

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.11.009

液电电机叶片泵样机的性能试验*

冀宏 李志峰 王峥嵘 王建森 兰博杰

(兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050)

【摘要】 针对研制出的液电电机叶片泵样机,建立了电机泵性能试验系统,获得了样机的输入电量参数、输出液压能参数及内部转子转速和壳体内部压力等参数,得到了液电电机叶片泵样机的转子转速、噪声、功率和效率等随输出压力变化的特性,并与同等功率液电电机油泵组的试验结果进行了对比。与电机油泵组相比,电机叶片泵样机的体积减小50%、轴向尺寸减小61%,噪声降低约7 dB,液电电机叶片泵内部转子转速随输出压力升高而明显下降;同时,试验也发现样机存在内部流道狭窄引起的气泡析出和内部密封不良引起额外泄漏的问题,提出了相应的解决方法,为电机泵的后续优化及工业化提供了参考依据。

关键词: 液电电机叶片泵 电机油泵组 性能试验 噪声 泄漏

中图分类号: TH137 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)11-0048-04

Performance Test of the Prototype of Electric Motor Pump

Ji Hong Li Zhifeng Wang Zhengrong Wang Jiansen Lan Bojie

(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract

An experimental system was established for the performance test of the developed prototype of electric motor pump. The parameters consisting of the electric power input, hydraulic power output, rotor speed and internal pressure in the electric motor pump were measured. The characteristic of the rotor speed, noise, power and efficiency changing with the outlet pressure of the prototype was obtained. Compared with the traditional hydraulic power unit which has the same power as the prototype, the volume of the prototype was reduced by 50%, the dimension in axial direction shortened 61% and the noise level lowered 7 dB, and the speed of rotor in the prototype decreased apparently with the increased of the output pressure. Furthermore, the bubble separation as a result of the narrow channels and the extra leakage due to the ineffectual seal in the prototype were discussed, and the corresponding solutions were proposed.

Key words Electric motor pump, Hydraulic power unit, Performance test, Noise, Leakage

引言

液电电机泵是将电动机与液压泵一体化的新一代液压动力单元,将电能直接转化为液压能输出。近年来,美国、德国、日本和台湾等发达国家和地区对电动机与液压泵融合化(hybrid/integrated)都高度重视,液电电机泵已成为液压技术创新发展的主要方向^[1~4],由于电机泵工业化价值突出,在国内

外,有关电机泵的研究论文和相关试验数据公开发表的还很少,有关资料文献大多以专利形式出现。相对于传统的“三段式”液压动力单元—电机油泵组(即由独立电动机、联轴器和液压泵组成),液电电机泵具有结构紧凑、噪声低、无外泄漏和效率较高等优点。液电电机泵的独特优点,使其具有重要研究价值和广阔的应用前景。

本文针对研制出的首台液电电机叶片泵样机,

收稿日期: 2010-04-04 修回日期: 2010-05-18

* 国家自然科学基金资助项目(50605030)和甘肃省教育厅研究生导师基金资助项目(0906ZTB006)

作者简介: 冀宏,教授,博士,主要从事现代流体器件与行走机械液压技术研究, E-mail: jihong@lut.cn

建立电机泵性能试验系统, 获得样机的输入电量参数、输出液压能参数及内部转子转速和壳体内部压力等参数, 得到液压电机叶片泵样机的转子转速、噪声和效率等随输出压力变化的特性, 并与同等功率液压电机油泵组的测试结果进行对比。本研究为液压电机泵优化及创新发展提供有益的参考。

