

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 1 月 9 日 (09.01.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/006698 A1

- (51) 国际专利分类号:
E01C 19/23 (2006.01) *G05D 1/02* (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2018/094460
- (22) 国际申请日: 2018 年 7 月 4 日 (04.07.2018)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201810720255.3 2018 年 7 月 3 日 (03.07.2018) CN
- (71) 申请人: 清华大学 (TSINGHUA UNIVERSITY)
[CN/CN]; 中国北京市海淀区清华大学,
Beijing 100084 (CN)。
- (72) 发明人: 李庆斌 (LI, Qingbin); 中国北京市海淀区清华大学, Beijing 100084 (CN)。 张庆龙 (ZHANG, Qinglong); 中国北京市海淀区清华大学, Beijing 100084 (CN)。 安再展 (AN, Zaizhan); 中国北京市海淀区清华大学, Beijing 100084 (CN)。 刘天云 (LIU, Tianyun); 中国北京市海淀区清华大学, Beijing 100084 (CN)。

- (74) 代理人: 西安智大知识产权代理事务所 (XI'AN CYDA INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY); 中国陕西省西安市雁塔区科技路 195 号世纪颐园 A707, Shaanxi 710075 (CN)。
- (81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。
- (84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,

(54) Title: SMART ROLLING SYSTEM FOR EARTHWORK

(54) 发明名称: 一种土石方智能碾压系统

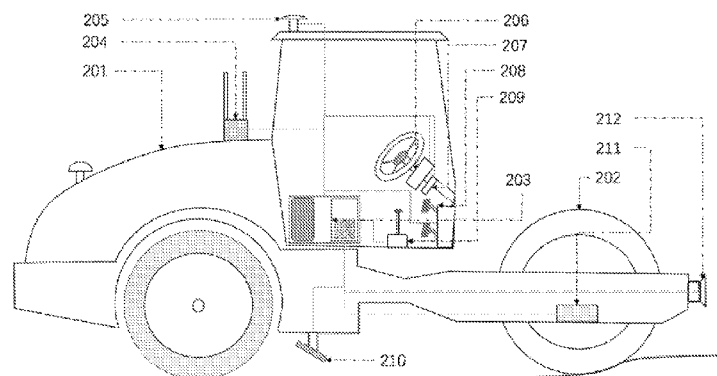


图 3

(57) Abstract: A smart rolling system for an earthwork, comprising a roller operation parameter autonomous decision control system, an unmanned roller, a roller cluster cooperative rolling operation system, an RTK-system, a wireless communication system, and a remote quality monitoring center. The system is implemented on the basis of a material-machine-information-machine autonomous decision interaction system framework, and performs, according to the current compaction state, parameter autonomous decision control for the next rolling operation, thereby implementing the refined filling construction of the earthwork.

(57) 摘要: 一种土石方智能碾压系统, 包括碾压机工作参数自主决策控制系统、无人碾压机及机群协同碾压作业系统、RTK-系统、无线通信系统、远程质量监控中心, 基于材料-机器-信息-机器自主决策交互系统框架实现, 根据当前压实状态进行下一遍碾压时参数自主决策控制, 实现土石方工程精细化填筑施工。



WO 2020/006698 A1

IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

根据细则4.17的声明：

- 关于发明人身份(细则4.17(i))
- 关于申请人有权申请并被授予专利(细则4.17(ii))
- 关于申请人有权要求在先申请的优先权(细则4.17(iii))
- 发明人资格(细则4.17(iv))

