

文章编号:1671-251X(2021)02-0088-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2020070063

基于数字孪生的 Buck 电路故障诊断方法

夏玲¹, 姜媛媛¹, 张杰¹, 孙权², 魏念巍¹, 张书婷¹

(1. 安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001;
2. 南京工程学院 自动化学院, 江苏 南京 211167)



扫码移动阅读

摘要:针对 Buck 电路故障诊断方法存在计算量大和准确率低等问题,提出了一种基于数字孪生的 Buck 电路故障诊断方法。首先,通过 Matlab/Simulink 软件平台建立 Buck 电路的数字孪生模型,并根据 Buck 电路元器件标称值设置数字孪生模型初始参数;然后,将采集的 Buck 电路输出电压信号及运行状态映射到数字孪生模型中,根据数字孪生模型与 Buck 电路的输出电压建立目标函数,并利用 Levenberg-Marquart 算法迭代优化目标函数,实现数字孪生模型的更新,最终实现 Buck 电路元器件参数估计;最后,比较数字孪生模型得到的参数估计值与 Buck 电路元器件标称值,若二者之差超过标称值 20%,表明元器件失效,从而实现 Buck 电路故障诊断。实验结果表明,该方法对 Buck 电路元器件参数具有较高的估计精度与诊断可靠性。

关键词:Buck 电路;故障诊断;数字孪生;参数估计;Levenberg-Marquart 算法
中图分类号:TD61 文献标志码:A

Buck circuit fault diagnosis method based on digital twin

XIA Ling¹, JIANG Yuanyuan¹, ZHANG Jie¹, SUN Quan², WEI Nianwei¹, ZHANG Shuting¹
(1. School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Automation, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract:In order to address the problems of large calculation and low accuracy of Buck circuit fault diagnosis methods, a buck circuit fault diagnosis method based on digital twin is proposed. Firstly, the digital twin model of Buck circuit is established by Matlab/Simulink software platform, and the initial parameters of the digital twin model are set according to the nominal values of Buck circuit components. Secondly, the acquired Buck circuit output voltage signal and operation state are mapped into the digital twin model, and the objective functions are established according to the digital twin model and the output voltage of Buck circuit. The Levenberg-Marquart algorithm is used to iterate and optimize the objective functions to achieve the digital twin model update so as to realize the parameter estimation of Buck circuit components. Finally, the estimated parameters obtained from the digital twin model are compared with the nominal values of Buck circuit components. When the difference between the two exceeds 20% of the nominal values, it is indicated that the component is invalid and the Buck circuit fault diagnosis is obtained. The experimental results show that the proposed method has high estimation accuracy and diagnostic reliability for Buck circuit component parameters.

Key words:Buck circuit; fault diagnosis; digital twin; parameter estimation; Levenberg-Marquart

收稿日期:2020-07-17;修回日期:2021-02-15;责任编辑:盛男。
基金项目:安徽省高校省级自然科学研究项目(KJ2019ZD12, KJ2018A0759);安徽省高校优秀青年骨干人才国内外访学研修项目(gxfx2017025)。
作者简介:夏玲(1995—),女,安徽六安人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子系统故障诊断与预测,E-mail:lingxia013@163.com。
引用格式:夏玲,姜媛媛,张杰,等.基于数字孪生的 Buck 电路故障诊断方法[J].工矿自动化,2021,47(2):88-92.
XIA Ling,JIANG Yuanyuan,ZHANG Jie,et al. Buck circuit fault diagnosis method based on digital twin[J]. Industry and Mine Automation,2021,47(2):88-92.

algorithm

0 引言

Buck 电路作为煤矿井下开关电源的重要组成部分,受工作环境及自身老化等因素的影响,其内部元器件参数实际值极易超过标称值,引起 Buck 电路发生故障,导致开关电源无法正常工作,甚至引发安全事故^[1-2]。因此研究 Buck 电路故障诊断方法对煤矿安全生产具有重要意义。

