

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.10.013

无阀芯位置反馈的电液比例 方向阀死区补偿方法研究*

吴 强, 赵海娟, 吉星宇, 黄家海*

(太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:针对无位移传感器比例方向阀死区引起的流量非线性等问题,对比例方向阀死区模型进行了分析。通过对比补偿前后比例方向阀的输出流量静态特性曲线,得出了输出流量期望值与实际值的差值,并依据线性关系,计算出了两条曲线在同一输出流量下的输入电压差,拟合出了补偿电压,提出了无须位移反馈的线性死区补偿方法;通过建立比例方向阀流量控制系统仿真模型,仿真分析了死区补偿前后比例方向阀的输出流量静态特性;利用比例方向阀试验台,结合数字电液比例控制器,在不同压差情况下,对进、出阀口比例方向阀输出流量的静态特性进行了测试。研究表明:采用所提出的死区数字补偿方法,可灵活应用于数字电液比例控制器中,并可有效地减小无位移传感器比例方向阀的死区。

关键词:比例方向阀;死区模型;非线性;数字补偿

中图分类号:TH137.52

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)10-1204-06

Dead-zone compensation for the electro-hydraulic proportional directional valve without spool displacement feedback

WU Qiang, ZHAO Hai-juan, JI Xing-yu, HUANG Jia-hai

(School of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Aiming at the non-linear problems of flow caused by the dead-zone of the proportional directional valve without displacement sensor, the dead-zone model of the proportional directional valve was analyzed. The output flow static characteristic curve of the proportional directional valve before and after compensation were compared, to obtain the difference between the expected and the actual output flow value. The voltage difference between the two curves at the same output flow was calculated by the linear relationship. The compensation voltage was fitted and a linear dead-zone compensation method without displacement feedback was proposed. By the established simulation model of the proportional directional valve flow control system, the static characteristics of the proportional directional valve output flow before and after dead-zone compensation were simulated and analyzed. The static output flow characteristic of the proportional directional valve at the case of different valve port pressure drop were tested by the employed of digital electro-hydraulic proportional controller on the proportional directional valve test bench. The results indicate that the proposed dead-zone compensation method can be flexibly applied to digital electro-hydraulic proportional controllers and can effectively reduce the dead-zone of the proportional directional valve without displacement sensor.

Key words: proportional directional valve; dead-zone model; non-linear; digital compensation

收稿日期:2020-02-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51775362);山西省自然科学基金资助项目(201801D221226)

作者简介:吴强(1994-),男,安徽合肥人,硕士研究生,主要从事电液比例控制方面的研究。E-mail:wuqiang_vip@126.com

通信联系人:黄家海,男,教授,硕士生导师。E-mail:huangjiahai@tyut.edu.cn

0 引 言

液压系统中广泛采用的比例方向阀,通常情况下均是通过阀芯位置,来实现对其流量和方向的控制^[1]。

由于加工、装配精度以及工作中受到的阻尼力、摩擦力等原因,这类比例阀阀芯位置均存在着一定程度的死区,即对于一定范围内的输入信号,阀口均没有流量输出^[2]。死区范围通常在 5% ~ 25%,甚至更大,严重影响比例阀的控制性能^[3]。如何补偿比例阀死区,提高其控制性能,是比例阀控制方面面临的一个挑战^[4]。

谢建等人^[5]研究了死区对电液比例阀控制性能的影响,并提出了定值补偿和变幅值补偿方法^[6]。定值补偿法为先导电流补偿法,即通过在控制信号电路中设定最小电流,从而实现跳跃死区,但这种方法需要设计额外的硬件电路。变幅值补偿法则是通过改变比例阀在死区段、线性段、饱和段的控制器增益,从而实现阀芯快速通过中位死区。刘白雁等人^[7]提出了结合变幅值和超前切换的智能补偿方法,改善了比例阀系统的响应波形;张佳旭等人^[8]提出了基于 PID 位置闭环的零位电流阶跃与衰减式位置指令跳跃的死区补偿策略,有效地消除了零位位置死区。近年来,基于非线性控制算法的补偿策略已广泛应用于电液比例阀的控制中,如滑膜变结构策略^[9]、模糊控制策略^[10]、反步控制策略^[11]等,均有效地改善了死区所产生的影响。

