

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211642

# 工业机器人位置稳定时间不确定度的研究分析

张昌尧<sup>1,2</sup> 吴清锋<sup>1,2</sup> 张秋怡<sup>1,2</sup> 刘仲义<sup>1,2</sup>

(1. 广东产品质量监督检验研究院 佛山 528300; 2. 国家市场监督管理总局重点实验室(智能机器人安全) 广州 510670)

**摘要:** 针对工业机器人位置稳定时间的精度问题,企业和检测机构不断研究改进检测方法。通过激光跟踪仪和 CompuGauge 的对比实验,搭建不确定度测量模型,采用 A、B 类方法对测量重复性、数字分辨率、示值误差和坐标对齐进行分析并评定不确定度分量,得出激光跟踪仪和 CompuGauge 的扩展不确定度分别为  $U_1 \approx 0.11$  s 和  $U_2 \approx 0.19$  s,最终  $|En| \approx 0.5$ 。实验结果表明:激光跟踪仪的结果较集中、稳定,精度更高,但受坐标对齐的影响最大,而 CompuGauge 操作方便、省时,不依赖于机器人模型,但受示值误差的影响最大。

**关键词:** 激光跟踪仪;CompuGauge;位置稳定时间;扩展不确定度;  $|En|$

**中图分类号:** TH115;TP242.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 242.2

## Research and analysis on uncertainty of position stabilization time of industrial robot

Zhang Changyao<sup>1,2</sup> Wu Qingfeng<sup>1,2</sup> Zhang Qiuyi<sup>1,2</sup> Liu Zhongyi<sup>1,2</sup>

(1. Guangdong Testing Institute of Product Quality Supervision, Foshan 528300, China;

2. Key Laboratory of Safety of Intelligent Robots for State Market Regulation, Guangzhou 510670, China)

**Abstract:** In view of the accuracy of the position stabilization time of industrial robots, enterprises and inspection institutions have been constantly studying and improving the detection methods. Through the comparative experiment of the laser tracker and the cable CompuGauge, the uncertainty measurement model is built, and the measurement repeatability, digital resolution, indication error and coordinate alignment are analyzed and evaluated using Class A and B methods. The expanded uncertainty of the laser tracker and CompuGauge are  $U_1 \approx 0.11$  s and  $U_2 \approx 0.19$  s respectively, and finally  $|En| \approx 0.5$ . The experimental results show that the results of the laser tracker are more concentrated, stable, and more accurate, but are most affected by coordinate alignment, while CompuGauge is easy to operate, time-saving, independent of the robot model, but most affected by indication error.

**Keywords:** laser tracker;CompuGauge;position stabilization time;expanded uncertainty;  $|En|$

## 0 引言

工业机器人的位置稳定时间是反映机器人性能的一项重要指标,不仅反映机械构件(电机、减速器)的配合精度,而且反映控制系统算法的精度。对于位置稳定时间的测量,通常采用 Leicad 公司的激光跟踪仪、Faro 公司的激光跟踪仪和 Dynalog 公司的 CompuGauge 等主流高精度设备。对于位置稳定时间的测量方法,目前通常采用国标 GB/T 12642-2013 的做法,但是行业内尚无法对其精度做出有效评价,对位置稳定时间不确定度的认识仍然处于一片空白状态。位置稳定时间的测量,主要与重复定位精度和测量设备的精度有关。重复定位精度,即门限带值,机器人的定位精度主要通过标定来进行误差补偿,基于误差补

偿的定位精度已经有很多研究成果,如赵艺兵等<sup>[1]</sup>建立了基于方向矢量和连接矢量的零参考模型,采用 LM 算法对几何参数误差辨识;张和君等<sup>[2]</sup>分析机械轴系安装误差、光学准直误差、编码器偏心等误差,搭建现场标定装置和提出数值优化求解方法;而测量设备的精度,其影响因素主要包括设备的采样频率和读数分辨率以及坐标对齐转换等,如刘湛基等<sup>[3]</sup>采用最小二乘法的 RANSAC 快速转换算法,乔贵方等<sup>[4]</sup>提出一种融合多点拟合法和轴线矢量测量法的坐标系快速转换方法等。

由于没有对设备的采样频率进行计量校准,所以无法保证测量数据的可溯源性。于是,实验室通过对位置稳定时间的不确定度评定来对测量数据进行精度评价。当前,国内实验室对于不确定度的评定有多种不同的方法,江文

