

文章编号: 1000-8241(2015)09-0966-07

# 大容量径向偏差测量机器人装置的研制与应用

刘瑛<sup>1</sup> 陈贤雷<sup>1</sup> 郝华东<sup>1</sup> 郑国祥<sup>1</sup> 施浩磊<sup>1</sup> 许玉亮<sup>2</sup>

1. 舟山市质量技术监督检测研究院, 浙江舟山 316021; 2. 国家大容量第二计量站, 山西运城 044000

**摘要:** 针对大容量计量光学垂准线法存在的人工劳动强度大、危险系数高、准确度低等缺陷, 结合爬壁机器人的研究现状, 从机械结构、控制机构与软件设计 3 方面开展了大容量径向偏差测量机器人装置的研究。在机械结构方面着重开展了吸附机构、驱动机构、传动机构、跨越机构、传感机构的设计研究。研制出的大容量径向偏差测量机器人装置样机已应用于立式金属罐容量的计量工作, 测量结果表明: 该装置在保证测量准确度的同时, 提高了工作的安全性, 降低了人工劳动强度。(图 5, 表 3, 参 10)

**关键词:** 立式金属罐; 大容量计量; 径向偏差; 光学垂准线法; 机器人

中图分类号: TE978

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2015.09.010

## Development and application of high-capacity radial deviation metering robot

LIU Ying<sup>1</sup>, CHEN Xianlei<sup>1</sup>, HAO Huadong<sup>1</sup>, ZHENG Guoxiang<sup>1</sup>, SHI Haolei<sup>1</sup>, XU Yuliang<sup>2</sup>

1. Zhoushan Institute of Calibration and Testing for Quality and Technology Supervision, Zhoushan, Zhejiang, 316021;

2. No.2 National High-capacity Metrology Station, Yuncheng, Shanxi, 044000

**Abstract:** Since optical reference line method for high-capacity metrology are characterized by high work intensity, significant risk factors, low accuracies and other drawbacks, and with consideration to currently available technologies related to wall-climbing robots, researches include compositions of mechanical structure, control mechanism and software design are conducted for development of high-capacity radial deviation metering robot. As far as mechanical structures are concerned, researches are performed for design of absorption, driving, transmission, spanning and sensing mechanisms. The developed prototype of the high-capacity radial deviation metering robot has been applied in the capacity metrology of vertical metal tanks. On-site applications show that this new device can effectively enhance operation safety, minimize work intensity of relevant operators without sacrificing metering accuracy. (5 Figures, 3 Tables, 10 references)

**Key words:** vertical metal tank, high-capacity metrology, radial deviation, optical reference line method, robot

立式金属罐是进行石油化工产品贸易结算的主要计量器具之一, 其计量准确与否, 不仅直接关系到国内有关企业的经营结算、成本核算、能源利用等各项经济效益, 也直接关系到我国对外贸易的经济利益和国家计量信誉<sup>[1]</sup>。因此, 立式金属罐容量检定的各项研究工作具有广泛深远的现实意义。

径向偏差的测量是立式金属罐容量计量的主要检定项目之一<sup>[2]</sup>。目前常用测量方法有围尺法、光学垂准线法和全站仪法等。其中, 光学垂准线法使用的光学垂准仪是国际首推的测量仪器, 其测量精度高, 与

动式径向偏差测量仪(磁性滑车)配套使用, 测量精度在 1 mm 以内。但是, 该方法尚存在一些弊端:

