

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.05.12

# 基于力传感器并联方式的测力仪测量误差来源分析

李自武, 冯维华, 刘戎

(中国航发西安航空发动机有限公司, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 介绍了基于力传感器并联方式的测力仪的工作原理和信号输出特点。以两支力传感器并联连接的测力仪为例, 详细分析了力传感器灵敏度和直线度因素对并联测力仪测量误差的影响, 并进行了相关试验验证, 为并联测力仪的应用提供技术参考。

**关键词:** 力传感器; 并联测力仪; 测量误差

**中图分类号:** TB9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2019)05-0065-05

## Analysis of Measurement Error Source of Dynamometer Based on Parallel Method of Force Transducer

LI Ziwu, FENG Weihua, LIU Rong

(AECC Xi'an AERO-engine LTD, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** This paper introduces the working principle and signal output characteristics of the dynamometer based on the parallel method of force transducer. Taking the dynamometer with two force transducers connected in parallel as an example, the influence of the sensitivity and linearity of the force transducer on the measurement error of the parallel dynamometer is analyzed in detail, and the related verification tests are carried out, which can provide technical reference for the application of the parallel dynamometer.

**Key words:** force transducer; parallel dynamometer; measurement error

## 0 引言

电阻应变式力传感器主要由弹性体、应变片桥路和各种补偿电阻组成, 在外部载荷的作用下, 粘贴在弹性体上的应变片将力转换为应变, 通过电阻应变片组成的桥路输出电信号<sup>[1]</sup>。由于电阻应变式力传感器具有直线度高、滞后和蠕变小、响应频率高、稳定性好等特点, 如今已被广泛地应用于力值计量和工程试验力测量领域<sup>[2]</sup>。实际力学测量试验中, 由于受到测量阈值及安装条件等限制, 单支力传感器往往无法满足测力要求, 例如在大型压力机试验和发动机试验台测试中, 需要使用多支力传感器并联进行测力以满足试验要求。

并联测力仪基于力传感器桥路输出信号的合成过程实现力值测量, 此结构特点决定了其与单支力传感器和测量仪表组成的测力仪在误差来源因素方面存在一定差异, 但是现有文献针对并联测力仪测量误差的影响因素分析较少<sup>[3-5]</sup>。以为并联测力仪的实际应用提供更深入的理论支撑为研究目的, 本文对并联测力仪和单支力传感器的测力仪共有的误差来源因素不再进行赘述(例如温度和激励电源等), 而是着重于结合并联测力仪的结构特点, 以两支力传感器并联连接的

测力仪为例, 从力传感器灵敏度和直线度两方面入手, 对并联测力仪测量误差的影响因素进行分析讨论。

## 1 并联测力仪工作原理及信号输出特点

### 1.1 并联测力仪工作原理

基于力传感器并联方式的测力仪(以下简称为并联测力仪)的工作原理是: 分别将每支力传感器应变片桥路的输入、输出端并联, 然后接入信号合成器, 试验时力传感器所测得的数据经信号合成器处理后, 输入测量仪表, 通过测量仪表显示所承受的外部载荷, 从而达到力值测量的目的。图1为基于两支力传感器并联连接的测力仪工作原理示意图。

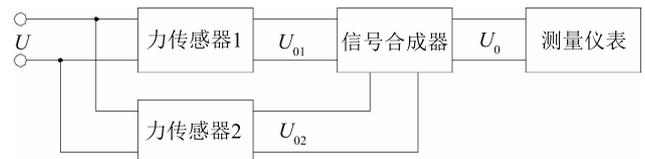


图1 基于力传感器并联连接的测力仪工作原理示意图

电阻应变式力传感器通常采用四个电阻应变片组成惠斯通电桥, 当力传感器受到外力作用时, 电桥由初始平衡状态转变为一个电压信号输出状态, 对于某一载荷

$F_i$ ，采用一支量程为  $F_c$ ，灵敏度为  $S$ ，供桥电压为  $U$  的力传感器进行测量，则输出电压  $U_0$  的表达式为

$$U_0 = \frac{F_i S U}{F_c} \quad (1)$$

基于两支力传感器并联方式的测力仪由两支并联连接的电阻应变式力传感器、信号合成器和测量仪表组成。图 2 为两支力传感器的并联电路图，其中， $U$  为力传感器的供桥电压， $U_0$  为力传感器并联后的总输出信号。因为每支传感器都可等效为一个电压与其输出阻抗串联的电路，所以可进一步简化得到如图 3 所示的等效电路图。

