

机械臂的多负载自适应重力补偿方法、装置及控制设备

相关申请的交叉引用

本申请要求于 2020 年 05 月 28 日提交中国专利局的申请号为 202010466099.X、名称为“一种机械臂的多负载自适应重力补偿方法”的中国专利申请的优先权，其全部内容通过引用结合在本申请中。

技术领域

本申请涉及机器人技术领域，具体地说，涉及一种机械臂的重力补偿方法、装置及控制设备。

背景技术

随着机械臂制造工业和传感器工业的逐步发展，机械臂不再仅仅服务于生产流水线，也开始慢慢进入生活中的各个领域。传统的工业机械臂需要设置安全范围，在运行时严格禁止人员进入其工作区域，以防止人员受伤。然而大部分生活中的应用场景在设定安全范围时会有诸多不便，在人机协同操作时效率也不高。为使人和机器的工作空间不再割裂，从而做到真正高效率高精度的人机协同操作，人们设计出了协作型机械臂。协作型机械臂具有感知接触力的能力，能对人体和机械臂的物理接触做出反应，因此允许操作人员和机械臂共享工作空间。协作型机械臂的出现大大扩展了机械臂在家庭陪护、教育娱乐、健康医疗、高端制造业等行业的应用，利用机械臂高效、高精度、高稳定性的特点来改善生活的各个方面。

零力控制技术指的是在拖动示教的过程中，机械臂能很好的顺应外力进行运动，仿佛不受机械臂本身重力影响。这种技术降低了拖动示教的劳动强度，增加了人在控制机械臂时的流畅性。为了使机械臂在夹持了末端工具的情况下依然能实现零力控制，需要对机械臂本体和工具分别做参数标定，用逆向工程的方法准确计算出机械臂各段臂和工具的质量和质心。关于机械臂本体参数标定的技术在文献 Identifying the dynamic model used by the KUKA LWR: A reverse engineering approach. (C. Gaz, F. Flacco)和 Gravity compensation of KUKA LBR IIWA Through Fast Robot Interface. (C. Hou, Y. Zhao)中都有详细介绍，然而针对末端工具参数的标定资料较少。在有些复杂应用中，机械臂甚至需要更换末端工具才能完成工作。在这种情况下，机械臂如何能自适应补偿工具的重力，从而保证不同的末端工具都能获得零力控制，成为协作操作是否顺畅的关键。

目前机械臂重力补偿的方案普遍需要先使用称量仪器测末端工具的质量，再用悬挂法或支撑法测出工具的质心。然后把测得的数据导入机械臂的控制系统，让控制系统根据工具的参数进行重力补偿，使机械臂能做到零力控制。但是测工具质量和质心的时候工具是

与系统分离的状态，测得的参数容易忽略安装过程对质量和质心的影响，并且每次只能对一个工具的参数进行重力补偿，切换工具时必须停止程序，需要多种工具频繁切换时，效率低下。

发明内容

本申请的目的之一包括提供一种机械臂的多负载自适应重力补偿方法、装置、控制设备及可读存储介质，减少操作步骤，提升效率和重力补偿的性能。

为了实现上述目的，本申请所采用的技术方案如下：

第一方面，本申请实施例提供了一种机械臂的多负载自适应重力补偿方法，包括如下步骤，

- S1.1，搭建机械臂的运动学模型；
- S1.2，重构动力学模型的重力项；
- S1.3，无负载静态位置采样；
- S1.4，安装各个工具后分别进行静态位置采样；
- S1.5，分别计算各个工具待标定的参数值；
- S1.6，分别计算各个工具的质量和质心；
- S2.1，计算当前安装的工具对法兰施加的力；
- S2.2，补偿工具重力。

在一种可能的实现方式中，S1.1 步骤中，使用标准 D-H 法构建机械臂关节坐标系。

在一种可能的实现方式中，S1.3 步骤中，机械臂在无负载情况下，运行到工作空间下任意非奇异位置，采样关节位置和力矩读数。

在一种可能的实现方式中，S1.4 步骤中，将各工具分次安装在机械臂末端，重复步骤 S1.3 步骤进行静态位置采样。

在一种可能的实现方式中，S1.4 步骤中，针对每个工具，在将该工具安装在机械臂末端后，根据该工具的尺寸确定机械臂当前与该工具对应的有效工作空间，然后基于有效工作空间重复步骤 S1.3 步骤对该工具进行静态位置采样。