(1) 在每个测量点, 工作人员需要手拉磁性滑车并保持平衡。由于测量点数一般超过 200 点, 导致测量强度较大, 检定时间长, 工作人员连续作业易疲劳。

(2) 磁性滑车需要人工目视定位至各测量点, 在高空巨大仰角情况下, 易导致定点精度不高, 测量精度难以保证。

机器人是集机构学、传感技术、控制和信息技术等学科为一体的高科技产品, 国外自 20 世纪 80 年代以

来迅猛发展,国内起步较早的是哈尔滨工业大学,目前已成功研制出壁面爬行遥控检测机器人,采用真空吸附式,通过运载小车使机器人在壁面上上下左右自由行走;上海交通大学马培荪等<sup>[3]</sup>于1996年研制出了用于油罐容积检测的磁吸附式爬壁机器人,其吸附安全性好、耐腐蚀、不会因控制部件出现故障而发生脱离的危险,另外无需外部供能,结构简单、运动可靠,履带式移动着地面积大、吸附力大,并且对壁面的弯曲度、不平整度及台阶均有较强的适应能力。清华大学田兰图<sup>[4]</sup>针对性地开展了智能检测爬壁机器人的理论与技术研究,并进行了运动性能和涡流检测效果的实验研究,实验结果表明:系统具有负载能力大、运动稳定可靠、定位精度高、自动化程度高等优点,但在运动规划和跟踪控制方面尚存在一些缺陷。辽宁石油化工大学佟仕忠等<sup>[5-6]</sup>针对传统油罐检定方法的缺陷,研制出了一种小型的立式金属罐爬壁检定机器人,采用永磁吸附三轮式结构,测控系统以单片机89S51为核心,并配备多种传感器,实施有缆遥控操作,但是在检定过程中存在油罐出现压痕等不足。

针对现有研究的缺陷,设计了一种大容量径向偏差测量机器人装置,在大容量径向偏差测量中代替人工拉动磁性滑车,达到降低劳动强度、提高大容量检定速度、提升检定效率的目的。

## 1 装置概况

### 1.1 装置构成

根据实际检定现场的需要,大容量径向偏差测量机器人装置由3部分组成:①机械部分,由永磁铁履带、微型驱动马达、主从动链轮、涡轮蜗杆减速装置、标尺、传感器和电源组成,履带的磁力强度必须保证整个测量装置贴紧罐壁;②控制部分,由控制器、单片机等组成,主要功能是控制系统之间的通讯、伺服电机的运动及姿态传感器数据读取和工作状态;③软件部分,主要由上位机控制软件、下位机控制软件及上位机和下位机之间的通讯软件组成。

### 1.2 工作原理

大容量径向偏差测量机器人装置的测量工作原理为<sup>[2]</sup>:保持光学垂准仪静止不动,启动机器人驱动电机,使动力链轮带动主动链轮按一定速度转动,带动机器人沿油罐罐壁垂直运动,并依次停于各圈板的垂直

测点处(分别选在基圆圆周的轨迹上和各圈板高度的1/4处和3/4处),读取安置在机器人上的标尺数值并记录,作为各垂直测站的径向偏差数据。第一水平测站的所有垂直测点测量完成后,将光学垂准仪和机器人移动至下一水平测站点。重复以上步骤,直至所有水平测站的垂直测点测量完毕。

### 1.3 装置应用

根据JJG 168—2005要求,检定环境条件为:非雨雪天气、风力不大于4级、相对湿度不大于85%。具体测量步骤如下:

(1)建立水平测站:根据罐体的大小,确定水平测站数(应为偶数)。周长不大于100m时,相邻水平测站间弧长不得超过3m,最小测量点数不得少于12;周长大于100m时,相邻水平测站的弧长不得超过4m,最小测量点数不得少于36。水平测站应沿圆周方向均匀分布,在垂直方向上,距任一竖直焊缝的距离不得小于300mm,且不受障碍物影响。

(2)选取垂直测点:垂直测点分别选在基圆圆周的轨迹上和各圈板高度的1/4处和3/4处。

(3)将光学垂准仪安装在第一个水平测站处。将大容量径向偏差测量机器人装置放于罐壁上,使之位于光学垂准仪的正上方。调平光学垂准仪并调整其方向,使目镜中的十字丝横线与机器人所携带的标尺的刻度线平行;调焦使目镜中标尺的刻度线清晰,此时读取数值,作为基圆的径向偏差数据。第一个垂直测点测量完毕,通过控制器微调机器人位置,并使其恢复原位,再次读数。若两次读数之差不超过1mm,则以第一次测量值为准,否则应重新测量。启动驱动电机,使动力链轮带动主动链轮按一定速度转动,从而实现机器人沿固定垂直的油罐罐壁上升或下降。保持光学垂准仪静止不动,通过控制器控制机器人使之垂直向上运动,依次停于其他各圈板的垂直测点处,调焦使目镜中标尺的刻度线清晰,读取数值并记录,作为各垂直测站的径向偏差数据。

