

【专题：创新设计赋能国防装备】

步枪工业设计研究综述

张帆, 朱特, 朵英贤
(北京理工大学, 北京 100081)

摘要: **目的** 探索步枪系统中工业设计的影响因素、设计方法和评价方法, 协助枪械设计师通过工业设计方法, 处理步枪系统毁伤威力、适用性、可靠性与人的能力之间的博弈关系。**方法** 以步枪“弹—枪—人”系统的发展演变历程为历史基础, 总结提出了步枪“弹—枪—人”动力学系统与“人—机—环”工业设计系统之间的关系; 结合国内外武器系统作战效能评价方法, 总结工业设计在战略层、战区层、战斗层、系统层和性能层 5 个层次中对步枪作战效能的影响关系; 探讨现代步枪设计中的工业设计方法, 总结出枪械结构、零件材质、加工工艺、人机工效 4 个方面的步枪系统作战效能设计优化方法。**结论** 在现代化、信息化、体系化战争背景之下, 步枪系统与人的能力之间的博弈关系会继续存在, 并且两者之间的矛盾会愈加强烈, 需要设计师通过工业设计的理念和方法对步枪系统进行整体优化, 在向人能力妥协的同时, 满足战争对步枪系统毁伤威力、可靠性、适用性的需求。

关键词: 步枪设计; 工业设计; 武器系统作战效能; 评价方法; 人机工效; 设计方法

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)20-0001-28

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.20.001

The Review on Rifle Industrial Design Research

ZHANG Fan, ZHU Te, DUO Ying-xian
(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: Explore the influencing factors, design methods and evaluation methods of industrial design in the rifle system, and assist firearm designers to deal with the game relationship between the damage power, applicability, reliability and human ability of the rifle system through industrial design methods. Based on the historical basis of the development and evolution of the rifle “bullet-gun-person” system, the relationship between the “bullet-gun-person” dynamics system of the rifle and the “person-machine-ring” industrial design system was summarized and proposed. Combining domestic and foreign weapon system combat effectiveness evaluation methods, summarizing the impact of industrial design on rifle combat effectiveness in five levels: strategic level, theater level, combat level, system level, and performance level; discussed industrial design in modern rifle design methods, summarized and put forward the design optimization method of rifle system combat efficiency from four aspects: firearm structure, parts material, processing technology, ergonomics. Under the background of modernization, informatization, and systematic warfare, the game relationship between the rifle system and human capabilities will continue to exist, and the contradiction will become more intense. It is necessary for designers to use the concepts and methods of industrial design to carry out the rifle system. The overall optimization, while compromising the ability of people, satisfies the war’s demand for the damage power, reliability, and applicability of the rifle system.

KEY WORDS: rifle design; industrial design; weapon system combat effectiveness; evaluation method; ergonomics; design method

收稿日期: 2021-07-20

作者简介: 张帆 (1974—), 男, 上海人, 博士, 北京理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为设计美学、创意方法学、文化遗产保护及利用等。

通信作者: 朵英贤 (1932—), 男, 甘肃人, 中国工程院院士, 北京理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为武器系统分析与总体设计、武器智能化、武器动力学等。

国际上“步枪”是指利用火药燃气能量发射弹丸、口径小于 20 mm 的长身管射击武器,以发射枪弹、打击无防护或弱防护的有生目标为主,是单兵的主要武器装备^[1]。步枪系统作战效能是指枪械完成预定作战任务能力的大小^[2-3]。枪械是典型的“形式追随功能”式产品,第二次世界大战前的枪械设计师并没有对步枪的工业设计有专门的研究,各国一直致力于提高枪的射击精度和杀伤威力^[4]。第二次世界大战期间,美、英、德等国家只注重大威力、高性能武器的研究,忽略了“人的因素”,导致机器性能与人的能力之间出现了很多矛盾,实战中达不到预期的作战效能。于是,战后武器设计师们逐渐从“人适应机器”的设计思维转变为“机器迁就人”的设计理念。同时,战后工业设计的日渐发展和成熟也给枪械设计中如何处理人和枪械之间的关系提供了新的解决思路。本文尝试对步枪作战效能评估中的工业设计相关因素进行溯源和分析,通过工业设计过程中处理人和产品之间关系的多维分析方法,总结枪械设计中的工业设计相关影响因素和设计方法。

1 步枪系统中的工业设计

95 式步枪总设计师朵英贤院士曾多次提到步枪的研制难度很大,用数学语言来讲,对一个多目标函数,在约束的众多条件下,有可能无解^[5]。造成“轻武器不轻”的主要原因除了装备范围广、数量多、使用环境复杂恶劣、可靠性要求高之外,还受到士兵生理条件等不确定因素的种种限制^[6]。轻武器设计理念的变化实质上是“弹—枪—人”系统和“人—机—环”工业设计系统两者关系的发展演变过程,也是一个枪械本身不断向人体能力限制妥协的过程^[7]。

1.1 枪械设计理念的发展演变

第二次世界大战前,受人力、设计经验和计算设备的限制,为了降低枪械设计时需要考虑的变量数量,简化枪械设计的复杂程度,早先的枪械设计师们只是单纯地将枪械设计抽象化为“弹药—枪械”的二元刚体力学模型^[8-10]。虽然这种力学模型抽象简化的方法降低了设计时的力学计算难度,但是完全没有将射手的变量和生理素质限制条件考虑在其中,依据此类力学模型推断,只要弹药的威力足够大,枪械的锁闭机构足够稳固,枪管内弹头充分加速,便有不错的毁伤威力。各国早期全威力步枪的设计便是由此力学模型设计而来,例如经典的毛瑟系列栓动式步枪、苏联的莫辛—纳甘式步枪、英国的李—恩菲尔德式步枪、美国的春田式步枪等。如何处理枪械与人相关的工业设计相关影响因素,更多的是凭借枪械设计师数十年来工作中积累的经验 and 设计过程中的灵光一现,第二次世界大战期间各国主要装备的栓动步枪,几乎相同的枪托结构设计和机械式瞄准具,便是枪械工业



图 1 第二次世界大战基本一致的各型栓动步枪结构
Fig.1 The basically same structure of bolted rifles in WW II



图 2 全威力弹 (7.92 mm×57.00 mm) 和
中间威力弹 (7.92 mm×33.00 mm)
Fig.2 Full power bullet (7.92 mm×57.00 mm) and
intermediate cartridge (7.92 mm×33.00 mm)

设计经验的传承与发展,见图 1。

在战争中,各国发现虽然全威力弹射程远、威力大、弹道平直,但是过大的后坐力反而降低了射击的精度,较重的弹药质量影响了士兵携带的弹药数量,较长的枪身不利于灵活机动,加之栓动式步枪射击间隔长,影响了火力的持续性和综合毁伤效能^[4,7]。

随着第二次世界大战中各国部队机械化程度的提高,双方交战距离相较第一次世界大战的堑壕战大大缩短,全威力弹威力过剩和火力持续性不足的问题逐渐突出,这促进了中间威力弹的发明和成熟^[8,10]。第二次世界大战中德国诞生了首支使用中间威力弹的突击步枪 stg-44,其凭借优良的可靠性、较好的毁伤威力、持续的火力密度,使得战场上出现了交战双方士兵都喜爱使用这支步枪的情况^[11]。这支突击步枪也直接启发了著名枪械设计师卡拉什尼科夫,设计出历经数十载依旧遍布全世界的著名枪械 AK-47 突击步枪。中间威力弹步枪也经过了第二次世界大战和之后数次局部战争的严酷检验,时至今日依然活跃在世界轻武器家族中^[12]。AK-47 等中间威力弹步枪在世界范围的广泛采用中,也逐渐暴露出了连射速度与连射精度、质量与备弹数量、操作便捷程度等之间的矛盾和问题^[13]。这些问题都是“弹—枪”二元刚体动力学模型不能解决的。全威力弹和中间威力弹,见图 2。

在这样的时代背景下,各国枪械设计师们逐渐将人体考虑进枪械力学模型的变量因素中,形成了早期的“弹—枪—人”动力学模型。20 世纪 50 年代,苏

联邦罗夫教授针对自动武器的稳定性进行了研究^[14]。1975 年美国岩岛兵工厂的 HUTCHINGS T D 和 RAHE A E 针对立姿握持人体射击进行了研究^[15], 提出了人枪系统相互作用的 2 刚体 3 自由度力学模型, 该模型考虑了武器后坐、上扬和人体俯仰 3 个自由度方向上人枪系统的运动响应, 但是忽略了射击时人枪系统左右和侧向的自由度。20 世纪 80 年代, 英国皇家兵工厂的 NEWMAN A R 等人针对轻武器射击精度进行了研究^[16], 分析了人体肩部运动对射击的影响。朵英贤院士提出了通过时域、频域中的参数识别和模态综合方法, 优化小口径步枪频射的方法^[17]。包建东等人通过模态识别, 对连发射击人枪系统的机械导纳提出了测量分析方法^[18]。在此类模型中, 人被看作是一个单一刚体元素, 弹药和枪械之间的力经由枪托传递给射手, 射手保障射击时的稳定性。人的生理条件给枪的结构、质量、后坐力等性能提出限制, 在枪械单发和连发的过程中, 如何提高连发速度、降低后坐力的大小, 或延长作用力的作用时间、减小冲量, 同时保证单发和连发的精确度, 成了枪械设计师们的新课题。在此力学模型的设计理念下, 设计师们不断探索新的自动步枪设计方案和可能性。在保证射击质量的前提下, 不断追求提高射击火力密度。

理想的枪械射击平台是一个稳固的不动刚体, 而人体并不是一个很好的枪械射击固定平台, 它由多个可活动的关节和复杂的肌肉组织构成, 射击时的后坐力和质心变化会使人体产生各种细微活动变化, 尤其在连发状态下, 人体的变化会逐发叠加, 进而影响整个“弹—枪—人”系统的稳定性^[19]。随着现代人机工程学和计算机辅助设计技术的逐步发展, 主观的人体心理影响和生理因素被测试构建为数字模型^[20], 客观的人体测量学和标准的人体模型被逐渐应用于枪械设计过程, 人体被更详细地抽象为复杂多关节刚体模型^[21-24], 这种更细致的动力学模型为枪械在不同射击情境下提供了详细的变化过程分析。王茂林建立了卧姿射击人枪系统的 8 自由度等效参数动力学模型。该模型考虑了武器自动机碰撞和射手肩部反作用力的影响, 具有一定的参考价值^[25]。宋杰等人建立了 19 刚体、52 自由度的人体模型, 用以人枪系统建模仿真^[26]。人枪系统方面, 成志方^[27]、蔡周斌^[28]、党建滨^[29]、李永新^[30]和宫鹏涵^[31]等人对某型突击步枪射击过程中的人枪系统进行了一系列理论分析和实验研究。针对立姿、跪姿和卧姿等种射击情形下的人枪系统建立了不同形式的动力学模型, 并且采用高速摄影方法和加速度传感器测量了射击过程中人枪系统的运动响应, 用自制的应变型为传感器测量了人枪系统间的部分相互作用力, 获得了大量有价值的测量结果^[32]。在人体生物力学的研究方面, HUSTON R L 等人将人体作为多刚体模型对其响应进行了分析和讨论^[33]。Truyen E 等人建立了美国、欧洲和亚洲人的

设计人体模型^[34]。另外, PANJABI M 等人提出了著名的“脊柱稳定性模型”, 指出了影响脊柱稳定性的 3 个主要因素^[35]。在仿真模型方面, KITAZAKI S^[36]和 BELYTSCHKO T^[37]提出了一种人体生物动力学模型的简化思路, 利用该思路建立的人体脊柱简化模型, 可通过仿真计算获得可靠的人体动力学响应。杨洋、王亚平等建立了人—枪肌肉骨骼模型, 并提出了逆向仿真方法^[38]。苑大威^[39]和李峰^[40]对轻武器虚拟样机的有效性和协同并行仿真进行了设计。在更全面的“弹—枪—人”动力学模型指导下, 步枪开始被要求设计得更加轻便、简洁、易于操控, 在确保结构优化的前提下, 更符合人的使用习惯, 由此枪械的工业设计被逐渐重视。

在越南战争中, 由于美军装备的 M-14 步枪在战争初期与越军装备的 AK-47 步枪对抗时火力和适用性的糟糕的表现, 美军情急之下选调了 M-16 小口径步枪作为新的单兵制式武器。这支步枪使用 5.56 mm 小口径弹药, 在战争中小口径弹药具有质量轻、后坐小、初速高、后效好的特点, 使其在士兵携弹量、火力密度、精准度和停止效应上都有较大的提升^[41-42]。在工业设计上, M-16 步枪只有枪管、自动机等重点部件采用钢制零件, 其余部件采用更轻便的材料, 如机匣采用铝合金, 护木和枪托采用高分子复合材料, 因此整枪的质量大幅降低, 有效降低了单兵负荷。结构上由于缓冲复进机构向后伸出, 使其枪托抵肩点和枪管轴线共线, 降低了射击时向上翻转的力矩, 无形中在人机工效上提高了连发射击时的精确度和稳定性^[43-44]。虽然 M-16 步枪在越战初期的沼泽雨林环境中暴露出了各种各样的可靠性、维护性问题, 但是在后续的改变更新中这些问题被逐渐克服^[45]。M-16 作为首支被大量投入实战的小口径弹药突击步枪, 开启了全球步枪小口径化风潮, 其在工业设计和人机工效上的成果也对之后的轻武器发展产生了深远影响^[46]。

进入 21 世纪后, 战争的模式逐渐由大规模的机械化野战转变为小规模的信息战局部战争, 日益频繁的反恐作战冲突促使步枪的设计理念发生了变化^[47-50]。新战场环境下, 以小规模遭遇战为主, 敌我双方交战距离缩短近 100 m 之内, 战斗中对士兵的射击要求变为“绝对快、相对准”, 强调先敌开火、先敌命中^[51-52]。这就要求步枪设计时, 需要具备能从携行状态快速切换到战斗状态, 便于快速据枪瞄准射击, 更加轻便短小易于使用, 火力密度更高的功能^[53]。另一方面, 单兵个人防护装具的防护性能不断提升, 随着价格的逐渐降低普及率越来越高^[54-55], 小口径弹药中远距离对防弹衣等装备侵彻力不足的问题愈发明显, 这导致中间威力弹又被各国逐渐重视^[56]。对步枪的功能性要求越来越多, 对弹药的口径和侵彻力要求越来越高, 对质量控制和易用性的要求越来越严格^[57-63]。步枪的威力、质量、备弹量、易用性等问题杂糅在一起, 使“弹

“一枪一人”系统变成了一个约束众多的多目标函数,促进了工业设计更加深入的参与到步枪系统的整体设计中,成为了处理步枪系统设计中“人—机—环”众多博弈关系的评价和解决途径。石学海^[64]、方峻^[65]、胡良明^[66]等人提出了基于决策支持理论和 CBR 框架原型的枪械产品设计资源重用方法,协助枪械设计师们全面、高效利用枪械的设计经验。刘国庆等人采用实验与数值计算相结合的方法,基于非线性有限元理论,将稳健设计思想应用于弹/枪参数匹配设计方法中,形成了一套可行的狙击步枪弹/枪参数匹配设计理论方法^[67]。王亚平^[68]、刘岩^[69]等人结合工业设计相关指标建立了新的人枪系统模型。韩国的 LEE J H 等人对自动武器后坐力进行了研究,提出了新型测试方法并分析了武器后坐力对射手的影响^[70]。

在新的战场环境要求下,枪械设计师意识到人体对稳定态的突然变化有或长或短的反应时间,疲劳、情绪、伤病等因素更会大幅增加这个射击平台的不确定性,因此在实际使用过程中人体模型是实时运动变化的,不能简单通过理想化的人体骨骼力学模型进行分析。这促使枪械设计思考模式的逐渐转变,分析射击过程中“弹—枪—人”模型系统如何被破坏,并通过人的控制能力进行恢复修正^[4,7]。其中,“弹—枪—人”力学模型用于确保系统的威力和可靠性,通过工业设计“人—机—环”的研究和设计方法,优化枪械使用中的使用效率和易用性。陈晓等人建立了士兵系统人机工效模拟仿模型^[71]。王永娟等人分析了点射模式下人枪系统的响应特性^[72]。王缘等人基于典型步枪人枪作用特性,对人—枪骨骼肌肉动力学模型进行逆向动力学求解,获得了点射中人体运动和动力学响应数据,揭示了后坐力在人体中传导与变化的规律^[73-74]。金鑫等人明确了连射工况下人体参数的辨识方法^[75]。WEI Z 等人通过动作捕捉和足底测量,重建了连射情况下人体恢复人枪系统的过程^[76]。陈强华^[77]和刘依华^[78]构建了轻武器动力学一体化模型和弹药毁伤一体化模型,简化了设计阶段的虚拟仿真过程。在新的步枪系统设计理念的指引下,设计师们通过枪族化和模块化等设计方式,在战略、战役、战术、战斗、参数等多层面,实现了步枪系统的作战效能充分提高。现代步枪设计中“人—机—环”系统与“弹—枪—人”关系见图 3。

纵观“弹—枪—人”系统的发展演变历程,步枪设计理念受战争模式、战场环境、射手能力、技术能力 4 方面因素的制约和促进。枪械设计理念和方法的演变是一个一直在向人的能力妥协和适应的过程。枪械的工业设计从初期的很少被考虑到现在成为了重要的设计组成部分,甚至改变了步枪的形态,成为了步枪作战效能的倍增器。

1.2 枪械系统作战效能与工业设计

影响枪械系统作战效能的因素很多,主要包括可

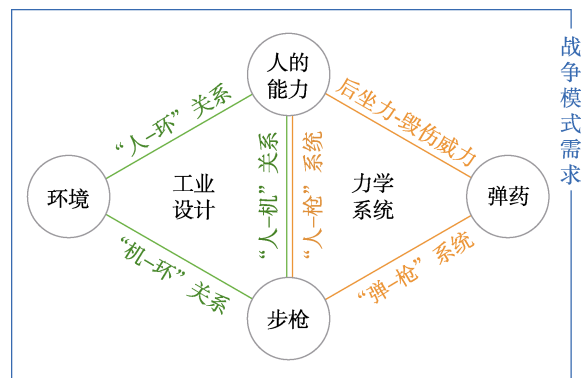


图 3 现代步枪设计中“人—机—环”系统与“弹—枪—人”关系

Fig.3 The relationship between “person-machine-ring” system and “bullet-gun-person” in modern rifle design

