DOI: 10.3901/JME.2018.02.102

基于逆向工程的焊接过程有限元模拟*

赵文勇¹ 刘湘波¹ 吴海江² 魏艳红¹ 张韬² 李卓²

(1. 南京航空航天大学材料科学与技术学院 南京 211106;

2. 上海翼锐汽车科技有限公司 上海 201805)

摘要: 传统的针对复杂构件的焊接过程有限元模拟均是基于理论的、理想的简化几何模型,其问题是模型建立的过程较为漫长,精度不足;而焊接构件在焊接前往往经过前道工序诸如锻造的处理,使得构件实际尺寸与原始设计尺寸不符,从而造成实际构件尺寸形状与理论几何模型存在差异。快速制造系统中用于非规则复杂曲面实体建模的逆向工程技术近年来得以快速发展,将其运用于复杂非规则焊接件的焊接过程的有限元模拟不仅可以提高建模精度,而且可以缩短建模周期。以某车车身侧围后内板为例,采用逆向工程技术获得实体模型,证实了基于逆向工程建模的高效性和精确性;并建立电阻点焊的有限元模型,分析不同焊接工序下应力场和变形的分布情况,研究了后道工序的应力场和变形对前道工序的影响,以优化焊接工艺,指导生产实践。

关键词: 复杂构件; 逆向工程; 有限元分析

中图分类号: TG441

Finite Element Simulation of Welding Process Based on Reverse Engineering

ZHAO Wenyong¹ LIU Xiangbo¹ WU Haijiang² WEI Yanhong¹ ZHANG Tao² LI Zhuo²

(1. College of Materials Science and Technology,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106;

2. Shanghai Yi Rui Automotive Technology Co., Ltd., Shanghai 201805)

Abstract: The traditional finite element modeling of the welding process for complex components is based on the theoretical and ideal CAD model. The problem is that the modeling period is long and the precision is not high enough. However, the machining before actual welding processing, such as forging, often change the shape and size of the actual component comparing with the designed one. It finally results in the difference between the actual and theoretical geometry model. The application of reverse engineering technology which used in irregular complex surface modeling of rapid manufacturing system and developed rapidly in recent years for welding structure can not only improve the modeling accuracy, but also shorten the whole modeling period. Taking the inner panel of a vehicle rear body side as an example, the reverse engineering technology is used to obtain the CAD model, which proves the high efficiency and accuracy of the reverse engineering modeling. In order to optimize the welding process and guide the production practice, the finite element model based on resistance spot welding is established to analyze the distribution of stress field and deformation under different welding steps and the interaction of stress field and deformation between two continuous processes.

Key words: complex components; reverse engineering; finite element analysis

0 前言

随着计算机技术的不断发展和有限元分析方法相关理论知识的不断完善,利用有限元法模拟分析焊接复杂过程的准确度得到进一步提升。

DENG 等^[1]利用 Abaqus 研究了 2.25Cr-1Mo 钢管多层多道对接焊后微观组织结构以及温度场和残余应力场的分布情况,其中残余应力场的预测考虑了固态相变的影响,最后得出固态相变使得构件体积和屈服强度发生改变,从而影响了残余应力的分布。LEE 等^[2]对稳压器安全喷嘴异种金属焊接残余应力分布进行了数值模拟,并结合物理试验验证了简化模型的有效性和模拟结果的准确性。扬州大学刘基

* 江苏高校优势学科建设工程(PAPD)和中央高校基金重大项目培育基金(NP2016204)资助项目。20170527 收到初稿,20170921 收到修改稿

冈^[3]对工程车车架的焊接变形进行了预测和控制,采用“局部-整体”映射有限元法预测了焊接变形情况,并得出焊接顺序对焊接变形的影响结果。可以看出,使用有限元法模拟焊接过程的温度场和应力应变场以及预测可能出现缺陷的位置已经相当成熟^[4-12],但是,作为有限元分析前处理的几何建模均是基于构件的原始设计尺寸或者对原始设计的简化。实际焊接构件在进行有限元计算时,往往经历了前道工序诸如锻压的处理,造成构件实际尺寸与原始设计尺寸不符,因此采用传统的几何建模方法模拟计算出的结果与实际存在一定偏差。此外,对于由复杂非规则曲面构成的构件,对模拟精度要求更苛刻,采用传统的简化建模方法处理也不能满足其对精度的要求,而且建模周期较长。因此,为实时、准确、高效的获取焊接构件尺寸形貌进行有限元建模,本文尝试采用一种的新的曲面建模技术——逆向工程。

