

基于 CPS 的气动试验研究体系全链路数据融合研究

何 福, 罗昌俊, 马永一, 汤 瀑

(中国空气动力研究与发展中心计算空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 三大手段融合气动试验是新一代航空航天飞行器研制的必然需求, 当前由于链路不通、设备数字化程度低等多种因素, 制约了三大手段的有效融合应用; 文章分析了气动试验研究体系中的信息物理系统内涵和建设必要性, 阐述了信息物理系统与气动试验研究融合的目标愿景, 通过构建气动试验研究体系信息物理系统, 提出打通数据、流程、试验手段三个链路的方法, 形成气动设备、试验研究对象(型号、标模)和人三个维度的数字化, 通过气动试验研究大数据为三大手段融合注入新的驱动力, 促进气动试验研究能力从数据组织、信息价值、管理能力三个维度螺旋提升, 有力推动气动试验研究体系的建立。

关键词: 气动试验研究体系; 信息物理系统; 全链路数据融合

Research on Full Data Fusion Application of Aerodynamic Experiments Research System Based on CPS

He Fu, Luo Changjun, Ma Yongyi, Tang Pu

(Computational Aerodynamics Institute of China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: The data fusion of wind tunnel test, numerical calculation and flight test is an inevitable requirement for the development of new generation aerospace vehicles. However, the application of data fusion is restricted by many factors, such as isolated data islands and low level of equipment intelligence. In this paper, the definition and necessity of aerodynamic CPS is analyzed, and the vision of the integration of CPS and aerodynamic research is described. By construction of aerodynamic CPS, the method of data, process and experiments fusion is proposed, to realize the digitalization of equipment, model and human. Driven by big data, data fusion brings new ideas to wind tunnel test, numerical calculation and flight test, and promotes the research ability in data organization, information value and management.

Keywords: aerodynamics research; CPS; full data fusion

0 引言

中科院何积丰院士认为信息物理系统(cyber-physical system, CPS)是一个在环境感知基础上, 深度融合计算(Computation)、通信(Communication)和控制(Control)能力的可控可信可扩展的网络化物理设备系统。

信息物理系统正在成为全球新一轮产业变革的核心技术体系^[1-2], 利用全量数据实现现实空间与虚拟空间的映射, 通过数据驱动科研机构的核心竞争力, 有望重构传统的科学探索和技术创新模式。

空气动力学是研究空气自身运动以及空气与物体相对运动现象和作用规律的一门学科。它是世界公认的事关国家安全与发展战略的技术科学, 是航空、航天技术发展的先行官。

风洞试验、数值计算和模型飞行试验是空气动力学研究的三大手段, 通过三大手段的综合应用, 形成闭环的气动试验研究体系。气动试验研究体系着眼设备发展大局和信息化发展趋势, 以 CPS 技术为核心, 实现“人”、“信息”和“物理系统”的综合集成, 形成链路通畅、高度数字化的试验研究环境, 形成气动数据从生产到应用生态

链, 用多维度融合赋能气动研究创新发展, 为气动研究工作注入新的活力^[3-4]。

1 国内外现状

以云计算、物联网、大数据、人工智能为代表的新一代信息技术以“信息”为核心, 立足于信息的全面采集、自由流动、充分共享和高效利用, 推动了 CPS 技术的快速发展。

在过去几年中, CPS 的概念已经开始广泛影响许多国家的先进制造业和工业战略, 如美国将 CPS 列为未来竞争力技术的首位, 德国也以 CPS 为核心制定了“工业 4.0”国家战略, 《中国制造 2025》明确将信息物理系统作为支撑信息化和工业化深度融合的综合技术体系^[5]。

CPS 是一种深度融合信息空间和物理空间, 能够优化资源配置且实时高效的智能技术, 未来将被应用到人类生产生活方方面面, 具有广泛的应用前景, 必将大大促进国民经济、军事的发展。

而在气动研究和设备试验与评估方面, 美国空军 AEDC 倡导提出了一体化试验与评估(integrated test & evaluation, IT&E)概念^[6-8], 要求试验与评估各方对各试验阶段和各试验活动进行协同规划和实施, 实现数据共享和互联互通。一体化试验与评估主要体现在两个方面: 一是不同研制阶段试验一体化, 即研制方和风洞机构共同编制试验大纲, 尽量避免过量重复性试验, 力争通过一次试验获得多个参数, 减少