1 试验系统及方法

液压电机叶片泵样机内部结构^[5-7]如图 1 所示。

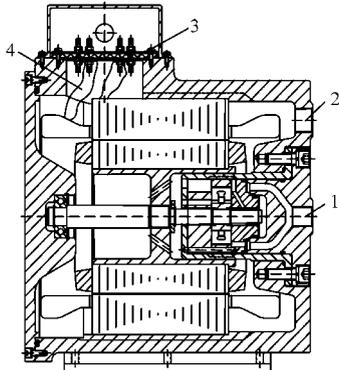


图 1 液压电机叶片泵内部结构

Fig. 1 Internal structure of the electric motor pump

1. 出口口 2. 进油口 3. 接线板 4. 腔体

1.1 液压电机叶片泵的性能试验系统

电机泵作为一种新一代液压动力单元, 目前还没有相关的测试标准, 试验中参照电动机和叶片泵的测试标准^[8-9], 设计确定了电机叶片泵样机的性能试验系统。

图 2 为电机叶片泵样机的试验系统图, 手动换向阀 3 置于左位时, 电机叶片泵样机 1 输出油液直接回油箱, 处于空载运行状态; 手动换向阀 3 置于右位, 且两个节流阀 5、6 处于关闭状态时, 通过调节溢流阀 2, 改变输出压力, 实现对电机叶片泵样机 1 进行加载。

1.2 电机泵与电机油泵组性能对比试验

电机叶片泵样机进行空载和负载性能试验时, 油箱内油液温度保持在 $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。空载试验测量参数包括空载输入功率、空载转速和空载电流, 其中空载电流为电机叶片泵样机空载运行时定子三相绕组中通过的电流, 绝大部分的空载电流产生旋转磁场, 称为空载励磁电流, 是空载电流的无功分量; 小部分用于克服电机叶片泵样机空载运行时的各种功率损耗 (如机械摩擦、铁芯损耗和粘性负载损耗等), 这一部分是空载电流的有功分量, 因所占比例很小, 可忽略不计。负载试验时, 在外加电压及频率保持不变条件下, 对电机叶片泵样机进行测试, 研究转子转速 n 、输出流量 q 、定子绕组电流 I 、功率因数

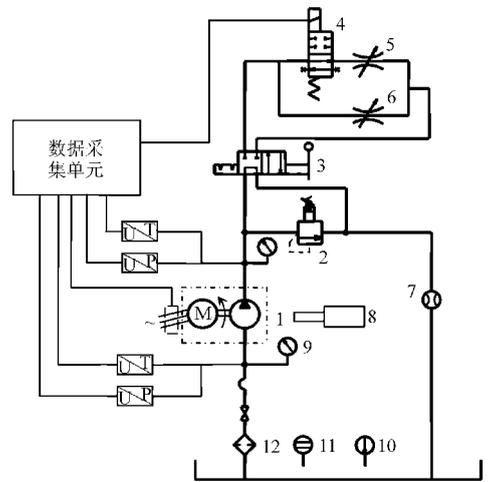


图 2 电机叶片泵样机的试验系统图

Fig. 2 Test system for electric motor pump

1. 电机泵 2. 溢流阀 3. 手动换向阀 4. 电磁换向阀 5、6. 节流阀 7. 流量计 8. 噪声频谱分析仪 9. 压力表 10. 温度计 11. 液位器 12. 过滤器

$\cos\varphi$ 、功率 P 、效率 η 等与输出压力 p_o 之间的关系, 通过试验曲线直接反映电机叶片泵样机运行过程中主要性能指标与运行参数的变化规律。

将电机叶片泵更换为电机油泵组 (图 2), 选用 11 kW 标准 Y2 系列电动机和 PC20V-5 型子母叶片泵, 在相同试验条件下, 对电机油泵组进行性能测试, 测量出电机油泵组转速 n_z 、流量 q_z 、定子电流 I_z 、功率因数 $\cos\varphi_z$ 、功率 P_z 、效率 η_z 、噪声等参数, 并确定与输出压力 p_o 之间的关系。

2 试验结果及分析

2.1 外形尺寸及体积

电机叶片泵样机与同等功率电机油泵组实物比较如图 3 所示。由图可见, 电机叶片泵样机 (图 3 左侧) 在轴向尺寸上比同等功率电机油泵组 (图 3 右侧) 缩短 61%, 体积减小约 50%。