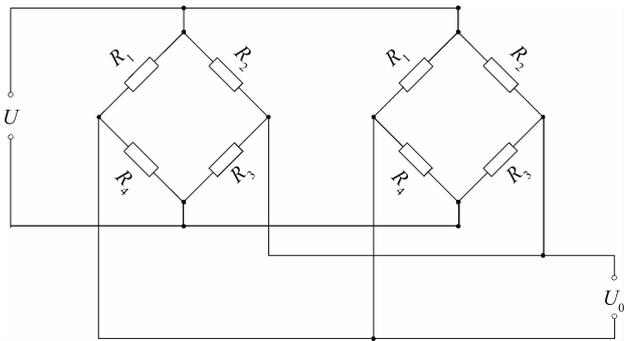


图 2 力传感器并联电路

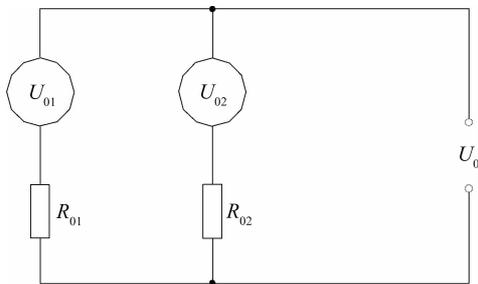


图 3 力传感器并联电路等效图

总输出信号  $U_0$  的表达式如式(2)所示。设两支力传感器的输出阻抗分别为  $R_{01}$  和  $R_{02}$ ，灵敏度分别为  $S_1$  和  $S_2$ ，输出信号分别为  $U_{01}$  和  $U_{02}$ ，传感器的量程均为  $F_c$ ，则  $U_0$  也可按式(3)形式表示。

$$U_0 = \left( \frac{U_{01}}{R_{01}} + \frac{U_{02}}{R_{02}} \right) \times \frac{R_{01} R_{02}}{R_{01} + R_{02}} \quad (2)$$

$$U_0 = \left( \frac{S_1 F_1}{R_{01}} + \frac{S_2 F_2}{R_{02}} \right) \times \frac{U}{F_c} \times \frac{R_{01} R_{02}}{R_{01} + R_{02}} \quad (3)$$

式中： $F_1$ ， $F_2$  分别为两支传感器所承受的载荷。

### 1.2 并联测力仪信号输出特点

根据式(2)分析可知，并联测力仪具有如下信号输出特点：

1) 如果  $\frac{S_1}{R_{01}} = \frac{S_2}{R_{02}}$ ，则可根据式(3)推导出式(4)。

$$U_0 = \frac{K U}{F_c} \times \frac{R_{01} R_{02}}{R_{01} + R_{02}} F_i \quad (4)$$

式中： $K = \frac{S_1}{R_{01}} = \frac{S_2}{R_{02}}$ ，并联测力仪所承受的总载荷  $F_i = F_1 + F_2$ 。因为  $\frac{K U}{F_c} \times \frac{R_{01} R_{02}}{R_{01} + R_{02}}$  为常数，根据式(4)可知  $U_0$  与并联测力仪所承受总载荷  $F_i$  成正比，与两支力传感器所承受载荷  $F_1$  和  $F_2$  是否相等（均匀受力）无关。不管  $F_1$  和  $F_2$  的大小关系如何分配，总载荷  $F_i$  只要保持不变， $U_0$  就会保持不变，即不会产生偏载误差。

