

# 3MN 叠加式力标准机的研制

唐纯谦<sup>1</sup>, 高富荣<sup>2</sup>, 陈明华<sup>2</sup>, 陈世超<sup>1</sup>, 徐尹杰<sup>1</sup>, 谭洪辉<sup>2</sup>, 易伟<sup>1</sup>

(1.中国测试技术研究院, 四川 成都 610021; 2.广东省计量科学研究院, 广东 广州 510405)

摘要: 运用“平面二次包络环面蜗杆传动”原理, 研制一种“轴向可调隙蜗轮蜗杆传动副”, 将它应用到机械力源动力传动的伺服电机减速机构中, 驱动精密滚珠丝杠上的动横梁来完成对参考力传感器的粗加载。运用物理学中的“逆压电效应”原理, 采用压电陶瓷材料和专门的工艺方法制作成的力传感器微变形补偿装置—压电陶瓷力发生装置, 并将它应用到机械力源的精加载闭环控制中, 实现了大载荷下参考传感器微小力值变化的精确控制。研制最大负荷为 3MN 的叠加式力标准机。

关键词: 平面二次包络环面蜗杆传动; 压电陶瓷; 逆压电效应; 压电陶瓷力发生装置; 参考传感器; 机械力源; 叠加式力标准机

中图分类号: TP212.12; TB931

文献标识码: A

文章编号: 1672-4984(2008)02-0013-03

## Preparation of 3 MN build-up force standard machine

TANG Chun-qian<sup>1</sup>, GAO Fu-rong<sup>2</sup>, CHEN Ming-hua<sup>2</sup>, CHEN Shi-chao<sup>1</sup>, XU Yin-jie<sup>1</sup>, TAN Hong-hui<sup>2</sup>, YI Wei<sup>1</sup>

(1.National Institute of Measurement and Testing Technology, Chengdu 610021, China;

2.Guangdong Institute of Metrology, Guangzhou 510405, China)

Abstract: Based on “plane double enveloping hourglass worm gearing” technology, one kind of “axial clearance adjustable worm wheel and worm transmission pair” was developed. In the reducing mechanism of servomotor which was the power transmission of mechanical forcing device, the transmission pair could drive the crossbeam on the precise ball screw. This could be used to load the reference force transducer roughly. According to the “converse piezoelectric effect” principle in physics, piezoelectric ceramic force generator was prepared with piezoelectric ceramic materials and special technological methods, which was a micro-deformation compensator set. In the close-loop control system for precision loading of the forcing device, it could be used to precisely control the tiny force change of the reference force transducer under large load. At present, one build-up force standard machine with the maximum load capacity of 3MN was prepared.

Key words: Plane double enveloping hourglass worm gearing; Piezoelectric ceramic; Converse piezoelectric effect; Piezoelectric ceramic force generator; Reference transducer; Mechanical forcing device; build-up force standard machine

## 1 引言

近年来, 随着传感器技术的快速发展, 1 MN 以上的高精度大力值传感器已经面市。采用力传感器(或并联)作为参考标准与被检传感器串联, 以液压或机械方式施加负荷的力源装置也相继问世, 国际上将此种类型的力产生装置称之为叠加式力标准机<sup>[1]</sup>。由于叠加式力标准机结构简单造价相对较低, 因此被世界各国采用。随着力传感器和力源装置技术性能的提高, 叠加式力标准机的计量性能也得到了很大的提高。目前国际上不同力源类型的叠加式力标准机的研究现状见表 1。

收稿日期: 2007-10-25; 收到修改稿日期: 2008-01-07

作者简介: 唐纯谦(1951-), 男, 重庆市人, 高级工程师, 主要从事力值计量基、标准的研究。

表 1 不同力源类型的叠加式力标准机现状表

力源类型	最大负荷	测量范围	力值不确定度 (包含因子 k=2)	备注
机械力源	1 MN	100 kN~1 MN	0.03%	比较式 <sup>*</sup>
机械力源	3 MN	30 kN~3 MN	0.02%	叠加式 <sup>**</sup>
液压力源	1 MN	100 kN~1 MN	0.05%	比较式
液压力源	10 MN	100 kN~10 MN	0.1%	叠加式