收稿日期: 2020-04-02; 修回日期: 2020-05-06。

作者简介: 何 福(1981-), 男, 四川三台人, 高级工程师, 主要从事信息化规划、设计、建设与研发方向的研究。

资源消耗，缩短研制时间。二是试验与仿真一体化，即通过对建模与仿真、地面试验与高性能计算、虚拟试验和飞行试验等各种方法手段的综合利用，形成数字样机模型，通过多次迭代对设计方案进行修改，可及早发现问题，有效节省研制时间、减少风险和控制成本。

随着 IT 技术、建模与仿真技术、人工智能等高新技术的飞速发展，一体化试验与评估模式已广泛应用于美军装备试验与评估领域。

2 气动试验研究体系的信息物理系统内涵

早在 1978 年钱学森同志就曾指出^[9]：“要较好的解决航天器空气动力学设计问题，必需是地面风洞模拟试验、计算机流场数值和实际飞行试验三种研究方法同时并举，相互配合。”钱学森同志对气动试验研究体系的规划是综合利用风洞试验、数值计算、模型飞行三种手段来支撑航空航天飞行器研制。

将先进的感知、计算、通信、控制等信息技术和自动控制技术应用于气动试验研究，构建物理风洞、数值风洞、飞行风洞与信息空间中人、机、物、环境、信息等要素相互映射、适时交互、高效协同的信息物理系统，实现气动试验研究资源的快速配置、运行的按需响应、对象的快速建模和方案的动态优化，从而形成支撑三大手段融合的综合技术体系。

气动试验研究体系信息物理系统的核心要素是“一网、一平台、一中心”，一网是试验现场测控专网与办公网的逻辑互通，保证数据链路的贯通，一平台是所有系统与应用均基于一个统一应用基础平台研制，实现流程的贯通和数据的融合，一中心是建立一个气动试验研究大数据中心，通过数据驱动三种试验手段链的贯通，为气动中心开展飞行器一体化试验与评估提供平台，支撑气动试验研究体系的建设。

3 研究的必要性

空气动力学三大研究手段综合应用是新一代航空航天飞行器研制的必然需求，已成为美俄欧等航空航天强国在先进飞行器研制中普遍采用的研究模式。按照钱学森同志对气动中心的规划，经过多年发展特别是新区建设，气动中心三大手段设备相对集中、能力日趋均衡，具备了开展三大手段综合应用的基础条件。但是仍然存在以下问题，制约气动试验研究的创新发展。

1) 三个链路不通。包括“数据感知—安全采集—高速传输—分布式存储—云计算分析—虚拟化仿真—多源模拟应用”的数据链；“任务接收—任务策划—组织实施—产品交付”的流程链；“风洞试验—数值计算—模型飞行试验”的研究手段链。

2) 体系数字化程度低。气动中心物理设备的管理、控制、模拟、仿真的数字化程度低；试验对象（型号、标模）缺乏全生命周期数据描述与分析；作为体系参与者，人的数字化程度低，相关信息零散，无法开展精益化管理，无法实现经验的积累与知识的传承；

3) 数据融合利用不够。以单个设备为中心的试验数据管理模式造成设备体系之间、试验手段之间的数据割裂；气动试验研究行为与人隔离的现象。

基于一些已有的尝试^[10-11]，信息物理系统建设是解决上述问题的有效途径，使信息化成为气动中心气动研究组织、管理、决策、运行、作业的神经系统，进一步释放 Cyber 空间分析、评估、优化和决策的能力，更好地服务于国家重大战略发展需求。

