

航空发动机制造工艺仿真技术 体系探索

崔一辉¹, 赵恒², 张森堂²

(1. 中国航空发动机集团有限公司, 北京 100097;

2. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043)

[摘要] 基于航空发动机仿真工作发展规划,从制造维度对仿真技术的应用需求进行了深入分析。提出了构建航空发动机制造工艺仿真技术体系的思路和建设原则,基于5个环节的应用需求提出了仿真技术体系的初步框架,并对当前需要加快突破的仿真关键技术进行了分析,推进航空发动机制造工艺仿真技术发展和规划的落地。

关键词: 技术体系框架; 仿真; 制造工艺; 航空发动机; 生产线

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.13.040



崔一辉
博士、高级工程师,研究方向为数字化制造、机械设计及理论。

新一代信息通信技术、材料技术、能源技术等与制造技术的深度融合,正驱动传统制造业的制造模式、制造流程、制造手段、生态系统等发生重大变革^[1],以数字化、智能

化为代表的新一轮科技革命为全球制造业注入了新动能。近年来,我国航空制造业的数字化技术发展迅速,三维数字化设计技术得到了广泛应用^[2],直接推动了三维模型在制造、试验、服务等领域的智能复用,开启了基于模型的数字化应用时代。

航空发动机结构复杂,制造难度大,物理试错加经验判断的传统研制模式已经难以满足新型航空发动机自主研制需求。为缩短研制周期,降低研制成本,仿真技术的应用成为必然的发展趋势,尤其是在试制阶段,采用制造工艺仿真与物理验证相结合的研制模式已经成为行业的共识。但长期以来,行业内各制造单位仿真技术仍处于单项应用阶段,缺少对航空发动机制造工艺仿真方法和模型的系统研究,没有积累修正仿真模型所需的试验数据,也缺失能满足先进航空发动机试制

需要的制造工艺仿真技术标准和规范。在航空发动机行业加快仿真技术应用的背景下^[3],急需建立面向产品全制造过程的仿真技术体系,形成扩展性强的制造工艺仿真技术体系框架,规划制造全过程的业务活动,编制机加、热表、特种、装配等专业工艺仿真技术应用标准,推动制造工艺仿真技术真正融入航空发动机制造全流程。

航空发动机制造工艺仿真 技术需求

仿真技术用来模拟实际系统的工作机理和动态过程,其置信度取决于建模和分析求解的手段与精度,本质上是对实际系统的深度认知。仿真技术已经广泛应用于航空、航天、化工、电力等工程技术领域,成为各种复杂产品研制工作的必备手段。近年来,仿真技术与大数据、人工智能、虚拟现实等技术结合程度越来越

紧密,应用的范围逐步扩展到城市规划、交通管理、气象等社会经济领域,管理过程通过系统建模实现了量化定义,从而使仿真系统的应用研究逐渐成为各领域的热点方向^[4-7]。在航天领域,仿真技术的应用已覆盖概念设计、详细设计、制造、使用等全过程,在工艺流程设计、实施方案设计以及人机工效分析等方面展开了成熟应用^[8-9]。

当前,航空发动机制造工艺仿真仍以工件成形过程仿真为主,铸造仿真、锻造仿真、焊接仿真、切削仿真、数控加工仿真、装配堆叠仿真等仿真技术的单项应用相对成熟,增材制造、热处理、整机/部件装配等业务的仿真经验不足,尚未解决全过程、多因素、强耦合的仿真问题。部分主机厂具备了初步的生产运行过程仿真能力,能够开展作业规划和生产能力评估,但不具备面向智能车间的综合仿真能力。仿真工具依赖国外通用商业软件,特种工艺、机内多约束过程仿真、多学科联合仿真、基于实物特征的发动机装配仿真等仍缺乏有效的解决手段。各单位仿真建模和基础数据的积累不足,难以保证仿真结果的精确性。制造工艺仿真与上下游环节的协同存在不足,影响仿真技术对产品制造“一次成功”的支撑效果。同时,受行业内设计仿真、制造工艺仿真重视程度不同的影响,制造工艺仿真技术体系化发展路径受到明显制约。

