

文章编号: 1000-5013(2012)06-0613-04

液压综合试验平台误差分析和仿真实验

林少芬, 戎志祥

(集美大学 轮机工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 对液压综合试验平台系统进行随机误差、系统误差计算,并给出综合误差分析结果.通过对试验平台精度的研究,可知其精度符合设计要求,满足工程机械实验测试所需.在此基础上选取仿真模型的一种稳态情况,对其压力数据进行验证,可知仿真模型能模拟实际系统,仿真结果是可信的.

关键词: 液压系统; 试验平台系统; 测量精度; 验证分析

中图分类号: TG 8; TP 271.31 **文献标志码:** A

液压系统具有功率质量比高、速度刚度大等优点,广泛应用于工业生产各个领域,如 95% 的工程机械就采用了液压技术^[1].为提高产品竞争力,开发测量精度高的通用液压系统性能测试平台意义重大^[2].江小霞等^[3]根据实际生产需要,采用虚拟仪器的设计思想,通过软、硬件技术的组合,设计出满足工程机械测试所需的液压试验平台系统.测量精度是判断一个试验平台系统优劣的重要技术指标,一般通过对试验平台的系统误差、随机误差和综合误差的计算来反映^[4-5].对于误差总体,随机误差具有统计特性,系统误差主要取决于各测试仪器的精度等级^[6],而粗大误差会对测量结果产生扭曲,因此,在进行数据分析处理之前还要进行异常值判定并在需要时剔除异常值.仿真模型验证通常从系统的稳态和动态性能两个方面进行^[7-8].本文详细分析所设计的液压综合试验平台测量精度,并进行仿真验证.

1 试验平台系统的精度测量

图 1 为适用于各种工程机械的通用型液压系统试验平台,主要由油源系统、台架系统和计算机测控系统组成.油源系统由油箱装置、泵组及其调压阀组、加热/冷却/过滤装置组成;台架系统包括安装平台、工作机构、工作机构控制阀组、转向机构、转向机构控制阀组、比例加载/测量阀组;计算机测控系统包括工控机、PLC 控制模块组、采集板卡、各类传感器、变频电机及变频器等.

试验平台中各种仪器仪表的精度测量.1) 使用 JSC 型数字式转矩转速测量仪测量液压泵输入端的扭矩(M)和转速(n),其测量范围为 $100\sim1\,000\text{ N}\cdot\text{m}$,精度等级为 0.5 级.2) 采用 SKLW-GY-400 型涡轮流量传感器测量系统流量(Q),其测试范围为 $2\sim20\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,涡轮流量传感器串联在封闭循环系统中,其精度等级为 0.5 级.3) 采用 SCP-400-24-07 压力传感器测量系统的进、回油压力(p),其测试范围为 $0\sim40\text{ MPa}$,过载时为 80 MPa ,精度等级为 0.5 级.

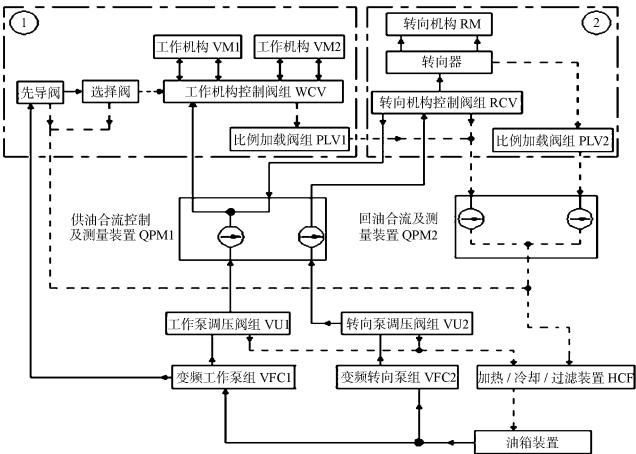


图 1 试验平台液压系统部分构成图

Fig. 1 Hydraulic system components of comprehensive test rig

2 随机误差分析

根据误差理论可知,试验平台系统的随机误差服从统计规律,误差的概率服从正态分布^[9].在试验平台上进行 10 次重复性试验,依据拉依达准则并结合相应的标准进行异常值剔除^[10-11],处理后的测试结果及随机误差计算结果,如表 1 所示.表 1 中: δ 为同一量 10 次重复测量的变化范围; S_s 为标准偏差; σ_R 为置信概率为 95%时的随机误差, $\sigma_R = x S_s / \sqrt{n}$; Q 为流量; n 为转速; M 为转矩; p 为进、回油压力.

