

文章编号 1004-924X(2018)08-2021-08

## 自驱动关节臂坐标测量机模块化关节设计

胡毅<sup>1\*</sup>, 黄炜<sup>1</sup>, 胡鹏浩<sup>1</sup>, 杨洪涛<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230001;

2. 安徽理工大学 机械工程学院电控制系 安徽 淮南 232001)

**摘要:**传统的关节臂测量机工作时是依靠工作人员牵拉实现运动和测量,存在路径规划不佳、主观性误差大、测量效率低等问题很难适应智能制造对在线自动测量系统的新要求。本文提出了利用含有无刷电机、谐波减速器及精密轴系的模块化关节构成自驱动关节臂坐标测量机的构想,并对模块化关节进行了构型设计,建立了单关节扭矩估算模型,在此基础上选择了关节2的电机和谐波减速器,设计了关节模块的测控电路,研制了单关节部件样机并进行了重复性实验。其中单方向测量数据表明,为保证较小的测量重复性误差,关节在运动时应尽量避免速度或加速度突变的运动形式;双方向测量的数据表明,当控制电机运动速率小于1.53 rad/s时,测头因回弹产生误触发信号的概率较小,此时最大误差数据为 $\pm 2.11''$ 。上述实验也验证了模块化关节设计方案的可行性,为后续自驱动关节臂坐标测量机整机研制提供了理论和实验依据。

**关键词:**自驱动关节臂坐标测量机;模块化关节;扭矩估算;重复性实验

中图分类号: TP721 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20182608.2021

## Design of modular articulation in self-driven AACMM

HU Yi<sup>1\*</sup>, HUANG Wei<sup>1</sup>, HU Peng-hao<sup>1</sup>, YANG Hong-tao<sup>2</sup>

(1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering,

Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

\* Corresponding author, E-mail: huyi@hfut.edu.cn

**Abstract:** A large subjective error and low measurement efficiency occurs as a result of manual movement and measurement in a traditional Articulated Arm Coordinate Measuring Machine (AACMM) to solve the problem of worse path planning. In this case, it is difficult to adapt the system to the new requirements of online automatic measuring systems. As such, the concept of a self-driven AACMM is proposed which includes a brushless motor and a harmonic reducer, and demonstrates precise shafting in its articulation. A structure for the modular articulation and the torsion estimating model is also proposed. A prototype and experimental device of the Joint2 with a measurement and control circuit, motor and harmonic reducer were built to evaluate the performance and facilitate a series of repeatability experiments. A prototype with a single joint component was developed and repeatability experiments were performed. The single direction measurement data show that to ensure a small repeatability

收稿日期:2018-01-18;修订日期:2018-03-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51775163, No. 51475133)

ty error, the joints should avoid drastic changes in velocity or acceleration when in motion. The data from the measurement of both sides show that when the motor speed of the control machine is less than 1.53 rad/s, the probability that the probe will produce a false trigger signal is small, and the repeatability error is  $\pm 2.11''$ . The experiment also verifies the feasibility of the modular articulation design scheme. These research findings provide a theoretical and experimental basis for studying completely self-driven AACMM.

**Key words:** self-driven Articulated Arm Coordinate Measuring Machine(AACMM); Modular articulation; torsion estimating; repeatability experiment

## 1 引言

关节臂坐标测量机(Articulated Arm Coordinate Measuring Machine, AACMM)采用仿人体手臂结构,因其具有便携、测量运动灵活、测量空间开阔等特点,被广泛应用于汽车、航空、机械制造及模具制造等行业及工业现场检测中<sup>[1]</sup>。

在提高关节臂坐标测量机(以下简称关节臂)测量精度方面,国内外学者从关节臂参数标定技术、结构、传感器等方面进行了深入地研究。文献[2]利用机器人运动学中的 DH 方法建立了 7 轴关节臂的模型,以两点距离作为标准量对关节臂进行标定,并获得了坐标测量机的整机参数,通过测量验证了该方法所建立模型的正确性;文献[3]提出了一种基于逆运动学分析方法和非线性规划遗传算法的参数自标定,实现了单点测量精度以及长度测量精度的提高。文献[4]基于 PSD 位移检测的杆件微变形测量方法测量平行双关节坐标测量机零件弹性变形量,从而对由此引起的测量误差进行补偿;文献[5]基于圆光栅误差特性,利用蚁群算法求解最佳测量区,关节臂在采用此方法计算得到的最佳测量区内测量可以提高测量精度。文献[6]通过对圆光栅标定数据的频谱分析,提出了一种基于粒子群算法的参数辨识模型,并通过实验证明用该方法补偿光栅传感器可提高关节臂的测量精度。

