

DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2017.15.040

油电混合动力工程机械研究现状及发展趋势

刘会勇^{1,2,3}, 熊冶平³, 赵青⁴

(1. 贵州大学机械工程学院, 贵州贵阳 550025; 2. 清华大学摩擦学国家重点实验室, 北京 100084;
3. 南安普顿大学工程与环境学院, 南安普顿 SO17 1BJ 英国; 4. 贵州大学土木工程学院, 贵州贵阳 550025)

摘要: 随着全球化石能源的日益枯竭和环境污染的日益严重, 如何改善工程机械的排放质量和实现工程机械的节能已经引起工程机械生产厂家和用户的广泛关注。油电混合动力技术近年来已经成为工程机械节能降耗的一个重要研究方向, 受到工程机械领域的高度重视。根据研究工作积累和文献资料调研, 总结了国内外主要研究机构对于油电混合动力工程机械的研究现状, 分析了油电混合动力工程机械研制需要解决的关键技术, 对油电混合动力工程机械的发展趋势进行了预测。

关键词: 工程机械; 油电混合动力; 节能; 减排

中图分类号: TH321 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3881 (2017) 15-166-6

Research Status and Development Trends of Petrol-Electric Hybrid Construction Machinery

LIU Huiyong^{1,2,3}, XIONG Yeping³, ZHAO Qing⁴

(1. College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550025, China;
2. The State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. Faculty of Engineering and the Environment, University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, UK;
4. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550025, China)

Abstract: With the global fossil energy exhausting and environmental pollution is getting more and more serious day by day, how to improve the discharge quality and realize energy saving of construction machinery has attracted wide attention of construction machinery manufacturers and users. Petrol-Electric Hybrid technology in recent years has become an important research direction of energy saving and consumption reduction of construction machinery, and has been highly valued by the field of construction machinery. According to the research work and the accumulation of literature, the research status of Petrol-Electric Hybrid construction machinery was summarized in main research institutions at home and abroad, the key technology need to be solved when developing Petrol-Electric Hybrid construction machinery was analyzed, and forecast development trend of Petrol-Electric Hybrid construction machinery is forecasted.

Keywords: Construction machinery; Petrol-Electric Hybrid; Energy saving; Emission reduction

0 前言

工程机械是装备制造业的重要组成部分, 广泛用于国防建设工程、交通运输建设、农林水利建设、工业与民用建筑、环境保护等领域^[1]。传统的工程机械通常采用柴油发动机——液压传动系统——多执行机构的驱动方案, 具有排放质量差、燃油消耗高等缺点^[2]。随着全球化石能源的日益枯竭和环境污染的日益严重, 如何实现工程机械的节能和改善工程机械的排放质量已经引起工程机械生产厂家和用户的广泛关注。

节能和环保是当今世界倡导的主题。随着科学技术的不断进步和世界各国对于节能降耗的渴望, 油电

混合动力技术近年来受到工程机械领域的高度重视, 已经成为工程机械节能降耗的一个重要研究方向。国内外越来越多的研究团队和研究机构对油电混合动力工程机械进行了大量的研究, 并取得了大量的研究成果。

本文作者根据研究工作积累和文献资料调研, 总结了国内外主要研究机构对于油电混合动力工程机械的研究现状, 分析了油电混合动力工程机械研制需要解决的关键技术, 对油电混合动力工程机械的发展趋势进行了预测。

1 油电混合动力系统概述

油电混合动力系统是指采用化学能和电能进行组

收稿日期: 2016-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51365008); 贵州省科技厅联合资金资助项目 (黔科合 LH 字 [2015] 7658 号); 清华大学摩擦学国家重点实验室开放基金资助项目 (SKLTKF13B07); 国家留学基金委 (CSC) 资助项目 (201606675008); 贵州省自然科学基金项目 (黔科合 J 字 [2010] 2247 号)

作者简介: 刘会勇 (1979—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为工程机械混合动力节能控制技术。E-mail: heartext@163.com。

