

本文引用格式: 陈勃琛,郭广廓,董成举,等.工业机器人性能测试技术发展综述[J].自动化与信息工程, 2022,43(1):20-24,48.

CHEN Bochen, GUO Cuangkuo, DONG Chengju, et al. Review of the progress in the performance test of industrial robots[J]. Automation & Information Engineering, 2022,43(1):20-24,48.

工业机器人性能测试技术发展综述*

陈勃琛¹ 郭广廓¹ 董成举¹ 张晓露²

(1.工业和信息化部电子第五研究所/广东省电子信息产品可靠性技术重点实验室, 广东 广州 511370 2.西安赛宝工业技术研究院有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要:工业机器人是推动智能制造转型升级的关键设备,其使用越来越广泛。我国的机器人产业蓬勃发展,但大而不强。性能是机器人产业发展的重要瓶颈,国内外已经开展了较多的相关研究。本文就工业机器人关键整机性能参数的测试方法、设备以及关键成果的相关文献进行综述,指出制约工业机器人性能测试技术发展的主要问题,并对其应用前景进行展望。

关键词:工业机器人;性能测试;激光跟踪仪

中图分类号: TP242.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-2605(2022)01-0004-06

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2022.01.004

0 引言

随着社会发展和经济进步,智能化已成为制造业发展的一个重要趋势^[1-3]。工业机器人作为制造业智能化的通用机械装备,对实现制造业转型升级具有重要意义。根据中国机器人产业发展报告(2021)的数据,2021年全球工业机器人市场规模达335.8亿美元,从2016年到2021年,平均年增长率为11.5%;2021年国内工业机器人市场规模约为839亿元^[4]。

虽然工业机器人应用越来越广泛,但国内工业机器人技术相对国外先进水平还存在较大差距,特别在性能方面。工业机器人性能测试对特定应用场景合理使用机器人以及提高机器人性能都有重要意义。

1 工业机器人性能测试指标体系

工业机器人性能测试指标体系可指导工业机器人的设计、制造、使用和测试等工作^[1],对工业机器人的性能评估以及故障诊断具有重要作用,因此建立一套行之有效的测试指标体系意义重大。

近几年,我国颁布了很多工业机器人相关的国家标准及行业标准^[5],但工业机器人性能测试指标体系建设比较落后,目前基本采用国外标准,国内的相关

研究尚在起步阶段。

工业机器人性能测试指标体系主要包括整机性能指标测试和关键部件性能指标测试。

1.1 整机性能指标测试

工业机器人是一种复杂且集成度较高的机电产品,其整机性能指标测试主要依据GB/T 12642—2013《工业机器人性能规范及其试验方法》(等同采用ISO 9283—1998)和JB/T 10825—2008《工业机器人产品验收实施规范》等标准进行。《工业机器人性能规范及其试验方法》规定了位姿准确度和位姿重复性、多方向位姿准确度变动、距离准确度和距离重复性、位置稳定时间、位置超调量、位姿准确度漂移、位姿重复性漂移、互换性等10余项通用性能指标和1项针对焊接机器人的专用性能指标。《工业机器人产品验收实施规范》中给出了动作检验、工作空间检验等通用性能指标和绝缘电阻检验、耐压检验等安全性能指标。

1.2 关键部件性能指标测试

工业机器人关键部件性能指标测试主要包括精密减速器和伺服电机的测试。精密减速器性能指标测试主要依据GB/T 14118—1993《谐波传动减速器》、

GB/T 30819—2014《机器人用谐波齿轮减速器》和 GB/T 35089《机器人用精密齿轮传动装置 试验方法》，性能指标主要有启动转矩、扭转刚度、背隙、空程、传动误差、空载摩擦转矩等。伺服电机性能指标测试主要依据 GB/T 30549—2014《永磁交流伺服电动机 通用技术条件》和 JB/T 11991—2014《工业机械数字控制系统用交流伺服电动机》等标准，性能指标主要有电机转矩特性及效率、温升、噪声、振动等。

