

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.059

铁路货车轮对踏面检修机械手路径最优化自动控制方法

范文明¹, 李冰²

(1. 国家能源集团国能铁路装备有限责任公司, 北京 100011;

2. 中车齐齐哈尔车辆有限公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161002)

摘 要:为研究铁路货车轮对踏面检修机械手路径最优化自动控制方法,选择轮轨接触理论划分机械手接触长轴与短轴,按照两点路径规划模式设定运动轨迹,确定机械手初始与终止构形。采用拉格朗日法构建动力学方程,获取与关节变量运行有关的参数,求解机械手关节的动能与势能。通过几何姿态位置关系,代入机械手关节运动全过程,分别将车轮对踏面与机械手放置在两组坐标系中,获取相对应的坐标系位置矢量,以约束条件实现机械手最优路径选择,完成路径的最优化自动控制方法设计。分别对检修机械手的 6 组关节进行控制。实验表明:可快速调节至设计角度,并将最终角度控制在较小误差范围内,便可以实现机械手运动路径的最优化控制。

关键词:铁路货车车轮;检修机械手;轮对踏面检修;路径优化控制方法;工作效率;位置矢量

中图分类号:TP241.2 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)01-0289-06

Path Optimization Automatic Control Method for Railway Freight Car Wheelset Tread Inspection Manipulator

FAN Wenming¹, LI Bing²

(1. CHN Energy China Energy Railway Equipment Co., Ltd., Beijing 100011, China;

2. CRCC Qiqihar Rolling Stock Co., Ltd., Qiqihar 161002, China)

Abstract:To study the path optimization automatic control method of railway freight car wheelset tread repair manipulator, the wheel-rail contact theory was selected to divide the long axis and short axis of the manipulator, and the motion trajectory was set according to the two-point path planning mode to determine the initial and terminal configurations of the manipulator. The Lagrange method was used to construct the dynamic equation, the parameters related to the operation of joint variables were obtained and the kinetic energy and potential energy of the manipulator joint were solved. Through the geometric attitude position relation, the whole process of manipulator joint movement was substituted, the wheel tread and the manipulator were placed in two groups of coordinate system, the corresponding coordinate system position vector was obtained, the optimal path selection of the manipulator was realized by the constraint conditions, and the optimal automatic control method design of the path was completed. The experimental results show that the control of the six groups of joints of the maintenance manipulator can be quickly adjusted to the design Angle under the application, and the final angle can be controlled within a small error range, which can realize the optimal control of the manipulator's motion path.

Keywords:railroad wagon wheels; maintenance manipulator; maintenance of tread; path optimization control method; work efficiency; position vector

0 引言

铁路货车在制动过程中会存在不当操作,容易引起轮轨之间的滑动从而造成车轮踏面擦伤,而且由于车轮的自身质量较大,通过人工检修会产生较大的成本。随着信息化技术和人工智能技术的发展,移动机械手装置被应用在各个行业之中,其中铁路行业已将机械手作为检修工作的重要工具,但因其移动过程中容易产生误差,需要设

计一个精准的控制方法。唐翠微^[1]设计了基于混合神经网络的机械手移动轨迹自动控制方法,解决了机械手轨迹控制不连续的问题,能够最大限度地控制移动偏差。该方法通过分析机械手各关节的运动特征,以混合神经网络构建控制模型,并结合二次函数对模型进行激活,确定不同层级之间的控制权重,实现轨迹指令的实时修正。沈孝龙等^[2]基于改进差分进化算法设计了机械手轨迹控制方法,主要针对机械手系统运行的稳定性和

第一作者简介:范文明(1972—),男,河北卢龙人,高级工程师,学士,研究方向为铁路货车检修,toulao8728582@163.com。

关节角跟踪精度进行分析,在假定参考轨迹为摆线的基础上,设定机械手运行的最低能量为适应度函数,建立混沌映射改进差分重建规则,以实现对不同角度的求解。该方法通过离散函数进行插值计算,在多个轨迹中选择出最优的运行轨迹,具有较强鲁棒性,可以实现机械手轨迹的优化控制。但这两种方法均未考虑关节变量动能与势能,机械手仍不具有自主路径规划能力,无法根据实际检修要求生成最优路径,机械手关节调节时间与误差均较高。

