

联合扩张状态观测器的移动焊接机器人运动自动控制研究

凌付平¹

LING Fuping

摘要

移动焊接机器人在实际运动过程中,会受到欠驱动约束、多源不确定性以及执行器非线性耦合等多重因素的共同影响,这些问题叠加在一起,容易造成机器人运动精度不足、各部件配合协调性变差等情况。为此,文章开展了联合扩张状态观测器的运动自动控制方法研究。通过建立包含多源扰动耦合关系的广义动力学模型,并联合扩张状态观测器,同时对系统的集总扰动与关键状态变量进行估算,将估算结果作为前馈补偿量,将其与依托模型设计的反步滑模反馈控制律相结合,构建出一套鲁棒性更强的复合控制结构,以此达成对移动焊接机器人运动的自动化控制。实验结果表明,所提出的自动控制方法,让绝对位置跟踪误差的 RMSE 最大下降了 74.8%,同时,机器人的移动部分与执行机构在动态运行过程中也能保持更为稳定的协同状态,整体运动控制的精准度与协调能力均有明显提升,为实现高精度的自动化焊接作业提供了较为实用的技术参考与支撑。

关键词

联合扩张状态观测器;移动焊接机器人;运动控制;解耦估计;轨迹跟踪

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.06.036

0 引言

移动焊接机器人是推动焊接作业自动化与智能化发展的重要载体,其运动控制品质,在很大程度上决定了实际焊接效果与作业效率。在工况复杂的现场应用中,机器人系统常会受到欠驱动限制、模型参数摄动、外部未知扰动以及执行器非线性特性等多重因素的耦合作用,这些问题叠加后往往会造成运动精度降低、动态响应迟缓等现象。

因此,设计鲁棒性更强的运动控制方案,以实现复合扰动有效抑制,已成为提升移动焊接机器人整机性能的关键问题。罗卢洋等^[1]提出的融合视觉反馈的运动控制方案,由于依赖固定参数模型,且在扰动处理上多采用集总逼近方式,难以对参数化与非参数化两类异质扰动进行有效区分与独立估计,使得控制器难以实现精准的差异化补偿。曹海兰等^[2]基于 PLC 技术设计的主从协调控制策略,在面对低频参数摄动与高频未建模动态相互耦合的工况时,模型自适应能力不足,同样会引发状态估计偏差,进而影响整体控制效果。

基于此,本文提出一种基于联合扩张状态观测器的移动焊接机器人运动自动控制方法,以期突破传统方法在处理多类型扰动耦合问题上的瓶颈。

1 基于 D-H 参数建模的移动焊接机器人运动学正逆解求解

运动学模型作为描述机器人内部几何关系的核心,其首要任务是厘清关节变量与末端执行器位姿之间的映射规律。针对移动焊接机器人这一由移动底座与多关节焊接臂组成的复杂空间机构,本文选取 D-H 参数法作为建模的基础手段。

D-H 参数法通过为每个关节定义四个参数:连杆长度 a_{i-1} 、连杆扭角 α_{i-1} 、关节距离 d_i 和关节角 θ_i ,来描述相邻连杆之间的相对位置和姿态^[3]。对于具有 n 个关节的移动焊接机器人,其末端执行器相对于基坐标系的位置和姿态可以通过齐次变换矩阵 0T_n 来表示,该矩阵是各个关节齐次变换矩阵的乘积,即:

$${}^0T_n = \prod_{i=1}^n {}^{i-1}T_i \quad (1)$$

式中: ${}^{i-1}T_i$ 是第 i 个关节相对于第 $i-1$ 个关节的齐次变换矩阵,其表达式为:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & a_{i-1} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & a_{i-1} \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过上述运动学模型,可以根据给定的关节变量 $\theta_i (i=1, 2, \dots, n)$ 计算出末端执行器的位置和姿态,实现正运动学分析。同时,也可以通过末端执行器的期望位置和姿态,反解出各个关节变量,实现逆运动学分析,为后续控制提供精确的关节空间期望指令。