工业机器人整机及关键部件的性能测试指标较多，本文主要分析工业机器人整机性能测试研究进展。

1.3 工业机器人整机关键性能指标测试方法

根据 GB/T 12642—2013《工业机器人性能规范及其试验方法》规定，位姿准确度和位姿重复性是关键指标。

位姿准确度是机器人末端的指令位姿与实到位姿的平均值之差，分为位置准确度和姿态准确度。

位置准确度 AP_p 计算公式为

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

姿态准确度计算公式为

$$AP_a = \bar{a} - a_a$$

$$AP_b = \bar{b} - b_b$$

$$AP_c = \bar{c} - c_c$$

式中：

AP_a 、 AP_b 、 AP_c ——指令位姿对应的姿态准确度；

\bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 、 \bar{a} 、 \bar{b} 、 \bar{c} ——指令位姿；

x_c 、 y_b 、 z_c 、 a_a 、 b_b 、 c_c ——重复 n 次运动后机器人末端位置姿态坐标的平均值。

位姿重复性是指在同一指令位姿条件下，机器人从同一方向重复 n 次运动时，实到位姿的一致程度，分为位置重复性和姿态重复性。

位置重复性计算公式为

$$RP_l = \bar{l} + 3S_l$$

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i$$

$$l_i = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2}$$

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - \bar{l})^2}{n-1}}$$

式中：

RP_l ——位置重复性；

\bar{l} ——实到位姿和各个实到位姿集群重心间的距离；

S_l ——标准偏差；

x_i 、 y_i 、 z_i ——第 i 次测试各个测试点的实到坐标；

n ——测量循环次数。

姿态重复性计算公式为

$$RP_a = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{n-1}}$$

$$RP_b = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (b_i - \bar{b})^2}{n-1}}$$

$$RP_c = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}{n-1}}$$

式中：

RP_a 、 RP_b 、 RP_c ——指令位姿对应的姿态重复性；

a_i 、 b_i 、 c_i ——机器人第 i 次实到位姿坐标。

目前，工业机器人位姿准确度和位姿重复性一般在 μm 级，常规的测试设备无法满足精度要求。早期测试方法与测试设备不发达，一般利用千分尺等工具手动测量，测试过程繁琐且结果可信度低。目前，工业机器人整机性能测试设备主要有三坐标测量仪、球杆仪、经纬仪、激光跟踪仪等。

三坐标测量仪采用 3 个相互垂直的测量轴组成一个笛卡尔空间直角坐标系，将机器人相对位置关系的测量转化为机器人单点或点集的三维坐标测量。三坐标测量仪具有精密的机械运动结构，是一种高效率、

高精度的测量设备，但无法在运动状态下直接测量，只能在静止状态下完成位姿测量。

球杆仪通过内部的径向距离线性传感器测得机器人末端执行器与其工作空间内的某一固定点之间的距离。

经纬仪测量方位角和俯仰角，根据基线的标定结果，解算被测点的坐标。经纬仪只能在静止状态下完成位姿测量，设备成本较高。

激光跟踪仪是由激光干涉仪发展起来的一种空间测量系统，是激光干涉仪应用的延伸。在工业机器人性能测试时，首先，对机器人的运动轨迹进行编程，使机器人在特定空间以特定的轨迹重复运动；然后，机器人在运动过程中特定的指令点停留，激光跟踪仪通过安装在机器人末端的位姿传感器采集机器人在这些点的实到位姿；最后，通过分析计算得到相应的性能参数。

与激光跟踪仪相比，三坐标测量仪测量精度高，但测量范围小；球杆仪便携性好，测量灵活，但测量范围有限；经纬仪系统复杂，测量结果与观测水平相关，自动化程度低。综上所述，激光跟踪仪测量范围大、精度高、速度快，操作方便，应用范围广。

