

统一计算架构下的装配精度并行计算模型

苏裕林^{1,2}, 刘浩^{1,2}, 苏琦^{1,2}, 贾康^{1,3}, 洪军^{1,2,3}

(1. 西安交通大学现代设计与轴承转子教育部重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安交通大学软件学院, 710049, 西安; 3. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对复杂装配体在多指标需求下装配精度计算效率低下的问题,提出了一种基于统一计算架构(CUDA)的多误差传递路径装配精度并行计算模型。首先,对局部并联结构进行旋量转换,得到涵盖串并联的小位移旋量(SDT)模型,在此基础上将装配特征作为误差传递单元,通过构建姿态变换和误差传递模型,分解误差传递过程,为后续并行计算提供支持;然后,对多功能需求(FR)误差传递路径按类型特征进行路径合并和误差旋量复用,减少计算量和数据生成量;最后,设计算法数据结构,根据任务需求分配线程任务、合理分配内存及降低访存时延。采用该模型对某型航发高压压气机转子的装配精度进行仿真计算,结果表明:与传统 CPU 模型相比,所提模型的装配精度计算速度提高了约 97.3 倍,能够为复杂装配体的装配精度计算和公差设计提供支持。

关键词: 公差设计;装配特征;装配精度;统一计算架构;并行计算

中图分类号: TH164 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202306012 **文章编号:** 0253-987X(2023)06-0105-10

Parallel Computing Model for Assembly Accuracy with Compute Unified Device Architecture

SU Yulin^{1,2}, LIU Hao^{1,2}, SU Qi^{1,2}, JIA Kang^{1,3}, HONG Jun^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design & Rotor-Bearing System, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Software Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the low computing efficiency of assembly accuracy for complex assemblies under multi-index requirements, a parallel computing model for assembly accuracy with multiple error transmission paths based on the compute unified device architecture (CUDA) was proposed. Firstly, the torsor transformation was performed on the local parallel structure to obtain the SDT model covering the series and parallel structures. On this basis, the assembly feature was used as the error transfer unit to build the position transformation and error transfer model, decompose the error transfer process, and provide support for the subsequent parallel computing. Next, based on the type characteristics of the error transfer path of the multiple functional requirements (FRs), the path was combined and the error torsor was reused to reduce the amount of computation and data generation. Finally, the algorithm data structure was designed to allocate thread tasks according to task requirements, reasonably allocate memory and reduce memory

access delay. The model was used to simulate the assembly accuracy of the high pressure compressor rotor of an aeroengine, and the simulation results showed that the proposed model could compute the assembly accuracy about 97.3 times faster than a conventional CPU model and can provide support for the assembly accuracy computation and tolerance design of complex assemblies.

Keywords: tolerance design; assembly feature, assembly accuracy; computer unified device architecture; parallel computing

装配是将零部件依据配合关系进行定位安装形成产品的生产活动。作为产品制造的最后一环,零部件的加工误差和装配定位误差直接决定着产品的装配质量。由于零件制造误差不可避免,因此必须对零件进行合理的公差设计,在控制零件加工成本的同时,保证产品装配精度满足质量要求。

公差分析是将零件的单个公差纳入产品整体进行分析的过程,是进行公差优化设计的基础。装配精度预测是基于零件设计公差进行最终产品装配精度的表征评价,是公差分析的重要环节。在产品公差设计阶段进行公差分析,可以在生产样机前检验所设计的公差参数是否满足功能要求,提前解决可能出现的问题以缩短产品开发周期,降低开发成本。机械装配体通常由多个零件组装而成,单个零件的尺寸和几何误差随着零件装配过程不断累积,并最终影响产品性能。如何高效地计算每个零件误差对目标装配功能的影响是提高公差分析效率和节省计算时间的关键。

装配精度预测包含误差建模和误差传递两方面。在误差建模方面,经过多年的发展,研究者提出了很多模型,主要有使用齐次变换矩阵进行公差描述的矩阵模型^[1-2],采用刚体相关理论构建最小几何基准元的工艺拓扑相关曲面(TTRS)模型^[3],使用向量表示装配尺寸的矢量环(vector-loop)模型^[4],雅可比旋量(Jacobian-torsor)模型^[5],以点集描述几何元素及变动的T-Map模型^[6-7],使用间隙描述零件特征关系的GapSpace模型^[8],为更贴近实际误差而基于点云数据的肤面模型^[9]以及采用刚体理论、以6个旋量表示几何元素误差的小位移旋量(SDT)模型^[10-11]。在误差传递方面,Whitney等^[12]首先将机器人位姿变换中的齐次变换矩阵方法用于装配体公差分析,实现了装配体累积误差的计算。Camelio等^[13]详细地分析了装配体的整体误差来源,提出了适用于多工位装配系统的误差传递计算方法。Ghie等^[5]提出了以雅可比旋量模型为基础的雅可比矩阵误差传递方法。

在这些研究基础上,面向装配体的仿真法精度预测主要形成了面向装配特征SDT的误差累积传

递^[14]、雅可比旋量建模与求解^[15]、肤面模型-雅可比矩阵^[16]等主流计算模型。其中,SDT误差累积传递需要对误差传递路径上的几何元素按序进行逐个计算,效率较低;基于雅可比矩阵传递的方法模型简单,易于实现数值计算,然而计算需要针对每一对功能需求(FR)开展,缺乏对装配体全体零件精度状态的表征,当存在多个FR时需要分别计算,对误差传递路径重叠的元素造成计算浪费。

蒙特卡罗方法具有求解误差与问题维数无关、适应性强等优点,是模拟加工误差和求解装配精度的重要方法。但蒙特卡罗仿真法的计算次数与结果的准确性成正比,在实际的产品装配公差设计中往往需要综合多项装配精度质量指标开展。在装配体结构愈发复杂和产品更新速度不断提高的背景下,传统的CPU算法面临很大挑战,高效的精度预测计算成为公差设计乃至面向实际装配过程误差调整的重要保障。

