

曲轴摆缸式阀配流水液压马达工作特性研究

满家祥¹ 赵继云² 王云飞^{2,3} 黄笛² 刘磊¹ 于鸣泉²

(1. 徐州工程学院机电工程学院, 徐州 221018; 2. 中国矿业大学机电工程学院, 徐州 221116;
3. 徐州工程机械集团有限公司, 徐州 221011)

摘要:为解决盘配流和轴配流低速大扭矩水液压马达配流副存在的磨损和泄漏问题,提出一种新型阀配流结构的低速大扭矩水液压马达,柱塞配流通过配流凸轮控制配流阀的通断实现。研究柱塞运动学规律和马达输出扭矩形成,揭示配流阀推杆位移、阀芯通断、柱塞进回液间的对应关系,分析马达角排量波动随转角、结构设计参数 K 的变化规律,当结构设计参数 K 为0.13时,马达输出扭矩波动率为6.59%。在AMESim中建立了配流阀及单柱塞配流过程的仿真模型,分析配流阀的工作特性及单柱塞动态配流性能,工作中配流阀产生最大压降为0.08 MPa,进/回液配流阀无高低压串液。为验证阀配流结构在水液压马达中的工作性能,建立阀配流单柱塞试验台,并研究不同工况下的配流工作特性。试验结果表明,配流阀在马达转速0~60 r/min、压力0~21 MPa的工况下稳定配流,进液阀口压力在柱塞腔进回液转换时存在瞬间小幅压力波动,但对配流过程基本无影响,阀配流结构能够满足曲轴摆缸式马达柱塞的配流需求,为低速大扭矩水液压马达的配流提供了思路。

关键词: 水液压; 阀配流; 低速大扭矩; 液压马达; 性能测试

中图分类号: TH137 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)01-0450-09 OSID: 

Working Characteristics of Crankshaft Swing Cylinder Water Hydraulic Motor with Flow Distribution Valve

MAN Jiaxiang¹ ZHAO Jiyun² WANG Yunfei^{2,3} HUANG Di² LIU Lei¹ YU Mingquan²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, China
2. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China
3. Xuzhou Construction Machinery Group Co., Ltd., Xuzhou 221011, China)

Abstract: Low speed and high torque water hydraulic motor is widely used in environmental protection and explosion-proof working conditions, such as coal mine, underwater action, military explosion-proof construction, etc. However, the low viscosity of water leads to serious wear and leakage of flow port pair in traditional motor with plate and shaft flow distribution. A type of water hydraulic motor with valve flow distribution structure was proposed and the piston flow distribution was realized by controlling on-off of valve through distribution cam. The kinematics of piston and motor output torque were theoretically calculated, and the corresponding relationship among push rod of flow distribution valve, valve core on-off and piston flow distribution states was revealed. The variation law of motor angular displacement fluctuation with angle and structure parameter K was analyzed. When structure design parameter K was 0.13, the fluctuation rate of motor torque was 6.59%. The simulation model of single piston with valve flow distribution was established in AMESim. Simulation results indicated that the maximum pressure drop of valve in flow distribution process was 0.08 MPa. In single piston flow distribution, the valve port pressure responded quickly without high-pressure and low-pressure liquid connection. To verify the working performance of valve flow distribution in water hydraulic motor, a single piston with valve flow distribution test bench was established, and the working characteristics of valve under different working conditions were studied. The experimental results showed that the valve was stable under the working

conditions of motor speed of 0 ~ 60 r/min and pressure of 0 ~ 21 MPa. The pump outlet pressure fluctuated slightly when flow distribution state of piston chamber was switched, which had little effect on flow distribution process. The valve flow distribution structure can meet the flow distribution demand of crankshaft piston motor with swing cylinder. The relative sliding of the traditional motor flow port pair under water lubrication was converted into the valve on-off, which provided an idea for flow distribution of the water hydraulic motor with low speed and high torque.

Key words: water hydraulic; flow distribution valve; low speed and high torque; hydraulic motor; performance test

0 引言

低速大扭矩水液压马达具有水介质下持续低速、大扭矩输出的工作特点,在具有防爆、环保、抗燃的特殊工况中有广泛应用,如水下作业施工的回转驱动、煤矿井下乳化液系统中的执行机构(钻机、绞车、紧链器等)、军用防爆低速工况的作业机构等^[1-4]。但因水介质、低速、高压工况的特殊性,传统轴配流、盘配流结构的低速大扭矩马达配流副磨损和泄漏严重,因此,马达结构、配流原理、材料配对等关键技术的突破,能进一步提升水液压马达工作性能和寿命^[5-6]。

国内外学者开展了众多水液压马达的相关研究。在低速大扭矩水液压马达方面,Düsterloh 公司研发了一种七星轮端面配流高水基乳化液马达,其配流体具有双向液压压紧自补偿功能,通过配流体的磨损补偿提高马达使用寿命和工作性能,最大转速 800 r/min,最大压力 25 MPa^[7]。文献[8-10]研究了内曲线球塞式盘配流水液压马达,通过设计工程塑料与金属配对的配流副,改善了马达的容积效率,同时对定子内曲线轨道和关键摩擦副进行了优化,配流体上的仿生织构能有效降低配流副的摩擦磨损。邱冰静等^[11-12]提出了自平衡阀配流结构的曲轴柱塞水马达,分析了马达双向旋转阀配流的可行性,模拟了配流阀动态配流特性和响应,但并未开展试验研究和样机试制。轴向柱塞水液压马达方面,李壮云团队作为国内水液压技术研究的先驱^[13-14],开展了水压轴向柱塞马达的配流和转矩特性的相关研究,理论分析了配流盘减振槽对气蚀产生的影响以及水马达瞬时输出转矩的工作特点,但该马达属于高速水马达。文献[15-16]针对轴向柱塞水液压马达开展了相关理论和试验研究,虽然不属于低速大扭矩马达,但水润滑下低速大扭矩马达的关键摩擦副和结构设计提供了参考。北京天玛公司研制了 MRF 非圆行星齿轮乳化液马达,工作压力 20 MPa 以上,最大转速 1 000 r/min,主要用于矿用钻机的高速场合^[17]。此外,Black Bruin 公司研发了一款配流盘和滑阀组合配流的低速大扭矩马达,

