

文章编号:1671-5497(2006)Suppl. 2-0073-05

力标准机加载过程砝码倒换控制方法

张学成, 周长明, 于立娟, 韩春学

(吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130022)

摘要:从理论上分析了静重式力标准机加载过程的砝码倒换的力学原理。得出力值控制精度和速度取决于执行装置的控制性能的结论。据此建立了控制模型,研究了其中的控制问题,并进行了倒码实验。结果表明,对砝码倒换的力学原理的理论分析和基于此的控制模型是正确、有效的,利用该模型控制倒码造成的力值波动不大于2%。

关键词:仪器仪表技术;静重式力标准机;砝码倒换加载;自动控制

中图分类号:TP216 **文献标识码:**A

Control method of weight rearrangement during loading process of dead weight force standard machine

Zhang Xue-cheng, Zhou Chang-ming, Yu Li-juan, Han Chun-xue

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Using the loading method by the weight rearrangement in the dead weight force standard machine may lead to reducing the weight quantity, broadening the measure range, and minimizing the machine size. However, the weight rearrangement process should not result in the precision deterioration during machine calibration and force measurement. It is requested that the force fluctuation during the weight rearrangement process should not be too strong. The mechanical principle of the weight rearrangement during the loading process in the studied machine was analyzed and the results show that the force value control precision and speed depend upon the control performance of the actuator of the machine. Based on these results a control model was established and the weight rearrangement experiment was performed. The results show that the theoretical analysis of the weight rearrangement process and its control model are correct and effective, leading to the force value fluctuation during weight rearrangement less than 2%.

Key words: technology of instrument and meter; dead weight force standard machine; weight rearrangement loading; automatic control

在传统的静重式力标准机的使用中,同一块砝码在不同的力值组合中只能使用一次,即在一个加载实验循环中,某块砝码一旦被选用,下级载荷组合中就不能再使用它^[1]。因此,为实现尽量多的力值组合不得不增加砝码的数量,造成设备

体积庞大、结构复杂、力值组合级数少等问题。依据大力值由小力值组成的原理,如果把一个较大的砝码按照某个规则分成若干个小砝码,当由小到大组成不同的力值时,这些砝码可以分时使用,从而达到以较少数量的砝码组合成较多级力值的

收稿日期:2005-12-12.

作者简介:张学成(1960-),男,教授.研究方向:机电测试与控制. E-mail:zxche@163.com

目的。如果倒换砝码过程的效果像直接施加砝码过程一样,则采用倒码方法施加载荷不会对设备的计量检测结果造成影响。在倒换砝码过程中,关键是保证力值波动尽量小以及倒码过程满足测力过程对加荷时间的要求^[2]。作者在论述倒换砝码式力标准机工作原理的基础上,探讨和研究解决倒换砝码的控制问题以及倒换砝码过程对设备工作精度的影响问题。

1 倒换砝码的基本工作原理

倒换砝码就是在从某级载荷加载到另一级载荷的过程中,需首先卸下原来已加上的某(几)块砝码,然后再加上另外合适的砝码,达到欲施加力值的要求。例如,一台 100 kN 的静重式力标准机,若取砝码组合为 50(吊挂,以下同),0.5,1,2,2,5,10,20,20,20,20 kN,共计 11 块砝码,总重力 101 kN,可以组合成最小力值为 0.5 kN,最大 100 kN,级差 0.5 kN 共 200 级的力值组合。但是从某级载荷加载到另一级载荷的过程中,由于可能在剩余的砝码中找不到适合下一级载荷的某(几)块砝码,需要首先卸下原已加上的某(几)块砝码,然后再加上另外合适的砝码,达到欲施加力值的要求,即所谓倒换砝码(以下简称倒码)。设已加荷 20 kN(吊挂计算重量),下一级载荷为 30 kN,设备的 10 kN 砝码已被施加的 20 kN 载荷占用,但剩有 20 kN 砝码。所以欲实现 30 kN 载荷,必须要首先卸下 10 kN 砝码,再加上 20 kN 砝码。这样最终实现的载荷仍然是 30 kN(20 - 10 + 20 = 30)。显然这一过程的结果像在已有的 20 kN 砝码基础上再加 1 块 10 kN 砝码一样。但是条件是,首先在卸下 10 kN 砝码过程中施加在被检测力仪上的载荷仍应保持原值(即 20 kN)不变;接下来施加 20 kN 砝码的过程中,施加在被检测力仪上的载荷应在 20 至 30 kN 之间呈单调上升,如同施加 1 块 10 kN 的砝码一样。换言之,应当通过正确的控制方法使得倒换砝码过程中的力值波动尽量小。

