

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.02.009

气泡泵垂直提升管内气泡运动的 CFD 数值模拟研究

谢育博^{1,2}, 刘道平^{1,2}, 杨 亮^{1,2}, 秦蓓兰^{1,2}

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093;
2. 上海理工大学 新能源科学与工程研究所, 上海 200093)

摘 要: 目前对气泡泵的研究主要集中在加热功率、管径和管数对气泡泵提升量的影响, 而对垂直提升管内气泡运动状态的研究较少。文中采用 VOF 模型对气泡泵的双提升管和三提升管内气泡的产生和运动进行 CFD 数值模拟。结果表明: 在低加热功率范围内, 提升管数量对气泡的产生和运动形式基本没有影响; 在高加热功率时, 虽然液体提升量随着提升管数量的增加而增加, 但是它并没有相应的成倍数的增加; 在提升管数量相同, 压力为 0.4 MPa 时, 氨水适于作为气泡泵的工质。因此得出结论: 改进气泡泵结构、选取合适的加热功率和工质将是气泡泵发展的一个趋势。

关 键 词: 气泡泵; 计算流体动力学(CFD); 气液两相流; VOF 模型; 提升管

中图分类号: TB657 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2017)02-0043-05

CFD Numerical Simulation Analysis of Bubble Motion in Vertical Lifting of Bubble Pump

XIE Yubo^{1,2}, LIU Daoping^{1,2}, YANG Liang^{1,2}, QIN Beilan^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Institute of New Energy Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093)

Abstract: At present, the research of the bubble pump mainly concentrates on the influence of the heating power, the diameter and the number of tubes on the bubble pump, while the research on the bubble motion in the vertical lift tube is less. The CFD numerical simulation on the bubble generation and movement in the double and three vertical lifting tubes of the bubble pump were simulated by the VOF model. The results show that the number of tubes has no effect on the formation and movement of bubbles in the low heating power range. In the high heating power, the liquid lifting capacity in the volume of liquid increases with the increase of the vertical lifting tubes, but it does not have a corresponding multiplied increase. The ammonia water is suitable to be used as the working fluid of the bubble pump, when the number of the lifting pipe is the same at 0.4 MPa pressure. The conclusions are obtained that improving the structure of the bubble pump, selecting the appropriate heating power and working fluid will be a trend of the development of the bubble pump.

Keywords: airlift pump; computational fluid dynamics (CFD); air-liquid two phase flow; VOF model; vertical lifting tubes

气泡泵的工作原理就是由底部的加热装置释放一定的热量, 使气泡泵内的液体变成蒸气, 形成气泡, 然后在气泡上升的同时将液体带入到高位储液器。气泡

泵作为 Einstein 制冷循环^[1]的核心部件, 其效率对制冷循环的性能有重大影响。因此, 对气泡泵性能参数的研究是单压吸收制冷系统的研究重点^[2-3]。影响其

收稿日期: 2016-09-14; 修回日期: 2016-12-30

基金项目: 上海市研究生创新基金项目(JWCXSL1302); 上海市教育委员会科研创新项目资助(13ZZ117)。

第一作者简介: 谢育博(1991), 男, 山东菏泽人, 硕士, 主要研究方向为单压吸收式制冷。E-mail: 13120987961@163.com

性能的主要因素有结构形式、运行参数和工质对^[4]。

1998年 Delano^[5] 基于 Stenning 和 Martin 的空气提升泵理论^[6] 设计了一个气泡泵,并以水为工质研究了气泡泵中液体质量流量与气相质量流量的相关性。阙雄才^[7] 基于系统的总压降平衡建立了绝热弹状流气泡泵的数学模型。在弹状流状态下,郑晓倩^[8] 和陈永军^[9] 分别进行了圆弧形导流式气泡泵的冷态试验研究和变截面直立管气泡泵理论模型的验证研究。刘振全、吴玉莹^[10] 应用气液两相流分相模型的压降理论,分析了气泡泵的压力特性,得出了相关的数学模型。平亚琴^[11] 以分相流模型理论为基础,建立了气泡泵在绝热弹状流工况下的理论模型,并实验论证了该理论模型。陈永军^[12] 基于漂移流模型理论,采用最小二乘法对气泡泵阻力系数进行拟合,完善了气泡泵理论模型。李华山^[13] 也是基于两相漂移流模型理论,对扩散吸收式制冷系统中以 TFE/E181 溶液为工质的气泡泵建立了数学模型,研究了垂直提升管的管径对有机工质气泡泵性能的影响分析。