本国际公布：

- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

一种土石方智能碾压系统

技术领域

本发明属于土石方工程技术领域，特别涉及一种土石方智能碾压系统，主要用于大坝、公路、铁路、机场、堤坝、桥梁、港口等领域土石方工程填筑碾压质量控制。

背景技术

土石方工程的稳定性由填筑施工质量决定，其具体控制指标有结果控制指标（如压实度 K 、干密度 ρ 等）、料源控制指标（如含水量 w 、级配 p 等）和施工参数控制指标（如碾压遍数 n 、行车速度 v 、振动频率 f 、行车轨迹等）。土石方压实监控系统是实现对上述三种指标进行全过程监控的有效手段，相关系统已被国内外学者进行了一定的研究并取得了若干成果。其中，碾压集成压实监控技术（Roller-Integrated Compaction Monitoring, RICM）已经在美国和欧洲的土石方工程中广泛应用。目前国外基于 RICM 技术研发的压实监控系统主要有美国 Caterpillar 公司的基于碾压驱动功率（MDP）的碾压过程监测系统、瑞典 Ammann 公司的基于土体刚度表征指标 K_s 的 ACE（Ammann Compaction Expert）系统、Dynamic 与 Trimble 公司基于加速度表征指标 CMV 的 RICM 系统、Rinehart 和 Mooney 基于总谐波失真指标（THD）的 RICM 系统。连续压实控制系统（Continuous Compaction Control, CCC）是安装在压实装备上能连续采集碾压操作和性能实时信息的数据采集系统。从某种意义上来说，CCC 是 RICM 的另一种命名。随着技术的发展，BOMAG, AMMANN 和 Dynapac 公司提供了自动反馈控制系统（AFC），当辊的跳跃模式被确定或达到一个预设的碾压测量阈值时，系统中的振幅、频率可以自动调节，利用 AFC 系统对土进行压实可以增加快速压实的机会，改进土特性的均匀性。当 RICM 系统提

供碾压机频率、振幅、行车速度等的自动反馈控制（AFC）功能时，它往往被称为智能压实系统（Intelligent Compaction, IC）。按照美国联邦高速公路管理局（FHWA）的定义，IC 指利用装备有集成测量系统、机载计算机报告系统、基于地图的全球定位系统（GPS）和反馈控制系统的现代振动碾压机对公路材料如土、骨料或沥青路面材料的压实系统。IC 技术已经在欧洲和日本实现很多年，该技术在 2000 年末被引入美国。机器参数的动态控制可以将振动能量应用到欠压区域，防止过度压实和确保土/骨料的均匀压实。尽管 IC 技术及其系统的应用充满前景，但它们的性能并未得到完全评估。Liu 等利用土石坝压实质量实时监控系統，对碾压施工参数（碾压遍数 n 、压实厚度 h 、行车轨迹、行车速度 v ）进行了实时采集，进而分析了含水率 w 、级配 p 、压实质量（如压实度 K 、干密度 ρ ）和碾压施工参数之间的相关性分析，建立了包含碾压施工参数、含水量、级配、压实质量的多元回归模型，据此模型，结合 Kriging 空间插值方法，估算了全仓面任意位置处的压实度及全仓面的碾压质量达标率。此外，Liu 等还利用填筑碾压质量实时监控技术对混凝土面板堆石坝的压实质量进行了快速质量评估研究，建立了 CV 值和含水量、级配为变量的土石坝压实质量评估模型，结合 Kriging 空间插值方法，提出了基于 CV 值的土石坝填筑材料压实质量全工作面的快速评估方法，实现了全工作面压实质量的快速评估。

在国内，关于土石方压实监控系统方面的研究也取得了一定成果。经过对加速度传感器采集到的数据与土的压实度之间关系的研究，张润利等研制了加速度计。邓学欣等提出通过检测振动轮振动加速度间接反映土壤压实状况的压实度自动检测原理，并开发了响应检测系统。范云等开展了填土压实质量检测及机载压实集成系统应用研究。对于工程量较大、工序复杂的面板堆石坝，基于 GPS 技术，黄声享等研制了可实时监控碾压遍数、压实厚度和行车速度的监控系统。为了解决粗粒土路基压实质量较难控制的问题，基于连续检测路基结构抗力变化的方法，徐光辉等提出了路基压实质量连续动态监控技术。针对南水北调中线工程干渠渠道大部分为高填方工程，土石方工程量巨大，工期紧等

问题，李斌等研制开发了南水北调中线一期工程高填方段碾压施工质量实时监控系统，并在工程实践中得到应用。于子忠和黄增刚开展了智能压实过程控制系统在水利水电工程中的试验性应用研究。针对南水北调工程中高填方段的施工特点，余洋等开发了相应的填筑施工质量监控系统，并在该工程中进行了应用。曾怀恩和刘金平对土石坝碾压实时监控系统进行了模拟试验研究。刘东海等以反映碾压机做功的坝料单位体积压实功（ E ）和振动轮的加速度谐波失真量（ THD_0 ）作为堆石坝压实质量的实时监测指标，研制开发了堆石坝压实质量实时监测系统，对于堆石坝的压实质量进行了实时监测与快速评估。针对传统的以随机取样的干密度实验检测坝体填筑质量的方法不能全面反映坝体实际碾压质量，影响坝体质量评价可靠性的问题，王晓玲等利用压实质量实时监控系统对于堆石坝的碾压质量进行了二元耦合评价研究。基于实时采集到的碾压施工参数数据，刘东海和王东烽进行了不同碾压施工参数（如行车速度 v 、压实厚度 h ）与压实质量评估指标（如压实度 K 、干密度 ρ ）的相关性分析，针对填筑材料的压实质量模型得以建立，进而结合地质统计方法提出一种可评估仓面上任意位置的压实质量及全工作面的压实质量达标率的快速评估方法。