随着高性能航空发动机大量采用新材料、新结构、新工艺,以实物为载体的工艺研究方法周期长、投资大、风险高,依靠现有的生产经验与试制验证的传统工艺准备方式已无法满足产业快速发展的需求,融合虚拟现实、大数据、实时交互、人工智能等技术的制造仿真就显得尤为重要。仿真技术的全面、深入应用,有利于提高产品的工艺可行性和制造可达性,缩短工艺研发周期和产品试制周

期,降低制造成本。为加强仿真技术在制造全过程的工程应用,可以尝试改变从学科角度出发的技术分类方法^[4,10],从“服务于制造全过程”的维度对仿真技术的需求进行分析。按照业务过程,航空发动机制造可分为生产工艺准备、工艺试验、工件成形加工、装配试车和生产运行5个阶段。

(1) 生产工艺准备阶段。针对工艺性审查、工艺方案评审、工艺设计、工艺试验、首件研制、现场技术问题处理、技术瓶颈攻关、工艺定型等具体业务或任务的技术可行性、系统匹配性、技术指标可达性等,通过仿真、分析和验证,对加工工艺系统综合性能及效能进行评估,建立全局性、集成性强的仿真支撑平台。

(2) 工艺试验阶段。利用计算机建模与仿真技术、通信技术和网络技术,对加工工艺系统涉及的部分或关键技术进行功能性试验。虚拟工艺试验是工艺试验、分析的方法和工具在虚拟环境下的具体体现,需要多种工具、模型、信息等资源的参与和配合,涉及到不同类型、不同语义的数据,实现的关键在于虚拟工艺试验支撑环境的构建和虚拟工艺试验过程模型的建立,其中,虚拟工艺试验支撑环境是核心,工艺试验过程的任务推进管理、试验过程描述及结果分析的可视化处理等可借助于这个支撑环境来进行。

(3) 工件成形加工阶段。这个阶段是传统意义上的航空发动机制造工艺仿真的研究内容。铸造、锻造、钣金、弯管等成形过程仿真已经广泛应用于产品研制过程中,主要用来分析、评估和验证工艺设计的正确性;数控加工工艺系统仿真、热处理过程系统仿真和电化学成形过程系统仿真等加工工艺系统仿真已经取得了快速发展。在此基础上,多学科仿真以及虚拟现实技术的深入应用是技术发展的重点方向。

(4) 装配试车阶段。针对航空

发动机转子装配、传动装配、管路装配和发动机试车等进行仿真,需要建立基于实测数据的几何匹配模型和不平衡匹配模型,开展零件定位方式和形位公差、配合间隙等装配属性定义及分析。利用数字孪生、虚拟现实、半实物试验、可视化等技术对装配和试车过程进行仿真、监控、预测,优化装配工艺参数,提高装配质量和效率。

(5) 生产运行阶段。这一阶段是模拟生产现场的产品生产过程,包含生产现场的所有业务活动及过程,需要表达整个制造系统中的物质流、信息流,以及系统各单元间的关系、约束机制等。同时,物质流、信息流在控制流的协调和控制下,在各个层次上进行相应的决策,实现从投入到产出的有效转变。具体可分解为单机、单元、生产线和车间4个层次的生产过程仿真。

航空发动机制造工艺仿真技术体系构想

建立航空发动机制造工艺仿真技术体系,引导各制造环节开展仿真技术研究和应用验证,确保工艺设计和生产的“一次成功率”。

1 航空发动机制造工艺仿真技术体系建设原则

航空发动机制造工艺仿真技术体系的研究处于起步阶段,必须明确体系建立方法和指导原则,以促进航空发动机制造工艺仿真技术发展。

(1) 系统性。在航空发动机制造工艺仿真技术体系梳理过程中,应覆盖机械加工、锻造铸造工艺、热处理工艺、特种加工、装配试车等全专业技术领域,同时覆盖航空发动机制造全业务流程。

