

钢结构焊接机器人的现状及发展方向

戴为志¹, 俞海涛², 王继文³

1. 中国工程建设焊接协会 北京 100082

2. 浙江精工钢结构集团有限公司 浙江绍兴 312030

3. 安徽工布智造工业科技有限公司 安徽巢湖 230000

摘要: 根据我国最近几年焊接机器人科技成果的研究资料, 详细地阐述了焊接机器人的应用过程及现状, 比较深刻地论述了其技术内涵, 初步揭示了焊接机器人技术的难点和重点, 为焊接机器人技术的工作方向提出了可供参考的意见和建议。

关键词: 焊接机器人; 现状; 发展方向

1 序言

随着中国制造技术的不断发展, 汽车、轨道交通、工程机械、船舶、钢结构及电力装备等行业, 都在加快智能制造的步伐^[1-3]。机器人作为智能制造中不可或缺的关键设备, 如何实现钢结构制造中机器人的快速应用, 一直是工程技术人员不断研究的课题, 并且已经取得了很好的成果。比如, 大兴机场与港珠澳大桥等工程中机器人焊接的成功应用^[4]。因此, 未来随着焊接应用技术不断进步的加速, 钢结构行业普遍采用焊接机器人肯定是焊接应用技术的发展方向之一。

2 钢结构焊接机器人应用过程与现状

1986年, 由中冶集团建筑研究总院与北京市机械施工有限公司合作开发的自动横焊设备, 应用于第一个由国内施工单位实施总承包管理的京城大厦全钢结构超高层建筑, 这是国内焊接自动化设备在建筑钢结构施工现场的首次应用。

2005年, 在鸟巢工程施工期间, 由北京石油化学工业学院和浙江精工钢结构集团有限公司共同研发的焊接机器人在钢结构现场施工中得到了应用, 该机器人基本满足了鸟巢钢结构焊接现场施工的要求。后续又对机器人焊接设备进行了升级改造, 使其具有焊缝轨迹示教、焊接参数储存记忆、焊接电源联动控制等功能, 同时也实现了焊缝电弧跟踪控制、

多层多道自动排道等技术^[5]。

此外, 浙江精工钢结构集团有限公司进口了日本的一套梁贯通节点焊接机器人, 此设备开发应用得比较成功。

近几年, 由中铁山桥集团有限公司、中铁宝桥集团有限公司和唐山开元机器人系统有限公司联合研发的焊接机器人在港珠澳大桥钢箱梁U形肋中得到了成功应用。此外, 还研发了板单元自动组装和机器人定位焊系统、U形肋和板肋单元机器人焊接系统、横隔板单元机器人焊接系统、腹板轨道式机器人焊接系统, 建成了正交异性板单元的机器人焊接生产线。同时, 开发了小型焊接机器人, 用于钢箱梁整体拼装时斜底板对接焊和索塔钢锚箱焊接。

由宝钢钢构有限公司和唐山开元机器人系统有限公司联合研发的焊接机器人在建筑钢结构制造中得到了应用。开发了一套可满足建筑钢结构常规构件进行机器人焊接的系统, 以及适用于非标件机器人焊接的快速、智能软件编制技术; 初步建立了非标件焊接机器人工艺参数数据库, 并尝试解决机器人焊接精度和零部件装配偏差件与安装精度不高的矛盾。

针对箱型钢结构施工安装现场的环缝焊接问题, 清华大学和中铁建设集团有限公司联合开发了一种直-弧组合轨道式焊接机器人系统, 并提出了综合轨迹规划法, 使机器人以最少的自由度在箱型钢

结构环缝焊接时实现焊枪任意空间位姿调整功能，焊接轨迹规划更加简便高效。

另外，中建钢构有限公司、中建三局第一建设工程有限责任公司等钢结构企业也开展了机器人焊接应用实践工作。

综合分析以上机器人焊接技术在钢结构工程中的应用情况可看出，现阶段在桥梁钢结构领域，尤其是桥梁板单元的焊接制造中，焊接机器人的应用已比较成熟，得到行业普遍认可。在建筑钢结构领域，尚处于应用初始阶段，例如机器人焊接小批量、复杂构造或制造和安装精度较低的构件中还存在各种问题，尚不成熟。但随着钢结构构件标准化设计程度的提升、机器人智能化程度的提高以及焊接数据库的丰富，机器人焊接技术必将在钢结构行业发挥重要作用。