上述有关比例阀的死区补偿方法通常都基于位移传感器,而对于实际应用中大量采用的无位移传感器比例方向阀,则鲜有零位死区补偿的相关研究文献。由于无阀芯位置反馈,该类比例方向阀位置控制都不太理想,若能通过死区补偿等方法提高其综合性能,则具有积极的意义。

针对上述问题,笔者将比例方向阀死区模型简化为死区段和线性段的组合,提出无须位移反馈的线性死区补偿策略;通过比例阀最大输入电压 $u_{\max}$,最大输出流量 $Q_{\max}$ 和原点,拟合出补偿后期望的比例方向阀输出流量静态特性曲线,并与未增加补偿时比例方向阀输出流量静态特性曲线进行对比,得出在任意相同输出流量下,补偿前与补偿后的电压差值,该差值便为此输出流量下的补偿电压;以此类推,得到比例方向阀输入电压与补偿电压之间的关系。

1 数学模型

典型的比例方向阀结构如图 1 所示。

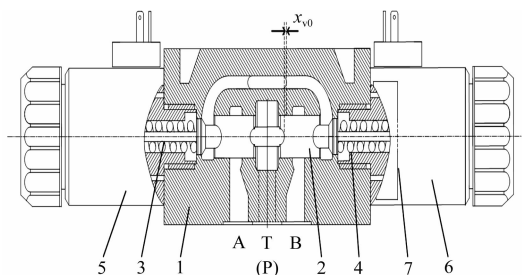


图 1 比例方向阀结构图

1 - 阀体;2 - 控制阀芯;3,4 - 弹簧;5,6 - 比例电磁铁;
7 - 三位阀转换为二位阀的丝堵

比例方向阀的死区模型如图 2 所示。

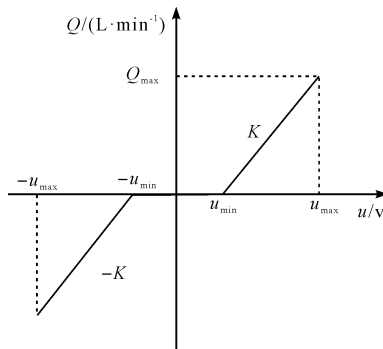


图 2 比例方向阀死区模型

由图 2 可知,比例方向阀死区模型是一个死区段和线性段的组合,此时比例方向阀输出流量 Q 的表达式为:

$$Q = \begin{cases} -K(u + u_{\min}), & -u_{\max} \leq u \leq -u_{\min} \\ 0, & -u_{\min} < u < u_{\min} \\ K(u - u_{\min}), & u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u —比例阀输入信号; Q —比例方向阀输出流量; $-u_{\min}$ —左极限死区; $u_{\min}$ —右极限死区; $-K$ —左输出斜率; K —右输出斜率。

2 死区补偿策略

2.1 补偿策略

比例方向阀输出流量与输入电压之间的关系如图 3 所示。

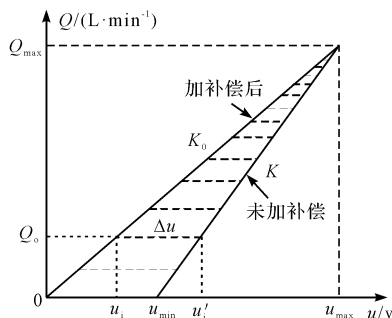


图 3 比例方向阀输出流量与输入电压的关系

图 3 中,以第一象限为例,未增加补偿时,比例方向阀输出流量与输入电压的关系可用分段函数来表示,即:

$$Q = \begin{cases} 0, & 0 < u < u_{\min} \\ K(u - u_{\min}), & u_{\min} < u < u_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: K —补偿前右输出斜率, $K = Q_{\max}/(u_{\max} - u_{\min})$ 。