4 研究目标

如图 1 所示，该研究是在现代化管理治理和标准规范体系建立的前提下，一是建立基于“一套网络、一个中心、一

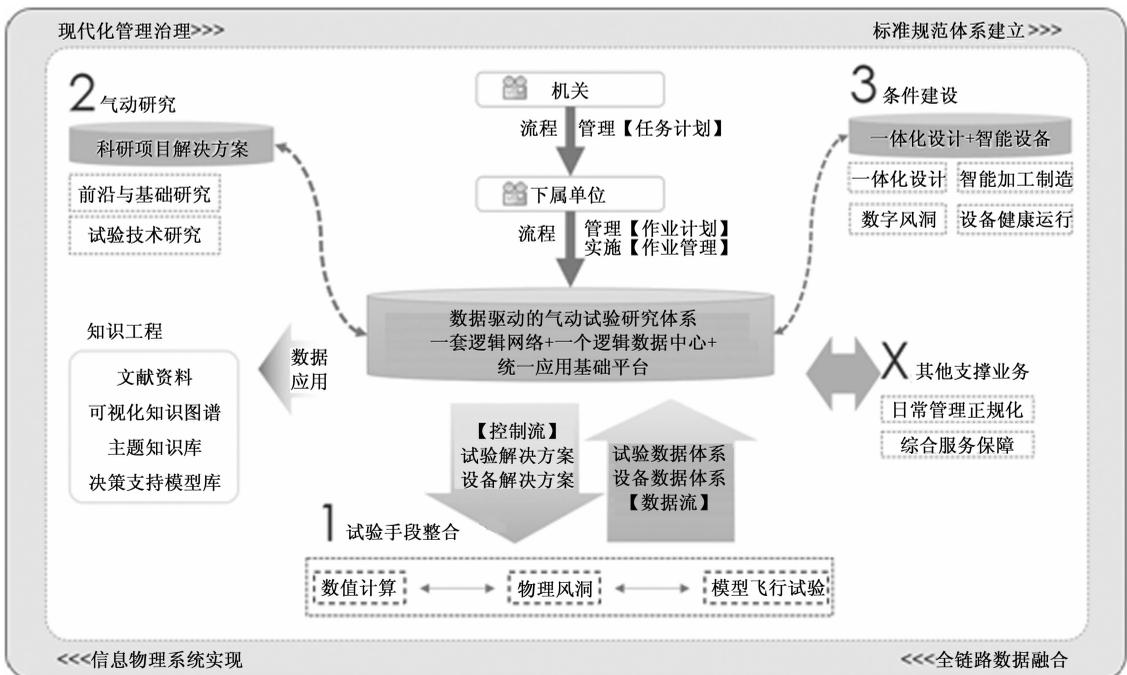


图 1 数据驱动的全链路数字化融合远景图

个基础应用平台”的信息物理系统以全量数据核心;二是按业务线条开展“3+X”业务系统建设,其中“3”是聚焦气动试验研究体系核心的试验手段、精益研究和气动设备条件建设的三大中心任务,“X”是支撑中心工作高效运行的日常管理和服务保障。要打破以往按职能部门条块划分的业务系统建设,实现业务数据的全汇聚;三是提高两级机关的管理流程与反馈的效率;四是基于数据中心与云计算实现知识工程化,为各专业业务领域提供全面的数据支撑。最终使得管理流、控制流、数据流在数据中心自动流转、汇聚、抽取和交换,实现全链路数据融合,推动信息物理系统的实现,加快信息化向知识化、智能化的转变,支撑气动中心气动试验研究体系建设。

5 全链路数字化融合方案

5.1 总体设计

打通三个链路:充分利用风洞数字化和信息化已有成果,贯通“数据感知—安全采集—高速传输—分布式存储—云计算分析—虚拟化仿真—多源模拟应用”的数据链、“预算/申请—项目管理过程—设备管理过程—试验管理过程—知识归档过程”五大过程中的流程链、“条件建设—风洞试验—数值计算—模型飞行试验”的空气动力学闭环研究手段链;

全面数字化:基于数字孪生技术,形成气动中心气动设备、试验研究对象(型号、标模)和人的数字化描述,构建气动中心气动试验研究体系的虚拟空间映射。

实现体系融合:开展信息化与业务的融合、试验对象间的融合、试验行为与人的融合等多融合应用,打破以往以单个设备或单种手段为中心的试验数据割裂模式,实现设备体系之间、试验手段之间的数据融合,推动经验延续和知识积累。

5.2 建立开放性的“1+3+X”顶层框架

如图 2 所示,结合气动试验研究业务和大数据的特点,设计开放性的“1+3+X”五层架构,“1+”即一套网络基础、一个空气动力试验大数据中心、一个基础应用平台、一个知识共享平台;“3+X”为三大核心业务和其他支撑业务领域。

“一套网络”是统筹规划科研网、测控专网、物联网等网络基础,逻辑上达到互联互通,形成支撑信息物理系统的“一张网”;

