

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.09.012

一种六维轮力传感器标定分析*

熊铃华¹, 陈守良², 张克武¹, 郭 威¹

(1. 广东中国科学院 工业技术研究院, 广东 广州 510632; 2. 中国航天 702 所, 北京 100076)

摘要:针对汽车六维车轮力传感器数值解耦精度不高的问题, 设计了标定台架, 并对一种新研制的六维 WFS 进行了标定和解耦, 以评估该传感器的性能并研究和完善高精度的解耦方法。讨论和分析了六维 WFS 的测量原理和解耦理论, 通过多向组合加载的方式, 获得了传感器各通道对多维耦合力的响应, 利用最小二乘法解耦得到了传感器的耦合系数矩阵; 并对耦合系数矩阵和耦合率矩阵的特征进行了讨论。研究结果表明, 采用多向组合加载结合最小二乘法进行解耦, 解决了试验中难以精确施加纯单向力或力矩的困难, 能使六维 WFS 具有更高的测量精度。

关键词:六维轮力传感器; 标定; 解耦

中图分类号:TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)09-1094-05

Calibration and analysis of six-dimentional wheel force sensor

XIONG Ling-hua¹, CHEN Shou-liang², ZHANG Ke-wu¹, GUO Wei¹

(1. Institute of Industry Technology, Guangzhou & Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510632, China;

2. 702 Institute China Aerospace, Beijing 100076, China)

Abstract: Aiming at the low precision of numerical decoupling of the six dimensional WFS (Wheel Force Sensor), by designing a calibration mechanical system, a WFS was calibrated and decoupled to evaluate the performance and find a high accuracy decoupling method. The measuring principle of a six dimensional WFS and how to decouple it were discussed. Through the way of multidirectional combination load and using least squares method (LSM), the coupling coefficient matrix (CCM) of the sensor was obtained, and the characteristics of the CCM and coupling rate were discussed. The results indicate that the decoupling by multidirectional combination load and LSM can solve the difficulty of load a single force, and make the measuring accuracy of WFS higher.

Key words: six dimension wheel force sensor; calibration; decoupling

0 引 言

六维 WFS 又称车轮六分力传感器, 是一种在车辆道路试验中用来采集或辅助模拟道路谱的力(力矩)传感器, 一般安装在汽车车轮轮毂上, 以记录汽车在行驶过程中或道路模拟试验中车轮或轮轴受到的侧向力、垂直力、纵向力、侧倾扭矩、横摆扭矩、驱动或制动扭矩的作用。

WFS 主要应用在汽车制动性能研究、汽车 ABS 定

量分析、车辆动力学系统试验研究、汽车悬架特性动态测量、道路谱采集等方面。通过车轮力/力矩测试, 可获取决定车辆纵向运动(制动、牵引控制)、横向运动(转向控制)和垂直运动(平稳控制)的相应载荷状态, 评估部件受工况作用而产生的载荷, 进而分析车辆损坏情况和安全性。通过与 GPS/INS 系统结合可获取整车运动状态的力学性能, 进行整车极限状态的预测和控制等^[1]。WFS 还能多体动力学的载荷分解提供真实数据, 对整车各部件的疲劳分析(需要分解

收稿日期: 2016-04-07

基金项目: 广东省工程技术研究中心建设基金项目(411203626067)

作者简介: 熊铃华(1983-), 男, 湖南常德人, 博士, 助理研究员, 主要从事结构可靠性试验分析方面的研究。E-mail: xiong_linghua@126.com

载荷、应力场和评定准则)和零部件优化设计等具有重要的参考价值。

因为WFS自身结构和电路较为复杂、各向力或力矩相互之间容易产生的耦合作用,且力和力矩的量程较大,使得六维轮力传感器的研制和标定难度很大^[2-4]。目前,多维载荷再现技术在发达国家已较为成熟,但多维路谱技术在国际上还是难题,只有少数国际大公司才开展这方面的研究工作,如美国的MTS公司等^[5-7],但关键技术尚未公开。国内,张小龙等人^[8]对一种自制的车轮多分力传感器进行了静态标定、解耦;朱卫东、刘润华等人^[9-10]利用液压标定装置对一种六维WFS进行了静态标定试验,提出迭代法并实现了静态线性解耦。

