

涡轮泵水力试验系统扭矩现场校准技术研究

李 彤, 刘站国, 窦 昱, 靳爱平
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 为有效解决液体火箭发动机涡轮泵水力试验系统扭矩现场校准的难题, 提出了一种基于力偶矩加载原理的扭矩现场校准技术。简要地介绍了该套装置的结构组成和技术难点, 并对不确定度进行了分析。

关键词: 涡轮泵; 扭矩校准; 力偶矩; 现场校准

中图分类号: V434.3-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 03-0073-07

Field calibration technology for torque of turbo pump hydraulic test system

LI Tong, LIU Zhan-guo, DOU Yu, JIN Ai-ping
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: A field torque calibration technology based on the principle of moment of couple loading is presented in this paper to effectively solve the problem of field torque calibration of the hydraulic experimental system for turbo pump designed for the liquid rocket engine. The configuration and technical challenges of the system are introduced briefly. The uncertainty is analyzed.

Keywords: turbo pump; torque calibration; moment of couple; field calibration

0 引言

液体火箭发动机涡轮泵水力试验的目的是为了准确获得涡轮泵在额定转速和流量下的扬程和效率参数, 以便为发动机系统调整计算提供依据。泵效率参数是影响发动机推力调整的重要参数之一, 无法从试验中直接测量, 而是从试验系统扭矩参数间接计算得到的。因此, 扭矩参数测量的准确与否直接影响发动机系统的工作可靠性。

扭矩传感器共轴安装在试验台拖动电机和被试产品泵之间。轴系间的同轴安装误差和涡轮泵运转等额外载荷直接影响扭矩传感器的测量准确度。为保证试验系统可靠运转和测量准确, 涡轮泵试验系统经过了精细的安装调试。因此, 安装在试验系统轴系中的扭矩传感器不能随意拆卸送实验室校准, 只能开展现场(原位)校准。

为满足型号研制的需要, 某研究所涡轮泵水力试验系统建有多个试验台位, 拥有不同规格的

收稿日期: 2015-03-02; 修回日期: 2015-04-29

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2011JY021)

作者简介: 李彤 (1968—), 女, 高级工程师, 研究领域为计量检测技术

扭矩传感器, 最大量程可达 $6000 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。由于泵水力试验系统现场工艺管路密布, 场地狭小, 采用传统静重式校准原理, 受杠杆力臂长度和砝码重量以及数量的限制, 人工加载砝码的扭矩校准方法无法实现扭矩传感器的满量程校准。同时泵水力试验系统传动轴系空间有限, 安装高精度标准扭矩传感器进行比对的方法也是不可行的。因此, 开展涡轮泵水力试验系统扭矩现场校准技术研究, 特别是大扭矩现场加载技术研究成为型号研制过程亟待解决的计量技术难题。

1 扭矩现场校准原理、方法与技术研究现状

1.1 扭矩现场校准原理

现场校准与实验室校准的区别在于, 既要求校准方法科学、准确、可靠, 又要求校准设备轻巧、便携, 适合现场校准操作。实验室扭矩传感器检定是对传感器进行分项检定合成误差处理, 而现场校准是整体校准, 相似于现场测量, 只不过测量对象是一个标准值而已。通常扭矩现场校准原理大致分为 3 大类, 即传递法、平衡力法及能量转换法。

传递法采用串接到设备的传动系统中去测量扭矩, 或附装到设备的传动轴上去测量扭矩, 测试时不需改变设备的结构, 也不需移动设备部件, 便于现场测试, 测量结果精确, 能真实反映机械的实际情况。按照扭矩测量传感器的不同安装方式, 还可分为介入式和非介入式。平衡力方法采用的是标准力臂砝码得到扭矩的测量方法。能量转换法就是根据能量守恒定律, 间接测量扭矩的方法。

1.2 扭矩现场校准的方法

扭矩现场校准通常采用将扭矩现场校准装置和被校扭矩传感器串接进行比对的方法, 具体为杠杆法、参考传感器串接法、非断轴法及贴片法等。作为扭矩现场校准装置要求尽量减少串接间距, 同时要求扭矩现场校准装置、现场被校扭矩传感器以及轴系的安装必须对中(即同轴), 可在量程范围内可分为 5~10 点内进行加载。扭矩现场校准装置的不确定度应低于被校扭矩传感器允