用性、可信赖性、射击效能、毁伤效能、火力效能、机动效能、防护效能等,以及作战过程中的战术、地形、气候条件和参战人员因素。因此枪械“毁伤威力—可靠性—易用性”三者之间的关系直接影响枪械作战效能。其中枪械的工业设计优劣直接影响了其“可靠性”与“易用性”的好坏。在世界范围内,很长时间内传统的枪械设计观念一直将工业设计错误等同于美工的艺术设计,将枪械的质量、尺寸、功能、人机工效等因素孤立开,从力学和机械角度进行设计与取舍,在各个因素的互相博弈中并没有认识到工业设计为提高枪械作战效能带来的积极作用^[79-86]。

工业设计研究功能和形式,以及产品、用户和环境之间的联系^[87]。2015 年在韩国光州举行的第 29 届国际工业设计大会上,专业实践委员会公布了工业设计的新定义——工业设计是一个战略性的问题解决过程,它通过创新的产品、系统、服务和体验推动创新、建立业务成功并带来更好的生活质量。工业设计弥补了什么是什么和什么是可能之间的差距。这是一个跨学科的职业,它利用创造力解决问题并共同创造解决方案,以制造产品为目的,使系统、服务、体验或业务变得更好。从本质上讲,工业设计通过将问题重新定义作为机遇,提供了一种更乐观的看待未来的方式。它将创新、技术、研究、商业和客户联系起来,在经济、社会和环境领域提供新的价值和竞争优势。工业设计师将人置于流程的中心,通过同理心深入了解用户需求,并以务实且以用户为中心的理念解决问题,提升产品、系统、服务和体验。工业设计师是创新过程中的战略利益相关者,具有独特的优势,可以将不同的专业学科和商业利益联系起来。他们重视经济,他们的工作对社会和环境产生影响,他们对共同创造更好的生活质量具有突出贡献^[88]。枪械设计可以利用工业设计中指定的产品特性,可能包括物体的整体形式、细节相互之间的位置、颜色、质地、形式,以及与产品使用相关的方法来优化枪械的设计。此外,工业设计师可能会指定有关生产过程、材料选择

和使用方式等方面的内容。在枪械开发过程中工业设计师的参与可以通过提高可用性、降低生产成本和开发更优异的整体性能提升枪械的综合作战效能。枪械工业设计也可能侧重技术概念、产品和流程,用于探索和预研新装备。除美学、可用性和人体工程学外,它还可以包括枪械的工程性、实用性、应用场景和其他问题,如心理学、用户射击体验和用户使用全过程的情感波动等^[89]。

现代枪械设计过程中,新的战争形势导致了不同于过去的战场环境与战斗方式,对人和兵器的设计、使用、评价都提出了跨越式要求。将传统“弹—枪—人”系统设计方法与处理“人—机—环”关系的工业设计方法融合,在使用实践中持续通过工业设计对枪械进行系统优化的方式,已经成为了各国现代步枪设计中公认的规范化设计方法与流程。德国 HK 公司、意大利伯莱塔公司、美国柯尔特公司等世界先进枪械设计机构,先后设立了专门的工业设计部门,或在项目组中加入工业设计相关人员优化枪械设计。我国在 95 式步枪设计过程中,朵英贤院士团队开始注重将工业设计的方法和理念用于提高枪械的人机工效^[90],并在该步枪改进中,通过改善人机工效获得了很好的 95-1 式改进成果^[91]。在此之后的新枪族设计过程中,设计团队更是充分利用工业设计的相关思想与方法,实现了我国的轻武器设计优化的大幅度发展。朵英贤院士测试 95 式突击步枪见图 4。95 式与 95-1 式突击步枪改进对比见图 5。



图 4 朵英贤院士测试 95 式突击步枪

Fig.4 Academician Duo Ying-xian tests Type 95 assault rifle



图 5 95 式与 95-1 式突击步枪改进对比

Fig.5 Improved comparison of Type 95 and Type 95-1 assault rifles

2 步枪系统作战效能评价方法与工业设计

2.1 步枪系统作战效能的定义

关于武器的作战效能,由于工业设计难以量化评价,所以各国标准并没有在其中对工业设计指标进行明确,但是步枪工业设计的相关影响指标渗透在各个层面的指标评价体系之中^[92]。由于不同国家、不同部门的研究侧重不同,所以对作战效能的理解也存在较大的差异,到目前为止并没有完全统一,比较典型的定义如下:(1)在规定条件下使用系统时,系统在规定时间内满足作战要求的概率(美国航空无线电研究公司^[93]);(2)系统能在规定的条件和规定的时间内完成规定的任务之程度的指标或系统在规定条件和规定时间内满足作战需要的概率(美国海军^[94]);(3)预期一个系统能满足一组特定任务要求的程度度量,是系统可用性、可信赖性和能力的函数(美国工业界武器效能咨询委员会 WSEIAC^[95-96]);(4)系统与使命的匹配程度(美国 MIT 的 LEVIS A H 等人在评价 C³I(指挥、控制、通信及性能)时的定义^[97-99])。

从已经掌握的资料和案例来看,美国工业界武器效能咨询委员会和 MIT 的定义得到了业内人士的普遍认可和应用。为了分析和研究步枪系统的作战效能,设计研究人员必须了解作战任务的层次结构,以及整个武器系统作战效能的层次结构。通常情况下,现代步枪系统作战效能可以分为以下 5 个层次^[38]:战略层效能指标——资源消耗率;战役战区作战效能层指标——毁伤率和保障能力;战术效能层(格斗层)指标——损耗交换比;武器系统单项效能层(系统层)指标——由可用性(Availability)、可信赖性(Dependability)和能力(Capacity)3 大要素组成 ADC 效能指标或射击效率;武器子系统效能层(性能层)——步枪的性能指标。

其中,战略层和战役战区层是各兵种联合作战进行的效能评价,因此,对于步枪系统的作战效能评价主要在格斗层、系统效能层和性能层进行。步枪系统作战效能评估体系指标从性能层、系统层和格斗层角度建立了枪械系统效能的指标体系。步枪系统性能层是进行武器系统作战效能分析的基础,系统层是单项指标测试结果的评价结果,格斗层是依托性能层和系统层能力在实战中综合表现的结果。步枪的工业设计因素不只体现在性能层的单一参数上,其人机工效和用户体验等也会直接影响用户学习、使用的过程,甚至是整体战争中的资源消耗与生产力占用率。因此步枪工业设计指标穿插交融在 5 个层面的不同环节中,对每个层次的评价都起到不同的影响作用,工业设计优劣指标在 5 个层次,尤其是后 3 个层次中占有重要比重。步枪系统工业设计对作战效能评价的影响见图 6。

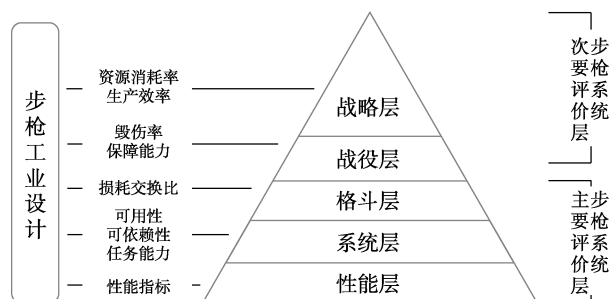


图 6 步枪系统工业设计对作战效能评价的影响

Fig.6 The influence of rifle system industrial design and combat effectiveness evaluation

2.2 性能层

在性能层中,只考察枪械本身的性能参数,枪械的工业设计主要体现在对“人—机”“机—环”之间二元关系的影响。枪械的结构和布局决定了其战场环境的最大适用范围,超越了这个范围便需要使用其他武器进行替代。枪械的结构和布局,尤其是人机外形、自动结构、材质等是直接影响士兵评价枪械工业设计和用户体验的重要因素。我国很早就提出了系统测试枪械性能层参数方法,1998 年董高庆就搭建了基于 VXI 总线的轻武器综合测试系统^[100]。咎博勋等人评测了人枪系统参数对射击精度的影响^[101]。楼俐等人系统论述了灰色系统理论及量化分析方法在枪械设计方案评价选择中的应用,为步枪设计方案阶段优化性能层指标提出了客观可行的评价方法^[102]。高建等人提出了基于 AHP 的轻武器维修保障能力评估办法,可用于系统量化的评价枪械系统的维护保障指标^[103]。赵炜霞^[104]、汪传忠^[105]等人通过小子样实验测试枪械产品的可靠性指标。白俊敏^[106]、张涛^[107]等人依据测试指标统计概率建立了轻武器可靠性模型,预测枪械产品故障率变化。方峻进一步通过蒙特卡洛法分析了零件的可靠性^[108]。张雪辰等人提出了轻武器最佳可靠性模型的选择方法^[109]。《GJB 4559A-2008 枪械和枪弹部队试验规程》^[110]中对枪械和弹药的性能参数测试进行了细致的实验规范。

步枪利用高温、高压、高速的火药燃气发射弹药,并推动各机构完成一系列动作,它的许多主要机构动作必须在千分之几秒内完成,同时伴随着各种剧烈的撞击,机匣内运动状态过程极为恶劣,同样的动作还需要在数十万次的重复中保持稳定可靠。性能层效能指标直接利用枪械系统的性能参数进行评估,形成枪械系统实验数据的采集与处理方法。其中参数包含且不限于枪械布局结构、质量、枪械质心位置、枪械膛压、自动机构种类、自动机运动速度、弹丸初速与射频、弹性系数与粘滞阻尼系数、射击准确度与射击密集程度等^[111-112]。

质量和质心的位置是重要评价指标。现代战争中士兵需要携带的任务装备数量越来越多,但是人体负重的极限却没有随时间大幅度进步,这就要求步枪的

质量越来越轻以适应士兵综合负重分配的需求^[113]。枪械质心的位置直接影响武器射击时的控制难易程度,理论上枪械质心越靠近握把越便于控制射击稳定,YANG Y^[114]和 SELINGER J C^[115]等人的研究显示若质心靠近枪口方向,长时间使用容易造成手臂和腕部的疲劳;若质心靠近枪托方向,容易加剧射击时枪口上仰。自动机的种类和运动速度决定了步枪的射击频率、火力密度和后坐力,间接影响了步枪射击的准确程度。过大的后坐力会导致射手难以控制枪械稳定射击,降低枪械的易用性。过高的射频会过量消耗弹药,造成过早更换弹夹形成火力空缺,并且加剧坐力的射姿变化导致的叠加效应,降低枪械的易用性和射击的准确度。

2.3 系统层

系统层效能指标,一般采用射击效率评定指标、WSEIAC 模型中的 ADC 效能指标(美国工业界武器系统效能咨询委员会)和 SEA 效能指标(美国 MIT 信息与决策系统实验室)进行评估。

采用射击效率以一定条件下完成的作战任务程度来描述,主要由武器的命中概率和武器所发射的弹药在命中后的毁伤概率 2 部分组成。命中概率取决于武器的瞄准、射击精度、所对付目标的机动性;毁伤概率取决于弹药的威力和所对付目标的防御能力。评定方法考虑了枪械实际作战时的射击状况和敌对目标的特点,因此此项测试可以作为动态枪械系统作战效能的评估方法。

在使用 ADC 指标分析方法的过程中,基于美国工业界武器系统效能咨询委员会提出的 WSEIAC 模型,应用了随机过程理论的科尔莫哥洛夫前进方程,结合层次分析法和模糊综合评定法,综合分析了枪械质量、枪械长度、士兵持枪转移速度、有效射程、枪口动能、战斗射速、命中率等因素的影响,对陆军小分队的枪械系统进行了静态作战效能评估分析。并考虑了参战人员自身的影响因素,对参战人员的士气、身高、武器熟练度、作战经验等随机影响因素进行了量化处理。使得最终的评估结果能够反映枪械系统在作战过程中不同阶段的效能指标,因此定义该项方法为枪械系统静态作战效能评估方法。

SEA 方法是美国 MIT 在 20 世纪 80 年代初提出的一种系统效能分析法。它是一种综合性的评价方法,通过把系统的运行与系统要完成的使命联系起来,观察系统的运行轨迹和使命要求的轨迹在同一时空域相符合的程度,根据重合率的高低判断系统效能的高低^[116]。系统有效性分析法本来属于系统效能的分析方法,但由于分析的过程中考虑了作战双方的对抗,建立了枪械系统在对抗条件下的枪械系统效能评估模型,所以该项方法为基于 SEA 的枪械系统作战效能综合评估方法。

综上所述,系统层步枪作战效能分析是综合考虑“人—机—环”三者之间配合结果后,其满足任务需求程度的客观评价方法。枪械的工业设计因素作为性能层采集到的基础数据,在系统层间接影响着枪械系统对于任务需求的满足程度。优点在于基于测试数据的结果带入构建的模型算法中,可以非常客观地量化测试的结果,评价对比枪械“人—机—环”系统的优劣。其缺点也很明显,测试多为相对理想环境下简单任务的完成程度,与真实战场环境相去甚远,无法测评真实战场中各种因素叠加的结果。然而系统层参数评价方法依然可以有效协助设计师针对性优化枪械的工业设计,通过结果为工业设计相关因素影响度排序,尤其是对解决在借助测试数据量化处理枪械设计过程中互相博弈因素的取舍优化问题提供了途径。这为步枪设计提供了客观量化的设计评价工具。

2.4 格斗层

格斗层效能指标主要利用作战双方人员的毁伤程度来描述。一般采用虚拟仿真评估方法和实战对抗数据研究相结合的方式采集和评估。虚拟仿真方面,采用分布式交互仿真方法结合虚拟现实技术^[117],构成分布式虚拟战场环境下,对格斗层的步枪系统作战效能指标进行采集评估。实战对抗数据方面,一般采用统计法,依据实战、演习、测试获得的资料评估武器装备的作战效能。

由于其是在实战或虚拟实战的环境中进行的测试,所以格斗层效能测试是最接近实战环境体系对抗中枪械系统表现结果。其中,既有毁伤程度与交换比的量化客观评价,也包含交战双方对步枪系统的主观可靠性、易用性使用评价。同时格斗层效能评价中还可以发现射击操训方式与新武器的适应性问题^[118-123],为充分发挥新枪械作战效能提供了操训方式制定测试方法^[124-126]。吕惠文等人建立了从 4 个视角出发的多层次武器装备系统贡献率评价体系,为格斗层的评价体系建立奠定了基础^[127]。罗小明等人探索了基于复杂网络理论的武器装备体系贡献率评价方法,系统阐述了装备与装备间关联对作战效能的影响与量化评价方法^[128]。王楠等人将基于粗糙集的武器装备体系贡献度评估方法用于解决评价中指标和标准之间模糊性的问题^[129]。格斗层效能评价优点在于,可以真实立体地展现步枪系统在实战因素叠加下整体工业设计的优劣,充分展现步枪系统的普遍特性,也能展现个案或偶发特性^[130]。其缺点在于测试需要消耗的人力、物力和时间成本较高,主观和客观结果杂糅在一起,后期数据统计需要消耗大量时间,数据噪声较大、信噪比较低。

3 现代步枪的工业设计方法

现代步枪设计定型过程中,虽然各国依旧没有将

工业设计作为独立的项目进行设计考量,但是已经将工业设计的理念和方法全面吸收到了“弹—枪—人”系统设计之中,以确保在达到要求的毁伤指标同时大幅提高枪械的可用性、易用性和可信赖性。美军在新一代步枪的招标选型过程中已经对枪械的工业设计和人机工效设置了详细的考核标准,例如左右利手都可使用且能够有效兼容下一代的作战服等。具体实践中的设计优化方法总结如下。

3.1 结构的工业设计与优化

3.1.1 弹药因素

枪械设计中“弹是定心丸”,性能优异的弹药是枪械毁伤威力和可靠性的基础^[131]。一般枪械的设计流程都需要先确定使用弹药的性能指标和结构参数,再开始枪械系统的设计。其中弹药的口径、装药和弹药结构,决定了其毁伤力潜力和使用中的可靠性与易用性。其中,口径的设定和弹药结构是枪械工业设计中需要着重考虑的相关因素^[132]。

现代步枪弹药的口径可以分为 3 类:小口径弹药(6 mm 以下)、中口径弹药(6~10 mm)、大口径弹药(10 mm 以上)。弹药研究和装备经过了从全威力弹到中间威力弹再到小口径弹的发展历程。朵英贤院士总结小口径步枪弹药的优势是后座冲量约一半,直射距离加百米,枪弹质量约一半^[133]。冲量低利于优化人机工效,直射距离远说明初速高弹道更加平直,这都有利于提高命中率。质量小可以使士兵携弹量提高近一倍,同时小口径弹药由于质量轻,命中后的失稳效果好,利于增强空腔效应和停止效应^[134]。也正因为质量小,中远距离小口径弹药的终点效能相对较低,侵彻力下降较为严重。

近些年由于战争模式的改变和个人防护装备的普及,小口径弹药无法对防弹衣形成有侵彻^[135],中口径弹药又有了复兴的迹象^[136]。美国国防部下一代步兵武器招标项目中就将 6.8 mm×51.0 mm 弹药定为新一代班组武器制式弹药^[137]。并且其技术规范中要求可以在规定距离内,击穿各国装备的所有种类防弹衣。俄罗斯国防部也开始考虑测试各型中口径步枪弹药,为下一代步枪研究做准备^[138]。更大口径的弹头具有更好的终点效能,但也相对增加了弹药的质量,降低了单兵携弹总量。更大口径和更多装药增加了弹药的侵彻力,但是同时会产生更大的后坐力,降低步枪的易用性。因此各国均选择了比 7.62 mm 弹药更小的 6 mm 左右口径弹药进行测试,最终呈现出世界步枪弹药的“双 7 趋势”,即 7 mm 口径左右弹药,质量 7 g 左右,以达到威力、命中率、人机工效在射击效果最大化下的最佳匹配^[139]。

弹药结构的每次革命,都会给枪械的设计和人机工效带来前所未有的跨越^[140]。前膛枪时代,纸包装弹的发明使装弹效率相较分装弹有明显提高。金属

定装弹和后膛枪的组合,可以有效封闭步枪的后膛,提高初速和重装填速度。雷酸汞中心式发火底火的发明,提高了枪械的可靠性和易用性,奠定了现代步枪弹药的基础结构。通过弹药结构的革新,步枪射速从几分钟一发,提高到每分钟数百发,对不同气候条件的耐受性明显强化。射手的人机工效和射击体验得到了极大的提高。现在各国依然没有停止对子弹结构的创新与尝试,尤其是美国 ACR 计划先后研发测试了多头弹、箭形弹、锥膛弹、埋头弹和无壳弹等多种新结构子弹^[141],见图 7。多头弹可以提升火力密度,但不利于精确射击;箭形弹对防弹衣侵入力好,但是易受环境干扰精度差,生产工艺过于复杂^[142];锥头弹初速高弹道性能好,但加工工艺过于复杂;埋头弹可以减小弹药的尺寸方便携带,但是由于结构原因对环境的耐受性较差^[143];无壳弹可以有效降低弹药质量并极大提高射速,但是容易引起发膛温过高和误射。虽然现阶段条件下这些弹药因为各种不足导致没有被选中为制式弹药,但是它们各自具备的优势为弹药结构的进步做出了有益的探索,随着技术的发展各种不足都将被化解。

