

机器人热影响模型分析及动态精度补偿

李睿¹, 赵阳²

(1. 北京工业大学 北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心, 北京 100124;
2. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘要: 如何提高机器人定位精度是机器人柔性化加工中重点研究的问题, 而温度变化引起的机构热变形是影响定位精度的重要原因之一。分析了机器人自身发热及现场环境温度变化对各轴运动学参数及末端定位精度的影响, 采用有限元原理构建机器人的温度分布及热变形模型。针对两种热影响模型提出了温度补偿的策略, 重点对机器人自身发热情况下的运动学参数显著相关性进行了试验和理论分析。提出一种便捷的、适合工业现场环境的机器人自身发热影响动态补偿方法。综合以上原理实现的温度补偿策略, 可以保证由温度变化引起的末端定位误差小于 0.1 mm。

关键词: 机器人; 热影响模型; 动态补偿; 有限元分析

中图分类号: TP242.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2382-07

Thermal effect model analysis and dynamic error compensation of industrial robot

Li Rui¹, Zhao Yang²

(1. Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China 2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: To advance the precision of the robot motion is one significant research goal of robot flexible processing issues. In the process, deformation mechanism of heat caused by temperature variation is found as one of the important reasons for affect the positioning error. The temperature compensation method suitable for the industry field was presented and testified through this paper. Effect of robot self-heating and scene environmental temperature factors on axial motion and the ending actuator positioning accuracy were analyzed. The thermal distribution and deformation models were built using finite element theory. Thermal compensation strategy was presented to accomplish the experimental and theoretical analysis of significant correlation between robot kinematics parameters and thermal models above, especially self-heating effect. It was convenient and suitable for industrial field environment. Thermal compensation is experimentally proved to carry the ability to adjust the position error of ending actuator to less than 0.1 mm.

Key words: robot; thermal effect mode; dynamic compensation; finite element analysis

收稿日期: 2014-12-05; 修订日期: 2015-01-03

作者简介: 李睿(1986-), 女, 博士, 主要从事工业机器人、精密光电测量方面的研究。Email: lirui1860@163.com

通讯作者: 赵阳(1982-), 男, 博士, 主要从事大型航天器空间机械臂测试方案设计、性能数据分析、及故障诊断和健康管理。

Email: abc2709786@126.com

0 引 言

机器人末端定位误差由多种因素综合引起^[1], 其中温度变化导致的连杆变形、关节膨胀对机器人定位精度有很大影响。目前国内外针对工业机器人运动系统如何补偿温度误差进行了大量研究。参考文献[2]对高精度并联机器人温度误差进行补偿, 在外部激光干涉测量系统、机器人系统和外界环境中布置 11 个温度传感器, 温度补偿后位置精度可达 0.1 μm。而对于串联机器人的温度补偿比并联机器人要复杂很多。参考文献[3]通过测量被加工件的表面温度变化确定机器人最佳运行路径和速度。参考文献[4]提出一种最优控制理论, 通过非均匀三次样条曲线差值法, 根据温度限制优化路径算法。参考文献[5]提出了补偿机器人温度误差的方法, 采用逆运动学计算修正温度误差。

文中在国内外研究的基础上提出一种便捷的、适应工业现场环境温度变化的误差补偿方法。根据机器人自身发热误差模型和预先测量获得的机器人受温度变化产生的误差变化规律, 设定运动补偿阈值条件和补偿时机。文中具体分析了环境温度变化对各轴误差影响规律, 并采用有限元分析的方法建立了各轴温度分布及热变形误差模型, 计算理论情况下各轴温度分布及热变形量, 并在此基础上实验测量, 确定对末端靶球定位精度影响最为显著的 6 项运动学参数。根据机器人热影响误差模型, 计算机器人自身发热及外界温度变化干预后的运动学参数误差并进行动态补偿。实验验证了通过温度补偿可有效减小工作空间内任意点位机器人末端定位误差。