近年来,国内外已有大量学者深入研究 Buck 电路故障诊断方法,主要包括基于信号处理、基于数据驱动和基于解析模型的故障诊断方法。基于信号处理的故障诊断方法通过小波变换^[3]、傅里叶变换^[4-5]等分析电路的时频域信号,提取频率、方差和幅度等特征,从而进行故障诊断,但该方法无法充分利用信号之间的相关性,容易出现特征提取不全面,导致无法有效地进行故障诊断。基于数据驱动的故障诊断方法通过主成分分析^[6-7]、支持向量机^[8]等进行信号预处理、特征提取,最终实现对故障的分类和诊断,但该方法需要大量且具有相同分布的训练数据与测试数据,导致计算量大。基于解析模型的故障诊断方法通过分析模型参数与电路元器件参数之间的关系来进行参数估计^[9],将参数估计值与标称值进行比较来判断电路是否发生故障及故障的程度,但该方法难以建立精准的模型,故障诊断准确率低。本文提出了一种基于数字孪生的 Buck 电路故障诊断方法。通过建立 Buck 电路的数字孪生模型,精确地模拟 Buck 电路运行状态;通过比较数字孪生模型得到的参数估计值和 Buck 电路元器件标称值,实现 Buck 电路故障诊断。

1 基于数字孪生的 Buck 电路故障诊断原理

基于数字孪生的 Buck 电路故障诊断原理如图 1 所示。数字孪生模型^[10-12]是 Buck 电路的虚拟模型,将采集的 Buck 电路输出电压信号及运行状态映射到数字孪生模型中,来模拟 Buck 电路运行状态;利用智能算法迭代优化对数字孪生模型进行

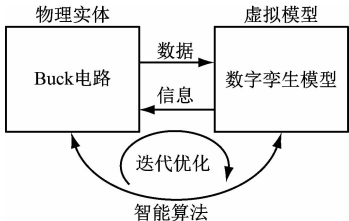


图 1 基于数字孪生的 Buck 电路故障诊断原理
Fig.1 Fault diagnosis principle of Buck circuit based on digital twin

更新,实现对 Buck 电路元器件的参数估计;将通过数字孪生模型得到的参数估计值与 Buck 电路元器件标称值进行比较,实现 Buck 电路故障诊断。

2 基于数字孪生的 Buck 电路故障诊断方法

2.1 故障诊断流程

基于数字孪生的 Buck 电路故障诊断流程如图 2 所示。

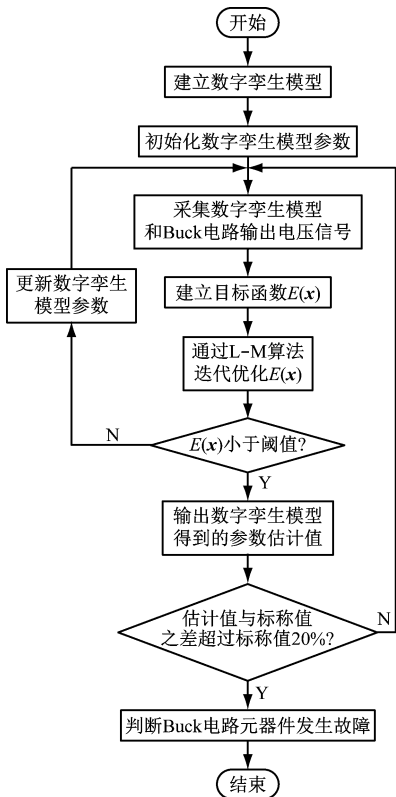


图 2 基于数字孪生的 Buck 电路故障诊断流程
Fig.2 Fault diagnosis flow of Buck circuit based on digital twin

Step1 通过 Matlab/Simulink 软件平台建立 Buck 电路的数字孪生模型。

Step2 设定数字孪生模型初始参数为 Buck 电路元器件标称值。

Step3 采集数字孪生模型输出电压 $U_i(x)$ 和 Buck 电路输出电压 $V_i(x)$, 建立目标函数:

$$E(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N e_i^2(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (U_i(x) - V_i(x))^2$$

(1)