“一个空气动力试验大数据中心”是数据云化存储,包括通用、试验、计算和数据交换四个分中心。通用数据中心存储经过抽象化的共性数据,计算数据中心存储数值计算数据,试验数据中心(共用)存储风洞试验和模飞试验数据,数据交换中心实现数据集中交换。上述数据资源在逻辑上形成国家气动试验研究大数据中心,为空气动力试验研究提供全面、高质量的数据支撑。

“一个基础应用平台”统一应用基础平台从低到高细分为资源、共性和特性三个层级,共同支撑气动中心各业务系统的快速开发、数据融合和无缝集成。其中:资源层包括人力、设备、通用管理等三类基础数据和计算、存储、网络等基础资源;共性层提供基础信息服务支撑,包括基于模型服务、知识服务、统一流程服务、GIS 服务、BIM 服务等;特性层提供面向应用开发的集成框架,包括日常办公协同框架、科研试验全流程框架、风洞设计与仿真框架、CPS 应用基础框架等。

“一个知识共享平台”是在气动中心全部数据云化后,所有业务领域数据链路打通的基础上,构建气动试验研究体系大数据环境,建立气动中心统一的知识共享管理及展示平台,实现经验凝练传承、知识共享协同,在对各类原始



图 2 “1+3+X” 五层架构

数据和信息进行收集、整理、搜索和挖掘的基础上，提供辅助决策支持。

“3+X”为聚焦气动试验主责主业的三类核心业务，分别是侧重质量效率的智慧风洞试验，侧重知识创新的气动研究，侧重一体化和智能化的条件建设。纵向实现试验研究体系的一体化管控，横向实现试验、研究、条件建设的数据全生命周期贯通。“X”为支撑空气动力试验研究的其他业务领域，如日常管理、综合服务等。

5.3 标准规范体系建设

标准规范建设气动试验研究信息物理系统建设的基础制度保障，标准规范文件体系分三个层次。第一层为核心文件，主要描述是信息物理系统建设的管理机制、总体目标、组织模式等，如《气动试验研究体系信息物理系统建设指导意见》、《网络安全和信息化工作管理办法》，是建设的根本遵循；第二层次是专项制度文件，如《试验工控网管理规定》、《统一应用基础平台技术规范》，是业务领域工作的规定；第三层次是作业文件，如《试验现场物理层数据标准与接口规范》、《数据结构设计与共享规范》，用于具体的工作指导。

5.4 全链路数字化设计

5.4.1 数据链

如图 3 所示，贯通式数据链设计从业务维度将气动试验研究分为日常管理、条件建设、科学研究、试验内场、模拟计算、智慧园区和试验外场六个领域。从数据生命周期维度分为前端采集、业务解决方案、云化存储与数据融合、

数据深度应用四个层次。数据生产环节通过标准化规范人工、智能感知设备和接口三种数据采集方式，尽可能实现全量数据采集。业务解决方案均基于同一应用基础平台开发，应用基础平台自动将数据全量汇聚到业务对应的数据分中心，实现数据的云化存储，数据交换中心构建不同数据分中心、不同网系之间数据的共享互通，建立数据的相互关系，在逻辑上形成气动试验研究大数据中心，实现数据融合。各专业领域根据数据中心提供统一的数据服务开展数据挖掘，共同沉淀、梳理、抽取形成知识，知识反馈到业务领域，指导业务领域的持续改进和流程优化，形成现实物理空间数据在网络空间的循环流动。

5.4.2 流程链

贯通式流程链设计打破系统以部门为边界的分割模式，将气动试验研究所有业务归纳为五个大的阶段，每个阶段均有不同的业务部门参与，流程管理模式由传统面向部门职能设计转变为面向业务线条设计，实现部门主导流程方式向流程牵引部门工作行为的转变，使得流程不仅在部门内高效流转，还能够在跨阶段、跨部门间顺畅衔接。贯通式流程链采用流程与业务分离，流程作为独立服务实现了流程与业务的解耦，因此，模块内的流程与模块间的流程可以通过统一流程引擎串联，解决了业务边界效率问题。全部流程由统一基础应用平台共性层集中管理，确保流程的连贯性、一致性，实现环环相扣的业务耦合，业务模块衔接更加顺畅，确保气动试验研究体系计划、组织、管理的高效协同。

