

叠加式力标准机及其应用

中国运载火箭技术研究院一〇一所 谢显奇

【内容摘要】 本文讲述了叠加式力标准机的原理、特点、类型、精度和应用，并介绍了性能优异的产品。解决了一些人对叠加式力标准机的模糊认识，为正确应用叠加式力标准机提供了依据。

【关键词】 叠加式力标准机 称重传感器 宽频伺服全自动

一、前言

叠加式力标准机在我国是上世纪八十年代出现的一种新型标准测力机，近年来已得到普遍认可，应用范围逐渐扩大，并成为测力、称重传感器生产的重要设备。那么，什么是叠加式力标准机呢？叠加式力标准机是用一个（或一组）比被检测力仪准确度高的测力仪作为标准，与被检测力仪受力串联，以液压或机械方式施加载荷，以确定被检测力仪力学性能的测力机。由这个定义可以引申出其工作原理：力发生器对标准测力仪和被检测力仪同时加载，由于两者受力串联，承受同一载荷。载荷大小由标准测力仪的输出来确定，当输出达到用高一级测力仪（或测力机）标定的定度值时，所施加的载荷为一标准力值，稳定该力值，记录下被检测力仪的输出。逐级加载和卸载，完成对被检测力仪的检测。叠加式力标准机基本原理决定了它与传统的力标准机如静重机、杠杆机不同，具有两个最主要的特点：一是它的依赖性。静重机等是砝码通过地心引力产生重力作为标准负荷，砝码既是力源又给出了力值大小。叠加式力标准机则不然，它的液压或机械力发生器仅作为力源，力值大小是由标准测力仪确定的。标准测力仪则需要到高一级的测力机上去检定，得出它的力学特性才能用来确定力值。因之它需要准确度更高的力标准机向它传递力值，这就是它的依赖性。二是它的加载稳定性，由于叠加式力标准机加载和力值分别由力发生器和标准测力仪确定，加载过程是力发生器实施加载，标准测力仪实时确定并指示加载力值。如要达到所需加载力值，标准测力仪必须把加载值反馈给力发生器，以调节加载值的大小。加载调节是一个动态过程，达到所需力值则需要一个稳定时间。如要达到高的力值精度，就需要高的稳定度和尽可能长的稳定时间。这个要求对传统的静重机、杠杆并不特别突出，加上砝码就会得到一个稳定力值，对叠加机却是一个很关键的问题。叠加式力标准机必须解决加载稳定，正是因为解决了加载稳定性问题，叠加式力标准机才得到认同并获得了发展。但对稳定问题也不要过分苛求，如要求像静重机那样长时间的高稳定度，它不但带来技术上的难度，也会对测量造成负面影响。稳定时间只要满足标准测力仪和被检测力仪的加载响应时间，同时满足采样时间就可以了。

叠加式力标准机是基于传感器技术和电子技术高度发展基础上产生的，现在有不少高精度，高稳定的应变式传感器和仪表可用做标准测力仪，这使它的存在和发展具备了先决条件。叠加式力标准机同其他力标准机一样是力学领域的基础设备，由于它结构简单、工作可靠、工作效率高，并且具有较高精度和较低价格而得到迅速推广应用。

二、基本概念

叠加式力标准机不同于传统力机的几个基本概念分述如下：

1. 标准传感器

在叠加式力标准机上用做标准测力仪的传感器。

2. 标准值

用准确度等级比叠加式力标准机高的标准测力仪对叠加机定度的值（也可以是标准传感器在高一级的测力机上的检定值），它是标准传感器输出与力值相对应的一组（或几组）数值，可以有量纲，也可以无量纲。

3. 加载值

叠加式力标准机使用时，加、卸过程中，标准传感器输出实时显示的数值，它指示了加卸载的实际力值大小。它与标准值一样，可以有量纲，也可以无量纲。

4. 稳定度

在规定时间内，加载值的变化程度（变化范围），一般用它与满量程的百分比表示。

5. 采样精度

检测数据采集时，加载值的准确程度，也就是采样时加载值偏离标准值的程度。一般用加载值与标准值的差值对满量程标准值的百分比表示，它体现了采样时力值的准确度。

实际上，采样精度给定了一个采样范围，因为这个范围内，在哪一个值上达到规定的稳定时间都可采样，而哪个数值上满足要求是随机的。例如，采样精度为 0.001%是指：若满量程标准值为 200000，在加载值为 199998，199999，200000，200001，200002 这五个数中任一个数上稳定时间达到规定要求时进行采样，采样精度就是 0.001%，而不是采样时具体的某一个加载数值与标准值之差对满量程标准值的百分比。