3.1.2 枪械结构布局

枪械的整体布局直接影响了枪械的内部结构和外形尺寸,现代步枪主要分为有托式和无托式 2 种布局。

无托式步枪在枪管长度一样的情况下可以有效缩短全枪的整体尺寸长度,方便搭乘机械化载具,变相降低了全枪的整体质量,缓解了士兵使用的疲劳感^[144]。RICHARD T S^[145]和 YUAN W^[146]等人的研究显示无托式步枪的质心后移,枪械质量更多集中在射手的主手,更利于单手瞄准和 CQB 时的人机工效和枪械稳定,见图 8。无托式布局由于枪体的缩短,导致瞄准基线的缩短,一定程度上影响了使用机械式瞄准时的射击精度。无托式步枪的机匣、弹夹、抛壳窗等结构都集中安置在枪械尾部的枪托内,距离射手的脸部很近,射击时如果发射药没有燃烧完全,燃气烟雾很有可能会熏烤到射手的瞄准眼。抛壳方向不稳定时灼热的弹壳容易被抛溅到射手脸上,一旦发生炸膛等意外情况,对射手的伤害会更危险。较短的枪身尺寸也不利于拼刺格斗。

有托式布局是历史最悠久、最普遍的步枪布局,发展至今已经演变出固定式枪托、折叠式枪托、伸缩式枪托 3 种子布局。固定式枪托结构简单,可靠性更好,稳固的结构和较长的射击基线也有利于保证射击的精度,枪托内宽大的空间还可以安置复进和缓冲机构,或安置枪械保养工具,缺点就是固定式枪托布局全枪的尺寸长、质量大,不方便快速机动与长时间携带。因此,设计师们创造了折叠式枪托和伸缩式枪托。2 种枪托都可以有效缩短全枪的整体长度,甚至在枪管长度一致的前提下,折叠式枪长可以比无托式布局



图 7 美国 ACR 计划中测试的新结构弹药
Fig.7 New structured cartridges tested in U.S ACR Program



图 8 无托式步枪弹夹机匣在后利于重心控制
Fig.8 Supportless rifle structure is conducive to center of gravity control

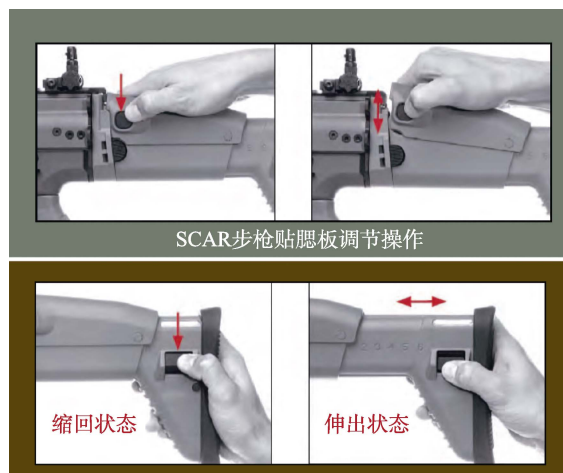


图 9 SCAR 步枪的枪托可伸缩、折叠、调节托腮板
Fig.9 SCAR rifle stock can stretch out and draw back, fold, and adjust the cheek pad

还要短。然而,折叠式和伸缩式布局结构更为复杂,并且枪托是重要的后坐力传导部件,在复杂的战场环境下,折合机构不利于保证枪械的可靠性。在遭遇战时,射手需要先展开枪托再进行射击,增加了射击前准备动作环节,行军战斗状态的转换速度慢,不利于确保快速射击和首发命中率。有托式步枪的质心更加靠近枪口方向,相对远离射手主手,不方便单手操作枪械,尤其是在枪械挂载了战术外挂设备的时候,质心前移效应会更加明显。SCAR 步枪的枪托可伸缩、折叠、调节托腮板见图 9。

虽然纵观世界军队，有托式布局占据主流地位，但是国际上公认有托式布局和无托式布局并不存在孰优孰劣和替代关系，两者的存在即是合理的。并且在未来很长的一段时间内，两者都将继续并行不悖，发挥各自的优势，成为步兵手中最基本的武器配置。

3.1.3 自动机的选择和优化

自动武器中，参与和完成自动动作，以实现连发射击的各机构的总称是自动机。自动机是自动武器的核心部分。通常从工作原理来讲，枪械自动机包括闭锁机构、供弹机构、退壳机构、击发机构、发射机构、保险机构、复进机构，枪管后坐式枪械还常有加速机构。自动机性能是步枪系统性能层参数的主要决定因素之一，现代自动武器的自动方式有后坐式、导气式、转膛式、转管式和链式 5 种。现代步枪自动机主要采用导气式和后座式 2 种自动结构。后座式可以分为枪机后座式和身管后座式，其中枪机后座式又可以分为自由枪机式和半自由枪机式；身管后座式又可以分为身管长行程后座式和身管短行程后座式。导气式可以分为吹气式、长行程活塞式、短行程活塞式、膛口集

气式 4 种自动结构。

不同自动机结构具有不同的特性，现代自动步枪常用自动机结构见表 1。通过对比可以发现，结构简单的自动机结构往往在后坐力或故障率上存在不足，后坐力小的自动机通常结构复杂或射击精度差^[147]，因此必须根据枪械的用途和弹药的种类选择适合的自动机结构，才能实现火力、可靠性、易用性三者在任务需求下的作战效能最大化。

为了实现更好的作战效能，设计师依然在现有的成果上继续创新自动机的原理和结构。郭浩然等人设计了回转体半自由枪机结构，有效缓解了半自由枪机质量转换效率低的问题^[148]。郭佼瑞等人提出了多种导气式结构的动力学仿真分析方法^[149]。王力等人构建了基于 ISIGHT 的刚柔耦合人枪系统模型，用以优化自动机结构设计，提高射击精度^[150]。胡志刚等人研究了 2 类移动自动机的动力学模型，提出了平衡射速和降级震动的方法^[151]。宫鹏涵^[152]、张小石^[153]等人，针对无托式步枪自动机进行了动力学优化仿真，提高了可靠性。导气式自动机还发展出了平衡式自动

表 1 现代自动步枪常用自动机结构
Tab.1 The structure of automata commonly used in modern rifles

自动原理	自动方式	自动结构	优点	缺点	代表枪械
后座式	枪机后座式	自由枪机式	结构简单，主要部件是枪机和复进簧	枪机较重，射击时质心变化剧烈；弹药威力越大，射速越慢；后坐力大	石帕金 1944 突击步枪（苏联）
		半自由枪机式	结构相对简单；后坐力相对减小	枪机较重，射击时质心变化剧烈；延迟后座机构结构复杂，对材质强度和加工工艺要求高	FAMAS 突击步枪（法国），G3 系列步枪、CETME-L 自动步枪(德国)
	身管后座式	身管长行程后座式	可以很大程度减缓后坐力；适合大口径大威力弹药	射速较低；枪管运动剧烈，射击精度差	杰帕德系列大口径反器材步枪（匈牙利）
		身管短行程后座式	工作可靠，尤其是闭锁机构相较其他结构更为可靠；后坐力较小；各机构工作中撞击较小，射击精度较好；通过加速机构作用，理论射速高	结构复杂,导致故障率高；加工难度高，尤其是加速器；材质强度要求高	约翰逊 M1941 半自动步枪、巴雷特 M82 系列大口径反器材步枪(美国)
	导气式	活塞式	吹气式	结构相对简单；枪机质量轻，重心变化小，后坐力小；理论射速高	火药燃气长时间直接吹入枪膛，容易积累大量火药残渣，影响机构的可靠性
长行程活塞式			结构相对简单可靠；进入气室的火药燃气量可调，复杂环境适应性好；理论射速高	枪机质量大,重心变化大；工作时撞击剧烈，后坐力大；外形尺寸大	AK 系列步枪（俄罗斯）
短行程活塞式			枪机质量相对较小，重心变化小；机构运动平缓撞击小，后坐力小；理论射速高	结构相对复杂，对加工工艺和材质要求高；结构相对精密，环境适应性略差	HK416 系列步枪(德国)
		枪口集气式	保证了子弹在枪管内时枪机闭锁的稳定性，理论上射击精度高	集气装置在枪口，容易损坏和被污物堵塞，可靠性和环境适应性差	加兰德步枪早期型号（美国）、G41 步枪（德国）



图 10 95 式枪族
Fig.10 Type 95 gun family



图 11 SCAR 模块化步枪
Fig.11 SCAR modular rifle

机,通过活塞驱动枪机和配重体反向运动实现后坐力的平衡与抵消。

3.1.4 枪族化/模块化

从时间轴上看,枪族化设计理念的诞生早于模块化设计理念。第二次世界大战期间各国为了减轻后勤保障的压力,以某款成熟枪械为基本型号,改变其枪管长度、护手尺寸、枪托样式、供弹方式等要素,使同一“弹—枪”系统在不同交战距离和环境的战斗中发挥不同的效能。枪族化设计要求步兵班内同族枪械的主要零件和弹药通用,一般枪族中包含突击步枪、短突击步枪、轻机枪和精确射手步枪 4 种枪械。枪族化设计理念在冷战时变为现实,诞生了以北约斯通纳 63 和华约 AK-74 为代表的 2 大枪族化武器^[154]。我国枪族化设计诞生了 81 式枪族和 95 式枪族^[155-156],并对枪族化设计中不同种类枪械的“人—枪”力学模型特点和工业设计方法进行了细致研究,明确了枪族化设计的优化路径^[1,2],见图 10。枪族化设计在战略层上,降低了资源的消耗率,提高了枪械的生产效率,减轻了后勤保障压力。在战役战区层上,降低了战时临时维修的难度,提高了维护修理的速度,变相保证了毁伤率的持续性^[157]。由于每种弹药只有在其身管长度和导程下才能发挥既定的威力,所以枪族化设计是面对大规模作战环境,以牺牲枪械系统性能层中的拓展性和毁伤威力为代价,换取格斗层对战场环境的适应性和战略/战役层后勤保障能力的设计理念。

随着冷战的结束,大规模战争风险大幅降低,区域冲突和反恐战争成为威胁和平的新不安定因素,特种作战和反恐作战成为主要战争模式^[158]。适应大规模作战的枪族化设计已经不能很好适应复杂多变的作战环境和非对称作战的实际情况,枪械设计师开始探索“一枪多弹多模式”的可能性,通过不同枪械和弹种之间威力和用途的互补性满足新作战模式的需求,由此诞生的模块化设计理念逐渐成为当代步枪设计主流风潮^[159]。

“一枪适配多弹种”和“不同口径快速转换”是模块化步枪的最显著特征^[154]。为突出枪械设计的整

体性和减轻作战人员负重,设计师将一支枪分成多个结构模块,通过更换不同的模块实现功能和口径的快速转换。目前世界上经典的模块化步枪设计,多采用有托式布局和上下机匣结构^[160],通常枪械系统会被分成枪管/导气系统模块、枪机模块、供弹模块和击发模块等,有的枪械还会将握把和枪托作为单独模块进行设计,以便进一步提高枪械的人机工效。同口径转换通常只需更换枪管/导气系统模块和护手模块,便可以在短突击步枪、普通突击步枪和精确射手步枪之间快速转换。异口径间转换通常还需要更换枪机模块和供弹模块,以实现口径和弹种的变换^[161]。SCAR 模块化步枪见图 11。

判断模块化步枪的 4 项基本特征如下^[154]。

首先,是否具备不同口径和弹药的快速转换能力。需要枪械可以在 2 种或 2 种以上弹药之间进行模式切换。通常为在小口径—中口径弹药之间进行切换,以实现战区层减轻后勤保障和供给负担的目的。模块参数的设置主要取决于本国与所在军事联盟列装弹药种类和对方势力的弹药种类。

其次,是否具备不同长度枪管(上机匣组件)的快速转换能力。同口径弹药下,枪械可以在 2 种或 2 种以上枪管长度间切换,通常为短突击步枪—突击步枪—精确射手步枪,实现火力由近及远、由点及面的有效覆盖。

再次,零部件是否具备模块化设计。有些步枪采用上下机匣结构,但是并不是将枪管/导气机构和枪机作为模块整合进机匣模块内用以实现口径和弹种变换,仅是为了方便快速保养与维护,因此不可以称为模块化步枪。

最后,是否有相对固定的操作模式。不同口径和功能的枪械应当具有一致或基本相同的操作模式,使用户学习一支枪械的使用方法便可以贯通所有模块化变体的使用方式,降低学习成本。

相较于枪族化设计,模块化设计有效增强了枪械的作战效能,其具备部分前者零件通用的特性优势,但更强调专枪专用、专门模块实现专业用途,还实现了不同枪种和弹种之间的优势互补,为同一步兵班内

提供了从近至远、从小到大、由点到面的火力支持,更符合作战任务中的多样化需求^[162-163]。然而 PLATEK P 等人研究发现不同弹种和模块之间射击诸元的变化,零部件之间的啮合程度的波动,都会对枪械的射击精度和可靠性造成影响^[164]。赵书彬等人针对这种不利影响提出了智能辅助设计策略与方法^[165]。可更换的结构对生产制造中的精加工技术和材质质量有相当高的要求,会导致生产速度的降低和成本的提高。如果国家不具备较高的工业生产水平,模块化设计会导致所有层面枪械作战效能的降低。

值得注意的是,通常情况下模块化步枪系统中不包含专用的班用机枪型号。因为机枪作为基层作战单元中主要的火力输出,需要实现长时间的稳定火力倾泻,所以通常采用链式供弹和可快速拆卸的枪管设计,其人枪系统的动力学特性不同于突击步枪^[166],独特的战术需求和结构不适合作为步枪模块进行设计^[167-170],否则复杂的通用结构和降低的可靠性会限制基层作战单元的火力输出。美军模块化步枪中提供中远距离连续火力支援的枪械被称为重枪管突击步枪(Heavy Barrel Assault Rifle,简称 HBAR),其装备加长的重型枪管具备更远的射程、更高的精确度和更可靠的连续火力输出能力,其本质上还是步枪,但不能作为轻机枪或班用机枪使用,连续供弹可更换枪管的班用机枪作用依然是无可替代的。

3.2 制造工艺

优秀稳定的加工制造工艺是枪械正常发挥设计作战效能的基础保障,也是一型步枪能够被大规模列装的先决条件^[171]。现代步枪设计对枪械的射击精度要求越来越高,枪族化、模块化步枪设计理念中,对零件加工的标准化和精度要求愈加严格。导致现代工业发展中诞生的先进加工与测量校准技术,都被第一时间应用到了步枪的制造过程中。如何搭配加工方法,协调材料的丰富度、适应性和加工速度与精度之间的优势互补,更经济、更高效、更可靠地提升枪械系统的生产,是在战略层和战区层全面提升步枪系统作战效能的主要途径之一^[172]。

陈效华等人提出了基于参数化的枪械外形设计策略,通过 CAD 离散特征与约束的参数化封装,提高了设计方案阶段枪械内结构设计与外观设计的同步协调^[173]。胥泽奇等人提出了环境工程在步枪设计生产过程中应用的必要性与适用性,同时提出了其应用模式,用以提高步枪生产的保障性作用^[174-175]。吴利荣等人系统阐述了基本可靠性和任务可靠性模型在产品全生命周期中的应用方法,用以在设计之初制定人力、物力、财力和任务指标之间的综合权衡^[176]。宋遁志^[177]和江祚峤^[178]等人研究了通过纳米材料等发射药处理工艺,实现威力优化和枪管延寿的方法。

当前,先进国家步枪生产早已实现设计制造一体

化、加工过程数字化、过程控制自动化,其零件大量采用 MIM 技术制造。精铸、精锻、精冲及软加工技术,不但可以节省原材料,而且可以大幅提高产品质量^[179]。设计中会尽量降低枪械精密加工零件的数量和结构复杂度,仅将枪管、枪机、瞄具、模块化接口等部件作为精密加工零件,通过精密铸造、CNC 加工、精密冷锻等工艺进行生产。主要结构件如机匣、弹夹、枪托等则采用冲压、注塑、钣金等方式进行生产。通过优化加工工艺的搭配,提高生产效率,降低生产成本。

3.3 材质

传统枪械材质构成都采用钢木混合结构,枪管、枪机通过卡榫和螺栓固定在木质枪托上,确保射击时枪械的后坐力可以平稳传递给射手。木材具有良好的亲肤性,获取渠道也较为丰富简单,加工工艺的难度也相对较低。然而木材的质量较重,环境适应性差,即使是经过防腐处理的木质零件,冬季低温干燥的环境下依然容易开裂,夏季高温潮湿的环境中,木材容易受潮膨胀变形,甚至发生腐烂。使用优质木材原料可以一定程度上缓解以上问题,但是优质木材本身就难以获得且成本高昂,不适于大规模工业化量产。因此第二次世界大战后枪械设计中逐渐不再将木材作为主要原材料使用。

非金属材料技术、合金冶炼技术和复合材料技术突飞猛进的发展为步枪系统提供了丰富的材料选择空间^[180]。首先,高分子聚合物材料被广泛应用于步枪的枪托、握柄、护手等零件,其具备 5 点优势:(1)与木材相似的亲肤性表现,简单来说就是“冬天不冰,夏天不烫”,使用过程中适宜与身体长时间接触,不易引起皮肤不适感受;(2)对复杂环境的耐候性好,对温度、湿度、水浸、盐蚀、碰撞等具有较好的耐受性^[181];(3)质量轻,机械性能好,密度与枪用木材的密度相当,易于加工制成空心、蜂巢等结构,进一步降低质量,并且不用考虑疤结和木纹方向,受力没有方向性;(4)加工方便快捷,通过注塑、吸塑等方式生产,生产效率比木材机加工提高数倍,同时产品品质也更稳定;(5)成本低,原料价格相较木材大幅降低,在大量生产同件数的情况下成本降低数倍。

我国早在 20 世纪 80 年代初期就开始重视工程塑料在轻武器中的应用。在 95 式突击步枪的研制中大胆使用了多种改性工程塑料,实现了 95 式突击步枪在质量、环境耐候性和人机工效上的长足进步,并于 2008 年编制了最新的非金属材料的应用规范^[182],指导轻兵器非金属材料的发展与创新。

其次,轻合金和轻型硬质合金为传统钢制零件提供了更多替代的选项。主要是以铝合金、镁合金、钛基合金为代表的一系列轻质合金,通过改进配方和一系列旋压、锻造、冷热、表面处理等加工成型方法,

