

doi: 10.7690/bgzdh.2025.09.005

教练机飞行员飞行训练质量评估系统

尹大伟

(空军航空大学飞机系统教研室, 长春 130022)

摘要: 为解决以视频回放为主的评估模式存在人为评判误差大、缺乏量化依据、训练数据统计分析难以实现等问题, 对教练机飞行员飞行训练质量评估系统设计进行研究。基于飞行训练大纲中训练科目的分析解读, 以飞参数据为核心研发资源, 搭建教练机飞行员飞行训练质量评估系统软件的运行架构, 开发飞行训练超限告警、飞参数据曲线分析、飞行轨迹 3 维回放、飞行训练诊断报告, 以及阶段训练效果评估等具体功能。结果表明, 该设计能为教练机飞行员飞行训练效果检验提供实用有效的辅助工具。

关键词: 教练机; 飞行员; 飞参数据; 飞行训练质量评估

中图分类号: V323.1 **文献标志码:** A

Quality Evaluation System for Pilot Training of Trainer Aircraft

Yin Dawei

(Department of Aircraft Systems Aviation University of Airforce, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to solve the problems of large error of human judgment in evaluation mode mainly based on video playback, lack of quantitative basis and difficult to realize statistical analysis of training data, design of flight training quality evaluation system for trainer pilots is studied. Based on analysis and interpretation of training subjects in flight training outline and taking flight parameters as core R & D resource, operational framework of flight training quality evaluation system for pilot of training aircraft is built. Flight training over-limit warning, flight data curve analysis, 3D flight trajectory playback, flight training diagnosis report, and evaluation of training effectiveness of specific functions are developed. The results show that a practical and effective assistant tool for pilot training effect test can be provided by the design.

Keywords: trainer aircraft; pilot; flight parameter data; flight training quality evaluation

0 引言

当前, 教练机飞行员飞行训练评估工作主要依靠飞行教员伴飞监控, 以及飞行后地面视频回放讲评来开展。尽管视频回放方式具有使用便捷灵活等一系列优点, 但由于视频采集通常按时间轴进行, 教学研讨时需要依靠教学员人工定位寻找所需位置节点, 不具备飞机飞行姿态、飞行操控数据的收集整理能力, 不利于飞行员自主开展飞行训练效果评估, 使得其存在一定的使用限制问题。同时, 随着航空工业的快速发展, 现役飞机飞参设备的采集能力得到了大幅度提升, 采集的飞参数量少则数百多则数千, 并且能够完整记录飞行全流程绝大多数的重要数据信息^[1-3]; 因此, 视频方式所欠缺的, 恰好是飞行员提升飞行训练质量所必须的, 而伴随飞行训练采集得到的飞参数据, 在大数据技术高速发展的今天, 则能满足飞行训练评估的相应要求。

基于此, 充分利用飞参数据开展飞行员飞行训

练质量辅助评估工作, 发挥其海量数据所蕴含的统计融合、规律提取等优势, 帮助飞行员快速发现飞行训练问题和飞行操控中的关键节点, 能够有效优化飞行员飞行训练质量的评估效果^[4-6]。将飞参数据作为软件开发核心资源, 通过对飞行训练大纲典型飞行训练科目的分析解读, 搭建飞行训练质量评估系统软件架构; 将快速定位、直观易懂的用户需求作为开发目标, 通过设计飞行训练超限告警、飞参数据曲线分析、飞行轨迹 3 维回放、飞行训练诊断报告和阶段训练效果评估等功能模块, 构建形式多样、判据丰富、评估信息充分的软件应用体系。

1 飞行训练质量评估系统软件架构

飞行训练质量评估系统以实现飞行员飞行训练效果的综合评判为目标, 围绕飞参数据使用、飞行动作识别、动作偏离度分析和视景仿真回放等主要评估手段进行设计开发, 评估系统软件架构如图 1 所示。