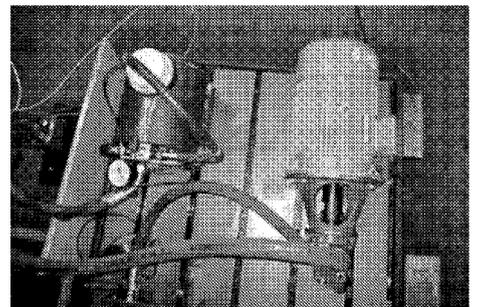


图 3 液压电机叶片泵与电机油泵组的外形对比

Fig. 3 Comparison of sizes between the electric motor pump and the traditional hydraulic power unit

2.2 转子转速与输出流量特性

转速和流量随着输出压力的变化规律如图 4 所

示。图4a为转子转速随输出压力的变化曲线,其中 n 为电机叶片泵样机的转子转速变化曲线, n_z 为电机油泵组的转子转速变化曲线;图4b为输出流量随输出压力的变化曲线,其中 q 为电机叶片泵样机的输出流量曲线, q_t 为电机叶片泵的理论流量(即无泄漏的输出流量)曲线, q_z 为电机油泵组输出流量曲线。

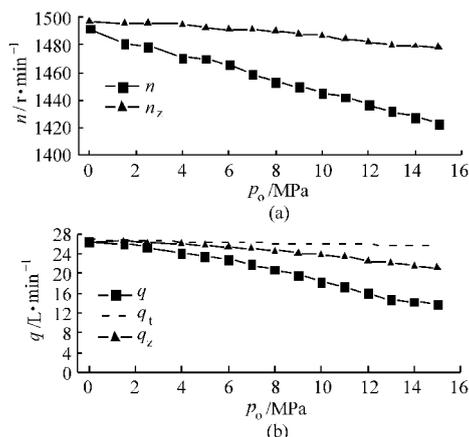


图4 转速与输出流量随输出压力的变化曲线

Fig. 4 Rotary speed and flow rate changing with the output pressure
(a) 转速 (b) 流量

输出流量为

$$q = nD - \Delta q \quad (1)$$

式中 D ——泵的几何排量 Δq ——泄漏量

由图可见,空载时,电机叶片泵的转子转速与电机油泵组接近,随着输出压力的升高,电机叶片泵样机的转子转速明显下降,而电机油泵组的转子转速稍有下降,表明与标准电动机相比,电机叶片泵样机内的电机负载刚性较低。空载时,二者转速和输出流量基本相同,随着负载压力的增加,电机叶片泵样机的输出流量 q 与其理论流量 q_t 的差值偏大,对照电机油泵组的输出流量 q_z ,可知电机叶片泵样机的输出流量降低的主要因素是其内部存在着额外的泄漏量,且此泄漏量与输出压力近似成线性关系,表明泄漏属于层流流态;与额外的泄漏量相比,电机叶片泵样机的转子转速随输出压力增大而下降只是其输出流量减小的一个次要因素。

2.3 噪声

分别在距电机叶片泵样机与电机油泵组轴线方向1 m处放置噪声频谱分析仪,进行A声级噪声测量,其噪声声级随输出压力的变化曲线如图5所示。电机叶片泵样机噪声明显低于电机油泵组的噪声。空载(即0 MPa)时,电机叶片泵样机的噪声声级比电机油泵组低3 dB,随着输出压力的升高二者声级逐渐升高、声级差进一步加大,当输出压力大于

