Journal of System Simulation

Volume 35 | Issue 3 Article 10

3-22-2023

Application of Digital Twin Model in Grinding of Bearing Rings

Hongbin Liu
1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China;, hongbin-liu@163.com

Zhiqiang Shen
1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China;, 513988632@qq.com

Yize Wang
1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China;

Ming Qiu
1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Application of Digital Twin Model in Grinding of Bearing Rings

Abstract

Abstract: The digital twin model can effectively promote the virtual-real interaction between the actual product and the product model. Aiming at the grinding force generated in the grinding process of spherical roller bearings, *this paper constructs the bearing ring raceway grinding process by performing dynamics, contact algorithm modeling and rigid-flexible coupling treatment on the components of the grinding work area. The digital twin model completes the virtual mapping of the grinding work area of the bearing ring in the digital space.* The model is used to analyze and test the process parameters such as the grinding wheel linear speed and the workpiece speed, which proves the validity of the digital twin model constructed. The model has high fidelity and can be used to understand, predict and optimize real systems.

Keywords

dynamics, virtual mapping, digital twin model, grinding force, process parameters

Authors

Hongbin Liu, Zhiqiang Shen, Yize Wang, Ming Qiu, and Wenrong Lin

Recommended Citation

Hongbin Liu, Zhiqiang Shen, Yize Wang, Ming Qiu, Wenrong Lin. Application of Digital Twin Model in Grinding of Bearing Rings[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(3): 557-567.

This paper is available in Journal of System Simulation: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol35/iss3/10

第 35 卷第 3 期 系统仿真学报© Vol. 35 No. 3
2023 年 3 月 Journal of System Simulation Mar. 2023

数字孪生模型在轴承套圈磨削加工中的应用

刘红彬[1]，申志强[1*]，王轶泽[1]，邱明[1]，林文荣[2]
(1. 河南科技大学 机电工程学院，河南 洛阳 471000；2. 山东宇捷轴承制造有限公司，山东 临清 252665)

摘要：数字孪生模型能够有效地促进实际产品与产品模型间的虚实交互。针对调心滚子轴承套圈磨削过程中的磨削力，通过对磨削工作区各构件进行动力学与接触算法建模以及刚柔耦合处理，构建了轴承套圈沟道磨削加工数字孪生模型，完成了轴承套圈磨削工作区域在数字空间中的虚拟映射。并使用该模型对砂轮线速度、工件转速等工艺参数进行了分析与试验，证明了所构建数字孪生模型具有一定的有效性。该模型具有高保真性，可用于理解、预测和优化真实系统。

关键词：动力学；虚拟映射；数字孪生模型；磨削力；工艺参数
中图分类号：TH133.33; TP391.9　　文献标志码：A　　文章编号：1004-731X(2023)03-0557-11
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1050
引用格式: 刘红彬, 申志强, 王轶泽, 等. 数字孪生模型在轴承套圈磨削加工中的应用[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(3): 557-567.
Reference format: Liu Hongbin, Shen Zhiqiang, Wang Yize, et al. Application of Digital Twin Model in Grinding of Bearing Rings[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(3): 557-567.

Application of Digital Twin Model in Grinding of Bearing Rings

Liu Hongbin[1], *Shen Zhiqiang*[1*], *Wang Yize*[1], *Qiu Ming*[1], *Lin Wenrong*[2]
(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China;
2. Shandong Yujie Bearing Manufacturing Co. , Ltd, Linqing 252665, China)

Abstract: The digital twin model can effectively promote the virtual-real interaction between the actual product and the product model. Aiming at the grinding force generated in the grinding process of spherical roller bearings, *this paper constructs the bearing ring raceway grinding process by performing dynamics, contact algorithm modeling and rigid-flexible coupling treatment on the components of the grinding work area. The digital twin model completes the virtual mapping of the grinding work area of the bearing ring in the digital space.* The model is used to analyze and test the process parameters such as the grinding wheel linear speed and the workpiece speed, which proves the validity of the digital twin model constructed. The model has high fidelity and can be used to understand, predict and optimize real systems.

Keywords: dynamics; virtual mapping; digital twin model; grinding force; process parameters

0　引言

滚动轴承套圈的加工主要包括车削加工和磨削加工过程。作为最后最重要的一道加工工序，磨削加工过程中所产生的磨削力会直接影响套圈最终的表面质量和形位误差，而众多加工工艺参数如砂轮线速度、工件转速、进给速度等都会对磨削力大小、稳定性造成影响，这就导致所加工出的轴承套圈质量的一致性和稳定性难以得到保

收稿日期：2021-10-15　　修回日期：2021-12-31
基金项目：山东省重点研发计划(2020CXGC011001)
第一作者：刘红彬(1974-)，男，副教授，博士，研究方向为轴承润滑、动力学。E-mail：hongbin-liu@163.com
通讯作者：申志强(1996-)，男，硕士生，研究方向为轴承润滑、制造。E-mail：513988632@qq.com

