

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312312

# 自动装配的导纳控制系统中关键影响机制研究\*

郝正阳<sup>1</sup>, 张帆<sup>2</sup>, 张帆扬<sup>1</sup>

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院 上海 201620; 2. 上海工程技术大学机器人智能控制实验室 上海 201620)

**摘要:**在工业自动装配中,机械卡阻现象经常导致零件接触力增大,进而导致装配失败。本文以汽车装配中车门销与车身孔的装配任务为背景,运用导纳控制方法解决柔顺性难题。受导纳参数(弹性、阻尼和质量)的影响,控制系统可能在稳态误差、超调量和响应速度等方面出现不同程度的波动。为消除稳态误差的影响,本文采用基于倍率调节的积分优化方法成功消除稳态误差。面对超调量和响应速度不平衡的问题,本文提出一种基于罚函数的自动调参算法。通过设置惩罚项,在求解过程中逐渐满足约束条件。实验结果表明:接触力的震荡波动从0.1 N减小至0.05 N,当外界阻抗消失时,缩短50%的回落调整时间。该方法成功避免震荡引起的零件损坏,能够提高自动装配时的柔顺性能。

**关键词:**柔顺装配;导纳控制;倍率调节;积分优化;罚函数

**中图分类号:** TH39 TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Research on key influencing mechanisms in admittance control systems for automated assembly

Hao Zhengyang<sup>1</sup>, Zhang Fan<sup>2</sup>, Zhang Fanyang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Robotics and Intelligent Control Laboratory, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** In industrial automated assembling, the phenomenon of mechanical jamming often leads to an increase in contact force between parts, resulting in assembly failures. This article focuses on the assembly task of the door pin and body orifice in automotive assembling, using the admittance control method to address the issue of compliance. Influenced by admittance parameters (elasticity, damping, and mass), the control system may exhibit varying degrees of fluctuations in steady-state error, overshoot, and response speed. To eliminate the impact of steady-state error, this article successfully addresses it using an integral optimization method based on gain scheduling. In response to the issues of overshoot and imbalanced response speed, a penalty function-based automatic tuning algorithm is proposed. By setting penalty terms, the constraints are gradually satisfied during the solution process. Experimental results show a reduction in oscillatory fluctuations of contact force from 0.1 N to 0.05 N, and a 50% reduction in settling time when external impedance disappears. This method successfully avoids part damage caused by oscillations and enhances compliance performance during automated assembling.

**Keywords:** flexible assembly; admittance control; gain scheduling; integral optimization; penalty function

## 0 引言

目前自动化装配任务需要机械臂辅助完成,以汽车车门与车身的装配为例<sup>[1]</sup>,其中紧密配合时出现的卡阻问题是整个装配过程的难点。

传统的人工作业具备较高的灵活性和适应性<sup>[2]</sup>,更新为自动化模式后,往往因为机械视觉遮挡引起定位失准出现卡阻现象。情况轻微时会导致自动装配失败,严重时会对机械门和车身,甚至会对机械设备造成损伤。为了解决这一问题,研究者们效仿人工的优势提出柔顺装配的思想。

收稿日期:2023-12-25 Received Date: 2023-12-25

\* 基金项目:上海市科委生物医药领域科技支撑计划(17441901200)项目资助

为了解决装配时的柔顺性问题,柔顺控制分为被动柔顺和主动柔顺。最早的被动柔顺是加入弹簧阻尼等调整机构,使其获得被动顺从环境变化的能力。由 MIT Draper 实验室设计的远中心柔顺机构 (remote center compliance, RCC) 是目前已知最早的被动柔顺装置<sup>[3]</sup>,通过调整弹簧刚度来改变柔顺程度。后续的研究学者也做过很多改进,有增加传感器、采用电驱或气动等方式,如 ARCC<sup>[4]</sup>,但被动调整始终存在装配精度模糊的固有缺点。为了解决被动柔顺存在的固有问题,专家们开始转入到主动柔顺控制的研究当中。目前主动柔顺主要有直接力控制<sup>[5]</sup>、力位混合控制<sup>[6]</sup>和阻抗导纳控制<sup>[7]</sup>等。

阻抗与导纳的控制方式可以适应未知的控制环境,更适用于车门的装配场景。首先由 Hogan<sup>[8]</sup>提出了目前广泛应用的阻抗控制基本原理,使得装配可以沿着接触力减小的方向进行,从而降低摩擦损耗。在实际操作过程中,Zhang 等<sup>[9]</sup>将阻抗控制应用于轴孔装配任务,分析卡阻状态与底层力控制器间的关系,通过实验验证阻抗控制器能有效避免卡阻现象。Bartz<sup>[10]</sup>在研究非弹性碰撞的重力效应时,采用质量-弹簧-阻尼模型成功验证加入重力效应的重要性,同时为其他刚性接触的控制问题提供良好的理论基础。随着主动柔顺的深入研究,Zhao 等<sup>[11]</sup>提出一种用于六足机器人腿的自适应主动顺从控制器,基于传感器的基础上应用导纳控制实现力控制,使机器人具有适应行走中接触环境的可变形状和刚度的能力。Hou 等<sup>[12]</sup>提出一种基于学习的进化优化算法用于优化选择底层控制器的参数,该优化方法不需要装配环境的先验信息,但需要通过一定量的实际装配实验数据来支撑。