合, 主要包括发动机、发电机、蓄电池/超级电容、电动机等, 其中发动机用于实现将燃油的化学能转化为机械能, 还能够带动发电机进行发电, 蓄电池/超级电容用于存储发电机输出的电能。根据能量源的组成结构分类, 可分为串联式、并联式和混联式油电混合动力系统。

1.1 串联式油电混合动力系统

图 1 为串联式油电混合动力系统。发动机将化学能转化为机械能, 并带动发电机将机械能转化为电能输送给电动机, 将电能转化为机械能驱动负载。蓄电池或超级电容主要有两个功能: (1) 当发动机带动发电机转化的电能超过电动机驱动负载所需要的电能时, 将多余的电能储存在蓄电池或超级电容中。(2) 当发动机带动发电机转化的电能低于电动机驱动负载所需要的电能时, 蓄电池或超级电容将提供电能给电动机。

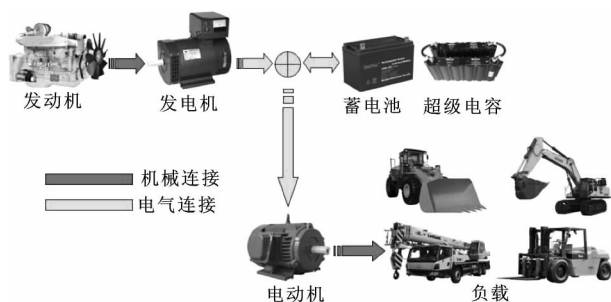


图 1 串联式油电混合动力系统

1.2 并联式油电混合动力系统

图 2 为并联式油电混合动力系统, 发动机和电动机可以单独驱动负载, 也可以共同驱动负载。蓄电池或超级电容一方面可以储存电动机富余的电能, 另一方面当发动机输出的机械能不能够驱动负载时, 可以提供电能给电动机和发动机一起共同驱动负载。

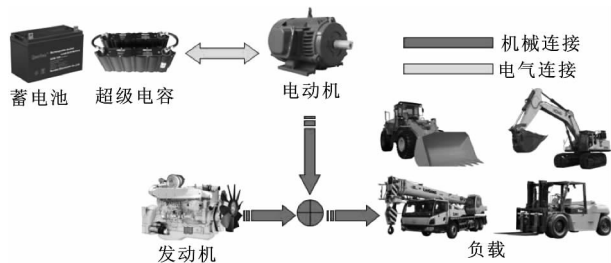


图 2 并联式油电混合动力系统

1.3 混联式油电混合动力系统

图 3 为混联式油电混合动力系统, 发动机和电动机可以单独驱动负载, 也可以共同驱动负载。发动机输出的机械能一方面带动发电机将机械能转化为电能并储存在蓄电池或超级电容中; 另一方面直接驱动负载。发动机和电动机可以单独驱动负载, 也可以共同驱动负载。蓄电池或超级电容一方面可以储存发电机

输出的电能和电动机富余的电能, 另一方面当发动机输出的机械能不能够驱动负载时, 可以提供电能给电动机和发动机一起共同驱动负载。

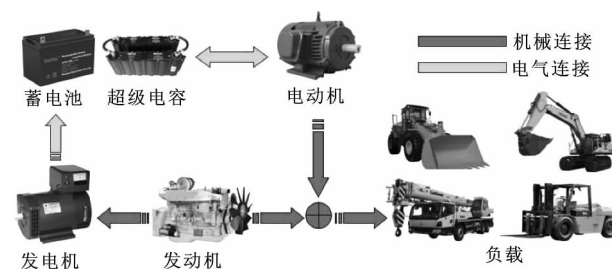


图 3 混联式油电混合动力系统

2 油电混合动力工程机械研究现状

鉴于混合动力系统于 20 世纪 70 年代开始在汽车领域的成功应用, 国内外工程机械制造商和研究机构从 21 世纪初期开始研究混合动力系统在工程机械上的实际应用, 主要的产品包括挖掘机、装载机、起重机、推土机和叉车等。