1 系统温度误差来源和规律分析

机器人运动系统各轴受到两个方面温度变化的影响: 一是机器人所处环境温度变化对各轴运动学参数影响; 二是机器人运动过程中, 电机发热和关节间相对转动产生的摩擦发热对各轴运动学参数影响。两项温度变化对机器人运动精度的影响需分别考虑。

文中采用激光跟踪仪测量机器人末端靶球空间坐标^[6], 实验系统如图 1 所示。通过测量固定在机器人末端的靶球坐标, 可解算得到机器人末端中心坐

标, 用于分析机器人运动过程中末端空间坐标由温度变化产生的误差规律。

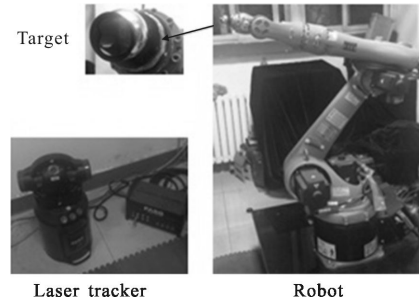


图 1 温度误差测量实验系统

Fig.1 Experiment system for temperature error measurement

1.1 外部环境温度变化对机器人运动误差的影响规律

机器人工作温度区间为-10~50 ℃, 为分析环境温度变化对机器人控制精度的影响规律, 采用 ansys 有限元分析建立不同温差情况下各轴产生的热变形误差模型^[7], 计算不同温差条件下的热变形率。如图 2 所示, 选择温差分别为 10 ℃、30 ℃和 60 ℃计算, 对应温度范围分别为 20~30 ℃、10~40 ℃和-10~50 ℃。不同温差下热变形率的最大和最小值如表 1 所示。

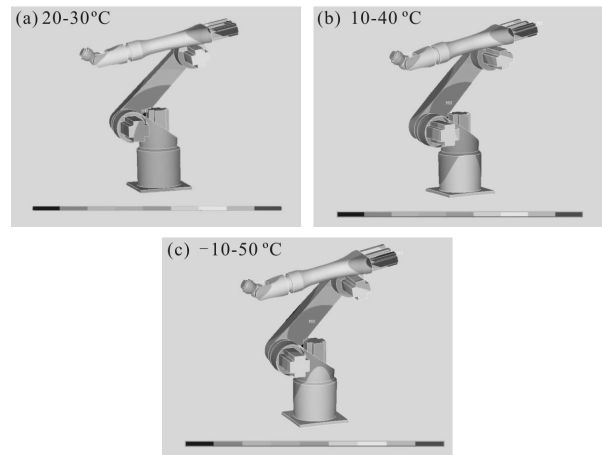


图 2 机器人不同温度下热变形量有限元分析结果

Fig.2 Results of thermal deformation by the way of finite element method in different temperature

表 1 不同温差下热变形率(10⁻⁴)

Tab.1 Thermal deformation rate of different temperature range(10⁻⁴)

Temperature range/℃	10	30	60
Max	0.401	0.524	0.654
Min	0.117	0.148	0.182

由此可以看到,随着温差增大,各轴变形率分布规律基本一致,而最大和最小误差量随温差增大逐渐增加,热变形与温差基本成线性关系。故环境温度变化对各轴产生的热变形可预测,通过插值等方法预先补偿。

通过试验验证机器人只受外部环境温度变化影响下的温度误差模型,机器人在固定位置处保持各轴静止,控制环境温度从 20℃ 逐渐升温至 30℃,每升高 1℃ 测量一次机器人末端靶球坐标,多次测量取平均值。从分析结果可知,环境温度变化对末端球标产生的定位误差为 0.1 mm 左右,与热变形影响模型分析结果基本一致。通过预先分析的不同温差条件下各轴热变形量模型,自适应性修正实际外界加工环境下温度变化产生的热变形,可有效补偿外界环境温度影响^[8]。