已有研究发现增加外部控制器不仅依赖机械臂动力学模型,还依赖于大量机械臂在不同接触力下进行柔顺作业的数据预测算法。虽然理论上具有较高的控制精度和鲁棒性,但仍然面临以下挑战。

- 1) 对于不同作业环境和任务类型,需要充分的训练数据以确保模型的适用性。
- 2) 由于涉及到大量数据的学习和匹配,需要强大的计算资源和算法支持。
- 3) 目前该方法仍在不断发展和改进中,尚难以广泛应用于实际的作业任务中。

为实现更优异的柔顺性能,必须找到最佳的阻抗或导纳控制参数<sup>[13]</sup>。本文提出一种基于倍率调节的积分优化的方法有效消除装配时的稳态误差。设计基于罚函数的自动调参算法<sup>[14-15]</sup>,改善弹性系数对系统的超调量和响应速度的影响。通过理论仿真分析与实验验证,证明采用罚函数的自动调参方法能够快速找到最优弹性参数,使得整个系统在提高柔顺性能的同时具有更加平衡的控制效果。

## 1 柔顺控制的导纳模型

在汽车的车门与车身自动化装配时,由于二者的销孔连接位置比较隐蔽,容易出现视觉遮挡,从而无法使用视觉定位。因此机械臂实施自动装配时经常出现卡阻现象,如图 1 所示。

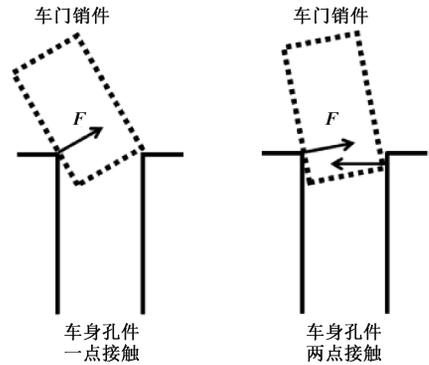


图 1 卡阻现象

Fig. 1 The phenomenon of mechanical jamming

在一点接触时,如果接触力过大,孔边缘容易给销轴一个较大的侧力,从而损伤轴件;在两点接触时,轴件边缘与孔身接触,在较大的装配力作用下容易划伤孔面。

鉴于人工装配拥有天然的柔顺性优势,若机械臂能够模仿人类操作,就能实现柔顺装配。对于本文中车门与车身的未知控制环境,柔顺控制中的阻抗导纳控制可以根据实际情况完成力和位置的相互转化,对环境有较强的适应性。其中基于动力学的阻抗控制虽然具有更加精确的控制模型,但在实际应用中的动力学模型非常复杂,对于设计具体控制器十分不利,故本文采用基于位置的导纳控制模型。

导纳控制是一种通过引入物理元件于控制系统中,以影响系统的动态特性的控制方法。常见的物理元件包括提供缓冲的弹簧元件、减轻震荡的阻尼元件,以及具有一定质量的工件等。在导纳控制系统中,可采用不同的参数来模拟物理元件的特性,并通过调整这些参数改善系统的动态响应,其简化模型如图 2 所示。

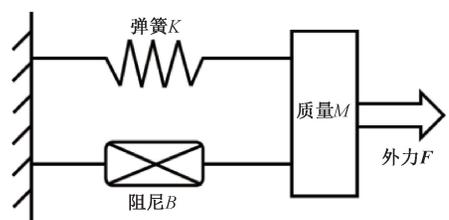


图 2 质量-弹簧-阻尼系统

Fig. 2 Mass-spring-damping system

根据图2所示模型,规定向右为正方向,分析系统的受力情况建立力学平衡方程。

$$F = Mx'' \tag{1}$$

根据弹簧的弹力与弹簧的形变成正比:

$$F_k = Kx \tag{2}$$

根据阻尼力与移动速度成正比:

$$F_B = Bx' \tag{3}$$

式中: $M$ 为工件的惯性系数,单位为kg; $K$ 为缓冲弹簧件的弹性系数,单位为N/m; $B$ 为减震器的阻尼系数,单位为Ns/m; $x$ 为装配时轴件的单次位移,单位为m; $x'$ 为移动速度,单位为m/s; $x''$ 为移动加速度,单位为m/s<sup>2</sup>。