2) 如果  $\frac{S_1}{R_{01}} \neq \frac{S_2}{R_{02}}$ ，则  $U_0$  不仅与  $F_i$  有关，而且与

两支力传感器所承受载荷  $F_1$  和  $F_2$  的大小有关，即会产生相应的偏载误差。

## 2 并联测力仪测量误差来源分析

### 2.1 灵敏度

假设两支力传感器的输出阻抗、所承受载荷均相等，即： $R_{01} = R_{02}$ ， $F_i = F_1 = F_2$ ，此时并联测力仪所承受的总载荷  $F_i = 2 F_1$ ，桥路激励电压均为  $U$ ，则式(3)可简化为式(5)。假设两支力传感器输出信号直线度很好，则输入-输出特性近似为正比例关系，如图 4 所示， $l_1$  和  $l_2$  分别为力传感器 1 和力传感器 2 的输入-输出校准直线，力传感器 1 和力传感器 2 的灵敏度分别  $S_1$  和  $S_2$ ，且  $S_1 \neq S_2$ 。如果以  $S_1$  作为并联测力仪测量仪表的灵敏度和载荷转换参数，由于  $S_1$  和  $S_2$  之间存在一定偏差，必然会产生相应的测量误差，两支力传感器并联后的电压输出误差  $\delta_{U_i}$  如式(6)所示。

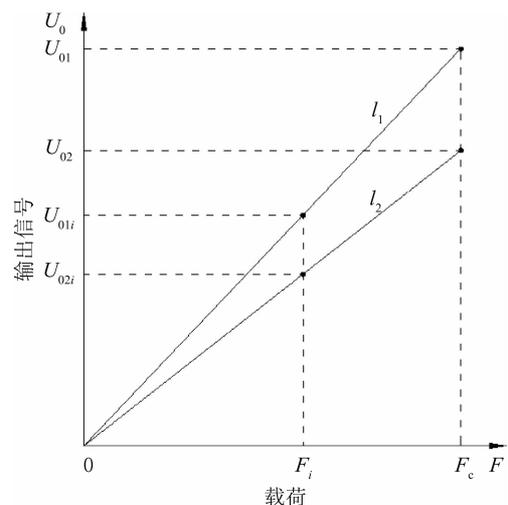


图 4 正比例关系的力传感器输入-输出特性

$$U_0 = (S_1 + S_2) \times \frac{F_i U}{2F_c} \quad (5)$$

$$\delta_{U_i} = \frac{(S_1 - S_2) F_i U}{2F_c} \quad (6)$$

选用两支 Z30 型力传感器, 编号分别为 051628 与 052955, 二者的输出阻抗近似相等 (350.0 Ω), 量程  $F_c$  均为 10 kN。采用 PW36 - 1.5ADP 型稳压源为力传感器提供 10 V 直流供桥电压, 并采用 34401A 型数表测量输出信号。利用力标准机对力传感器施加标准载荷, 分别测得两支力传感器的桥路输出电压、灵敏度及直线度如表 1 所示。根据表 1 数据可知, 两支力传感器灵敏度存在一定偏差, 直线度则属于同一等级, 即均小于 0.01% FS, 输入-输出特性近似为正比例关系。将两支力传感器并联, 分别在 8, 12, 16 kN 载荷下进行试验, 测量数据如表 2 所示, 其中标“※”的测量点的加载条件为两支力传感器承受的载荷相等; 未标“※”的测量点的加载条件为两支力传感器承受的载荷不相等, 即偏载状态下。

表 1 Z30 型力传感器桥路输出电压、灵敏度及直线度

载荷/kN	力传感器 1 输出 $U_{01}$ /mV	力传感器 2 输出 $U_{02}$ /mV
0	0.000	0.000
2	4.012	4.003
4	8.025	8.006
6	12.041	12.008
8	16.055	16.010
10	20.068	20.012
灵敏度	$S_1 = 2.0068 \text{ mV/V}$	$S_2 = 2.0012 \text{ mV/V}$
直线度	<0.01% FS	<0.01% FS

