

基于数字孪生的装配误差建模与溯源分析方法

门松辰¹, 周光辉^{1,2}, 张超^{1,2}, 常丰田³, 邹永成¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械制造系统工程
国家重点实验室, 710054, 西安; 3. 长安大学工程机械学院, 710064, 西安)

摘要: 针对因装配误差溯源分析时效性差、准确率低而导致的装配质量控制不及时等问题, 提出基于数字孪生的装配误差建模与溯源分析方法。首先, 结合数字孪生技术搭建面向装配误差分析的数字孪生框架, 在此基础上, 构建装配物理层、数据感知模型、几何模型与设备运动模型, 为后续装配误差传递模型的构建与溯源分析提供支持; 其次, 将装配工艺信息中提取的零部件特征、质量特征与特征间连接关系, 分别作为误差传递网络中节点与节点的连边关系, 构建自适应生长误差传递网络, 并通过数据模型获取装配现场数据, 用于误差传递网络权重赋值, 得到自适应生长误差传递模型; 然后, 采用多算法动态融合排序方法对自适应生长误差传递模型进行关键装配节点识别, 为装配质量控制提供依据; 最后, 结合逆回溯算法与误差传递强度, 计算误差传递路径上各节点的误差传递强度, 实现装配误差溯源分析。采用所提方法在装配实验平台进行误差溯源分析实验, 结果表明: 在各装配工序发生质量问题概率相等的情况下, 所提方法相比传统离线溯源分析方法的时效性提高了约 40%, 通过所提方法能有效提高装配质量控制时效性, 并降低装配质量控制成本。

关键词: 装配误差; 数字孪生; 误差溯源; 建模; 关键装配节点识别

中图分类号: TH166 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202301017 **文章编号:** 0253-987X(2023)01-0175-10

Assembly Error Modeling and Traceability Analysis Method Based on Digital Twin

MEN Songchen¹, ZHOU Guanghui^{1,2}, ZHANG Chao^{1,2},
CHANG Fengtian³, ZOU Yongcheng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key
Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China;
3. School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Aiming at the problems of untimely assembly quality control due to poor timeliness and low accuracy of assembly error traceability analysis, an assembly error modeling and traceability analysis method based on digital twin is proposed. Firstly, a digital twin framework for assembly error analysis is built by the digital twin technology. On this basis, the assembly physical layer, data perception model, geometric model, and equipment motion model are constructed to provide support for subsequent assembly error transfer model construction and traceability analysis. Secondly, an adaptive growth error transfer network is constructed by taking the component features, quali-

收稿日期: 2022-05-19。 作者简介: 门松辰(1998—), 男, 硕士生; 张超(通信作者), 男, 博士, 助理教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52105530); 中国博士后创新人才支持计划资助项目(BX2021244); 陕西省高校科协青年人才托举计划资助项目(20210409)。

网络出版时间: 2022-09-30

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220927.2232.002.html>

ty features, and connection relationship among the features extracted from the assembly process information respectively as the nodes and connection relationship among the nodes in the error transfer network, and then an adaptive growth error transfer model is generated by applying the assembly site data obtained from the data model to the weight assignment of the error transfer network. Then, the multi-algorithm dynamic fusion sorting method is introduced to identify the key assembly nodes of the adaptive growth error transfer model, which provides a basis for assembly quality control. Finally, the inverse backtracking algorithm and error transfer intensity algorithm are combined to calculate the error transfer intensity of each node on the error transfer path and to realize the assembly error traceability analysis. The proposed method is used to conduct error traceability analysis experiments on the assembly experimental platform. The experimental results show that the timeliness using the proposed method could be improved by about 40% compared with the traditional offline traceability analysis method under the condition that the probability of quality problems in each assembly process is equal, which indicates that the proposed method can effectively improve the timeliness of assembly quality control and reduce the cost thereof.

Keywords: assembly error; digital twin; error traceability; modeling; key assembly node identification

装配作为产品制造过程的最后一个环节,在很大程度上对产品的最终精度与性能起着决定性作用^[1],因此需在产品装配过程中对装配质量进行控制。由于产品装配质量形成过程受多种因素的综合作用,且各因素耦合作用机制^[2]不明确,导致装配质量难控制。装配误差传递模型的构建与溯源分析,能从源头对装配质量进行理论分析与控制,是装配质量控制的先决条件。构建装配误差传递模型与误差溯源分析能实现误差源的快速准确识别,能有效提高实时装配过程中的装配质量,因此对装配质量控制具有重要的工程意义。

近年来,国内外众多学者对误差传递模型构建与溯源分析进行了相关探索。如 Wang 等^[3]、Li 等^[4]、余德文等^[5]采用基于状态空间模型与灵敏度分析方法构建误差传递模型,此类方法构建的误差传递模型精确,误差溯源分析精度高,但其时间复杂度高,存在溯源分析时效性差等问题。祝鹏等^[6]采用复杂网络理论构建误差传递网络,该方法的误差传递模型构建简便,但仅考虑单方面误差的影响,且未面向装配过程进行误差传递模型构建,无法支持装配误差在线溯源,降低了装配质量控制的时效性。

将产品装配过程与数字孪生技术^[7]结合,可有效解决当前装配误差溯源方法因采用离线误差传递模型而导致的误差溯源分析时效性差等问题。目前已有部分学者对装配数字孪生技术进行了相关研究,如胡兴等^[8]、Zhuang 等^[9],但仍存在误差传递模型不完善,溯源分析方法时间复杂度高以及无法在

