DOI: 10.3901/JME.2013.06.103

复杂产品制造精度控制的数字化方法 及其发展趋势

林忠钦 来新民 金隼 王皓 朱利民 陈关龙
(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240)

摘要: 汽车车身、发动机等复杂产品通常要经历数十道乃至上百道加工工序, 零件毛坯偏差、机床误差、夹具定位误差以及操作、环境等因素引起的误差在制造过程中传递和累积形成产品综合偏差, 并最终影响产品整体性能和市场竞争力。面向工艺设计的线外质量控制, 根据产品结构和质量要求, 确定制造过程工位布置以及工艺参数; 面向工艺过程控制的线内质量控制, 则根据制造过程中所出现的尺寸偏差问题, 确定尺寸偏差根源并采取相应工艺控制措施, 两者相辅相成共同推动制造质量的提升。数字化方法是实现产品制造精度控制的关键。结合汽车车身、发动机制造精度控制的理论研究和工程实践, 阐述复杂产品制造精度控制的科学内涵和技术要点。基于描述多工位制造过程偏差产生、传递、累积与湮没的偏差流理论, 提出复杂产品制造精度数字化控制的总体框架。从数字化工艺设计和数据驱动的工序控制两方面, 总结和归纳面向线外质量控制的产品制造工艺数字化设计方法和面向线内质量控制的复杂产品制造工艺过程控制方法。针对高端装备和高性能产品的制造需求, 展望了复杂产品质量控制的发展趋势。

关键词: 数字化工艺设计 质量控制 汽车车身 汽车发动机 复杂产品

中图分类号: TH16

Digital Methods of Complex Product Manufacturing Precision Control and Its Development Trend

LIN Zhongqin LAI Xinmin JIN Sun WANG Hao ZHU Limin CHEN Guanlong
(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: The complex product manufacturing, e.g., autobody and engine, usually need dozens or even hundreds of manufacturing processes. Blank deviations, machine tool errors, jig positioning errors and errors by operating environment caused have been transferred, accumulated and formed product comprehensive deviation in the manufacturing process, and ultimately affect the product performance and market competitiveness. On the one hand, the manufacturing process station layout and process parameters are determined according to the product structure and quality requirements for technological design of the off-line quality control, on the other hand, the size deviation root caused and taken corresponding process control measures are determined at the instance of the size deviation in the manufacturing process for on-line quality control. Both complements promote the ascension of the manufacturing quality. Digital method play a key role in improving product accuracy of manufacturing. According to the theoretical and applied researches on the dimensional control of auto-body and engine, the scientific connotation and key techniques of dimensional control of complex products is explained. The general frame-work of digital dimensional control methods for manufacturing complex products is proposed based on the stream of variation theory(SOV), which describes the laws of generation, transmission, accumulation and absorption of variations in multi-station manufacturing processes. Then, the two-stage dimensional control of complex product is summarized. In the stage of product process development, the digital process design method is used to synthesize the product and tooling tolerance. In the stage of product manufacturing, the data-driven process control method is used to improve the process stability. Some thoughts are given on the development and trend of quality control techniques for high-end equipment and

high performance products.

Key words: Digital process design Quality control Auto-body Automobile engine Complex product

0 前言

汽车车身、发动机等都是典型复杂产品,不仅产品结构复杂,而且要经历数十道乃至上百道加工工序,其制造精度影响着产品整体性能和市场竞争力。20世纪90年代初,美国轿车车身综合尺寸误差在 $\pm 2\text{ mm}$ 以上,显著高于日本车体的 $\pm 1\text{ mm}$ 水平,为此丢掉了近30%的美国国内市场。美国“2 mm工程”^[1]借助于在线检测方法和数据驱动的质量控制方法,显著提高了车身装配质量监测和偏差源诊断能力,使美国三大汽车公司轿车车身制造质量赶上了国际先进水平,逐步夺回了被日本企业抢占的市场份额;中国“2 mm工程”也是异曲同工,不仅提高了离线检测条件下车身装配质量监测与偏差源诊断能力,而且改善了车身工艺设计,使我国汽车车身制造质量迅速达到国际先进水平,提高了国产轿车的市场竞争力。