收稿日期: 2024-09-07; 修回日期: 2024-10-08

第一作者: 尹大伟(1976—), 男, 吉林人, 博士。

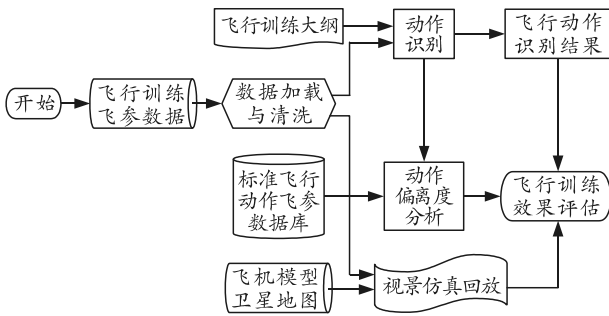


图 1 飞行训练评估系统软件架构

飞行训练评估工作,起始于对飞参数据的采集、挖掘与处理,因此,软件运行的首要任务,就是将机电管理计算机记录的飞参数据进行处理和还原,生成工程值文件,并从中提取出飞行训练评估需要的飞参数据,如指示空速、气压高度、迎角、俯仰角、滚转角和航向角等,形成 CSV 数据文件,并对该文件进行必要的加载与清洗,为后续飞行训练评估提供数据源头。

飞行动作识别功能是软件系统运行的基础。通过对飞行训练大纲中典型飞行训练科目的分析解读形成执行脚本文件,根据飞行动作中高度、速度、过载、迎角、滚转角、俯仰角、航向角等典型飞参数据的变化规律,利用执行脚本中的判据与相应的飞参数据进行对照识别,从中提取出飞行动作关键点特征数据,将待识别飞行动作关键点特征数据与标准飞行动作特征数据相比对,开展实际飞行动作的识别与归类。按照上述操作步骤,对架次飞行中的所有飞行动作展开顺序分析,最终得到完整飞行架次全部飞行动作的识别结果。

动作偏离度是衡量飞行员飞行动作完成质量好坏的重要指标,动作偏离度小说明实际飞行动作与标准飞行动作接近,动作偏离度分析对飞行动作的效果评估起到关键性作用。动作偏离度由飞行动中各个特征点处飞参数据的符合度与相应特征在整个飞行动作中的权重系数加权得到,其中,特征点处飞参数据的符合度,通过计算实际飞参数据与标准飞参数据之间的相似程度来获取。

视景仿真回放功能是飞行员飞行后回顾飞行动作、重温飞行详情的有效手段。根据经纬度等飞参数据信息加载卫星地图,构建 3 维飞机模型,将飞机运动轨迹与地球地理特征相结合,通过高度、速度、迎角等飞参数据驱动飞机在 3 维空间中运动,再现飞行训练过程,使飞行员能够直观查看飞机空中姿态和飞行轨迹,使飞行教员能够依此开展飞行员飞行训练效果的精确讲评。

2 软件功能模块设计

飞行员飞行训练质量评估依据飞行训练大纲的规则要求,以及飞行员成长轨迹的必然规律进行,评估内容应该具备飞行员自主评估和开展飞行后讲评的有效辅助作用;因此,软件功能围绕飞行训练中的超限告警、曲线分析、3 维回放、诊断报告和效果评估等实际需求进行模块设计,并注重评估形式的多样性和评估结论的快速性。软件功能模块划分如图 2 所示。

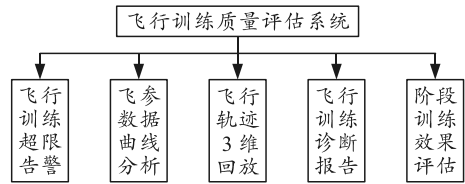


图 2 飞行训练质量评估系统软件功能

2.1 飞行训练超限告警模块

超限告警是对飞行员飞行训练中突破飞行安全界限的必要警示,也是飞行后讲评时需要着重回顾的重要内容,主要记录并分析起降阶段、空中飞行阶段,以及飞机飞行性能边界等相关超限信息。其中,起降阶段考察起飞和着陆过程中的超限操纵,重点研究起降速度、迎角、侧滑角等飞参参数变化特征;空中飞行阶段考察飞行过程中所完成的飞行动作,利用高度、速度、过载等飞参数据,对飞行动作的关键特征点数据及可能存在的超限情况展开分析;飞机飞行性能边界超限围绕飞行员的实际操控与飞机飞行性能要求,针对飞机最大飞行高度、最大过载和最小速度等飞参数据进行预警。

超限告警功能模块设计展示飞参数据解析后的架次超限数据信息,能够查看特定飞行架次各飞行阶段的实际超限状况,并根据超限程度进行正常、黄色预警、红色预警等状态显示,如图 3 所示。