12 MPa时,电机叶片泵样机的噪声声级趋于恒定,为72 dB;而电机油泵组的噪声声级为79.5 dB(对应输出压力 $p_0 = 14$ MPa),且随着压力的升高噪声声级有继续增大的趋势。

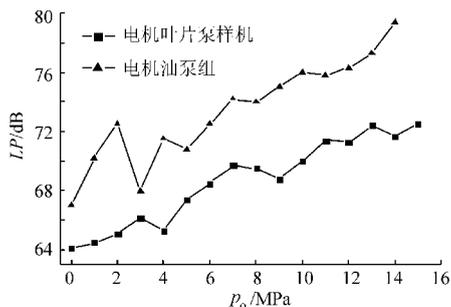


图5 噪声声级随输出压力的变化曲线

Fig. 5 Noise level changing with the output pressure

采用1/3倍频对电机叶片泵样机和电机油泵组的噪声频谱进行分析,图6给出了二者在输出压力为12 MPa时的噪声频谱图,横坐标为1/3倍频程中心频率,纵坐标为声压级。从图中可以看出电机叶片泵样机的噪声主频为4 000 Hz,它决定了声级大小;电机油泵组的噪声主频为300、3 150 Hz;二者比较发现,电机叶片泵样机属于高频噪声,其噪声源主要是气穴噪声,而电机油泵组的噪声主频相对较低,其主要噪声源还包含着机械噪声成分。

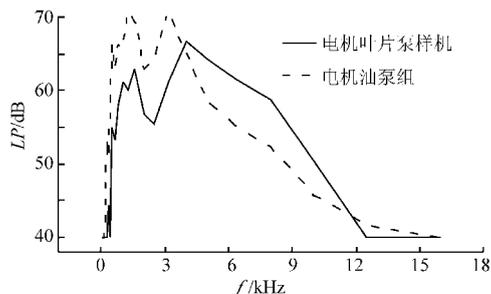


图6 噪声频谱图

Fig. 6 Noise spectrum

在试验过程中,采用透明有机玻璃制成的接线板对电机泵样机壳体内液流进行了观察,发现壳体内部的油流携带有许多细小气泡,这些气泡在高压区溃灭形成了高频气穴噪声。图7给出了样机壳体左侧腔体(图1)内的真空度(真空表由接线板接入,见图3)随进口油温的变化曲线。

在油温较低时真空度较大,随着油温升高、油液粘度减小,流动阻力减小,真空度逐渐减小,当油温大于 41°C 后,真空度迅速减小,图7清楚证明电机泵样机存在内部流道狭窄、吸油阻力大的问题。在样机制造过程中,壳体铸件的轴向尺寸偏小和内流道狭窄,使得定子线圈绕组距吸油口太近,造成电机叶片泵样机内部流道存在负压区和油液中的气泡析出。通过增大壳体铸件轴向尺寸、扩大内流道,避免

吸油过程中的气泡析出及其气穴噪声,可进一步大幅降低电机叶片泵样机的噪声。

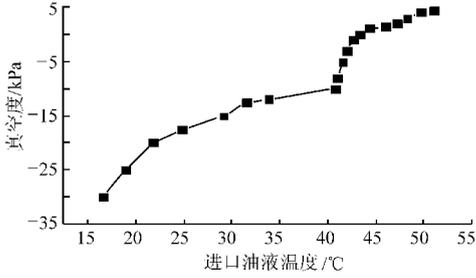


图 7 电机泵壳体内压力随进口油温变化曲线
Fig. 7 Pressure in the case changing with the oil temperature at inlet

2.4 效率

电机叶片泵样机的容积效率为

$$\eta_v = \frac{q}{q_i} = \frac{q}{nD} \quad (2)$$

总效率为

$$\eta = \frac{q(p_o - p_i)}{P_{em}} \quad (3)$$

式中 p_i ——进油口压力

P_{em} ——输入电功率

效率随输出压力的变化如图 8 所示,其中 η_{vi} 为电机叶片泵的理论容积效率, η_i 为理论总效率, η_v 为电机叶片泵样机的容积效率, η_{vz} 为电机油泵组的容积效率。当输出压力达到 14 MPa 时,电机叶片泵的理论总效率约为 0.56;当输出压力 p_o 大于 6 MPa 时,电机叶片泵样机的容积效率和总效率明显下降。电机油泵组中的叶片泵容积效率随着压力的升高逐渐降低、变化平缓。电机叶片泵的理论效率曲线与电机油泵组的总效率曲线基本重合。