针对上述问题,提出铁路货车轮对踏面检修机械手路径最优化自动控制方法。利用动力学方程求解机械手关节变量动能与势能,通过不同机械手质心点变化位置,调整机械手的几何姿态位置,为机械手规划出一条最优的运动路径。

1 机械手路径最优化自动控制方法设计

1.1 机械手应用场景规划

由于铁路货车轮对踏面的几何形状为圆弧环状,由轮辋支承于铁路钢轨上,通过轴箱承载车厢、车载物重力和动力等传递至车轮,因此如果踏面横向角度、纵向角度过大,会在车轮旋转时产生横向的冲击或不稳定运动或导致轮对产生较大的垂向力。若轮缘高度和轮缘半径过小,则导致铁路货车在运行时容易受到振动,增大轮对所承受的摩擦力,使铁路货车车轮在制动过程中容易产生踏面擦伤。为了对其进行精准检修,需要通过机械手进行操作。在此过程中,机械手基本工作流程如下。

1) 当铁路货车需要进行轮对踏面检修时,货车会进入专门的检修线路。在进入检修线路后,机械手会使用喷水枪或其他清洗设备,对轮对踏面上的污垢和油渍进行自动清洗。清洗完成后,利用机械手将清洗设备移开。

2) 由机械手搭载传感器,抓取传送带上完成清洗的待检测轮对,并对轮对踏面进行整体扫描。扫描完毕后,利用机械手将货车轮对固定在检修设备上,并使用检修设备对准轮对的踏面进行缺陷检测。

3) 通过控制机械手的关节运动,使传感器的测头移动到需要检测的位置,然后对检测数据进行采集和处理,判断踏面是否存在磨损、裂纹等缺陷。

4) 根据检测结果,机械手需要搭载磨削工具,对轮对踏面进行磨削操作。如果存在磨损或小裂

纹等问题,可以采用磨削、打磨、抛光等方法进行修复;如果存在严重的裂纹或缺陷,则需要更换轮对。

5) 经过检修后的货车轮对会重新进入运营线路,继续执行运输任务。

针对上述机械手基本工作流程,需要结合机械手动、势能参数以及机械手关节质心点变化位置(即轨迹节点运动位置),对机械手相关工作要求进行相应的分析,以此做出定量约束条件如下。

a) 在轮对踏面故障检修的过程中,机械手通过末端的夹爪或其他固定装置,以整周转动的方式从传送带上抓取待检测的轮对。考虑到铁路货车轮对的质量一般在1 t左右,而机械手关节需要保持一定灵活度才能正常运作,因此机械手的最大承重能力需要能够满足轮对的质量要求。同时考虑到操作的安全性,机械手的最大承重能力应该略大于轮对的质量。机械手的最大承重能力应该在500 kg以上,以便抓取和搬运较重的轮对。

b) 在机械手上搭载传感器,控制传感器测头进行扫描检测的过程中,首先会通过激光测距或摄像头规划轮对的移动位置,以对轮对进行精确定位。在此过程中,通过精确控制机械手伺服电机的转动,使机械手可以控制检测头沿着轮对的长轴方向移动,以确保检测头能够覆盖整个轮对表面,并且根据需要进行半径方向和横向移动。

c) 完成检测头运动控制后,机械手会通过弯曲、转动等运动方式,根据设定的标准对轮对踏面的不同部位进行检测,并将检测结果传输到计算机系统中进行记录和分类判定。根据铁路行业标准中的规定,铁路货车轮对踏面检修时需要轮对表面进行高精度的检测。其中,轮对踏面磨损量的测量精度要求为 ± 0.2 mm;轮缘高度的测量精度要求为 ± 0.3 mm;轮缘厚度的测量精度要求为 ± 0.5 mm。因此,为了使机械手在进行检测时满足这些精度要求并能准确规划监测位置,需将检测精度误差控制在0.5 mm以内,重复定位精度控制在0.1 mm以内。

d) 故障修复的过程中,机械手需要按照预设的轮对磨削路径进行移动,以确保轮对表面能够得到均匀的磨削。为避免因机械手运动方向不稳定而导致的磨削不均,保证表面粗糙度 Ra 不大于 $3.2\text{ }\mu\text{m}$,需要根据预设路径实时地调整机械手的运动轨迹,因此将轮对磨削路径精度控制在0.5 mm内。