许误差的 $1/3$, 如大于 $1/3$ 则需增加校准次数。

1.3 国内外扭矩现场校准技术现状

国内外扭矩现场校准装置大都采用杠杆砝码式加载原理或同轴串接标准扭矩传感器的方式, 从而实现扭矩量值的传递、校准及检测。如美国 WDC-1609 系统就是到舰船现场去计量的校准设备, 德国 HBM 的 PB-1 标准扭矩传感器, 也可用于现场扭矩计量。

由于现场安装条件苛刻, 装拆空间狭小, 各种影响因素带来的不确定度多而且复杂。影响扭矩标准装置不确定度的因素主要由杠杆装置力臂长度、砝码加载力值、支撑点摩擦扭矩、同轴度变化、应力带来及力臂水平度等。如何保证扭矩标准装置工作符合扭矩力学模型, 减小各个不确定度分量, 确保整个装置的不确定度指标, 一直是国内外各研究机构探索和研究的方向。

2 涡轮泵水力试验系统扭矩现场校准技术研究

2.1 设计原理

按照涡轮泵水力试验系统特殊的环境特点和扭矩校准要求, 提出并研究采用力偶加载法施加扭矩, 这种纯扭矩施加形式, 能使物体完全不呈现任何平移运动, 只呈现纯旋转运动, 从而进一步减小扭矩装置的不确定度。

力偶矩加载法的设计原理如下:

使机械构件产生转动效应, 并伴随扭转变形的力偶或力矩(称为扭矩)。如图 1 所示。图 1(a)为力偶矩, 由作用在同一物体上的大小相等, 方向相反的 2 个平行的力形成力偶矩。力偶矩的大小按公式 (1) 计算:

$$M=F \times 2R \quad (1)$$

图 1(b)为力矩, 是偏离物体旋转中心的作用力 G 对物体形成的扭矩。扭矩的大小按公式 (2) 计算:

$$M=G \times L \quad (2)$$

可以看出, 当力(偶)臂相等($L=2R$)时, 力偶矩作用在物体上的力会减小一半, 而且力偶矩作用时, 按平面力系平衡原理, 作用在物体上的合力最小为 0。另一方面, 当力和力(偶)矩相等

时, 力偶臂所需的回转半径小一半, 因此利用力偶矩的这一特性实现力偶矩加载, 可以达到充分利用空间的目标。

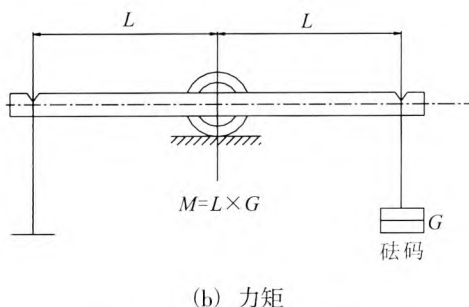
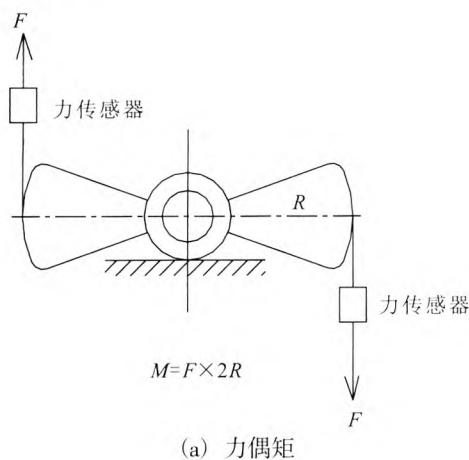


图 1 力偶矩加载设计原理图

Fig. 1 Design principle of moment of couple

运用这一原理进行扭矩校准, 只需要对 R 和 F 进行非常精确的测量即可。 R 是长度量, 可以精确测量到 $\pm 3 \mu\text{m}$, 机械加工就可以保证足够的精度; 采用高精度的测力传感器, F 可以精确测量到 0.03%, 因此可以获得一个施加在被校扭矩传感器上的标准 (参考) 扭矩, 实现扭矩校准。

