

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.045

共形天线表面贴片压力柔顺控制方法

李可¹, 杜小东², 王长瑞¹, 田威¹, 邓超², 丁忆凡¹, 王子航¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;

2. 中国电子科技集团公司 第二十九研究所, 四川 成都 610036)

摘 要:贴片压力是影响共形天线表面贴片电阻贴装质量的关键工艺参数之一。考虑到贴片电阻尺寸、焊盘间隙较小, 如果贴片压力控制不当可能会导致贴装偏离, 甚至导致共形天线损坏, 严重影响产品性能。针对共形天线贴装过程中贴片压力柔顺控制的需求, 分析贴装接触力的变化过程, 构建贴片末端与共形天线基体之间的二阶“质量-阻尼-弹簧”系统; 设计一种基于导纳控制策略的贴片压力控制器, 采用改进烟花算法对导纳控制的惯性参数、阻尼参数及刚度参数进行寻优, 并通过建模仿真及实验验证优化后的导纳控制参数的有效性。

关键词:共形天线; 贴片压力; 导纳控制; 烟花算法; 参数优化

中图分类号:TP273⁺.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)03-0234-08

Mounting Pressure Compliance Control Method for Conformal Antenna

LI Ke¹, DU Xiaodong², WANG Changrui¹, TIAN Wei¹, DENG Chao², DING Yifan¹, WANG Zihang¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. The 29th Research Institute of CETC, Chengdu 610036, China)

Abstract: Mounting pressure, being one of critical process parameters affecting the mounting quality of the surface patch resistance of the conformal antenna, its improper control, considering the small-sized patch resistor and narrow gap between the pads, may cause the installation to deviate and even damage the conformal antenna, seriously affecting product performance. To meet the requirements of compliant pressure control in the conformal antenna mounting process, the process of changing the contact force is analyzed, and a second-order "mass-damping-spring" system is constructed between the end of the patch and the conformal antenna substrate. A mounting pressure controller is designed based on the admittance control strategy, and the improved firework algorithm is applied to optimize the inertia parameters, damping parameters and stiffness parameters of the admittance control, whose effectiveness is verified by modeling, simulation and practical experiments.

Keywords: conformal antenna; mounting pressure; admittance control; firework algorithm; parameter optimization

0 引言

随着我国武器装备的更新换代, 对于雷达作战能力的要求也在不断提高^[1]。共形天线作为各武器装备平台中雷达天线的核心部件, 具有空间利用率高、波束覆盖面大、隐身性能强等特点^[2]。因此, 共形天线不仅被应用在军事装备上, 在车载雷达、移动通讯设备等民用领域也得到了广泛应用。

在共形天线表面片式小元件的装配过程中, 电阻贴装作为其中的关键装配环节, 精度要求高、装配难度大。贴片压力等工艺参数对于共形天线的质量与性能有着重要的影响。国内外学者针对参数整定优化问题进行了研究。黄浩^[3]针对芯片放置过程中快速进给与低冲击力的控制要求, 提

出一种利用 Turbo PMAC (多轴运动控制器) 实现音圈电机软着陆的方法。LEE 等^[4]根据力跟踪误差调节导纳控制器中的刚度参数来实现对于接触力的调节控制。贴装时, 为了保证粘贴的可靠性, 把贴片电阻置于焊盘之后, 还需要以一定的接触力作用一段时间, 保证电阻焊端不小于 1/2 厚度浸入焊膏。贴片压力过小, 电阻焊端将浮在焊膏表面, 焊膏粘不住电阻; 贴片压力过大, 焊膏挤出量过多, 容易造成焊膏黏连^[5]。现有平面 PCB 贴装, 贴片压力与贴片高度成线性关系, 只需设定好贴装高度即可控制压力^[6-8]。但是在共形天线实际贴片时, 如图 1 所示, 共形天线表面曲率变化较大, 贴片头的位置会频繁发生变化, 电阻每次运动的距离也具有不确定性, 仅仅依靠位置控制难以实现。考虑到贴片头与共形天线的刚度较高, 极

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFB1710300); 国防科工局国防基础科研计划项目(JCKY2019210B004)

第一作者简介:李可(1998—), 男, 山西大同人, 硕士研究生, 研究方向为电子装备智能装配, lk3477622049@163.com。

微小的位置偏差都有可能产生较大的接触力,导致贴片电阻位置偏移、焊膏压塌、甚至导致贴片头损坏。综上所述,现有的贴片压力控制方法并不适用于共形天线的曲面加工,需要对贴片过程中的接触力进行高精度的柔顺控制,避免因位置偏差造成贴片压力波动。