2 国外研究现状

国外工业机器人技术发展较早，其性能测试技术的研究也较早。

1986年美国 LAU K 等人^[6]利用激光跟踪仪进行机器人的位置准确度和重复性研究，并提出利用激光跟踪仪进行校准的方法。

1990年 VAN BRUSSEL 等人^[7]提出精确的运动模型对机器人离线编程非常重要，并指出机器人连杆制造误差、机械臂刚度弹性、编码器分辨率等都会导致机器人运动误差。

2000年 YONG K 等人^[8]指出离线编程机器人的精度较差，利用激光干涉仪对 Cloos Romat 310、ABB IRB 6400S 和 KUKA KR125 三个型号的机器人，在空载条件下 X 轴和 Y 轴方向的线性位置误差和直线度进行测试。结果显示，ABB IRB 6400 较另外 2 个

型号机器人精度更高，且在整个工作空间精度分布也更稳定。

2001年 YONG K 等人^[9]对 FANUC Hexapod 的 Flextool-100 和 Flextool-200 机器人进行精度测试，指出两代机器人都具有较好的运动精度，但 Flextool-200 机器人的机械设计和控制精度都更优异。

2008年 ISMAIL A R 等人^[10]利用激光干涉仪对 FANUC ARC Mate 机器人，在不同负载和不同工作位置的准确度和重复性进行测试，并对测得数据进行分析，研究位置准确度和重复性与负载的关系，拟合得到线性关系式。

2011年 OH Y T^[11]利用 12 mm 数字位移传感器的球杆仪对多关节机器人的位置准确度进行测试，并提出提高准确度的方法。

2012年 MOHAMED S 等人^[12]按照 ISO 9283 分别利用激光跟踪仪、激光干涉仪和球杆仪对 ABB IRB1600 机器人，在不同运动速度下的运动精度进行测试分析，发现机器人从静止状态开始测试比在短暂运动热身后测试单向位置重复性更好，且测试斜面中心的重复性较边界区域的重复性好。同时，指出激光干涉仪可用来测试机器人直线路径的线性误差以及与运动轨迹正交的轴转角误差，但成本昂贵。综合考虑成本和测试精度，球杆仪是较好的选择。

2012年 CIMPOERU I^[13]将机器人的性能分为作业性能、与人相关性能和环境相关性能，并研究 3D 测试设备、固定基准设备以及 Cassino 跟踪系统等性能测试方法。

2017年 MOROZOV M 等人^[14]利用激光跟踪仪对 KUKA KR5 机器人的位姿和不同运动速度下的动态轨迹准确度分别进行研究。为得到机器人整个工作空间的位置准确度，设计了新试验，研究机器人局部位置准确度和机器人工作空间的关系，发现在 X 轴和 Y 轴方向位置准确度存在明显循环。

2018年 PACZEK M 等人^[15]提出运动准确度是机器人使用的最大问题，利用 Faro Vantage 对 KUKA KR16-2 机器人的位置准确度和重复性进行测试，研究在边长为 200、600 和 1 000 mm 的正立方体空间

下,不同的运动路径和运动参数对机器人运动准确度的影响,并将离线编程和在 Robcad 虚拟运行环境编程条件下的机器人运动准确度和重复性进行对比。结果表明,虚拟运行环境编程条件下可以更好地保证机器人的准确度。

校准是提高机器人性能的重要方法。通过性能测试可获得机器人误差来源;通过机器人运动模型和补偿算法可对机器人的关节参数、减速比等参数进行补偿,提高机器人运行精度。目前已经有较多的校准方法被提出^[16-17]。

综上所述,国外从 80 年代就开始了工业机器人性能测试技术的研究并形成了多种测量方法。常采用激光跟踪仪、激光干涉仪和球杆仪等测试设备对工业机器人进行多点测量,并通过对比不同工况的测试数据,分析机器人的运动性能。近年来,利用计算机图形学和矩阵变换,结合 CAD 技术和图形显示技术,对机器人末端复杂运动轨迹进行离线仿真,可快速完成工业机器人的精度分析。同时,机器人仿真技术在机器人离线编程及机器人轨迹仿真方面的应用已成为研究热点之一,受到越来越多的关注。