设加载系统各个机械环节为线性的,则倒换、加卸砝码机构可简化为如图 1 所示的物理学模型(图中略去移动笼和预加载机构的质量)。

图 1 中: k_1 为预加载装置、吊挂、和传感器系统的综合刚度; Δx_1 为预加载装置、吊挂和传感器系统受载后的总变形量; k_2 为移动笼驱动砝码系

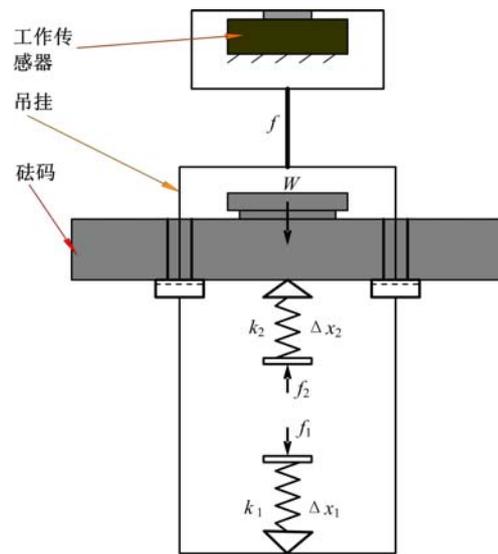


图 1 倒换、加卸砝码机构

Fig. 1 Rearranging, loading and unloading organ

统的刚度; Δx_2 为移动笼驱动砝码系统的变形量; W 为重力为 W 的砝码; f 为传感器受力值; f_1 为预加载装置产生的作用力; f_2 为移动笼驱动系统产生的作用力。倒码过程的静力平衡满足如下关系:

(1) 卸砝码时 W_1 保持力值不变

初始状态:

$$f = W, \Delta x_1 = 0, \Delta x_2 = 0, f_1 = 0, f_2 = 0$$

卸载过程中:

$$f = W - k_2 \Delta x_2 + k_1 \Delta x_1$$

$$\Delta f = f - W = k_1 \Delta x_1 - k_2 \Delta x_2$$

控制目标: $\Delta f = 0$

控制结果: $f = W + \Delta f \approx W$, 砝码 W 脱离吊挂, 作用于传感器上的作用力仍为 f 。

(2) 加某砝码时 W_1 保持力值不变

初始状态:

$$f \approx W, \Delta x_1 \neq 0, \Delta x_2 \neq 0, f_1 \neq 0, f_2 \neq 0$$

$$W \approx f_1 = k_1 \Delta x_1, f_2 = W_1 = k_2 \Delta x_2$$

加载过程中:

$$f = W_1 - k_2 \Delta x_2 + k_1 \Delta x_1$$

$$\Delta f = f - W = k_1 \Delta x_1 - k_2 \Delta x_2$$

控制目标: $\Delta f = 0$

控制结果: $f = W_1$, 砝码 W 加到吊挂上, 作用于传感器上的作用力为 $f = W_1$ 。

需要指出的是,倒换砝码的方法是建立在利用弹性力代替重力,重力与弹性力平衡原理基础上的。

2 倒换砝码的控制方法

根据胡克定律,在结构刚度确定的情况下,弹性力大小取决于位移量,位移是速度对时间的积分 $\Delta x = \int v \cdot dt$,即力值控制是速度和时间的函数,是一个动态控制过程。力值控制速度和精度取决于控制方法和控制系统的控制性能。

如上所述,倒码是在卸(或加)砝码过程的同时通过施加(或减小)弹性力来保持作用在被检测力仪上的力值不变(或单调变化)。因此,倒码过程是一个移动笼机构和预加载机构同时运动的双输入、动态力控制过程。在倒码过程中,系统的简化动力学模型如图 2 所示。图中: k 为系统的

