

基于复杂性测度的变矩器流场仿真模型可信度分析*

刘树成¹ 魏巍¹ 闫清东¹ 赖宇阳²

(1. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 北京树优信息技术有限公司, 北京 100081)

【摘要】 为客观准确地评价液力变矩器流场仿真模型的可信度,对某型液力变矩器进行了300次性能试验,并按照与试验完全相同的输入量对流场仿真模型进行300次仿真计算,将仿真结果和试验结果进行了对比。基于复杂性测度理论,建立了仿真与试验两组数据系统单变量、两变量和多变量等3个层次的可信度评估体系,并提出复杂性、关联性和稳健性3种仿真模型可信度量化指标。结果显示,该流场仿真模型的整体可信度为72%。

关键词: 变矩器 流体力学 复杂性测度 模型可信度

中图分类号: TH137 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)10-0019-06

Credibility Analysis of Simulation Model for Torque Converters Based on Complexity Measurement

Liu Shucheng¹ Wei Wei¹ Yan Qingdong¹ Lai Yuyang²

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. Soyotec Technologies Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract

In order to objectively and accurately evaluate the credibility of hydrodynamic torque converter's flow field simulation model, 300 performance tests of one hydrodynamic torque converter were conducted, and a same number of simulation using the same input variables with the tests was also carried out. Results of both the tests and simulation were compared. Based on theory of complexity measurement, a credibility evaluation system covering three levels, including single-variable, dual-variables and multi-variables was set up, and corresponding quantitative credibility indexes based on complexity, relevance and robustness were put forward. The results showed that overall credibility of the simulation model was 72%.

Key words Torque converter, Fluid mechanics, Complexity measurement, Model credibility

引言

长期以来,研究人员对变矩器流场数值仿真模型的可信度评估仅局限于将仿真结果与试验数据进行对比的层面^[1~8],该方法的局限性在于:仅将一两次仿真结果与试验数据进行对比,数据吻合程度具有偶然性;仅能评价仿真与试验系统中同一变量的数值差异性,不能对两个系统中变量之间的关联程度的相似性进行对比;基于目测曲线差异或者云图

差异的评价具有一定的主观性,且不能提供相应仿真模型的可信度量化指标。

随着信息理论的发展,与复杂性有关的非线性、非平衡、动态思想和系统方法为仿真模型的可信度验证与评估提供了一种新思路。目前信息熵、复杂性测度等是描述非线性时间序列信息量的重要参数。信息熵来源于信息理论,复杂性测度最初于1965年由Kolmogorov提出,表征为能够产生某一(0,1)序列的最短程序的比特数,并经Lempel和Ziv

收稿日期: 2012-03-20 修回日期: 2012-04-26

* 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(50905016)和部级预研资助项目(40402050202)

作者简介: 刘树成,博士生,主要从事车辆传动系统理论与技术研究, E-mail: liushucheng@vip.126.com

发展成为具体的复杂度算法^[9],2006年 Marczyck 提出复杂性测度是系统结构化信息度量的定义,并通过与模型无关的计算方法进行复杂系统信息拓扑结构的抽取^[10]。目前,应用复杂性测度理论对变矩器流场仿真模型可信度进行验证的研究鲜见报道。本文基于 Marczyck 的复杂性测度理论对变矩器流场仿真模型的计算结果与试验数据进行整体复杂性分析和模型可信度分析,提出变矩器流场仿真模型可信度评估的量化指标。

1 复杂性测度理论

系统复杂性测度的计算,可通过以下步骤实现:

(1)相空间信息分析:首先构造系统的相空间,相空间所包含的信息通过信息熵或称香农熵(Shannon entropy)测度进行定量计算,相空间变量之间的非线性相关性通过基于互信息测度的广义相关系数(generalized correlation coefficient)进行定量计算。设离散随机变量 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为所给定的信源,其出现的概率 $p_k = P(x_k)$ ($k = 1, 2, \dots, n$),且 $\sum_{k=1}^n p_k = 1$,则信源 X 的信息熵表示为^[11]

$$H(X) = - \sum_{k=1}^n p_k \lg p_k \quad (1)$$

变量 X, Y 之间的联合熵定义为

$$H(X, Y) = - \sum_x \sum_y p(x, y) \lg p(x, y) \quad (2)$$

式中 x, y —— X 和 Y 的特定值

$p(x, y)$ —— x 和 y 联合概率分布

变量之间的互信息测度为

$$I(X, Y) = \sum_A \sum_B p(x, y) \lg \frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} \quad (3)$$

