

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.014

过盈连接组件装配过程爬行现象原因分析及改进方法

马诚,李智勇,刘文凯,韩宇,娄志峰

(大连理工大学 机械工程学院,辽宁 大连 116024)

摘要:为避免电液伺服阀微小过盈组件装配时的爬行现象,提高组件的连接质量,提出采用合理范围压装速度以及油膜黏度策略。通过理论分析、模拟计算、有限元仿真等方法分析不同压装速度以及不同黏度参数对压力-位移曲线产生爬行现象的影响。研究表明在低速压装以及润滑油黏度较低时易出现爬行现象。针对上述现象,搭建一台基于压力传感器、光栅尺的精密压装实验设备,采用有限元仿真时所用参数进行相关实验,证明仿真结果的合理性。采用优化后的压装速度和油膜黏度进行相关实验,可有效避免爬行现象。

关键词:电液伺服阀;过盈联接;精密压装;仿真分析;爬行现象

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)04-0071-05

Cause Analysis and Improvement Method for Crawling Phenomenon in Assembly Process of Interference Fit Components

Ma Cheng, Li Zhiyong, Liu Wenkai, Han Yu, Lou Zhifeng

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to avoid the crawling phenomenon during the assembly of tiny interference fit components in electro-hydraulic servo valves and improve the connection quality of components, a strategy employing a reasonable range of pressing speed and oil film viscosity is proposed. Through theoretical analysis, simulation calculation, finite element simulation and other methods, the influence of different pressing speeds and viscosity parameters on the crawling phenomenon of the pressure-displacement curve is analyzed. The research indicates that the stick-slip phenomenon is prone to occur at low pressing speeds and when the lubricating oil viscosity is low. In response to this phenomenon, a precision pressing experimental setup based on pressure sensors and grating rulers was constructed. Experiments were conducted using the same parameters as in the finite element simulation, verifying the rationality of the simulation results. Experiments conducted with optimized pressing speed and oil film viscosity effectively avoided the crawling phenomenon.

Keywords: electrohydraulic servo valve; interference fit; precision pressing; simulation analysis; crawling phenomenon

0 引言

电液伺服阀内的衔铁组件作为其核心部件之一,负责电与液的连接,能够利用电流控制液压通路的开启和关闭来实现对液压执行元件的精确控制。

娄志峰等^[1]根据微小组件装配要求研制了一套精密微小组件自动压装仪器,通过分析压装过程中压装力与系统弹性变形变化关系,对组件的压装位移进行了有效补偿。Wang 等^[2]提出了一种简化模型,建立了基于厚壁圆筒理论(TCT)和阻力计算方法的解析方法。Huang 等^[3]通过选取不同过盈配合参数进行疲劳试验建立了疲劳寿命预测模型。You 等^[4]采用有限元分析研究了压装

位移曲线和压装组件的最大压装力,成功预测精密压装组件的压装质量。李伟刚等^[5]基于非合作式激光相位测距技术,提出了一种针对大尺寸轴孔类零件热装配轴线位置测量和重合调整的方法,建立了轴孔类零件装配轴线的测量模型。王兴远^[6]针对无法预测过盈配合面之间的接触状态,研制了一种应力分布超声测量装置。

1 衔铁组件精密压装方法与设备

1.1 衔铁组件结构与装配要求

本文所选用的衔铁组件为电液伺服阀内的一个核心部件,由衔铁和弹簧管的装配而成,配合类型为孔轴过盈配合,衔铁和弹簧管二者的零件结构特征以及装配后的模型如图 1 所示。

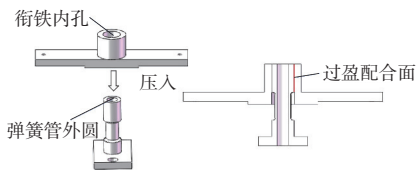


图 1 衔铁组件模型图

衔铁内孔与弹簧管外圆为过盈配合,其配合长度为 6 mm,过盈量一般为 12~14 μm ,装配过程中两者的同轴度误差应控制在 $\pm 5 \mu\text{m}$ 。