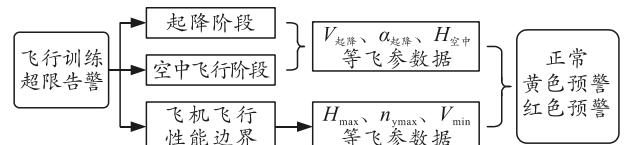


图 3 飞行训练超限告警功能设计

2.2 飞参数据曲线分析模块

飞参数据曲线是对飞行员飞行操纵过程中特定飞参数据特征变化的详细描述,能够记载并反馈飞行训练效果评估所需的重要信息,是飞行员飞行后讲评与自评的实用分析工具。针对与飞行动作相关的一系列重要飞行参数,如高度、速度、迎角和过

载等，本模块设计实现各飞参数据曲线随时间轴的自动绘制，以及飞参极限值选取、动作状态曲线标定等功能，使飞行员能够通过飞参数据曲线查看并清晰地了解飞行期间的具体操纵细节，模块设计如图 4 所示。

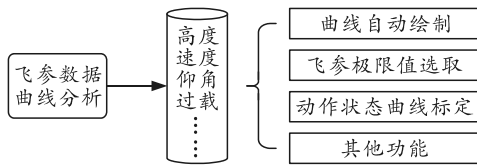


图 4 飞参数据曲线分析功能设计

飞参数据曲线绘制在以时间为横轴、飞参数据为纵轴的坐标系中，各飞参参数独立建图，针对选定的飞行动作，能够对相关的数据曲线以不同的颜色或文字进行标记，针对超限飞行数据，能够以醒目颜色进行警示标记，以方便飞行员查看。

2.3 飞行轨迹 3 维回放模块

通过对飞机飞行过程中经纬度等飞参数据的实时解析，飞机空间飞行运动轨迹将被完整复现，配合 3 维飞机模型及对高度、速度、俯仰角等飞参数据的输入，使飞机的姿态变换与空间位置信息更加精准，从而形成视景仿真功能。通过上帝视角、跟踪视角、第一视角等多种观察角度的设置，使飞行员能够从不同维度观察飞机运动状态。该模块设计如图 5 所示。

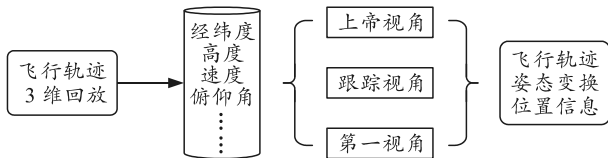


图 5 飞行轨迹 3 维回放功能设计

2.4 飞行训练诊断报告

飞行训练诊断报告是对飞行员特定飞行架次飞行训练效果的综合评定，报告涵盖飞行训练基本信息、超限告警、飞行动作评估与成绩评定等内容。飞行训练基本信息包括飞机机型、机号、飞行架次、飞行训练科目等，给出架次飞行训练的概要信息；超限告警部分描述飞行中出现的超限情况，包括告警名称、时刻、正常值范围等信息；飞行动作评估部分描述了架次飞行中所有飞行动作的相关信息，包括飞行动作的开始时间、结束时间、关键点数据等，并给出实际飞行动作与标准飞行动作之间的偏离度分析结果；成绩评定部分，根据超限告警和飞行动作评估，结合飞行教员的人工决策，综合形成飞行员飞行训练成绩。该模块设计如图 6 所示。

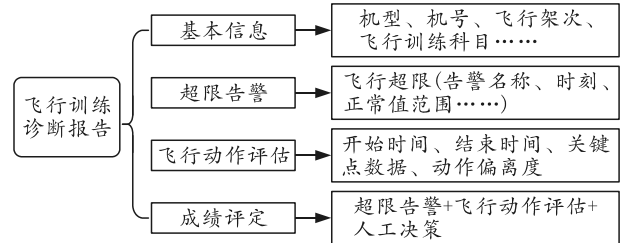


图 6 飞行训练诊断报告功能设计

2.5 阶段训练效果评估模块

飞行员飞行训练过程中，同一训练科目将阶段性进行多次练习，以期通过反复的飞行训练纠正偏差，最终达到提高飞行员飞行技能的目的。基于此，设计阶段训练效果评估模块，针对特定飞行动作，进行阶段飞行训练偏离度分析，以实现训练效果的趋势评估。该模块设计如图 7 所示。

