

电液伺服斜盘柱塞式液压变压器配流盘缓冲槽

刘成强, 姜继海, 高丽新, 杨冠中

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 150080 哈尔滨)

摘要: 为了减小电液伺服斜盘柱塞式液压变压器的压力冲击, 降低噪声, 提高其运行平稳性, 本文基于 ADINA 软件的流固耦合功能对液压变压器的配流盘缓冲槽进行了研究。在 Pro/E 中建立了配流结构的流体模型和固体模型, 导入到 ADINA 软件中建立有限元模型, 分析了配流缓冲结构的流场, 并对结构进行了有限元校核, 设计制造了带有三角槽缓冲结构的配流盘, 基于搭建的液压变压器实验台进行了实验研究。结果表明所设计的配流盘能够使液压变压器运行平稳, 最低转速达到 35 r/min, 噪声显著降低, 可靠性明显提高, 验证了理论分析的正确性。

关键词: 液压变压器; ADINA; 流固耦合; 配流盘; 缓冲槽研究

中图分类号: TH137.51

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2013)07-0053-04

Valve plate's buffer slot in electro-hydraulic servo plate-inclined plunger hydraulic transformer

LIU Chengqiang, JIANG Jihai, GAO Lixin, YANG Guanzhong

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: To reduce the pressure shock of the electro-hydraulic-servo piston hydraulic transformer with swash plate, to lower the noise and to improve the operational stability, this paper develops buffer slot in the valve plate of the hydraulic transformer based on the fluid-structure coupling function of the software ADINA. In software Pro/E, fluid model and solid model of the flow assignment structure of valve plate are built and imported to the software ADINA for building of finite element model. The flow field of the flow assignment structure that was checked with finite element method was analyzed. A valve plate with buffer slot with triangle shape was manufactured and tested on hydraulic transformer test-bed. The results revealed that the valve plate enabled hydraulic transformer steady in operation and the minimum speed of hydraulic transformer reached 35 r/min. The noise was lower and the reliability was improved. The correctness of theoretical analysis was testified.

Key words: hydraulic transformer; ADINA; fluid-solid interaction; valve plate; Research on buffer slot

液压变压器是在液压系统中用来实现压力调节的一种液压元件, 是随着恒压网络二次调节静液传动技术的发展而产生的^[1-2]。电液伺服斜盘柱塞式液压变压器是一种集成式液压变压器, 该液压变压器将液压泵和液压马达功能集成于一体, 具有结构简单、体积小、效率高、惯性小, 动态响应快的优点, 在液压系统中可以无节流损失地控制液压执行元件运动, 还可回收负载的能量, 应

用前景十分广阔^[3-5]。

电液伺服斜盘柱塞式液压变压器的配流盘与液压泵/马达的配流盘不同之处是液压变压器的配流盘上加工了 3 个配流口^[6-7], 而且配流盘是可以转动的, 因此决定了配流过渡过程不一定发生在配流盘的上下死点处, 使液压变压器的压力脉动大, 噪声高, 运行不平稳。文献 [8] 中采用了梭结构来实现压力缓冲, 但结构复杂, 加工困难。本文采用三角槽结构来实现配流过程的压力缓冲。

1 液压变压器工作原理阐述

液压变压器在液压系统中用来实现压力调节,

收稿日期: 2012-06-11.

基金项目: 2011 年国家重大科技成果转化项目.

作者简介: 刘成强(1982—), 男, 博士研究生;

姜继海(1957—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 刘成强, lcq08@163.com.

它可以将恒压网络的压力无节流损失的调节为负载需要的压力,从而控制负载的运动. 由于没有节流损失,如果不考虑系统转换效率的因素,液压变压器符合能量守恒定律,其调压原理曲线如图1所示.

