

基于工程机器人的智能建造

王坚 张弛

上海建工二建集团, 上海 200080

[摘要]文中首先介绍了机器人与工程机器人的概念。厘清了工程机械,发展到自动化机械,并最终达到智能化机器人的历史发展趋势。并按照用途将主要施工机械分为十大类。从“结构主体”“工作机构”“动力装置”,及“控制系统”四个方面,对主要施工机械进行结构功能分解。进而阐述和列举了如何针对这些常见的施工机械进行自动化改造。建筑机械的自动化内容主要包括又包含机电一体化、多功能开发、电子和微机控制等。通过与自动化机械与建造机器人的对比,思考了建筑机器人的建造设计,和如何自动化控制和操作建筑机械的施工过程,人机交互,以及数字数控平台的架构。最后结合一个实例,从而展望如何最终实现智能建造。

[关键词]施工机械; 自动化建造; 波士顿动力公司; 建造机器人; 人工智能; 智能建造

DOI: 10.33142/ec.v7i1.10858

中图分类号: TU755.2

文献标识码: A

Intelligent Construction Based on Engineering Robots

WANG Jian, ZHANG Chi

Shanghai Construction No. 2 Construction Group Co., Ltd., Shanghai, 200080, China

Abstract: The article first introduces the concepts of robots and engineering robots. Clarified the historical development trend of engineering machinery, developing into automated machinery, and ultimately achieving intelligent robots, and divided the main construction machinery into ten categories according to their uses. Decompose the structural functions of the main construction machinery from four aspects: "structural main body", "working mechanism", "power device", and "control system". Furthermore, it elaborates and lists how to carry out automation transformation for these common construction machinery. The automation content of construction machinery mainly includes mechatronics integration, multifunctional development, electronic and microcomputer control, etc. By comparing with automated machinery and construction robots, this paper considers the construction design of construction robots, as well as how to automate the control and operation of the construction process of construction machinery, human-machine interaction, and the architecture of digital CNC platforms. Finally, with an example, we will explore how to ultimately achieve intelligent construction.

Keywords: construction machinery; automated construction; Boston Power Company; building robots; artificial intelligence; intelligent construction

引言

机器人作为集机械、电子、控制、计算机、传感器、人工智能等多学科先进技术为一体的现代制造业中最重要的自动化装备,不仅开始广泛应用于各大门类的工业生产和制造,尤其应用在航空、深海领域、和其他危险或恶劣的环境中,并且也不断深刻地改变着人们的生产和生活方式。

工程机器人可泛指所有能替代目前工程中无论是人力还是机械作业的机器人。这终将是未来土木行业的发展趋势。现有的工程机器人主要包括:焊接机器人、擦玻璃机器人、抹灰机器人、砌砖机器人、3D 打印机器人,等。传统的机械施工可以节省大量人力,降低劳动强度和工程成本,完成人力难以承担的高强度和重体力施工,大幅度提高施工效率和经济效益,加快建设速度,保证工程质量^[1-4]。而要更大范围地使用各类型的机器人,可从现有的施工机械着手,完成其自动化、数字化,以及智能化的升级与改造。目前已

经出现了自行走式的爬挖机,可远程遥控的挖土机等。

根据现场施工的实际需求,目前的工程机械主要包括:起重机械、土方机械、桩工机械、钢筋机械、混凝土机械,和装饰机械等。施工机械在一定程度上反映出—个国家建筑行业的发展水平和科技实力。当前土木行业的生产过程中,最主要的建造过程,仍是由天然的“模拟计算机”——人脑,配合施工机械完成的。近年来,随着自动控制(数字计算机)、嵌入式计算机、微电子,和机电一体化等技术,大规模集成电路(芯片),以及相应的程序开发的进步,施工机械正朝着自动化、数字化和机器人化的方向发展^[5-6]。而要能让“数字计算机”去参与甚至是主导整个建造过程,可狭义地视作“数字化建造”的一个方向。要实现自动化的建造行为,需要测量和控制的相关信息大部分都是模拟信号,如实际的图纸,混凝土温度的变化、挖土量的增加等等。为了用数字电路处理这些模拟信号,必须完成模数转换,并传输给控制对象——数字计算机。

其实,“人机交互”遵循的底层内核也是数模信号的转换;而人工智能的背后是“数字计算机”向“模拟计算机”——人脑的运行模式的靠近并实现自主工作。所有实现自动化建造过程中所产生的信息和相应应对办法的决策则部分由具有一定“自主”能力的计算机实现。

1 数字技术

1.1 电子技术的发展

在整个 20 世纪中,发展最迅速且应用最广泛是电子技术:1895 年,洛伦兹假定了电子的存在;1897 年,汤姆逊用试验找出了电子;1904 年,弗莱明发明了一种二极管,用于检测微弱的无线电信号;1906 年,福雷斯特发明了具有放大作用的双二极管;1946 年,贝尔实验室发明了晶体管;1958 年,集成电路问世……