线溯源等问题。

针对当前存在的问题,提出基于数字孪生的装配误差建模与溯源分析方法。首先,结合装配工艺信息与数字孪生模型^[10]构建自适应生长误差传递模型;其次,采用动态融合排序算法实现关键装配节点识别,并结合逆回溯算法实现装配误差溯源分析;然后,在装配实验平台使用该方法进行误差溯源分析实验,得到喷管装配误差源;最后,通过三坐标测量仪验证了本文方法的可行性与有效性。

1 面向装配误差分析的数字孪生框架

构建如图 1 所示的面向装配误差分析的数字孪生框架。该框架借助数字孪生技术对装配现场的数据进行实时感知,在此基础上实现误差在线溯源分析,并通过误差源的可视化展示,提高装配质量控制的时效性。

物理层由各类物理实体组成,是实现孪生装配模型功能和任务的主要工具和载体,同时也是装配过程中各类数据的生产者和决策的参与者^[11]。物理层通过多种方式与孪生层相连接,向孪生层传递各类装配现场数据^[12]。

孪生层由数据感知模型、几何模型、运动模型、误差传递模型与误差溯源机制组成^[13]。数据感知模型通过多种方式与物理层设备连接,实时感知物理层传递的装配现场数据;通过几何模型与运动模型的协同,可实现装配过程的孪生展示和误差溯源结果的可视化展示。

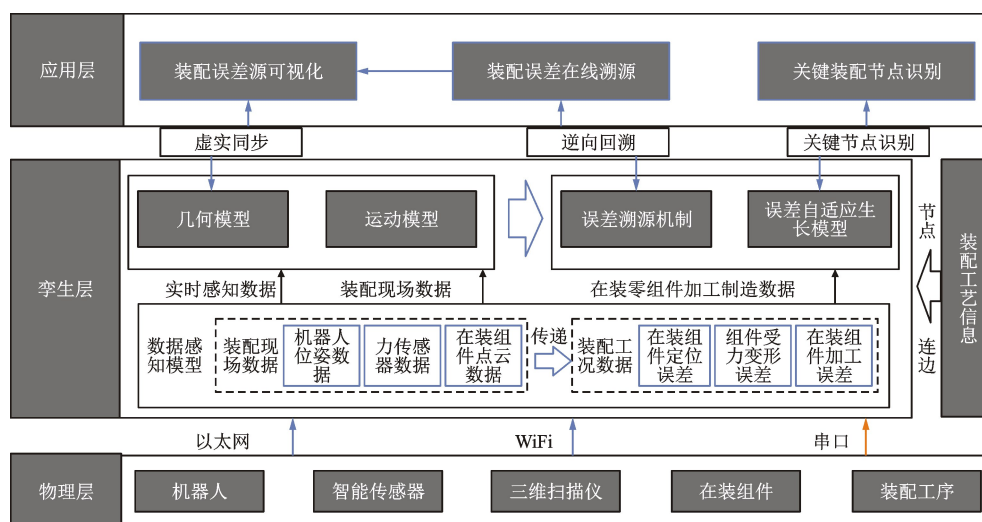


图1 面向装配误差分析的数字孪生框架

Fig. 1 A digital twin framework for assembly error analysis

基于复杂网络理论构建装配过程模型,结合多工序装配的特点,形成自适应生长误差传递网络,同时借助数据感知模型实现基于装配现场数据的网络权重赋值,获得自适应生长误差传递模型;在此基础上,引入误差溯源机制,为实现面向装配过程中的装配质量误差在线溯源分析提供支撑。

应用层在孪生层误差传递模型的基础上进行关键装配节点在线识别,得到能帮助提高产品整体装配质量的关键装配节点,同时结合孪生层误差溯源机制,实现当前装配工序的误差在线溯源,并在数字孪生的几何模型基础上,实现误差源的可视化展示。

2 基于复杂网络的装配误差建模

在装配过程中,零部件制造误差与装配工艺误差都将导致装配误差,并且由于误差的种类、大小不确定,及在装配过程中通过零部件特征进行传递、累计与演化,因此可采用复杂网络对产品的装配过程模型进行动态描述,建立误差传递模型。

2.1 自适应生长误差传递网络构建

本文结合产品装配多工序的特点,采用时序快照网络理论^[14]对产品装配过程进行描述,得到自适应生长误差传递网络模型。在自适应生长误差传递网络模型中,节点由装配工艺信息提取的零部件特征与质量特征组成,节点间的连边关系代表特征间的连接关系,节点连边权重由装配现场数据通过公式计算获得,因此误差传递模型能对当前装配工序中误差的传递路径与传递强度进行实时描述。

时序快照网络介于静态网络与时序网络之间,由多个静态网络组成,既能体现时序性,也可运用静

态网络的相关算法进行计算。基于静态网络与时序快照网络的误差传递模型构建方法相比,使用基于时序快照网络的方法能够很好地利用装配多工序特点实现在线溯源分析。因此,本文采用时序快照网络理论构建误差传递模型,得到高时效性的误差溯源分析方法。