(4)顶部圈板的最后一个垂直测量点测完之后,将机器人降至第一个垂直测量点,再次读取基圆的径向偏差数据,若前后两次的径向偏差之差小于1mm,则表明该水平测站全部测量有效,取第一次的径向偏差参与计算。

(5)若前后两次的径向偏差之差大于1mm,则本水平测站的测量从步骤(3)重新开始。

(6)第一水平测站的所有垂直测点测量完成后,将光学垂准仪和大容量径向偏差测量机器人移至下一水平测站点。重复以上步骤,直至所有水平测站的所有垂直测点测量完毕。

### 1.4 性能指标

(1)抗风能力可达到7~8级,能够垂直向上向下运动,最大行程为15~30 m(行程视油罐高度而定)。每隔0.5~1 m,停止1~2 min,向上行走15~30 m后通过控制器调节可自动返回。

(2)在爬行1 m的行程中,其定位精度偏差小于5 mm,可以随时定位,定位误差在±1 mm之内。其行走速度可调,最大速度可达7 m/min。

(3)其直线运动精度小于1°50'(偏垂直线角度),使机器人携带的标尺在光学垂准仪视野范围之内。

(4)支撑载荷除自重10 kg外,尚能携带3 kg载荷;具有可跨越不小于10 mm凸出高度的能力。

(5)机器人使用简便,便于操作人员现场使用。

## 2 机械结构

### 2.1 吸附机构

机器人采用永磁体吸附、履带式移动设计理念,具有吸附安全性能好、耐腐蚀的特点。吸附机构用于产生吸附力,保证机器人可靠地吸附在罐壁表面。机器人的吸附机能是由镶嵌在履带链条外翼板上的磁吸附块来实现的。在总吸附力和机器人爬行所需驱动功率为恒值的情况下,履带上的永磁体块数越多越好。假设履带与壁面吸附总极面积为 $A$ ,其中吸附于壁面上的永磁体共有 $n$ 块,每一块永磁体与壁面的接触极面积为 $A_i$ ,则有:

$$A = nA_i \quad (1)$$

$$F_i = \frac{F}{n} \quad (2)$$

$$F = \frac{B^2 A}{2 \mu_0} \quad (3)$$

式中: $F$ 为吸引力,N; $F_i$ 为每一块永磁体与壁面的吸附力,N; $B$ 为气隙密度, $\text{wb}/\text{m}^2$ ; $\mu_0$ 为真空绝对磁导率, $4 \pi \times 10^{-7} \text{ H}/\text{m}$ 。

从式(1)可以看出,永磁体块数越多,则单块的吸附力越小,更易于驱动机构驱动履带使该块永磁体脱离壁面。然而,块数多少受到机械性能的限制,机器人

的最大结构尺寸也限制了磁极总面积。

此外,由于罐壁上有防腐涂层,在永磁铁和罐壁之间形成间隙,势必影响吸附机构的吸附力,由式(1)可得,这些材料对吸附能力的影响体现在磁导率这一参数中。在电磁学中,磁导率是一种材料对一个外加磁场线性反应的磁化程度。其他非铁磁性材料的磁导率近似空气绝对磁导率,罐壁油漆和氧化层对永磁铁吸附能力基本没有影响,变化在于油漆厚度导致间隙变化对磁吸附力的影响。由式(2)可得磁吸附力公式为:

$$F = \frac{S_g}{2 \mu_0} \left[ \frac{B + \mu_{\text{rec}} H_d}{\frac{S_g}{S_m} + \left( \mu_{\text{rec}} + \frac{B}{H_d} \right) \frac{f L_g}{L_m}} \right]^2 \quad (4)$$