则广义相关系数定义为

$$c(X, Y) = \sqrt{1 - e^{-2I(X, Y)}} \quad (4)$$

c 取值为 $0 \sim 1$, $c = 1$ 表示强相关性, $c = 0$ 表示无相关性。

(2)整体信息结构认知:根据 Zadeh 不相容原理,可按照一定的模糊水平将相空间分割成模糊单元,并将样本点的精确数值转换为等价模糊向量,在此基础上,抽取系统中变量之间的模糊依赖规则,然后通过系统图^[12]对系统整体信息结构进行描述。系统图中的变量成为节点,节点之间的关联程度称为度,度值有两种定义方法,一种是相关性范数,用于量化节点的连接强度,另一种是连接度,表示与某节点相连的所有节点数目。系统图中第 i 个节点的相关性范数为

$$F_i = \sqrt{\sum_j c_{ji}^2} \quad (5)$$

式中 c_{ji} ——第 j 个节点与第 i 个节点广义相关性系数

系统图中第 i 个节点的连接度为

$$D_i = \sum_j L_{ji} \quad (6)$$

式中 L_{ji} ——第 i 个节点产生关联的连接数

(3)测量复杂性:由系统变量的信息熵、互信息、广义相关系数等给出系统的复杂度,并确定系统拓扑结构稳健性。

系统图将连接度为零的节点隐去,剩余节点称为活动节点, n 个活动节点最多可产生 $n(n-1)/2$ 组关联,系统图识别出的关联数与当前活动节点最多可能关联数的比值称为系统图连接密度 ρ_L , ρ_L 最大值为 1,表示系统图识别出了所有节点间的可能关联,则系统复杂性测度为

$$C = \frac{2T_E}{N\xi} \quad (7)$$

其中 $T_E = \sum_i H(X_i) - \sum_{i < j} [H(X_i, X_j)]$

$$\xi = \sqrt{\frac{\rho_L + 1}{2}} \quad (8)$$

式中 N ——活动节点数

T_E ——系统信息总熵,它等于所有变量信息熵之和除去任意两变量间的互信息熵

ξ ——考虑系统图连接密度的修正因子

系统图拓扑结构稳健性是系统图的一个重要属性,它是系统图当前复杂度、系统图所允许的临界复杂度和系统最低复杂度的函数,本文基于惩罚函数的思想,按复杂度进行圆形加权方法计算,如图 1 所示,记 C_r 为系统极限复杂度, C_u 为系统当前复杂度, C_m 为系统最低复杂度,以半径 $R = l_{OB} = C_r - C_m$ 作 $1/4$ 圆,圆心为 O 。作如图所示映射,将 C_u 映射到图中 A 点,则系统稳健性为

$$W = l_{OA} / l_{OB} \quad (9)$$

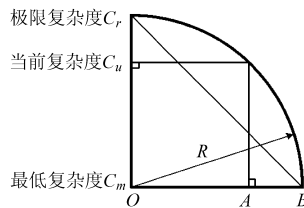


图 1 拓扑结构稳健性计算方法

Fig. 1 Calculation method of topological structure robustness

2 可信度指标

基于上述复杂性测度理论,可以通过 3 个层次考察变矩器流场仿真模型的整体可信度。

(1)单变量:统计信息(定量)。

(2)两变量:相空间形态(定性);广义相关性

(定量)。

(3)多变量:系统图形态(定性);系统整体复杂性测度(定量);模型关联性可信度指数(定量);系统稳健性对比(定量);变量误差贡献率(定量)。

通过仿真与试验两组原始数据包含的信息熵和变量间的信息结构的计算与识别,得到仿真数据和试验数据的复杂性、变量之间关联性和系统拓扑结构稳健性等信息。仿真模型的可信度可从复杂性、关联性和稳健性等分别量化。

仿真模型复杂性可信度指标为

$$M_{\text{com}} = \left| \frac{\min \{ C_{\text{simu}}, C_{\text{test}} \}}{\max \{ C_{\text{simu}}, C_{\text{test}} \}} \right| \times 100\% \quad (10)$$