在前人的众多研究中大多集中在加热功率、管径和管数对气泡泵提升性能的影响,而对气泡泵垂直提升管内气泡运动状态的研究较少,因此本文将采用 CFD(计算流体力学)方法,对在 0.4 MPa 压力下以纯水和氨水为输送对象的气泡泵进行模拟从而达到对气泡泵的优化分析。

1 数值模型

1.1 计算模型及边界条件

根据所搭建的爱因斯坦制冷循环多管式气泡泵实验装置,分别将两管和三管气泡泵简化,其几何尺寸如图 1 所示。对气泡泵计算模型进行网格划分,边界条件的设置:提升管上端面为压力出口边界,气泡泵底面为加热边界,工作压力为 0.4 MPa。在过热温差分别为 $\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\Delta T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下进行加热。

1.2 控制方程

控制方程主要是质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程。

1) 质量守恒方程

流场中任意状态的改变都必须满足质量守恒定律,即:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0。$$

式中: ρ 是密度, t 是时间, u, v, w 是在 x, y, z 方向的速度分量。

2) 动量守恒方程

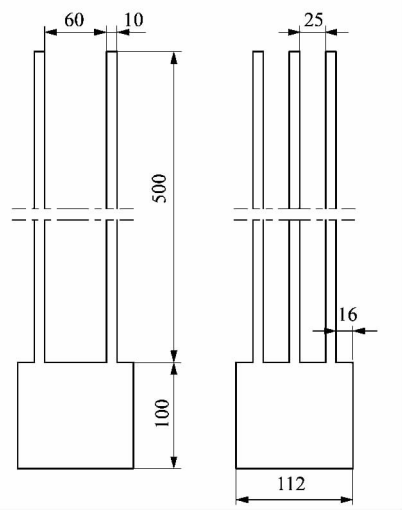


图 1 多管气泡泵的计算模型

Figure 1 Calculation model of multi tube bubble pump

流体运动除了要满足质量守恒定律之外,还要满足动量守恒定律^[14],即:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x;$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v u) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y;$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w u) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z。$$

式中: p 是作用于流体微元上的压强,Pa; $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}$ 等是微元体表面上的黏性应力 τ 的分量,Pa; F_x, F_y, F_z 为 x, y, z 3 个方向的单位质量力, m/s^2 。

3) 能量守恒方程

由于对气泡形成的模拟过程中涉及到了热交换,因此还应当满足能量守恒定律^[15],即:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{u}(\rho E + p)] = \nabla \cdot [k_{\text{eff}} \nabla T -$$

$$\sum_j h_j J_j + \tau_{\text{eff}} \cdot \mathbf{u}] + S_h。$$

式中: E 为流体微团的总能, J/kg ; h 为焓, J/kg ; h_j 为组分 j 的焓, J/kg ; k_{eff} 为有效热传导系数, $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$, $k_{\text{eff}} = k + k_t$, k_t 为湍流导热系数, k 为导热率,根据所用的湍流模型来确定; J_j 为 j 组分的扩散通量; S_h 为包括了化学反应热及其他用户定义的体积源项。

2 双管气泡泵数值计算结果及分析

2.1 工质为水时气泡运动的 CFD 数值模拟分析

在以水为工质、压力为 0.4 MPa、过热温差分别为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下,对双管气泡泵内气泡的形成进行了模拟分析,气泡形成运动图像如图 2~3 所示。