Journal of System Simulation, Vol. 35 [2023], Iss. 3, Art. 10

证[1]。因此在多因素共同作用下，探明磨削力的影响机制，准确获取磨削力动态变化特性，是提高轴承套圈质量的关键，同时也是达成国家智能制造目标的重要基础。

要想实现产品加工质量的提高，产品在制造过程中所处状态的信息诊断、监测与优化尤为重要，一个能够反映产品真实加工状态的模型是不可或缺的。随着数字孪生技术[2-4]的问世，让这一愿景成为可能。数字孪生(digital twin, DT)的核心在于采用数字化方式，从多空间、多尺度、多维度出发，于数字空间之中实现物理实体的复刻，实现物理实体向数字空间的虚拟映射，搭建起跨尺度、跨层级的虚拟系统与真实系统之间联系的桥梁，而后基于所构建的虚拟模型，对真实物理系统或产品进行仿真、分析以及优化。近年来，国内外诸多专家学者对于数字孪生这一主题展开了相当丰富的研究并取得了一定的成果。文献[5]以减少系统对人的物理伤害为初衷，从3个维度对于数字孪生模型进行了讨论，即物理实体、虚拟产品和连接。美国通用电气[6]建立了飞机喷气发动机部件的数字孪生模型，该模型能够实时监测发动机的运行状况，且能够用于预测发动机的剩余寿命以及最佳维护间隔。NASA[7]创建了飞行器的数字孪生模型，基于高精度的物理模型以及飞行器历史运行数据，该模型已被成功应用于飞行器的健康管理。文献[8]综合计算和实验流体动力学，构建了基于物理建模和实验数据的飞行器数字孪生模型，在降低开发成本和时间的同时，为飞行器整个生命周期的决策提供了工程分析能力和支持。文献[9]针对机队飞机飞行安全保障问题，提出了一个用于对机队进行监控、诊断和健康管理的数字孪生模型，该模型可以实现对航空发动机的准确故障检测和寿命预测。文献[10-11]等将数字孪生技术视为实现智能制造目标的使能技术，在研究数字孪生车间技术的过程中，首次提出了数字孪生五维模型的概念，并结合多个相关产业，对数字孪生与产业结合的落地应用提供了方案与思路，这对于促进智能制造产业的提升与发展有着十分积极的影响和重要意义。文献[12]通过用数字孪生模型表达产品构型信息的方法，为产品在三维研制时的构型管理问题提供了新的技术思路。文献[13]考虑到实现模型的物理行为向虚拟空间中高保真映射的需求，提出通过模型细小特征简化等方法来创建轻量化的高保真模型，这为虚拟空间中数字孪生模型的创建提供了新的参考。文献[14]建立了针对铣削过程中主轴动力学特性监测的数字孪生体，所建立的数字孪生模型相较于传统方法能够更为精确地映射出铣削主轴在加工过程中的动力学行为，对于选取最佳铣削加工参数以及提高加工质量和效率有着指导意义。文献[15]基于数字孪生的高保真特性以及深度学习所建立的数字孪生模型能够对煤机关键零件的寿命以及煤机健康状态进行有效的预测。不难发现，经过近些年的发展，数字孪生的概念开始在军事和空间应用之外变得切实可行，并且备受青睐。但分析人员所提出的亟待解决的一个问题是缺乏模型，以及缺乏产生高保真预测所需的建模和仿真知识[16]。许多数字孪生模型仅仅依靠对输入数据的统计处理以及对历史数据的查表来创建。其缺点在于，很难了解和理解设备或生产过程中的真实情况。相比之下，多物理场模型在得到验证后即可用最少的数据在广泛的运行范围内保持精确。出于这些原因，包含某种基于模型描述的数字孪生模型是理想之选。

虽然数字孪生已经在诸多领域和行业进行了成功的运用，但是截至目前，针对滚动轴承套圈磨削加工系统数字孪生模型的研究还尚未出现。而滚动轴承套圈在磨削加工过程中，由于多种因素的共同作用，其磨削力的演变具有随机、动态、复杂的特性，通过建立磨削系统的DT模型，可以达到研究磨削工艺参数对磨削力影响机制以及监测磨削力变化的目的。本文讨论了如何创建具有高保真性质，且能够用于理解和预测磨削力的滚动轴承套圈沟道磨削系统数字孪生模型，为滚动

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol35/iss3/10
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1050

轴承套圈生产过程参数的监测与调整提供了一种新的思路。

1 数字孪生模型的创建

1.1 磨削系统动力学模型

本文所分析的调心滚子轴承套圈磨削系统如图1所示。主要工作区域由砂轮主轴系统和工件主轴系统两部分组成，砂轮安装于磨床主轴的外伸端，需要进行磨削加工的轴承套圈依靠电磁吸力牢牢吸附在磁极上随磁极转动，同时套圈周向存在两限制磨削加工过程中套圈径向位置的固定支承。

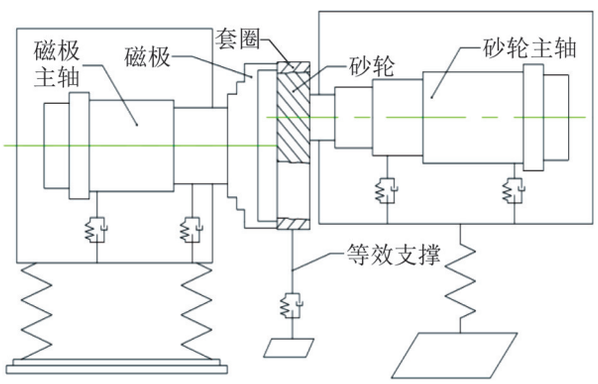


图1 磨削系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of grinding system

将整个磨削工作区视作由若干个独立构件组成的系统，图2显示了构件在空间中位置的确定方法，$O_ix'_iy'_iz'_i$坐标系是构件参考系，$OXYZ$坐标系是惯性参考坐标系，$\boldsymbol{r}_i$是从O到O_i的位置矢量，$\boldsymbol{f}_i$、$\boldsymbol{g}_i$、$\boldsymbol{h}_i$分别是沿着x'_i、y'_i、z'_i轴的单位矢量。

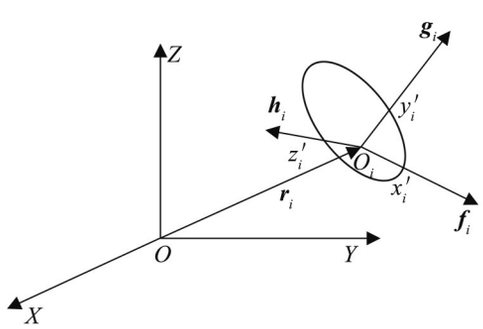


图2 坐标系和构件
Fig. 2 Coordinate system and components

构件的方向矩阵为

$$\boldsymbol{A}_i=\left[\boldsymbol{f}_i\ \boldsymbol{g}_i\ \boldsymbol{h}_i\right] \tag{1}$$

O_i点在$OXYZ$坐标系的速度和虚位移定义为

$$\boldsymbol{Y}_i=\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{r}}_i\\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_i\end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\delta\boldsymbol{Z}=\begin{bmatrix}\delta\dot{\boldsymbol{r}}_i\\ \delta\dot{\boldsymbol{\pi}}_i\end{bmatrix} \tag{3}$$

在$O_ix'_iy'_iz'_i$坐标系的相应量为

$$\boldsymbol{Y}'_i=\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{r}}'_i\\ \dot{\boldsymbol{\omega}}'_i\end{bmatrix}\equiv\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_i^{\mathrm{T}} & \dot{\boldsymbol{r}}_i\\ \boldsymbol{A}_i^{\mathrm{T}} & \dot{\boldsymbol{\omega}}_i\end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\delta\boldsymbol{Z}'=\begin{bmatrix}\delta\boldsymbol{r}'_i\\ \delta\boldsymbol{\pi}'_i\end{bmatrix}\equiv\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_i^{\mathrm{T}} & \delta\boldsymbol{r}_i\\ \boldsymbol{A}_i^{\mathrm{T}} & \delta\boldsymbol{\pi}_i\end{bmatrix} \tag{5}$$