1.2 精密压装设备研制

根据对组件装配要求和压装关键技术分析,设备的设计模型和实体结构如图 2 所示。各模块的功能如下:零件夹持模块用于衔铁和弹簧管的可靠定位与夹持;视觉检测模块用于衔铁与弹簧管相关边线的提取;XY 精密自动调整平台用于调整弹簧管的相对位置;直线推杆用于实现衔铁的进给运动。下横梁下方的压力传感器和横梁侧面的直线光栅尺分别用于采集压力和位移。

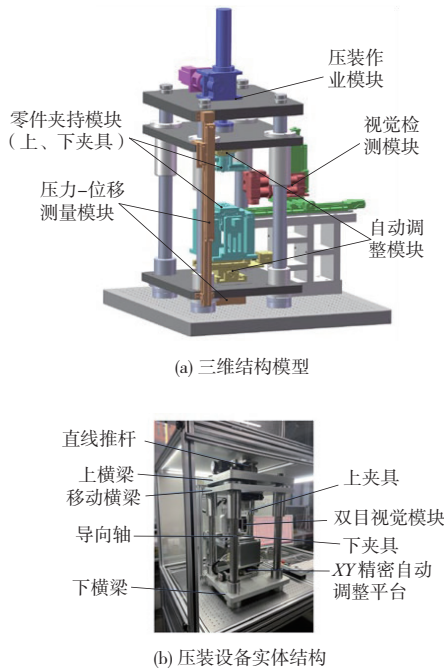


图 2 精密压装设备的设计模型和实体结构

2 衔铁组件压装过程仿真分析

2.1 压装过程仿真参数设置

衔铁组件结构如图 3 所示,利用 SolidWorks 软件对组件进行建模,使用有限元软件对装配过程进行分析,材料参数如表 1 所示。在本文计算模型中,衔铁与弹簧管选定摩擦类型为有摩擦

(Frictional)。根据 GB/T 5371—2004《极限与配合过盈配合的计算和选用》,当材料为“钢-钢”接触类型时,在无润滑的情况下,摩擦因数为 0.07~0.16,在油润滑的情况下,摩擦因数为 0.05~0.13。在实际的装配过程中需要在弹簧管过盈配合段外表面涂覆一层润滑油,因此选择摩擦因数为 0.08。仿真软件中的约束情况如图 4 所示,在弹簧管过盈配合段下端面施加支撑约束 (fixed support),对衔铁上端面施加位移约束 (remote displacement),过盈量采用手动设置。接触设置如表 2 所示。

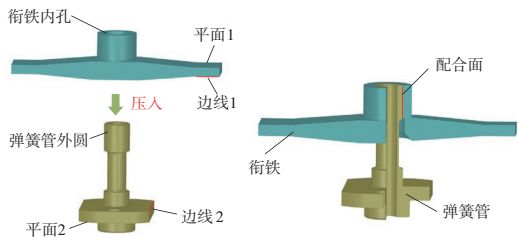


图 3 衔铁组件二维剖面图

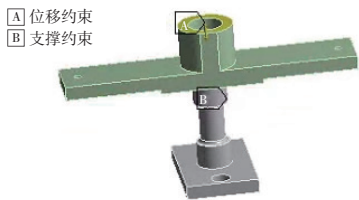


图 4 仿真软件中衔铁组件约束情况

表 1 衔铁组件材料参数

参数	零件	
	衔铁	弹簧管
弹性模量/MPa	157 000	186 000
泊松比	0.34	0.30
屈服极限/MPa	686	882
切线模量/MPa	942	1 116
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	8 200	8 000

表 2 接触设置

参数	设定值
接触类型	摩擦接触
摩擦因数	0.08
过盈量	手动设置
接触算法	增强拉格朗日
法向刚度系数	2.50

2.2 未涂覆润滑油的仿真分析

未涂覆润滑油仿真分析,即在衔铁与弹簧管装配之前,弹簧管过盈配合段不涂覆润滑油。仿真软件中的各项参数设置如 2.1 节所示。本节对 3 种摩擦因数的装配过程进行了仿真研究,如图 5、图 6 所示。

