

基于关节扭矩平衡的机器人末端负载建模及辨识

高贯斌^{1,2} 赵思郭^{1,2} 李映杰^{1,2*}

1.昆明理工大学机电工程学院,昆明,650500

2.云南省智能控制与应用重点实验室,昆明,650500

摘要:针对现有末端负载辨识方法质心参数解耦困难且难以在控制器不开放的机器人上实施的问题,提出了一种基于扭矩平衡的机器人末端负载建模及辨识方法。通过对关节扭矩平衡下的末端负载可辨识条件进行分析,构建了末端负载质量和质心位置的辨识模型。为解耦质量和质心参数,设计了一种依次辨识负载质量,质心位置 x 、 y 坐标,质心 z 坐标的三步辨识策略,并消除了辨识模型中扭矩投影带来的误差项。通过负载辨识的仿真和实验验证了所提方法的有效性,与不开源6自由度机器人自带辨识方法相比,质量辨识平均误差从0.103 kg减小至0.032 kg,质心位置辨识平均误差从50.25 mm减小至4.14 mm;与动力学参数辨识相比,质量辨识的平均误差从0.179 kg减小至0.083 kg,质心位置辨识平均误差从10.13 mm减小至4.33 mm。

关键词:工业机器人;末端负载;扭矩平衡;参数辨识;力矩投影

中图分类号: TP242.2

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.06.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Modeling and Identification of Robot End-payloads Based on Joint Torque Balance

GAO Guanbin^{1,2} ZHAO Siguo^{1,2} LI Yingjie^{1,2*}

1.Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650500

2.Yunnan Key Laboratory of Intelligent Control and Application, Kunming, 650500

Abstract: To address the challenges of decoupling center of mass parameters in existing end-payload identification methods and the difficulty of implementation on robots with non-open controllers, a torque-balance-based modeling and identification method was proposed for robot end-payloads. The identifiability conditions of the end-payloads were analyzed under joint torque balance, and identification models for the end-payload mass and center of mass position were established. To further decouple the mass and center of mass parameters, a three-step identification strategy was designed, where the load mass was identified first, followed by the center of mass position in x and y , and finally in z . This strategy effectively eliminated the error terms introduced by the projection of joint torques in the identification models. The efficiency of the proposed method was validated through simulation and experiments. Compared with the built-in identification method of a non-open-source six-degree-of-freedom robot, the average error in mass identification is reduced from 0.103 kg to 0.032 kg, while the average error in center of mass position identification is decreased from 50.25 mm to 4.14 mm. Furthermore, compared with dynamics parameter identification, the mass identification error is reduced from 0.179 kg to 0.083 kg, and the center of mass position error is reduced from 10.13 mm to 4.33 mm.

Key words: industrial robot; end-payload; torque balance; parameter identification; torque projection

0 引言

随着装备制造业对自动化和智能化需求的不断提高,工业机器人被广泛应用于装配、喷涂、焊接、搬运等一系列工业生产活动中^[1]。实际应用中工业机器人末端通常需要安装不同类型的执行

器,如焊枪、激光切割头、夹爪和加工主轴等,这些执行器引入了额外末端负载^[2]。在末端负载的重力和惯性力作用下,机器人空载时标定的定位精度将大幅下降,甚至无法满足实际应用需求^[3]。为提高工业机器人定位精度,对末端负载进行辨识和补偿是当前最重要的方法之一,而末端负载的辨识精度决定了误差补偿精度^[4]。末端负载辨识包括质量和质心位置辨识。通常负载质量和质

收稿日期:2023-12-29 修回日期:2025-03-05

基金项目:国家自然科学基金(52265001);云南省科技厅基础研究重点项目(202201AS070033)

心可以通过称量仪器和质心测定方法^[5]得到,但测量时需要将末端执行器从工业机器人末端拆下,且重新安装后的质心坐标系与测定坐标系难以完全匹配,因此,在不拆卸情况下辨识负载对提高工业机器人定位精度具有重要的意义。

目前,常用末端负载辨识法主要包括 CAD 辨识法^[6]、末端力矩传感器辨识法和动力学参数辨识法^[7]。CAD 辨识法先采用有限元分析软件对需要辨识的对象进行数字化建模,然后通过有限元理论^[8]计算得到末端负载质量和质心位置。KLIMCHIK 等^[9]提出了一种在 CAD 环境下利用虚拟实验辨识机械臂弹性静力参数的方法。由于 CAD 辨识法不仅需要辨识对象的外形进行准确三维建模,且末端执行器在 CAD 环境下的安装位姿与实际安装位姿很难完全一致,所以它在实际中难以推广应用。末端力矩传感器辨识法先通过在机器人末端安装多维力传感器来对末端负载作用力/力矩进行测量,然后构建扭矩平衡方程对负载质量和质心位置进行求解。DUAN 等^[10]在机器人末端安装包括重力/惯性力传感功能的多维力传感器,提出了一种基于激励轨迹的末端负载快速识别方法,但该方法需要额外安装传感器,通用性较差。适用性更强的动力学参数辨识法是将末端负载建模到动力学模型中与动力学参数进行统一辨识。KHALIL 等^[11]建立了带负载的动力学辨识模型,通过空载和负载情况的力矩差值方程来计算末端负载。GAZ 等^[12]分析了负载引起的动力学参数变化,根据变化关系估计了末端负载。此外,一些学者还提出了末端负载在线辨识方法,该方法通过递归最小二乘(RLS)方法^[13]、卡尔曼滤波方法^[14]和自适应算法^[15]等进行末端负载辨识。为降低动力学建模的复杂度,DONG 等^[16]对机器人动力学模型进行了参数线性化,提高了辨识计算效率。为降低辨识参数对测量噪声的敏感度,动力学参数辨识法需要在特定激励轨迹下进行^[17],但目前大多数工业机器人的控制器不开放,难以实现激励轨迹输入。此外,动力学参数辨识法得到的辨识结果是组合参数^[18],质心参数需通过解耦获得。

现有的负载辨识方法依赖于机器人控制器的开放性,且负载质心参数解耦较为困难,如文献^[19]中实验对象为控制器开放的机器人,辨识结果中质量和质心参数是耦合的。为解决上述问题,本文提出了一种基于扭矩平衡的末端负载建模及辨识方法,该方法不需要在机器人上加装外部传感器。

1 扭矩平衡条件下的工业机器人末端负载辨识建模

由动力学方程可知,关节加速度为零时,机器人末端负载与关节驱动力矩满足平衡条件(关节静止或匀速运动),理论上利用该平衡条件可求解得到末端负载的质量和质心位置。与激励轨迹运动条件相比,该平衡条件的实施与机器人控制器开放性无关。基于该思想首先进行关节扭矩平衡分析,确定参数辨识的基本条件,然后建立末端负载辨识模型。