(1) 油电混合动力挖掘机

2004 年, 日立建机制造了并联式油电混合动力系统的液压挖掘机 EX200, 其能量存储单元采用蓄电池, 行走部分和回转部分均采用电动机驱动, 通过发动机带动发电机发电, 采用整流/逆变器驱动回转电机和行走电机的以及将多余电能存储到蓄电池^[3]。

2004 年 5 月, 日本小松 (KOMATSU) 成功研制了世界上第一台混合动力液压挖掘机的试验机^[4]。2008 年, 小松推出了 20 t 级并联式油电混合动力挖掘机 PC200-8, 采用蓄电池存储能量, 有一个单独的能量回收液压马达和发电机。控制器根据操作信号和反馈信号来控制发动机、电池、整流器、逆变/整流器和控制阀, 节能可达 25%^[5]。

2010 年, 小松推出了低燃油消耗的 HB205/HB205LC-1, 该混动动力系统主要通过回收传统挖掘机浪费掉的回转减速与制动的能量, 以电能的形式储存在蓄电器中。2012 年又推出了改进产品 HB215LC-1, 平均油耗降低了 25%^[6]。

2006 年, 纽荷兰与神户制钢推出了 7 t 并联式油电混合动力液压挖掘机, 其能量存储单元采用蓄电池, 节能效果约为 20%^[7]。2007 年, 神户制钢推出了 HE-O1 串联式油电混合动力液压挖掘机, 其能量存储单元采用蓄电池, 节能效果约为 40%^[8]。

2009 年日本住友 (SUMITOMO) 推出了 20 t 级磁盘起吊式混合动力液压挖掘机, 据说该机可降低燃油消耗 20% 以上^[9]。同年 5 月, 美国凯斯公司 (Case Corp) 推出 CX210B 型混合动力挖掘机, 采用电机驱动上车平台回转, 采用超级电容回收回转平台的制动能^[10]。

2007 年, 贵州詹阳重工推出中国首台串联式油电混合动力挖掘机 JYL621H, 节能效果约为 20%。2009 年, 三一重机推出 SY215C 型并联式油电混合动力液压挖掘机, 节能效果约为 10%。2010 年, 柳工集团推出 CLG922D 混合动力挖掘机, 采用超级电容作为能量存储单元, 节能效果约为 10%。山河智能推出并联式油电混合动力挖掘机 SWE210Hybrid, 采用超级电容作为能量存储单元, 节能效果约为 20%^[8,11-12]。

(2) 油电混合动力装载机

2003 年, 日立建机推出了世界首台采用并联式油电混合动力系统的轮式装载机, 在车辆制动时, 发电机利用制动能发电, 将能量存储在蓄电池中^[13]。

2008 年, Volvo 展出了并联式混合动力轮式装载机 L220F Hybrid, 并于 2009 年正式推出市场, 其能量存储单元采用蓄电池, 可以降低油耗 20% 左右^[14]。

2010 年, 柳工集团推出 CLG862 混合动力装载机, 采用超级电容作为能量存储单元, 节能效果约为 10%^[15]。

2011 年, 日本工程机械制造商川崎在美国 CONEXPO-CON/AGG 2011 工程机械博览会上推出了 65ZV-2 型油电混合动力装载机, 采用电容器储存电能, 比同级别普通装载机节省燃油 35% 以上^[15]。美国约翰·迪尔展示了 644K 型和 944K 型油电混合动力轮式装载机样机, 采用蓄电池储存电能, 与传统轮式装载机相比, 644K 型混合动力装载机的燃油经济性将有望提高 20%, 944K 型有望提高 30% 左右^[16]。

2014 年, 斗山推出了并联式混合动力装载机, 其能量存储单元采用蓄电池, 节能效果约为 35%^[17]。

(3) 油电混合动力起重机

2006 年, 西门子起重机与马士基集团联合开发了 ECO-RTG 驱动系统, 配置超级电容作为储能装置, 与常规 RTG 相比节约燃油成本约 70%^[18]。