数字化方法是实现制造精度控制的关键。从本质上讲,尺寸偏差都是在制造过程中引入的,是零件毛坯偏差、机床误差、夹具定位误差以及操作、环境等因素引起的误差在制造过程中传递和累积的结果,如同纵横交错的溪流汇入江河,可以形象地用偏差流描述^[2-5]。基于偏差流理论,产品制造精度控制可归结为两类问题,一是面向工艺设计的,即根据偏差流正向传递规律,确定制造过程工位布置以及工艺参数;二是面向工艺过程控制的,即针对制造过程中所出现的尺寸偏差问题,采用偏差流逆向溯源方法,确定尺寸偏差根源并采取相应工艺控制措施。前者是属于线外质量控制范畴,后者属于线内质量控制范畴^[6]。制造精度控制的数字化是采用模拟手段揭示制造过程中偏差流的传递规律,用定量分析替代传统的经验比对,变革复杂产品制造工艺设计和工艺控制方法。

本文从设计和制造两个方面,阐述复杂制造过程精度控制的科学问题及技术体系,总结和归纳面向线外质量控制的复杂产品制造工艺数字化设计方法和面向线内质量控制的复杂产品制造工艺过程控制方法;结合国际上高端装备和高性能产品制造的迫切需求,思考和展望产品制造质量控制的发展趋势。

1 复杂产品制造精度控制数字化方法的总体框架

复杂产品制造过程由一系列的零件加工及层次化的装配工序构成。经过冷、热、粗、精等加工工序的零件先装配成部件,该部件又变成下一层装配中的子部件,直至形成完整的产品。制造过程中偏差传递和累积规律十分复杂,如薄壁结构装配偏差累积与湮没现象并存,零件装配后的偏差可以小于单个零件偏差,基于刚性累积理论的偏差分析方法难以刻画其传递过程。如何定量描述复杂产品制造过程偏差流,揭示误差的产生、传递、积累与湮没规律,是制造精度控制面临的关键科学问题。

制造工艺是连接装备系统和被加工产品的纽带,涉及装备精度及其动力学性能、工件材料属性及工具对工件作用的物理过程,决定着产品精度和物理性能。如图1所示,以CAD/CAE产品数据管理(Product data management, PDM)为代表的产品数字化,提高了设计效率和产品性能;以数控(Numerical control, NC)/柔性制造系统(Flexible manufacturing system, FMS)/企业资源计划(Enterprise resource planning, ERP)为代表的制造装备及制造系统数字化,显著提高了产品生产效率;而以计算机辅助工艺设计(Computer aided process planning, CAPP)/面向装配设计(Design for assembly, DFA)为代表的工艺数字化,为改善产品制造精度和物理性能提供了有效手段。

图1 复杂产品开发过程的数字化

从制造工艺学和工序控制论角度,产品制造精度控制数字化涵盖工艺设计和数据驱动的工序控制两个方面,是采用数学建模与仿真手段,对产品制

造的成形成性过程进行定量描述,使生产之前的工艺设计方案和生产过程中的质量控制决策从基于经验的试凑模式向基于科学的推理模式转变。

图2是复杂产品精度控制数字化方法的总体框架。基于偏差流的产生、传递、积累与湮没规律,从工艺设计角度,可以建立多工序制造过程中产品精度的预测模型,进而通过工艺过程仿真,确定工艺设计方案和工艺参数设置,形成满足产品精度指标的工艺设计;从工序控制角度,可以建立多工序制造过程中多误差源诊断模型,通过产品质量检测数据分析,确定制造过程中误差源位置及其补偿(调整)策略,以保证产品的精度要求。

图2 复杂产品精度控制数字化方法的总体框架

2 面向线外质量控制的产品制造工艺数字化设计方法

田口方法的线外质量控制主要是针对产品设计和工艺设计过程。在工艺设计阶段,通过生产系统规划、加工机床选型、工装夹具设计及工艺参数优化,提高产品精度设计水平。数字化工艺设计借助制造过程偏差流仿真进行方案的动态调试,为复杂产品开发过程的线外质量控制提供了有效手段。

2.1 基于制造过程偏差仿真的数字化工艺动态调试

轿车车身、飞机机身等复杂产品通常由大量薄板成形零件装配而成,最终产品尺寸公差是零件公差、夹具公差以及装配顺序等工艺要素综合作用的结果。如何根据最终车身产品公差要求分配零件公差和夹具定位公差,是车身工艺设计的核心任务。由于柔性薄板装配偏差可以小于零件偏差,传统的基于刚性假设的误差累积理论不再有效^[7-9]。尽管国际上已出现了商业的偏差分析软件(如VSA、3DCS等),但它们尚不能精确地模拟薄板装配过程中的柔性变形。现有的工艺设计方法主要依靠类比设计,再借助实物样车试制进行设计方案修正。如美国、日本和欧洲等汽车企业均采用图3实线部分所示的

