文章编号:1674-8190(XXXX)XX-001-06

高级教练机LVC训练技术研究及原理验证

李维,余伏章,赵平均,王欣,陈晓冬
(航空工业江西洪都航空工业集团有限责任公司 飞机设计所,南昌 330024)

摘 要: LVC训练是军事大国低成本、体系化实现联合战术对抗的重要手段之一。为了扩展教练机战术训练任务、提升训练效率、降低训练成本,研究一种具备教练机特色的LVC训练系统。分析国外战斗机、教练机LVC训练系统的概念、训练能力和技术内涵,着重介绍高级教练机LVC训练的体系架构、技术架构和关键元素。基于高级教练机LVC训练架构,结合实际,简要说明高级教练机LVC原理演示验证环境;通过仿真方式验证教练机体系中实装节点、模拟器节点、虚兵节点之间的通讯协议以及交互逻辑。结果表明:高级教练机LVC训练组成架构及关键元素的分析满足工程要求,为构建教练机LVC训练体系提供了技术支持。

关键词: 教练机;LVC训练;飞行模拟器;嵌入式训练
中图分类号: V241.0 **文献标识码:** A
DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

Research and principle verification of LVC training technology for advanced trainer aircraft

LI Wei, YU Fuzhang, ZHAO Pingjun, WANG Xin, CHEN Xiaodong
(Aircraft Design Institute, AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Company Ltd., Nanchang 330024, China)

Abstract: LVC training is one of the important means for military powers to achieve joint tactical confrontation at low cost and systematically. In order to expand the tactical training tasks of the trainer aircraft, improve the training efficiency and reduce the training cost, an LVC training system with the characteristics of the trainer was studied. This paper analyzes the concept, training capability and technical connotation of LVC training system for foreign fighter and trainer aircraft, and focuses on the system architecture, technical architecture and key elements of LVC training for advanced trainer aircraft. Based on the LVC training architecture of the advanced training aircraft, combined with the actual situation, the LVC principle demonstration and verification environment of the advanced training aircraft is briefly explained. The communication protocol and interaction logic between the implementation node, simulator node and virtual soldier node in the training machine system are verified by simulation. The results show that the analysis of the LVC training structure and key elements of the advanced trainer meets the engineering requirements, and provides technical support for the construction of the LVC training system of the trainer.

Key words: trainer aircraft; LVC training; flight simulator; embedded training

收稿日期: 2025-01-14; **修回日期:** 2025-05-09
基金项目: 江西省“双千计划”项目(jxsq2023201070)
通信作者: 李维(1981—),女,学士,正高级工程师。E-mail: 13979129258@163.com
引用格式: 李维,余伏章,赵平均,等. 高级教练机LVC训练技术研究及原理验证[J]. 航空工程进展,XXXX,XX(XX):1-6.
LI Wei, YU Fuzhang, ZHAO Pingjun, et al. Research and principle verification of LVC training technology for advanced trainer aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-6. (in Chinese)

0 引 言

随着构建新型军事训练体系，创新实战化训练要求的提出，应对体系对抗训练所需要的更复杂、更真实的训练场景是各国军队所要面临的直接问题，如何实现有效的、低成本的、快速的训练成为军队必须要考虑的问题。“采用分布式结构，将分散在不同地域的真实装备、模拟系统、仿真兵力互联起来进行LVC训练，是解决当前信息化条件下联合对抗训练诸多问题的有效手段[1]。”

所谓LVC训练，就是将真实训练装备(L-Live)、模拟的训练装备(V-Virtual)、构造的训练装备(C-Construction)通过有线、无线相融的网络联合在虚实融合的战场环境中。其中真实训练装备和模拟的训练装备由人操控，构造的训练装备为全虚拟的作战兵力[2]。

通过研究国内外LVC训练技术及发展现状可知，LVC训练技术已经大量应用于美欧等军事强国的日常战术对抗训练中。如美空军经SLATE演示验证项目之后衍生的P6CTS以及海军的TCTSⅡ空战训练系统等[3]。美国的T-7A教练机也在其招标时提出需要具备LVC训练能力[4]。LVC训练技术在国内军事训练领域的应用还处于研究中，在教练机领域，高级教练机承担飞机学员在院校阶段的高级训练和部分战术训练任务，但是因为研制成本、设备安装空间等限制，教练机所能够提供的战术训练能力有限。为了解决这一问题，本文分析教练机应用LVC技术的必要性以及其与战斗机LVC的本质区别，提出教练机LVC训练的架构，分析教练机LVC训练的关键元素，基于教练机LVC训练架构，结合实际，介绍教练机LVC原理演示验证环境及功能验证情况。