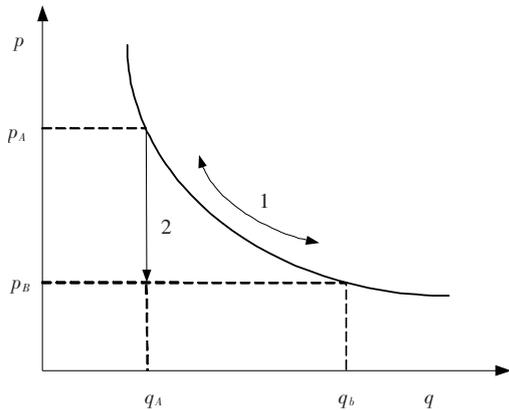


图1 液压变压器调压原理曲线

从图1可以看出,当采用液压变压器来实现压力调节时,如果将系统的压力从 P_A 调节到 P_B ,其压力流量变化轨迹线为1所示,即压力降低了,流量变大了,没有功率损失,即

$$P_A q_A = P_B q_B \quad (1)$$

当压力升高时,流量会减小,为满足流量守恒,所以液压变压器的配流盘加工了3个配流口,多余的流量流回油箱,配流盘的端面图如图2所示.

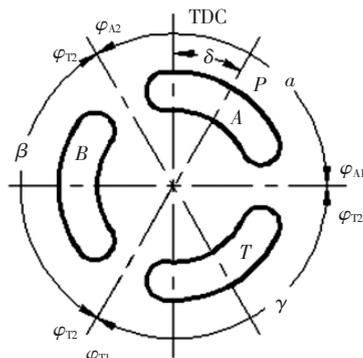


图2 液压变压器配流盘端面图

2 基于 ADINA 流固耦合的配流盘有限元分析

流固耦合是指流体的作用力施加到固体上,结构产生变形,结构的变形反过来影响流体区域. ADINA 软件将流固耦合分析集成到了一个软件中,在流固耦合方面,ADINA 可以作到实时双向流固耦合 (Real-Time Two-Way Fluid-Structure Interaction (FSI)) 功能,可以分别建立流体域和固体域,它们由各自的材料模型、边界条件等分别定义,然后利用 ADINA 的结构分析能力和流体分析能力,建立同样的数据代码格式,为进行流固耦合分析提供基础^[9].

在流固耦合模型中,流体模型和固体模型可以使用完全不同的单元和网格. 通常在流固耦合界面上,两个模型的节点并不相同. 流固耦合网格的划分如图3所示.

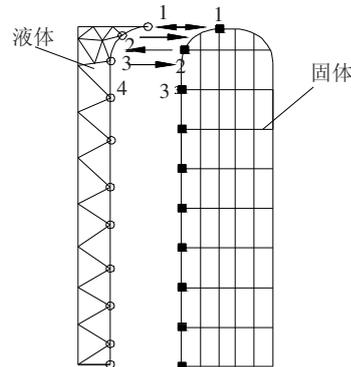


图3 流体和固体节点的耦合

文献[10]中运用 ADINA 软件对连续回转电液伺服马达进行了缓冲结构的有限元分析,并提高了马达的低速性能. 本文参考其分析过程,对电液伺服斜盘柱塞式液压变压器配流盘的缓冲结构进行了有限元分析.

2.1 配流盘流固耦合模型建立

三角锥形缓冲槽的加工简单,对不同工况的自适应性较好,三角槽的结构示意图如图4所示. 设计变量为两个,即三角槽深度倾角和长度包角.

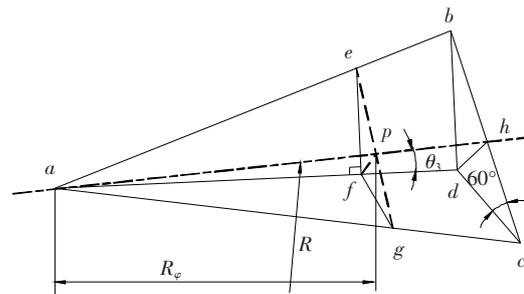
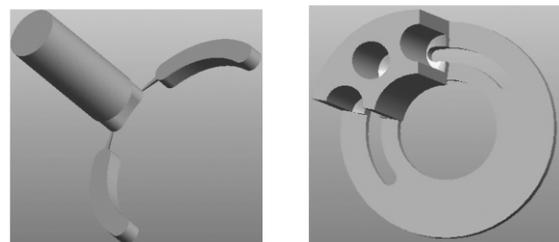