式中: $F$ 为吸附力,N; $S_g$ 为工作气隙截面积, $\text{m}^2$ ; $S_m$ 为永磁铁截面积, $\text{m}^2$ ; $\mu_{\text{rec}}$ 为工作气隙相对磁导率, $\text{H}/\text{m}$ ; $H_d$ 为材料最大磁能点对应的磁场强度, $\text{A}/\text{m}$ ; $f$ 为磁阻系数, $1/\text{H}$ ; $L_g$ 为工作气隙长度, $\text{mm}$ ; $L_m$ 为永磁铁长度, $\text{mm}$ 。

由于永磁体的工作点和尺寸是确定的,因此吸附力 $F$ 和工作气隙长度 $L_g$ 之间的关系可简化为:

$$F = \frac{1}{(a + b L_g)^2} \quad (5)$$

$$a = \frac{S_g / S_m}{\left( \mu_{\text{rec}} + \frac{B}{H_d} \right) H_d \sqrt{2 \frac{S_g}{\mu_0}}} \quad (6)$$

$$b = \frac{f / (H_d L_m)}{\sqrt{S_g / (2 \mu_0)}} \quad (7)$$

由于永磁体的工作点、尺寸都是确定的,因此 $S_g$ 、 $S_m$ 、 $H_d$ 、 $L_m$ ,都是确定的,而 $\mu_{\text{rec}}$ 、 $B$ 、 $\mu_0$ 、 $f$ 均为常数,则 $a$ 、 $b$ 均可视为常数。

从图1可以看出,磁吸附力 $F$ 随着工作气隙 $L_g$ 的平方而衰减,在5 mm范围后趋于平稳<sup>[7]</sup>。一般罐壁的涂层或氧化层均在1 mm左右,在设计时需合理选取受力。

综上所述,经理论计算与实际运行,采用图2所示的吸附结构设计。机器人实际爬行过程中共有60块永磁铁可以使其处于有效使用状态,每块的理论吸力为0.8 kg,其所产生的静摩擦力大于设计的机器人与悬挂电缆自重(约11 kg)。永磁铁的吸力可以克服爬

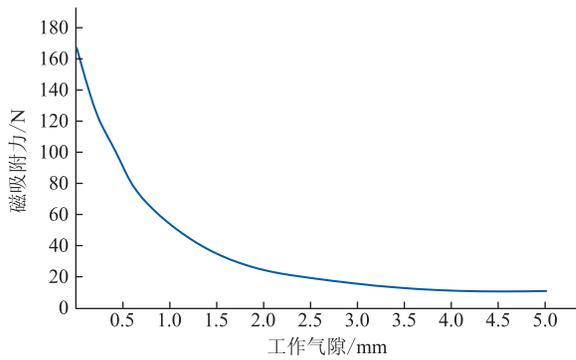


图1 工作气隙变化和磁吸附力关系曲线

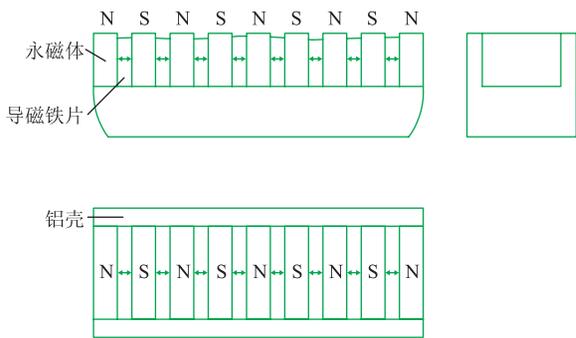
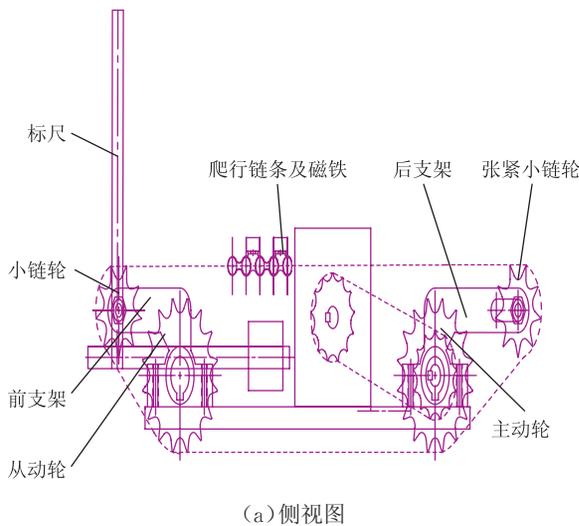