逆向工程(Reverse engineering, RE)又称反向工程,它是对产品设计过程的一种描述,即通过对已存在的实体三维尺寸的测量,利用计算机辅助设计(CAD)进行建模,从而实现产品再设计、创新和制造的过程。自 20 世纪 80 年代以来,逆向工程在新产品开发、创新以及再加工过程当中扮演着重要的角色,它涉及涵盖航空、航天、汽车、船舶、医学、文物保护等在内的众多领域^[13-17]。逆向工程针对复杂非规则曲面建模优势明显,特别地,对于未知模糊尺寸构件,能够准确地进行几何重现。图 1 为基于逆向工程的焊接过程有限元模拟分析流程图。

图 1 基于逆向工程的焊接过程有限元分析结构图

1 逆向工程曲面建模过程与进展

得益于快速制造技术的发展,逆向工程技术用来构建复杂、不规则以及未知尺寸等产品构件的模型。逆向工程理论研究包括几何测量、图像处理、计算机视觉和几何造型等领域,逆向工程主要包含

三个阶段:模型点云数据的收集、模型曲面的拟合和实体化以及模型的再设计和加工制造。

1.1 数据收集与预处理

点云数据的精度是否满足要求是逆向工程设计的关键,目前,三维数字化测量技术可分为接触式测量和非接触式测量两种。接触式数据采集包括基于力触发原理的接触式采集、连续扫描式采集和磁场法等;非接触式数据采集主要基于光学原理采集数据,包括激光扫描法、结构光法、超声波法和工业计算机断层扫描成像法等^[18-19],几种测量方式的特点如表 1 所示。随着激光技术的发展,基于激光光源的非接触测量方法被广泛采用,与接触式相比,它有效规避了因接触力而引起的随机误差和系统误差。

表 1 几种测量方法的比较

测量方法	精度范围	测量速度	测量曲面复杂度	对材料有无限制	测量成本
激光三角法	$\pm 5 \mu\text{m}$	一般	一般	无	较高
结构光法	$\pm 1 \sim \pm 3 \mu\text{m}$	快	好	无	一般
CT 及超声波法	1 mm	较慢	好	无	高

目前通用的逆向工程商用软件有 Geomagic studio、Image Ware、Copy CAD 和 RapidForm^[20-23]等。测量获得的点云数据十分庞大,如图 2 所示,是一个使用 Kreon 激光扫描仪获得的汽车覆盖件点云数据^[14]。数据测量过程中常常会混入一些无用的噪声点,因此需要将点云数据导入专业的逆向工程软件中进行数据杂点的删除、噪声点的滤除,排序,平滑化和筛减^[24]。浙江大学的钱锦峰^[25]对逆向工程中的点云数据处理进行了研究,指出噪声点的处理方法与获取的点云数据排列形式有关。对于具有行×列特点和经光刀扫描后基本位于同一等截面线上特点的点云数据,可采用平滑滤波法进行噪声处理;而对于完全散乱的、无组织的点云数据,则通过建立点与点之间的拓扑关系,计算点与该点邻域各点的距离然后取平均值,若平均距离超过设定的阈值,则该点为噪声点,进行删除,否则,该点为正常点,进行保留。采用非接触式数据采集方法会获得大量的冗余数据点,在一定程度影响曲面构建效率,因此有必要在保证一定的精度下进行点云数据精简。精简的方法视点云数据类型而定,散乱的数据采用随机采样的方法进行精简,对较整齐的点云数据则采取等间距缩减、倍率缩减或者等量缩减的方法进行精简。目前通用的逆向工程软件一般采用均匀网格的方法进行精简^[26]。图 3 为汽车覆盖件噪声杂点处理后的点云图。

图 2 汽车覆盖件原始点云数据图

图 3 汽车覆盖件噪声杂点处理后的点云图

复杂物体一般由多个曲面构成,为使在曲面之间进行平滑过渡,减少计算量并保证精度,需要对点云数据进行分割。保证数据一致的凹凸性和良好的曲面重构时态性为分割的原则。分割的方法主要有基于边、基于面和基于群簇三种:基于边的方法是从数学的角度出发,以观测点法矢或曲率发生突变处为边界^[27];基于面的方法根据曲面方程进行拟合数据;基于群簇的方法则是采用群簇技术把几何参数相似的数据点聚为一类进行分割,但是容易出现细碎面片,需要进一步处理^[28-29]。