1 国内外LVC训练技术研究

1.1 美国SLATE空战训练系统

基于体系化对抗训练需求，美国防部2015年开展了SLATE(Secure LVC Advanced Training Environment)演示项目，用构造仿真扩大战术训练场景，真实地构建飞行员战术对抗训练环境[5]，SLATE吊舱如图1所示。演示验证期间，SLATE在P5CTS吊舱的基础上，更改数据链路和训练波形等[6]，融合地面飞行模拟器以及计算机兵力生成软件(CGF)[7]。SLATE演示项目，验证了多类型飞机之间、地面模拟器与飞机之间的互操作性[8]，5G-ATW数据链路的通讯性能，多通道数据链加密，以及V-模拟器、C-构造兵力与L-实装飞机处于相同战术场景而没有被明显感知等能力，评估了LVC训练相关技术的成熟度[9]。

图1 SLATE吊舱(美国立方体公司图片)

Fig. 1 SLATE pod(Image Cubic Corporation, USA)

SLATE训练系统能够支持不同类型的训练节点在多域空间中进行训练，支持模拟器与模拟器、模拟器与飞机之间，与不同国家军兵种之间的联合训练[10]。使模拟器与实装飞机能够在高逼真的模拟环境中共同进行飞行模拟训练，共同进行作战模拟训练。可以提供不断变化的环境，支持相关人员开展战术级、战役级训练。实装装备适用于战术级，扩展数字环境后，可支持战役级训练。支持的战术训练内容可涉及空地攻击、空中近距支援、空空作战、假想敌等。可有效地开展一定规模的、带战术背景的对抗模拟训练和联合训练[6]。

演示项目结束后，LVC技术衍生了一系列产品，如美海军也发展出了海军版本LVC训练产品“TCTS增量Ⅱ”[11]，在先进网络支持下将构造元素与真实飞行员融合在同一战场场景，并在战术对抗流程、操作规程等方面保持与实战一致。美空军2019年发布的空战训练系统P6CTS的顶层需求中，也要求在技术上融入LVC训练，并要求P6CTS需要与海军TCTSⅡ空战训练系统之间互

用性问题[12]。

1.2　美国T-7A教练机LVC训练

美国空军的飞行员训练体系历来在国际上享有盛誉,但是近年来,其训练体系逐渐显露出与日益增长的军事需求之间的脱节。目前,美军仍依赖老旧的T-38教练机来培养飞行员。所培养的飞行员后续需要衔接更为先进的战斗机,随着训练装备与主战装备之间的技术差距不断扩大,导致训练效果难以满足现代化战争的要求。为了弥补差距,美军采用先进战斗机进行训练任务,这种方式不仅成本高昂,还存在影响整体战备的风险。

“2018年9月27日,美国空军宣布波音设计的T-X飞机成功竞标为的新型先进喷气教练机,被命名为T-7A,以取代正在使用的T-38。”[4]

T-7A教练机采用计算机仿真技术,模拟了现代战斗机所依赖的多种先进传感器和任务系统,使飞行学员在训练阶段就能提前熟悉这些关键设备。T-7A教练机也具备LVC训练能力,能够将实装飞机与地面飞行模拟器链接在同一个战场环境中。这种设计不仅为飞行员提供了逼真的战术训练环境,还能够模拟敌机角色,全面地提升飞行学员的实战能力和战术协同水平。

1.3　以色列LVC训练技术

以色列凭借自身丰富的空战经验和科研技术实力在作训和模拟系统领域具有深厚的技术积累。在战斗机、教练机等平台上配备了一系列战术训练服务设备。如M-346教练机的嵌入式虚拟航空电子设备(Embedded Virtual Avionics,EVA),其可提供虚拟的雷达、光电、电子战以及武器功能,使教练机能够模拟先进战斗机的战术对抗能力,提供虚拟地面和空中威胁,仿真作战场景。地面任务训练中心(MTC)采用开放和模块化的架构,基于局域网络将多模拟器、多数字节点融合在一个网络化、面向任务的模拟训练环境中。“天空场景”采用计算机技术生成仿真兵力,支持将仿真兵力与其他训练系统连接,实现复杂的分布式训练。以色列通过网络技术将嵌入式虚拟航电设备(EVA)、地面任务训练模拟器、“天空场景”组合实现LVC训练。