式中 $e_i(x)$ 为第 $i(i=1,2,\cdots,N,N$ 为输出电压样本数) 个输出电压误差, x 为元器件参数向量, $x=[x_1\ x_2\ \cdots\ x_n]$, x_j 为第 $j(j=1,2,\cdots,n,n$ 为元器件参数个数) 个元器件参数。

Step4 通过 Levenberg-Marquart(L-M)算法

迭代优化目标函数。当目标函数值大于设定阈值时,更新数字孪生模型参数并返回 Step3。否则,直接输出数字孪生模型得到的参数估计值。

Step5 当数字孪生模型得到的参数估计值与 Buck 电路元器件标称值之差超过标称值的 20%^[13],表明元器件失效,Buck 电路发生故障。否则,返回 Step3。

2.2 L-M 算法迭代优化目标函数

L-M 算法结合了高斯-牛顿法和梯度下降法的优点^[14]:靠近最优解时,具有高斯-牛顿法的局部快速收敛特性;远离最优解时,具有梯度下降法的全局搜索特性。鉴于此,本文通过 L-M 算法迭代优化目标函数 $E(\mathbf{x})$,具体过程如下。

设 $\mathbf{x}_k$ 为第 $k(k=1,2,\cdots,L,L$ 为迭代次数)次迭代时的元器件参数向量,则第 $k+1$ 次迭代时的元器件参数向量为

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \Delta \mathbf{x} \tag{2}$$

$$\Delta \mathbf{x} = -[\nabla^2 E(\mathbf{x})]^{-1} \nabla E(\mathbf{x}) \tag{3}$$

式中: $\Delta \mathbf{x}$ 为元器件参数向量的变化量; $\nabla E(\mathbf{x})$ 为目标函数 $E(\mathbf{x})$ 的梯度; $\nabla^2 E(\mathbf{x})$ 为 $E(\mathbf{x})$ 的 Hessian 矩阵。

设 $\mathbf{e}(\mathbf{x})=[e_1(\mathbf{x})\ e_2(\mathbf{x})\ \cdots\ e_N(\mathbf{x})]^T$,则

$$\nabla E(\mathbf{x}) = \mathbf{J}^T(\mathbf{x})\mathbf{e}(\mathbf{x}) \tag{4}$$

$$\nabla^2 E(\mathbf{x}) = \mathbf{J}^T(\mathbf{x})\mathbf{e}(\mathbf{x}) + \mathbf{J}(\mathbf{x}) \tag{5}$$

式中 $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 为 Jacobian 矩阵。

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial e_1(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial e_1(\mathbf{x})}{\partial x_n} \\ \frac{\partial e_2(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial e_2(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial e_2(\mathbf{x})}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial e_N(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial e_N(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial e_N(\mathbf{x})}{\partial x_n} \end{bmatrix} \tag{6}$$

L-M 算法的迭代表达式为

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - [\mathbf{J}^T(\mathbf{x})\mathbf{J}(\mathbf{x}) + \lambda \mathbf{I}(\mathbf{x})]^{-1} \mathbf{J}^T(\mathbf{x})\mathbf{e}(\mathbf{x}) \tag{7}$$

式中: λ 为比例系数; $\mathbf{I}(\mathbf{x})$ 为单位矩阵。

迭代过程中,若 $E(\mathbf{x}_{k+1}) < E(\mathbf{x}_k)$,减小比例系数 λ ,令 $\lambda = \lambda\beta(0 < \beta < 1)$,否则,增加比例系数 λ ,令 $\lambda = \lambda/\beta$ 。不断调整比例系数 λ ,直至 $E(\mathbf{x}_{k+1})$ 小于设定阈值,此时迭代结束,输出元器件参数向量 $\mathbf{x}$ 。

3 实验结果与分析

Buck 电路拓扑如图 3 所示。 U 为输入电压; R_{on} 为 MOSFET 导通电阻; L 为电感; R_L 为电感内阻; D 为二极管; R_D 为二极管并联电阻; C 为电容; R_{ESR} 为电容等效电阻; R 为负载电阻。