其柱塞配流通过端面配流体实现,同时滑阀通断控制有效工作柱塞数量,但该马达仅能使用油介质^[18]。张小龙等^[19]对滚柱-柱塞副之间的动静压混合润滑油膜建立非稳态弹流润滑仿真模型,确定了油马达的滚柱-柱塞的最优配合间隙。

综上所述,目前关于低速大扭矩水马达结构和配流方式的研究较少,配流体的磨损和泄漏问题仍未解决。本文针对水润滑低速大扭矩特殊工况提出一种阀配流的曲轴摆缸式水马达,通过阀组配流解决配流过程的磨损和泄漏问题,为低速大扭矩水马达的研究提供参考。

1 马达结构及工作原理

1.1 马达结构

如图 1 所示,曲轴摆缸式水液压马达的柱塞配流是通过进液阀和排液阀实现,进液阀和排液阀的开启和关闭由配流凸轮控制有序开启,针对低速大扭矩水润滑特殊工况,端面配流、轴配流马达配流副难以形成有效的润滑液膜,磨损、泄漏问题不可回避,而阀配流过程中仅有阀口的通断,取消了配流副,更适合低速大扭矩水液压马达配流^[20]。图中 Z1~Z5 为柱塞,配流阀包括进液阀和排液阀,H1~H5 为进液阀,L1~L5 为排液阀。图 2 为低速大扭矩曲轴摆缸式阀配流水液压马达结构图。

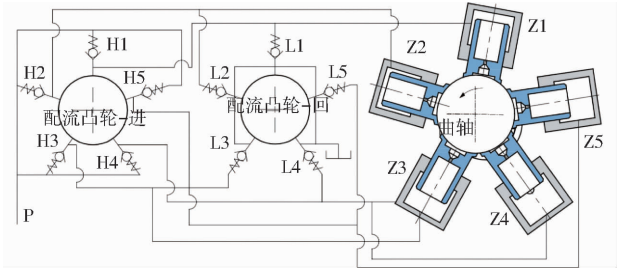


图 1 阀配流水液压马达工作原理图
Fig. 1 Working principle of water hydraulic motor with flow distribution valve

根据曲轴摆缸式水液压马达工作原理,设计配流阀结构如图 3 所示。阀口关闭时,高压液被隔断在阀芯上端,此时推杆受配流凸轮控制与阀芯脱离,出口为低压;阀口配流时,推杆受配流凸轮控制阀芯

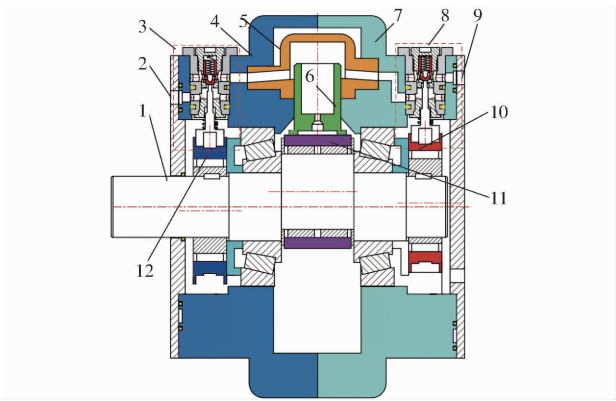


图 2 水液压马达结构图

Fig. 2 Structure diagram of water hydraulic motor

1. 曲轴 2. 出口 3. 排液配流阀 4. 壳体 1 5. 摆缸 6. 柱塞
7. 壳体 2 8. 进液配流阀 9. 进口 10. 进液配流凸轮 11. 套筒
12. 回液配流凸轮

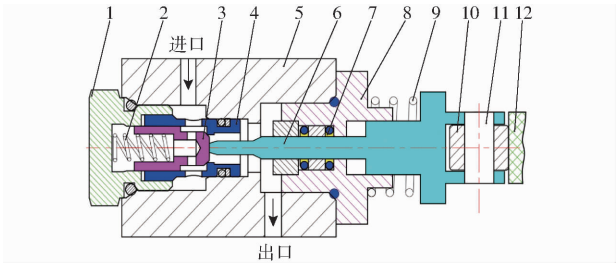


图 3 配流阀结构图

Fig. 3 Structure diagram of flow distribution valve

1. 阀芯 2. 阀芯弹簧 3. 阀芯 4. 阀座 5. 阀块 6. 推杆 7. 往
复密封 8. 端盖 9. 推杆弹簧 10. 滚子 11. 销 12. 配流凸轮

向上运动,此时阀口打开进行配流。
曲轴摆缸式水液压马达工作时柱塞液压力推动曲轴回转从而形成扭矩,其中由于摆缸的存在,柱塞几乎不受侧向力^[21]。如图 4 所示,柱塞位移 x 随转角 φ 的变化公式为

$$x = e(1 - \cos\varphi) + (Kesin^2\varphi)/2 \tag{1}$$

其中 $K = e/(e + R + L - l)$
式中 e ——曲轴偏心距
 L ——曲轴与柱塞切点到柱塞顶部距离
 l ——柱塞顶部到摆缸摆动中心的距离

柱塞度速度为

$$v = e[\sin\varphi + (K\sin(2\varphi))/2] \tag{2}$$

柱塞度加速度为

$$a = e(\cos\varphi + K\cos(2\varphi)) \tag{3}$$

如图 5 所示,配流凸轮转动中逐渐使推杆向上运动,配流凸轮是偏心距为 e_1 的偏心轮,安装时进/排液凸轮存在 180° 相位差,配流阀芯位移 x_f 与转角关系式为