2006 年, 日本的安川公司推出了以超级电容器为储能系统的 RTG, 当 RTG 处于怠速等候状况时, 发电机组直接向超级电容充电。而在各运行机构工作时, 超级电容存储的能量和柴油发电机组共同提供所需电能。节能效果由原来的 11% ~ 13% 提升至 40% 以上^[19]。

2003 年, 上海振华重工在 RTG 上装置超级电容进行混合动力的实验, 取得了非常明显的效果。通过加装“超级电容系统”后, HYBRID RTG 发动机功率大大降低, 综合节能率达 35% 以上。2005 年, 上海振华重工配备有超级电容器的 SSA8#RTG 在美国西雅图投入使用, 性能良好, 受到了用户的肯定^[20]。

2009 年, 天津港与中国长航红光港机厂、武汉理工大学合作, 开展了采用超级电容作储能系统的轮

胎式起重机混合动力技术的研究工作, 并开发了第一代 25 t 轮胎式混合动力起重机, 在主要技术参数不低于原机型的前提下, 发动机的功率从 145 kW 降低到 92 kW^[21]。

(4) 油电混合动力推土机

20 世纪 90 年代, 美国卡特彼勒公司开始研究混合动力电传动履带推土机的关键技术, 于 2008 年 3 月在拉斯维加斯举办的 CONEXPO-CON/AGG 博览会上展出第一次生产的电传动履带推土机 D7E^[22]。

2010 年, 卡特彼勒推出了串联式混合动力推土机, 其能量存储单元采用蓄电池, 节能效果约为 30%^[23]。

2010 年, “国家科技支撑计划”设立“通用的商用车与工程机械模块化混合动力总成”项目, 形成以系统集成和电子控制为特征的工程机械混合动力总成的集成开发能力。北京理工大学与山推工程机械股份有限公司合作, 共同承担该项目中混合动力推土机的动力学建模与控制策略研究^[11]。

(5) 油电混合动力叉车

2008 年, 林德在德国国际物流技术与运输系统展览会上以“人机工程、环保、高效”概念为主题, 推出了油电混合动力叉车, 将发动机、电机与锂离子电池通过一套智能管理系统高效的整合在一起共同发挥效能, 该系统可使整车的燃油消耗量降低 25% 左右^[24]。

2009 年, 丰田推出内燃式燃料混合动力叉车, 由柴油发动机、电动马达、镇氢燃料电池等组成。通过将柴油发动机、电动机和镇氢燃料电池进行有效的组合, 能够减少 CO₂ 的排放量与燃油消耗量 50% 左右^[25]。

2009 年, 无锡开普动力机械有限公司推出了首台国产内燃混合动力叉车, 根据发动机的外特性, 利用发动机的最佳工作点把机械能通过发电机转化为电能, 电能再利用电动机驱动叉车, 通过发动机与电动机的配合, 使其燃油消耗和 CO₂ 排放量均降低 30% 以上^[26]。

2008 年, 日本小松推出了 AE50 并联式混合动力叉车, 采用蓄电池和超级电容存储能量, 节能效果约为 20%^[15]。

2010 年, 三菱重工推出了 GRENDiA EX 系列油电混合动力叉车, 利用发动机和电机各自的工作特点, 排列组合成不同的动力工作模式以满足不同的工况需求, 通过配置高容量的镍离子电池, 减小了发动机的功率, 节省 39% 的燃料^[27]。

2011 年, 安徽合力股份有限公司推出了 7 t 混合动力叉车, 采用铅酸蓄电池与超级电容混合动力技术,

其特征在于将势能转化为液压油动能, 推动马达旋转, 带动发电机给叉车充电, 节能效果约为 20%^[28]。

此外, 在油电混合动力工程机械的基础研究方面, 首尔国立大学、汉阳大学、日立建机、韩国斗山等以及国内各主要工程机械生产厂家和科研院所如浙江大学、哈尔滨工业大学、吉林大学、长安大学、同济大学、合肥工业大学、北京理工大学、武汉理工大学等对于油电混合动力工程机械的控制策略与参数匹配方法进行了相关基础研究, 取得了丰硕的研究成果^[3, 6, 11, 15, 29-45]。