使轻质合金强度和机械性能大幅度提高。从早期仅代替机匣、弹夹等非恶劣工况零件,逐步实现了包括枪管在内的所有零件的适用性。轻质合金相较钢等传统枪械原料材质,可在保证结构强度的前提下大幅度降低枪械的质量。钛基合金以其优良的性能,可提升枪械对极端环境的适应性,并且提高枪械的寿命。相较于塑料,轻质合金具有更好的耐磨、耐高温、耐高压与高强度等特性。

最后,复合材料成为了枪械未来选材探索的新方向。通过在基材中添加其他材料粉末或纤维,使其具备更多样的力学、热力学、化学特性,有目的地代替部分枪械零件材质,实现强度、质量、可靠性的多方面提升。枪械系统复合材料主要有 3 种发展方向:一是通过复合材料增强枪械可靠性与寿命,例如通过在塑料中添加玻璃纤维或碳纤维,提高工程塑料的强度和寿命;二是通过复合材料降低枪械质量,例如在塑料中掺杂陶瓷材质,用以代替金属生产弹壳,降低了弹药质量也降低了生产难度,提高了携弹量;三是通过复合材料增加枪械威力,例如通过钨基复合材料替代铅作为弹头的内部材质,可以有效改善弹头的侵彻力。

各种新材质、新工艺的应用,在保证机械强度的前提下,有效降低了枪械系统的总质量,提高了枪械系统的复杂环境适应性。

3.4 人机工效

任何武器装备,即使是最自动化的兵器,也需要在人的参与下才能有效完成战斗的保障任务。步枪作为士兵最基本的战斗武器,其人机工效的优劣更是直接关系到步枪系统作战效能的发挥。人机工效学是一门复杂的多变量科学,需要从人的生理、心理和与环境之间的关系入手解决问题^[183-186],人因学认知理论、UCD 理论和 UXD 理论也为枪械人机工效的提高提供了新的优化途径^[187]。我国因为原来借鉴的是苏联的武器设计思想与模式,所以曾对人机工效的优化并不重视^[188],但在 20 世纪 90 年代后,我国逐渐认识到人机工效对轻武器作战效能提升的显著作用,并开始着手对轻武器人一机一环的设计展开系统化、科学化的研究^[189-190],并于 1997 年和 2002 年发布了《GJB 2873-1997 军事装备和设施的人机工程设计准则》^[191]和《GJB Z 131-2002 军事装备和设施的人机工程设计手册》^[192]。按照设计过程,各国现代步枪系统的人机工效设计主要被分为设计仿真阶段、试制评价阶段、追踪优化阶段^[193]。

在设计仿真阶段,得益于计算机辅助设计技术的飞速发展,设计师可以依据人体测量数据,构建用户的人机工效模型,结合“弹—枪—人”动力学模型,在设计之初对枪械的人机工效进行系统仿真,并且能够得到相当客观的量化数据。李峰^[194]、窦万峰^[195]

等人提出了在此阶段的并行工程协同设计方法。郑晓慧等人建立了系统的军用工效学虚拟人模型,有效减少了在设计仿真阶段和试制评价阶段的循环次数^[196]。

在试制评价阶段,根据第一阶段的设计仿真结果试制样枪并进行实验室测试。测试分为单项测试和综合测试,通过实验人员与战士的不断试射和操枪训练,摸索适用于新枪械的操训方式与使用方法。根据测试中发现的问题,反馈回上一阶段改进设计。直至测试全部达到或满足预定人机工效指标。

在追踪优化阶段,新枪械正式装备后,总师团队并不解散,而会继续追踪枪械在实际训练和战斗中暴露出来的问题,根据基层部队反映上来的问题,返回第一阶段优化枪械系统。该机制源于美国,被称为总师追踪制度,总师团队将以 5 年为单位,为枪械的全生命周期进行优化改进。

在具体的设计方法上,现代步枪系统设计主要从控制质量、优化后坐力、优化瞄准机构和优化功能细节 4 个方面提升提人机工效。

3.4.1 控制步枪系统质量

枪械质量和质心位置是影响步枪系统人机工效的最基本的因素之一,对步枪质量的要求从一战时满弹 5 kg 左右,逐渐提高到现代自动步枪满弹 3.5 kg 以内^[197]。枪弹系统每降低 100 g,弹药携带量可以增加 3%~5%,提高徒步越野机动速度,增大越野机动范围^[198-200],降低负重还可以有效避免行军中人的关节损伤^[201]。FRANK M^[202]等人的实验结果表明,枪械的质心位置处于握柄上方时,会更有利于在射击时控制枪械震动。质心靠近枪口方向,长时间使用容易造成手臂和腕部的疲劳。质心靠近枪托方向,容易加剧射击时枪口上仰。杨洋采用实验与数值仿真的方法,对单兵系统的人机工效进行了复合量化研究,对单兵的负重和射击时的状态进行了主客观复合分析^[203]。

现代步枪减重的方式主要有 3 种:(1)使用轻质材料,通过在枪身和弹药使用塑料、轻质合金和复合材料,降低钢、铜等较重材质的使用量,达到系统减重的目的;(2)优化枪械结构,通过简化枪械的零件数量,简化自动机的自动结构,提高零件集成度,优化模块间组合机构,采用高效的减后座技术等方式,达到结构减重的目的;(3)弹药变革减重,弹头的质量不能过轻,否则会影响射程和侵彻力,弹药只能通过减小弹药口径,或减轻弹壳质量,达到系统减重的目的^[204]。

全兴勇结合 13 种弹药产品中的工程塑料,分析了工程塑料在弹药系统中的应用方法和改进方向^[205]。张敬慧^[206]、刘斌^[207]、祁荣长^[208]分析了国内外工程塑料在弹药和枪械上的应用。骆佳光、鞠涛针对某轻型步枪,通过结构创新和材料的合理选用,分析了该步枪的系统减重方法^[209-210]。

然而枪械质量过轻会导致后坐冲量增大,使射击

时难以稳定枪械,并且枪机后坐复进时重心变化会更剧烈,导致射击精度的下降。BYERS J^[211]等人在其实验中证明了枪械质量与杀伤力和生存性之间存在相关关系,因此枪械质量需要充分考虑枪械种类用途和实战反馈,并以此进行系统减重设计优化。

3.4.2 优化后坐力

步枪系统发射时的后坐力是破坏“弹—枪—人”系统稳定态的主要因素。过大的后坐力不仅会导致枪械在射击时难以控制进而射击精度下降,严重时还会威胁到射手的生命安全,因此减小和控制后坐力是提升步枪系统人机工效的重要途径。胡扬坡为轻武器测试射击后坐力、后座速度、后座能量、自动机运动位移及速度动态参量搭建了一套可行的轻武器动态多参数测试平台^[212]。张志广建立了一套轻武器射击平台的拟人模型,用以分析“人—枪”相互作用系统^[213]。包建东结合人体生物力学结构特点,构建了一种立姿无依托抵肩射击的人—枪系统模型,并提出了主动态模拟实验枪架的构思^[214]。HANDLEY H 等人根据后坐力一肩的作用分析,试图搭建后坐力测试台^[215]。金鑫等人建立了基于 LifeMod 的人枪系统连续射动力学模型,为客观系统分析提供了思路 and 工具^[216]。

减小后坐力的主要方法之一是设计高效的减后座机构,通过减后座机构吸收后座能量,通过枪口制退器抵消减缓后坐力^[217],或通过肘节机构等方式延迟后座时间降低后座冲量。齐清设计了 3 种缓冲结构方案,并通过 ADAMS 仿真分析了 3 种结构的优缺点^[218],见图 13。苏瑞^[219]、任冠逢^[220]等人构建了基于 ADMAS 的缓冲装置设计方法。贺大为^[221]、李鹏^[222]等人分析了弹簧缓冲器对射频和后坐力的影响,并提出了优化方向与路径。何伟^[223]基于大口径狙击步枪的自动机和缓冲机构的选型和优化,探索了新的设计思路和解决的技术路径。王洋^[224]提出了利用浮动减后座和冲击振动隔离技术,大幅度降低后坐力,提升射击稳定性的方案。焦健等人设计了通过延迟后座降低射频的结构,并提出了降低后坐力的动力学分析模型^[225]。吴臣等人设计了弹簧双向延迟机构^[226]。姚养无等人分析了弹簧液压延迟后座枪机的结构和动力学仿真方法^[227]。

减小后坐力的另一个途径是减小弹药的口径。小口径弹药相较于中间威力弹,后坐力冲量可以减少约

一半。缩小弹药口径可以在减小后坐力的同时降低武器系统质量,提高携弹量。这是导致全球步枪小口径化风潮的主要原因之一。减小后坐力还可以通过设计对称运动的自动机零件实现,平衡导气式自动机便是通过零件的对称运动,抵消了射击时的后坐力,实现了枪械后坐力的大幅度降低,采用该自动机结构的枪械可以轻松实现单手射击。

利用火药燃气射击的枪械后坐力是无法避免的,后坐力冲量是一个矢量,有效控制其作用方向也可以提升枪械的人机工效^[228]。现代步枪设计中对枪托的位置基本上达成了共识,枪托后坐力作用点与枪管轴线共线时,枪械的后坐力最容易控制,枪口上扬现象最不明显,对射击精度的影响最小。AK-47 步枪在其改进款 AK-74 系列步枪中,便将枪托重新设计为共线的可伸缩枪托,以改善连射中枪械难以控制的现象。

3.4.3 优化瞄准机构

根据步枪的结构和用途设计优化瞄准具,可以有效提高步枪系统的瞄准速度、射击精度、和射击时的舒适度,进而提升枪械系统的人机工效^[229]。现代步枪的瞄准机构主要分为 3 类:机械瞄准具、白光瞄准具、光电瞄准具^[230]。

机械瞄准具是历史最悠久、结构最简单、性能最可靠的基础瞄准设备。发展至今,典型的机械式瞄准具由准星和照门构成,主要有 2 种结构:开放式瞄准具和觇孔式瞄准具^[231],见图 12。开放式瞄准具的照门为凹槽状,瞄准时观察视野大,据枪瞄准速度快,但是瞄准的精度低。觇孔式瞄准具的照门为直径不一的小孔,理论上孔越小或照门的厚度越厚,瞄准的精度越好。然而孔状照门对射手的视野遮挡大,不利于射击时观察周围环境。为了改善机械式瞄具的种种不足,设计师通过改善照门的形状和准星的结构弥补机械式瞄具在精度和瞄准效率上的不足,部分机械式瞄具的照门可以根据环境切换,选择开放式或觇孔式照门。同时,现代步枪的机械式瞄准具都设计了可调的标尺用以修正距离和风偏对射击带来的影响。部分机械式瞄具还具备吸光材料或氙光管以适应夜间瞄准的需求。虽然机械式瞄具只能适用于 200 m 内距离射击,但其作为最简单、有效、可靠的瞄准具,将会继续作为主要瞄准方式与现代步枪系统共同进化发展。



图 12 3 种后座缓冲机构
Fig.12 3 kinds of recoil cushioning mechanism



图 13 开放式瞄准具与觇孔式瞄准具
Fig.13 Open sights and target sights



图 14 某型综合光电式瞄准具
Fig.14 A kind of integrated photoelectric sight



图 15 瞄准具串联使用
Fig.15 Tandem use of sights

白光瞄准具兴起于第一次世界大战,发展于第二次世界大战,为步枪系统作战效能距离的拓展延伸起到了极大的辅助作用^[232]。发展至今,现代白光瞄准具按结构主要分为3类:望远式、准直式、反射式。望远式瞄准具利用光学透镜可将目标放大数倍,可以很大程度提升远距离射击精度。然而其瞄准时视野极为狭窄,精密的结构对制造水平要求很高,价格也较为高昂,需要射手大量的练习以克服视差等问题^[233]。准直式瞄准具根据人的双眼成像原理,将导光材料在光栅中呈现的无穷远光点与射手另一只眼中的目标重合,实现快速瞄准的目的。其并不具备对目标的放大倍率,中远距离精度差,但是因为结构简单制造容易,对视野遮挡小,所以适于近距离快速瞄准。反射式瞄准具出现后准直式瞄具被迅速替代。反射式瞄准具通常没有放大功能,通过照明系统发光射向折光镜,光线经折光镜呈现出瞄准点并反射后平行射进人眼。这种结构的优势在于方便双眼快速瞄准,光点随视角移动,射击时不需要射手的视线对准主光轴。

光电瞄准具起源于第二次世界大战,德国为了提升步兵夜战能力,为STG44突击步枪设计了“吸血鬼”夜视系统。随着现代光学和电子技术的发展,光电瞄准具得到了长足的发展进步^[234]。现代光电瞄准具按原理主要分为:微光瞄准具、红外瞄准具、激光瞄准具^[235]。微光瞄准具主要用于夜间,实现索敌、

瞄准、射击。红外瞄准具依托红外热成像原理实现了昼夜全天候环境下的快速索敌和瞄准,并且利用红外变焦实现了无损放大目标影像^[236-237]。激光瞄准具可以通过激光测距快速测定目标准确距离,并通过激光光点快速瞄准。除以上3种光电瞄准具外,有些瞄准具还将风速传感器、湿度传感器、定位传感器集成进瞄具内,通过微型计算机直接计算弹道和弹着点,极大调高了瞄准效率和射击精度。然而通常情况下光电瞄准具质量较重、造价高昂,并且对恶劣环境的耐候性较差。某型综合光电式瞄准具见图15。

吴安律等人将现代步枪系统与瞄具的匹配方法与趋势大体进行了总结:机械瞄具搭配光学瞄具,以通过专用接口或全尺寸导轨安装的光学瞄准镜为主瞄准具,机械瞄具作为备份使用,提高精度保证可靠性;光学瞄具串联使用,通过白光、微光、红外、激光瞄具的串联搭配,实现应对不同任务类型的组合瞄具方案,实现作战效能最大化,见图16;专枪配专镜,针对某型枪械设计专用光学瞄准具,适合大规模列装,并且降低训练成本,某些现代步枪在出厂时便已经配备了小倍率固定式光学瞄准具^[237]。只有根据步枪任务种类和战场环境,合理配置瞄具,才能提升步枪系统的人机工效,最大程度提高步枪系统的作战效能。

3.4.4 符合人体生理尺寸的外形结构和功能细节

步枪系统的外形结构和功能细节优化是一个繁杂琐碎的人机工程优化工作。其主体思路是根据人的身体尺寸、生理能力和运动特性,改进枪械的结构,增加或减少功能,实现枪械使用效率、可靠性、舒适度、易用性的全面提升,进而提升“弹—枪—人”系统的作战效能。设计时应当遵循以下5点准则^[238]。

人与武器的协调性。其主要是指枪械与人体尺寸和能力的协调,便于人充分发挥武器的全部性能。例如,枪械的握把是全枪与人体接触时间最长的部位,握把的形状、后倾角度、侧偏角度都会影响射手的舒适度和射击稳定^[239-241]。扳机护圈的形状与大小,将影响到徒手射击与手套射击的兼容性,以及能否有效防止钩挂走火^[242]。快慢机开关的位置应当位于便于操作的位置,方便射手在不改变射击姿势的情况下就能快速切换射速档位,同时能够有效避免携行时钩挂^[243-244]。同时要考虑拉机柄的位置是否适合左右利手射击。扳机和快慢机的触发力度设置需要符合人手指的力量区间^[245]。施云红从射击时的持枪舒适性和射手的认知活动出发,构建了一套射击过程分析与评价方法,为提高枪械的人机工效提供了更为客观的参数化分析方法^[246]。陈文明针对被动式枪架的测试问题,通过分析人枪握把的相互作用,提出了主动态人枪握把的作用力模型^[247]。许翰锐从手性特征出发提升了产品的人机工效^[248]。美国国防部针对提升装备人机工效学,专门开发了综合人体工效学工具^[249]。

人机工作分配的合理性。其关键在于在枪械使用过程中,自动功能与人工功能之间达到最佳的分配^[250]。早期步枪全部依靠人工实现所有动作,现代突击步枪依靠自动机实现了上膛、射击、抽壳、复进等动作的自动化。根据步枪的用途,合理分配自动机或其他设备所负责的工作,实现射击效率、准确度、舒适度的全面提升。例如,光电瞄具自动测算射击诸元,为射手降低了脑力负荷,提升了瞄准效率。空仓挂机功能的出现,帮助射手省却了还弹上膛的动作,提升了火力的连续性。合理设计的弹夹引导槽,使射手实现了快速盲换弹夹。

人机信息传递的简易性。其主要指枪械的工作和状态信息应当符合人机工学中人机界面信息传递的简易性原则^[251]。信息的传递是双向、有效、实时、准确的,应具备合理的显示器和控制器^[252-253]。例如,枪械的余弹量应当直观有效地呈现给射手,使用观察孔或透明弹夹可有效提升信息的交流效率。快慢机开关应当通过清晰醒目的视觉和触觉实时呈现枪械的击发模式。瞄具的密位划分和显示界面应简单明了。各可操作的零件应当具有正确的动作意向形式^[254]。

人对武器的可控性。其指在人的能力范围内,枪械的所有动作都是一直可控的。主要有2种做法:一是降低枪械超出人力范围的指标,例如前面提到的控制后坐力、降低系统质量等;二是通过枪械提升人的控制能力,例如设计可折叠伸缩的枪托、可调节档位的托腮板等,提升射手的射击舒适度和对枪的控制能力。在枪身设置战术导轨^[255],方便增挂战术握把、手电、瞄准指示器等设备,实现成倍提升枪械作战效能^[256]。

人机对环境的适应性。其主要指在“弹—枪—人”系统与环境的相互作用下,保证系统的可靠性。例如,在抛壳窗和抛壳挺处设计舱盖和导流槽,可以有效避免因风沙污物引起的卡壳等故障。在护木和机匣的位置合理设计散热孔和组合间隙,加速散热的同时方便污物的排除。将扳机、快慢机开关、弹夹开关、拉机柄设计在外形凹陷处,防止磕碰钩挂造成的误触。

4 结语

从国内外新研制步枪系统的发展趋势里不难看出,工业设计的思路和方法在未来步枪系统设计中,尤其是信息化与体系化对抗下,将会发挥愈加重要的作用^[257]。

第一,步枪系统会继续在保证毁伤威力和可靠性的前提下,继续向人的能力妥协^[57-63,258]。现代化、信息化、体系化战争中,需要士兵掌握和携带的设备越来越多,步枪在全部负重所占的比率会进一步降低。然而,对枪械威力和可靠性的要求会进一步提高。如何处理这之中的博弈关系,需要设计师通过工业设计、工程、材料等多方面方法综合优化,实现性能层

和格斗层的效能提升。

第二,步枪系统未来不只是单纯的机械结构系统,如弹道计算机、火控系统等数字化、可交互设备将会被集成进枪械系统中^[259-261]。这就更加需要通过工业设计的方法对系统的“人—枪”关系、“枪—环”关系和“人—环”关系进行设计与优化,实现步枪系统在系统层和格斗层的效能提升。