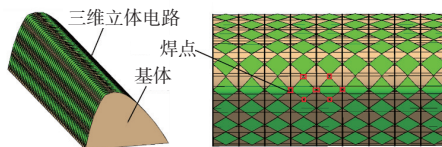


图1 共形天线及其表面特征

现有的柔顺控制方法主要有力/位混合控制、阻抗控制和导纳控制^[9]。其中力/位混合控制将力控和位控解耦到不同的方向分别控制^[10],存在控制响应速度慢、环境建模困难等问题,不适用于曲面贴片的复杂环境。阻抗控制和导纳控制都是通过融合力反馈与位置反馈信息,建立二者之间的动态关系,使执行机构体现出一定的柔顺性。阻抗控制^[11]通过控制关节驱动力来实现对末端接触力和位移的调整,控制精度依赖于精确的机器人动力学模型,适合于大刚度环境下的柔顺控制。导纳控制^[12]根据机器人与环境的接触力偏差,通过调整机器人末端的位置/速度实现控制,适合于刚度较小的柔顺控制,在机器人轴孔装配领域得到了广泛的应用。CHEN等^[13]提出了一种鲁棒阻抗控制算法,将其应用到印刷电路板(PCB板)插入到连接器插座中的装配任务。双丰等^[14]为了完成非结构化环境中的机器人轴孔装配任务,提出了一种融入模糊奖励机制的深度确定性策略梯度变参数导纳控制算法。MOL等^[15]提出了一种基于压力传感器的闭环嵌套导纳控制策略,通过数值求解得到了导纳控制器的稳定性界限,实现了毫米级零件的轴孔装配任务。贴片过程中的力控与位控方向耦合、元器件浸入焊膏过程交互力小,因此导纳控制更适应于对贴片压力进行实时调控,解决接触瞬间压力超调的

问题。导纳控制中控制参数的选择决定了控制性能和控制精度^[16],但其耦合参数较多,常规经验整定法难以获得最优参数,影响控制器的控制精度,且效率较低。

针对上述问题,本文提出了一种基于改进烟花算法的导纳控制器参数优化方法。首先针对接触瞬间压力超调的问题,设计了贴片压力导纳控制器,基于 Matlab/Simulink 搭建贴装过程仿真模型;然后针对传统导纳控制方法在环境参数未知时鲁棒性差的问题,以响应速度、超调量和控制精度作为优化目标,采用改进烟花算法对导纳控制参数进行在线寻优求解,获得最佳的控制参数组合;最后通过离线仿真和贴装实验验证了所提方法的有效性。

1 贴片压力导纳控制策略

本文提出的接触力控制策略的基本思想就是通过设计导纳控制器,将贴片头末端等效为阻抗系统,贴片压力通过安装在贴片头末端的压力传感器获取,通过导纳控制方法调节贴片头末端位置与贴片压力之间的动态关系,实现对贴片压力的柔顺控制。

1.1 导纳控制模型搭建

本设计采用的导纳控制模型是由导纳控制外环和位置控制内环组成,系统控制模型如图2所示。其中导纳控制器内部将贴装头与力传感器构成的末端等效为“质量-阻尼-弹簧”的2阶系统,用来表示贴装末端与共形天线之间的力/位关系,并根据贴装的位置、速度和力反馈信息,建立末端位移与接触力之间的动态平衡方程。正运动学和逆运动学模块是根据丝杆导程,实现加工空间中位置坐标与伺服驱动器所控制的电机角度 θ 之间的相互转换的功能。位置控制模块的功能是结合伺服电机的分辨率,将伺服电机的角度信息转化为对应的脉冲数,并向电机驱动器发送脉冲控制电机转动。同时为了简化操作,将接触环境简化为1阶弹簧系统。

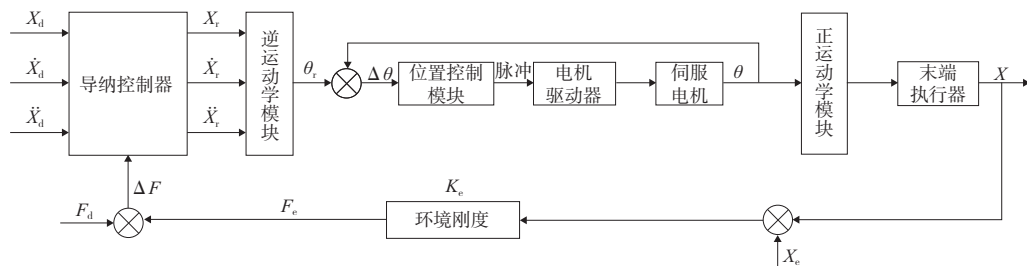


图2 贴片压力导纳控制模型原理图

图2中 X_d 表示期望位置坐标, $\dot{X}_d$ 表示期望速度, $\ddot{X}_d$ 表示期望加速度, X_r 表示指令位置坐标, X 为实际位置坐标, θ_r , $\Delta\theta$ 和 θ 分别表示 z 轴伺服电机的期望角度、角度增量和实际角度。对于位置型控制系统来说,假设其位置控制足够精确,即满足 $X = X_r$ ^[17],则期望位置与实际位置之间的偏差为 $\Delta X = X - X_d = X_r - X_d$ 。 X_e 表示环境位置,假设环境刚度为 K_e ,那么贴装头与共形天线之间的接触力可以表示为 $F_e = K_e(X - X_e)$,而在实际加工过程中 F_e 可以通过压力传感器精准获取。 F_d 为期望压力,期望压力与实际压力之间的力偏差为 $\Delta F = F_e - F_d$ 。

