

DOI:10.13332/j.1000-1522.20190048

国内外林区几种大型作业车辆研究进展及 车型设计展望

孙术发¹ 张山山¹ 李禹璇¹ 武晋峰¹ 储江伟²

(1. 东北林业大学工程技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 东北林业大学交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:林区作业车辆的应用是林业现代化的重要标志之一。随着林业战略由采伐转型为营林护林, 林区作业车辆的研究依然是林区机械领域的热点。本文采用文献分析法研究了自 1950 年以来国内外林区作业车辆的发展历程, 其中包括集材车、消防车、运兵车和采育联合机, 阐述了林区作业车辆的先进技术, 分析了林区作业车辆的工作特点、用途以及工作环境, 并对新时代林业车辆的发展方向做出展望。近些年国内外林区集材车发展缓慢, 主要集中在作业联合机的研发上。集材车虽然功能日益增多, 绝大多数是在原有车型基础上进行研发, 车型偏小, 车身笨重不灵活。消防车主要由装甲运兵车改装而来, 在逐渐实现灭火要求的同时更注重以人为本的思想, 将安全问题考虑到森林消防车的研发设计中。运兵车主要以全地形车为主, 大多数采用履带式行走机构, 属于军用车辆, 已经实现了功能和载重的系列化。采育联合机在木材生产较发达国家应用较普遍, 人机工程学和自动化程度相对较高, 并逐渐发展无人驾驶技术, 我国对采育联合机研究较少。林区车辆的发展应结合我国实际情况, 综合分析林区车辆的功能要求, 既要充分利用高新技术提高林区装备的技术含量, 又要遵循经济性和实用性原则, 真正做到林区车辆结构的优化设计。在新时代对我国林区作业车辆的研究应拓宽思路, 注重多样化服务和个性化研究。本文结合我国林区环境提出 6 款林区概念车型, 即森林救护车、森林炊事车、森林宿营车、森林浮桥车、森林挂车和森林消防指挥车, 这些车型必将在林区抢险救灾过程中发挥越来越重要的作用。

关键词: 林区车辆; 集材车; 消防车; 运兵车; 采育联合机

中图分类号: S776 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522-(2019)06-0154-13

引文格式: 孙术发, 张山山, 李禹璇, 等. 国内外林区几种大型作业车辆研究进展及车型设计展望 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(6):154-166. Sun Shufa, Zhang Shanshan, Li Yuxuan, et al. Studies of several large-scale forestry operating vehicles at home and abroad and prospect of vehicle type design [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(6): 154-166.

Studies of several large-scale forestry operating vehicles at home and abroad and prospect of vehicle type design

Sun Shufa¹ Zhang Shanshan¹ Li Yuxuan¹ Wu Jinfeng¹ Chu Jiangwei²

(1. College of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;
2. College of Transportation, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: The application of forestry operating vehicles is one of the important symbols of forestry modernization. With the transformation of forestry strategy from logging to management and protection, the research on forestry operating vehicles is still a hot spot in the field of forest equipment. This paper studies the development process of domestic and foreign forestry operation vehicles including skidder, fire engines, personnel carriers, forestry felling and cultivation machines since 1950 by means of literature analysis, describes the advanced technology of forestry operating vehicles, and analyzes the working characteristics, uses and working environment of forestry operating vehicles. In recent years, the development of skidder in

收稿日期: 2019-01-17 修回日期: 2019-03-08

基金项目: 中央高校基金科研业务费专项基金项目(2572016CB12), 哈尔滨市应用技术与开发项目(2015RAQXJ043)。

第一作者: 孙术发, 博士, 副教授。主要研究方向: 林业运输装备。Email:ssfangel@163.com 地址: 150040 黑龙江省哈尔滨市香坊区和兴路 26 号东北林业大学工程技术学院。

责任作者: 储江伟, 博士, 教授。主要研究方向: 汽车运行品质控制理论与方法。Email:cjw_62@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

forest areas at home and abroad has been slow, mainly focusing on the research and development of joint machines. Although the functions of skidder are increasing day by day, they are developed on the basis of the original models. The overall model is small and the body is heavy and inflexible. Fire engines are mainly refitted from armored personnel carriers. While gradually realizing the requirements of fire extinguishing, they pay more attention to the people-oriented idea and take safety issues into account in the research and design of forest fire engine. Personnel carriers mainly use all-terrain vehicles, most of them use tracked walking mechanism, belonging to military vehicles, and have realized the serialization of functions and loads. Forest felling and cultivation machines in wood production are more common in developed countries, and its ergonomics and automation are relatively high, and driverless technologies are gradually developed. There is less research on forestry felling and cultivation machines in China. The development of forestry vehicles should be combined with the actual conditions of our country, and the functional requirements of forestry vehicles should be comprehensively analyzed. We should not only make full use of high and new technology to improve the technology of forestry equipment, but also follow the principles of economy and practicability, so as to truly achieve the optimization design of the structure of forestry vehicles. Based on the forestry environment, this paper puts forward five future development directions of forest vehicles, such as forest ambulance, forest cooking vehicle, forest camping vehicle, forest pontoon vehicle, forest trailer and forest fire command vehicle. These vehicles are bound to shoulder more and more heavy tasks in the process of rescue and disaster relief in forestry.

Key words: forest area vehicle; skidder; fire engine; personnel carriers; forest felling and cultivation machine

林业车辆发展至今已经将近一个世纪,形成了覆盖各种功率的林区作业车辆体系。林区车辆根据底盘的不同主要分为履带式车辆和轮式车辆^[1]。我国林区作业车辆发展至今已经形成了覆盖 7.5 ~ 173 kW 不同功率多种机型的车辆,林业车辆按功能分主要有集材车、森林消防车、运兵车和采育联合机等。集材车是指将伐区的木材从伐木地点汇集到装车场或山上楞场的作业车辆^[2];森林消防车主要功能包括运送消防员、开设隔离带以及利用车辆的水源水泵进行林区灭火;运兵车是运送消防官兵的作业车辆,除了具有运兵作用外还有运送物资的功能;采育联合机主要是林区采伐林木的车辆。林业车辆的应用可有效提高林区作业效率,减轻工人的劳动强度。因此对林业车辆进行研究具有深远意义,对林业车辆的综述研究可全面掌握国内外林业车辆的发展现状和发展趋势,为进一步开展林业车辆的研究奠定基础。

1 集材车

集材车是世界上主流的木材运输设备,为林业的现代化建设做出了巨大贡献^[3]。从 20 世纪 50 年代开始,各个国家纷纷研发集材设备代替人力和畜力集材。北欧、美国、俄罗斯等木材储备量丰富的国家以大型集材设备为主,如美国 CAT-518 轮式集材拖拉机、瑞典集集材和运材于一体的六轮驱动的伏

尔伏 860TC 集材机^[4-7]以及芬兰带有液压机械臂的 Hopkep-440 集材机,大部分集材机底盘是通用的,从而维修和更新速度快^[8-10];日本、德国等森林面积小的国家以小型集材设备为主,如日本岩手富士会社生产的 T-10、T-20、T-30 和 T-50 小型集运机,其功率分别为 13、20、25 和 54 kW。在 20 世纪 60 年代,芬兰已经批量生产配置液压起重臂的四轮折腰转向集材机,实现了集材的半自动化^[11]。我国集材设备研发落后,在 1964 年才研制出第一台 J-50 集材机(图 1a),通过性和爬坡能力强,但对林地破坏性大、机身笨重^[12-13]。1966 年,自主研发出独立式四轮驱动、全液压操纵折腰转向 J-80 型集材拖拉机(图 1b),通过性较差,且没有减震措施^[14]。之后研发了林海-35 轮式集材机、营林-28L、CD12 营林集材拖拉机和 J15 小型集运机等集材设备^[15-16]。这些拖拉机的车型较小,属于环境友好型设备,但只是车型变小,都不如 J-50 集材机应用广泛。到 1998 年,由于林业资源减少,我国开始实施“天保”工程,大部分林区已由主伐生产向营林过度,集材车的研究逐渐放缓。