1.2 机器人自身发热对运动误差的影响规律

机器人自身发热对各轴运动学参数影响主要由机器人电机发热和关节摩擦发热引起。在环境温度恒定,存在空气对流和空气热传导影响的环境中,保持机器人持续且较高速(1 m/s)运行,在机器人运动空间内随机选择 20 个点,每隔 15 min 测量一次所有点,研究各点处误差均值随时间的变化规律,结果如图 3 所示,可以看到,随着机器人运行时间增长,电机温度逐渐升高,机器人末端定位误差逐渐增大。在机器人持续运行状态下连续工作 3 h,机器人末端定位误差达到平衡,约为 0.3 mm。

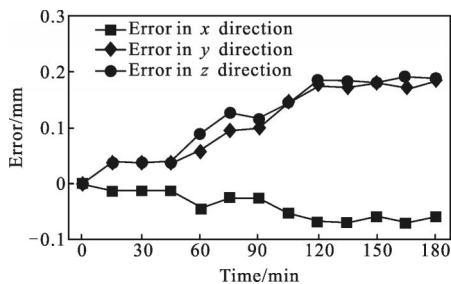


图 3 定量时间间隔下测算机器人各向定位误差

Fig.3 Quantitative calculation of position error of robot axes every fixed time interval

2 自身发热误差模型的建立及误差补偿方案

机器人在现场加工制造过程中,实际加工任务均可分解为多个任务单元组成的,如图 4 所示。在外界环境保持基本一定的条件下,机器人自身发热情

况与其工作流程有关。因为机器人运动路径有很大差异性,且较为复杂,同时电机温度也很难到达稳定点,所以机器人热变形误差预估和评价难度极大,需要设计一种实时动态评估和补偿的策略。

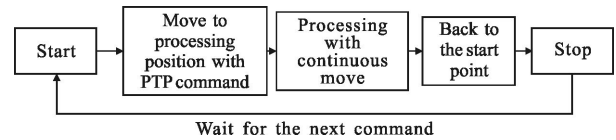


图 4 机器人加工任务流程

Fig.4 Robot manufacturing process

2.1 自身发热对各轴运动影响的理论分析

为定量分析由于自身发热产生的各轴运动学参数误差,采用 ansys 有限元方法建模。

机器人结构的设计中,将电机外壳设计为散热面,其附近形成温度较高的局部温场。基于这样的设计,机器人电机发热产生的热量传递方式主要为自然对流传导,热对流可用牛顿冷却方程描述:

$$q''=h(T_s-T_b) \quad (1)$$

式中: h 为对流换热系数; q'' 为热流密度; T_s 为固体表面温度; T_b 为周围流体温度。

当机器人关节电机运行到一定时间,对流散发的热量和机器人运行产生的热量可以达到一种平衡。可以根据机器人结构和材料来设定模型热稳态条件。

文中不具体研究电机内部结构发热模型,而将其作为整体进行分析。连续工作 3 h 后电机外壳基本恒温,采用热敏电阻测量电机 1~6 外壳,温度分别为:51.2℃、48.4℃、50.3℃、37.6℃、39.4℃、38.8℃。电机外壳为铝合金材质,导热系数为 226 W/mK。

机器人各连杆材料为铸铁和不锈钢两种材质,导热系数分别为 42 W/mK 和 36 W/mK,弹性模量 2.06×10^{11} ,泊松比 0.3。环境温度 20℃,空气对流系数 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。

采用 ansys 建模分析各轴温度分布及热变形如图 5 所示。图 5(a)为热稳态条件下有限元分析解算得到的机器人各部分温度分布,最低温度为 22.178℃,最高温度为 46.909℃。图 5(b)为根据结构弹性模量和泊松比计算得到的机器人各部分热变形量,最小变形率为 7.25×10^{-6} ,最大变形率为 5.03×10^{-5} 。