至此,电子技术细分出多个门类。如:电力电子技术、微电子技术、机械电子技术,和数字电子技术等。其中,在电力电子技术发展过程中又经历了整流器、逆变器,和变频器三大时代。其应用包括:各类电器、电能,和计算机等;微电子技术的应用实例有微机电系统等;机械电子技术的应用包括:机电一体化,如机器人等;数字电子技术涉及信号处理相关的技术领域,具体包括:信息电子、自动化、通讯技术、测控技术、仪器仪表等。当然,这四大分类还在继续演化,比如机械电子技术向微机械电子发展,产生了嵌入式计算和微控制器下的机电一体化技术,典型应用是智能机器人。

狭义地从机械和电子学的角度来理解建筑行业的数字化,可视为建造过程的“数字计算机化”,或者说“数字电子化”。对于施工机械和设备或可视为“数字信号的微处理器化”。在技术史中,某一学科其自身技术水平的高低,主要取决于装置的技术集成能力和自动化水平。“数字化”是迈向“智能化”的前进方向和必经阶段。而迈向“智能化”的技术必将由计算机或 PLC 等控制单元控制。在该学科领域中某项技术实施过程中其自身的参数,在采集、调控、检测、测试或处理的过程中采用瞬态记录仪(模拟信号:连续)将该模拟信号经过 A/D 转换器转换后变成数字量,再经过计算机和 PLC 处理后,直接显示数(字)值,便于人为/机器判断和决策。其中,若机器的判断行为是通过程序来实现的,便算是一种人工智能了。

对于施工机械而言,数字化是从高度集成的自动化向机器人发展的过渡阶段。相信在不远的将来,在拥有了自主研发的大规模集成含有逻辑门的数字电路的微结构体系(芯片)之后,拥有“大脑”与“神经系统”的建筑机器人^[9],集成“软、硬”件的尖端技术,具有“感知”能力的智能化机器人会逐渐加入到管理与施工的队伍中来,实现基于机器人的智能化建造。

1.1.1 数字信号与数字电路

在电子技术中,被传递、加工和处理的信号可分为两

类:模拟信号和数值信号。在时间和信号大小上均连续变化的是模拟信号;在时间或信号大小上非连续(离散)变化的是数字信号。与之对应,用以传递、加工和处理模拟信号的电路叫模拟电路;传递、加工和处理数字信号的电路叫数字电路。

与模拟电路相比,数字电路的特点是采用二进制。凡是有两个稳定状态的元件,均可采用二进制数码,故其基本单元电路简单,对各元件性能参数要求不高,这样对实现数字电路的大规模集成化十分有利;由于二进制传输数据,抗干扰、精度高,便于存储,保密性好,通用性强;可运用标准的逻辑器件和可编程逻辑器来构成各类的数字系统,设计方便,使用灵活。与之对应,使用模拟信号进行计算的机器是模拟计算机;使用数字信号进行计算的是数字计算机。当然,量子计算机是新的发展方向。

1.1.2 计算机与数字化

不同数学学科的代数化是计算方法,用计算机和微处理器实现计算方法叫算法,算法的计算机语言叫程序,让程序含有用于分析、控制或计算等的信息叫数字化。

1.2 数字设计与计算机体系

1.2.1 计算机的兴起

从物理世界发现了电子开始,电子器件的产生、模拟电路的发明,到数字电路的出现,又由此构造了有数学逻辑含义的逻辑门,并以此为基础制造了基于电子运动的微体系结构,并大规模集成体系结构(芯片)。并且,在计算机经过几代发展并最终面向普通用户、推向市场的时候,界面友好的操作系统被开发,并开启了基于某类操作系统的大规模的应用软件的开发。

1.2.2 数字设计

数字设计是计算机和微处理器的基础。在传统的施工机械和设备上加装数字设备和处理器也是施工数字化的重要内容之一,并可以据此实现施工行为的数字信息平台管理^[10]。

除了人,工程中另一个施工主体是工程机械。机械可节省大量人力,降低劳动强度和工程成本,完成人力难以承担的高强度和重体力施工,大幅提高施工效率和经济效益,加快建设速度,保证工程质量。随着机械和电子技术的发展,施工机械的机电一体化是必然趋势^[11]。目前,机电一体化实际应用与基础研究聚焦于传感器与微控制器的接口技术、数字信号处理、反馈控制、有刷直流电机理论、电机的选择与传动装置、微控制器的控制,以及无刷电机、步进电机、伺服电机等其他执行机构、编程语言、集成开发环境的搭建与命令行的编写等。运用一些微控制器编程工具,将程序的编写、编译、模拟和调试汇集到一个界面,通过诸如 C、Python 等程序语言和汇编语言的开发,编辑到微控制器中,这是机械的数字设计的一种成熟的创新范式。

表 1 施工机械种类^[1-4]