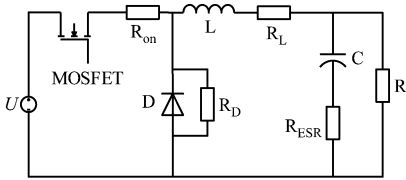


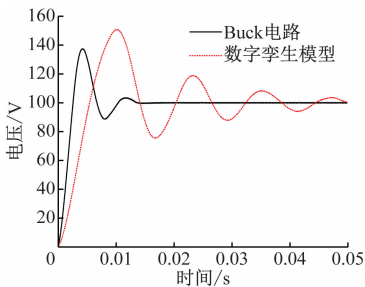
图 3 Buck 电路拓扑

Fig. 3 Buck circuit topology

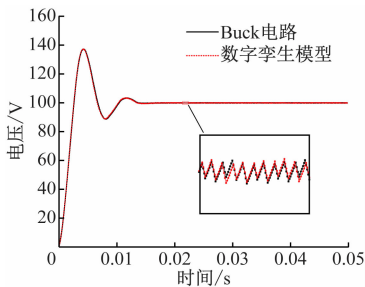
建立 Buck 电路的数字孪生模型,根据 Buck 电路元器件标称值设置数字孪生模型初始参数: $U=200\text{ V}$, $R_{on}=0.1\ \Omega$, $R_D=0.1\ \Omega$, $L=0.003\text{ H}$, $R_L=0.3\ \Omega$, $C=0.0047\text{ F}$, $R_{ESR}=0.1\ \Omega$, $R=1\ \Omega$ 。MOSFET 开关频率为 20 kHz,采样频率为 1 MHz。

将采集的 Buck 电路输出电压信号映射到数字孪生模型中,对数字孪生模型进行优化更新。通过仿真实验得到数字孪生模型更新迭代数据,见表 1。

数字孪生模型与 Buck 电路的输出电压对比如图 4 所示,可看出数字孪生模型更新后的输出电压波形与 Buck 电路输出电压波形几乎重叠,表明随着数字孪生模型不断更新,该模型能够准确地模拟 Buck 电路运行状态。



(a) 数字孪生模型更新前



(b) 数字孪生模型更新后

图 4 数字孪生模型与 Buck 电路的输出电压对比

Fig. 4 Comparison of output voltage between digital twin model and Buck circuit

目标函数迭代过程如图 5 所示,可看出经过迭代后的目标函数值为 7.9×10^{-4} ,表明数字孪生模型得到的参数估计值与 Buck 电路元器件参数十分接近。

在稳态运行时电容突然失效情况下,数字孪生模型与 Buck 电路的输出电压对比如图 6 所示,参数见表 2。可看出在电容 C 和等效电阻 R_{ESR} 突变的

表 1 数字孪生模型更新迭代数据
Table 1 Update iteration data of digital twin model

迭代次数	C/F	L/H	R_L/Ω	R_D/Ω	R_{on}/Ω	R_{ESR}/Ω
0	0.004 700 0	0.003 000 00	0.300 00	0.100 000	0.100 00	0.100 00
1	0.008 636 5	0.000 369 87	0.471 16	0.106 700	0.098 46	0.151 17
2	0.006 974 3	0.000 417 51	0.458 17	0.096 809	0.098 24	0.154 99
3	0.003 990 2	0.000 663 73	0.423 10	0.077 959	0.097 08	0.153 86
4	0.003 714 0	0.001 011 30	0.412 97	0.069 404	0.095 59	0.146 16
5	0.002 065 9	0.001 321 40	0.379 41	0.058 095	0.095 27	0.134 91
6	0.003 056 3	0.001 050 40	0.337 02	0.059 437	0.095 16	0.121 75
7	0.003 612 1	0.000 971 41	0.318 06	0.062 581	0.094 18	0.128 00
8	0.003 339 1	0.001 036 60	0.326 59	0.063 742	0.097 42	0.124 43
9	0.003 297 4	0.001 069 00	0.312 99	0.068 416	0.097 15	0.096 86
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
23	0.003 965 9	0.000 993 34	0.199 26	0.079 537	0.079 43	0.079 03