除了 RICM/CCC/IC 系统之外，基于 GPS 技术和自动控制技术的自动导航控制系统目前已取得一定研究成果。在国外，相关研究主要集中在道路施工方面。在国内，长沙矿山研究院于 1995 年研制了具有遥控功能的无人碾压振动压路机，并应用于矿山道路建设。2000 年，湘潭江麓机械公司与国科大联合研制了 W1102DZ 型高性能无人碾压振动压路机，在现场测试时能够自主完成点火、起步、变速、转向、倒车、停车等基本操作。针对粒径分布范围较广的土石料，刘天云等研制了一种水利施工振动自动驾驶系统，该系统可有效解决相邻作业面间重复、漏碾、交叉碾压等问题。此外，在农业领域，国内也取得了一定研究成果。华南农业大学与雷沃重工研制了基于 RTK-GPS 技术的自动导航控制系统，解决了农田播种“播行不直、接行不准”的瓶颈问题。基于 XDNZ630 型耧到插秧机、RTK-GPS 技术和自动控制技术，伟利国等研制了插

秧机自动导航转向系统，该系统具有自动对行导航和地头转向的功能。

以上国内外最新的研究成果表明，国外的土石方压实监控技术主要应用于公路建造中，在其他领域缺乏应用研究，且技术水平仍停留于自动反馈控制阶段，土石方工程碾压质量的控制不仅对操作人员要求较高，而且仍由人来完成决策实施，而国内相应的技术仅仅发展到对土石方工程填筑质量进行实时碾压施工参数监控，这种监控仅仅是针对碾压遍数、行车速度、压实厚度、碾压机振动状态等的监控且偏重于对压实质量进行监测，而疏于对压实质量的控制，对土石方工程填筑碾压质量的监控基本上还是通过碾压过程中对碾压施工参数进行实时监控、碾压作业完成后建立压实质量评估模型预测整个施工区域碾压层的压实质量，这样很容易在材料碾压过程中产生过压或欠压的情况，使得压实均匀性得不到保证。除此之外，无人驾驶碾压技术等也是处于自动控制阶段并以人来决策评估填筑材料的压实质量。总的来说，目前的研究仍基于材料-机器-信息-人决策交互系统框架，仍基于人工决策对填筑料碾压质量进行控制，对土石方工程填筑碾压质量的控制并非实现智能控制，压实质量得不到有效保证，碾压作业精确性、填筑料的压实均匀性、现场施工作业效率得不到保障。

发明内容

为了克服上述现有技术的缺点，本发明的目的在于提供一种土石方智能碾压系统，该系统基于材料-机器-信息-机器自主决策交互系统框架，将智能决策控制方法应用于压实质量监控系统中，实现真正的智能压实，该系统可用于土石方工程填筑施工质量控制，作为土石方工程施工过程中碾压质量智能化控制的一种有效解决方案，可以对碾压质量实现具有机器自主决策功能的智能压实控制，以填筑材料压实质量为控制目标，以最高效的控制手段使得填筑料达到压实质量（如压实度 K ）的目标期望值，而不会出现过压、欠压或压实均匀性差的情况。该系统主要包括无人驾驶碾压系统和碾压机工作参数自主决策控制系统，实现压实参数机器自主决策控制，以实现智能高效的碾压。

为了实现上述目的，本发明采用的技术方案是：

一种土石方智能碾压系统，基于材料-机器-信息-机器自主决策交互系统框架实现，包括：

碾压机工作参数自主决策控制系统，通过人工智能算法，利用实时压实情况检测数据组成训练数据，然后通过数据训练产生预测模型，最后通过碾压前的状态参数经过预测模型得到碾压机作业参数，所述实时压实情况检测数据包括该位置的压实效果指标值 $S(x,y)$ 和碾压机工作参数，所述碾压机工作参数包括振动频率 $f(x,y)$ ，振幅 $A(x,y)$ 和行车速度 $V(x,y)$ ，还可包括激振力等；

无人碾压机及其机群协同碾压作业系统，其中无人碾压机根据碾压作业参数进行无人碾压施工作业；

RTK-系统，为无人碾压机提供高精度的定位导航服务；

无线通信系统，为单台无人碾压机或多台无人碾压机机群协同碾压作业系统提供实时高速通信服务，为无人碾压机与远程质量监控中心提供实时通信服务；此外，也为碾压施工作业过程中其他需要通信的场景提供服务；