样车试制过程,逐步修正初始工艺设计,以保证零件公差、夹具公差、零件连接方式、装配顺序等满足车身综合尺寸公差要求,一般需要制作50~70台样车,花费8~12个月的试制周期。汽车发动机工艺设计也有类似的情况。尽管发动机零件刚性大,但由于要求达到微米级加工精度,也需要考虑零件装夹和切削变形引起的误差,零件加工工艺设计往往需要大量的现场试验与调试。

图3虚线对应部分是数字化工艺设计流程,与传统方法相比,两者的根本区别是用装配过程模拟替代实物样车试制,将基于物理模型的尺寸精度评价转变为基于数字模型的尺寸精度评价,最终确定零件公差、装配夹具定位误差、装配顺序等工艺要素。图4是某新车型开发过程中数字化工艺设计系统替代实物样车拼装系统的例子。对于普通机械产品,该工艺设计流程同样适用。

图3 基于样机试制的工艺设计与基于偏差模拟的工艺设计流程对比

图4 车身装配偏差仿真系统替代实物样车试制的实例

2.2 复杂制造过程偏差流仿真方法

2.2.1 单工位制造过程的偏差模拟

在每个零件加工或装配工位中,工艺系统综合刚度影响着各种误差源在零件尺寸上的“复映”过程。例如薄板结构装配经历装夹定位、焊枪闭合、点焊连接、释放回弹等工步,由于薄板零件刚度低,需要采用 $N-2-1$ 定位模式进行装夹定位^[10], N 个定位点的实际接触点位置取决于夹具定位单元和零件

偏差的统计状态。如何精确地模拟这种装配过程成为工艺优化的关键问题之一;又如,在发动机缸体镗削加工中,通过工件装夹过程及镗削过程模拟,规划装夹位置和夹紧力也是镗削工艺设计的关键。

图5示出薄板结构装配偏差建模方法的基本思路,主要是通过引入接触单元,精确计入夹紧顺序等工艺过程与零件偏差的耦合作用^[11],可有效地解决柔性薄板装配偏差的预测精度问题。

图5 薄板结构单工位装配偏差建模

2.2.2 多工位加工过程偏差流数学描述

如前所述,对于汽车车身装配和发动机缸盖加工等多工位制造过程,在单工位制造过程偏差模型的基础上,建立多工位装配过程中工位间偏差的传递关系模型,可以定量地描述多源偏差的传递、累积甚至湮没规律,分析工艺参数对产品综合尺寸偏差的影响,为产品制造全过程偏差预测和系统性地工艺优化提供理论基础。

图6示出汽车车身多工位装配过程偏差流建模思路^[16],基于现代控制理论,以车身偏差为状态变量 $V(s)$,零件偏差和定位偏差为控制变量 $U(s)$,测量结果为输出变量 $Y(s)$,工位为时间参数,建立描

述多工位偏差传递的状态空间方程,定量描述偏差的传递路径和传递率,通过计算状态变量和变量间的灵敏度,确定工艺参数的动态调试策略。

2.3 应用实例

2.3.1 汽车车身装配工艺的数字化封样

车身数字化封样系统:在单工位薄板装配偏差分析模型和多工位装配偏差流描述模型的基础上,可以建立图7所示的汽车车身数字化封样系统。该系统以典型结构工艺数据库为参考依据,给定初始装配顺序、零件公差、定位装夹和连接工艺参数,通过装配偏差模型预测车身匹配间隙、面差、形状偏差等几何精度指标,再通过参数动态调试确定优化的工艺方案。

某车型前脸区域零件公差设计:如图8a所示,轿车前脸装配涉及五大总成数十个薄板件,是多曲面交汇、多零件变形协调、多偏差积聚的区域,影响着前部密封、噪声、外观等产品性能。图8b是采用车身数字化封样系统进行偏差分析的结果。在实际设计中,可根据封样系统给出的偏差流传递路径与传递率,确定零件公差、定位方案等工艺参数优选策略,实现从给定的前脸零件匹配公差到各零件公差的分配。