收稿日期:2022-10-10

松等<sup>[5]</sup>采用蒙特卡洛法建立了六自由度机械臂参数校准不确定度评定模型,于海莲等<sup>[6]</sup>分析随机性因素和干涉测量误差、计算方法误差以及环境变化等系统性因素的方法;王智源等<sup>[7]</sup>采用 A、B 类方法对测量重复性和设备测量误差进行评定,依据标准 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》,采用 GUM 方法评定不确定度分量等。通过对比实验,对采集到的数据进行分析计算并汇总归纳,确保检测结果的准确性、可靠性和有效性,完善位置稳定时间的检测方法,提高实验室的技术能力<sup>[8]</sup>。

## 1 位置稳定时间的测试原理

依据标准 GB/T 12642-2013/ISO 9283:1998《工业机器人性能规范及其试验方法》,位置稳定时间是用于衡量机器人停止在实到位置慢程度的性能,是机器人第一次进入门限带的瞬间到不再超出门限带的瞬间所经历的时间,如图 1 所示(虚线表示机器人过阻尼接近,实线表示机器人振荡接近),其中门限带可定义为名义重复性。当机器人到达指令位姿  $P_0$  后,设备连续测量测试点的位置,直到 TCP 稳定在实到位置为止,记测量点坐标为  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  ( $i \in N$ ),第一次进入门限带瞬间的点为  $P_a(x_a, y_a, z_a)$ ,最后一次出门限带瞬间的点为  $P_b(x_b, y_b, z_b)$ ,最终实到位置为  $P_c(x_c, y_c, z_c)$ ,则机器人测量点坐标与最终实到位置坐标的距离  $L_i$  为:

$$L_i = |P_i P_c| = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 + (z_i - z_c)^2}, i \in N \quad (1)$$

假设  $|P_a P_c|$  和  $|P_b P_c|$  无限接近门限带的值,即  $|P_a P_c| \approx |P_b P_c| \approx L$ ,今有点  $P_j(x_j, y_j, z_j)$  ( $j \in N$ ),满足:

$$g(j) = |P_j P_c| - L = \sqrt{(x_j - x_c)^2 + (y_j - y_c)^2 + (z_j - z_c)^2} - L \quad (2)$$

其中,  $L$  为门限带值已知,则当  $g(j) = 0$  时,令  $\sqrt{(x_j - x_c)^2 + (y_j - y_c)^2 + (z_j - z_c)^2} - L = 0$ ,即可求出  $g(j) = 0$  的解,记解所对应的点  $P_j(x_j, y_j, z_j)$  的下标为集合  $A = \{j_a, j_b, \dots, j_n\}$  ( $a, b \in N$ ),其中,  $j_a$  和  $j_b$  分别为  $P_a$  和  $P_b$  点的下标,取集合  $A$  的最小值和最大值分别为  $\min A = j_a$  和  $\max A = j_b$ ,结合文献[9]利用线性插值法对测量数据进行分析的方法,设  $f$  为采样频率,则位置稳定时间  $t$  为:

$$t = \frac{\max A - \min A}{f} = \frac{j_b - j_a}{f} \quad (3)$$

## 2 位置稳定时间比对实验的系统建模

### 2.1 位置稳定时间的实验过程

分别采用激光跟踪仪和 CompuGauge,对同一台六轴搬运机器人的  $P_1$  点位置稳定时间进行检测。已知样品的额定负载和额定速度分别为 8 kg 和 1 500 mm/s,停顿时间设为 4 s,采样频率  $f$  设为 1 000 Hz,则采样时间间隔为

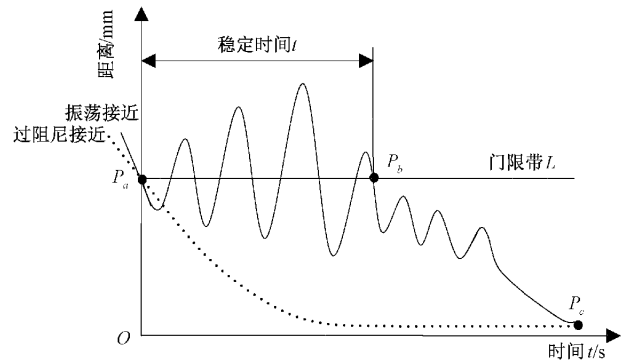


图 1 位置稳定时间的原理

0.001 s,测试轨迹设定为从  $P_2$  点开始运动至  $P_1$  点,当机器人到达  $P_1$  点后,检测设备测量  $P_1$  点的位置稳定时间,采集并记录原始数据如表 1。记录测试现场的温度范围为  $(20.5 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,相对湿度范围为  $(56 \pm 2)\% \text{RH}$ 。