1.2 曲面拟合与实体化

曲面拟合是逆向工程的关键步骤,可分为点云数据直接拟合曲面和曲线插值拟合曲面两种。浙江大学钱锦峰^[25]详细论述了曲面拟合算法以逼近数据点,采用的方法为最小二乘法。对于平面、圆柱面、球面、抛物面等二次曲面,首先建立曲面的二次方程,然后通过最小二乘法求解得到曲面方程的参数,实现曲面方程的曲面拟合,图 4 为二次曲面拟合实例。目前,自由曲面拟合和优化是很多研究工作者研究的重点。自由曲面的拟合方法根据源数据的特点有 B 样条法^[30-31]、NURBS 法和 Bezier 法等。B 样条中,相应顶点对局部的控制比较明显,灵活性较大^[32]。NURBS 法相对于 B 样条和 Bezier 法,加入了控制点的比重,可以准确地表示二次曲线曲面,并且可以用统一的表达式表示自由曲面和

规则曲面,但是由于 NURBS 法对权因子的选择要求高,容易出现图形畸变,曲面的光顺性很难保证,同时计算量庞大,需要空间更大。

图 4 二次曲面拟合实例

如图 5 所示,为汽车覆盖件曲面拟合后的形状。将曲面拟合后的模型数据导入到 CAD 软件中进行缝合、布尔运算等生成有质量、有厚度的实体以完成逆向工程的最终建模。对通过逆向工程建立的模型进行有限元分析,可实现产品构件的结构力学分析、优化设计和再创新^[33-35]。

图 5 汽车覆盖件曲面拟合后的形状

2 基于逆向工程的汽车侧围后内板焊接过程有限元分析

目前,汽车车身大部分是由冲压板材拼焊而成,焊后的残余应力和变形分布影响各拼焊板部件之间的组装,因此选择合适的焊接工艺,准确地对冲压板拼焊过程进行模拟至关重要。汽车侧围后内板是车身关键部位,是典型的由复杂非规则曲面构成的构件。采用逆向工程技术对某汽车侧围后内板进行曲面建模,并对其焊接过程进行有限元数值模拟,分析不同焊接工序下残余应力场、变形的分布以及后一道工序对前一道应力场、变形的影响以优化焊接工艺,实现构件焊接质量的改善。

2.1 侧围后内板曲面建模

利用某型号扫描仪扫描得到的某汽车侧围后内板各组件的点云数据如图 6 所示,可以看出,点云

数据图准确地表征了侧围后内板各组件的表面形貌特征。由于点云数据中混杂了许多噪声点和杂点,因此将点云数据导入专门的逆向工程软件中进行去噪、精简、修复以及曲面拟合。随后将曲面拟合后的模型导入 Solidworks、UG 等专门的 CAD 软件中进行实体化,最终得到的侧围后内板的逆向总成模型,如图 7 所示。

(a) 组件 C1

(b) 组件 C2

(c) 组件 C3

(d) 组件 C4

图 6 侧围后内板各组件点云数据

图 7 侧围后内板逆向总成实体模型

2.2 侧围后内板有限元分析

将利用逆向工程技术获得的实体模型导入专业的网格划分软件中进行网格划分,网格类型以六面体网格为主,并且焊缝位置及其周围、曲面曲率发生突变处网格尺寸较小,远离焊缝、截面比较平坦的位置网格尺寸较大,疏密网格之间采用网格过渡技术进行过渡。网格划分结果如图 8 所示。

图 8 侧围后内板的有限元网格模型

将网格模型导入到专业的有限元计算软件中,设定相应的材料性能参数、焊接参数、热-电-力学边界条件以及不同的焊接工序进行数值模拟计算,即得到不同焊接时刻、不同焊接工序下侧围后内板残余应力和变形的分布情况。