导纳控制的本质就是输入期望压力与实际压力的偏差,输出位置偏差,用来实时调整指令位置,其动力学方程为

$$\Delta F = M[\ddot{X}_r - \ddot{X}_d] + B[\dot{X}_r - \dot{X}_d] + K[X_r - X_d] \quad (1)$$

式中 M 、 B 、 K 分别表示惯性参数、阻尼参数和刚度参数。

由于实际的贴片控制过程是基于数字采样系统实现的,所以需要将式(1)转化为离散系统的差分形式^[18]。首先对式(1)进行拉普拉斯变换,得到其传递函数:

$$H(s) = \frac{\Delta X(s)}{\Delta F(s)} = \frac{1}{Ms^2 + Bs + K} \quad (2)$$

对式(2)采用双线性变换:

$$H(z) = H(s) \Big|_{s=\frac{2(Z-1)}{T(Z+1)}} \quad (3)$$

进而得到导纳控制模型的离散表达式:

$$H(z) = \frac{\Delta X(z)}{\Delta F(z)} = \frac{T^2(z+1)^2}{\omega_1 z^2 + \omega_2 z + \omega_3} \quad (4)$$

式中: $\omega_1 = 4M + 2BT + KT^2$; $\omega_2 = -8M + 2KT^2$; $\omega_3 = 4M - 2BT + KT^2$; T 为采样时间间隔。

最后得到的导纳控制差分方程为

$$\Delta X(k) = \frac{1}{\omega_1}(\alpha + \beta) \quad (5)$$

式中: $\alpha = -\omega_2 \Delta X(k-1) + \omega_3 \Delta X(k-2)$; $\beta = T^2 \Delta F(k) + 2T^2 \Delta F(k-1) + T^2 \Delta F(k-2)$ 。

整个贴装控制系统的控制流程如下:首先使用压力传感器对贴片压力 F_e 进行实时检测和采集,并计算出压力偏差 ΔF ;将压力偏差 ΔF 输入导纳控制器,根据导纳控制参数(M 、 B 、 K)计算出贴装头位置偏差 ΔX ,进而得到发送给贴装末端的指令位置 X_r ,表示为 $X_r = X_d + \Delta X$;将指令位置 X_r 输入到位置控制内环,贴装末端向目标位置移动,同时压力传感器继续采集当前位置贴片压力;重复执行上述步骤,直至贴片动作完成。

1.2 仿真建模与参数分析

为验证所设计的导纳控制系统能否快速、有效地控制贴片压力,在 Simulink 中搭建末端执行器贴装过程的控制系统仿真模型,如图3所示。其中正、逆运动学模块均用 Matlab-Function 编写,环境接触模型中的环境刚度是利用压力传感器和位移传感器配合采集数据,后拟合出压力-位移曲线获得。位置控制模块采用传统的 PID 控制,控制对象为使用 Simulink 搭建的永磁同步电机仿真模型。导纳控制模块内部结构如图4所示。

