

汽轮机通流间隙精度预测与修配规划方法研究

张嘉锟, 陈琨, 高建民, 高智勇, 戴宏伟, 杜欣霏
(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对汽轮机通流间隙装配精度难以保障, 需要反复装配及调整, 缺乏事先的仿真、预判及修正, 难以适应数字化装配转型需求的问题, 提出一种汽轮机通流间隙精度预测与修配规划方法。该方法首先基于规则推理进行一次修配, 确保汽轮机可以满足除通流间隙以外的其他主要装配要求, 防止因不能成功装配而引起的零部件返修; 其次根据产品装配工艺信息, 通过构建装配特征网络, 引入深度优先搜索算法, 生成通流间隙装配尺寸链, 进而实现通流间隙的精度预测; 然后考虑尺寸链之间的耦合特性, 基于案例推理进行二次修配, 通过案例检索获得修配环的修配范围, 以及基于粒子群算法的最优修配量, 确保通流间隙能够满足设计要求。以某型号汽轮机装配单元为例进行应用验证, 结果表明, 提出的方法可成功根据采集到的实测数据实现通流间隙的精度预测, 并输出对应的修配建议, 为实物装配提供参考, 进而提高汽轮机的一次装配成功率及装配效率。

关键词: 通流间隙; 精度预测; 修配规划; 规则推理

中图分类号: TP391.7 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202112011 **文章编号:** 0253-987X(2021)12-0087-11



OSID 码

Accuracy Prediction and Repair Planning of Steam Turbine Flow Clearance

ZHANG Jiakun, CHEN Kun, GAO Jianmin, GAO Zhiyong, DAI Hongwei, DU Xinfei
(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: It is difficult to guarantee assembly accuracy of steam turbine flow clearance due to repeated assembly and adjustments in the case of lack of prior simulation, prediction and correction. To meet the requirements of digital assembly transformation, a steam turbine flow clearance accuracy prediction and repair planning method is proposed. The primary repair is carried out following the rule-based reasoning to ensure the turbine, except the flow clearance, to meet the main assembly requirements and prevent the parts from being repaired due to assembly failure. The assembly feature network is constructed according to the product assembly process information, and the depth first search algorithm is used to realize the generation of the flow clearance assembly dimension chains, then the accuracy prediction of flow clearance is realized. Considering the coupling characteristics of the dimension chains, the secondary repair is carried out following the case-based reasoning, and via case retrieval the repair range of repair ring is obtained and the optimal repair quantity is achieved with particle swarm optimization algorithm to ensure the flow clearance to meet the design requirements. A turbine assembly unit is used as an example for application verification. The results show that this method can successfully predict the accuracy of flow clearance according to the collected measurement data and can output

corresponding repair suggestions, and then improve the first-time assembly success rate and assembly efficiency of steam turbine.

Keywords: flow clearance; accuracy prediction; repair planning; rule-based reasoning

装配是产品制造中的关键环节,直接影响产品性能及最终质量^[1]。通流间隙是汽轮机装配时需要严格保证和把控的重要质量特性之一,通流间隙的大小不仅影响汽轮机的热效率,也直接影响机组的运行安全^[2-3]。汽轮机产品零部件众多,尺寸跨度大,装配工艺复杂,加之受重力等因素的影响,使得通流间隙常常难以满足设计要求。目前企业多采用实物预装配的方式来确定装配效果、调整配合余量,进而保证复装后满足设计要求。实际生产中常常需要经过反复的装配、测量以及调整,占用了大量的人力、物力和时间,并且具有一定的安全隐患。开展汽轮机通流间隙精度预测与修配规划研究,利用实际测量数据对装配过程进行事先仿真、预判及修正,进而指导后续实物装配过程,对提高汽轮机一次装配成功率、装配效率及最终产品质量具有重要意义。

汽轮机一般为单件小批量生产,其组成环多,通流间隙精度要求很高,装配工艺方法以修配法为主^[4]。因此,汽轮机通流间隙装配质量的保障分为装配精度的预测和修配规划两部分。其中,装配精度预测可分为面向设计阶段的预测和面向装配阶段的预测^[5],前者采用带公差信息的零件和装配模型,后者则基于带测量尺寸和误差的零件和装配模型。近年来,小位移旋量模型(SDT)^[6]、公差变动矢量图模型(T-Map)^[7]、雅克比旋量模型(Jacobian-Torsor)^[8]等被广泛应用于设计阶段的公差建模与精度预测,而面向装配的精度预测研究相对较少,目前以尺寸链和状态空间模型为主。Bjorke等首先实现了二维尺寸公差链的自动生成^[9];王恒等基于CAD装配模型,利用图论理论实现了三维装配尺寸链的自动生成^[10];文献[11-13]均采用构建装配体图模型,通过路径搜索算法来生成装配尺寸链的思路;文献[14-15]通过建立信息单元来自动生成装配尺寸链。此外,自Jin等提出描述多工位装配过程中误差传递的状态空间模型^[16]以来,一些学者将其发展并应用于汽车车身、精密机床等装配过程的精度预测^[17-18]。在修配规划方面,目前主要根据装配精度的实际测量结果,依靠技术人员的经验,需要反复吊装及测量。为改善上述问题,李兴炜通过建立装配偏差传递矢量模型,完成了某型号汽轮机通流间隙的精度预测及预修配规划,在一定程度上提高了该

型号汽轮机的一次装配成功率^[19],然而该模型构建过程复杂,且不具备拓展能力,对于单件小批量生产的汽轮机而言具有一定的局限性。

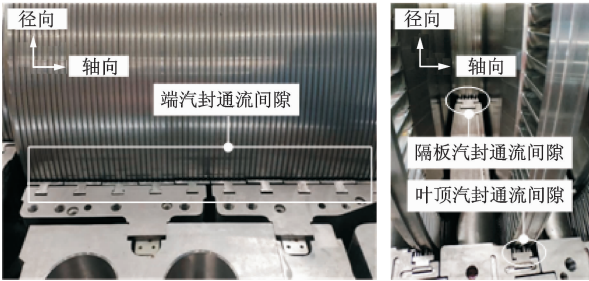
针对汽轮机通流间隙的应用研究方面不足包括:①在精度预测方面,汽轮机装配工艺复杂,难以获得基于状态空间模型等方法需要的一些数据,而且在计算过程中,多次测量引入的随机误差以及大量矩阵变换导致的数据失真问题使得预测精度难以保障;通流间隙装配尺寸链数目繁多、组成复杂、存在耦合,现有尺寸链生成方法仍会出现错漏的情况,一些方法建模复杂,拓展困难。②在修配规划方面,单件小批量的生产模式下,汽轮机企业迫切需要一种具有拓展能力,能够应用于更多机型的修配规划方法;汽轮机的一个修配环会同时影响多个通流间隙的精度,现有修配方法暂未考虑尺寸链间的耦合影响。③针对汽轮机通流间隙及类似复杂产品的装配精度预测与修配问题尚缺乏一种系统有效的解决方案。