表 1 随机误差统计表
Tab. 1 Statistical table of random error

编号	$Q/L \cdot \min^{-1}$	p/MPa	$n/r \cdot \min^{-1}$	$M/N \cdot m$
1	96.280 4	5.057 7	951.466 3	147.274 0
2	95.360 8	5.056 2	938.204 7	147.977 6
3	94.446 9	5.050 7	932.272 6	146.585 7
4	94.851 4	5.052 0	937.476 7	146.013 1
5	96.106 2	5.052 7	942.634 4	147.093 8
6	94.819 2	5.052 9	938.309 7	146.367 3
7	96.125 6	5.073 0	949.596 2	146.675 9
8	94.983 5	5.062 0	946.068 2	146.733 8
9	95.300 3	5.065 0	939.935 3	144.749 1
10	95.988 2	5.085 0	949.701 7	144.738 7
平均值	95.426 2	5.060 7	942.566 6	146.420 9
δ	0.90%	0.48%	0.94%	1.06%
S_s	0.655 8	0.011 0	6.392 2	1.032 1
σ_R	0.46%	0.23%	0.76%	0.52%

3 系统误差分析

系统误差主要是仪表误差,其次是附加误差.当仪表在其使用条件下时,附加误差可以忽略.安装误差和试验装置制造误差也会直接影响试验平台系统的精度,但对它们作定量分析比较困难.因此,将上述两种误差作为随机误差考虑.液压综合试验台系统误差包含各试验测量参数的系统误差.

- 1) 流量测量的系统误差(σ_Q)就是 SKLWGY-400 型涡轮流量传感器的测量误差,即 $\sigma_Q = \sqrt{\sigma_{LW}^2 + \sigma_{JP}^2}$.由涡轮流量计的误差 $\sigma_{LW} = \pm 0.5\%$,信号检测器的误差 $\sigma_{JP} = \pm 0.1\%$,可得 $\sigma_Q = \pm 0.51\%$.
- 2) 压力测量的系统误差就是压力传感器的测量误差,即 $\sigma_p = \pm 0.5\%$.
- 3) 转速测量的系统误差就是转矩转速测量仪的测量误差,即 $\sigma_n = \pm 0.5\%$.
- 4) 转矩测量的系统误差就是 JSC 型转矩传感器的测量误差,即 $\sigma_M = \pm 0.5\%$.
- 5) 轴功率测量的系统误差就是液压泵轴功率的测量误差,即 $\sigma_P = \sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_n^2}$,可得 $\sigma_P = \pm 0.502\%$.
- 6) 试验平台效率的系统误差(σ_η)即 $\sigma_\eta = \sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_n^2 + \sigma_P^2 + \sigma_Q^2}$.经计算可得 $\sigma_\eta = \pm 1.005\%$.

4 测量误差分析

在实验室使用条件下,电源稳定,环境温度保持在仪表规定的正常使用范围内,试验平台的各测量值的测量误差即其综合误差(σ)由对应系统误差 σ_s 和随机误差 σ_R 求得,即 $\sigma = \sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_R^2}$.

试验各测量参数的综合误差计算结果,如表 2 所示.从表 2 可知:试验平台精度满足设计要求,能达到工程机械测试需要.

表 2 液压综合试验平台综合误差表
Tab. 2 Composition error of the comprehensive test rig

测量参数	流量	压力	转速	转矩	轴功率	系统效率
$\sigma/\%$	± 0.69	± 0.55	± 0.91	± 0.72	± 1.06	± 1.52

5 仿真模型的稳态验证

实验时, 液压泵采用工作泵单独供油, 溢流阀溢流压力设定为 8 MPa, 背压加载的电磁阀给系统加载 5 MPa 的背压, 电机转速由 0 连续运转到 $1\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 测得工作回路的系统进口压力稳态时的数据; 给定相同的输入条件, 运行仿真模型, 得相应的压力数据量, 两个数据样本如表 3 所示.

采用秩和检验法对两样本进行一致性验证研究. 设有组子样数据 (x_1, x_2, \cdots, x_n) , 将此数据按由小到大的排序得到新的序列, 则原样本中的数据在新序列中的位置称为原样本中各数据的秩. 于是, 两组数据子样的秩和检验为, 将总体 X 的子样数据 (x_1, x_2, \cdots, x_n) 和总体 Y 的子样数据 (y_1, y_2, \cdots, y_m) 混合, 称为合样本. 对合样本由小到大排序, 得到次序统计样本 $z_{(1)} \leq z_{(2)} \leq \cdots \leq z_{(m+n)}$. 若 $k_k = z(j)$, 记 $R_k = j$, 称 j 为 x_k 在合样本中的秩, $k=1, 2, \cdots, n$; 若 $y_t = z(i)$, 记 $R_t(Y) = i$, 则称 i 为 y_t 在合样本的秩, $t=1, 2, \cdots, m$; 若 X 和 Y 相容(一致或服从统一分布), 则 $R_i(X)$ 和 $R_i(Y)$ ($k=1, 2, \cdots, n; t=1, 2, \cdots, m$) 应均匀地交错排列.