实际中, 由于无法获得 2 个大小完全相等的力 F , 力臂的加工也不可能完全对称, 因此实际的力偶矩可以按公式 (3) 计算:

$$M = F_1 R_1 + F_2 R_2 \quad (3)$$

同时, 在给被校扭矩传感器施加标准 (参考) 扭矩时, 为确保扭矩传感器保持平衡 (静止) 状态, 需要一套反力矩平衡装置 (轴系抱死装置) 去平衡标准扭矩。

2.2 主要技术要求

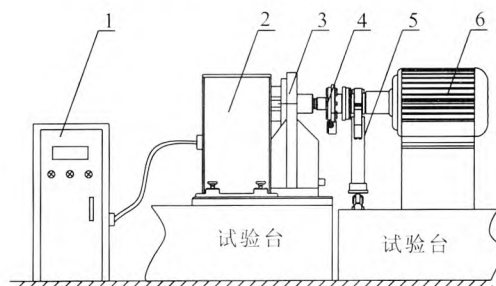
涡轮泵水力试验系统现场扭矩校准装置总体

技术指标及功能如下:

- 1) 最大量程范围: $6000 \text{ N} \cdot \text{m}$;
- 2) 校准装置不确定度: 0.2% ($k=2$);
- 3) 扭矩传感器现场校准装置采用力偶矩加载法, 通过标准力偶和力偶臂实现扭矩传递;
- 4) 力偶矩加载法应在有限空间条件下实现扭矩传感器全量程校准, 满足扭矩传感器校准要求, 并在结构设计上保证系统精度, 实现自动加/卸载;
- 5) 整套校准装置应易拆装和操作简单, 可移动, 并具有自身过载、过热等的保护和警示;
- 6) 扭矩传感器现场校准装置应实现被校扭矩传感器正反向加载。

2.3 涡轮泵水力试验系统校准装置组成

涡轮泵水力试验系统扭矩现场校准装置主要由标准力偶矩加载装置、试验泵架、抱死装置及液压自动加载系统等组成, 如图 2 所示。



1-液压自动加载系统; 2-标准力偶矩加载装置; 3-试验泵架; 4-被检扭矩传感; 5-抱死装置; 6-5 000 kW 电机

图 2 扭矩传感器现场校准装置组成示意图

Fig. 2 Diagram of field calibration system for torque sensor

标准力偶矩加载装置见图 3, 主要由框架、标准力偶臂、静压轴承、标准力传感器及伺服作动器 (油缸) 等组成。用于完成给被校扭矩传感器施加标准力矩, 通过试验系统泵架进行定位安装, 并在安装平台上设计辅助支撑。工作时, 通过液压加载系统对 2 个伺服作动器 (油缸) 施加作用, 由油缸产生一对拉动力偶臂的加载力, 采用标准力传感器作为标准力值的测量, 这样油缸和标准力传感器在同一液压条件下会产生一个标准的加载力偶矩。通过调节油缸的供油压力, 可

实现不同校准点扭矩传感器的校准。

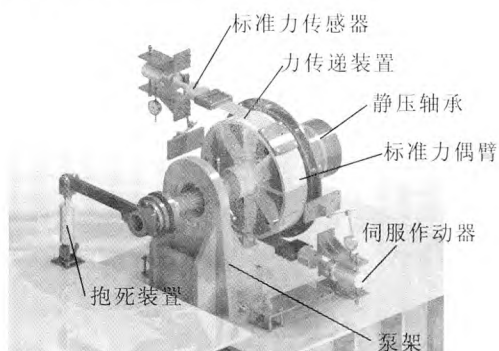


图3 标准力偶矩加载装置结构图

Fig. 3 Structure diagram of standard moment of torque loading system

轴系抱死装置为被校扭矩传感器提供平衡力矩，避免轴系旋转。液压自动加载系统主要包括伺服作动器（油缸）、泵站（供油系统）及控制系统等（系统原理图见图4），主要完成加载力的控制，实现力矩自动加/卸载。