图3所示为一对相邻构件之间的运动学关系，其中构件i为外侧构件，i–1是构件i的内侧构件。

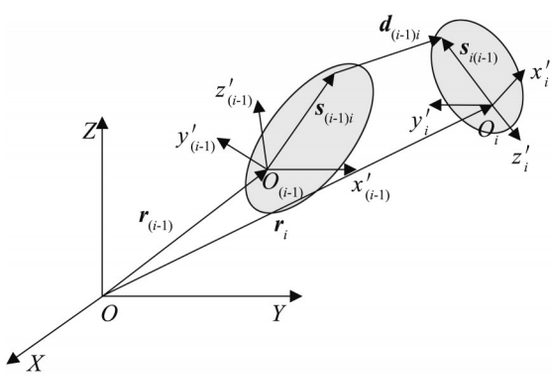


图3 两相邻构件间运动学关系
Fig. 3 Kinematic relationship between two adjacent components

O_i点位置为

$$\boldsymbol{r}_i=\boldsymbol{r}_{(i-1)}+\boldsymbol{s}_{(i-1)i}+\boldsymbol{d}_{(i-1)i}-\boldsymbol{s}_{i(i-1)} \tag{6}$$

通过式(5)，构件i在局部坐标系下角速度为

$$\delta\boldsymbol{\pi}'_i=\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}_{(i-1)i}\delta\boldsymbol{\pi}'_{(i-1)}+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}_{(i-1)i}\boldsymbol{H}'_{(i-1)i}\delta\boldsymbol{q}_{(i-1)} \tag{7}$$

式中，$\boldsymbol{H}'_{(i-1)i}$是由转动轴决定的，$\boldsymbol{A}_{(i-1)i}$定义为

$$\boldsymbol{A}_{(i-1)i}=\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}_{(i-1)i}\boldsymbol{A}_i \tag{8}$$

由式(6)可得O_i点位置的虚位移：

$$\begin{aligned}\delta\boldsymbol{r}'_i=&\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}_{(i-1)i}\delta\boldsymbol{r}'_{(i-1)}-\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}_{(i-1)i}(\tilde{\boldsymbol{s}}'_{(i-1)i}+\tilde{\boldsymbol{d}}'_{(i-1)i}-\\ &\boldsymbol{A}_{(i-1)i}\tilde{\boldsymbol{s}}'_{(i-1)i}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}_{(i-1)i})\delta\boldsymbol{\pi}'_{(i-1)}+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}_{(i-1)i}[(\boldsymbol{d}'_{(i-1)i})\boldsymbol{q}_{(i-1)i}+\\ &\boldsymbol{A}_{(i-1)i}\tilde{\boldsymbol{s}}'_{(i-1)i}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}_{(i-1)i}\boldsymbol{H}'_{(i-1)i}]\delta\boldsymbol{q}_{(i-1)i}\end{aligned} \tag{9}$$

式中：加波浪号表示的变量为原矩阵的对称斜矩阵；$\boldsymbol{q}_{(i-1)i}$项为相对坐标矢量。联合式(7)和(9)得到

Journal of System Simulation, Vol. 35 [2023], Iss. 3, Art. 10

相邻构件的虚位移方程为

$$\delta \boldsymbol{Z}_i' = \boldsymbol{B}_{(i-1)i1}\delta \boldsymbol{Z}_{(i-1)}' + \boldsymbol{B}_{(i-1)i2}\delta \boldsymbol{q}_{(i-1)i} \tag{10}$$

式中：

$$\boldsymbol{B}_{(i-1)i1} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_{(i-1)i}^{\mathrm{T}} & 0 \\ 0 & \boldsymbol{A}_{(i-1)i}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I} & (\tilde{\boldsymbol{s}}_{(i-1)i}' + \tilde{\boldsymbol{d}}_{(i-1)i}' - \boldsymbol{A}_{(i-1)i}\tilde{\boldsymbol{s}}_{(i-1)i}'\boldsymbol{A}_{(i-1)i}^{\mathrm{T}}) \\ 0 & \boldsymbol{I} \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{B}_{(i-1)i2} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_{(i-1)i}^{\mathrm{T}} & 0 \\ 0 & \boldsymbol{A}_{(i-1)i}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\boldsymbol{d}_{(i-1)i}')_{q(i-1)i} + \boldsymbol{A}_{(i-1)i}\tilde{\boldsymbol{s}}_{(i-1)i}'\boldsymbol{A}_{(i-1)i}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}_{(i-1)i}' \\ \boldsymbol{H}_{(i-1)i}' \end{bmatrix} \tag{12}$$

值得注意的是，矩阵$\boldsymbol{B}_{(i-1)i1}$和$\boldsymbol{B}_{(i-1)i2}$仅为两构件间的相对坐标函数。因此，式(11)和(12)中矩阵$\boldsymbol{B}_{(i-1)i1}$和$\boldsymbol{B}_{(i-1)i2}$进一步关于其他项微分为0。整个系统绝对坐标和相对坐标的虚位移关系通过重复应用式(10)可得

$$\delta \boldsymbol{Z}' = \boldsymbol{B}\delta \boldsymbol{q} \tag{13}$$

式中：矩阵$\boldsymbol{B}$为笛卡尔坐标和相对坐标间的速度转换矩阵。采用同样的方法，可推导出笛卡尔坐标速度$\boldsymbol{Y}'$和相对速度$\dot{\boldsymbol{q}}$间的关系为

$$\boldsymbol{Y}' = \boldsymbol{B}\dot{\boldsymbol{q}} \tag{14}$$

在各个构件在空间中位置确定之后，通过力的递归算法计算空间广义力。这就需要创建$\boldsymbol{R}^{nr}$中新矢量$\boldsymbol{g} = \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}$($\boldsymbol{g}$由$\boldsymbol{R}^{nc}$里矢量$\boldsymbol{G}$转换得来，$nc$和$nr$分别表示笛卡尔坐标和相对坐标的数量)。