表 1 位置稳定时间重复试验的结果

参数	激光跟踪仪( $x_1$ )/s			CompuGauge( $x_2$ )/s		
1	0.52	0.69	0.48	0.72	0.68	0.59
2	0.52	0.52	0.77	0.88	0.71	0.63
3	0.56	0.68	0.77	0.92	1.10	0.87
4	0.60	0.60	0.68	0.79	0.52	0.66
5	0.61	0.77	0.44	0.73	0.58	0.67
6	0.47	0.60	0.56	0.67	1.04	0.95
7	0.47	0.48	0.52	0.68	0.57	0.96
8	0.48	0.68	0.60	0.52	0.69	0.81
9	0.52	0.47	0.60	1.11	0.88	0.89
10	0.52	0.43	0.52	1.11	0.76	0.90
最佳估计值 $\bar{x}$	0.57			0.79		
标准偏差 $s(x_k)$	0.099			0.18		

首先安装 T-mac 如图 2 所示,实测负载约为 8.1 kg,新建工业机器人模型,导入 D-H 参数,并调试工业机器人的工作空间 box 的位置及棱长。现场发现当 box 过大时,机器人的关节速度超出限制,且容易产生奇异点;当 box 过小时,机器人无法在规定轨迹内达到额定速度,不符合标准的要求。因此,参考文献[10-11]运用 MATLAB 模拟仿真的方法,选择机器人上部工作空间并把正方体 box 的棱长设为 630 mm,且实测速度约为 1 500 mm/s。记录在机器人基础坐标系下 box 所对应的 5 个点的坐标分别为  $P_1(826.2, -0.3, 382.4)$ 、 $P_2(1 078.2, 251.6, 634.4)$ 、 $P_3(1 078.2, -252.3, 634.4)$ 、 $P_4(574.2, -252.3, 130.4)$  和  $P_5(574.2, 251.6, 130.5)$ ,且通过 Spatial Analyzer 软件验证 5 个点共面,参考文献[12]从码垛机器人的空间利用率及左侧轮廓线斜率等方面进行合理评价。

然后安装 CompuGauge 的适配器如图 3 所示,实测负载约为 8.1 kg,调试机器人程序,增加调试次数,减少拉线变形引入的弹性误差和滑轮的装配误差,使 5 点坐标与

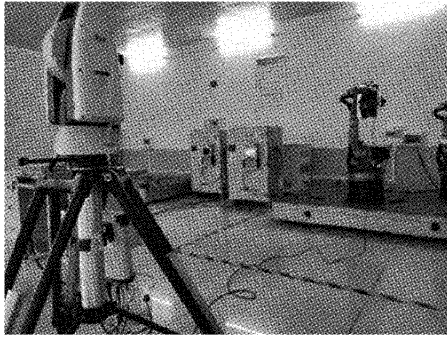


图 2 激光跟踪仪现场试验

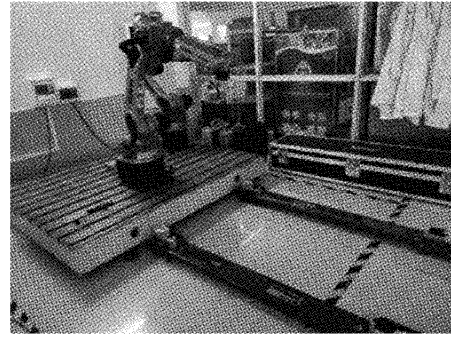


图 3 拉线式测试仪现场试验

光跟踪仪的 5 点坐标基本保持一致,且运行速度、测试轨迹、停顿时间和采样频率也与激光跟踪仪保持一致,最后采集并记录原始数据如表 1。

2.2 标定的过程分析

机器人相邻连杆的齐次变换矩阵是由 4 个连杆参数来

确定的,分别是连杆长度  $a$ ,连杆偏距  $d$ ,连杆转角  $\alpha$  及连杆夹角  $\theta$ ,参考唐越建立的 MD-H 运动学误差辨识模型<sup>[13]</sup>,在激光跟踪仪检测系统中直接导入名义 DH 参数,建立机器人模型,采集 30 个点数据进行标定,所得结果与名义值作差为  $\Delta\alpha_1$ 、 $\Delta\alpha_2$ 、 $\Delta d_1$  和  $\Delta\theta_1$  如表 2 所示。

表 2 名义 DH 参数表(激光跟踪仪、CompuGauge)

