

Leica 绝对激光跟踪仪在工业机器人校准及检测中的应用

海克斯康测量技术（青岛）有限公司 刘凯

针对国产工业机器人的绝对定位精度较低，在某些高精度检测、加工及制造应用领域存在的较大应用短板，作为全球领先的计量方案提供商——海克斯康通过感知、解析及行动，推出了工业机器人校准及检测系统，提高工业机器人精度，以弥补其在应用领域存在的不足。文章详细介绍了该工业机器人校准及检测系统中的关键技术及校准检测流程，并通过案例展示其在工业机器人参数补偿与性能检测中的巨大优势。

一. 引言

在新的国际国内环境下，立足于国际产业变革大势，2015年5月19日，国务院正式印发了《中国制造2025》，旨在全面提升中国制造业发展质量和水平，从制造大国迈向制造强国。同时我国科技部印发了关于发布国家重点研发计划智能机器人等重点专项2017年度项目申报指南的通知，围绕了对工业机器人以及其他五个方向进行部署，落实《中国制造2025》等规划，推动我国工业机器人技术和产业快速发展（图1）。

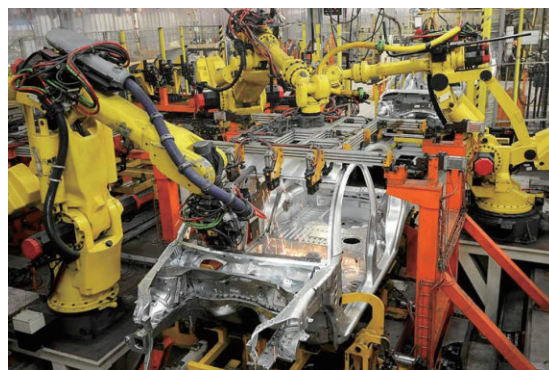


图1 机器人在整车焊装车间应用

通过近十年的发展，中国机器人产业从无到有、从小到大，目前已经形成了一百余家从事机器人研发设计、生产制造、工程应用以及零部件配套的产业集群，国产机器人的应用已遍及汽车制造、工程机械、食品加工等行业。随着国产机器人应用场景越来越广泛，仅仅保证重复性指标已经不能满足需求，国产机器人绝对定位精度较低的弊端越来越凸显，成为限制国产工业机器人发展的绊脚石，如何提高绝对定位精度成为国产机器人厂家亟待解决的问题。

2016 年我国正式开始建立实施机器人检测认证制度，以助力国产机器人质量控制和自主创新能力提升，助推国产机器人产业进步升级，增强我国在全球机器人产业标准和合格评定程序制定方面的话语权和国际竞争力。机器人检测认证制度的实施，需要建立规范的标准及认证方式，也需要系统全面的检测手段支撑，然而在机器人整体性能指标检测领域，还并没有一套完备的解决方案。

二. 国产工业机器人精度校准及性能检测的现状

1. 国产机器人存在的问题

依据《GB/T 12642-2013 工业机器人性能规范及其试验方法》，衡量工业工业机器人性能的指标如图 2 所示。

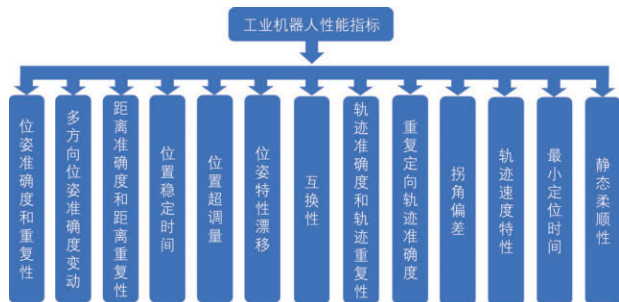


图 2 工业机器人性能指标

从以上指标可以看出，描述工业机器人的性能指标主要有两个方面：重复性和准确性。重复性是指工业机器人重复回到同一位姿的能力，即重复定位精度；准确性是工业机器人到达指令位姿的能力，也叫绝对定位精度。当前大多数的国产工业工业机器人厂家都无法提供完整的出厂性能指标信息，能给出的只有重复定位精度指标，无法提供准确性的相关信息。而且国产工业机器人的重复精度一般都较高（0.05mm 或更高），绝对定位精度却往往都无法保证（5mm 甚至更低）。