针对上述问题,本文提出一种汽轮机通流间隙精度预测与修配规划方法。首先基于规则推理进行一次修配,确保汽轮机满足除通流间隙外的其余装配要求;然后通过构建装配特征网络,基于深度优先搜索实现通流间隙装配尺寸链的生成,进而完成通流间隙的精度预测;最后基于案例推理进行二次修配,通过对修配环的调整来保证通流间隙的精度要求。以某型号汽轮机为例对本文方法进行应用验证,所得结果为后期实物装配过程提供了参考。

1 通流间隙预测与修配总体方案

汽轮机通流间隙是指汽轮机转动部件与静止部件之间的间隙。其按照方向一般可分为轴向通流间隙和径向通流间隙;按照分布位置一般可分为端汽封通流间隙、隔板汽封通流间隙和叶顶汽封通流间隙,如图1所示。其中,径向隔板汽封通流间隙和径向叶顶汽封通流间隙误差传递关系复杂,一般需要沿着汽封内径在上、下、左、右4个方向进行测量,且精度要求高,实际装配中较难保证,因此本文主要讨论这两种通流间隙。

针对上述通流间隙的精度保障问题,企业目前仍采用多装多试,反复调整的方式,费时费力且安全



(a)端汽封通流间隙 (b)其他通流间隙

图 1 汽轮机通流间隙

Fig. 1 Flow clearance of steam turbine

隐患多,难以适应现代数字化装配环境的转型需求。为改善上述问题,本文以汽轮机装配时的实际测量数据为基础,从通流间隙装配精度的预测和修配规划两部分出发,提出一种汽轮机预装配仿真方案,根据精度预测的结果进行预修配调整,进而减少重复测量及装配次数,从而在一定程度上解决汽轮机总装技术难度大、周期长的问题。

根据对象和目标的不同,可将汽轮机的修配分为两种,本文将其定义为一次修配和二次修配。其中,一次修配的主要目标是进行局部装配关系中主要装配要求的检查,在不考虑通流间隙精度的前提下确保汽轮机可以顺利装上,主要的修配对象为具有较高装配要求的各个零部件。二次修配的目标是使通流间隙满足装配精度要求,确保汽轮机可以顺利装好,修配的对象为设计中预留的修配环。通流间隙装配精度的预测应在两次修配之间进行,因为只有在进行一次修配后,确保汽轮机满足主要装配要求后的精度预测才有意义,而二次修配则是以精度预测的结果为基础进行的。

图 2 所示为本文提出的汽轮机通流间隙预测与修配总体方案,主要可分为一次修配、精度预测、二次修配 3 个阶段。首先输入实际测量数据,基于规则推理,对不符合装配要求的特征进行一次修配,在

不考虑通流间隙的情况下确保汽轮机可以顺利装配;其次通过构建装配特征网络进行通流间隙装配尺寸链的生成与求解,实现通流间隙的精度预测;最后根据通流间隙的超差量,基于案例推理进行二次修配,通过对修配环的调整确保通流间隙能够满足设计要求。整合上述结果,输出通流间隙的预测结果及对应的修配建议,为实物装配过程提供参考。

2 通流间隙精度预测与修配规划

2.1 基于规则推理的一次修配

汽轮机零部件及特征众多,装配工艺复杂。在实物装配前,基于零件实测数据进行干涉检查及主要的装配要求检查,并对不合格零件进行提前修配,防止因不能成功装配而引起的零部件返修,这对提升装配效率具有重要意义。此外,确保汽轮机零部件之间满足装配要求,可以顺利进行装配,是后续通流间隙精度预测以及二次修配的基础。

汽轮机主要零件多采用多轴精密机床进行加工,加工误差相对较小,因此在众多的装配要求中,本文只对易出现问题的关键零部件进行检查。在单件小批量生产方式下,不同型号汽轮机的结构及尺寸或许存在较大差异,然而它们需要满足的装配要求却存在一定的共性,并且遵循一定的规则。

作为一种专家系统,规则推理可用来模仿专家解决异常事件,将具有因果关系的知识采用规则来描述,这些规则中包含问题以及与问题对应的解决方案^[20],这与汽轮机装配要求的检查及修配规划的要求相符。要实现基于规则推理的汽轮机一次修配,首先应该建立相应的规则库,获取途径见表 1。

推理规则可以采用“If-Then”的形式来表示,其中“If…”表示规则的前提属性,“Then…”表示结论。对于汽轮机而言,可将不符合装配要求的异常测量参数作为规则的前提,对应的修配建议作为结论,表 2

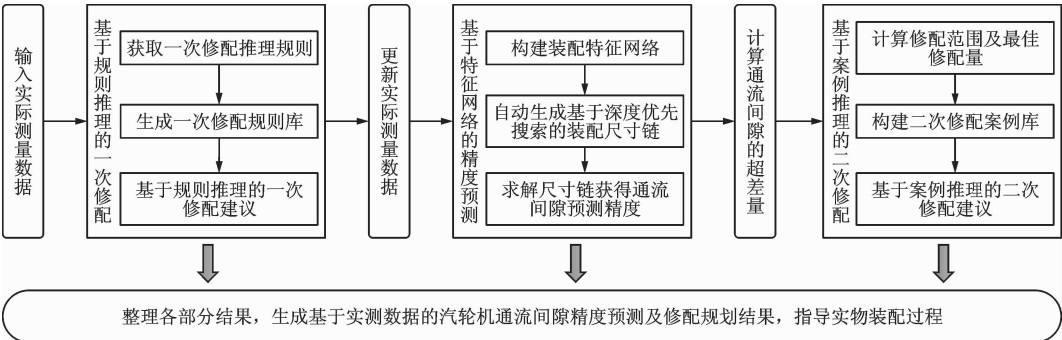


图 2 汽轮机通流间隙预测与修配总体方案

Fig. 2 General scheme for accuracy prediction and repair of steam turbine flow clearance