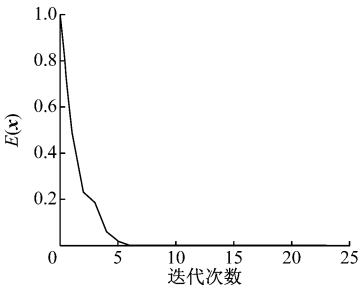


图 5 目标函数迭代过程

Fig. 5 Iteration process of objective function

情况下,数字孪生模型输出电压波形与 Buck 电路

输出电压波形几乎重叠,数字孪生模型得到的参数估计值与 Buck 电路元器件参数实际值十分接近,表明数字孪生模型可对 Buck 电路故障时的元件器参数进行准确估计。

为验证本文方法参数估计的有效性,与文献[9]方法进行对比,结果见表 3。可看出本文方法平均相对误差为 0.73%,文献[9]方法平均相对误差为 2.91%,表明本文方法能更准确地估计 Buck 电路元器件参数,从而提高 Buck 电路故障诊断准确率。

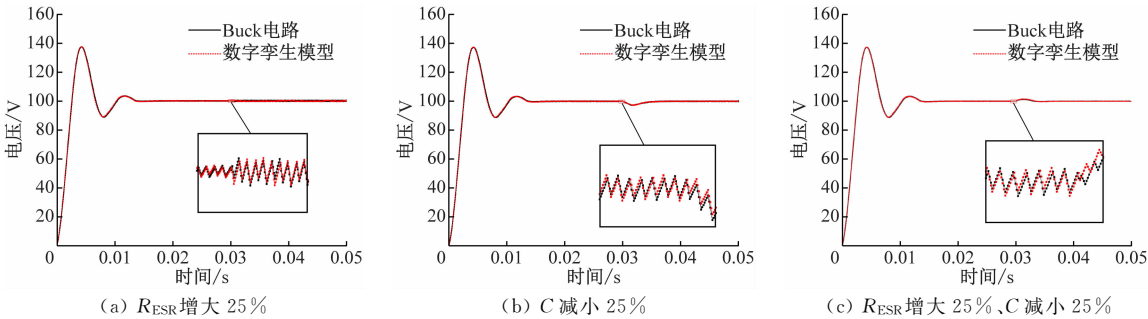


图 6 电容失效情况下数字孪生模型与 Buck 电路的输出电压对比

Fig. 6 Comparison of output voltage between digital twin model and Buck circuit under capacitor failure

表 2 电容失效情况下数字孪生模型与 Buck 电路元器件参数对比

Table 2 Comparison of component parameters between digital twin model and Buck circuit under capacitor failure

参数	R_{ESR} 增大 25%		C 减小 25%		R_{ESR} 增大 25%、C 减小 25%	
	实际值	估计值	实际值	估计值	实际值	估计值
C/F	0.004 00	0.004 04	0.003 00	0.003 15	0.003 00	0.003 09
L/H	0.001 000	0.000 907	0.001 000	0.001 080	0.001 000	0.001 087
R_L/Ω	0.200 00	0.204 99	0.200 00	0.192 89	0.200 00	0.196 16
R_D/Ω	0.080 00	0.078 84	0.080 00	0.081 49	0.080 00	0.079 32
R_{on}/Ω	0.080 00	0.078 93	0.080 00	0.081 44	0.080 00	0.081 55
R_{ESR}/Ω	0.100 00	0.105 39	0.080 00	0.079 41	0.100 00	0.101 47

表 3 不同方法的参数估计误差对比
Table 3 Comparison of parameter estimation errors of different methods

参数	本文方法			文献[9]方法		
	实际值	估计值	相对误差/%	实际值	估计值	相对误差/%
C/F	0.004 000 0	0.003 965 9	0.85	0.004 000 0	0.003 852 4	3.69
L/H	0.001 000 00	0.000 993 34	0.67	0.001 000 00	0.000 979 80	2.02
R_L/Ω	0.200 00	0.199 26	0.37	0.200 00	0.194 00	3.00
R_D/Ω	0.080 000	0.079 537	0.58	0.080 000	0.078 000	2.50
R_{on}/Ω	0.080 00	0.079 43	0.71	0.080 00	0.078 20	2.25
R_{ESR}/Ω	0.080 00	0.079 03	1.20	0.080 00	0.076 80	4.00