进入到 21 世纪,各国纷纷投入资金和技术研制自动化程度高的集成化设备,美国 Caterpillar 公司研制出大型 CAT-527 履带式集材拖拉机和 CAT-525 轮式集材拖拉机,配备了液压悬浮式驾驶室,无论林区地形多么崎岖不平,司机都可以维持水平驾驶状态,在考虑车辆集材平稳性的同时也为司机提供了良



a J-50 集材机
J-50 skidder



b J-80 集材机
J-80 skidder



c 约翰迪尔集运机
John Deere gathering machine



d ZX(SY) 120集材机
ZX(SY) 120 skidder



e 多功能轮式集材机
Multifunction wheeled skidder



f 可更换三角履带集材机
Skidder of replaceable triangular

图 1a 引自文献 [12], 图 1b 引自文献 [14], 图 1c 引自网址 https://www.iqiyi.com/w_19ru42dcft.html, 图 1e 引自文献 [24], 图 1f 引自文献 [27].
Fig. 1a is cited from reference [12]. Fig. 1b is cited from reference [14]. Fig. 1c is cited from website https://www.iqiyi.com/w_19ru42dcft.html.
Fig. 1e is cited from reference [24]. Fig. 1f is cited from reference [27].

图 1 各种集材机

Fig. 1 Various skidders

好的驾驶环境^[17]。我国哈尔滨拖拉机厂研制出 80 kW 的 J-110 拖拉机, 填补了国内集材机该功率级别的空白, 而且 80 kW 水冷发动机可以适应热带地区的高温要求^[18]。随着科技的发展, 林业发达国家已使用作业联合机取代了单工序机械, 自装集运机、伐木集材机和造材打枝集材机等的应用实现了林业全面机械化, 提高了作业效率^[19]。美国约翰迪尔公司研发出一款集装卸、集材和运输一体的集运机(图 1c), 配置可 360°旋转的全液压抓斗, 司机只需要在驾驶室操作方向盘就可控制设备的装卸和运输等功能, 操作顺畅, 实现了集材的自动化, 大大减轻了工人的劳动效率。日本日立公司研发的 ZX(SY)120 集材机(图 1d), 通过在林场架设钢缆将树木拖运到指定地点, 也可装配 360°旋转的抓斗实现自装自卸。我国龙剑群等^[20]将自装卸抓斗和集运拖车结合, 利用 Creo 构建该模型, 借助 ADAMS 进行运动和动力学仿真, 证明了该模型的可实施性, 为以后集运机的结构优化提供了参考。

近年来, 我国也研发出几款集材车, 但是都处于试验阶段。东北林业大学王立海等研制了一款小型单履带手扶集材设备, 采用整体式橡胶履带, 汽油机传动, 可作为林区工作人员的代步工具, 进入非常狭窄的空间, 但是在崎岖地面转向不灵活^[21]。葛晓雯等^[22-23]测试出履带预张紧力为车重 40% 时更适于转向, 为车重 50% 时更适于跨越壕沟, 为以后履带

式车辆的设计做出参考。杨德岭^[24]研制了一款多功能轮式集材机(图 1e), 集修简易路、清障、集材和装卸等功能于一体, 最大趟载量 2 m³/趟, 最大爬坡 20°, 但绞盘机设计不合理, 自救能力不足^[25]。刘洁^[26]设计了具有自救系统的小型集材运输机, 对绞盘机进行优化设计, 使用直径 8 mm 的钢丝绳, 卷筒采用优质碳素结构钢 45 钢材料, 最大牵引力为 8 160 N, 但是没有生产出样机。王立海、侯捷建等研制的可更换三角履带集材机(图 1f), 前段设有铲斗和抓具, 履带和轮胎宽度都为 350 mm, 使用橡胶履带对林地破坏性小, 在硬质地面上运行平稳, 但是在软质地面上容易发生断链和脱轨事故^[27]。战丽等^[28]研制出宽度只有 0.78 m 的小型间伐履带式集材机, 转弯半径只有 1.4 m, 绞盘机最大牵引力为 6 150 N, 可以实现自救, 适合人工林作业。

综合国内外林区集材拖拉机的研究进展, 国外对集材车的研究起步较早, 功能种类更齐全, 目前更注重集材联合机的研发。国内外的集材拖拉机逐渐趋于多功能和小型化集材, 以便车辆在没有集材道的情况下可以自由出入而且不破坏树木, 朝着环境友好的方向发展。国内的集材车仍集中在 20 世纪 50—90 年代的研发上, 近年研究的集材机多由农用拖拉机改装, 灵活性较差, 技术上落后。国内林区大部分是原始林区, 路况复杂, 显然履带式集材车更具有优势。未来在集材拖拉机的结构设计应注重结构

的优化和自动化以及智能化创新,同时注重司机的驾驶安全和舒适性,同时,集材车应具有良好的通过性、灵活性和较长的使用寿命。

2 森林消防车

近年来,森林消防车在林区灭火中不断投入使用,在开设防火隔离带,运送消防员,减轻火灾损失,保障消防员的人身安全等方面发挥了至关重要的作用^[29]。

国外森林消防车起步较早,主要集中在美国、日本和欧洲等发达国家。日本研发的自动驾驶消防车可近距离停靠在火场附近,准确地将泡沫喷洒在燃烧物上。芬兰研制的 SISUNA-140 全地形双节履带式消防运兵车由 4 条宽橡胶履带驱动,双节车厢采用铰接柔性连接,运行较平稳,在当时被誉为“草上飞”^[30]。捷克利用 T55 底盘改装成装甲消防车,装配遥控装置,可借助电视在 1 500 m 处对消防车进行遥控操作。在 20 世纪 80 年代初,我国首款森林消防车 YD801 研制成功,从此我国在消防车领域开始蓬勃发展。北京林业大学研制的 6MX 系列车载可卸式消防装置可安装在集材机上用水或化学试剂灭火^[31]; CGL25/5 型轮式森林消防车具有高强度综合灭火能力^[32]; BFC804 履带式森林消防车,基于 85 式履带式装甲输送车的底盘研制而成,在当时被誉为“世界上最好的森林消防车”^[33]。该车水泵扬程 80 m,灭火能力强,较 YD801 型消防车小,在松软泥泞路面行走的通过性更强。

进入到 21 世纪,随着高新技术的发展,森林消防车也逐渐向高智能方向发展。在伊春投入使用的蟒龙全地形双节履带式森林消防车,在驾驶室配有电子罗盘、指挥仪和 GPS 导航定位系统,有利于与航空战备和场外指挥部紧密联系,第二节车厢装配便携式高压接力消防水泵,可以对林区附近水源充分利用,来回往返火场和水源地,有效缩短灭火时间^[34]。2006 年,芬兰研发的 NF-750 消防车(图 2a)亮相百年消防展,该车美观大方,通过性强。保加利亚研发出一款名为“炭火舞女”的消防车,采用新型抗辐射耐高温材料,消防人员无需下车,可利用履带行走机构进入到火场中心进行灭火,保障了消防员的安全。随着高新技术的发展,消防车自动化程度越来越高。2013 年,湖南江麓研制成功 SXD09 多功能森林履带式消防车(图 2b),由 86 式装甲车改进而成,采用军用履带装甲车辆技术,履带宽约 390~450 mm,可爬坡度 32°,在车后部可加装耕翻犁,利用水和泡沫灭火,提高经济效益^[35]。同年,重庆大江工业公司成功研发 6×6 轮式装甲消防车(图 2c),前段设有清障铲,可撞击 8 t 的障碍物,车体采用军用装甲钢板,观察窗为防爆玻璃,可强有力地保障消防员生命安全。该车行驶速度、防护能力、通过性较强,但是只能载员两人。哈尔滨第一机器制造集团有限公司研制的蟒式全地形森林消防车(图 2d),前后节车厢采用连杆结构,可作俯仰和蛇形扭动行走,跨沟越障性能好,自载 4 t 水并配有水泵、水带卷盘和一台水炮,水泵出水最高时速 40 km,有效提高了灭水效率^[36]。



图 2b 引自文献 [35], 图 2d 引自文献 [36], 图 2f 引自文献 [37], 图 2h 引自文献 [38]。Fig. 2b is cited from reference [35]. Fig. 2d is cited from reference [36]. Fig. 2f is cited from reference [37]. Fig. 2h is cited from reference [38].