提高钢结构构件的模块化、系列化、标准化设计是机器人焊接技术在钢结构行业应用的基础。构建完善的焊接数据库，开发智能编程软件，提升焊接机器人智能化程度，以逐步解决钢结构机器人焊接技术应用的难题，这也许是钢结构焊接机器人技术的工作方向。

需要指出的是，目前在建筑钢结构行业中，焊接机器人大多数应用在钢结构制作工厂，除北京大兴机场钢结构焊接工程成功应用北京石油化工学院研制的焊接机器人，以及浙江精工钢结构集团有限公司在一些重点工程中多次应用了焊接机器人外，在其他钢结构施工现场很少应用。尽管如此，我国在施工现场应用焊接机器人的规模和水平在全球范围内，仍然处于领先地位。

总体上说，随着钢结构用钢量的持续增加和人工成本的不断攀升，开展机器人智能化焊接技术在钢结构领域的研发和应用已成为共识，许多钢结构制造施工企业与科研机构、大专院校或设备厂商联合攻关，取得了一些成果。但相比于汽车、工程机械、锅炉压力容器等焊接机器人利用率较高的行业，钢结构行业机器人焊接技术的应用发展较迟缓，这一点和除日本之外的大多数国家相同。

3 钢结构焊接机器人的具体技术

机器人产业是高端技术产业，是当代科技进步的重要标志，是中国战略新兴产业的重要组成部分。

机器人产业的快速发展有其深厚的客观原因，从长期因素来看，随着中国社会老龄化的不断加深，劳动力资源短缺和劳动力成本不断提高，需要不断装备机器人来代替人的简单重复的劳动；从国内外制造业发展环境来看，客户定制、柔性制造、成本效率，以及全球资源整合成为核心要素，在此大背景下，机器人不断发展成为重要装备。

由于机器人最忠实执行WPS的工艺纪律，故对于操作人员的焊接技术水平要求较低，焊接过程中受人为因素的影响小，并且具有焊缝成形美观，焊接过程稳定，焊接效率高等优势。因此，在厚壁、长焊缝、多位置焊接的建筑钢结构工程建设中，机器人自动焊具有很大的应用空间。

焊接机器人是指具有三个和三个以上可自由编程的轴，并能将焊接工具按要求送到预定空间位置，按要求轨迹及速度移动焊接工具（焊枪）的机器；比较完整的机器人自动焊应有精密焊接质量闭环控制系统、机器人控制电源、焊接过程动态建模与控制、自主跟踪等系统，并隶属于焊接专家系统。

因此，全套技术分为两大部分，即机器人部分和焊接电源部分。目前，由于大专院校专业设置的问题，所以我国既懂得机器人技术，又懂得焊接技术的工程技术人员太少，远远不能满足企业需求。

3.1 机器人部分

机器人同其他自动化机器的根本区别是自动化编程，实现自动焊接，目前编程技术分为以下4种。

(1) 离线编程 针对建筑钢结构构件焊接，试图通过离线编程来解决。由机器人工程师通过专用三维软件对构件上每道焊缝，对机器人运动姿态以及焊接工艺进行描述，生成机器人可执行的焊接指令。

但是目前零部件加工工序基本依靠半自动和手工，焊缝位置偏差大，重复件少，弊端明显，主要表现为：①每个工件均需要离线编程或者人工示教等大量重复性工作，效率低下。②编程根据工程师能力分质量高低，后期无法持续改进。

这个技术理论无差，但其可靠性需实践检验，仅适合单道焊缝的工程。目前离线编程技术是大专院校的主要方向。

(2) 示教程序 根据焊接技师的经验,操纵机器人进行有效焊接,每进行一次,储存一次到数据库,每一种结构(板厚及坡口)都需要作一种成功的示教。在以后的工程中,相同类型的结构可调出直接使用。