在装配过程中,装配体包含的零组件特征与装配质量特征在动态变化,因此网络中的节点与连边都与时间相关,因此需同时根据装配顺序与装配工艺信息提取的特征作为网络节点与节点连边,构建当前装配工序的自适应生长误差传递网络,可描述为

$$G_t = (V_t, E_t) \quad (1)$$

式中: t 表示当前装配时刻, $t \in [1, T]$, T 表示产品完成装配所需时间; G_t 表示 t 时刻在装零组件的自适应生长误差传递网络; V_t 表示在 t 时刻的在装零组件中,出现在装配工艺信息中的节点集合 $\{v_1, v_2, \dots, v_l\}$, l 表示 t 时刻节点集合中节点的数量; E_t 表示 t 时刻节点连边的集合 $\{e_1, e_2, \dots, e_h\}$, h 表示在装零组件包含的节点连边数量。

当装配进入新的工序时,误差传递网络 G_{t+1} 将在上一工序的误差传递网络 G_t 基础上进行节点与连边的增加。由于节点与连边分别表示装配体中零部件特征及其装配关系,因此新的装配工序不会对上一工序的节点与连边产生影响。若本道工序中某零部件特征与上一工序装配体中零部件特征具有装配关系,则代表该特征的节点之间将会产生新的连边关系,实现误差传递模型随装配工序更新。

2.2 装配现场数据驱动的误差传递网络赋权

为避免采用主观性较强的权重赋值方法从而导致模型不准确的问题,本文采用在装零组件的制造误差与定位误差等装配现场数据对网络权重^[15]进行赋值。

基于数字孪生系统获取现场装配过程中在装零组件的三维点云数据,从中获取零组件加工制造信息,计算出用以描述零部件制造误差的权重因子,计算公式如下

$$w_m = |l_s - l_o| / T_m \quad (2)$$

式中: w_m 为零部件制造误差的传递权重因子; l_s 为零部件尺寸的实际值; l_o 为零部件尺寸的设计值; T_m 为装配工艺允许的变动公差。

基于数字孪生系统,获取零组件安装位置信息、夹具夹取力与螺栓拧紧力等,计算出用以描述在装零组件定位误差、因外力产生的形位误差等误差的权重因子,计算公式如下

$$w_d = |d_s - d_o| / T_d \quad (3)$$

$$w_f = \Delta f / T_f \quad (4)$$

式中: w_d 、 w_f 分别表示特征之间的相对位置、对特征施加的外力所对应的误差传递权重因子; d_s 为特征之间的实际位置; d_o 为特征之间的理论位置; Δf 为外力误差; T_d 、 T_f 为特征之间的相对位置、外力允许的变动公差。

将两节点间包含的权重因子累加,得到各节点之间连边的最终权重,计算公式如下

$$w = \sum w_i \quad (5)$$

式中: w 为节点之间的最终误差传递权重; w_i 为节点之间涉及的误差传递权重因子,如 w_d 、 w_f 等。

使用权重对误差传递网络进行边权赋值或更新,在线构建自适应装配工序生长的误差传递模型,模型可描述为

$$G_t = (V_t, E_t, W_t) \quad (6)$$

式中: W_t 为 t 时刻装配网络 G_t 中节点与边所对应的权重集合。

综上,通过获得在装工序的自适应生长误差传递模型,用以描述在装配工艺误差与制造误差耦合作用下的装配误差传递路径与强度。

3 关键装配节点识别与溯源分析

关键装配节点是指在误差传递网络中能更大程度影响装配质量的节点,通过对关键装配节点质量进行管控,能显著降低装配质量问题发生概率。当在装工序整体质量或装配指标质量出现预警,则需

对关键装配节点或装配质量指标直接关联的节点进行误差溯源,获得装配误差源。

3.1 多算法动态融合的关键装配节点识别

结合上文内容可知,自适应生长误差传递模型中的节点、连边以及权值等随装配工序自适应生长,网络结构等均在动态变化,采用单一固定关键装配节点排序算法将无法达到最优效果。针对上述问题,提出如图 2 所示的基于多算法动态融合的关键装配节点识别方法(DFA),利用优劣解距离法(TOPSIS)确定最适合当前网络结构的排序组合,结合熵值法^[16]对组合结果进行融合,得到比单个固定指标更加全面、一致和准确的信息^[16],最后基于改进易感-传染-易感(SIS)模型^[17]进行方法验证。

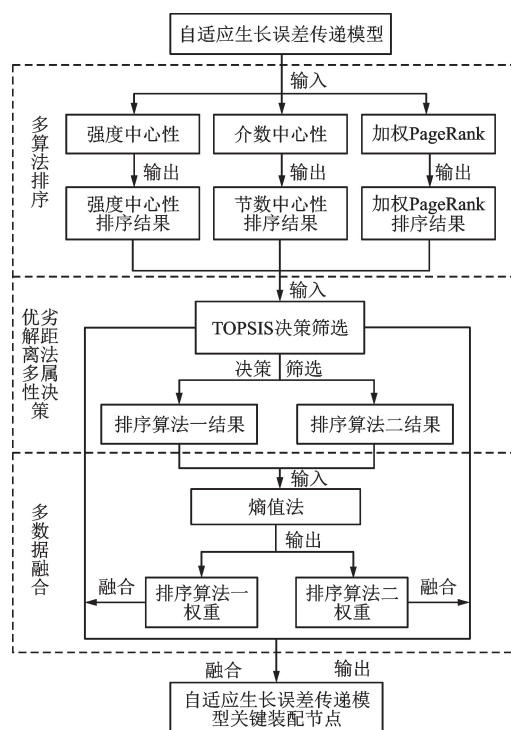


图 2 多算法动态融合排序方法

Fig. 2 Multi-algorithm dynamic fusion sorting method

3.1.1 多排序算法匹配

由于众多节点重要度排序方法^[18]如基于节点近邻的排序方法在不同场景下,其排序结果准确性存在较大波动,因此结合自适应生长误差传递网络结构、节点及权重等随装配工序动态变化的特点,采用 TOPSIS 进行多属性决策^[19],获得当前在装工序自适应生长误差网络的最优的排序算法组合。具体计算过程如下。