1.1 关节扭矩平衡分析

如图 1a 所示,首先考虑一个关节的扭矩平衡。当机器人关节处于平衡状态时,可以分别得到包含末端负载和无负载情况下的方程:

$$\left. \begin{aligned} \tau' &= m_c g l_c \cos \theta + m_p g l \cos \theta_p + \tau_f \\ \tau &= m_c g l_c \cos \theta + \tau_f \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: τ' 、 τ 分别为负载和空载下的关节驱动力矩; m_c 、 m_p 分别为连杆和负载质量; g 为重力加速度; τ_f 为关节处的摩擦力矩。

为降低建模复杂性,假设摩擦力矩 τ_f 在相同运动速度下保持恒定,将式(1)中负载和空载的关节驱动力矩相减得到:

$$\Delta \tau = m_p g l \cos \theta_p \quad (2)$$

式(2)中除了包含未知负载参数 m_p 和 l 外,还包含未知关节角 θ_p ,故通过该方程难以求解出负载质量和质心位置。进一步放松条件,如图 1b 所示,假设负载质心位于连杆延长线上,同理可得

$$\Delta \tau = m_p g (l_L + l_p) \cos \theta \quad (3)$$

式中: l_L 、 l_p 分别为杆长和质心与连杆末端距离。

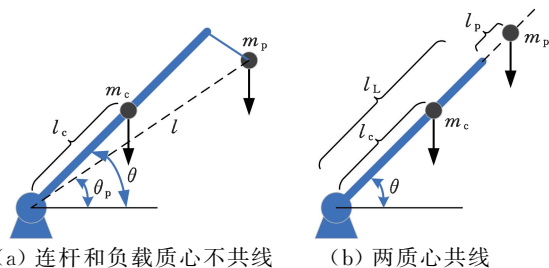


图 1 一个关节扭矩平衡分析

Fig.1 Analysis of torque balance of a robot joint

式(3)中仅包含末端负载参数 m_p 和 l_p 。式(3)表明,仅考虑一个关节扭矩平衡条件无法求解末端负载质量和质心位置,需进一步考虑两关节扭矩平衡条件。

如图 2a 所示,当连杆 2 和连杆 1 共线且关节 1 处于平衡状态时,由式(3)可得关节 1 负载和空载情况下的力矩差为

$$\Delta \tau_1 = m_p g (l_{L1} + l_{L2} + l_p) \cos \theta \quad (4)$$

式中： l_{L1} 、 l_{L2} 分别为连杆 1 和连杆 2 的长度。

然后考虑关节 2 扭矩平衡，如图 2b 所示，当关节 2 运动使得连杆 2 与水平方向夹角也为 θ 时，可得关节 2 在平衡状态下负载和空载情况下的力矩差为

$$\Delta\tau_2 = m_p g (l_{L2} + l_p) \cos \theta \quad (5)$$

连杆长度 l_{L1} 和 l_{L2} 可通过机器人手册或运动学标定得到，而 τ 和 θ 则可由机器人控制器获得，故结合式(4)和式(5)可以容易求解出末端负载质量 m_p 和质心位置 l_p 。

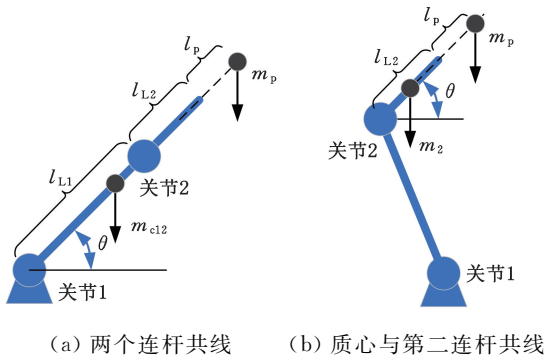


图 2 两个关节扭矩平衡分析

Fig.2 Analysis of torque balance between two joints

由上述分析可知，对于旋转关节的串联型机器人，当机器人末端负载质心位于图 2b 所示的第二连杆延长线上或其质心沿关节轴线的投影位于第二连杆延长线上时，根据式(4)和式(5)构造机器人关节构型，可以求出末端负载质量和质心位置。目前，大部分串联型工业机器人的关节 2 和关节 3 互为平行关节，与图 3 中两连杆情况较为吻合，故可选择关节 2 和关节 3 构造条件来满足式(4)和式(5)进行末端负载的求解。

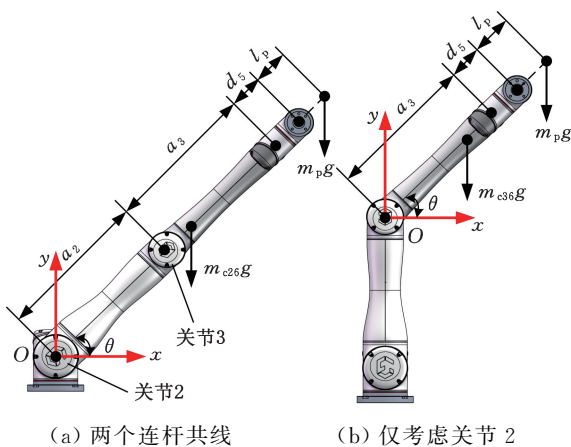


图 3 机器人关节 2 和关节 3 扭矩平衡分析

Fig.3 Torque balance analysis of robot joint 2 and joint 3

以 6 自由度机器人为例，当机器人分别满足图 3a 和图 3b 所示构型时，可以得到如下方程：

$$\left. \begin{aligned} \Delta\tau_2 &= m_p g (a_2 + a_3 + d_5 + l_p) \cos \theta \\ \Delta\tau_3 &= m_p g (a_3 + d_5 + l_p) \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： $\Delta\tau_2$ 、 $\Delta\tau_3$ 分别为关节 2 和关节 3 的负载与空载时的力矩之差； a_2 、 a_3 分别为连杆 2、连杆 3 的长度； d_5 为关节 5 的偏置。

求解方程式(6)可以得到机器人末端负载的质量和质心位置。

在上述方法中，通过构造机器人关节满足式(4)和式(5)的扭矩平衡来求解末端负载质量和质心位置，但前提是假设末端负载质心位于第二连杆的延长线上。然而，现实中机器人的负载质心位置一般不可能恰好处于该延长线上，通常位于某个偏离该延长线的未知位置，因此，为求解出一般情况下的负载质心位置，仍需构造额外关节条件。