式中 C_{simu} ——仿真数据的复杂性测度
 C_{test} ——试验数据的复杂性测度

仿真模型关联性可信度指标为

$$M_{\text{rel}} = \frac{m}{n} \quad (11)$$

式中 m ——两个系统中相同连接度的节点数
 n ——试验系统图中的所有活动节点数

仿真模型稳健性可信度指标为

$$M_{\text{rob}} = \left| \frac{\min \{ W_{\text{simu}}, W_{\text{test}} \}}{\max \{ W_{\text{simu}}, W_{\text{test}} \}} \right| \times 100\% \quad (12)$$

式中 W_{simu} ——仿真模型拓扑结构稳健性
 W_{test} ——试验系统仿真模型拓扑结构稳健性

3 实例分析

3.1 数据获取

针对 D400 型综合式液力变矩器,按照 GB/T 7680—2005,进行了 300 次性能试验,作为变矩器流场仿真模型的数据对比组。300 次性能试验中,泵轮转速服从均值为 2 000 r/min,标准差为 0.5 r/min 的正态分布,涡轮转速按照传动比分别为 0.10、0.20、…、0.60、0.65、0.70、0.75 和 0.80 取值,并进行标准差为 0.1 r/min 的微小扰动。随着输入转速的扰动,泵轮转矩差异在 10 N·m 以内,涡轮转矩差异在 15 N·m 以内,效率差异在 0.2 以内,变矩比差异在 0.05 以内。为获得较好的可信度对比效果,将试验组中的输入数据(泵轮转速 n_b 和涡轮转速 n_t)作为流场仿真模型的输入数据,进行相同次数的 CFD 计算,仿真模型基于 ANSYS/CFX 平台构建,采用了标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,变矩器流场流道模型为 A 型循环对称流道^[3],如图 2 所示。全部使用网格质量(以网格雅可比矩阵行列式的最小值与最大值之比来计算)大于 0.3 的六面体网格,以 Isight 软件构建循环计算流程,以期将计算出的泵轮转矩 T_B 、涡轮转矩 T_T 以及变矩比 K 、传动效率 η 等与相应的试

验数据进行对比。变矩器流场仿真计算流程如图 3 所示。

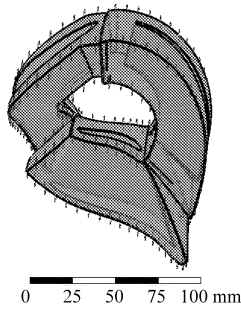


图 2 A 型轴对称流道模型

Fig. 2 A-type axisymmetric flow passage of simulation model

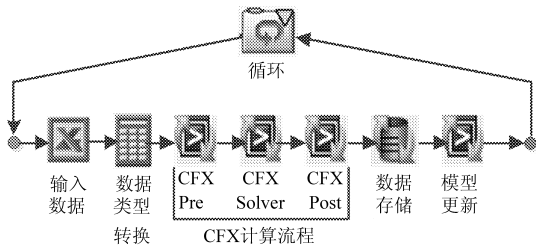


图 3 变矩器流场仿真模型循环计算流程
Fig. 3 Cycling calculation flow for torque converter flow field simulation

全部仿真计算耗时 50 h,得到与已有试验数据相同维数的仿真数据。将 2 组数据以 Excel 表格形式导入 OntoTest 软件进行复杂性分析。

3.2 模型可信度评估

采用传统方法,将某次 CFD 流场仿真的结果与一、两次试验数据进行对比,仿真模型的可信度的评估结果会存在较大的偶然性,图 4 所示的是本例中 1 次流场分析中变矩器效率(变矩工况)与 2 次试验数据的效率进行对比的情况,从图中可以看出试验 1 的结果与仿真值存在较大偏差,而试验 2 的结果则与仿真值几乎吻合。因此,对变矩器流场仿真模型的可信度评估需要采用复杂性测度的方法。