图 2 森林消防车

Fig. 2 Forest fire engines

2014年,我国三一重工集团设计出一款概念车(图2e),由水箱和前车两部分组成,水箱放置在森林各处。当发生火灾时,前车到达距离火灾最近的水箱点,前车与水箱结合成消防车,进行灭火。

美国研制出一种自动化程度高的奥什科什·不死鸟森林消防车(图2f)。该车装配高分辨率的摄像机和红外扫描系统,能够透过烟雾精确找到火源位置;轮胎内空气压力可以根据地形条件自动调节大小,而且轮胎可根据不同地势上升或下降40 cm适应不同地形条件,能力强,通过性强,可爬60°陡坡。该车可自载10 t水,在8个大胶轮驱动下快速地在崎岖不平的火场中穿行,但是造价昂贵,成本高^[37]。西班牙雷诺D系列4×4消防车(图2g),采用206 kW DTI 7欧6排放发动机,自载3 080 L水,其中的500 L用于车辆的自保系统,当消防车离火源较近时,轮胎与驾驶室上方的喷头可喷出水雾,保证车辆和人员的安全。2017年,东北林业大学与哈尔滨松江拖拉机有限公司联合研制出一台LF1352JP新型履带式森林消防车(图2h),将底盘加宽加长,增加了稳定性。此外,还将该车的功率提升到99.3 kW,纵坡可爬最大坡度48°,爬坡越障能力强^[38]。2018年,东北林业大学研制出一个高压储能式脉冲灭水水枪,安装在美国北极星6×6全地形轮式越野车上,实现了自吸水,提高了可持续灭火时间^[39]。刘凯等^[40]设计出森林火灾识别算法,可全天候自动监测森林火灾,识别准确率达到97%。该算法可与森林消防车结合,实现精确扑救,推进了森林消防智能化发展。随着科学技术的发展,在消防车的研发领域出现越来越多的科学仿真方法和软件对各种类型的车辆进行越障性和稳定性分析,以便做出更科学的比较^[41-43]。

我国在20世纪80年代才开始研究森林消防车,起步较晚,目前大多数森林消防车由军用装甲车底盘改装而成,结构优化不足,造价高,有效运水量小,对林区地形适应能力差。国外森林消防车的研究起步较早,大部分由城市消防车改装而来,在人机工程学和智能化程度方面更高,可以实现火灾现场状况的可视化,从而远程监测火灾现场,全面把握灾情,实现灭火的高效率,但造价高,维护难度和成本较高,我国林区引进较少。我国未来应该注重消防车的自动化研究,思考如何改善森林消防车的结构,提升人机工程学配置,提高森林消防车的林区复杂地形通过能力,解决林区通讯信号差以及巡护难度大等问题。我国也应该抓住机遇,综合分析林区消防车的作业要求,发展符合我国国情的车载无人机技术,使无人机与森林消防车结合,提升消防车的功能范围,这将对我国林业防护管理和救援消防起到

极大地助推作用。

3 运兵车

运兵车主要以全地形车为主,全地形车是采用轮式车辆的传动、履带车辆的行走、铰接车辆的转向的特种车辆,其凭借履带与地面形成的极低接地比压和多自由度的铰接装置实现全地形越野通过性^[44]。对全地形车辆的研制是国内外林区车辆研究的重点。国内外针对车辆系统开展了许多分析和研究,研究的技术路线主要分为4种^[44-48]。

(1)以芬兰NA系列车型为代表的载重2 t的轻型车。芬兰Sisu公司开发的履带式全地形车辆主要有两个型号,NA-140BT和NA-110,可载17人,爬坡能力为60%,主要应用于芬兰军事运兵^[49]。到2014年,中国YQSY集团与意大利ARIS合作推出Qc800铰接履带式全地形车(图3a),爬坡能力达到100%,实现了军民技术的融合。这一系列的车辆宽约2 m,自重5.5 t左右,载重约2 t,但是更加机动灵活,是全地形车辆中转弯半径最小的,只有6 m,离地间隙400 mm相对较高,通过性强。同年,我国山猫全地形车(图3b)亮相珠海航展,可以配置“北斗”导航系统和车载外挂件,该车速度较慢但是擅长极限运动,可翻转70°陡坡,即使车轮损坏一半也可使用^[50]。中东和日本也进行过这方面的研究^[51-52]。随着作业需求的增加,2 t的载重量越来越无法满足需求,因此降低车辆自重,增加载重是一个重要的发展趋势。

(2)以瑞典的Bv系列车型为代表的载重1~8 t的轻、中型车^[53]。赫格隆公司针对军事需求设计出Bv206S(图3c)和BvS10型装甲车,并于2001年和2008年分别推出装甲车升级版BvS10-MK1和BvS10-MK2。这两款车型载重达到了5.5 t,但是自重也相应提高了,自重15 t,最小半径相对较大,达到了11 m,但不如NA系列车型灵活^[54-56]。2015年,赫格隆公司研制出无装甲防护装置的BvS10-Beowulf铰接全地形车(图3d)。该车在Bv系列车型中整体性能达到最优,载重8 t,但自重只有7.5 t左右,可持续行走里程达1 000 km。我国在1990年根据Bv206车型设计出CTW12全地形车(图3e),这是我国对全地形车辆技术自主研发的首次尝试^[57]。

(3)以新加坡Bronco系列为代表的载重4~6 t的中型车。1995年,新加坡研制了第一代Bronco全地形车,自重11.2 t,载重4.8 t,载员16人,采用柴油机启动最高时速达到60 km,但是其爬坡能力只达到了60%,稍逊于BvS10,主要应用于新加坡军事领域。到2017年,第三代Bronco(图3f)被研制成功,载重



图 3a 引自文献 [46], 图 3b 引自文献 [50], 图 3c 引自文献 [57], 图 3d 引自文献 [46], 图 3e 引自文献 [57], 图 3f 引自文献 [46], 图 3g 引自文献 [46], 图 3h 引自参考文献 [57]。Fig. 3a is cited from reference [46], Fig. 3b is cited from reference [50], Fig. 3c is cited from reference [57], Fig. 3d is cited from reference [46], Fig. 3e is cited from reference [57], Fig. 3f is cited from reference [46], Fig. 3g is cited from reference [46], Fig. 3h is cited from reference [57].