图4 三角槽的结构示意图

在进行流固耦合分析时,首先需要建立几何模型. 本文在 Pro/E 里建立几何模型,然后导入到 ADINA 软件中. 三角槽的结构参数为深度角 5° 、长度包角 11° 时建立的配流盘流固模型和固体模型如图5所示.



(a) 流体模型 (b) 固体模型

图5 液压变压器配流结构的几何模型

导入 ADINA 软件后,需对材料、初始条件、边

界及载荷条件、网格划分、时间函数等进行设定,对流体模型采用 ADINA - F 中的 4 节点四面体单元;在固体计算模型中,采用 ADINA 中网格划分效果最好的四边形网格单元.流体介质为 32 号液压油,微可压缩流体,为恒定的牛顿流体(即速度梯度变化时,动力黏度不变),粘度为 $0.0013 \text{ m}^2/\text{s}$,密度为 $870 \text{ kg}/\text{m}^3$;设置固体的材料属性密度为 $7800 \text{ kg}/\text{m}^3$,弹性模量 $2 \times 10^{11} \text{ Pa}$,泊松比 0.3,建立的有限元模型如图 6 所示.

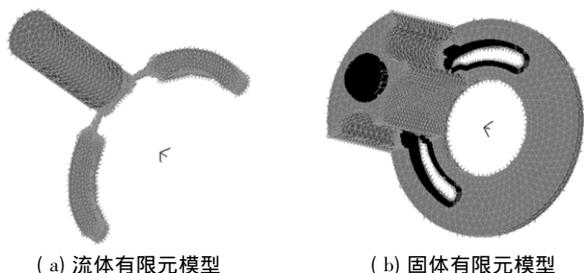


图 6 液压变压器配流结构的有限元模型

2.2 配流盘流固耦合结果分析

电液伺服斜盘柱塞式液压变压器是轴向柱塞元件,柱塞的速度公式为

$$v = \omega R t \tan \alpha \sin \phi \quad (1)$$

式中: ω 为液压变压器转速 (r/min), t 为液压变压器斜盘倾角 ($^\circ$), R 为柱塞分布圆半径 (mm), ϕ 为柱塞相对上死点转过的角度 ($^\circ$).

液压变压器的额定转速为 1500 r/min,柱塞的分布圆半径为 34 mm,斜盘倾角 17° .将参数代入式 1 可以得到柱塞的运动速度.对流固耦合有限元模型的流体模型施加速度载荷和压力载荷,即得到流体模型的压力场和速度场分别如图 7 和图 8 所示.

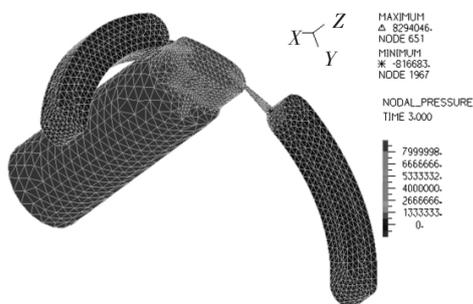


图 7 流体模型的压力场分析

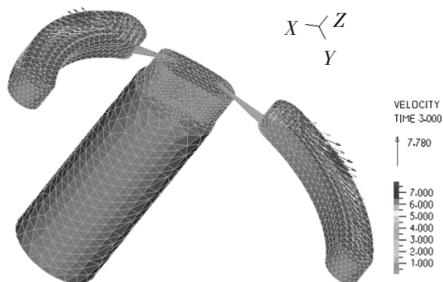


图 8 流体模型的速度场分析

从压力场分布图 7 可以看出,压力的最大值在柱塞的入口处,最大压力为 $8.29 \times 10^4 \text{ Pa}$,符合实际工况,最小压力在三角槽的根部,这是由于局部真空产生了负压,其压力为 $-8.16 \times 10^3 \text{ Pa}$.由速度场的结果(图 8)可以看出,流场的速度分布情况,可以看出流场的最大速度发生在配流槽中间位置,速度矢量和配流盘平面的夹角为 40° ,夹角越大说明流线越垂直于过流截面,能量损失越小.