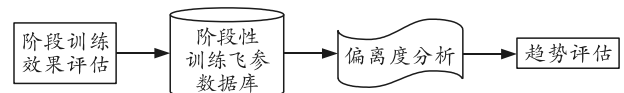


图 7 飞行训练诊断报告功能设计

3 实例应用

以某飞行员特定架次飞行训练为例，结合软件中各功能模块的运用，开展飞行员飞行训练质量评估分析。

对该架次采集得到的飞参数据进行预处理，规范数据阵列、去除奇点异常值、形成标准 CSV 数据格式，随后，将数据导入软件系统中并依次实施各项评估工作。

飞行状态超限告警功能如图 8 所示。在超限告警界面中，单击选择所要分析的飞行架次，界面右侧将呈现出详细的列表信息，其中主要显示架次飞行中起降阶段的起飞速度、起飞迎角，空中飞行阶段各个飞行动作的进入高度、进入速度等飞行员关注的飞参数据信息，并对突破飞行训练大纲要求的超限信息以黑框线、虚框线标注，进行告警示意。由于本架次飞行中没有对飞机飞行性能边界的突破，所以未显示相关飞参数据信息。

类别	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7
飞行状态超限告警	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7
飞参数据曲线分析	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8
飞行轨迹 3 维回放	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	3-9
飞行训练诊断报告	4-4	4-5	4-6	4-7	4-8	4-9	4-10
阶段训练效果评估	5-5	5-6	5-7	5-8	5-9	5-10	5-11
系统管理	6-6	6-7	6-8	6-9	6-10	6-11	6-12

动作名称	告警信息	参数详情
1 起飞	与标准值差很远	[起飞速度: 250.5625, 起飞迎角: ...]
2 第1次着陆	符合大纲要求	[着陆速度: 225.5625, 着陆迎角: ...]
3 第2次着陆	符合大纲要求	[着陆速度: 225.125, 着陆迎角: ...]
4 第3次着陆	符合大纲要求	[着陆速度: 227.9375, 着陆迎角: ...]
5 过数改身	符合大纲要求	[进入高度: 3926.0, 进入速度: ...]
6 下边台	与标准值差很远	[进入高度: 4155.0, 进入速度: ...]

图 8 超限告警界面显示情况

飞参数据曲线分析界面如图 9 所示。进入该界面后：首先，由架次选择框确定所要分析的飞行架

次；随后，选择特定飞参参数，即可从界面右侧获得该参数随飞行时间的变化曲线；此时，如果由动作选择框确定所要分析的飞行动作，则飞参数据曲线中该动作的分布情况将以醒目颜色进行标注。并且，为了使曲线分析更加灵活多样，在界面下方设置了一系列图形调节选择功能，可以根据使用者的实际需求开展缩放、锚定等相关操作。

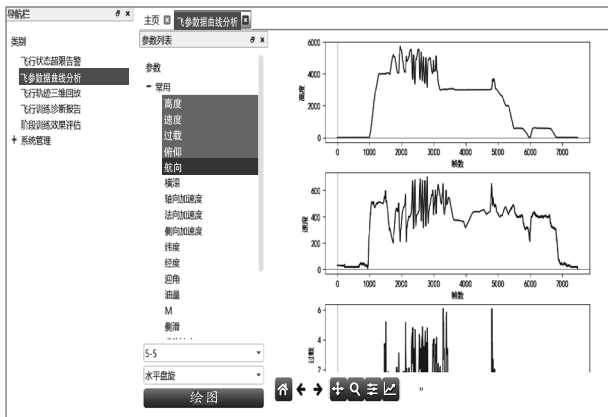


图 9 飞参数据曲线分析界面状态显示

飞行轨迹 3 维回放界面如图 10 所示。图中对追踪视角进行了独立显示，也可以根据需要将上帝视角、跟踪视角、第一视角组合显示。针对回放过程，利用时间进度条、视角控制、显示控制等功能，能够随机调整回放模式、定位和关注特定飞行状态；通过航迹跟踪线、画面缩放操作，能够实时的观察飞机飞行轨迹和飞行姿态变化，并快速获取对应的

