

测定工业机器人位置特性的误差不确定度分析

王智源¹ 朱刚²

(1. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093; 2. 上海电器科学研究所 上海 200063)

摘要: 依据 GB/T 12642-2013《工业机器人 性能规范及其试验方法》,采用 Dynalog 公司的 CompuGauge 测试系统对新时达 SA1400 工业机器人进行了位置特性的测量。首先验证了试验是在 GB/T 12642-2013 规定的试验条件下进行,得到试验数据后,依据试验方法和计算方法分析该试验结果误差来源,根据 JJF 1059-1999《测量不确定度评定与表示》的方法,不同误差来源会引入不同种类不确定度,分析计算后得到 CompuGauge 引入的不确定度分量及测量重复性引入的不确定度分量,最终分析得到该试验结果的不确定度。

关键词: 工业机器人;位置特性;CompuGauge;不确定度

中图分类号: TP242.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Study on uncertainty evaluation of industrial robot position characteristic

Wang Zhiyuan¹ Zhu Gang²

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Electrical Apparatus Research Institute, Shanghai 200063, China)

Abstract: This paper focuses on the position characteristic test of STEP SA1400 industrial robot based on GB/T 12642-2013 "Industrial robots-performance criteria and related test methods" by using CompuGauge testing system from Dynalog company. Firstly ensure this testing on the foundation laid by GB/T 12642-2013 "Manipulating industrial robots-performance criteria and related test methods". Analyze the primary error of the test after the test finish and compute all parts of uncertainty of the test course. Finally evaluate the position characteristic uncertainty.

Keywords: industrial robot; position characteristic; CompuGauge; uncertainty

1 引言

随着近几年我国工业机器人产业迅猛发展,我国即将成为全球第一大机器人应用市场,机器人质量认证是机器人上市的先决条件,有强劲的市场需求。GB/T 12642-2013《工业机器人 性能规范及其试验方法》对于工业机器人整机测试提供了检测标准,其中对于位置特性检测提供了方法依据。目前有多种根据标准设计的检测仪器,比如单激光跟踪仪、光学经纬仪及本试验使用 Dynalog 公司的 CompuGauge 系统等。

机器人整机性能检测和试验结果不确定度分析一直是国内的空白。作为国内第一批第三方机器人检测机构以及国家评定中心的重要单位,上电科一直在努力研究分析和完善符合标准的试验方法并对既有的机器人整机性能测试结果进行了不确定度评定。本试验利用该系统对新时达 SA1400 机器人进行位置特性检验,并对结果进行了不确定度分析与评定。

2 试验方法

2.1 位置特性定义^[1]

1) 位置准确度

指令位置从相同的方向接近位置时的实到位置平均值之间的偏差。它表示了机器人的指令位置和实际所达位置群中心的偏差。计算公式如下:

$$AP_j = \sqrt{(x_j - x_c)^2 + (y_j - y_c)^2 + (z_j - z_c)^2} \quad (1)$$

$$AP_p = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2} \quad (2)$$

式中: AP_j 是机器人每个实到位置与指令位置的偏差, AP_p 即为机器人的位置准确度, x_j, y_j, z_j 是机器人第 j 次实到位置坐标, x_c, y_c, z_c 是机器人指令位置坐标, $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ 是机器人重复 n 次指令得到的所到位置集群中心点坐标。

2) 位置重复性

指机器人对于同一条指令位置从相同方向重复执行 n 次,所到位置间相一致的程度。计算公式:

$$RP_1 = \bar{l} \pm 3S_l; \bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \quad (3)$$

$$l_j = \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z-z_j)^2} \quad (4)$$

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\bar{l} - l_j)^2}{(n-1)}} \quad (5)$$

式中: RP_1 为机器人的位置重复性及其区间范围; l_j 是机器人 n 次实到位置坐标集群中心和实到位置的偏差; \bar{l} 表示位置重复性; $\pm 3S_l$ 则表示了在置信概率为 99% 的条件下, 标准规定的位置重复性的区间 [2]。