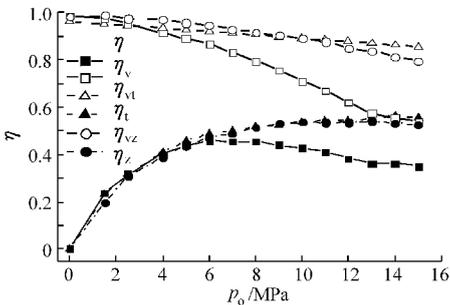


图 8 效率随压力变化曲线

Fig. 8 Efficiency changing with the output pressure

电机叶片泵样机存在额外的内泄漏,致使电机叶片泵样机的容积效率随其输出压力的升高而下降较快,其总效率也相应降低。

现对电机叶片泵样机出现的额外内泄漏进行分析。图 9 给出了电机叶片泵样机中泵芯的装配图,样机中采用了高压子母叶片泵的标准泵芯,其高压区由 O 形密封圈 1、聚四氟乙烯密封圈 3 和组合密

封 2 来保证与低压区隔离。首先,可以断定 O 形密封圈 1 处的密封是可靠的,否则会产生外泄漏,试验过程中样机未出现任何外泄漏;其次,组合密封圈 2 是 O 形密封圈与聚四氟乙烯挡圈的组合,其密封是依靠橡胶圈的压缩量来保证的,此处泄漏也可以排除;聚四氟乙烯密封圈 3 为硬质塑料,样机装配时此处基本无预压缩量,泵芯座 5 内孔与泵芯组件 4 外圆柱面之间为间隙配合,因此密封圈 3 位置处的泄漏很容易发生。当输出压力较高时 ($p_o > 6$ MPa 时),泵芯座在液压力作用下将产生较大的径向和轴向变形,径向变形使得泵芯座 5 的内径增大,泵芯组件与泵芯座之间的间隙随之增大,泄漏相应增加。图 9 中,用带箭头的虚线表示了电机泵样机内的额外泄漏的路径及其方向。

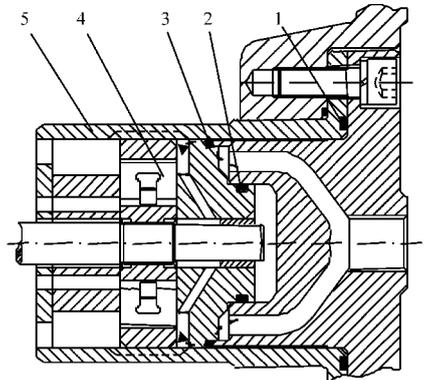


图 9 电机叶片泵样机中泵芯的装配关系

Fig. 9 Assembly of pump heart in the electric motor pump
1. O 形密封圈 2. 组合密封 3. 聚四氟乙烯密封圈 4. 泵芯组件 5. 泵芯座

改进泵芯座与泵芯组件之间的密封,优化泵芯座的结构,可以彻底避免电机叶片泵样机中出现的额外的内泄漏,保证电机叶片泵的容积效率和总效率均不低于传统的电机油泵组。

3 结束语

建立了液电电机泵性能试验系统,对研制出的液电电机叶片泵样机进行了试验研究,获得了样机的输入电量参数、输出液压能参数及电机叶片泵样机内转子转速和内部压力等特性,并与同等功率的电机油泵组的性能进行对比。相比于电机油泵组,电机叶片泵样机的体积减小 50%、轴向尺寸减小 61%,噪声降低 7 dB,液电电机叶片泵内部转子转速随输出压力升高而明显下降。同时,试验发现电机泵样机内部流道狭窄引起了吸油气穴和内部密封不良引入的额外的内泄漏问题,消除额外的内泄漏后,可保证电机叶片泵的总效率不低于电机油泵组,这为电机泵的后继优化及工业化提供了参考依据。