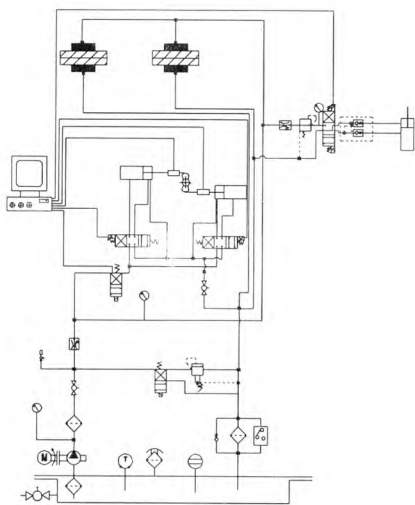


图4 液压自动加载系统原理图

Fig. 4 Principle of hydraulic auto loading system

2.4 主要技术难点

在涡轮泵水力试验系统扭矩现场校准装置的研制中存在以下技术难点。

2.4.1 标准力偶矩加载技术

涡轮泵试验系统主轴中心高度为 540 mm，扭矩传感器周围布满各类管路和连接支架，空间

狭小，在试验系统有限的空间内完成大扭矩现场加载，实现在有限的试验系统空间内完成扭矩传感器校准成为主要技术难点。

针对上述问题，提出一种标准力偶矩加载技术。这种将加矩装置和测矩装置合二为一的设计，有效地解决了空间狭小的问题。采用先进的液压加载技术，实现了现场大扭矩自动加载，解决了大扭矩现场校准问题。

2.4.2 旋转轴对中技术

在扭矩现场校准过程中，由于扭矩传感器与力臂杠杆旋转轴不能绝对同心，导致除扭矩之外的其他寄生分量如弯矩的产生。保证传感器中轴线与力矩加载装置的旋转轴线尽可能重合是本项目技术难点。

目前国外通常采用液压螺母抱紧等柔性连接或万向连接方式，可有效解决安装和测试过程中扭矩传感器和校准装置不同心而产生的寄生分量，但是涡轮泵试验系统中扭矩传感器与标准力矩加载装置之间采用的是花键联接，受加工、安装等工艺的限制，存在一定的对中误差。因此，通过在标准力矩加载装置上设计对中调整基准，对主动轴、扭矩传感器、被动轴以及支撑之间的轴心线同轴度进行控制，减小对中误差带来的影响。如在扭矩传递法兰与框架采用微小过盈配合设计，并在连接法兰上设计定位销，避免二次安装造成的对中误差。

2.4.3 摩擦力矩的影响

在扭矩标准装置研制中，摩擦力矩是一直以来制约扭矩校准装置准确度提高的主要原因。由于摩擦力矩始终是向着阻止运动的方向，产生的误差与扭矩传感器本身的滞后误差相同，影响对扭矩传感器迟滞误差的测量和分析。因此，如何减小摩擦力矩的影响是本项目的技术难点。

目前国外高标准扭矩标准装置采用空气轴承有效抑制了摩擦力矩的产生和影响。但是对于量程为 6 000 N·m 扭矩校准装置，若采用空气轴承作为支撑，受其结构限制，其体积非常庞大无法安装到涡轮泵水力试验现场。因此，本项目采用油液静压支撑方式，通过降低摩擦系数来减小摩擦力矩。静压支撑为悬浮式支撑，摩擦系数为

3×10^{-6} , 这样可以大大减小支撑间的摩擦力矩产生的误差。

2.4.4 力传递装置设计

力传递装置的设计是关系到输出标准力偶矩准确与否的关键。对于力传递装置的材质既要求有很高的抗拉强度, 还需要有足够的柔软性, 这样才能在较小的预紧力条件下, 保证输出力完全沿着传递轴的圆周切线方向。

通常的力矩加载采用薄钢带, 以 65Mn 的薄钢带 (厚 0.3 mm) 为例, 若宽度为 100 mm 时, 钢带强度安全系数为 1.29, 要将此钢带拉到完全贴服圆周则需要 409Nm 的预紧力, 此时该预紧力占整个测量范围的 6.8%。文中采用一种碳纤维布材料作为标准力的传递件, 具体见图 5。

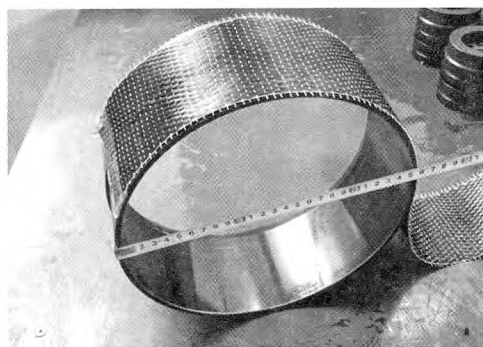


图 5 碳纤维布实物图

Fig. 5 Picture of carbon fiber sheet

2.4.5 液压加载系统稳定性

液压加载装置常常出现力值难以稳定在所需的校准点上, 加载停止后力值逐渐下滑, 卸载停止后力值缓慢上升的问题, 因此液压加载系统稳定性设计成为技术难点。采用高精度伺服阀与低摩擦伺服作动器组合进行系统闭环精确调节, 控制精度达到 0.03%。同时, 在回油路加装风冷系统, 有效控制系统内液压油热效应的影响, 提高整套系统稳定性。