6. 零误差采样

检测数据采集时，加载值正好为标准值，即加载值与标准值的偏差为零。

例如，标准值为 100000，加载值只有在 100000 这个数值上稳定时间达到规定要求才进行采样，称为零误差采样。

三、叠加式力标准机的类型及工作原理

1. 类型和产品

叠加式力标准机从加载方式上分有液压式和机械式；从加载控制上分有手动、压电陶瓷全自动、宽频伺服全自动；从结构形式上分有单纯压式、拉压式和检吊钩秤、轮轴秤等专用机。就国内生产

的叠加式力标准机而言，隶属于中国运载火箭技术研究院一〇一所的北京协力衡科技有限责任公司，生产的DL型最为优异。其产品有以下优点：

a、规格品种及功能齐全：DL型叠加式力标准机为液压式，目前已生产了5T、10T、20T、30T、50T、60T、100T、200T、500T叠加机，有压式和拉压式，有手动、半自动、全自动，其立柱间距宽，可放置能容纳多个传感器的高低温箱。还生产了多台检吊钩秤、轮轴秤的专用机。

力机具备检测各种传感器的通用性，可进行传感器的线性、滞后、重复性或综合误差检测、灵敏度检测、蠕变和蠕变恢复检测、以及高低温性能检测。

b、力机性能好，一般首检精度为0.02%；手动每30秒稳定度为 $\pm 0.003\%F.S$ ，自动每30分钟或更长时间稳定度优于 $\pm 0.003\%F.S$ ；自动采样精度 $\pm 0.002\%F.S$ 或 $\pm 0.001\%F.S$ ；予压一次所需时间1分钟左右，对于五级检测，一次进回程8分钟左右，自动快速检测一次进回程5分钟左右。

工作可靠，故障率极低，一般使用数年，无故障发生，有的用户一天24小时工作，曾持续使用1个月以上。

c、测试空间调节和加载由两个独立的传动机构和加载系统完成。分别满足小负荷、大位移量、快速要求和大负载、小位移、高稳定要求。

d、全自动采用了宽频伺服加载系统，一套机构完成粗加载，精加载，调节和稳定。加载油缸活塞位移量最小可达3~4纳米，调节范围为1~40K，即活塞最大位移量可为最小位移量的40000倍。活塞移动量没有限制，可以满足各种不同变形量传感器检测需要。

e、压电陶瓷控制叠加式力标准机，精加载、调节、稳定都通过压电陶瓷的变形来实现。计量部门对它检定发现方位误差大，达不到要求。分析认为可能是由于元件变形的不一致性，改变了受力面的平面度，造成方位不好。如分析属实，则是一个固有缺陷。DL型力机则不然，加载时油缸活塞移动，受力面水平位移，不改变受力面的水平度，进而保证了力机精度。

f、适时监控，多层保护，DL型力机加载过程可以随时监控，出现问题能及时报警并进行提示，保证了加载安全性。同时力机还有压力保护、行程保护等多套保护措施，可以有效防止超载，保护传感器不被压坏。这是机械加载系统难于做到的。

g、液压加载避免了机械加载因磨损产生的精度降低和满负荷值降低，使用寿命长，DL型力机有的已使用了十七、八年，现在还在正常工作。

h、采用了航天密封技术，基本上做到了无泄漏。

由于DL型力机的高质量、高性能，赢得了用户的信任。已售出120余台，遍及全国15个省市近50个单位。

2. 工作原理:

下面再以DL型力机为例简述叠加式力标准机的工作原理：

工作前，把标准传感器的标定值输入计算机作为设定值。工作开始后，伺服电机启动，自控泵给油缸增压，油缸活塞移动，标准传感器和被检传感器同时受力，传感器输出信号分别由标准表和

检测仪表发送给计算机，计算机计算标准传感器输出信号（加载值）与设定值的差值，并根据一套算法计算控制脉冲的频率及电机的转动方向，然后通过控制板向脉冲自动跟踪系统发出该频率的脉冲，进而控制电机的转速与方向。（见图 1）。