机械手基本工作流程如图1所示。



图1 机械手工作流程示意图

1.2 应用轮轨接触理论构建机械移动路径控制构形

设机械手接触长轴几何长度为 Q , 接触短轴几何长度为 $I^{[3]}$, 机械手与轨顶接触长度为 T , 机械手与车轮接触长度为 U , 车轮与轨道之间的夹角即轮轨角为 β , 机械手关节初始阶段构形值集合为 F_h^0 , 机械手关节终止阶段构形值集合为 F_h^H 。构建机械手几何模型表达式为

$$C = Q + I + \left(\frac{1}{T}\right)^{\cos\beta} + \left(\frac{1}{U}\right)^{\cos\beta} + |F_h^0 F_h^H| \cdot 6 \frac{\sqrt{T'_{\text{sum}} + U'_{\text{sum}}}}{e} \quad (1)$$

式中: C 为机械手几何模型; T'_{sum} 为机械手与轨顶接触长度补偿参量, 且 $I < T'_{\text{sum}} < Q$; U'_{sum} 为机械手与车轮接触长度补偿参量, 且 $I < U'_{\text{sum}} < Q + 1$; e 表示关节动能计算参量。

假定车轮与钢轨的尺寸为标准参数, 根据长半轴几何长度与短半轴几何长度的力学特征进行计算:

$$Q = F \left[\frac{2.72 M_t}{2E(T+U)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

$$I = \frac{1}{W} \times Q \quad (3)$$

式中: W 为机械手受力节点的抗压强度, MPa; F 为机械手的分子间力, MPa; M_t 为机械手承受的总质量, kg; E 为车轮弹性模量, MPa。

当明确机械手长、短轴的几何长度后, 通过分析车轮、钢轨的尺寸参数, 计算机械手与不同参照主体的接触长度:

$$T = B \left(\frac{1}{2A} \right)^K \quad (4)$$

$$U = B \left(\frac{1}{2S} \right)^K \quad (5)$$

式中: A 为轨顶半径; S 为车轮半径; B 为轮对所承受的垂直载荷; K 为机械手接触轮对的表面积。根据上述轮对计算参数, 结合机械手的长、短轴力学特征可以获取 $\cos\beta$, 表示为

$$\cos\beta = \frac{B}{IF} + \frac{K}{S|W|} \quad (6)$$

式中: 机械手在接触轮对时会受到一定的压力作用, 为确保机械手与轮对之间的紧密接触, 分析当 β 不同时, F 与 W 的大小^[4], 具体取值如表1所示。

表1 对应参数表

$\beta/(\circ)$	F/MPa	W/MPa
10	1.82	0.24
20	1.74	0.36
30	1.64	0.42
40	1.42	0.58
50	1.35	0.61
60	1.21	0.72
70	1.18	0.85
80	1.06	0.92
90	1.00	1.00

如表1中所示, 以不同的接触角度获取对应参数, 将其放置在直角坐标系中, 则检修机械手的运动轨迹为 $P(X, Y, Z)^{[5]}$ 。此次选择的检修机械手共计含有6个关节, 按照两点规划方案进行路径构形, 不同阶段的构形集合如下:

$$F_h^0 = (X_h^0, Y_h^0, \beta_h^0, \beta_h^0, \beta_h^0, \beta_h^0) \quad (7)$$

$$F_h^H = (X_h^H, Y_h^H, \beta_h^H, \beta_h^H, \beta_h^H, \beta_h^H) \quad (8)$$

式中: $(X_h^0, Y_h^0, \beta_h^0, \beta_h^0, \beta_h^0, \beta_h^0)$ 为初始阶段构形机械手关节构形值子集; $(X_h^H, Y_h^H, \beta_h^H, \beta_h^H, \beta_h^H, \beta_h^H)$ 为终止阶段机械手关节构形值子集; H 为终止位置^[6]; h 表示机械手关节, 取值范围为 $h = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。而机械手的运动轨迹控制, 实质上就是机械手的运动学求解过程, 因此需要构建动力学方程, 对其关节的动能和势能进行计算。