侧围后内板所采用的焊接方法为电阻点焊。在有限元建模过程中,电传导满足方程式(1),热传导满足方程式(2)

$$\rho(T)U = I \quad (1)$$

$$C(T)T + K(T)T = Q + Q_E \quad (2)$$

式中, $\rho(T)$ 为热电系数矩阵; U 为电压矩阵; I 为电流矩阵; $C(T)$ 为比热容矩阵; T 为温度矩阵; $K(T)$ 为热传导矩阵; Q 为热流量矢量; Q_E 为电流流动生产的焦耳热流量。

方程式(1)、(2)中的 $\rho(T)$ 和 Q_E 共同实现电流生

热和热传导的耦合, 其中 Q_E 由式(3)决定

$$Q_E = \int B^T q_E dV \quad (3)$$

式中, $q_E = i^2 R$; B 为几何矩阵; i 为工作电流; R 为工件电阻; V 为体积微元。

同样, 建模过程中位移 u 、应变 ε 、应力 σ 满足位移-应变关系、应力-应变关系和平衡条件。其中 ε 包括热应变、弹性应变等。焊接过程通过夹具夹持施加约束, 设置工序 1 为组件 C1-C2, C2-C3 拼接点焊, 工序 2 为工序 1 焊接结束后组件 C4-C1-C3 拼接点焊。

图 9、10 为点焊第一道工序刚开始与完全结束时的应力变形分布结果。可以看出: 点焊刚开始由于夹具施加一定的初始载荷, 在焊缝位置存在一定的应力和变形, 但应力分布范围小, 变形幅度低; 点焊结束后, 整体应力分布范围较广, 焊缝焊点位置存在应力集中, 点焊变形主要集中在 C3, C2 组件焊缝及热影响区周围, 变形量峰值为 0.4 mm 左右。

(a) 点焊刚开始时应力分布

(b) 点焊完全结束时应力分布

图 9 工序 1 点焊刚开始和完全结束应力分布(Pa)

图 11 为点焊第二道工序点焊完全结束后的变形模拟结果, 与图 10b 工序 1 点焊结束后的变形结果分布相比较, 可以得出: 点焊工序 1 结束后, 焊

缝位置及热影响区周围变形较大, 而在经历工序 2 之后, 工序 1 的焊缝位置及热影响区附近变形有所回复, 整体变形量减小, 但在工序 2 焊缝位置出现的变形峰值高于工序 1 结束后的变形峰值。

(a) 点焊刚开始变形分布

(b) 点焊完全结束变形分布

图 10 工序 1 点焊刚开始和完全结束变形分布(mm)

图 11 点焊工序 2 完全结束后的变形结果分布(mm)

3 结论

(1) 逆向工程曲面建模是目前加工制造领域的新技术, 但各方面已相当成熟。逆向工程的关键是点云数据的收集、预处理和曲面拟合, 将其运用于焊接过程的有限元模拟, 可以解决复杂焊接构

件非规则曲面建模难、耗时长的问題。

(2) 汽车侧围后内板是典型的复杂不规则曲面焊接构件, 采用逆向工程技术进行几何建模大大提高了建模精度和效率。对利用逆向工程技术建立的几何模型进行有限元分析, 可准确获得不同焊接工序下构件残余应力、变形的分布情况, 从而指导生产、加工制造。

逆向工程与有限元模拟分析结合是未来加工制造业的趋势, 随着计算机技术的不断发展, 逆向工程软件的不断完善, 基于逆向工程的焊接过程有限元模拟优势会更加明显。今后需要着重解决的是曲面拟合算法的优化和 RE 软件与 CAD/CAE 软件之间的无缝连接问题, 避免数据在传递过程中失真, 缺损。在逆向工程的基础上进行复杂焊接结构件的有限元分析是今后提高有限元模拟精度和效率的一个重要方向。