(1)根据自适应生长误差传递网络中需要评价的节点数量 n 、节点重要度排序算法数量 m ,构建初

始化节点评价分数矩阵

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: x_{ij} 为节点 v_i 在评价方案 j 中的得分, $j \in [1, m]$; v_i 表示第 i 个节点, $i \in [1, n]$;

(2) 由于各个节点重要评价方案的计算公式不同, 导致各节点重要度评估方案所得的节点指标量级并不一致, 故需要对决策矩阵进行标准化处理, 计算公式为

$$y_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \quad (8)$$

式中: $x_j^{\max}$ 为所有节点在评价方案 j 中获得指标的最大值; $x_j^{\min}$ 为所有节点在评价方案 j 中获得指标的最小值; y_{ij} 为节点 v_i 在评价方案 j 中标准化后的数值。

标准化的决策矩阵为

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nm} \end{bmatrix} \quad (9)$$

(3) 在上述标准化决策矩阵的基础上, 利用熵值法获取各指标权重, 记第 j 个指标的权重为 w_j , 熵值法计算流程见下一小节, 各指标权重与 $\mathbf{Y}$ 构成加权的标准决策矩阵为

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} w_1 y_{11} & w_2 y_{12} & \cdots & w_m y_{1m} \\ w_1 y_{21} & w_2 y_{22} & \cdots & w_m y_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_1 y_{n1} & w_2 y_{n2} & \cdots & w_m y_{nm} \end{bmatrix} \quad (10)$$

(4) 根据标准决策矩阵中每个指标的最大值与最小值确定正理想方案与负理想方案

$$\begin{cases} P = (P_1, P_2, \dots, P_m) \\ P_j = \max\{z_{1j}, \dots, z_{nj}\} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} N = (N_1, N_2, \dots, N_m) \\ N_j = \min\{z_{1j}, \dots, z_{nj}\} \end{cases} \quad (12)$$

式中: P 、 N 分别为所有方案的正理想方案与负理想方案; P_j 表示在评价方案 j 中的正理想值; N_j 表示在评价方案 j 中的负理想值; z_{ij} 表示第 i 个节点在在评价方案 j 中权重融合后的数值, $z_{ij} = w_j y_{ij}$ 。

(5) 计算评价方案 j 到正负理想方案的距离, 以及评价方案 j 与最优方案的贴近程度

$$D_{P_j} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_j - z_{ij})^2} \quad (13)$$

$$D_{N_j} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_j - z_{ij})^2} \quad (14)$$

$$C_j = \frac{D_{N_j}}{D_{P_j} + D_{N_j}} \quad (15)$$

式中: D_{P_j} 、 D_{N_j} 分别为评价方案 j 到正、负理想方案的距离; C_j 为评价方案 j 与最优方案的贴近程度。

最后, 根据计算出的贴近度 ($0 \leq C_j \leq 1$), 确定出评估结果, 选取排名前 2 的评价方案, 进行下一步数据融合。

3.1.2 基于熵值法的排序结果融合

为避免部分数据融合方法其权重分配会受到人为因素的影响, 进而导致结果不准确的问题^[20], 本节采用信息论方法中经典的熵值法, 其根据客观信息给出权重分配, 避免主观因素影响, 其计算过程如下。

(1) 构建节点指标矩阵

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: x_{ij} 为节点 v_i 在排序方案 j 中的得分, $j \in [1, m]$; v_i 表示第 i 个节点, $i \in [1, n]$; n 为节点个数, m 为排序方案个数。

(2) 为便于后续计算, 采用式(8)对指标矩阵进行归一化处理。在此基础上, 计算第 j 项算法下第 i 个节点指标所占比重

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (17)$$

式中: p_{ij} 为第 j 项算法下第 i 个节点指标所占比重。

(3) 计算算法的熵值

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \log p_{ij} \quad (18)$$

式中: $k = 1/\ln n$, n 为节点的个数; e_j 表示第 j 项算法的熵值。

(4) 计算算法的差异系数

$$g_j = 1 - e_j \quad (19)$$

式中: g_j 表示第 j 项算法的差异系数。

(5) 计算第 j 项算法的权重 W_j

$$W_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^m g_j} \quad (20)$$

(6) 将自适应生长误差传递网络中各节点的所

有排序方案指标与对应排序方案权重相乘,得到最终融合后的节点排序方案,表达式如下

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} x_{11}W_1 + \cdots + x_{1m}W_m \\ \vdots \\ x_{n1}W_1 + \cdots + x_{nm}W_m \end{bmatrix} \quad (21)$$

3.1.3 基于改进 SIS 模型的关键装配节点验证

关键装配节点识别主要考察异常质量信息在装配误差传递模型中的传播扩散对整个结构的影响,更加符合传播动力学模型的特点,故可采用传播动力学模型中 SIS 传播模型^[21]对排序结果进行验证。