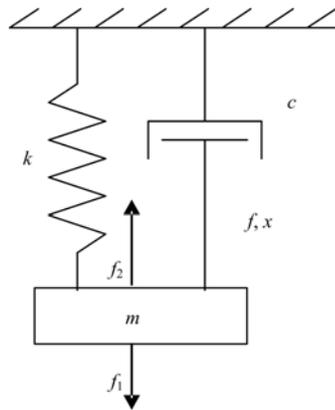


图 2 倒码加载机构简化动力学模型

Fig. 2 Dynamic model of weights rearrangement loading machine

等效刚度, $k = \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \right)^{-1}$; c 为系统各传递机构结合部位的等效黏性阻尼; f 为系统所受的外力, $f = f_1 - f_2$, 其中 f_2 为在倒码过程中移动笼机构向上托起砝码所用的力, 而 f_1 为在这一过程中为了保持吊挂总的受力恒定而由加载机构施加的反方向的力, 依据牛顿力学定律可得如下的数学模型^[3]

$$\begin{cases} mx'' + cx' + kx = f(t) \\ f(t) = f_1(t) - f_2(t) \end{cases}$$

由于 $C > 0$, 因此倒码加载机构可等效为 1 个二阶衰减系统。倒码的目标就是保证总有效输入 $f(t) = 0$ 。由于力标准机加荷过程的时间以数十秒计, 使用中可以把惯性力忽略; 又由于 C 较小, 因此倒码加载机构实际上可以按照比例系统处理^[4]。

为实现对加载机构的控制, 根据经济、高效原则设计了控制系统, 如图 3 所示。

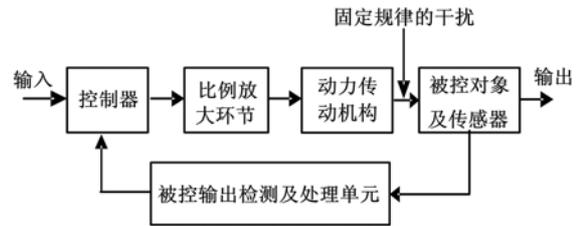


图 3 控制系统倒码过程框图

Fig. 3 Block diagram of weight rearrangement process of control system

分析上述系统, 首先系统有 2 个输入, 把其中 1 个作为干扰输入处理。其次, 构成系统的各个环节除了力值检测反馈外均可以作为比例放大环节处理, 实施简单的比例控制。高精度测力仪通常是一个大滞后系统, 为了解决仅采用测力方法反馈可能造成的加荷控制速度过慢的问题, 在系统中再增加一个位移控制检测环节。实际应用时, 首先由位移控制快速实现砝码的预加卸过程, 然后再由力值控制完成基于模糊控制原理的力值的精密稳定跟踪控制^[5]。

3 倒码实验

为验证倒码过程的正确性以及倒码对工作精度、效率的影响, 在所研制的试验装置上进行了实验。试验装置是一台 100 kN 的静重式力标准机。其基本结构组成和工作原理如图 4 所示。其砝码组合为 20, 20, 20, 20, 10, 5, 2, 2, 1, 0.5 kN。它们放置在设备的固定笼上。被测传感器放置在位于顶部的承载横梁上, 通过电动机可以调整承载横梁的上下位置。通过移动笼的上下运动可以实现砝码在固定笼与吊挂之间的切换(从固定笼上取下砝码, 根据需要将其放置在吊挂上, 或者从吊挂上取下放回固定笼)。移动笼的上下移动由位于底部的机电传动系统完成。同样位于主机底部的预加载装置与移动笼一起可以完成倒换砝码功能。倒码过程中的力值检测由串接于吊挂上的控制传感器实现。通过倒换砝码, 可以实现最小分级为 50 kg 的载荷级数组合。倒换砝码功能是当设备的砝码组合不能满足检测需要时, 利用此功能组合出需要的载荷级数, 可大大减小设备的体积、增加检测级数。

采用上述控制方法, 通过改变控制参数, 力值波动可以控制在适当的范围内, 如图 5 所示。大量实验结果表明: 如果允许倒码时间足够长, 力值波动可以控制在当级载荷的 2% 以内, 但是倒码