根据力学平衡方程可得:

$$F - Kx - Bx' = Mx'' \tag{4}$$

由于控制系统要根据实际情况不断迭代跟新,故导纳控制是研究目标位置与实际位置之间的位置偏差、速度偏差和加速度偏差与所受外力的关系,具体表达式为:

$$M\Delta x'' + B\Delta x' + K\Delta x = F \tag{5}$$

式中: $\Delta x$ 、 $\Delta x'$ 、 $\Delta x''$ 分别为位置偏差、速度偏差和加速度偏差。

导纳控制是基于位置的控制模式,作用力为系统的输入,实际位置作为系统的输出,即系统根据反馈的误差来修正下一步的输入信号。通常情况下需要将动态方程做一定变换便于系统实现,本文对动态方程做如下拉普拉斯变换:

$$F(s) - KX(s) - BsX(s) = Ms^2X(s) \tag{6}$$

$$X(s) = F(s) \frac{1}{Ms^2 + Bs + K} \tag{7}$$

根据式(7)可以设计导纳控制模型。为简化模型以研究参数对系统的影响,省略机器人动力学与环境的交互阶段,同时将机械臂的研究对象设定为一个关节,将空间关节角度值简化为平面位移值,如图3所示。

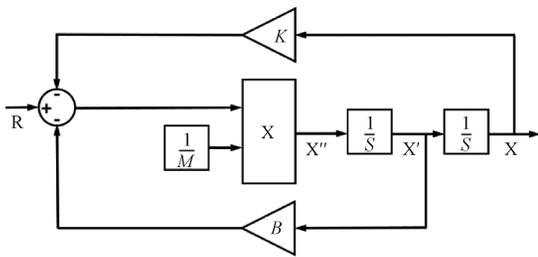


图3 导纳控制模型

Fig.3 Model of admittance control

在图3中,工件的目标位置为R,实际位置为X。采用导纳控制时需要计算位置偏差,将实时结果转化为机械臂需要输入的关节力矩;之后通过动力学引导机械臂

执行任务,通过力传感器反馈力矩信息并计算当前实际位置,从而实现控制闭环。因此,需要设计控制器来实现位置偏差信号到输入关节力矩的转换。

## 2 建立导纳系统的理论控制模型

### 2.1 基于倍率调节的控制方法

在实际装配过程中,当实际位置与目标位置的偏差较大时,对应机械臂调整的输出力矩也相应增大。故在计算位置误差与输入力矩之间的关系时,最直观的方式是引入倍率系数T。控制框图如图4所示。其中,R为位置参考值,X为位置输出值,T为倍率系数,则倍率调节表达式为:

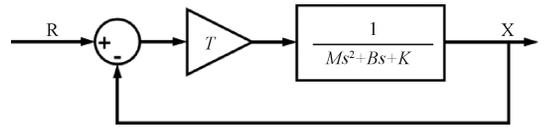


图4 倍率调节控制

Fig.4 Control strategy of gain scheduling

$$T\left(\frac{R}{s} - X(s)\right) \frac{1}{Ms^2 + Bs + K} = X(s) \tag{8}$$

$$X(s) = \frac{T \frac{R}{s}}{Ms^2 + Bs + K + T} \tag{9}$$

对于系统的稳定性根据劳斯判据可得: $M > 0$ ,  $B > 0$ ,  $K+T > 0$ ; 即  $T > -K$ 。系统的稳态值可由终值定理得(FVT):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} X(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sX(s) = \frac{T\Delta R}{K + T} \tag{10}$$

由于轴件的目标位置设定为R,故目标位置与最终位置的差值,即工件的稳态误差 $\Delta x$ 为:

$$\Delta x = R - \frac{T \cdot R}{K + T} = \frac{K}{K + T} R \tag{11}$$

分析稳态误差的表达式(11)可知,在导纳控制中仅使用倍率调节时,稳态误差会随着倍率系数T的增大而减小。若想消除稳态误差,倍率系数T需趋于无穷。为突出系统的过程曲线,故设定轴件初始位置为0,目标位置为5(此数值只代表待追踪的目标值,并无具体单位限制,仿真结果与其大小无关),设定倍率系数T分别为1, 2, 5, 10, 100, -1, 其不同系数对应的输出结果如图5所示。机械臂对应的输入力值如图6所示。

分析式(10)~(11)和图5、6可得,随着倍率系数越大,系统响应越快且稳态误差越小。但在实际物理情况中,输入力需在合理的范围内。如果选择稳态误差更小的倍率系数(如T=100),则输入力需要高达500N,不符