图 4a 为质心安装在连杆末端的示意图，该质心不在连杆的延长线上。旋转末端坐标系 O_1 让 x 坐标轴与连杆重合，末端负载的质心随着坐标系旋转到新位置，如图 4b 所示。坐标变换后负载对关节的作用扭矩为

$$\tau_1 = l \cos(\theta - \theta_1) m_p g \quad (7)$$

式(7)中的 l 和 θ_1 未知，为了将作用角转换到关节角，将该作用扭矩投影到连杆的延长线上：

$$\tau_s = (l_L + l_p) \cos \theta m_p g \quad (8)$$

但投影扭矩和真实作用扭矩存在误差，表示为

$$e = \tau_1 - \tau_s = [(l_L + l_p)(1 - \cos \theta_1) - l_s \sin \theta_1] \cos(\theta - \theta_1) m_p g \quad (9)$$

则用投影上的作用扭矩表示真实扭矩的表达式为

$$\tau = (l_L + l_p) \cos \theta m_p g + e \quad (10)$$

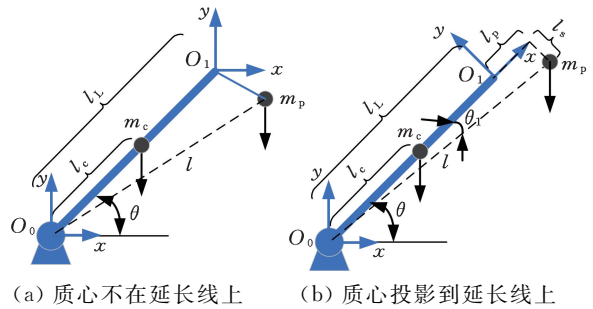


图 4 姿态变换示意图

Fig.4 Schematic diagram of posture change

在图 4b 中姿态时， l_p 代表 x 坐标轴质心坐标。式(10)中的 e 包含未知项 l_p 、 l_s 和 θ_1 ，为了简化求解过程，实际求解 m_p 时使用式(8)，故引入了误差项 e ，该误差项对辨识质量 m_p 的影响将在 2.1 节进行分析。

由上述分析可知，末端负载辨识首先至少需要两个平行关节参与，其次还需将末端坐标系的 x 轴或 y 轴旋转至与图 4 所示的第二连杆平行，最

后使用投影后的扭矩平衡方程对负载参数进行求解。

1.2 工业机器人末端负载辨识建模

由 1.1 节分析可知,当工业机器人末端负载位于第二连杆延长线上或沿关节轴线投影在该延长线上时,负载辨识只需任意选择两个平行关节建立扭矩平衡方程,但针对一般情况下的质心位置求解还需增加额外姿态变换条件。本文结合图 5 所示 6 自由度工业机器人建立了末端负载辨识模型。根据式(6),以关节 2 和关节 3 建立扭矩平衡方程,通过调整关节 4、5、6 来变换末端负载姿态,然后对负载质心坐标 x 、 y 、 z 和负载质量进行建模。由于对负载质心坐标 x 、 y 和 z 的求解需采用不同姿态变换条件,故分别建立 x 、 y 和 z 的负载辨识模型。

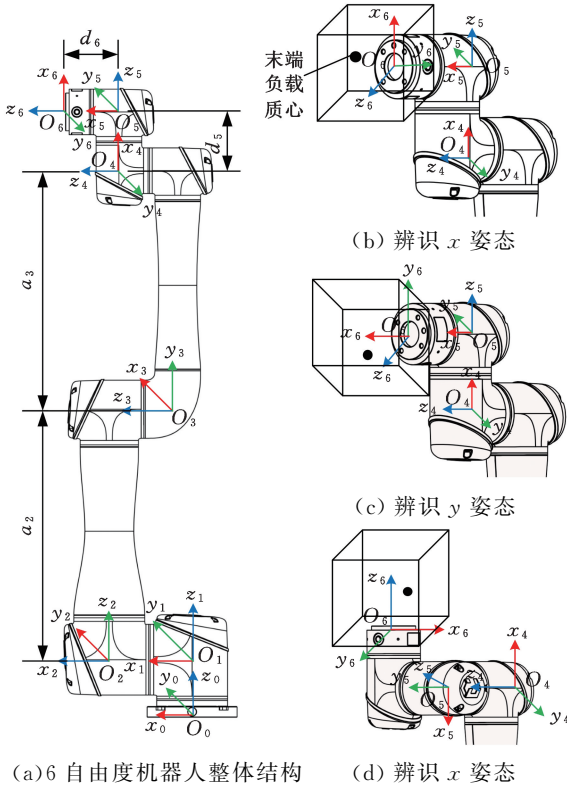


图 5 负载辨识姿态示意图

Fig.5 Schematic diagram of load identification posture

首先,建立关于末端负载质心 x 坐标辨识模型,旋转末端坐标系的 x_6 轴与 y_3 坐标轴平行,如图 5b 所示,再将负载投影到坐标系上。通过负载和空载扭矩之差建立关节 2 和关节 3 关于末端负载的平衡方程:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\tau_{2(x)} &= m_p g \cos \theta (a_2 + a_3 + d_5 + x) + e_{2(x)} \\ \Delta\tau_{3(x)} &= m_p g \cos \theta (a_3 + d_5 + x) + e_{3(x)} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中, $\Delta\tau_{2(x)}$ 、 $\Delta\tau_{3(x)}$ 分别为关节 2 和关节 3 在 x 坐标辨识模型下负载和空载的扭矩之差; $e_{2(x)}$ 和 $e_{3(x)}$ 分别为关节 2 和关节 3 的真实扭矩和投影扭

矩之差。求解式(11) 可得质量和 x 坐标:

$$m_p = \frac{\Delta\tau_{2(x)} - \Delta\tau_{3(x)} - e_{2(x)} + e_{3(x)}}{g a_2 \cos \theta} \quad (12)$$

$$x = \frac{\Delta\tau_{3(x)}}{m_p g \cos \theta} - (a_3 + d_5 + e_{3(x)}) \quad (13)$$

然后,建立关于末端负载 y 坐标辨识模型,旋转末端坐标系的 y_6 轴与 y_3 坐标轴平行,如图 5c 所示,将负载投影到坐标系上。由负载和空载扭矩之差可以建立关节 2 和关节 3 关于末端负载的平衡方程:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\tau_{2(y)} &= m_p g \cos \theta (a_2 + a_3 + d_5 + y) + e_{2(y)} \\ \Delta\tau_{3(y)} &= m_p g \cos \theta (a_3 + d_5 + y) + e_{3(y)} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

同理,可以求解出质量和 y 坐标:

$$m_p = \frac{\Delta\tau_{2(y)} - \Delta\tau_{3(y)} - e_{2(y)} + e_{3(y)}}{g a_2 \cos \theta} \quad (15)$$

$$y = \frac{\Delta\tau_{3(y)}}{m_p g \cos \theta} - (a_3 + d_5 + e_{3(y)}) \quad (16)$$