力$\boldsymbol{Q}\in\boldsymbol{R}^{nc}$在笛卡尔坐标系中所做虚功为

$$\delta \boldsymbol{W} = \delta \boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q} = \delta \boldsymbol{q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}^{*} \tag{15}$$

式中：$\boldsymbol{Q}^{*} = \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}$。

将式(15)写成求和形式为

$$\delta \boldsymbol{W} = \sum_{i=0}^{n-1} \delta \boldsymbol{q}_{i(i+1)}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Q}^{*}{}_{i(i+1)} \tag{16}$$

另一方面，自第n个构件起向与其相邻的前一个构件方向，将式(13)代入到式(15)中，可得

$$\delta \boldsymbol{W} = \sum_{i=0}^{n-1} \delta \boldsymbol{q}_{i(i+1)}^{\mathrm{T}}\{\boldsymbol{B}_{i(i+1)2}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{Q}_{i+1} + \boldsymbol{S}_{i+1})\} \tag{17}$$

其中：

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{S}_0 = 0 \\ &\boldsymbol{S}_{i+1} \equiv \boldsymbol{B}_{(i+1)(i+2)1}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{Q}_{i+2} + \boldsymbol{S}_{i+2}) \end{aligned} \tag{18}$$

令式(16)和(17)右侧相等，得到$\boldsymbol{Q}^{*}$的递归算法为

$$\boldsymbol{Q}^{*}{}_{i(i+1)} \equiv \boldsymbol{B}_{i(i+1)2}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{Q}_{i+1} + \boldsymbol{S}_{i+1}) \tag{19}$$

式中：$i = n-1, n-2, \cdots, 0$。

由于$\boldsymbol{Q}$是$\boldsymbol{R}^{nc}$中的一个任意矢量，式(18)和(19)对$\boldsymbol{R}^{nc}$中的任何矢量$\boldsymbol{G}$都适用。因此，为获得更高计算效率，$\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}$可通过下列各式计算：

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{g}_{i(i+1)} \equiv \boldsymbol{B}_{i(i+1)2}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{G}_{i+1} + \boldsymbol{S}_{i+1}) \\ &\boldsymbol{S}_0 = 0 \\ &\boldsymbol{S}_i \equiv \boldsymbol{B}_{i(i+1)1}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{Q}_{i+1} + \boldsymbol{S}_{i+1}) \end{aligned} \tag{20}$$

式中：$\boldsymbol{g}$为$\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G}$的计算结果。

1.2 物理模型

从数字孪生模型建立的整体架构来看，不仅需要基础理论建模，想要实现复杂对象的建模，空间维度上还需要对模型进行组装，从多学科领域出发对模型进行融合，以实现对象模型各种特征属性的完整刻画。

1.2.1 空间映射

创建数字孪生模型的最终目的是能够于虚拟空间中实现真实物理对象的属性、行为等特性，因此所创建的数字孪生模型应该是“物理几何—行为规则”多维度的。从模型建立的架构来看，物理模型的建立是构建数字孪生模型的基础。物理模型即实体在虚拟空间中的映射，是真实物理系统的数字表示，其应该在几何形状和属性上模仿其物理对应部分，且CAD模型的物理特性和材料属性应与实际的物理系统相似。

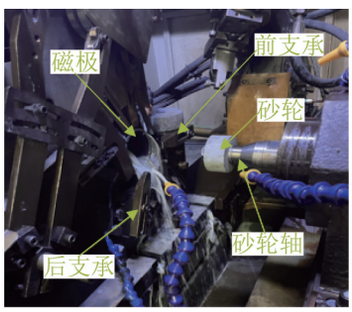
CAD实施的第一步是获取准确的系统尺寸并创建磨削工作区域各部件的CAD模型。本文使用三维建模软件绘制了包括砂轮、磁极、工件、支承以及砂轮主轴在内的磨削工作区3D模型(各个工件的材料属性如表1所示)，并将其在虚拟空间中完成组装，这些部件的几何尺寸以及装配位置关系均完全与实际物理系统保持一致，如图4所示。

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol35/iss3/10
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1050

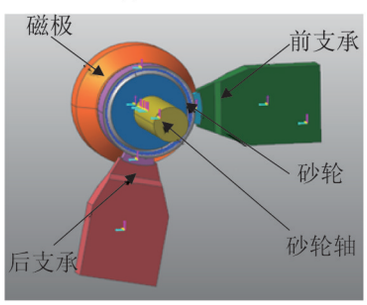
表 1　各部件材料属性

Table 1　Material properties of each part

名称	材质	弹性模量	泊松比
套圈	GCr15	2.19×10^{11}	0.300
砂轮	Al_2O_3	3.70×10^{11}	0.220
磁极	45 钢	2.09×10^{11}	0.269
砂轮轴	45 钢	2.09×10^{11}	0.269
支承	45 钢	2.09×10^{11}	0.269



(a) 真实空间



(b) 虚拟空间

图 4　磨削工作区系统物理模型

Fig. 4　Physical model of the grinding work area system

1.2.2 动力学接触算法

在计算面—面接触问题时，可用多个球—面接触替代，从逻辑上将接触副的 2 个对象分别定义为撞击体和相对撞击体而言的防御体，撞击体外形一般称其为撞击边界，相应地有目标边界，通常分别用一组球以及三角形碎片来分别表示撞击体和防御体表面，如图 5 所示。其中，惯性参考坐标系在图中用 *OXYZ* 坐标系表示，构件参考系用 *O′x′y′z′* 及 *O″x″y″z″* 表示，其方向用 $\boldsymbol{A}$ 表示，位置用 $\boldsymbol{r}$ 表示。2 个基本坐标系分别是撞击体的节点参考系和防御体的面接触参考系。防御体的所有几何变量基于面参考系测量。撞击体与防御体之间的方向和相对位置分别为 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{ch}}$ 和 $\boldsymbol{d}''_{\mathrm{ch}}$。