随着近年来GPU技术的迅猛发展以及统一计算架构(CUDA)的快速演进,将装配精度预测的海量蒙特卡罗仿真计算组织为轻量级的并行模式有望进一步地提升仿真计算效率。考虑到面对多FR计算需求时,误差累积传递的计算模式相比于雅可比矩阵误差计算原理,易于获得更高的效率且存在并行优势,因此本文面向多FR装配精度预测,提出了一种基于CUDA的通用并行计算模型,采用SDT进行公差表征与装配体多FR误差传递路径建模,并基于特征误差累计传递和蒙特卡罗仿真法,开展了适用于CUDA的并行计算模型的设计与优化,最终通过案例分析验证了模型的有效性。

1 基于SDT误差传递的FR装配精度计算模型

1.1 基于SDT的装配特征误差建模

装配特征是装配体零件上存在配合关系的几何元素,是构成误差传递路径的基本元素。装配特征建模是进行装配精度预测的基础,SDT作为装配特征误差模型的经典表示方法,将装配特征误差表示为相对理想几何元素位姿的六自由度微小变动,即

$T = (\alpha, \beta, \gamma, u, v, w)$, 其中 α, β, γ 和 u, v, w 分别表示理想几何元素绕 x 轴、 y 轴、 z 轴旋转和平移的微小变动量。本文中, 将 T 称为装配特征的误差, T 内的变动量称为误差分量。通常, 采用变动不等式表示单个误差分量的变动范围, 采用约束不等式确定各误差分量需要共同满足的变动范围^[14]。

装配特征存在串联和如图 1 所示的局部并联模式, 其中 P_{ij} 表示零件 i 的第 j 个装配特征, 坐标系表示方法与装配特征类似。为保证本文算法的通用性, 参考文献[17] 中的局部并联装配特征误差建模方法, 针对双平面配合、圆柱平面配合和双圆柱配合等 3 类局部并联模式, 进行多个装配特征的误差分量合并, 即在统一局部装配特征坐标系的基础上, 对装配特征的全体误差分量取并集, 对每一误差分量区间取交集。这 3 类局部并联结构的装配特征 SDT 误差模型如表 1 所示, 其中 l_{ij} 表示装配特征 i 的长度, j 为序号; t_i 代表装配特征 i 的公差带宽度。

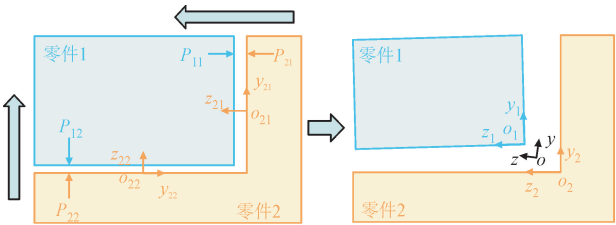


图 1 局部并联和坐标系合并误差传递示意图

Fig. 1 Local parallel and coordinate system merge error transfer diagram

公差指定了实际元素可以偏离理想元素的范围, 误差模型的误差分量变动区间由公差决定, 但约束不等式的存在使实际的变动区间无法直接确定。由于零件在大批量生产时, 可认为加工误差在公差范围内服从正态分布^[18], 本文面向大批量生产讨论, 故可认为各误差分量也服从正态分布。因此, 本文根据正态分布的 3σ 原则并结合蒙特卡罗思想, 利用约束不等式来筛选变动不等式生成的误差分量, 然后对误差分量进行拟合得到实际变动区间满足的参数, 利用拟合后的正态分布参数生成随机数作为 SDT 误差模型的误差分量。

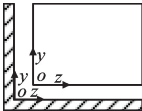
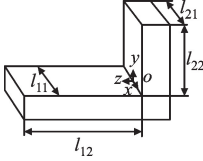
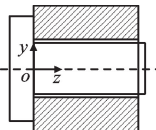
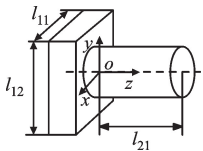
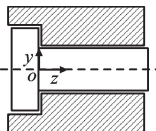
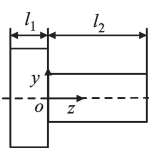
1.2 基于装配特征的误差传递计算模型

零件之间通过装配特征的配合进行装配定位, 相应的, 零件间的装配误差由装配特征的形状及定位误差形成并在装配体内传递。因此, 两零件间基于装配特征配合的误差传递是装配体精度预测计算的基础。本文统一采用齐次坐标变换进行 SDT 误差及误差传递的表述。

装配特征误差传递包含同一零件不同几何元素的姿态传递(零件内姿态传递)和不同零件配合面的误差传递(零件间误差传递)。零件内姿态传递由零件自身姿态变化驱动, 以图 2 中 P_1 到 P_2 的姿态变换 I_{12} 为例, 图中所有装配特征均为理想状态, P_0 先将误差传递到 P_1 , 引起零件坐标系变动, 由于 P_1 和 P_2 属同一零件, 所以误差经由零件坐标系传递到 P_2 , 因此属同一零件的理想装配特征的姿态变换可经由零件坐标系算出, 为恒定值。

