

应变式标准测力仪的 负荷特性在力值传递中的作用

唐纯谦 贺建平

(中国测试技术研究院, 成都 610021)

摘要 力值计量检定系统主要由产生力值的力标准机和传递力值的标准测力仪构成, 应变式标准测力仪由应变式负荷传感器和数字显示器组成, 应变式标准测力仪的基本特性包括: 重复性、负荷特性、温度特性和时间特性。本文主要介绍应变式标准测力仪的负荷特性, 即测力仪的输出随负荷产生的变化, 重点阐述这一基本特性在力值传递中的作用、拟合方法及其应用。

关键词 应变式负荷传感器 标准测力仪 负荷特性

1 引言

随着应变式负荷传感器综合性能的提高, 应变式测力仪已逐渐替代水银箱式、光学式及百分表式测力仪, 成为力值传递及高精度力值比对的主要测力仪器。研究标准测力仪的基本特性, 有助于检定人员合理应用这些基本特性, 解决力值传递中的诸多实际问题; 对改善标准测力仪的计量性能, 提高标准测力仪力值测量或力值比对的准确度具有实际参考价值。

标准测力仪的基本特性包括: 重复性、负荷特性、温度特性和时间特性, 由于大多数应变式负荷传感器具有非常好的重复性, 作为一项基本技术指标对标准测力仪的计量性能不产生重要影响。本文主要介绍应变式标准测力仪的负荷特性, 及该特性在力值传递中的重要作用。

在力值传递中常常需要解决: 因受力标准机力级的限制, 测力仪不能定度或校准到足够多的连续使用的负荷点; 或因力标准机量程的限制, 不能定度或校准到测力仪的整个测量范围, 例如: 一台用于叠加式力标准机的 2000kN 测力仪在 1000kN 基准或标准测力机上只能定度到 1000kN 及以下的负荷点的数据, 诸如此类的问题都可以运用测力仪的负荷特性得到解决。

2 应变式标准测力仪的负荷特性

2.1 负荷传感器的负荷特性

负荷传感器在外力的作用下, 传感器产生弹性变形的输出随负荷的连续变化构成了反映传感器负荷特性的校准曲线(如图 1 所示)。在实际使用中, 传感器的校准曲线是由数个不连续定度或校准负荷点 f_i (一般为 6~8 个) 相对应的输出 X_i 构成的非线性关系曲线。在 JJG391-1985 负荷传感器检定规程中, 采用“端点”拟合直线来评估校准曲线的质量, 即传感器的非线性(又称直线度)。

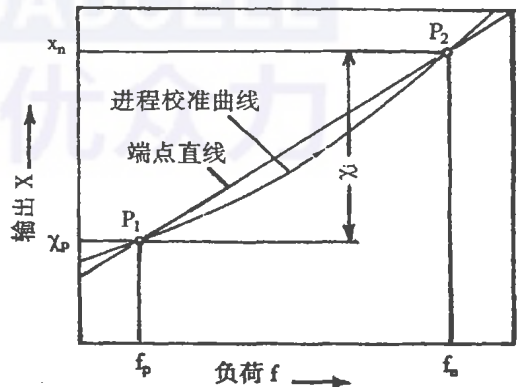


图 1 负荷传感器的校准曲线

2.2 标准测力仪的负荷特性

标准测力仪通常采用在力标准机上定度或校准到的若干负荷点的输出数据列表定地使用。但在许多实际使用场合中, 所需要的测量负荷点常常并不与测力仪校准负荷点相重合, 因此需要分析和判断该测力仪(传感器)校准曲线的“线性”是否满足未校准负荷点的使用要求, 根据该传感器非线性指标的大小选择满足其内插误差要求的拟合方程, 该方程是以力值为自变量输出为函数的一次、二次或三次多项式方程(又称校准方程)。

2.2.1 负荷特性的拟合方法

2.2.1.1 直线关系的拟合方法

由于大多数应变式负荷传感器具有较好的非线性, 一般不大于测力仪准确度等级的 0.5 倍, 因此,

表 1 利用拟合直线方程“内插”的应用实例

力传感器: YZ106/5MN NQ.0201001(Q.3 级)			
指示器: SD9000-2C(Q.01%±1d)			
力标准机: 30MN BM(Q.1 级)			
温度: 19.0℃ 日期: 2002.2.6			
f_i (MN)	X_i (μ V)	X_c (μ V)	I_{pi} (%)
1.0	4006	4007	0.025
1.5	6008	6007	-0.017
2.0	8006	8007	0.013
2.5	10002	10007	0.050
3.0	12008	12007	-0.010
3.5	—	14007	—
4.0	16014	16007	-0.044
4.5	—	18008	—
5.0	20002	20008	0.030
拟合直线方程: $X_c = 6.3 + 4000.27f_i$			
内插误差: $I_{pi} = 0.05\%$			
相关系数: $r = 1 - 2.8 \times 10^{-7}$ 标准偏差: $S = 4.41$			