$$x_f = \sqrt{r^2 - (e_1\sin\varphi)^2} - e_1\cos\varphi - (r - e_1) \tag{4}$$

式中 r ——配流凸轮外圆半径

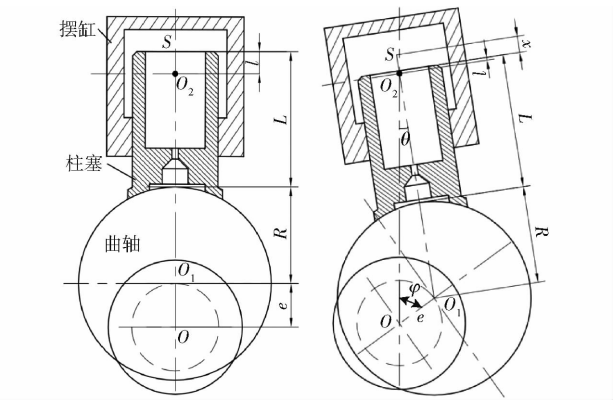


图 4 曲轴柱塞运动示意图

Fig. 4 Schematic diagram of crankshaft piston movement

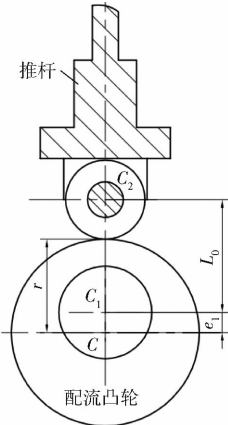


图 5 配流凸轮和推杆运动关系

Fig. 5 Relationship between flow distribution cam and push rod motion

1.2 工作特性分析

工作中柱塞位移、度速度、度加速度变化如图 6 所示。柱塞在转角 $0 \sim \pi/2$ 内先加速运动,在转角 $\pi/2 \sim \pi$ 内做减速运动,转角 $\pi/2$ 时,柱塞度速度最大。柱塞的运动学特性取决于结构设计参数 K 和

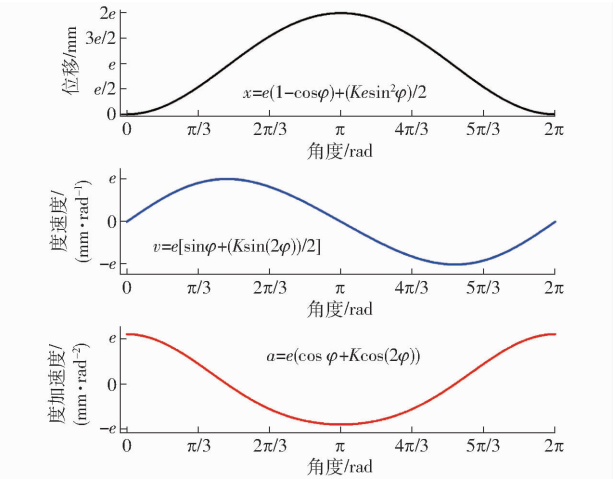


图 6 曲轴转动过程中柱塞位移、度速度、度加速度变化曲线

Fig. 6 Piston displacement, degree velocity and degree acceleration change during crankshaft rotation

曲轴偏心距 e , 度速度最大为 $(1 + K)e$, 合理选取 K 值和曲轴偏心距极为重要。

图 7 为进/排液阀配流中的阀芯位置与柱塞配液的对应关系。柱塞从排液到进液时, 先关闭排液阀, 而后开启进液阀, 柱塞腔进入高压液做功; 柱塞

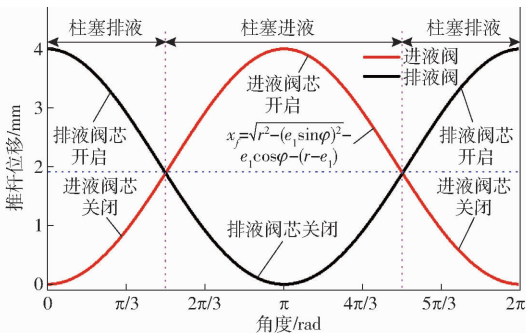


图 7 配流中进/排液阀的阀芯位置关系
Fig. 7 Position relationship of inlet/outlet valve cores in distribution process

$$\sum q(\varphi_i) = \begin{cases} A_z e [\cos(\beta/2 - \varphi_i)/(2\sin(\beta/2)) + K\sin(2\varphi_i - \beta)/(4\cos\beta)] & (0 \leq \varphi_i < \beta) \\ A_z e [\cos(3\beta/2 - \varphi_i)/(2\sin(\beta/2)) + K\sin(3\beta - 2\varphi_i)/(4\cos\beta)] & (\beta \leq \varphi_i < 2\beta) \end{cases} \quad (6)$$

各柱塞的扭矩之和为

$$\sum M(\varphi_i) = pA_z e \left(\sum \sin\varphi_i + \frac{K}{2} \sum \sin(2\varphi_i) \right) \quad (7)$$

马达整机波动率为

$$\delta_M = \left(\sum M(\varphi_i)_{\max} - \sum M(\varphi_i)_{\min} \right) / \sum M(\varphi_i)_{av} \quad (8)$$

由式(8)可知, 为确保马达输出波动较小, 设计时应保证马达角排量的波动最小, 如图 8 所示(角排量以 $A_z e$ 的倍数表示), 在转角 $\pi/10$ 处, 角排量最大, 在转角为 0 时, 角排量最小。 K 增大, 使角排量最大值减小, 但 K 过大使得曲轴、柱塞、摆缸在空间上难以布置, K 过小, 使马达整体尺寸增大, 综合考

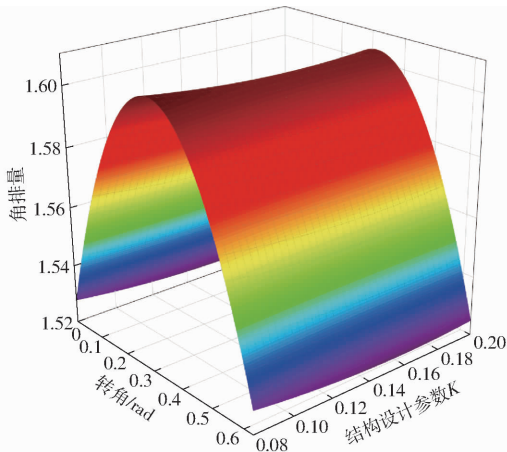


图 8 马达角排量与转角、结构设计参数 K 之间的关系
Fig. 8 Relationship between motor angular displacement, angle and structural design parameter K

从进液到排液时, 进液阀关闭, 而后开启排液阀。在进/排液阀互相切换时, 配流凸轮设计不合理或加工误差都会导致高低压串液或困液, 因此设计配流阀芯开度 2 mm, 配流凸轮控制推杆行程 4 mm, 推杆向上运动 0 ~ 2 mm 时, 阀芯与推杆处于脱离状态, 阀口关闭, 推杆向上运动 2 ~ 4 mm 时, 推杆开启阀芯, 阀口打开。

转动中各柱塞角排量之和为

$$\sum q(\varphi_i) = A_z e \left(\sum \sin\varphi_i + \frac{1}{2} K \sum \sin(2\varphi_i) \right) \quad (5)$$