表 1 常见局部并联配合装配特征 SDT 误差旋量模型

Table 1 SDT error screw model for common local parallel fit assembly feature

配合图示	配合面参数	类型	旋量	约束不等式
		双平面	$T = (\alpha, \beta, \gamma, 0, v, w)$	$\begin{aligned} \alpha l_{12} + \gamma l_{11} / 2 + v &\leq t_1 / 2 \\ \alpha l_{22} + \beta l_{21} / 2 + w &\leq t_2 / 2 \end{aligned}$
		平面圆柱	$T = (\alpha, \beta, 0, u, v, w)$	$\begin{aligned} \alpha l_{12} / 2 + \beta l_{11} / 2 + w &\leq t_1 / 2 \\ (u + \beta l_2)^2 + (v + \alpha l_2)^2 &\leq (t_2 / 2)^2 \end{aligned}$
		双圆柱面	$T = (\alpha, \beta, 0, u, v, 0)$	$\begin{aligned} (u + \beta l_1)^2 + (v + \alpha l_1)^2 &\leq (t_1 / 2)^2 \\ (u + \beta l_2)^2 + (v + \alpha l_2)^2 &\leq (t_2 / 2)^2 \end{aligned}$

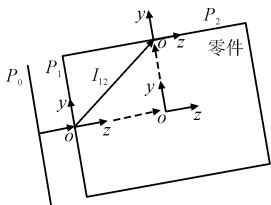


图 2 零件内误差传递示意图

Fig. 2 Schematic diagram of error transfer within a part

零件间误差传递需要依靠零件间的配合来完成,因此本文通过建立配合特征对模型,对零件间的配合进行表征和计算。如图 3 所示,零件 1 和 2 的装配特征 P_1 和 P_2 配合, P'_1 和 P'_2 分别表示装配特征 1 和 2 在误差作用下的实际状态,MFP 表示配合特征对。不考虑装配特征的具体形貌,认为装配特征 1 和 2 的实际状态完全贴合,即 $P'_1 = P'_2$ 。

为方便计算,采用齐次坐标变换构建 P_1 到 P_2 的位置变化矩阵如下

$$\mathbf{M}_{(P_1, P_2)} = \mathbf{M}_{(P_1, P'_1)} \mathbf{M}_{(P'_1, P_2)} \quad (1)$$

其中,装配特征的误差变换矩阵由其 SDT 模型误差分量来构建^[14]。

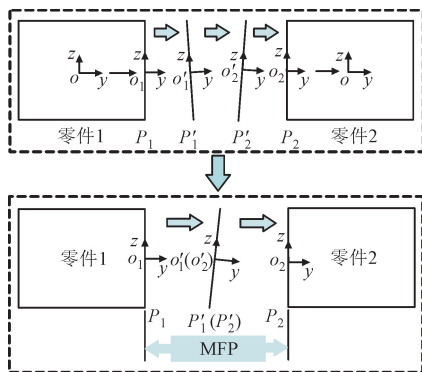


图 3 配合特征对模型示意图

Fig. 3 Mating feature pair schematic

$\mathbf{M}_{(P'_2, P_2)}$ 为 $\mathbf{M}_{(P_2, P'_2)}$ 的逆矩阵。考虑到旋转变换为正交阵,其逆矩阵与转置矩阵相同,由此得到 P_1 到 P_2 的变化矩阵如下

$$\mathbf{M}_{(P_1, P_2)} = \mathbf{M}_{(P_1, P'_1)} (\mathbf{M}_{(P_2, P'_2)})^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_1 & \beta_1 & u_1 \\ \gamma_1 & 1 & -\alpha_1 & v_1 \\ -\beta_1 & \alpha_1 & 1 & w_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \gamma_2 & -\beta_2 & -u_2 \\ -\gamma_2 & 1 & \alpha_2 & -v_2 \\ \beta_2 & -\alpha_2 & 1 & -w_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_1 + \gamma_2 & \beta_1 - \beta_2 & u_1 - u_2 \\ \gamma_1 - \gamma_2 & 1 & -\alpha_1 + \alpha_2 & v_1 - v_2 \\ -\beta_1 + \beta_2 & \alpha_1 - \alpha_2 & 1 & w_1 - w_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.3 面向 FR 的误差传递路径

FR 是指预测某条路径装配精度的需求。每个 FR 指定一条误差传递路径,该路径是零件内姿态传递和零件间误差传递的有序集合,多个零件误差沿此误差传递路径逐渐累积为装配误差。为提高计算效率,可将存在重复的多条误差传递路径合并为多 FR 进行计算。

如图 4 所示, $I_{m,n}$ 表示零件内理想装配特征 m 到 n 的变换, $P_{i,j}$ 表示零件外理想装配特征 i 到 j 的变换, $P_{s,1}$ 和 $P_{8,e}$ 分别为零件 1 中装配特征 1 的误差姿态到理想姿态和零件 4 中装配特征 8 的理想姿态到误差姿态的变换。

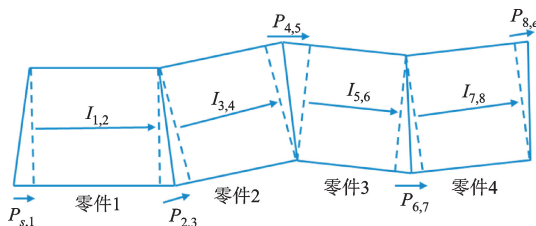


图 4 装配误差传递示意图

Fig. 4 Schematic diagram of assembly error transmission

2 基于 CUDA 的并行计算模型设计

从并行计算角度对多 FR 装配精度蒙特卡罗仿真进行分析,首先在装配特征误差的随机数生成与判定中,各装配特征的随机数相互独立;然后在装配对计算过程中,每次仿真相互独立,各仿真所需的配合特征对矩阵也需具有独立性;最后,误差传递计算是 2 个大型多维矩阵按照装配序列的交叉相乘计算,是典型的可以并行的计算操作。此外,装配精度蒙特卡罗仿真次数一般取 5 000~20 000^[19-23],所以采用并行计算可以明显提升效率。