参 考 文 献

- [1] DENG D, MURAKAWA H. Finite element analysis of temperature field, microstructure and residual stress in multi-pass butt-welded 2.25 Cr-1Mo steel pipes[J]. Computational materials science, 2008, 43(4): 681-695.
- [2] LEE K, KIM W, LEE J, et al. Finite element analysis and measurement for residual stress of dissimilar metal weld in pressurizer safety nozzle mockup[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(11): 2948-2955.
- [3] 刘基冈. 工程车车架焊接变形预测与控制[D]. 扬州: 扬州大学, 2015.
LIU Jigang. Prediction and control of welding deformation of engineering vehicle frame [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2015.
- [4] 朱妙凤, 芦凤桂, 陈云霞, 等. 铝合金激光焊接过程有限元模拟与分析[J]. 焊接学报, 2008, 29(4): 97-100.
ZHU Miaofeng, LU Fenggui, CHEN Yunxia, et al. Finite element simulation and analysis of aluminum alloy laser welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(4): 97-100.
- [5] LI YONG, C SHENGLE, J HUANG, et al. Experimental and simulation studies on cold welding sealing process of heat pipes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(2): 332-343.
- [6] SHANMUGAM N S, BUVANASHEKARAN G, SANKARANARAYANASAMY K, et al. A transient finite element simulation of the temperature and bead profiles of T-joint laser welds[J]. Materials & Design, 2010, 31(9): 4528-4542.
- [7] 陈姬, 宗然, 武传松, 等. TIG-MIG 复合焊电弧间相互作用对焊接过程的影响[J]. 机械工程学报, 2016, 52(6): 59-64.
CHEN Ji, ZONG Ran, WU Chuansong, et al. Influence of inter arc interaction of TIG-MIG composite welding on welding process [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(6): 59-64.
- [8] 范海平, 刘海明. 有限元数值模拟在焊接中的应用分析[J]. 科技展望, 2016(13): 115.
FAN Haiping, LIU Haiming. Application of finite element numerical simulation in welding [J]. Science and Technology Outlook, 2016(13): 115.
- [9] BHATTI A A, BARSOUM Z, KHURSHID M. Development of a finite element simulation framework for the prediction of residual stresses in large welded structures[J]. Computers & Structures, 2014, 133: 1-11.
- [10] LOSTADO R, MARTINEZ R F, MAC DONALD B J, et al. Combining soft computing techniques and the finite element method to design and optimize complex welded products[J]. Integrated Computer-Aided Engineering, 2015, 22(2): 153-170.
- [11] ZHAO H, ZHANG G, YIN Z, et al. Three-dimensional finite element analysis of thermal stress in single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(1): 276-285.
- [12] 冯磊. 大型旋转部件的焊接残余应力数值模拟及寿命分析研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2015.
FENG Lei. Numerical simulation of welding residual stress and life analysis of large rotating parts [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2015.
- [13] 宋丽娜. 基于 CATIA 飞机方向舵建模与有限元分析[D]. 天津: 中国民航大学, 2014.
SONG Lina. Modeling and finite element analysis of CATIA aircraft rudder[D]. Tianjin: China Civil Aviation University, 2014.
- [14] 潘斌. 基于逆向工程的汽车覆盖件快速原型设计及有限元分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
PAN Bin. Rapid prototyping design and finite element analysis of automobile panel based on reverse engineering[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.
- [15] 雷蔓, 吕健, 刘征宏, 等. 基于逆向工程与 3D 打印的工艺品保护与开发[J]. 制造业自动化, 2014, 36(5): 141-144.