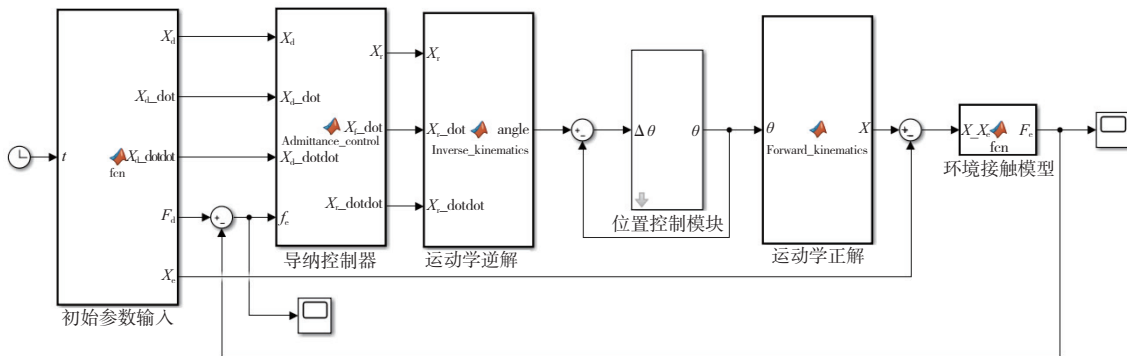


图3 导纳控制系统 Simulink 仿真模型

为研究导纳控制参数对于柔顺控制性能的影响,采用变量控制方法,对导纳控制参数 M 、 B 、 K

的影响效果进行对比研究,为后续导纳控制参数寻优确定取值范围。设定贴片压力的期望值为

3 N, 采样时间为 0.01 s, 仿真时间为 5 s。

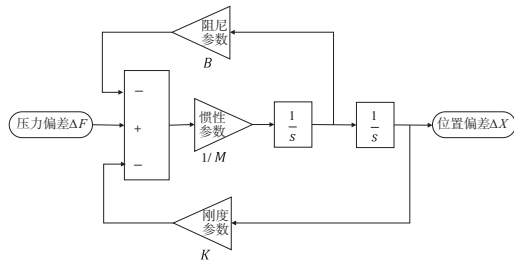


图4 导纳控制结构

1) 惯性参数 M 对控制系统的影响

设置阻尼参数 $B = 80 (\text{N} \cdot \text{s})/\text{mm}$, 刚度参数 $K = 100 \text{ N/mm}$, 惯性参数 M 分别取 10、50、100 和 $150 (\text{N} \cdot \text{s}^2)/\text{mm}$ 。不同惯性参数下贴片压力曲线如图 5 所示。从图中可以看出, 随着惯性参数 M 的增大, 控制系统响应速度降低, 系统达到稳态的时间延长, 超调量增大, 控制效果变差。但是可以看出惯性参数的变化基本不影响控制系统的稳态误差。

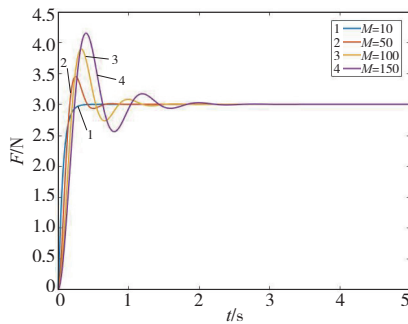


图5 不同惯性参数 M 对控制系统的影响

2) 阻尼参数 B 对控制系统的影响

设置惯性参数 $M = 10 (\text{N} \cdot \text{s}^2)/\text{mm}$, 刚度参数 $K = 100 \text{ N/mm}$, 阻尼参数 B 分别取 20、50、80 和 $110 (\text{N} \cdot \text{s})/\text{mm}$ 。不同阻尼参数下贴片压力曲线如图 6 所示。从图中可以看出, 改变阻尼参数 B 的值, 不会改变接触压力的稳态值, 只影响控制系统的响应速度和超调量。

3) 刚度参数 K 对控制系统的影响

设置惯性参数 $M = 10 (\text{N} \cdot \text{s}^2)/\text{mm}$, 阻尼参数 $B = 80 (\text{N} \cdot \text{s})/\text{mm}$, 刚度参数 K 分别取 50、100、150 以及 200 N/mm 。不同刚度参数下贴片压力曲线如图 7 所示。从图中可以看出, 刚度系数取值对于超调量和响应速度未产生明显影响, 其主要影响的是控制系统的稳定值, 刚度参数越大, 接触力稳定值越大。

但是面对贴装过程中环境模型参数未知或动

态变化的问题时, 固定参数对系统扰动的鲁棒性较差, 不具备良好的调节能力。因此, 需要根据实际贴片压力的测量对导纳控制参数进行在线调整与综合寻优, 选择出最佳的控制参数组合, 对环境变化进行补偿, 保证控制系统稳定。

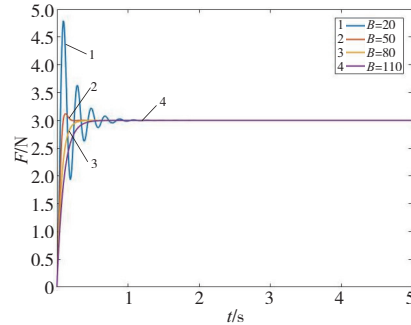


图6 不同阻尼参数 B 对控制系统的影响

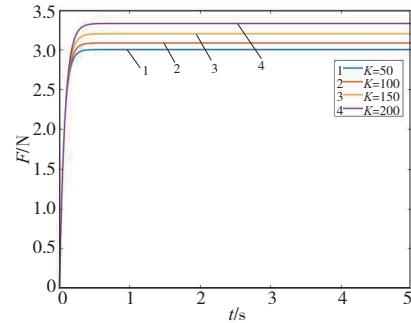


图7 不同刚度参数 K 对控制系统的影响

2 基于改进烟花算法的导纳控制参数优化

根据烟花在夜空中爆炸产生火花并照亮周围区域这一自然现象, TAN 等^[19] 提出了烟花算法 (FWA)。标准烟花算法通过引入随机因素和选择策略形成一种并行爆炸式搜索方式, 具有局部搜索能力和全局搜索能力的自调节机制, 适合于连续空间中多控制参数优化求解问题。

标准烟花算法主要由爆炸算子、变异操作、映射规则和选择策略 4 部分组成^[20]。基本原理是: 首先随机生成 N 个烟花, 每一个烟花代表导纳控制参数解空间中的一个可行解。每一代烟花的适应度值越小, 其爆炸产生的火花数量越多, 爆炸半径越大, 导纳控制器的压力调节性能就越好。