随着研究和应用的深入,学者们也注意到关节臂坐标测量机的动态特性及动态误差而从动态标定及人为因素方面考虑,文献[7]提出当前关节臂测量不确定度的计算主要考虑的是自身结构对测量结果的影响,而忽略了使用者对测量结果的影响,尤其是仪器在动态情况下测量力、测量方向的随机性均会对关节臂结构造成不同程度的形

变,该形变所带来的测量不确定度必须添加至测量结果中。文献[8]指出,目前的关节臂测量结果的评定源于对传统三坐标测量机使用的经验而忽略了人为因素的影响,通过对 3 名操作者操作关节臂对同一被测件的测量结果的差异,对人为因素影响测量结果这一观点进行了证实。

上述研究现状表明,传统关节臂存在人为因素影响较大、难以实现测量路径优化及不适应大批量测量环境等问题。为了适应智能制造的在线自动测量系统通用化、在线化、智能化、高精度化的发展趋势,并减小人为因素可能对测量结果所产生的影响,本文提出了自驱动关节臂坐标测量机(以下简称自驱动关节臂)的构想。该构想的核心即利用机械相比人手臂更适用于实现繁复动作的特点,设计具有自驱动功能的精密回转关节替代原有关节臂内无动力关节,结合传统关节臂坐标测量机和轻型工业机械臂领域的研究成果,使得这种自驱动关节臂在测量过程中相较传统关节臂拥有优化的运动轨迹、合理和恒定的触发方式,并通过优化路径以测量误差小的姿态实现自动测量。

## 2 自驱动关节臂原理及关节结构设计

### 2.1 设计着重点与机械臂对比

本文所述的自驱动关节臂与工业机械臂相比,尤其是轻型机械臂<sup>[9-11]</sup>,二者从结构形式、运动方式等方面均有相似之处,但它们在结构、设计目标和使用功能等方面有本质的不同,表 1 则列出了两者的对比。现在已有学者通过在工业机器人臂上加装视觉测量系统组成在线测量系统<sup>[12-13]</sup>,并取得了比较丰硕的成果,其技术核心是视觉测量和图像拼接,而自驱动关节臂本质上源自柔性关节坐标测量机,采用测头恒力触发实现高精度测量。二者的核心技术不同,所适用的被测对象、

工业场景均有不同。

表 1 自驱动关节臂与机械臂对比

Tab. 1 Comparison between Self-driven AACMM and Robotic Arm

对比项	机械臂	自驱动关节臂
功能及设计目标	焊接、喷涂、搬运、抓取,侧重于运动过程平稳性及轨迹规划,通用化设计	空间坐标测量,侧重于触发时的平稳性,专门针对自动化测量,轻量化设计
负荷类型	负荷大,主要集中在悬臂末端	负荷小,主要为自重及运动加速度
工作(运动)方式	运动轨迹清晰明确,从确定位置到另一个确定位置	通过待测件模型规划运动轨迹,测头运动至待测表面附近后缓慢移动直到触发,最终位置不确定
精度要求	重复定位精度	注重绝对测量精度,可通过标定和误差补偿等技术提高这一指标

### 2.2 自驱动关节臂模块化关节构型

现有关节臂中的关节根据输入输出相对位置可分区为俯仰关节(关节 2,4,6)以及横滚关节(关节 1,3,5)。这两类关节在肩部、肘部和腕部各分配一对,最终实现关节臂的 6 自由度运动。自驱动关节臂两种模块化关节构型如图 1 所示。该关节内由无刷电机及谐波减速器构成驱动部分;并通过联轴器传递来自驱动部分的动力;关节之间通过轻质杆件相连,由光栅编码器负责读取输出端相对于输入端的转角。肩关节之间、肘关节之间、腕关节之间分别采用相同的驱动部分及精密轴系,通过更换不同的输入输出端外壳可实现俯仰关节与横滚关节之间的互换。