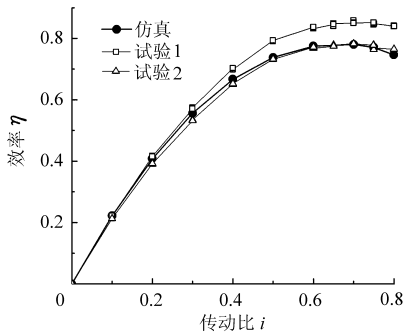


图 4 某次仿真结果与两次试验数据对比
Fig. 4 Comparison chart of one simulation and two test results

基于复杂性测度的模型可信度分析可从 3 个层次展开。

(1)单变量统计信息对比

首先可以计算仿真与试验的单个对应变量抽样获得的信息量,信息量以信息熵为测量指标,2组数据的信息量对比结果如图5所示。从图中可以看出,由于仿真模型的输入数据 n_B 、 n_T 完全相同,所以两者的信息熵值以及两者的比值 $i(i = n_T/n_B)$ 的信息熵值与试验值完全一样,而仿真模型的其他变量,如泵轮转矩 T_B 、涡轮转矩 T_T 、变矩比 K 和效率 η 等均小于相应的试验值,这说明仿真模型包含的信息量小于试验数据,即仿真模型存在信息的丢失,仿真数据信息量只有试验数据信息量的89.14%。

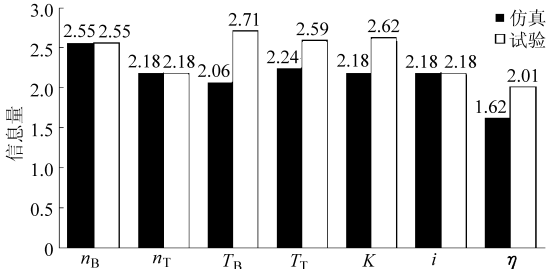


图5 仿真与试验数据对应变量的信息量对比

Fig. 5 Comparison of information content of simulation and test data

仿真与试验2个系统中4个输出变量随着抽样点变化的散点图如图6所示。可以看出,两组数据变化的模式基本相同,只是仿真数据信息熵较试验数据小,系统的不确定性被减弱,从图上来看就是仿真数据比试验数据取点更为集中。

(2)两变量信息对比

分别构造2组数据中任意2个变量的散点图(Anthill图),本例一共有7个变量,总共可以构造21个散点图,组成2组数据的相空间,如图7所示,图中用正交的直线相连的节点具有较高的广义相关性。从图中可以看出,仿真与试验节点连接的拓扑结构完全相同,即两系统中变量之间的关联性较为一致。两系统中泵轮转矩与其他变量之间的联系不明显,是因为在仿真与试验过程中,泵轮转速 n_B 近似恒定,仅有微小波动,系统的运行状态很大程度上取决于涡轮转速 n_T 。

仿真与试验的2个相空间中, T_B 与 T_T 、 η 与 i 、 η 与 T_T 以及 T_B 与 i 等4组典型变量之间的关联性对比结果如图8所示。从图中可以看出,上述4组变量之间的广义相关性系数中,除 η 与 T_T 的广义相关性系数2个系统仿真值与试验值相等外,其余均是仿真值大于试验值。这说明仿真模型对相应变量之间的关联性进行了一定的强化,这是因为仿真忽略了实际试验中噪声成分的影响,从图中可以看出仿真值较试验值取点更为集中。