图 3 全地形运兵车

Fig. 3 All-terrain personnel carriers

提升至 6 t, 自重保持不变, 爬坡能力达到 100%。我国贵州詹阳动力公司与新科动力公司合作在 2005 年研发 JY813 全地形车, 于 2011 年底基本完成设计研发工作并准备生产。JY813 自重只有 9.5 t, 载重 4.3 t, 载员 10 人, 爬坡能力较差, 约 30°。其采用独特的纯液压驱动方式, 结构较简单, 也为今后国内外全地形车的研究提供思路。

(4) 以俄罗斯 DT 勇士系列为代表的载重 10 ~ 30 t 的重型车, 主要应用于军事后勤物资运输^[58]。19 世纪 60 年代, 前苏联研制出最大载重 30 t 的重型车辆勇士 DT 系列(图 3g)^[59]。该车自重 60 t, 最大载重 30 t, 全车长 16 m, 宽 3 m, 可载员(5 + n)人。为了满足其载重需求, 其负重轮远大于轻中型车辆, 并采用实心的橡胶轮胎。重型车辆由于载重大, 机动灵活性特别差, 最小转弯半径为 17 m, 是林区车辆中最大的。我国在 2008 年通过参考勇士车型研制出 MSM 重型蟒式全地形车(图 3h), 自重 16 t, 已经形成载重 2 ~ 30 t 的系列车型, 通过性和越野性能优越, 最高时速达到 50 km, 但是造价比较昂贵^[60]。

林业运兵车不同于其他林业车辆, 对安全性要求更高。目前的林业运兵车主要是由民用运输车底盘改装而成, 只能在林区良好道路上行驶, 越野道路无法通行。越野道路运兵一般采用全地形车, 其主要应用于军事和森林扑火运兵, 结构趋向于多节式铰接转向发展, 无论是爬坡能力还是速度都优于集

材车和消防车。发达国家的全地形车发展较成熟, 形成了覆盖各种功率的林业运兵车辆体系。我国对于全地形运兵车的研制仍处于发展中阶段, 大多数车型由国外引进, 如中国兵器工业集团有限公司引进俄罗斯技术研制的重型蟒式全地形车载重可达 30 t, 可有效提高林业车辆的载重能力。未来运兵车的研究方向应为创新车型, 提高安全性、车辆的自救和林区通讯能力, 以及在减轻自重的前提下提高载重能力和灵活性。

4 采育联合机

早期, 我国林区采伐作业只是单纯的采伐木材, 故将采伐机械称为“采伐联合机”。现代林区作业首先是保证生态环境下的木材生产和环境恢复, 在采伐基础上增加了抚育功能, 因此一些学者认为“采育联合机”比“采伐联合机”更为合适, 故本文采用“采育联合机”的称谓。

我国采伐设备主要是油锯, 采育联合机的研究较少, 但在北欧、美国等发达国家应用较为普遍^[61-63]。20 世纪 70 年代发达国家的采育联合机就已经具备现代采育联合机的主要功能, 实现了伐木、打枝、造材和归楞等作业的自动化和一体化^[64]。加拿大 Timbco 公司生产的 Timbco T400 系列采育联合机能够在约 25° 的坡度上进行作业; T420 型采育联合机功率达到了 127 kW, 稳定性强但是行驶速度慢。这一系列车

型驾驶室均可四向调平,安全性能高^[65]。进入20世纪80年代,无人驾驶技术在采育联合机上得到应用,美国John Deere推出的Timber jack系列采育联合机依靠GPS系统,结合林区环境制定详细的采伐流程,从而实现无人操作技术。

20世纪90年代,芬兰生产的采育联合机大多数已经装备了电脑控制的自动操作系统、测量系统、监控系统和自我诊断系统,伐木工只需要对准要操作的木材,之后的打枝、伐木和造材作业都可由采育联合机自动完成。Ponsse公司的每台采育联合机都配置OptiControl™系统和Opti4G信息系统^[66-67]。Opti4G信息系统详细记录着每一个树干的精确信息,可以帮助伐木工把原条砍伐成需要的尺寸,提高木材利用率。芬兰的Timberjack 600系列和2600系列的采育联合机,采用轮式底盘,发动机在两个车轮之间,与驾驶室隔离开,司机的驾驶空间也相应变大,噪声污染减小^[68]。

进入到21世纪,采育联合机的结构也逐渐发生转变。芬兰公司首先采用“步行技术”研制出六条腿式的步行采育联合机,采用行走脚与轮胎组合,工人通过智能实时遥控系统自动操作各个腿的动作,利用多腿协作功能实现前进、后退、侧向和拐弯等行走功能^[69]。美国约翰迪尔公司进一步设计研发六腿采育联合机(图4a),通过计算机和传感器根据林区不同坡度来控制机械腿的行走动作,自动化程度较高,按照不同的程序控制设备进行伐木、打枝和集材作业,而且在每一个机械腿底部都有一个圆形脚垫,与

地表接触有一定的缓冲,减小了土壤压实,保证了森林的生态环境^[70-71]。在2015年,东北林业大学与北京航空航天大学也开始着手研究采育联合机的六腿行走装置,确定了升降机构、平衡机构和六腿行走装置的结构设计^[72]。

芬兰Ponsse公司研制的Ergo轮式采育联合机(图4b)。前轴采用悬浮系统,达到了人类工效学较高级别,驾驶员在驾驶室可以始终与不平坦的地面保持垂直,消除了摇晃对驾驶员造成的不适。美国John Deere公司研制出可自动可手动的Timbermatic 300轮式采育联合机,该机可以实现驾驶室50°转动和倾斜^[73-74]。这两款采育联合机都配有测量和控制系统,设定原木的长度和直径,操作人员只要按一下按钮就可以完成整个采伐工作,自动化程度处于行业领先水平。2007年底,北京林业大学开始研制轮式采育联合机CFJ30,实现了伐木、打枝和造材等林区作业的自动控制。该机全部采用全液压传动的方式,操作简单,适合人工林作业,低速行驶下可爬30°的陡坡^[75-77]。2016年,东北林业大学研制出小型履带式采育联合机,采用多片组合圆锯切削系统,成本低,适合人工林中小径木作业,但只是车型较小,没有批量生产^[78-79]。张期奇等^[80]经过试验得出:当抚育间伐为中等强度(25.48%)时,对林木的抑制作用最小。2018年,彭洋等^[81]开发测试出一种基于增量式PID控制算法的自动精准进料控制系统,可应用在采育联合机的机头中。此系统具有较强的适应性,有效提高了采育联合机的造材效率。



a 六腿式步行林业多工序作业机

Six-legged walking forestry multi-process machine



b Ergo轮式采育联合机

Ergo forest felling and cultivation machine

图4a引自文献[74],图4b引自文献[73]。Fig. 4a is cited from reference [74], Fig. 4b is cited from reference [73].