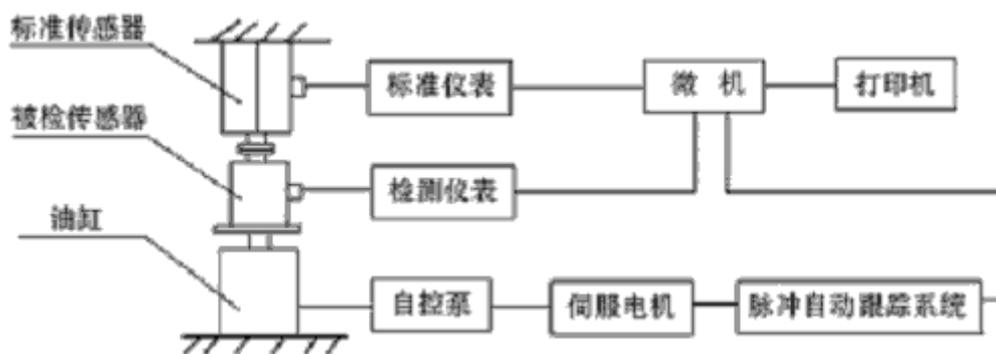


图 1

当差值大时，电机转动速度快，差值小时电机转速慢。差值为正，电机正转；差值为负，电机反转。加载值接近标准值时，电机转速变得很慢，使加载值缓慢逼近并达到标准值。当加载值超过标准值，电机反转，加载值回到标准值，电机始终处于运转状态，保证加载值稳定于设定值。此时所施加的力值为一标准力值，计算机采集并记录被检传感器的输出值。如此，逐点完成检测。

四、叠加式力标准机的精度

JJG734—2001 检定规程把叠加式力标准机规定了三个精度等级：0.03，0.05，0.1。最高精度等级的力值误差为 0.03%。这几个精度等级是怎样确定的呢？确定的依据是叠加式力标准机的误差来源。那么，叠加机有哪些误差来源呢？误差源基本上有以下几个方面：

- a、机械加工精度（机械结构的传力精度）；
- b、力发生器的加载准确度和稳定性；
- c、标准传感器的精度；
- d、标准传感器二次仪表（标准表）的精度和分辨率；
- e、环境因素影响（主要是环境温度影响）。

机械加工精度不够高一般会引起方位误差，如若产生大的重复性误差，对测力机是致命的，不允许的。按现在的加工能力和工艺技术水平，可以达到相当高的加工装配精度，只要达到检定规程的要求，机械结构对传力带来的误差很小，可以不考虑。

现在无论是机械加载还是液压加载，可以准确的施加任一力值，加载稳定度可达到十万分之一。故力发生器的加载误差也可以不考虑。

电子技术迅速发展，使仪表有了很高的精度和分辨率。有许多高性能的仪表可供选择，标准表带来的误差可以忽略不计。

环境因素可以进行控制，使它们对力机精度的影响可以减小到忽略不计。这样，在上面所说的条件得到满足的情况下，叠加式力标准机的精度主要取决于标准传感器。

下面，再把标准传感器各项性能对叠加式力标准机的精度影响分述如下：

非线性：如果采用定点加载，即按各标定点的标准值加载，标准传感器非线性对力机带来误差可以消去。非定点加载，即按各标定点之间的插值加载，将把标定点之间的小线性误差带到力机的力值误差中去，引起小的力值误差，加大标定点密度，可使这一误差进一步缩小。

滞后：使用时，进程用标定值的进程加载，回程用标定值的回程加载。标准传感器滞后对力机产生的误差基本可以消除。

重复性：标准传感器的重复性误差要全部带到力机的力值误差中去。

零点温度系数和灵敏度温度系数：如果环境温度控制在允许的范围內，使力机使用时温度与标定温度一致，它们对力机产生的误差也可略去不计。

蠕变：当使用时的加载时间控制到与标定时时的加载时间大体一致，蠕变对力机产生的误差也可忽略。

长期稳定性：标准传感器的长期稳定性误差要带到力机的力值误差中去。

标准传感器各项性能指标对叠加式力标准机力值误差的影响简单示于下表（X无影响，√有影响）：

线性	X（或小量）
滞后	X
重复性	√
零点温度系数灵敏度温度系数	X
蠕变	X
长期稳定性	√

综上所述，标准传感器各项性能误差中主要有重复性误差和长期稳定性误差带到叠加式力标准机的力值误差中去。

国内叠加式力标准机所使用的标准传感器，基本都是德国 HBM 公司 C3H3 型，它的精度等级是 0.02 级，重复性误差 $\leq 0.01\%$ ，根据多年的使用经验和试验数据，它的年长期稳定性误差一般与重复性误差相当，约为 0.01%，有的到 0.015%。因此叠加式力标准机精度上限定到 0.03%是可靠的。如果标准传感器重复性误差和年长期稳定性误差都在 0.01%之内，力机精度可以达到 0.02%。也有性能好的标准传感器，其重复性误差和年长期稳定性误差都小于 0.005%，力机精度达到 0.01%也是