用其中容量较小的样本(假设 $m \leq n \leq 10$) 的秩和作为检验的统计量, 即

$$T = \sum_{k=1}^m R_i(Y).$$

对于给定的显著水平 α , 由秩检验分位表, 得临界值 T_1 和 T_2 , 使得

$$P(T \leq T_1) = P(T \geq T_2) = \alpha/2.$$

两样本相容的否定域为

$$G = \{ T : T \leq T_1 \text{ 或 } T \geq T_2 \}.$$

当样本容量都大于 10 时, 用正态分布近似统计量 T 可得精确的近似结果^[7]. 此时接受假设的条件为

$$P\{(T - E(T))/\sqrt{\text{var}(T)} \leq \mu_\alpha\} = 1 - \alpha/2,$$

而其否定域为

$$G = \{ T : \frac{T - E(T)}{\sqrt{\text{var}(T)}} > \mu_\alpha \} = (\mu_\alpha, +\infty).$$

于是, 得到秩和检验的思路:

- 1) 选定显著性水平 α , 查秩和临界值表得 T_1, T_2 的值或者分位数 μ_α ;
- 2) 将两组子样数据按由小到大顺序混合排列, 求较小子样的每个分量的秩, 然后计算秩和 T 的值;
- 3) 根据样本容量大小, 采用以上两种判断准则中的其中之一, 给出两子样是否相容的结论.

根据以上的思路, 对处理过的压力的稳态数据进行秩和检验.

设仿真实验的压力数据样本为 x_n , 实验测试的压力数据样本为 y_m , 两者的比较, 如表 3 所示.

表 3 稳态时的压力数据样本

Tab. 3 Pressure data sample steady-state

样本	1	2	3	4	5	6	7
x_k	5.007	5.028	5.043	5.048	5.039	5.062	5.066
y_t	5.052	5.037	5.026	5.031	5.036	5.034	5.061
样本	8	9	10	11	12	13	14
x_k	5.057	5.055	5.045	5.019	5.056	5.038	5.024
y_t	5.049	5.047	5.069	5.053	5.027	—	—

将以上两数据样本混合, 并按由小到大的顺序排列. 因实验测试的压力数据样本较小, 故计算其样本中每个分量在新的混合序列的秩, 如表 4 所示.

表 4 实验测试的压力数据的秩表

Tab. 4 Rank of test pressure data

样本	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
y_t	5.052	5.037	5.026	5.031	5.036	5.034	5.061	5.049	5.047	5.069	5.053	5.027
秩	18	11	4	7	9	8	23	17	15	26	19	5

由于两子样容量均大于 10, 用正态分布近似统计量 T , 取显著水平 $\alpha=0.05$, 查正态分布表的分位

数 $\mu_a=1.96, E(T)=13.583\ 3, \text{var}(T)=52.219\ 7$. 于是可知: $P\{\frac{T-E(T)}{\sqrt{\text{var}(T)}}\leqslant \mu_a, \text{样本}(x_1, x_2, \cdots, x_n) \text{和} \text{样本}(y_1, y_2, \cdots, y_n) \text{相容}\}=0.975=1-\alpha/2$. 所以, 压力稳态数据的两样本无显著差异, 可认为两者来自同一总体.

6 结 束 语

通过对试验平台各测量参数的误差计算分析可知, 试验平台精度达到试验平台设计要求, 能较好地应用于工程机械的实验测试. 进一步验证可以看出, 仿真模型在当前的给定条件下的输出和试验平台系统的测试数据具有给定显著水平下的一致性, 也说明仿真模型此时能替代实际系统, 模型是完全可信的. 按照仿真模型验证的要求, 还应进一步验证其他输入条件下系统稳态和动态性能的一致性, 才能更加全面地说明仿真模型的有效性, 增强仿真模型的可靠性及仿真结果的可信性.

参考文献:

[1] 易铭. 液压实验台 CAT 系统的设计与开发[D]. 广州: 广东工业大学, 2005.
[2] 陈跃波. 液压系统动态性能试验测试平台仿真研究[D]. 厦门: 集美大学, 2008.
[3] 江小霞, 林少芬, 陈仅星. 工程机械液压系统测控平台设计[J]. 上海海事大学学报, 2008, 29(3): 32-36.
[4] 张永杲, 陈正航, 王乐天. ISO 标准 B 级精度液压阀试验台精度分析[J]. 液压气动与密封, 1989(1): 37-41.
[5] 贾国方. 离心泵试验台精度分析和误差估算[J]. 排灌机械, 1989(2): 32-38.
[6] 施卫东, 关醒凡. 水泵模型泵段及模型装置试验台精度分析[J]. 水泵技术, 1995(6): 44-47.
[7] 廖瑛, 邓方林, 梁加红, 等. 系统建模与仿真的校核、验证与确认(VV&A)技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2006.
[8] 李姝. 导弹系统仿真模型验证方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.
[9] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 6.
[10] 钱政, 王中宇, 刘桂礼. 测试误差分析与数据处理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
[11] 全国统计方法应用标准化技术委员会. GB/T 4883-2008 数据的统计处理和解释 正态样本离群值的判断和处理[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

Errors Analysis and Simulation Verification of
the Comprehensive Hydraulic Test Platform

LIN Shao-fen, RONG Zhi-xiang

(College of Marine and Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: It is carried out calculations of random and systematic errors of the comprehensive hydraulic test platform system, and the analysis results of comprehensive errors is given. Based on the accuracy research of the test platform, it's known that its precision fits the design requirement, and also meets the engineering mechanical experiment required for testing. On that basis, a steady state of simulation model is selected, and its pressure data is verified. The results show that simulation model can imitate the real system, and the simulation results are reliable.

Keywords: hydraulic systems; test platform system; measuring accuracy; verification analysis

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)