通过温度分布和热变形图可以看到,热量集中

于电机驱动附近, 由于轴 1、轴 2 体较厚重, 温度虽然较高但变形量不大; 轴 3 同时受电机 3、4、5、6 影响, 温度较高且变形量较大; 轴 5 虽然远离热源温度较低, 但由于壁厚较薄、机构较为灵活而产生比较大的变形。

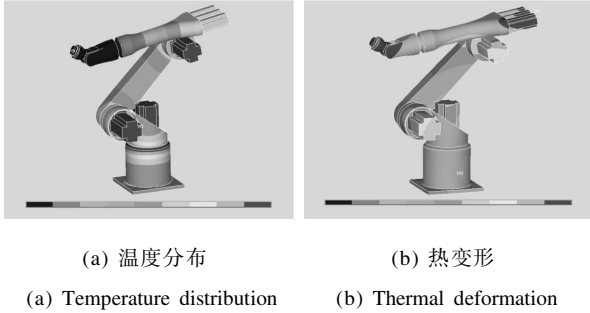


图 5 机器人在自身发热下各轴温度分布及热变形

Fig.5 Analysis of temperature distribution and thermal deformation of robot axes affected by self-heating

2.2 试验分析自身发热对机器人运动精度影响

为补偿由于自身发热对机器人末端定位产生的误差, 需要利用标定的方法获得各轴运动学参数受温度影响的变化量。但是, 如标定全部由温度引起的运动学参数误差, 需测量多个基准点并进行大量运算, 测量及运算时间较长, 影响实际加工的连续性。由于机器人各轴运动学参数受温度变化影响不同, 同时机器人为串联结构, 底部轴运动学参数的变化经逐级放大会产生较大的末端靶球定位误差, 所以需在有限元分析的基础上, 实验测量确定对末端靶球影响最为显著的运动学参数误差。

根据已知的机器人机械结构和电机型号等信息: 电机 1、2、3 为大功率电机, 发热量大, 升温较快; 电机 4、5、6 并排安装且布局紧凑, 不利于散热, 容易产生局部较高温度; 转动关节 5、6 位置紧密且散热面小, 关节间摩擦产生的热量较难散发, 对误差影响较大。所以需重点考虑以下几种工作状态下的运动学参数的变化量, 包括电机 1、2、3 单独转动, 电机 4、5、6 同时转动, 电机 5、6 同时转动。

分别针对以上 5 种工作状态设计实验, 测量机器人电机自身发热对各轴运动学参数的影响。以单独旋转电机 1 为例说明试验过程, 机器人开机后只旋转电机 1, 首先记录电机外壳的初始温度状态 (20.8 °C), 并在此温度条件下, 运动至空间 10 个点位, 使用跟踪仪测量这 10 个点位坐标作为初始条件

下测量值。待电机 1 连续旋转 3 h, 电机外壳温度上升至 51.2 °C 后, 跟踪仪测量相同的 10 个空间点处机器人末端靶球坐标。后者测量值与初始条件下的测量值之差为电机 1 发热对运动学参数产生的影响。将机器人关机降温, 待静置后达到初始状态时, 启动机器人进行后续试验, 包括单独旋转电机 2、3、同时旋转电机 4、5、6, 同时旋转电机 5、6。试验中既包含电机发热对系统精度影响, 也考虑到了关节转动发热对误差的影响。

以上试验得到电机发热对各轴误差的影响结果, 如表 1 所示, 如当电机 1 旋转 3 h 后, 电机 1 的发热会影响到邻近的轴 1、2, 跟踪仪测得的在机器人基坐标系下误差较大的坐标方向是 x 和 z 向, z 发生变化可能是由于机器人的基座受热变形或机器人手臂长度发生变化。根据有限元分析结果可知轴 1、2 的长度 a_1 、 a_2 发生变化引起了 z 向误差的变化。方向 x 定位误差发生变化可能是由于机器人轴 1 和轴 2 间距发生变化或机器人连杆长度发生变化, 根据有限元分析结果可知为 d_1 和 a_2 发生受热变形。同理结合有限元分析结果及测量得到的机器人末端靶球误差可分析出主要受影响的参数如表 2 所示。