(2) 实用性原则。体系框架的搭建应按照分层分类的模式逐层细化,体系内容设置应符合实际需求,具有较强的可操作性。

(3) 可扩展性原则。体系框架

的搭建应充分考虑特定领域内技术的飞速发展,留有充分的扩展空间。

(4)科学性原则。注重各领域的平衡发展,在确定航空发动机制造工艺仿真重点方向时,采取“有所为、有所不为”的发展模式,以现有的工艺为基础,优先解决新产品研制急需的工艺瓶颈问题和批产产品中面临的生产瓶颈问题。

(5)先进性原则。紧跟航空发动机前沿制造技术,将最新的仿真技术纳入其中,使制造技术与新一代信息技术、自动化技术深度融合。

2 航空发动机制造工艺仿真技术体系框架

制造工艺仿真技术体系是产品生产加工过程中所涉及的业务行为按其内在联系形成的多种类、多层次的有机体,包括使能工具、数据处理技术、分析判据及准则、专业领域知识、支撑及应用技术等关键要素。从航空发动机制造全过程应用需求出发,各环节均有对应的重点技术研究方向。

(1)生产工艺准备环节。

主要作用是根据产品任务要求,分解相关业务的指标要求,适应性建立工艺准备分析验证系统。其内容包含:工艺准备仿真环境构建、客户工具定制开发和仿真流程定义与管理。

根据指标要求建立数学/仿真模型,并且开展工艺路线验证;同时,根据各业务间的耦合模型建立单工序级、多工序级制造工艺仿真验证环境,对相关业务总体技术方案的可行性、指标分解的正确性、技术指标的可达性等进行功能性验证,最终评估加工工艺系统是否满足任务要求。

在仿真技术体系框架中,借助仿真环境构建技术,为工艺虚拟验证提供接近实际的仿真环境;为满足不同业务的技术及管理需求,在仿真环境中开发客户化定制工具,为用户提供高效的交互模式;通过仿真工作流程定义与管理,将无法

被计算机识别的标准规则离散后,重新植入数字化仿真流程,提高工艺准备过程的效率和质量。

(2)工艺试验环节。

利用计算机网络集成各种试验系统,依据仿真数据与实物试验数据修正工艺试验和效果评估,形成一个高效的、完整的虚拟工艺试验系统环境。顺应网络化、虚/实结合、设计/分析/试验验证一体化的发展趋势,使得虚拟工艺试验系统具备分布性、实时性、集成性和可扩展性。其内容包含:初始条件定义、仿真试验验证技术、仿真过程及结果验证技术、仿真分析与评估技术、虚拟产品试制及仿真优化技术。

仿真技术体系框架中,通过初始条件定义技术对所有业务相关数据建立关联关系,完成初始化工作;利用有效的仿真试验与验证技术和工具对制造过程进行仿真;仿真分析与评估技术为技术方案的制定提供合理依据;仿真过程及结果确认技术评估工艺试验结果的有效性;虚拟产品试制及仿真优化技术支持试验件的仿真分析和迭代优化。

(3)工件成形加工环节。

通过构建制造工艺仿真系统环境,对加工工艺系统进行全方位的性能优化,既能够检验各子系统间的匹配性和性能指标的合理性,也能够验证总体加工技术指标的可达性,是在现有仿真应用能力上的深度扩展。其内容包含数据处理技术、数据管理技术、资源库管理技术、仿真基础技术和建模与仿真技术。

仿真技术体系框架中,基于成熟的工艺方法和工具,通过标准流程,实现对加工过程的快速验证。建模与仿真技术主要是构建符合需求的简化模型与实物相对应,并对工艺过程进行仿真分析,包含精密铸造、锻造、冲压、增材制造、热处理、焊接、弯管、复合材料成型、机械加工等冷、热和特种工艺的仿真,也包含单工序加