4 结语

基于数字孪生的 Buck 电路故障诊断方法通过采集数字孪生模型和 Buck 电路的输出电压建立目标函数;利用 L-M 算法迭代优化目标函数,更新数字孪生模型,获得参数估计值;对比数字孪生模型得到的参数估计值和 Buck 电路元器件标称值,实现 Buck 电路故障诊断。实验结果表明,该方法可准确估计 Buck 电路元器件参数,提高 Buck 电路故障诊断准确率。

参考文献(References):

[1] 田长庚. 矿用本安电源 Buck 变换器设计与仿真[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(11): 136-140.
TIAN Changgeng. Design and simulation on Buck converter of mine intrinsic safe power [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(11): 136-140.

[2] HSU Y C, TING C Y, HSU L S, et al. A transient enhancement DC-DC Buck converter with dual operating modes control technique [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2018, 66(8): 1376-1380.

[3] 张镇, 段哲民, 龙英. 基于小波变换和支持向量机的开关电流电路故障诊断新方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(5): 744-752.
ZHANG Zhen, DUAN Zhemin, LONG Ying. Fault diagnosis of switched current circuit based on wavelet transform and support vector machine[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 48(5): 744-752.

[4] 庄陵, 方晶晶, 王凯. 基于改进离散傅里叶变换滤波器组的两步检测算法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(10): 208-213.
ZHUANG Ling, FANG Jingjing, WANG Kai. Two-step detection algorithm based on MDFT modulated filter bank[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(10): 208-213.

[5] VARGHESE J, SUBASH S, HUSSAIN O B, et al.

An improved digital image watermarking scheme using the discrete Fourier transform and singular value decomposition[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2016, 24(5): 3432-3447.

[6] 马峻, 赵飞乐, 徐潇, 等. MRA-PCA-PSO 组合优化 BP 神经网络模拟电路故障诊断研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(3): 73-79.
MA Jun, ZHAO Feile, XU Xiao, et al. Fault diagnosis of analog circuit based on optimized BP neural network with MRA-PCA-PSO technology[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(3): 73-79.

[7] 李振, 李伟光, 赵学智, 等. 基于主成分分析的特征频率提取算法及应用[J]. 振动·测试与诊断, 2018, 38(4): 834-842.
LI Zhen, LI Weiguang, ZHAO Xuezhi, et al. Feature frequency extraction algorithm based on principal component analysis and its application[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(4): 834-842.

[8] 肖晓晖. 基于改进果蝇优化算法优化 SVM 的模拟电路故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(5): 57-64.
XIAO Xiaohui. Fault diagnosis of analog circuit based on SVM optimized by improved fruit fly optimization algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(5): 57-64.

[9] 王友仁, 傅宏辉, 邵力为, 等. 基于电压检测与混杂模型的 Buck 电路参数辨识[J]. 电力电子技术, 2019, 53(6): 137-140.
WANG Youren, FU Honghui, SHAO Liwei, et al. A novel method of parameter identification for Buck circuit based on voltage detection and hybrid models [J]. Power Electronics, 2019, 53(6): 137-140.

[10] DAHMEN U, ROSSMANN J. Experimentable digital twins for a modeling and simulation-based engineering approach [C]//IEEE International Systems Engineering Symposium, Rome, 2018: 1-8.

[11] 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(7):41-45.

YU Yong, FAN Shengting, PENG Guanwei, et al. Study on application of digital twin model in product configuration management [J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2017(7):41-45.

[12] SCHLUSE M, ROSSMANN J. From simulation to experimentable digital twins: simulation-based development and operation of complex technical systems [C]//IEEE International Symposium on Systems Engineering,Edinburgh,2016:1-6.

[13] 王凤茹. 基于智能二次电源的健康管理技术研究 [D]. 长春:中国科学院大学,2015.

WANG Fengru. Study on health management for intelligent switching-mode power supply [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences,2015.

[14] 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):1-18.

TAO Fei,LIU Weiran,LIU Jianhua,et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24 (1): 1-18.