远程质量监控中心，依据建设土石方工程的三维数字模型人机交互规划作业区域和导航路线，通过无线通信系统接收无人碾压机的作业数据及作业环境视频信息，向无人碾压机发送自动导航数据与指令，根据接收紧急处理请求情况人机交互远程操纵无人碾压机，为无人碾压机及机群协同碾压作业系统提供调度服务，并显示现场碾压施工作业情况，实时存储现场碾压施工作业数据。

所述碾压机工作参数自主决策控制系统主要包含碾压机工作参数自主决策模型训练模块和碾压机工作参数预测模块，其中，碾压机工作参数自主决策模型训练模块通过人工智能算法（如机器学习算法）模型进行数据训练产生预测模型，碾压机工作参数预测模块利用输入参数和周期训练的模型运算，得到下一个局部区域将需要的最大效率的碾压机工作参数，制定压实策略，实现压实过程智能化控制。

碾压机工作参数自主决策模型训练模块和碾压机工作参数预测模块又可称为碾压机智能压实模型模块：智能压实模型主要建立压实效果与碾压参数的关

系，并根据当前压实状况，进行碾压参数优化，制定压实策略，实现压实过程智能化控制。

所述碾压工作参数自主决策模型训练模块利用实时定位装置、压实质量在线检测装置、传感器装置得到的数据，包括该位置坐标 (x, y) 和实时压实情况检测数据，组成训练数据，通过坐标数据 (x, y) ，当前已经碾压遍数 $(n - 1)(x, y)$ ，碾压前压实效果指标值 $S_{n-1}(x, y)$ 、第 $n - 1$ 遍碾压工作参数、振动频率 $f_{n-1}(x, y)$ 、振幅 $A_{n-1}(x, y)$ 以及速度 $V_{n-1}(x, y)$ 等数据组成训练模型的输入数据，碾压后压实效果指标值 $S_n(x, y)$ 作为训练模型的输出数据，通过机器学习算法模型进行数据训练，得到压实效果与碾压工作参数的关系，即：

$$S_n(x, y) = F(S_{n-1}(x, y), f_{n-1}(x, y), A_{n-1}(x, y), V_{n-1}(x, y))$$

所述碾压工作参数预测模块在无人碾压实时作业时，将实时的从实时定位装置、压实质量在线检测装置以及传感器装置等获得当前压实状态 $S_{n-1}(x, y)$ ，以达到规定压实效果指标 $S_E(x, y)$ 的效率最高为目标进行碾压参数优化，得到智能压实模型的输出：

$$(f_n(x, y), A_n(x, y), V_n(x, y)) = F(S_{n-1}(x, y), S_E(x, y))$$

$f_n(x, y), A_n(x, y), V_n(x, y)$ 即下一遍碾压作业的碾压振动频率、碾压振幅和碾压车速，实现碾压作业参数自主决策控制。

所述碾压工作参数自主决策控制系统还用于土石方工程填筑碾压质量评估、质量反馈控制（QC）和质量验收（QA），即碾压工作参数自主决策控制系统依照设计填筑压实质量的控制标准，将获取的压实效果指标值通过压实质量评估模型计算出相应的设计填筑压实质量的控制指标值，进而计算该值是否符合设计填筑压实质量的控制标准，因而可实现土石方工程填筑碾压质量评估，通过评估结果可利用碾压工作参数自主决策控制系统对压实质量作反馈控制和质量验收，具有机器自主决策进行质量评估、质量反馈控制（QC）和质量验收（QA）的智能化特点。

所述无人碾压具备远程唤醒、休眠、高精度 RTK-系统定位导航、安全

避障、自主规划碾压作业、单机或多机协作自主碾压与自动检测施工质量等功能，主要包含传感系统、控制系统、驱动系统和碾压机体，传感系统、驱动系统及控制系统组成机载自动控制系统，机载自动控制装置实时接收远程质量监控中心发来的自动导航指令、遥控驾驶信息，并与传感系统、RTK-系统检测的速度、转向角度、位置等信息比较，偏差经 PID 算法调整后传送至电动方向盘、电动油门以及电动刹车制动等执行元件，控制振动碾压完成期望的无人驾驶碾压作业。