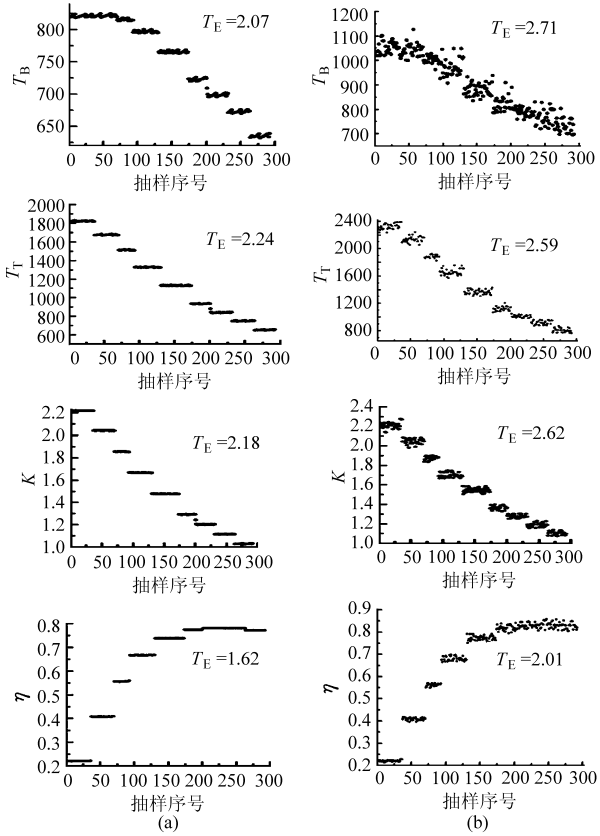


图6 输出变量随抽样点变化的散点图

Fig. 6 Anthill plots by sampling of output variables

(a) 仿真 (b) 试验

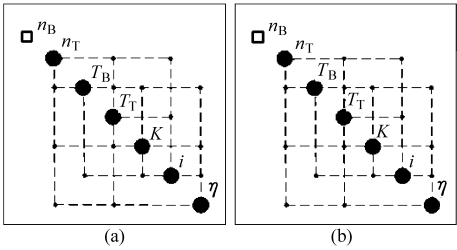


图7 仿真与试验数据的相空间图

Fig. 7 Phase space map of simulation and test

(a) 仿真 (b) 试验

仿真系统对两变量之间的连接强度的差异程度可以从仿真与试验2个系统中每个变量的相关性范数的对比得出,如图9所示。从图中可以看出,仿真值的相关性范数要比试验值大,两者的比值即是仿真值连接强度的放大倍数,仿真将连接强度平均放大1.02倍。

(3)多变量信息对比

按照7水平的模糊水平将仿真和试验的相空间分割成模糊单元,则相空间中的每个样本点都属于某一个模糊单元,即每个样本点的精确值转换为等价模糊向量,排除其中高信息熵和低相关性的相空间图后,便得到存在有效信息和结构的相空间图,并进行模糊规则抽取,建立仿真与试验系统图,如图10所示,图中去掉了低关联性的连接线,仅保留较强的