由图 3 可知,期望的比例方向阀的输出流量应与输入电压信号成正比,斜率为 K_0 ;即补偿后,比例方向阀输入电压与输出流量的关系为:

$$Q_o = K_0 u \quad (3)$$

式中: K_0 —补偿后右输出斜率, $K_0 = Q_{\max}/u_{\max}$; Q_o —补偿后期望的比例方向阀输出流量。

当输入电压为 $u = u_i$ 时,依据式(2,3),可以分别求得补偿后期望的比例方向阀输出流量 Q_o ,未增加补偿曲线对应的比例方向阀输入电压为 u'_i ,即:

$$u'_i = \frac{K_0}{K} u_i + u_{\min} \quad (4)$$

由图 3 阴影部分可知,补偿电压 Δu 即为 u'_i 与 u_i 的差,即:

$$\Delta u = u'_i - u_i = \left(\frac{K_0}{K} - 1 \right) u_i + u_{\min} \quad (5)$$

将 K 和 K_0 代入上式可得:

$$\Delta u = -\frac{u_{\min}}{u_{\max}} u_i + u_{\min} \quad (6)$$

故补偿后的总电压 u_o 为:

$$u_o = u_i + \Delta u = \left(1 - \frac{u_{\min}}{u_{\max}} \right) u_i + u_{\min} \quad (7)$$

2.2 补偿方法实现

数字电液比例控制器是利用微处理器,将输入的控制信号 u_i 通过控制信号调理模块、A/D 采样模块、PWM 模块,最终将控制信号成比例地转换为 PWM 波形的占空比,再将其送入到比例阀驱动电路中,实现对比例阀流量及方向的控制。

由数字电液比例控制器的控制原理可得,数字补偿信号 $\Delta u'$ 为:

$$\Delta u' = K_c K_{AD} K_{PWM} \left(-u_i \frac{u_{\min}}{u_{\max}} + u_{\min} \right) \quad (8)$$

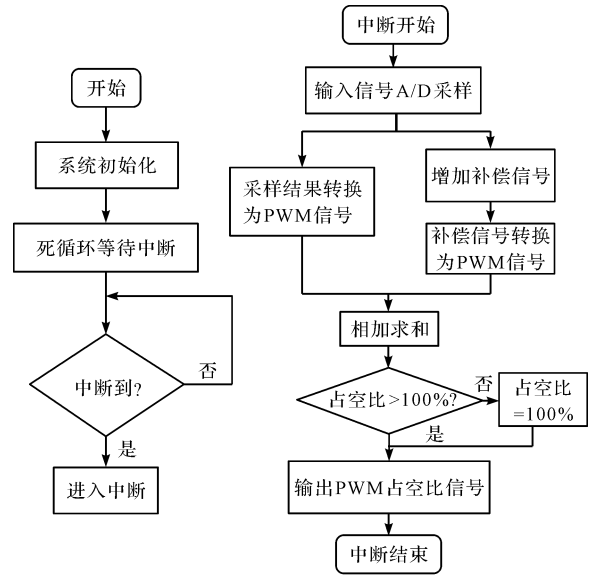
式中: K_c —信号调理模块的增益; K_{AD} —A/D 转换模块的系数; K_{PWM} —PWM 模块的系数。

在数字电液比例控制器中,因无法直接补偿模拟信号,需要将模拟信号转换成数字信号。结合数字比例控制器,需要将补偿算法通过 C 语言,写入到比例控制器软件部分中。

通过 C 语言代码,笔者将式(8) 写入到微处理器

中断程序部分中。

补偿算法流程图如图 4 所示。



(a) 主程序流程图

(b) 中断程序流程图

图 4 补偿算法流程图

3 建模与仿真

3.1 比例方向阀流量控制系统模型

由于比例方向阀中的比例电磁铁可等效为电阻和电感的串联,比例电磁铁线圈上的电压方程为:

$$u_0(t) = (R_c + r_p) i_0(t) + L_c \frac{di_0(t)}{dt} \quad (9)$$

式中: R_c —比例电磁铁等效电阻; r_p —放大器内阻; L_c —比例电磁铁等效电感; $u_0(t)$ —比例放大器输出电压; $i_0(t)$ —流过比例电磁铁的电流。