在一种可能的实现方式中，S1.5 步骤中，将 S1.3 和 S1.4 得到的采样数据根据工具进行分组，依次代入 S1.2 步骤中的重力项内。

在一种可能的实现方式中，S1.6 步骤中，针对每个工具，将携带该工具时标定的参数值与无负载标定的参数值进行比较，并根据比较结果以及该工具的质量、该工具的质心、机械臂中末段臂的质量和末段臂的质心之间的关联关系，计算得到该工具的质量和质心。

第二方面，本申请实施例提供了一种机械臂的多负载自适应重力补偿装置，所述装置

包括：

模型搭建模块，配置成搭建机械臂的运动学模型；
重力重构模块，配置成重构动力学模型的重力项；
位置采样模块，配置成无负载静态位置采样；
位置采样模块，还配置成安装各个工具后分别进行静态位置采样；
参数标定模块，配置成分别计算各个工具待标定的参数值；
质参计算模块，配置成分别计算各个工具的质量和质心；
外力计算模块，配置成计算当前安装的工具对法兰施加的力；
重力补偿模块，配置成补偿工具重力。

在一种可能的实现方式中，所述模型搭建模块在搭建机械臂的运动学模型的过程中，使用标准 D-H 法构建机械臂关节坐标系。

在一种可能的实现方式中，所述位置采样模块在机械臂无负载情况下，控制机械臂运行到工作空间下任意非奇异位置，采样关节位置和力矩读数。

在一种可能的实现方式中，所述位置采样模块在将各工具分次安装在机械臂末端后，针对每个工具根据该工具的尺寸确定机械臂当前与该工具对应的有效工作空间，然后基于有效工作空间重复控制机械臂运行到对应有效工作空间下任意非奇异位置，采样关节位置和力矩读数。

在一种可能的实现方式中，所述参数标定模块通过将所述位置采样模块得到的采样数据根据工具进行分组，并依次代入到所述重力重构模块得到的重力项内进行计算，得到各个工具待标定的参数值。

在一种可能的实现方式中，所述质参计算模块在计算各个工具的质量和质心的过程中，分别针对每个工具，将携带该工具时标定的参数值与无负载标定的参数值进行比较，并根据比较结果以及该工具的质量、该工具的质心、机械臂中末段臂的质量和末段臂的质心之间的关联关系，计算得到该工具的质量和质心。

第三方面，本申请实施例提供了一种机械臂的控制设备，包括存储器、处理器，所述存储器中存储有可在所述处理器上运行的计算机程序，所述处理器执行所述计算机程序时，实现前述的机械臂的多负载自适应重力补偿方法。

第四方面，本申请实施例提供了一种可读存储介质，其上存储有计算机程序，所述计算机程序被处理器运行时，执行前述的机械臂的多负载自适应重力补偿方法。

本申请实施例的有益效果之一包括：通过 D-H 法构建机械臂关节坐标系，再基于关节坐标系对每段机械臂的质心位置进行建系。在原始的重力项中，将关节位置相关的项与质量质心相关的项拆分，拆分过程中需要将待标定的参数进行适当组合，再将拆分后的项放

入两个矩阵中，使其相乘依然满足原来的重力项。然后对无负载状态时机械臂的静态位置进行采样，之后将各个工具安装在机械臂的末端，再分别进行静态位置采样。将采样数据不同工具分组后代入重力项内，使用 SVD 分解可解得组合后的参数的值，最后利用组合物体参数分离的方法，可在组合后的参数中提取出工具的质量和质心。基于在无负载情况下标定的参数和实时关节位置的反馈，可计算出当前安装的末端工具对法兰施加的力的大小。根据测得法兰上的外力，系统可得知当前在法兰上安装的是哪一个工具，从而可直接使用标定的参数值进行补偿工具重力后的外力测量，或是将得到的质量和质心应用到机械臂的配置之中。该方法通过预先计算获取工具参数的方式，使实际应用时的操作步骤得到简化，大大增强了协作操作的流畅性。此外，通过使用关节位置和力矩传感器对工具进行参数标定，也使标定的工具参数更加符合机械臂的运动学和动力学特性，从而改善了零力控制的性能。