3 涡轮泵水力试验系统校准装置不确定度评定

依据 JJF1059-2012 测量不确定度评定与表示, 本文只进行 B 类不确定评定。

根据物理学定义, 现场扭矩校准装置产生的扭矩为力偶臂长度与力值的矢量积, 建立数学模型为:

$$M = F_1 R_1 + F_2 R_2 \quad (4)$$

式中: M 为标准装置所产生的扭矩; F_1 和 F_2 为 2 个标准力传感器输出的加载力值; R_1 和 R_2 为力偶臂半径长度。

4.1 影响测量不确定度的因素

由数学模型和机械性能等物理因素影响的不确定度分量如下:

- 1) 标准力传感器最大允许误差引入的不确定度分量 u_F ;
- 2) 标准负荷测量仪最大允许误差引入的不确定度分量 u_F ;
- 3) 环境温度变化对标准力传感器影响引入的不确定度分量 u_{FT} ;
- 4) 油缸加载力 F_1 和 F_2 偏差引入的不确定分量 u_{F12} ;
- 5) 力偶臂长度测量偏差引入的不确定度分量 u_{Rc} ;
- 6) 环境温度变化对力偶臂长度影响引入的不确定度分量 u_{RT} ;
- 7) 力臂支撑轴承的同轴度偏差引起的力臂长度变化 u_{Rt} ;
- 8) 力偶臂与平衡力臂轴心线变化引入的不确定度分量 u_{δ} ;
- 9) 摩擦力矩引入的不确定度分量 u_{f0} 。

4.2 不确定度评定

整套装置测量不确定度分量一览表如表 1 所示。

装置的合成不确定度:

$$u_c = \sqrt{u_F^2 + u_F^2 + u_{FT}^2 + u_{F12}^2 + u_{Rc}^2 + u_{RT}^2 + u_{Rt}^2 + u_{\delta}^2 + u_f^2} \%$$

对于本套校准装置 $k=2$, 初步估计扩展不确定度:

$$U = k \cdot u_c = 0.12\%$$

故本套现场校准装置 U 优于技术指标 0.2%, 满足要求。

表 1 测量不确定度分量一览表
Tab. 1 Components of measuring uncertainty

不确定 度分量	不确定度来源	评定方法	概率分布	k 值	数值	备注
u_F	标准力传感器最大 允许误差影响	B 类	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.006%	
$u_{F'}$	标准负荷测量仪最大 允许误差影响	B 类	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.006%	
u_{FT}	环境温度变化对标准力 传感器影响	B 类	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.006%	
u_{F12}	油缸加载力偏差	B 类	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.005%	
u_{Rc}	长度测量偏差引起力臂 长度变化	B 类	均匀分布	$\sqrt{3}$	1.7×10^{-6}	
u_{RT}	环境温度变化引起力偶 臂半径长度变化	B 类	均匀分布	$\sqrt{3}$	$\frac{\Delta R_w}{\sqrt{3}}$	ΔR_w 为温度变化引入的 力臂半径变化极限误差
u_{Rb}	力臂支撑的同轴度偏差 引起的力臂长度变化	B 类	均匀分布	$\sqrt{3}$	$\frac{3D}{10}$	D 为同轴度
u_{δ}	轴心线变化	B 类	均匀分布	$\sqrt{3}$	$\frac{\Delta \delta}{\sqrt{3}}$	$\Delta \delta$ 轴心线允许极限误差
u_f	摩擦力矩	B 类	均匀分布	$\sqrt{3}$	0.005%	

4 涡轮泵水力试验系统扭矩现场校准试验验证

将现场校准装置用于某型号发动机涡轮泵水力试验系统扭矩传感器现场校准工作。被校的扭矩传感器为德国 HBM 公司生产，型号为 T10FS，测量上限至 5 000 N·m，精度等级为 0.05 级，校准数据见表 2。