表 1 汽轮机一次修配的推理规则获取途径

Table 1 Approach to obtaining reasoning rules for primary repair of steam turbine

获取途径	具体内容
现场观察记录	从实际装配中易发生的装配异常事件及解决方案中总结经验,获取规则
专家经验知识	将专家的相关经验知识形成规则
装配误差分析	通过对装配误差的分析建立规则
历史资料总结	从历史数据及资料中总结规则

表 2 汽轮机一次修配的规则表示

Table 2 Rule representation of steam turbine primary repair

If		Then	
异常参数	异常现象	异常原因	修配建议
$S_g < S_{gm}$	隔板悬挂销配合间隙过小	悬挂销键宽过大	悬挂销键宽减少 $S_{gm} - S_g$
$s_{hl} \geq s_{hr}$ 且 $\Delta S_h > S_d$	隔板水平度不合格	隔板右侧低于左侧	隔板右侧增加厚度为 ΔS_k 的调整垫片
$S_i > S_{im}$	内缸定位键配合过盈量大	定位键宽度过大	定位键键宽减少 $S_i - S_{im}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

为部分汽轮机一次修配的规则表示。以汽轮机隔板及悬挂销的装配要求为例进行说明,如图 3 所示,隔板下半和悬挂销之间存在间隙配合,若悬挂销的键宽实际测量值为 S_i ,隔板下半的键槽实际测量值为 S_c ,则该配合的实际间隙为 $S_g = S_c - S_i$ 。当基于实测值计算得到的 S_g 小于需满足的最小间隙 S_{gm} 时,则应进行修配,将悬挂销的键宽减少 $S_{gm} - S_g$ 方可满足装配要求。据此可得规则:If $S_g < S_{gm}$, Then 悬挂销键宽减少 $S_{gm} - S_g$ 。

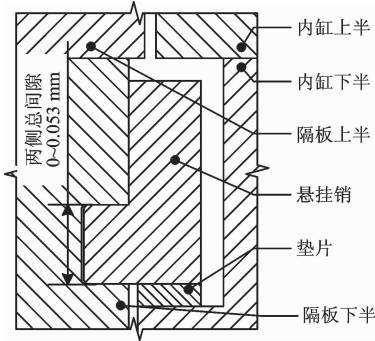


图 3 某型号汽轮机悬挂销隔板装配图

Fig. 3 Assembly drawing of suspension pin-baffle of a steam turbine

完成汽轮机一次修配规则库的建立后,即可基于规则进行零件异常测量参数的推理,获取对应的修配建议。图 4 所示为基于规则推理的汽轮机一次修配流程,主要包含模式匹配、规则选择、规则执行等部分。通过零件实际测量数据之间的关系匹配规则,在满足条件的规则中选择合适的几条或几条进行执行,进而得到对应的零件修配建议。

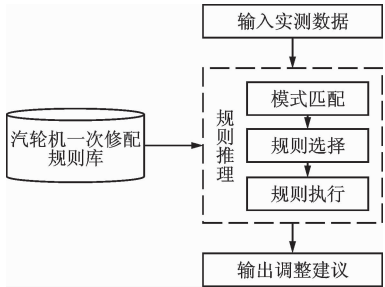


图 4 基于规则推理的一次修配流程

Fig. 4 Primary repair process following rule-based reasoning

2.2 基于特征网络的精度预测

汽轮机经过一次修配后,可满足除通流间隙以外的其他装配要求,在此基础上,本节基于一次修配更新后的零件实测值进行通流间隙的预测。网络科学作为一门交叉学科,理论方法和建模思路在生产制造领域得到了广泛的研究和应用^[21]。因汽轮机组成复杂,文献[22]建立了汽轮机零件网络,并根据通流间隙对汽轮机整机进行了单元的分解,从而可以以一种分而治之的方式进行通流间隙的保障。基于文献[22]得到的装配单元,结合汽轮机特点及企业现状,本文提出基于装配特征网络的汽轮机通流间隙精度预测方法,具体过程如下。

2.2.1 装配特征网络的构建 如图 5 所示,以汽轮机零件层级装配单元为基础,进行装配特征层级网络建模,具体步骤如下。

步骤 1:根据装配工艺表将零件层级的节点向特征层级映射,产生由装配特征(关键接触面的各个质量特征等)组成的特征节点集 V 。

步骤 2:根据装配顺序,确定特征节点集 V 中各个特征节点之间的连接关系(面与面接触、面与面偏置以及以面为基准定位等),连接关系均从先安装面指向后安装面,如图 5 中的特征 a1 和 b1 等。对于同属于一个零件的节点,若存在尺寸约束等连接约束,则采用无向连接,如图 5 中的特征 a1 和 a2 等,综上可得到特征网络的边集 E 。

步骤 3:以各连接关系的实际测量数据作为连边的权重,整合得到网络的权重集 W 。

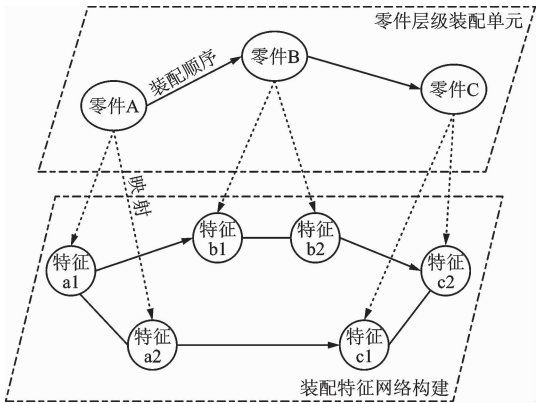


图 5 装配特征网络建模过程

Fig. 5 Assembly feature network modeling process

综上可完成装配特征网络的构建,表示为 $G=(V,E,W)$ 。

2.2.2 装配尺寸链(环路)的生成 建立汽轮机通流间隙的装配尺寸链,是进行通流间隙精度预测的前提和基础。经调研发现,汽轮机通流间隙的装配尺寸链具有以下特点。

(1)通流间隙装配尺寸链组成复杂。汽轮机零部件及特征众多,通流间隙是汽轮机总装过程中最后形成的一环,其尺寸链涉及的零部件数目繁多,组成环相对复杂。

(2)通流间隙装配尺寸链数目繁多。汽轮机需要保证的通流间隙数量很多,且每一个通流间隙均需要同时满足上、下、左、右 4 个方向的精度要求,对应着 4 条尺寸链。综上,通流间隙需要建立的尺寸链数目极多,并且具有一定的方向性。