无人碾压具体可由无人碾压控制模块实现控制：

该模块主要基于实时定位装置、无线通信系统、智能运算装置、碾压操控装置来共同协作实现，首先实时定位装置在碾压作业前通过移动定位测量工具构建作业区域的三维平面地理坐标体系，然后智能运算装置将基于此三维平面地理坐标体系构建出无人碾压在作业区域的碾压运动轨迹。在碾压作业时，将通过智能运算设备智能路径规划算法通过数据线向碾压操控装置发送控制指令来实现无人驾驶的功能，如自动控制碾压的点火、转向、速度、制动、掉头等。

所述 RTK (Real-time kinematic，实时动态)-系统为 RTK-GPS 系统或 RTK-BDS 系统，基于载波相位差分技术和 GPS (或 BDS) 经纬度数据实现 cm 级的高精度定位，RTK-系统获取高精度的全球经纬度数据，构建三维平面地理坐标体系，然后通过映射算法来转换成高精度的平面地理坐标体系。其主要由 GPS 或 BDS 接收机、RTK-GPS 或 BDS 基准站、现场流动站、卫星等组成，实时提供精确的无人碾压的空间位置信息、行车速度信息和其他运行状态信息，实时计算车体与最优路径之间的距离偏差和角度偏差，从而计算出调整转向角，为无人碾压提供高精度定位导航服务。

所述传感系统包括防撞雷达装置和碾压轮传感装置，所述控制系统包括智能运算装置、压实质量在线检测装置和碾压操控装置，防撞雷达装置安装在碾压机的最前方，实时监测碾压行驶方向的障碍物的空间距离，当距离运动

方向的障碍距离达到预警阈值时候，无人碾压机将采取智能避让策略。所述压实质量在线检测装置由传感器、传感器安装装置、数据采集卡、数据处理与分析装置构成，属于填筑施工碾压质量机载测量技术，通过测量碾压过程中与填筑料压实质量相关的信号，实时在线获取填筑材料的压实效果指标即 RICMMV、ICMV 或 SCV，并通过压实效果指标来表征填筑料的压实质量，不同的压实效果指标均可用于表征填筑料压实质量（如刚度、强度、变形、沉降、温度、密度或压实度）；所述压实质量在线检测装置周期性地检测当前位置当前时刻的压实效果指标值，当前的位置信息通过碾压机上的定位装置获得，压实效果指标值通过无线装置传输到远程质量监控中心，压实效果指标值用可视化效果展示。

所述无线通信系统主要由机载通信装置、通信中转站、远程监控平台通信系统组成，实现无人碾压机与远程质量监控中心之间的信息和指令的传输，并实现机载自动控制装置各部分之间、多台无人碾压机之间，以及与附近其他施工设备间的信息通信。

所述无人碾压机的机群协同碾压作业系统基于无人碾压机、远程质量监控中心多机调度系统、工程场地路径规划算法和 RTK-GPS 或 RTK-BDS 导航技术构建，远程质量监控中心制定导航线路并通过无线通信系统向无人碾压机自动控制装置提供，根据碾压机工作参数自主决策控制系统得出的碾压机实时工作参数控制无人碾压机的动作执行，进行多机协作智能碾压作业以及自动碾压，所述远程质量监控中心多机调度系统根据现场实际情况给出无人碾压机调度实施方案，实现多台无人碾压机的有效调度，为无人碾压机机群协同碾压作业提供基础服务；所述工程场地路径规划算法为无人碾压机提供最优的碾压作业和避障导航路径。

所述远程质量监控中心为作业区域的大数据数字化可视化平台和与无人碾压机交互平台，实时显示碾压施工作业现场情况，在紧急或特殊情况下进行人机交互远程操控无人碾压机作业，其中碾压施工作业现场情况包含现场填筑料

碾压质量信息（如压实质量连续表征指标信息）、碾压施工参数信息（如行车速度、碾压遍数、压实厚度、振动频率）和现场环境视频信息。其可实现对作业区域的碾压质量评估结果 3D 化的展示，同时将作业区域的所有运行数据进行智能分析、建模和存储到数据库中，然后周期的更新预测模型和通过无线传输到无人碾压机的智能设备装置中，以及对无人碾压机的紧急制动、碾压机召回到基地区域等控制交互。

与现有技术相比，本发明具有智能、高效、实时、控制精度高等特点，可根据当前压实状态进行下一遍碾压作业时碾压参数实时自主决策控制，实现碾压过程机器自主决策控制，适用于土石方工程填筑施工质量控制，可通过对表征填筑料压实质量的连续压实指标值进行快速检测，确定填筑料压实质量并计算压实模型参数，利用压实模型进行碾压机工作参数优化，提出压实决策最优方案，以控制碾压机工作参数。本发明可以应用于水利、公路、铁路、机场、港口等土石方工程填筑施工质量控制，不仅可有效控制碾压施工质量，也可有效提高碾压施工效率，实现碾压过程的智能压实控制，实现土石方工程填筑施工精细化管理