可以将应变式标准测力仪的未知输出计算值 X_c 与所加负荷 f 看作直线关系, 可以采用下列几种拟合方法。

(1) 额定负荷斜率法

直线的方程式:

$$X_c = \left(\frac{X_n}{f_n}\right)f \quad (1)$$

式中 f_n 为额定负荷, x_n 为额定负荷下的输出, 直线的斜率为 $\left(\frac{x_n}{f_n}\right)$ 。该方法又称端点直线法, 一般仅用于计算负荷传感器的非线性。

(2) 最小二乘法直线

直线的方程式:

$$X_c = a + bf \quad (2)$$

式中系数 a 、 b 分别为直线的截距与斜率, 利用测力仪各校准负荷点的输出数据, 求解公式(2)中的系数 a 和 b 即可得到实际使用中所需要的拟合直线方程。

(3) 两点内插法

内插计算公式:

$$x_c = \frac{x_2 - x_1}{f_2 - f_1} f \quad (3)$$

式中 f_1 、 f_2 和 x_1 、 x_2 分别为相邻两校准点的负荷与输出。利用该方法可以估算出所需相邻两校准负荷点之间的未校准点负荷的输出。

2.2.1.2 曲线关系的拟合方法

当负荷传感器的非线性指标较大(大于 0.5 倍

测力仪准确度等级), 而且测力仪校准负荷点数又较少(少于 6 个点), 可以判断该传感器校准曲线的“线性”较差, 在此情况下应将测力仪的未知输出计算值 X_c 与所加负荷 f 看作曲线关系, 可以采用一般二次曲线拟合方法, 一般二次曲线方程式:

$$X_c = a + bf + cf^2 \quad (4)$$

利用最小二乘法求解(4)式中的系数 a 、 b 、 c , 即可得到实际使用中所需要的拟合曲线方程。

2.2.2 负荷特性的相关技术指标

在 JJG144-1992 标准测力仪检定规程中, 规定利用拟合直线方程或曲线方程(又称校准方程)得到的与负荷 f_i 相对应的测力仪输出计算值(X_c)与实测值(X_i)的最大偏差, 即内插误差(I_p)作为评估测力仪的负荷特性指标, 并规定测力仪的内插误差不大于测力仪准确度等级的 0.5 倍。

内插误差由下式计算:

$$I_{pi} = \frac{X_{ci} - X_i}{X_i} \times 100\%$$

式中 X_i 为标准测力仪进程校准时, 各负荷点对应的输出平均值。

3 应用举例

我们采用最小二乘直线和一般二次曲线两种拟合方法对 0.5 级至 0.01 级应变式标准测力仪的负荷特性进行了统计计算, 结果表明: 当应变式负荷传感器的非线性指标小于标准测力仪准确度等级的 0.5 倍时, 采用最小二乘直线法($X_c = a + bf$)为最佳, 当传感器的非线性指标大于 0.5 倍测力仪准确度等级时, 采用一般二次曲线法($X_c = a + bf + cf^2$)为宜。两种方法均满足测力仪未校准负荷点的“内插”和“外推”的使用要求。由于最小二乘直线法计算简便, 对目前国内大多数用于检定试验机的 0.1 级和 0.3 级应变式标准测力仪尤其适用。

本文列举了一台 0.3 级 5MN 应变式测力仪, 采用最小二乘直线法得到在额定负荷的(20~100)%测量范围内, 可连续使用的($X_c = a + bf$)拟合直线方程的实例(参见表 1)。

另一台 0.3 级 2MN 应变式测力仪, 利用(0.2~1.0)MN 负荷段的拟合直线方程外推, 获得(1.2~2.0)MN 负荷段的输出数据的实例(参见表 2)。

(下转第 20 页)

量。如果使用通带较小的传感器,由于传感器高频噪声不敏感,因此测得信号的噪声幅度会大大降低,传感器的量程就可以更小一些,这样零偏电压即使保持在原来的水平,但相对于有效信号就很小,可以忽略不计,由此信噪比也会大大提高,在软件设计也可以省去很多不必要的麻烦。