序号	名称	种类
1	施工准备机械	除根机、灌木清除机、松土机、平地机、卷扬机、曳引机、水泵……
2	土方机械	挖掘机（单斗、多斗、反铲）、（固定式、回转式）推土机、铲运机、装载机、平地机，……
3	压实机械	静力式碾压机械、冲击式压实机械、振动式压实机械（压路机）、（蛙式）打桩机、羊角碾、振动碾·轮胎碾：……
4	桩工机械	预制桩打桩机械[静压桩机、柴油锤、蒸汽打桩锤、液压打桩锤、振动打拔桩锤（振动锤）、静力压桩机，……]灌注桩打桩机械（螺旋钻孔机、冲击成孔机、冲抓成孔机、潜水钻孔机，……
5	起重/运输/输送机械	千斤顶、滑车、卷扬机、（物料）提升机、（斗式）起重卷扬机、施工升降机、高空作业吊篮、转臂式起重机、自行车起重机械（轮胎、履带）、塔式起重机（轨道式塔式起重机、自升式塔式起重机），门座式起重机、缆式起重机、工程运输车辆：公路型自卸货车、非公路型重型后卸汽车，等，输送机械：斗式提升机、带式输送机、螺旋输送机……
6	钢筋加工机械	钢筋强化机械（钢筋冷拉机械、钢筋冷拔机械、钢筋冷轧机械、剥肋滚压直螺纹成型机、钢筋直螺纹剥肋滚丝机、钢筋套丝机）、钢筋调直机、电动砂轮机、钢筋切断机、电动圆锯、钢筋弯曲机械、钢筋套丝机、钢筋焊接机械（电焊机、钢筋对焊机、钢筋电焊机、钢筋电渣压力焊机），……
7	混凝土施工机械	混凝土原材料计量/称量设备、混凝土搅拌机（强制式搅拌机、插入式振荡器、附着式振荡器、自落式搅拌机、强制式搅拌机、混凝土搅拌站、混凝土运输机械、混凝土浇筑泵、锥形反转出料搅拌机、混凝土浇筑泵车和混凝土布料机械等），……
8	路面施工机械（压实机械）	路床铺设机械、沥青混凝土摊铺机械、（光面、轮胎）压路机、路面破碎机械、路面修筑机械、地面整修机械，平板振动器……
9	装饰机械	电动类：电锤、电钻、电锯、电刨、电动修整机、电动水磨石机、电动刻槽机、电动路面切割机、抹光机、灰浆制备机械，……；气动类：风动机具、风镐、风钻、风锤、风动凿岩机、气动射钉枪、气动扳手、灰浆喷涂机械，……
10	凿岩钻孔机械	掘进机、盾构机、凿岩机、钻孔机、雷岩钻孔机械、凿岩钻车，……。

1.3 数字技术与建造管理

1.3.1 数字信号处理与控制

数字信号处理是指用计算机技术，以数字形式对信号进行采集、变换、滤波、估值、增强、压缩、识别等处理，以得到符合人们需要的信号形式^[12]。数字信号处理器(DSP)是用于进行数字信号处理运算的微处理器。其主要功能是快速实现各种数字信号处理算法及各种复杂控制算法。数字信号控制器 DSC 是 DSP 的升级。数字信号处理器，也称为 DSP 芯片，是一种具有特殊结构的微处理器。其内部采用程序和数据分开的哈佛结构，配备了专门的硬件乘法器，采用流水线操作，提供特定的 DSP 指令，可快速实现各种数字信号处理算法。

1.3.2 建造管理数字化

拥有丰富经验的复杂项目的工程师，与计算机工程师相似，都掌握了控制复杂系统的方法。计算机中的复杂的计算机科学包含了数以亿计的晶体管，但没有人还会再为每个晶体管内的电子运动建立并求解方程来理解这样的系统。在实际的工程管理中，忽略不重要的细节，利用传感器和成像等技术，抓取建造过程中的关键和有用的信息，提升机械和设备的数字化水平，并用计算机或微处理器处理这些信息可算是数字建造。

2 自动化建造

2.1 施工机械

工程机械是现代化建设种的主要技术装备，广泛应用在城建、交通、水利、矿山和国防等行业。目前，我国已

基本形成了含设计、制造，和销售服务，且门类齐全、品种完善的工业体系。近年来，仍不断引进和自主研发自动化程度高和技术性能先进的工程机械产品。

2.1.1 种类

工程机械的工作原理、构造性能、操控方式，和作业特点等。工程机械，以最为常见的推土机为例，常常可按工作机具、用途（标准型和专用型）、行走装置（履带或轮胎）、传动方式（机械式、液力机械、静液压、电传动）、发动机功率等级等进行分类（表 1）。

2.1.2 结构分解

施工机械根据组成部分的作用和功能进行分解，可以分为结构主体、工作机构、动力装置，和控制系统。以下按照这四个功能对主要施工机械进行结构分解（表 2）。

表 2 机械结构分解（以起重机为例）

名称	结构分解	具体构件
起重机	结构主体	吊臂、人字架、转台、底架、塔架
	工作机构	机构包括：起升、变幅、回转、行走；分别用以重物吊升、吊臂变幅、上车回转，和整机行走。
	动力装置	电驱动，内燃机驱动
	控制系统	操控系统：控制动作 安全装置：限制器及相应的信号报警装置