本研究设计标定台架,并对一种新研制的六维WFS进行标定和解耦。

1 六维轮力传感器工作原理

WFS基本工作原理是:传递和反馈路面对汽车车轮施加的力和力矩,自身在外力作用下发生弹性形变,使得粘贴在WFS结构上的各个应变片发生变形引起电阻值变化,再经电桥将电阻值的变化转化为电压或电流的变化,最后通过放大电路将各力或力矩分量传输出去^[11-12]。

路谱传感器的安装如图1所示。



图1 装有六维轮力传感器的汽车

WFS一般有6个输出通道,自主研发的六维轮力传感器如图2所示。



图2 自主研发的六维轮力传感器

分别对应3个测量方向上的力和力矩(力矩方向按右手定则),输出信号为电压信号,用 U_{Fx} 、 U_{Fy} 、 U_{Fz} 、 U_{Mx} 、 U_{My} 、 U_{Mz} (或 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 、 U_5 、 U_6)表示,测量坐标系如图3所示。

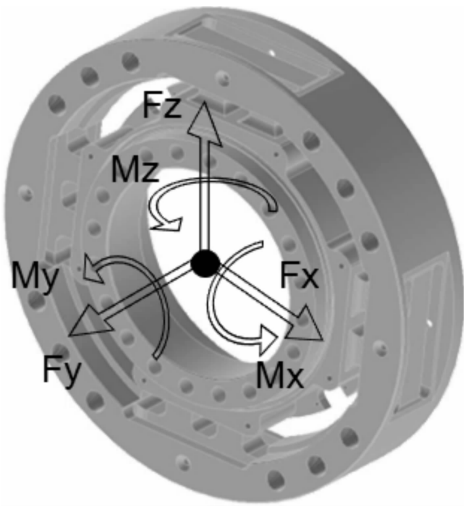


图3 六维轮力传感器的测量坐标系

如果不考虑通道间的耦合(传感器在结构设计和粘贴应变片时已经进行物理解耦),在线性假设下有:

$$U_N = k_N Q_N + b_N \quad (1)$$

式中: Q_N —第 N 通道对应输入的广义力; U_N —该通道的输出; k_N —该通道的灵敏度换算系数; b_N —零点偏移, $N = (1, 2, \dots, 6)$ 。

实际上,由于结构、贴片等一系列原因,传感器不可能实现完全的物理解耦,即第 N 通道的输出除了有 N 主通道输入的主要影响外,还包括其他各通道输入的贡献,即:

$$[U] = [k][Q] + [B] \quad (2)$$

其中: $[U] = [U_1, U_2, \dots, U_6]^T$, $[Q] = [F_1, F_2, \dots, F_6]^T = [F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]^T$, $[B] = [B_1, B_2, \dots, B_6]^T$, 耦合系数矩阵:

$$[k] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & \dots \\ k_{21} & k_{22} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & k_{66} \end{bmatrix} \quad (3)$$

为了实现精确测量,必须对WTF进行数字解耦处理,得到耦合矩阵:

$$[c] = [k]^{-1} \quad (4)$$

经过数字解耦后传感器才能保证测量精度,有:

$$Q = [c]\{[U] - [B]\} \quad (5)$$

对于路面行驶状态的汽车,可建立的坐标系如图 4 所示(两坐标系的 z 轴和 Z 轴重合)。通过坐标转换和转角实时监测值(靠安装在传感器上的集流环测得),可获得在 t 时刻传感器和路面的相对转角 $\alpha(t)$,从而通过下式换算道路谱:

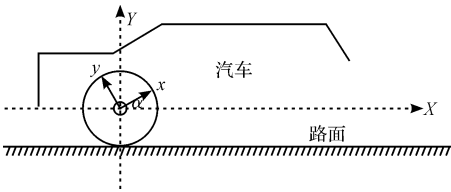


图 4 汽车行驶时 WFS 与路面坐标系

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

2 六维轮力传感器标定和解耦方法

目前,WFS 的标定和解耦方法主要有最小二乘法、神经网络法、迭代法等。本研究通过设计工装对传感器进行单向或多向加载,通过加载力(力矩)输入及输出,来计算耦合矩阵。笔者利用改进后的最小二乘法进行多维拟合,来逼近 WFS 的耦合矩阵。