表 2 自身发热相关的机器人运动学参数显著性分析
Tab.2 Significant relevant parameter analysis of robot self-heating effect

Working motor	Affected axis	Error			Significant varying direction	Significant affected parameter
		x/mm	y/mm	z/mm		
1	1, 2	0.038 5	0.054 2	0.042 0	y, z	a_1, d_1, a_2
2	1, 2	0.057 5	0.034 9	0.057 5	x, z	a_1, d_1, a_2
3	2, 3	0.078 4	0.013 6	0.034 1	z, x	a_2, d_3
4, 5, 6	3	0.077 8	0.012 0	0.033 3	x	α_3, a_3
5, 6	5, 6	0.034 4	0.036 4	0.056 4	z	a_5

以上分析可以得到, 对温度最为敏感且对机器人末端误差影响最大的 6 项参数为 $(a_1, d_1, a_2, a_3, \alpha_3, a_5)$ 。在工程现场, 可对此 6 项参数进行过程评价和补偿, 达到快速降低机器人自身发热影响下的末端定位误差。

3 自身发热影响模型下的动态补偿方法

实验使用 KUKA 公司 Kr5-arc 型工业机器人,

此型号机器人标称重复性定位精度为 0.05 mm; 根据图 3 定量时间间隔下测算机器人各向定位误差可知, 随温度升高机器人末端距离误差可达 0.3 mm。所以, 当机器人末端距离误差小于 0.1 mm 时, 测得的距离误差主要由机器人重复性定位误差、测量系统不确定度和外部随机因素引起, 误差随机性较大, 补偿效果不明显, 可以不进行补偿。根据距离误差的最大值和控制精度的需求, 可设置补偿阈值为 0.1 mm。

为补偿机器人自身发热模型影响下的 6 项运动参数的误差, 解算最少需要测量 2 个空间位置点。为进一步提高精度, 需增加一定数量测量点。实验证明当基准点达到 4 个以上时, 计算结果达到稳定值, 故在运动空间内均匀选择 4 个基准点。保持环境温度恒定, 测量 4 个基准点坐标; 等待约 15 min, 机器人机构恢复至常温后, 再次测量基准点坐标, 重复以上步骤 6 次, 以多次测量平均值为基准点的标准值。测量得到基准点位置误差小于 0.04 mm, 符合机器人重复性定位精度要求

设置每 30 min 分别测量 4 个基准点 P1~P4, 坐标分别为 (550, -200, 920), (550, 200, 1320), (850, -200, 1320), (850, 200, 920)。当各基准点距离误差平均值小于阈值时(0.1 mm), 不进行补偿计算; 当基准点距离误差平均值大于阈值(0.1 mm)时, 利用以下标定方法, 计算对末端误差影响最大的 6 项运动学参数误差, 确定受自身发热影响下机器人的实际运动学参数。

根据机器人 DH 模型^[9], 相邻关节的坐标系变换表示为:

$$T_{i-1}^i = \text{rot}(z, \theta_i) \times \text{trans}(0, 0, d_i) \times \text{trans}(a_i, 0, 0) \times \text{rot}(x, \alpha_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: a_i 、 d_i 、 α_i 、 θ_i 分别为连杆长度、连杆距离、扭转角和连杆夹角。

机器人相邻轴间位置误差微分可表示为:

$$dT_{i-1}^i = \frac{\partial T_{i-1}^i}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial T_{i-1}^i}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial T_{i-1}^i}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial T_{i-1}^i}{\partial d} \Delta d \quad (3)$$

设:

$$\frac{\partial T_{i-1}^i}{\partial q_i} = T_{i-1}^i \times T_{q_i} \left(T_{q_i} = (T_{i-2}^i)^{-2} \times \frac{\partial T_{i-1}^i}{\partial q_i} \right)$$