通过采样电阻 R_0 ,比例放大器将流过线圈的电流转换成电压信号,构成电流反馈,即:

$$u_{if}(t) = K_{fi} i_0(t) \quad (10)$$

式中: $u_{if}(t)$ —反馈电压; K_{fi} —电流负反馈系数。

比例放大器的输出电压 $u_0(t)$ 与输入电压 $u_i(t)$ 成线性关系,可视为比例环节,即:

$$u_0(t) = K_e [u_i(t) - u_{if}(t)] \quad (11)$$

由于比例电磁铁属于励磁式电-机械转换器件,衔铁在磁场中受到的电磁力为:

$$f_e(t) = K_i i_0(t) \quad (12)$$

式中: K_i —比例电磁铁的电流-力增益。

在带动阀芯动作时,衔铁需要克服的负载包括衔铁以及所驱动部件的惯性力、阻尼力、弹簧力、稳态液动力和负载力。

衔铁上的力平衡方程为:

$$f_e(t) = m_e \frac{d^2 x_e(t)}{dt^2} + B_e \frac{dx_e(t)}{dt} + K_{et} x_e(t) + f_{eL} \quad (13)$$

式中: m_e —衔铁以及它所驱动部件的质量; B_e —阻尼系数; K_{et} —弹簧总刚度; $x_e(t)$ —阀芯位移; f_{eL} —衔铁工作时需克服的负载力。

比例方向阀的输出流量为:

$$Q(t) = C_d W x_e(t) \sqrt{2\Delta P/\rho} \quad (14)$$

在初始条件为 0 的情况下,笔者对式(9 ~ 14)进行拉氏变换,并在 MATLAB/Simulink 仿真软件中建立比例方向阀控制系统模型,最后将补偿策略增加到模型中。

仿真模型的参数表如表 1 所示。

表 1 仿真模型参数表

参数	数值
放大器电压放大系数 $K_e/(V \cdot A^{-1})$	2.4
电流反馈系数 $K_f/(V \cdot A^{-1})$	0.37
电阻 $R_e + r_p/\Omega$	2
电感 L_c/H	0.02
弹簧总刚度 $K_{et}/(N \cdot mm^{-1})$	25.51
阻尼系数 $B_e/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	31.6
衔铁及驱动部件质量 m_e/kg	0.02
比例电磁铁电流-力增益 $K_i/(N \cdot A^{-1})$	26

该仿真参数与实验中使用的特意加工的死区较大比例方向阀的实际参数一致,其中,比例电磁铁电感参数的确定方法可参考文献[12],阻尼系数计算方法参考文献[13]。

3.2 仿真结果分析

仿真步骤:

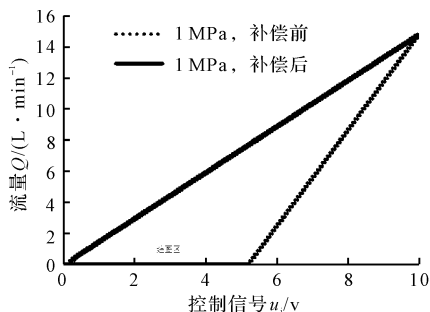
(1) 分别设定比例方向阀的进、出口压差为 1 MPa 和 5 MPa; 输入控制信号为 0 ~ 10 V, 斜率为 0.2 V/s 的斜坡信号, 对比例方向阀输出流量静态特性进行仿真;