如图 5d 所示,辨识 z 方向的姿态中始终存在一个偏置 d_5 ,该偏置导致关节 2 和关节 3 扭矩误差分别为

$$e_2 = (a_3 + a_2)(1 - \cos \theta_2) - d_5 \sin \theta_2 \quad (17)$$

$$e_3 = a_3(1 - \cos \theta_3) - d_5 \sin \theta_3 \quad (18)$$

$$\theta_2 = \arctan \frac{d_5}{a_2 + a_3} \quad \theta_3 = \arctan \frac{d_5}{a_3}$$

式中: θ_2 为末端坐标系偏置位置与连杆 2 的角度; θ_3 为末端坐标系偏置位置与连杆 3 的角度。

加上该偏置误差后, z 方向的平衡方程表示为

$$\left. \begin{aligned} \Delta\tau_{2(z)} &= m_p g \cos \theta (a_2 + a_3 + d_6 + z) + e'_{2(z)} \\ \Delta\tau_{3(z)} &= m_p g \cos \theta (a_3 + d_6 + z) + e'_{3(z)} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$e'_{2(z)} = e_2 + e_{2(z)} \quad e'_{3(z)} = e_3 + e_{3(z)}$$

求解式(19) 可得质量和 z 坐标:

$$m_p = \frac{\Delta\tau_{2(z)} - \Delta\tau_{3(z)} - e'_{2(z)} + e'_{3(z)}}{g a_2 \cos \theta} \quad (20)$$

$$z = \frac{\Delta\tau_{3(z)}}{m_p g \cos \theta} - (a_3 + d_6 + e'_{3(z)}) \quad (21)$$

通过上述三种情况分别建立质心坐标 x 、 y 和 z 的模型,并通过相应方程组分别解出负载质量 m_p 和质心坐标 (x, y, z) 。

2 末端负载辨识方法及仿真验证

2.1 末端负载辨识方法

由上述分析可得到末端负载模型,由式(12)、式(15)和式(20)可知,求解质量 m_p 时等式中存在误差 $\Delta e = e_2 - e_3$ 。根据式(9), Δe 可表示为

$$\begin{aligned} \Delta e &= [(l_{12} \cos \theta_2 + l_s \sin \theta_2) \cos(\theta - \theta_2) - \dots \\ &\quad (l_{11} \cos \theta_1 + l_s \sin \theta_1) \cos(\theta - \theta_1) + \dots \\ &\quad (l_{11} - l_{12}) \cos \theta] m_p g \end{aligned} \quad (22)$$

$$\theta_1 = \arctan \left(\frac{l_s}{l_{11} + l_p} \right) \quad \theta_2 = \arctan \left(\frac{l_s}{l_{12} + l_p} \right)$$

为了分析质心位置对 Δe 的影响,设置 l_s 和 l_p 为自变量, Δe 作为因变量,分析质心位置对质量辨识的影响。 l_s 和 l_p 的范围设置为 $0 \sim 2000$ mm,其中末端负载质量 m_p 设置为实验对象的最大负载 6 kg, θ 设置为 $\pi/4$ 。在自变量范围内取 10 mm 作为步长,可以得到误差 Δe 关于质心位置的函数曲面图像,见图 6。从图 6 中可以看出,误差 Δe 的值始终在 10^{-14} 的水平上,在实际计算中可以忽略不计。上述分析表明通过两个包含误差项的关节投影扭矩方程可以准确计算质量 m_p 。

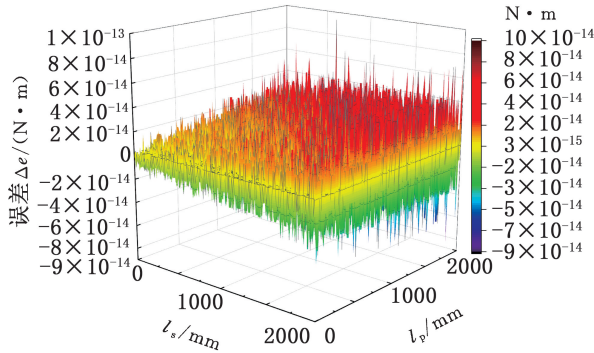


图 6 质心位置对扭矩误差的影响

Fig.6 Effect of center of mass position on torque error

结合数值分析可知求解 m_p 时投影扭矩和真实扭矩的误差可以抵消,式(12)可以写成

$$m_p = \frac{\Delta\tau_{2(x)} - \Delta\tau_{3(x)}}{g a_2 \cos \theta} \quad (23)$$

通过式(23)可以计算得到末端负载质量。

求解质心只用一个关节的信息时,无法对方程中的扭矩误差进行消除,会导致质心坐标 x 、 y 和 z 辨识不准确。由 1.2 节可知,辨识 y 的姿态由辨识 x 姿态下关节 6 旋转 90° 后得到。再结合 1.1 节中对投影扭矩和真实扭矩之间误差的分析可知,辨识 x 时存在的扭矩误差是由 y 方向的坐标导致的。同理,辨识 y 时存在的扭矩误差也是由 x 方向的坐标导致。为消除辨识质心时存在的误差,在质量 m_p 已知后,建立同时包含 x 和 y 的扭矩平衡方程。具体方法是:旋转末端坐标系的 Oxy 平面到图 5b 所示姿态,建立关于 x 和 y 的平衡方程:

$$[\cos \theta \quad \sin \theta] \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{\Delta\tau_3}{m_p g} - (a_3 + d_5) \cos \theta \quad (24)$$

已知 m_p 和 x 后,旋转末端坐标系的 Ozx 平面到图 5d 所示姿态,建立关于 x 和 z 的平衡方程:

$$z \cos \theta = \Delta\tau_3 / m_p g - (a_3 + d_6) \cos \theta - (x + l_s) \sin \theta \quad (25)$$

在式(23) ~ 式(25)中,令等式右边为 δ ,等式左边的未知项为 b ,等式左边角度项为 ϕ 。式(23) ~ 式(25)可以统一简化为

$$\phi b = \delta \quad (26)$$

在实际辨识时采集 n 组数据可得

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 b &= \delta_1 \\ \phi_2 b &= \delta_2 \\ &\vdots \\ \phi_n b &= \delta_n \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

令 $[\phi_1 \quad \phi_2 \quad \dots \quad \phi_n]$ 为 Φ 、 $[\delta_1 \quad \delta_2 \quad \dots \quad \delta_n]^T$ 为 Ψ ,使用最小二乘法对未知项 b 求解如下:

$$b = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \Psi \quad (28)$$

通过上述分析可以确定辨识方法为:第一步,通过图 5b 所示姿态下的投影扭矩求解出质量 m_p ;第二步,利用已知的质量 m_p 和图 5b 姿态下建立的扭矩平衡方程求解出质心坐标 x 和 y ;第三步,将已知的质量 m_p 和质心坐标 x 代入图 5d 姿态下建立的扭矩平衡方程求解出质心坐标 z 。