所设计的自驱动关节臂关节与现有通用机械臂关节结构有较大区别,以一种轻型机械臂结构为例,如图 2(a)所示,为保证关节结构的轻量化并达到较大的负重比,电机通过减速器后直接将动力输出,而谐波减速器柔轮的柔性、迟滞与背隙都是运动控制时需要考虑的因素,这种常规结构中编码器通常安装在电机背部,用作闭环反馈中的位置环、速度环,此类关节通常还需要增加电流传感器、力矩传感器等构成闭环反馈以应对载荷剧烈变化对定位精度的影响。图 2(b)为自驱动

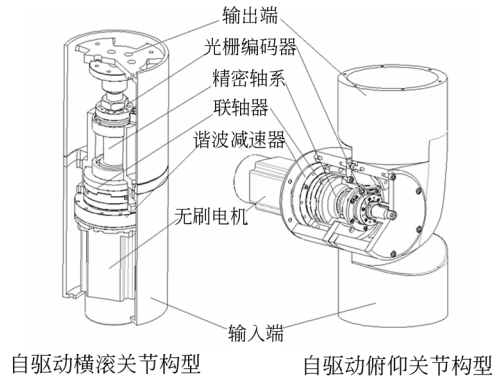
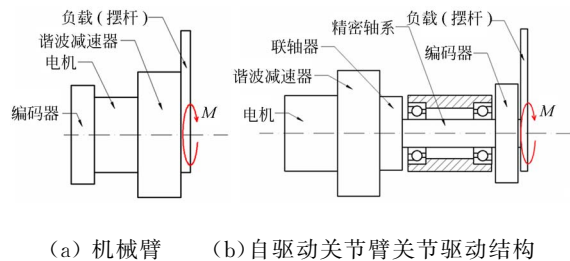


图 1 模块化关节结构示意图

Fig. 1 Structure of modular articulation

关节臂关节驱动结构简图,在径向上,关节回转精度由经过预紧的轴保证,将轴承作为支点,负载输出部分为悬臂梁,由于负载输出靠近支点,可忽略悬臂梁的形变;在轴向上,谐波减速器、联轴器、主轴即使在大负载下产生扭转变形,但由于高精度编码器安装紧邻负载,可认为编码器输出转角就是关节实际输出转角,且该转角与减速器迟滞和背隙等无关。



(a) 机械臂 (b) 自驱动关节臂关节驱动结构  
(a) Robotic arm (b) Self-driven AACMM

图 2 机械臂与自驱动关节臂关节结构差异

Fig. 2 Comparison between robotic arm and self-driven AACMM

## 3 模块化关节硬件设计

### 3.1 关节扭矩估算

#### 3.1.1 负载重力力矩计算

模块化关节动力部件选型主要包括直流无刷电机的选型及谐波减速器选型,在设计时采用了关节 6 至关节 1 逐级递推的计算方式计算所需扭矩大小。自驱动关节臂针对测量,运动速度较低、杆件质量轻,可将连杆质量集中至关节回转中心处计算,如图 3 所示,为方便估算,令相邻的关节旋转轴线垂直且相交。图 3 中  $m_0 \sim m_6$  分别代表

了 5 个关节及测头质点的质量,  $L_0 \sim L_5$  为这些质点之间距离, 由此可利用力学的方式计算单关节所需力矩。

以图中输入输出呈  $90^\circ$  的关节 2 为例, 该关节尝试克服负载重力进行逆时针旋转时, 其所需扭力  $M$  由后续关节重力产生的扭矩  $M_M$  及惯性扭矩  $M_J$  组成, 当后续负载平行于地面, 由重力产生的扭矩达到最大值。根据图 3 所建立模型, 此时关节 2 重力负载扭矩的力学方程为:

$$M_{M,1} = L_1 m_2 g + (L_1 + L_2) m_3 g + (L_1 + L_2 + L_3) m_4 g + (L_1 + L_2 + L_3 + L_4) m_5 g + (L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5) m_6 g, \quad (1)$$

其中  $g$  为重力加速度。

由于关节 1 旋转轴垂直于地面, 因此其内部的电机无需克服负载重力力矩动作。对于关节 3 和关节 5, 当关节 4 或关节 6 输入输出呈  $90^\circ$  且平行于地面时, 由末端质点所产生的重力矩与关节 4 或关节 6 输入输出呈  $180^\circ$  时所需的扭力相同, 因此关节 3 和关节 4、关节 5 和关节 6 各自所需克服的负载重力扭矩相同, 简化了计算, 提高了关节的互换性。推广至一般情况, 各关节需克服后续关节重力矩所需的扭矩大小可通过式(2)计算。

$$M_{M,k} = \sum_{i=k}^5 \left[ \left( \sum_{j=1}^k L_j \right) m_{j+1} g \right], (k = 1, 2, 3, 4, 5). \quad (2)$$