可能的。此外，缩短检定周期，可以减小长期稳定性误差，提高力机精度。

我们认为：叠加式力标准机最高精度一般应为 0.03%，特殊要求并采取相应措施，可以达到 0.01%。

五、0.03 级的叠加式力标准机能否检定 0.02 级的称重传感器？

这个问题从叠加式力标准机一出现就不断有人提出来，现在还是有不少人提出质疑。对这个问题的回答是肯定的，无论是国内还是国外都是这样做的。而从力值传递角度上讲，上一级检定下一级，一般遵循上一级精度要为下一级精度的三倍。用精度低的测力机检定精度等级比力机高的称重传感器是乎行不通。这里有一个称重传感器特殊性：在测力机重复性好的情况下，称重传感器主要力学性能指标：线性、滞后、重复性、蠕变等对力值精度要求并不高，只有灵敏度要求用准确力值检定，而有关标准规定 0.02 级称重传感器灵敏度允许误差为 $\pm 0.1\%$ ，因此，0.03 级的叠加式力标准机检定 0.02 级的称重传感器并没有违背力值传递要求，是可行的。

叠加式力标准机重复性好时，重复性误差以外的误差可表现为两种形式：一种是力机有一个固定的系统误差，使各级加载力值偏离准确力值为一个常数。例如标准传感器单独检定，使用时可能承受的连接件、反向器的重量，定度时温度与使用时温度不一致零点温度系数引起的误差，仪表置零引起的误差等。这种误差将使检定特性曲线发生平移，见图 2。

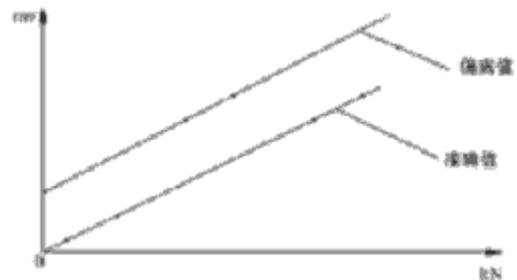


图 2

显然，这种误差对测试结果的影响，不改变传感器线性、滞后、重复性等基本性能，也就是对称重传感器基本性能测试无影响。即使这种误差更大一些，如千分之几，也不会对线性、滞后、重复性测试带来影响。

另一种误差是随力值大小呈线性变化，如标准传感器的长期稳定性误差力机方位误差等。这种误差对检定的影响可作如下表述：

准确力值为 x

实际力值为 $k x$

若被检传感器灵敏度为 s

用准确力值检定，被检传感器输出为

$$y = s x$$

用实际力值检定，被检传感器输出为

$$y = s k x$$

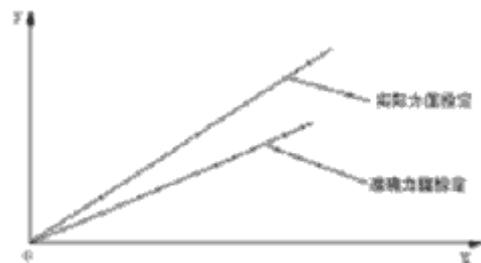


图 3

由此可以看出，这种误差产生的结果使检定特性曲线的斜率发生了变化，见图 3。

这种误差对被检传感器的灵敏度有影响，而对线性、滞后、重复性等不产生影响，仅对基本性能而言，这种误差大了也没有关系。

上面论述了称重传感器线性、滞后、重复性等基本性能对力值精度要求不高，但大的误差对灵敏度测试是不允许的，对测力传感器同样也是不允许的，对它们的检测应满足力值传递要求。不论从哪一方面讲：0.03 级的叠加式力标准机检定 0.02 级的称重传感器都是没问题的。