2.2 机械自动化

机械或设备在无人干预的情况下，按照规定的程序或指令进行操作或控制的过程叫做自动化^[5]。施工机械四大分解的结构功能都可以用自动控制代替人工控制。一个自

表3 施工机械机电一体化^[1,5]

机电一体化装置名称	适用的施工机械	装置概要
自动调平装置	推土机, 自动式平地机, 沥青摊铺机, 挖沟机	为了用推土机或平地机等把地面整平, 该装置将推土板的高度一定
遥控装置	推土机、挖掘机、水陆两用推土机	处理炼铁厂炉渣或填平海岸时用的遥控操纵工程机械
无人操纵的行走装置	自卸卡车	自动控制车辆的操作角度及车速, 使车辆沿着规定路线行驶
海底移动机械	水下推土机、海底移动机械手	可在海底作业、移动机械
自动变速装置	自卸卡车、自行式铲运机	根据车辆的行走状态(速度、载荷等)选择适当的速度等级
燃料控制装置	自卸卡车	从节能和提高效率的角度出发, 根据载荷不同, 最恰当的控制燃料供给
减速器控制装置	自卸卡车	控制车速和制动器冷却油温, 使车辆安全下坡
冷却风扇控制装置		为使冷却水经常保持最适宜的温度, 控制冷却风扇的转速
异常状态的监测及安全装置	自卸卡车、起重机	将车辆的行走状态及异常部位显示给司机并发出警报
推土板负荷的控制装置	推土机	推土作业时, 使其效率最大
泵的控制	挖掘机	根据不同作业内容把几台泵组合在仪器, 控制其流量
铲斗轨迹的控制	挖掘机	为使挖掘平面或破面的作业容易操作, 使铲斗沿一定的直线方向运动

自动化程度高的建筑机械包括四个子系统: 工作状态监控系统、动力装置控制系统、工作装置控制系统, 以及行走装置控制系统。常见的自动化装置可以用于改造目前使用的施工机械(表3)。

目前, 国内外已经出现了可智能控制的装载、挖掘一体机、振动压路机, 遥控与无人驾驶的土方机械。当然, 这四大分类还在继续演化, 比如机械电子技术向微机械电子发展, 产生了嵌入式计算和微控制器下的机电一体化技术, 典型应用是智能机器人。

2.2.1 控制系统与控制理论

把实现自动控制理论所需要的各个部件按一定的规律组合起来, 去控制被控制对象, 这个组合叫做“控制系统”。分析和综合自动控制系统的理论为“控制理论”。

经典控制理论研究的是单输入单输出线性定常系统的分析与设计, 数学工具是常微分方程和复变函数。20世纪50、60年代, 在空间技术的飞速发展需求下, 亟需一种理论能解决多输出、高精度、参数时变系统的分析与设计。之后, 高精度数字计算机的诞生为解决复杂控制系统提供了实现上的可能性, 即现代控制理论。其主要内容包括: 多变量控制系统、最优控制理论、系统辨识与模式识别、最优估计、自适应控制、大系统理论、模糊控制与神经网络等^[5-7]。

自动控制系统的种类较多, 被控制的物理量也各种各样, 如温度、压力、流量、电压、转速、位移和力等。组成这些控制系统的元、部件虽然有较大的差异, 但系统的基本结构却相类同, 且一般是通过机械、电气、液压等方式来代替人工控制。如果用自动控制去代替上述的人工控制, 那么自动控制系统中心必须具有上述三种职能机构, 即测量机构、比较机构, 和执行机构。

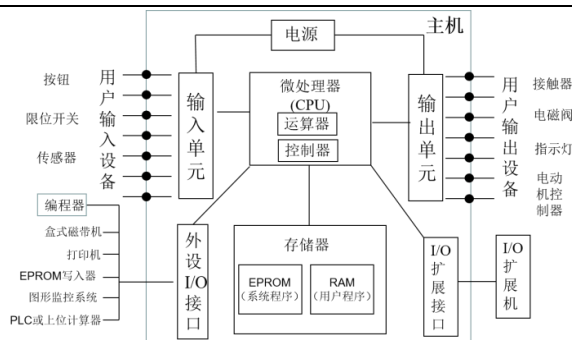


图1 数字计算机控制系统的构成简图^[7]