SIS 模型可由以下微分形式描述

$$dS_t = (\gamma I_t - \beta I_t S_t) dt \quad (22)$$

$$dI_t = (\beta S_t I_t - \gamma I_t) dt \quad (23)$$

式中: β 为一个 S 状态节点在单位时间内与 I 状态节点接触而被感染的几率; γ 为 I 状态节点转变为 S 状态节点的概率; $s(t)$ 和 $i(t)$ 为 S 时刻的 S 状态节点和 I 状态节点所占比例, $s(t)$ 和 $i(t)$ 满足 $s(t) + i(t) = 1$ 。

在上述模型中,所有节点都是有相同的机会进行相互接触,没有考虑节点之间是否有连边以及连边权重的影响,而在自适应生长误差传递网络中,节点之间的影响需要通过连边传递,即有连边的节点才能相互影响,为此需要采用改进后的 SIS 网络^[15]。

3.2 基于自适应生长误差传递模型的误差溯源分析

在自适应生长误差传递模型中,各个特征节点之间通过混合边连接,因此两个节点之间的路径将不止一条,路径中的中间节点也不止一个。装配误差通过这些中间节点以及边进行传递、累计以及演化,故回溯源节点将被多个误差源节点共同影响。为确定影响最大的误差源节点,需回溯出传递路径中所有节点,具体回溯步骤如下:首先,将关键装配节点或装配质量指标直接关联的节点作为源节点 S;然后,查找网络中能直接达到源节点的误差源节点并记录;最后,再以第一步回溯获得的误差源节点 N_1 为起点,重复上述操作,便可得到所有误差源节点,但为保证误差溯源的精度,溯源路径中仅保存 3 步以内的节点。回溯过程如图 3 所示。

将回溯的节点记录为集合 G ,在此基础上对集合中的所有中间节点进行误差传递强度 C_{IR} ^[6] 计算,其计算公式为

$$k_i = \frac{S_i^{\text{out}}}{S_i^{\text{in}}} = \frac{\sum w_{ij}a_{ij}}{\sum w_{ji}a_{ji}} \quad (24)$$

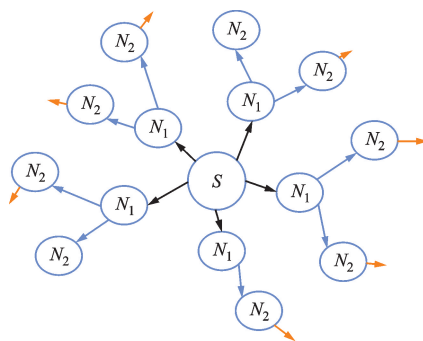


图 3 误差溯源流程

Fig. 3 Deviation traceability process

式中: k_i 为节点 v_i 的出强度与入强度的比值; S_i^{out} 为节点 v_i 的出强度; S_i^{in} 为节点 v_i 的入强度; w_{ij} 为节点 v_i 对节点 v_j 的权重;两个节点之间可能有连边,但是权重是有方向性的,故有可能节点相连但权重为 0,为此引入 a_{ij} 来表示节点 v_i 对节点 v_j 是否有权重,有则记为 1,没有则记为 0。

计算出各个节点的出强度与入强度的比值之后,在此基础上计算误差传递强度,其表达式为

$$C_{IRi} = S_i^{\text{out}} \prod_{i \in G_r} k_i \quad (25)$$

式中: G_r 为集合 G 中第 r 条路径; i 为路径 r 中第 i 个节点。

通过上述计算,可确定出误差源节点,对误差源节点的质量进行重点监控以及优化,可保证装配路线的正常运行。

4 案例研究

为了验证本文所提的方法的有效性,选取固体火箭发动机喷管^[22]作为研究对象。固体火箭发动机喷管装配实验平台如图 4 所示。喷管组成部件及其装配工序如图 5 所示,共包含 5 个装配工序。下文将结合装配工艺信息、现场装配数据以及组件加工制造数据进行案例验证。



图 4 固体火箭发动机喷管装配实验平台

Fig. 4 Solid rocket engine nozzle assembly experimental platform

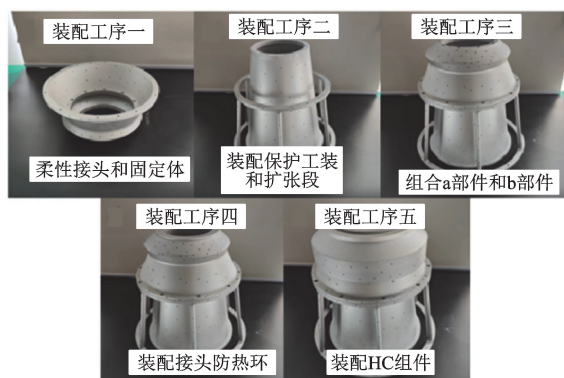


图 5 喷管装配工序示意图

Fig. 5 Nozzle assembly process

4.1 喷管自适应生长误差传递模型构建

为便于网络描述,利用标签替换特征名,喷管部分特征含义及其标签符号如表 1 与图 6 所示。

表 1 部分特征含义及其标签

Table 1 Some feature meanings and their labels

特征含义	标签	特征含义	标签
柔性接头下底面外径	D_{RB}	接头防热环内部接触面	S_{JR}
柔性接头高度	H_R	HC 顶部外径	D_{HT}
柔性接头与扩展段接触面	S_{RK}	柔性接头顶部外径	D_{RT}
柔性接头上接触面	S_{RT}	扩展段顶部外径	D_{KT}
柔性接头下接触面	S_{RB}	固定体下接触面	S_{GB}
固定体上接触面	S_{GT}	保护工段高度	H_B
柔性接头上顶面厚度	R_{RT}	保护工段上接触面	S_{BT}
固定体高度	H_G	扩张段高度	H_K