附图说明

图 1 为本发明提供的智能压实决策系统的框架图。

图 2 为本发明提供的智能压实决策系统的原理示意图。

图 3 为本发明提供的智能压实决策系统的软件系统流程图。

图 4 为本发明提供的无人碾压机的一个实施例的结构图。

具体实施方式

下面结合具体实施例和附图对本发明进行详细说明。以下实施例将有助于本领域的技术人员进一步理解本发明，但不以任何形式限制本发明。应当指出的是，对本领域的普通技术人员来说，在不脱离本发明构思的前提下，还可以做出若干变化和改进。这些都属于本发明的保护范围。

本发明提供一种土石方智能碾压系统，可用于土石方工程填筑施工质量控

制，如图 1 所示，该系统基于材料-机器-信息-机器自主决策交互系统框架，作为土石方工程施工过程中碾压质量智能化控制的一种有效解决方案。

如图 2 所示，该系统主要包括：碾压机工作参数自主决策控制系统、多台无人碾压机 101、实时定位装置（即 RTK-系统 103）、无线通信系统 105、远程质量监控中心 104 等，无人碾压机 101 可组成协同工作系统，根据碾压机工作参数自主决策控制系统提供的碾压作业参数进行无人碾压施工作业。

碾压机工作参数自主决策控制系统主要包含碾压机工作参数自主决策模型训练模块和碾压机工作参数预测模块，通过人工智能算法，利用实时压实情况检测数据组成训练数据，然后通过数据训练产生预测模型，最后通过碾压前的状态参数经过预测模型得到碾压机作业参数。

RTK-系统 103，包括基站、流动站 205 以及全球定位卫星 106，采取 RTK-GPS（或 BDS）系统，基于载波相位差分技术为该方案提供 cm 级高精度的定位服务和碾压机作业区域坐标系统的构建，其中碾压机作业区域坐标系统是由作业区域定位测量工具 107 给出区域的地理经纬度边界点，然后结合 RTK-GPS（或 BDS）系统给出整个区域的地理经纬度坐标，该高精度地理坐标通过无线通信装置传输到远程质量监控中心 104，远程质量监控中心 104 通过服务器程序构建出 3D 作业区域范围，并给每台无人碾压机 101 智能分配单次作业的直道路径。

RTK-系统 103 在碾压机作业前通过移动定位测量工具构建作业区域的三维平面地理坐标体系 102，然后基于此坐标体系构建出无人碾压机 101 在作业区域的碾压运动轨迹。在碾压机作业时，智能路径规划算法通过数据线向碾压机操控装置发送控制指令来实现无人驾驶的功能，如自动控制碾压的点火、转向、速度、制动、掉头等。

无线通信系统 105 主要由机载通信装置、通信中转站、远程监控平台通信系统等组成，为单台无人碾压机或多台无人碾压机机群协同碾压作业系统提供实时高速通信服务，为无人碾压机与远程质量监控中心提供实时通信服务；此

外，也为碾压施工作业过程中其他需要通信的场景提供服务；可实现无人碾压机与远程质量监控中心之间的信息和指令的传输，并实现机载自动控制装置各部分之间、多台无人碾压机之间，以及与附近其他施工设备间的信息通信。

远程质量监控中心 104，依据建设土石方工程的三维数字模型人机交互规划作业区域和导航路线，通过无线通信系统接收无人碾压机的作业数据及作业环境视频信息，向无人碾压机发送自动导航数据与指令，根据接收紧急处理请求情况人机交互远程操纵无人碾压机，为无人碾压机及机群协同碾压作业系统提供调度服务，并显示现场碾压施工作业情况，实时存储现场碾压施工作业数据。

无人碾压机 101 具备远程唤醒、休眠、高精度 RTK-系统定位导航、安全避障、自主规划碾压作业、单机或多机协作自主碾压与自动检测施工质量等功能，图 3 所示为本发明提供的无人碾压机 101 的一个实施例的结构图，无人碾压机 101 可构成多台作业群协同碾压作业，主要由碾压机机体 201、振动碾压轮 202、智能运算装置 203、无线传输装置 204、流动站 205、碾压机操控装置、压实质量在线检测装置 210、碾压轮传感装置 211、防撞雷达装置 212 等组成。

智能运算装置 203 为高性能的嵌入式系统，是整个系统方案中最核心的装置，主要功能有无人碾压机的数据分析、无人驾驶指令控制、碾压机工作参数智能预测、无人碾压机所有方案附加装置的运行维护等。