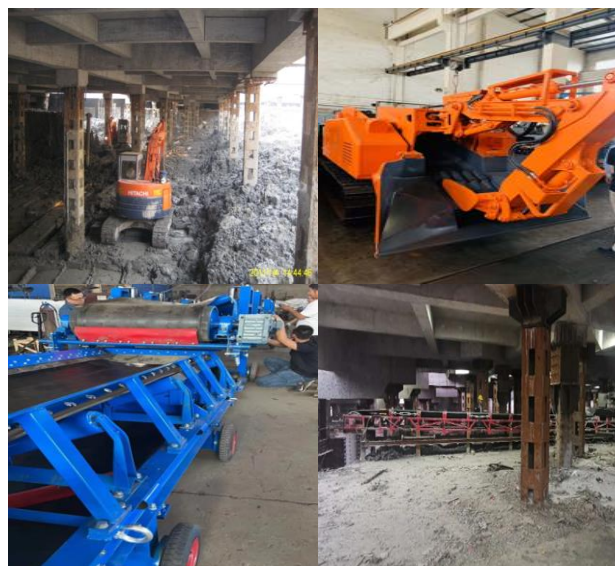


图2 新型的自行走转向的爬挖一体机

(a) 传统挖掘机; (b) 履带式新型可90°转向的挖掘头; (c) 可拼接可行走的皮带部分; (d) 现场工作状态图

2.2.2 机电一体化

机电一体化实际应用与基础研究聚焦于传感器与微控制器的接口技术、数字信号处理、反馈控制、有刷直流电机理论、电机的选择与传动装置、微控制器的控制,以及无刷电机、步进电机、伺服电机等其他执行机构、编程语言、集成开发环境的搭建与命令行的编写等。

2.2.3 电子(微机)控制

施工机械的电子(微机)控制是采用电子元器件、电子电路、微处理器、可编程控制器、计算机等对施工机械进行控制,且可与其他控制技术相结合。其中,可编程控制器(PC或PLC)是一种以微处理器为基础,综合了计算机技术与自动控制技术的工业控制装置。可编程控制器的结构框图和计算机一样,由中央处理器(CPU)、存储器和输入/输出接口等构成。从硬件角度来说,可编程控制器就是计算机,其硬件系统简化图4所示。

目前,机电一体化实际应用与基础研究聚焦于传感器与微控制器的接口技术、数字信号处理、反馈控制、有刷直流电机理论、电机的选择与传动装置、微控制器的控制,以及无刷电机、步进电机、伺服电机等其他执行机构、编程语言、集成开发环境的搭建与命令行的编写等。譬如,美国CAT公司研制(2017)成功研制了电子控制液压操控燃料的喷射系统。

2.3 机械数字化

在电子技术中,被传递、加工和处理的信号可分为两类:模拟信号和数值信号。在时间和信号大小上均连续变化的是模拟信号;在时间或信号大小上非连续(离散)变化的是数字信号。不同数学学科的代数化是计算方法,用计算机实现计算方法叫算法,算法的计算语言叫程序,让程序含有计算、分析,和控制等的信息叫数字化。与之对应,使用模拟信号进行计算的机器是模拟计算机;使用数字信号进行计算的是数字计算机。与之对应,用以传递、加工和处理模拟信号的电路叫模拟电路;传递、加工和处理数字信号的电路叫数字电路。

目前,在建筑行业,也兴起了数字化的浪潮。所谓的数字化,可以狭义地理解为数字计算机化,或者说数字电子化。与模拟电路相比,数字电路有这样一些特点:数字电路一般均采用二进制。凡是有两个稳定状态的元件,均可采用二进制数码,故其基本单元电路简单,对各元件性能参数要求不高,这样对实现数字电路的大规模集成十分有利;由于二进制传输数据,抗干扰、精度高,便于存储,保密性好,通用性强;可运用标准的逻辑器件和可编程逻辑器来构成各种各样的数字系统,设计方便,使用灵活。数字化是施工机械从高度集成的自动化向机器人发展的过渡阶段。

2.4 机械机器人化

数字化之后的发展阶段是机器人化。未来机器人可见

的发展趋势,一是更广泛地使用机器人代替人类的基本功能;二是运用机器人来扩展人类的功能和活动空间:如空间开发和海洋探测。常见的能源供给是化学燃料及电能。机器人的发展历经三代:

第一代机器人是“操作性”机器人,多为“关节型搬运装置”,如弧焊机器人。它包括:控制系统(决策)和工作系统(执行)。比如,带电动焊接枪运动的机械臂部分(工作系统)和控制器(控制系统)。控制器内必须得有保证它实现其功能所必需的算法和信息。控制器内根据系统复杂程度和执行的任務不同,有效的软件也不同。

第二代机器人可以分为三类。对于可以参与建造过程的机器人其实已经出现:诸如大型钢结构高空作业时候的焊接机器人,可以实现高层建筑外墙体的抹灰机器人,可以实现地面水泥砂浆抹平的机器人,以及实现高空幕墙清洗的清洁机器人。

第三代机器人是要求机器人能通过传感器了解外部环境或者“身体内在的”状态和变化,甚至自己做出的“逻辑、推理、判断与决策”。主要特点是具有“感知能力”。“大脑”进行复杂的逻辑思维并进行判断、决策,能够认识自己的工作环境、工作对象和状态。只要人给指令,就可以通过自己对外界的认知独立工作。

施工机器人的发展同样呈现设备互联,系统工作的趋势。通过网络与其他类型的建筑机器人协同工作,信息和数字共享,人机交互页面,甚至机器与机器交互页面都将随之改变。机器人作为网络中的一环,可用人机交互接口,使得人能够操作包括施工在内的各类型专业操作过程。天空和深海是机器人潜在的应用领域,航天机器人也必将更加重要。此外,结构主体承受荷载能力更强的、运动能力更突出的、或是更微型的、能实现更多微操的,以及结合了深度学习能力和大数据技术的机器人等,都将随着科技的进步而得到应用。