(2) 同时设定比例方向阀的进、出口压差为 1 MPa, 输入控制信号为 0 ~ 10 V 的阶跃信号, 对比例方向阀的位移动态特性进行仿真。

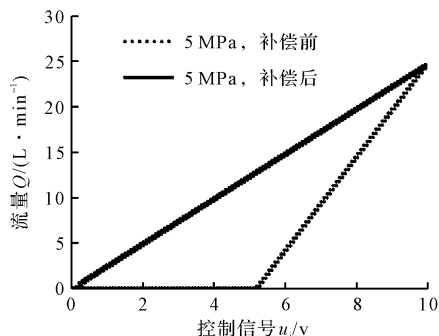
在不同压差下, 比例方向阀补偿前后^[14]的仿真结果如图 5 所示。

由图 5 可知:

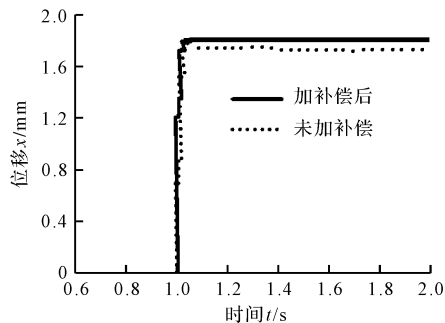
(1) 1 MPa 情况下, 未加补偿时, 当输入的控制信号在 0 ~ 5.23 V 之间时, 比例方向阀输出流量为 0, 存在 52.3% 的死区; 越过死区后, 比例方向阀输出流量与输入的控制信号成正比, 最大流量为 14.7 L/min; 增加了死区补偿后, 比例方向阀输出流量基本可以线性地响应控制信号, 死区减小到 2%, 最大流量仍为 14.7 L/min;



(a) 压差为 1 MPa 下补偿前后流量静态特性曲线



(b) 压差为 5 MPa 下补偿前后流量静态特性曲线



(c) 压差为 1 MPa 下补偿前后位移动态特性曲线

图 5 不同压差下补偿前后仿真结果

(2) 5 MPa 情况下, 未加补偿时, 当输入的控制信号在 0 ~ 5.21 V 之间时, 比例方向阀输出流量为 0, 存在 52.3% 的死区; 越过死区后, 比例方向阀输出流量与输入的控制信号成正比, 最大流量为 24.8 L/min; 增加了死区补偿后, 比例流量阀输出流量基本可以线性地响应控制信号, 死区减小到 2%, 最大流量仍为 24.8 L/min;

(3) 1 MPa 情况下, 增加补偿后系统没有出现超调、震荡的现象, 响应时间为 0.1 s。由此可以看出, 该补偿策略对比例方向阀阀芯位移的动态性能没有影响。

4 实验及结果分析

根据前文所述, 笔者所采用的数字补偿策略, 是运用代码编程写入到数字比例控制器中, 来加以实现补偿。因此, 为验证死区补偿的效果, 笔者特别加工了一个死区较大的比例方向阀, 以用于实验。该比例方向阀的阀芯最大位移为 1.8 mm。

在实验中,笔者将比例方向阀的 AB 口相连,比例方向阀处于空载状态;溢流阀用来设定 P 口压力,则此时的溢流阀设定压力即为其进、出口压差;流量计选用 Parker 齿轮流量计,最大量程可达 150 L/min;采集仪选用 NI USB-6343,该采集仪有 4 路输出和 24 路输入端口,可以同时输出和采集信号。