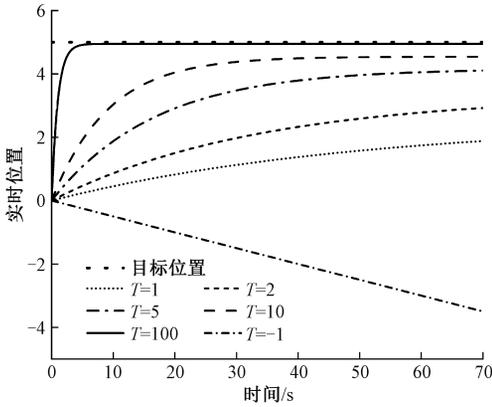


图 5 不同倍率系数对应的输出位置

Fig. 5 Output positions corresponding to different gain factors

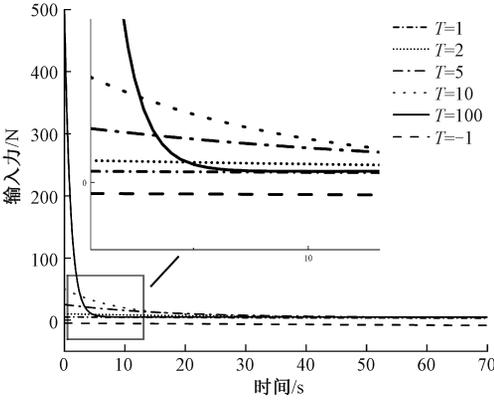


图 6 不同倍率系数对应的输入力

Fig. 6 Input force corresponding to different gain factors

合实际情况。因此,仅靠倍率调节无法满足导纳控制的实际情况,需要增加新的控制环节。

2.2 消除稳态误差的积分优化方法

为避免机械臂输入力过大的情况出现,同时又能消除系统的稳态误差,根据式(11)中稳态误差的表达式可知,需设计新的控制器为  $H(s)$  替代倍率调节,结合式(9)得其表达式如下所示:

$$X(s) = \frac{H(s) \cdot R}{Ms^2 + Bs + K + H(s)} \tag{12}$$

为了消除导纳控制的稳态误差,首先要计算新控制器  $H(s)$  状态下的最终稳态值,再通过误差比较得到具体控制表达式。由式(12)并根据劳斯判据和终值定理 (final value theorem, FVT) 可得:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} X(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sX(s) = \frac{H(s) \cdot R}{K + H(s)} = R \cdot \lim_{s \rightarrow 0} \frac{K}{K + H(s)} \tag{13}$$

根据式(13)的稳态结果,若想最终的稳态误差为 0,则需要新控制器  $H(s)$  的最终值趋于无穷,因此需要将  $H(s)$  设计为积分形式,即  $I/s$ ,其中  $I$  为积分系数,其表达式如下所示:

$$\lim_{s \rightarrow 0} H(s) = \infty \tag{14}$$

$$X(s) = \frac{\frac{I}{s} \cdot R}{Ms^2 + Bs + K + \frac{I}{s}} \tag{15}$$

根据式(15)计算加入新控制器  $H(s)$  后的终值为:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} X(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sX(s) = s \cdot \frac{\frac{I}{s} \cdot R}{Ms^2 + Bs + K + \frac{I}{s}} = \frac{I \cdot R}{Ms^3 + Bs^2 + Ks + I} = \frac{I \cdot R}{I} = R \tag{16}$$

由式(16)可得:将  $H(s)$  设计为积分形式后,装配时工件的最终位置将与目标位置重合,从而消除稳态误差,理论上能够减小装配误差。为进一步证明理论的可行性与有效性,本文设定积分系数  $I$  分别为 1, 2, 5, 10, 对积分控制做不同参数的对比仿真,从而验证加入积分环节后的终值和稳态误差,其实际输出结果如图 7 所示。

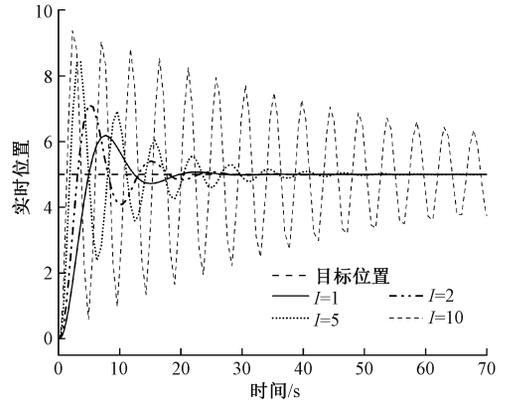


图 7 不同积分参数的系统响应

Fig. 7 System response with different integration parameters

从图 7 中可以看出,积分环节会对导纳控制带来震荡,装配时机械臂也会随之波动,但最终会稳定在目标位置上。当积分系数较小时,设备到达目标位置越快,但机械臂响应速度较慢;当积分系数较大时,虽然提高响应速度,但会增加到达目标位置的时间。