3 智能建造

3.1 数字信号与平台

3.1.1 数字信号

数字信号处理是指利用计算机技术,以数字形式对信号进行采集、变换、滤波、估值、增强、压缩、识别等处理,以得到符合人们需要的信号形式。数字信号处理器(DSP)^[8-9]是用于进行数字信号处理运算的微处理器。其主要功能是快速地实现各种数字信号处理算法及各种复杂控制算法。数字信号控制器(DSC)是DSP的升级。数字信号处理器,也称为DSP芯片,是一种具有特殊结构的微处理器。其内部采用程序和数据分开的哈佛结构,配备了专门的硬件乘法器,采用流水线操作,提供特定的DSP指令,可用来快速地实现各种数字信号处理算法。

3.1.2 数字平台

拥有丰富经验的复杂项目的工程师,与计算机工程师

相似,都掌握了控制复杂系统的方法。计算机中的复杂的计算机科学包含了数以亿计的晶体管,但没有人还会再为每个晶体管内的电子运动建立并求解方程来理解这样的系统。在实际的工程管理过程中,隐蔽不重要的细节,利用传感器和成像等技术,抓取建造过程中的关键信息,提升机械和设备的数字化水平,并用计算机或微处理器处理这些信息就算是数字化。在数字云平台上,首先完成“人-机-料-法-环”的系统集成,再通过云平台服务器进行数据记录,最终在诸如大屏幕、手机,或电脑上实现数据的前端展示。平台架构中的感知层的设备直接布设在工地中,对应解决工地管理的痛点问题,大大提升了管理水准和安全水平。

其实,无论何种新形态的信息科学技术和产业经济形态,如物联网、人工智能、人机交互、大数据、互联网、云计算等,其背后的技术基础仍然是电子技术、集成电路、计算机系统、芯片和软件。建造过程中的模拟信号成为了电脑可处理与分析的数字信息。信息变得有价值,也正是数字时代到来的明显标志。

3.2 智能建造

随着 Chat GPT 等机器学习“软件”的问世,大量的工程管理文件的生成,不再依赖于现场工程人员的观察,而是可以通过工程建造过程的可视化过程,通过采集相关视频和影像资料;并通过相应的图像识别和处理,筛分出有用的信息。并且来判定工程对象的状况,比如基坑的变形情况或梁的受力情况等。而以上的所有过程都可以是电脑控制下的自主行为。完全不需要人为干预。

类似的小的智能化器件其实已经产生,比如智能化的喷淋设施,用于清洗车辆;或是大体积混凝土浇筑的智能化温度控制系统等。再加之能够完成诸多建造行为的机器人的出现,工程中常常有人工完成的搬运工作,绑扎和切割钢筋工作,支设模板的动作,焊接动作等等都可以用受计算机控制的机器人来完成。

3.2.1 人机交互

工程机器人由机械、控制、传感三大部分组成。如果用来比喻机器人的组成,那么控制系统相当于人的“大脑”,感受系统相当于人的“视觉与感觉器官”,驱动系统相当于人的“肌肉”,执行机构相当于人的“身躯和四肢”。整个机器人运动功能是通过人机交互实现。

在机器人的遥操作中,需要将远距离的环境因子转换成人类自身感官能够感知的形式,并且使用机器人理解并执行操作人员的动作。完成这些功能的装置称为人机交互接口,包括:视觉^[10]、声音、触觉,和嗅觉等接口通道。接触交互接口能够使得操作人员通过自己身体的直接接触和运动而感知和操作虚拟环境或者远距离环境中的(施工)现场。

视觉是接收外部信息的主要渠道,但无法对外部产生

影响,是信息的单项接收。声音具有一定的人机交互功能,是基于语音识别转换成电脑可执行指令的间接操作和控制方式,操作性能和结果取决于机器(控制器内的程序和传感器等)。嗅觉和味觉也是单向信息的接收。因此,一个好的遥操作系统一定是具备先进的接触交互接口,是真正对远距离环境进行直接操作的唯一接口。

在一些不适合人工作业的危险工作环境或人工视觉难以满足要求的场合,常用机器视觉来替代人工视觉。主要是运用计算机来模拟人的视觉功能,从客观事务的图像中提取信息,进行处理并加以理解,最终用于施工的实际检测、测量和控制^[11]。

3.2.2 软件系统

机器人的“软件系统”是机器人的生命,是机器智能。实际上,就是人工智能的主要技术在机器人上的应用,主要包括:问题求解、语言处理、感觉识别、状态控制、动作表达、推理过程,等。AI 可以被认为是与思考或行为方式与人类相近的计算机程序,或者是会自主学习的,能感知环境,做出合理行为,能获得收益的计算程序^[12]。

因此,智能建筑机器人的软件体系是能够使机器人能及时获取和处理环境实时信息,并完成建造过程的计算机程序^[13]。比如,在一段程序指令下的 3D 打印机器,就可以完成一个建筑形式的完整表达。并且配合砌砖机器人等,就基本上可以形成一座几乎完全“自主”行为模式的“建筑”。