3 油电混合动力工程机械关键技术

(1) 结构形式的合理选择。工程机械工况复杂, 不同类型的工程机械具有不同的工作特点, 可能适合不同形式的混合动力系统结构。应根据相关的工程机械不同的工作情况和负载特性进行串联、并联、混联等结构形式的综合比较, 使得相应的工程机械在保证经济性的同时达到较好的节能效果。

(2) 控制策略的优化研究。控制策略对于油电混合动力工程机械的节能减排和综合性能具有重要的作用。工程机械种类繁多, 同一种类的工程机械在不同的工况下也会具有不同的工作特性。因此, 应在充分了解和分析工程机械的负载特性的基础上, 对油电混合动力工程机械的控制策略进行优化研究, 使得油电混合动力工程机械能够达到期望的节能效果。

(3) 元件参数的合理匹配。油电混合动力是典型的机电液一体化产品, 存在机-电-液之间的耦合, 如果能够实现机-电-液各元件之间参数的合理匹配, 将能够大大提高整机的工作性能。应在分析构成油电混合动力工程机械各个组成元件特性的基础上, 分析元件之间的耦合特性, 并在此基础上进一步研究参数匹配方法, 实现提高整机工作性能的同时具有较高的节能效果。

(4) 能量存储元件的有效性能。电池和超级电容作为能量存储元件, 是油电混合动力工程机械中的重要组成部分, 其性能的优劣对于整机工作性能具有很大的影响。工程机械具有负载变化大、工作频繁、工作环境恶劣的特点, 对于能量存储元件的有效性提出了具有功率密度、能量密度、存储容量、使用寿命的要求。

(5) 能量管理系统的可靠设计。油电混合动力工程机械的目标之一是要实现节能, 其中关键环节之一就是能量管理系统。工程机械工作过程中对于不同的工作环境和负载情况对于能量的要求是不同的, 这就提出了合理分配能量的要求。如果能够设计可靠的能量管理系统, 将能够更好实现整机的节能。因此, 能量管理系统的可靠设计是油电混合动力工程机械研制的又一关键技术。

4 油电混合动力工程机械发展趋势

(1) 控制策略的动态优化。对于同一类型工程机械将会有多种控制策略, 能够根据不同的工况进行合理的动态优化, 使得整机工作在最优的状态。

(2) 能量存储单元的小型化。随着电源技术和材料技术的不断发展, 能量存储单元电池和超级电容将会朝着小型化方向发展, 在实现高功率密度的同时, 能够有效降低整机装机质量。

(3) 参数匹配的智能化。能够根据不同的工作环境和负载特点对各个耦合元件进行智能化参数匹配, 自动判断和识别工作状态, 实时调整各个耦合元件参数。

(4) 工作可靠性高。随着机械制造技术、发动机控制技术、计算机技术、信息与控制技术、材料技术等快速发展, 油电混合动力工程机械从元件到整机都将具有较高的工作可靠性。

(5) 集成多功能化。能够适应各种工作环境, 在不同工作环境中具有不同的功能, 并且这些不同的功能都集成在同一台油电混合动力工程机械上。

5 结束语

节能减排是世界各国共同努力的目标, 油电混合动力技术是实现工程机械节能减排的有效途径。目前油电混合动力工程机械主要包括挖掘机、装载机、起重机械、推土机和叉车等, 若要实现油电混合动力工程机械的节能减排, 需根据工程机械的工况和负载特点, 合理选择结构形式、优化控制策略、合理匹配元件参数、提高能量存储元件的性能和设计可靠的能量管理系统。通过攻克以上关键技术, 将能够有效提高油电混合动力整机性能和节能效率。

参考文献:

- [1] 吴庆鸣, 何小新. 工程机械设计 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007.
- [2] 王庆丰, 张彦廷, 肖清. 混合动力工程机械节能效果评价及液压系统节能的仿真研究 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 135-140.
WANG Q F, ZHANG Y T, XIAO Q. Evaluation for Energy Saving Effect and Simulation Research on Energy Saving of Hydraulic System in Hybrid Construction Machinery [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(12): 135-140.
- [3] 肖清. 液压挖掘机混合动力系统的控制策略与参数匹配研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [4] HIROAKI I. Introduction of PC200-8 Hybrid Hydraulic Excavators [M/OL] // <http://www.komatsu.com/company/info/profile/report/pdf/161-E-05.pdf>.
- [5] REED T, DOUCETTE, MALCOLM D, MCCULLOCH. Modeling the Prospects of Plug-in Hybrid Electric Vehicles to Reduce CO₂ Emissions [J]. Applied Energy, 2011, 88(7): 2315-2323.