表 2 不同灵敏度力传感器并联试验数据

总载荷 /kN	力传感器 1 载荷 /kN	力传感器 2 载荷 /kN	并联实测结果 /mV
0	0	0	0.000
※ 8	4	4	8.016
8	2	6	8.010
8	6	2	8.022
※ 12	6	6	12.025
12	4	8	12.016
12	8	4	12.031
※ 16	8	8	16.032
16	6	10	16.026
16	10	6	16.038

根据表 2 可知, 两支力传感器并联后, 在承受相等载荷和不相等载荷状态下所测得结果之间存在一定偏差, 产生这种偏差的原因就是两支力传感器的灵敏度不同, 且经计算分析此偏差的数值关系符合前文式 (6) 的分析结果。因此, 在实际工作中应尽量选取同一厂家生产的同型号同批次力传感器进行并联, 使阻抗近似相等。同时还应检测灵敏度, 避免并联灵敏度差异较大的力传感器, 以减少测量误差, 保证测量准确性。

### 2.2 直线度

力传感器的直线度为力传感器实际测得的输入-输出校准曲线与其理论拟合直线之间的偏差。假如二者的灵敏度、输出阻抗和所承受载荷均相等, 即:  $S_0 = S_1 = S_2, R_{01} = R_{02}, F_i = F_1 = F_2$ , 则式 (3) 可简化为式 (7), 如图 5 所示,  $l_0$  为两支力传感器的输入-输出理论拟合直线,  $l_1$  和  $l_2$  分别为两支力传感器输入-输出校准曲线,  $l_1$  和  $l_2$  为不同曲率的曲线。

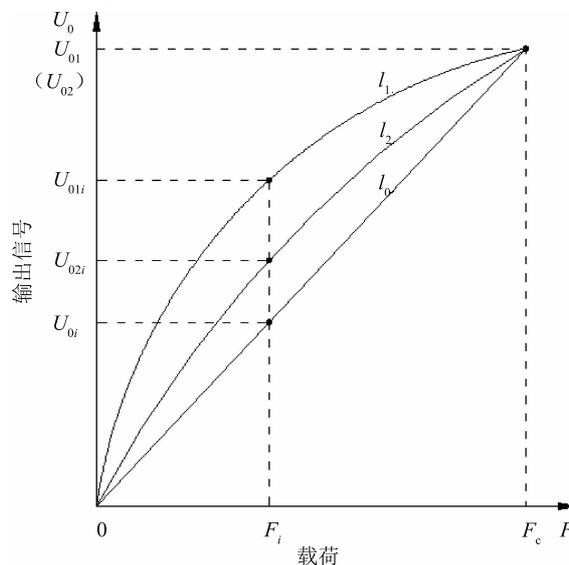


图 5 非比例关系的力传感器输入-输出特性曲线

力传感器的直线度引起的误差可分为以下两种情况:

1) 如果并联测力仪的测量仪表按两点法进行标定 (即以零点和额定载荷点进行标定),  $S_0$  作为灵敏度和载荷转换参数时, 由于输入-输出校准曲线  $l_1, l_2$  和理论拟合直线  $l_0$  除了零点和额定载荷点重合外, 其它部分均存在一定偏差, 会导致产生一定的测量误差。两支力传感器并联后电压输出误差  $\delta_{U_{0i}}$  如式 (8) 所示, 其中  $U_{0i}, U_{01i}, U_{02i}$  分别为载荷为  $F_i$  时三种输入-输出曲线所对应的输出信号值。