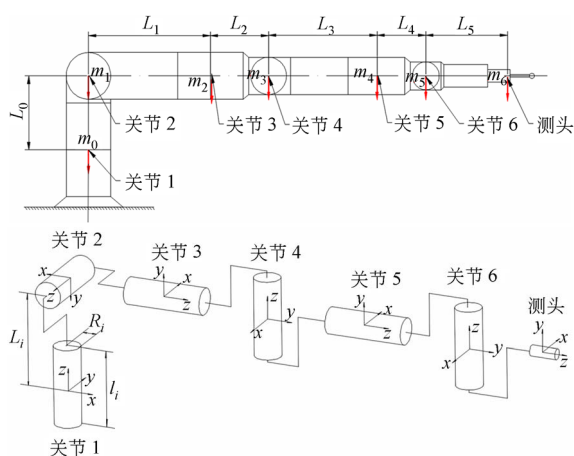


图 3 单关节扭矩估算模型

Fig. 3 Model of articulation torque estimating

### 3.1.2 负载惯性扭矩计算

为了简化惯性扭矩的计算, 将自驱动关节臂所有关节及测头形状理想化为具有一定半径及长度的圆柱体, 且圆柱体旋转轴两两重合且垂直,

$R_i, l_i$  分别为这些圆柱体的半径与长度<sup>[14]</sup>, 如图 3 所示。关节模块在运动过程中的转动惯量包括自身的转动惯量以及后续模块的转动惯量, 而转动惯量及惯性矩有如下关系:

$$M_J = J \alpha, \quad (3)$$

其中:  $M_J$  为惯性扭矩,  $J$  为转动惯量,  $\alpha$  为旋转关节的角加速度。

在计算转动惯量时, 针对质心不在旋转轴上的关节, 利用平行轴定理计算其对于该轴的转动惯量。该定理指出, 若有一过刚体质心的轴与旋转轴平行, 且该轴与过旋转轴距离为  $d$ , 则刚体转动惯量为:

$$J = J_C + m d^2, \quad (4)$$

其中:  $J_C$  为相对通过质心的轴的转动惯量,  $d$  为该轴与过质心的轴的距离。

关节总惯性矩主要包括自身转动惯量以及负载的惯转动惯量:

$$J_k = J_{k,k} + J_{k,k+1} + \sum_{i=k+2}^6 J_{k,i}, \quad (5)$$

其中:  $J_{k,k}$  为待求解关节自身转动惯量, 根据圆柱绕  $Z$  轴旋转的转动惯量公式计算:

$$J_{k,k} = \frac{1}{2} m_k (R_k)^2, \quad (6)$$

其中:  $J_{k,(k+1)}$  为待求解关节输出端相邻关节的转动惯量, 当待求解关节  $k$  为关节输入输出相对为横滚运动时, 关节  $(k+1)$  的旋转轴  $X$  轴与关节  $k$  的旋转轴  $Z$  轴重合, 此时根据圆柱绕  $X$  轴的转动惯量公式有:

$$J_{k,(k+1)} = \frac{1}{12} m_{(k+1)} (3R_{k+1}^2 + l_{k+1}^2), \quad (7)$$

而当待求解关节  $k$  输入输出相对为俯仰运动时, 关节  $(k+1)$  的质心在回转轴线以外, 需要根据式(4)及式(7)计算转动惯量:

$$J_{k,(k+1)} = \frac{1}{12} m_{k+1} (3R_{k+1}^2 + l_{k+1}^2) + m_{k+1} L_k^2. \quad (8)$$

式(5)最后一项为后续关节(测头)的转动惯量, 这些圆柱体质心均位于旋转轴之外, 转动惯量同样参照式(4)及式(7)计算:

$$J_{k,i} = \frac{1}{12} m_i (3R_i^2 + l_i^2) + m_i \left( \sum_{j=k}^{i-1} L_j \right)^2. \quad (9)$$