- [6] 杨杰. 混合动力液压挖掘机实时仿真系统研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [7] SUN H, YANG L F, JING J Q, et al. Control Strategy of Hydraulic/Electric Synergy System in Heavy Hybrid Vehicles [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(1): 668 – 674.
- [8] 姜飞. 混合动力挖掘机回转系统设计及其控制的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [9] YAMASHITA K. Flow Rate Control Device in a Hydraulic Excavator: USA, 6202411 [P]. 2001 – 03 – 20.
- [10] MATSUBARA M, MATOBA N. A New Parallel Hybrid System of Excavator: USA, 2004011256 [P]. 2004 – 01 – 15.
- [11] 王红. 混合动力履带推土机动力学建模及控制策略研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [12] 李鹏. 混合动力履带推土机整车控制策略仿真研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [13] 徐晓美, 唐倩倩, 王哲. 混合动力装载机的研究现状及发展趋势 [J]. 工程机械, 2012, 43(2): 53 – 56.
XU X M, TANG Q Q, WANG Z. Research Status of Hybrid Power Loader and Its Development Trend [J]. Construction Machinery and Equipment, 2012, 43(2): 53 – 56.
- [14] WILSON H W. Off-road Electric Drives Gain Traction [J]. Machine Design, 2008, 80(7): 24.
- [15] 林添良. 混合动力液压挖掘机势能回收系统的基础研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [16] 孟庆勇, 孙辉. 混合动力工程机械闪耀 bauma China 2010 展 [J]. 建设机械技术与管理, 2011, 24(1): 85 – 86.
MENG Q Y, SUN H. Hybrid Construction Machinery at Bauma China 2010 [J]. Construction Machinery Technology & Management, 2011, 24(1): 85 – 86.
- [17] RAMAKRISHNAN R, HIREMATH S S, SINGAPERUMAL M. Modeling, Simulation and Design Optimization of a Series Hydraulic Hybrid Vehicle [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 541: 727 – 731.
- [18] 王吉明, 叶云魁. 西门子节能型轮胎式集装箱起重机电气控制系统 [J]. 起重运输机械, 2009(3): 33 – 35.
WANG J M, YE Y K. Electric Control System of SIE-MENS Energy Saving Tyred Container Crane [J]. Lifting the Transport Machinery, 2009(3): 33 – 35.
- [19] BAYASGALAN D, RYU J S, CHOI Y M, et al. Control of Improved RTGC System with Reduced Fuel Consumption [C]// ECCE Asia, Harbin, June 2 – 5, 2012: 2957 – 2961.
- [20] 金毅. “超级电容系统”轮胎吊 (HYBRID RTG) 在洋山深水港区三期工程的运用 [J]. 港口科技, 2013(6): 1 – 5.
JIN Y. Application of Hybrid RTG in the Yangshan Deep-water Port District (Phase 3) [J]. Science & Technology of Ports, 2013(6): 1 – 5.
- [21] 沈克宇, 周超, 李志俊, 等. 基于超级电容的混合动力起重能量控制系统研究 [J]. 起重运输机械, 2010(11): 65 – 68.
SHEN K Y, ZHOU C, LI Z J, et al. Research on Energy Control System of Hybrid Crane Based on Supercapacitor [J]. Lifting the Transport Machinery, 2010(11): 65 – 68.
- [22] 宋金宝, 赵建军, 杨海清, 等. 履带式推土机电液新技术的应用与发展 [J]. 建筑机械, 2011(15): 73 – 76.
SONG J B, ZHAO J J, YANG H Q, et al. Application and Development of Electro-hydraulic New Technology on Crawler Dozer [J]. Construction Machinery, 2011(15): 73 – 76.
- [23] 许佳音, 叶森森. Caterpillar 系列轮式装载机 [J]. 工程机械, 2014(1): 75.
XU J Y, YE S S. Caterpillar Series Wheel Loaders [J]. Construction Machinery and Equipment, 2014(1): 75.
- [24] 俞剑敏. 新能源叉车的推广 [J]. 现代制造, 2009(43): 16 – 16.
YU J M. Promotion of New Energy Forklift [J]. Maschinen Markt, 2009(43): 16 – 16.
- [25] 张颖, 缪惟民. 新能源开创丰田叉车历史新纪元 [J]. 中国包装工业, 2010(21): 80.
ZHANG Y, MIAO W M. New Energy to Create a New Era of TOYOTA Forklift [J]. China Packaging Industry, 2010(21): 80.
- [26] 李静宇. 无锡开普放歌低碳环保的叉车 [J]. 中国储运, 2010(7): 72 – 73.
LI J Y. Wuxi Kipor Sings Low Carbon Environmental Protection Forklift [J]. China Storage & Transport, 2010(7): 72 – 73.
- [27] 胡扬波. 叉车也可以为低碳和绿色环保做贡献 [J]. 叉车技术, 2010(3): 1 – 4.
HU Y B. Forklift Can also Contribute to Low Carbon and Green Environmental Protection [J]. Forklift Technology, 2010(3): 1 – 4.
- [28] 孙博为, 叶森森. 回望 2011 与技术共进 [J]. 工程机械, 2012, 43(2): 69 – 72.
SUN B W, YE S S. Look Back at 2011 and Advance with Technology [J]. Construction Machinery and Equipment, 2012, 43(2): 69 – 72.
- [29] ENDO H, ITO M, OZEKI T. Development of Toyota's Transaxle for Mini-van Hybrid Vehicles [J]. Jsae Review, 2003, 24(1): 109 – 116.
- [30] CORRADINI M L, CRISTOFARO A, ORLANDO G, et al. Robust Control of Multi-input Periodic Discrete-time Systems with Saturating [J]. International Journal of Control, 2013, 86(7): 1240 – 1247.
- [31] FILLA R. Hybrid Power Systems for Construction Machinery: Aspects of System Design and Operability of Wheel Loaders [J]. Proceedings of ASME IMECE 2009, (13): 611 – 620.
- [32] HOVLAND V, PESARAN A, RICHARD M, et al. Water and Heat Balance in a Fuel Cell Vehicle with a Sodium Borohydride Hydrogen Fuel Processor [J]. SAE: 2003(1): 2271.