图4 采育联合机

Fig. 4 Forest felling and cultivation machine

由于采育联合机造价高,使我国自主研发受到很多限制,对采育联合机的研究较少且仍处于发展中阶段,使用更多的还是油锯。国外的采育联合机应用较为普遍且自动化程度高,可以实现采育联合机的远程控制,监测采育联合机的工作环境和工作状态,根据工作需要装置不同的伐木头装置砍伐不同大小的树木。在采育联合机的设计制造过程中应

结合林区的实际环境,综合分析采育联合机的功能要求,思考如何提高采育联合机的智能化,提高采育联合机的配置,与自动化和智能化技术紧密联系。

本文综述的4类车型在中国东北林区应用较广泛,南方林区原始林主要以山地为主,地况复杂,坡度较陡,机械作业难度大。人工林采用林业车辆作业,

其中,广西斯道拉恩索公司经营的桉树(*Eucalyptus robusta*)人工林采用了国外引进的采育联合机进行采伐生产,效果良好。

5 新时代林业车辆概念车型设计展望

建国以来,我国已经形成了具有中国特色的林业车辆体系,林业车辆的应用可大幅度提高林区作业效率,改善工人的工作环境,对林业现代化的进程具有重要意义。随着《林业科技创新“十三五”规划》的逐步开展,国家林业战略由采伐转型为营林护林,因此积极推进和发展林业现代化是实现国家林业和草原长期建设的有效途径之一。为实现林业现代化和科技创新,我们对林区作业车辆的研究应该拓宽思路,注重一些个性化和多功能定制服务,比如森林救护车、森林炊事车、森林宿营车、森林浮桥车、森林挂车和森林消防指挥车的研究,这些车型必将在林区抢险救灾过程中担负起越来越重的任务。

5.1 森林救护车

受全球气候因素的影响,我国森林火灾频发,给国家和人民生命财产造成巨大损失。在森林火灾救援中,针对森林火灾的特殊情况进行救援工作的森林救护车,能极大地降低森林火灾的损失。森林救护车采用集材车底盘,救护车采用箱式结构,内部配置氧气瓶、便携式吸引器、便携式呼吸机、折叠担架、心电监测仪、电除颤器、无线电对讲机及行动电话、便携式急救箱(图5)。该救护车对林区地形适应性强,救援设施齐全,适用于火灾救护和林区突发情况的救援和急救。

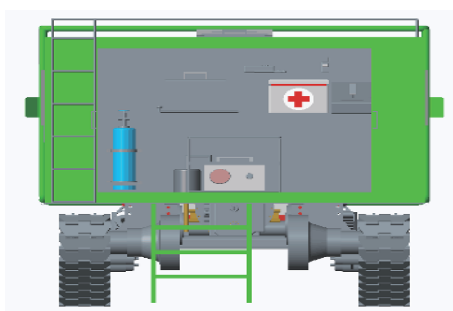


图5 森林救护车

Fig. 5 Forest ambulance

5.2 森林炊事车

随着军民各领域对应急装备需求的不断增加和专用汽车技术的快速发展,应用于后勤应急炊事保障等领域的装备也逐渐增多,森林履带式炊事车(图6)的研制具有较高现实意义。炊事车车厢板侧面可以折叠敞开,增大了有效工作面积。车顶配有通风窗,保证车内通风。该炊事车可配置发电系统,保证野外动力供应。履带式炊事车可进行蒸、炖、炒等炊事

工作,车厢前部配置组合蒸锅、高效加压煎锅、冷藏冰箱,车体中部安装大型灶台,能同时进行多种炊事活动,车体后部负责清洗工作,装有洗碗台,消毒柜。该炊事车林区地形适应性强,车内炊事设备齐全,适用于林区踏察和野外工程作业时提供上百人的主副食和开水服务。

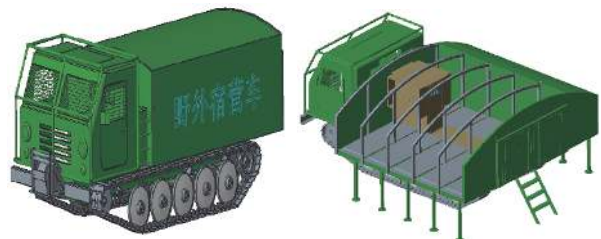


图6 森林炊事车

Fig. 6 Forest caterpillar cooking car

5.3 森林宿营车

随着营林和木材生产等林区作业的不断发 展,林区作业人员的生活也应得到改善。研制一款森林宿营车(图7)可以极大提高林区作业人员的生活条件。宿营车上装采用双侧扩展大板厢式结构,车厢收拢外形为标准运兵车车厢。车厢采用机械压簧扩展方式,扩展顶板为软棚顶,扩展底板为可折叠板,底部由5个辅助支撑座进行支撑,内侧设置可折叠骨架。车头位置安装电动绞盘,可在恶劣环境中进行自救和施救。该车还可装备便携式发电机、开水器、工具箱等常用的生活和工作设备。该宿营车集人员输送和休息为一体,可满足一个班组(10人)的运送和宿营要求。



a 车厢封闭式野外宿营车
Carriage enclosed type forest
camper car

b 车厢展开式野外宿营车
Carriage expansion type forest
camper car

图7 森林宿营车

Fig. 7 Forest camper car

5.4 森林浮桥车

浮桥车在欧洲、美国和日本等发达国家比较常见,我国林区尤其是北方林区需求较大,但市场还未有相应车型。这种车的优点很多,在非工作时,可将浮桥折叠收起,如图8a所示。在工作时,采用自卸吊车放下浮桥,浮桥通过钢丝绳串联,铺于水面之

上,形成宽度为3 m的浮桥,如图8b所示,每辆浮桥车可完成长度16.5 m浮桥的架设,可在林区河流快速架设浮桥,满足 ≤ 10 t车辆的通过。该浮桥车能协助林区进行紧急灾情救援,具有林区桥梁抢修、物资运送等多种用途。

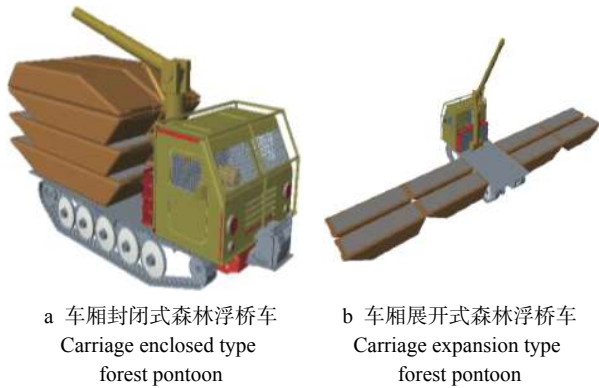


图8 森林浮桥车
Fig. 8 Forest pontoon

5.5 森林挂车

随着国家天然林保护工程的实施,森工企业布局发生很大的变化,由过去的长年生产变成季节性生产,夏季抚育冬季采伐。林区运输也变为季节性运输且周期变短,此外林区路况较差导致木材运输效率低。为保证林区经济的稳定发展,应注重林区运输车辆的技术开发和产品创新。研制一款履带式森林挂车可有效提高运输效率。履带式挂车主要由主车和辅车两部分组成,主车为履带式集材车底盘,辅车为四轮台车(图9)。辅车可通过绞盘装卸到主车上,主车安装马鞍连接座。该挂车林区地形适应性强,承载能力强,稳定性好,动力足,可在林区工程作业时完成木材、电线杆等长大件的运输。



图9 森林挂车
Fig. 9 Forest trailer

5.6 森林消防指挥车

图10为履带式森林消防指挥车模型,该车可采用履带式底盘,上装采用箱式结构,内部空间大,可容纳10人(一个班组)。配套设备包括调音器、功放器、超级计算机、图像传输设备、无线电台、卫星电话、定位系统和监控系统等。车厢上部装置可升降式车载激光雷达和可升降式监控器,可在信号盲区