2.3.2 汽车发动机缸体加工工艺优化设计

缸体是汽车发动机的核心部件,通常要经过20

图6 车身多工位装配的偏差流建模

图7 汽车车身数字化封样系统

(a) 前脸结构

(b) 装配偏差分析

图8 某轿车前脸公差设计

多道工序加工而成。缸孔直径误差和圆柱度误差直接影响到发动机的摩擦功和压缩比等整机性能，如何设计缸体加工工艺是汽车发动机开发的关键问题之一。如图9所示，为了控制内孔加工误差，首先进行了缸体加工过程中的多工序偏差流分析，再针对缸孔镗削加工与珩磨加工两个关键偏差流控制节点，建立了缸孔镗削加工与珩磨加工工艺仿真模型；仿真分析表明，通过优化镗削过程中的夹具支撑点位置，可减小单缸缸孔圆柱度并改善四缸圆柱度一致性；通过设计新型珩磨条结构，可显著消除缸孔鼓形误差。

图9 某车型发动机缸体内孔加工工艺设计

3 面向线内质量控制的数据驱动的工艺过程控制方法

无论是汽车车身制造还是发动机制造，都是典型的复杂产品大批量制造过程，生产线长、工装夹具多、偏差相互耦合。如何快速地确定误差源是产品精度控制面临的关键技术挑战，离线检测条件下带来的小样本问题进一步加大了误差源诊断的难度。因此，小样本检测条件下制造过程偏差源诊断是实现产品制造精度控制的核心。

3.1 数据驱动的多工位制造过程精度控制流程

统计过程控制(Statistical process control, SPC)借助控制图分析，确定工艺过程统计状态，对处于非受控状态的工艺过程，需要进一步分析故障源并进行工艺改进。传统的SPC方法重点在制造过程质量监控，而非制造过程误差源诊断，根据控制图很

难解释制造过程中质量问题的原因。为了建立车身尺寸偏差与故障源间的映射关系,可以通过主成分分析(Principal component analysis, PCA)和相关性分析,在大量繁杂测量数据中提取尺寸误差的主要变化特征,再与装配夹具的潜在故障模式相比较,实现车身产品装配偏差源的定位^[17-19]。如果没有车身装配偏差流的定量描述,多工位间偏差的传递和累积关系仍然处于黑箱状态,单纯的主成分分析方法难以解决多工位制造过程中误差源的诊断问题;同时,如果仅依靠测量数据统计分析来推断产品的质量状态,客观上要求检测数据具有大样本特征,难以在小样本检测条件下应用。

图10示出数据驱动的多工位制造工艺控制方法。该方法通过当前数据统计特征与历史质量数据、

产品结构知识相结合,将基于大样本检测数据的质量状态监测拓展到基于小样本数据检测的质量状态监测;通过设定产品总体尺寸波动方差的阈值,对大于该阈值的测点进行聚类分析,确定质量改进案例;以多工位制造过程中偏差的产生、传递、累积和湮没规律为基础,通过主成分分析法与工位间偏差传递关系相结合,将偏差源诊断从单工位内拓展到多工位间;通过质量改进案例的解决,使产品尺寸误差波动降低到设定阈值内,完成一个质量改进戴明循环。当降低尺寸波动方差阈值时,将产生新的质量改进案例,进入新的戴明循环。随着尺寸波动方差阈值不断降低,产品制造精度不断得到改进。

图10 数据驱动的多工位制造工艺控制

3.2 小样本检测条件下制造过程偏差源诊断方法

3.2.1 小样本检测条件下复杂产品制造质量精确评价

当用离线的三坐标测量机进行复杂产品质量检测时,一般每天定期抽检2~3件产品,相对于每天产品产量的样本总体,这是一个典型的小样本问

题,采用传统的统计方法难以在短期内对样本总体水平给出准确估计。如图11所示,可将经验贝叶斯方法引入这种质量评价中,建立基于经验贝叶斯理论的制造质量动态评价方法^[17-22],通过历史检测数据与当前检测样本的信息融合,以提高制造质量评价精度。

图11 基于经验贝叶斯理论的制造质量动态评价

3.2.2 基于模式匹配的制造过程误差源诊断

制造过程中夹具故障、零件偏差以及工艺系统刚度是影响尺寸精度的主要因素,工艺过程检测数据与误差源间具有潜在的映射关系,探寻这种映射关系的过程也就是误差源的诊断过程^[23]。首先通过检测数据的主成分分析,确定当前尺寸偏差的主要