$$U_{0i} = \frac{1}{2}(U_{01i} + U_{02i}) \quad (7)$$

$$\delta_{U_{0i}} = \frac{1}{2}(U_{01i} + U_{02i}) - U_{0i} \quad (8)$$

2) 现在多数测力类仪表具有多点标定参数的功能, 除了对零点和额定载荷点进行标定外, 可以对中间部分均匀的选取几个测量点进行标定, 从而减小直线度引入的测量误差。假如测量仪表按输入-输出校准曲线  $l_1$  进行多点标定, 两支力传感器并联后电压输出误差  $\delta_{U_{0i}}$  如式(9)所示。

$$\delta_{U_{0i}} = \frac{1}{2}(U_{01i} - U_{02i}) \quad (9)$$

选用两支 BK-2 型力传感器, 编号分别为 2056 和 2060, 二者的输出阻抗近似相等(350.0  $\Omega$ ), 量程均为 50 kN。采用力标准机对力传感器施加标准载荷, 分别测得两支力传感器的桥路输出电压、灵敏度及直线度如表 3 所示, 两支力传感器灵敏度偏差量很小, 可近似认为相等, 直线度分别为 0.15% FS 和 0.02% FS, 输入-输出特性为非正比例关系的曲线。将两支力传感器并联后, 用两台力标准机分别对两支力传感器施加标准载荷, 分别在 40 kN 和 60 kN 载荷下进行试验, 测得结果如表 4 所示, 标“※”的测量点的加载条件为两支力传感器承受的载荷相等, 未标“※”的测量点的加载条件为两支力传感器承受的载荷不相等。根据表 4 可知, 两支力传感器并联后, 其在承受相等载荷和不相等载荷所测得结果之间存在一定的偏差, 产生这种偏差的原因是两支力传感器直线度不同, 且经计算分析此偏差的数值关系符合前文式(7)~式(9)的计算结果。

表 3 BK-2 型力传感器桥路输出电压、灵敏度及直线度

载荷/kN	力传感器 1 输出/mV	力传感器 2 输出/mV
0	0.000	0.000
5	2.065	2.054
10	4.129	4.108
20	8.241	8.215
30	12.339	12.321
40	16.432	16.425
50	20.528	20.530
灵敏度	$S_1 = 2.0528 \text{ mV/V}$	$S_2 = 2.0530 \text{ mV/V}$
直线度	0.15% FS	0.02% FS

表 4 相同灵敏度不同直线度力传感器并联试验数据

总载荷 /kN	力传感器 1 载荷 /kN	力传感器 2 载荷 /kN	并联实测结果 /mV
0	0	0	0.000
※ 40	20	20	8.228
40	10	30	8.225
40	30	10	8.223
※ 60	30	30	12.330
60	20	40	12.333
60	40	20	12.322

选用 2000 型显示仪表作为两支力传感器并联的显示仪表, 分别以力传感器 1 的输出值作为载荷转换参数进行 7 点标定和以其灵敏度  $S_1$  作为载荷转换参数进行两点标定, 然后对测力仪同时施加标准载荷, 加载过程中两支力传感器承受的载荷相等, 分别得到载荷实测结果如表 5 所示。由表 5 的试验数据可知, 在不同载荷转换参数下所测得力值都存在一定的误差, 而且这两种情况之间也存在一定偏差, 误差产生原因就是两支力传感器直线度的偏差所致, 且经计算分析此偏差的数值关系符合前文的公式计算结果。同理, 如果两支力传感器承受的载荷不相等, 即在偏载的状态下也同样会产生测量误差, 这里不再赘述。

表 5 不同载荷转换参数下并联测力仪试验数据 kN

总载荷	力传感器 1 载荷	力传感器 2 载荷	7 点标定 实测结果	2 点标定 实测结果
0	0	0	0.000	0.000
10	5	5	10.024	10.030
20	10	10	20.045	20.059
40	20	20	40.059	40.080
60	30	30	60.042	60.058
80	40	40	80.028	80.032
100	50	50	99.999	100.000

综上, 并联测力仪的两支力传感器的直线度差异也是其测量误差的来源因素, 在选配传感器的时候一定要根据使用要求进行筛选, 而且应考虑二者直线度的差异, 尽量减小两者直线度引入的误差量。