式中: q 代表 4 个连杆参数, T_{q_i} 可通过机器人连杆参数计算求得。根据需要补偿的误差参数可得:

$$dT_{i-1}^i = T_{i-1}^i (T_{a1} \cdot \Delta a_1 + T_{d1} \cdot \Delta d_1 + T_{\alpha 2} \cdot \Delta \alpha_2 + T_{\alpha 3} \cdot \Delta \alpha_3 + T_{\alpha 3} \cdot \Delta \alpha_3 + T_{\alpha 5} \cdot \Delta \alpha_5) = T_{i-1}^i \Delta_i \quad (4)$$

根据机器人串联机构模型:

$$T_0^N + dT_0^N = \prod_{i=1}^N (T_{i-1}^i + dT_{i-1}^i) = \prod_{i=1}^N (T_{i-1}^i + T_{i-1}^i \Delta_i) \quad (5)$$

公式(5)展开多项式, 略去高次项, 可得:

$$dT_0^N = \sum_{i=1}^N T_0^1 T_1^2 \cdots T_{i-1}^i \Delta_i T_i^{i+1} = T_0^1 T_{a1} T_1^N \Delta a_1 + T_0^1 T_{d1} T_1^N \Delta d_1 + T_0^2 T_{\alpha 2} T_2^N \Delta \alpha_2 + T_0^3 T_{\alpha 3} T_3^N \Delta \alpha_3 + T_0^3 T_{\alpha 3} T_3^N \Delta \alpha_3 + T_0^5 T_{\alpha 5} T_5^N \Delta \alpha_5 = \begin{bmatrix} 0 & -\delta_z & \delta_y & d_x \\ \delta_z & 0 & -\delta_x & d_y \\ -\delta_y & -\delta_x & 0 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

机器人末端靶球中心在实际机器人基坐标系下的坐标为 O_a , 在实际基坐标系下根据 DH 模型解算得到的坐标为 O_c , 在测量得到的基坐标系下坐标为 O_m , 在跟踪仪坐标系下坐标为 O_p , 则:

$$O_a = O_c + \Delta p$$

$$O_m - O_c = T_0^f$$

$$O_a - O_c = T_0^f (O_c + \Delta p) - O_c = (T_0^f - E) O_c + \Delta p + (T_0^f - E) \Delta p \quad (7)$$

$(T_0^f - E) \Delta p$ 为二次高阶微小项, 可以忽略, 因此:

$$O_m - O_c = (T_0^f - E) p + \Delta p \quad (8)$$

令

$$\Delta p = [d_x d_y d_z]^T = \begin{bmatrix} k_{1a}^x & k_{1d}^x & k_{2a}^x & k_{3a}^x & k_{3\alpha}^x & k_{5a}^x \\ k_{1a}^y & k_{1d}^y & k_{2a}^y & k_{3a}^y & k_{3\alpha}^y & k_{5a}^y \\ k_{1a}^z & k_{1d}^z & k_{2a}^z & k_{3a}^z & k_{3\alpha}^z & k_{5a}^z \end{bmatrix} \cdot$$

$$[\Delta a_1 \quad \Delta d_1 \quad \Delta a_2 \quad \Delta a_3 \quad \Delta \alpha_3 \quad \Delta a_5]^T = B_i \Delta q_i \quad (9)$$

将运行 3 h 时各点测量误差带入公式(9), 计算可得 6 项机器人运动参数误差补偿量如表 3 所示。

表 3 机器人自身发热引起的运动参数误差补偿量值

Tab.3 Kinematic parameters compensation value affected by robot self-heating

Kinematic parameter	a_1 /mm	d_1 /mm	a_2 /mm	a_3 /mm	α_3 (°)	a_5 /mm
Error	0.093 7	0.116 2	0.128 3	0.055 7	0.000 6	0.013 2