注: \* 采用一个力传感器作为参考标准<sup>[2]</sup>; \*\* 本案

目前, 国际上采用机械传动方式加载的叠加式力标准机量程在 1 MN 及以下, 力源的负荷波动性(0.01~0.02)%/30 s, 力标准机的力值不确定度 0.03%~0.05%<sup>[3-4]</sup>。量程大于 1 MN 的叠加式力标准机都是采用液压传动方式加载的力源, 力源的负荷波动性 0.02~0.03)%/30 s, 力标准机的力值不确

定度 0.05%~0.1%<sup>[3-4]</sup>。

## 2 工作原理

机械传动分为“运动传动”和“动力传动”两大类<sup>[5]</sup>,前者主要用于精密机床、仪器仪表等作精密分度的运动机构,后者主要用于机械设备作负载动力传动的减速器<sup>[6]</sup>。本课题是将这两大类机械传动学科的“精密”与“负载”传动的理论与技术相结合,运用“平面二次包络环面蜗杆传动”技术原理<sup>[7]</sup>,研制一种“轴向可调隙蜗轮蜗杆传动副”,将它应用到大载荷动力传动的伺服电机减速机构中,用它驱动精密滚珠丝杠上的动横梁来完成对参考传感器的粗加载。运用物理学中的“逆压电效应”原理<sup>[8]</sup>,采用压电陶瓷材料和专门的工艺方法制作成的力传感器微变形补偿装置——压电陶瓷力发生装置<sup>[9]</sup>,并将它应用到机械力源的精加载闭环控制中,实现大载荷下参考传感器微小力值变化的精确控制。研制最大负荷为 3MN 的叠加式力标准机。力标准机的工作原理见图 1。

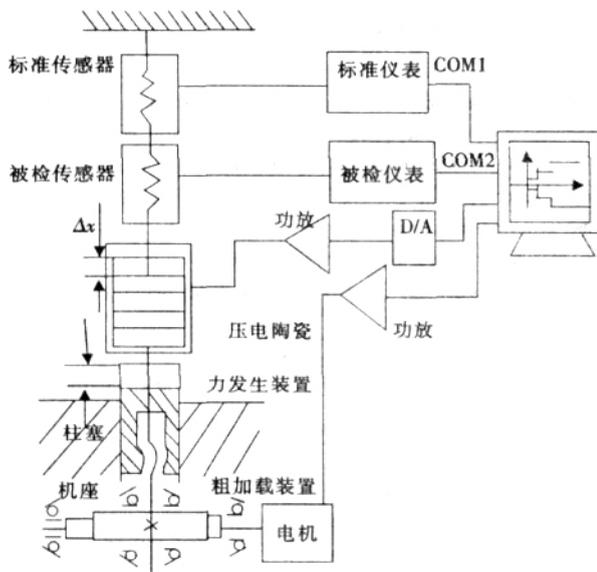


图 1 力标准机工作原理图

## 3 结构设计

### 3.1 主体

力标准机主体采用了四根导向光柱固定上、下横梁和工作平台构成的高刚性框架结构。移动横梁由四根精密滚珠丝杠副传导向同一方向运动,既可产生对上横梁的拉向作用力,又可产生对下横梁工作平台的压向作用力。移动横梁内装有可调隙精密直线轴承,在四根导向光柱上作垂直直线运动,由于导向柱的作用,最大限度地减小了移动横梁加载时

对力传感器可能产生的非轴向负荷的影响<sup>[10-11]</sup>,同时有效地保障滚珠丝杠的平稳运行。

滚珠丝杠副与移动横梁具有最大负荷为 3.6MN 的负载能力,移动横梁额定负荷下的变形量小于 0.5mm/m,无负荷时的水平度小于 0.1/1000,额定负荷下的水平度小于 0.2/1000,工作行程内的升降速度 0~50 mm/min 连续可调。力标准机的主体结构见图 2。