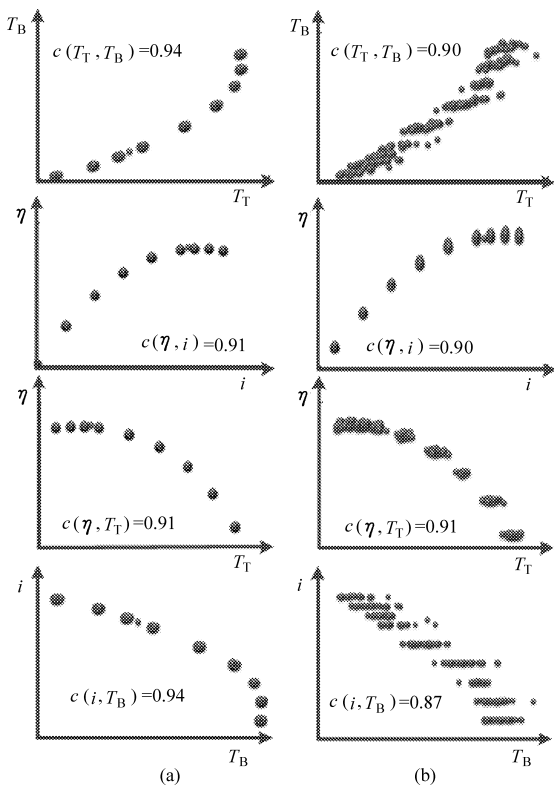


图 8 典型变量之间的关联性

Fig. 8 Correlation between typical variables

(a) 仿真 (b) 试验

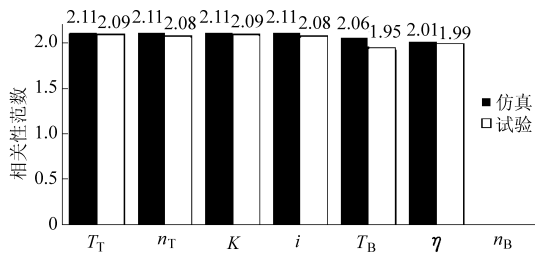


图 9 仿真与试验中变量的相关性范数

Fig. 9 Correlation norm of variables in simulation and test

关联节点的连接线。从图中可以看出,仿真系统图与试验系统图的连接线的拓扑结构并不一致。

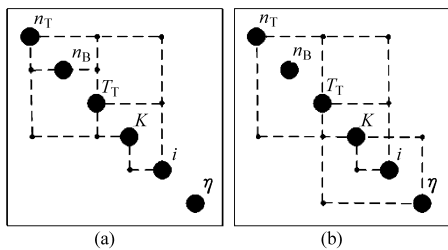


图 10 仿真与试验的系统图

Fig. 10 System map of both simulation and test systems

(a) 仿真 (b) 试验

从图 10 中可以看出,在去掉低相关性的关联后,两个系统所建立的关联数均是 8 组,其中与变量 T_B 和 η 的 4 组关联存在差异,关联性可信度指数按式(11)计算得 50%。

按照式(7)可计算出系统复杂性测度,仿真数

据的复杂性测度为 11.35,试验数据的复杂性测度为 15.16,则仿真模型复杂性可信度指数可按式(10)计算得 74.87%。

图 11 是 OntoTest 软件计算出的复杂性测度和系统稳健性。

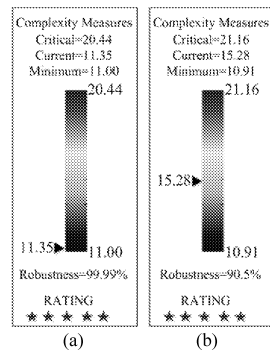


图 11 OntoTest 计算的仿真与试验系统复杂性测度与结构稳健性

Fig. 11 Complexity measurement and structure robustness of simulation and test systems calculated by OntoTest

(a) 仿真 (b) 试验

从图 11 中可见,其复杂性测度与本文计算结果差别很小(仅试验系统的复杂性与本文结果有微小差别),OntoTest 仿真模型的拓扑结构稳健性为 99.99%,试验数据的拓扑结构稳健性为 90.5%。本文采用式(7)和式(9)计算出的上述稳健性分别为:99.89%和 91.02%,与之非常接近。两种计算结果都表明,即试验存在较大的不确定性,而仿真将一些不确定性忽略了。取本文计算结果,按式(12)计算出仿真模型稳健性可信度指标为 91.12%。

由 3 个层次的可信度评估得到了仿真模型和试验对比的复杂性可信度指标、变量关联性可信度指标和拓扑结构稳健性可信度指标。定义 3 种可信度指标的均值为仿真系统整体可信度指标 M ,可以计算出 $M = 72\%$ 。该仿真模型属于中度可信的模型。

根据仿真和试验系统数据复杂性的差异可以得到各变量对仿真和试验差距的贡献量,如图 12 所示。从图中看出,效率 η 对仿真和试验差距的贡献最大,泵轮转矩 T_B 和涡轮转矩 T_T 的贡献量紧随其后。

虽然在实际经验中,变矩器原始性能仿真效率与试验的效率差距没有工作轮转矩的差距大,但是效率 η 的差异对 2 个数据系统的整体差异性贡献最大,因为效率 η 集中体现了泵轮与涡轮的转矩与转速的差异。在上述变量中,独立变量是 T_B 、 T_T 、 n_B 和 n_T ,其中 T_B 和 T_T 对仿真和试验结果的差距贡献是所有差异的根源。

取 300 次仿真的泵轮转矩与试验值之比和仿真

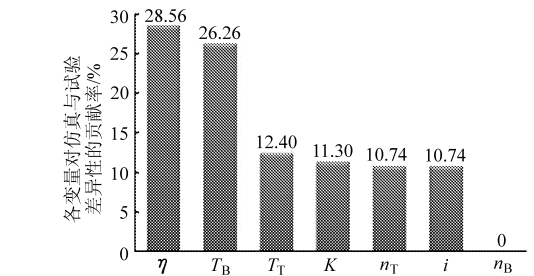


图 12 各变量对仿真和试验差距的贡献率
Fig. 12 Variables' contribution to total distance

的涡轮转矩与试验值之比,作概率分布图,如图 13 所示。从图中可以看出,仿真的泵轮转矩值与试验值之比介于 0.74~0.92 之间,仿真的涡轮转矩值与试验值之比介于 0.74~0.94 之间,其中上述比值分