显而易见,示教程序工作量巨大,成本很高。但实践证实,示教编程是最可靠的技术之一。

(3) 可视性编程 这是编程的高端技术,要求机器人带有视觉能力,机器人数据库准确而庞大。可想而知,机器人的成本和建立机器人数据库的成本都是非常高的。

(4) 可视性建模编程 指应用相机拍摄现场坡口形态,调出或自动生成相应工艺参数进行自动焊接。目前,这是成本最低、最先进的技术,但是仅限于角焊缝的焊接。

3.2 焊接电源

这部分常被人们忽视,这是因为目前焊接电源质量和可靠性有所提高,在同机器人匹配中比较随意,忽略了自动焊对电弧的要求。同机器人匹配的焊接电源多数为MIG/MAG气体保护焊机,电弧为普通电弧,对脉冲特殊电弧开发研究不够,同时极少数应用埋弧焊机。

焊接工艺的开发研究,离不开焊接设备和材料,焊接机器人自动焊技术应当重视焊接工艺的研究,才能有效地使用机器人。

3.3 焊接机器人贴角焊缝焊接技术

安徽工布智造工业科技有限公司利用Tekla等三维软件,开发了一种应用于金属结构的智能焊接系统,可实现无需人工示教和编程,解决了非标金属结构件的智能焊接问题。

具体创新点如下^[6]:

1) 开发了焊接模拟系数软件(Smart Modter),可快速建立焊缝模型,并同机器人进行数字互联。

2) 开发了构件自动快速定位技术,通过点对点快速定位方式,将模型与构件对应,可实现非标构件一次性自动焊接。

3) 研发了相机自动识别和三维数字处理技术,通过激光定位与纠偏,可快速计算工件位置,自动形成精准的焊接路径及运动姿态。

4) 研发了焊接程序自动生成技术,应用与机器人相匹配的数据格式和接口参数,可自动调用、修改存储焊接参数,根据焊接路径快速生成焊接程序,实现贴角焊缝智能焊接。

该技术工作原理与焊接现场如图1、图2所示。由于其可靠性及效率较高,所以目前在全国范围内贴角焊缝机器人自动焊已得到广泛应用。

3.4 埋弧焊与机器人匹配的贴角焊缝焊接及全熔透焊缝

H形钢智能化焊接制造示范线由浙江精工钢结

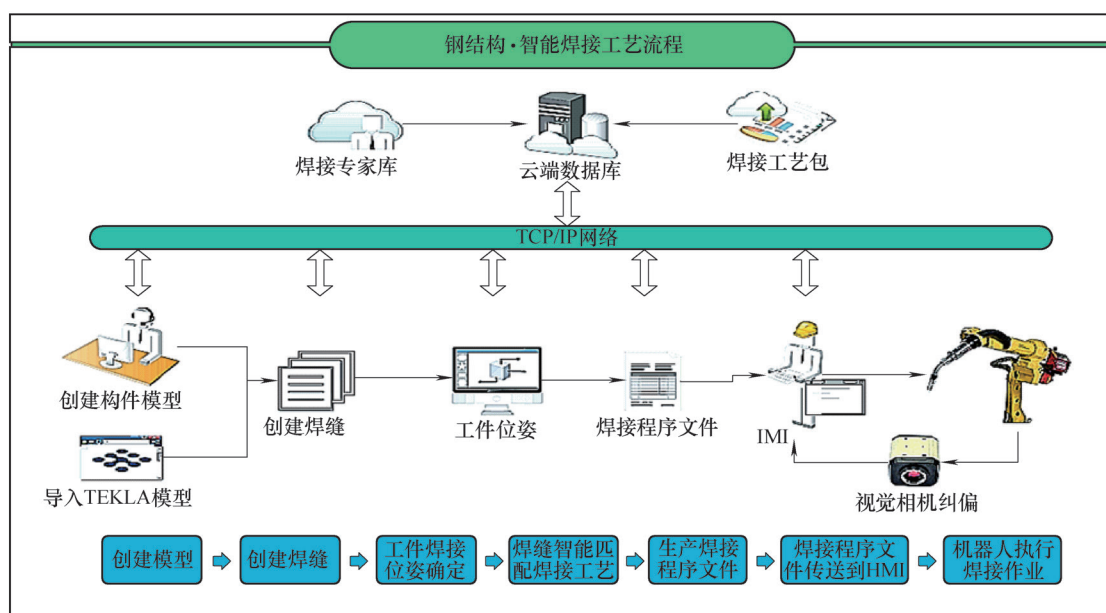


图1 钢结构智能焊接工作原理

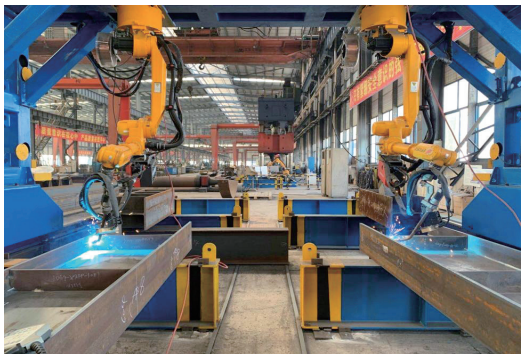


图2 钢结构智能焊接现场

构集团有限公司牵头实施，由中国京冶工程技术有限公司、北京时代科技股份有限公司共同参与建成。该示范线集成了基于焊接起始位置自动识别、激光跟踪的焊道定位、跟踪与纠偏的机器人智能焊接技术，以及相控阵超声波传感的焊接质量在线监测技术等，集成创新了焊道自动纠偏、智能检测，实现了H形钢智能焊接装备国产化，提高了生产效率和产品质量。其中焊枪运动轨迹通过激光跟踪系统控制，焊接位置采用船型焊。以不同翼板、腹板厚度为主要影响因素，焊接参数以标准工艺为基础进行调整，开展了不同规格H形钢构件的焊接试验，形成了用于H形钢机器人智能焊接制造示范线的焊接参数。

H形钢的埋弧焊由机器人智能焊接工作站（见图3）完成，工作站由2套直角悬臂机器人组成，每套机器人由机器人主体、集成控制系统、焊接系统、焊剂输送回收装置、激光跟踪装置、辅助及安全装置等组成。在钢结构行业，我国第一次采用埋弧焊技术同机器人匹配，实用价值很高，并获得了成功。

埋弧焊焊接机器人是机器人智能焊接工作站的主体，主要用于控制、调整焊接机头的运行轨迹



图3 H形钢机器人智能焊接工作站

及位置。集成控制系统由控制柜、手持操作器及连接电缆等组成，具备示教和离线编程等轨迹引导功能和急停、暂停、断点恢复等安全功能。焊接系统由埋弧焊接电源、送丝装置、埋弧焊接机头、线缆及附件等组成，可与控制系统信息连成一体，操作调整更加便捷。焊剂回收装置由焊剂输送回收一体机、电动料斗、输送与回收管路等组成，回收位置可调，其操作集成于控制系统。激光跟踪系统主要由激光器、光学传感器和中央处理器、防护装置、线缆等组成。工作过程中可把焊缝偏移反馈给控制系统，引导焊枪实时跟随焊缝行走。

机器人智能焊接工作站集成了基于接触传感和空间坐标变换的钢结构机器人焊接位置精准识别技术，解决了焊缝定位偏差导致的焊接程序失效问题；集成了激光跟踪定位技术，利用光学传播与成像原理，基于激光扫描区域内各个点的位置信息，检测到实际焊缝与焊枪之间的偏差（见图4）；通过专用的程序算法输出偏差数据，由运动执行机构实时纠正偏差，实现焊接过程焊缝的实时定位、跟踪和纠偏。

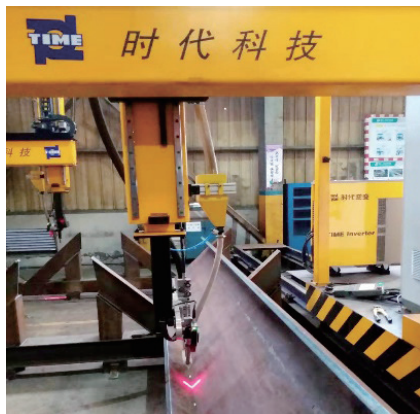


图4 H形钢埋弧焊接激光跟踪

H形钢构件采用机器人智能埋弧焊接，是很容易掌握的实用技术。在工作实践中，焊接速度的平均值为58cm/min，即机器人焊接1m构件的基本时间为6.9min（已考虑H形钢构件有四条焊缝），构件吊装、翻身消耗的辅助时间为基本时间的3%，调程序、设备及过程监控消耗的服务时间为基本时间的5%，休息时间为基本时间的2%，即焊接1m构件总耗时7.6min，且机器人智能化焊接工作站配有2套机器人焊接系统，则机器人智能化焊接工序的时间定额为0.2632m/min，每日可加工构件284.2m。