1. 江苏航运职业技术学院教务处金工实训中心 江苏南通 226010
[基金项目] 江苏省职业教育智能焊接技术技艺技能传承创新平台(苏教师函〔2022〕31号, 202211)

2 基于联合扩张状态观测器的移动焊接机器人运动状态与扰动协同估计

为克服状态不可测与异质扰动耦合导致的控制性能退化,在运动学建模后,实施基于联合扩张状态观测器的状态与扰动协同估计。该步骤旨在通过实时解耦估计系统真实状态及异质扰动分量,为主动抗扰控制提供精确信息。联合扩张状态观测器通过构建并联储观测器组,协同估计系统状态并解耦分离低频参数不确定性与高频未建模动态等异质扰动成分^[4]。所得高精度状态估计值及解耦后的扰动估计值,直接作为前馈补偿设计的关键输入,可据此构造前馈控制量以主动抵消扰动,从而显著降低系统所受扰动影响,使反馈控制器仅需处理大幅衰减后的扰动残余,为提升系统轨迹跟踪精度与抗干扰性能奠定基础。

为了准确地估计机器人的运动状态,本文设计了一种联合扩张状态观测器。

设移动焊接机器人的动力学模型可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{x}$ 是系统的状态向量,包括位置、速度等信息, $\mathbf{u}$ 是控制输入向量, $\mathbf{y}$ 是系统的输出向量, $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 是适当维数的系数矩阵, $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)$ 是系统的集总扰动,包含模型不确定性、外部干扰等因素。

联合扩张状态观测器的设计思路是将集总扰动 $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)$ 扩张为一个新的状态变量,并构造多个 ESO 来分别估计不同的状态分量及扰动特性^[5]。假设构造 m 个 ESO, 每个 ESO 的结构表示为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}}_i = \mathbf{A}_i \hat{\mathbf{x}}_i + \mathbf{B}_i \mathbf{u} + \mathbf{L}_i (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}_i) \\ \hat{\mathbf{y}}_i = \mathbf{C}_i \hat{\mathbf{x}}_i \end{cases} \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (4)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}_i$ 为第 i 个 ESO 对系统状态和扩张状态的估计值, $\mathbf{A}_i$ 、 $\mathbf{B}_i$ 、 $\mathbf{C}_i$ 为根据系统模型设计的系数矩阵, $\mathbf{L}_i$ 为观测器的增益矩阵,直接影响观测器的估计性能。

通过合理设计各个 ESO 的参数和增益矩阵,使其能够协同工作,实现对系统状态和异质扰动的解耦与精准估计。所得高精度状态估计值及解耦后的扰动估计值,为前馈补偿提供关键输入。

3 基于扰动估计的移动焊接机器人前馈补偿设计

在基于联合扩张状态观测器完成运动状态与扰动协同估计后,实施基于扰动估计的前馈补偿设计,旨在将扰动观测信息转化为主动控制力,实现对扰动的超前抑制。通过构造前馈补偿控制律,将估计扰动直接注入控制输入端以产生反向抵消作用,有效解决传统反馈控制中响应滞后、控制冲突及高频扰动放大等问题。前馈补偿可将系统扰动项压缩为微小残余,使控制任务得以解耦,并为后续反步滑模反馈控制创造有利条件:其不仅显著降低滑模控制器所需增益以抑制

抖振,还使反馈控制更专注于消除模型误差与前馈残余,从而提升跟踪精度与整体控制鲁棒性,最终形成“观测-解耦估计-前馈补偿-反馈镇定”的协同抗扰控制架构^[6]。

设控制系统的控制输入为 $\mathbf{u}$, 将其分解为前馈补偿部分 $\mathbf{u}_{ff}$ 和反馈控制部分 $\mathbf{u}_{fb}$, 即 $\mathbf{u} = \mathbf{u}_{ff} + \mathbf{u}_{fb}$ 。前馈补偿部分 $\mathbf{u}_{ff}$ 基于 JESO 提供的解耦扰动估计 $\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)$ 来设计,其目的是使系统在受到扰动时能够产生一个与扰动相反的控制作用,从而减小扰动对系统输出的影响^[7]。