基于 2.1 和 2.2 节综合分析倍率调节与积分控制,它们各自拥有响应迅速和快速稳态的不同优点,因此考虑结合二者优点实施联合控制装配,如图 8 所示。

为了研究不同的组合系数对装配系统的影响,根据图 8 做了如下仿真验证,结果如图 9 所示。



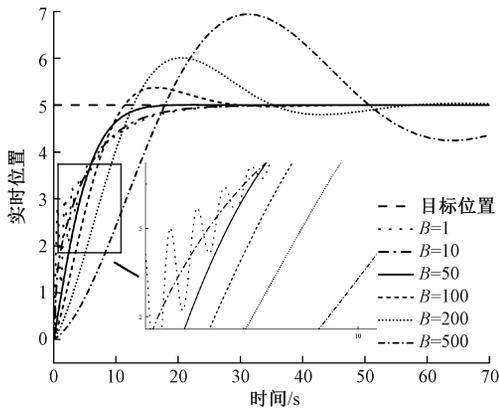


图 11 不同阻尼系数对应的系统响应

Fig. 11 System response corresponding to different damping coefficients

值可以做出适中的选择,如采用  $B_2 = 50 \text{ Ns/m}$  时,装配系统具有较短的响应时间和较快的稳定速度。

### 3.3 质量系数分析

在实际装配过程中,机械臂所夹持的工件均是有质量的实体,所以在研究柔顺控制时,质量带来的惯性也是影响装配工作的重要因素。故本小节内容采用与前两者相同的原理,根据图 10 和 11 的结果,考虑弹性系数  $K_3 = 20 \text{ N/m}$ ,阻尼系数  $B_3 = 50 \text{ Ns/m}$ ,观察质量系数分别在  $M_3 = 0.1, 1, 10, 50, 100, 200 \text{ kg}$  时的控制效果,结果如图 12 所示。

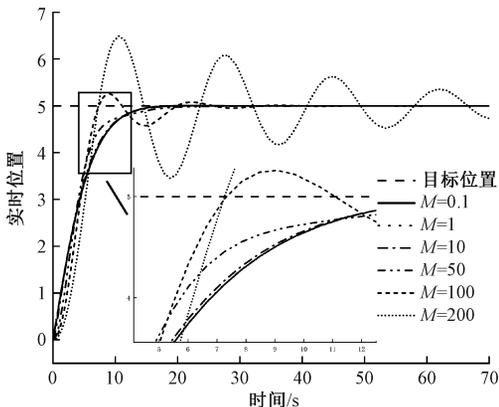


图 12 不同质量系数对应的系统响应

Fig. 12 System response corresponding to different mass coefficients

分析图 12 可知,在导纳控制模型中,质量系数较小时,即  $M_3 < 50 \text{ kg}$  时,质量系数的变化对装配任务的影响不大;但是当质量系数  $M_3 > 100 \text{ kg}$  之后,系统在响应速度基本不变的基础上,逐渐出现越来越大的超调量波动,同时机械臂达到目标位置且保持稳定的时间也越来越长,甚至可能出现最终位置发散的情况,实际作业中将意味

着装配失败。综合实际情况考虑,应用于孔轴装配的实际质量不会过大,并且在物理实验的调整过程中,质量系数一般设定为定值。故将导纳控制质量系数值设定在  $50 \text{ kg}$  以下即可。

### 3.4 导纳控制参数分析

通过对整体的导纳参数研究发现,弹性、阻尼与质量参数单独改变都会对柔顺装配带来不同的影响。本节对这 3 个参数研究分析得出以下结论:

1) 弹性系数较小时,系统响应时间减小,但超调量增大;而弹性系数较大时,系统响应时间增长,但超调量逐渐减小直至消失。

2) 较小的阻尼系数可能导致过早的震荡;而较大的阻尼系数不仅会延长响应时间,还可能增加超调量。因此,通过在弹性系数的基础上选择适中的阻尼系数,可以实现良好的控制效果。

3) 质量系数的增大会导致系统超调量增大并可能出现明显的震荡。考虑到实际问题,质量系数所对应的物理量通常相对稳定和客观,因此设定质量参数时可以根据实际情况调整。

综上所述,超调量和响应时间主要受弹性系数的影响较大,因此需要调整导纳控制的弹性系数,使其根据装配时的限制条件自动寻找合适的参数,从而提高装配的柔顺性能,能够快速、准确又稳定的完成装配任务。

## 4 基于罚函数的导纳控制优化算法研究

### 4.1 基于罚函数的弹性系数自动调参算法

在以往的研究中发现,大多数的调整是通过外加控制系统,如强化学习等,从而辅助改善导纳控制的柔顺性。肖金壮等<sup>[16]</sup>采用一种改进自适应伪随机转移策略,减小陷入局部最优解的概率,有效提升参数调整时的收敛速度。周国光<sup>[17]</sup>采用 BP 神经网络和萤火虫优化算法,成功改进局部最小值和收敛速度慢的问题,能够起到很好的自动平衡控制效果。曾方正等<sup>[18]</sup>为解决纵向控制算法中动态不平稳性问题,提出模糊纵向控制算法,该算法在期望值发生动态变化时进行参数自适应调节,提高控制性能。但针对不同的装配环境又需要手动调节对应的控制参数,以体现出不同的动态响应。以上控制算法虽能够实现自动调参任务,但需要大量的先验数据集,或者依据已存经验池搜索最优参数。本文充分利用罚函数的优势,提出一种基于罚函数的自动调参算法。