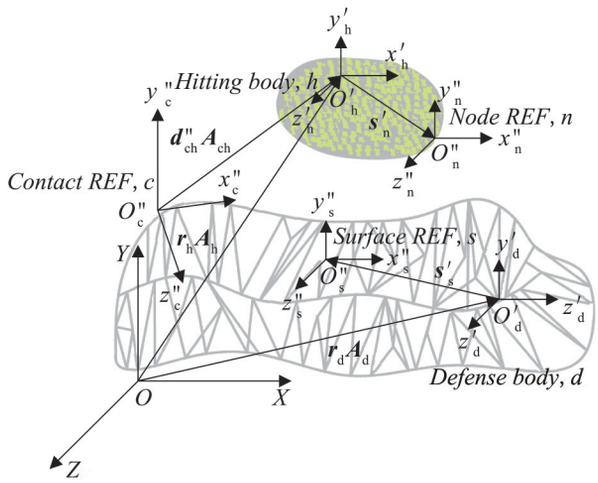


图 5　接触副运动学表示

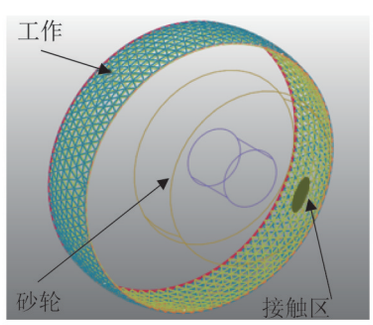
Fig. 5　Kinematics representation of contact pair

撞击体参考系相对接触参考系的位置和方向可直接从广义坐标 $\boldsymbol{d}''_{\mathrm{ch}}$ 和 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{ch}}$ 中获得，由式(21)获得撞击体相对接触参考系的节点位置：

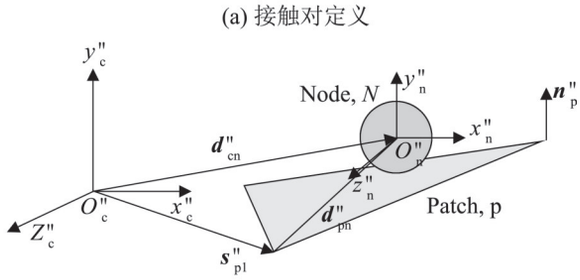
$$\boldsymbol{d}''_{\mathrm{cn}}=\boldsymbol{d}''_{\mathrm{ch}}+\boldsymbol{A}_{\mathrm{ch}}\boldsymbol{s}'_{\mathrm{n}} \tag{21}$$

式中：$\boldsymbol{s}'_{\mathrm{n}}$ 为撞击体相对于接触参考系的位置矢量。

将砂轮定义为撞击体，工件定义为接触体，接触对存在于接触区，如图 6(a)所示，在确定了用于计算的接触对之后，首先计算穿深量，然后计算接触力，计算碎片以及节点如图 6(b)所示。



(a) 接触对定义



(b) 计算碎片和节点

图 6　接触计算

Fig. 6　Contact calculation

Journal of System Simulation, Vol. 35 [2023], Iss. 3, Art. 10

节点相对接触参考系的位置矢量为

$$\boldsymbol{d}''_{\mathrm{pn}}=\boldsymbol{d}''_{\mathrm{cn}}-\boldsymbol{s}''_{\mathrm{pl}} \tag{22}$$

将$\boldsymbol{d}''_{\mathrm{pn}}$投影至碎片参考系：

$$\boldsymbol{d}'''_{\mathrm{pn}}=\boldsymbol{C}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{d}''_{\mathrm{pn}} \tag{23}$$

式中：$\boldsymbol{C}_{\mathrm{p}}$为碎片参考系相对于接触参考系的方向矩阵。

计算节点与碎片的穿深量：

$$\boldsymbol{\delta}=\boldsymbol{r}-\boldsymbol{n}_{\mathrm{p}}'''^{\mathrm{T}}\boldsymbol{d}'''_{\mathrm{pn}} \tag{24}$$

式中：$\boldsymbol{n}_{\mathrm{p}}'''^{\mathrm{T}}$为碎片法向矢量。

法向接触力由式(25)获得：

$$f_{\mathrm{n}}=k\delta^{m_1}+c\frac{\dot{\delta}}{|\dot{\delta}|}|\dot{\delta}|^{m_2}\delta^{m_3} \tag{25}$$

式中：k为接触刚度系数；c为阻尼系数；$\dot{\delta}$为δ的时间导数；m_1为刚度指数；m_2为阻尼指数；m_3为凹痕指数，通常令$m_3>1$，避免接触力为负。

摩擦力由式(26)获得：

$$f_{\mathrm{f}}=\mu\left|f_{\mathrm{n}}\right| \tag{26}$$

因为在实际工作环境中，砂轮的表面形貌特征十分复杂，由不同粒度和结合剂所组成的砂轮由于磨粒数量众多且每个磨粒的几何形状都十分不规则，导致砂轮表面形貌建模十分困难。而考虑到磨削过程的本质是硬的材料去除软的材料的过程，因此将砂轮与工件接触区域进行刚柔耦合处理，即将砂轮视作刚体，将工件的被加工表面视作柔性体，并对其进行网格划分。

针对不同类型网格对模型计算精度和效率的影响，在网格尺寸相同和单元数相等的前提条件下，仿真发现六面体网格计算结果的收敛精度相较于四面体网格会更高，故在之后的仿真过程中，网格类型均采用六面体网格。柔性化处理后的工件加工表面如图7所示。

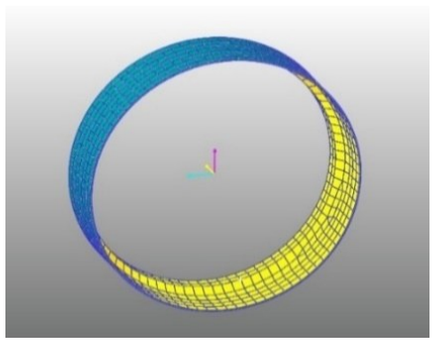


图7　工件加工表面柔性化处理

Fig. 7　Flexible processing of the workpiece surface

1.3 行为模型

在完成物理模型的构建之后，还需要对其运行逻辑规则进行建模。磨削系统的行为规则模型在虚拟空间中的对应部分即为模型所应该包含的边界条件，边界条件如表2所示。

表2　基础磨削工艺条件

Table 2　Basic grinding process conditions

工艺信息	工作条件
机器类型	3MZ1450轴承外圈滚道磨床
砂轮	CBN棕刚玉砂轮
工件	23952CA/W33-01
偏心量/mm	0.2
砂轮线速度/(m/s)	48
工件轴转速/(r/min)	62
进给速度/(mm/min)	0.1
进给量/mm	0.013