1.3 动力学方程求解机械手关节变量动能与势能

采用拉格朗日法构建动力学方程, 为机械手规

划出一条最优的运动路径,反复计算机械手运动的动能、势能参数,分析与两个参数有关的变量因素。通过拉格朗日函数将机械手间的能量关系定义为

$$s = d - f \quad (9)$$

式中: s 为拉格朗日函数; d 为总动能; f 为总势能。根据上式可知,拉格朗日函数能够描述机械手动能与势能之间的差值^[7]。则机械手的拉格朗日动力学方程表示为

$$g_h = \frac{1}{j} \times \frac{s}{l'_h} - \frac{s}{l_h} \quad (10)$$

式中: g_h 为机械手关节的最大转矩; l_h 为机械手关

节的动力变化参量^[8]; l'_h 为机械手关节动力变化参量一阶导数; j 为机械手的转动特征值。

通过拉格朗日法构建机械手的动力学方程,需要对其动能、势能求解,其中动能计算方式如下:

$$d_h = \frac{1}{2} \text{trace} \left(\sum_{h=1}^{l=2} \sum_{h=1}^{l=2} \frac{j}{l_h} \mathbf{v}_h | l'_h | \right) \quad (11)$$

式中: d_h 为机械手关节的动能^[9]; $\mathbf{v}_h$ 为关节动力学伪惯量矩阵。根据不同机械手质心点变化位置对伪惯量矩阵求解:

$$\mathbf{v}_h = \begin{bmatrix} \frac{-v_{hXX} + v_{hYY} + v_{hZZ}}{2} & v_{hXY} & v_{hXZ} & n_h \bar{X}_h \\ v_{hXY} & \frac{v_{hXX} - v_{hYY} + v_{hZZ}}{2} & v_{hYZ} & n_h \bar{Y}_h \\ v_{hXZ} & v_{hYZ} & \frac{v_{hXX} + v_{hYY} - v_{hZZ}}{2} & n_h \bar{Z}_h \\ n_h \bar{X}_h & n_h \bar{Y}_h & n_h \bar{Z}_h & n_h \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中 $[\bar{X}_h \ \bar{Y}_h \ \bar{Z}_h]$ 为三维空间内机械手质心坐标。势能计算方式为

$$f_h = - \int m^\alpha s n_h \quad (13)$$

式中: n_h 为 h 的总质量^[10]; f_h 为 h 的总势能^[11]; m 为惯性变化参量; α 为动力特征转换系数。获取关节变量的动能与势能,以此采用几何姿态位置理论控制其运动路径。

1.4 几何姿态位置关系自动控制机械手最优路径

为了使机械手具有自主路径规划能力,可以根据检修要求生成最优路径,并且将机械手的最大运动速度控制在1m/s以上,以保证检修效率和质量。根据检修机械手各关节的自身限制条件以及运动关系,运用几何推导方式对其运动路径进行控制,设置机械手中心点为三维空间中的一点,表示为 q ,其在直角坐标系 $\{w\}$ 中的投影为

$${}^w \mathbf{q} = q_X e + q_Y e + q_Z e \quad (14)$$

式中: q_X 、 q_Y 、 q_Z 为 q 点在坐标系 $\{w\}$ 中的3个坐标分量^[12]。 ${}^w \mathbf{q}$ 为 q 的坐标变化矢量。为研究机械手的具体运动轨迹,需要描述物体的方位,通过固接于此物体的坐标系来描述:

$${}^w \mathbf{q} \begin{cases} {}^w t = [{}^w t_X \quad {}^w t_Y \quad {}^w t_Z] \\ {}^w u = [{}^w u_X \quad {}^w u_Y \quad {}^w u_Z] \\ {}^w i = [{}^w i_X \quad {}^w i_Y \quad {}^w i_Z] \end{cases} \quad (15)$$