第三,士兵作战系统是未来轻武器的发展趋势^[262-266],步枪系统不再仅是独立的武器装备,而会变成士兵作战系统的重要组成单元,使现在的树形层级作战指挥模式,变为网状平面作战模式。届时工业设计会大幅度改变步枪传统的形式和功能,甚至改变步枪的使用模式,实现步枪系统效能在战略层和战区层的大幅提升。

建立工业设计与工程设计相结合的复合枪械设计团队体系,开发适合的枪械设计与评价方法成为当务之急。作为工业设计师,需要积极迎接新技术的出现,正确分析面对新战争模式的挑战,将装备工业设计的意义上升到国家安全与人民安全层面,利用工业设计开创步枪设计的新模式和探索步枪性能的新边界。

参考文献:

- [1] 兵器工业科学技术辞典编辑委员会. 兵器工业科学技术词典 轻武器[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.
Ordnance industry Science and Technology Dictionary Editorial Committee. Ordnance industry Science and Technology Dictionary Light Weapons[M]. Beijing: National Defense industry Press, 1992.
- [2] 郭凯, 陈良坤, 徐诚. 枪械系统作战效能综合评估方法的研究[J]. 战术导弹技术, 2006(2): 42-47.
GUO Kai, CHEN Liang-kun, XU Cheng. Comprehensive Evaluation Method of Combat Effectiveness of Firearm System[J]. Tactical Missile Technology, 2006(2): 42-47.
- [3] 罗兴柏, 刘国庆. 陆军武器系统作战效能分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
LUO Xing-bai, LIU Guo-qing. Analysis of the Combat Effectiveness of Army Weapon Systems[M]. Beijing: National Defense industry Press, 2007.
- [4] 景继生. 枪·轻武器发展史[M]. 天津: 百花文艺出版社, 2008.
JING Ji-sheng. The Development History of Guns and Light Weapons[M]. Tianjin: Baihua Literature and Art Publishing House, 2008.
- [5] 朵英贤, 曹占英. 朵英贤自传[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
DUO Ying-xian, CAO Zhan-ying. Autobiography of DUO Ying-xian[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013.
- [6] 朵英贤. 轻武器不“轻”——兼论步枪设计及其发展

- [J]. 轻兵器, 2002(1): 6-9.
DUO Ying-xian. Light Weapons Are Not “Light”: and on Rifle Design and Development[J]. Light Weapons, 2002(1): 6-9.
- [7] 王洋. 枪械百年史: 从无烟火药到理想单兵战斗武器[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
WANG Yang. A Century of Firearms: From Smokeless Gunpowder to Ideal individual Combat Weapon[M]. Beijing: Mechanical industry Press, 2019.
- [8] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
JIN Zhi-ming. Interior Ballistics of Guns[M]. Beijing: Beijing institute of Technology Press, 2004.
- [9] 徐诚, 王亚. 火炮与自动武器动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
XU Cheng, WANG Ya. Artillery and Automatic Weapon Dynamics[M]. Beijing: Beijing institute of Technology Press, 2006.
- [10] 黎晓明. 轻武器百年回眸[J]. 现代军事, 1999(8): 11-14.
LI Xiao-ming. A Hundred Years Review of Light Weapons[J]. Modern Military, 1999(8): 11-14.
- [11] 李义. 国外突击步枪的水平及发展趋势[J]. 轻兵器, 1994(4): 8-11.
LI Yi. The Level and Development Trend of Foreign Assault Rifles[J]. Light Weapon, 1994(4): 8-11.
- [12] 薛园. 苏军轻武器发展的一些特点[J]. 现代兵器, 1982(10): 24-25.
XUE Yuan. Some Characteristics of the Development of Soviet Light Weapons[J]. Modern Weapon, 1982(10): 24-25.
- [13] 米哈伊尔·季莫费耶维奇·卡拉什尼科夫. Ak-47, 这把枪改变世界[M]. 南京: 江苏凤凰文艺出版社, 2015.
KALASHNIKOV M T. Ak-47, This Gun Changes the World[M]. Nanjing: Jiangsu Phoenix Literature and Art Publishing House, 2015.
- [14] 戈洛夫. 自动武器设计原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1958.
GOLOV. Principles of Automatic Weapon Design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1958.
- [15] THOMAS D, HUTCHINGS, ALBERT E. Rahe. Study of Man-Weapon Reaction Force Applicable to the Fabrication of a Standard Rifle Firing Fixture[J]. Acta Armamentarii, 1975(5):56-59.
- [16] NEWMAN A R. A Theoretical and Experimental Study of the Dynamics At the Small Arm Firer interface[C]. New York: Proceeding of the Tenth international Conference of Ballistics, 1987.
- [17] 朵英贤. 参数识别与模态综合[J]. 兵工学报, 1985, 6(2): 39-48.
DUO Ying-xian. Parameter Identification and Modal Synthesis[J]. Acta Armamentarii, 1985, 6(2): 39-48.
- [18] 包建东, 王昌明, 孔德仁, 等. 连发射击人枪系统机械导纳测量与分析[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2006(4): 521-524.
BAO Jian-dong, WANG Chang-ming, KONG De-ren, et al. Measurement and Analysis of Mechanical Admittance of Continuous Firing Gun System[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2006(4): 521-524.
- [19] 金鑫. 仿人射击枪架的理论与实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
JIN Xin. Theoretical and Experimental Research on Human-Like Shooting Gun Holders[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [20] 杜君, 梁强, 许仁杰. 武器装备人机工效仿真分析与评估[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(9): 1795-1800.
DU Jun, LIANG Qiang, XU Ren-jie. Simulation Analysis and Evaluation of Ergonomics of Weapon Equipment[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(9): 1795-1800.
- [21] 孙远波. 人因工程基础与设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010.
SUN Yuan-bo. Human Factors Engineering Foundation and Design[M]. Beijing: Beijing institute of Technology Press, 2010.
- [22] 徐孟. 面向人机工程仿真分析的人体生物力学模型[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
XU Meng. Human Body Biomechanics Model for Ergonomic Simulation Analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [23] 杨立强, 刘西刚, 秦立斌, 等. 人机工程学领域人体建模技术发展综述[J]. 装甲兵工程学院学报, 2006, 20(2): 59-63.
YANG Li-qiang, LIU Xi-gang, QIN Li-bin, et al. Overview of Human Body Modeling Technology Development in the Field of Ergonomics[J]. Journal of Armored Forces Engineering Academy, 2006, 20(2): 59-63.
- [24] 赵朝义. 人类工效学基础数据调查研究[J]. 人类工效学, 2013, 19(1): 76-79.
ZHAO Chao-yi. Investigation and Research on Basic Data of Ergonomics[J]. Ergonomics, 2013, 19(1): 76-79.
- [25] 王茂林. 手提式自动武器枪身运动规律的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 1981.
WANG Mao-lin. Movement Law of the Hand-Held Automatic Weapon[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 1981.
- [26] 宋杰, 廖振强, 李佳圣, 等. 卧姿有依托人枪系统建模与仿真分析[J]. 南京理工大学学报, 2014, 38(4): 457-463.
SONG Jie, LIAO Zhen-qiang, LI Jia-sheng, et al. Modeling and Simulation Analysis of the Prone Human Gun System[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2014, 38(4): 457-463.
- [27] 成志方. 人枪相互作用研究[D]. 南京: 南京理工大

- 学, 1987.
- CHENG Zhi-fang. Human-Gun interaction[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 1987.
- [28] 蔡周斌. 卧姿射击状态人-枪相互作用研巧[D]. 南京: 南京理工大学, 1987.
- CAI Zhou-bin. Human-Gun interaction in Prone Shooting State[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 1987.
- [29] 党建滨. 跪姿射击状态人-枪相互作用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 1987.
- DANG Jian-bin. Human-Gun interaction in Kneeling Shooting State[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 1987.
- [30] 李永新, 朱明武, 孙海波, 等. 人枪系统动力响应研究[J]. 兵工学报, 1999(1): 8-12.
- LI Yong-xin, ZHU Ming-wu, SUN Hai-bo, et al. Dynamic Response of Human Gun System[J]. Acta Armamentarius, 1999(1): 8-12.
- [31] 宫鹏涵, 周克栋, 赫雷, 等. 基于正交高速摄影的人枪动态特性实验研究[J]. 弹道学报, 2015(3): 95-100.
- GONG Peng-han, ZHOU Ke-dong, HE Lei, et al. Experimental Research on the Dynamic Characteristics of Human Gun Based on Orthogonal High-Speed Photography[J]. Journal of Ballistics, 2015(3): 95-100.
- [32] 郑召辉. 模拟人体枪架结构与动力学仿真[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- ZHENG Zhao-hui. Structural Design and Dynamics Simulation of Simulated Human Gun Frame[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [33] HUSTON R L, PASSERELLO E. Multibody Structural Dynamics Including Translation between the Bodies[J]. Computers and Structures, 1980, 12: 713-720.
- [34] TRUYEN E, HOSEK P, Maddens N, et al. Design of a New Setup for the Dynamic Analysis of the Recoil-Shoulder interaction[J]. Springer, Cham, 2018, 48(2): 46-48.
- [35] PANJABI M. The Stabilizing System of the Spine[J]. Spinal Disord, 1992, 5(4): 383-389.
- [36] KITAZAKI S, GRIFFIN M J. A Modal Analysis of Whole Body Vertical Vibration, Using a Finite Element Model of the Human Body[J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 200(1): 93-103.
- [37] BDYTSCHKO T, PRIVITZER B. Refinement and Validation of a Three-Dimensional Head-Spine Model[J]. Aerospace Medical Research Laboratory, 1978(16):78-89.
- [38] 杨洋, 王亚平, 徐诚, 等. 步枪人-枪肌肉骨骼建模及逆向动力学仿真研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(9): 100-105.
- YANG Yang, WANG Ya-ping, XU Cheng, et al. Musculoskeletal Modeling and inverse Dynamics Simulation Study of Rifle-Gun Man[J]. Vibration and Shock, 2018, 37(9): 100-105.
- [39] 苑大威, 贾飞, 李坤. 轻武器协同仿真模式设计与实现[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(9): 6.
- YUAN Da-wei, JIA Fei, LI Kun. Design and Implementation of Cooperative Simulation Mode for Light Weapons[J]. Chinese Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(9): 6.
- [40] 李峰, 徐诚, 王永娟. 轻武器虚拟样机有效性研究[J]. 机械设计, 2007, 24(7): 45-47.
- LI Feng, XU Cheng, WANG Yong-juan. Effectiveness of Virtual Prototypes of Light Weapons[J]. Machine Design, 2007, 24(7): 45-47.
- [41] 张玉玉, 方丽. 美军秘密文件: Ar15/M16 步枪早期测试与评估[J]. 轻兵器, 2018(8): 48-52.
- ZHANG Yu-yu, FANG Li. U. S. Army Secret Document: Early Test and Evaluation of Ar15/M16 Rifles[J]. Light Weapon, 2018(8): 48-52.
- [42] 黄珊. 轻武器典型杀伤效应测试与分析研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- HUANG Shan. Test and Analysis of Typical Lethal Effects of Light Weapons[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [43] 王洋. 世界名枪印象(2) M16 步枪(上)[J]. 兵器知识, 2019(9): 36-41.
- WANG Yang. Impressions of World Famous Guns (2) M16 Rifle (Part 1)[J]. Weapon Knowledge, 2019(9): 36-41.
- [44] 王洋. 世界名枪印象(2) M16 步枪(下)[J]. 兵器知识, 2019(12): 32-37.
- WANG Yang. Impressions of World Famous Guns (2) M16 Rifle (Part 2)[J]. Weapon Knowledge, 2019(12): 32-37.
- [45] 朵英贤. 略论轻武器时代[J]. 兵器知识, 2009(6): 25-27.
- DUO Ying-xian. A Brief Discussion on the Generation of Light Weapons[J]. Weapon Knowledge, 2009(6): 25-27.
- [46] 孟凡俊. 美军非对称作战理论概观[J]. 中国军事科学, 2002(12): 48-56.
- MENG Fan-jun. Overview of the U. S. Army's Asymmetric Warfare theory[J]. Chinese Military Science, 2002(12): 48-56.
- [47] 石风军. “非对称作战”的提出及其启示[J]. 军事历史, 1999(1): 43.
- SHI Feng-jun. The Proposal of “Asymmetric Warfare” and Its Enlightenment[J]. Military History, 1999(1): 43.
- [48] 解放军报. 军报刊文: 加强非对称作战准备[J]. 解放军报, 2015(10): 45-49.
- Liberation Army News. Articles in Military Newspapers: Strengthening Preparations for Asymmetric Operations[J]. Liberation Army News, 2015(10): 45-49.
- [49] 曾永珠. 技术进步和战术技术要求的变化对轻武器发展的影响[J]. 四川兵工学报, 1995(4): 13-16.

- ZENG Yong-zhu. The Impact of Technological Progress and Changes in Tactical and Technical Requirements on the Development of Light Weapons[J]. Sichuan Armed Forces Journal, 1995(4): 13-16.
- [50] 汪正胜. 谈我国轻武器装备体系的发展[J]. 中国军转民, 2018, 221(9): 74-75.
- WANG Zheng-sheng. On the Development of My Country's Light Weapons and Equipment System[J]. Chinese Military Zhuanmin, 2018, 221(9): 74-75.
- [51] 曾永珠. 21 世纪初叶轻武器发展研究. 南京理工大学.
- ZENG Yong-zhu. Development of Light Weapons in the Early 21st Century. Nanjing University of Science and Technology.
- [52] 刘军, 渠红星. 关于轻武器未来发展的思考[C]. 北京: 中国兵工学会, 2010.
- LIU Jun, QU Hong-xing. Thoughts on the Future Development of Light Weapons[C]. Beijing: Chinese Academy of Ordnance, 2010.
- [53] BROWN S, VILLA J D, HANCOCK C L, et al. Stance and Transition Movement Effects on Marksmanship Performance of Expert Shooters during a Simulated Multiple Target Engagement Task[J]. Proceedings of the Human Factors & Ergonomics Society Annual Meeting, 2018, 62(1): 1444-1448.
- [54] 黄献聪. 军用防弹衣的性能需求与发展方向[C]. 北京: 现代服装纺织高科技发展研讨会, 2005.
- HUANG Xian-cong. The Performance Requirements and Development Direction of Military Bulletproof Vests[C]. Beijing: Modern Clothing Textile High-Tech Development Seminar, 2005.
- [55] 夏羽, 郭依伦, 彭长龙, 等. 防弹衣的服用发展趋势[J]. 中国个体防护装备, 2013(4): 12-14.
- XIA Yu, GUO Yi-lun, PENG Chang-long, et al. Development Trend of Wearing Body Armor[J]. China Personal Protective Equipment, 2013(4): 12-14.
- [56] 李洪兴. 美国陆军开发新型步枪和子弹[J]. 现代军事, 2017(6): 17-17.
- LI Hong-xing. The U. S. Army Develops New Rifles and Bullets[J]. Modern Military, 2017(6): 17-17.
- [57] Weapons: Infantry Yearbook 20/21[J]. Jane's Group, 2021, 48(10): 1-6.
- [58] Weapons: Infantry Yearbook 19/20[J]. Jane's Group, 2020, 47(8): 2-5.
- [59] Weapons: Infantry Yearbook 18/19[J]. Jane's Group, 2019, 46(6): 1-4.
- [60] Weapons: Infantry Yearbook 17/18[J]. Jane's Group, 2018, 45(5): 3-8.
- [61] Weapons: Infantry Yearbook 16/17[J]. Jane's Group, 2017, 44(12): 8-12.
- [62] Weapons: Infantry Yearbook 15/16[J]. Jane's Group, 2016, 43(2): 6-10.
- [63] Weapons: Infantry Yearbook 14/15[J]. Jane's Group, 2015, 42(6): 12-19.
- [64] 石学海. 基于决策支持的枪械产品设计重用方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- SHI Xue-hai. Design Reuse Method of Firearms Based on Decision Support[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [65] 方峻, 刘长毅, 徐诚. 枪械方案设计系统中的基于实例推理框架研究[J]. 兵工学报, 2003, 24(1): 128-132.
- FANG Jun, LIU Chang-yi, XU Cheng. Case-Based Reasoning Framework in Firearms Scheme Design System[J]. Acta Armamentarii, 2003, 24(1): 128-132.
- [66] 胡良明, 徐诚, 方峻. Cbr 技术在枪械方案设计专家系统中的应用[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(4): 772-775.
- HU Liang-ming, XU Cheng, FANG Jun. Application of Cbr Technology in the Expert System of Firearms Scheme Design[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(4): 772-775.
- [67] 刘国庆, 徐诚, 丁传俊. 狙击步枪弹/枪相互作用数值研究[J]. 振动与冲击, 2017(19): 1-7.
- LIU Guo-qing, XU Cheng, DING Chuan-jun. Numerical Study on the interaction of Sniper Rifle Bullet/Gun[J]. Vibration and Shock, 2017(19): 1-7.
- [68] 王亚平, 徐诚, 郭凯. 人枪系统建模及数值仿真研究[J]. 兵工学报, 2002(4): 551-554.
- WANG Ya-ping, XU Cheng, GUO Kai. Modeling and Numerical Simulation of Human Gun System[J]. Acta Armamentarii, 2002(4): 551-554.
- [69] 刘岩, 张志广, 王坚, 等. 人枪系统试验建模方法研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2014(3): 66-68.
- LIU Yan, ZHANG Zhi-guang, WANG Jian, et al. Modeling Method of Human Gun System Test[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014(3): 66-68.
- [70] LEE J H. Ndia International Infantry & Joint Services Small Arms Systems Symposium[C]. Experimental Performance Analysis on Recoil Pad for Reducing Firing Shock Force, 2008, May 19-22.
- [71] 陈晓, 董大勇, 祖媛媛, 等. 单兵装备系统人机工效仿真评价技术初步研究[J]. 中国个体防护装备, 2009(2): 12-15.
- CHEN Xiao, DONG Da-yong, ZU Yuan-yuan, et al. Preliminary Research on Man-Machine Ergonomics Simulation Evaluation Technology of individual Soldier Equipment System[J]. China Personal Protective Equipment, 2009(2): 12-15.
- [72] 王永娟, 陈效华, 徐诚. 点射模式在人枪系统中的响应特性分析[J]. 兵工学报, 1999, 20(2): 108-110.
- WANG Yong-juan, CHEN Xiao-hua, XU Cheng. Analysis of the Response Characteristics of the Burst Mode in the Human Gun System[J]. Acta Armamentarii, 1999, 20(2): 108-110.
- [73] 王缘, 王亚平, 王新蕊, 等. 基于逆向动力学的点射过程人枪动态响应研究[J]. 振动与冲击, 2018,