埋弧焊工艺同机器人匹配,是建筑钢结构焊接机器人在一次成形的焊接工程应用中最实用的技术。由于埋弧焊技术具有自动化程度高、熔敷量大、焊接性能可靠等特点,所以同机器人匹配如虎添翼。另外,埋弧焊容易一次成形,因此避开了焊接坡口热变形的问题,使机器人工作稳定可靠,不仅提高了生产效率和焊接质量,而且使贴角焊缝达到教科书式的成形质量,如图5所示。

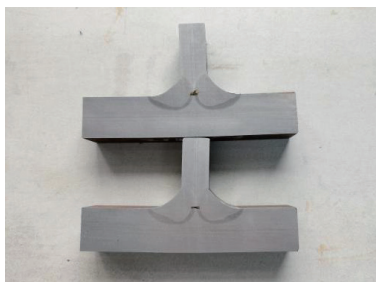


图5 埋弧焊工艺同机器人匹配贴角焊缝宏观金相

此外,该技术实现了25mm板厚的H形钢不开坡口一次成形全熔透,焊接接头的力学性能和微观金相全部达到技术标准要求,这对提高钢结构制作效率和质量有很大意义。贴角焊缝全熔透宏观金相如图6所示。

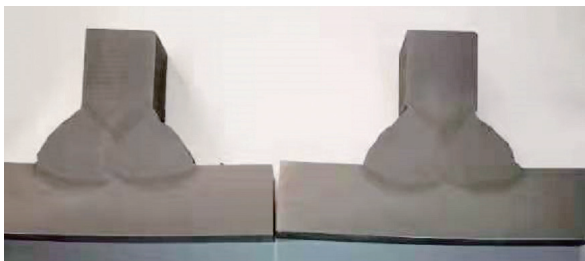


图6 埋弧焊工艺同机器人匹配贴角焊缝全熔透宏观金相

3.5 采用MIG/MAG技术同机器人匹配

有专家断言,在目前的焊接设备状况下,提高熔敷金属的效率必须从新型电弧研究开发开始。目前我国的新型电弧研究开发已初见成效。

快速脉冲压缩电弧工艺适合与焊接机器人匹配,该技术熔敷效率高,熔深大,基本无飞溅。浙江精工钢结构集团有限公司试验结果显示,厚度为45mm的全熔透焊缝模拟机器人自动焊,用快速脉冲压缩电弧工艺需焊接28道;而模拟机器人自动焊采用相同焊接参数,用传统GMAW常规纯CO₂保护需焊接32道。经分析,快速脉冲压缩电弧焊接工艺较传统GMAW常规纯CO₂焊接工艺,熔敷效率提高

了12.5%。

4 焊接机器人技术的发展方向

在我国,随着制造业更新换代、转型升级,国内对工业机器人的需求,已经不再是高端用户的概念,众多中小企业对使用工业机器人有更加强烈和迫切的意愿,这为我们国产机器人的发展提供了很好的时机。同时,借助独特的服务优势和了解国情的优势,可以设计出更加满足国情的强适用型弧焊机器人系统。

机器人焊接技术的核心是信息技术,是融合人的感官信息(焊接过程视觉、听觉、触觉)、经验知识(熔池行为、电弧声音、焊缝外观)、推理判断(焊接经验知识学习、推理与决策)、焊接过程控制以及工艺各方面专门知识的交叉学科。突破机器人焊接智能化关键技术,是机器人智能焊接技术在钢结构领域应用的迫切需要。

针对机器人智能化焊接技术应用难题,国内外各研究机构及钢结构企业开展了大量研究工作,主要集中在钢结构机器人焊接数据库、焊缝跟踪技术研究、钢结构构件智能化制造生产线等方面。

4.1 焊接数据库技术

数据库是钢结构机器人焊接的核心,开发研究工作量大且十分复杂。包括轨迹规划、焊枪位姿、焊接电流、电弧电压及焊接速度等多个焊接参数。由于钢结构构件为非标构件,接头形式复杂,材料种类、规格繁多,且装配间隙及坡口角度偏差大,为满足准确编程的要求,需要基于实际装配间隙和坡口角度建立焊接数据库,可见适用于钢结构机器人焊接的数据库规模将十分庞大。