项目	$\Delta\alpha_1/(^\circ)$	$\Delta\alpha_2/(^\circ)$	$\Delta a_1/\text{mm}$	$\Delta a_2/\text{mm}$	$\Delta d_1/\text{mm}$	$\Delta d_2/\text{mm}$	$\Delta\theta_1/(^\circ)$	$\Delta\theta_2/(^\circ)$
1	-0.031 1	0.027 6	0.406 0	2.512 9	-0.553 2	-1.115 3	-0.036 1	0.019 2
2	0.005 8	0.032 2	0.239 0	-3.781 5	1.756 5	0.771 6	-0.018 0	0.381 1
3	-0.036 3	0.015 4	0.729 9	0.710 3	1.554 5	0.771 6	-0.257 5	-0.376 5
4	-0.231 5	-0.052 1	-2.655 8	2.068 8	1.180 1	0.560 3	-0.032 6	-0.079 2
5	0.527 9	0.438 6	0.041 6	0.013 8	0.131 8	-0.009 6	0.281 1	-0.279 6
6	-0.466 9	-0.278 8	0.172 4	0.018 0	-0.433 8	1.478 5	-0.211 6	0.019 5

参考朱煜<sup>[14]</sup>提出的闭环矢量链的标定系统几何参数自标定法和罗振军等<sup>[15]</sup>提出的标定方法,通过精密的拉线编码器,在机器人上面采集 50 个点,利用 DynaCal 软件把采集到 50 点数据,与 DynaCal 硬件采集到的数据及机器人的模型数据(根据机器人的设计模型),结合 3 个数据库进行正反解方程得出机器人 TCP 点、home 点、连杆长度、机器人各轴夹角、检测机器人关节齿轮间隙以及减速比等相关参数,所得结果与名义值作差为  $\Delta\alpha_2$ 、 $\Delta\alpha_2$ 、 $\Delta d_2$  和  $\Delta\theta_2$  如表 2 所示。

使用激光跟踪仪标定后辨识得到的机器人连杆长度  $a$  与实际值误差最大为 -2.655 8,相比较名义值 640 mm,相对误差仅为 0.4%;连杆偏距  $d$  最大误差有 1.756 5 mm,连杆转角  $\alpha$  最大误差有 0.527 9°,连杆夹角  $\theta$  最大误差有 0.281 1°;使用 CompuGauge 标定后辨识得到的机器人连杆长度  $a$  与实际值误差最大为 -3.781 5 mm,相对误差仅为 0.6%;连杆偏距  $d$  最大误差有 1.478 5 mm,连杆转角  $\alpha$  最大误差有 0.438 6°,连杆夹角  $\theta$  最大误差有 -0.381 1°。

2.3 坐标对齐的分析

对于激光跟踪仪,向民志提出了工具标定与公共点转换相结合方法<sup>[16]</sup>,通过软件建模将机器人的基坐标系(Base)和机器人模型的坐标系转换到激光跟踪仪的坐标

系,通常随机采集覆盖工作空间的 30 个点进行坐标对齐;对于 CompuGauge 则是直接将设备的坐标系转换到机器人的基坐标系,通常采集工作空间内的 5 个点( $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$ )进行坐标对齐。

由表 3 可知,激光跟踪仪 X、Y、Z 方向的最大偏差为 0.83 mm,均方根误差 RMS 为 0.67 mm,平均偏差为  $\Delta_1 = 0.1$  mm;CompuGauge 的 A 与 B 的角度偏差分别为 0.32° 和 -0.09°,5 个点实际交集的误差为  $\Delta_2 = 0.05$  mm,当  $\Delta_2 \leq 0.05$  mm 时,说明系统处于良好状态,满足操作条件。由于  $\Delta_1 > \Delta_2$ ,说明激光跟踪仪在系统建模时引入了较大的模型误差。

表 3 坐标对齐的结果

激光跟踪仪	对齐结果	CompuGauge	对齐结果
最大位置/mm	0.83	A/(°)	0.32
位置 RMS/mm	0.67	B/(°)	-0.09
平均位置 $\Delta_1/\text{mm}$	0.1	$\Delta_2/\text{mm}$	0.05

坐标对齐后进行位置重复性试验,得出位置重复性的值,将门限带值定义为位置重复性值,则激光跟踪仪和 CompuGauge 的门限带值分别为 0.038 mm 和 0.05 mm,相差仅为 0.012 mm,说明实验条件控制得较好。

### 3 位置稳定时间比对实验的结果分析

#### 3.1 测量模型及测量不确定度分析

位置稳定时间的测量不确定度主要受到测量重复性、数字分辨率、示值误差和坐标对齐的影响,具体为测量重复性引入的不确定度分量  $u(T_1)$ 、设备数字分辨率引入的不确定度分量  $u(\beta)$ 、设备示值误差引入的不确定度分量  $u(\gamma)$  以及设备坐标对齐引入的不确定度分量  $u(\delta)$ ; 由于无法判断温度和湿度的变化对实验结果造成的影响,因此由环境变化所引入的不确定度不予考虑,则建立测量模型如下:

$$t = T_1 + k_1\beta\Delta T_2 + k_2\gamma\Delta T_3 + k_3\delta\Delta T_4 \quad (4)$$