式(1)至式(9)表明, 各关节所需扭矩与其所驱动后续关节部件的质量、质心距离、旋转角加速度及关节尺寸有关。从满足驱动要求方面考虑, 自驱动关节臂主要设计指标包括臂长、关节运动

角加速度以及末端负载。在本设计中总臂长要求不小于 1.2 m、关节运动角加速度自肩关节至腕关节分别为  $10^\circ/s^2$ 、 $20^\circ/s^2$  和  $30^\circ/s^2$ 、末端负载为恒力触发测头。

计算各关节所需扭矩及器件选型时,首先根据所选定触发测头尺寸、质量及角加速度估算关节 5、6 所需扭矩,根据该扭矩对这两部分电机及减速器等部件进行选型,进而估算出尺寸、总质量及大致的角加速度;而关节 5、6 参数确定后,关节 3、4 所需扭矩亦可估算求出,同时亦可估算出关节 3、4 的尺寸、总质量等,以此类推求得关节 1、2 所需扭矩,最终完成所有关节模块电机及减速器的初步选型及尺寸设计,如表 2 所示。

表 2 模块化关节扭矩估算结果

Tab. 2 Result of modular articulation torque estimation

项目/关节	1	2	3	4	5	6	测头
标号	0	1	2	3	4	5	6
角加速度 $((^\circ) \cdot s^{-1})$	10	10	20	20	30	30	-
质心距离 $L_i/mm$	140	450	130	380	100	150	-
理想圆柱 长度 $l_i/mm$	330	330	240	240	150	150	100
质量 $m_i/g$	5 555	6 586	6 043	4 448	4 034	3 344	1 087
理想圆柱 半径 $R_i/m$	90	75	50		40	30	
负载重力矩 $M_M/(N \cdot m)$	0	136.31	36.27		1.60		-
惯性矩 $M_J/(N \cdot m)$	20.04	18.17	6.46	6.37	0.20	0.16	-
总扭矩 $M/(N \cdot m)$	20.04	154.48	44.95	44.86	1.94	1.90	-
速比	120		100		100		-
电机所需扭 矩 $(N \cdot m)$	1.29		0.43		0.02		-

### 3.2 关节模块通用电路设计

#### 3.2.1 光栅编码器分辨率计算

自驱动关节臂的关节采用高精度圆光栅编码器实现角度的读取,与传统关节臂不同的是,该编码器也构成电机反馈控制环节的一环,实现关节位姿较为精确的控制。选用光栅读数头时需计算光栅读数头及后续处理电路的分辨率(倍频数)。

设关节臂由光栅分辨率引起的误差为  $e$ ,根据三角函数关系,满足:

$$e = L \tan \theta, \quad (11)$$

其中: $L$ 为所求关节回转中心至测头中心的距离; $\theta$ 为读角系统所能分辨的最小转角,其大小由光栅环、读数头及电子细分共同决定, $\theta$ 满足:

$$\theta = \frac{2\pi}{N} = \frac{2\pi}{N_0 d / (R/i)}, \quad (12)$$

其中: $N$ 为光栅旋转一周,计数器所计得的最大值, $N_0$ 为光栅刻线数; $d$ 为光栅刻线栅距; $R$ 为光栅读数头名义分辨率; $i$ 表示倍频因子,当对于正交脉冲信号输出型的光栅读数头而言,后续细分向电路可实现 1、2、4 倍频,对于雷尼绍光栅读数头而言,其名义分辨率通常指经过电子 4 倍频后的分辨率,因此需要通过乘以 4 再除去倍频因子进行修正。

#### 3.2.2 关节电路模块设计

所设计模块化关节需要实现光栅编码器转角读取、电机闭环控制、触发信号获取以及关节间的通讯等功能,对于根部的关节而言还需要提供与上位机通讯的接口。在进行系统电路验证时这些模块均需具备,其电路原理如图 4 所示。

光栅读数头输出信号为三路差分信号,包括 A 相、B 相及零位信号。其中 A、B 相信号相位相差  $90^\circ$ ,后续处理电路需要实现该信号的滤波、辨向、细分及正反计数。本系统采用 LS7266R1 专用正交计数芯片配合 STM32F407 微控制器实现角度读取的方案,可对功能、系统复杂度、线路板体积及成本进行较好兼顾。

光栅读数头输出三路差分信号通过电平转换、信号整形输入至计数器。LS7266R1 工作在 N 模正交信号计数模式,自动对 XA 及 XB 输入的正交信号相位进行检测并进行加减计数,当计数值超过  $N-1$  或小于 0 时,计数器将自动循环计数。