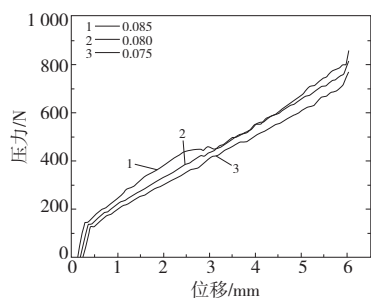


图 5 未涂覆润滑油仿真时的压力-位移曲线

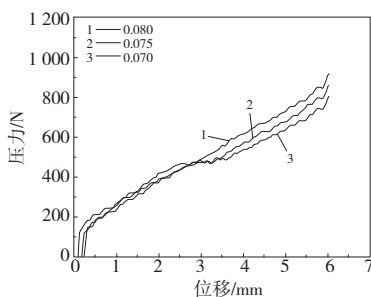


图 6 涂覆润滑油仿真时的压力-位移曲线

结果表明, 0~0.2 mm 过程只存在位移不存在压装力,这是由于衔铁和弹簧管存在倒角,此阶段属于空压状态;0.2~0.3 mm 阶段,属于衔铁和弹簧管的触发碰撞阶段,此时压力从 0 开始急剧上升;随之,0.3 mm 畸变点为正常压装阶段,此阶段压力-位移曲线相对平滑。由于压装过程的分析是非线性的,因此选择了非线性大变形和分载荷步选项。在压装刚开始接触时,这一短暂的过程中压装力变化非常大,因此通过多子步进行详细计算仿真分析。

2.3 涂覆润滑油的仿真分析

为减小装配过程中的接触应力,尽可能减小压装过程中出现的配合面划伤现象,对弹簧管进行可靠装夹之后,在弹簧管过盈配合段外圆涂覆一层润滑油。所选用的润滑油为 20 号航空润滑油,其密度为 876 kg/m^3 ,运动黏度为 24 cSt。由于在装配之前涂覆了润滑油,摩擦因数会相应地减小,如图 6 所示为涂覆润滑油之后的同样 3 种摩

擦因数仿真结果。

结果表明,涂覆润滑油之后虽然过盈配合面之间的摩擦因数减小了,装配过程中的压装力也减小了,因此更有利于将衔铁压入弹簧管中。但是压力-位移曲线较为波动,说明爬行现象较为明显。这对装配质量而言非常不利,严重时可能导致衔铁内孔被挤出碎屑,从而影响装配件的使用性能。

3 衔铁组件压装实验验证

3.1 压力-位移曲线分析

从第 2 节的仿真结果和图 7—图 8 所示的实验结果可以看出,在装配之前涂覆了润滑油得到的最大压装力要明显比未涂覆润滑油时的最大压装力要小。两种情况的工况设置除有无润滑油的区别之外其余条件完全相同,但是从得到的结果可以看出,在涂覆了润滑油之后绘制出的压力-位移曲线有明显的爬行现象。

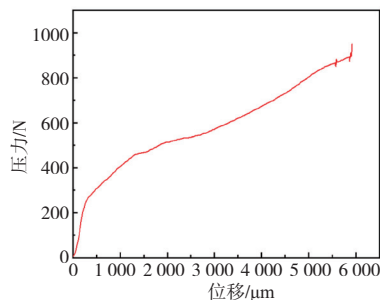


图 7 未涂覆润滑油时的压力-位移曲线

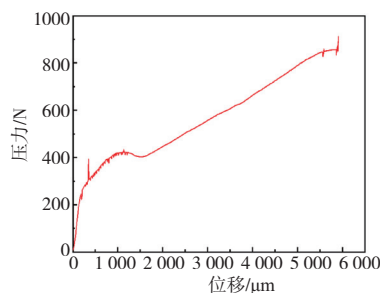


图 8 涂覆润滑油时的压力-位移曲线

以下是爬行现象机制分析:在压装的某一瞬间,压装力逐渐增大,衔铁相对于弹簧管的支撑面位置没有改变,压装力不断增大,直到积聚到足够大之后,衔铁开始移动。过了衔铁与弹簧管支撑面之间的相对位置之后,推力相比最高峰时又变小了。假如滚珠丝杠的刚度差,在压装力峰值处由于力的作用累积了较大的变形,过了这一峰值