将当前装配工序新增的特征节点加入上一工序的自适应生长误差传递网络中,并依据装配工艺信息,对新加入节点之间、新节点与已存在节点之间建立连接关系,从而实现误差传递网络跟随装配工序自适应生长。在喷管整体装配过程中,误差传递网络随装配工序自适应生长过程如图 7 所示。

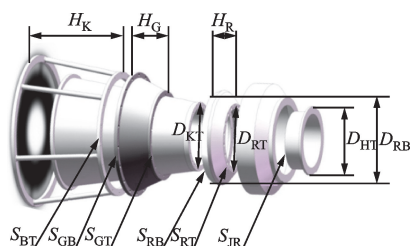


图 6 部分特征及标签示意图

Fig. 6 Schematic diagram of some features and labels

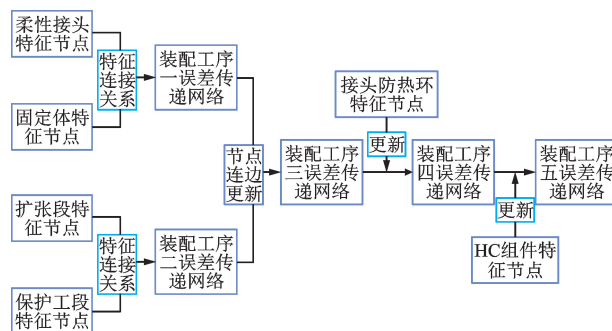


图 7 喷管误差传递网络自适应生长过程

Fig. 7 Adaptive growth process of nozzle error transfer network

4.2 喷管装配过程关键装配节点识别与验证

结合 3.1.1 节中所述,本节选取节点数最多的误差传递模型进行关键装配识别与结果验证。首先,选取 3 种针对加权有向网络改进的重要节点排序算法,包含强度中心性(SC)、介数中心性(BC)与基于加权改进的 PageRank(PR)。将 3 种重要节点排序算法分别应用于误差传递模型中,得到相关结果,其中 SC 算法排序的关键装配节点依次为 D_{KT} 、 S_{JR} 、 H_K ; BC 算法排序的关键装配节点依次为 S_{JR} 、 D_{KT} 、 D_{HT} ; PR 算法排序的关键装配节点依次为 D_{RB} 、 D_{RT} 、 H_K 。

其次,要用 TOPSIS 算法对排序结果计算贴近度,得到 SC 贴近度为 0.1841, BC 贴近度为 0.2032, PR 贴近度为 0.0214。从结果中可看出, SC 与 BC 得分远大于 PR 排序算法,说明针对当前误差传递模型的结构, SC 与 BC 排序算法的结果更加准确,因此选取排名靠前的 SC 算法与 BC 算法进行组合。

最后,结合 3.1.2 节所述,采用熵值法对 BC 与 SC 排序结果进行数据融合,得到 SC 与 BC 两者的权重分别为 0.421 099 与 0.578 901。将各个节点的得分与方案权重值进行融合,得到各个节点最终的排序结果,依次为 D_{KT} 、 S_{JR} 、 H_K 、 S_{BT} 、 S_{GT} 。

从各排序算法得到的排序结果可以看出,扩张段零部件特征出现频率最高,说明扩张段零部件在整个装配过程中有十分重要的作用。同时,通过分析喷管结构可知,扩张段处在多个装配质量指标中,因此其质量将更大程度影响到喷管装配质量,装配过程中需要重点关注扩张段的装配质量。

为比较各算法在最终装配工序误差传递模型中排序结果的准确性,采用改进 SIS 模型对排序结果进行评价。本文的感染率取 0.1,恢复率为 0.05,迭代次数为 35。考虑到算法随机性的影响,本文进行了 10 000 次仿真,并取其平均值作为对比依据。首先,将各个算法排序前列的节点设置为初始感染源,初始感染源在相同的时间在最终装配工序误差传递

模型中进行传播;然后,比较初始感染源最终的传播范围以及传播速率。同时,对本文所提排序算法 DFA 排名前五的节点与随机节点进行对比验证,通过感染源传播范围以及传播速率,验证本文算法对节点排序的准确性。

对 4 种排序算法进行对比实验,结果如图 8 所示。由图 8 可知,在相同时间以及相同初始感染节点数量的情况下,DFA 算法确定出的关键节点传播速度比 SC、BC 与 PR 更好,能更快的感染 S 状态节点;针对自适应生长误差传递网络,DFA 相比于 BC、SC 与 PR 方法更优。同时从图 9 可知,DFA 算法确定的关键装配节点的传播速度与传播范围符合关键装配节点排序,且传播速度与传播范围均高于非关键节点。