2.1 改进烟花算法

标准烟花算法收敛速度慢, 易于陷入局部最优, 无法找到满足要求的全局最优解。考虑到贴片过程环境模型参数动态变化, 而且实际位置与

指令位置均是时变的,标准烟花算法不能满足贴片装过程中贴片压力的控制需求。因此,本文采用改进烟花算法对导纳控制参数进行寻优。

1) 对变异算子的改进

标准烟花算法的变异算子是高斯变异,当随机产生的 e 值接近于 0 时,易将解变异到原点位置附近。因此,使用一种新型高斯变异算子:

$$\hat{x}_{ik} = x_{ik} + g \times (x_{Bk} - x_{ik}) \quad (6)$$

式中: $g \sim N(0, 1)$, 表示 g 函数服从标准正态分布; x_{Bk} 为当前烟花种群中适应度函数值最小的烟花的第 k 维度上的位置。

2) 对映射规则的改进

标准烟花算法的映射规则容易将解映射到搜索空间原点附近的位置,但是大部分问题目标函数的最优解都在原点位置或附近,这样就会导致算法过早地收敛。因此采用随机映射规则:

$$\hat{x}_{ik} = x_{LB,k} + U(0, 1) \times (x_{UB,k} - x_{LB,k}) \quad (7)$$

式中 $x_{UB,k}$ 、 $x_{LB,k}$ 分别表示导纳控制参数的上边界和下边界。

3) 对选择策略的改进

标准烟花算法中的选择策略是基于欧式距离的轮盘赌选择策略,这种计算方式消耗时间较长,因此改为采用锦标赛适应度值选择策略。首先选择最优的个体,之后采用锦标赛的方式选择其他个体。个体被选中的概率为

$$p(x_i) = \frac{y_{\max} - f(x_i)}{\sum_{i \in K} (y_{\max} - f(x_i))} \quad (8)$$

式中: $y_{\max}$ 表示群体 K 中所有个体最大适应度值,群体 K 包含初始烟花、爆炸火花以及变异火花; $f(x_i)$ 是个体 x 的适应度值。

2.2 导纳参数优化求解

导纳控制器的优化问题就是确定一组合适的参数 M 、 B 、 K ,使得控制系统的性能指标达到最优。在寻优过程中,将改进烟花算法的适应度函数作为评价控制系统性能的指标,并根据适应度函数计算出每个烟花的适应度值,通过适应度值判断烟花的优劣,找到导纳控制参数 M 、 B 、 K 对应的最佳烟花。所以适应度函数设计的优劣将直接影响算法的控制效果。包含控制系统稳态误差 $e(t)$ 的性能指标函数包括:绝对误差积分 (IAE)、平方误差 (ISE)、时间乘误差平方积分 (ITSE)、时间乘绝对误差积分 (ITAE) 等^[21]。对于整个贴片过程来说,不仅要保证贴片压力能够快速达到期望值,还要保证最终的贴片位置偏差极小,即同时

实现高精度的位置控制和压力控制。因此,本文选取 ITAE 性能指标作为最小目标函数,同时在目标函数中加入导纳控制器输入平方项 (ITSE)。则目标函数为

$$F_{\text{itness}} = \int_0^t J_1 t |e(t)| dt + \int_0^t J_2 t u(t)^2 dt \quad (9)$$

式中: F_{itness} 表示适应度函数值; $e(t)$ 表示贴片压力误差 $F_e - F_d$ 随时间变化的函数; $u(t)$ 表示贴片位置偏差 ΔX 关于时间的变化函数; J_1 、 J_2 表示调节权重值。为了方便分析和计算,选取积分限位 $[0, t]$,其中 t 为调节时间,取采样周期为 Δt ,为了易于计算机程序的实现,对式 (9) 进行离散化处理。离散系统的适应度函数为

$$F_{\text{itness}} = J_1 \left(\sum_{k=0}^N t(i) |e(i)| \right) \Delta t + J_2 \left(\sum_{k=0}^N t(i) [e(i)]^2 \right) \Delta t \quad (10)$$

式中: $t(i)$ 为离散时间数组; 采样次数 $N = t / \Delta t$ 。

采用改进烟花算法进行导纳控制参数寻优流程如图 8 所示。设置好初代烟花规模和最大评估次数等参数,图中 M 、 B 、 K 参数搜索范围可以通过前期变量控制方法确定。在迭代过程中,还需确定种群历史最佳适应度值,对于每一个烟花和产生的火花,将其适应度值与种群历史最优适应度值进行比较,若较好,则将其作为当前历史最佳适应度值。每次迭代后判断是否达到最大评估次数,如果符合条件则终止迭代,选择适应度值最小的个体作为导纳控制最优参数;如果不符合条件,应用锦标赛选择策略选择新的火花作为下一代烟花继续迭代。