- 40(10): 8.
WANG Yuan, WANG Ya-ping, WANG Xin-rui, et al. Dynamic Response of Human Gun Based on inverse Dynamics in the Process of Burst Shooting[J]. Vibration and Shock, 2018, 40(10): 8.
- [74] 王缘, 王亚平, 徐诚. 射击全过程典型步枪人枪作用特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2016, 40(11): 7.
WANG Yuan, WANG Ya-ping, XU Cheng. Characteristics of Typical Rifle and Gun Action in the Whole Shooting Process[J]. Journal of Beijing institute of Technology, 2016, 40(11): 7.
- [75] 金鑫, 周克栋, 赫雷, 等. 枪托连续冲击作用下的人体参数辨识[J]. 兵工学报, 2016, 37(4): 598-602.
JIN Xin, ZHOU Ke-dong, HE Lei, et al. Human Body Parameter Identification Under Continuous Impact of Buttstock[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(4): 598-602.
- [76] WEI Z, WANG Y P, CHENG X U. The Characteristics of Man-Rifle interaction in the Entire Process of Rifle Fire[C]. 30th international Symposium on Ballistics. 2017.
- [77] 陈强华, 王永娟. 轻武器杀伤效能评估理论与计算[J]. 兵工自动化, 2011(7): 32-34.
CHEN Qiang-hua, WANG Yongj-uan. Theories and Calculations of Light Weapons Killing Effectiveness Evaluation[J]. Ordnance industry Automation, 2011(7): 32-34.
- [78] 刘伊华, 李鸽, 朱镜丽. 轻武器设计仿真一体化技术研究[J]. 价值工程, 2018, 37(17): 185-187.
LIU Yi-hua, LI Ge, ZHU Jing-li. Research on integrated Technology of Light Weapons Design and Simulation[J]. Value Engineering, 2018, 37(17): 185-187.
- [79] 郭凯, 幕志浩. 枪械系统作战效能仿真评估体系与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.
GUO Kai, MU Zhi-hao. Simulation Evaluation System and Method of Firearm System Combat Effectiveness[M]. Beijing: National Defense industry Press, 2019.
- [80] 杨南镇. 小武器不小 轻武器不轻——关于轻武器“地位与作用”的思辨[J]. 轻兵器, 2005(9): 6.
YANG Nan-zhen. Small Arms Are Not Small, Light Weapons Are Not Light! Thinking About the “Status and Function” of Light Weapons[J]. Light Weapons, 2005(9): 6.
- [81] 杨南镇. 个性立异 vs 共性制约——关于轻武器“人机工程”的思辨[J]. 轻兵器, 2007(4): 4.
YANG Nan-zhen. Individuality innovation Vs Common Restriction: Thinking About “Human Machine Engineering” of Light Weapons[J]. Light Weapon, 2007(4): 4.
- [82] 杨南镇. 个性唯美 vs 共性永恒——关于轻武器“美观性”的思辨[J]. 轻兵器, 2006(22): 3.
YANG Nan-zhen. Aesthetic individuality Vs. Eternal Universality: a Speculation on the “Aesthetics” of Light Weapons[J]. Light Weapon, 2006(22): 3.
- [83] 杨南镇. “质”与“量”的“度”——关于轻武器品种的思辨[J]. 轻兵器, 2006(5): 7.
YANG Nan-zhen. The “Degree” of “Quality” and “Quantity”-Speculation on the Varieties of Light Weapons[J]. Light Weapon, 2006(5): 7.
- [84] 杨南镇. 轻兵器的轻与重和大与小——关于轻武器“体重”的思辨[J]. 轻兵器, 2005(22): 3.
YANG Nan-zhen. The Lightness and Heaviness of Light Weapons and the Big and Small: Thinking About the “Weight” of Light Weapons[J]. Light Weapons, 2005(22): 3.
- [85] 杨南镇. 削足适履 vs 量身打造——关于轻武器“适应性”的思辨[J]. 轻兵器, 2006(11): 3.
YANG Nan-zhen. Cut the Feet to Fit the Shoes Vs. Tailor-Made: Thinking About the “Adaptability” of Light Weapons[J]. Light Weapon, 2006(11): 3.
- [86] 春晓. 轻武器设计的特点和难点[J]. 轻兵器, 2001(8): 16-20.
CHUN Xiao. Features and Difficulties of Light Weapons Design[J]. Light Weapons, 2001(8): 16-20.
- [87] Wikipedia. Industrial Design[EB/OL]. (2021-7-31) [2021-9-1]. https://en.wikipedia.org/wiki/industrial_design.
- [88] Icsid. Definition of industrial Design[EB/OL]. (2007-3-17)[2021-9-1]. <https://web.archive.org/web/20070317-224506/http://www.icsid.org/about/abouta/articles31.htm>.
- [89] 胡琳, 何人可. 工业产品设计概论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
HU Lin, HE Ren-ke. Introduction to industrial Product Design[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [90] 朵英贤. 95 式 5.8mm 班用枪族的研制[J]. 中国工程科学, 1999, 1(2): 57-61.
DUO Ying-xian. Development of Type 95 5.8mm Class Gun Family[J]. Chinese Engineering Science, 1999, 1(2): 57-61.
- [91] 贺亮. 95-1 式 5.8mm 班用枪族大揭示[J]. 轻兵器, 2011(23): 14-20.
HE Liang. A Big Revelation of the 95-1 Type 5.8mm Class Gun Family[J]. Light Weapon, 2011(23): 14-20.
- [92] 魏继才, 崔颢, 任庭光, 等. 关于武器装备体系论证方法的思考[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(11): 2202-2209.
WEI Ji-cai, CUI Hao, REN Ting-guang, et al. Thoughts on the Method of Weapon Equipment System Demonstration[J]. Systems Engineering theory and Practice, 2011, 31(11): 2202-2209.
- [93] ARINC. Combat Effectiveness[EB/OL]. (2016-05-15) [2021-06-25]. <https://www.aviation-ia.com/>. 2021. 9.
- [94] 郭齐胜. 装备效能评估概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
GUO Qi-sheng. Introduction to Equipment Effectiveness Evaluation[M]. Beijing: National Defense industry Press, 2005.

- [95] HERD G R, MOXLEY F H. Weapon System Effectiveness industry Advisory Committee (Wseiac). Volume 2. Cost-Effectiveness Optimization (Tasks and Analysis Methodology). 1965.
- [96] 郭齐胜, 袁益民, 郅志刚. 军事装备效能及其评估方法研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2004, 18(1): 1-5, 9.
- GUO Qi-sheng, YUAN Yi-min, ZHI Zhi-gang. Research on Military Equipment Effectiveness and Its Evaluation Methods[J]. Journal of Armored Forces Engineering Academy, 2004, 18(1): 1-5, 9.
- [97] 罗爱民, 罗雪山, 黄力. C3i 系统体系结构框架研究[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(6): 86-90.
- LUO Ai-min, LUO Xue-shan, HUANG Li. Research on C3i System Architecture Framework[J]. System Engineering theory and Practice, 2003, 23(6): 86-90.
- [98] 杨秀珍. C3i 系统作战效能研究[J]. 系统工程与电子技术, 1998(10): 25.
- YANG Xiu-zhen. Research on C3i System Combat Effectiveness[J]. System Engineering and Electronic Technology, 1998(10): 25.
- [99] 杨秀珍, 潘泉, 徐乃平, 等. 战场环境下 C3i 系统效能研究[J]. 火力与指挥控制, 2000, 25(1): 39-42.
- YANG Xiu-zhen, PAN Quan, XU Nai-ping, et al. Research on C3i System Effectiveness in Battlefield Environment[J]. Fire Power and Command Control, 2000, 25(1): 39-42.
- [100] 董高庆. 基于 vxi 总线的轻武器综合测试系统[J]. 计算机自动测量与控制, 1998(1): 7-10.
- DONG Gao-qing. Integrated Test System for Light Weapons Based on VXI Bus[J]. Computer Automatic Measurement and Control, 1998(1): 7-10.
- [101] 咎博勋, 薛百文, 杨臻, 等. 人枪系统参数对射击精度的影响[J]. 兵工自动化, 2020, 256(2): 53-57.
- ZAN Bo-xun, XUE Bai-wen, YANG Zhen, et al. The influence of Human Gun System Parameters on Shooting Accuracy[J]. Ordnance industry Automation, 2020, 256(2): 53-57.
- [102] 楼俐, 徐诚, 张飞猛. 灰色系统理论及量化分析法在枪械方案设计评价中的应用[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2019(5): 581-585.
- LOU Li, XU Cheng, ZHANG Fei-meng. Application of Grey System theory and Quantitative Analysis in the Design and Evaluation of Firearms Scheme[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019(5): 581-585.
- [103] 高健, 刘铁林, 冯兵, 等. 基于 Ahp 的轻武器装备维修保障能力评估[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(3): 92-94.
- GAO Jian, LIU Tie-lin, FENG Bing, et al. Evaluation of Maintenance Support Capability of Light Weapons and Equipment Based on Ahp[J]. Chinese Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(3): 92-94.
- [104] 赵炜霞, 王瑞林, 吕忠波, 等. 枪械产品小子样试验的可靠性评定[J]. 火炮发射与控制学报, 2005(4): 64-67.
- ZHAO Wei-xia, WANG Rui-lin, LYU Zhong-bo, et al. Reliability Evaluation of Small Sample Test of Firearm Products[J]. Journal of Artillery Launch and Control, 2005(4): 64-67.
- [105] 汪传忠, 廖振强, 傅建平. 轻武器小子样可靠性定型试验可行性研究[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2003, 27(4): 363-366.
- WANG Chuan-zhong, LIAO Zhen-qiang, FU Jian-ping. Feasibility Study on Small Sample Reliability Type Test of Light Weapons[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2003, 27(4): 363-366.
- [106] 白俊敏, 董富强, 曾妍. 轻武器寿命可靠性模型研究[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(3): 170-173.
- BAI Jun-min, DONG Fu-qiang, ZENG Yan. Lifetime Reliability Model of Light Weapons[J]. Firepower and Command Control, 2016, 41(3): 170-173.
- [107] 张涛, 吴迪, 段炼, 等. 轻武器可靠性模型研究[J]. 兵器装备工程学报, 2009, 30(5): 37-40.
- ZHANG Tao, WU Di, DUAN Lian, et al. Research on Reliability Model of Light Weapons[J]. China Ordnance Equipment Engineering Journal, 2009, 30(5): 37-40.
- [108] 方峻, 徐诚. 蒙特卡洛方法在枪械零件可靠性分析中的应用[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2018(6): 604-607.
- FANG Jun, XU Cheng. Application of Monte Carlo Method in Reliability Analysis of Firearms Parts[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018(6): 604-607.
- [109] 张雪辰, 贾云非, 王瑞林. 轻武器最佳可靠性模型的选择及应用[J]. 火力与指挥控制, 2005(S1): 23-34.
- ZHANG Xue-chen, JIA Yun-fei, WANG Rui-lin. Selection and Application of the Best Reliability Model for Light Weapons[J]. Firepower and Command Control, 2005(S1): 23-34.
- [110] 中国人民解放军总装备部. GJB 4559a-2008, 枪械和枪弹部队试验规程[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2008.
- People's Liberation Army General Armament Department. GJB 4559a-2008, Test Regulations for Firearms and Ammunition Forces[S]. Beijing: People's Liberation Army General Armament Department, 2008.
- [111] 单永海, 田鸿源, 廖振强, 等. 轻武器射击精度及其表征方法研究[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2013, 37(1): 15-19.
- SHAN Yong-hai, TIAN Hong-yuan, LIAO Zhen-qiang, et al. Shooting Accuracy of Light Weapons and their Characterization Methods[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 37(1): 15-19.
- [112] 景银萍, 杨臻, 黄坤. 轻武器射击精度影响因素剖析[J]. 兵器装备工程学报, 2006, 27(5): 14-16.

- JING Yin-ping, YANG Zhen, HUANG Kun. Analysis of Factors Affecting the Shooting Accuracy of Light Weapons[J]. Ordnance Equipment Engineering Journal, 2006, 27(5): 14-16.
- [113] CHRIS B, DERREK L, CHAPMAN T. A Review of the Soldier's Equipment Burden. 2011.
- [114] YANG Y, WANG Y, XU C, et al. Influences of Rifle Weight, Weight Distribution and Layout on Aiming Comfort[J]. Journal of Beijing institute of Technology: English Edition, 2019, 28(2): 248-256.
- [115] SELINGER J. The Effect of Weight and Weight Distribution on Upper Extremity Muscular Fatigue during Static Rifle Aiming[D]. 2009.
- [116] 罗小明, 朱延雷, 何榕. 基于 sem 的武器装备作战体系贡献度评估方法[J]. 装备学院学报, 2015(5): 1-6.
- LUO Xiao-ming, ZHU Yan-lei, HE Rong. Sem-Based Assessment Method for the Contribution of Weapon Equipment Combat System[J]. Journal of the Academy of Equipment, 2015(5): 1-6.
- [117] KUMAR S S, ASHOK D S. Integration of Virtual Reality and Digital Human Model Simulations for Ergonomic Analysis of Cad Models[J]. Iop Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1123(1): 56.
- [118] 胡永生. “轻武器射击”课程教学改革与探索[J]. 军事体育学报, 2015, 34(4): 116-118.
- HU Yong-sheng. Teaching Reform and Exploration of “Light Weapons Shooting” Course[J]. Journal of Military Physical Education, 2015, 34(4): 116-118.
- [119] 蓝维彬, 杨臻. 95 式训练枪后坐模拟装置设计与分析[C]. Osec 首届兵器工程大会论文集. 2017.
- LAN Wei-bin, YANG Zhen. Design and Analysis of Recoil Simulation Device for 95 Training Gun[C]. Proceedings of Osec First Ordnance Engineering Conference. 2017.
- [120] 郭英, 王俊峰, 袁义, 等. 非侵入式轻武器射击训练系统设计[J]. 四川兵工学报, 2015, 30(2): 116-125.
- GUO Ying, WANG Junf-eng, YUAN Yi, et al. Design of Non-invasive Light Weapon Shooting Training System[J]. Journal of Sichuan Armamentary Engineering, 2015, 30(2): 116-125.
- [121] 杨育兵. 轻武器射击训练平台研究[J]. 军事体育学报, 2011, 30(4): 79-81.
- YANG Yu-bing. Research on Light Weapons Shooting Training Platform[J]. Journal of Military Sports, 2011, 30(4): 79-81.
- [122] 胡德利, 闫金东. 轻武器射击训练实战化改革探索与实践[J]. 军事体育学报, 2014, 33(3): 108-110.
- HU De-li, YAN Jin-dong. Exploration and Practice of the Actual Combat Reform of Light Weapons Shooting Training[J]. Journal of Military Sports, 2014, 33(3): 108-110.
- [123] 王强, 张清涛, 张金荣. 实战化背景下轻武器射击训练改革[J]. 军事交通学院学报, 2016, 18(8): 60-63.
- WANG Qiang, ZHANG Qing-tao, ZHANG Jin-rong. The Reform of Light Weapons Shooting Training Under the Background of Actual Combat[J]. Journal of Military Transportation Academy, 2016, 18(8): 60-63.
- [124] STEPHANIE A T. Shooting Stability: a Critical Component of Marksmanship Performance As Measured Through Aim Path and Trigger Control[J]. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2017, 61(1): 1476-1480.
- [125] LOTFABADI R, GRANER J A, HE J, et al. Effect of Guided Tactical Breathing with Biofeedback on Acute Stress Attenuation and Marksmanship Performance of Novice Shooters[J]. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2020, 64(1): 641-645.
- [126] BURES M, GRNER T, MILLER A, et al. Methodology of Digital Firearm Ergonomic Design[J]. Advances in Ergonomics Modeling, Usability & Special Populations, 2017, 56(12): 23-36.
- [127] 吕惠文, 张炜, 吕耀平, 等. 基于多视角的武器装备体系贡献率评估指标体系构建[J]. 装备学院学报, 2017(3): 36-45.
- LYU Hui-wen, ZHANG Wei, LYU Yao-ping, et al. Construction of the Assessment index System for the Contribution Rate of the Weapon Equipment System Based on Multi-Perspectives[J]. Journal of the Academy of Equipment, 2017(3): 36-45.
- [128] 罗小明, 朱延雷, 何榕. 基于复杂网络的武器装备体系贡献度评估分析方法[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(2): 83-87.
- LUO Xiao-ming, ZHU Yan-lei, HE Rong. Evaluation and Analysis Method of Weapon Equipment System Contribution Based on Complex Network[J]. Firepower and Command Control, 2017, 42(2): 83-87.
- [129] 王楠, 杨娟, 何榕. 基于粗糙集的武器装备体系贡献度评估方法[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(1): 104-107.
- WANG Nan, YANG Juan, HE Rong. Rough Set-Based Assessment Method of Contribution of Weapon Equipment System[J]. Command Control and Simulation, 2016, 38(1): 104-107.
- [130] 钱学森, 王寿云. 论系统工程[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1982.
- QIAN Xue-sen, WANG Shou-yun. On System Engineering[M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1982.
- [131] 何懿. 弹是定心丸——朵英贤院士访谈录[J]. 兵器知识, 2017(8): 18-21.
- HE Yi. A Bullet Is a Pill for Your Heart-interview with Academician DUO Ying-xian[J]. Weapon Knowledge, 2017(8): 18-21.
- [132] 苏国晓, 王鹏, 王湛, 等. 世界轻武器弹药发展方向追踪[J]. 轻兵器, 2020(8): 12-19.
- SU Guo-xiao, WANG Peng, WANG Zhan, et al.