- [33] KWON T, LEE S W, SUL S K, et al. Power Control Algorithm for Hybrid Excavator with Super Capacitor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(4): 1447–1455.
- [34] NGUYEN A, LAUBER J, DAMBRINE M. Optimal Control Based Algorithms for Energy Management of Automotive Power Systems with Battery/Supercapacitor Storage Devices [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 87: 410–420.
- [35] PALADINI V, DONATEO T, RISI A D, et al. Super-capacitors Fuel-cell Hybrid Electric Vehicle Optimization and Control Strategy Development [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(11): 3001–3008.
- [36] MONTAZERI-GH M, POURSAMAD A, GHALICHI B. Application of Genetic Algorithm for Optimization of Control Strategy in Parallel Hybrid Electric Vehicles [J]. Journal of the Franklin Institute, 2006, 343(4): 420–435.
- [37] 解泽哲. 扭矩耦合式挖掘机液压混合动力系统设计与控制策略研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [38] 鄢伟利. 混合动力旋挖钻机动力系统设计与控制策略研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [39] 柯小毛. 并联式油电混合动力装载机控制策略研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [40] 李健. 基于遗传算法的混合动力集装箱装载机控制策略研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [41] 孙晖. 轮胎式起重机混合动力系统主电路的研究与设计 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [42] 常晓清. 应用超级电容的轮胎式集装箱起重机节能特性研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [43] 张广清. 并联式混合动力叉车功率分配控制策略的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [44] 吴浩. 并联式混合动力叉车能量回收控制策略的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [45] 徐回. 混联式混合动力叉车整车能量管理策略研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.