### 3 结论

力传感器的并联方式具有系统成本低、稳定性好、响应时间快、抗干扰性好等优点。力传感器的灵敏度和直线度是影响并联测力仪测量误差的重要因素，因此选配灵敏度和直线度一致的力传感器是减小偏载误差的关键。在实际应用中，应根据并联测力仪使用技术要求和实际工作受力状态等方面对力传感器进行筛选，减少因灵敏度和直线度差异引入的误差，保证测量结果的准确性、可靠性。本文以两支力传感器并联连接的测力仪为例，具体地阐述了力传感器灵敏度和直线度对并联测力仪测量误差的影响，并进行了试验验证，为实际工程应用中减少并联测力仪的测量误差提供了重要依据。

#### 参 考 文 献

[1] 傅宽, 洪宝林. 力学计量(上)[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.

- [2] 李孝武, 刘景利. 力学计量[M]. 北京: 中国计量出版社, 1999.
- [3] JJG391-2009. 力传感器检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2009.
- [4] JJG144-2007. 标准测力仪检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2007.
- [5] JJG455-2000. 工作测力仪检定规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2000.

收稿日期: 2019-05-08; 修回日期: 2019-06-09

#### 作者简介

李自武(1971-), 男, 高级工程师, 主要从事力学计量研究工作。



(广告)

## 《化学分析计量》2019 年第 4 期目次

#### 标准物质

辛基二茂铁同分异构体标准物质的制备

#### 分析测试

微波三步提取-高效液相色谱-原子荧光法测定土壤中砷形态

还原分离-硫酸亚铁铵返滴定法测定碲化铜中碲

放射化学分析法测定水中<sup>60</sup>Co

气相色谱法检测霜膏类化妆品中的芳香烃矿物油

气相色谱法测定常见饮料中 8 种邻苯二甲酸酯类化合物

电感耦合等离子体发射光谱法测定锡精矿中 10 种元素

高压密闭溶样-电感耦合等离子体质谱法测定土壤中有毒元素

离子色谱法快速测定土壤中的亚硝酸盐氮和硝酸盐氮

气相色谱法分析玫瑰花露水中香气成分及含量变化

离子交换色谱法测定西番莲中有机酸

高效液相色谱法同时测定柑普茶中橙皮苷和 6 种儿茶素

单波长色散 X 射线荧光光谱法测定高硫油品中微量氯

液液萃取-离子色谱法测定乏燃料后处理模拟料液中的叠氮酸

微波消解-火焰原子吸收光谱法测定土壤和沉积物中的重金属

气相色谱法测定木香中去氢木香内酯的含量

ICP-AES 法测定铁矿石中全铁、磁性铁、五氧化二铌、二氧化硅、氧化铈和磷

在线衍生-高效液相色谱法测定食品中的甲醛次硫酸氢钠

微波消解-双通道原子荧光光谱法同时测定土壤中的硒和锑

高效液相色谱法测定壳寡糖的含量

测汞仪固体直接进样测定土壤中总汞

氢化物发生-原子荧光光谱法测定高盐食品中的微量铅

傅立叶变换红外光谱法测定铝合金热轧乳液的有效成分

电感耦合等离子体原子发射光谱法测定水晶泥玩具中硼酸和硼酸盐

区带流动分析技术测定水中的氨氮

快速加热容量法测定土壤中有机质含量

#### 计量技术

茶叶中甲氧菊酯测定能力验证中结果评价方式的选择

直接测汞仪的校准及检出限不确定度评定

#### 仪器设备

定点法温度校准装置的研制

#### 实验室管理

计量数据自动化处理技巧实例分析

ICP-MS 法测定土壤中 12 种金属元素时的样品前处理方法

#### 综述

石斛中主要特征成分测定研究进展

X 射线荧光光谱技术在地质分析中的应用及发展动态