- Tracking the Development Direction of World Light Weapons and Ammunition[J]. Light Weapon, 2020(8): 12-19.
- [133] 魏开功. 发射药制约 95 式枪族性能——与朵英贤院士偶聊[J]. 轻兵器, 2017(14): 10-12.
WEI Kai-gong. The Propellant Restricts the Performance of the 95-Style Gun Family: a Chat with Academician DUO Yingxian[J]. Light Weapon, 2017(14): 10-12.
- [134] 朵英贤. 国外自动武器及其发展[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2001, 22(4): 235-251.
DUO Ying-xian. Foreign Automatic Weapons and their Development[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2001, 22(4): 235-251.
- [135] 人民解放军总后勤部. GJB 4300-2002, 军用防弹衣安全技术性能要求[S]. 北京: 人民解放军总后勤部, 2002.
People's Liberation Army General Logistics Department. GJB 4300-2002, Military Bulletproof Vest Safety Technical Performance Requirements[S]. Beijing: People's Liberation Army General Logistics Department, 2002.
- [136] 王少昆, 孙耀峰. 国外突击步枪发展现状与未来展望[J]. 现代军事, 2017(3): 57-60.
WANG Shao-kun, SUN Yao-feng. The Development Status and Future Prospects of Foreign Assault Rifles[J]. Modern Military, 2017(3): 57-60.
- [137] 王少然. 走过 2019: 国外轻武器装备发展呈览(上)[J]. 轻兵器, 2020(3): 10-17.
WANG Shao-ran. Through 2019: Overview of the Development of Foreign Light Weapons and Equipment (Part 1)[J]. Light Weapon, 2020(3): 10-17.
- [138] 王少然. 走过 2019, 国外轻武器装备发展呈览(下)[J]. 轻兵器, 2020(4): 20-27.
WANG Shao-ran. Through 2019, an Overview of the Development of Foreign Light Weapons and Equipment (Part 2)[J]. Light Weapon, 2020(4): 20-27.
- [139] 张循和. 突击步枪弹的“双 7”趋势[J]. 轻兵器, 2020(6): 4.
ZHANG Xun-he. The “Double 7” Trend of Assault Rifle Shells[J]. Light Weapon, 2020(6): 4.
- [140] 王家磊, 潘兆民. 浅谈枪弹的发展历程[J]. 中国军转民, 2019, 236(12): 47-48.
WANG Jia-lei, PAN Zhao-min. Talking About the Development Process of Bullets[J]. Chinese Army Zhuanmin, 2019, 236(12): 47-48.
- [141] 曹晓东. 探寻“银弹”之旅——美军轻武器枪弹发展回顾与展望[J]. 轻兵器, 2009(15): 10-15.
CAO Xiao-dong. A Journey to Exploring the “Silver Bullet”: Review and Prospect of the Development of the Us Army's Light Arms and Bullets[J]. Light Weapon, 2009(15): 10-15.
- [142] 李向荣, 王海福, 朵英贤. 增阻尾翼对子弹弹道及速度的影响[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(1): 1-4.
LI Xiang-rong, WANG Hai-fu, DUO Ying-xian. The Effect of increased Drag Tail on Bullet Trajectory and Velocity[J]. Journal of Beijing institute of Technology, 2006, 26(1): 1-4.
- [143] 曾鑫, 先苏杰, 许德鹏, 等. 某埋头弹机枪自动机机构设计与动力学分析[J]. 兵工自动化, 2020, 40(3): 4.
ZENG Xin, XIAN Su-jie, XU De-peng, et al. Structural Design and Dynamics Analysis of a Countersunk Machine Gun Automatic Machine[J]. Ordnance industry Automation, 2020, 40(3): 4.
- [144] 杨南镇. 几种无托突击步枪的战斗使用对比分析[J]. 轻兵器, 2000(12): 14-16.
YANG Nan-zhen. Comparative Analysis of Combat Use of Several Unsupported Assault Rifles[J]. Light Weapon, 2000(12): 14-16.
- [145] RICHARD T S, BRANDON F. MOELLER B, et al. Biomechanical and Performance Implications of Weapon Design: Comparison of Bullpup and Conventional Configurations[J]. Human Factors -New York then Santa Monica, 2014(16): 48-59.
- [146] Experimental Study: Effects of Typical Man-Rifle Parameters on Aiming Performance[J]. Journal of Physics Conference Series, 2020, 1507: 102012.
- [147] 王长庚, 徐万和, 徐诚. 人-枪系统中不同自动方式对枪械后坐作用影响研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(5): 741-747.
WANG Chang-geng, XU Wan-he, XU Cheng. Influence of Different Automatic Modes in the Human-Gun System on the Recoil Effect of Firearms[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(5): 741-747.
- [148] 郭浩然, 袁志华, 尹鑫. 回转体半自由枪机机构设计与动力学仿真研究[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 59-64.
GUO Hao-ran, YUAN Zhi-hua, YIN Xin. Design and Dynamics Simulation of the Semi-Free Gun Mechanism of the Slewing Body[J]. Journal of Jinggangshan University (Natural Science Edition), 2020, 41(1): 59-64.
- [149] 郭皎瑞, 姚养无, 张延平, 等. 导气式步枪自动机射击动力学仿真分析[J]. 计算机仿真, 2016, 33(5): 37-41.
GUO Jiao-rui, YAO Yang-wu, ZHANG Yan-ping, et al. Simulation Analysis of Shooting Dynamics of Air-Guided Rifle Automatic Machine[J]. Computer Simulation, 2016, 33(5): 37-41.
- [150] 王力, 杨臻, 邓大建, 等. 基于 isight 的人枪系统多参数动态优化设计[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(11): 61-66.
WANG Li, YANG Zhen, DENG Da-jian, et al. Multi-Parameter Dynamic Optimization Design of Human Gun System Based on Isight[J]. Chinese Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(11): 61-66.
- [151] 胡志刚, 聂宏, 徐诚, 等. 考虑自动机移动的两类机

- 枪动力学模型研究[J]. 兵工学报, 2007(11): 1293-1297.
- HU Zhi-gang, NIE Hong, XU Cheng, et al. Research on Two Types of Machine Gun Dynamic Models Considering the Movement of Automata[J]. Acta Armamentarii, 2007(11): 1293-1297.
- [152] 宫鹏涵, 周克栋, 康小勇, 等. 某自动步枪发射动力学仿真[J]. 弹道学报, 2014, 26(1): 94-97.
- GONG Peng-han, ZHOU Ke-dong, KANG Xiao-yong, et al. Simulation of Launching Dynamics of an Automatic Rifle[J]. Journal of Ballistics, 2014, 26(1): 94-97.
- [153] 张小石, 王宪升, 喻翔, 等. 某自动步枪机构动力学仿真分析[J]. 机械工程与自动化, 2021(4): 64-66.
- ZHANG Xiao-shi, WANG Xian-sheng, YU Xiang, et al. Dynamic Simulation Analysis of an Automatic Rifle Mechanism[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2021(4): 64-66.
- [154] 杨文靖, 李进, 李向东, 等. 现代轻武器之路: 枪族化与模块化[J]. 轻兵器, 2020(5): 8.
- YANG Wen-jing, LI Jin, LI Xiang-dong, et al. The Road to Modern Light Weapons: Gun Familyization and Modularization[J]. Light Weapons, 2020(5): 8.
- [155] 孙丽. 踏遍青山人未老——81式枪族主设计师王志军访谈录[J]. 轻兵器, 2006(9): 14-17.
- SUN Li. Traveling All Over the Green Hills and People Who Are Not Old: an interview with WANG Zhijun, the Chief Designer of the 81-Style Spear Clan[J]. Light Weapon, 2006(9): 14-17.
- [156] 三土 明光. 浴火重生——对越自卫反击战对我国轻武器发展的影响[J]. 轻兵器, 2014(13): 14-20.
- SAN-Tu, MING-Guang. Rebirth From the Ashes-the Impact of the Vietnam Self-Defense Counterattack on the Development of Light Weapons in Our Country[J]. Light Weapons, 2014(13): 14-20.
- [157] 陈杨. 95式班用机枪动力学分析及优化设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
- CHEN Yang. Dynamic Analysis and Optimal Design of Type 95 Class Machine Gun[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005.
- [158] 刘琪. 国外评价苏联 Ak 冲锋枪综述[J]. 现代兵器, 1980(3): 22-26.
- LIU Qi. Review of Foreign Evaluation of Soviet Ak Submachine Guns[J]. Modern Weapon, 1980(3): 22-26.
- [159] 卞荣宣, 方芳, 王萍. 国外轻武器发展中的六个现象[J]. 现代军事, 2004(9): 34-36.
- BIAN Rong-xuan, FANG Fang, WANG Ping. Six Phenomena in the Development of Foreign Light Weapons[J]. Modern Military Affairs, 2004(9): 34-36.
- [160] 曾永珠. 世界轻武器发展趋势[J]. 轻兵器, 1995(5): 7-9.
- ZENG Yong-zhu. The Development Trend of Light Weapons in the World[J]. Light Weapons, 1995(5): 7-9.
- [161] 李东昊, 邹义洪. Scar 步枪结构设计深度解析(上)[J]. 轻兵器, 2020(24): 5.
- LI Dong-hao, ZOU Yi-hong. In-Depth Analysis of Scar Rifle Structure Design (Part 1)[J]. Light Weapon, 2020(24): 5.
- [162] 李东昊. Scar 步枪结构设计深度解析(下)[J]. 轻兵器, 2017, 1(478): 11-16.
- LI Dong-hao. In-Depth Analysis of Scar Rifle Structure Design (Part 2)[J]. Light Weapon, 2017, 1(478): 11-16.
- [163] 马志杰, 崔子鑫. 国产轻武器发展之路: 模块化设计[J]. 轻兵器, 2020(6): 4.
- MA Zhi-jie, CUI Zi-xin. Development of Domestic Light Weapons: Modular Design[J]. Light Weapons, 2020(6): 4.
- [164] PLATEK P, DAMAZIAK K, MALACHOWSKI J, et al. Numerical Study of Modular 5.56 mm Standard Assault Rifle Referring to Dynamic Characteristics[J]. Defence Science Journal, 2015, 65(6): 431-437.
- [165] 赵书彬, 徐诚, 蒋弘毅, 等. 模块化枪族智能化辅助设计策略与方法[J]. 兵工学报, 2021, 42(4): 723-733.
- ZHAO Shu-bin, XU Cheng, JIANG Hong-yi, et al. Intelligent Auxiliary Design Strategy and Method of Modular Gun Family[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(4): 723-733.
- [166] 张本军, 王瑞林, 郑立评, 等. 机枪冲击作用下的人体动力学响应研究[J]. 振动与冲击, 2017(9): 25-29.
- ZHANG Ben-jun, WANG Rui-lin, ZHENG Li-ping, et al. Research on Human Dynamic Response Under the Impact of Machine Gun[J]. Vibration and Shock, 2017(9): 25-29.
- [167] 姜奥, 王刚, 满孝杰, 等. 某机枪输弹机构设计及动力学分析[J]. 机械设计与制造工程, 2019, 50(1): 4.
- JIANG Ao, WANG Gang, MAN Xiao-jie, et al. Design and Dynamics Analysis of a Machine Gun's Delivery Mechanism[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2019, 50(1): 4.
- [168] 黄盼, 廖振强, 张涛. 某通用机枪连发射击稳定性研究[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(6): 132-133.
- HUANG Pan, LIAO Zhen-qiang, ZHANG Tao. Stability of a General-Purpose Machine Gun Burst Shooting[J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2015, 44(6): 132-133.
- [169] 史亦超, 王永娟. 某新型自动发射系统动力学仿真研究[J]. 兵工自动化, 2016(8): 25-32.
- SHI Yi-chao, WANG Yong-juan. Dynamic Simulation Study of a New Automatic Launch System[J]. Ordnance Industry Automation, 2016(8): 25-32.
- [170] 杨帆, 张本军, 刘京生, 等. 某型通用机枪人枪系统建模与仿真[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(1): 58-60.
- YANG Fan, ZHANG Ben-jun, LIU Jing-sheng, et al. Modeling and Simulation of a Certain General-Purpose Machine Gun Human Gun System[J]. Sichuan Armed Forces Journal, 2012, 33(1): 58-60.
- [171] 山口. 轻武器技术扫描(二)——制造技术是轻武器发展的质量保证[J]. 轻兵器, 2001(3): 25-26.

- SHAN Kou. Scanning of Light Weapons Technology (2)-Manufacturing Technology Is the Quality Assurance for the Development of Light Weapons[J]. Light Weapons, 2001(3): 25-26.
- [172] 夏长春. 浅谈轻武器制造技术发展方向[J]. 科学家, 2017, 5(3): 18-19.
- XIA Chang-chun. Talking About the Development Direction of Light Weapons Manufacturing Technology[J]. Scientist, 2017, 5(3): 18-19.
- [173] 陈效华, 刘震, 王永娟, 等. 基于参数化的枪械外形设计策略[J]. 兵工学报, 2000, 21(3): 198-200.
- CHEN Xiao-hua, LIU Zhen, WANG Yong-juan, et al. Design Strategy of Firearms Shape Based on Parameterization[J]. Acta Armamentarii, 2000, 21(3): 198-200.
- [174] 胥泽奇, 李引, 李俊松, 等. 环境工程在某枪族研制过程中的应用[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 12-19.
- XU Ze-qi, LI Yin, LI Jun-song, et al. Application of Environmental Engineering in the Development of a Gun Family[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(6): 12-19.
- [175] 胥泽奇, 宣卫芳. 环境工程在轻武器研制生产中的应用[J]. 装备环境工程, 2005, 2(6): 22-24.
- XU Ze-qi, XUAN Wei-fang. The Application of Environmental Engineering in the Development and Production of Light Weapons[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(6): 22-24.
- [176] 吴利荣, 王建华. 基本可靠性和任务可靠性模型研究[J]. 现代制造工程, 2004(5): 24-25.
- WU Li-rong, WANG Jian-hua. Research on Basic Reliability and Mission Reliability Model[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2004(5): 24-25.
- [177] 宋遁志, 朵英贤. 纳米材料对发射药的影响及身管延寿作用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(9): 1173-1178.
- SONG Qiu-zhi, DUO Ying-xian. The Effect of Nanomaterials on Propellant and the Life Extension Effect of the Barrel[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(9): 1173-1178.
- [178] 江祚峣, 毕晨良, 张权鹏. 浅谈轻武器发射药的配方和工艺[J]. 化工设计通讯, 2017, 43(4): 81.
- JIANG Zuo-yao, BI Chen-liang, ZHANG Quan-peng. On the Formula and Technology of Propellant for Light Weapons[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2017, 43(4): 81.
- [179] 何树国, 尹波. 我国轻武器制造技术发展方向[J]. 四川兵工学报, 2009(12): 45-49.
- HE Shu-guo, YIN Bo. The Development Direction of My Country's Light Weapons Manufacturing Technology[J]. Journal of Sichuan Armamentary Engineering, 2009(12): 45-49.
- [180] 王维广. 非金属材料在轻武器上的近期应用及发展[J]. 现代兵器, 1992(5): 6-10.
- WANG Wei-guang. Recent Application and Development of Non-Metallic Materials in Light Weapons[J]. Modern Ordnance, 1992(5): 6-10.
- [181] 范启胜, 黄雪鹰, 郭宝星. 轻武器用工程塑料热老化试验与寿命预测[J]. 兵工学报, 2006, 27(1): 141-143.
- FAN Qi-sheng, HUANG Xue-ying, GUO Bao-xing. Thermal Aging Test and Life Prediction of Engineering Plastics for Light Weapons[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(1): 141-143.
- [182] 杨英清. 兵器非金属材料“三大规范”编制[J]. 国防技术基础, 2008, 1(1): 25-25.
- YANG Ying-qing. Compilation of “Three Standards” of Non-Metallic Materials for Weapon[J]. National Defense Technology Foundation, 2008, 1(1): 25-25.
- [183] 曾山, 关惠元. 论人类工效学研究中的复杂性问题[J]. 包装工程, 2012(8): 88-91.
- ZENG Shan, GUAN Hui-yuan. On the Complexity of Ergonomics Research[J]. Packaging Engineering, 2012(8): 88-91.
- [184] 王兴宇. 基于产品设计中人机工程学的研究综述[J]. 现代装饰(理论), 2013(1): 110.
- WANG Xing-yu. Research Summary Based on Ergonomics in Product Design[J]. Modern Decoration (theory), 2013(1): 110.
- [185] 王向前, 邓伟明, 杨育兵, 等. 狙击手-枪稳定性与成绩的相关关系研究[C]. 北京: 人-机-环境系统工程大会, 2012.
- WANG Xiang-qian, DENG Wei-ming, YANG Yu-bing, et al. Correlation between Sniper Man-Gun Stability and Performance[C]. Beijing: Man-Machine-Environment System Engineering Conference, 2012.
- [186] 尹长松, 韦哲. 人机工程技术的概念、应用及发展[J]. 医疗装备, 2005, 18(9): 28-31.
- YIN Chang-song, WEI Zhe. The Concept, Application and Development of Man-Machine Engineering Technology[J]. Medical Equipment, 2005, 18(9): 28-31.
- [187] 许为, 葛列众. 人因学发展的新取向[J]. 心理科学进展, 2018, 56(10): 44-49.
- XU Wei, GE Lie-zhong. The New Orientation of Human Factors Development[J]. Advances in Psychological Science, 2018, 56(10): 44-49.
- [188] 朵英贤. 我国轻武器发展面面观[J]. 兵器装备工程学报, 2006, 27(2): 3-4.
- DUO Ying-xian. The Development of Light Weapons in My Country[J]. China Ordnance Equipment Engineering Journal, 2006, 27(2): 3-4.
- [189] 张珍基, 王丽静, 王希群. 轻武器人-机-环境研究手段建设思考[C]. 北京: 中国人-机-环境系统工程大会, 中国系统工程学会, 2007.
- ZHANG Zhen-ji, WANG Li-jing, WANG Xi-qun. Thoughts on the Construction of Light Weapons Man-Machine-Environment Research Methods[C]. Beijing: Chinese Man-Machine-Environment System Engineering Conference, China System Engineering