无刷电机动作通过单片机与外部电机驱动器通讯实现,驱动器与单片机通过 RS485 以及普通 IO 通讯,可实现电机方向及转速控制、电子刹车、相电流读取、PID 参数设置、基于霍尔传感器的速度闭环、位置闭环动作等操作,结合光栅转角计数值,可为后续整机运动控制算法提供硬件基础。在电路上同时还预留了计算机通讯、多关节通讯

接口。微控制器可随时读取计数器的计数值,并在触发测头触发时读取并保存当前计数器值,可

实现自动触发测量的功能。为简化整机内部走线,多关节通讯可采用 WIFI 数据透传实现。

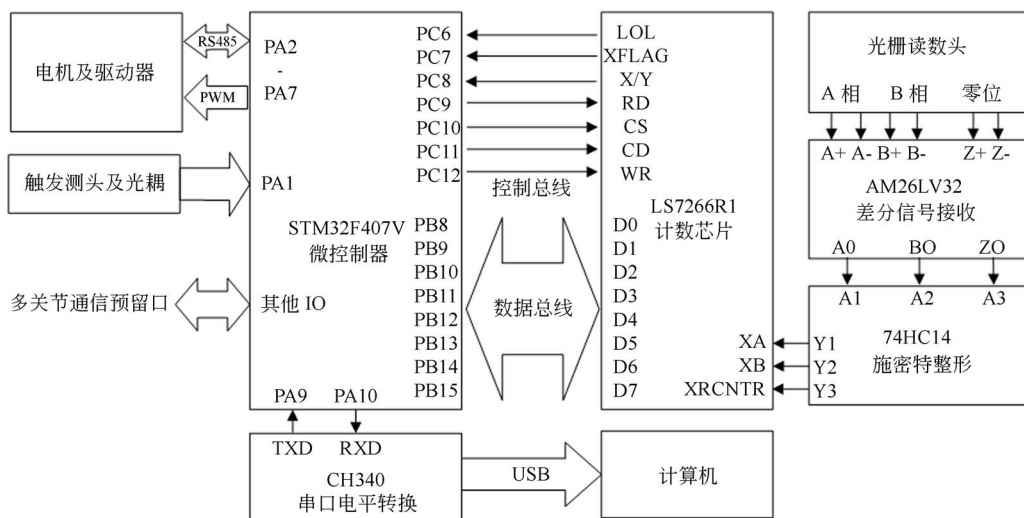


图 4 模块化关节电路原理图

Fig. 4 Schematic of modular articulation

## 4 重复性实验及结果

### 4.1 重复性实验设计

自驱动模块化关节在测头触发后读取编码器计数值的重复性极大影响到整机精度。实验装置如图 5 所示,其以图 1 所示关节构型为基础,该装置固定于光学平台上,精密轴系及电机之间联轴器可拆除,摆臂及恒力触发测头连接至精密轴系输出端,电路模块通过驱动电机旋转带动精密轴系转动,摆杆及触发测头在轴系旋转带动下对量块进行触碰,电路模块接收到触碰信号后读出此时的计数值,并上传至电脑,完成数据记录。

### 4.2 单向触碰重复性实验

实验装置光栅编码器分辨率为 20 nm,根据式(12)可得  $N=2\ 048\ 000, \theta=0.64''$ ,在不同触发频率  $T(\text{ms})$ 以及不同电机转速 PWM(%)下分别进行了 50 组单侧重复触发测量的实验,记录触发时计数器值,测头返回一定距离(由  $T$  决定)并进行再次触发。通过 RS485 可从电机驱动器获得不同 PWM 下的输出稳态转速, PWM 与转速关系如表 3 所示。

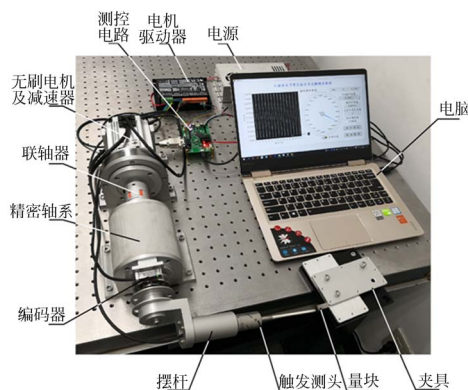


图 5 实验装置示意图

Fig. 5 Experimental installation

表 3 PWM 与输出稳态转速关系

Tab. 3 Relationship between PWM and speed (rad · s<sup>-1</sup>)