工仿真和多过程耦合仿真;通过面向工程的仿真基础技术来提供可操作性强的工件成形加工仿真流程和标准;资源库管理技术、数据管理技术、数据处理技术共同支撑工件成形加工仿真工具有效运行。

(4)装配试车环节。

通过利用轻量化的产品数字样机和数字化装配环境,对装配过程进行模拟分析,评估零件几何偏差并开展优选优配。模拟航空发动机起动、慢车、巡航、加力、应急及额定状态,与实际试车过程比对,检查最后装配质量和性能参数。其内容包含基于特征的装配技术、几何匹配优化技术、组件不平衡量预测和响应仿真技术、装配工艺参数优化技术、基于实测数据的环境构建技术、整机试车建模及仿真技术、试车数据融合及可视化技术。

仿真技术体系框架中,基于特征的装配技术是对整机及部件装配过程的模拟,包含转子装配、传动装配、管路装配、整机装配等,对装配路径、可操作性、可维护性进行验证;借助几何匹配优化技术对装配过程的零组件几何偏差进行评估,通过组件不平衡量预测和响应仿真技术对转动件的平衡配重进行优化;根据试车过程的整机性能实测数据和数据融合技术,复现试车过程并实现可视化,对装配试车参数进行调优。

(5)生产运行环节。

通过构建数字化生产线建模与仿真系统,对加工单元、生产线和车间生产现场的运行状态和工艺状况进行实时数据采集、状态监控和分析,对生产线的物流、信息流、数据流进行模拟分析和动态反馈,以实现航空发动机生产能力评估和虚拟调试,同时为管理决策者提供基于生产数据的预判。其内容包含虚拟生产线构建技术、生产线仿真技术、生产能力规划评估技术、工况故障诊断及分析技术、校核验证技术。

仿真技术体系框架中,通过虚拟生产线对物理生产线进行高保真映射,进而对物流系统、生产能力和工艺路线进行模拟分析;基于生产现场数据和设备采集数据,对故障进行预测式分析;利用试验验证数据对生产线运行状态及整套工艺进行快速校验,基于综合仿真结果分析为管理部门提供决策依据。

可以看出,工件成形加工、装配试车和运行阶段重点关注实时数据的处理。合理的工艺必须在生产过程中严格执行才能达到生产管理目标,数据采集与分析不仅能够严格贯彻工艺,还能通过对现场的数据采集实现实时反馈,完成闭环管理模式。在当前技术能力下,规则制定和判断定义有必要融合数据采集与追溯、生产线数据分析、在制品跟踪、

质量品质分析等功能。

制造工艺仿真技术体系框架(图1)中列出的技术方向是航空发动机行业通常会涉及的技术方向,横向上根据各个行业的范围定义和实际应用会有所扩展,纵向上各个技术方向根据融合的技术要素会继续向下分解,如云制造系统建模技术、大数据挖掘分析技术、分布式资源库管理技术等。技术梳理得越具体,仿真技术体系的发展脉络越清晰,对产品实际制造过程的支撑效果越明显。

3 航空发动机制造工艺仿真急需突破的关键技术

航空发动机制造工艺仿真技术在多个“点”上开展了应用验证,但受限于认知水平和软硬件条件,在制造系统建模仿真和联合仿真等方面还存在技术短板,影响仿真精度和仿

真效率,主要包括复杂制造工艺仿真环境构建技术、虚拟工艺试验及验证技术、仿真系统环境校核、辨识及修正技术、制造工艺仿真共性支撑技术等,是近期需要重点突破的关键技术。

(1)复杂制造工艺仿真环境构建技术。

包括坯料热成形、切削过程、工件冷加工成形、热表处理过程、特种加工过程、装配过程等制造工艺仿真系统环境,涉及到建模与仿真技术、仿真环境构建技术、多工序连续仿真、多专业联合仿真等关键技术。