(3)通流间隙装配尺寸链存在耦合。通流间隙本质上是由汽轮机的转子和静子形成的,静子中的缸体是其余部件的重要载体,汽轮机一个模块仅拥有一个转子,这就决定了通流间隙的各条装配尺寸链间存在相同的零件及组成环,它们的尺寸同时影响多个通流间隙的装配精度。因此,同一平面的装配尺寸链在生成及求解时必须考虑耦合特性的影响。

上述特点决定了采用传统人工建立的方式存在效率低下、容易出错或遗漏的弊端。然而,从网络图的角度来看,装配尺寸链的封闭性决定了其本质上是一种环路,因此通流间隙装配尺寸链的生成问题可转化为特征网络 G 的环路搜索问题。

深度优先搜索(DFS)是一种常用的网络图的遍历方法,基于 DFS 能够实现网络的环路搜索,进而生成装配尺寸链。生成装配尺寸链生成需要遵循的原则^[23]如表 3 所示,可得到特征网络中尺寸链的生

成规则:搜索含有封闭环特征、不含影响因素小的特征、含有特定方向约束特征的最小环路。此外,因尺寸链不存在方向,因而在搜索过程中将特征网络 G 视为无向图处理。

表 3 尺寸链生成原则及对应的环路搜索规则

Table 3 Dimension chain generation principles and corresponding loop search rules

装配尺寸链生成原则	特征网络环路搜索规则
尺寸链封闭环的确定	以构成封闭环的装配特征为基础进行搜索
装配尺寸链简化原则	搜索过程中剔除影响较小的装配特征
装配尺寸链组成的最短路线(环数最少)原则	寻找特征网络中符合条件的最小环路
装配尺寸链的方向性	搜索过程中添加对方向起约束作用的装配特征
组成环的无向性	搜索过程中忽略特征网络连边方向

2.2.3 装配尺寸链(环路)的求解 基于生成的装配尺寸链进行正计算(求解封闭环)即可获得通流间隙的预测精度。在求解尺寸链时,首先应进行增减环的判断,本文利用环路搜索快速实现了尺寸链的生成,然而却损失了尺寸链的物理结构,难以采用传统的概念法等进行增减环判断。李世春总结了一种基于串并联关系的尺寸链增减环判断方法,如图 6 所示,具有串联关系的组成环行走方向不变,具有并联关系的组成环行走方向改变^[24]。汽轮机虽然结构复杂,但其装配过程在竖直方向大体遵循由下至上,在水平方向大体遵循由中间至两边的方向,因而具有并联关系的组成环数目较少,且一般位于尺寸链的两端。因此,只需要根据串并联关系对环路中部分特征间的方向进行修正,即可完成增减环的判断。

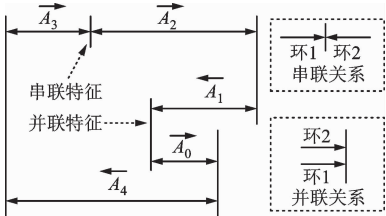


图 6 尺寸链的增减环判断

Fig. 6 Increasing or decreasing ring judgment of dimension chain

完成尺寸链(环路)的方向修正后,即可对封闭环进行求解,如图 7 所示。图中 A_0 为封闭环,与其

方向相同的为减环,方向相反的为增环,设置环路求解的正方向为封闭环反方向,则封闭环为其余环的权重矢量和。

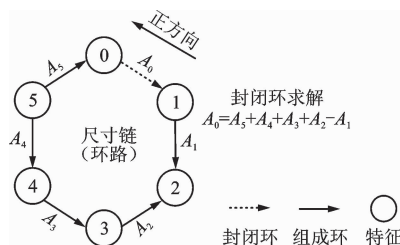


图7 基于权重矢量和的尺寸链(环路)求解

Fig. 7 Solving dimension chain (loop) based on the vector sum of weights

2.3 基于案例推理的二次修配

汽轮机的修配环同时影响多个通流间隙,并且通流间隙装配精度要求很高,因此在实际装配过程中很难一次装配成功,需要对修配环进行调整以满足要求。目前,汽轮机的二次修配仍以工艺人员现场计算为主,效率低下,容易出错。在单件小批量的生产方式下,汽轮机企业迫切需要一种应用范围相对较广、系统且有效的二次修配指导方案。本节基于2.2节的通流间隙预测结果,提出基于案例推理的二次修配方法。

案例推理是一种人工智能的推理范式,其核心思想是将过往经验用于现有问题的快速解决^[25]。对于汽轮机而言,不同机型产品虽然结构不同,通流间隙的具体设计精度不同,然而本质上具有一定的共性,即都是通过通流间隙的实测值与设计值的超差量来确定修配环的调整量。因此,可将具有耦合性的各通流间隙的超差量及对应的修配建议转换为案例的形式。图8所示为基于案例推理的二次修配方流程,可分为案例库构建、案例检索与重用、案例修正与存储等部分。

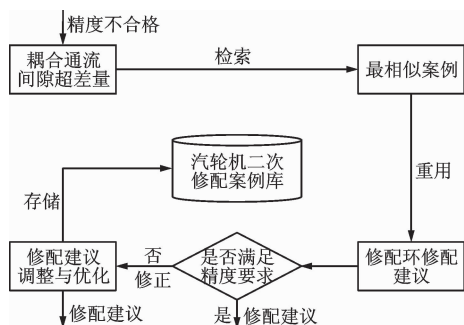


图8 基于案例推理的二次修配流程

Fig. 8 Secondary repair process following case-based reasoning

2.3.1 案例描述与案例库 案例一般由问题与解两部分组成,其中,问题的描述为条件属性,解的描述为解属性。具有耦合性的汽轮机通流间隙一般为2~20个,其中以6和8最为常见,本文以6个耦合通流间隙为例进行说明。不同机型通流间隙的设计区间不同,但公差范围大体一致,因此,可将6个耦合通流间隙超差量作为条件属性,将对应的修配环修配建议作为解属性。目前,汽轮机装配的相关数据积累不足,结合专家经验以及装配过程中的常见超差量,本文通过仿真数据来扩充案例库,以符合大规模装配的需求。