1.4　国内LVC技术

通过相关技术文献可知,为了解决协同作战训练中空基指控规模有限、组训难度大,相关院所进行了基于LVC技术的空基指控训练技术研究[13],防空反导训练因为地域广、要素多、协同复杂等,实战化训练存在一定困难,相关院所为了解决这一问题,提出并构建了防空反导LVC训练架构,拟形成集导调、监控、评估与一体的防空反导LVC联合训练体系[14]。

但由于国内LVC技术在军事训练领域的应用存在场景复杂、虚拟构造的逼真度有限、异构训练节点互联设计复杂等问题,现阶段LVC训练技术在国内军事训练领域还处于研究阶段。

2　教练机LVC训练技术研究

由以上国外战斗机以及教练机应用LVC技术的情况可知,教练机LVC训练技术与战斗机LVC训练技术存在一些本质区别,战机LVC训练的目的是为了提高和维持飞行员对战机任务系统的熟练程度,教练机主要侧重低成本训练,实现战术体系训练下载。所以在LVC训练网络规模需求方面,教练机体系的需求没有战斗机需求大,针对机载平台和模拟器平台,教练机需要的仿真元素多,需要仿真不同型的传感器、武器,以达到衔接不同战机以及战术任务下载的需要[15]。由此可知,教练机LVC训练应既能兼顾融入战斗机LVC训练,也应该满足自身训练需求。

为了解决因结构、成本等自身限制而无法满足战斗机飞行员战术训练需求的问题,教练机通过配装相应的嵌入式训练系统“下载”战斗机的战术基础教练内容,承担部分基础战术训练课目,减少战斗机低水平消耗。嵌入式训练是LVC训练技术架构实现的物质基础,是LVC训练的简化版本,是实现LVC训练之前的关键部分[6]。

教练机应用LVC训练,可以创建一个全面的培训环境,实现教练机信息化战术训练,提高教练机的战术模拟训练逼真度、复杂度和训练效益,降低训练成本。应用LVC训练后,教练机结合机载嵌入式训练系统下载先进战机的任务能力,使得飞行员低成本的感知全要素的战术元素,密切衔接不同战机的需求。飞行学员可以在在不同地域的飞行模拟器上,与实装飞机联网,进行联网训

练。地面可以通过指挥控制,实时给“模拟”“实装”“虚拟”参训平台分享不同的威胁信息以及控制指令,增强联合训练的随机性和复杂性。

2.1 教练机LVC训练架构设想

教练机LVC训练基于机载的嵌入式训练系统(L)、飞行训练模拟器(V)、构造环境(C)以及空地一体化的网络,提供了一种可灵活扩展、逼真度高的模拟训练能力,架构如图2所示。

机载—机载嵌入式训练系统(L),支持“单机”或“多机”的联网,支持LVC训练。

飞行模拟器(V),模拟器使用仿真任务系统实现与实装飞机任务互操作。

构造环境(C),通过计算机程序模拟仿真生成的虚拟目标,其具有动态特性、对抗行为、智能响应,用于增强和加强真实/虚拟环境。

空地一体化网络系统—机载数据链及地面支持系统,支持实现实装飞机(L)、模拟器(V)、虚拟兵力(C)之间的互联互通。

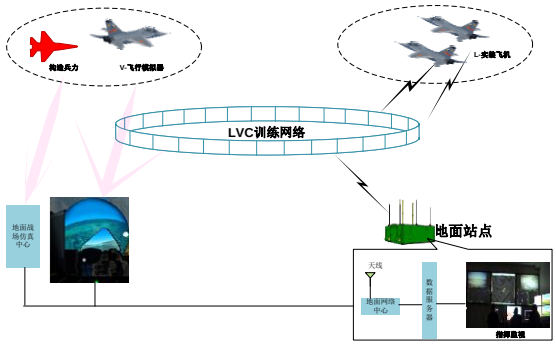

图2 教练机LVC架构设想

Fig. 2 Conceptual design of LVC architecture for trainer aircraft

2.2 教练机LVC训练技术架构

教练机LVC训练体系从技术架构层次可分为训练执行层、分布式交互层、共享资源层和终端应用层,如图3所示。

训练执行层:“实装”参训平台、“模拟器”参训平台、“虚拟兵力”参训平台通过分布式网络,构建了一个逼真的战斗训练环境。各参训平台可以感知训练环境中的威胁,了解战场的态势,并对态势进行判断和评估,确定作战方案,执行攻击。