比例方向阀输入信号为 0~10 V,频率为 0.01 Hz 的斜坡信号。

在进出口压差为 1 MPa 和 5 MPa 的情况下,笔者分别测试了补偿前后比例方向阀的输出流量静态特性,如图 6 所示。

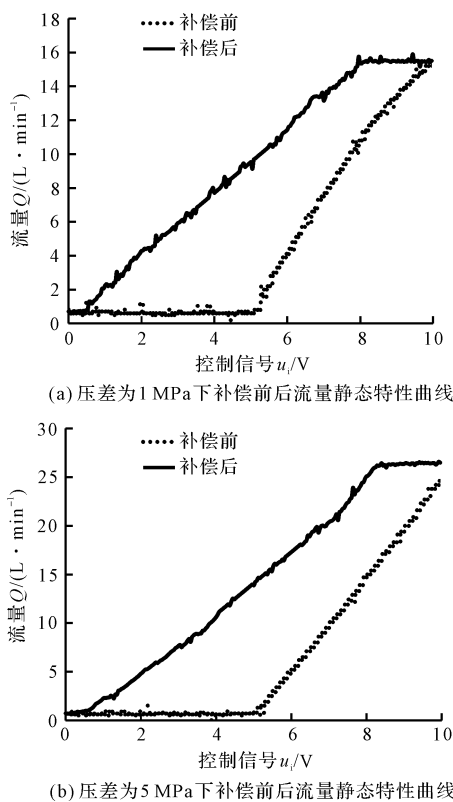


图 6 比例方向阀输出流量静态特性曲线

由图 6 可知:

(1) 1 MPa 情况下,未加补偿时比例方向阀输出流量死区为 53%,最大流量为 15.2 L/min;增加了补偿后,比例方向阀输出流量死区减小到 4%,最大流量为 15.2 L/min;

(2) 5 MPa 情况下,未加补偿时比例方向阀输出流量死区为 53%,最大流量为 24.8 L/min;增加了补偿后,比例方向阀输出流量死区减小到 5%,最大流量为 26.4 L/min。

5 结束语

本研究针对无阀芯位置检测的电液比例方向阀中存在的死区问题,将其死区模型简化为死区段和线性

段的组合,提出了一种无需位移传感器反馈的线性死区补偿方法;建立了仿真模型对其进行了分析,并在数字电液比例控制器中运用了 C 语言代码,予以实现;最后为了验证死区补偿的效果,特别加工了一个死区较大的比例方向阀,对此进行了实验。

仿真结果表明:该死区补偿方法可以明显改善提高比例方向阀静态控制性能,对其动态性能没有影响,可以有效地减小比例方向阀输出流量死区;同时,该补偿方法也可以方便地在数字电液比例控制器中使用。

实验结果表明:该补偿策略可将比例方向阀的死区从 53% 减小到 4%~6%。

由此可见,实验结果与仿真结果基本一致。因上,笔者所提出的死区补偿方法,可灵活应用于数字电液比例控制器中,并可有效地减小无位移传感器比例方向阀的死区。

参考文献 (References):

- [1] XU B, SU Q, ZHANG J, et al. Analysis and compensation for the cascade dead-zones in the proportional control valve [J]. *ISA Transactions*, 2017(66):393-403.
- [2] 刘大华. 液压比例方向阀死区辨识的新方法[J]. 矿山机械, 2010(24):63-65.
- [3] ACUÑA-BRAVO W, CANUTO E, AGOSTANI M, et al. Proportional electro-hydraulic valves: An embedded model control solution [J]. *Control Engineering Practice*, 2017(62):22-35.
- [4] HAN G, SHI G, GUO Q. Sliding model position control based on disturbance observer for electro-hydraulic proportional systems [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2019(1):26.
- [5] 谢建, 李泰嵩. 电液比例阀性能影响因素及补偿方法的研究[J]. 液压气动与密封, 2016, 36(9):10-12.
- [6] 许益民. 电液比例控制系统分析与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [7] 刘白雁. 电液比例方向阀死区的智能补偿[J]. 机床与液压, 2002(2):89-90.
- [8] 张佳旭, 俞亚新, 翁之旦, 等. 双电磁铁比例方向阀零位位置控制死区补偿方法研究[J]. 机电工程, 2019, 36(3):262-266.
- [9] BESSA W M, DUTRA M S, KREUZER E. Sliding mode control with adaptive fuzzy dead-zone compensation of an electro-hydraulic servo-system [J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2010, 58(1):3-16.
- [10] PRATUMSUWAN P, THONGCHAI S. Precompensation for a hybrid fuzzy PID control of a proportional hydraulic system [C]. *Electrical Engineering/Electronics, Computer,*