(2)虚拟工艺试验及验证技术。

工艺试验通常包括新工艺、新技术实施、新材料应用过程的试验;新技术标准、质量标准的试验;解决工艺规程、技术说明书存在问题的试验;对转厂生产的成附件、主要原材

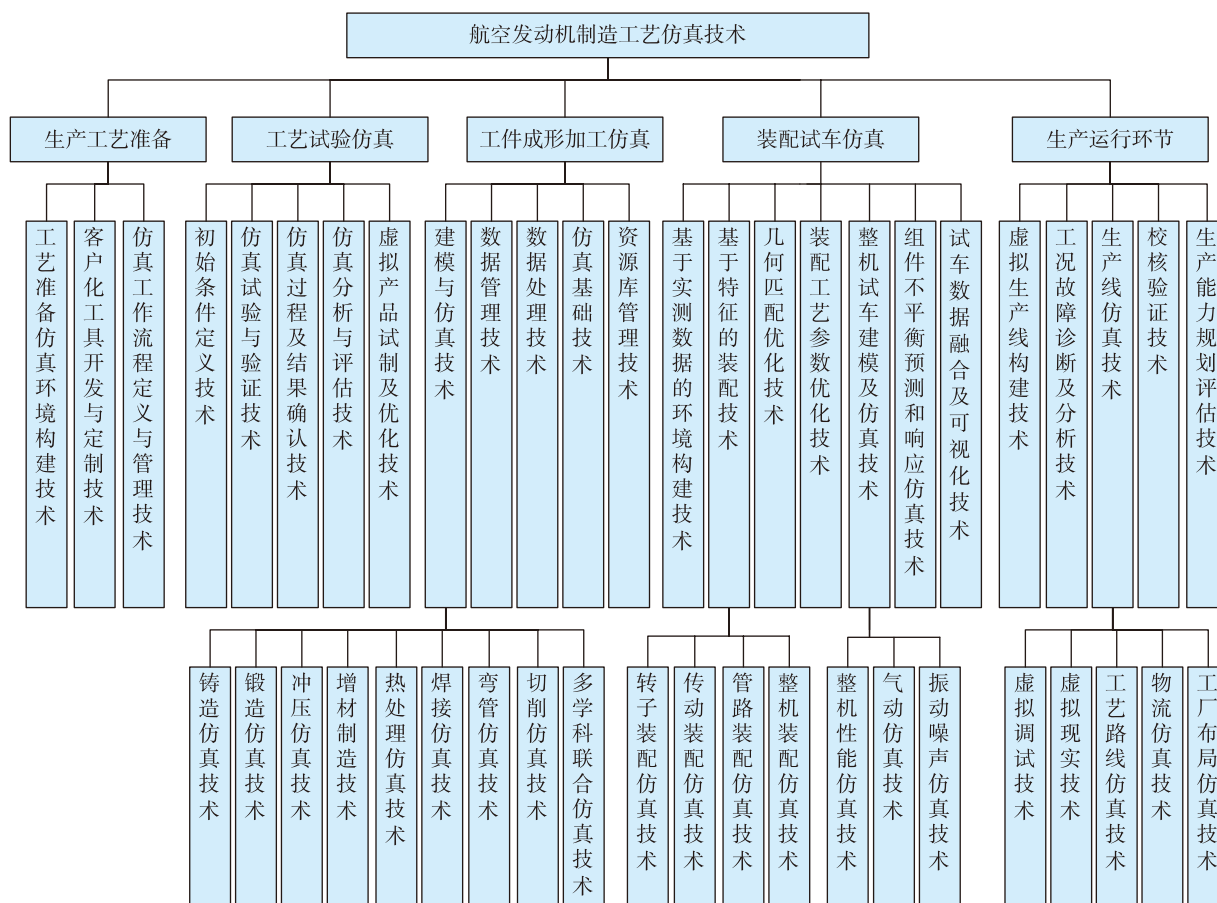


图1 航空发动机制造工艺仿真技术体系框架

Fig.1 Technological system frame of aero-engine manufacturing process simulation

料投产前的试验;对新设备功能验证及主要生产设备更换的试验。试验活动多采用正交试验、析因试验等方法进行试验设计和数据统计分析。随着计算机技术的突破,有限元技术在工艺试验领域得到了前所未有的应用,技术发展较快,发展了多种仿真分析理论,包括有限元分析方法、多体动力学分析方法、CFD分析方法、统计能量分析方法等,建立了较完善的数据库,提供了各种试验分析方法和工具。