(1)案例条件属性的创建。本文定义的通流间隙的超差量可按式计算

$$a_i = L_i - (L_{i,\min} + L_{i,\max})/2 \quad (1)$$

式中: a_i 表示第*i*个通流间隙相对设计中值的超差量; L_i 表示第*i*个通流间隙的预测值; $L_{i,\min}$ 表示第*i*个通流间隙的设计下限; $L_{i,\max}$ 表示第*i*个通流间隙的设计上限。上述通流间隙的超差量 a_i 为所有通流间隙与设计值的偏差提供了一个统一的量化指标,方便了案例的表达与构建。

(2)案例解属性的创建。本文求解的修配环修配建议包括修配范围及最优修配量两部分。

a)修配范围的求解。修配环的最终尺寸应能够保证所有与之相关的通流间隙均在设计范围内,因各通流间隙的设计公差范围可能存在不同,本文取所有通流间隙中公差的最小值进行修配环修配量的求解,即

$$\Delta = \xi_i (a_i - T_{\min}/2) \sim \xi_i (a_i + T_{\min}/2) \quad (2)$$

式中: Δ 表示修配环的调整范围; ξ_i 为-1或1,表示第*i*个通流间隙与修配环之间的传递系数, $\xi_i = -1$ 表示修配环为减环,即修配环越修通流间隙越大, $\xi_i = 1$ 表示修配环为增环,即修配环越修通流间隙越小; $T_{\min}$ 表示通流间隙公差的最小值,参考专家建议,本文取0.3 mm。

采用 $T_{\min}$ 作为所有通流间隙的公差,虽然在一定程度上提高了部分公差较大通流间隙的精度要求,但却使所有通流间隙在求解时拥有了共同的基准,进而提高了案例的适用范围及拓展性,方便了案例的检索。综上,可根据式(2)和对各个通流间隙的修配量分别求解,并对最后的结果取交集来得到修配环的调整量。

b)最优修配量的求解。汽轮机通流间隙过大,则影响热效率,过小则容易出现机组碰摩,通流间隙越接近设计中值,留有的调整余地越大。因此,本文

同时考虑修配环对各个通流间隙的影响,求取最优的修配量,参考专家意见,以与设计总值的差值最小为优化目标,可表示如下

$$\begin{aligned} \min & \sum (a_i + \xi_i \cdot \Delta)^2 \\ \text{s. t. } & -1 \leq \Delta \leq 1 \end{aligned} \quad (3)$$

参考专家建议,修配环的调整范围 Δ 取 $-1 \sim 1$ mm。

近年来,许多优化算法用于解决工程问题^[26],其中粒子群算法^[27]在可行域内可随机搜索最优解,有着参数较少、简单易行、收敛较快的特点,适合本文案例库中修配环最优修配量的求解,算法流程见图 9。

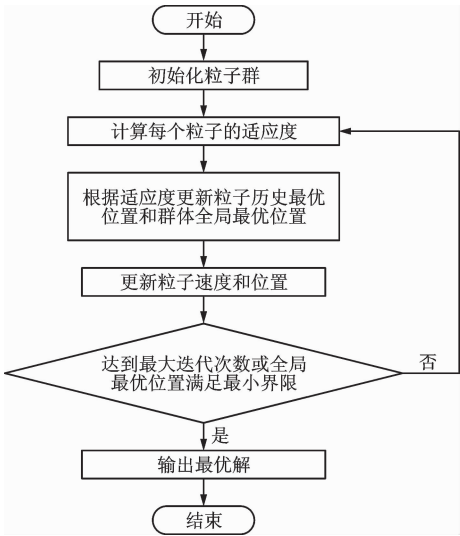


图 9 粒子群算法流程

Fig. 9 Process of particle swarm optimization

粒子速度和位置的更新计算公式如下

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (g_d - x_{id}^k) \quad (4)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (5)$$

式中: ω 表示惯性权重; v_{id}^k 表示粒子 i 在第 k 次迭代中的第 d 维速度; c_1 、 c_2 表示学习因子,一般取 $c_1 = c_2 = 2$; r_1 、 r_2 表示介于 $[0, 1]$ 之间的随机数; p_{id}^k 表示粒子 i 在第 k 次迭代中的第 d 维历史最优位置; x_{id}^k 表示粒子 i 在第 k 次迭代中的第 d 维位置; g_d 表示群体在第 k 次迭代中第 d 维的最优位置。

经多次试验,本文对粒子群算法的其他必要参数设置为:粒子群大小 $N = 40$;惯性权重 $\omega = 0.8$;最大迭代次数 $K = 100$ 。

(3)二次修配案例库的生成。根据上文案例条件属性和解属性的创建规则,进行汽轮机二次修配案例库的生成,具体内容如下。

a)条件属性数量的选择。条件属性的数量应与相互耦合的通流间隙数量一致,例如 6 个耦合通流

间隙具有 6 个超差量,对应着 6 个条件属性。

b)条件属性的仿真规则。当样本足够大时,零件的加工误差等在公差范围内大都近似呈正态分布,而相互独立的正态分布相加减,结果仍然服从分布。因此,本文假设通流间隙的超差量服从正态分布,结合专家经验及通流间隙历史超差记录,以 0.01 mm 为步长,在 $-0.5 \sim 0.5$ mm 范围内生成 10 000 组由各耦合通流间隙超差量组成的随机数列,作为各案例的条件属性。

c)解属性的求解。求取各组条件属性对应的解属性,并将结果整合形成案例,即对根据式(2)和式(3)对耦合通流间隙的各个超差量模拟值分别求解,得到各种超差情况对应的修配建议。

2.3.2 案例检索与重用 根据实际预测得到的超差量在案例库中进行检索,即可获取对应的修配建议。定义实际超差量与案例超差量的相似度如下

$$S = \sum (a_{is} - a_{ic})^2 \quad (6)$$

式中: a_{is} 表示第 i 个通流间隙的实际预测超差量; a_{ic} 表示第 i 个通流间隙的某案例超差量。

在计算过程中, a_{is} 与 a_{ic} 传递系数应保持一致。将相似度最小的案例进行重用,即可快速解决多数情况下的汽轮机二次修配问题。

2.3.3 案例修正与存储 特殊情况下,采用上述方式得到的修配建议不能满足精度要求,此时应根据通流间隙的实际超差量来重新计算,并将修正后的案例进行存储,进而不断完善案例库。

3 实例分析

为了验证所提出的汽轮机通流间隙预测与修配规划方法的有效性,选取某型号汽轮机为研究对象。首先构建汽轮机装配特征网络及生成通流间隙装配尺寸链,然后基于实测数据生成通流间隙精度预测及修配规划。