本文引入罚函数的基本思想是通过设计惩罚项来约束超调量和响应时间,并根据实际位置误差不断更新弹性系数,最终找到最优参数,从而实现柔顺装配。

导纳模型中的超调量可以通过实时位置与目标位置所围成的面积表示,面积越小则超调量越小。考虑从较小的弹性系数  $K_0=5$  开始迭代,设线性回归误差为  $\varepsilon_i$ ,通过调节线性回归误差从而限制超调量的大小。超调量的计算方法为面积法:

$$S_i = \int_0^{t_i} |f(t_0) - 5| dt \quad (17)$$

线性回归误差  $\varepsilon_i$  的表示方法为:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (y_{i,j} - 5)^2 \quad (18)$$

当误差足够小时,说明超调量很小,即实际位置逐渐靠近目标位置。同时为了缩短响应时间,本文将实际位置与目标位置的误差设定为 0.1,并记录达到这一标准的时间值  $t_0$ ,使得装配任务在满足装配精度的前提下提高装配效率。

算法将两次迭代的误差和参数变化的比值关系作为灵敏度<sup>[19]</sup>,它随着超调量的变化而变化,使得系统在调整过程中有较好的稳定性和可靠性,灵敏度  $\delta_i$  的表示方法如下:

$$\delta_i = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}}{K_i - K_{i-1}} \quad (19)$$

惩罚项设定为允许误差阈值与线性回归误差的差值,即  $(0.0004 - \varepsilon_i)$ ,可以让线性回归误差控制在 0.0004(根据实际需要调整精度)以内。通过循环计算  $S_i$  和  $\varepsilon_i$ ,不断迭代直至满足约束条件( $t_0 \leq 10$  并且  $\varepsilon_i \leq 0.0004$ )。基于罚函数的弹性系数自动调参算法中弹性系数的迭代方式为:

$$K_{i+1} = K_i + \frac{0.0004 - \varepsilon_i}{\delta_i} \quad (20)$$

基于所提算法;根据优化的结果表示,当弹性系数值为 25.3213 时,实际位置输出曲线与目标位置曲线所围成的面积  $S_i=17.7604$ ,线性回归误差  $\varepsilon_i=\pm 0.0002$ ,响应时间  $t_0=9.9300$  s。弹性系数的迭代数据表如表 1 所示。优化后的弹性系数对比图如图 13 所示。

最终,选择线性回归误差最小的参数作为最佳结果,得到最优弹性系数的导纳控制输出。通过使用罚函数的自动调参算法,我们能够有效地搜索导纳控制的参数空间,并找到使机械臂在柔顺装配中最接近目标位置的导纳参数值。这种方法可以应用于受限制的控制参数优化问题中,帮助系统实现更好的控制性能。最终的导纳控制参数如表 2 所示。

#### 4.2 基于力传感器的柔顺性阻抗实验

根据前文提出的机械臂导纳控制方法,设计柔顺性阻抗实验进行验证。考虑到在实际柔顺控制时,需要建立

表 1 弹性系数迭代数据表

Table 1 Elastic coefficient iteration

弹性系数 N/m	面积/mm <sup>2</sup>	线性回归误差
6.716 151	29.549 207	0.339 820
8.119 425	26.130 003	0.245 210
11.756 802	20.594 500	0.101 778
14.338 267	18.418 521	0.050 649
16.895 933	17.182 358	0.022 861
19.000 422	16.692 394	0.010 424
20.764 772	16.600 217	0.004 684
22.204 971	16.745 893	0.002 133
23.409 485	17.022 346	0.000 966
24.407 092	17.360 178	0.000 462
25.321 287	17.760 380	0.000 237