- LEI Man, LÜ Jian, LIU Zhenghong, et al. crafts protection and development Based on reverse engineering and 3D printing [J]. Manufacturing automation, 2014, 36(5): 141-144.
- [16] 张荣强. 逆向工程技术在古典家具保护方面的应用与研究[J]. 机械设计, 2013(1): 101-103.
- ZHANG Rongqiang. Application and research of reverse engineering technology in classical furniture protection [J]. Mechanical Design, 2013(1): 101-103.
- [17] AGHILI A L, GOUDARZI A M, PAKNAHAD A, et al. Finite element analysis of human femur by reverse engineering modeling method[J]. Indian Journal of Science and Technology, 2015, 8(13): 1-10.
- [18] 李江雄, 柯映林. 基于特征的复杂曲面反求建模技术研究[J]. 机械工程学报, 2000, 36(5): 18-22.
- LI Jiangxiong, KE Yinglin. Study on reverse modeling of complex surfaces based on feature[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(5): 18-22.
- [19] 李江雄, 柯映林, 程耀东. 基于实物的复杂曲面产品反求工程中的 CAD 建模技术[J]. 中国机械工程, 1999, 10(4): 390-393.
- LI Jiangxiong, KE Yinglin, CHENG Yaodong. CAD modeling technology in reverse engineering of complex surface products based on physical engineering[J]. China Mechanical Engineering, 1999, 10(4): 390-393.
- [20] TAMAS V, RALPH R M, JORDAN C. Reverse engineering of geometric models-an introduction[J]. Computer-Aided Design, 1997, 29(4): 255-268.
- [21] 刘世明, 胡桂川. Imageware 与反求工程[J]. 重庆科技学院学报, 2006(3): 84-86.
- LIU Shiming, HU Guichuan. Imageware and reverse engineering[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology, 2006(3): 84-86.
- [22] 赫英磊. 基于逆向工程技术的焊接路径离线识别方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- HE Yinglei. Optimization method of off-line welding path based on reverse engineering[D]. Harbin Institute of Technology, 2009.
- [23] 周小东, 成思源, 杨雪荣, 等. 基于逆向工程的参数化优化设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(3): 37-40.
- ZHOU Xiaodong, CHENG Siyuan, YANG Xuelong, et al. Parameter optimization design based on reverse engineering [J]. Combined Machine Tool and Automated Processing Technology, 2016 (3): 37-40.
- [24] 董明晓, 郑康平. 一种点云数据噪声点的随机滤波处理方法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(2): 245-248.
- DONG Mingxiao, ZHENG Kangping. A random filtering method for noise point of point cloud data[J]. Chinese Journal of Image and Graphics, 2004, 9(2): 245-248.
- [25] 钱锦锋. 逆向工程中的点云处理[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- QIAN Jinfeng. Point cloud processing in reverse engineering [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [26] 葛盛. 集成逆向工程关键技术研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2007.
- GE Sheng. Research on key technologies of integrated reverse engineering[D]. Suzhou: Suzhou University, 2007.
- [27] OBLONSEK C, GUID N. A fast surface-based procedure for object reconstruction from 3D scattered points[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1998, 69(2): 185-195.
- [28] CHAN V H, BRADLEY C, VICKERS G W. A multi-sensor approach for rapid digitization data segmentation in reverse engineering[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2000, 122: 725-733.
- [29] 史桂荣, 刑渊, 张永清. 反向工程几何建模自动化系统[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(3): 392-395.
- SHI Guirong, XING Yuan, ZHANG Yongqing. Automation engineering of reverse engineering geometry modeling[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University 2000, 34(3): 392-395.
- [30] 孙殿柱, 魏亮, 李延瑞, 等. 基于局部样本增益优化的 α -shape 曲面拓扑重建[J]. 机械工程学报, 2016, 52(3): 136-142.
- SUN Dianzhu, WEI Liang, LI Yanrui, et al. Surface reconstruction with α -shape based on optimization of surface local sample[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(3): 136-142.
- [31] BIAN K, KE Y. Topology recovery technique for complex freeform surface model after local geometry repair[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(1): 197-206.
- [32] 任重, 杨灿军, 陈鹰. 轨迹规划中的 B 样条插值算法[J]. 机电工程, 2001, 18(5): 38-39.
- REN Zhong, YANG Canjun, CHEN Ying. B-spline interpolation algorithm in trajectory planning[J]. Electrical Engineering, 2001, 18 (5): 38-39.
- [33] MANES A, MAGRASSI G, GIGLIO M, et al. Reverse engineering of experimental tests results of ballistic impact for the validation of finite element simulations[C]//

ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2010: 189-195.

- [34] CHENG Z Q, THACKER J G, PILKEY W D, et al. Experiences in reverse-engineering of a finite element automobile crash model[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2001, 37(11): 843-860.

- [35] LI S Y, CHENG S Y, QIU C H. Product's optimum

design based on the combination of reverse engineering and finite element analysis[J]. Key Engineering Materials. Trans Tech Publications, 2011, 467: 335-338.

作者简介: 赵文勇, 男, 1994 年出生。主要研究方向为焊接过程数值模拟与仿真。

E-mail: wy_zhao@nuaa.edu.cn

魏艳红(通信作者), 女, 1965 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为材料焊接性及焊接工艺、焊接过程数值模拟与仿真、焊接工程应用软件设计、数字化焊接。