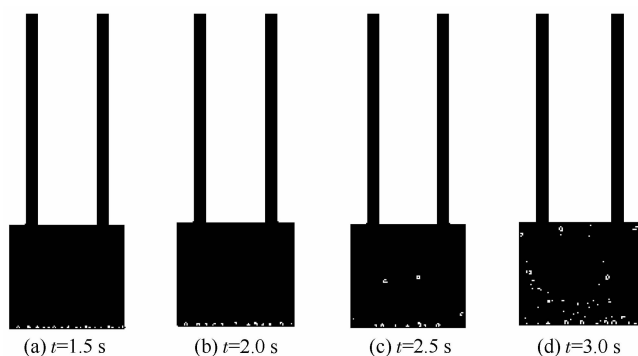


图2 双提升管气泡泵在过热温差为
20 °C 时的模拟结果

Figure 2 Simulation results of bubble pump with double lifting tube when overheating temperature gap of 20 °C

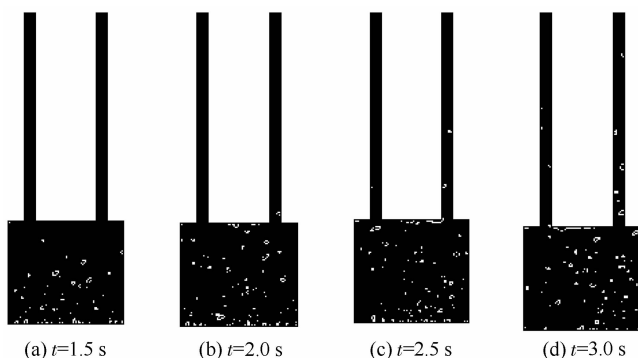


图3 双提升管气泡泵在过热温差为
40 °C 时的模拟结果

Figure 3 Simulation results of bubble pump with double lifting tube when overheating temperature gap of 40 °C

由图2和图3可以看出:在以水为工质的条件下,温度对气泡的形成速率和脱离壁面的速率有很大的影响,过热温差越大,气泡脱离壁面的速率越快,气泡的直径也越大。因为液体的黏度随着温度的升高而减小,并且泵内液体的流型发生变化,由泡状流到弹状流,湍流程度增加。我们还可以看到,无论气泡泵在高温或低温的情况下,垂直提升管中都或多或少的存在气泡分配不均的现象,因为气泡形成是随机的,所以改进气泡泵结构将是气泡泵发展的一个趋势。

2.2 工质为氨水时气泡运动的 CFD 数值模拟分析

在以氨水为工质、压力为 0.4 MPa、过热温差分别为 20 °C 和 40 °C 的条件下,对双管气泡泵内气泡的形成进行了模拟分析,气泡形成的运动图像如图 4 ~ 5 所示。

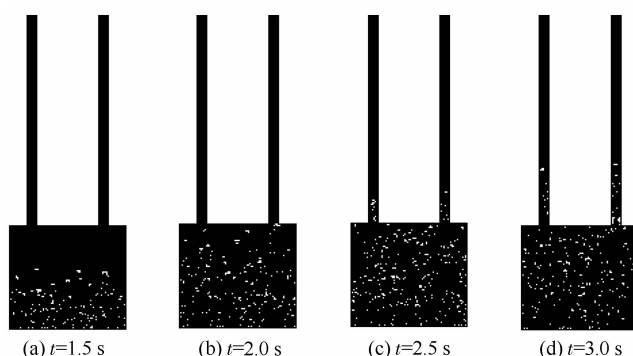


图4 双提升管气泡泵在过热温差为
20 °C 时的模拟结果

Figure 4 Simulation results of bubble pump with double lifting tube when overheating temperature gap of 20 °C

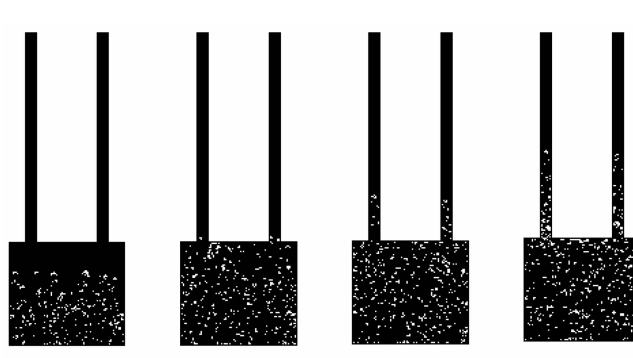


图5 双提升管气泡泵在过热温差为
40 °C 时的模拟结果

Figure 5 Simulation results of bubble pump with double lifting tube when overheating temperature gap of 40 °C