六、叠加式力标准机的应用

1. 称重传感器生产中的应用

现在国内各传感器生产厂配置在用的叠加式力标准机有 150 台以上，随着传感器产量的提高，叠加式力标准机的用量还在迅速增加。在大量程传感器生产领域，叠加式力标准机已基本上取代了杠杆机、静重机。叠加式力标准机的高可靠性，高效率是其他力机不可比拟的，大吨位叠加机其价格也远低于杠杆机、静重机。叠加式力标准机不象杠杆机、静重机受砝码限制，可连续加载，能够加到所要求任意一个力值，因此对传感器量程适用面宽。这些优点对生产单位尤其重要，也是叠加式力标准机得到迅速发展的主要原因。

如上所述，叠加式力标准机可对传感器进行综合性能测试（或线性、滞后、重复性单项性能测试），灵敏度测试和超载试验。一般设计叠加式力标准机在强度上都有很大富余量，因之，还可施加超过名义值的载荷。

叠加式力标准机可用来做传感器的蠕变试验。由于加载中，标准传感器和被检传感器都要发生蠕变。一般做法是：保持标准传感器的加载值不变，测出被检传感器的蠕变。其结果应是标准传感器和被检传感器蠕变之和。因此，需要预先做出标准传感器的蠕变。蠕变试验时，测试数据减去标准传感器蠕变值才是被检传感器蠕变值。如此看来，叠加式力标准机做蠕变不如杠杆机、静重机优越。

叠加式力标准机配置了高低温箱，可做传感器高低温性能试验。能放置多个传感器的大温箱，箱内温度更均匀，并且可对几个传感器同时加温（或降温），提高了工作效率。在对被检传感器加温时，要注意不要影响标准传感器，可采用加温时把温箱移至机外，温度达到要求时再移至机内，或其他隔热措施来解决。同时，还要选择被检传感器与力机之间合适的隔热材料，不然，也难于做好温度试验。

在传感器生产过程中，为了保证质量，避免返工，减小废品率，进行工序间检测是必要的。叠加式力标准机由于结构紧凑，占地面积小，且对环境条件要求不苛刻，特别适宜于生产现场使用。使它成为传感器生产中的在线检测优选设备。

2. 吊钩秤、轮轴秤检测

吊钩秤整秤一般用砝码检测，这种方法对小吨位吊秤是方便可行的。但对大吨位吊秤问题就复杂了，不仅需要大量砝码，还需要大吨位起重设备，而且还带来安全问题，于是这种方法变得不可行了。梅特勒—托利多等单位用协力衡公司生产的检测吊钩秤专用叠加式力标准机来检吊秤，已取

得很好的效果。这种专用机有足够大的拉向空间，方便吊钩秤的安装；能准确施加 $20e$ 的小载荷；能按吊钩秤检定规程要求，进行吊钩秤各项性能检测，包括转动测试（一个方位加载测试后，卸载转至另一方位，再加载测试）。现在吊钩秤检定规程已允许用力发生器检测，故用叠加式力标准机检测吊钩秤，无论从实践上还是法规上都没有障碍，可顺利实行。

治理高速公路超载，不少单位研制出了各种轮轴秤。为满足这种秤的检测需要，协力衡公司研制出了检测轮轴秤专用叠加式力标准机，已在深圳汇银公司等单位使用多年。这种叠加式力标准机有大工作台面，使被检轮轴秤可在台面上推移，实现对秤的多点加载，满足了测试要求。同样取得了满意效果。

3. 数字传感器测试

近来，国内许多厂家都在研发数字传感器，又提出了数字传感器检测手段问题。用静重机检测数字传感器是一个好方法，对小量程传感器用小静重机检测，一般厂家可以做到。但大量程传感器需要大的静重机，而大静重机价格昂贵，一般厂家难于承受，叠加式力标准机在这方面可以发挥作用。我们知道，缩短叠加式力标准机的力值传递周期，可以提高力机精度。如果使长期稳定性误差可以忽略不计，那么力机精度主要取决于标准传感器的重复性误差，而标准传感器的重复性误差达到十万分之几是不难的。所以用叠加式力标准机检定数字传感器是可行的。预计用不了多久，叠加式力标准机就会在检测数字传感器方面一显身手。

上面只是简单地讲述了叠加式力标准机的主要应用，随着新技术、新产品的出现，它还有更广阔的应用空间。

作者通信地址：北京市朝阳区太阳宫金星园 10-1071

邮政编码：100028

电 话：010-84413689

完稿时间：2006 年 12 月 18 日