变化模式(主成分),再与制造工位的潜在失效模式进行匹配,使用最小距离分类器锁定夹具误差源。潜在失效模式由工装夹具定位分析模型来构造,也可以是零部件已有的偏差模式,形成潜在的故障模式库。图 12 给出了基于模式匹配的偏差源诊断的基本思路。

图 12 基于模式匹配的偏差源诊断的基本思路

3.3 应用实例

3.3.1 车身后围板尺寸误差源诊断

如图 13 所示,某轿车后保险杠与尾灯、行李箱盖的匹配间隙超差,10 个测点 z 向坐标波动大(6σ 在 3.5~5.2),影响了整车匹配质量。为此,首先对检测数据进行相关分析和主成分分析,确定测点平

动为主要偏差模式(图 14);再考察后围板的装配工艺,发现当遗漏补焊焊点时将会发生后围板 z 向平动模式,通过这种偏差变化模式与潜在失效模式的匹配,确定了“后围板焊点遗漏”为误差源。经过整改措施后,测点偏差 6σ 值从原来的 3.5~5.2 mm 减小到 1.3~2.7 mm。

图 13 测点偏差主成分与变化模式

图 14 误差源改进前后效果对比

3.3.2 汽车发动机制造过程误差源诊断

图 15 示出某型号汽车发动机缸盖多工序加工过程误差源诊断流程。在该型号发动机中缸盖底面至燃烧室底面距离为关键尺寸,通过检测发现存在尺寸偏差,该偏差直接影响到燃烧室容积和发动机压缩比。该尺寸主要由 OP10、OP20、OP80、OP140 等多道粗加工、半精加工、精加工工序加工完成。首先,定义机床坐标系、夹具坐标系和零件坐标系,建立零件偏差矢量模型。然后通过齐次变换技术,

建立发动机缸盖多工序偏差流状态空间模型,并构建基于数据驱动和工程模型的误差源诊断方法^[24-27]。最后基于误差源诊断方法和 OP140 工序尺

寸检测数据,诊断出 OP10 工序装卡夹具的三个定位销 Z1、Z2、Z3 磨损程度不同,造成了 OP140 工序底面至燃烧室距离产生了尺寸偏差。

图 15 数据驱动的发动机缸盖多工序制造过程误差源诊断

4 复杂产品质量控制的发展趋势

未来机械装备系统的结构和功能将愈加复杂,其服役能力及工作品质要求更趋极端化,需要探索复杂制造过程质量控制新原理新技术,突破现有制造技术的极限^[28]。国内外研究机构和学者对此给予了高度重视,以应对复杂产品制造质量控制技术的变革。纵观国际学术界和工业界近期研究工作,制造质量控制研究的发展趋势将体现在三个方面。

4.1 制造质量控制从“精度驱动”向“性能驱动”转变

如图 16 所示,像航空发动机涡轮叶片工作温度达 $1\,100\,^{\circ}\text{C}$,寿命要求达到数千小时;飞机起落架冲击载荷达数百吨,需要经受 3 000 飞行小时以上的考验,这些高端装备的零部件要承受高温高压环境、强冲击载荷、长服役寿命的考验,要求零件具有单晶组织、连续流线等特定的内部微观组织与表面完整性。另一方面,像火箭发动机喷管要求具有高效传热性能,螺旋锥齿轮要求具有精密传动性能,导弹导引头天线罩要求具有均匀透波性能,这些产品必须以导流、传动和透波等物理性能作为制造过程的控制目标。因此,制造质量控制的发展趋势将以使用/服役性能为目标,研究性能驱动的数字制造新原理和新方法,主要体现在面向服役性能

图 16 高端装备零部件组织结构和服役性能要求

的抗疲劳制造、性能驱动的公差精量化设计、测量-加工一体化等方面。

4.2 制造质量控制从“考虑力学效应为主”到“考虑力学与物理效应的融合”

如图 17 所示,现代制造工艺的另一个特征是越来越多地融入现代物理效应。超精密抛光能够达

到几十纳米的面形精度和小于 1 nm 的表面粗糙度，其材料去除过程涉及微观力、热、磁、光、电等多能场耦合作用。传统电解加工多用于粗加工，而精密电解加工通过对复杂电场/流场耦合作用的精确控制，能够实现 50 μm 的航空叶片面形精度；激光加工技术的发展更依赖于光与物质的作用机理的研