附图说明

图 1 是本申请实施例提供的一种机械臂的多负载自适应重力补偿方法的流程图。

图 2 是本申请实施例提供的一种机械臂的多负载自适应重力补偿方法的工具与机械臂末端示意图。

图 3 是本申请实施例提供的一种机械臂的多负载自适应重力补偿方法的机械臂多工具安装示意图；

图 4 是本申请实施例提供的一种机械臂的多负载自适应重力补偿装置的组成示意图。

具体实施方式

下面结合具体实施例和说明书附图对本申请做进一步阐述和说明：

请参考图 1-图 3，在完整的机械臂动力学方程中，含有惯性项、离心力与科氏力项、重力项和摩擦力项。其中惯性项与关节加速度相关，离心力与科氏力项和关节速度相关，摩擦力项也与关节速度相关，而关节加速度和关节速度在机械臂处于静止状态时都为 0，因此对于静态位置的研究可只针对重力项开展。构建含有重力项的动力学方程需要以机械臂的关节位置和力矩作为输入，因此对机械臂的硬件有一定要求。以 KUKA LBR Med 7 R800 为例，该机械臂为七轴协作型机械臂，各个关节都配备了高精度的位置和力矩传感器，符合本申请对机械臂硬件的配置要求。以 KUKA LBR Med 7 R800 七轴协作型机械臂为例对实际操作进行解释。

S1.1：搭建机械臂的运动学模型。

在本实施例的一种可能的实现方式中，搭建机械臂的运动学模型时，机械臂的关节坐标系建立采用经典的 D-H 法（A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices, J. Denavit, R. S. Hartenberg）。对于 KUKA LBR Med 7 R800，其 D-H 参数表如下所

示。

表格 1: KUKA LBR Med 7 R800 的 D-H 参数表

关节编号	α_i	$a_i(\text{mm})$	$d_i(\text{mm})$	θ_i
1	$-\pi/2$	0	340	θ_1
2	$\pi/2$	0	0	θ_2
3	$-\pi/2$	0	400	θ_3
4	$\pi/2$	0	0	θ_4
5	$-\pi/2$	0	400	θ_5
6	$\pi/2$	0	0	θ_6
7	0	0	126	θ_7

其中 α_i 表示连杆转角， a_i 表示连杆长度， d_i 表示连杆偏距， θ_i 表示关节角。在建立了关节坐标系后，以一定规则对每段机械臂的质心位置建立质心坐标系。建立质心坐标系时只需要保证坐标系原点位于每一段臂的质心处即可，旋转角度可与第 $i+1$ 关节的旋转角度保持一致。

S1.2: 重构动力学模型的重力项。

在本实施例中，对于静止状态的机械臂，重力项等于机械臂关节力矩，公式表示为：

$$G(\theta, \mathbf{m}, \mathbf{c}) = \boldsymbol{\tau}$$

从公式中可知，重力项与关节角 θ_i 、质量 $\mathbf{m}_i$ 和质心 $\mathbf{c}_i$ 有关。其中质量 $\mathbf{m}_i$ 和质心 $\mathbf{c}_i$ 与工具的标定直接相关，需要提取出来，因此要对重力项 G 做如下拆分：

$$\mathbf{Y}(\theta) \cdot \mathbf{A}(\mathbf{m}, \mathbf{c}) = \boldsymbol{\tau}$$

容易发现，质量 $\mathbf{m}_i$ 和质心 $\mathbf{c}_i$ 在重力项中是耦合的，无法单独分离。因此为了组成待标定参数的矩阵 $\mathbf{A}$ ，须在满足方程成立的同时，通过将参数合理组合，使标定的参数变为组合的 $\mathbf{m}_i$ 和 $\mathbf{c}_i$ 。组合参数时应尽量减少 $\mathbf{A}$ 中的参数数目，以此可以避免线性方程组的解陷入局部最优，从而得到更好的标定效果。

S1.3: 无负载静态位置采样。

在本实施例中，确认机械臂处于无负载状态，运动机械臂到工作空间的非奇异位置，在各个关节都静止后，采集关节的位置和力矩。重复采样步骤，使采样点尽可能遍布整个工作空间。在采样过程中，可能会有少部分采样点非常接近奇异位置，由于奇异点位置机械臂自由度的缺失会导致力矩反馈不准确，因此这些采样点应被剔除出采样集。