接收到卫星信号,保障通讯信号畅通。该指挥车对林区地形适应性强,指挥系统功能强大,可作为扑灭大型林火、林区踏察和救援的指挥车辆。



图10 森林消防指挥车
Fig. 10 Forest fire command vehicle

6 结 论

综合国内外林区作业车辆的研究进展,国外林业车辆无论从自动化程度、种类和产品系列化方面都远超我国。我国林区车辆基本上是按照“引进技术和设备、技术吸收、技术整合和创新、研发新设备”的历程发展。集材车主要集中在20世纪八九十年代的研发,近些年设计的集材车大多是在原有车型的基础上进行改进,并没有大的突破。目前国内外集材车更注重集材联合机的研发,正逐步向多功能和环境友好方面发展,绿色生态集材的观点达成了共识。我国森林消防车大多数由装甲运兵车改装而来,在越野性和自动化程度方面已经取得了一定的进步,但与发达国家相比,新型材料和高新技术的应用仍存在不足。目前国内外森林消防车不断与自动化技术相结合,研发耐高温耐辐射的新型材料,逐渐实现以人为本的思想,以确保消防员的安全。国外运兵车起步早,已经发展成熟,我国仍处于技术创新与研发新设备阶段。运兵车大部分采用履带式底盘,实现了全地形的要求,通过性强,但是林区环境恶劣,地形复杂,因此车辆的自救和施救能力有待进一步提升。采育联合机造价高,在木材储备量发达国家研究较普遍,我国由于条件限制,采育联合机研究较少。国外采育联合机更注重人机工程学方面的研究,逐渐实现了自动化的要求和无人操控技术。在林区车辆的研发过程中,应结合我国实际情况,综合分析林区车辆的功能要求,既要充分利用高新技术提高林区装备的技术含量,又要遵循经济性和实用性原则,真正做到林区车辆结构的优化设计。本文针对我国新时代特点和林区复杂的作业环境,提出了6款林区作业概念车型,即森林救护车、森林炊事车、森林宿营车、森林浮桥车、森林挂车和森林消防指挥车,这些车型将在林区工程作业和抢险救灾中发挥着重要作用,进一步推进林业现代化的建设进程。

参 考 文 献

- [1] 李彦兵, 杜兰, 刘宏伟, 等. 基于微多普勒效应和多级小波分解的轮式履带式车辆分类研究[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(4): 894-900.
Li Y B, Du L, Liu H W, et al. Study on classification of wheeled and tracked vehicles based on micro-doppler effect and multilevel wavelet decomposition[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(4): 894-900.
- [2] 张建伟, 王立海. 小型环境友好集材装备的研究进展[J]. 森林工程, 2012, 28(4): 31-36.
Zhang J W, Wang L H. Research progress of mini-type environmental-friendly skidding machine[J]. Forest Engineering, 2012, 28(4): 31-36.
- [3] 李鹏飞, 秦江涛, 刘举胜. 基于模糊 TOPSIS 方法的采伐现场木材运输方案评价[J]. 森林工程, 2017, 33(1): 59-65.
Li P F, Qin J T, Liu J S. Evaluation of timber transport program at the logging scene based on fuzzy TOPSIS method[J]. Forest Engineering, 2017, 33(1): 59-65.
- [4] Meneel J F, Ballard T M. Analysis of site stand impacts from thinning with a harvester-forwarder system[J]. Journal of Forest Engineering, 1992, 4(1): 23-29.
- [5] 陈思成. 某型森林消防车安全性能研究与碰撞仿真分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
Chen S C. Safety research and crash simulation analysis of a forest fire engine[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [6] Laitila J, Asikainen A, Nuutinen Y. Forwarding of whole trees after manual and mechanized felling bunching in pre-commercial thinnings[J]. International Journal of Forest Engineering, 2007, 18(2): 29-39.
- [7] Rush E S. Soft-soil performance of a four-wheel-drive log skidder[J]. Transactions of the ASAE, 1969, 12(4): 546-549.
- [8] 马铨瑛. 国外木材采运小型拖拉机[J]. 国外林业, 1984(1): 44-49.
Ma Q Y. Small tractors for timber harvesting abroad[J]. Foreign Forestry, 1984(1): 44-49.
- [9] Ticktin T. The ecological implications of harvesting non-timber forest products[J]. Journal of Applied Ecology, 2004, 41(1): 11-21.
- [10] 关强, 储江伟, 齐英杰, 等. 美国油锯及集材拖拉机发展概况[J]. 林业机械与木工设备, 1998, 26(5): 11-14.
Guan Q, Chu J W, Qi Y J, et al. Overview of American chainsaw and skid tractor development[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 1998, 26(5): 11-14.
- [11] Edlund J, Löfgren B, Bergsten U. Effects of two different forwarder steering and transmission drive systems on rut dimensions[J]. Journal of Terramechanics, 2012, 49(5): 291-297.
- [12] 朱国玺, 李纪瞻, 陆怀民. 林业拖拉机在松软地面和冰雪地面上的通过性研究[J]. 东北林业大学学报, 1988, 16(1): 37-44.
Zhu G X, Li Q Z, Lu H M. Study on the passability of forestry tractors on soft ground and ice and snow ground[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1988, 16(1): 37-44.
- [13] 何希豪. 试论东北林区集材拖拉机的选型[J]. 林业机械, 1983(2): 10-13.
He X H. Selection of skidding tractors in northeastern forest areas[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 1983(2): 10-13.
- [14] 集材-80 拖拉机冬季试验及使用情况[J]. 林业机械, 1982(1): 8-10.
Winter test and application of skidding-80 tractor[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 1982(1): 8-10.
- [15] 葛树欣, 王红捷, 雒鸫, 等. CD12 型营林集材拖拉机的研制[J]. 林业机械, 1994(4): 11-12.
Ge S X, Wang H J, Luo Y, et al. Development of CD12 type forest skidding tractor[J]. Forestry Machinery, 1994(4): 11-12.
- [16] 刘晓江, 吴永喜, 曹伟杰. 浅谈两种新型集材机具[J]. 森林工程, 1997, 13(1): 35-36.
Liu X J, Wu Y X, Cao W J. Talking about two new types of skidding machines[J]. Forest Engineering, 1997, 13(1): 35-36.
- [17] 张宝玉. 对美、加、日三国集材拖拉机的技术考察所见[J]. 林业机械与木工设备, 1985, 13(4): 43-45.
Zhang B Y. Technical investigation of skid tractors in the United States, Canada and Japan[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 1985, 13(4): 43-45.
- [18] 赵俊宝, 何静华. 集材-110 型轮式拖拉机的研制及应用[J]. 林业机械与木工设备, 2007, 35(6): 51-52.
Zhao J B, He J H. Development and application of skidding-110 wheeled tractor[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2007, 35(6): 51-52.
- [19] Yoshioka T, Aruga K, Nitami T, et al. A case study on the costs and the fuel consumption of harvesting, transporting, and chipping chains for logging residues in Japan[J]. Biomass & Bioenergy, 2006, 30(4): 342-348.
- [20] 龙剑群, 李耀翔. 自装卸式原木集运机抓木机构动力学仿真[J]. 福建林业科技, 2015, 42(4): 53-56.
Long J Q, Li Y X. Dynamics simulation of log loader mechanism of self-loading and unloading forwarders[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2015, 42(4): 53-56.
- [21] 胡忠林. 单履带手扶运输设备的设计与研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
Hu Z L. The research and design of single track hand walking transportation equipment[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [22] 葛晓雯, 侯捷建, 王立海. 集材机可更换三角形履带转向动力学仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(2): 360-367.
Ge X W, Hou J J, Wang L H. Steering dynamics simulation analysis of replaceable triangular track of skidder[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(2): 360-367.
- [23] 葛晓雯, 侯捷建, 王立海. 集材机可更换三角形履带跨越壕沟动力学仿真分析[J]. 林业工程学报, 2016, 1(1): 111-117.
Ge X W, Hou J J, Wang L H. Trench-crossing dynamic simulation of the replaceable triangular track of skidder[J]. Journal of Forestry Engineering, 2016, 1(1): 111-117.
- [24] 杨德岭. 多功能轮式集材机关键参数优选与作业装置设计及试验研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.