究。考虑力学与物理效应融合的制造过程仿真具有多领域、跨尺度、多能场耦合的特点，所涉及的科学问题包括力、热、电、磁、光等多能场复合作用下材料去除/添加过程的微观机理；复合能场作用下能量传输与反应物/产物传质过程的耦合规律与调控机制等。

图 17 考虑力学与物理融合的制造过程

4.3 制造质量控制从“开环监测”向“闭环反馈”转变

传统的线内质量控制虽然也强调预测、反馈和校正，但基本上处于“开环监测”状态，操作者是反馈和校正的主体。智能加工装备为制造质量控制从“开环监测”向“闭环反馈”转变提供了基础。英国学者在 MTM 杂志 2009 年发表的论文^[29]总结了下一代数控机床的体系结构，与当前的数控机床相比，在运动控制闭环和数控系统闭环的基础上增加了两个闭环，一个是过程控制闭环，另一个是目标产品质量检测到工艺设计的闭环，如图 18 所示。

由于加工过程是一个涉及力-热耦合作用，以及振动、变形、摩擦影响的复杂过程，加工过程闭环控制面临以下挑战，在过称信息检测方面，关键物理参量缺乏实时原位测量手段；在工艺知识方面，快时变、参数不确定、微分/偏微分方程描述的制造过程的输出响应的精确计算异常困难，在机床智能结构单元方面，目前只有智能刀架、刀柄、主轴等少数主动控制手段。为此，CIRP 在 2008~2010 年连续举办“机床-工艺交互作用”国际会议探讨上述难题。

图 18 下一代智能数控机床体系示意图

5 结论

汽车车身、汽车发动机等复杂产品的尺寸精度直接影响到产品的整体性能,精度控制是这些产品质量控制的核心问题。精度控制的数字化是采用模拟手段揭示复杂制造过程中偏差的传递规律,使质量控制和改进决策从基于经验的试凑向基于科学的推理模式转变,从而变革产品制造工艺设计和过程控制方法。

基于偏差流理论,精度控制可归结为“面向线外质量控制的复杂产品制造工艺数字化设计方法”和“面向线内质量控制的复杂产品制造工艺过程控制方法”两类问题,前者属于线外质量控制范畴,后者属于线内质量控制范畴,两者相辅相成共同决定了复杂产品制造精度。掌握了复杂制造过程偏差流的产生、传递、积累与湮没规律,从工艺设计角度,可以预先设置工艺设计方案和工艺参数,在成本约束下使产品达到最高的精度水平;从工序控制角度,可以确定制造过程中误差源位置及其补偿(调整)策略,实现产品精度的持续改进。

理论分析和工程实践表明,以多工位制造偏差流模拟为基础的工艺数字化设计方法和以多工位制造过程偏差模式匹配为基础的制造工艺过程控制方法,形成了产品精度数字化控制的系统方法,为复杂产品质量控制提供了理论和技术基础。

高端装备服役能力及工作品质的极端化,对复杂产品质量控制提出了更高的要求。复杂产品质量控制研究需要从“精度驱动”向“性能驱动”、从“考虑力学效应为主”向“考虑力学与物理、化学效应融合”、从“开环监测”向“闭环反馈”转变,探索复杂制造过程质量控制新原理新方法,突破现有制造技术的极限。

参 考 文 献

- [1] 林忠钦. 汽车车身制造质量控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- LIN Zhongqin. Auto body manufacturing quality control technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [2] HU S J. Stream of variation theory for automotive body assembly[R]. Annals of the CIRP, 1997, 46(1): 1-6.
- [3] HUANG Q, ZHOU N R, SHI J J. Stream of variation modeling and diagnosis of multi-station machining processes[R]//Proceedings of IMECE 2000 International Mechanical Engineering Congress & Exposition,

November 5-10, 2000, Orlando, Florida.

