 朱文鉴, 等. 取样钻机用声频振动头[P]. 中国: CN201826836U, 2011-05-11.

(编辑 李艺)