优化焊接数据库,使其适应钢结构行业是研究重点。加强钢结构构件及焊接节点的标准化设计,是有效减小焊接数据库规模的重要途径。

4.2 焊缝跟踪技术

焊缝跟踪技术是焊接过程纠偏的重要途径,也是焊接机器人技术研究开发的重点之一。

在实际焊接过程中,钢结构构件装配偏差和焊接变形会导致焊缝轨迹偏离,需要采用焊缝跟踪技术实时纠偏焊接轨迹。电弧跟踪技术是焊缝跟踪技术的一种,通过焊接电弧的摆动,利用电弧与工件之间距离变化引起的焊接参数变化来探测焊枪位置

不锈钢车体激光焊接关键技术的研究

张洪国, 高文文, 张艳辉, 刘海伟, 张强

中车长春轨道客车股份有限公司 吉林长春 130000

摘要: 目前激光焊接技术以其高效、质量稳定、变形小等优点已在国内外轨道客车行业得到了广泛应用。通过开展激光焊半熔透工艺方法的研究, 解决了不锈钢激光焊工艺中各种焊接变形、焊接质量控制、工艺评定、焊后检测等难题。实现了激光焊替代传统的电阻点焊工艺, 提高焊接接头的强度、静强度、疲劳强度20%以上; 改善了车体侧墙的表面外观质量; 提高了生产效率。通过对激光焊的原理和方法及优缺点、焊接设备选用、工艺参数、工艺评定及质量检测控制等进行深入分析, 促进激光焊技术在轨道车辆上的推广与应用。

关键词: 轨道客车制造; 激光焊; 工艺评定; 质量检测

1 国内外研究现状

当今日本的高速列车和轻轨客车在客车车体制造中应用了激光焊接技术, 日本的几个主要车辆厂

分别开发了采用激光焊接侧墙板的方法制造不锈钢车辆^[1]。目前此项技术已用于不锈钢车辆的批量生产, 技术的可行性、侧墙的表面质量改善得到了认

偏差, 从而检测焊缝的中心位置, 实现实时跟踪。电弧跟踪具有反馈速度快、跟踪实时性好的特点, 且不受焊接弧光、飞溅和烟尘的影响, 特别适用于钢结构构件的焊缝跟踪。

4.3 钢结构构件智能化制造生产线

(1) 钢结构构件机器人焊接智能化制造生产工艺 要研究适用于机器人焊接的钢结构构件接头类型、焊接位置、焊接方法、焊接方式、坡口类型及坡口尺寸等, 开发钢结构构件智能化制造生产工艺。

(2) 钢结构构件机器人焊接智能化制造数据库技术 建立基于专家系统的焊接智能化制造数据库, 实现生产参数的自动调用、修正和智能化生成。

(3) 钢结构构件机器人焊接制造用焊接材料的研制 研究焊丝原材料盘条的化学成分、力学性能及生产制造工艺对其送丝稳定性的影响规律, 发展适用于焊接机器人用的配套焊接材料。

(4) 钢结构构件智能化制造生产线的示范 基于机器人焊接的钢结构构件智能化制造技术、焊接质量在线监测技术及数据库技术, 升级智能化钢结

构构件制造生产线, 并开展应用示范。

(5) 焊接机器人工作站匹配物流自动化 这是建成钢结构构件智能化制造生产线的最基本的思维方法。

参考文献:

- [1] 朱志民, 方孝钟, 周勇, 等. 工业机器人在轨道交通制造中的应用现状及发展趋势[J]. 金属加工 (热加工), 2021 (1): 7-12.
- [2] 陈鹏. 机器人焊接工作站在汽车制造中的应用[J]. 集成电路应用, 2020, 37 (4): 70-71.
- [3] 胡浩, 高飞, 邹家生. 焊接机器人在船舶建造中的应用与发展[J]. 金属加工 (热加工), 2021 (1): 1-6.
- [4] 徐向军. 桥梁钢结构焊接自动化技术的应用与发展[J]. 金属加工 (热加工), 2015 (22): 14-17.
- [5] 戴为志, 刘景风, 高良. 建筑钢结构焊接工程应用技术及案例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [6] 安徽工布智造工业科技有限公司. 基于视觉和三维模型识别的龙门式智能焊接机器人研究与应用[Z]. 2021.

MW 20211114