2.2 仿真验证

为了验证所提方法的有效性,在 Simulink 中搭建了机器人模型并使用仿真数据对该方法进行验证。首先使用 SolidWorks 和 Simulink 联合搭建机器人模型,然后在 Simulink 中输入关节角度并分别转动关节 2 和关节 3,采集角度信息和扭矩信息对模型末端负载参数进行辨识。仿真程序分为机器人角度输入部分、机器人本体模型部分和数据采集部分,如图 7 所示。

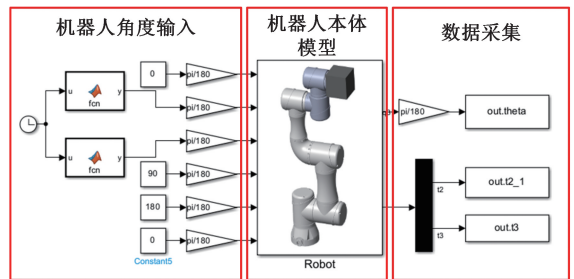


图 7 仿真程序图

Fig.7 The simulation process

机器人角度输入包括两个平行关节的角度输入和末端姿态角的输入。首先,在空载情况下设置末端姿态,并将末端坐标系 x_6 轴旋转到与 y_3 平行的位置(图 5b)。在保持末端姿态不变的情况下先驱动关节 2,关节 2 的运动起始范围设置为 $0^\circ \sim 55^\circ$,转动的速度设置为 $1^\circ/s$,关节 3 保持不动,通过数据采集模块中的 out.t2_1 采集关节 2 的扭矩,out.theta 采集角度;继续保持末端姿态不变,关节 2 在竖直位置,再以相同的速度和范围驱动关节 3,通过数据采集模块 out.t3 采集关节 3 的扭矩。

装载上末端负载后,以相同的姿态、转动范围和转动速度分别驱动关节 2 和关节 3 并采集扭矩。采集数据后,使用式(23)通过最小二乘法对

质量 m_p 进行辨识。辨识得到质量 m_p 后,将关节 3 的扭矩信息和角度信息代入式(24)对质心 x 坐标和 y 坐标进行辨识。之后再变换末端姿态,将末端坐标系 z_6 轴旋转到与 y_3 平行(图 5d),按照上述流程在空载和负载的情况下分别转动关节 2 和关节 3 并采集数据,将采集到的数据代入式(25)中对质心 z 坐标进行辨识。辨识结果如表 1 所示。进一步地,在扭矩上加入均值为 0、标准差为 0.3 的白噪声。使用加入白噪声后的数据对末端负载进行辨识,其辨识结果如表 1 所示。当噪声水平为 0.3 时,质量辨识最大误差为 0.047 kg,质心辨识最大误差为 0.373 mm。辨识结果表明扭矩信息存在噪声时,辨识精度会有所下降。

表 1 不同噪声水平下负载辨识仿真结果
Tab.1 Simulation results of load identification at different noise levels

组别	参数	实际值	无噪声辨识误差	噪声为 0.3 辨识误差
1	m_p /kg	1.0	1.82×10^{-11}	0.001
	x /mm	60	2.33×10^{-8}	0.221
	y /mm	50	1.72×10^{-8}	0.202
	z /mm	75	3.67×10^{-8}	0.142
2	m_p /kg	2.3	2.23×10^{-11}	0.047
	x /mm	70	2.11×10^{-8}	0.088
	y /mm	65	1.01×10^{-8}	0.095
	z /mm	50	2.09×10^{-8}	0.373
3	m_p /kg	3.4	2.68×10^{-11}	0.0016
	x /mm	90	1.84×10^{-8}	0.091
	y /mm	100	8.67×10^{-8}	0.001
	z /mm	85	1.87×10^{-8}	0.184

3 机器人末端负载实验

3.1 实验设计

为验证所提方法适用性及有效性,以 EC66 机器人为研究对象展开实验,该机器人控制器不开放,其末端最大负载为 6 kg。分别设计了两个实验装置验证质量和质心辨识的有效性,质量实验装置如图 8 所示。图中法兰用于固定不同大小的质量块,通过更换不同质量块并辨识来验证质量辨识的有效性。在质心的实验装置中法兰用于固定滑轨,滑块在滑轨上可自由移动,通过改变滑轨的位置来改变末端负载的质心位置。

末端负载辨识流程如图 9 所示,一共设计了 5 个不同质量的质量块进行实验,实际质量为 0.744、1.238、1.489、2.468、2.963 kg。质心实验的空载条件是在图 8 所示机器人末端法兰加装滑轨,负载为图 8 所示滑块,滑块在滑轨上移动变换质心位置,该负载质量为 0.897 kg。该实验分别对 x 、 y 和 z 坐标辨识进行验证,验证 x 时另外两

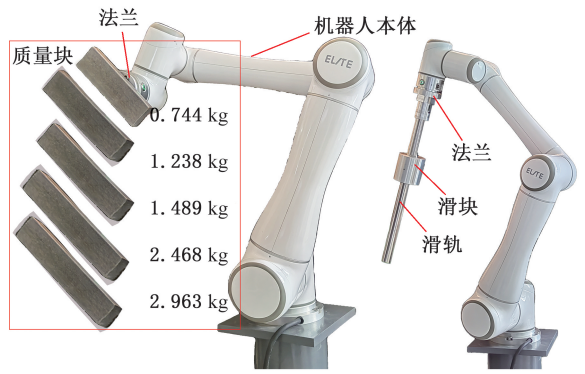


图 8 实验装置

Fig.8 Experimental setups

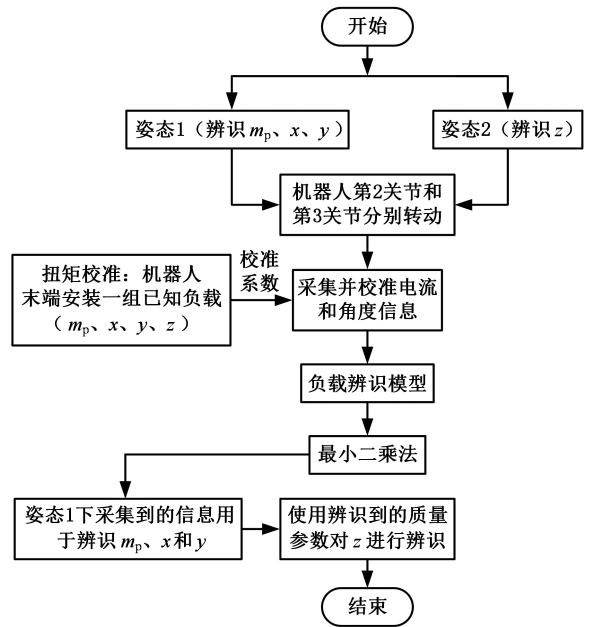


图 9 末端负载辨识流程

Fig.9 End-payload identification process

个坐标保持不变, y 和 z 同理。 x 、 y 和 z 都分别设置 125 mm、215 mm 和 305 mm 三个质心进行实验。

在空载运行后分别采集两关节的角度信息和电流信息,加装上负载再次以相同的速度和运动范围转动一次关节 2 和关节 3 并采集两关节的角度和电流信息,两次采集的信息分别为空载和负载条件下的角度和电流,使用 2.1 节中描述的方法依次对质量和质心进行辨识。