经现场扭矩校准装置校准合格的 T10FS 扭矩传感器随即用于某大型液体火箭发动机泵水力试验中进行试验验证工作。试验转速 9 000 r/min，从小到大依次调 7 个流量点进行泵的性能试验。在试验中，同步采集转速、扭矩等原始数据。在扭矩输出信号数据处理时，同时采用中国计量院

校准合格后用扭矩传感器理论值以及用涡轮泵水力试验系统扭矩现场校准装置校验数据进行比对，具体试验数据见表 3。

扭矩（中国计量院校准后理论值参与采集）与流量的拟合曲线见图 6，扭矩（现场校准装置校验数据参与采集）与流量的拟合曲线见图 7。

由图 6 和图 7 可以看出：2 条拟合曲线公式中二次项、一次项及常数项基本一致，说明 2 条拟合曲线的线形趋势相同；拟合后相关系数都为 0.9997，说明 2 条曲线的线性度很好。

从上述分析可以得到，经涡轮泵水力试验系统扭矩现场校准装置校准合格的扭矩传感器通过试验验证，满足发动机涡轮泵水力试验系统扭矩传感器现场校准的要求。

表 2 T10FS 型扭矩传感器现场校准数据及结果

Tab. 2 Field calibration data and results of T10FS torque sensor

标准扭矩/ (N·m ⁻¹)	被校扭矩仪输出扭矩/(N·m ⁻¹)						平均值
	进程 1	进程 2	进程 3	回程 1	回程 2	回程 3	
0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
1 000	1 001.2	1 001.1	1 001.1	999.2	999.6	999.8	1 000.3
2 000	2 001.2	2 001.1	2 002.1	1 999.9	1 998.8	1 999.8	2 000.5
3 000	3 002.8	3 002.4	3 002.5	3 000.1	3 000.1	3 000.4	3 001.4
4 000	4 003.3	4 003.4	4 003.8	3 999.9	3 999.9	3 999.7	4 001.7
5 000	5 002.1	5 002.7	5 002.5	5 000.1	5 000.7	5 000.4	5 001.4

校准结果: 示值误差 0.043%; 符合 0.05 级

表 3 T10FS 型扭矩传感器用于涡轮泵水力试验数据

Tab. 3 Data of T10FS torque sensor used in turbo pump hydraulic test

转速/(r·min ⁻¹)	流量/(L·s ⁻¹)	扭矩 (理论值) / (N·m)	扭矩 (现场 校准值) /(N·m)	差值/(N·m)	误差/%
8 999	86.3	1 526.71	1 526.31	-0.41	-0.03
8 999	101.2	1 627.94	1 627.51	-0.43	-0.03
8 999	115.6	1 732.15	1 731.70	-0.45	-0.03
8 999	129	1 850.84	1 850.37	-0.47	-0.03
8 999	143.9	1 982.36	1 987.86	-0.50	-0.03
8 999	158.1	2 108.49	2 107.89	-0.60	-0.03
8 999	173.2	2 249.67	2 249.77	0.10	0.00

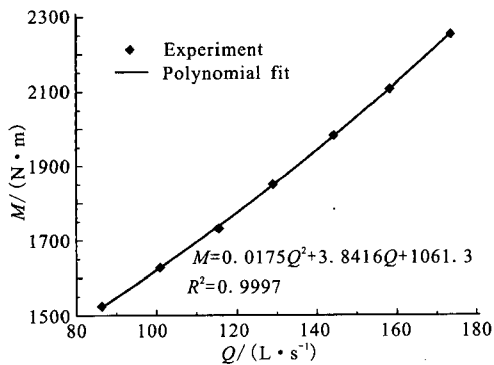


图 6 扭矩(用理论值)与流量的拟合曲线
Fig. 6 Fitting curve of torque
(theoretical value) and flow

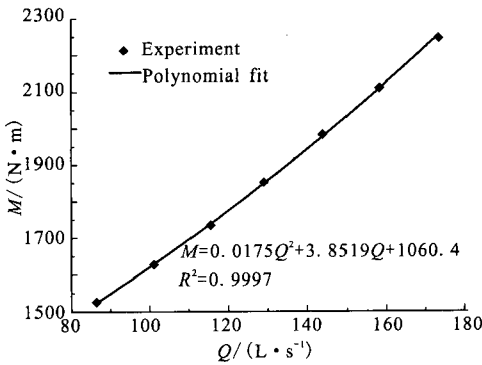


图 7 扭矩(用现场校准装置校验数据)
与流量的拟合曲线
Fig. 7 Fitting curve of torque (data calibrated by
field calibration system) and flow