4 机械改造实例: 新型的可自转向行走的爬挖一体机

逆作法作为基坑工程中一种特殊的工法从诞生之初就备受瞩目,如今随着城市化进程的发展,逆作法以其围护变形小,对周边环境保护优势明、B₀板天然可作为施工及历史文物保护建筑的场地等优势而蓬勃发展。但上下同步逆作或历史文物保护建筑下方增设地下室存在取土口无法覆盖而坑内暗运土方距离过远的问题,常规的施工思路为多部小挖机坑内接力驳运,但这种思路存在如下严重问题:坑内挖土机械数目过多,机械租赁费用、燃料费用增大;小挖机之间需要多次接力方能将远处土方翻运至取土口内,但多次翻运挖土效率严重下降;大量挖机产生过多有毒尾气,坑内施工环境较差,危害施工人员健康;人机交叉施工范围过大,危及施工人员人身安全等。

传统逆作法在取土时,通过小型挖机在地下的大范围分布,将土“接力”地向取土口搬运,然后通过垂直取土设备将土通过取土口逐步挖取至地面,最后由渣土车完成最后的运输。这样的常规取土做法虽然可以在地下狭小空间完成运土任务,但仍然存在以下不足:首先,需要耗费大量的机械相互配合以提高取土效率,机械的有效取土效率低下;其次,在大型的地下空间取土时,需要将土多次水平搬运及垂直搬运才能到达地面,取土效率低下;还有,

大大增加了挖土的施工成本；在设计阶段，需在楼板及层间板结构上设置多处取较大的土口以提高取土效率；同时破坏了楼板的完整性，增加了周边环境的变形量。

皮带机，由于其运输量大，结构简单，维护方便，一直广泛地应用在矿业、化工、冶金、交通、水电、物流等诸多行业中。在建筑行业，传统的皮带运输机需要满足大运量和长距离的运土需求。随着技术的发展，皮带机的功能趋于多样，应用范围扩展。同时，常见的启动与运行时的功率控制问题、大功率时的能耗问题、运料洒落问题、托辊振动问题、自清理的困难，以及运输过程中由于各种原因导致的跑偏故障，也都在一定程度上得到了缓解。

实际逆作取土时，常规机械取土有诸多不足：出土量少、工作不连续、工人的安全管理难度大、需要较多较大出土口预留等。新型的可 90° 转向的可行走的爬挖一体机，相比于传统的挖土机和皮带机，具有自行走、自转向，和远程可操控性的自动化和数字化的特点。

在大型地下空间开发的盖挖工程中，区别于传统的挖掘机挖土方式，该装备是由挖土部分、传送部分及电动履带机组成，可在地下空间狭小的施工条件下高效取土与大量土方的远距离传输。同时，为了提高机械化和自动化程度，该机械具有一定自行走和转向能力，也使得其在地下狭小空间内的出土能力大幅度提升。区别于传统的皮带机，在逆作法暗挖等工程中，该装备是实现了多达 90° 的转向运输和自行走功能。同时实现了开挖过程中，大容量原状土的长距离皮带运输。该新型机械属于施工装备研制领域，特别适合于逆作法工程中的土方暗挖。它是开挖取土一体化的装备体系与逆作法施工方法中的重要一环。

挖土部分由集土挡板、机械臂、门架式基座组成。门架式基座跨越下方的传送带，使机械臂的基座置于传送带正上方，增加机械臂可转动的范围；机械臂既可自行挖土，直接输送至机头传送带上，也可以与独立小挖机配合，将小挖机翻运集中的土方扒送至机头传送带。集土挡板呈外八字分布，便于将挖取的渣土汇聚到传送带上；传送部分由传送装置、传送带挡板、振动碎土装置、除泥装置组成。

前端加装的挖斗或配合小型挖机将渣土扒运至传送带部分后开始向上搬运，期间有挡板支在传送带两边，防止渣土向周边滑落、防止流塑土外溢；挡板上布置有振动碎土装置，将大块渣土震碎成小块以便后续运土；传送装置尾部设有除泥装置，包括刮泥板和防溢流板，可将粘在传送带上的黏土刮除干净及防止流塑黏土溢出，保证传送带运行的稳定；履带机后部设有连接运土设备的预留接口，该预留接口可与后续运土的设备相互连接达到长距离运土的目的。

前端挖土扒土由传送带将堆放在集土板上的渣土向后方搬运；当土为块状土时，启动传送带挡板上的振动碎土装置，调整好振幅和频率，在运送中进行碎土；当土为

流塑黏土时，传送带挡板及尾部防溢板均发挥格挡作用，且刮泥板可有效去除粘附在传送带上的黏性土；传送带挡板上的振动碎土装置为小型振动机，置于传送带挡板外侧及传送带下方，通电后开始振动挡板及传送带，达到散土碎土的目的，可调节其振动频率和幅度；电动履带机尾部设有预留连接卡扣，与运土传送带相连，增加运土距离。