(3) 仿真环境和仿真结果校核、辨识及修正技术。

仿真环境和仿真结果校核、辨识及修正技术涉及到3个层次的问题。一是仿真环境与真实环境的符合性问题,核心在于如何解决面向产品和任务的仿真规则和边界条件定义问题,确保制造工艺仿真结果数据与实际加工过程和加工结果的一致性;二是工艺仿真相关规则和判据的制定问题,如工艺性审查规则、切削性能评判依据、工艺优化准则等;三是制造工艺仿真数据的处理问题,目的是能够进行工艺仿真数据与工艺试验数据的对比及其迭代分析,以便进一步验证/修正仿真系统环境。

(4) 制造工艺仿真共性支撑技术。

制造工艺仿真共性支撑技术主要包括软件工具协同技术、仿真环境支撑技术和虚拟环境技术等。其中,软件工具协同技术主要研究多学科协同建模与仿真的方法,通过异构软件和模型的协同技术,建立协同仿真模型集成框架,实现多学科异构仿真模型的多机并发协同仿真;仿真环境支撑技术主要研究基于分布式计算环境、高性能计算环境、半实物仿真环境的多学科、一体化、分布式、协同仿真模型的运行支撑平台,涉及基于数值算法和并行技术的高效仿真方法、高性能计算加速技术、云计算系统仿真优化技

术等关键技术;虚拟环境技术是指对自然环境和人为对抗环境的仿真建模,模拟环境效应的虚拟现实、可视化技术等。

结论

在航空发动机制造领域内,仿真技术发展的目标应紧紧围绕背景产品的研制需求,不断夯实仿真技术基础,强化仿真支撑环境,努力实现制造“一次成功”。本文分析了航空发动机各典型制造环节对仿真技术的业务需求,提出构建航空发动机制造工艺仿真技术体系的思路,并对仿真技术体系的框架和关键技术进行了初步论述,对航空发动机领域深入推进制造工艺仿真技术研究具有借鉴意义。

参考文献

[1] 李伯虎,张霖,王时龙,等.云制造——面向服务的网络化制造新模式[J].计算机集成制造系统,2010,16(1):1-7.

LI Bohu, ZHANG Lin, WANG Shilong, et al. Cloud manufacturing: a new service-oriented networked manufacturing model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(1): 1-7.

[2] 郭具涛,梅中义.基于MBD的飞机数字化装配工艺设计及应用[J].航空制造技术,2011,54(22):74-77.

GUO Jutao, MEI Zhongyi. Design and application of MBD-based aircraft digital assembly process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(22): 74-77.

[3] 曹建国.航空发动机仿真技术研究现状、挑战和展望[J].推进技术,2018,39(5):961-970.

CAO Jianguo. Status, challenges and perspectives of aero-engine simulation technology[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(5): 961-970.

[4] 王赞,蔡帆.国外武器装备体系仿真技术综述[J].兵工自动化,2015,34(7):15-20.

WANG Yun, CAI Fan. Review on foreign weapon system simulation technology[J].

Ordnance Industry Automation, 2015, 34(7): 15-20.

[5] 宁振波,王立书,邓虎.航空数字化技术的新发展——工艺仿真系统[J].航空制造技术,2011,54(S1):83-85.

NING Zhenbo, WANG Lishu, DENG Hu. Process simulation system: new development of aviation informatization technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(S1): 83-85.

[6] 陈云,张天宏.仿真技术在航空推进控制系统中的应用[J].航空发动机,2006,32(3):39-41.

CHEN Yun, ZHANG Tianhong. Application of simulation technology in aeropropulsion control system[J]. Aeroengine, 2006, 32(3): 39-41.