图 8 试验现场照片

加载安装示意图与试验现场照片如图(5 ~ 8) 所示。

表 1 仪器和设备主要参数

仪器	范围和精度
数据采集仪 /mV	1 500 ± 0.1%
直流稳压电源 /V	12 ± 0.2%
液压伺服控制系统 /kN	55 ± 0.2%

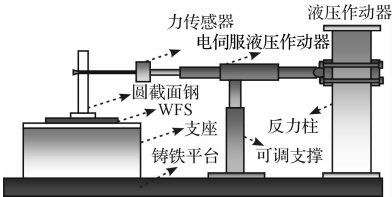


图 5 F_x 和 M_y 组合加载安装示意图

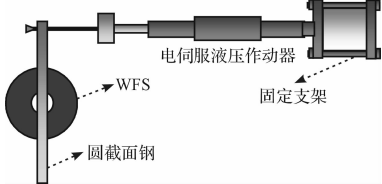


图 6 M_z 、 M_x 和 F_y 组合加载安装示意图

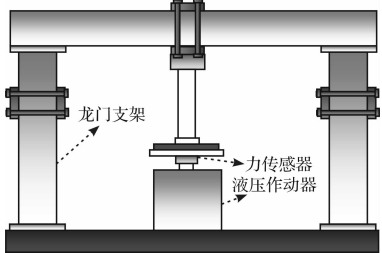


图 7 F_z 加载安装示意图

本研究通过工装固定 WFS 并借助电伺服液压作动器进行加载,并根据单向力传感器的读数和实测力臂来确定当时所施加的载荷,WFS 的输出由 6 个输出通道经电路调制器和数据采集仪采集,试验用到的仪器如表 1 所示。

在考察以 F_x 、 F_y 、 M_x 或 M_y 为主通道输出时(因结构等原因,施加的力不总能恰好通过传感器的测量轴,偏轴施力时,会产生附加的力矩,因此试验中尽量使得载荷主要施加在需考察的通道上,即需要考察力通道时,使偏轴产生的力臂尽量小,考察力矩时,使力臂尽量大,则力可以相对较小),以图 5 的形式安装,通过调整力臂大小,来区分测量数据对应的主通道。因为不是施加的纯单向载荷,在考察 F_x 或 F_y 时,采用较小的力臂施加载荷,此时分别会对应有较小的附加载荷 M_y 或 M_x ;在考察 M_x 或 M_y 时以图 6 的形式安装,此时分别会对应有较小的耦合载荷 F_y 或 F_x 。在考察 M_z 为主通道时,以图 6 的形式安装,此时会有 F_x 、 M_y 的附加力(矩)。附加力矩可根据当时的实测力臂计算。在考察以 F_z 为主通道输出时以图 7 的形式安装,此时没有其他方向的附加载荷。

若已测得第 i 次(共 n 次)加载施加在传感器各方向上的载荷为:

$$Q_n = (Q_1 \quad Q_2 \quad Q_3 \quad Q_4 \quad Q_5 \quad Q_6) \quad (7)$$

对应测得的输出为:

$$U_n = (U_1 \ U_2 \ U_3 \ U_4 \ U_5 \ U_6) \tag{8}$$

则残差平方和:

$$\varphi = \sum_{i=1}^{n=i} \{Q_n - c(U_n - B)\}^2 \tag{9}$$

经过 n 次试验获取样本,即可逼近矩阵 c 和 B 。

3 试验和结果分析

试验测得各个加载主方向的数据各 30 组,共 180 组。以考察 M_x 通道为例,每组施加的载荷为:

$$Q_n = (0 \ F_n \ 0 \ F_n L_x \ 0 \ 0)^T \tag{10}$$

式中: F_n — 伺服作动器施加的力, L_x — 力矩对应的力臂。

利用最小二乘法进行逼近,设传感器是线性的,因载荷矩阵中只有 2 个非零元素,则逼近效果应该是一个平面,最小二乘法逼近效果如图 9、图 10 所示(点— 实测电压值,平面— 理想的双通道输入单通道输出关系),根据该理想面即可确定矩阵 c 中的两列元素和矩阵 B 中的两个元素。