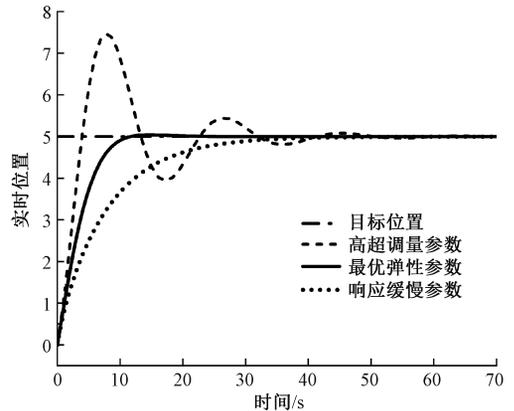


图 13 最优弹性系数对应的系统响应

Fig. 13 The system response corresponding to the optimal elasticity coefficient

表 2 控制优化参数表

Table 2 Controlling optimization parameters

控制参数名称	参数值
倍率系数	6
积分系数	4
弹性系数/(N/m)	25.321 3
阻尼系数/(Ns/m)	50
质量系数/kg	M<50

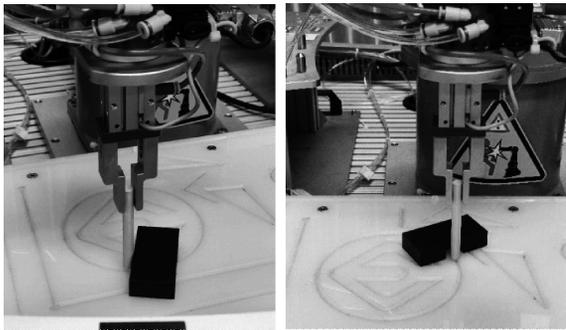
六维导纳控制系统,分别对应机械臂末端执行器的六维自由度。通过力反馈将机械臂末端的力偏差转化为速度和加速度偏差,并最终求得转化为关节角速度轨迹,可以实现装配过程中的平滑运动,提高作业效率和质量。

本节所采用的实验设备为 ABB-irb120 机械臂、气动

夹爪、力传感器和试验轴件,其中轴件的质量为 150 g。通过调用 RobotStudio 编程仿真软件,配合 PowerPacs 功能包实现机械臂的程序控制。

在实验中,设定预先程序使机械臂夹取轴件实现导纳控制下的圆周轨迹运动,并在途径 1/3 和 2/3 处放置阻抗质量块。初始化导纳参数,弹性系数为 1 N/m,阻尼参数为 50 Ns/m,质量参数为 0.15 kg。同时在控制程序中加入消除稳态误差的积分优化控制器,保证机械臂末端位置的准确性。

采用基于罚函数的弹性系数自动调参算法更新导纳控制的弹性系数参数,并通过控制器得到机械臂末端的三维速度控制量。控制系统中运用逆运动学将其折算为关节速度量,经由控制指令传达至机械臂控制电机,实现导纳系统柔顺控制,如图 14 所示。



(a) 1/3处接触阻抗块 (a) Contact impedance block at 1/3  
(b) 2/3处接触阻抗块 (b) Contact impedance block at 2/3

图 14 柔顺性阻抗实验

Fig. 14 Experiment on compliance impedance

当轴与质量块接触时,力传感器将接触力反馈到控制器,通过基于罚函数的弹性系数自动调参算法,根据震荡要求自动调整控制器参数。实验时的接触力如图 15 所示。

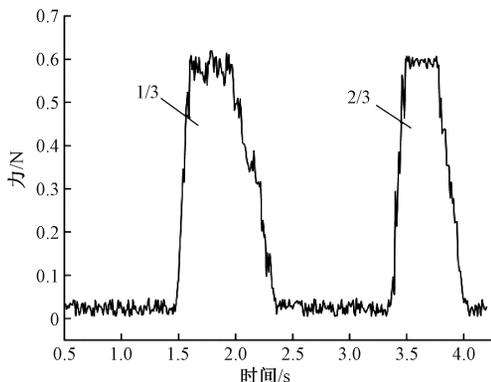


图 15 导纳控制接触力

Fig. 15 Contact force of admittance control

从图 15 可以看出,在 1/3 处接触阻抗质量块时,接

触力的波动范围在 0.1 N,在 2/3 处接触阻抗质量块时,工件之间的接触性力震荡明显减小至 0.05 N,并且当外界阻抗消失时,较 1/3 处缩短了一半的回落调整时间。根据控制参数显示,迭代后的弹性系数为 25.61,与仿真结果比较在合理误差范围内。本实验验证基于罚函数的弹性系数调参算法可以自动调整导纳参数,优化了导纳控制模型。该方法成功减小接触震荡幅度,缩短调整时间,提高装配时的柔顺性能,为机械臂执行孔轴装配任务提供了实验依据。

## 5 结 论

1) 根据柔顺装配中导纳控制的位置和输入力的转换关系,设计了基于倍率调节的积分优化控制器。通过理论和仿真的方式证实最终实际位置能够达到目标位置,而且在靠近过程中成功消除稳态误差,保障了从位置偏差信号转换为导纳控制输入信号时的稳定性。

2) 研究分析导纳控制的弹性、阻尼和质量 3 个参数,并采用基于罚函数的自动调参算法优化弹性系数。通过平衡超调量和响应时间,最终得到较为准确的弹性系数值,使得装配任务具有较小的超调量、较短的调整时间和较快的响应速度。

3) 优化后的导纳控制能在机械臂位置调整时避免出现震荡问题,这种控制方式能够较好的提高自动装配时的柔顺性,减少车门与车身部件之间因刚性摩擦引起的损耗,对汽车车门自动化柔顺装配问题提供了有效的参考价值。