- Yang D L. Study on the key parameters optimization and operating device design and testing of the multifunctional wheeled skidder[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.
- [25] 侯捷建, 王立海, 鲍震宇. 多功能轮式集材拖拉机搭载板装置的设计研究 [J]. *森林工程*, 2014, 30(1): 64-67.
- Hou J J, Wang L H, Bao Z Y. Study of logging board device design for a multi-function wheel skidder[J]. *Forest Engineering*, 2014, 30(1): 64-67.
- [26] 刘洁. 林间集材运输机与自救系统的设计与仿真 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
- Liu J. The design and simulation of the forest skidding transporter and self-rescue system[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.
- [27] 侯捷建. 集材机可更换三角形履带主参数优选及动力学仿真分析 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
- Hou J J. Main parameter optimization and dynamical simulation analysis of replaceable triangular track for skidder[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.
- [28] 战丽, 朱晓亮, 马岩. 间伐区小型集材机的设计 [J]. *林业工程学报*, 2016, 1(3): 97-102.
- Zhan L, Zhu X L, Ma Y. The design of small skidder for intermediate cutting area[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2016, 1(3): 97-102.
- [29] 张瑛舟. 履带式消防车在扑救大兴安岭林区森林火灾中的应用 [J]. *森林防火*, 2008(4): 26-27.
- Zhang Y Z. Application of tracked fire truck in fighting forest fire in Daxing'an mountains[J]. *Forest Fire Prevention*, 2008(4): 26-27.
- [30] 于文华, 王海明, 乔启宇. SISUNA-140 全道路车加装灭火装置的研制 [J]. *北京林业大学学报*, 1998, 20(5): 65-69.
- Yu W H, Wang H M, Qiao Q Y. Forest fire fighting unit mounted on the SISUNA-140 rubber tracked all terrain vehicle[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1998, 20(5): 65-69.
- [31] 王海明, 于文华, 乔启宇. 6MX 系列车载可卸式森林消防装置的研制 [J]. *北京林业大学学报*, 1995, 17(增刊 2): 57-61.
- Wang H M, Yu W H, Qiao Q Y. Development of 6MX series vehicle mounted unloadable forest firefighting device[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1995, 17(Suppl. 2): 57-61.
- [32] 森林消防车课题组. CGL25/5 型轮式森林消防车的研制 [J]. *北京林业大学学报*, 1992, 14(3): 1-8.
- Forestry Fire Truck Task Force. Development of CGL25/5 wheeled forest fire engine[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1992, 14(3): 1-8.
- [33] BFC804 型履带式森林消防车 [J]. *中国对外贸易*, 1994(8): 45.
- BFC 804 tracked forest fire engine[J]. *China' Foreign Trade*, 1994(8): 45.
- [34] 何志成. 森林消防车在伊春地区应用效果分析 [J]. *林业勘查设计*, 2017(4): 75-78.
- He Z C. Application effect analysis of forest fire truck in Yichun area[J]. *Forest Investigation Design*, 2017(4): 75-78.
- [35] 中国兵器工业集团江麓公司首批 30 台 SXD09 多功能森林消防车交付武警森林部队 [J]. *新技术新工艺*, 2011(3): 55.
- The first batch of 30 SXD09 multi-function forest fire engines delivered to the armed police forest force by Jianglu Company, China Weapons Industry Group[J]. *New Technology & New Process*, 2011(3): 55.
- [36] 姜晨龙, 丛静华, 汪东. 地面大型森林消防装备发展现状研究 [J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(12): 3595-3597.
- Jiang C L, Cong J H, Wang D. Study on development status of ground large forest firefighting equipment[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(12): 3595-3597.
- [37] 丛静华, 何瑞银, 王家胜. 森林消防车的发展现状和功能分析 [J]. *林业机械与木工设备*, 2006, 34(8): 4-6.
- Cong J H, He R Y, Wang J S. Current situation and function analysis on forest fire fighting truck[J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2006, 34(8): 4-6.
- [38] 孙木发, 任春龙, 李涛, 等. 基于履带式底盘的改进型森林消防车通过性 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(17): 61-67.
- Sun S F, Ren C L, Li T, et al. Trafficability analysis of improved forest fire engine based on crawler chassis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(17): 61-67.
- [39] 崔航, 张运林, 舒展. 轮式森林消防车与高压储能式脉冲灭火水枪的组合与应用 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(3): 109-114.
- Cui H, Zhang Y L, Shu Z. Combination and application of wheeled forest fire engine and high-pressure energy storage pulse fire extinguisher[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2018, 38(3): 109-114.
- [40] 刘凯, 魏艳秀, 许京港, 等. 基于计算机视觉的森林火灾识别算法设计 [J]. *森林工程*, 2018, 34(4): 89-95.
- Liu K, Wei Y X, Xu J G, et al. Design of forest fire identification algorithm based on computer vision[J]. *Forest Engineering*, 2018, 34(4): 89-95.
- [41] 王亚, 陈思忠, 李海涛, 等. 高地面仿形性动力底盘的设计与试验 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(增刊 1): 39-44.
- Wang Y, Chen S Z, Li H T, et al. Design and experiment of high performance profiling terrain chassis with power train[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(Suppl. 1): 39-44.
- [42] 巴兴强, 巴铁魁. 林火巡护与扑救车辆地形通过性仿真分析、实车试验 [J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(8): 105-108.
- Ba X Q, Ba T K. Simulation analysis and test of terrain trafficability of forest fire patrolling and firefighting vehicles[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 38(8): 105-108.
- [43] 巴兴强. 基于 FVP 技术的全路况林火巡护与扑救车辆动态性能研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.
- Ba X Q. Forestry fire patrol and fighting all-terrain vehicle dynamic performance research based on FVP technology[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2009.
- [44] 董超, 成凯, 胡康乐, 等. 全地形铰接式履带车辆俯仰运动性能 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2017, 47(3): 827-836.
- Dong C, Cheng K, Hu K L, et al. Pitching movement performance of all terrain articulated track vehicles[J]. *Journal of Jilin*