图2 大容量径向偏差测量机器人吸附结构设计图

壁车的重力及倾覆力矩,可实现其在壁面的自由爬行,履带采用两块铝板固定永磁体并加以保护,以避免机器人在爬行过程中,将壁面上的铁锈吸到履带上,造成行走障碍。



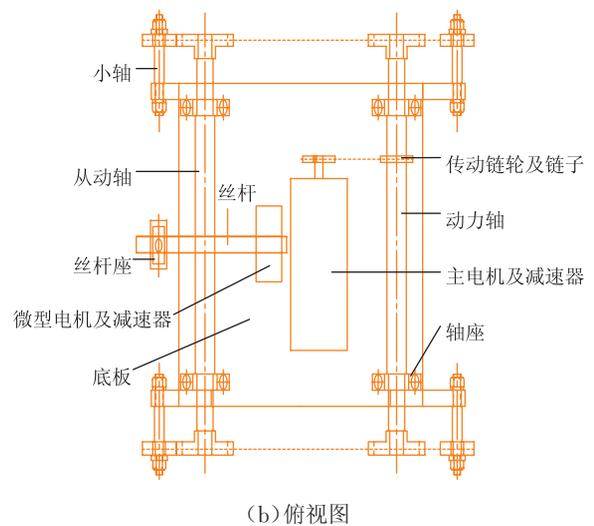
(a) 侧视图

## 2.2 驱动机构

根据设计原理,本装置配置两个电机交流伺服电机作为动力源。其中主电机安置在底板上,通过减速器与输出链轮相连,用于驱动爬壁车行走。其功率为30 W,减速比为1:36,设计速度为6 m/min。副电机安置于底板上,动力输出端与一丝杆传动连接,用于调整标尺的位置。其功率为25 W,减速比为1:72。

## 2.3 传动机构

装置主动力的传动及调节机构包括从动轴,小轴,从动轮,前支架,小链轮,爬行链条及磁铁(爬行链条为定制的链条,磁铁与爬行链条通过螺栓连接),张紧小链轮,后支架,主动轮,传动链轮及链子、动力轴、轴座(图3)。传动链轮套在主动轴上,主动轴安装在轴座上进行固定,轴座通过螺栓固定在底板上,主动轮与动力轴通过键连接。从动轴安装方式与主动轴相同,小链轮通过小轴与前支架进行固定安装,前支架通过螺栓与底板连接,张紧小链轮通过小轴与后支架进行固定安装,后支架通过螺栓与底板连接,后支架上有一个50 mm×10 mm的长腰槽,便于调节张紧小链轮,使得爬行链条的松紧度合适。主电机通过减速器、传动链轮及链子给动力轴一个动力,使得机器人能够沿罐壁爬行。



(b) 俯视图

图3 大容量径向偏差测量机器人装置驱动机构设计图

## 2.4 跨越机构

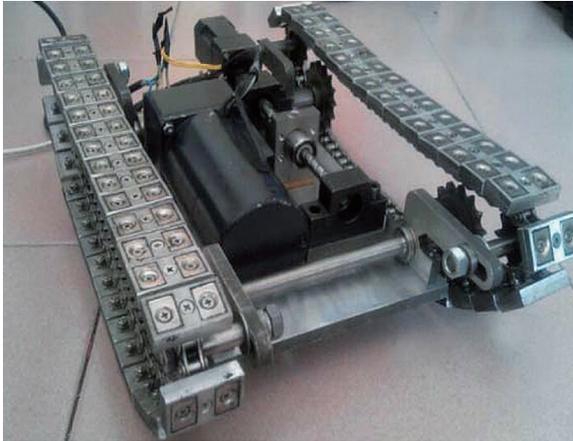
机器人在运行过程中,会遇到抗风圈和加强圈等障碍,单轮的设计无法跨越这些障碍,为此,将动轮与小链轮设计形成一个与水平约45°的夹角,以利于爬过这些障碍。