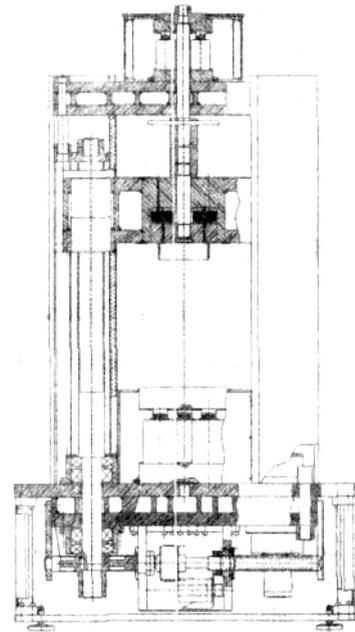


图 2 力标准机主体结构图

### 3.2 加载系统

#### 3.2.1 粗加载系统

利用伺服电机驱动减速机构,经同步带驱动四组蜗轮蜗杆及四根精密滚珠丝杠上的动横梁来完成对参考传感器实施额定负荷 90%的粗加载。

研制的“轴向可调隙蜗杆传动副”传动效率和传动精度较高、空回量较小、轴向可调隙;在相同的传动速比下,它的传动精度寿命和强度寿命是圆柱蜗杆传动副的 2~3 倍,传动噪声低 1~2 倍;它的应用主要是提高整机的动态稳定性、工作效率和使用寿命<sup>[5-7]</sup>。

#### 3.2.2 精加载系统

将压电陶瓷力发生装置与参考传感器同轴安装于系统中,由微机控制系统控制压电陶瓷力发生装置来完成对参考传感器实施额定负荷 10%精加载的控制。力标准机精加载控制系统的工作原理见图 3。

### 3.3 控制系统

控制系统主要由两个部分组成,一是伺服电机

粗加载控制部分: 微机通过一多轴驱动控制器来完成对伺服电机的速度和方向的控制, 达到粗加载的控制目的; 二是系统精加载控制部分: 微机通过精确调控一 D/A 转换器的输出电压 (0 V ~5 V), 经功率放大器放大后来改变作用于压电陶瓷力发生装置上的电场强度大小, 继而改变其产生的微变形量, 来达到精加载闭环控制的目的。控制系统是以参考传感器的输出作为反馈信号, 首先控制伺服电机完成对力传感器粗加载, 当达到压电陶瓷力发生装置对参考传感器微变形量的调控范围时, 系统即转向对压电陶瓷力发生装置的控制, 最终完成对力值的精确控制。压电陶瓷力发生装置对参考传感器微变形的补偿控制范围为 10 μm ~50 μm; 在参考传感器额定负荷的 (90 ~100) % 范围内, 可控性优于 0.001%。力标准机精加载控制系统的技术路线见图 3。

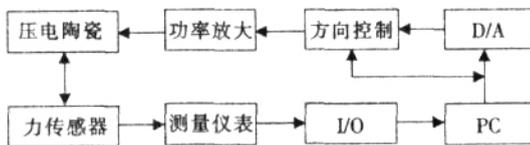


图 3 精加载控制系统路线图

#### 4 性能检测

##### 4.1 灵敏限测试

测试仪器: 标准测力仪 C6A- 5MN, No.044930102, 指示装置 2000B, No.411。

力标准机参考传感器: C3H3- 100t, No.K10541、K10543、K10545。

测试内容: 测试力标准机的灵敏限 ( 又称鉴别力) <sup>[1-2]</sup>; 测试点: 300 kN、3 MN; 灵敏限测试数据及结果见表 2。

表 2 灵敏限测试数据及结果

负荷 (MN)	指示装置示值 (kN)	负荷增量 (kN)	灵敏限 (%)
0.3	299.98~299.99	0.01	0.003
3	2 999.50~2 999.55	0.05	0.002