前馈补偿的原理可以表示为:

$$\mathbf{u}_{ff} = -\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) / \mathbf{B} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{B}$ 是控制输入矩阵中的相关元素,具体取值根据系统的动力学模型确定。

通过引入扰动前馈补偿,系统的动力学方程可以改写为:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{u}_{ff} + \mathbf{u}_{fb}) + \mathbf{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) \\ &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{fb} + (\mathbf{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) - \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)) \end{aligned} \quad (6)$$

因联合扩张状态观测器可以准确地解耦,估计出集合总扰动 $\hat{\mathbf{f}}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)$, 因此 $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t) - \hat{\mathbf{f}}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, t)$ 的值较小,系统会受到反馈控制部分 $\mathbf{u}_{fb}$ 的影响,增加了系统的抗干扰性能^[8]。前馈补偿会把系统扰动项压减小到微小残余量,让控制任务解耦更加准确,可为后续反馈控制提供有利条件,从而组成“观测-解耦估计-前馈补偿-反馈镇定”的协同抗扰组织架构。

4 基于反步滑模的移动焊接机器人轨迹跟踪反馈控制

在经过前馈补偿后,设计反步滑模反馈控制律,建立系统稳定保障和精度校正机制。设置移动焊接机器人误差系统为:

$$\begin{cases} \mathbf{e}_1 = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_{1d} \\ \mathbf{e}_2 = \dot{\mathbf{x}}_1 - \dot{\mathbf{x}}_{1d} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{x}_1$ 为系统实际位置, $\mathbf{x}_{1d}$ 为期望位置。

设计的滑模面表达式为:

$$\mathbf{s} = \mathbf{e}_2 + c_1 \mathbf{e}_1 \quad (8)$$

式中: c_1 是正常数,其取值影响系统的动态性能。

对滑模面求导可得:

$$\dot{\mathbf{s}} = \dot{\mathbf{e}}_2 + c_1 \dot{\mathbf{e}}_1 \quad (9)$$

依据系统动力学模型^[9]和通过扰动前馈补偿后进行控制输入,此时设计的反馈控制律 $\mathbf{u}_{fb}$ 满足 $\dot{\mathbf{s}} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(\mathbf{s}) - k\mathbf{s} (\varepsilon > 0, k > 0)$, 其中 $\operatorname{sgn}(\mathbf{s})$ 为符号函数^[10]。经过对上述方程进行求解,获得反馈控制律 $\mathbf{u}_{fb}$ 的具体表达式。

反步滑模控制是融合反步法的递推设计和滑模控制,具有很强的鲁棒性,能够有效抑制前馈补偿后出现的残余不确定性,保证闭环系统稳定一致。把扰动前馈补偿量 $\mathbf{u}_{ff}$ 和反馈控制律 $\mathbf{u}_{fb}$ 进行融合,组成复合控制器 $\mathbf{u}$, 达到对移动焊接机器人运动自动控制的目的。

5 实验结果与分析

5.1 实验设置

为验证所提基于联合扩张状态观测器的移动焊接机器人运动自动控制方法的有效性,构建实物验证平台。为评估所提方法在克服异质扰动耦合问题上的优势,选取文献[1]基于固定参数模型的视觉反馈控制方法和文献[2]基于集总处理的 PLC 协调控制方法为对比,控制精度误差、相对位姿为验证指标进行对比验证。采用的这两种对比方法分别代表了在应对复合扰动时,因模型僵化或处理方式粗放,导致性能受限的典型传统方案。实验采用的移动焊接机器人实验平台,具体如图 1 所示。