请参考图 3，S1.4: 安装各个工具后分别进行静态位置采样。

在本实施例中，依次安装各个工具至机械臂末端，重复 S1.3 步骤对每一个工具都进行

一轮运动采样，将剔除奇异位置后的数据集予以保存。由于工具本身具有一定的尺寸，对机械臂的运动范围会产生一定限制，在运动过程中可能会出现碰撞机械臂本体或外围障碍物的意外，所以在对工具机械能静态位置采样的过程中应对有效工作空间重新予以确认，设计合理的运动轨迹，使采样点在尽量布满工作空间的同时，防止碰撞的发生。由此，在本实施例的一种可能的实现方式中，针对每个工具，在将该工具安装在机械臂末端后，根据该工具的尺寸确定机械臂当前与该工具对应的有效工作空间，然后基于有效工作空间重复 S1.3 步骤对该工具进行静态位置采样。

S1.5: 分别计算各个工具待标定的参数值。

在本实施例中，执行 S1.5 步骤需将采集到的所有数据按照工具进行分组，将每一组数据堆叠到 S1.2 中得到的方程组内，如下所示：

$$\bar{Y} \cdot A = \bar{\tau} \Rightarrow \begin{bmatrix} Y_1(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \\ Y_2(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \\ Y_3(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \\ \vdots \end{bmatrix} A(\mathbf{m}, \mathbf{c}) = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

其中，数据集中的关节位置将被堆叠到矩阵 $\bar{Y}$ 中，而关节力矩堆叠到 $\bar{\tau}$ 。由于堆叠矩阵 $\bar{Y}$ 和 $\bar{\tau}$ 都被确认，待标定参数矩阵 $A(\mathbf{m}, \mathbf{c})$ 可通过 SVD 分解求线性方程组的方式得到。矩阵 $\bar{Y}$ 可被分解为以下形式：

$$\bar{Y} = U \Sigma V^T \quad (U \in \mathbb{R}^{m \times m}, \Sigma \in \mathbb{R}^{m \times n}, V \in \mathbb{R}^{n \times n})$$

其中左奇异矩阵 U 和右奇异矩阵 V 都是正交矩阵，因此对于超定方程 $\bar{Y} \cdot A = \bar{\tau}$ ，令 $X = V^T A$ ， $B = U^T \bar{\tau}$ ，则有新表达式

$$\Sigma X = B$$

在上述表达式中， Σ 是一个对角矩阵，对角元素全部为矩阵 $\bar{Y}$ 的奇异值 σ_i 且 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \cdots \geq \sigma_n > 0$ ，因此可以求出 X 。最后根据 $A = VX$ 即可求出矩阵 A 中的待标定参数。

S1.6: 分别计算各个工具的质量和质心。

在本实施例中，执行步骤 S1.5 的过程需要作为刚体的工具在安装到机械臂末端后再进行参数标定，因此标定的参数中最后一段刚体的质量和质心实际为机械臂最后一段和工具结合以后的参数。由此，工具的质量和质心可通过将带工具标定的参数和无负载标定的参数进行比较，再结合用于表征工具的质量和质心与机械臂中末段臂的质量和质心之间的关联关系的多体系统质心公式可得到确定。因此，在本实施例的一种可能的实现方式中，可针对每个工具，将携带该工具时标定的参数值与无负载标定的参数值进行比较，并根据比较结果以及该工具的质量、该工具的质心、机械臂中末段臂的质量和末段臂的

质心之间的关联关系，计算得到该工具的质量和质心。

其中，以 KUKA LBR Med 7 R800 的末端为例，请参考图 2，夹持工具后的机械臂系统所对应的多体系统质心公式有如下物理性质：

$$c_c = \frac{m_t c_t + m_7 c_7}{m_t + m_7}$$

其中 c_c 是工具和末段臂结合后的质心， m_t 和 c_t 分别是工具的质量和质心， m_7 和 c_7 分别是末段臂的质量和质心。将以上公式与标定的参数表达式联立，即可求出工具的质量 m_t 和质心 c_t 。

同时，本申请设计了一套自动选择工具参数应用于重力补偿的系统。该系统以关节力矩和位置传感器的输出作为系统的输入，在系统内部计算当前工具在机械臂末端施加的力，从而判断夹持的工具类型，再套用 S1 中计算的参数，完成重力补偿。以下解释详细实施步骤。