3.2 辨识实验一

实验环境如图 10 所示。根据图 9 辨识流程,分别转动第 2 关节和第 3 关节,采集信息,使用最小二乘估计对质量进行辨识,并与机器人自身辨识程序的辨识结果进行对比,结果如表 2 所示,根据表 2 得到误差比较图(图 11)。结果表明,所提方法的最大误差为 0.052 kg,平均误差为 0.032 kg;机器人辨识程序的最大误差为 0.135 kg,平均误差为 0.103 kg。从图 11 中可以看出,机器人程

序的辨识误差会随着质量的增大而增大,而所提方法的辨识误差由于库仑摩擦的影响也呈现出增大趋势,但总体均小于机器人自带程序的辨识误差,这表明所提方法对末端负载质量的辨识是有效的。



图 10 实验环境

Fig.10 Experimental environment

表 2 质量辨识结果

Tab.2 Mass identification results kg

	组别				
	1	2	3	4	5
实际值	0.744	1.238	1.489	2.468	2.963
机器人程序辨识	0.681	1.142	1.383	2.333	2.847
所提方法辨识	0.741	1.264	1.509	2.520	3.008

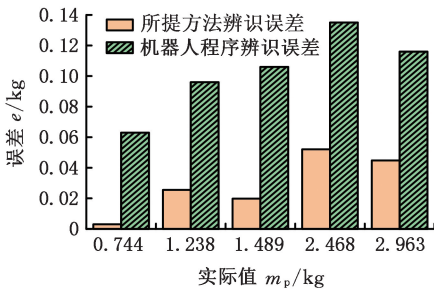


图 11 质量辨识误差比较

Fig.11 Comparison of mass identification errors

同时为了验证质心辨识有效性,将图 8 中所示负载移动到 125、215、305 mm 分别对 x 、 y 和 z 坐标进行实验,辨识实验结果如表 3 所示,根据表 3 作出误差比较图(图 12)。其中横坐标字母表示 x 、 y 和 z 方向,数字表示组别。结果表明,所提方法对质心的辨识最大误差为 6.65 mm,平均误差为 4.14 mm;机器人程序辨识最大误差为 93.25 mm,平均误差为 50.28 mm。结合图 12 可以看

表 3 质心辨识结果

Tab.3 Centroid identification results mm

项目	组别			
	1	2	3	
实际值	125	215	305	
x	机器人程序辨识	150.37	256.58	398.25
	所提方法辨识	118.78	218.58	302.38
y	机器人程序辨识	198.91	297.47	376.93
	所提方法辨识	120.32	217.94	300.00
z	机器人程序辨识	93.42	196.50	340.29
	所提方法辨识	127.33	211.77	298.35

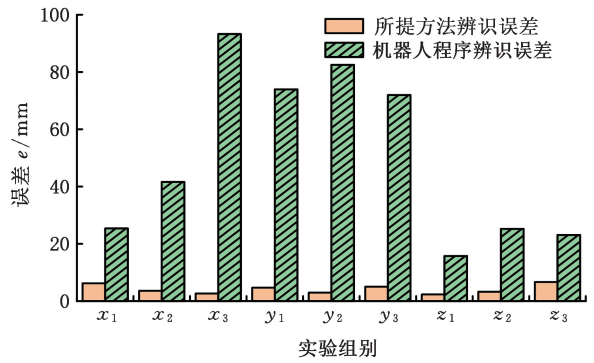


图 12 质心辨识误差比较

Fig.12 Comparison of centroid identification errors

出,质心辨识的总体误差比机器人程序辨识的误差小,可以验证所提方法对质心辨识的有效性。

为验证本文所提方法在接近机器人最大负载时依然有效,设置一组负载质量为 4.11 kg,质心为(60 mm,115 mm,150 mm)。最终本文所提方法辨识质量为 4.225 kg,质心为(72.306 mm,118.506 mm,146.832 mm)。机器人程序辨识质量为 4.024 kg,质心为(80.698 mm,149.708 mm,150.631 mm)。对比结果显示所提方法在接近机器人最大负载时,其质心的辨识精度仍优于机器人自带程序辨识方法,但质量误差从 0.086 kg 增大至 0.115 kg,辨识精度有所下降。造成这一结果的原因可能是所提方法在建立关节扭矩平衡方程时简化了摩擦力矩的影响,当负载增大时关节摩擦力矩也随之增大,导致质量辨识精度降低。

综上所述,虽然在 4.11 kg 负载(机器人最大负载的 86.8%:(负载+法兰 1.1 kg)÷最大负载)的质量辨识中,所提方法的质量辨识精度降低,但在表 2 的实验结果中,负载质量小于 2.963 kg(机器人最大负载的 67.7%)时,所提方法的质量和质心辨识精度均优于机器人程序辨识,这表明所提方法在机器人中、小负载情况下能够有效辨识负载质量和质心。

由于建模是在扭矩平衡条件下进行的,因此加速度对所提辨识方法没有影响。为研究不同速度对辨识结果的影响,在同一组负载(质量为 1.46 kg, x 为 76 mm, y 为 100 mm, z 为 70 mm)情况下,分别设计了机器人最大速度(144°/s)的 1%、3%、5%、10%、15%、20%进行负载辨识实验。机器人点到点运动程序从启动到停止的速度分为三段:第一段为加速阶段,第二段为匀速阶段,第三段为减速阶段。根据上文,本文所提辨识方法是在匀速时辨识的,所以取中间匀速阶段的数据进行实验。当速度为 25%时,中间的匀速阶段采集到的数据仅为 20 个,此时使用最小二乘辨识,由

于数据量比较小,所提辨识方法失效,有效的实验结果如表 4 所示。

表 4 不同速度实验误差对比
Tab.4 Repeatability error

关节速度	x/mm	y/mm	z/mm	m_p/kg
1%	2.75	3.14	3.27	0.013
3%	2.91	2.94	3.31	0.025
5%	3.33	3.54	3.75	0.043
10%	4.45	4.32	5.47	0.073
15%	7.33	4.45	6.54	0.098
20%	9.75	6.58	10.34	0.130