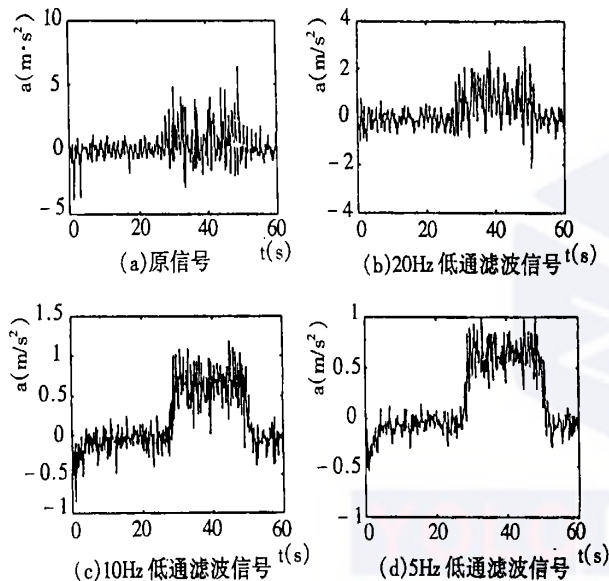


图2 不同截止频率的低通滤波信号

可以用不同截止频率的低通滤波器对已测得的加速度信号进行滤波,根据滤波结果来确定合理的传感器通带。设计三个 Chebyshev-I 型低通滤波器,通带 1dB 截止频率分别为 10、5 和 2.5Hz,阻带起点分别为 20Hz、10Hz 和 5Hz,阻带最小衰减为 30dB,分别对同一加速度信号进行滤波,结果如图 2 所示。可以看出,信号的幅度分别下降到原幅度的 30%、15% 和 12%,由此可以推算传感器的量程分别为 6、

3 或 2.4m/s²。

有效加速度信号是缓变信号,从一种稳态到另一种稳态的过渡时间一般在 1s 以上,也就是列车通过缓和曲线的时间。因此,加速度传感器的通带也不能太窄,以保证足够快的响应速度,对有效信号的提取可采用优化的数字滤波器。对传感器的量程和响应速度进行折衷考虑,传感器的截止频率在 10~20Hz 之间是一种比较合适的选择,这样传感器的量程可以定为 5m/s²。

4 结论

通过对摆式列车倾摆测量传感器测量结果的分析,确定了加速度传感器的截止频率为 20Hz,量程为 5m/s² 对于摆式列车的横向不平衡加速度测量是最佳的。虽然应变式和电容式加速度传感器,在对倾摆信号进行测量时,都存在一定的不足,但其主要原因是本测试系统中磁带机的漂移和零偏过大造成的。而在实际应用中摆式列车倾摆测控系统不会采用磁带机,从而在一定程度上克服系统的漂移和零偏造成的影响,所以本文所采用的应变式和电容式加速度传感器经多次现场实验证明可以应用在摆式列车倾摆测控系统中。

参考文献

- 1 铁道部科学研究院机辆所. 国外高速列车文集(七). 北京, 1998
- 2 吴耀庭. 铁路曲线及曲线养护. 北京: 中国铁道出版社, 1995
- 3 Anderson E. 黄志辉译. 以更高速度在既有线上运行的 X2000 列车设计. 电力牵引快报, 1997, 2
- 4 Andres Schaefer-Enkelner 王渤洪译. 机车动车用径向可调轮对转向架. ZEV+DEF Glss. Ann. 1992, 2

(上接第 4 页)

表 2 利用拟合直线方程“外推”的应用实例

f_i (MN)	X_i (μV)	X_{ci} (μV)	I_{pi} (%)	f_i (MN)	X_i (μV)	X'_{ci} (μV)	I'_{pi} (%)
0.2	2001	2003	0.100	1.2	12011	12007	-0.033
0.4	4005	4004	-0.025	1.4	14013	14008	-0.036
0.6	6007	6005	-0.033	1.6	16016	16008	-0.050
0.8	8008	8005	-0.037	1.8	18014	18009	-0.028
1.0	10003	10006	0.030	2.0	20006	20010	0.020

(0.2~1.0)MN 拟合直线方程:
 $X_c = 2.7 + 10003.5f_i$
 内插误差: $I_{pi} = 0.10\%$
 相关系数: $r = 1 - 3.5 \times 10^{-7}$
 标准偏差: $S = 3.06$

利用(0.2~1.0)MN 拟合直线方程 $X_c = 2.7 + 10003.5f_i$ 外推得到(1.2~2.0)MN 各负荷点 f_i 对应的输出计算值 X'_{ci} 与实测值 X_i 的相对误差:
 $I'_{pi} = -0.05\%$

4 小结

在标准测力仪负荷特性的实际使用中,可以根据测力仪在力标准机上定度或校准得到的若干负荷点的输出数据,采用合适的拟合方法,获得满足测力仪“内插”或“外推”使用要求的拟合直线(或曲线)方程。根据大量的统计结果表明,采用最小二乘直线和一般二次曲线两种拟合方法均可满足 0.5 级以上的应变式标准测力仪“内插”或“外推”的使用要求。利用传感器非线性指标来判别传感器校准曲线的“线度”质量,从而选择适合于该测力仪负荷特性的拟合方法,能够达到事半功倍的效果。