时所需要的力又突然变小,滚珠丝杠此时会突然把在压力峰值时积聚的变形释放,从而导致压装爬行现象的发生^[7-8]。

上述现象可以将其简化为弹簧系统进行研究^[9-10],从滚珠丝杠副到压头这些环节可简化为弹簧。压装开始时,压头向下进给,相当于弹簧压銜铁,开始时受到很大的静摩擦力而保持静止,弹簧一直在被压缩而转变成弹性势能。当弹簧被压缩到一定状态时,压缩力增大到和銜铁与弹簧管之间的最大静摩擦力相等时,銜铁开始运动,此时受动摩擦力。因为动摩擦力要比最大静摩擦力小,所以弹簧的压缩力也比动摩擦力大,銜铁便会出现一个短暂的加速运动过程,这便是所说的銜铁跳跃运动^[11]。之后压装过程中上述这种时走时停的现象反复交替,便是压装过程中銜铁的爬行现象。

3.2 改进之后的压装实验

通过对实验数据的汇总分析,导致压装过程中爬行的主要原因如下:一是压装过程中丝杆副的进给速度太慢;二是动静摩擦力差值较大。静摩擦力是一定的,关键取决于润滑油的黏度大小。上述采集到的压力-位移曲线是采用 24 cSt 的航空润滑油。因此,为避免爬行现象的产生,采用黏度更高的润滑油。综合上述两点原因继续压装实验。

1) 提高压装速度

压装的爬行现象主要发生在低速运动中,因为高速运动时过盈配合面之间容易形成动压油膜,此时的摩擦因数非常小。在低速运动时,较难形成动压油膜,从而出现由微峰直接接触的边界摩擦。在低速运动的时候,摩擦因数上升的很快,也就是具有很高的正阻尼;在高速运动时,摩擦因数会稳定下来,此时又不会产生太大的驱动阻力。

徐涛等^[12]通过对仿生飞行器结构仿真优化,分析主要部件的变形及应力,为本文仿真分析提供了思路。在仿真软件中对不同压装速度进行了分析,结果如图 9 所示,随着压装速度的增大爬行现象逐渐消失,压装力增大的问题也开始显现出来。在设置不同速度时不能无限制增大速度,需结合实际及表 1 里面材料的屈服极限进行设置,不能超过极限值,结果如图 10 所示。根据提取的应力值以及压装力,合理压装速度选择 0.8 mm/s,并且进行压装实验,结果如图 11 所示,在提高了压装速度之后,可有效避免了压装过程中的爬行现象。

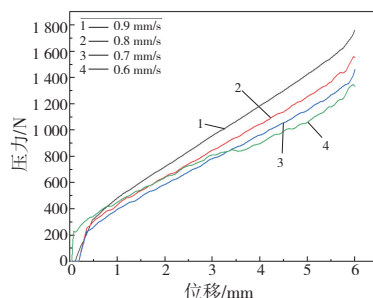


图 9 不同压装速度时的压力-位移曲线

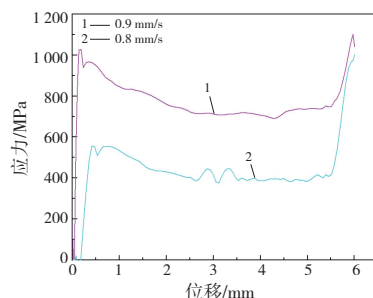


图 10 不同速度时的应力曲线

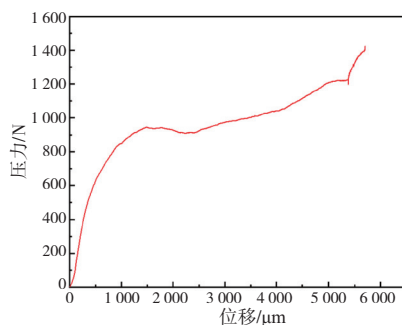


图 11 0.8 mm/s 时的压力-位移曲线

2) 采用黏度高的润滑油

上述有爬行现象时选用的润滑油是黏度为 24 cSt 的航空润滑油,为减小动静摩擦力的差值,选用黏度相对更高的润滑油(黏度为 30 cSt 和 40 cSt),并用仿真软件进行流固耦合分析,其仿真结果如图 12 所示。