3.1 装配尺寸链的生成

基于文献[22]得到的汽轮机装配单元划分结果,以电机侧 6 级隔板装配单元为基础,根据装配工艺信息创建特征网络中的节点及连边,并按照一定规则对特征节点进行命名,例如 DP-R-D 表示右边垫片的下表面,GB-U-Z 表示隔板上半的中分面。

图 10 所示为所构建的电机侧 6 级隔板装配单元特征网络,可见该特征网络共有 6 个弱连通分量。其中,所有需要保障的通流间隙(封闭环)均位于 6 号连通子图中,其他 5 个较小的连通子图均为部分零件间的局部装配关系。例如,3 号连通分量为 8

段隔板汽封的接合关系,它们通过结合面的连接构成完整的圆形,各结合面的特征与通流间隙的测量面不在一个平面,对封闭环的影响可忽略不计。因此,后续分析以 6 号连通子图为主。

根据表 3 中的环路搜索规则,进行通流间隙装配尺寸链(环路)的生成,并基于图 6 所示方法完成环路方向的修正。该单元含有隔板汽封 1 号齿、隔

板汽封 2 号齿以及叶顶汽封齿,每类汽封齿需对竖直方向(上、下)和水平方向(左、右)分别测量,因此一共需要搜索 12 条尺寸链,图 11 所示为所生成的竖直方向的 6 条尺寸链(环路)。图 12 所示为对 6 个环路进行相同节点合并的结果,可见,汽轮机通流间隙的各条尺寸链间存在耦合现象,形成了网状结构,而修配环(垫片)的相关特征位于耦合尺寸网络的

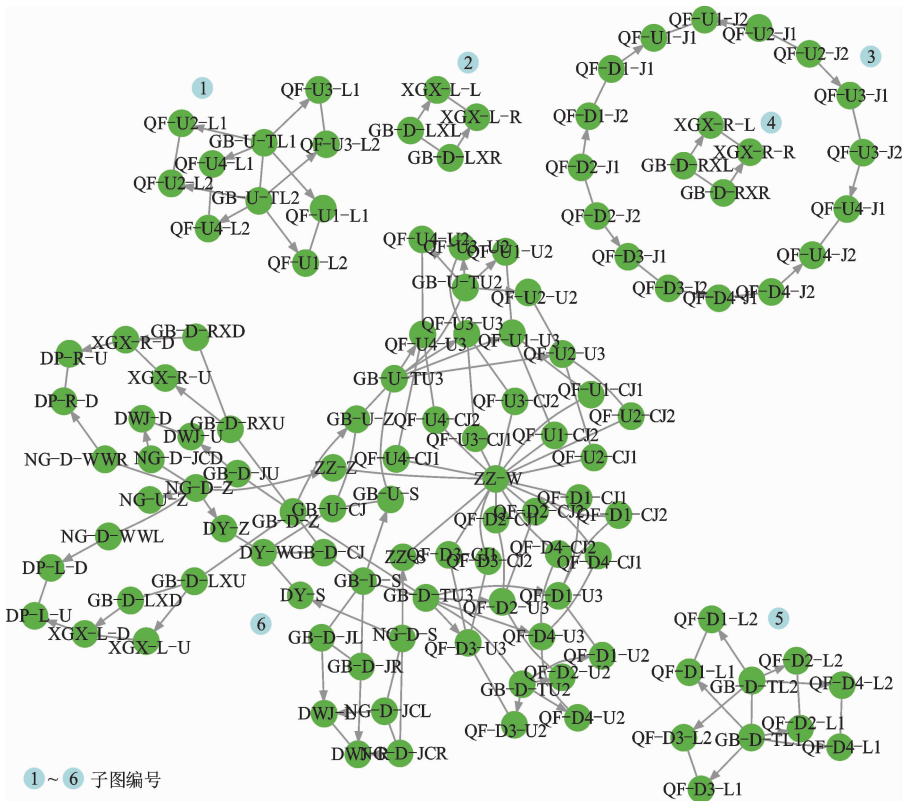


图 10 电机侧 6 级隔板装配单元特征网络

Fig. 10 Feature network of 6-stage baffle assembly unit on motor side

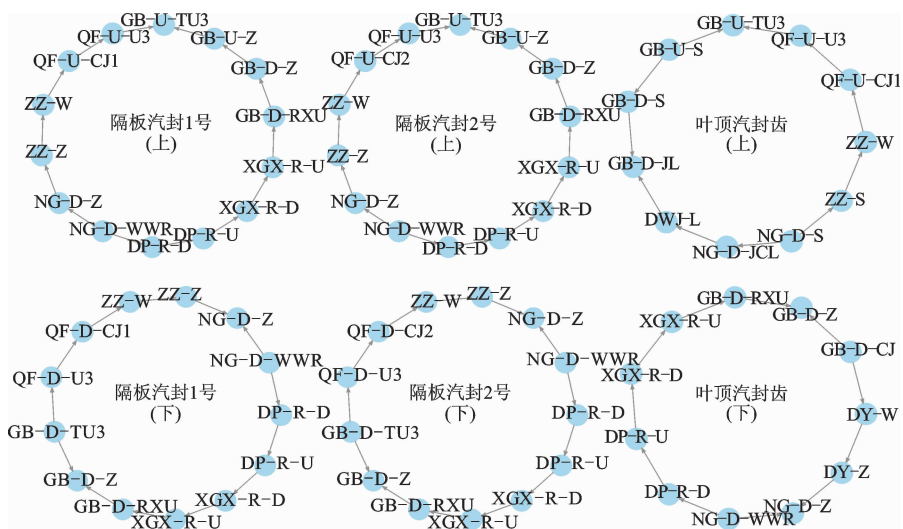


图 11 竖直方向装配尺寸链(环路)搜索结果

Fig. 11 Vertical assembly dimension chains(loops) search result

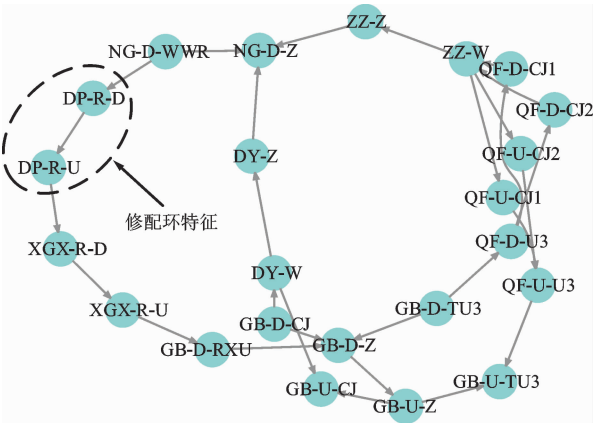


图 12 垂直方向装配尺寸链(环路)的耦合特性
Fig. 12 Coupling characteristic of vertical assembly dimension chains (loops)