- Telecommunications and Information Technology, Pattaya: IEEE, 2009.
- [11] GUO Q, SUN P, YIN J, et al. Parametric adaptive estimation and backstepping control of electro-hydraulic actuator with decayed memory filter [J]. **ISA transactions**, 2016 (62): 202-214.
- [12] 杜昌元, 许益民, 黄松, 等. 比例电磁铁电感的测量 [J]. **机床与液压**, 2012, 40(7): 115-116.
- [13] 王书铭, 蔡存坤, 左哲清, 等. 电液伺服阀阀芯粘性阻尼系数辨识方法研究 [J]. **航天控制**, 2018, 36(1): 92-97.
- [14] 司昌练. 基于电液位置伺服系统机床滑台模糊自适应控制研究 [J]. **液压气动与密封**, 2019(5): 37-42.

[编辑:程浩]

本文引用格式:

吴强, 赵海娟, 吉星宇, 等. 无阀芯位置反馈的电液比例方向阀死区补偿方法研究 [J]. **机电工程**, 2020, 37(10): 1204-1209.

WU Qiang, ZHAO Hai-juan, JI Xing-yu, et al. Dead-zone compensation for the electro-hydraulic proportional directional valve without spool displacement feedback [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2020, 37(10): 1204-1209.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第1197页)

- [7] 刘华, 张天翼. 双螺杆制冷压缩机性能影响因素的试验研究 [J]. **流体机械**, 2016, 44(9): 12-15.
- [8] KOVACEVIC A, STOSIC N, LAN K. Smith. Three dimensional numerical analysis of screw compressor performance [J]. **Journal of Computational Methods in Science and Engineering**, 2003, 3(2): 259-284.
- [9] JOHN B, VOORDE V. ALE calculations of flow through rotary positive displacement machines [C]. ASME 2005 Fluids Engineering Division Summer Meeting. Houston, Fluids Engineering Division, 2005.
- [10] RANE S, KOVACEVIC A, STOSIC N, et al. Grid deformation strategies for CFD analysis of screw compressors [J]. **International Journal of Refrigeration**, 2013, 36(7): 1883-1893.
- [11] KOVACEVIC A, STOSIC N, SMITH I K. The influence of rotor deflections upon screw compressor performance [C]. VDI-Schraubenmaschinen, Dortmund, Germany, 2002.
- [12] HORIM L, CHANGHEE K, JANGSIK Y, et al. Study on the performance of a centrifugal compressor using fluid-structure interaction method [J]. **Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B**, 2016, 40(6): 357-363.
- [13] 赵宁, 李碧浩, 屈文涛, 等. 螺杆转子动力学性能有限元分析 [J]. **现代制造工程**, 2006(3): 37-39.
- [14] CAO F, GAO T, LI S, et al. Experimental analysis of pressure distribution in a twin screw compressor for multi-phase duties [J]. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2011, 35(1): 219-225.
- [15] 王小明, 田青青, 熊国良, 等. 基于螺杆转子啮合接触线加载气体轴向力的热应力分析 [J]. **液压与气动**, 2013(7): 59-61.
- [16] 吴慧媛, 何雪明, 戴进. 基于CFD的双螺杆压缩机的三维动态仿真分析研究 [J]. **中国机械工程**, 2013, 24(24): 3366-3371.
- [17] 魏静, 孙旭建, 孙伟. 双螺杆转子结构特性流固耦合数值模拟 [J]. **中国机械工程**, 2012, 23(18): 2228-2233.
- [18] 李托雷, 王军利, 雷帅, 等. 齿顶及啮合间隙对双螺杆压缩机流场特性影响 [J]. **陕西理工大学学报: 自然科学版**, 2019, 35(6): 6-12.
- [19] XU Q, FENG J X, ZHANG S C. Effects of different loads on structure stress of "L"-type large-diameter buried pipe network based on fluid-structure-heat coupling [J]. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 2017(86): 222-230.

[编辑:冯黎雅]