3 国内研究现状

国内关于机器人性能测试技术的研究相对较晚。

1992 年杨志超等人^[18]对位姿精度和位姿重复性的计算方法进行分析,并设计一种由特定的测试框和测试块组成的测试装置,利用该装置可得到机器人位姿重复性误差,但该装置自身准确度无法保证。

2000 年陈虹等人^[19]提出一种机械随动式机器人性能测试系统,该系统利用 DH 算法进行数据分析计算,可获得相应的位置误差。同时,分析了该系统的测试分辨率以及测量不确定度。该测试系统虽然结构简单、成本低,但测试精度较差。

2010 年蔡广宇等人^[20]实际测量弧焊机器人的运动轨迹,并以最小二乘法拟合得到轨迹直线方程,计算得到弧焊机器人直线轨迹的位置准确度、方向准确度和重复精度。

2017 年张鑫龙等人^[21]利用单激光跟踪干涉仪对

码垛机器人进行位置精度的测试和分析。利用干涉仪测得距离数据换算得到机器人末端位置;利用安装在机器人末端的固定跟踪系统得到机器人的方位角,从而得到机器人末端位姿。

2017 年张曦等人^[22]提出机器人性能测试标准存在门限带设置不明确、数据冗余等问题并给出建议;利用 LRD840 激光跟踪仪对 SR50 机器人的几何性能进行测试,并开发机器人精度测试软件进行数据处理。

2018 年麦丽菊等人^[23]以激光跟踪仪为对比仪器,对机器人重复精度测试系统进行了期间核查研究。以激光跟踪仪测量值为指定值,将被核查仪器的测量结果与指定值进行对比,通过 En 指标来判断设备核查结果是否符合要求。此外,还对机器人重复精度测试系统的测量不确定度进行分析。

2019 年王茂林等人^[24]对激光跟踪仪测试法、基于拉线位移传感器测试法、视觉测试法和试验探头法等多种机器人性能测试方法进行分析,认为激光跟踪仪测试法综合性能更好。同时,选取激光跟踪仪测试法对机器人进行测试,研究速度、负载和空间位置等因素对机器人位姿准确度、位姿重复性和轨迹准确度等性能参数的影响。

2020 年董成举等人^[25]利用蒙特卡洛方法得到机器人的工作空间,并把最大工作空间划分为多个工作域,利用激光跟踪仪测试方法得到机器人在各工作域的性能参数,从而得到机器人位置准确度和位置重复性在工作空间内的分布,指导机器人应用于相应的工况。

综上所述,国外的工业机器人精度评估和性能测试技术较成熟,但其测试设备价格昂贵。国内工业机器人性能研究以测试性能参数为主,整体技术水平落后于国外的研究水平。当前国内工业机器人的技术发展水平与实际应用需求之间的矛盾依然突出,工业机器人性能测试及提升方法的研究具有重要的价值和广阔的应用前景。

4 问题与展望

4.1 存在的问题

国外对机器人性能的相关研究开展较早,早期研

究主要集中于机器人性能测试后的定性分析,后期逐渐开展机器人性能影响因素的定量分析,及对如何提高机器人性能参数研究。国内对机器人性能的相关研究以性能测试为主,近年来开始研究性能参数对机器人使用工况的影响。

通过以上文献可以看出,国内仍然缺乏低成本、高精度的测试设备,这是制约机器人性能测试技术发展的主要问题。此外,对机器人性能进行实时测试与补偿的研究较少。

4.2 未来展望

机器人性能测试对于机器人的应用意义重大,测试的目的是为了提高机器人本身的性能,因此以后需要更关注机器人性能参数与影响因素的定量关系,通过影响因素分析找到更加便捷、经济的提升机器人性能的方法。