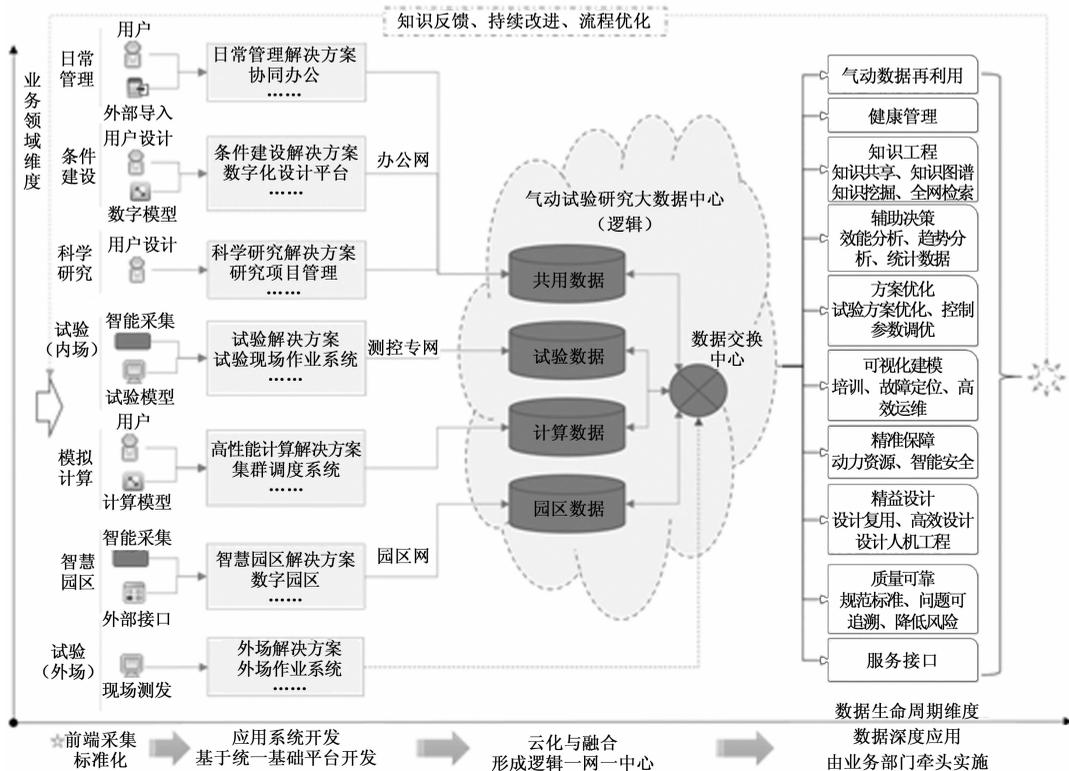


图 3 气动试验研究体系数据链

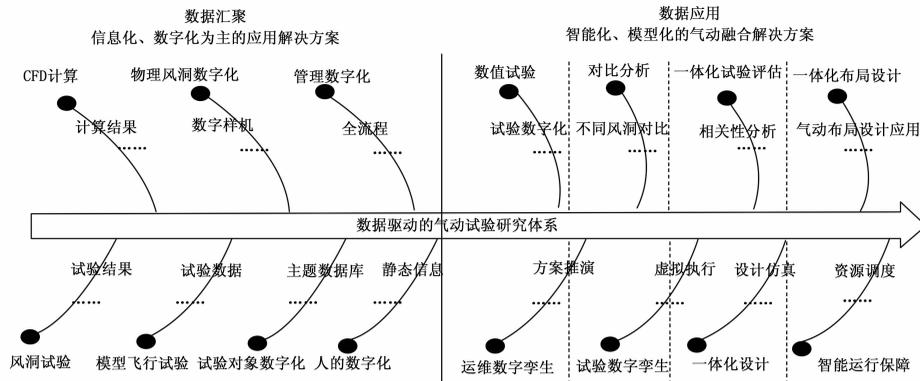


图 4 气动试验研究手段链

5.4.3 气动试验研究手段链

如图 4 所示, 信息物理系统通过数据的贯通和业务流程贯通, 风洞试验、CFD 计算、模飞试验三种试验手段数据与试验设备、试验对象、管理过程和“人”的背景数据的全连汇聚, 形成气动试验研究大数据体系, 形成气动试验研究的虚拟映射。一方面, 为气动试验研究手段链提供数据支撑, 依靠数据管理、数据融合、数据再利用技术提高数据精准度, 在智慧试验研究、数据验证、天地相关性、试验鉴定评估等领域实现智能化、模型化的气动融合解决方案, 通过气动研究三种手段密切配合、优势互补, 支持针对专门气动问题的气动主题数据库建设与应用, 形成闭环气动试验研究体系, 促进气动中心一体化试验与评估能力建设。另一方面, 为气动试验研究提供更加高效、宽泛的仿真环境, 解决真实环境和飞行环境难以测试的问题, 降低成本与风险, 验证工程实用性, 提高气动研究质量效能和适用范围, 缩短研究周期。

6 应用实验与分析

如图 5 所示, 气动试验研究体系信息物理系统的形成, 信息化建设跳出局部环境和局部利益约束, 从气动试验研究全局发挥信息化作用, 通过数据驱动的方式把气动试验研究体系中的组织管理和三种试验手段的深度耦合, 数据组织、信息价值、管理能力三个维度均在螺旋提升。数据组织是信息数字化、结构化、知识化的变革, 信息价值是从单纯的试验研究, 到结构化分析、知识化挖掘的跃升, 组织管理实现从松散到流程的优化与再造的转变。

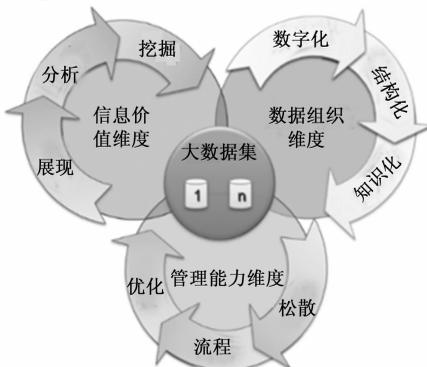


图 5 三维度螺旋驱动循环

目前, 已建立了气动试验研究的信息物理系统顶层设计, 制定了从配套的方案与标准规范体系, 通过重构与扩展, “一网、一平台、一中心”的格局已经形成, 信息化逐步从“建系统向建体系”转变, 数据的共享与流程的互通日益提高, 物理风洞设备的数字化也正在规划建设, 气动试验数据再利用工程与信息物理系统有机衔接。

7 结束语