式中:  $t$  表示测量误差,单位为 s;  $T_1$  表示位置稳定时间的测量示值,单位为 s;  $k_1, k_2, k_3$  表示设备的距离示值在参考频率 1 000 Hz 时的影响系数,单位为  $\mu\text{m}^{-1}$ ;  $\beta$  表示设备的数字分辨率,单位为  $\mu\text{m}$ ;  $\gamma$  表示设备的示值误差,单位为  $\mu\text{m}$ ;  $\delta$  表示设备坐标对齐的系统误差,单位为  $\mu\text{m}$ ;  $\Delta T_2, \Delta T_3, \Delta T_4$  表示测量时间间隔,单位为 s。

对于无法溯源的高准确度测量仪器,其仪器的不确定度通常要通过不确定度分析和评定得到。由式(2)和(3)可知,门限带  $L$  与设备的距离测量值对于位置稳定时间的测量结果有着明显的贡献,故经过多次实验测试,激光跟踪仪和 CompuGauge 的距离示值在参考频率 1 000 Hz 下的影响系数约为  $1 \mu\text{m}^{-1}$ ,所以  $k_1 \approx k_2 \approx k_3 \approx 1 \mu\text{m}^{-1}$ ; 由于测量时间间隔  $T = \frac{1}{f}$ ,  $f$  为采样频率,所以  $\Delta T_2 = \Delta T_3 = \Delta T_4 = 0.001 \text{ s}$ 。因此,利用一阶偏导数求得式(4)的灵敏系数分别为:

$$c_1 = c_{T_1} = \frac{\partial t}{\partial T_1} = 1 \quad (5)$$

$$c_2 = c_\beta = \frac{\partial t}{\partial \beta} = k_1\Delta T_2 = 0.001 \text{ s} \cdot \mu\text{m}^{-1} \quad (6)$$

$$c_3 = c_\gamma = \frac{\partial t}{\partial \gamma} = k_2\Delta T_3 = 0.001 \text{ s} \cdot \mu\text{m}^{-1} \quad (7)$$

$$c_4 = c_\delta = \frac{\partial t}{\partial \delta} = k_3\Delta T_4 = 0.001 \text{ s} \cdot \mu\text{m}^{-1} \quad (8)$$

#### 3.2 测量不确定度分量的评定

##### 1) 测量重复性引入的不确定度分量 $u(T_1)$

测量重复性采用 A 类评定方法,对在规定测量条件下测得的值用统计分析的方法进行评定,充分体现了客观性。在重复性测量条件下分别进行 30 组独立重复试验,记结果为  $x_{ji}$  ( $j = 1, 2; i = 1, 2, \dots, 30$ ) 如表 1 所示。

被测量  $X$  的最佳估计值是  $n$  个独立测量值的算术平均值  $\bar{x}_j$ , 计算公式:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ji}, (j = 1, 2; i = 1, 2, \dots, n; n \in N) \quad (9)$$

根据贝塞尔公式求单个测得值  $x_k$  的实验标准偏差  $s(x_k)$ :

$$s_j(x_k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_j)^2}{n-1}} \quad (10)$$

被测量估计值  $x_j$  的 A 类标准不确定度  $u_j(x_j)$  的计算公式:

$$u_j(\bar{x}_j) = s_j(\bar{x}_j) = \frac{s_j(x_k)}{\sqrt{n}} \quad (11)$$

将表 5 中的实测数据分别代入式(9)和(10)即可求得,激光跟踪仪和 CompuGauge 的最佳估计值分别是  $\bar{x}_1 = 0.57 \text{ s}$  和  $\bar{x}_2 = 0.79 \text{ s}$ , 标准偏差分别为  $s_1 = 0.099 \text{ s}$  和  $s_2 = 0.18 \text{ s}$ ; 由于  $s_1 < s_2$ , 说明 CompuGauge 的数据较分散、波动性较大; 将  $s_1$  和  $s_2$  分别代入式(11)求得由重复性测量引入的标准不确定度分别为  $u_1(T_1) = 0.018 \text{ s}$  和  $u_2(T_1) = 0.032 \text{ s}$ 。自由度为  $v_1 = 30 - 1 = 29$ 。