##### 4.2 负荷波动性测试

测试仪器: 标准测力仪 C6A- 5MN, No.044930102, 指示装置 2000B, No.411。

力标准机参考传感器: C3H3- 100t, No.K10541、K10543、K10545。

测试内容: 测试力标准机的负荷波动性<sup>[1-2]</sup>; 测试点: 300 kN、3 MN; 负荷波动性测试数据及结果见表 3。

表 3 负荷波动性测试数据及结果

负荷 (MN)	时间	指示装置示值 (kN)	负荷波动性 1 (%/min)	负荷波动性 2 (%/10 min)
0.3	10:42:30	299.97	/	
	10:43:30	299.98	0.003	
	10:44:30	299.97	0.003	
	10:45:30	299.98	0.003	
	10:46:30	299.97	0.003	0.003
	10:47:30	299.98	0.003	
	10:48:30	299.98	0.000	
	10:49:30	299.97	0.003	
	10:50:30	299.97	0.000	
	10:51:30	299.98	0.003	
3	17:36:40	2 999.44	/	
	17:37:40	2 999.46	0.001	
	17:38:40	2 999.48	0.001	
	17:39:40	2 999.46	0.001	
	17:40:40	2 999.50	0.001	0.002
	17:41:40	2 999.46	0.001	
	17:42:40	2 999.50	0.001	
	17:43:40	2 999.46	0.001	
	17:44:40	2 999.50	0.001	
	17:45:40	2 999.50	0.000	

表 4 力值重复性与力值误差测试数据及结果

负荷 (kN)	测试值 (mV/V)	标准值 (mV/V)	力值重复性 (%)	力值误差 (%)
300	0.61 196	0.61 193	0.007	0.005
600	1.22 420	1.22 410	0.006	0.008
800	1.63 240	1.63 224	0.007	0.010
1 000	2.04 045	2.04 022	0.008	0.011
1 200	0.480 359	0.480 350	0.012	0.008
1 500	0.600 391	0.600 420	0.012	- 0.005
1 800	0.720 457	0.720 480	0.011	- 0.003
2 100	0.840 518	0.840 540	0.012	- 0.003
2 400	0.960 645	0.960 570	0.009	0.008
2 700	1.080 731	1.080 650	0.008	0.007
3 000	1.200 838	1.200 690	0.009	0.012

##### 4.3 力值重复性与力值误差测试

测试仪器: 标准测力仪 C3H2- 100t, No.47208, C3H5- 5MN, No.30497; 指示装置 DMP40, No.050520008。

测试内容: 测试力标准机 3 MN 参考标准 ( C3H3- 100t, No.K10541、K10543、K10545, 三台参考传感器) 的力值重复性与力值误差<sup>[1-4]</sup>; 测试点: 300 kN ~3 MN; 其中: 300 kN ~1 000 kN 测试用标准测力仪 C3H2- 100t, No.47208, 测试日期 2008 年 1 月 18 日; 1 200 kN ~3 000 kN 测试用标准测力仪 C3H5- 5MN, No.30497, 测试日期 ( 下转第 39 页)

( Magic\_Client) 测试各项功能,同时查看、分析由网络信息包分析工具(Ethereal)抓获的 SIP 协议的数据信息来分析传送消息的工作流程是否正确。实践结果表明,本方法可以完成 Magic 软件的测试工作。

#### 参考文献

- [1] 毕厚杰,李秀川.MS与下一代网络[M].北京:人民邮电出版社,2006.
- [2] Poikselka M, Mayer G, Khartabil H, et al. IMS: 移动领域的 IP 多媒体概念和服务[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [3] 张智江,张云勇,刘韵洁.SIP 协议及其应用[M].北京:电子工业出版社,2005.
- [4] 刘韵洁,张智江.下一代网络[M].1 版.北京:人民邮电出版社,2005: 209- 213.
- [5] 龚双瑾,刘多.下一代电信网的关键技术[M].1 版.北京:国防工业出版社,2003: 15- 23.