首先需要按照实际工况对所建立的物理模型添加各部件之间对应的接触关系，并在各个接触对之间添加约束和定义驱动，如通过力的添加来模拟磁极吸力，使套圈吸附在磁极之上随磁极共同转动；通过添加旋转副实现磁极与砂轮的转动；通过添加平移副以实现砂轮的进给运动，使得所建立的磨削工作区物理模型能够在虚拟空间中完成与真实系统完全相同的运行逻辑和行为动作，从而用来模拟真实工况条件下套圈磨削区域的工作情况。

至此完成了轴承外圈沟道磨削工作区数字孪生模型的创建，其本质为真实物理实体在数字空间中的虚拟映射。虚拟空间包含真实过程的丰富表示，以非常高的保真度模拟了真实过程。模型所具有的高保真度性质使其可以很好地完成后续轴承套圈在磨削加工过程中的模拟、仿真及验证工作。

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol35/iss3/10
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1050

2 分析和结果

在完成磨削工作区域数字孪生模型的完整建立之后，通过运行数字孪生仿真模型，可以得到实际物理系统于数字空间中虚拟运行的结果。计算分析时，时间步长dt设为0.002 s，整个套圈磨削加工时间为8 s，计算得到磨削力的动态变化图谱如图8所示。从图中可以看出，磨削过程中磨削力大小会发生动态变化，磨削力的变化又将引起套圈沟道表面质量的改变。而且磨削力幅值的变化会存在一个区间，不同工艺参数条件下所得到的磨削力波动变化的幅值以及范围也不尽相同，对应不同磨削力条件下所加工出的套圈沟道的表面质量也会不同，一定磨削力条件下所加工出的套圈表面质量会存在相对应的映射关系。数字孪生模型的优势在于整个磨削过程中所产生的磨削力的数据，都可以从数字模型的虚拟加工结果进行读取，磨削力的波动范围也能够直观地显示，通过改变数字孪生模型的边界条件，能够实现对磨削力精确、高效的预测。

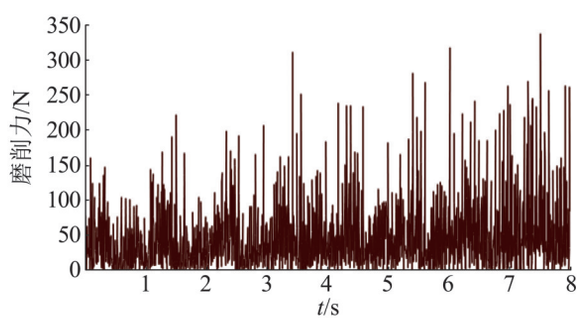


图8 磨削力变化时域图
Fig. 8 Time domain diagram of grinding force change

2.1 砂轮线速度对磨削力的影响

为分析套圈磨削过程中磨削力随时间的变化趋势，对图8中的时域磨削力数据进行处理，将整个磨削过程分为几个时间段，计算各个时间段内磨削力数据的均方根值作为有效值，即RMS (root mean square)值，得到不同边界条件下的磨削力变化规律，如图9~13所示。

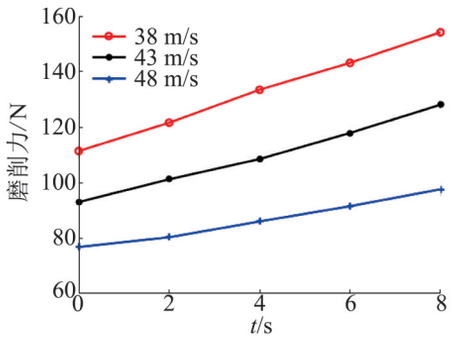


图9 砂轮不同线速度磨削力
Fig. 9 Grinding force at different linear speeds

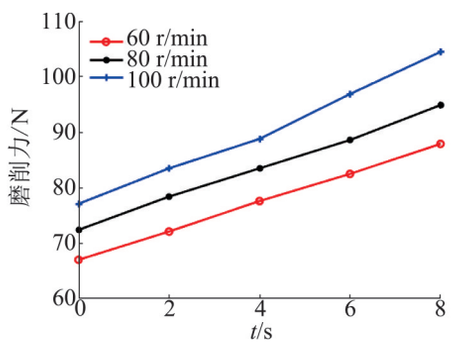


图10 工件不同转速磨削力
Fig. 10 Grinding force of workpiece at different speeds

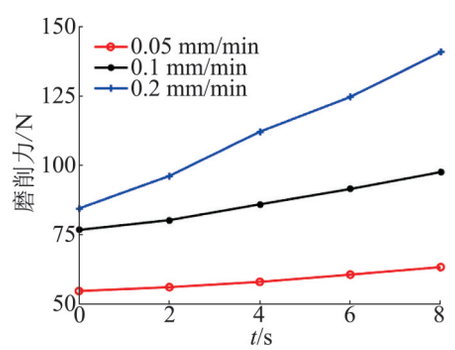


图11 进给速度不同磨削力
Fig. 11 Grinding force with different feed speed

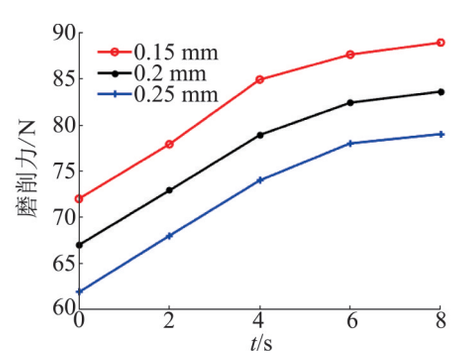


图12 偏心量不同磨削力
Fig. 12 Different grinding force of eccentricity

Journal of System Simulation, Vol. 35 [2023], Iss. 3, Art. 10

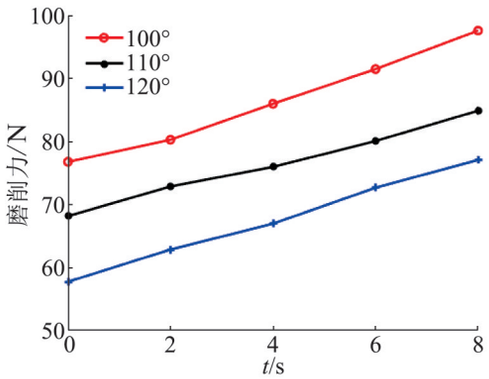


图13 支承角度不同磨削力

Fig. 13 Grinding force for different supporting angles

图9为其他工艺参数一定，通过改变数字孪生仿真模型边界条件参数设置中的砂轮线速度后，对磨削过程中磨削力RMS值进行提取总结所得到的磨削力变化规律。由图9可以看出，磨削过程中随着磨削时间变化，所产生的磨削力近似呈线性不断增大；且伴随着砂轮线速度的不断增大，磨削力整体呈下降趋势，下降比例均匀，无明显起伏。这是因为在进给速度以及工件转速一定的情况下，砂轮旋转的线速度越高，磨削区域内单位时间所通过的磨粒数量就会越多，单个磨粒所承受的材料去除量减小，导致未变形切屑的厚度的减小，与之相对应的磨削力也将减小。