##### 2) 测量设备数字分辨率引入的标准不确定度分量 $u(\beta)$

设备数字分辨率采用 B 类评定方法,反映了人在读数时的差异性。查找设备说明书可知,激光跟踪仪的绝对测距仪(ADM)的数字分辨率为  $\beta_1 = 0.1 \mu\text{m}$ , 则区间半宽为  $0.05 \mu\text{m}$ , 假设服从均匀分布,取  $k = \sqrt{3}$ , 则  $u_1(\beta) = \frac{0.05 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} \approx 0.029 \mu\text{m}$ ; CompuGauge 的数字分辨率为  $\beta_2 = 10 \mu\text{m}$ , 则区间半宽为  $5 \mu\text{m}$ , 假设服从均匀分布,取  $k = \sqrt{3}$ , 则  $u_2(\beta) = \frac{5 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} \approx 2.9 \mu\text{m}$ 。按下式估计其自由度:

$$v_i \approx \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right]^{-2} \quad (12)$$

估计  $u(\beta)$  的不可靠程度  $\left[ \frac{\Delta u(\beta)}{u(\beta)} \right]$  为 10%, 代入式(12)计算得到  $v_2 = \frac{1}{2} (10\%)^{-2} = 50$ 。

##### 3) 测量设备示值误差引入的标准不确定度分量 $u(\gamma)$

设备示值误差反映了激光测距仪的光学漂移误差,采用 B 类评定方法,反映了设备的测量精度。查找设备说明书可知,激光跟踪仪的距离示值误差(MPE)为  $\pm(15 \mu\text{m} + 6 \times 10^{-6} \times L_1)$  ( $L_1$  单位为 m), 查找有效期内的校准证书即可证明该激光跟踪仪在  $L_1 = 3.34 \text{ m}$  处的示值误差为合格,则  $\gamma_1 = \pm 35 \mu\text{m}$ , 区间半宽度为  $\gamma_1 = 35 \mu\text{m}$ , 假设服从均匀分布,取  $k = \sqrt{3}$ , 则  $u_1(\gamma) = \frac{35 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} \approx 20 \mu\text{m}$ ; CompuGauge 说明书给出的 MPE 为  $\gamma_2 = \pm 150 \mu\text{m}$ , 有效期内的校准证书可证明该 CompuGauge 的示值误差为合格,则区间半宽度为  $150 \mu\text{m}$ , 假设服从均匀分布,取  $k = \sqrt{3}$  则  $u_2(\gamma) = \frac{150 \mu\text{m}}{\sqrt{3}} \approx 87 \mu\text{m}$ 。估计  $u(\gamma)$  的不可靠程度

$\left[ \frac{\Delta u(\gamma)}{u(\gamma)} \right]$  为 20%, 代入式(12)计算得到  $v_3 = \frac{1}{2} (20\%)^{-2} = 12$ 。



4) 测量设备坐标对齐引入的标准不确定度分量  $u(\delta)$

设备坐标对齐采用 B 类评定方法,反映了设备在标定  
时补偿方法的差异以及在坐标转换时的计算误差。由表 3  
以及第 2.3 节坐标对齐的分析可知,激光跟踪仪引入了机  
器人 D-H 参数模型,产生的系统误差约为  $\delta_1 = \pm 100 \mu\text{m}$ ,  
则区间半宽为  $100 \mu\text{m}$ ,假设服从正态分布,取  $k=2$ ,则  
 $u_1(\delta) = \frac{100 \mu\text{m}}{2} = 50 \mu\text{m}$ ; CompuGauge 坐标对齐  
Alignment 的误差约为  $\delta_2 = \pm 50 \mu\text{m}$ ,则区间半宽为

$50 \mu\text{m}$ ,假设服从正态分布,取  $k=2$ ,则  $u_2(\delta) = \frac{50 \mu\text{m}}{2} =$

$25 \mu\text{m}$ 。估计  $u(\delta)$  的不可靠程度  $\left[ \frac{\Delta u(\delta)}{u(\delta)} \right]$  为 25%,代入