4 补偿方法试验验证

4.1 任意位置处温度误差静态补偿试验

为验证误差补偿后的机器人末端在任意位置处定位精度, 在机器人工作空间内随机选择 10 组点位, 使用跟踪仪分别测量初始运行时和 3 h 后各点处机器人末端靶球三维坐标。以初始运行时各点坐标为参考值, 3 h 后测量得到的坐标与初始值之差为由于热影响产生的定位误差, 记为补偿前误差; 3 h 后利用上述补偿方法补偿机器人六项运动学参数误差后测量得到的坐标, 与初始值之差为补偿后的位置误差。测量结果如图 6 数据所示。

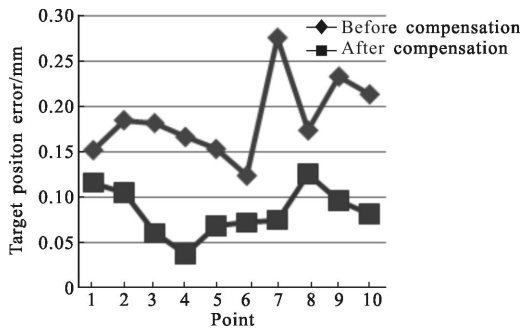


图 6 补偿前后末端位置误差

Fig.6 Position error of target before and after compensation

对测量数据进行补偿, 补偿后任意各点处定位误差小于 0.15 mm。补偿前误差的平均值为 0.186 5 mm, 不确定度为 0.442 3 mm, 补偿后误差平均值为 0.083 9 mm, 不确定度为 0.027 1 mm。实验表明, 通过对 6 项误差进行温度补偿可以减小机器人自身发热对末端定位精度的影响。

4.2 温度误差动态补偿试验

为了验证机器人连续运行条件下, 温度误差的补偿效果, 提高动态补偿精度, 优化补偿周期, 设计实验, 保持机器人连续高速运行, 每隔 15 min 测量一次预先设定好的 4 个基准点和环境温度, 各点误差平均值小于 0.1 mm 则继续运行, 大于 0.1 mm 计算 6 项运动学参数误差量, 并插值计算由环境温度变化引起的各轴热变形量, 并以补偿后的运动学参数作为预装参数继续运行。补偿结果如图 7 所示。

图 7(a)为计算的到的各点距离误差平均值, 可以看到在运行至 75 min 和 120 min 时, 距离误差大于 0.1 mm 需要进行补偿, 故实际加工时可设定每

30 min 进行一次测量补偿。

图 7(b)、图 7(c)、图 7(d)为 x 、 y 、 z 3 个方向上补偿前后误差的平均值。可以看到机器人自身发热对 y 、 z 两个方向上产生较大影响, 通过温度补偿可以较好的提高 y 、 z 向定位精度。