## 2.5 传感机构

机器人在运行过程中,电机及其传动系统会存在一定误差,履带和壁面之间存在不可避免的滑转和滑移,将使得驱动轮的实际转速不能与规划值完全相符,导致机器人姿态的偏斜。为此,要求机器人配置能够

实时检测自身位置并反馈给电机,对机器人位置进行调整。本系统选配了美国 AGI 公司生产的 900 型双轴倾斜计,可检测两个相互正交方向上的偏角。

通过对机器人吸附机构、传动机构、驱动机构和跨越机构的设计,完成了大容量径向偏差测量机器人装置的制作(图 4)。



(a) 正面图



(b) 侧面图

图 4 大容量径向偏差测量机器人装置实物图

### 3 控制机构及软件

#### 3.1 控制系统

控制电路的主要功能是以单片机控制系统之间的通讯,以控制器控制伺服电机的运动及姿态传感器数据读取和工作状态(表 1)。下位机电路板由 I/O 口扩展电路、D/A 转换与运算放大单元、AT89C51 单片机、数字量输入输出接口电路、电源转换电路以及与上位机进行通讯的 RS-485 标准接口电路构成。控制电路板主要输出模拟量电压信号来控制伺服驱动器,进而

控制伺服电机的运转,从而达到控制机器人行走的目的,同时完成与上位机之间的通讯任务,将上位机传送给的控制指令进行处理后,再将相应的电压信号传递给伺服驱动器,从而实现遥控操作的功能。

控制器以单片机为核心,结合键盘/显示接口芯片组成人-机界面,可键盘输入或数字管显示。机器人上位机控制系统采用工业控制计算机或控制盒,直接给出控制命令,通过串口将命令值传给下位机,并实时接收下位机传送回来的检测信号,显示被控对象的状态,提供人机操纵界面,直观地控制整个装置。

表 1 大容量径向偏差测量机器人的主要功能<sup>[8]</sup>

按键	功能说明
数据设置	操作人员在线调试得到的壁面参数值预输入。设置机器人爬行距离、停顿时间、速度等参数
前进、后退	按动前进、后退键,机器人即按设置的距离前进和后退。爬行到自移动法要求的测量点之后停下,按所预置的等待时间停顿后继续爬行,等待也可被中止,只需按相应键则继续爬行
点动	按动前进或后退键,机器人即向前或向后移动一小段距离(距离可设置),继续按动,机器人即连续前进或后退。此功能在调试时或运行时起微调作用
纠偏	机器人爬行时出现偏差,操作人员可实时介入,按动纠偏键,使机器人纠正偏差,纠正度可设置
停止	在前进或后退过程中,如需紧急停止,按此键

#### 3.2 软件系统

机器人的软件设计采用模块化,主要包括上位机控制软件、下位机控制软件及上位机和下位机之间的通讯软件(图 5)。在整个控制系统中,上位机控制系

统的主要功能根据外部按键信号的输入,通过 RS-485 串口向下位机发送指令数据,控制下位机的运行从而达到控制机器人运动的目的。此外,上位机还要根据输入信号实现对机器人运行状态的实时监测<sup>[9]</sup>。