由图4和图5可以看出:在以氨水为工质的条件下,温度对气泡的形成速率和脱离壁面的速率也有很大的影响。在与以水为工质的条件进行比较时可以发现:在同样的过热温度时,气泡脱离壁面的速率更快,气泡的直径也更大。因为氨水的临界压力和临界温度比水要低,表面张力更小,所以在相同的温度条件下,垂直提升管内液体更易蒸发形成气泡,液体流型变化也更显著,由泡状流到环状流。同样地,无论气泡泵的工质是水或氨水,垂直提升管中都或多或少的存在气泡分配不均的现象,因为气泡形成是随机的。但是在高温条件下,氨水中气泡分配不均的现象不明显。所以改进气泡泵结构和选取合适的工质将是气泡泵发展的一个趋势。

3 三管气泡泵数值计算结果及分析

3.1 工质为水时气泡运动的 CFD 数值模拟分析

在以水为工质、压力为 0.4 MPa、过热温差分别为 20 °C 和 40 °C 的条件下,对三管气泡泵内气泡的形成进行了模拟分析,气泡形成运动图像如图 6~7 所示。

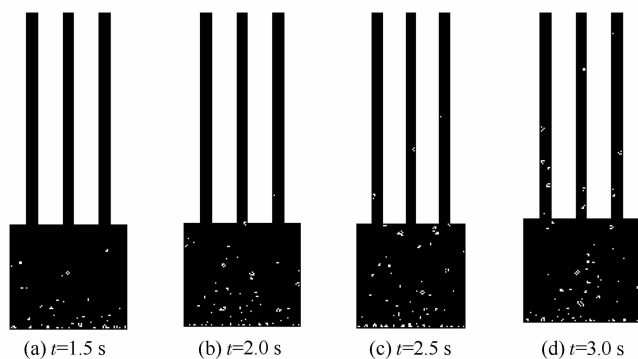


图 6 3 根提升管气泡泵在过热温差为 20 °C 时的模拟结果

Figure 6 Simulation results of bubble pump with three lifting tube when overheating temperature gap of 20 °C

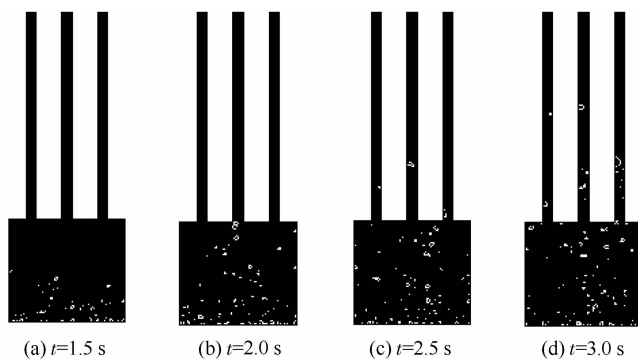


图 7 3 根提升管气泡泵在过热温差为 40 °C 时的模拟结果

Figure 7 Simulation results of bubble pump with three lifting tube when overheating temperature gap of 40 °C

从图 6 和图 7 可以看出,在过热温差较小时,3 根提升管气泡泵内气泡的形成和液体的流动形态与 2 根管的模拟结果是相似的,液体提升量并没有随着管数的增加而增加。这是由于随着提升管数量的增加,平均分配到每根提升管的加热功率减小,管内流型偏离弹状流较大,每根管的提升效果有一定程度的减小。在过热温差较大时,虽然提升量有一定的增加,但是它并没有相应的成倍的增加。同样地,3 根提升管的气泡泵也存在气泡分配不均的现象。所以改进气泡泵结