2.2 试验方法

位置特性试验中机器人在由根据 GB/T 12642-2013 第 7.2 规定的检测方法以及 GB/T 12642-2013 第 6.8 规定的平面选用规则选定的平面上按 P1-P2-P3-P4-P5 的制定轨迹重复运行 30 次, 记录每个点实到位置坐标, 并按照标准计算位置特性。机器人在 100% 负载和 100% 速度条件下运行, 环境温度为 25 °C。

CompuGauge 在标准中的钢索三边测量法基础上做出改进, 与三边测试法只能测定机器人位置特性不同该系统通过 4 条绳索连接机器人末端可以测定机器人的位姿特性, 同时能完成标准规定的大部分机器人性能指标测试。其设备连接如图 1 所示, 现场测试情况如图 2 所示。

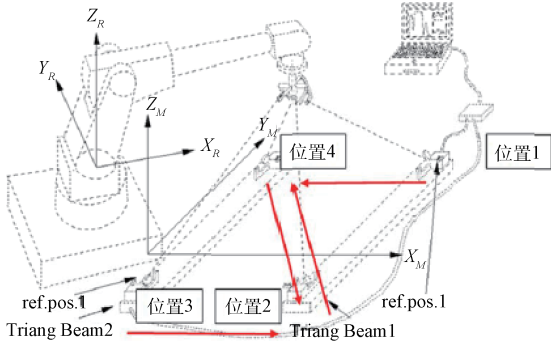


图 1 设备连接



图 2 实际测试现场

2.3 测试平面的选取

依据标准选取的测试平面如图 3 所示, 各指令位置分别为 $P1(1050.000 \ 0.000 \ 40.000)$; $P2(1250.000 \ 200.000 \ 600.000)$; $P3(1250.000 \ -200.000 \ 600.000)$; $P4(850.000 \ -200.000 \ 200.000)$; $P5(850.000 \ 200.000 \ 200.000)$ 。

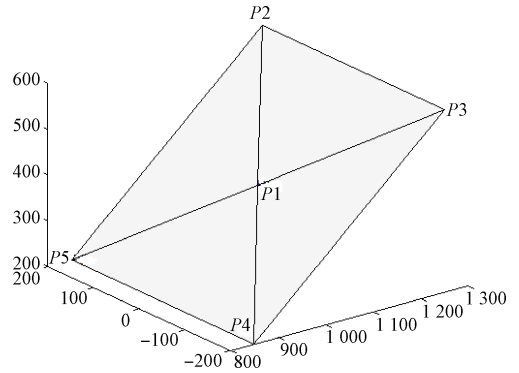


图 3 测试点选取

在 MATLAB 中验证 $P1 \sim P5$ 5 个点共面 [3-4]:

```
syms x y z
```

```
P3 = [1250, -200, 600]; P4 = [850, -200, 200];
```

```
P5 = [850, 200, 200];
```

```
d = det([ones(4,1), [[x,y,z]; P3; P4; P5]]);
```

```
X = [* * *];
```

```
subs(d, [x,y,z], E)
```

分别将 $P1, P2$ 两点坐标分别代入程序 $X = [* * *]$ 矩阵, 最终结果为 0 则表示 $P1, P2$ 在 $P3, P4, P5$ 所确定的平面上。经验证得出 5 点共面。

3 测量误差分析

3.1 测试设备带来的误差

试验过程中 Alignment 操作将末端工具点坐标系转换到机器人基底坐标时会产生误差; 绳索的刚性及编码器计算带来的误差, 这是决定测试设备最大允许误差的主要因素。

3.2 重复性试验引入的误差

根据不确定度 [5-7] 的性质, 第 1 项的标准不确定度来源采用不确定度的 B 类评定, 第 2 项的标准不确定度来源采用 A 类评定。

4 不确定度分量的计算

位置特性试验记录数据平均值及标准偏差如表 1 所示。 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ 均为按照试验标准进行 30 次取样的平均值, 即机器人重复 n 次指令得到的所到位置集群中心点坐标。

表 1 重复试验平均值

	P1	P2	P3	P4	P5
\bar{x}	1 050.160 9	1 249.512 4	1 249.946 1	850.354 5	850.578 6
\bar{y}	0.196 1	199.850 9	-200.405 3	-199.769 0	199.748 7
\bar{z}	399.659 6	599.738	599.963 7	200.706 7	200.416 6