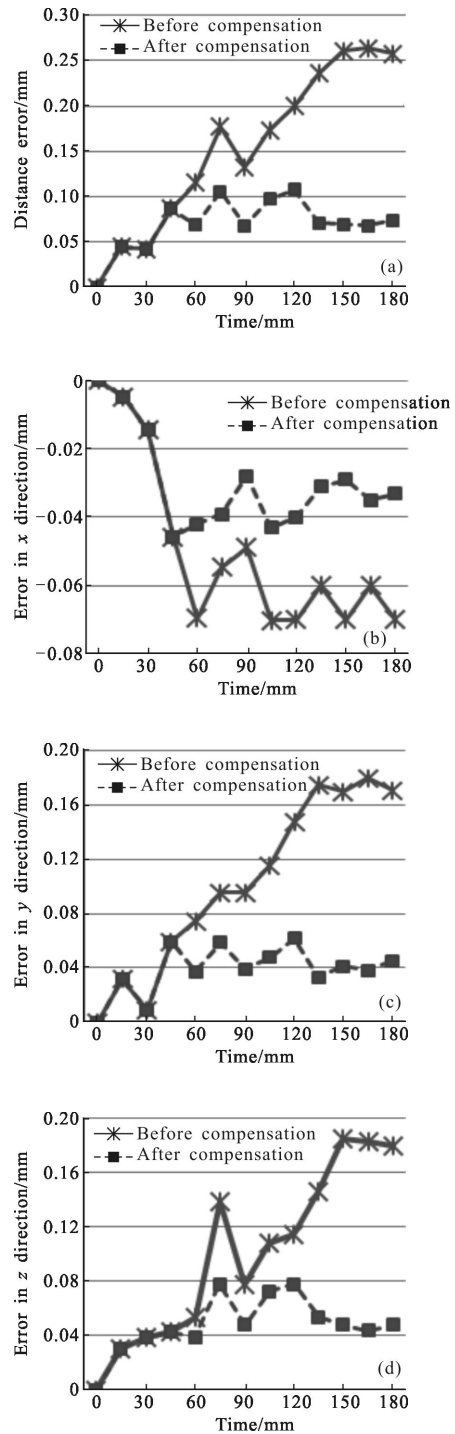


图 7 误差补偿前后结果

Fig.7 Result comparison before and after compensation

5 结 论

(1) 文中分析了机器人的两种热影响模型,并对自身发热模型中运动学参数显著性特点进行了分析。提出了现场机器人动态补偿方法,可在实际加工环境下有效补偿环境温度变化和机器人自身发热产生的热变形误差,通过实验验证补偿后精度小于 0.1 mm。该方法较为便捷,只需预先测量计算环境温度误差模型,在加工过程中每隔 30 min 测量 4 个基准点和环境温度即可快速获得运动学参数补偿量,适用于工业现场环境。

(2) 文中方法可根据加工精度和加工效率两个侧重点,因情况选择所需补偿的运动学参数个数。还可根据需要进行测量的基准点数量,也可获得更准确的运动学参数补偿结果。

参考文献:

- [1] Jiao Guotai, Feng Yonghe, Wang Feng, et al. Synthetically analysis of the robot pose error resulting from various factors [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2004, 12 (4): 435-442. (in Chinese)
焦国太, 冯永和, 王锋, 等. 多因素影响下的机器人综合位姿误差分析方法 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2004, 12 (4): 435-442.
- [2] Emanuele Lubrano, Reymond Clavel. Thermal calibration of a 3 DOF ultra high-precision robot operating in industrial environment [C]//International Conference on Robotics and Automation, 2010.
- [3] Paul D A Jones, Stephen R, Duncan. Optimal robot path for minimizing thermal variations in a spray deposition process [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2007, 15(1): 1-11.
- [4] Matthieu Guilbert, Pierre-Brice Wieber, Luc Joly. Optimal trajectory generation for manipulator robots under thermal constraints[C]//International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006.
- [5] Eastwood S, Webb P. Compensation of thermal deformation of a hybrid parallel kinematic machine [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2009, 25: 1-6.
- [6] Alici G, Shirinzadeh B. A systematic technique to estimate positioning errors for robot accuracy improvement using laser interferometry based sensing [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2005, 40(8): 879-906.
- [7] Feng Fuzhou, Zhang Chaosheng, Min Qingxu, et al. Heating characteristics of metal plate crack in sonic IR imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1456-1461. (in Chinese)
冯辅周, 张超省, 闵庆旭, 等. 超声红外热像技术中金属平板裂纹的生热特性 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(5): 1456-1461.
- [8] Yu Tao, Wang Yongcheng, Dai Shuang, et al. Active thermal control system for space camera based on temperature level [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 249-253. (in Chinese)
于涛, 王永成, 代霜, 等. 基于温度水平的空间相机主动热控系统 [J]. *红外与激光工程*. 2015, 44(1): 249-253.
- [9] Yang Shourui, Yin Shibin, Ren Yongjie, et al. Improvement of calibration method for robotic flexible visual measurement systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3289-3246. (in Chinese)
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.