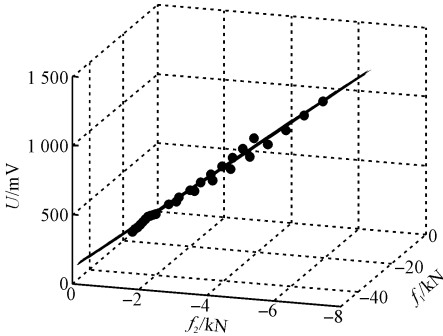


图 9 $U-M_x$ 的最小二乘逼近(一)

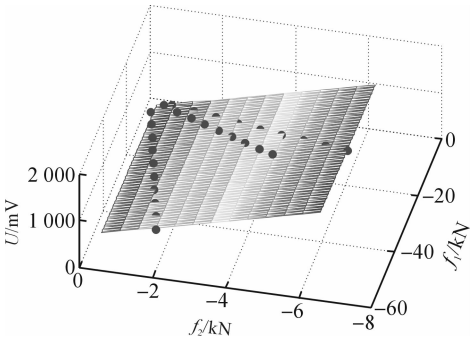


图 10 $U-M_x$ 的最小二乘逼近(二)

其他通道也进行相似的处理,即可确定耦合系数矩阵 k 和矩阵 B ,对 k 求逆得耦合矩阵 c 。对耦合系数矩阵进行归一化,可得到各通道间的耦合率如表 2 所示。

从耦合系数矩阵可以看出,其对角线上的元素相当于对应通道单输入单输出的灵敏度系数,因为设计和制造传感器时进行过物理解耦,其他元素要明显小于对应一列的对角线元素,利用耦合矩阵、矩阵 B 和若干组试验的输入输出数据进行反算验证,该 WFS 的测量精度为 1.0% F. S。最大耦合率为 5%,其中耦合率大大优于国内现有文献公开的 WFS 的耦合率。

耦合率是非对称矩阵,说明通道间的耦合不具有对称性,即通道间的相互影响不对等。如 F_x 对 F_z 的耦合为 4%,而加载 F_z 对 F_x 的耦合则为 2%。

表 2 解耦结果

耦合系数矩阵 k						矩阵 B		耦合率					
19.12	-0.78	0.34	0.35	-2.48	9.57	0.05	0.01	1.00	-0.04	0.02	0.00	-0.01	0.03
-0.71	20.04	-0.89	-8.71	-0.03	-6.63	-0.01	-0.04	-0.04	1.00	-0.05	-0.05	0.00	-0.02
0.15	-0.16	19.67	2.45	-0.08	2.75	0.03	0.01	-0.01	1.00	0.01	0.01	0.00	0.01
0.83	-1.46	0.86	191.92	-3.35	2.75	0.03	0.04	-0.07	0.04	1.00	-0.02	-0.02	0.01
-1.05	-0.51	-0.87	-1.05	171.61	2.9	-0.02	-0.05	-0.03	-0.04	-0.01	1.00	0.01	0.01
0.73	-0.91	0.03	6.24	1.56	290.24	0.04	0.04	-0.05	0.00	0.03	0.01	1.00	0.01

4 结束语

一般来说,六维 WFS 的维间耦合越小,数值解耦越充分,耦合系数矩阵精度越高,则传感器的测量精度越高^[13]。从试验数据可以看出,该 WFS 的维间耦合

率(最大 5%)大大优于现有国内公开的数据(最大维间耦合达到 20% 以上)。本研究设计加载台架进行试验并获得试验数据,利用多变量最小二乘法对六分轮力传感器进行解耦,解决了试验中难以精确施加纯单

(下转第 1139 页)

本文引用格式:
熊铃华,陈守良,张克武,等. 一种六维轮力传感器标定分析[J]. 机电工程,2016,33(9):1094-1097,1139.
XIONG Ling-hua, CHEN shou-liang, ZHANG Ke-wu, et al. Calibration and analysis of six-dimentional wheel force sensor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(9):1094-1097,1139.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>