4.1 重复运行引入的不确定度(A类评定)

P1~P5 各点位置准确度的标准不确定度计算公式

为^[8]: $u_{A1} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (AP_j - AP_v)^2}{n(n-1)}}$, 式中各项参数定义见

2.1 节。

P1~P5 各点位置准确度 AP_p 及其 A 类不确定度计算结果如表 2 所示。

表 2 位置准确度及其 A 类不确定度

	P1	P2	P3	P4	P5
AP_1/mm	0.42	0.57	0.41	0.82	0.76
u_{A1}/mm	0.003 9	0.002 3	0.006 1	0.007 3	0.003 2

注:自由度 $\nu(u_{A1})=n-1, n=30$, 则 $\nu(u_{A1})=29$ ^[9]

P1~P5 各点位置重复性的标准不确定度计算公式

为: $u_{R1} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\bar{l}_j)^2}{(n-1)n}}$, 式中各项参数定义见 2.1 节。

P1~P5 各点位置重复性 RP_p 及其 A 类不确定度计算结果如表 3 所示。

表 3 位置重复性及其 A 类不确定度

	P1	P2	P3	P4	P5
\bar{l}/mm	0.025	0.021	0.044	0.043	0.022
S_1/mm	0.012	0.007	0.083	0.030	0.020
u_{A1}/mm	0.002 1	0.001 3	0.015 1	0.005 4	0.003 8

注:自由度 $\nu(u_{R1})=29$

4.2 测试设备的误差引入的位置准确度的不确定度

根据 CompuGauge 系统说明,可知测量准确度时的最大允许误差为 $\pm 0.15 \text{ mm}$,故区间半宽度为 0.15 mm ,在该区间内认为服从均匀分布,包含因子 $k = \sqrt{3}$,则 $u_{A2} = \frac{0.15}{\sqrt{3}} \text{ mm} = 0.086 6 \text{ mm}$;依据 JJF 1059-1999《测量不确定度评定与表示》中不确定度 B 类评定自由度的计算, $\nu \approx \frac{1}{2} [\frac{\Delta u_1}{u_1}]^{-2}$, 其中 $\frac{\Delta u_1}{u_1}$ 代表该不确定度评定的可靠程度,通

常情况下,对于大部分检测机构的测量结果引起的标准不确定度,不可靠程度取 10%,由此计算自由度 $\nu(u_{A2}) = 50$ (下同)。

由于 Compugauge 系统的 Alignment 操作会对位置准确度产生较大影响,其误差为 $\pm 0.08 \text{ mm}$,即区间半宽度为 0.08 mm ,按正态分布,包含因子 $k = 2$,则 $u_{A3} = \frac{0.08}{2} \text{ mm} = 0.04 \text{ mm}$,自由度 $\nu(u_{A3}) = 50$ 。

4.3 测试设备的误差引入的位置重复性的不确定度

根据 CompuGauge 系统说明,可知测量重复性时的最大允许误差为 $\pm 0.02 \text{ mm}$,即区间半宽度为 0.02 mm ,在该区间内认为服从均匀分布,包含因子 $k = \sqrt{3}$,则 $u_{R2} = \frac{0.02}{\sqrt{3}} \text{ mm} = 0.011 5 \text{ mm}$,自由度: $\nu(u_{R2}) = 50$ 。

Compugauge 系统的 Alignment 操作对于位置重复性的影响非常小,在重复性测试中引入的不确定度在合成计算中可以忽略。

5 标准不确定度的合成^[10]

$$u_A = \sqrt{u_{A1}^2 + u_{A2}^2 + u_{A3}^2}; u_R = \sqrt{u_{R1}^2 + u_{R2}^2} \quad (6)$$

P1~P5 各点位置准确度 AP_p 及位置重复性 RP_p 的合成标准不确定度如表 4 所示。

表 4 合成标准不确定度

	P1	P2	P3	P4	P5
u_A/mm	0.095 5	0.095 4	0.095 6	0.095 7	0.095 4
u_R/mm	0.011 7	0.011 6	0.019 0	0.012 7	0.012 1