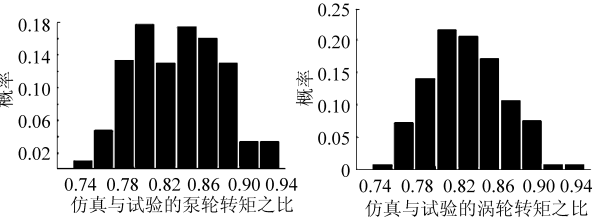


图 13 仿真与试验转矩比的概率分布
Fig. 13 Probability of torque ratio in simulation and test

别在 0.80~0.84、0.80~0.82 之间的点数最多。

4 结论

(1)变矩器流场仿真模型的可信度评估结果显示,仿真模型对实际变矩器试验系统进行了较多简化,减少了试验系统许多固有的不确定性,使系统复杂性明显降低。尽管仿真结果与某些试验数据较为吻合,但从模型复杂性可信度、关联性可信度和稳健性可信度 3 方面来看,仿真模型与试验系统的整体一致性仅处于中等水平。

(2)分析结果显示,仿真模型在泵轮转矩计算方面与试验存在较大差异,该差异是仿真模型与试验差异性的根源。统计数据显示绝大多数的泵轮转矩仿真值是其对应试验值的 80%~82%。

(3)基于复杂性测度的变矩器流场仿真模型的可信度分析方法是合理可行的,基于该方法建立的单变量、两变量和多变量 3 个层次的可信度评估体系,和相应的定量指标,有效地避免了人为主观判断因素,得到了仿真模型与试验系统的内在差异性,这对变矩器流场仿真模型的改进具有一定的指导意义。

参 考 文 献

1 才委,马文星,刘春宝,等. 基于三维流场计算的液力变矩器特性预测方法[J]. 哈尔滨工程大学学报,2007,28(3): 316~319,325.
Cai Wei, Ma Wenxing, Liu Chunbao, et al. Characteristics prediction of a torque converter based on three dimensional numerical calculation of flow field[J]. Journal of Harbin Engineering University,2007,28(3): 316~319,325. (in Chinese)

2 刘春宝,马文星,朱喜林. 液力变矩器三维瞬态流场计算[J]. 机械工程学报,2010,46(14): 161~166.
Liu Chunbao, Ma Wenxing, Zhu Xilin. 3D transient calculation of internal flow field for hydrodynamic torque converter[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2010,46(14): 161~166. (in Chinese)

3 张锡杰. 液力变矩器三维流场数值分析及性能预测研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.
Zhang Xijie. Research on 3-dimensional flow field numerical simulation and performance prediction of hydrodynamic torque converter[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2009. (in Chinese)

4 田华,葛安林,马文星,等. 液力变矩器泵轮内流场的数值分析[J]. 吉林大学学报:工学版,2004,34(3): 378~382.
Tian Hua, Ge Anlin, Ma Wenxing, et al. Numerical analysis on internal flow field in pump wheel of a torque converter[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition,2004,34(3): 378~382. (in Chinese)

5 Brun K. Analysis of the automotive torque converter internal flow field [D]. Charlottesville:University of Virginia, 1996.

6 Whitehead L D. A comparison of the internal flow fields of two automotive torque converters using laser velocimetry [D]. Charlottesville:University of Virginia,1995.

7 Dong Y. An experimental investigation on fluid dynamics of an automotive torque converter [D]. University Park: The Pennsylvania State University,1998.

8 Liu Y. An experimental investigation on fluid dynamics and performance of an automotive torque converter [D]. University Park: The Pennsylvania State University, 2001.

9 Lempel A, Ziv J. On the complexity of finite sequences[J]. IEEE Transactions on Information Theory,1976,22(1): 75~81.

10 Marczyc J. Measuring and tracking complexity [C] //Proceedings of the Sixth International Conference on Complex Systems, Boston, MA, USA; New England Complex Systems Institute, 2006.

11 Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. The Bell System Technical Journal,1948,27(3,4): 379~423, 623~656.

12 Stylios C D, Groumpos P P. Fuzzy cognitive map in modeling supervisory control systems [J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems,2000,18(2): 83~98.