E-mail: yhwei@nuaa.edu.cn

第 7 届上银优秀机械博士论文奖——优秀奖

齿轮整体误差测量的基础理论及其应用研究

作者: 王笑一

毕业学校: 北京工业大学

指导教师: 石照耀

齿轮是应用最为广泛的关键基础件, 作为工业的象征镶嵌在国徽上。齿轮质量直接影响主机各项性能指标, 齿轮测量和评价是保证齿轮质量的主要途径。汽车齿轮在我国齿轮产业中占据着最为重要的经济地位, 大量汽车齿轮的在线快速检测是亟待解决的关键问题。我国首创的齿轮整体误差测量技术具有效率高、信息全的特点, 特别适用于批量生产汽车齿轮的在线快速检测, 但其基础理论中一些关键问题没有解决, 影响了该技术的推广和应用。

本文通过理论创新, 解决了齿轮整体误差理论单元曲线的精确计算、整体误差曲线上齿廓评定区域的自动精确找定、整体误差测量中异点接触误差的修正和整体误差测量信息的充分利用等关键问题, 为齿轮整体误差测量技术在汽车齿轮快速测量领域的成功应用提供了有力支撑。针对上述四项创新分别开展了有针对性的实验, 实验结果验证了所提方法和理论的正确性、有效性和实用性。集成了上述四项创新成果的齿轮整体误差数据处理软件已在汽车齿轮在线快速测量系统中得到现场成功应用。

本文主要研究内容如下。

(1) 提出计算整体误差理论单元曲线的新方法。该方法建立了渐开线蜗杆和螺旋齿轮齿面的特殊数学模型, 引入二维平面内的最小值优化算法替代了基于啮合原理的隐式微分方程组的求解, 只用一组统一的公式就可获得包括啮入阶段、渐开线啮合段和啮出阶段的整体误差理论单元曲线。即使在被测齿轮有安装误差及齿面存在拓扑修形的条件下, 该方法仍然适用。该方法很好地解决了渐开线蜗杆与螺旋齿轮空间啮合条件下整体误差理论单元曲线的精确获取问题, 满足了整体误差测量技术的需要。

(2) 提出齿轮整体误差曲线上齿廓评定区域的新确定方法。新方法相对于传统方法有三点重要改进, 其中最为关键的是提出应当区分整体误差单元曲线上不同阶段数据的可信度, 在此基础上进一步提出应当以啮出阶段数据作为确定齿廓评定区域的主要依据。为验证新方法的正确性和有效性, 进行了标准齿轮和产品齿轮在不同转速下的测量实验, 对比分析了由三种不同方法获取的齿廓评价区域单元起点位置的一致性; 实验数据表明新方法得到的单元起点位置一致性最好, 可满足汽车齿轮快速测量的需要, 尤其在测量产品齿轮时, 新方法显著优于传统方法。

(3) 提出齿轮整体误差测量中异点接触误差定义及其修正方法。通过对齿轮整体误差测量中异点接触现象的分析, 提出了异点接触误差的定义和计算方法, 辨析了异点接触误差和曲率干涉误差在本质上的不同之处, 提出了基于准形态学滤波的异点接触误差修正方法, 并进行了异点接触误差修正的仿真实验和实际整体误差测量结果的异点接触误差修正实验。理论分析和实验表明, 修正后的整体误差测量结果更加接近实际被测齿廓的真实形状, 应用本方法修正异点接触误差的效果显著, 可提高整体误差式齿轮量仪的测量精度。

(4) 提出基于全信息的齿轮精度评价体系。提出了齿面误差的三维模型、基于齿面误差三维模型的特征数据集定义方法和基于统计的评价指标计算方法, 并选取有代表性的指标建立了新的齿轮精度评价指标系统, 以上内容共同组成基于全信息的齿轮精度评价体系。仿真和实测实验表明新评价体系可充分利用齿轮整体误差测量数据, 对测量误差不敏感, 能真实完整地反映齿轮性能, 有利于分析齿轮加工误差来源, 有利于评价工艺系统稳定性, 特别适用于汽车齿轮的在线高速测量。

(5) 设计齿轮整体误差数据处理软件并应用。在解决整体误差理论单元曲线计算、齿廓评定区域自动找定、以及异点接触误差修正等关键问题的基础上, 结合基于全信息的齿轮精度评价体系, 开发了齿轮整体误差数据处理软件。该软件提供了一种通用的齿轮整体误差测量数据处理方法, 增加了基于整体误差测量的齿轮精度评价结果的一致性和可靠性。该软件集成了本文提出的各种理论和方法, 已在汽车齿轮在线快速测量机上得到成功应用。