式中 A_z ——柱塞面积

相邻柱塞夹角为 $2\beta = 2\pi/5$, 在 $0 \leq \varphi_i < \beta$ 时, 马达 3 个柱塞处于进液状态, 在 $\beta \leq \varphi_i < 2\beta$ 时, 马达 2 个柱塞处于进液状态。

马达整机角排量为

虑, 确定选取 $K = 0.13$ 。

由图 9 可知(扭矩以 $pA_z e$ 的倍数表示), 当 $K = 0.13$ 时, 工作中马达扭矩以 $\pi/5$ 为周期呈现脉动, 相邻周期内进液柱塞为 2 个和 3 个, 整机输出扭矩波动率为 6.59%。综上所述, 确定马达设计参数为: 额定工作压力 16 MPa, 工作转速 0 ~ 60 r/min, 曲轴偏心距 12 mm, 柱塞直径 42 mm, 曲轴半径 30 mm, $l_{o02} = 50$ mm, 马达设计排量 166.3 mL/r。

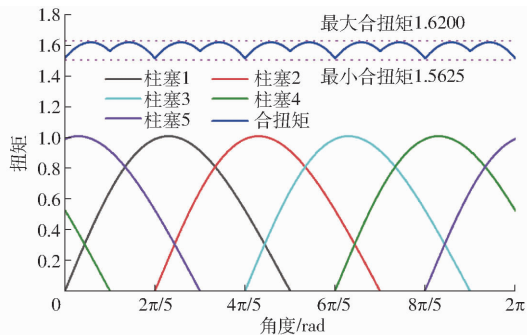


图 9 马达各柱塞形成扭矩及合扭矩变化曲线
Fig. 9 Variation curves of single piston torque and motor total torque

2 配流阀 AMESim 仿真分析

2.1 配流阀压力-流量特性

为研究高水基介质下配流阀的工作特性, 基于配流阀结构和参数在 AMESim 中建立仿真模型, 如图 10 所示。配流阀模型主要参数: 系统压力为 21 MPa, 可变节流口最大开度为 2 mm; 阀芯直径为 8 mm, 弹簧初始弹力为 9 N, 弹簧直径为 5.6 mm。

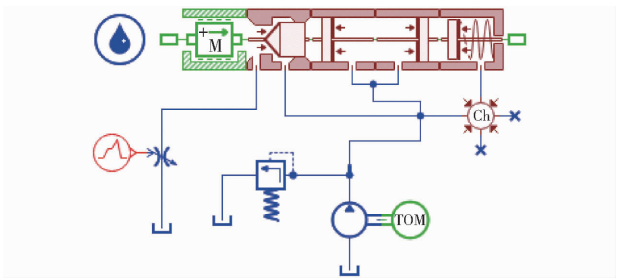


图 10 进液配流阀 AMESim 模型

Fig. 10 AMESim model of inlet flow distribution valve

如图 11 所示,配流阀全开(开度 2 mm)时,阀内产生的压降随进液流量的增大而逐渐增大,当流量为 25 L/min 时,阀内产生压降为 0.63 MPa,而曲轴摆缸式阀配流马达在转速 60 r/min 时,单柱塞最大流量为 6.3 L/min,此时配流阀产生压降为 0.04 MPa,这一微小压降对整机的工作性能影响几乎可以忽略。

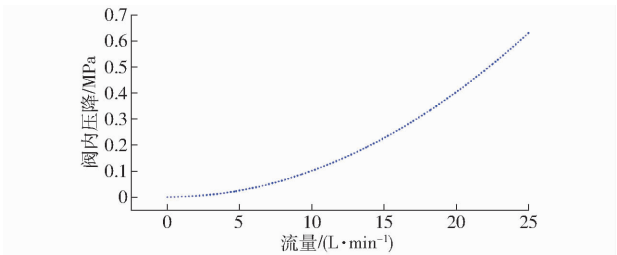


图 11 阀口开度 2 mm 下配流阀的压降-流量曲线

Fig. 11 Pressure drop – flow curve of flow distribution valve in 2 mm opening

在转速 60 r/min 时不同曲轴转角下柱塞腔流量和阀口开度对应的阀内压降如图 12 所示。柱塞进液过程中阀芯开度逐渐增大,而阀内压降从 0.08 MPa 先降低后增大。开度 0.1 mm 时,阀内压降最大为 0.08 MPa,开度 0.8 mm 时,阀内压降最小为 0.016 MPa。配流过程中阀内压降较小,配流阀能够满足水液压马达的配流需求。

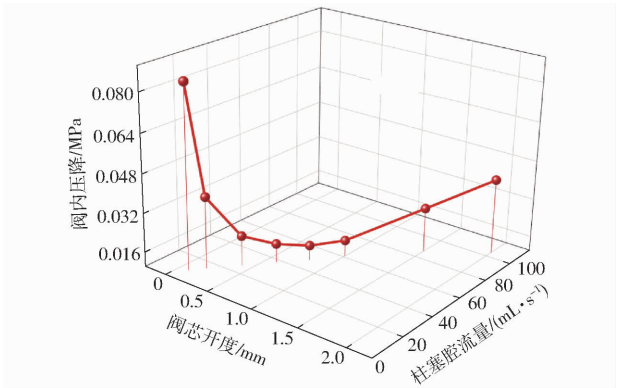


图 12 不同柱塞腔流量下配流阀内产生的压降

Fig. 12 Pressure drop of flow distribution valve at different piston flow rates

2.2 马达单柱塞阀配流工作特性

柱塞工作中由一个进液阀和一个排液阀组成,

进液阀和排液阀结构完全相同,进液配流凸轮和回液配流存在相位差。单柱塞阀配流的 AMESim 仿真模型如图 13 所示。

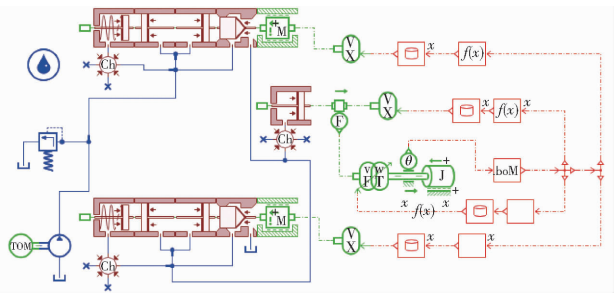


图 13 单柱塞阀配流 AMESim 仿真模型

Fig. 13 AMESim simulation model of single piston with flow distribution valves

当压力为 21 MPa、转速为 60 r/min 时马达的动态工作特性如图 14 所示。柱塞进液后腔内压力迅速响应(约 4 ms 达到工作压力),同时曲轴上形成扭矩,扭矩峰值为 347.2 N·m。进液时柱塞腔流量先增大后减小,最大工作流量约 105.3 mL/s,回液时柱塞腔流量变化与进液时类似。