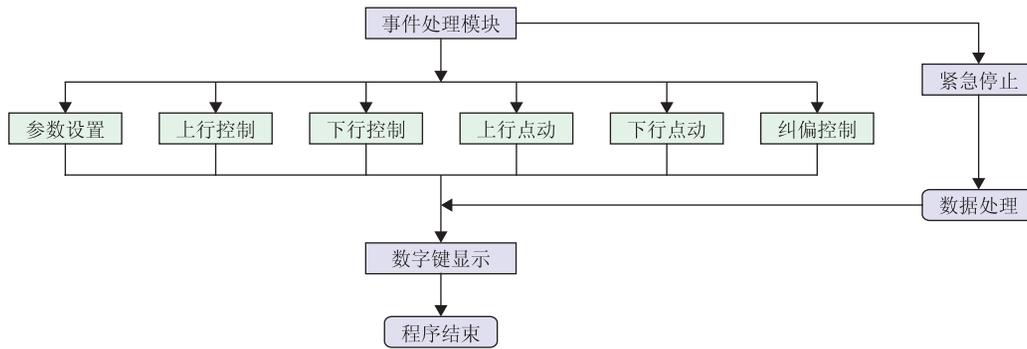


图5 大容量径向偏差测量机器人软件系统结构图

下位机在整个控制系统中的作用是通过 RS-485 串口接收来自上位机控制系统的指令,根据该指令控制机器人伺服电机在相应的状态下运转,从而保证机器人能够按照预期的设想在罐壁表面上实现前进、后退。下位机控制软件主要由串口通讯子程序和伺服电机转速控制子程序构成。串口通讯子程序主要用来接收上位机发送过来的控制指令;伺服电机转速控制子程序主要是根据上位机发送过来的控制指令,输出相应的模拟量电压并确保伺服驱动器正常工作。

#### 4 实践应用

以舟山某公司一个标称容量为 5 000 m<sup>3</sup> 的立式金属罐为试验对象。检测现场的环境条件:风力三级,温度 30 ℃,相对湿度 65%。分别运用光学垂准仪+磁性滑车、光学垂准仪+大容量径向偏差测量机器人装置两种方式测量同一个立式金属罐径向偏差,通过比较立式金属罐容量,验证大容量径向偏差测量机器人装置的准确性。该罐以第一圈板 3/4 处作为基圆周长,基圆内周长为 74 324.8 mm。对于罐底量、圈板高度、附件以及参考高度等不在比对范围内的数据,在编制

罐容表时,试验比对的两种方法采用相同的罐底量、圈板高度、附件测量数据。通过测量与计算,得到径向偏差数值(表 2)。

表 2 磁性滑车和机器人径向偏差数据比较

圈板号	磁性滑车径向偏差数据/mm	大容量径向偏差测量机器人装置径向偏差数据/mm	差值/mm
1	0.0	0.0	0
2	+1.04	+0.79	-0.25
3	+1.67	+1.00	-0.67
4	+6.46	+4.63	-1.83
5	+10.04	+9.04	-1.00
6	+9.75	+8.54	-1.21
7	+6.54	+4.63	-1.91
8	+4.75	+3.04	-1.71

根据 JJG168—2005 的规定,要求每个圈板的径向偏差或半径的最大测量允许误差为 ±2.0 mm。采用机器人后,其径向偏差与实际标准值(磁性滑车所测的径向偏差值)的偏差值均在 ±2.0 mm 之内。

检定工作结束后,对原始数据进行计算处理,并编制成计量罐容积表。对整数米段的数据汇总,将磁性滑车和机器人容量数据进行比对(表 3)。

表 3 磁性滑车和机器人容量数据比较

高度/m	容量/m <sup>3</sup>		平均值 /m <sup>3</sup>	$\frac{ y_1 - y_2 }{y_1}$
	磁性滑车数据 y <sub>1</sub>	机器人数据 y <sub>2</sub>		
2	876.829	876.837	16 960.235	0.009 × 10 <sup>-3</sup>
3	1 316.351	1 316.376	19 787.896	0.019 × 10 <sup>-3</sup>
4	1 755.828	1 755.901	22 615.635	0.042 × 10 <sup>-3</sup>
5	2 195.117	2 195.285	25 443.520	0.077 × 10 <sup>-3</sup>
6	2 634.225	2 634.526	28 271.240	0.114 × 10 <sup>-3</sup>
7	3 073.079	3 073.454	31 098.691	0.122 × 10 <sup>-3</sup>
8	3 511.945	3 512.404	33 925.850	0.131 × 10 <sup>-3</sup>
9	3 950.841	3 951.396	36 752.397	0.140 × 10 <sup>-3</sup>