[7] 帅朝林,陈雪梅,邱世广.虚拟现实技术在航空智能制造中的应用思考与展望[J].航空制造技术,2016,59(16):26-33.

SHUAI Chaolin, CHEN Xuemei, QIU Shiguang. Thinking and prospect of virtual reality application in aerospace intelligent manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(16): 26-33.

[8] 包为民.对航天器仿真技术发展趋势的思考[J].航天控制,2013,31(2):4-8.

BAO Weimin. The development trend of aerospace craft simulation technology[J]. Aerospace Control, 2013, 31(2): 4-8.

[9] 黄垒,刘孟周,邢帅,等.虚拟仿真技术在载人航天器总装工艺设计中的应用[J].航天器环境工程,2011,18(6):609-614.

HUANG Lei, LIU Mengzhou, XING Shuai, et al. Application of virtual simulation technology in assembly process design of manned spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 18(6): 609-614.

[10] 陈西选,徐璐,曲凯,等.仿真体系结构发展现状与趋势研究[J].计算机工程与应用,2014,50(9):32-36.

CHEN Xixuan, XU Luo, QU Kai, et al. Research on simulation architecture development state and trends[J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(9): 32-36.

通讯作者:崔一辉, E-mail: cuiyh@aecc.cn.

(下转第52页)

ZHENG Yaohui, et al. The finite element simulation of GH4169 three-dimension turning cutting force and temperature[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2016(8): 106-111.

[10] 赵永亭. 超声椭圆振动切削工作头的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.

ZHAO Yongting. Research on ultrasonic ellipse vibration cutting working head[D].

Shenyang: Northeastern University, 2014.

通讯作者: 张臣, E-mail: meeczhang@nuaa.edu.cn.

Investigation on Simulation of Elliptical Vibration-Assisted Cutting Micro-Texture Based on Rotary Surface

ZHANG Chen, HUO Jianqiang, HOU Lei, WANG Shengcai

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Bionic studies have shown that micro-structures such as pits and trenches have excellent performances such as drag reduction and self-cleaning. The processing of micro-texture is of great significance for saving energy, reducing pollution and improving product life. In order to effectively predict the effect of elliptical vibration-assisted cutting micro-texture, this paper proposes a trajectory planning of elliptical vibration cutting micro-texture based on the characteristics of the resonant frequency of the elliptical vibration-assisted cutting mechanism and the rotation rate of the rotary reference surface. The loads of elliptical vibration are exerted on finite element tool model by transforming periodic vibration loads into the Fourier series. Thus, the finite element model of elliptical vibration-assisted cutting micro-texture is established. Based on the established finite element simulation model, the instantaneous Mises stress distribution and cutting force is analyzed by selecting different vibration parameters in micro-texture generation. The results of the finite element simulation verifies the correctness of elliptical vibration-assisted cutting micro-texture, and provides a reference for actual elliptical vibration-assisted cutting micro-texture.

Keywords: Micro-texture; Rotary surface; Elliptical vibration-assisted cutting; Trajectory planning; Finite element simulation
(责编 大漠)

(上接第44页)

Exploration on Technological System of Aero-Engine Manufacturing Process Simulation

CUI Yihui¹, ZHAO Heng², ZHANG Sentang²

(1. Aero Engine Corporation of China, Beijing 100097, China;

2. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China)

[ABSTRACT] Based on the aero-engine simulation work development planning, this paper analyzed the requirement of aero-engine manufacturing process simulation technology from manufacturing dimensions. It proposed to establish the technological system of aero-engine manufacturing process simulation following some principles. It provided a preliminary framework of the technological system based on demands corresponding to five kinds of difficult stages. Furthermore, it analyzed the key technologies should be broken through recently. The research is useful to implementing the development planning and directing the development of aero-engine manufacturing process simulation technology.

Keywords: Technological system frame; Simulation; Manufacturing process; Aero-engine; Production line

(责编 大漠)