- neural network[J]. Pump Technology, 2002(5): 16~18. (in Chinese)
- 3 丛小青,袁寿其,袁丹青,等. 基于改进 BP 神经网络的离心泵性能预测[J]. 农业机械学报,2006,37(11):56~59.
Cong Xiaoqing, Yuan Shouqi, Yuan Danqing, et al. Performance forecast of centrifugal pump by BP neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(11): 56~59. (in Chinese)
 - 4 刘光临,蒋劲,符向前. BP 神经网络法预测水泵全性能曲线的研究[J]. 武汉水利电力大学学报,2000,33(2):37~39.
Liu Guanglin, Jiang Jing, Fu Xiangqian. Predicting complete characteristics of pumps by using BP neural network[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 2000, 33(2): 37~39. (in Chinese)
 - 5 Mustafa Gölcü. Neural network analysis of head-flow curves in deep well pumps[J]. Energy Conversion and Management, 2006,47(7~8):992~1003.
 - 6 Garg A,Sastry P S, Pandey M, et al. Numerical simulation and artificial neural network modeling of natural circulation boiling water reactor[J]. Nuclear Engineering and Design,2007,237(3):230~239.
 - 7 丛爽. 面向 MATLAB 工具箱的神经网络理论与应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2003.
 - 8 刘厚林,王勇,谈明高,等. 基于神经网络的离心泵汽蚀性能预测[J]. 排灌机械,2008,26(3):15~18.
Liu Houlin, Wang Yong, Tan Minggao, et al. Prediction on cavitation performance of centrifugal pumps based on artificial neural network[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2008, 26(3): 15~18. (in Chinese)
 - 9 Panda S S, Chakraborty D, Pal S K. Flank wear prediction in drilling using back propagation neural network and radial basis function network[J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(2): 858~871.
 - 10 袁寿其,沈艳宁,张金凤,等. 基于改进 BP 神经网络的复合叶轮离心泵性能预测[J]. 农业机械学报,2009,40(9):77~80,25.
Yuan Shouqi, Shen Yanning, Zhang Jinfeng, et al. Performance predicting of centrifugal pumps with compound impeller based on improved BP neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(9): 77~80,25. (in Chinese)

(上接第 51 页)

参 考 文 献

- 1 Bernd Schreiber. 齿轮泵嫁接电动机[J]. 现代制造,2005(2):36~37.
- 2 Wehner D, Helduser S. Integrated electric-hydraulic drives for power and motion control [C] // Proceedings of the 6th International Conference on Fluid Power Transmission and Control, Hangzhou, China, 2005: 81~84.
- 3 江木正夫,萧欣志. 日本液压技术动向[J]. 液压气动与密封,2004(1):11~14.
Masao Egi, Xiao Xinzh. The trend of Japan's hydraulic technology[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2004(1):11~14. (in Chinese)
- 4 黄閔宗,吴有章,謝聖平. 電液複合泵浦氣隙油膜效應模擬分析[J]. 機械月刊,2005,31(8):143~150.
- 5 冀宏,孙磊,王峥嵘,等. 一种电机内嵌叶片泵: 中国,101255868[P]. 2007-09-03.
Ji Hong, Sun Lei, Wang Zhengrong, et al. A vane pump built within electric motor: CN,101255868[P]. 2007-09-03. (in Chinese)
- 6 冀宏,丁大力,王峥嵘,等. 液压电机泵内置孔板离心泵的流场解析与优化[J]. 机械工程学报,2009,45(6):199~205.
Ji Hong, Ding Dali, Wang Zhengrong, et al. Flow analysis and optimization of port-plate centrifugal pump in electric motor pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6):199~205. (in Chinese)
- 7 冀宏,孙磊,王峥嵘,等. 液压电机泵中浸油电机的负载效应[J]. 兰州理工大学学报,2009,35(4):52~56.
Ji Hong,Sun Lei, Wang Zhengrong, et al. Load effect of electro-motor of hydraulic electro-motor pump[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2009, 35(4):52~56. (in Chinese)
- 8 王益全,张炳义. 电机测试技术[M]. 北京:科学出版社,2004.
- 9 全国液压气动标准化技术委员会. 中国机械工业标准汇编:液压与气动卷[M]. 北京:中国标准出版社,1999.