续表 3

高度/m	容量/m <sup>3</sup>		平均值 /m <sup>3</sup>	$\left  \frac{y_1 - y_2}{y_1} \right $
	磁性滑车数据 $y_1$	机器人数据 $y_2$		
10	4 389.955	4 390.653	39 578.932	$0.159 \times 10^{-3}$
11	4 829.150	4 829.981	42 405.450	$0.172 \times 10^{-3}$
12	5 268.397	5 269.355	45 231.908	$0.182 \times 10^{-3}$

注：由于该立式金属罐进行容量计量的最小测量容量为 2 m 所对应的容量表容积，因此 1 m 处不作为比对的对照点。

由上述数据可见， $\left| \frac{y_1 - y_2}{y_1} \right|$  的最大值为 0.018 2%。

JJG 168-2005 规定，容量在 700 m<sup>3</sup> 以上的立式金属罐，检定的扩展不确定度  $U$  应不大于 0.1%，两种标准器的测量合成不确定度为 0.14%。

故  $\left| \frac{y_1 - y_2}{y_1} \right| = 0.018 2\% < \sqrt{U_1^2 + U_2^2} = \sqrt{2} \times 0.1\% = 0.14\%$ ，符合 JJF 1033-2014<sup>[10]</sup> 要求，因而该测量系统不确定度的合理性得到了检验。

## 5 结论

对比试验证明，大容量径向偏差测量机器人装置可应用于立式金属罐容量的计量检定工作中。该设备通过遥控器控制机器人在罐壁上移动，到达指定位置，然后控制标尺微移动，达到径向偏差测量定点定位的目的。该测量设备符合 JJG 168-2005《立式金属罐容量》国家计量检定规程的规定，计量检定结果准确可靠；同时该设备具有结构简单合理，操作快速、便捷等特点，不仅降低了人工拉绳的劳动强度和人工作业疲劳度，而且提高了工作效率。

### 参考文献：

[1] 康育英. 容量计量技术[M]. 北京：北京计量出版社，2006.  
 [2] 刘子勇，佟明星，王丁，等. JJG 168-2005 立式金属罐容量计量检定规程[S]. 北京：中国计量出版社，2005.  
 [3] 马培菘，陈佳品，俞翔. 油罐容积检测用爬壁机器人的研制[J]. 上海交通大学学报，1996，30(11)：159-164.

[4] 田兰图. 油罐检测爬壁机器人技术及系统研究[D]. 北京：清华大学，2004.  
 [5] 文怀海，佟仕忠，付贵增，等. 立式金属罐容积检定爬壁机器人的研制[J]. 自动化仪表，2007，28(8)：45-47.  
 [6] 李昌海，吴云，佟仕忠，等. 立式金属罐非接触轮式爬壁检定机器人的研究[J]. 自动化仪表，2009，30(10)：5-8.  
 [7] 付宜利，李志海. 爬壁机器人的研究现状[J]. 机械设计，2008，25(4)：1-4.  
 [8] 陈佳品，程君实，冯萍. 油罐容积检测用爬壁机器人控制系统研制[J]. 工业仪表与自动化装置，1997(6)：7-12.  
 [9] 金东杰. 水下船体清刷机器人控制系统及路径规划研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2007.  
 [10] 丁跃清，邓媛芳，倪育才，等. JJF 1033-2014 计量标准考核规范[S]. 北京：中国计量出版社，2014.

(收稿日期：2014-06-18；修回日期：2015-06-10；编辑：杜娟)



**基金项目：**国家质检总局公益性行业科研专项“大型石油储运工程容量计量技术研究”，201210106；浙江省质监系统科研项目“大容量径向偏差测量机器人装置研制及应用”，20090236。

**作者简介：**刘瑛，高级工程师，1963年生，1983年毕业于浙江工业大学工业分析专业，现主要从事计量检测管理工作。

LIU Ying, senior engineer, born in 1963, graduated from Zhejiang University of Technology, industry analysis, in 1983, engaged in the inspection and management of metrology operations.

Tel: 0580-2080519, Email: zszjzx@163.com