PWM	转速	PWM	转速
4%	0.23	14%	2.37
6%	0.67	16%	2.80
8%	1.10	20%	3.23
10%	1.53	22%	3.87
12%	1.97	24%	4.30

其中每组实验包括 50 次触发,即 50 个编码器计数值,得到 50 组数据的标准差  $\sigma$  的大小,如表 4 所示。当 PWM 大于 14% 后,重复性误差较大。

表 4 单侧触碰数据

Tab. 4 Unilateral triggering data

T/ms	400	600	800	1 000	1 200	
4	0.04	0.71	0.16	0.34	0.56	
6	1.60	3.25	4.77	3.69	0.73	
PWM/%	8	0.36	0.51	0.45	6.08	0.68
	10	0.15	0.24	0.58	0.32	1.10
	12	0.49	16.73	7.48	1.68	109
	14	5.65	566	2 028	3 283	15 860

据表 4 数据分析有以下结论:当控制电机转速的 PWM 超过 12% 后方差急剧增大,此时读取的计数值重复性差且无法用于数据处理。从光栅编码器及电路响应频率角度考虑,光栅速度或加速度的突变点是潜在的累积误差产生原因。当触碰周期加长、PWM 值提高,电机在折回点处的速度及加速度将逐渐增大,且速度越大,在折回点处脉冲信号频率瞬间超过集成电路基频上限,导致计数脉冲丢失越多,产生累积误差。

#### 4.3 双向触碰重复性实验

在单方向实验的基础上,针对摆臂折回点处测头反向及速度突变造成累积误差的现象,改进了电机运动方式,并对量块两侧进行了正反向触碰的重复性实验。在实验过程中出现了测头触碰返回时由于触发测头内部弹片反弹造成多次触发

的现象,该现象极大影响测量结果,因此将测头回程运动产生误触发的次数计入测量数据中。表 5 则列出了 PWM 在 4%~14% 情况下,对挡块正反面进行 50 次双边触碰实验的结果,其中  $\sigma_U$ 、 $\sigma_D$  分别表示触碰挡块上下两侧计数值的标准差,ETU、ETD 分别表示触碰上下表面后产生的误触发次数, $M_U$ - $M_D$  表示上、下两侧触发计数值平均数之差。

分析表 5 得出以下结论:PWM 超过 10%,MU-MD 急剧增大,此时触发测头形变增大;PWM 值越大,测头振动并产生误触发的概率越大;适当选择测头触碰时的速率,可减小重复性误差,当 PWM 不大于 10% 时(转速小于 1.53 rad/s),根据  $3\sigma$  准则最大重复性误差不超过  $\pm 3.3$  (2.11")。

综合单向测量和双向测量数据,PWM 为 6% 时的重复性较差,因此并非越低的触碰速度就能获得更好的重复性。

## 5 结 论

针对现有关节臂坐标测量机采用手动拖拽测量效率较低、人为因素可能对测量结果造成一定影响的情况,提出了一种采用自驱动关节替代现有关节使关节臂坐标测量机实现自动测量的构想。对构成这种自驱动关节臂坐标测量机的模块化关节进行了构型设计,建立了自测头到根部逐级估算扭矩的模型,为器件的选型提供了依据。对模块化的关节中的测控电路软硬件进行了设计。在制作了模块化关节样机上搭建了实验平台,对上述机械及电路性能进行了调试和验证。在实验装置输出端安装恒力触发测头,以不同速度或触发频率进行了单关节单向及双向重复性实验,实验分析结果表明,通过合理选择触发频率及速度,并避免如折返运动等速度及加速度突变的运动方式,可获得较小的重复性误差。上述研究成果为自驱动关节臂坐标测量机整机研究提供了理论和实验依据。

表 5 双侧触碰数据

Tab. 5 Bilateral triggering data

PWM/%	$\sigma_U$	ETU	$\sigma_D$	ETD	$M_U$ - $M_D$
4	0	0	0.64	2	20 701
6	0.85	0	0.85	1	20 705
8	0	3	1.1	0	20 708
10	1.01	7	0	1	20 741
12	1.21	15	0	6	20 739
14	0	3	1.8	15	20 732