S2.1：计算当前安装的工具对法兰（机械臂末端）施加的力。

在本实施例中，可使用无负载状态下标定的参数，可计算出当前位置由机械臂本体导致的关节力矩 τ_{robot} 。将实时测量的关节力矩 $\tau_{measure}$ 与 τ_{robot} 相减，得到的是由外力导致的关节力矩 τ_{ext} 。再利用雅可比矩阵，可将外力从关节空间映射到工作空间，计算出机械臂末端（法兰）在工作空间中受到的外力。

S2.2：补偿工具重力。

在本实施例中，工具之间的差异性会反映在外力的数值上。例如，工具之间的质量差异较大，可以外力 XYZ 方向上的数值作为区分工具的依据；若是工具的质量差异较小，质心差异较大，则可考虑用外力 ABC 方向上的扭矩作为区分的根据；对于质量和质心差异都不大的工具，可考虑将其视为一种工具，套用同一套标定的参数，亦可获得较好的补偿效果。对于允许输入工具参数自动做重力补偿的机械臂来说，可将步骤 S1.6 中计算出来的工具的质量和质心直接写入机械臂的配置中，让机械臂内置程序计算工具上施加的外力；对于无重力补偿功能的机械臂来说，可直接应用步骤 S1.5 中标定的参数来计算当前工具所受到的外力。由此，机械臂所感受的外力为补偿工具重力后的外力，以此外力作为输入的控制策略也将忽略工具的影响，即做到零力控制。

此外，请参考图 4，本申请还提供一种机械臂的多负载自适应重力补偿装置 100，以通过该多负载自适应重力补偿装置 100 所包括的各项功能实现模块，对上述机械臂的多负载自适应重力补偿方法进行执行。其中，所述多负载自适应重力补偿装置 100 包括模型搭建模块 110、重力重构模块 120、位置采样模块 130、参数标定模块 140、质参计算模块 150、外力计算模块 160 及重力补偿模块 170。

模型搭建模块 110，配置成搭建机械臂的运动学模型。

重力重构模块 120，配置成重构动力学模型的重力项。

位置采样模块 130，配置成无负载静态位置采样。

位置采样模块 130，还配置成安装各个工具后分别进行静态位置采样。

参数标定模块 140，配置成分别计算各个工具待标定的参数值。

质参计算模块 150，配置成分别计算各个工具的质量和质心。

外力计算模块 160，配置成计算当前安装的工具对法兰施加的力。

重力补偿模块 170，配置成补偿工具重力。

在本实施例的一种可能的实现方式中，所述模型搭建模块 110 在搭建机械臂的运动学模型的过程中，使用标准 D-H 法构建机械臂关节坐标系。

在本实施例的一种可能的实现方式中，所述位置采样模块 130 在机械臂无负载情况下，控制机械臂运行到工作空间下任意非奇异位置，采样关节位置和力矩读数。

在本实施例的一种可能的实现方式中，所述位置采样模块 130 在将各工具分次安装在机械臂末端后，针对每个工具根据该工具的尺寸确定机械臂当前与该工具对应的有效工作空间，然后基于有效工作空间重复控制机械臂运行到对应有效工作空间下任意非奇异位置，采样关节位置和力矩读数。

在本实施例的一种可能的实现方式中，所述参数标定模块 140 通过将所述位置采样模块得到的采样数据根据工具进行分组，并依次代入到所述重力重构模块得到的重力项内进行计算，得到各个工具待标定的参数值。

需要说明的是，本申请实施例所提供的多负载自适应重力补偿装置 100，其基本原理及产生的技术效果与前述的多负载自适应重力补偿方法相同，为简要描述，本实施例部分未提及之处，可参考上述的针对多负载自适应重力补偿方法的描述内容。

此外，本申请还提供一种机械臂的控制设备，该控制设备包括存储器、处理器。其中，所述存储器可以包括一个或多个计算机程序产品，所述计算机程序产品可以包括各种形式的可读存储介质，例如易失性存储器和/或非易失性存储器。所述易失性存储器例如可以包括随机存取存储器和/或高速缓冲存储器等。所述非易失性存储器例如可以包括只读存储器、硬盘、闪存等。在所述可读存储介质上可以存储一个或多个计算机程序，处理器可以运行所述计算机程序，以实现上述的机械臂的多负载自适应重力补偿方法所代表的功能以及/或者其它期望的功能。在所述可读存储介质中还可以存储各种应用程序和各种数据，例如所述应用程序使用和/或产生的各种数据等。