面向多 FR 的装配精度并行仿真计算,需要进行面向 GPU 的计算模型数据预处理和误差模型计算、误差变动矩阵、误差传递、装配误差等核心计算任务的并行化组织。计算总体流程如图 5 所示,包含 CPU 端执行的数据预处理、GPU 端执行的数据填充、误差变动矩阵计算、误差传递计算、装配误差计算以及 CPU 端执行的统计分析。

2.1 面向 CUDA 的计算模型数据预处理

设计合理的数据结构并进行预处理是确保并行计算执行的基础。为满足多 FR 装配精度仿真计算,

设计数据结构如图 6 所示。图中,0→1、0→3 分别表示标准面到 MF1、MF3 面的变换矩阵; $i \rightarrow j$ 表示 MF i , 到 MF j 面的变换矩阵。由于 FRSeqMat 矩阵按照

FR 的顺序存储变换矩阵的索引,为了区分不同的变换类型,MFPMat 矩阵索引用正数,NormalMat 矩阵索引用负数。

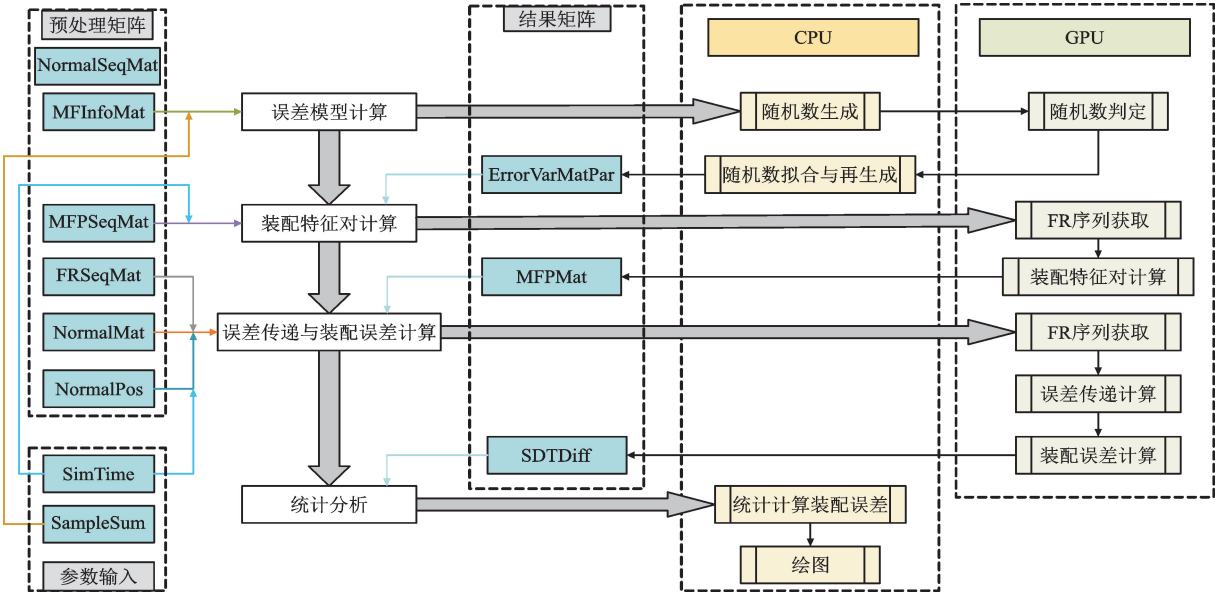


图 5 整体计算流程与任务分配

Fig. 5 Overall calculation process and task allocation

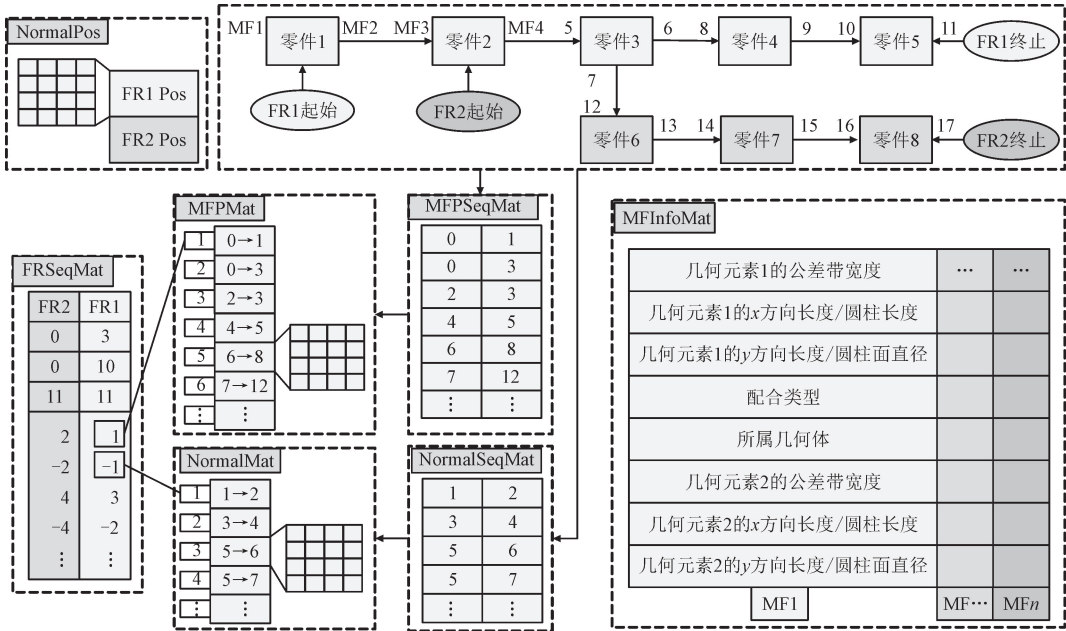


图 6 预处理矩阵数据结构

Fig. 6 Preprocessing matrix data structure

2.2 基于蒙特卡罗的装配特征误差模型计算算法

装配特征的误差旋量生成计算分为随机数生成、随机数判定以及随机数拟合与再生成 3 个步骤。随机数按照装配特征依次生成,正态分布参数随装配特征参数的变化而变化。算法步骤设计如下:

- 步骤 1** 随机数生成与内存传输。以 MFInfoMat 为参考,根据变动不等式生成正态分布随机数,组成初始随机数矩阵 RandomMat,并将其以变量形式传入 GPU 全局内存。
- 步骤 2** 随机数判定。在 GPU 上将 RandomMat 中

不符合约束不等式的装配特征误差分量进行并行置零操作。

步骤3 随机数拟合与再生成。从 GPU 取回随机数矩阵,进行去零和正态分布拟合,利用拟合得到的正态分布参数,为每个装配特征的每个 SDT 分量生成 N 个随机数,组装成误差分量矩阵 ErrorVarMatPar。

2.3 零件间配合特征对计算算法

表达零件间误差传递,由特征对索引矩阵 MFPSeqMat 驱动的配合特征对计算包含 3 步:取装配特征索引;根据索引取误差数据;计算配合特征对并存入矩阵 MFPMat。算法步骤设计如下:

步骤1 取装配特征索引。线程按照 MFPSeqMat 内装配对的顺序依次提取每个装配对对应的两个装配特征的索引。

步骤2 根据索引提取误差数据。线程执装配特征索引到随机数矩阵 ErrorVarMatPar 内提取对应位置的 6 个误差分量。

步骤3 计算配合特征对。线程按照式(4)的方法代入误差分量,计算配合特征对并存入矩阵 MFPMat, MFPMat 中配合特征对的顺序与 MFPSeqMat 相同。

2.4 完整 FR 路径误差传递计算算法

误差传递的计算本质为零件内部变换矩阵 NormalMat 和配合特征对矩阵 MFPMat,按照 FR 序列信息矩阵 FRSeqMat 指引完成交叉相乘计算。算法步骤设计如下:

步骤1 索引判断和数据提取。线程到 FRSeqMat 中按照顺序提取索引,然后判断正负,若为正数则执索引到 MFPMat 中获取配合特征对变换矩阵,若为负数则到 NormalMat 获取零件内部变换矩阵。

步骤2 误差传递计算。将步骤1中的矩阵与前一次结果矩阵相乘,若本次为第一次计算,则乘以单位阵。

步骤3 重复执行步骤1~2,直到 FRSeqMat 中本 FR 计算完毕,得到误差传递结果。将误差传递结果与 FR 标准末尾姿态对比,计算装配误差后将误差以误差分量形式存入 SDTDiff。

3 案例验证

高压压气机转子是航空发动机的关键部件,它是由多个转子零部件堆叠而成,转子之间通过止口配合和螺栓紧固连接,由于工作时需要在高温、高压的环境中高速旋转,因此对装配精度尤其是偏心量的要求非常高。本文以转子的装配精度仿真计算为例,阐述本算法的优越性。

转子零部件间存在 2 种配合连接,其中螺栓紧固连接可视为平面配合,止口配合可视为圆柱面配合,二者共同构成平面-圆柱局部并联结构。图 7 中 A、F 分别为前轴和后轴,B、C、D 为压气机盘,E 为涡轮盘,共 6 个转子零件,通过 5 个局部并联结构联接。局部并联结构计算中,平面的长宽以圆面直径代替,公差带宽度根据独立原则取公差最小值。

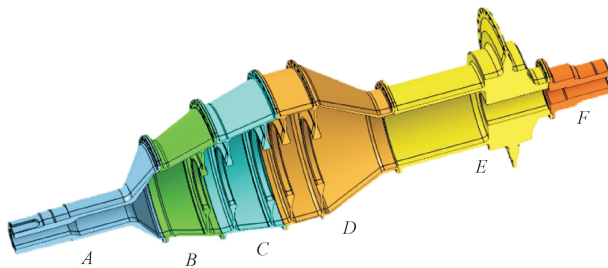


图7 某型号高压压气机转子示意图

Fig. 7 Schematic diagram of a certain type of high pressure compressor rotor

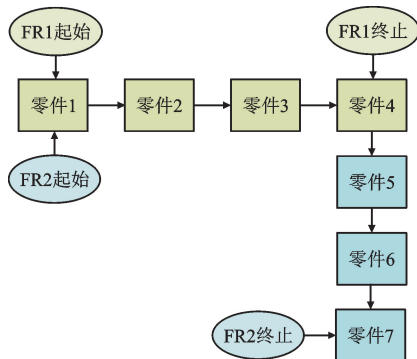
3.1 多 FR 误差传递分析

多 FR 的误差传递路径有 3 种情况:同路径、分叉路径和平行路径。同路径多 FR 如图 8(a)所示,分叉路径多 FR 如图 8(b)所示,箭头所指为误差的传递方向,不同的 FR 用不同的颜色表示,重叠部分不做区分, $I_{m,n}$ 代表零件内装配特征 m 到 n 的变换, $P_{i,j}$ 代表零件间装配特征 i 到 j 的变换。

对多 FR 的处理如下:

(1)对于同路径多 FR,作合并计算。由于本文采用误差累计传递计算,可直接获取误差传递路径上每个装配特征的姿态,因此将多 FR 合并计算。

(2)对于分叉路径多 FR,误差分量共用。路径之间必定存在重合的装配特征,即存在元素共享,如图 8(b)所示,FR1 和 FR2 共享了变换 $I_{3,4}$ 和 $P_{4,5}$ 。为提高效率,在共享的装配特征上,多个 FR 计算所需的 SDT 误差分量共用。