固体模型的分析结果如图 9 和图 10 所示,由图 9 可以看出最大的应力为 9.7 MPa,发生在三角槽处,由图 10 看出最大的变形量为 $7.8 \times 10^{-7} \text{ mm}$,结构满足强度和刚度要求.

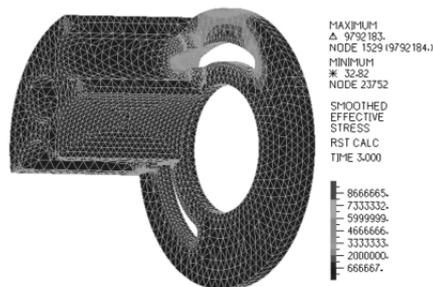


图 9 配流结构的应力分析

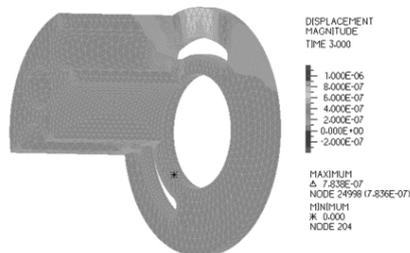


图 10 配流结构的变形量分析

如果柱塞腔入口处的压力较大,说明三角槽的节流面积过小,会造成排油时压力阻尼过大,功率损耗高,吸油时真空度大,会形成气穴和噪声,因此过流面积不应太小.对几组不同结构的三角槽进行了分析,得到三角槽深度角为 6° ,三角槽长度包络角为 14° 时较好,不至于产生气穴.为便于比较,设计加工了带优化三角槽的配流盘和不带三角槽的配流盘,如图 11 所示.



图 11 配流盘的实物图

3 液压变压器转速特性的实验测试

通过调节液压变压器的入口压力,使液压变

压器在不同的转速下运行,得到的最低稳定转速,分别如图 12 和图 13 所示.图 12 为没有三角槽时的最低转速,可以看出最低连续转速为 80 r/min,当低于该转速时,液压变压器不能持续运转.此时液压变压器的转速脉动率为 19%.图 13 为带优化三角槽的最低稳定转速,液压变压器的最低连续转速为 35 r/min,可见三角槽缓冲结构极大的提高了液压变压器运行的低速稳定性,扩大了液

压变压器的工作范围.

在液压变压器转速为 180 r/min 时有三角缓冲槽和无三角缓冲槽的转速特性分别如图 14 和图 15 所示.很显然没有三角槽时转速脉动很大,从图中可以计算出脉动率约为 10%;有三角槽时转速脉动较小,从图中可以计算出脉动率约为 1.3%.可见,所设计的三角缓冲槽极大的降低了液压变压器的转动脉动率.