总路上,其同时影响着 6 个通流间隙的装配精度,因此在后续的修配中,应将 6 个通流间隙视为一个整体进行分析。

3.2 通流间隙精度预测及修配规划

以图 11 和图 12 所示的垂直方向具有耦合特性的通流间隙为例,搜集该型号汽轮机在装配工艺中测量的 5 组有代表性的数据。其中,因修配环一般是配作的,留有 2 mm 的工艺余量,因此在预测通流间隙时修配环采用名义值 10 mm 计算,根据本文所提出的一次修配、通流间隙预测以及二次修配方法,进行实例验证,结果如表 4 所示。在进行通流间隙

精度预测前,首先基于规则推理进行一次修配,确保汽轮机能够满足除通流间隙外的其他基本装配要求。如表 4 中的第 2 组数据,因悬挂销键宽过小而导致间隙配合不满足要求,此时应先进行调整,并更新相关特征的尺寸后方可进行精度预测。

若预测的精度不合格,则计算 6 个通流间隙与设计中值的差值,一般情况下,因重力等其他因素影响,上通流间隙容易过小($a_1 \sim a_3$),下通流间隙容易过大($a_4 \sim a_6$)。本文案例中,通流间隙的最小范围为 0.3 mm,为方便案例检索,忽略各通流间隙公差范围的差异,仅当所有通流间隙均满足 $|a_1| \leq 0.15$ mm 才算装配合格。在进行修配前还需注意修配环对各个通流间隙的影响,对上通流间隙的影响系数为-1(越修间隙越大),对下通流间隙的影响系数为 1(越修间隙越小)。通过案例检索与重用,可得到修配环的修配范围以及基于粒子群算法的最优修配量。通过观察可见,最优修配量并非修配范围的中值,这是因为修配范围实际上是由超差量绝对值最大和最小的两个通流间隙决定的,最优修配量结合了所有通流间隙的超差情况,使各个通流间隙均能尽可能地接近设计中值。

表 4 所示的前 3 组数据为通流间隙精度不合格时对应的修配建议,以第 3 组数据为例,其基于案例推理得到的修配范围为 0.20 mm,而实际修配范围在 0.18~0.21 mm 均可满足所有通流间隙的精度要

表 4 通流间隙精度预测及修配规划结果

Table 4 Results of flow clearance accuracy prediction and repair planning

组号	基于规则推理的一次修配				基于特征网络权重矢量和的预测精度 /mm						基于案例推理的二次修配 范围和修配量/mm	
	是否异常	异常参数及现象	原因及建议	是否合格	a_1 (ξ_1)	a_2 (ξ_2)	a_3 (ξ_3)	a_4 (ξ_4)	a_5 (ξ_5)	a_6 (ξ_6)	修配环 修配范围	最优 修配量
1	否			否	-0.11 (-1)	-0.20 (-1)	-0.12 (-1)	0.05 (1)	0.09 (1)	0.06 (1)	0.06~0.22	0.11
2	是	$S_g=0.08$ mm, $S_{gM}=0.053$ mm, 隔板悬挂销配 合间隙过大	悬挂销键宽过 小,底部增加 $S_g-S_{gM}=$ 0.027 mm 的调整垫片	否	-0.19 (-1)	-0.28 (-1)	-0.10 (-1)	0.16 (1)	0.23 (1)	0.11 (1)	0.14~0.25	0.18
3	否			否	-0.33 (-1)	-0.18 (-1)	-0.10 (-1)	0.09 (1)	0.06 (1)	0.29 (1)	0.20	0.20
4	否			是	-0.01 (-1)	-0.08 (-1)	-0.07 (-1)	0.11 (1)	0.04 (1)	0.05 (1)	-0.03~0.12	0.06
5	否			否	-0.07 (-1)	-0.40 (-1)	-0.15 (-1)	0.02 (1)	0.14 (1)	0.10 (1)	0.04~0.17 且 0.23~0.30	

求,可见本文构建的案例库虽然可解决大部分修配问题,但其精度仍有待提高。

表4中的第4组数据为预测合格的情况,说明采用名义值可满足通流间隙精度要求,然而工艺中仍需去除预留的工艺余量,因而得到的修配建议可供工艺参考,即去除工艺余量 $2.00_{-0.03}^{+0.12}$ mm 均可满足要求。在第5组数据中,出现了无法通过调整修配环使精度合格的情况,这种情况一般较少,通过观察发现,仅2号通流间隙不合格,且 $|\alpha_2|$ 与其他通流间隙相差较大,因此可通过对2号通流间隙的齿尖进行调整来满足精度要求。

综上,整理可得到汽轮机的精度预测及修配规划结果。例如,基于第2组实测数据的结果为:悬挂销键底部增加0.027 mm的调整垫片,在此基础上预测发现1、2、4、5号通流间隙不合格,可将修配环修至 $10_{-0.25}^{+0.14}$ mm,最优修配建议为修至9.82 mm。此外,本文所提方法同样适用于其他级以及相似机型的通流间隙预测及修配规划,可为实物装配提供参考,提高汽轮机一次装配成功率及装配效率。

4 结 论

(1)构建了汽轮机常见装配要求的规则库,基于规则推理对汽轮机进行一次修配,保证了汽轮机满足除通流间隙外的其余装配要求,为通流间隙精度预测及二次修配奠定基础。

(2)根据装配工艺信息,构建了汽轮机装配特征网络,基于深度优先搜索实现了通流间隙装配尺寸链的生成,进而实现了装配精度的预测。

(3)考虑尺寸链的耦合性,基于案例推理,实现了汽轮机的二次修配,给出了修配环的调整范围,基于粒子群算法得到了最优修配量,进而通过对修配环的调整确保通流间隙装配精度满足设计要求。

(4)以汽轮机某装配单元采集的实测数据进行了应用验证,输出了通流间隙预测结果及对应的修配建议,实现了汽轮机预装配仿真,为实物装配提供了参考。该方法也可为同类机械产品的精度预测及修配规划提供了新的思路。