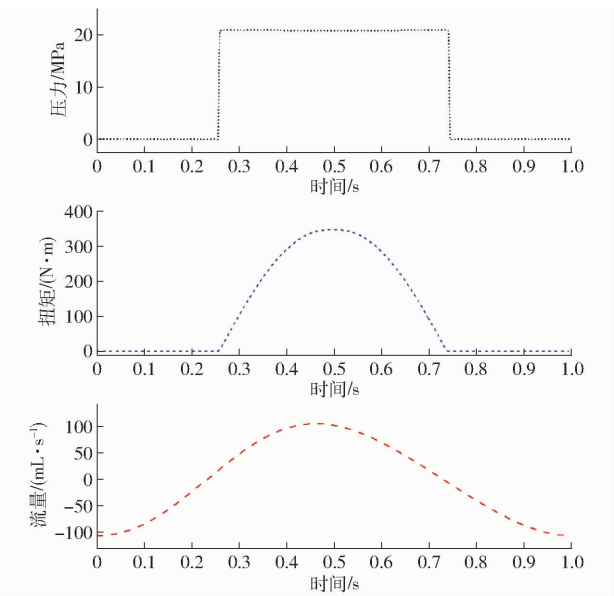


图 14 单柱塞腔压力、扭矩和流量

Fig. 14 Flow, pressure and torque of single piston

根据单柱塞阀配流的 AMESim 仿真结果,得到整机输出扭矩变化曲线如图 15 所示。当压力 21 MPa、转速 60 r/min 时整机的输出扭矩呈现周期性波动,扭矩波动量为 32.2 N·m,仿真结果与图 9 理论计算结果一致。根据图 16 可知,进液阀开启瞬间,柱塞腔压力迅速上升,同时进液阀口压力有微小波动,而后迅速稳定。进液阀关闭时,排液阀打开,此时柱塞腔压力迅速下降,而进液阀芯关闭引起阀口前端压力有小幅压力冲击,配流中未发现进液阀、排液阀间存在高低压串液现象。

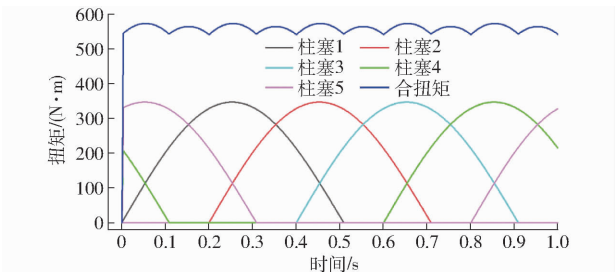


图 15 马达输出合扭矩

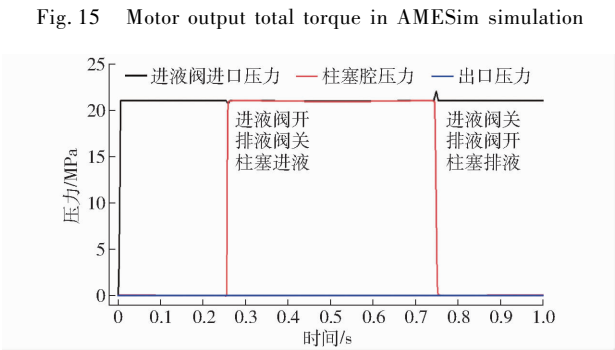


图 16 进液阀进口、柱塞腔、排液阀出口压力变化曲线

Fig. 16 Pressure changes at inlet of inletflow distribution valve, piston chamber and outlet of outlet flow distribution valve

3 马达单柱塞阀配流试验

3.1 试验台搭建

在阀配流曲轴柱塞摆缸式水马达配流原理和工作特性理论分析的基础上,为进一步验证配流阀的动态配流工作性能,参考国家机械行业标准^[22-24],搭建马达单柱塞阀配流试验台,图 17 为试验台液压原理图,图 18 为马达单柱塞阀配流试验台实物图。

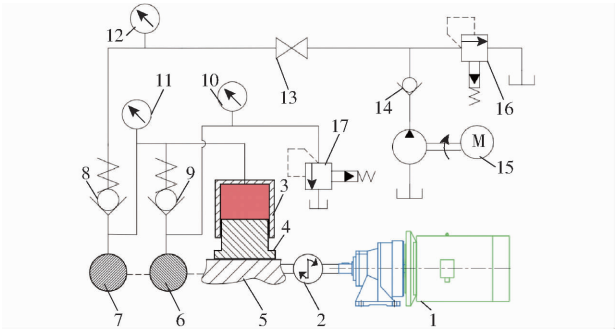


图 17 马达单柱塞阀配流试验台液压原理图

Fig. 17 Hydraulic schematic of motor single piston test bench with flow distribution valves

1. 电机及减速器 2. 扭矩/转速传感器 3. 摆缸 4. 柱塞 5. 曲轴 6. 排液配流凸轮 7. 进液配流凸轮 8. 进液阀 9. 排液阀 10, 11, 12. 压力传感器 13. 截止阀 14. 单向阀 15. 乳化液泵站 16. 溢流阀 17. 背压阀

试验主要研究马达在不同转速、压力下配流阀向柱塞配流的工作特性。测试柱塞阀配流过程中阀口、柱塞腔的压力变化规律,防止出现困液、内泄漏等问题,其中柱塞滑靴为剩余压紧式结构,曲轴转速