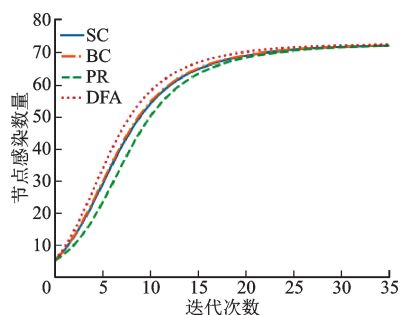


图 8 4 种排序算法对比验证结果

Fig. 8 Comparison and validation of sorting algorithms

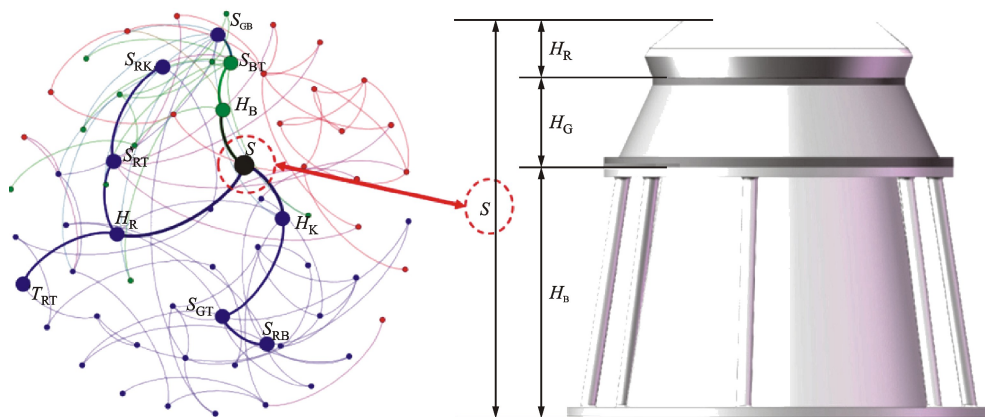


图 10 误差传递路径及装配体结构指标示意图

Fig. 10 Schematic diagram of error transmission path and assembly structure index

从图 10 中可知,误差源节点有 H_R 、 S_{RT} 、 S_{RK} 、 S_{RB} 、 T_{RT} 、 H_G 、 S_{GT} 、 H_B 与 S_{BT} 。结合式(25)对回溯到的所有误差源节点进行误差传递强度分析,得到如图 11 所示的分析结果。

从图 11 中可以看出, H_R 对目标节点的影响强度最大,说明 H_R 是本次装配质量问题的误差节点,因此只需对该节点进行优化,便能优化装配质量。

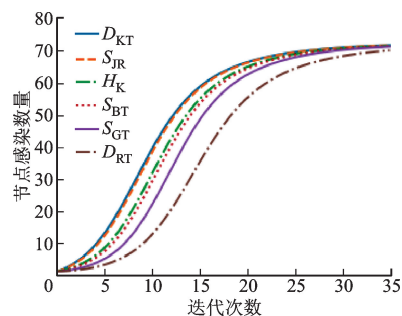


图 9 DFA 排序算法结果验证

Fig. 9 DFA sorting algorithm results verification

4.3 基于喷管误差传递模型的误差溯源分析

固体火箭发动机其结构复杂,由多种部件组成,对整体尺寸要求严格。本文在进行第 3 步装配工序时,装配精度预测系统检测出当前装配体轴向高度偏低,若不及时处理,将导致装配成品高度整体偏低,从而降低固体火箭发动机性能。

针对上述装配工序出现的质量问题,在该装配工序误差传递模型的基础上,结合 3.2 节知识,进行误差路径回溯与误差源辨识。先将该指标节点设为源节点,然后在误差传递模型中进行误差传递路径回溯,最后得到如图 10 所示的可视化分析结果。

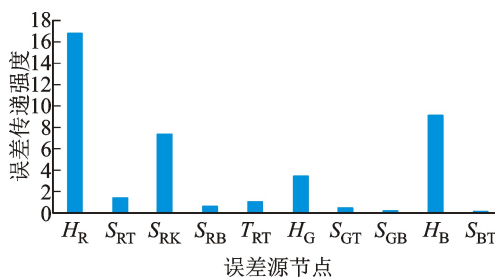


图 11 各节点误差传递强度分析

Fig. 11 Analysis of error transmission intensity of each node

为验证本文结果的准确性,利用三坐标测量仪对柔性接头、固定体以及保护工段进行高度测量,测量结果如表2所示。从表2可以看出,柔性接头的误差值最大,且超出了公差允许范围,因此柔性接头的整体高度误差是装配体装配尺寸误差的误差源。

表2 测量结果

Table 2 The measurement results

测量项	理论值	测量值
柔性接头高度/mm	58.000 00	57.802 81
固定体高度/mm	92.000 00	92.005 19
保护工段高度/mm	258.000 00	258.058 24

5 总 结

(1)本文结合数字孪生技术,提出了面向装配误差分析的数字孪生框架,并基于时序快照网络构建了自适应生长误差传递模型。

(2)本对自适应生长误差传递模型进行关键装配节点识别,得到了影响装配质量的关键节点。

(3)在误差传递模型的基础上,采用逆回溯算法与误差传递强度分析,实现了装配误差在线溯源分析。

(4)以喷管装配为例,通过获取装配现场数据,构建了自适应生长误差传递模型。在此基础上结合TOPSIS与数据融合方法实现了关键装配节点在线识别,同时结合逆回溯算法与误差传递强度分析,实现了问题工序装配误差的在线溯源。

本文初步实现了装配误差在线溯源分析,其方法仍需进一步改进。下一步,本课题组将继续优化误差权重因子的计算方式,并在本文基础上开展产品装配质量的自适应控制。

参考文献:

- [1] 郭飞燕,刘检华,邹方,等. 数字孪生驱动的装配工艺设计现状及关键实现技术研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 110-132.
GUO Feiyan, LIU Jianhua, ZOU Fang, et al. Research on the state-of-art, connotation and key implementation technology of assembly process planning with digital twin [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(17): 110-132.
- [2] 戴宏伟,陈琨,于慧,等. 雅可比旋量的装配体并联结构公差分析方法研究 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(5): 156-165, 222.
DAI Hongwei, CHEN Kun, YU Hui, et al. Toler-