(责任编辑: 卢文辉)

人工智能在中国“绽放”，只待时日

人工智能 (AI) 已成为全球科技、商业、投资等领域乃至国家战略博弈层面的“红人”。

令人关注的是，在关乎未来世界秩序与座次的这轮争夺中，中国人从一开始就走在了前面：美国白宫的一份报告指出，中国在深度学习 (AI 一个分支) 领域发表的论文数已经超过美国；咨询公司普华永道预计，与人工智能相关的增长到 2030 年将使全球 GDP 提升 16 万亿美元，其中半数归于中国；中国与人工智能相关的专利数量，在最近几年保持近 200% 的增长……

中国强劲有力的起跑，让西方国家备感惊讶。而最近发布的《新一代人工智能发展规划》就提出分三步走的战略目标，到 2030 年使中国人工智能理论、技术与应用总体达到世界领先水平，成为世界主要人工智能创新中心。

万事俱备，东风已来……

人工智能是时代赋予中国的机遇

人工智能赋予了机器一定的视听感知和思考能力，它进一步将人类从繁重、危险、重复性劳动中解放出来，带动多种传统产业的变革，促进产业模式的调整。可以说，人工智能完全契合了中国经济、社会发展的特点与需求，成为时代赋予中国的一大机遇。

中国作为传统制造业大国，产业大而不强，与美国、日本、德国差距明显，但恰恰是这种深度的不足和体系的不完整，为人工智能对制造业的渗透、改造和升级，提供了空间和便利。

中国有人工智能成长的最佳土壤

中国有底气让人工智能走在前面，除国家政策支持之外，一是数据，二是需求，三是人才。如果把当前的人工智能看作初生的幼狮，那么数据就是它成长为王者的食粮，而中国堪称人工智能的“美食天堂”。

第 40 期《中国互联网络发展状况统计报告》显示：截至今年 6 月，我国网民规模达到 7.51 亿，占全球网民总数的 1/5；我国手机网民规模达 7.24 亿，手机网民占比达 96.3%。

阿里云、亚马逊 AWS 和微软 Azure 被称为全球云计算的“三驾马车”。但中国的阿里云，在单位计算能力和计算性价比上远超同行，具备将世界级的计算能力变成普惠云科技的能力。不断增长的消费需求，是人工智能在中国迅速产业化的另一个源泉。消费的升级，呼唤了供给侧改革。制造业需要为社会提供日趋个性化的优质产品，无疑给了人工智能广阔的发挥空间。

在这一过程中，人才是核心基础。当前中国的 AI 人才力量明显弱于美国等西方国家，但海量的市场需求、优化的就业环境等都将逐步拉近这一差距。

自主创新是兑现预期的唯一途径

科技是一个讲求成果累积和迭代的领域，在人工智能领域，我们也有很多“课”要补。

腾讯研究院近日发布的《中美两国人工智能产业发展全面解读》显示，截至目前，美国融资金额达到 978 亿元，领先中国 54.01%；中国以 635 亿元，仅次于美国，占全球 33.18%。但从创业投资领域角度来看，美国面向全产业链投资，投资领域遍及基础层、技术层和应用层，而中国接受融资的企业主要集中在应用层。

作为人工智能的“灵魂”，芯片是技术要求和附加值最高的环节，产业价值和战略地位远大于应用层创新。所幸，在《新一代人工智能发展规划》中，我国已经提出大力发展人工智能新兴产业，加强与国家科技重大专项的衔接，在“核高基”（核心电子器件、高端通用芯片、基础软件）、集成电路装备等国家科技重大专项中支持人工智能软硬件发展。

中国人工智能，前途无量，但只有坚持自主创新，方能兑现预期。

(内容来源: 互联网)