## 参考文献

- [1] JO K, KANG S. The effect of mounting location in door and body stiffness on press door impact beam bending strength [J]. Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, 2018, 26(2):272-278.
- [2] MOUSSAVI S E, ZARE M, MAHDJOUR M, et al. Balancing high operator's workload through a new job rotation approach: Application to an automotive assembly line[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2019, 71:136-144.
- [3] WHITNEY D E, NEVINS J L. What is the remote centre compliance (RCC) and what can it do? [M]. Cambridge: Charles Stark Draper Laboratory, 1978:1-5.
- [4] KAZEROONI H. Direct-drive active compliant end effector (active RCC) [J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1988, 4(3): 324-333.
- [5] 张守权. 基于直接力控制的人工着舰技术综述[J]. 飞机设计,2022,42(2):21-25.  
ZHANG SH Q. Review of manual landing techniques based on direct force control[J]. Aircraft Design, 2022,

- 42(2): 21-25.
- [6] 石文瑞, 乔婷, 邱佳慧. 协作机器人的力/位混合控制系统设计[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(4): 4-6.  
SHI W R, QIAO T, QIU J H. Design of a force/position hybrid control system for collaborative robots [J]. Industrial Control Computer, 2022, 35(4): 4-6.
- [7] MUJICA M, CREPO M, BENOVSAAAD M, et al. Robust variable admittance control for human-robot co-manipulation of objects with unknown load[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2023, 79: 102408.
- [8] HOGAN N. Impedance control: An approach to manipulation, part I-III[J]. ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1985, 107(4): 481-489.
- [9] ZHANG K G, SHI M H, XU J, et al. Force control for a rigid dual peg-in-hole assembly [J]. Assembly Automation, 2017, 37(2): 200-207.
- [10] BARTZ S P. Gravity effects in mass-spring-damper models of inelastic collisions [J]. European Journal of Physics, 2023, 44(2): 025003.
- [11] ZHAO J, ZHANG H, LIU Y B. A self-adaptive active compliance controller for hexapod robot legs [C]. 2010 4th International Conference on Intelligent Information Technology Application, 2010: 478-481.
- [12] HOU ZH M, PHILIPP M, ZHANG K G, et al. The learning-based optimization algorithm for robotic dual peg-in-hole assembly [J]. Assembly Automation, 2018, 38(4): 369-375.
- [13] BRECKLE T, SCHWARZ D, RAMSAIER M, et al. Digital design and planning process of workstations of an assembly system for a customer-individual last-mile electric vehicle [J]. 9th CIRP Conference on Assembly Technolgies and Systems, 2022: 197-202.
- [14] 原杨飞, 党乾龙, 徐伟, 等. 动态罚函数法求解约束优化问题[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(4): 83-90.  
YUAN Y F, DANG Q L, XU W, et al. Solving constrained optimization problems using dynamic penalty function method [J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(4): 83-90.
- [15] 朱林, 邱建春, 陈敏. 基于修正 Sobol 灵敏度模型的拨穗授粉机疲劳寿命影响因素分析研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(16): 189-196.  
ZHU L, QIU J CH, CHEN M. Analysis of factors affecting fatigue life of tassel pollination machine based on modified sobol sensitivity model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(16): 189-196.
- [16] 肖金壮, 余雪乐, 周刚, 等. 一种面向室内 AGV 路径规划的改进蚁群算法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 277-285.  
XIAO J ZH, YU X L, ZHOU G, et al. An improved ant colony algorithm for indoor AGV path planning [J]. Journal of Instrumentation, 2022, 43(3): 277-285.
- [17] 周国光. 三轴气浮台自动调平衡系统设计与控制算法研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.  
ZHOU G G. Research on design and control algorithm of automatic balancing system for three-axis air flotation platform [D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences University (Chinese Academy of Sciences Changchun Institute of Optics, Precision Mechanics and Physics), 2020.
- [18] 曾方正, 高秀晶, 袁志群, 等. 基于实车调参的自动驾驶模糊 PID 纵向控制算法 [J/OL]. 中国测试, 1-10 [2024-08-22].  
ZENG F ZH, GAO X J, YUAN ZH Q, et al. Autonomous driving fuzzy PID longitudinal control algorithm based on real vehicle tuning [J/OL]. China Test, 1-10 [2024-08-22].
- [19] 王培桐, 范晋伟, 任行飞, 等. 一种新的机床位置误差灵敏度分析方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 129-138.  
WANG P T, FAN J W, REN X F, et al. A new sensitivity analysis method for machine tool position error [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(12): 129-138.

## 作者简介



郝正阳, 2020 年于上海师范大学获得学士学位, 现为上海工程技术大学硕士研究生, 主要研究方向为自动化柔顺装配。

E-mail: 13363537222@163.com

**Hao Zhengyang** received his B. Sc. degree from Shanghai Normal University in 2020. He is currently a master student at Shanghai University of Engineering and Technology. His main research interest is automated flexible assembly.



张帆(通信作者), 2008 年于东华大学获得博士学位, 现为上海工程技术大学副教授, 主要研究方向为基于人工智能的机器人优化与控制。

E-mail: pdszhangfan@sues.edu.cn

**Zhang Fan** (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Donghua University in 2008. She is currently an associate professor at Shanghai University of Engineering and Technology. Her main research interests include AI-based robot optimization and control.