2. 问题分析

(1) 缺乏量化工业机器人精度的测量手段，导致大部分性能指标无法进行定量的评估，国产工业机器人厂家过去经常采用顶尖对齐的方法来进行校准并测试精度，这种方法靠肉眼来判定误差大小，无法量化，所以不能保证精度。有的厂家引入了拉线测量手段尝试定量的分析工业机器人性能，但该方法也存在诸多限制，比如拉线的长度会限制测试空间的大小，拉线的存在会降低工业机器人位姿可达性，而且拉线本身及附属机械结构的受力变形都会影响测

量精度，并不是一种完美的测量方案；行业内还尝试过其它比如影像测量等手段，但受限于精度或契合特性，始终无法得到满意的结果。

(2) 没有全面补偿工业机器人精度的系统性方法，导致工业机器人的准确性指标不能得到保证，工业机器人的重复定位精度主要受关节齿轮系的精度及编码器的分辨率影响，而工业机器人的绝对定位精度会受到连杆长度、连杆偏移、工具坐标系 TCP 的定义偏差等工业机器人运动学模型几何参数以及机体的弹性变形、关节柔性、齿轮传动误差及间隙等其他非几何参数因素的影响，图 3 为几种常见误差源。

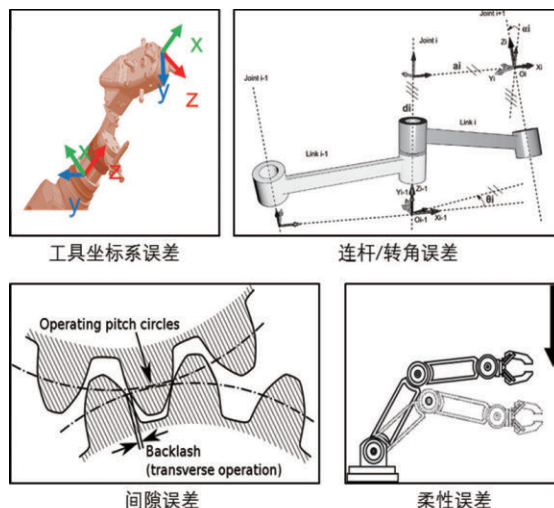


图 3 工业机器人主要误差源

重复性是由工业机器人本身的硬件素质保证的，在成本允许情况下尽可能提高齿轮系及编码器的精度，即可获得较好的重复性精度；而准确度是受多方面影响的，工业机器人零配件的加工误差以及装配误差都会引起几何参数误差，而且几何参数引起的误差代表 90% 工业机器人 TCP 位置误差。如何补偿几何参数误差，成为提高工业机器人绝对定位精度的重中之重。

三. Leica 工业机器人校准及检测方案

面对用户对全面有效的校准检测方案的需求，海克斯康迅速做出响应，深入工业机器人厂家及科研院所调研并分析，研发出专门应对工业机器人校准及性能检测需求的 RoboDyn 软件系统，并搭配集团旗下的拳头产品 Leica AT960 绝对跟踪仪测量系统，搭建形成一套完备的工业机器人校准及检测方案，如图 4 所示。

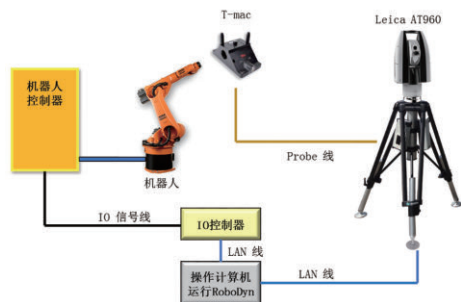


图4 Leica 工业机器人校准及检测方案示意图

该方案主要包括Leica AT960绝对跟踪仪、RoboDyn精度校准及性能检测软件、I/O控制器、T-mac测头等组成部分，Leica AT960绝对跟踪仪+T-mac测头，负责测量机器人法兰末端的位置和姿态，并输出带有时间标记的位置和姿态信息；RoboDyn软件负责机器人模型的创建，生成测点和机器人程序，获取跟踪仪的测量数据，进行分析计算，校准机器人模型，并生成校准结果和检测报告；IO控制器实现RoboDyn软件、机器人以及跟踪仪之间的同步，确保整个过程的有序、自动完成，各组成部分如图5所示。