式中 ${}^w t$ 、 ${}^w u$ 、 ${}^w i$ 为不同运动轨迹节点在 $\{w\}$ 中的3个坐标分量^[13],将其用矩阵表示为

$${}^w \mathbf{p} = \begin{bmatrix} {}^w t_X & {}^w u_X & {}^w i_X \\ {}^w t_Y & {}^w u_Y & {}^w i_Y \\ {}^w t_Z & {}^w u_Z & {}^w i_Z \end{bmatrix} = [{}^w t \quad {}^w u \quad {}^w i] \quad (16)$$

式中 ${}^w \mathbf{p}$ 为机械手运动轨迹矩阵,表示坐标系 $\{r\}$ 相对于参考坐标系 $\{w\}$ 的方位。在矩阵 ${}^w \mathbf{p}$ 中含有9个条件,但只有3个为独立条件,其余为约束条件,将其作为路径的控制条件如下:

$$\|t\| = \|u\| = \|i\| = 1 \quad (17)$$

$$t \times u = i \quad (18)$$

根据设定的约束条件,可通过坐标系 $\{r\}$ 的原点对应其在 $\{w\}$ 的位置矢量,以此描述机械手中心点在空间中的位置和运动姿态^[14]。至此,本文通过构建控制模型和动力学方程求解机械手的运行特性,利用空间几何位置关系跟踪控制机械手路径选择,实现最优化自动控制方法设计。

2 实验测试分析

2.1 测试准备

铁路货车轮对踏面检修机械手的路径选择较为重要,上文中设计一个新的自动控制方法,为验证该方法能够实现路径的最优控制,采用对比测试方式进行论证。采用基于混合神经网络

的控制方法和基于改进差分进化算法的控制方法作为对照组,分别与本文方法进行对比,验证不同控制方法的有效性。机械手各关节示意图如图2所示。

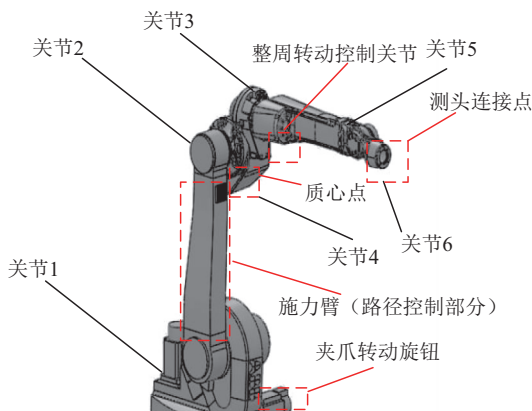


图2 机械手各关节示意图

为保证测试的真实性,采用较多的检修机械手作为测试对象,对其不同关节的运动角度进行设定,具体情况如表2所示。

表2 机械手各个关节角度变化范围

关节	角度变化/(°)
第1关节	(0,0.48)
第2关节	(0,-0.45)
第3关节	(0,0.28)
第4关节	(0,-0.23)
第5关节	(0,0.32)
第6关节	(0,-0.34)

如表2所示,此次选择的机械手共含有6组关节,且每个关节的运动角度各不相同,为尽可能地减少检修时间,需要对其进行路径优化,以最快的速度调节到各个关节所需的角度,并需要保证角度的精准度,防止后续的调整。将上述设定情况传入Matlab测试平台,采用选择的3种方法进行路径控制,验证不同方法的调节时间以及控制误差。

2.2 不同方法的调节时间对比及分析

分别对3种方法进行测试,以调节时间作为测试指标,将各个关节的设计角度作为理想值进行自动跟踪控制。连接3种控制方法至Matlab测试平台获取控制结果,具体结果如图3所示(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者)。