- [4] HUANG W Z, LIN J J, BEZDECNY M, et al. Stream-of-variation modeling — Part I: A generic three-dimensional variation model for rigid-body assembly in single station assembly processes[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129: 821-831.
- [5] HUANG W Z, LIN J J, KONG Z Y, et al. Stream-of-variation(SOVA) modeling—Part II: A generic 3D variation model for rigid body assembly in multistation assembly processes [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129: 832-842.
- [6] 王世芳. 工序控制论[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1991.
- WANG Shifang. Process control theory[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1991.
- [7] TAKEZAWA N. An improved method for establishing the process wise quality standard[R]. Reports of Statistical and Applied Research. Union of Japanese Scientists and Engineers(JUSE), 1980, 27(3): 63-76.
- [8] LIU S C, HU S J. An offset finite element model and its applications in predicting sheet metal assembly analysis[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1995, 35(11): 1545-1557.
- [9] LIU S C, HU S J, WOO T C. Tolerance analysis for sheet metal assemblies[J]. Journal of Mechanical Design, 1996, 118: 62-67.
- [10] LIU S C, HU S J. Variation simulation for deformable sheet metal assemblies using finite element methods[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997, 119: 368-374.
- [11] HU M, LIN Z Q, LAI X M, et al. Simulation and analysis of assembly processes considering compliant, non-ideal parts and tooling variations[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(15): 2233-2243.
- [12] JIN J H, SHI J J. State space modeling of sheet metal assembly for dimensional control[J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1999, 121(4): 756-762.
- [13] DING Y, CEGLAREK D, SHI J J. Modeling and diagnosis of multistage manufacturing processes part I-state space model[C]// Proceedings of the 2000 Japan/USA Symposium on Flexible Automation, Ann Arbor, 2000: 23-26.

- [14] ZHOU S, HUANG Q, SHI J. State space modeling of dimensional variation propagation in multistage machining processes using differential motion vector[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(4): 296-309.
- [15] LIU J, JIN J H, SHI J J. state space modeling for 3-D variation propagation in rigid-body multistage assembly processes[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2010, 7(2): 274-290.
- [16] LAI X M, TIAN Z Q, LIN Z Q. A simplified method for optimal sensor distribution for process fault diagnosis in multistation assembly processes[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, 2008, 130(5): 051002-1-13.
- [17] HU S, WU S W. Identifying root cause of variation in automobile body assembly using principal component analysis[J]. Trans. of NAMRI, 1992, 20(3): 311-316.
- [18] CARLSON J S. Assembly root cause analysis: A way to reduce dimensional variation in assembled products[J]. The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 2003, 15: 113-150.
- [19] LIU S C, HU S J. Assembly fixture diagnosis using designated component analysis[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005, 127: 358-368.
- [20] 林忠钦, 连军, 倪军, 等. 基于小样本的车身装配尺寸质量动态高精度评价方法[J]. 机械工程学报, 2001, 37(11): 62-65.
- LIN Zhongqin, LIAN Jun, NI Jun, et al. High precision evaluation of the autobody assembly quality based on small sample size[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(11): 62-65.
- [21] 刘银华, 金隼. 基于小数据集贝叶斯网络建模的偏差源诊断方法[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(5): 701-705.
- LIU Yinhua, JIN Sun. Bayesian networks modeling based on small samples for variation-source diagnosis[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012, 46(5): 701-705.
- [22] JIN S, LIU Y, LIN Z Q. A Bayesian network approach for fixture fault diagnosis in launch of the assembly process[J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(23): 6655-6666.
- [23] CEGLAREK D, SHI J, WU S M. A knowledge-based diagnosis approach for the launch of the auto-body assembly process[J]. ASME Transactions Journal of Engineering for Industry, 1994, 116(4): 491-499.
- [24] DU S C, LÜ J, XI L F. A robust approach for root causes identification in machining processes using hybrid learning algorithm and engineering knowledge[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, 23: 1833-1847.
- [25] LIAN J, LAI X M, LIN Z Q, et al. Application of data mining and process knowledge discovery in sheet metal assembly dimensional variation diagnosis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129: 315-320.
- [26] HASSAN A, SHARIFF N B M, SHAHAROUN A M, et al. Improved SPC chart pattern recognition using statistical features[J]. International Journal of Production Research, 2003, 41(7): 1587-1603.
- [27] ZHOU S, CHEN Y, SHI J. Root cause estimation and statistical testing for quality improvement of multistage manufacturing processes[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2004, 1(1): 73-83.
- [28] 王国彪. 国家自然科学基金委员会机械工程学学科发展战略报告(2011-2020)[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- WANG Guobiao. National Natural Science Foundation of China mechanical engineering discipline development strategy report(2011-2020)[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [29] MEKID S, PRUSCHEK P, HERNANDEZ J. Beyond intelligent manufacturing: A new generation of flexible intelligent NC machines[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(2): 466-476.

作者简介: 林忠钦, 男, 1957 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师, 中国工程院院士。主要研究方向为薄板成形与装配质量控制、复杂产品数字化设计等。

E-mail: zqlin@sjtu.edu.cn