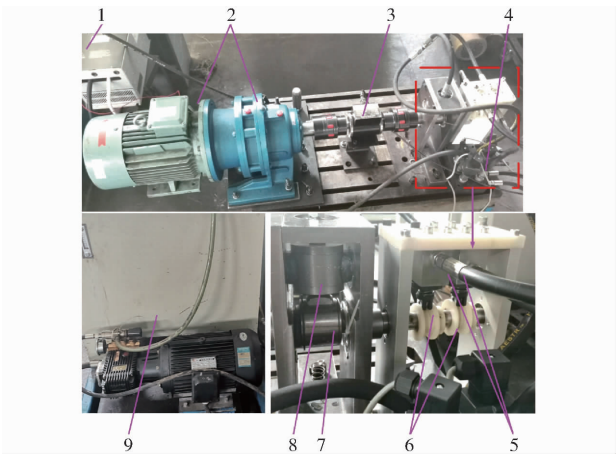


图 18 马达单柱塞阀配流试验台

Fig. 18 Motor single piston test bench with flow distribution valve

1. 变频器 2. 电机及减速器 3. 扭矩/转速传感器 4. 阀块及压力传感器 5. 配流阀 6. 配流凸轮 7. 曲轴 8. 摆缸 9. 乳化液泵站

由变频器控制,配流阀工作压力通过溢流阀调节,工作压力范围为 0 ~ 21 MPa,工作转速为 0 ~ 60 r/min。

3.2 试验结果分析

3.2.1 柱塞阀配流过程中压力动态特性

调节变频器和溢流阀使进液阀进口压力为 16 MPa,曲轴转速为 60 r/min,进液阀进口、柱塞腔、出口压力如图 19 所示。配流过程中柱塞腔压力呈周期性规律变化,高压区间与低压区间宽度基本相等,柱塞在 1 s 内高压作用下伸出时间为 0.5 s,低压区回缩时间也为 0.5 s,进液阀打开后,柱塞腔压力迅速升高至进口压力,压力响应迅速,表明配流阀能满足柱塞腔的高低压配液需求。

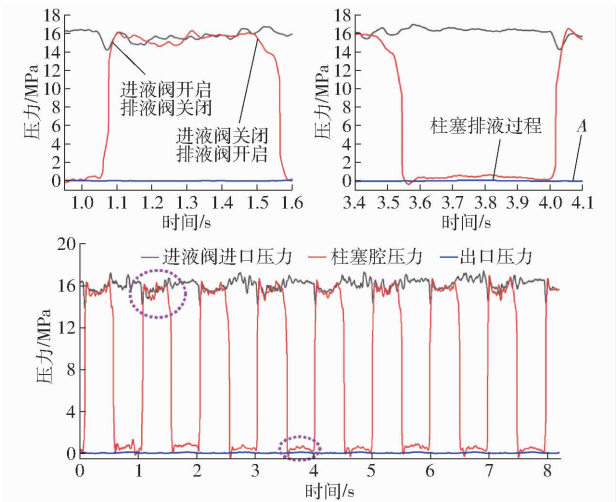


图 19 配流中不同位置的的压力变化规律

Fig. 19 Pressure variation law at different positions in flow distribution

进液阀进口压力在阀芯开启瞬间呈小幅下降,而后迅速回升到系统工作压力,出现这一变化的可

能原因:①进液阀开启后排液阀未完全关闭引起的高低压串液,此时出口压力会有小幅上升。②泵出口的高压液进入柱塞腔,使介质压力从低压迅速升至高压,同时柱塞伸出运动,从而引起泵出口压力的短暂波动。如图 19 中点 A 所示,出口压力中并未观测到明显的压力波动,表明配流中进液阀、排液阀并未出现高低压串液,因此,进口压力处的波动是由原因②导致。柱塞排液时,进液阀关闭、排液阀开启,进液阀口前端有小幅压力上升,柱塞腔压力迅速下降至背压压力。排液过程中柱塞回缩将介质排出,柱塞起到泵的作用,使柱塞腔压力先升高后减小。

3.2.2 不同压力、转速下的阀配流动态特性

如图 20 所示,进液阀进口压力升高后进液阀、排液阀依然能有序向柱塞配流,进液阀开启时进口压力波动随进口压力升高而变大,进回液并未出现高低压串液,马达阀配流结构能适应水介质下不同压力的配流工况。柱塞排液过程中出口压力呈现周期性波动,波动幅值基本相同,表明排液过程中进液阀通断性能良好,不受进液阀前端压力的影响。

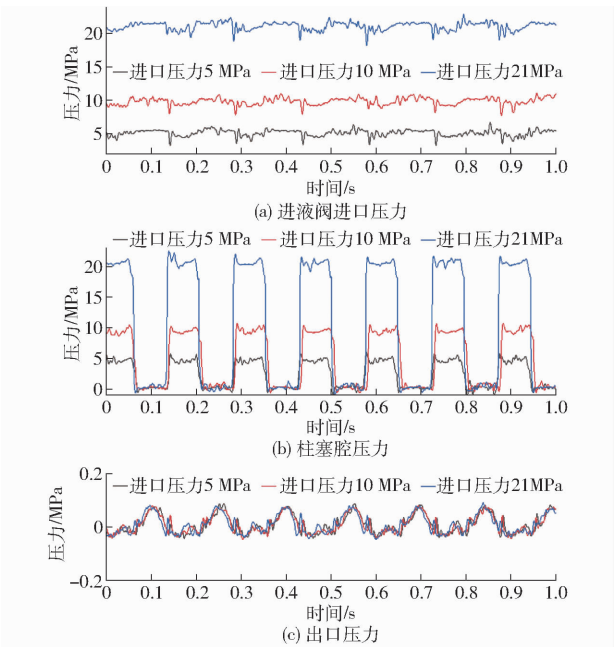


图 20 不同进口压力对配流中各处压力的影响 (转速 40 r/min)

Fig. 20 Influence of inlet pressure on various position pressures in flow distribution (rotating speed of 40 r/min)

如图 21 所示,曲轴摆缸式马达柱塞阀配流结构能够在较低的转速下稳定配流。进液阀开启时同样观测到阀进口的压力波动,配流中各处压力曲线变化规律与前述类似。试验结果表明,配流阀能够满足高水基介质下马达不同转速下的配流需求。

试验中未观测到进液阀、排液阀的滴漏现象,配流凸轮试验后表面未产生肉眼可见的磨痕,只发现

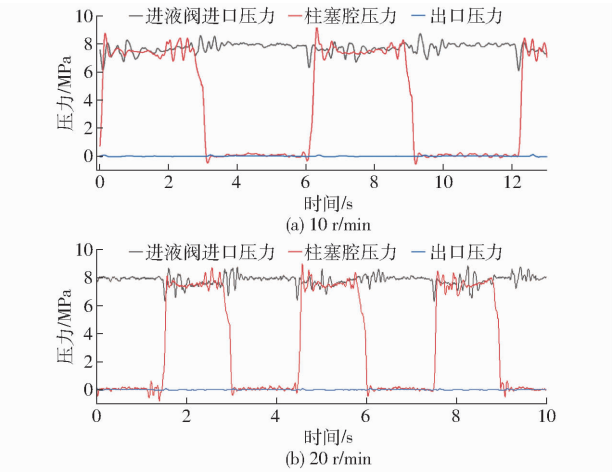


图 21 低转速下柱塞配流中各处压力的变化

Fig. 21 Pressure variation of different position in flow distribution at low speed