皮带运输机移动到开挖土方前，由挖机挖土送至运输机前端。土体在“V”字型设计的传送路径上传输稳定，不会出现漏泥和大量掉落的情况；下部的皮带会从出土的末端回环到接收土的前端，中途会设置改进和校准了的刮泥器，保证皮带不沾黏泥土。每一节运输段上，机身所用的槽钢要加厚，增加运输的稳定性。连接钢板要顶到槽钢的翼缘，也要加厚，并且需要保证一定的自身长度和铆接长度，防颤；换装了特制的轮子，防止皮带掉落；皮带机两端的架子采用一体化设备与制造，状体框架均采用槽钢，一台电机负责一段皮带，不做分段式设计，保证整体性，也就能避免振动过大引起的机身抖动；末端的出土端的落脚点，采用原有坡度顺延至地面的设计，增加了整体的稳定性。

该新型皮带机，旨在低净空下，解决逆作法顶板下方开挖原状土方后的长距离土方运输难题，并同时解决纯人工挖土效率低下及人工挖土成本上升的问题。有以下创新点：首先，采用电驱动方式，并可以实现自行走；其次，选用宽大的挖泥板，实现了配套挖土方式的转变；此外，机身前端重新设计，可实现 90° 转向运输；并采用中间低陷一定角度，采用更宽大厚实的皮带，实现更大量的原状土方运输；改进后的刮土器可更好地实现运输土体的自清理；选用了更加宽大的挡土板，并且可以不断搭接皮带机的运输段。

同时，随着建筑业数字化进程的推进，皮带机往智能化的方向发展。比如，开始加装智能变频调速装置。智能变频控制，使得皮带机可以根据电机的实际荷载，进入自动调速状态，确保启动过程中的平滑，减小了启动过程中对皮带机机械部分的冲击。这种软启动的方式，将皮带机中胶带的弹性变形能缓慢释放，保护了皮带、减速机，和电动机等。并且避免了由于启动过程中转矩过大，冲击电流断路而引起的重载启动。同时，提高了传输效率，延长了使用寿命。同样，也有通过皮带机运行过程中的噪声监测，来评估皮带机作业过程中的托辊轴承状态的劣化程度，进而避免托辊完全抱死，或皮带发生干摩擦发热燃烧的恶性事故等。

新型爬挖机的出现，不仅改变了传统的出土方式，更深刻地影响了管理模式：首先是人员和机械的配置；其次是进度计划的调整；还有多台可自行走可转向的爬挖机的数字化平台集成和操控。通过采用更多的自动化程度更高的机械，并通过建立统一的数字化平台。

5 结论与展望

当前,任何新形态的信息技术和产业经济,以及“衍生”出的各种概念,如“人工智能”“大数据”“数字建造”“智慧城市”“互联网”“物联网”“云平台”,和“云计算”等等,其基础仍然是集成电路、集成系统和软件。

施工机械往建筑机器人方向的发展有了模块化和平台统一化的趋势。传统刚性机器人多了柔性技术。更多的施工机器人将服务于高度动态、不确定和非结构化的环境。机器人在基于众多和感知互补的多传感器基础的数据融合平台上,能更好地实现对环境感知和智能决策。而管理模式,也会从人工资料的粗放式管理,向数字化平台管理演变,进而逐渐向智能化建造与管理发展。其未来的管理模式可见的是会用到人机交互、更多工程机器人软件的开发、机器自主学习,和人工智能等新兴的科技成果。

机械和装备数字化之后的发展阶段是机器人化或者说人工智能化。未来建造可见的发展趋势,一是更广泛地使用更智能的设备或是机器人来代替人类的基本功能,从设计、施工,到建筑全生命周期的运维都有数字信号数据的产生、处理与输出;二是运用机器人来扩展人类的功能和活动空间。

[参考文献]

- [1]田启华,李浩平.施工机械及其自动化[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
[2]吴志强,杨红玉.建筑施工机械[M].北京:北京大学出

版社,2017.

- [3]郑惠忠.建筑施工机械[M].上海:同济大学出版社,2021.
[4]张洪.现代施工机械[M].北京:机械工业出版社,2019.
[5]王欣等.工程机械典型控制系统[M].北京:人民交通出版社,2014.
[6]陈万米等.机器人控制技术[M].北京:机械工业出版社,2019.
[7]范立南,李雪飞.计算机控制技术[M].北京:机械工业出版社,2015.
[8]张东亮.DSP 控制器原理与应用[M].北京:机械工业出版社,2015.
[9]张雄伟,陈亮,徐光辉.DSP 芯片的原理与开发应用[M].北京:电子工业出版社,2007.
[10]程光.机器视觉技术[M].北京:机械工业出版社,2019.
[11]程时伟.人机交互概论[M].杭州:浙江大学出版社,2017.
[12]张培仁,杨兴明.机器人系统设计与算法[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2008.
[13]Achintya K. Bhowmik.实感交互(人工智能下的人机交互技术)[M].北京:机械工业出版社,2018.
作者简介:王坚(1986—),工程师,浙江台州,主要从事工程施工与现场管理。