构和选取合适的加热功率将是气泡泵发展的一个趋势。

3.2 工质为氨水时气泡运动的 CFD 数值模拟分析

在以氨水为工质、压力为 0.4 MPa、过热温差分别为 20 °C 和 40 °C 的条件下,对三管气泡泵内气泡的形成进行了模拟分析,气泡形成运动图像如图 8~9 所示。

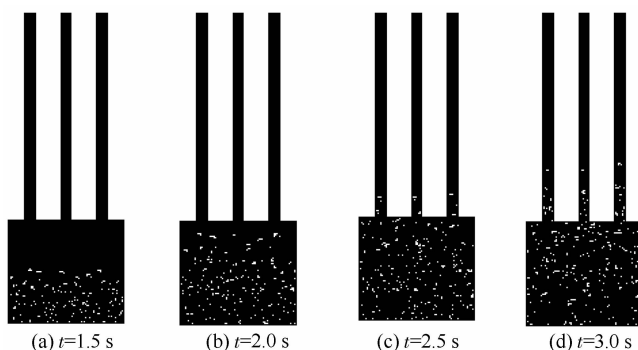


图 8 3 根提升管气泡泵在过热温差为 20 °C 时的模拟结果

Figure 8 Simulation results of bubble pump with three lifting tube when overheating temperature gap of 20 °C

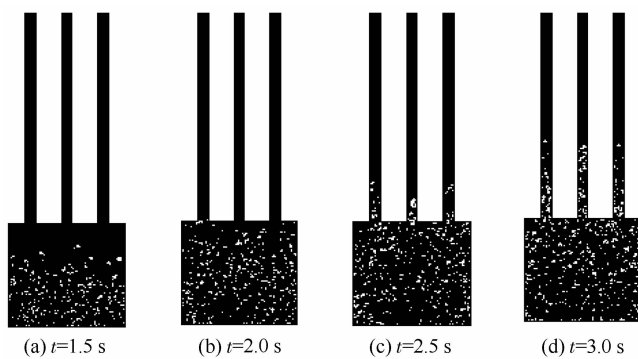


图 9 3 根提升管气泡泵在过热温差为 40 °C 时的模拟结果

Figure 9 Simulation results of bubble pump with three lifting tube when overheating temperature gap of 40 °C

在以氨水为工质的条件下,通过对比分析 2 根提升管和 3 根提升管气泡泵的模拟结果,可以看到气泡的产生和流体的流型是相似的。并结合以水为工质的条件下的对比分析,我们发现在低加热功率条件下,提升管数量对气泡的产生和液体提升量影响不大。在高加热功率条件下,氨水为工质时,气泡分配不均匀性较弱,气泡直径更小。因为在相同的温度时,氨水的湍流

程度比水的湍流程度更强。所以改进气泡泵结构、选取合适的加热功率和工质将是气泡泵发展的一个趋势。

4 结语

根据气泡泵的结构特点,建立了 CFD 数值模拟模型,分别对双提升管和三提升管在工质为水和氨水的条件下进行模拟分析,可以得到以下几点结论:

1) 在低加热功率范围内,提升管数量对气泡的产生和运动形式基本没有影响。在高加热功率时,虽然液体提升量随着提升管数量的增加而增加,但是它并没有相应的成倍的增加。

2) 在相同提升管数量时,工质的性质对气泡的产生有很大的影响。压力为 0.4 MPa 时,氨水适于作为气泡泵的工质。

3) 根据 CFD 模拟的结果分析,我们可以看到未来改进气泡泵结构、选取合适的加热功率和工质将是气泡泵发展的一个趋势。

参考文献:

- [1] EINSTEIN A, SZILARD L. Refrigeration; US1781541 [P]. 1930-11-11.
 - [2] 方甲闯,郑宏飞,李正良,等. 小型太阳能吸收式空调多管弦月形通道溶液提升泵的性能研究[J]. 太阳能学报,2007,28(3):291-295.
 - [3] 汤成伟,刘道平,祁影霞,等. 单压吸收式 Einstein 循环制冷机中气泡泵的性能分析[J]. 制冷学报,2009,30(3):35-39.
 - [4] 梁俟,刘道平,叶鹏. 气泡泵在制冷技术中的应用研究进展[J]. 制冷学报,2014,35(1):58-65.
 - [5] SHELTON S V, DELANO A D, SCHAEFER L A. Design analysis of the Einstein refrigeration cycle [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology,1998.
 - [6] STENNING A H, MARTIN B C. An analytical and experimental study of air-lift pump performance [J]. Journal of engineering for power,1968,90(2):106-116.
 - [7] 阙雄才,李红. 热虹吸泵绝热弹状流的热虹吸特性研究:无泵溴化锂吸收式太阳能制冷机机理研究之二[J]. 太阳能学报,1989,10(1):1-13.
 - [8] 郑晓倩,刘道平,陈永军,等. 圆弧形导流式气泡泵的冷态试验研究[J]. 流体机械,2015,43(9):58-62.
 - [9] 陈永军,刘道平,黄源琳,等. 变截面直立管气泡泵理论模型验证研究[J]. 太阳能学报,2016,37(4):917-923.
 - [10] 刘振全,吴玉莹,张中诚. 无泵溴化锂吸收式制冷气泡泵压力特性数学模型的探讨[J]. 兰州理工大学学报,2003,29(4):57-59.
 - [11] 平亚琴,刘道平,陈盛祥,等. 单压吸收式制冷系统气泡泵理论模型与实验研究[J]. 制冷学报,2010,31(6):46-50.
 - [12] 陈永军,刘道平,黄源琳,等. Einstein 制冷系统气泡泵理论模型修正验证研究[J]. 制冷学报,2014,35(6):68-74.
 - [13] 李华山,王令宝,卜宪标,等. 提升管管径对有机工质气泡泵性能的影响分析[J]. 新能源进展,2016,4(1):56-61.
 - [14] 李勇,王卫强,王国富,等. 水下天然气管道泄漏扩散数值模拟[J]. 当代化工,2015,44(12):2861-2863.
 - [15] 李自良,程赫明,王利,等. 雾化气体淬火过程耦合流场数值模拟及实验研究[J]. 材料导报,2016,30(2):126-129.
- =====
- (上接第 42 页)
- [3] JONES W S, ZIMMERMAN R W. Fabric pickup device: US5248177A [P]. 1993-09-28.
 - [4] SELIGER G, SZIMMAT F. Textile de-stacking with a freezing gripper [C]//World Youth Design and Manufacturing Science Conference. Dalian: National Natural Science Foundation of China, Wu Xianming Foundation, 2002:478-485.
 - [5] KORDI M T, HUSING M, CORVES B. Development of a multifunctional robot end-effector system for automated manufacture of textile preforms [C]//2007 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Zurich, Switzerland: IEEE, 2007: 1-6.
 - [6] CARCA E, ZOPPI M, MOLFINO R. A cooperative gripper for handling and handling limp parts [C]//The Eleventh International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machine. Coimbra, Portugal: World Scientific, 2008:843-850.
 - [7] CUBRIC G, NIKOLIC G, SIGNJAR S. Catching the woven fabric with vacuum gripper [J]. Annals of DAAAM for 2012 & proceeding of the 23rd international DAAAM symposium, 2012, 23(1):465-468.
 - [8] RAGUNATHAN S, KARUNAMOORTHY L. Modeling and dynamic analysis of reconfigurable robotic gripper system for handling fabric materials in garment industries [J]. Journal of advanced manufacturing systems, 2006, 5(2):233-254.
 - [9] 张元,赵志刚,李娜,等. 计及关节及杆柔性的空间机械臂抓取控制[J]. 南京航空航天大学学报,2011,43(2):210-215.
 - [10] 鲍官军,高峰,荀一,等. 气动柔性末端执行器设计及其抓持模型研究[J]. 农业工程学报,2009,25(10):121-126.
 - [11] 戎新萍,张得礼,王小平. 基于解耦的柔性关节机械臂振动抑制方法研究[J]. 机电工程,2015,32(1):14-20.