由表 4 可知,当机器人运动速度较小时(1%、3%、5%),所提方法对负载质量和质心的辨识精度较好,辨识结果与前述实验结果相当。随着机器人运动速度的增大,辨识误差也逐渐增大。导致辨识精度下降的主要原因是随着速度的增大黏滞摩擦力矩的影响逐渐显著。此外,当速度增大时匀速阶段采集到的辨识数据量减少,进而使辨识精度降低,所以采用所提方法时为了兼顾效率和辨识精度,需要选择合适的速度。

3.3 辨识结果一致性分析

为验证本文末端负载辨识方法的稳定性,进行了 10 组重复实验,每组均使用同一组负载,该负载实际质量为 0.897 kg,质心坐标 x 、 y 、 z 均为 125 mm。质量和质心辨识误差如图 13 所示。辨识质心位置 x 、 y 和 z 的标准差分别为 3.33 mm、3.38 mm 和 2.32 mm,辨识质量误差的标准差为 0.017 kg。对多次重复辨识所得结果的标准差及平均误差的分析表明,所提方法辨识结果的一致性较好,同一个负载多次辨识结果较为稳定。

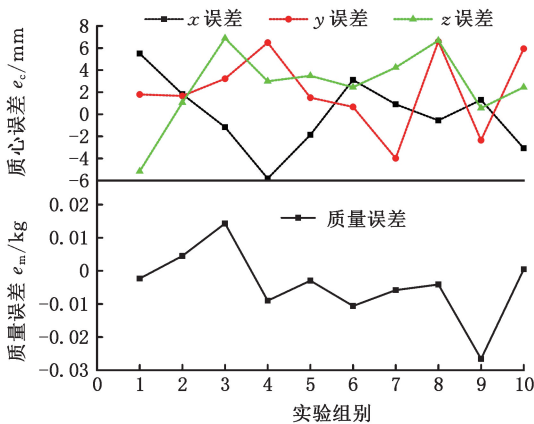


图 13 10 次重复辨识结果

Fig.13 Identification results of 10 repetitions

3.4 辨识实验二

在 3.2 节中所用实验对象 Elite EC66 的控制器写入权限并未开放,不能使机器人按照设计的激励轨迹运动,故无法在该机器人上采用目前较为先进的动力学参数辨识法^[19]进行负载参数(质

量和质心)辨识实验。为了能进一步比较所提方法与动力学参数辨识法,在另一台控制器开源的机器人上开展了负载辨识实验,如图 14 所示。该机器人最大负载质量为 2 kg,实验采用 3 个质量分别为 0.5、1、2 kg 的砝码作为辨识负载,其质心的位置分别为(0, 0, 18 mm)、(0, 0, 24 mm)、(0, 0, 33 mm)。



图 14 6 自由度开源机器人

Fig.14 The open source robot with 6 degrees of freedom

实验中控制机器人沿同一轨迹运行两次,分别采集空载和负载情况下的关节力矩 τ_e 、 τ_{load} ,然后利用与负载相关的动力学参数辨识方程对含负载参数项 H_{load} 进行辨识:

$$H_{load} = W(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})^{-1}(\tau_{load} - \tau_e) \quad (29)$$

式中: H_{load} 为含末端负载质量和质心的重组动力学参数,具体表达式见文献[16]; W 为动力学模型观测矩阵; θ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\ddot{\theta}$ 分别为关节角、角速度和角加速度。

为降低测量噪声对辨识结果的扰动,提高辨识精度,需进行激励轨迹优化设计使得 $W(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$ 的条件数最小。根据文献[17],激励轨迹采用 5 阶傅里叶级数,通过遗传算法对机器人关节 4、5、6 的轨迹进行优化,结果如图 15 所示。

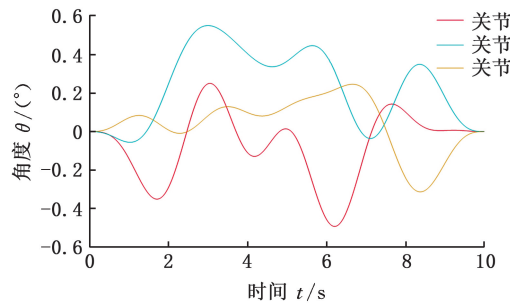


图 15 激励轨迹

Fig.15 Exciting trajectories

将优化得到的激励轨迹输入 CSPACE 开源控制器,控制机器人在空载和负载情况下运动。同时,采集关节角 θ 、角速度 $\dot{\theta}$ 、角加速度 $\ddot{\theta}$ 、关节空载力矩 τ_e 和负载力矩 τ_{load} 数据,并利用式(29)进行负载参数辨识。此外,在相同实验条件下,采用

所提方法(图9)对机器人末端负载进行辨识。两种方法的辨识结果如表5所示。由于三组砝码的实际质心位置在 x 和 y 方向均为0,故在辨识结果中仅给出了质心 z 方向的值。根据辨识结果,实际值减去辨识值计算得到辨识误差对比,见表5。

表5 所提方法与动力学参数辨识法比较

Tab.5 Comparison between the proposed method and the dynamic parameter identification method

组别	实际值	动力学参数辨识法		所提方法		
		结果	误差	结果	误差	
1	质量 m_p /kg	0.5	0.315	0.185	0.412	0.088
	质心 z /mm	18	26.3	-8.3	23.2	-5.2
2	质量 m_p /kg	1.0	1.213	-0.213	1.092	-0.092
	质心 z /mm	24	34.5	-10.5	21.6	2.4
3	质量 m_p /kg	2.0	1.862	0.138	1.931	0.069
	质心 z /mm	33	44.6	-11.6	38.4	-5.4

辨识结果显示,所提方法辨识后得到质量和质心误差在三组实验下均小于动力学参数辨识法的结果。其中,动力学参数辨识法得到的质量误差平均值和质心误差平均值分别为0.179 kg和10.13 mm,而所提方法辨识后的质量误差平均值和质心误差平均值分别为0.083 kg和4.33 mm,因此,相比于目前较先进的动力学参数辨识法,所提方法对机器人末端负载具有更高的辨识精度。这是由于所提方法能够直接辨识出质量和质心参数,而动力学参数辨识法需先辨识出负载参数与惯性张量的耦合项,然后通过解耦得到辨识负载,该过程引入了惯性张量参数的辨识误差,从而导致辨识精度降低。此外,对比实验一中所提方法的平均质量辨识误差0.032 kg,可以发现实验二的平均质量辨识误差有所增大,导致该差异的主要原因是实验二所用的开源机器人控制精度比实验一所用的工业机器人较差。