2.3 离线仿真

利用 Matlab 软件编写标准烟花算法程序和改进烟花算法程序对导纳控制参数进行迭代寻优。仿真参数设置如下:维度 $D=3$,最大评估次数 $E_{\text{va,max}}=30\ 000$ 。在对 3 个导纳控制参数 M 、 B 、 K 进行编码时,选定三维空间,每一个烟花算法中的个体都包含 3 个参数的变量,即 $x_i = [M, B, K]$, M 的取值范围是 $[0, 50]$, B 的取值范围是 $[50, 150]$, K 的取值范围是 $[0, 300]$ 。考虑到烟花算法的爆炸特性,烟花个体爆炸变异产生火花种群,设置初始烟花个数为 10,最大火花种群数量 $\hat{S}=50$,最大爆炸半径 $\hat{A}=40$,爆炸数目限制因子 $a=0.04$, $b=0.8$,变异火花数目为 5。适应度函数调节权值 $J_1=0.9$, $J_2=0.1$ 。仿真时间为 5 s,仿真步长为 0.01 s。适应度函数 F_{itness} 随迭代次数变化趋势如图 9 所示。

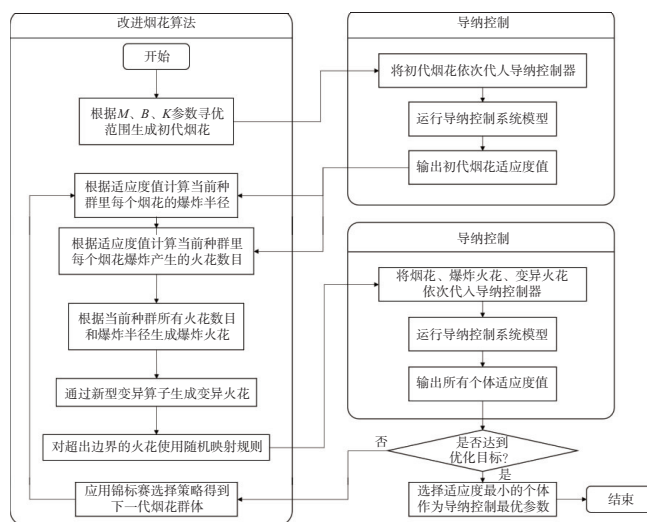


图8 导纳参数优化流程

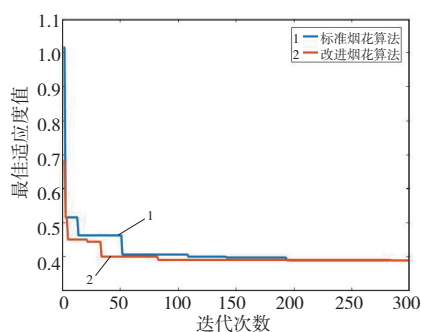


图9 适应度迭代曲线

从图9中可以看出,标准烟花算法和改进烟花算法都能向最优解逼近,标准烟花算法在迭代次数达到193代时适应度值才完全收敛,而改进烟花算法在迭代次数达到81次时,适应度值已趋于稳定。相比之下,改进烟花算法收敛迭代次数更少,收敛速度更快。由Matlab计算结果可知,改进烟花算法寻得的最优导纳控制参数为 $M = 10.115\ 2$, $B = 112.733\ 0$, $K = 49.251\ 5$,最优适应度值为0.39,相比较于优化前降低了42.64%。将寻得的最优导纳控制参数代入贴片压力Simulink导纳控制模型中并运行,得到的贴片压力控制曲线如图10所示。从图中可以看出,经过0.50 s,接触压力稳定在3.00 N,达到期望值,在控制过程中并没有发生超调或震荡等现象。这表明经过改进烟花算法优化后的导纳控制器稳定时间缩短,起到了明显的柔顺控制效果。

3 实验验证

基于本文所设计的导纳控制器搭建如图11所示的贴片实验平台。实验平台上位机采用C#语言在PC平台上进行开发,接收压力传感器发

送的反馈信号,经过数据采集卡采集信号后送入工控机,通过导纳控制算法对力信号进行运算处理,得到贴片头位置修正值,将结果传送至运动控制卡中并执行相应的程序,驱动贴片头移动至指令位置,实现贴片压力的柔顺控制。

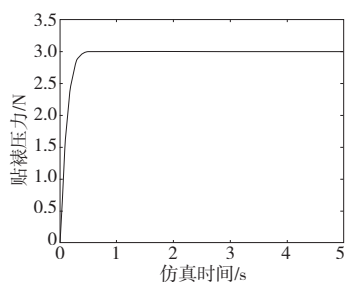


图10 贴片压力仿真结果

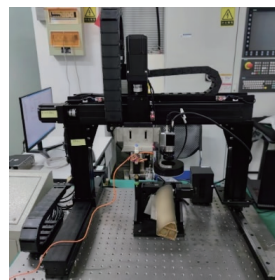


图11 实验平台

实际接触力随时间的变化曲线如图12所示。分析可知,贴片头末端初始处于自由空间,此时贴片头未接触工件。发生接触时,贴片头运动进入约束空间,此时设计的导纳控制算法开始工作,调整电机输出的力矩大小,使得接触力快速接近期望力。当接触力稳定后,上位机发送贴片完成信号,之后发送命令使贴片末端移动至指定位置,最后驱动电机反转,贴片头离开工件。