2.2 工件转速对磨削力的影响

除砂轮线速度之外，工件转速也会对加工过程中的磨削力大小造成影响。图10为不同工件转速条件下由数字孪生模型得到的磨削力的变化规律。从图10可以看到，在工件转速为60 r/min时，磨削力最小为67 N，整个磨削过程中磨削力同样呈线性增加趋势，当工件转速提高至100 r/min时，磨削力最小磨削力为77 N，三种工件转速条件下磨削力幅值变化较小；且随着工件转速的不断提高，磨削力整体呈上升趋势。这是因为工件转速越高，单位时间内磨粒所需要去除的加工量会增多，每个磨粒的切削厚度增大，导致单位面积上所产生的磨削力也随之增大。

2.3 进给速度对磨削力的影响

图11为其他工艺参数一定，进给速度不同时由数字孪生模型获取的磨削力的变化规律。从图11可以看出，当进给速度增大的同时，磨削力也会相应增大。当进给速度为0.05 mm/min时，整个磨削过程磨削力虽然不断增大，但其增幅较小；随着进给速度的不断增大，磨削力增幅也会变大，当进给速度为0.2 mm/min时，同样时间内磨削力增幅明显大于进给速度0.05 mm/min条件下的磨削力增幅。这时可以理解为：一方面是随着进给速度逐步增大，相同时间内磨削工件的磨粒总数将变多，但此时单颗磨粒的最大未变形切削厚度增加，磨削力就会随之增大；另一方面由于相同时间内切深增大的原因，去除材料的方式也发生了转变，由原本的成屑逐渐向滑擦和耕犁转变，加工表面的残余厚度将会增加，这也是造成磨削力增大的一个原因。

2.4 其他因素对磨削力的影响

除上述几个因素对磨削过程中所产生的磨削力会造成影响之外，事实上还有别的因素也会影响磨削力大小，文章还研究了偏心量大小以及前后支承间不同角度时磨削力的变化情况。图12为偏心量不同时磨削力变化规律，图13为前后支承角度存在不同时磨削力的变化情况。

通过数字孪生模型，还可以研究其他工艺参数例如磨削深度、工件砂轮转速配比等对于套圈在加工过程中磨削力变化的影响。如此通过对数字孪生模型的调整，可以快速获得对磨削力的调整，实现对轴承套圈磨削加工过程中的工艺参数优化。

当在生产加工过程中需要得到较小时间尺度结果时，高保真、低消耗的虚拟数字孪生模型可以快速提供可靠的磨削力状态数据。为了提高数字孪生模型的精确度，需要在机床磨削工作区域加装传感器，传感器需要能够测得在真实工况条件下轴承套圈沟道在加工过程中所产生的磨削力大小。通过比较实测数据与数字孪生模型仿真数据，不断校准所建立的磨削工作区数字孪生模型

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol35/iss3/10
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1050

参数，实现模型的迭代优化，使之与真实系统模型接近一致，健全真实磨削系统在数字空间的映射。反之，通过建立真实磨削系统的数字孪生模型，因为其具有调整参数简单、方便快速读取结果的特点，又可以通过调整模型参数，快速实现对磨削力的预测，完成对工艺参数调整的指导。

3 磨削过程映射验证

为验证所构建的数字孪生模型的有效性，本文以 23952CA/W33 调心滚子轴承外圈为研究对象，在生产现场通过交流电能采集模块对 3MK1450 型外圆自动磨床加工过程中砂轮轴电机磨削时的电功率进行监测，记录监测数据得到磨削加工时磨削力数值。

在其他磨削工艺参数不变的条件下，分别改变实际磨削加工时的砂轮线速度、工件转速以及进给速度进行虚实映射验证试验，将试验所得磨削力结果进行统计，并与数字孪生模型经过仿真模拟所得到的结果进行对比，得到的结果分别如图 14~16 所示。通过图中统计结果可以发现，在所测磨削力数值上，试验所得磨削力数值会稍大于仿真所得数值，这是因为在真实工况下磨削环境更为复杂，磨削时所产生的磨削热会使砂轮表面部分磨粒发生钝化，此时参与磨削的磨粒数量减少，单个磨粒所产生的磨削力会增大，整体的磨削力也将增大。但在磨削力的变化趋势上，仿真所得的结果与真实试验保持一致，证明了仿真具有一定的有效性。

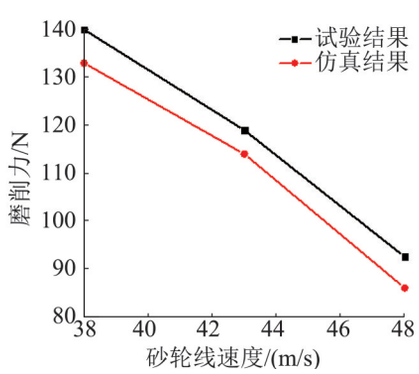


图 14 砂轮线速度结果对比
Fig. 14 Comparison of grinding wheel linear speed results

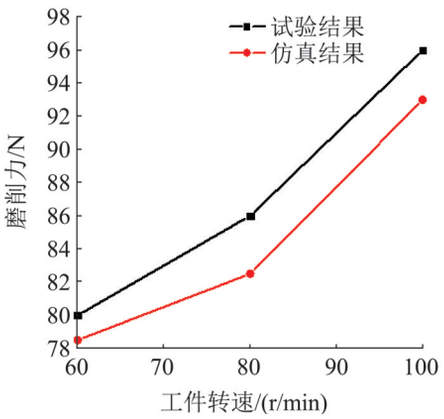


图 15 工件转速结果对比
Fig. 15 Comparison of workpiece speed results

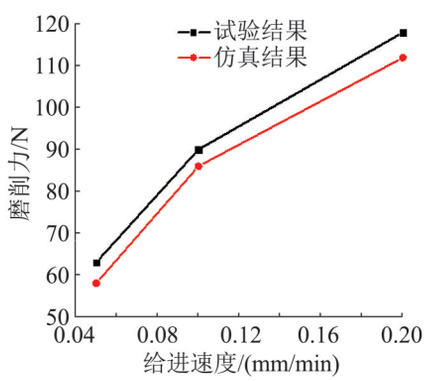


图 16 进给速度结果对比
Fig. 16 Comparison of feed speed results

4 结论

针对滚动轴承套圈磨削加工中磨削力的动态变化问题，本文基于动力学理论，通过完成物理空间实际磨削工作区向虚拟空间中的映射，建立了磨削工作区的数字孪生模型，为轴承套圈磨削加工状态的预测提供了新思路。主要结论如下：