## 参考文献:

- [1] 林虎, Frank H(a)rtig, Karin Kniel, 等. 基于便携式坐标测量机的大齿轮测量方法[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(7):1763-1770.
- LIN H, Frank H(a)rtig, Karin Kniel, *et al.*. Measurement of large gears by using portable coordinate measuring machines [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1763-1770. (in Chinese)
- [2] 程文涛, 于连栋, 费业泰. 一种关节式坐标测量机的建模及其标定[J]. 中国科学技术大学学报, 2011, 41(5):439-444.
- CHENG W T, YU L D, FEI Y T. Kinematic model and calibration of an articulated arm coordinate measuring machine[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2011, 41(5): 439-444. (in Chinese)
- [3] 祝连庆, 李伟仙, 潘志康, 等. 变臂关节式坐标测量机的参数自标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3):572-579.
- ZHU L Q, LI W X, PAN ZH G, *et al.*. Research on parameter self-calibration method for partly-bonded articulated arm coordinate measuring machine [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(3):572-579. (in Chinese)
- [4] 于连栋, 鲁思颖, 张炜, 等. 平行双关节坐标测量机连杆微变形测量系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(11):1621-1629.
- YU L D, LU S Y, ZHANG W, *et al.*. Measuring system of micro-deformation of parallel double-joint coordinate measuring machine linkage[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015, 29(11):1621-1629.
- [5] 胡毅, 江超, 黄炜, 等. 用蚁群算法求解关节式坐标测量机的最佳测量区[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(6):1486-1493.
- HU Y, JIANG CH, HUANG W, *et al.*. Optimal measurement area of articulated coordinate measuring machine calculated by ant colony algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(6):1486-1493. (in Chinese)
- [6] 高贯斌, 王文, 林铿, 等. 圆光栅角度传感器的误差补偿及参数辨识[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(08): 1766-1772.
- GAO G B, WANG W, LIN K, *et al.*. Error compensation and parameter identification of circular grating angle sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(08): 1766-1772. (in Chinese)
- [7] González-Madruga Daniel, Barreiro Joaquin, Cuesta Eduardo, *et al.*. AACMM performance test: influence of human factor and geometric features[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 69: 442-448.
- [8] CUESTA E, MANTARAS D A, LUQUE P, *et al.*. Dynamic deformations in coordinate measuring arms using virtual simulation [J]. *International Journal of Simulation Modelling*, 2015, 14(4):609-620.
- [9] VOGEL J, HADDADIN S, SIMERAL J D, *et al.*. Continuous control of the DLR Light-Weight Robot III by a human with tetraplegia using the BrainGate2 neural interface system[J]. *Experimental Robotics*, 2014: 125-136.
- [10] SALISBURY K, TOWNSEND W, EBRMAN B, *et al.*. Preliminary design of a whole-arm manipulation system (WAMS) [J]. *Proceedings 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1988, (1):254-260.
- [11] 熊根良. 具有柔性关节的轻型机械臂控制系统研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
- XION G L. *Research on control of light weight robot with flexible joints*[D]. Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [12] 郝继贵, 邹剑, 林嘉睿, 等. 面向测量的工业机器人定位误差补偿[J]. 光电子·激光, 2013(4):746-750.
- ZHU J G, ZOU J, LIN J R, *et al.*. Measurement-oriented positioning error compensation for industrial robot[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013(4):746-750. (in Chinese)
- [13] 杨守瑞, 尹仕斌, 任永杰, 等. 机器人柔性视觉测量系统标定方法的改进[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(12):3239-3246.
- YANG SH R, YIN S B, REN Y J, *et al.*. Improve-

ment of calibration method for robotic flexible visual measurement systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12): 3239-3246. (in Chinese)

[14] 招绍坤. 轻型机械臂模块化设计与运动控制的研

究[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.

ZHAO SH K. *Modular design and motion control for light robot arm*[D]. Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)

#### 作者简介:



胡毅(1961—),女,江西龙南人,博士,副教授,1983年于华中工学院获得学士学位,1988年、2011年于合肥工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事测试技术与仪器的研究。E-mail: huyi@hfut.edu.cn



黄炜(1993—),男,广东三水人,硕士研究生,2015年于合肥工业大学获得学士学位,主要研究方向为仪器及装备精度保障技术。E-mail: shwyz03@163.com.cn