- University (Engineering and Technology Edition), 2017, 47(3): 827-836.
- [45] Rehn B, Nilsson T, Olofsson B, et al. Whole-body vibration exposure and non-neutral neck postures during occupational use of all-terrain vehicles[J]. *Annals of Occupational Hygiene*, 2005, 49(3): 267-275.
- [46] 成龙. 铰接履带式全地形车技术发展对比解析[J]. *车辆与动力技术*, 2018(1): 58-64.
- Cheng L. Comparison and analysis of the technological development of articulated tracked all-terrain vehicle[J]. *Vehicle & Power Technology*, 2018(1): 58-64.
- [47] Rodgers G B. The characteristics and use patterns of all-terrain vehicle drivers in the United States[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 1999, 31(4): 409-419.
- [48] Dai L, Wu J. Stability and vibrations of an all-terrain vehicle subjected to nonlinear structural deformation and resistance[J]. *Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation*, 2007, 12(1): 72-82.
- [49] 刘西萍. 芬兰 NA-140 全地形车[J]. *现代兵器*, 1993(4): 19-20.
- Liu X P. Finland NA-140 all-terrain vehicle[J]. *Modern Weaponry*, 1993(4): 19-20.
- [50] 朱茂桃, 蔡炳芳, 束荣军, 等. 全地形车车架结构有限元分析与轻量化设计[J]. *拖拉机与农用运输车*, 2008, 35(3): 47-48.
- Zhu M T, Cai B F, Shu R J, et al. FEA and lightweight design for ATV frame structure[J]. *Tractor & Farm Transporter*, 2008, 35(3): 47-48.
- [51] Sasaki S, Yamada T, Miyata E. Articulated tracked vehicle with four degrees of freedom[J]. *Journal of Terramechanics*, 1991, 28(2/3): 189-199.
- [52] Alhimdani F F. Steering analysis of articulated tracked vehicles[J]. *Journal of Terramechanics*, 1982, 19(3): 195-209.
- [53] Janarthanan B, Padmanabhan C, Sujatha C. Longitudinal dynamics of a tracked vehicle: simulation and experiment[J]. *Journal of Terramechanics*, 2012, 49(2): 63-72.
- [54] 于海鹏. “北欧海盗”BvS10 型装甲全地形车[J]. *汽车运用*, 2014(3): 51-52.
- Yu H P. ‘Viking of Nordic’ BvS10 armored all-terrain vehicle[J]. *Auto Application*, 2014(3): 51-52.
- [55] 张国斌, 张琳. BvS10 全地形装甲车[J]. *国外坦克*, 2014(12): 17-21.
- Zhang G B, Zhang L. BvS10 all-terrain armored vehicle[J]. *Foreign Tanks*, 2014(12): 17-21.
- [56] 曲学春, 姚丁元, 张云. 国外履带式全地形车发展现状[J]. *国外坦克*, 2014(3): 32-39.
- Qu X C, Yao D Y, Zhang Y. Development status of tracked all-terrain vehicles abroad[J]. *Foreign Tanks*, 2014(3): 32-39.
- [57] 兰宇. 全地形双节履带运输车转向性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- Lan Y. Study on steering system of all-terrain articulated tracked vehicle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [58] 李补莲, 叶晓彤. 俄罗斯铰接式全地形车[J]. *国外坦克*, 2011(10): 53-55.
- Li B L, Ye X T. Russian articulated all-terrain vehicle[J]. *Foreign Tanks*, 2011(10): 53-55.
- [59] Cambi M, Certini G, Neri F, et al. The impact of heavy traffic on forest soils: a review[J]. *Forest Ecology & Management*, 2015, 338: 124-138.
- [60] 哈尔滨第一机械集团有限公司. 蟒式全地形双节履带车[J]. *军民两用技术与产品*, 2015(19): 13.
- Harbin First Machinery Group Co., Ltd. Python type all-terrain double tracked vehicle[J]. *Dual Use Technologies & Products*, 2015(19): 13.
- [61] 刘晋浩, 王丹. 谈国内外人工林抚育机械的现状与发展趋势[J]. *森林工程*, 2006, 22(3): 12-14.
- Liu J H, Wang D. The actuality and development trend of plantation tending machines at home and abroad[J]. *Forest Engineering*, 2006, 22(3): 12-14.
- [62] Sarles R L, Whitenack K R. Costs of logging thinnings and a clearcutting in appalachia using a truck-mounted crane, NE-545[R]. Broomall: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. 1984.
- [63] 余爱华, 赵尘. 基于清洁生产的森林采伐装备分析[J]. *西北林学院学报*, 2011, 26(6): 173-176.
- Yu A H, Zhao C. Analysis on forest harvesting equipment of cleaner production[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2011, 26(6): 173-176.
- [64] 顾正平, 沈瑞珍. 世界木材生产机械研究现状与发展趋势[J]. *世界林业研究*, 1999, 12(5): 26-30.
- Gu Z P, Shen R Z. The research status and developing tendency of timber production machinery in the world[J]. *World Forestry Research*, 1999, 12(5): 26-30.
- [65] Wang J, Ledoux C B, Li Y. Simulating cut-to-length harvesting operations in appalachian hardwoods[J]. *International Journal of Forest Engineering*, 2005, 16(2): 17.
- [66] 赵文锐, 刘晋浩. 伐木联合机的现状及发展[J]. *林业机械与木工设备*, 2008, 36(11): 10-12.
- Zhao W R, Liu J H. Current status and development of harvester[J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2008, 36(11): 10-12.
- [67] 沈嵘枫. 林木联合采育机执行机构与液压系统研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- Shen R F. Research on forestry felling & cultivation machine executive mechanism and load-sensing hydraulic system[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [68] 李金波, 王文印, 杨学春, 等. 谈伐木机械的现状与发展[J]. *森林工程*, 1998, 14(1): 31-32.
- Li J B, Wang W Y, Yang X C, et al. Present situation and development of logging machinery[J]. *Forest Engineering*, 1998, 14(1): 31-32.
- [69] 赵红艳. 基于 Vega 的联合伐木机视景仿真系统研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- Zhao H Y. Research on visual simulation system of harvester based on Vega[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [70] 吕光辉, 王乃康, 魏占国, 等. 林木联合采伐机底盘的研究现状

- 与发展趋势[J]. *林业机械与木工设备*, 2010, 38(10): 11-14.
- Lü G H, Wang N K, Wei Z G, et al. Research status and development trend of forest combined harvesters[J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*, 2010, 38(10): 11-14.
- [71] Ismoilov A, Sellgren U, Andersson K, et al. A comparison of novel chassis suspended machines for sustainable forestry[J]. *Journal of Terramechanics*, 2015, 58: 59-68.
- [72] 杨卫杰, 孟兆新, 秦国新. 联合采伐机六足行走装置单足力学解算与分析[J]. *森林工程*, 2015, 31(1): 66-69.
- Yang W J, Meng Z X, Qin G X. The mechanics calculation and analysis of a single foot within the six legged walking device of combined harvesting machine[J]. *Forest Engineering*, 2015, 31(1): 66-69.
- [73] 赵志强. 采伐作业联合机械手的运动学动力学分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- Zhao Z Q. Kinematics and dynamics analysis of the manipulator of a logging harvester[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2010.
- [74] 潘海兵. 多功能联合采伐机平顺性研究及动力学仿真[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.
- Pan H B. Ride comfort research on the multifunctional harvester and dynamical simulation[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2009.
- [75] 鲍际平, 刘晋浩, 魏占国, 等. CFJ30 轮式采伐联合机底盘传动方案的研究[J]. *湖北农业科学*, 2009, 48(10): 2573-2575.
- Bao J P, Liu J H, Wei Z G, et al. Study on the transmission scheme of CFJ30 wheeled log harvester chassis[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2009, 48(10): 2573-2575.
- [76] 郭秀丽. 采伐联合机械手运动分析与控制系统研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- Guo X L. Research on mechanism and control system of manipulator of logging harvester[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.
- [77] 魏占国, 刘晋浩. 轮式林木联合采伐机底盘的设计与研究[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2010, 35(2): 263-268.
- Wei Z G, Liu J H. Design of the chassis for a wheeled forest combined harvester[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2010, 35(2): 263-268.
- [78] 朱建楠. 小型履带式间伐采伐装备的设计与研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- Zhu J N. The research and design of small crawler wood cutting equipment[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2007.
- [79] 杨春梅, 朱建楠, 宋文龙. 小型履带式间伐采伐机切削系统的结构设计[J]. *林业工程学报*, 2016, 1(5): 101-106.
- Yang C M, Zhu J N, Song W L. The structural design of the cutting system of miniature tracked harvester for intermediate cutting[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2016, 1(5): 101-106.
- [80] 张期奇, 董希斌, 张甜, 等. 抚育间伐强度对兴安落叶松中龄林测树因子的影响[J]. *森林工程*, 2018, 34(5): 1-7.
- Zhang Q Q, Dong X B, Zhang T, et al. The effects of different thinning intensities on tree-measurement factors of middle-aged *Larix gmelinii* seedlings[J]. *Forest Engineering*, 2018, 34(5): 1-7.
- [81] 彭洋, 黄青青, 刘晋浩, 等. 联合采伐作业精确进料控制系统开发与测试[J]. *森林工程*, 2018, 34(3): 58-62.
- Peng Y, Huang Q Q, Liu J H, et al. Development and test of accurate feed control system for harvester combined operation[J]. *Forest Engineering*, 2018, 34(3): 58-62.

(责任编辑 吴娟
责任编辑 李文彬)