P1~P5 各点位置准确度 AP_p 及位置重复性 RP_p 的合成标准不确定度的有效自由度如表 5 所示。自由度计算公式为

$$\nu(u_A) = \frac{u_A^4}{\frac{u_{A1}^4}{\nu(u_{A1})} + \frac{u_{A2}^4}{\nu(u_{A2})} + \frac{u_{A3}^4}{\nu(u_{A2})}}; \nu(u_R) = \frac{u_R^4}{\frac{u_{R1}^4}{\nu(u_{R1})} + \frac{u_{R2}^4}{\nu(u_{R2})}}$$

表5 有效自由度

	P1	P2	P3	P4	P5
$\nu(u_A)$	48	47	48	48	48
$\nu(u_R)$	53	51	60	68	60

6 拓展不确定度的评定

取置信概率 $P=99\%$,按表5给出的自由度查 t 分布表得到包含因子 $k=t_{99}(\nu)$,根据公式 $U_{A99}=ku_A$ 及 $U_{R99}=ku_R$ 得如表6和7所示拓展不确定度。

表6 拓展不确定度

$t_{99}(48) = t_{99}(47) = t_{99}(48) = t_{99}(48) = t_{99}(48) =$					
2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68
U_{A99}	0.256	0.256	0.256	0.256	0.256

表7 拓展不确定度

$t_{99}(53) = t_{99}(51) = t_{99}(60) = t_{99}(58) = t_{99}(60) =$					
2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68
U_{R99}	0.019	0.019	0.031	0.021	0.020
$3S_1$	0.036	0.021	0.249	0.090	0.060

经比较, $U_{R99} < 3S_1$ 。因为由拓展不确定度的定义, U_{R99} 表示位置重复性的测量值有 99% 的概率包含于 $\pm U_{R99}$ 区间,所以有 99% 的概率包含于 $3S_1$ 的区间也成立,符合标准要求。

7 结 论

根据计算可知,该型号工业机器人的位置重复性精度较高,但位置准确度相对误差较大。用 CompuGauge 测试设备测量位置准确度时,试验过程中 Alignment 操作将末端工具点坐标转换到机器人基底坐标时引入的标准不确

定度较高;而测量位置重复性时,CompuGauge 的仪器精度误差引入的标准不确定度较高。

参考文献

- [1] GB/T 12642-2013 工业机器人性能规范及其试验方法[S]. 2014.
- [2] JJF 1059-1999 测量不确定度评定与表示[S]. 1999.
- [3] 王智兴,樊文欣,张保成. 基于 Matlab 的工业机器人运动学分析与仿真[J]. 机电工程,2012,29(1):33-37.
- [4] 刑迪雄,张琦. 基于 CATIA V5 的工业机器人运动学仿真研究[J]. 机械,2011,38(1):57-61.
- [5] 李慧奇,王凯红,李思. 基于动态测量理论的数据处理和不确定度评定[J]. 电测与仪表,2015,52(22):80-84.
- [6] 涂启志. 测量结果不确定度的估计与表达[J]. 现代电子技术,2009,32(17):124-127,130.
- [7] 陈小昊,陈晓怀,李高峰. 基于贝叶斯理论的不确定度评定[J]. 黑龙江工程大学学报,2012,3(2):116-119.
- [8] 李睿,曲兴华. 工业机器人运动学参数标定误差不确定度研究[J]. 仪器仪表学报,2014,35(10):2192-2199.
- [9] 郑红. 测量不确定度的自由度的计算[J]. 计量与测试技术,2014,41(12):44-46,48.
- [10] 崔伟群. 合成标准不确定度评定过程中相关系数的数学和测量学意义[J]. 计量与测试技术,2011,39(9):53-55.

作者简介

王智源,1991 年出生,上海理工大学光电信息与计算机工程学院硕士研究生,主要研究方向为工业机器人整机测试。

E-mail:wzy_sutiny@163.com

朱刚,1963 年出生,上海电器科学研究院高级工程师、主要研究方向为认证和测试技术研究。