式(12)计算得到  $v_4 = \frac{1}{2}(25\%)^2 = 8$ 。

5) 合成标准不确定度

激光跟踪仪和 CompuGauge 的不确定度来源、标准不  
确定度、灵敏系数、不确定度分量和自由度如表 4 所示。

表 4 标准不确定度一览表

参数	不确定度来源	标准不确定度 $u_i(x)$	灵敏系数 $c_i = \frac{\partial t}{\partial x}$	不确定度分量值 $u_i =  c_i  u_i(x)$	自由度 $v_i$
激光跟踪仪 ( $u_1$ )	测量重复性 $u_1(T_1)$	0.018 s	1	0.018 s	29
	设备数字分辨率 $u_1(\beta)$	0.029 $\mu\text{m}$	0.001 $\text{s} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	0.000 029 s	50
	设备示值误差 $u_1(\gamma)$	20 $\mu\text{m}$	0.001 $\text{s} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	0.02 s	12
	设备坐标对齐 $u_1(\delta)$	50 $\mu\text{m}$	0.001 $\text{s} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	0.05 s	8
CompuGauge ( $u_2$ )	测量重复性 $u_2(T_1)$	0.032 s	1	0.032 s	29
	设备数字分辨率 $u_2(\beta)$	2.9 $\mu\text{m}$	0.001 $\text{s} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	0.002 9 s	50
	设备示值误差 $u_2(\gamma)$	87 $\mu\text{m}$	0.001 $\text{s} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	0.087 s	12
	设备坐标对齐 $u_2(\delta)$	25 $\mu\text{m}$	0.001 $\text{s} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	0.025 s	8

由于输入量  $T_1, \alpha, \beta$  和  $\delta$  相互之间各不相关,则输出量  
 $t$  的合成标准不确定度的计算公式为:

$$u_c(t) = \sqrt{c_1^2 u^2(T_1) + c_2^2 u^2(\beta) + c_3^2 u^2(\gamma) + c_4^2 u^2(\delta)} \quad (13)$$

结合表 4,将实际数据代入式(13)即可求得激光跟踪  
仪的合成标准不确定度为  $u_c(t)_1 \approx 0.057 \text{ s}$ , CompuGauge  
的合成标准不确定度为  $u_c(t)_2 \approx 0.096 \text{ s}$ 。合成标准不确定  
度  $u_c(t)$  的有效自由度  $v_{\text{eff}}$  的计算公式:

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(t)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(t)}{v_i}}, \quad N = 4 \quad (14)$$

将实际数据代入式(14)即可求得  $v_{\text{eff}}(t)_1 =$   
 $\frac{(0.057)^4}{\frac{(0.018)^4}{29} + \frac{(0.000029)^4}{50} + \frac{(0.02)^4}{12} + \frac{(0.05)^4}{8}} \approx 13.3$ , 取  
 $v_{\text{eff}}(t)_1 = 13$ ;  $v_{\text{eff}}(t)_2 =$   
 $\frac{(0.096)^4}{\frac{(0.032)^4}{29} + \frac{(0.0029)^4}{50} + \frac{(0.087)^4}{12} + \frac{(0.025)^4}{8}} \approx 17.6$ , 取  
 $v_{\text{eff}}(t)_2 = 17$ 。由于  $v_{\text{eff}}(t)_1 < v_{\text{eff}}(t)_2$ , 说明评定的  $u_c(t)_2$   
比  $u_c(t)_1$  可靠。

6) 扩展不确定度的评定

扩展不确定度  $U$  的计算公式:

$$U = ku \quad (15)$$

置信概率  $p=95\%$  时,取包含因子  $k=2$ ,将实际数据代入  
式(15)可求得激光跟踪仪的扩展不确定度为  $U_1 = ku_c(t)_1 \approx$

$0.11 \text{ s}$ , CompuGauge 的扩展不确定度为  $U_2 = ku_c(t)_2 \approx 0.19 \text{ s}$ 。  
由于  $U_1 < U_2$ , 说明激光跟踪仪的精度更高。

### 3.3 评价依据和方法

结果评价用指定设备的结果对参与比对检验设备的结果  
进行评价,采用归一化偏差  $|En|$  值判定,当  $|En| \leq 1$   
时,参与比对的测量结果与参考值之差在合理的预期之  
内,认为比对结果满意,否则为不满意,并指出原因。根据  
计算公式:

$$|En| = \frac{|\bar{y}_2 - \bar{y}_1|}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2}} \quad (16)$$

其中,  $\bar{y}_1$  和  $\bar{y}_2$  分别为激光跟踪仪和 CompuGauge 的  
测量结果,  $\bar{y}_1$  和  $\bar{y}_2$  不相关,  $U_1$  和  $U_2$  分别为激光跟踪仪和  
CompuGauge 的扩展不确定度,  $U_1$  和  $U_2$  的包含因子  
 $k=2$ 。分别利用激光跟踪仪和 CompuGauge 重新测量 3  
组位置稳定时间的结果如表 5,计算 3 组结果的算术平均  
值分别为  $\bar{y}_1 \approx 0.56 \text{ s}$  和  $\bar{y}_2 = 0.67 \text{ s}$ ,将  $\bar{y}_1, \bar{y}_2$  与  $U_1, U_2$  代入  
式(16)即可求得  $|En| \approx 0.5$ 。