信息物理系统是气动试验研究创新发展的重要驱动力, 全链路数字化融合推动气动试验研究信息化、数字化能力的提升, 帮助提高气动试验研究能力, 洞察试验研究中各类因果关系和关联关系, 构建“以数为理”的气动试验研究环境, 更好发挥信息物理系统“能力倍增器”的效果。

参考文献:

- [1] 信息物理系统白皮书 [Z]. 中国电子技术标准化研究院, 2017.
- [2] 贾根良. 第三次工业革命与工业智能化 [J]. 中国社会科学, 2016 (6): 87-106.
- [3] 凌永顺, 万晓媛. 武器装备信息化 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016: 2-10.
- [4] 杨 飞, 于洪敏, 吕耀平. 基于物联网的部队装备信息共享需求分析 [J]. 兵工自动化, 2016 (35): 89-92.
- [5] 李 杰, 邱伯华, 刘宗场, 等. CPS 新一代工业智能 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2017.
- [6] Marcus L S, Tommie F L, William L P. Integrated test and evaluation for the 21st century [A]. AIAA [C]. 2004.
- [7] 王国盛, 洛 刚. 美军一体化试验鉴定分析及启示 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2010 (2): 99-102.
- [8] 杨 磊, 武小悦. 美军一体化试验与评价技术发展 [J]. 国防科技, 2010, 31 (2): 8-14.
- [9] 李 雪, 庄逢甘, 郑哲敏, 等. 力学发展众人谈 [J]. 科学中国人, 2007 (10): 15-16.
- [10] 何 福, 范金磊, 徐 涛, 等. 基于层次分析法的风洞试验装备全寿命健康因素量化评价方法研究计算机测量与控制 [J]. 2016, 24 (10): 271-273.
- [11] 何 福, 徐 涛, 王小飞. 基于 MSF 的风洞试验分布式数据库系统同步设计计算机测量与控制 [J]. 2015, 23 (9): 3192-3194.