如图3所示,本文方法在1.02 s跟踪到理想

值,两种传统方法的调节时间分别为9.82 s和12.45 s,分别比本文方法多了8.8 s和11.43 s,说明本文方法具有较快的调节速度,可以快速地作出调节响应,提高检修效率。

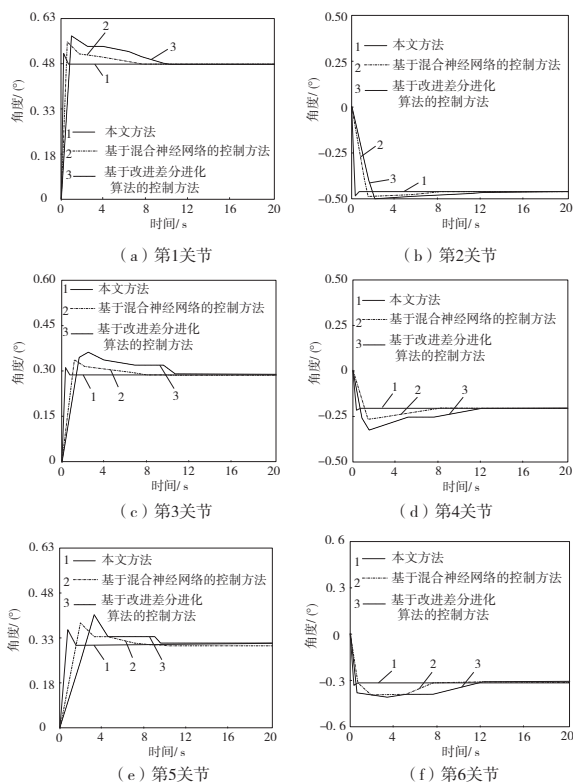


图3 不同方法应用下调节时间对比结果

2.3 不同方法的控制误差对比及分析

上一阶段验证了本文方法的调节效率,能够在较短时间内保证机械手的各关节处于设计角度,在此基础上验证3种方法的控制精度。以5次为测试条件进行关节角度控制,具体结果如图4所示。

图4中,在本文方法下每一次控制均能保持较小误差,基本上在 0.015° 以内,而两种传统的控制误差分别为 0.12° 和 0.08° ,说明本文方法更加有效,可以实现机械手各个关节的自动控制,保证其处于最佳的运动路径,具有应用价值。

3 结语

本文对铁路货车轮对踏面检修机械手的运动特性进行了详细分析,针对其路径控制这一难点设计了新的方法,且通过测试论证了新方法的有效性,相比传统方法更具有优势,可以实现精准控制。但由于研究时间有限,在整个设计过程中尚存在一些不足之处,仅选择了多发的故障进行检查,存在一定局限性。后续设计中会选择更多的