(a)同路径

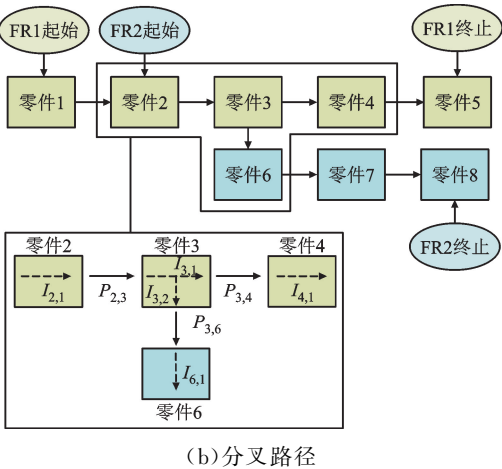


图 8 不同路径多 FR 示意图
Fig. 8 Multi-FR schematic

以图 7 中的前轴左侧面为误差路径起始,后轴右侧面为误差路径终止,对此转子开展 FR 设计,按 A 到 F 的顺序进行预测。各配合面参数如表 2 所示,其中 0A 和 F0 分别对应前轴的起始面和后轴的终止面,AB-1 代表 A 和 B 配合面中 A 面参数,AB-2 代表 B 面参数,以此类推。装配精度预测仿真次数和

误差模型计算中蒙特卡罗采样数均设为 20 000。

3.2 基于 CUDA 的并行计算模型设计

由上文可知,误差传递计算可类比为若干个矩阵按次序相乘,如何保存每次相乘的中间结果是一个问题。由于是多线程计算,如果使用 $B = AB$ 的方式保存每次矩阵计算的中间结果,因多线程在计算中无法保证完全同步,可能会引起线程读写冲突,造成计算结果错误。若用一个中间矩阵来保存计算结果,虽不会引发线程冲突,但仿真次数过多会导致其规模膨胀,只能放入全局内存。对于矩阵相乘这种高频读取而言,即使有合并访问延迟也很严重,且该矩阵保存的节点结果对多数计算并无作用。

为解决上述问题,本文设计了 1 组数据中转矩阵来保存每次的计算结果,这组矩阵由 2 个 4×4 方阵 M_{TD1} 和 M_{TD2} 组成,考虑到计算结果存取非常频繁且矩阵规模较小,因此放入共享内存来提高效率。计算过程中, M_{TD1} 和 M_{TD2} 轮流互为彼此的输入,有新数据写入时直接覆盖,保证并行线程计算过程中不会出现数据干扰,实现了矩阵计算的并行化。

表 2 转子配合面参数
Table 2 Rotor mating surface parameters

编号	t_p /mm	l_{px} /mm	l_{py} /mm	t_c /mm	l_c /mm	d /mm
0A	0.025	75	75	0	0	0
AB-1	0.020	270	270	0.02	3.5	237
AB-2	0.020	270	270	0.02	3.0	237
BC-1	0.025	356	356	0.01	3.5	320
BC-2	0.020	356	356	0.01	3.0	320
CD-1	0.025	408	408	0.01	3.5	374
CD-2	0.020	408	408	0.01	3.0	374
DE-1	0.025	230	230	0.01	3.5	194
DE-2	0.020	230	230	0.01	3.0	194
EF-1	0.025	145	145	0.01	3.5	111
EF-2	0.020	145	145	0.01	3.0	111
F0	0.025	80	80	0	0	0

注: t_p 、 l_{px} 、 l_{py} 分别表示平面的公差带宽度、 x 和 y 方向的长度; t_c 、 l_c 、 d 分别表示圆柱面公差带宽度、长度和直径。

3.3 CUDA 访存优化

因计算过程较快,内存访问时延便凸显为并行计算需要考虑的重要问题。以 3 个线程为例,图 9 展示了误差模型计算随机数判定中合并访问(全局内存中)和广播机制(只读内存中)的应用。2 个矩阵元素均为 FP32 类型,样本数设置为 32 的整数

倍,如此访存地址始终是以 128 字节对齐,1 个线程束(warp)可以一次性地取到全部线程所需的 128 字节数据^[24],尽可能地将线程计算任务之间的同步性进行回避,与串行访问相比效率提高了 32 倍。将重用率非常高的装配信息矩阵放入常量内存,与放入全局内存相比,广播机制能使一次访存结果广播

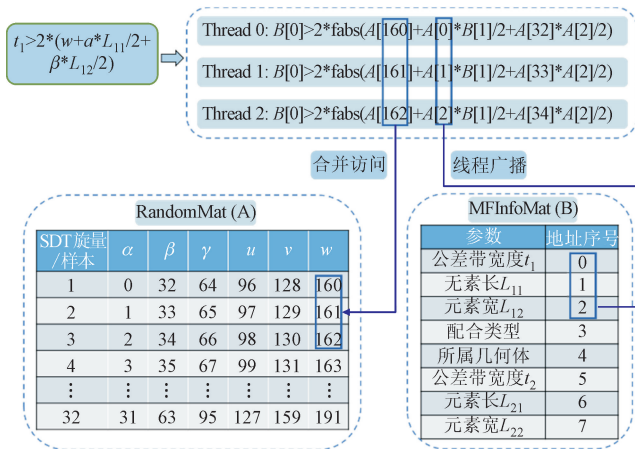


图 9 随机数判定中合并访问与广播机制应用示意图
Fig. 9 Schematic diagram of application of combined access and broadcast mechanism in random number determination

到其所在的半个线程束,访存开销降低了 15/16。

3.4 计算任务实现

仿真实验环境如表 3 所示,使用 MATLAB 作为 CPU 端平台,执行随机数生成、数据统计等任务。结合任务实际情况,本文将随机数判定、配合特征对计算和误差传递及装配误差计算设计为 3 个独立的 GPU 核函数。