4 结论

提出了一种基于扭矩平衡的机器人末端负载辨识模型,与传统基于动力学模型的负载辨识模型相比,所提方法无需设计辨识激励轨迹,对机器人控制器开放权限无要求,此外通过分步辨识的方法避免了质心参数解耦困难的问题。设计实验装置分别验证了质量和质心辨识的有效性,并通过重复性实验对实验结果的一致性进行验证,主要结论如下。

1)通过扭矩平衡分析可知,具有两个及以上的平行关节的机器人可辨识末端负载质量,再变换末端姿态可以辨识到质心参数。

2)数值分析表明,采用投影扭矩法进行质心

辨识存在误差,但是对两个关节的投影扭矩作差后求解质量,可消除投影扭矩误差。

3)实验结果表明,所提方法能有效辨识机器人末端负载质量和质心位置。相比于机器人自带程序和动力学参数辨识法的结果,所提方法的平均辨识精度得到提高。

4)重复性实验表明,所提方法10次辨识同一个负载,质心辨识的平均误差和标准差均在4 mm以内,质量辨识的平均误差和标准差均在0.030 kg以内,表明所提方法有较好的一致性。

参考文献:

- [1] IGLESIAS I, SEBASTIÁN M, ARES J. Overview of the State of Robotic Machining: Current Situation and Future Potential [J]. Procedia Engineering, 2015, 132:911-917.
- [2] 张立建, 胡瑞钦, 易旺民. 基于六维力传感器的工业机器人末端负载受力感知研究[J]. 自动化学报, 2017, 43(3):439-447.
ZHANG Lijian, HU Ruiqin, YI Wangmin. Research on Force Sensing for the End-load of Industrial Robot Based on a 6-axis Force/Torque Sensor [J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(3):439-447.
- [3] 吴锦辉, 陶友瑞. 工业机器人定位精度可靠性研究现状综述[J]. 中国机械工程, 2020, 31(18):2180-2188.
WU Jinhui, TAO Yourui. Review on Research Status of Positioning Accuracy Reliability of Industrial Robots [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(18):2180-2188.
- [4] 高贯斌, 张石文, 那靖, 等. 基于标定和关节空间插值的工业机器人轨迹误差补偿[J]. 机械工程学报, 2021, 57(21):55-67.
GAO Guanbin, ZHANG Shiwen, NA Jing, et al. Compensation of Trajectory Error for Industrial Robots by Interpolation and Calibration Method in the Joint Space [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(21):55-67.
- [5] 王梅宝, 张晓琳, 唐文彦, 等. 柔性质心测量方法及不确定度评定[J]. 光学精密工程, 2019, 27(7):1500-1507.
WANG Meibao, ZHANG Xiaolin, TANG Wenyan, et al. Flexible Center of Gravity Measurement Method and Uncertainty Evaluation [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(7):1500-1507.
- [6] HAYAT A A, ABHISHEK V, SAHA S K. Dynamic Identification of Manipulator: Comparison between CAD and Actual Parameters [J]. INaCoMM, 2015, 15:1-6.

- [7] 张相胜, 陈佳明. 一种改进的机器人动力学参数辨识方法[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2025, 46(1):50-56.
ZHANG Xiangsheng, CHEN Jiaming. Improved Identification Method of Robot Dynamic Parameter [J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2025, 46(1):50-56.
- [8] ARNDT D, BANGERTH W, DAVYDOV D, et al. The Deal. II Finite Element Library: Design, Features, and Insights[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2021, 81:407-422.
- [9] KLIMCHIK A, PASHKEVICH A, CHABLAT D. CAD-based Approach for Identification of Elastostatic Parameters of Robotic Manipulators[J]. Finite Elements in Analysis, 2013, 75:19-30.
- [10] DUAN J, LIU Z, BIN Y, et al. Payload Identification and Gravity/Inertial Compensation for Six-dimensional Force/Torque Sensor with a Fast and Robust Trajectory Design Approach[J]. Sensors, 2022, 22(2):439-456.
- [11] KHALIL W, GAUTIER M, LEMOINE P. Identification of the Payload Inertial Parameters of Industrial Manipulators[C]//Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Rome, 2007:4943-4948.
- [12] GAZ C, de LUCA A. Payload Estimation Based on Identified Coefficients of Robot Dynamics—with an Application to Collision Detection [C] // 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Vancouver, BC, 2017:3033-3040.
- [13] SÁNCHEZ M C, TORRES-TORRITI M, CHEE-IN F A. Online Inertial Parameter Estimation for Robotic Loaders[J]. IFAC Papers OnLine, 2020, 53(2):8763-8770.
- [14] FARSONI S, LANDI C T, FERRAGUTI F, et al. Compensation of Load Dynamics for Admittance Controlled Interactive Industrial Robots Using a Quaternion-based Kalman Filter[J]. IEEE Robotics, 2017, 2(2):672-679.
- [15] HU J, LI C, CHEN Z, et al. Precision Motion Control of a 6-DOFs Industrial Robot with Accurate Payload Estimation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(4):1821-1829.
- [16] DONG J, XU J, ZHOU Q, et al. Dynamic Identification of Industrial Robot Based on Nonlinear Friction Model and LS-SOS Algorithm[J]. IEEE Transactions on Instrumentation, 2021, 70:1-12.
- [17] 严浩, 白瑞林, 吉峰. 一种改进的 SCARA 机器人动力学参数辨识方法[J]. 中国机械工程, 2017, 28(22):2707-2713.
YAN Hao, BAI Ruilin, JI Feng. An Improved Dynamics Parameter Identification Method for SCARA Robots[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(22):2707-2713.
- [18] 李永泉, 吴鹏涛, 张阳, 等. 球面二自由度冗余驱动并联机器人系统动力学参数辨识及控制[J]. 中国机械工程, 2019, 30(16):1967-1975.
LI Yongquan, WU Pengtao, ZHANG Yang, et al. Dynamics Parameter Identification and Control of a Spherical 2-DOF Redundant Driven Parallel Robot System[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(16):1967-1975.
- [19] TAIE W, ELGENEIDY K, ALI A Y, et al. Online Identification of Payload Inertial Parameters Using Ensemble Learning for Collaborative Robots [J]. IEEE Robotics Automation Letters, 2023, 9(2):1350-1356.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:高贯斌,男,1979年生,教授、博士研究生导师。研究方向为机器人学、精密测量与控制、智能康复外骨骼。E-mail: gbgao@kust.edu.cn。李映杰*(通信作者),男,1995年生,博士研究生。研究方向为机器人学、精密测量与控制。E-mail: yjli@stu.kust.edu.cn。

本文引用格式:

高贯斌,赵思郭,李映杰.基于关节扭矩平衡的机器人末端负载建模及辨识[J]. 中国机械工程,2025,36(6):1188-1197.

GAO Guanbin, ZHAO Siguo, LI Yingjie. Modeling and Identification of Robot End-payloads Based on Joint Torque Balance[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(6):1188-1197.