智能运算装置 203、压实质量在线检测装置 210、碾压机操控装置、防撞雷达装置 212、碾压轮传感装置 211 均安装在碾压机机体 201 上；

碾压机操控装置主要包括电动油门 207、电动制动装置 208、电动方向盘 206 以及电动档位控制装置 209，均设置在驾驶室内；

碾压轮传感装置 211 装在振动碾压轮 202 的框架侧面。

无人碾压机 101 在软件功能模块上，主要包含传感系统、控制系统、驱动系统，传感系统、驱动系统及控制系统组成机载自动控制系统，机载自动控制系统实时接收远程质量监控中心发来的自动导航指令、遥控驾驶信息，并与传

感系统、RTK-系统检测的速度、转向角度、位置等信息比较，偏差经 PID 算法调整后传送至电动方向盘、电动油门以及电动刹车制动等执行元件，控制振动碾压机完成期望的无人驾驶碾压作业。

无人碾压机 101 的数据主要有实时定位装置的位置坐标数据、压实质量在线检测装置 210 所实时测得压实质量数值、前方防撞雷达装置 212 的运动方向的障碍物距离数据、碾压轮传感装置 211 产生的碾压轮振动频率幅度和偏转角等参数数据；

无人驾驶指令控制将根据获得实时碾压机的坐标数据和碾压轮的偏转角数据，再结合智能规划的路径数据通过碾压机操控装置实时进行对碾压轮的运动状态进行修正，以保证碾压机沿着规划的单次作业直道运动。

碾压机工作参数智能预测的实现是通过历史数据由远程服务训练得到模型预测来实现。训练数据主要包括地理位置数据 (x, y) 、第 $n-1$ 遍碾压的坐标分布的压实质量数据 $S_{n-1}(x, y)$ ，第 n 遍碾压的坐标分布的压实质量数据 $S_n(x, y)$ 、实时的碾压机工作参数（振动频率 $f_n(x, y)$ 、振幅 $A_n(x, y)$ 、行车速度 $V_n(x, y)$ 、当前的碾压次数 $n(x, y)$ 等，这些组合数据通过无线传输装置实时传输到远程质量监控中心进行数据分析、可视化展现、周期性的预测模型更新，得到新压实预测模型：

$$S_n(x, y) = F(S_{n-1}(x, y), f_{n-1}(x, y), A_{n-1}(x, y), V_{n-1}(x, y))$$

然后以达到规定压实效果指标 $S_E(x, y)$ 的效率最高为目标进行碾压参数优化，得到智能压实模型的输出：

$$(f_n(x, y), A_n(x, y), V_n(x, y)) = F(S_{n-1}(x, y), S_E(x, y))$$

该智能压实自主决策系统实现流程如图 4 所示，其中第 $n-1$ 和 n 遍的碾压效果数据通过压实质量在线检测装置和实时定位装置获得为 $S_{n-1}(x, y)$ 和 $S_n(x, y)$ ，第 n 遍碾压机工作参数 $(f_n(x, y), A_n(x, y), V_n(x, y))$ 通过安装在碾压轮侧面框架的碾压轮传感装置获得，此参数也是该坐标点在第 n 遍碾压时候通过操控装置调节的结果。

每次智能压实模型的输出结果通过无线通信系统同步到相应的无人碾压机的智能运算装置 203 中，智能运算装置 203 在进行下一位置点 (x_{i+1}, y_{i+1}) 第 $n + 1$ 遍碾压前将对该点的碾压工作参数调整，即通过把该点碾压前的压实效果指标值、规定压实效果指标值、已碾压遍数、地理坐标数据作为模型输入参数，利用模型预测得第 $n + 1$ 遍碾压机的振动频率、振幅、碾压轮速度。当碾压过该点 (x_{i+1}, y_{i+1}) 第 $n + 1$ 遍后，此部分的碾压后的参数数据又可以作为训练数据同步到远程质量监控中心 104 进行模型更新，如次反复进行模型迭代可以不断的优化模型、最后得到此土方碾压工程的最优模型数据，通过此模型可以实现作业区域高效的达到期望压实效果指标值。当碾压机行驶到图 2 直道的一端，远程质量监控中心 104 将通过该直道的历史数据进行系统评估出该直道的整体压实质量结果，然后给出下一次的碾压直道的调度。作业区依次流程直至整个作业区域完成碾压工程。