表 3 仿真实验环境

Table 3 Simulation test environment

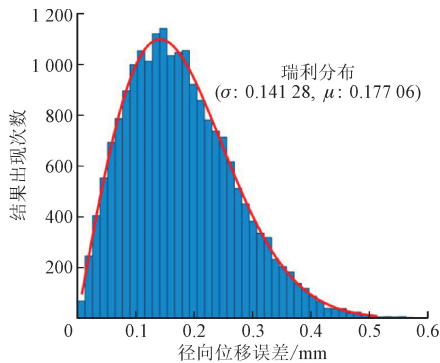
名称	型号
CPU	Intel Core i7-10875H 2.30 GHz 16 cores
GPU	NVIDIA GeForce RTX 2060
操作系统	Windows 10 中文教育版
运行环境	MATLAB R2021a,CUDA 11.2

线程分配方面,考虑到每个线程束包含 32 个线程,为保证 CUDA 核心在线程访存延迟时的活跃度,在随机数判定和配合特征对计算中,为每个线程块(block)分配 $4 \times 32 = 128$ 个线程;在误差传递计算中,由于线程任务是计算 4×4 矩阵,所以每个线程块分配 16 个线程,每个线程可分配更多的寄存器空间。

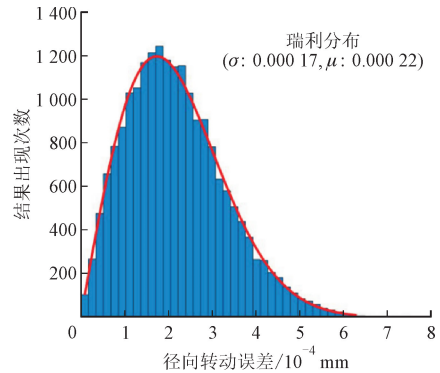
线程块分配方面,RTX2060 包含 30 个流多处理器(SM)^[25],每个 SM 最多可分配 64 KB 的共享内存,每个 SM 包含 64 个 CUDA 核心,因此理想情况下最多支持 30 个线程块或 64 个线程束并行,每个线程块最多可分配 32 KB 共享内存。考虑到 SM 的活跃度,在所有核函数计算中,共分配 $2 \times 30 = 60$ 个线程块。

3.5 仿真实验结果

对仿真实验得到的误差分量进行统计计算,得到精度输出元素的径向位移误差和径向转动误差,结果如图 10 所示。算法性能方面,配合特征对计算和误差传递计算阶段加速比达到 200 以上,从算法总体层面来看,GPU 相对于 CPU 的加速比达到 90 以上,达到了预期目标,具体比较结果见表 4。



(a) 径向位移误差分布图



(b) 径向转动误差分布图

图 10 径向位移与径向转动误差仿真结果图

Fig. 10 Simulation result of radial displacement and rotation error

根据实验结果,尽管针对简单案例串行计算的时间也非常短,不足以体现并行计算在计算时间方面的收益,但是当涉及到公差优化时,在整个尺寸链变量维度进行复合搜索模式下,需要调用大量的正向预测蒙特卡罗仿真子任务。这时,如果沿用传统的串行精度预测,则单次尺寸链优化会消耗几十分钟乃至数小时,这在实际工程中难以接受,也是目前复杂机械系统精度设计无法摆脱人工经验的一个原因。面对这一任务,装配精度预测子任务的并行计算时间收益则得到凸显,使得大规模尺寸链公差优化设计计算时间可被接受。类似计算需求在复杂装配任务的现场尺寸链装调中同样存在,这也是当前数字化智造和数字

孪生使能技术应用落脚的一个技术切入点。此外,传统的尺寸链计算都是面向单一的 FR 进行计算,若要兼顾面对实际工程中的多 FR,必然造成大量的重复计算。而本文面向多 FR 计算任务,在 CUDA 平台下进行了误差传递路径的预处理,能够进一步提升计算效率。

装配公差设计应从产品功能需求出发,在满足功能需求的前提下,力争使得产品的总成本最小。本文提出的模型在产品设计阶段提升了装配精度预测效率,可以在生产样机前检验设计的公差参数是否满足功能要求,提前解决可能出现的问题以缩短产品开发周期,降低开发成本。

表 4 算法主要阶段 CPU/GPU 性能比较
Table 4 CPU/GPU performance comparison during algorithm main phase

算法阶段	时间/ms			加速比
	CPU 执行	GPU 数据传输	GPU 算法执行	
数据预处理-随机数判定	3.41	2.70	5.26	0.4
配合特征对计算	508.53	1.59	0.22	280.7
误差传递计算	570.42	1.00	0.35	422.5
算法总体(除去共有部分)	1082.36	5.29	5.83	97.3

4 结束语

本文通过 SDT 统一建模与多 FR 优化计算,将并行计算应用于装配精度仿真计算,取得了很好的效果。首先在 SDT 误差建模和误差累积传递的基础上,设计了多 FR 装配精度并行计算模型,通过并联到串联的转化和算法设计,实现了对局部并联结构和多 FR 计算的支持。然后结合 CUDA 进行了算法实现,通过合理设计数据结构,使用合并访问、广播机制等访存优化措施实现了高性能的并行计算,通过仿真实验部分的性能对比可看出本算法在进行装配精度预测计算时具有高效性。本文在研究过程中考虑了常见的机械结构,但因机械结构类型众多,本文囊括的部分仍很有限,且目前的装配特征没有考虑优先级,算法的建模依赖手动;此外,实际装配过程中的定位、变形等误差对产品装配精度的显著影响本文算法尚未考虑。后续会对更多结构展开研究,致力于解决上述问题。

参考文献:

[1] 黄国权,司前前. 装配关系矩阵的分层表达与求解[J]. 机械设计与制造, 2021, 365(7): 237-240, 245.
HUANG Guoquan, SI Qianqian. Hierarchical expression and solution of assembly relationship matrix [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021, 365 (7): 237-240, 245.