柱塞滑靴-曲轴副出现了滴漏,如图 22 所示。随工作压力的升高,柱塞滑靴处产生的泄漏量逐渐增大,压力 21 MPa、转速 30 r/min 时泄漏量最大,约为 17 滴/min。相同压力下转速的升高对柱塞滑靴的泄漏量基本无影响,柱塞滑靴产生的泄漏量相对于整机流量很小,滑靴处的滴漏问题对马达容积效率和输出性能的影响可忽略。

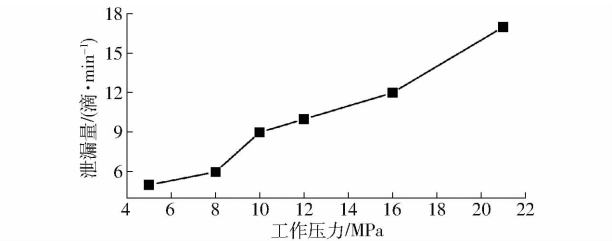


图 22 不同压力下阀配流过程中柱塞滑靴的泄漏量 (转速 30 r/min)

Fig. 22 Leakage of piston slipper during valve distribution under different pressures (speed was 30 r/min)

4 结论

- (1)提出了一种阀配流结构的曲轴式水液压马达,相对于盘配流和轴配流结构,水介质工况下阀配流具有更好的配流性能和密封性能,避免了水润滑下低速大扭矩马达配流副的磨损失效。
- (2)建立了曲轴摆缸式阀配流水液压马达的设计理论及研究方法,通过仿真揭示了阀配流下柱塞腔、进液阀、排液阀等位置的压力动态变化规律,马达整机扭矩波动周期为 $\pi/5$,波动率为 6.59%。
- (3)进液阀、排液阀向柱塞配流时无高低压串液现象,配流阀在不同工况下无滴漏现象,阀配流结构能满足工作压力 0 ~ 21 MPa、转速 0 ~ 60 r/min 的工况下向水液压马达稳定配流。

参 考 文 献

- [1] 刘银水, 吴德发, 李东林, 等. 深海液压技术应用与研究进展[J]. 机械工程学报, 2018, 54(20): 14–23.
LIU Yinshui, WU Defa, LI Donglin, et al. Applications and research progress of hydraulic technology in deep sea[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(20): 14–23. (in Chinese)
- [2] 高殿荣, 王志强. 水压马达的研究进展与展望[J]. 液压与气动, 2014, 38(8): 1–8.
GAO Dianrong, WANG Zhiqiang. Research progress and development prospect of water hydraulic motors[J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2014, 38(8): 1–8. (in Chinese)
- [3] 王传礼, 何涛, 喻曹丰, 等. 水液压技术在煤矿支护装备中的应用及其研究进展[J]. 液压与气动, 2016, 40(5): 1–7.
WANG Chuanli, HE Tao, YU Caofeng, et al. Water hydraulic's research progress and application to support equipment of coal mines[J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2016, 40(5): 1–7. (in Chinese)
- [4] 纪辉, 兰宇, 武子为, 等. 面向水下作业的水液压机械手研究与展望[J/OL]. 机械工程学报: 1–12. [2022–09–29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20220727.1227.084.html>.
JI Hui, LAN Yu, WU Ziwei, et al. Research progress and prospect of water hydraulic manipulator for underwater operation[J/OL]. Journal of Mechanical Engineering: 1–12. [2022–09–29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20220727.1227.084.html>. (in Chinese)
- [5] 刘银水, 吴德发, 李东林, 等. 海水液压技术在深海装备中的应用[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 28–35.
LIU Yinshui, WU Defa, LI Donglin, et al. Applications of seawater hydraulics in deep-sea equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(2): 28–35. (in Chinese)
- [6] 邱冰静. 自平衡阀配流低速大扭矩高水基液压马达关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
QIU Bingjing. Study on the key technology of low speed, high torque and high water-based hydraulic motor with a self-balanced distribution valve mode[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018. (in Chinese)
- [7] Düsterloh Fluidtechnik GmbH, Hydraulic Motors[EB/OL]. [2022–08–22]. https://www.duesterloh.de/doku/hydro/etl/rm50_21.pdf.
- [8] 王志强. 内曲线式低速大扭矩水液压马达关键技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
WANG Zhiqiang. Research on the key technology of incurve type water hydraulic motor with low speed high torque[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014. (in Chinese)
- [9] 孙怡龙, 王志强, 黄依凡, 等. 带仿生织构的水液压马达配流摩擦副摩擦学特性仿真研究[J]. 机电工程, 2019, 36(11): 1133–1139.
SUN Yilong, WANG Zhiqiang, HUANG Yifan, et al. Simulation on tribological property for port plate pair with bionic texture surface of water hydraulic motor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(11): 1133–1139. (in Chinese)
- [10] 倪敬, 冯国栋, 王志强, 等. 内曲线式端面配流水液压马达的优化设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(5): 946–953.
NI Jing, FENG Guodong, WANG Zhiqiang, et al. Optimization design of internal curve type water hydraulic motor with plain flow distribution[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(5): 946–953. (in Chinese)
- [11] 邱冰静, 赵继云. 新型自平衡阀配流式低速大扭矩高水基液压马达的研究[J]. 液压与气动, 2017, 41(9): 71–76.
QIU Bingjing, ZHAO Jiyun. High water-based hydraulic motor of new type distribution structure[J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2017, 41(9): 71–76. (in Chinese)
- [12] QIU Bingjing, ZHAO Jiyun, ZHAO Liang. Characterization and performance analysis of a new type of a high water-based hydraulic motor with a self-balanced distribution valve mode[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2017: 095440621769535.
- [13] 聂松林, 李壮云, 余祖耀. 轴向柱塞式液压马达转矩特性的理论研究[J]. 液压与气动, 2002, 26(7): 7–10.
NIE Songlin, LI Zhuangyun, YU Zuyao. Study on torque characteristic of axial piston hydraulic motor[J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2002, 26(7): 7–10. (in Chinese)
- [14] 聂松林, 李壮云. 水压柱塞泵(马达)配流盘的研究与仿真[J]. 机械科学与技术, 2001(3): 407–409, 315.
NIE Songlin, LI Zhuangyun. Research and simulation on valve plate of water hydraulic axial piston pump (motor)[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2001(3): 407–409, 315. (in Chinese)
- [15] 聂松林, 张立茂, 张振华, 等. 水压轴向柱塞泵/马达滑靴副水膜动态特性分析[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(9): 1303–1310.
NIE Songlin, ZHANG Limao, ZHANG Zhenhua, et al. Analysis of water film dynamic characteristics of slipper pair in a water hydraulic axial piston pump/motor[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(9): 1303–1310. (in Chinese)
- [16] 杨友胜, 曾祥峰, 聂松林, 等. 水液压轴向柱塞马达[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(4): 514–520.
YANG Yousheng, ZENG Xiangfeng, NIE Songlin, et al. A water hydraulic axial piston motor[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(4): 514–520. (in Chinese)
- [17] Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co. Ltd. High water-based motors[EB/OL]. [2022–06–21]. <https://www.tdmarco.com/contents/4124/13419.html>.
- [18] Black Bruin, Hydraulic Motors[EB/OL]. [2022–08–20]. <https://www.blackbruin.com/media/c200-series-product->