表 5 位置稳定时间比对的结果

参数	激光跟踪仪 ( $y_1$ )	CompuGauge ( $y_2$ )
实测 3 组结果/s	0.56 0.61 0.52 0.77 0.67 0.57	
算术平均值/s	0.56	0.67
扩展不确定度 $U$ /s	0.11	0.19
$ En $	0.5	
评价结果	<input checked="" type="checkbox"/> 满意 <input type="checkbox"/> 不满意	

## 4 结 论

由于  $U < 3S$ , 且  $|En| \leq 1$ , 本次结果为满意, 有以下3点结论: 1) 在测量方法基本一致性的前提下充分考虑了设备的测量结果和不确定度, 能较好地反映机器人位置稳定时间的特性以及检测设备之间的差异, 所得数据结果真实、准确和可靠, 满足内部质量控制的基本要求; 2) 在无法溯源的情况下, 填补了计量校准技术的空白, 为企业和检测机构提供了指导方法, 其中,  $u(\beta)$  对两台设备的合成标准不确定度的影响最小,  $u(\delta)$  对激光跟踪仪的合成标准不确定度的影响最大,  $u(\gamma)$  对 CompuGauge 的合成标准不确定度的影响最大; 3) 对于机器人位置稳定时间来说, 激光跟踪仪的扩展不确定度约为 0.11 s, 其数据结果相对较集中、稳定、波动性小, 精度更高, 但操作复杂; CompuGauge 的扩展不确定度约为 0.19 s, 其操作方便、省时, 不依赖于机器人模型, 但数据结果分散、波动性相对较大。另外, 今后可通过实验室间比对的方法, 将本实验室的结果与其它实验室结果作比较, 可以发现不足之处并进一步完善, 从而提升检测能力。

## 参考文献

- [1] 赵艺兵, 温秀兰, 康传帅, 等. 零参考模型用于工业机器人定位精度提升研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5): 76-84.
- [2] 张和君, 马俊杰, 张军. 激光跟踪仪多参数误差模型与标定[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 20-30.
- [3] 刘湛基, 王晗, 陈桴, 等. 机器人与激光跟踪仪的坐标系转换方法研究[J]. 中国测试, 2017, 43(11): 102-107.
- [4] 乔贵方, 孙大林, 宋光明, 等. 串联机器人标定系统的坐标系快速转换方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(14): 1-8.
- [5] 江文松, 李旋, 罗哉, 等. 六自由度机械臂参数校准不确定度评定方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(7): 26-34.
- [6] 于海莲, 夏仰球, 杨川贵. 激光跟踪仪测量工业机器人位置距离准确度的不确定度研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(11): 48-50, 97.
- [7] 王智源, 朱刚. 测定工业机器人位置特性的误差不确定度分析[J]. 电子测量技术, 2016, 39(9): 8-11.
- [8] 麦丽菊, 张艳菊, 徐子轩, 等. 机器人重复精度测试系统期间核查方法的研究[J]. 机床与液压, 2018, 46(11): 66-69, 74.
- [9] 林家春, 朱敏杰, 李睿, 等. 基于激光跟踪仪点位测量的工业机器人位置稳定时间测量与分析[J]. 机电工程, 2018, 35(6): 653-657.
- [10] 何佳唯, 平雪良, 李朝阳, 等. 机器人工作空间求解方法研究及应用[J]. 机械传动, 2015, 39(10): 68-71.
- [11] 董成举, 刘文威, 李小兵, 等. 六轴工业机器人工作空间分析及区域性能研究[J]. 中国测试, 2020, 46(5): 154-160.
- [12] 燕培磊, 卢剑伟, 马树全. 码垛机器人工作空间合理度量化评价方法及应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(7): 883-887.
- [13] 唐越, 郑金辉, 王庆杰. 六自由度工业机器人末端定位误差参数辨识与实验研究[J]. 现代制造工程, 2021(2): 21-26.
- [14] 朱煜. 基于拉线编码器的测量系统与机器人标定算法研究与应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [15] 罗振军, 孙思嘉, 梅江平, 等. 基于拉线位移传感器的机器人标定应用研究[J]. 航空制造技术, 2017(9): 43-49.
- [16] 向民志, 范百兴, 李祥云, 等. 激光跟踪仪与机器人坐标系转换方法研究[J]. 航空制造技术, 2018, 61(Z1): 98-101.

## 作者简介

张昌尧(通信作者), 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为机器人技术、图像处理和模式识别、人工智能检测技术等。

E-mail: 1531588799@qq.com