Leica AT960绝对跟踪仪	Robodyn精度校准及性能检测软件	T-mac测头及I/O信号控制器
实现6自由度动态测量的便携式激光测量系统。集绝对便携、绝对速度、绝对精度等特性于一身； ➢ 测量频率高达3000Hz ➢ 1000点/秒的数据输出 ➢ 典型测量精度 $7.5\mu\text{m}+3\mu\text{m/m}$	主要分为校准和检测两个模块 ➢ 校准模块修正工业机器人DH模型（连杆参数、关节转角）以及减速机、耦合比，提高工业机器人的绝对定位精度； ➢ 检测模块依据GB/T 12642即ISO 9283标准要求，帮助用户完成对工业机器人的性能指标测试。	➢ T-mac测头搭配AT960绝对跟踪仪，可实现对目标位置和姿态的动态跟踪及高精度测量，同时监控和测量工业机器人位置精度和姿态精度。 ➢ I/O信号控制器，实现RoboDyn软件、机器人以及跟踪仪之间的同步。

图5 Leica 工业机器人校准及检测主要组成部分

1. Leica AT960绝对跟踪仪+Tmac测量系统

海克斯康旗下的Leica AT960绝对跟踪仪，是第一款真正意义上实现6自由度动态测量的便携式激光测量系统，集绝对便携、绝对速度、绝对精度等特性于一身；Leica AT960绝对跟踪仪的测量频率高达3000Hz，可实现1000点/秒的数据输出，典型测量精度高达 $7.5\mu\text{m}+3\mu\text{m/m}$ ，完全满足工业机器人的精度指标要求。

搭配T-mac测头，可实现对目标位置和姿态的动态跟踪及高精度测量，可同时实现对工业机器人位置精度和姿态精度的监控和测量，而且跟踪仪内置毫秒级的时钟，可以进行时间维度的测量分析，完美契合工业机器人性能指标的测量需求。继汽车行业、机加工行业、航空航天等

行业之后，Leica AT960绝对跟踪仪必将在工业机器人行业大放异彩。

2. RoboDyn精度校准及性能检测软件

RoboDyn是海克斯康集团旗下专业的测量软件开发公司New River Kinematics公司专门为工业机器人行业开发的软件系统，主要分为校准和检测两个模块：

(1) 校准模块，根据机器人的几何参数信息创建DH参数表，进而建立机器人数字化理论模型，利用跟踪仪测量得到的位置和姿态数据进行运算优化，对齐测量坐标系与机器人坐标系，解算出工具的位置姿态偏差，得到优化后的机器人模型，实现对机器人DH模型（连杆参数、关节转角）以及减速机、耦合比的修正，提高工业机器人的绝对定位精度，操作整个流程如图6所示。



图6 校准模块操作流程

(2) 检测模块：依据GB/T 12642即ISO 9283标准要求，帮助用户完成对工业机器人各项性能指标的测试。其中得益于Leica AT960绝对跟踪仪高速动态跟踪的特性、毫秒级的测量时钟频率以及6Dof(Leica T-mac)动态测量能力，位置稳定时间和超调量、轨迹准确度和轨迹重复性、重复定向轨迹准确度、拐角偏差、轨迹速度特性、最小定位时间、摆动偏差等测试项目才能得以实现。检测模块操作流程如图7所示。

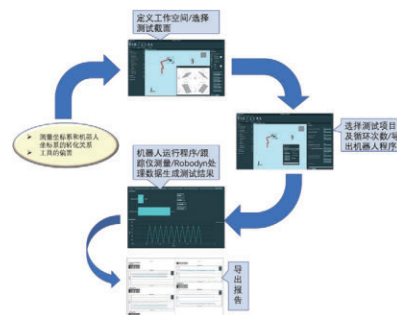


图7 性能检测模块操作流程

Robodyn软件根据工作空间、设备位置、测试项目等信息进行综合考虑，内置后处理程序根据机器人控制器类型

自动生成机器人能识别的指令程序，下载到控制器后可直接运行，无需进行繁杂的位置示教和编程。而且 RoboDyn 软件与跟踪仪、机器人之间使用 IO 信号通讯实现同步，一键开始测量之后，校准及性能测试的测量及数据分析过程均可自动完成。