研究方向,提出更加全面的控制方法,为铁路货车的检修提供更具体的技术支持。

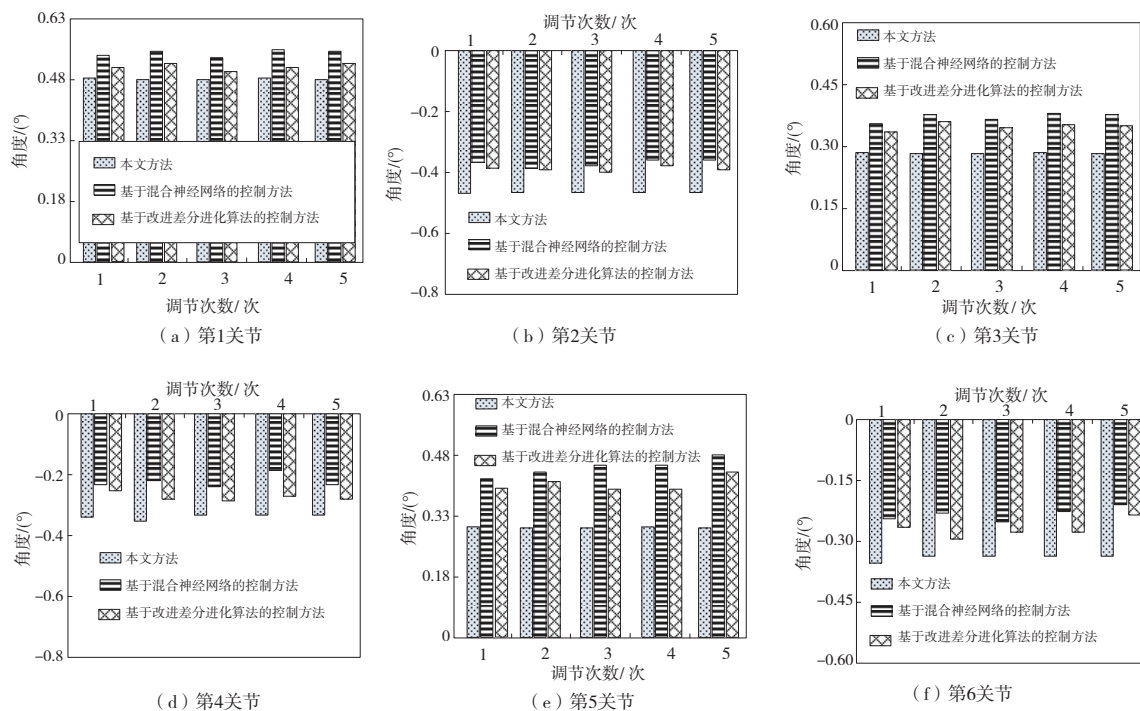


图4 不同方法应用下控制误差对比结果

参考文献:

- [1] 唐翠微. 一种基于混合神经网络的机械手移动轨迹自动控制技术研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(22): 86-90.
- [2] 沈孝龙, 王吉芳, 秦宇飞, 等. 基于改进差分进化算法的机械手轨迹控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(5): 105-108, 112.
- [3] 黄金凤, 张建喜, 于江涛, 等. 并联式选研机器人路径规划研究[J]. 工矿自动化, 2022, 48(8): 26-32, 42.
- [4] 董昊亮, 文永蓬, 王向阳, 等. 多种接触状态下地铁车辆蛇行运动的稳定性演化[J]. 振动与冲击, 2022, 41(18): 94-103.
- [5] 何静, 侯娜, 张昌凡, 等. 基于金字塔拆分注意力的列车轮对踏面损伤诊断[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(5): 35-40.
- [6] 干锋, 戴焕云, 罗光兵, 等. 高速动车组柔性转向架蛇行运动频谱分析[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(1): 155-167.
- [7] 张昌凡, 徐逸夫, 何静, 等. 基于残差注意力的YOLO-v5列车轮对踏面缺陷快速检测[J]. 机车电传动, 2022(6): 1-9.
- [8] 唐琴. 机械手最优夹持角度动态联合自动化控制方法[J]. 机械设计与制造, 2021(11): 266-269.
- [9] 赵天闻, 薛亚红, 包倩倩. 基于ADAMS的大型重载车辆车轮装配机械手运动学及动力学仿真分析[J]. 机械设计, 2021, 38(增刊1): 27-31.
- [10] 王相平, 丁旺才, 田毅, 等. 考虑车轮扁疤的轮轨磨损演化及其对车线桥系统的影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(5): 1289-1297.
- [11] 朱向楠, 韦源源. 基于位置姿势控制的并联机械手运动误差仿真分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(3): 49-52, 56.
- [12] 王宁, 王宁, 鲁挺, 等. 水下机器人-机械手系统末端执行器固定时间轨迹跟踪控制[J]. 大连海事大学学报, 2021, 47(2): 11-19.
- [13] 庄仁诚, 陈鹏, 傅瑶, 等. 列车车轮三维结构光检测中的点云处理研究[J]. 中国测试, 2021, 47(2): 19-25.
- [14] 司国斌, 王春霞. 农业采摘机械手路径规划: 基于云平台 and Q 学习算法[J]. 农机化研究, 2021, 43(10): 23-27.

收稿日期: 2023-04-04