分布式交互层:利用“实装”平台的数据链网络、地面的交互网络构成的LVC互联网络,实现训练执行层各参训平台的互联互操作,并提供实时、安全的信息传输功能。

共享资源层:采集数据,提供数据处理分析、管理、记录备份等功能。

终端应用层主要给各参训人员提供了训练任务想定、训练态势展示、训练及网络状态监控、训练控制等终端应用功能。

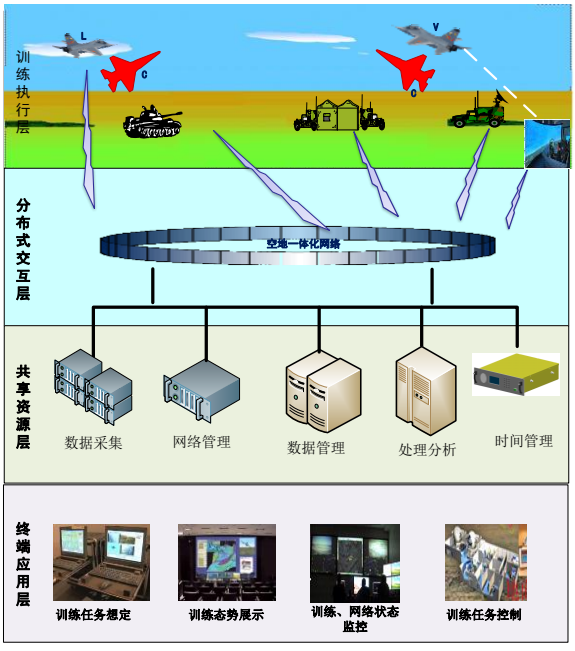

图3 教练机LVC训练技术架构

Fig. 3 Trainer aircraft LVC training technology architecture

2.3 教练机LVC训练关键元素分析

通过分析训练内容,对教练机LVC训练过程中所需的战术训练环境、战术训练要素等进行分析,主要包括:

1) LVC联合训练任务想定

在飞行员战术训练过程中,根据学员训练需要,进行联合训练任务想定,规划LVC训练的对抗规模、各节点的阵营、对抗场景以及各节点虚拟模型的配置,如虚拟外挂构型、传感器性能等。任务设定后,可通过以太网络将任务分发给各地面节点以及实装飞机的任务规划系统。

2) 机模一致的虚拟传感器模型

实装飞机与模拟器在LVC对抗训练中应采用一致的虚拟传感器模型。构建机模一致的威胁感知能力,解决实装飞机与模拟器在战术对抗中,实装传感器无法感知虚拟威胁问题,降低实体飞机

与模拟器互联的改动成本以及技术难度。构建教练机LVC训练需要的机模一致的传感器模型,应梳理机载火控雷达、电抗等传感器系统的性能,构建满足部队训练需要的传感器模型,建立标准的通讯接口,输出战术态势信息,通过人机交互装置,飞行员可以感知并操控传感器,达到培养其良好的战术素养的训练目的。

3) 机模一致的虚拟武器及攻击管理模型

实装飞机与模拟器在LVC对抗训练中应采用一致的武器仿真及攻击管理模型。通过机模一致的攻击能力,构建实装对抗,实装对模拟器,实装、模拟器、虚拟兵力混合对抗时公平的对抗环境。