- Society, 2007.
- [190] 李路铭, 吴超. 人机工程评价研究概况[J]. 人类工效学, 2010, 16(2): 78-80.
- LI Luo-ming, WU Chao. Overview of Ergonomics Evaluation Research[J]. Ergonomics, 2010, 16(2): 78-80.
- [191] 国防科学技术工业委员会. GJB 2873-1997, 军事装备和设施的人机工程设计准则[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1997.
- National Defense Science, Technology and Industry Commission. GJB 2873-1997, Ergonomic Design Guidelines for Military Equipment and Facilities[S]. Beijing: National Defense Science, Technology and Industry Commission, 1997.
- [192] 人民解放军总装备部. GJB/z 131-2002 军事装备和设施的人机工程设计手册[S]. 北京: 人民解放军总装备部, 2002.
- People's Liberation Army General Armament Department. GJB/z 131-2002 Man-Machine Engineering Design Manual of Military Equipment and Facilities[S]. Beijing: People's Liberation Army General Armament Department, 2002.
- [193] 李曙光, 邹渝, 肖楠, 等. 军事装备工效学发展研究[J]. 医疗卫生装备, 2016, 37(11): 145-148.
- LI Shu-guang, ZOU Yu, XIAO Nan, et al. Development of Ergonomics of Military Equipment[J]. Medical and Medical Equipment, 2016, 37(11): 145-148.
- [194] 李峰, 徐诚, 赵彦峻, 等. 面向并行工程的轻武器协同设计研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2007, 31(2): 214-218.
- LI Feng, XU Cheng, ZHAO Yan-jun, et al. Research on Collaborative Design of Light Weapons Oriented to Concurrent Engineering[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, 31(2): 214-218.
- [195] 窦万峰, 詹永照, 谢立. 面向并行工程的协同设计系统研究[J]. 机械设计, 2000, 17(1): 1-5.
- DOU Wan-feng, ZHAN Yong-zhao, XIE Li. Research on Collaborative Design System for Concurrent Engineering[J]. Machine Design, 2000, 17(1): 1-5.
- [196] 郑晓慧, 丁松涛, 王春宇, 等. 军用工效虚拟人研究进展[J]. 人类工效学, 2015, 21(2): 72-75.
- ZHENG Xiao-hui, DING Song-tao, WANG Chun-yu, et al. Research Progress of Military Ergonomic Virtual Humans[J]. Ergonomics, 2015, 21(2): 72-75.
- [197] 宋金峰, 党健铭. 探寻轻武器系统的减重之路[J]. 轻兵器, 2005(18): 9-11.
- SONG Jin-feng, DANG Jian-ming. Exploring the Way to Reduce the Weight of Light Weapon Systems[J]. Light Weapon, 2005(18): 9-11.
- [198] SCATAGLINI S. Phd-Ergonomic of Gesture. Effect of Body Posture and Load on Human Performance. 2017.
- [199] PAL M S, MAJUMDAR D, BHATTACHARYA M, et al. Optimum Load for Carriage By Soldiers At Two Walking Speeds on Level Ground[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2009, 39(1): 68-72.
- [200] CHRISTOPH S, SANDRA W, SUSANNE F, et al. The Effect of the Weight of Equipment on Muscle Activity of the Lower Extremity in Soldiers[J]. The Scientific World Journal, 2012, 2012: 976513.
- [201] WALSH G, LOW D C. Military Load Carriage Effects on the Gait of Military Personnel: a Systematic Review[J]. Applied Ergonomics, 2021, 93: 103376.
- [202] FRANK M, JODIE M C, KANE J M. Can Target Effects Or Discomfort Ratings Discriminate between Small- Arms Weapon Configurations?[J]. Ergonomics, 2020(7): 119-123.
- [203] 杨洋. 单兵装备人机工效试验与数值仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- YANG Yang. Research on Man-Machine Ergonomics Test and Numerical Simulation of individual Soldier-Equipment[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [204] 韩江涛. 美军选择聚合物弹壳枪弹之探析[J]. 轻兵器, 2020, 536(11): 14-18.
- HAN Jiang-tao. Analysis of the U. S. Army's Choice of Polymer Cartridge Shells[J]. Light Weapon, 2020, 536(11): 14-18.
- [205] 仝兴勇. 工程塑料在弹药系统中的应用问题研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- Tong Xingyong. Application of Engineering Plastics in Ammunition Systems[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.
- [206] 张敬慧. 工程塑料在弹药上的应用[J]. 科技创新, 2014(8): 104.
- ZHANG Jing-hui. The Application of Engineering Plastics in Ammunition[J]. Science and Technology innovation, 2014(8): 104.
- [207] 刘斌, 祁荣长. 塑料材料在枪弹上的应用[J]. 轻兵器, 1995(5): 13-15.
- LIU Bin, QI Rong-chang. The Application of Plastic Materials in Bullets[J]. Light Weapon, 1995(5): 13-15.
- [208] 祁荣长. 塑料材料在轻武器上的应用[J]. 轻兵器, 1998(11): 20.
- QI Rong-chang. The Application of Plastic Materials in Light Weapons[J]. Light Weapon, 1998(11): 20.
- [209] 骆佳光. 某轻型步枪关键问题研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- LUO Jia-guang. Key Issues of a Light Rifle[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [210] 鞠涛. 某轻型步枪的方案研究与仿真分析[D]. 南京理工大学, 2009.
- JU Tao. Project Research and Simulation Analysis of a Certain Light Rifle[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [211] BYERS J, LEEMANS R, MCDERMOTT S, et al. Quantifying the Effects of Weapon Weight on Lethality

- Through Holistic Modeling[J]. Industrial and Systems Engineering Review, 2019, 6(2): 75-81.
- [212] 胡扬坡. 轻武器动态参量测试系统设计与试验研究[D]. 南京理工大学.
- HU Yang-po. Design and Experimental Research on the Dynamic Parameter Test System of Light Weapons[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology.
- [213] 张志广. 轻武器射击平台拟人模型研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
- ZHANG Zhi-guang. Research on Anthropomorphic Model of Light Weapons Shooting Platform[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
- [214] 包建东. 人枪相互作用试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- BAO Jian-dong. Experimental Research on Human-Gun interaction[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [215] HANDLEY H. Defining Human Capability From Soldier and Task Data[J]. Proceedings of the Human Factors & Ergonomics Society Annual Meeting, 2017, 61(1): 791-795.
- [216] 金鑫, 周克栋, 赫雷, 等. 基于 lifemod 的人枪系统模型连续射击动力学仿真研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(23): 68-71.
- JIN Xin, ZHOU Ke-dong, HE Lei, et al. Continuous Firing Dynamics Simulation Study of a Human Gun System Model Based on Lifemod[J]. Vibration and Shock, 2015, 34(23): 68-71.
- [217] 赵排航, 李永建, 董金龙, 等. 某型狙击榴弹发射器的膛口制退器优化设计[J]. 火炮发射与控制学报, 2020, 41(2): 59-63.
- ZHAO Pai-hang, LI Yong-jian, DONG Jin-long, et al. Optimal Design of the Muzzle Brake of a Certain Type of Sniper Grenade Launcher[J]. Journal of Artillery Launching and Control, 2020, 41(2): 59-63.
- [218] 齐清. 步枪自动机缓冲技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- QI Qing. Research on Buffer Technology of Rifle Automatic Machine[D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- [219] 苏瑞, 郝秀平. 基于 adams 的冲锋枪缓冲装置设计[J]. 机械管理开发, 2016, 31(1): 24-26.
- SU Rui, HAO Xiu-ping. Adams-Based Submachine Gun Buffer Device Design[J]. Machinery Management Development, 2016, 31(1): 24-26.
- [220] 任冠逢, 赫雷, 黄雪鹰, 等. 基于 Adams 的单兵手持式榴弹发射器动力学仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2016(37): 19-23.
- REN Guan-feng, HE Lei, HUANG Xue-ying, et al. Dynamic Simulation of individual Hand-Held Grenade Launcher Based on Adams[J]. Chinese Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(37): 19-23.
- [221] 贺大为, 李忠新. 弹簧缓冲器对某机枪射频和后坐力的影响分析[J]. 兵工自动化, 2015(1): 44-48.
- HE Da-wei, LI Zhong-xin. Analysis of the influence of Spring Buffer on the Radio Frequency and Recoil Force of a Machine Gun[J]. Ordnance industry Automation, 2015(1): 44-48.
- [222] 李鹏, 陈永才, 狄长春. 轻武器用小型缓冲器结构改进与优化[J]. 火炮发射与控制学报, 2012(4): 34-37.
- LI Peng, CHEN Yong-cai, DI Chang-chun. Improvement and Optimization of Small Buffer Structure for Light Weapons[J]. Journal of Artillery Launch and Control, 2012(4): 34-37.
- [223] 何伟. 某型大口径狙击步枪设计与分析[D]. 南京: 南京理工大学.
- HE Wei. Design and Analysis of a Certain Type of Large-Caliber Sniper Rifle[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology.
- [224] 王洋. 某中口径机枪结构方案与动力学特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- WANG Yang. Structure Scheme and Dynamic Characteristics of a Medium-Caliber Machine Gun[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [225] 焦健, 郝秀平, 苏瑞. 冲锋枪降射频结构设计与动力学分析[J]. 机械设计与制造工程, 2019, 48(12): 25-28.
- JIAO Jian, HAO Xiu-ping, SU Rui. Structural Design and Dynamic Analysis of Submachine Gun Lowering Radio Frequency[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2019, 48(12): 25-28.
- [226] 吴臣, 杨臻, 徐伏波. 弹簧双向工作延迟机构设计与分析[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(4): 29-32.
- WU Chen, YANG Zhen, XU Fu-bo. Design and Analysis of the Spring Bidirectional Working Delay Mechanism[J]. Acta Sichuan Armament, 2015, 36(4): 29-32.
- [227] 姚养无, 王刚, 师翼. 弹簧液压式延迟后坐枪机的动力学仿真[J]. 兵工学报, 2008(5): 518-520.
- YAO Yang-wu, WANG Gang, SHI Yi. Dynamic Simulation of Spring-Hydraulic Delayed Recoil Shotgun[J]. Acta Armamentarii, 2008(5): 518-520.
- [228] TARASZEWSKI M, EWERTOWSKI J. Complex Experimental Analysis of Rifle-Shooter interaction[J]. Defence Technology, 2017, 59(9): 78-89.
- [229] 李伟. 射击瞄准镜光学系统设计[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- LI Wei. Design of Shooting Scope Optical System[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [230] 贺亮, 向霜, 周宏亮, 等. 现代自动步枪瞄具概况[J]. 轻兵器, 2002(6): 20-21.
- HE Liang, XIANG Shuang, ZHOU Hong-liang, et al. Overview of Modern Automatic Rifle Sights[J]. Light Weapon, 2002(6): 20-21.
- [231] PATRICIA B, WILLIAM H, SCRIBNER D. Effects of

- Sight Type, Zero Methodology, and Target Distance on Shooting Performance Measures While Controlling for Ammunition Velocity and individual Experience[R]. Us Army Research Laboratory. 2018.
- [232] 于秋水, 安志勇, 杨瑞宁, 等. 轻武器光学瞄具的视差参数测试[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1732-1737.
- YU Qiu-shui, AN Zhi-yong, YANG Rui-ning, et al. Parallax Parameter Test of Optical Sights for Light Weapons[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(8): 1732-1737.
- [233] 刘宇. 光电技术在轻武器中的新应用[J]. 应用光学, 2006, 27(4): 59-68.
- LIU Yu. New Applications of Photoelectric Technology in Light Weapons[J]. Applied Optics, 2006, 27(4): 59-68.
- [234] 朱昱, 王成, 倪红军. 瞄准镜光学系统的研究现状[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(9): 5-8.
- ZHU Yu, WANG Cheng, NI Hong-jun. Research Status of Sight Optical System[J]. Sensors and Microsystems, 2018, 37(9): 5-8.
- [235] 白鹏飞, 张佳丽. 一种应用于自动步枪的红外枪瞄镜的设计与实现[J]. 光电技术应用, 2020, 171(2): 35-43.
- BAI Peng-fei, ZHANG Jia-li. Design and Implementation of an infrared Gunsight Used in Automatic Rifles[J]. Application of Optoelectronic Technology, 2020, 171(2): 35-43.
- [236] 贾世奎, 赵书国. 夜视技术在枪械瞄具上的应用概况[J]. 舰船防化, 2011(2): 24-28.
- JIA Shi-kui, ZHAO Shu-guo. The Application of Night Vision Technology in Gun Sights[J]. Ship Defense, 2011(2): 24-28.
- [237] 吴安律, 赵丰, 朱兴胜. 步枪配装瞄准镜之趋向[J]. 轻兵器, 2019, 514(1): 15-19.
- WU An-lu, ZHAO Feng, ZHU Xing-sheng. The Trend of Rifle with Scope[J]. Light Weapon, 2019, 514(1): 15-19.
- [238] 姚养无. 轻武器设计中的人机工程学准则[J]. 轻兵器, 1998(9): 49-56.
- YAO Yang-wu. Ergonomics Criteria in the Design of Light Weapons[J]. Light Weapons, 1998(9): 49-56.
- [239] DABHOLKAR A, DUDEKULA S. Postural Risk, Upper Extremity Stability and Hand Dexterity in Rifle Shooters[J]. Journal of Exercise Science & Physiotherapy, 2019, 15(2): 78-88.
- [240] SEKULOVA K, BURES M, KURKIN O, et al. Ergonomic Analysis of a Firearm According to the Anthropometric Dimension[J]. Procedia Engineering, 2015, 48(6): 89-102.
- [241] FREED R. Ergonomic Pistol Grip for Rifles[J]. Applied Ergonomics, 2011, 42(12): 69-78.
- [242] 时培杰. 内在美, 外表也要美——评我国轻武器外形及表面处理[J]. 轻兵器, 2002(4): 43.
- SHI Pei-jie. Inner Beauty, But Also Beauty on the Outside-Comment on the Appearance and Surface Treatment of My Country's Light Weapons[J]. Light Weapon, 2002(4): 43.
- [243] CORNELL M A. A Systems Engineering and Ergonomic Evaluation of Safety and Operational Effectiveness in Traditional Firearms Design[D]. State University of New York At Binghamton. 2007.
- [244] MICHAEL A, CORNELL, MOHAMMAD T, et al. An Ergonomic Comparison of Firearm Safety Mechanisms[J]. Ergonomics, 2008, 51(9): 1394-1406.
- [245] ANDREW B, SIMON B, BRITTANY B, et al. Examining the Impact of Grip Strength and Officer Gender on Shooting Performance[J]. Applied Ergonomics, 2021, 97: 15-26.
- [246] 施云红. 射击过程中人体关键特性分析与评价[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- SHI Yun-hong. Analysis and Evaluation of the Key Characteristics of the Human Body during Shooting[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [247] 陈文明. 主动态人枪握把力相互作用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- CHEN Wen-ming. Interaction of the Main Dynamic Human Gun Grip Force[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [248] 许翰锐. 从工效视角探讨产品设计中的“手性”问题[J]. 包装工程, 2010(6): 57-60.
- XU Han-rui. Discussion on the “Chiral” Problem in Product Design From the Perspective of Ergonomics[J]. Packaging Engineering, 2010(6): 57-60.
- [249] WILLIAM D. Warfighter Integrated Physical Ergonomics tool Development: Needs Analysis and State of the Art Review[J]. Human Factors the Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 2016(12): 78-89.
- [250] MORELLI F, LARKIN G B, REINHART J, et al. Targeted Human Factors and Ergonomics Recommendations for Materiel and Concept Developers From the 2013 US Army Capabilities integration Center Dismounted Non-Network-Enabled Limited Objective Experiment (Arcic Dnne Loe). 2014.
- [251] 余妮泽, 葛列众. 图符的工效学研究综述[C]. 杭州: 心理学与社会和谐学术会议, 2012.
- Yu Ni-ze, Ge Lie-zhong. A Review of Ergonomics Research on Tufu[C]. Hangzhou: Academic Conference on Psychology and Social Harmony, 2012.
- [252] MCDANIEL J W. The Demise of Military Standards May Affect Ergonomics[J]. International Journal of industrial Ergonomics, 1996, 18(5-6): 339-348.
- [253] HOLLANDS J G, SPIVAK T, KRAMKOWSKI E W. Cognitive Load and Situation Awareness for Soldiers: Effects of Message Presentation Rate and Sensory Modality[J]. Human Factors the Journal of the Human

- Factors and Ergonomics Society, 2019, 61(5): 80.
- [254] 张琳霏, 高瞩, 吉晓民. 轻武器瞄准具的形态变化分析与设计研究[J]. 常州工学院学报, 2012, 25(6): 28-32.
- ZHANG Linf-ei, GAO Zhuan, JI Xiao-min. Analysis and Design of Light Weapons Sights' Morphological Changes[J]. Journal of Changzhou institute of Technology, 2012, 25(6): 28-32.
- [255] 殷宏斌, 陈胜, 李松洋. 浅谈轻武器拓展功能接口的发展[C]. Osec 首届兵器工程大会论文集. 2017.
- YIN Hong-bin, CHEN Sheng, LI Song-yang. On the Development of Light Weapons Expansion Function interface[C]. Proceedings of Osec First Ordnance Engineering Conference. 2017.
- [256] 宋金峰, 党健铭. 轻武器效能的倍增器——军用战术导轨面观[J]. 轻兵器, 2006(1): 9-11.
- SONG Jin-feng, DANG Jian-ming. The Multiplier of Light Weapon Effectiveness: a View of Military Tactical Rails[J]. Light Weapon, 2006(1): 9-11.
- [257] 潘金宽. 轻武器发展趋势[J]. 中国军转民, 2019(4): 61-67.
- PAN Jin-kuan. Development Trends of Light Weapons[J]. Transformation of Chinese Military to Civil, 2019(4): 61-67.
- [258] 高国强. 外军轻武器装备发展战略分析[J]. 现代军事, 2015, 461(6): 78-80.
- GAO Guo-qiang. Analysis of the Development Strategy of Foreign Military Light Weapons and Equipment[J]. Modern Military, 2015, 461(6): 78-80.
- [259] 侯捷. 当今世界轻武器系统技术火控的发展趋势[J]. 福建质量管理, 2020(13): 284-285.
- HOU Jie. The Development Trend of Technology Fire Control of Light Weapon Systems in the World today[J]. Fujian Quality Management, 2020(13): 284-285.
- [260] 王雨时. 轻武器弹药爆炸化的发展趋势及其引信的发展问题[J]. 国防技术基础, 2004(2): 23-24.
- WANG Yu-shi. The Development Trend of Light Weapons and Ammunition Explosion and the Development of Fuze[J]. National Defense Technology Foundation, 2004(2): 23-24.
- [261] 孙睿敏, 赵渝江, 邱年生. 信息化技术在轻武器中的应用——从模块化到融合化的发展历程[J]. 四川兵工学报, 2014(45): 75-87.
- SUN Rui-min, ZHAO Yu-jiang, QIU Nian-sheng. The Application of information Technology in Light Weapons: the Development Process From Modularization to integration[J]. Sichuan Armed Forces Journal, 2014: 75-87.
- [262] 王少然. 2020 年度: 国外士兵系统及轻武器发展动向(上)[J]. 轻兵器, 2020(3): 8.
- WANG Shao-ran. 2020: Development Trends of Foreign Soldier Systems and Light Weapons (Part 1)[J]. Light Weapons, 2020(3): 8.
- the Development of Soldier System and Rifle System, Caliber 6.8
- [263] 王少然. 2020 年度: 国外士兵系统及轻武器发展动向(下)[J]. 轻兵器, 2020(4): 6.
- WANG Shao-ran. 2020: Development Trends of Foreign Soldier Systems and Light Weapons (Part 2)[J]. Light Weapons, 2020(4): 6.
- Machine Gun Development, Bullet Development, Photoelectric Sight Development
- [264] 杨金耀. 对单兵作战系统标准化工作的几点思考[J]. 国防技术基础, 2006(11): 26-29.
- YANG Jin-yao. Some Thoughts on the Standardization of individual Combat Systems[J]. National Defense Technology Foundation, 2006(11): 26-29.
- [265] 黄田. 士兵系统综述[J]. 轻武器论证研究, 2002(2): 2-7.
- HUANG Tian. Review of Soldier System[J]. Research on Light Weapons Demonstration, 2002(2): 2-7.
- [266] 黄田. 士兵系统综述(续)[J]. 轻武器论证研究, 2002(4): 2-8.
- HUANG Tian. A Review of the Soldier System (Continued)[J]. Research on Light Weapons Demonstration, 2002(4): 2-8.