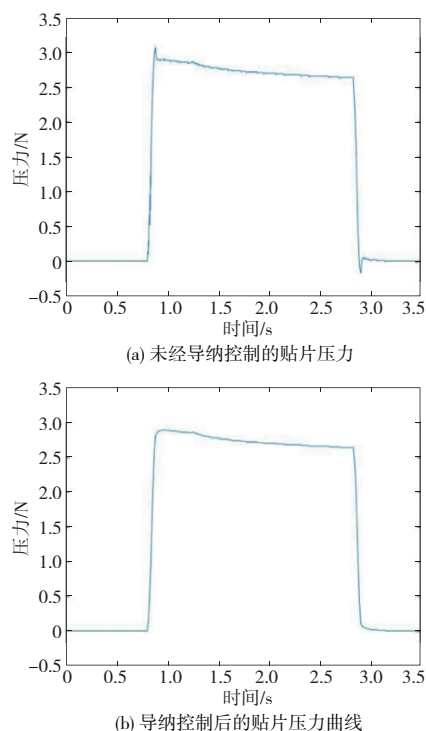


图 12 实际接触力随时间变化曲线

表 1 贴片压力数据

编号	传统			改进		
	稳定接触力/N	峰值/N	偏差控制精度/%	稳定接触力/N	峰值/N	偏差控制精度/%
1	3.22	4.02	7.3	3.12	3.58	4.0
2	3.31	4.05	10.3	3.24	3.83	8.0
3	3.39	4.08	13.0	3.32	3.88	10.6
4	3.34	3.92	11.3	3.20	3.71	6.7
5	3.27	3.87	9.0	3.22	3.68	7.3
6	3.41	3.96	13.6	3.16	3.58	5.3
7	3.26	4.04	8.7	3.21	3.79	7.0
8	3.20	4.16	6.7	3.10	3.68	3.3
9	3.34	3.76	11.3	3.19	3.59	6.3
10	3.27	3.67	9.0	3.11	3.55	3.7

分析表 1 数据可以看出,在接触环境参数不确定影响下,未经导纳控制方法在稳定状态下测量的接触压力与期望压力偏差较大,最高控制精度为 7.3%,最低控制精度为 13.6%,平均偏差为 0.301 N。而采用基于改进烟花算法的导纳控制的接触压力与期望压力偏差较小,控制精度更高,最高控制精度为 3.3%,最低控制精度为 10.6%,平均偏差为 0.187 N。相比于改进前平均偏差降低了 37.9%。同时,未经导纳控制的接触力最大峰值为 4.16 N,最小峰值为 3.67 N,平均峰值为 3.953 N;而经过改进导纳控制后的接触力最大峰值为 3.88 N,最小峰值为 3.55 N,平均峰值为 3.687 N。综上,改进后的导纳控制算法可以有效

通过对比图 12 控制前后的实验曲线可以发现,未经导纳控制和经过导纳控制的贴片压力几乎都在 0.88 s 处达到峰值,2.70 s 左右贴片压力达到稳定状态,且调节时间基本相同。但是未经导纳控制的接触力超调量约为 16.1%,稳态误差为 0.43 N,最大接触力 3.10 N 左右。从图 12(a)中可以看出,在贴片头与工件刚接触时,贴片压力产生明显超调。而经过导纳控制后的贴片压力超调量约为 9%,稳态误差为 0.24 N,最大接触压力为 2.80 N 左右,相比于未经导纳控制超调量减少了 44%,刚接触时贴片压力变化更加平滑、稳定,未发生较大超调,说明经过改进后的导纳控制器更加适用于贴片。

为了分析所设计导纳控制器的稳定性,保证重复性贴片的稳定进行,设定贴片期望压力为 3 N,连续贴片 10 次,未经导纳控制方法和经过导纳控制方法下的贴片试验压力数据如表 1 所示。

降低接触压力的超调量,并且提高贴片过程的稳定性,实现贴片压力的柔顺控制,避免贴片头与工件刚接触时因为位置偏差导致的压力突变问题,具备优异的控制性能。

4 结语

1) 本文针对共形天线贴装过程中贴片压力柔顺控制的需求,设计了基于导纳控制的贴片压力控制器。

2) 针对标准烟花算法收敛速度慢,易于陷入局部最优的问题。本文采用改进烟花算法对导纳控制参数进行寻优,经过 81 次迭代后,适应度值趋于稳定,说明与标准烟花算法相比,改进烟花算

法收敛迭代次数更少,收敛速度更快。

3)通过实验数据表明,导纳控制策略能够有效抑制超调量,保证贴片过程中的稳定性,期望压力为3 N时,平均峰值由3.953 N降低至3.687 N;平均偏差由0.301 N降低为0.187 N。柔顺控制性能较传统方式得到较大提升。

参考文献:

- [1] 李红卫,蔡金元,王玉田,等. 机载有源相控阵雷达的作战优势、性能对比及军事应用[J]. 国防科技, 2015,36(6):69-73.
- [2] 高雨辰. 基于典型结构的共形阵列天线设计技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2021.
- [3] 黄浩. 基于音圈电机的力/位控制及应用[D]. 武汉:华中科技大学,2008.
- [4] LEE K,BUSS M. Force tracking impedance control with variable target stiffness[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008,41(2):6751-6756.
- [5] 朱桂兵. 控制贴片质量关键因素的研究[J]. 电子测试,2009(4):48-52.
- [6] 赵文军,史建卫,杜彬,等. 片式小元件质量控制工艺[J]. 电子工艺技术,2010,31(6):324-331.
- [7] 李有成. 组装系统低压力贴装研究[J]. 电子工业专用设备,2014,43(8):31-34,58.
- [8] 侯一雪,王敏. 系统结构状态对微小芯片贴片精度的影响[J]. 电子工艺技术,2020,41(3):146-149.
- [9] 殷跃红,朱剑英,尉忠信. 机器人力控制研究综述[J]. 南京航空航天大学学报,1997,29(2):100-110.
- [10] 臧强,田浪,胡凯,等. 机器人力控制综述[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2022,14(6):744-754.
- [11] HOGAN N. Impedance control: an approach to manipulation[C]//1984 American Control Conference. San Diego,CA,USA: IEEE,1984:304-313.
- [12] FERRAGUTI F,TALIGNANI LANDI C,SABATTINI L,

et al. A variable admittance control strategy for stable physical human - robot interaction [J]. The International Journal of Robotics Research, 2019, 38(6):747-765.

- [13] CHEN H P,LIU Y. Robotic assembly automation using robust compliant control[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2013,29(2):293-300.
- [14] 双丰,卢万玉,李少东,等. 基于强化学习的机器人轴孔装配算法[J]. 机器人,2023,45(3):321-332.
- [15] MOL N, SMISEK J, BABUŠKA R, et al. Nested compliant admittance control for robotic mechanical assembly of misaligned and tightly tolerance d parts[C]//2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Budapest, Hungary: IEEE,2016:2717-2722.
- [16] 戚毅凡,贾英宏,赵宝山,等. 基于改进神经网络的空间机械臂阻抗控制方法[J]. 中国空间科学技术, 2022,42(2):82-90.
- [17] SONG P,YU Y Q,ZHANG X P. A tutorial survey and comparison of impedance control on robotic manipulation[J]. Robotica,2019,37(5):801-836.
- [18] 李冬武,张洁,汪俊亮,等. 细纱接头机器人神经网络自适应力跟踪导纳控制[J]. 机械工程学报,2023, 59(11):221-231.
- [19] TAN Y,ZHU Y C. Fireworks algorithm for optimization [M]// TAN Y,SHI Y H,TAN K C, Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg,2010:355-364.
- [20] 谭营.《烟花算法引论》新书出版[J]. 智能系统学报,2015,10(4):547.
- [21] 赵文龙,齐柳. 基于ITAE指标等概率分布的PID参数整定[J]. 电子技术与软件工程,2015(8):95-97.

收稿日期:2023-08-31

(上接第233页)

- [10] 罗继曼,马思源,肖雅心,等. 基于交叉耦合的四足机器人Trot步态控制研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(3):554-562.
- [11] 李红岩,魏洪玲,赵龙. 激光视觉引导下的工业机器人步态运动学参数辨识[J]. 激光杂志,2024, 45(4):191-195.
- [12] 李龙坤,方鸿磊. 基于Trot步态的四足机器人行走姿态控制策略[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2025,42(2):56-62.
- [13] 芮宏斌,王天赐,库龙林,等. 受海龟爬行与山羊行走启发的四足仿生移动机器人多步态规划及动力学分析[J]. 工程设计学报,2024,31(3):309-318.
- [14] 刘恒佳,胡立坤,徐大也,等. 单腿失效六足机器人蒙特卡洛树容错步态规划[J]. 国外电子测量技术, 2023,42(8):154-161.
- [15] 谢兴彪,张晓旭,孙秀婷,等. 6-PSU 并联机器人动

力学模型辨识及其驱动力矩估计新方法[J]. 力学学报,2025,57(1):183-198.

- [16] 陈嘉睿,凌琳,蒋贵荣. 脉冲推力作用下上楼梯双足机器人行走的建模与动力学分析[J]. 广西师范大学学报(自然科学版),2022,40(6):131-144.
- [17] 李姗姗,王洪波,陈建宇,等. 新型四足并联军用机器人步态控制算法及仿真[J]. 兵工学报,2023, 44(3):895-909.
- [18] 冯振,牟海明,薛杰,等. 融合模仿学习的双足机器人全向行走步态生成方法[J]. 电子科技,2025, 38(1):29-36.
- [19] 严宇,刘夏清,邹德华,等. 输电线路带电巡检作业单臂机器人行走姿态控制方法[J]. 电力科学与技术学报,2016,31(2):115-120.

收稿日期:2024-07-23