- ance analysis of partial parallel assemblies based on Jacobian-Torsor model [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(5): 156-165, 222.
- [3] WANG Hongwei, ZHANG Genbao, TAO Guibao, et al. A novel structural decomposition method for error propagation mechanism analysis based on meta-action unit theory [J]. IEEE Access, 2019, 7: 95108-95121.
- [4] LI Yunyong, ZHAO Yong, YU Haidong, et al. Modeling deviation propagation of compliant assembly considering form defects based on basic deviation fields [J]. Assembly Automation, 2019, 39(1): 226-242.
- [5] 余德文,赵强强,陈飞飞,等. 利用结构等效转换的空间可展机构装配误差建模与灵敏度分析 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(4): 15-23.
YU Dewen, ZHAO Qiangqiang, CHEN Feifei, et al. Assembly error modeling and sensitivity analysis for spatial deployable mechanisms with structural equivalent transformation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(4): 15-23.
- [6] 祝鹏,余建波,郑小云,等. 机械装配过程的偏差传递网络建模与误差溯源 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(8): 1582-1593.
ZHU Peng, YU Jianbo, ZHENG Xiaoyun, et al. Variation propagation network-based modeling and error tracing in mechanical assembling process [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(8): 1582-1593.
- [7] ZHANG Chao, ZHOU Guanghui, HE Jun, et al. A data- and knowledge-driven framework for digital twin manufacturing cell [J]. Procedia CIRP, 2019, 83: 345-350.
- [8] 胡兴,刘检华,庄存波,等. 基于数字孪生的复杂产品装配过程管控方法与应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 642-653.
HU Xing, LIU Jianhua, ZHUANG Cunbo, et al. Digital twin-based management method and application for the complex products assembly process [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(2): 642-653.
- [9] ZHUANG Cunbo, GONG Jingcheng, LIU Jianhua. Digital twin-based assembly data management and process traceability for complex products [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58, Part B: 118-131.
- [10] 张超,周光辉,肖佳诚,等. 数字孪生制造单元多维多尺度建模与边—云协同配置方法 [J/OL]. 计算机集成制造系统[2022-05-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20210601.0907.004.html>.
ZHANG Chao, ZHOU Guanghui, XIAO Jiacheng, et al. Multi-dimensional and multi-scale modeling and edge-cloud collaborative configuration method for digital twin manufac-

- turing cell [J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems [2022-05-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20210601.0907.004.html>.
- [11] 林海龙, 周雅光, 张超, 等. 基于工业互联网的燃料乙醇生产线数字孪生框架与建模方法 [J]. 应用科技, 2022, 49(1): 20-26.
- LIN Hailong, ZHOU Yaguang, ZHANG Chao, et al. A digital twin framework and a modeling method of fuel ethanol production line based on industrial internet [J]. Applied Science and Technology, 2022, 49(1): 20-26.
- [12] 常丰田, 周光辉, 李锦涛, 等. 边-云协同下智能制造单元的物联网协调配置方法 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(6): 184-194.
- CHANG Fengtian, ZHOU Guanghui, LI Jintao, et al. Co-ordinated configuration method for internet of things network of smart manufacturing cells under edge-cloud collaboration [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(6): 184-194.
- [13] 张超, 周光辉, 李晶晶, 等. 新一代信息技术赋能的数字孪生制造单元系统关键技术及应用研究 [J/OL]. 机械工程学报 [2022-08-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20220727.1035.004.html>.
- ZHANG Chao, ZHOU Guanghui, LI Jingjing, et al. Research on key technologies and application of new IT-driven digital twin manufacturing cell system [J/OL]. Journal of Mechanical Engineering [2022-08-31]. [http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20220727.1035.004.html)
- TH.20220727.1035.004.html.
- [14] 刘显. 时序网络节点重要性研究 [D]. 江苏徐州: 中国矿业大学, 2020: 17-19.
- [15] 张嘉锐. 汽轮机通流间隙装配质量网络建模与分析方法研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2021: 43-44.
- [16] 张崇兴. 基于预测和 D-S 证据理论的多传感器数据融合研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021: 7-16.
- [17] WANG Xinhe, WANG Zhen, SHEN Hao. Dynamical analysis of a discrete-time SIS epidemic model on complex networks [J]. Applied Mathematics Letters, 2019, 94: 292-299.
- [18] 任晓龙, 吕琳媛. 网络重要节点排序方法综述 [J]. 科学通报, 2014, 59(13): 1175-1197.
- REN Xiaolong, LV Linyuan. Review of ranking nodes in complex networks [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(13): 1175-1197.
- [19] 先九洲. 基于多指标融合的复杂网络节点重要度评估方法 [D]. 云南大理: 大理大学, 2021: 17-42.
- [20] CUI Xiaoyan, ZHAO Tao, WANG Juan. Allocation of carbon emission quotas in China's provincial power sector based on entropy method and ZSG-DEA [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 284: 124683.
- [21] LI Huicong, PENG Rui, WANG Fengbin. Varying total population enhances disease persistence: qualitative analysis on a diffusive SIS epidemic model [J]. Journal of Differential Equations, 2017, 262(2): 885-913.

(编辑 刘杨 荆树蓉)