所述处理器可以采用数字信号处理器、现场可编程门阵列、可编程逻辑阵列中的至少一种硬件形式来实现，所述处理器可以是中央处理单元或者具有数据处理能力和/或指令执行能力的其它形式的处理单元中的一种或几种的组合，并且可以控制所述控

制设备中的其它组件以执行期望的功能。所述处理器可相应地执行所述存储器中存储的计算机程序，以实现该计算机程序所代表的功能。

在本实施例的一种可能的实现方式中，上述机械臂的多负载自适应重力补偿装置 100 可采用软件或固件的形式存储在所述控制设备的存储器中，由所述控制设备的处理器执行所述存储器中的所述多负载自适应重力补偿装置 100 所包括的软件功能模块及计算机程序等，来实现上述机械臂的多负载自适应重力补偿方法所对应的功能。

综上所述，上述方案通过 D-H 法构建机械臂关节坐标系，再基于关节坐标系对每段机械臂的质心位置进行建系。在原始的重力项中，将关节位置相关的项与质量质心相关的项拆分，拆分过程中需要将待标定的参数进行适当组合，再将拆分后的项放入两个矩阵中，使其相乘依然满足原来的重力项。然后对无负载状态时机械臂的静态位置进行采样，之后将各个工具安装在机械臂的末端，再分别进行静态位置采样。将采样数据不同工具分组后代入重力项内，使用 SVD 分解可解得组合后的参数的值，最后利用组合物体参数分离的方法，可在组合后的参数中提取出工具的质量和质心。基于在无负载情况下标定的参数和实时关节位置的反馈，可计算出当前安装的末端工具对法兰施加的力的大小。根据测得法兰上的外力，系统可得知当前在法兰上安装的是哪一个工具，从而可直接使用标定的参数值进行补偿工具重力后的外力测量，或是将得到的质量和质心应用到机械臂的配置之中。该方法通过预先计算获取工具参数的方式，使实际应用时的操作步骤得到简化，大大增强了协作操作的流畅性。此外，通过使用关节位置和力矩传感器对工具进行参数标定，也使标定的工具参数更加符合机械臂的运动学和动力学特性，从而改善了零力控制的性能。

最后应当说明的是，以上实施例仅用以说明本申请的技术方案，而非对本申请保护范围的限制，尽管参照可选的实现方式对本申请作了详细地说明，本领域的普通技术人员应当理解，可以对本申请的技术方案进行修改或者等同替换，而不脱离本申请技术方案的实质和范围。

工业实用性

本申请实施例提供了一种机械臂的多负载自适应重力补偿方法、装置、控制设备及可读存储介质，通过 D-H 法构建机械臂关节坐标系，再基于关节坐标系对每段机械臂的质心位置进行建系。在原始的重力项中，将关节位置相关的项与质量质心相关的项拆分，拆分过程中需要将待标定的参数进行适当组合，再将拆分后的项放入两个矩阵中，使其相乘依然满足原来的重力项。然后对无负载状态时机械臂的静态位置进行采样，之后将各个工具安装在机械臂的末端，再分别进行静态位置采样。将采样数据不同工具分组后代入重力项内，使用 SVD 分解可解得组合后的参数的值，最后利用组合物体参数分离的方法，可在组合后的参数中提取出工具的质量和质心。基于在无负载情况下标定的参数和实时关节位置

的反馈，可计算出当前安装的末端工具对法兰施加的力的大小。根据测得法兰上的外力，系统可得知当前在法兰上安装的是哪一个工具，从而可直接使用标定的参数值进行补偿工具重力后的外力测量，或是将得到的质量和质心应用到机械臂的配置之中。该方法通过预先计算获取工具参数的方式，使实际应用时的操作步骤得到简化，大大增强了协作操作的流畅性。此外，通过使用关节位置和力矩传感器对工具进行参数标定，也使标定的工具参数更加符合机械臂的运动学和动力学特性，从而改善了零力控制的性能。