(5)本文初步建立了汽轮机修配规则库和案例库,其仍有很大的改进空间。后期可进一步拓展规则库,完善各推理规则,结合生产实际优化案例库,提高案例条件属性的精度,完善解属性的求解方法,剔除不符合生产实际的案例,从而使所提方法拓展性更强,适用范围更广。

参考文献:

- [1] 刘检华,孙清超,程晖,等. 产品装配技术的研究现状、技术内涵及发展趋势 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 1-28.
- [2] 曹丽华,贾彦铭,李盼,等. 汽轮机高低齿叶顶汽封泄漏流动的数值分析 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(8): 1545-1550.
- [3] CAO Lihua, JIA Yanming, LI Pan, et al. Numerical analysis on leakage flow of blade tip stepped seal in steam turbine [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(8): 1545-1550.
- [4] 张立祥,苏首森. 浅谈汽轮机安装检修中的间隙测量与调整 [J]. 中国设备工程, 2019(17): 24-25.
- [5] 卢秉恒. 机械制造技术基础 [M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2018: 188-194.
- [6] 刘伟东,宁汝新,刘检华,等. 机械装配偏差源及其偏差传递机理分析 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(1): 156-168.
- [7] LIU Weidong, NING Ruxin, LIU Jianhua, et al. Mechanism analysis of deviation sourcing and propagation for mechanical assembly [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(1): 156-168.
- [8] NAYROLES B. Plate theory and complementary displacement method [J]. International Journal of Solids and Structures, 1999, 36(9): 1329-1368.
- [9] MUJEZINOVIC A, DAVIDSON J K, SHAH J J. A new mathematical model for geometric tolerances as applied to polygonal faces [J]. Journal of Mechanical Design, 2004, 126(3): 504-518.
- [10] DESROCHERS A, GHIE W, LAPERRIÈRE L. Application of a unified Jacobian; torsor model for tolerance analysis [J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2003, 3(1): 2-14.
- [11] BJORKE O, DEVRIES W R. Computer-aided tolerancing, second edition [J]. Journal of Engineering for Industry, 1991, 113(1): 118.
- [12] 王恒,宁汝新,唐承统. 三维装配尺寸链的自动生成 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(6): 181-187.
- [13] WANG Heng, NING Ruxin, TANG Chengtong. Automatic generation of 3D assembly dimension chains [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(6): 181-187.
- [14] 周江奇,陈关龙,来新民,等. 车身装配尺寸链生成方法 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(7): 164-168.

- ZHOU Jiangqi, CHEN Guanlong, LAI Xinmin, et al. Generation method of automobile body assembly dimension chain [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(7): 164-168.
- [12] FRANCIOSA P, PATALANO S, RIVIERE A. 3D tolerance specification: an approach for the analysis of the global consistency based on graphs [J]. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2010, 4(1): 1-10.
- [13] 郭崇颖, 刘检华, 唐承统, 等. 基于图论的装配尺寸链自动生成技术 [J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(12): 2980-2990.
- GUO Chongying, LIU Jianhua, TANG Chengtong, et al. Automatic generation technology of assembly dimension chain based on graph theory [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, 20(12): 2980-2990.
- [14] ZHU Xinglei, LI Yingguang, WANG Wei, et al. Automatic generation of assembly dimension chain based on tolerance cell [J]. *Computer Aided Drafting, Design and Manufacturing*, 2012, 22(1): 77-83.
- [15] 鲍强伟, 樊友高, 丁晓宇, 等. 基于信息单元的装配尺寸链自动生成技术 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2016, 28(11): 1989-1999.
- BAO Qiangwei, FAN Yougao, DING Xiaoyu, et al. A method of automatic generation of assembly dimension chains based on information cells [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2016, 28(11): 1989-1999.
- [16] JIN Jionghua, SHI Jianjun. State space modeling of sheet metal assembly for dimensional control [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1999, 121(4): 756-762.
- [17] 田兆青, 来新民, 林忠钦. 多工位薄板装配偏差流传递的状态空间模型 [J]. *机械工程学报*, 2007, 43(2): 202-209.
- TIAN Zhaoqing, LAI Xinmin, LIN Zhongqin. State space model of variations stream propagation in multi-station assembly processes of sheet metal [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(2): 202-209.
- [18] 洪军, 郭俊康, 刘志刚, 等. 基于状态空间模型的精密机床装配精度预测与调整工艺 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(6): 114-121.
- HONG Jun, GUO Junkang, LIU Zhigang, et al. Assembly accuracy prediction and adjustment process modeling of precision machine tool based on state space model [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(6): 114-121.
- [19] 李兴伟. 汽轮机通流间隙预测与预修配的关键技术研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2020: 52-72.
- [20] AVDEENKO T V, MAKAROVA E S. Integration of case-based and rule-based reasoning through fuzzy inference in decision support systems [J]. *Procedia Computer Science*, 2017, 103: 447-453.
- [21] 姜洪, 陈琨, 李兴伟, 等. 多源多工序加工过程波动扩散网络建模与波动源辨识 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(2): 73-83.
- LOU Hong, CHEN Kun, LI Xingwei, et al. Fluctuation diffusion network modeling and fluctuation source identification of multi-fluctuation-source and multi-process machining processes [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(2): 73-83.
- [22] 张嘉锟, 陈琨, 于慧, 等. 面向误差传递的复杂机械产品装配单元划分方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(4): 86-94.
- ZHANG Jiakun, CHEN Kun, YU Hui, et al. Assembly unit partitioning method of complex mechanical products for error propagation [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(4): 86-94.
- [23] 巩亚东, 史家顺, 朱立达. 机械制造技术基础 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2017: 234-236.
- [24] 李世春. 基于串并联关系的尺寸链增减环判断方法 [J]. *装备制造技术*, 2009(5): 61-62.
- LI Shichun. The method of judging dimension chains based on series-parallel connection [J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2009(5): 61-62.
- [25] KOLODNER J L. Improving human decision making through case-based decision aiding [J]. *AI Magazine*, 1991, 12(2): 52-68.
- [26] 李丽丽, 高智勇, 高建民, 等. 航空发动机风扇转子动叶的选配优化技术研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(9): 60-70.
- LI Lili, GAO Zhiyong, GAO Jianmin, et al. Research on selecting-matching optimization technologies of fan rotor blades of aircraft engine [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(9): 60-70.
- [27] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]//*Proceedings of International Conference on Neural Networks*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995: 1942-1948.

(编辑 杜秀杰)