飞参数据信息。

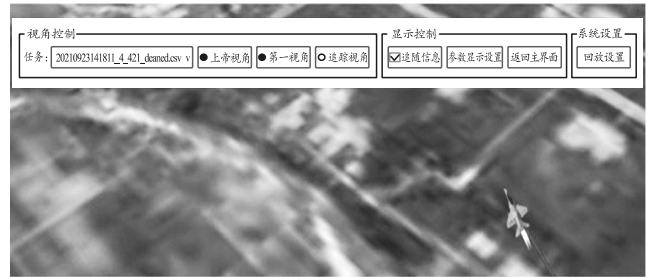


图 10 飞行轨迹 3 维回放界面状态显示

飞行训练诊断报告全方位分析解读飞行员飞行训练效果，以 2 种模式给出诊断结论。模式 1：针对特定飞行动作，结合典型飞参数据的极值特征，生成典型飞参数据极值状态列表，使飞行员能够对比分析飞行动作的完成质量，如图 11 所示；模式 2：生成内容详尽的 Excel 数据表，对飞行训练诊断所需的全部信息进行综合展示，能够满足飞行员及飞行教员的评估与记录存档需求，如图 12 所示。

参数名	进入	退出	最大值	最大位置	最小值	最小位置	起止变化量	极值位置
1 高度	00:21:31...	00:22:07...	-	-	-	-	-	-
2 速度	3858.0	3705.0	5349.0	00:21:44...	3571.0	00:22:03...	-153.0	1778.0
3 过载	661.06	653.06	676.56	00:22:04...	371.06	00:21:44...	-8.0	305.5
4 俯仰	3.3	4.06	4.06	00:22:07...	1.63	00:21:44...	1.56	3.22
5 侧滑	32.61	34.33	70.07	00:21:37...	-88.49	00:21:50...	1.72	158.56
6 航向	98.53	168.5	179.74	00:21:53...	-179.79	00:22:04...	70.97	359.52
7 横滚	-1.47	-17.7	179.32	00:21:44...	-179.13	00:21:45...	-16.23	358.45
8 迎角	5.99	9.12	14.1	00:21:40...	2.78	00:22:01...	3.13	11.32
9 侧滚	0.24	0.26	1.42	00:21:44...	-0.76	00:21:41...	0.02	2.16

图 11 飞行动作与典型飞参数据对应的列表信息

飞行训练质量评估报告						
基本信息	日期	飞行员	机号	备注		
	架次	履历总时长	空中总时长			
超限告警	具体内容	履历总时长: ... 飞行总时长: ... 起飞: {'速度': ..., '迎角': ..., '油量': ..., '侧滑': ...} 着陆: {'速度': ..., '迎角': ..., '油量': ..., '侧滑': ...}				
	影响分析					
动作识别与评估	动作名称	时间段	偏离度	关键点参数		
	过载热身			进入: {'高度': ..., '速度': ..., '过载': ..., '俯仰': ..., '航向': ..., '横滚': ..., '迎角': ..., '侧滑': ...} 中间: {'高度': ..., '速度': ..., '过载': ..., '俯仰': ..., '航向': ..., '横滚': ..., '迎角': ..., '侧滑': ...} 退出: {'高度': ..., '速度': ..., '过载': ..., '俯仰': ..., '航向': ..., '横滚': ..., '迎角': ..., '侧滑': ...}		
	大迎角机动					
	半滚倒转					
	草花筋斗					
	水平盘旋					
诊断建议	评语	综合得分				
	判读人签字	本人签字	建议			
	检查人签字	检查日期				

图 12 飞行训练诊断报告 Excel 数据表

阶段训练效果评估功能如图 13 所示。当特定飞行员阶段飞行训练飞参数据库充实完毕后，通过点

击选择需要评估的相应飞行训练动作，即可观察到该飞行动作阶段训练偏离度分析曲线图，进而由曲

线图分布规律了解该飞行员特定飞行动作的阶段训练效果。

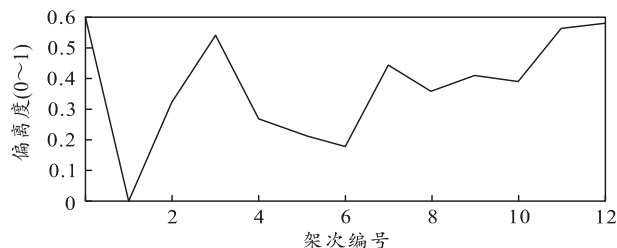


图 13 阶段训练效果评估界面状态显示

4 结论

教练机飞行训练过程中,采集的海量飞参数据完整记录了飞行员的飞行操控信息,由此,结合飞行训练大纲要求,充分利用飞参大数据分析解读飞行员实际飞行训练情况,开发评估系统开展飞行员飞行训练质量评估。评估系统能够自动读取并处理飞行训练中采集的速度、高度、迎角、过载等飞参数据,构建飞行训练科目与典型飞参数据之间的关联关系,形成标准飞行动作数据库;通过开展飞行员飞行动作识别,与标准飞行动作的偏离度比较分析,并配合视景仿真回放等操作手段,能够综合评判飞行员的飞行训练效果。评估系统能够针对飞行