4) 构造兵力模型

构造兵力模型是实现LVC训练的关键,其逼真度也是检验LVC训练效能的重要因素,需要结合训练场景需求,开展战法研究,构建相关模型。

5) 训练讲评及监视环境

能够通过二维、三维场景,实时或者事后情况下,对教练机LVC训练体系中各训练节点的飞行姿态、武器状态、传感器状态以及训练中关键事件等进行展示。

3　教练机LVC训练技术原理验证

3.1　原理验证环境简介

教练机LVC训练技术原理验证环境主要由实装平台仿真设备、模拟平台仿真设备、网络交换机组成,用于仿真LVC训练中的飞机要素、模拟器要素和网络要素。其中实装平台仿真设备用于仿真实装飞机,包括飞行仿真模块、任务模型仿真、嵌训仿真等。模拟平台仿真设备用于仿真LVC训练中的模拟器元素,采用与模拟器一致的输出接口。模拟平台仿真设备通过网络交换机可以与实装平台仿真设备交互。数据链是实现LVC训练中空中节点与地面训练节点互联的关键元素,网络交换机模拟飞行与模拟器之间的数据链网络,传输的消息内容、消息格式、传输周期等与数据链内容一致。模拟实装飞机与模拟器之间的信息交互。

3.2　工作原理

教练机LVC训练技术原理验证环境的交联关系如图4所示。

实装平台仿真设备配置了与机载一致的任务仿真模块(包含显控、任务、嵌训等仿真)、飞行仿真模块以及飞行操纵仿真装置等。嵌训模块具备虚拟传感器和武器功能,显控及任务仿真提供与机载一致的显示界面。试验操作人员通过仿真的操纵装置控制飞行仿真模块,以仿真飞机的飞行姿态数据,通过仿真的操控装置以及逼真的显示界面,操控虚拟传感器以及武器进行对抗训练,实现实装飞机与构造兵力、实装飞机与模拟器的对抗功能原理验证。

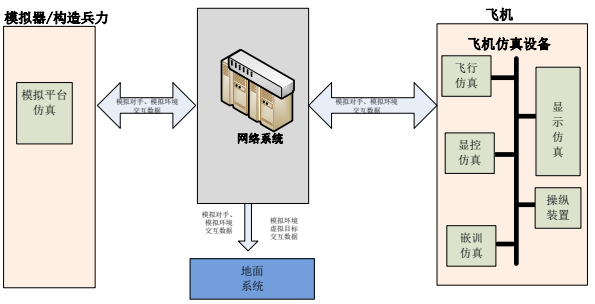

图4　教练机LVC训练验证工作原理

Fig. 4　Working principle of LVC training verification for trainer aircraft

实装平台仿真设备可以通过网络系统与模拟平台仿真设备进行数据交互,包括各自的位置姿态、战术状态等信息。

模拟平台仿真设备启动后,软件按照规划的参数运行,通过网络系统实时接收实装平台仿真设备发送的位置、姿态以及相关战术通告信息。生成的虚拟威胁具备一定程度的被动防御以及主动攻击能力。模拟平台仿真设备能够将实时产生的模拟对手信息通过网络系统发送给实装平台仿真设备,通过网络系统与实装平台仿真设备互联互操作。

3.3　原理验证结论

通过试验,完成了实装飞机与构造兵力、实装飞机与模拟器1对1的空战对抗训练仿真,验证了实装飞机平台与模拟器之间的通讯协议的合理性、交互逻辑的正确性,为教练机LVC训练技术的发展提供了理论支撑。

4　结　论

1) 本文提出一种适用于教练机LVC训练的

系统架构，该架构可以将实装教练机、构造兵力、飞行模拟器互联在同一个战场环境内，支持用户开展战术对抗训练。

2）本文采用仿真技术，搭建了教练机LVC训练中的各个训练节点，验证了教练机LVC系统架构各部分的交互逻辑，为教练机LVC训练技术的实际应用提供了技术支撑。

参 考 文 献

[1] 张昱，张明智，胡晓峰．面向LVC训练的多系统互联技术综述[J]．系统仿真学报，2013，25(11)：2515-2521.
ZHANG Yu，ZHANG Mingzhi，HU Xiaofeng. On multi-system integration technology oriented to LVC training[J]. Journal of System Simulation，2013，25(11)：2515-2521.(in Chinese)

[2] 白爽，洪俊．美军面向LVC联合训练的技术发展[J]．指挥控制与仿真，2020，42(5)：135-140.
BAI Shuang，HONG Jun. Development of U. S. LVC joint training technology[J]. Command Control & Simulation，2020，42(5)：135-140.(in Chinese)