- [6] 宋传旺,王静.浅析 SIP 协议[J].中国新通信,2007,9(7): 20- 23.
- [7] 雷恒,黄本雄.SIP 协议在下一代网络业务中的应用[J].计算机与数字工程,2007,35(1): 92- 93, 96.
- [8] 乔秀全,李晓峰,徐惠民.基于 Parlay 思想的智能业务平台[J].北京邮电大学学报,2004,27(1): 60- 64.
- [9] 王延峰,谢泽会.SIP 协议的发展及应用[J].河南科技,2007(1): 29- 30.
- [10] 顾茜.SIP 协议在 IMS 中的应用分析[J].中国多媒体通信,2006(12): 26- 28.
- [11] 靳娜.SIP 协议的研究与应用[J].计算机与信息技术,2007(12): 90- 91.
- [12] Sargento S, Valadas R, Goncalves J, et al. IP based access networks for broadband multimedia services[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(2): 146- 154.

(上接第 15 页)

2007 年 11 月 14 日。力值重复性与力值误差测试数据及结果见表 4。

#### 4.4 计量性能检测结果

力值范围: 压向 30kN ~3 000kN(拉向 50kN ~500kN);

灵敏限: 0.005%;

力值重复性: 0.015%;

力值误差:  $\pm 0.015\%$ ;

参考标准长期稳定度:  $\pm 0.01\%/15$  个月;

负荷波动性: 0.003%/30s; 0.005%/10min;

0.01%/30min。

#### 5 结束语

采用机械力源方式研制大力值叠加式力标准机获得成功。根据国内外相关研究的报道,研制的“3MN 叠加式力标准机”,克服了液压力源方式的大力值叠加式力标准机的不足,并取得以下几个方面的进展:

(1) 长时间的负荷稳定;本机在 3MN 载荷下,30min 负荷波动性不大于 0.01%。

(2) 大载荷下的高可控性;本机在 3MN 载荷下,鉴别力小于 50N,30s 负荷波动性不大于 0.003%。

(3) 宽量程范围的复现性;本机在 30kN ~3MN 测量范围内的重叠效应不大于 0.015%<sup>[1]</sup>,方位误差

(4) 本机采用了多组三台参考传感器并联及传感器分组并联分级取和的试验方法,使参考传感器组的输出得以大幅度提高(是单台传感器输出的三倍),最大载荷 3MN 时的分辨率为 6.00000(mV/V)。

#### 参考文献

- [1] JJF 1011- 2006,“力值与硬度计量术语及定义”国家计量技术规范[S].北京:中国计量出版社,2007.
- [2] 李庆忠.力值、扭矩和硬度测量不确定度评定导则[M].北京:中国计量出版社,2003.
- [3] JJG 734- 2001,“力标准机”国家计量检定规程[S].北京:中国计量出版社,2001.
- [4] JJG 2066- 2006,“大力值计量器具”国家计量检定系统表[S].北京:中国计量出版社,2007.
- [5] 黄茂林.机械原理[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [6] 杨橹.机床动力学[M].北京:机械工业出版社,1983.
- [7] 张光辉,等.平面二次包络弧面蜗杆传动的研究与应用[J].重庆大学学报,1978(4): 21- 25.
- [8] 冯端.金属物理学[M].北京:科学出版社,1975.
- [9] 电子技术情报网编.压电陶瓷应用[M].济南:山东大学出版社,1985.
- [10] 戴莲瑾.力学计量技术[M].重庆:重庆大学出版社,1990.
- [11] 唐纯谦,等.应变式标准测力仪的负荷特性在力值传递中的作用[J].实用测试技术,2002,28(4): 3- 4.
- [12] ISO376- 2004: Metallic materials- calibration of force- proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines[S].