manual-black-bruin-en. pdf.

- [19] 张小龙,张军辉,方梓帆,等. 内曲线径向柱塞马达滚柱-柱塞配合间隙优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(8): 8-13.
ZHANG Xiaolong, ZHANG Junhui, FANG Zifan, et al. Optimization of roller-piston fitting clearance of cam lobe radial-piston motor[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(8): 8-13. (in Chinese)
- [20] 泮健,施光林. 数字配流与调速式液压马达的建模与实现[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(11): 1607-1612.
PAN Jian, SHI Guanglin. Modeling and implementation of hydraulic motor with digital distribution and speed adjusting mechanism[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(11): 1607-1612. (in Chinese)
- [21] 陈卓如. 低速大扭矩液压马达理论、计算与设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1989.
- [22] 全国液压气动标准化技术委员会. JB/T 10829—2008: 液压马达[S]. 北京:机械工业出版社, 2008.
- [23] 湛从昌,陈新元. 液压元件性能测试技术与试验方法[M]. 北京:冶金工业出版社, 2014.
- [24] 张广庆,汪开鑫,肖茂华,等. 基于液压机械传动扭矩比的 HMCVT 稳态传动效率研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 533-541.
ZHANG Guangqing, WANG Kaixin, XIAO Maohua, et al. HMCVT steady state transmission efficiency based on HST EGT torque ratio[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 533-541. (in Chinese)

(上接第 431 页)

- [9] CHAICHAOWARAT R, KINUGAWA J, SEINO A, et al. A spring-embedded planetary-gear parallel elastic actuator[C]//2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2020: 952-959.
- [10] FERNANDEZ J D G, YU B, BARGSTEN V, et al. Design, modelling and control of novel series-elastic actuators for industrial robots[J]. Actuators, 2020, 9(1): 6.
- [11] ZHANG Q, SUN D, QIAN W, et al. Modeling and control of a cable-driven rotary series elastic actuator for an upper limb rehabilitation robot[J]. Front Neurorobot, 2020, 14: 13.
- [12] 张秀丽,谷小旭,赵洪福,等. 一种基于串联弹性驱动器的柔顺机械臂设计[J]. 机器人, 2016, 38(4): 385-394.
ZHANG Xiuli, GU Xiaoxu, ZHAO Hongfu, et al. Design of a compliant robotic arm based on series elastic actuator[J]. Robot, 2016, 38(4): 385-394. (in Chinese)
- [13] TSAGARAKIS N G, LAFFRANCHI M, VANDERBORGHT B, et al. A compact soft actuator unit for small scale human friendly robots[C]//2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2009: 4356-4362.
- [14] 史延雷,张明路,张小俊,等. 一种旋转型机器人柔性关节设计与分析[J]. 中国机械工程, 2016, 27(18): 2494-2499, 2500.
SHI Yanlei, ZHANG Minglu, ZHANG Xiaojun, et al. Design and analysis of a rotary-type robot flexible joint[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(18): 2494-2499, 2500. (in Chinese)
- [15] ZHOU M. A method to determine the topology of custom torsional elastic element for the lightweight rotary series elastic actuator[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1939(1): 012080.
- [16] HU B, CHENG G, LU H, et al. Optimal design of the elastic unit for the serial elastic hip joint of the lower extremity exoskeleton[C]//International Conference on Man-Machine-Environment System Engineering. Springer, Singapore, 2019: 85-94.
- [17] CARPINO G, ACCOTO D, SERGI F, et al. A novel compact torsional spring for series elastic actuators for assistive wearable robots[J]. Journal of Mechanical Design, 2012, 134(12): 1-10.
- [18] ROOZING W, REN Z, TSAGARAKIS N G. An efficient leg with series-parallel and biarticular compliant actuation: design optimization, modeling, and control of the eLeg[J]. The International Journal of Robotics Research, 2021, 40(1): 37-54.
- [19] 孙宁,程龙. 串联弹性驱动器设计、建模及在机器人上的应用[J]. 自动化学报, 2021, 47(7): 1467-1483.
SUN Ning, CHENG Long. Design and modeling of series elastic actuators with applications in robot[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(7): 1467-1483. (in Chinese)
- [20] BANG J, KWON Y, LEE J. Safety improvement in the turning motion using the series elastic actuator[C]//2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2020: 940-945.
- [21] 曲祥旭,曹东兴,张姗. 一种扭簧变刚度柔性关节的设计与研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(13): 114-123.
QU Xiangxu, CAO Dongxing, ZHANG Shan. Design and research of a variable stiffness compliant joint based on torsional spring[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(13): 114-123. (in Chinese)
- [22] 李华敏. 渐开线齿轮的几何原理与计算[M]. 北京:机械工业出版社, 1985.
- [23] 陈兵奎,李海翔. 渐开弧面齿轮的形成原理及数学模型[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 57-62.
CHEN Bingkui, LI Haixiang. Generation principle and mathematical models of involute-circular gear[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(3): 57-62. (in Chinese)