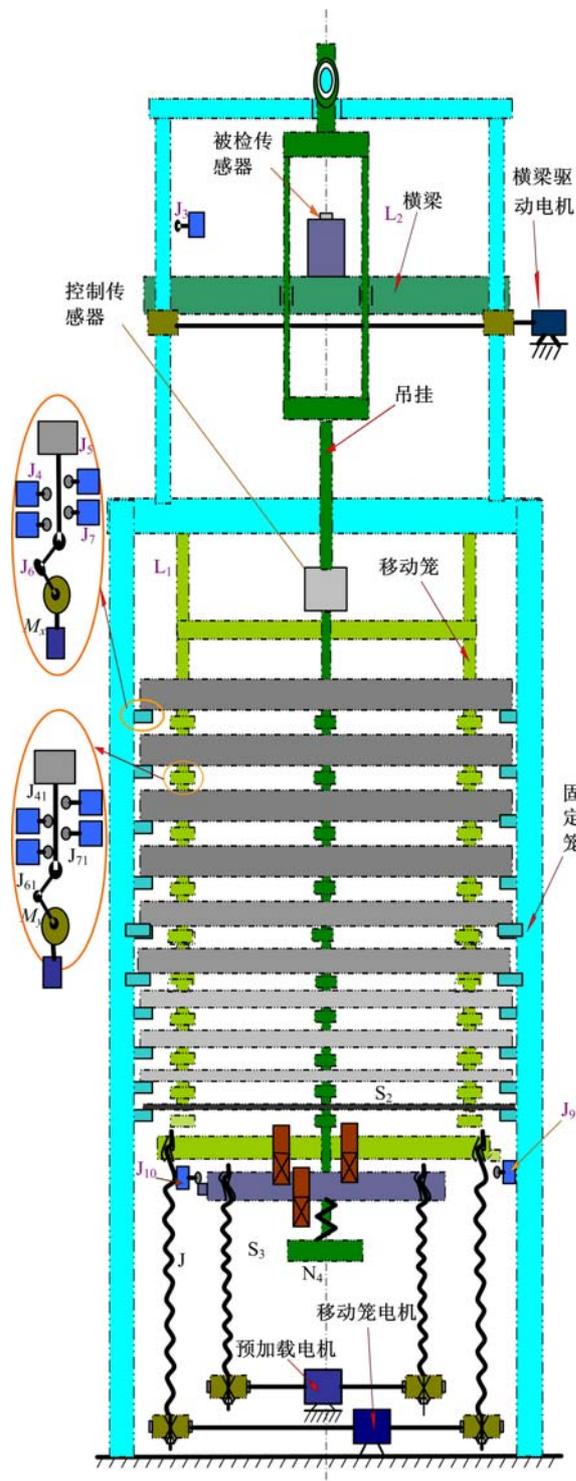
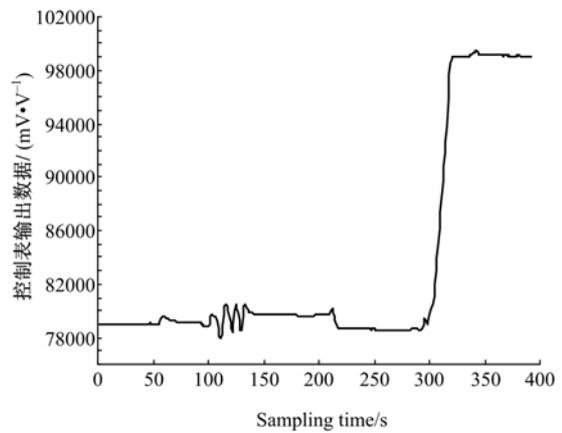


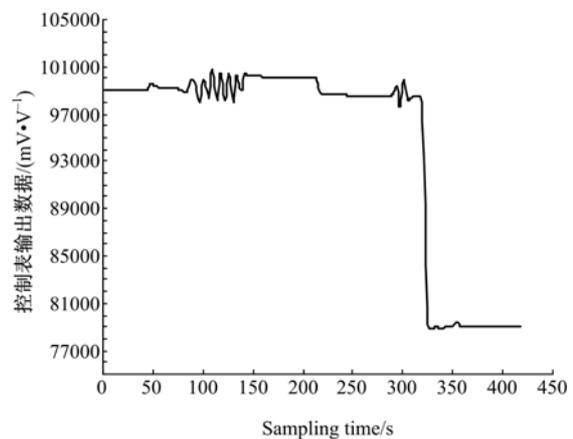
图 4 100 kN 静重力标准机

Fig. 4 Dead weight force standard machine of 100 kN
时间长将影响设备的工作效率。

传感器负荷特性试验时倒码和不倒码的比较结果(同一只传感器在同样的环境下)如表 1 所示。传感器规格为 10 t, C 级称重, 检定精度 0.03% FS, 灵敏度 2.15 mV/V; 使用指示仪表: 2000 标准负荷测量仪。控制系统使力值波动小