图 1 移动焊接机器人实验平台

如图 1 所示,设置的实验平台主要由全向移动平台、六自由度焊接机器人、激光跟踪仪、实时控制器和焊接电源五大部分组成。起重工,机器人的物理参数如表 1 所示。

表 1 机器人物理参数

参数	数值	单位
移动平台质量	85.5	kg
机械臂有效载荷	5.0	kg
驱动轮半径	0.10	m
平台转动惯量	6.82	kg·m ²
关节传动刚度系数均值	1.2×10^4	N·m/rad

5.2 实验结果分析

为量化评估三种控制方法在轨迹控制精度方面的性能,在构建的移动焊接机器人实验平台上,设计并执行包含复杂 S 型曲线、高速直线段和变曲率圆弧组合的标准综合测试轨迹。此轨迹规划主要是模拟实际焊接作业中常见运动模式,严格对移动平台和末端执行器间维持恒定的相对位姿关系进行约束,并以 0.25 m/s 的恒定合成速度执行,用于排除速度波动对精度评估造成的干扰。轨迹控制精度的核心量化评估结果如表 2 所示。从表 2 数据可以看出,采用本文方法 RMSE 较文献[1]方法和文献[2]方法分别下降了 55.7% 和 74.8%。本文方法存在的优势来源于 JESO 对异质扰动的解耦估计能力:而传统方法因固定参数模型或集总处理而不能分离扰动特性,使得补偿时缺乏针对性;而本文方法能通过解

耦估计前馈补偿能精准抵消低频模型的不确定性,同时反馈控制还能有效抑制高频残余扰动,显著提升跟踪精度。

表 2 轨迹控制精度误差对比

控制方法	绝对位置误差 RMSE /mm	最大位置偏差 /mm
本文方法	0.85	2.08
文献[1]方法	1.92	4.67
文献[2]方法	3.37	8.14

动态协调性是评估移动焊接机器人整体运动性能的重要维度,主要由移动平台和焊接机械臂在复合运动中实际相对位姿和期望相对位姿一致性来表示。图 2 为在相同测试轨迹下,三种控制方法所对应的实际相对位姿轨迹和期望轨迹对比的结果。

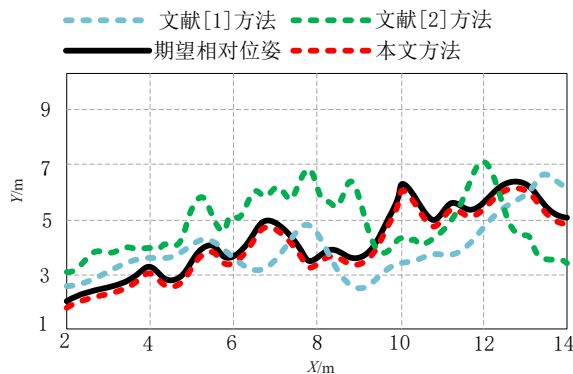


图 2 移动焊接机器人相对位姿对比

从图 2 的对比结果可知,采用本文方法时机械臂实际相对位姿和期望轨迹会高度重合,且动态协调误差极低。相反文献[1]方法在控制时产生了显著的滞后和偏差,文献[2]方法则主要出现了高频抖动和稳态偏移。由此可以看出,基于联合扩张状态观测器的解耦扰动估计,可以通过控制器分别对低频模型不确定性和高频未建模动态设计进行补偿,明显提高系统综合抗扰性能,而传统方法因缺少此补偿能力而出现协调性下降的问题。

6 结语

针对移动焊接机器人在复杂环境下的高精度轨迹跟踪需求,提出一种基于联合扩张状态观测器的运动控制方法。该方法构建了“运动学建模—状态与扰动协同观测—前馈主动补偿—反馈鲁棒镇定”的闭环控制架构,以同时处理低频参数化模型不确定性与高频非参数化扰动耦合问题。运动学模型基于 D-H 参数法建立,为轨迹跟踪提供精确的几何映射与参考指令。联合扩张状态观测器通过并联结构实现对系统状态及异质扰动的协同解耦估计,克服了传统方法带宽有限、难以分离低频参数摄动与高频未建模动态的局限。前馈补偿基于扰动估计主动抵消主要扰动,结合反步滑模反馈控制抑制残余不确定性,确保系统鲁棒稳定性与跟踪精度。实验表