(下转第 86 页)

预测,通过选取符合样本本身特点的核函数和核参数,RVM预测模型都能给出很好的预测效果,并且相关向量个数较少,极大地体现了RVM预测模型的稀疏性和算法的优越性。因此,RVM所具有的辨识复杂非线性系统的能力以及针对小样本数据的预测能力,决定了该算法有望在液体火箭发动机试验台故障预测中得到进一步的应用。

参考文献:

- [1] 郭宵峰,李耀华,陈鸿彦,等.液体火箭发动机试验[M].北京:宇航出版社,1990.
- [2] 张恒喜,郭基联,朱家元,等.小样本多元数据分析及应用[M].西安:西北工业大学出版社,2002.
- [3] 范庚,马登武,张继军.一种基于小样本数据的装备故障预测方法[J].弹箭与制导学报,2012,32(2): 225-228.
- [4] BISHOP C M, TIPPING M E. Variational relevance vector machines [C]// Proceedings of Uncertainty in Artificial Intelligence. USA: Morgan Kaufmann, 2000: 46-53.
- [5] TIPPING M E. Baseline Matlab implementation of "Sparse Bayesian" model estimation [EB/OL]. [2009-02-22]. <http://miketipping.com/papers.htm>.
- [6] TIPPING M E. Bayesian inference: an introduction to principle and practice in machine learning [EB/OL]. [2006-06-26]. <http://miketipping.com/papers.htm>.
- [7] TIPPING M E, FAUL A C. Fast marginal likelihood maximisation for sparse Bayesian model [EB/OL]. [2006-06-26]. <http://www.miketipping.com/papers.htm>.
- [8] 李刚,邢书宝,薛惠锋.基于RBF核的SVM及RVM模式分析性能比较[J].计算机应用研究,2009,26(5): 1782-1784.
- [9] 范庚,马登武,邓力,等.基于灰色相关向量机的故障预测模型[J].系统工程与电子技术,2012,34(2): 424-428.
- [10] 郭阳明,蔡小斌,张宝珍,等.故障预测与健康状态管理技术综述[J].计算机测量与控制,2008,16(9): 1213-1219.
- [11] 林左鸣,谭瑞松.航空故障诊断与健康管理技术[M].北京:航空工业出版社,2013.
- [12] 李夕海,刘代志,张斌,等.基于重采样的混沌时间序列相空间重构研究[J].信号处理,2006,22(2): 248-251.
- [13] 刘孝贤,冯晨.相空间重构中的K-L变换[J].山东大学学报(工学版),2004,34(6): 41-46.
- [14] 廉建鑫.基于RVM和混合优化算法的变压器故障诊断与预测应用研究[D].太原:太原理工大学,2012.
- [15] 田干,张伟,杨正伟,等.SVM方法在液体火箭发动机故障预测中的应用研究[J].2010,24(1): 1-9.
- [16] 杨淑莹.模式识别与智能计算-Matlab技术实现.2版[M].北京:电子工业出版社,2011.

(编辑:陈红霞)

(上接第79页)

5 结束语

扭矩现场校准技术研究是当前国内外扭矩计量专业发展的方向和重点。本文主要介绍了一种基于力偶矩加载原理的扭矩现场校准装置,可有效解决涡轮增压水力试验系统扭矩传感器现场校准的难题,为航天液体火箭发动机的精准调整提供了技术保障,同时具有一定的推广和使用价值。

参考文献:

- [1] 商维绿.现代扭矩测量技术[M].上海:上海交通大学出版社,1999.
- [2] 陈曦.现场扭矩测试技术和方法[J].船舶工程,2012,34(增刊): 22-24.
- [3] 李友先.扭矩校准技术现状与发展趋势[J].计量与测试技术,2013,40(11): 36-38.
- [4] SUE P, WILSON D. High precision torque measurement on a rotating load coupling for power generation operations, IEEE 978-1-4577-1772-7/12[R]. USA: IEEE, 2012.
- [5] 张有颐.转矩测量技术[M].北京:中国计量出版社,1986.
- [6] 王海林,杨兰.扭矩现场校准测试技术分析[J].工业计量,2013(增刊): 7-10.

(编辑:马杰)