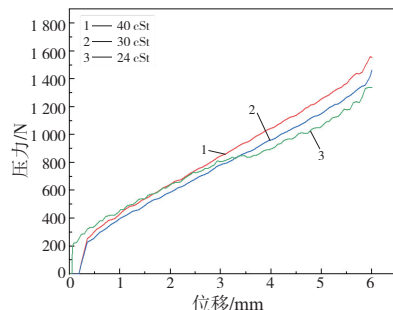


图 12 不同黏度润滑油时的压力-位移曲线

从仿真结果可以看出,随着所使用的润滑油的黏度增大,爬行现象也在逐渐消失。若润滑油黏度较小,导致过盈配合面之间动静摩擦力的差值较大,反而会出现爬行现象;若是选用润滑油的黏度较大(黏度为 40 cSt 的润滑油),虽然动静摩擦力的差值较前者减小了,但是同条件下的压装力增大了约 10%,并且黏度较高的润滑油在涂覆的时候很难保证均匀程度,这也会影响压装过程。综上所述,选用黏度为 30 cSt 的润滑油较为合适。

4 结语

本文基于研制的精密自动压装设备,对压装过程中实时采集的压力-位移曲线进行了分析。经过实验验证,为提高衔铁组件联接质量的可靠性,选用 0.8 mm/s 的压装速度以及黏度为 30~40 cSt 的航空润滑油,有效避免了爬行现象。此后随机抽取了实验台上多套衔铁组件进行了压装实验,其压力-位移曲线均在合理预测范围内,表明组件的装配质量良好。

参考文献:

- [1] 姜志峰,王晓东,由博,等. 精密微小组件压装技术及仪器[J]. 光学精密工程,2015,23(6):1605-1611.
- [2] Wang X Y, Lou Z F, Wang X D, et al. A new analytical method for press-fit curve prediction of interference fitting parts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250:16-24.
- [3] Huang C W, Yang G X, Fu N J, et al. Research on fretting fatigue life of interference fit and its influencing factors [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 251:293-300.
- [4] You B, Lou Z F, Luo Y, et al. Prediction of pressing quality for press-fit assembly based on press-fit curve and maximum press-mounting force [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2015, 2015:823019.
- [5] 李伟刚,张锁怀,吴一凡. 大尺寸轴孔类零件热装配轴线的非接触测量[J]. 机械设计与制造,2014(3):217-219,223.
- [6] 王兴远. 精密微小组件过盈连接与连接力超声测量[D]. 大连:大连理工大学,2020.
- [7] 许阳. 微小组件精密压装设备控制与系统标定[D]. 大连:大连理工大学,2015.
- [8] 李伟. 微小惯性组件精密装配设备控制与系统标定[D]. 大连:大连理工大学,2020.
- [9] 苏丹. 爬行机理的研究及计算机仿真[D]. 兰州:兰州理工大学,2007.
- [10] 魏维君. 基于机器视觉与被动柔顺机构的孔轴精密装配研究[J]. 机械工程师,2015(6):138-141.
- [11] 龙家. 喷嘴压装爬行机理及振动对爬行现象影响的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- [12] 徐涛,丁长涛. 仿生扑翼结构优化设计及动力学仿真分析[J]. 机械制造与自动化,2024,53(1):128-132.

收稿日期:2024-03-12

(上接第 59 页)

- [4] 卢家玲,楚武利,朱俊强,等. 端壁造型在叶轮机械中的应用与发展[J]. 热能动力工程,2009,24(6):687-691,813.
- [5] Deich M. E., Zaryakin A. E., Fillipov G. A., and Zatsepin M. F., Method of increasing the efficiency of turbine stages and shon blades [J]. Teplo energetika, 1960(2):240-254.
- [6] 石靖,周勇,周四平,等. 外端壁收缩与单向倾斜组合涡轮导叶的三维气动力研究[J]. 航空动力学报,2002,17(4):385-391.
- [7] Duan W H, Qiao W Y, Wei Z J, et al. The influence of different endwall contouring locations on the secondary flow losses in a highly loaded low pressure turbine [C]//

Volume 2B: Turbomachinery. Oslo, Norway: American Society of Mechanical Engineers, 2018: V02BT39A007.

- [8] 蒋筑宇,范召林,邱名,等. S 型收缩流道对涡轮通流能力影响的研究[J]. 推进技术,2022,43(9):176-187.
- [9] 王喜华,钟刚云,吴其林,等. 子午流道对调节级气动性能影响的三维数值研究[J]. 东方汽轮机,2014(2):11-17.
- [10] 张远森. 微型涡轮发电机双级轴流涡轮设计[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
- [11] 刘泽鹏. 进气畸变与风扇耦合影响机制及模型研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2023.

收稿日期:2024-03-19