四. 应用案例

某机器人厂 XXX 型号 6 轴机器人精度校准及性能测试的过程及结果报告。

1. 机器人校准

基于现场的跟踪仪和机器人的布局（图 8），在 RoboDyn 软件内创建好虚拟的工作环境，本系统可支持 6 轴机器人全部 24 个 DH 参数全的校准，也可根据实际机器人控制系统所支持的标定参数来进行调整。经过测量与软件分析之后，机器人的 DH 参数、减速比、耦合比以及校准后测机器人精度结果如图 9 所示，可见通过校准，理论上机器人的平均位置精度可以由 1mm 提升到 0.1mm，平均姿态精度也由校准之前的 0.3° 提升到 0.03° 。



图 8 机器人校准及性能测试现场

校准前					校准后				
Name	Alpha	A	D	Theta	Name	Alpha	A	D	Theta
Link1	0	0	475	0	Link1	0.1495	-0.214	475.65	0.2612
Link2	-90	150	0	90	Link2	-89.93	150.05	0.1347	89.669
Link3	0	-600	0	0	Link3	-0.015	-599.9	0.1347	-0.012
Link4	90	-120	720	0	Link4	89.996	-119.9	719.77	0.3133
Link5	-90	0	0	0	Link5	-89.99	0.0532	-0.307	0.2639
Link6	90	0	85	0	Link6	90.006	-0.018	85.101	0.0601

DH参数		DH参数	
CouplingRatio	ReductionRatio	CouplingRatio	ReductionRatio
0	1	0	0.9998
0	1	0	0.9998
1	1	1.0008	0.9989
0	1	0	1.0005
0	1	0	1.0001
0	1	0	1.0008

耦合比 减速比		耦合比 减速比	
Name	Values	Name	Values
Position Average	1.2844	Position Average	0.0673
Position Max	2.863	Position Max	0.1327
Position RMS	1.4086	Position RMS	0.0741
Orientation Average	0.301	Orientation Average	0.0306
Orientation Max	0.5539	Orientation Max	0.0682
Orientation RMS	0.3317	Orientation RMS	0.0343

图 9 校准前 / 后对比

2. 机器人性能测试

定义测试空间并选择测试截面，RoboDyn 软件会根据 GB/T 12642 标准自动生成所有的测试点位（图 10），并根据所选测试项目和循环次数生成机器人程序，测试完毕后，会自动出具测试结果的报告和数据图标，如图 11 所示。

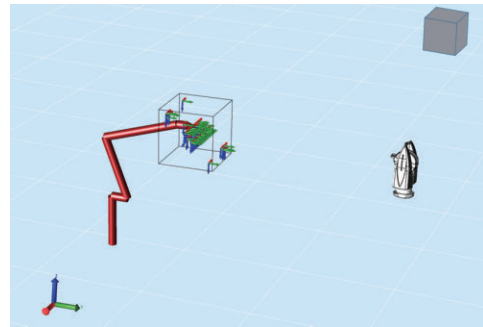


图 10 自动生成测试点位



图 11 性能测试结果图标

五. 结语

上述机器人校准及性能测试方案，已经在串联工业机器人领域得到了充分的使用和验证，获得了一致好评，数十家工业机器人生产厂家、科研院所、评定检测机构都选择了该方案去解决他们的问题。该方案完美的诠释了海克斯康制造智能三部曲——“感知、解析和行动”，Leica AT960 绝对跟踪仪 + T-mac 负责感知，精确采集所需数据，洞察机器人的误差信息，RoboDyn 软件负责解析，分析处理采集到数据，将机器人的性能信息完整的呈现出来，并根据误差推算出需要补偿的参数，指导机器人精度补偿的行动，提升机器人的品质，真正形成了一个感知、解析和行动的闭环，海克斯康助力《中国制造 2025》。