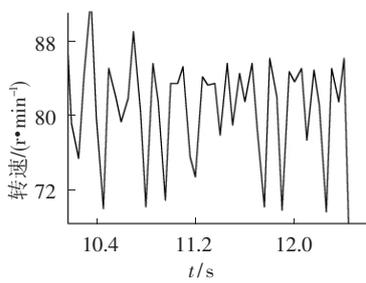


图 12 无三角槽时 HT 最低连续转速

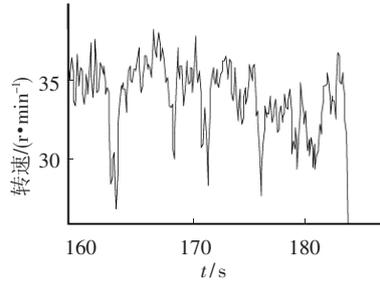


图 13 有三角槽时 HT 最低连续转速

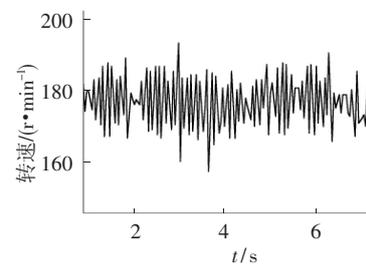


图 14 无三角槽时转速曲线(180 r/min)

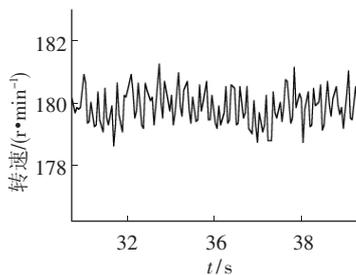


图 15 有三角槽时转速曲线(180 r/min)

4 结 论

1) 三角型配流缓冲槽加工简单,缓冲效果较好,节流过程接近线性变换,能够适应电液伺服斜盘柱塞式液压变压器的配流压力缓冲要求;

2) 通过 ADINA 有限元分析软件的流固耦合功能,对配流盘的配流结构进行了流固耦合分析,设计了三角缓冲槽的结构形状并对配流盘结构进行了校核,结构满足强度和刚度要求;

3) 搭建实验台并进行了实验测试,实验测试结果表明所设计的配流盘缓冲槽能够提高液压变压器的运行平稳性,降低了脉动和噪声,所设计的配流盘结构具有较好的缓冲效果.

参考文献

[1] 姜继海,卢红影,周瑞艳,等. 液压恒压网络系统中液压变压器的发展历程[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2006, 36(5): 869-874.
 [2] JIANG Jihai, DONG Honglin, WU Shenglin. A new structure of energy recuperation in secondary controlled system [C]//Proceedings of the fourth International Symposium on Fluid Power Transmission and Control. Wuhan: China Fluid Power Transmission and Control

Society, 2003: 587-590.
 [3] 张树忠,邓斌,曹树森,等. 挖掘机 LUDV 液压系统的能力流研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(1): 94-99.
 [4] VAEL G E M, ACHTEN P A J. IHT controlled serial hydraulic hybrid passenger cars [C]//7th International Fluid Power Conference. Aachen: Apprimus Verlag, 2010(4): 393-405.
 [5] 姚永明. 基于液压变压器的转载机节能研究[D]. 吉林: 吉林大学机械科学与工程学院, 2011: 60-63.
 [6] OUYANG Xiaoping, YANG Huayong, XU Bing. Research on the hydraulic transformer with new distribution pairs [J]. Science in China, Series E: Technological Sciences, 2008, 51(4): 435-442.
 [7] JIANG Jihai, LIU Chengqiang, YU Bin. Modeling and simulation for pressure character of the plate-inclined axial piston type hydraulic transformer [C]//International Conference on Information and Automation. Harbin: IEEE Robotics and Automation Society, 2010: 245-249.
 [8] ACHTEN P A J, VAEL G E M, JOHAN V D O, et al. 'Shuttle' Technology for noise reduction and efficiency improvement of hydrostatic machines [C]//The Seventh Scandinavian International Conference on Fluid Power. Linköping: Linköping University, 2001(2): 133-141.
 [9] ADINA R&D, Inc. ADINA theory and modeling guide volume I: ADINA Solids & Structures [S]. USA: ADINA R&D, Inc, 2005: 606-615.
 [10] 王晓晶,姜继海,赵克定,等. 基于 ADINA 分析的连续回转电液伺服马达结构优化及性能研究[J]. 宇航学报, 2008, 29(4): 1398-1401.

(编辑 苗秀芝)