[3] 候梦清，郝嘉，周九州．美军典型空战训练系统发展及关键技术研究[J]．火力与指挥控制，2023，48(6)：162-168.
HOU Mengqing，HAO Jia，ZHOU Jiuzhou. Research on the key technologies and development of US typical air combat training system[J]. Fire Control & Command Control，2023，48(6)：162-168.(in Chinese)

[4] 何晓骁．美空军新训练概念将大幅压缩飞行员培养周期[N]．中国航空报，2020-10-27(10).
HE Xiaoxiao. The U. S. Air Force′s new training concept will significantly shorten the pilot training cycle[N]. China Aviation News，2020-10-27(10).(in Chinese)

[5] GAO Y，ZHANG Y Y，ZHOU X G，et al. Overview of simulation architectures supporting live virtual constructive (LVC) integrated training[C]// 2021 6th International Conference on Control，Robotics and Cybernetics (CRC). Shanghai：IEEE，2021：333-338.

[6] 周进登，宋健，刘影，等．美军LVC建设梳理及对我军仿真建设的启发[J]．网信军民融合，2020(8)：45-48.
ZHOU Jindeng，SONG Jian，LIU Ying，et al. Overview of U. S. Military LVC development and its implications for PLA simulation construction[J]. Civil-Military Integration on Cyberspace，2020(8)：45-48.(in Chinese)

[7] 杨芸，胡建军，李京伟．LVC训练体系建设发展现状及关键技术[J]．兵工自动化，2023，42(1)：4-15.
YANG Yun，HU Jianjun，LI Jingwei. Development status and key techniques of LVC training system[J]. Ordnance Industry Automation，2023，42(1)：4-15.(in Chinese)

[8] 何晓骁，王秉涵．美军“实况—虚拟—构造”仿真技术发展及应用研究[J]．航空兵器，2021，28(6)：14-18.
HE Xiaoxiao，WANG Binghan. Research on development and application of LVC simulation technology in US[J]. Aero Weaponry，2021，28(6)：14-18.(in Chinese)

[9] 何晓骁．下一代吊舱的演训试用标志空战训练迈入虚实结合时代[N]．中国航空报，2021-12-07(9).
HE Xiaoxiao. The trial use of next-generation pods marks the entry of air combat training into an era of virtual-physical integration[J]. China Aviation News，2021-12-07(9).(in Chinese)

[10] 刘怡静，李华莹，刘然，等．LVC空战演训系统发展研究[J]．飞航导弹，2020(12)：55-60，77.
LIU Yijing，LI Huaying，LIU Ran，et al. Reasearch on the development of LVC air combat training system[J]. Aerodynamic Missile Journal，2020(12)：55-60，77.(in Chinese)

[11] BOND J. Tactical combat training system increment II[EB/OL]. (2020-04-15)[2025-05-09]. https：//www. collinsaerospace. com/-/media/project/collinsaerospace/collinsaerospace-website/product-assets/marketing/t/tcts-ii/tct-sii-brochure. pdf.

[12] TAYLOR W P. P6 combat training system[EB/OL]. [2025-05-09]. https：//www. collinsaerospace. com/-/media/project/collinsaerospace/collinsarospace-website/product-assets/markeing/p/p6-ms-broc hure. pdf.

[13] 邹清亮，李晨正，赵云．基于LVC技术的空基指控训练模式研究[J]．飞机设计，2025，45(1)：67-70.
ZOU Qingliang，LI Chenzheng，ZHAO Yun. Research on air-based control training mode based on LVC technology[J]. Aircraft Design，2025，45(1)：67-70.(in Chinese)

[14] 杨科，王刚，姚小强，等．防空反导LVC联合训练体系构建方法研究[J]．军事运筹与评估，2024，38(6)：69-74.
YANG Ke，WANG Gang，YAO Xiaoqiang，et al. A study on the construction method of joint training system for air defense and anti-missile based on LVC[J]. Military Operations Research and Assessments，2024，38(6)：69-74.(in Chinese)

[15] 李维，刘纯．教练机机载逼真战术训练技术应用研究[C]// 第六届中国航空科学技术大会．嘉兴：中国航空学会，2023：893-900.
LI Wei，LIU Chun. Research on the application of airborne realistic tactical training techniques for trainer aircraft[C]// The 6th China Aeronautical Science and Technology Conference. Jiaxing：Chinese Society of Aeronautics and Astronautics，2023：893-900.(in Chinese)

（编辑：马文静）