融合 HSL 颜色空间 ViBe 算法安防监控系统 运动目标检测的研究

何文乐¹ 陈光武¹
HE Wenle CHEN Guangwu

摘要

安防监控系统作为安防建设的重点工程,然而传统意义上的安防监控系统,运动目标的检测,仍需要人员固定的监控室实施监控,人防多于技防。这种运动目标的检测模式花费大量的人力资源,存在监控区域死角、监控及时性不足、只能事后调取处理。针对上述问题,文章提出了一种基于 HSL 颜色空间的 ViBe 检测算法,保证了检测算法的精准性和计算速度。

关键词

HSL 颜色空间; ViBe; 监控; 运动目标

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.06.037

0 引言

随着科技的进步,智能安防视频监控系统市场不断崛起,已经开始应用于各个领域当中。智能视频监控系统的智能化主要表现为对视频监控画面中的运动物体进行图像分析及图像分割等处理操作,实现对运动物体的检测,即目标检测。

1. 中山市中等专业学校 广东中山 528400

明,在包含 S 型曲线、直线段与圆弧的复合轨迹测试中,该方法绝对位置跟踪误差较对比方法最高降低 74.8%,实现了移动平台与机械臂的高动态协调,显著提升了复杂扰动下的控制精度与鲁棒性。该研究为移动焊接机器人高精度运动控制提供了有效解决方案,后续工作可围绕控制器在更广泛扰动频谱下的适应性、多机协同控制策略集成及算法嵌入式实时实现等方面展开。

参考文献:

- [1] 罗卢洋,谈剑峰,黄海涛,等.工业机器人焊接平台的精准定位与运动控制研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2024, 59(4):118-121.
- [2] 曹海兰,张媛.基于 PLC 技术的焊接机器人主从协调运动控制系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(7):122-127.
- [3] 吴超群,赵松,雷艇.曲线焊缝的机器人焊接轨迹规划与高频控制[J]. 中国机械工程, 2023, 34(14):1723-1728.
- [4] 朱国栋.焊接机器人控制系统设计与实现[J]. 机械与电子控制工程, 2024, 6(11):193-195.

目前,对运动目标检测常用的方法可以划分为三类:光流场法、背景建模算法及块分割法。其中,基于光流场法的运动目标检测是根据光流的不连续性来对前景目标与监控画面背景进行分割。不同的光流区域对应着不同的运动物体,但光流法也存在自身的局限性,例如当检测目标被遮挡、监控场景光照突变、运动目标运动较快等场合时,光流场法的检测性能就下降;此外,光流场法的计算量也相对较大,系

- [5] 张诚,袁慧铮,应之歌.应用多传感器激光视觉的焊接机器人变质心补偿控制[J]. 激光杂志, 2024, 45(1):236-241.
- [6] 程明权,秋钰洁,江鸣,等.基于 PLC 的机器人自动焊接设备控制系统的设计与研究[J]. 自动化应用, 2024, 65(6):75-77.
- [7] 杨亮亮,方世坛.焊接机器人的摆动焊接轨迹规划策略研究[J]. 机械与电子, 2023, 41(1):39-45.
- [8] 陈彬,方杰,彭伊丽,等.基于约束性能的机器人焊接视觉伺服控制研究[J]. 机床与液压, 2025, 53(15):56-62.
- [9] 何余华,李夫强,周金龙.复杂金属接缝焊接机器人双臂非线性抖动控制方法研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2024(6):69-74.
- [10] 祁鹏.基于虚拟现实的工业机器人焊接轨迹控制仿真研究[J]. 中国新技术新产品, 2025(11):9-11.

【作者简介】

凌付平(1983—),男,江苏泰州人,硕士,高级实验师、高级工程师,研究方向:机械设计制造及其自动化。

(收稿日期:2026-03-09 修回日期:2026-06-03)