(1) 通过对磨削工作区各构件的动力学、接触算法建模，以及对砂轮与被磨削表面间接触的刚柔耦合处理，在虚拟空间中创建了可用于模拟和预测磨削力的高保真数字孪生模型。

(2) 以调心滚子轴承外圈沟道磨削的数字孪生模型为对象，对部分重要磨削工艺参数进行了分析，结果表明：随着工件转速的提高，磨削力增大；砂轮线速度增大，磨削力减小；进给速度增

Journal of System Simulation, Vol. 35 [2023], Iss. 3, Art. 10

大，磨削力增大，三者对磨削力影响程度逐渐增强。

(3) 通过进行现场试验对所建立的数字孪生模型进行验证，试验结果与模型所得结果一致性较高，证明了所构建的数字孪生模型的有效性，实现了对磨削力进行预测的初衷，使得对磨削力的理解与预测多了一种新的手段。

目前为止，完成了整个数字孪生体系中最为重要的产品数字孪生模型的基本构建过程。然而，一个完善的数字孪生体系所涵盖内容与涉及范围都十分众多，还需借助传感器、物联网及相关技术实现数字孪生模型与计算机系统之间的通信，尤其是由数字孪生模型所产出的大量数据也需要合理地挖掘与利用，为此，下一步工作就需要建立相应的深度学习算法为之服务，以便更好地掌握模型与真实物理系统之间的内在联系，促进模型与系统之间的深度融合、加快产品在制造过程中的智能化数字化创新进程。

参考文献：

[1] 关佳亮, 杨洋, 胡志远, 等. 高精度轴承滚道ELID磨削专用机床设计[J]. 制造技术与机床, 2019(10): 62-65, 69.
Guan Jialiang, Yang Yang, Hu Zhiyuan, et al. Design of ELID Grinding Machine for High Precision Bearing Raceway[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2019(10): 62-65, 69.

[2] 张霖, 陆涵. 从建模仿真看数字孪生[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(5): 995-1007.
Zhang Lin, Lu Han. Discussing Digital Twin from of Modeling and Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(5): 995-1007.

[3] 李浩, 王昊琪, 程颖, 等. 数据驱动的复杂产品智能服务技术与应用[J]. 中国机械工程, 2020, 31(7): 757-722.
Li Hao, Wang Haoqi, Cheng Ying, et a1. Technology and Application of Data-Driven Intelligent Services for Complex Products[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(7): 757-722.

[4] 李欣, 刘秀, 万欣欣. 数字孪生应用及安全发展综述[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(3): 385-392.
Li Xin, Liu Xiu, Wan Xinxin. Overview of Digital Twins Application and Safe Development[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 385-392.

[5] Grieves M, Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems[M]// Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2017: 85-113.

[6] Warwic K, Graha M. GE Advances Analytical Maintenance with Digital Twins[J]. Aviation Week & Space Technology (S0005-2175), 2015: 10-19.

[7] Shafto M, Conroy M, Doyle R, et al. Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap[K]. USA: National Aeronautics and Space Administration, 2010.

[8] Kraft E M. The Air Force Digital Thread/Digital Twin - Life Cycle Integration and Use of Computational and Experimental Knowledge[C]// 54th Aerospace Sciences Meeting. San Diego, California USA: AIAA, 2016: 0897.

[9] Zaccaria V, Stenfelt M, Aslanidou I, et al. Fleet Monitoring and Diagnostics Framework Based on Digital Twin of Aero-Engines[C]// Turbo Expo. Oslo, Norway: ASME, 2018.

[10] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 4-21.
Tao Fei, Liu Weiran, Liu Jianhua, et al.Digital Twin and Its Potential Application Exploration[J]. Computer Intgrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 4-21.

[11] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1-18.
Tao Fei, Liu Weiran, Zhang Meng, et al. Five-dimension Digital Twin Model and Its Ten Applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25 (1): 1-18.

[12] 于勇, 范胜廷, 彭关伟, 等. 数字孪生模型在产品构型管理中应用探讨[J]. 航空制造技术, 2017, 60(7): 41-45.
Yu Yong, Fan Shengting, Peng Guanwei, et a1. Application of Digital Twin Model in Product Configuration Management[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(7): 41-45.

[13] 易扬, 刘晓军, 冯锦丹, 等. 面向数字孪生的产品表面模型表达与生成方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25 (6): 1454-1462.
Yi Yang, Liu Xiaojun, Feng Jindan, et al. Representation and Generation Method of Digital Twin-Oriented Product Skin Model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1454-1462.

[14] 谭飏, 张宇, 刘丽冰, 等. 面向动力学特性监测的主轴系统数字孪生体[J]. 中国机械工程, 2020, 31(18): 2231-2236.
Tan Yang, Zhang Yu, Liu Libing, et al. Spindle System Digital Twin for Dynamics Characteristic Monitoring[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(18): 2231-2236.

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol35/iss3/10
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1050

[15] 丁华, 杨亮亮, 杨兆建, 等. 数字孪生与深度学习融合驱动的采煤机健康状态预测[J]. 中国机械工程, 2020, 31(7): 757-722.
Ding Hua, Yang Liangliang, Yang Zhaojian, et al. Health Prediction of Shearers Driven by Digital Twin and Deep Learning[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(7): 815-823.

[16] Jos Voskuil. Model-Based — The Digital Twin[EB/OL]. (2018-07-02) [2021-09-12]. https://virtualdutchman.com/2018/07/02/model-based-the-digital-twin/.