[2] 吕盾,刘青,刘沛,等. 五轴机床加工零件轮廓误差预测方法 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(2): 9-15.
LÜ Dun, LIU Qing, LIU Pei, et al. Contour error

prediction method of part for five-axis machining [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(2): 9-15.

[3] 庞彩珠. 基于全信息模型的阀门产品参数化设计技术与开发 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2022.

[4] 唐健钧,田锡天,耿俊浩,等. 基于多维矢量环的装配偏差源敏感度分析 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(17): 156-161.
TANG Jianjun, TIAN Xitian, GENG Junhao, et al. Sensitivity analysis of assembly deviation source based on multidimensional vector loop [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(17): 156-161.

[5] GHIE W, LAPERRIÈRE L, DESROCHERS A. A unified Jacobian-Torsor model for analysis in computer aided tolerancing [M]//GOGU G, COUTELLIER D, CHEDMAIL P, et al. Recent Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering. Dordrecht, Netherlands: Springer Netherlands, 2003: 63-72.

[6] 张嘉锟,陈琨,高建民,等. 汽轮机通流间隙精度预测与修配规划方法研究 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(12): 87-97.
ZHANG Jiakun, CHEN Kun, GAO Jianmin, et al. Accuracy prediction and repair planning of steam turbine flow clearance [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(12): 87-97.

[7] 黄康,徐锐,陈奇. 小位移旋量和响应面法相结合的齿轮公差分析模型构建方法 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(9): 77-84, 91.
HUANG Kang, XU Rui, CHEN Qi. Gear tolerance modeling with small displacement torsor and response

- surface method [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(9): 77-84, 91.
- [8] 陶松桥. 机械产品装配复杂性度量方法 [J]. 现代机械, 2017(4): 8-12.
TAO Songqiao. Method for measuring assembly complexity of mechanical products [J]. Modern Machinery, 2017(4): 8-12.
- [9] 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. Tolerance analysis of partial parallel assemblies based on Jacobian-torsor model [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(5): 156-165, 222.
- [10] 刘小勇, 郑爱红, 蒋峰, 等. 一种提高异步电动机转矩性能的直接转矩控制方法 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(12): 12-17, 44.
LIU Xiaoyong, ZHENG Aihong, JIANG Feng, et al. A direct torque control method for inductive motor with torque optimization [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(12): 12-17, 44.
- [11] 吕程, 艾彦迪, 余治民. 蒙特卡罗与响应面法相结合的圆柱度公差模型求解 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(7): 53-59.
LÜ Cheng, AI Yandi, YU Zhimin. Cylindricity tolerance model solution combining Monte Carlo simulation with response surface method [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(7): 53-59.
- [12] WHITNEY D E, GILBERT O L, JASTRZEBSKI M. Representation of geometric variations using matrix transforms for statistical tolerance analysis in assemblies [J]. Research in Engineering Design, 1994, 6(4): 191-210.
- [13] CAMELIO J, HU S J, CEGLAREK D. Modeling variation propagation of multi-station assembly systems with compliant parts [J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125(4): 673-681.
- [14] 吕程. 基于结合面误差建模的装配精度预测与优化研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [15] CHEN Hua, JIN Sun, LI Zhimin, et al. A comprehensive study of three dimensional tolerance analysis methods [J]. Computer Aided Design, 2014, 53: 1-13.
- [16] 刘婷. 基于肤面模型的装配误差分析方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [17] CHEN Hua, JIN Sun, LI Zhimin, et al. A solution of partial parallel connections for the unified Jacobian-torsor model [J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 91: 39-49.
- [18] 卢强, 张友良. 用蒙特卡罗法进行 6 腿并联机床精度综合 [J]. 中国机械工程, 2002, 13(6): 464-467.
LU Qiang, ZHANG Youliang. Accuracy synthesis of a hexapod machine tool based on Monte-Carlo method [J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(6): 464-467.
- [19] 陈铭豪. 基于高斯过程回归的非参数化辨识及模型预测控制方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [20] 徐旭松, 刘建, 刘梦, 等. 装配虚拟边界及其仿真研究 [J]. 现代制造工程, 2020(3): 110-115.
XU Xusong, LIU Jian, LIU Meng, et al. Research on assemble virtual boundary and its simulation [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020 (3): 110-115.
- [21] 张人超. 面向复杂产品装配过程的装配精度预测方法研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [22] 王涵, 吴玉光. 不同类型接触面机械零件装配误差的自动计算方法研究 [J]. 机电工程, 2021, 38(6): 655-664.
WANG Han, WU Yuguang. Automatic calculation method of assembly error of mechanical parts with different contact surfaces [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38(6): 655-664.
- [23] 冉贞德, 程向东, 张立欣, 等. 基于雅可比旋量模型的行星齿轮传动系统三维偏差分析方法 [J]. 机械设计与研究, 2022, 38(4): 98-102, 108.
RAN Zhende, CHENG Xiangdong, ZHANG Lixin, et al. Three-dimensional tolerance analysis of planetary gearboxes based on Jacobian-torsor model [J]. Machine Design & Research, 2022, 38(4): 98-102, 108.
- [24] NVIDIA Corporation. CUDA C++ programming guide: release 12.0 [EB/OL]. [2022-10-11]. https://docs.nvidia.com/cuda/pdf/CUDA_C_Programming_Guide.pdf.
- [25] NVIDIA Corporation. Nvidia Turing GPU Architecture [EB/OL]. [2022-09-14]. <https://images.nvidia.cn/aem-dam/en-zz/Solutions/design-visualization/technologies/turing-architecture/NVIDIA-Turing-Architecture-Whitepaper.pdf>.

(编辑 李慧敏 刘杨)