(上接第 12 页)

- [43] 邱立军,吴明辉. PHM 技术框架及其关键技术综述[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(2): 10-15.
- [44] 王乐,周军,崔艳林. 数字孪生在航空发动机领域的应用分析[J]. 航空动力, 2020(5): 63-66.
- [45] 张艳丽,孙振宇,李琦,等. 基于数字孪生的商用航空发动机构型管理[J]. 航空动力, 2022(3): 50-52.
- [46] 黄新春,史恺宁,张定华. 航空发动机智能加工技术发展研究[J]. 航空精密制造技术, 2022, 58(2): 1-5.
- [47] 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.
- [48] 陶飞,张贺,戚庆林,等. 数字孪生模型构建理论及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(1): 1-15.
- [49] 陈斯迅,李在蓉,王禹钦,等. 管道数字孪生体模型的构建及应用[J]. 油气储运, 2021, 40(6): 643-650.
- [50] 任祝寅,周华,张健,等. 数字孪生在航空发动机燃烧室设计阶段的应用与展望[J]. 航空制造技术, 2022, 65(17): 34-39.
- [51] 黄新春,史恺宁,张定华. 航空发动机智能加工技术进

超限事件进行差异告警,通过飞参数据以 2 维曲线、3 维回放的方式再现飞行动作细节与飞行轨迹特征,快速给出架次飞行训练诊断报告,开展阶段飞行训练效果分析,为飞行员飞行训练的自主评估和飞行教员的成绩评定工作提供详实有效的辅助判据,为飞行员飞行训练能力成长提供实用的技术支持。

参考文献:

- [1] 周圣林,毛海涛. 浅析国内飞参使用现状与发展建议[J]. 航空标准化与质量, 2016(2): 49-52.
- [2] 刘丰恺,李茜. 航空大数据技术的发展与应用[J]. 电讯技术, 2017, 57(7): 849-854.
- [3] 景博,焦晓璇,黄以峰. 面向飞机 PHM 的大数据分析与人工智能应用[J]. 空军工程大学学报, 2019, 20(1): 46-54.
- [4] 张建业,李学仁,倪世宏. 飞行成绩评定及管理系统[J]. 空军工程大学学报, 2001, 2(1): 70-73.
- [5] 林亚军,王江南,张原,等. 教练机飞行与指挥模拟训练系统建设[J]. 兵工自动化, 2019, 38(1): 11-14.
- [6] 孟光磊,张慧敏,朴海音,等. 自动化飞行训练评估中的战机机动作识别[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(7): 1267-1274.
- [7] 展研究[J]. 航空精密制造技术, 2022, 58(2): 1-5.
- [52] 徐尧,连宇臣,程奕翀,等. 航空发动机总装脉动线单模块集成仿真分析[J]. 航空制造技术, 2021, 64(4): 59-65.
- [53] 崔一辉,杨滨涛,方义,等. 数字孪生技术在航空发动机智能生产线中的应用[J]. 航空发动机, 2019, 45(5): 93-96.
- [54] 付洋,曹宏瑞,郜伟强,等. 数字孪生驱动的航空发动机涡轮盘剩余寿命预测[J]. 机械工程学报, 2021, 57(22): 106-113.
- [55] 闫斌斌,冯坤,江志农. 基于改进广义牛顿法的燃气轮机性能数字孪生体构建方法[J]. 热能动力工程, 2022, 37(1): 110-116.
- [56] 刘瑜,谢强. 数字孪生的技术特点及在飞行试验中的应用展望[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(6): 1364-1373.
- [57] 邓焯,奉祁林,赵健. 数字孪生战场建设探讨[J]. 防护工程, 2020(3): 58-64.
- [58] 李浩,陶飞,王昊琪,等. 基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发框架与关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1320-1336.