(a) 加载倒码过程



(b) 卸载倒码过程

图 5 加卸载倒码过程

Fig. 5 Loading and unloading weight rearrangement process

于当级载荷的 10%, 加荷时间基本遵循标准规定。按国家标准计算得到如表 1 所示的实验结果: 有倒码过程时, 滞后为 0.026% FS, 重复性为 0.0003% FS, 非线性为 0.019% FS; 无倒码过程时, 滞后为 0.026% FS, 重复性为 0.001% FS, 非线性为 0.021% FS。

根据如同表 1 的大量试验数据分析可知, 有倒码的实验结果与不需进行倒码的实验结果基本相同, 倒码方法对 C 级传感器的检测不会造成明显误差。

4 结 论

(1) 倒换砝码的加载方法是一种重要的静重力标准机技术手段, 它可以减少砝码数量、增大测量范围、减小设备体积。

(2) 在对倒换砝码的力学过程进行分析的基础上, 建立了倒码过程的力学模型和实时控制模

表 1 实验数据记录
Table 1 Note of experiment data

| 载荷/N | 不倒换砝码/(mV · V ⁻¹) | | | 倒换砝码/(mV · V ⁻¹) | | |
|-------|-------------------------------|----------|----------|------------------------------|----------|----------|
| | 循环 1 | 循环 2 | 循环 3 | 循环 1 | 循环 2 | 循环 3 |
| 0 | -0.00001 | -0.00001 | 0.00001 | 0.00001 | 0.00000 | 0.00001 |
| 1000 | 0.21570 | 0.21569 | 0.21571 | 0.21573 | 0.21569 | 0.21570 |
| 2000 | | | | 0.43161 | 0.43156 | 0.43158 |
| 3000 | 0.64742 | 0.64742 | 0.64743 | 0.64745 | 0.64744 | 0.64745 |
| 4000 | | | | 0.86321 | 0.86318 | 0.86321 |
| 5000 | 1.07902 | 1.07902 | 1.07902 | 1.07903 | 1.07903 | 1.07904 |
| 6000 | | | | 1.29471 | 1.29469 | 1.29472 |
| 7000 | 1.51050 | 1.51049 | 1.51050 | 1.51049 | 1.51047 | 1.51050 |
| 8000 | | | | 1.72607 | 1.72604 | 1.72609 |
| 9000 | 1.94183 | 1.94183 | 1.94182 | 1.94179 | 1.94175 | 1.94179 |
| 10000 | 2.15729 | 2.15727 | 2.15729 | 2.15720 | 2.15718 | 2.15720 |
| 9000 | 1.94205 | 1.94203 | 1.94204 | 1.94198 | 1.94196 | 1.94197 |
| 8000 | | | | 1.72648 | 1.72646 | 1.72649 |
| 7000 | 1.51099 | 1.51097 | 1.51098 | 1.51093 | 1.51090 | 1.51093 |
| 6000 | | | | 1.29525 | 1.29523 | 1.29526 |
| 5000 | 1.07958 | 1.07958 | 1.07959 | 1.07958 | 1.07956 | 1.07957 |
| 4000 | | | | 0.86374 | 0.86370 | 0.86372 |
| 3000 | 0.64789 | 0.64789 | 0.64789 | 0.64790 | 0.64786 | 0.64789 |
| 2000 | | | | 0.43185 | 0.43181 | 0.43184 |
| 1000 | 0.21594 | 0.21593 | 0.21593 | 0.21601 | 0.21598 | 0.21601 |
| 0 | 0.00000 | -0.00002 | -0.00001 | -0.00003 | -0.00005 | -0.00002 |

型,实验证明了力学分析和控制模型是正确的。

(3)通过在静重式力标准机上的实际应用,表明通过正确合理的控制算法,倒码过程的力值波动度可以控制在 2% 以内。

(4)已经进行的大量实验结果证明,检测 C 级传感器时,倒换砝码加载方法的力值波动度在 10% 以内不会造成测力误差。

参考文献:

- [1] 李庆忠. 负荷传感器检定测试技术[M]. 北京:中国计量出版社,1990.
- [2] Metrological Regulation of Load Cells[S]. OIML, 1989
- [3] 张义民. 机械振动力学[M]. 长春:吉林科学技术出版社,2000.
- [4] 王积伟,吴振顺. 控制工程基础[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [5] 张学成,荆凤林,陶汉铭. 发动机推力测量校准中加载模糊控制[J]. 推进技术,1999,20(1):95-98.
Zhang Xue-cheng, Jing Feng-lin, Tao Han-ming. Fuzzy load control in calibration of rocket thrust measurement[J]. Journal of Proulsion Technology, 1999, 20(1):95-98.