参考文献

- [1] STEFFEN Landscheidt. The future of industrial robot business: Product or performance based?[J]. *Procedia Manufacturing*, 2018,25:495-502
- [2] 谭建荣,刘达新,刘振宇,等.从数字制造到智能制造的关键技术途径研究[J].*中国工程科学*,2017,19(3):39-44.
- [3] ROSSMANN J. eRobotics meets the internet of things: modern tools for today's challenges in robotics and automation[C]// *International Conference on Developments of E-Systems Engineering*. IEEE, 2016.318-323.
- [4] 中国电子学会.中国机器人产业发展报告(2021)[R/OL]. (2021-11-03). https://www.sohu.com/a/499019569_120056153.
- [5] 全国自动化系统与集成标准化技术委员会.GB/T 12642—2013 工业机器人 性能规范及其试验方法[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [6] LAU K, HOCKEN R J, HAIGHT W C. Automatic laser tracking interferometer system for robot metrology[J]. *Precision Engineering*, 1986,8(1):3-8.
- [7] VAN BRUSSEL H. Evaluation and testing of robots[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1990,39(2):657-664.
- [8] YOUNG K, PICKIN C G. Accuracy assessment of the modern industrial robot[J]. *Industrial Robot*, 2000,27(6):427-436.
- [9] YOUNG K, PICKIN C G. Speed accuracy of the modern industrial robot[J]. *Industrial Robot*, 2001,28(3):203-212.
- [10] ISMAIL A R, HASSAN A, SHAMSUDDIN S, et al. The performance analysis of industrial robot under loaded conditions and various distance[J]. *International journal of mathematical models and methods in applied sciences*,2008,2(2):277-284.
- [11] OH Y T. Robot accuracy evaluation using a ball-bar link system[J]. *Robotica*, 2011, 29(PT.6):917-927.
- [12] MOHAMED S, ALBERT N, ILIAN B, Assessment of the positioning performance of an industrial robot[J]. *Industrial Robot*, 2012,39(1):57-68.
- [13] CIMPOERU I. Measurements methods of industrial robots accuracy and workspace determination[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 463-464:1264-1267.
- [14] MOROZOV M, RIISE J, SUMMAN R, et al. Assessing the accuracy of industrial robots through metrology for the enhancement of automated non-destructive testing[C]// *IEEE International Conference on Multisensor Fusion & Integration for Intelligent Systems*. IEEE, 2017.
- [15] PACZEK M, PISZCZEK U. Testing of an industrial robot's accuracy and repeatability in off and online environment[J]. *Eksploatacja i Niezawodnos-Maintenance and Reliability*, 2018,20(3):455-464.
- [16] CHEN H, FUHLBRIGGE T, SANG C, et al. Practical industrial robot zero offset calibration[C]// *IEEE International Conference on Automation Science & Engineering*. IEEE, 2008.
- [17] SUN L, LIU J, SUN W, et al. Geometry-based robot calibration method[C]//*Robotics and Automation*, 2004. *Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on*. IEEE, 2004.
- [18] 杨志超,宋文骐,刘豪.机器人位姿重复性测试及计算的一种新方法研究[J].*昆明工学院学报*,1992(1):61-66.
- [19] 陈虹,张超群,蔡鹤皋.机器人性能测试仪分辨率及精度的分析[J].*机电一体化*,2000,6(3):57-60.
- [20] 蔡广宇,崔士林.弧焊机器人直线轨迹精度测试研究[J].*计算机工程与应用*,2010,46(1):48-50.
- [21] 张鑫龙,原思聪.码垛机器人位置精度测试与分析[J].*机床与液压*,2017,45(3):73-77.
- [22] 张曦,涂笔城,李伟.工业机器人几何性能测评方法研究[J].*计量与测试技术*,2017,44(6):4-7.
- [23] 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.
- [24] 王茂林,李本旺,管越,等.工业机器人整机性能影响机制试验研究[J].*机床与液压*,2020,48(15):17-21.
- [25] 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.

(下转第 48 页)