权 利 要 求 书

1、一种土石方智能碾压系统，其特征在于，基于材料-机器-信息-机器自主决策交互系统框架实现，包括：

碾压机工作参数自主决策控制系统，通过人工智能算法，利用实时压实情况检测数据组成训练数据，然后通过数据训练产生预测模型，最后通过碾压前的状态参数经过预测模型得到碾压机作业参数，所述实时压实情况检测数据包括该位置的压实效果指标值 $S(x,y)$ 和碾压机工作参数，所述碾压机工作参数包括振动频率 $f(x,y)$ ，振幅 $A(x,y)$ 和行车速度 $V(x,y)$ ；

无人碾压机及其机群协同碾压作业系统，其中无人碾压机根据碾压作业参数进行无人碾压施工作业；

RTK-系统，为无人碾压机提供定位导航服务；

无线通信系统，为单台无人碾压机或多台无人碾压机机群协同碾压作业系统提供实时通信服务，为无人碾压机与远程质量监控中心提供实时通信服务；

远程质量监控中心，依据建设土石方工程的三维数字模型人机交互规划作业区域和导航路线，通过无线通信系统接收无人碾压机的作业数据及作业环境视频信息，向无人碾压机发送自动导航数据与指令，根据接收紧急处理请求情况人机交互远程操纵无人碾压机，为无人碾压机及机群协同碾压作业系统提供调度服务，并显示现场碾压施工作业情况，实时存储现场碾压施工作业数据。

2、根据权利要求 1 所述土石方智能碾压系统，其特征在于，所述碾压机工作参数自主决策控制系统主要包含碾压机工作参数自主决策模型训练模块和碾压机工作参数预测模块，其中，碾压机工作参数自主决策模型训练模块通过人工智能算法模型进行数据训练产生预测模型，碾压机工作参数预测模块利用输入参数和周期训练的模型运算，得到下一个局部区域将需要的最大效率的碾压机工作参数，制定压实策略，实现压实过程智能化控制。

3、根据权利要求 2 所述土石方智能碾压系统，其特征在于，所述碾压机

工作参数自主决策模型训练模块利用实时定位装置、压实质量在线检测装置、传感器装置得到的数据，包括该位置坐标 (x, y) 和实时压实情况检测数据，组成训练数据，通过坐标数据 (x, y) ，当前已经碾压遍数 $(n-1)(x, y)$ ，碾压前压实效果指标值 $S_{n-1}(x, y)$ 、第 $n-1$ 遍碾压工作参数、振动频率 $f_{n-1}(x, y)$ 、振幅 $A_{n-1}(x, y)$ 以及速度 $V_{n-1}(x, y)$ 组成训练模型的输入数据，碾压后压实效果指标值 $S_n(x, y)$ 作为训练模型的输出数据，通过机器学习算法模型进行数据训练，得到压实效果与碾压工作参数的关系，即：

$$S_n(x, y) = F(S_{n-1}(x, y), f_{n-1}(x, y), A_{n-1}(x, y), V_{n-1}(x, y))$$

所述碾压工作参数预测模块在无人碾压实时作业时，将实时的从实时定位装置、压实质量在线检测装置以及传感器装置获得当前压实状态 $S_{n-1}(x, y)$ ，以达到规定压实效果指标 $S_E(x, y)$ 的效率最高为目标进行碾压参数优化，得到智能压实模型的输出：

$$(f_n(x, y), A_n(x, y), V_n(x, y)) = F(S_{n-1}(x, y), S_E(x, y))$$

$f_n(x, y), A_n(x, y), V_n(x, y)$ 即下一遍碾压作业的碾压工作参数、碾压工作振幅和碾压工作速度，实现碾压工作参数自主决策控制。

4、根据权利要求 2 所述土石方智能碾压系统，其特征在于，所述碾压工作参数自主决策控制系统还用于土石方工程填筑碾压质量评估、质量反馈控制和质量验收，即碾压工作参数自主决策控制系统依照设计填筑压实质量的控制标准，将获取的压实效果指标值通过压实质量评估模型计算出相应的设计填筑压实质量的控制指标值，进而计算该值是否符合设计填筑压实质量的控制标准，因而可实现土石方工程填筑碾压质量评估，通过评估结果可利用碾压工作参数自主决策控制系统对压实质量作反馈控制和质量验收。

5、根据权利要求 1 所述土石方智能碾压系统，其特征在于，所述无人碾压系统具备远程唤醒、休眠、高精度 RTK-系统定位导航、安全避障、自主规划碾压作业、单机或多机协作自主碾压与自动检测施工质量功能，主要包含传感系统、控制系统、驱动系统和碾压系统本体，传感系统、驱动系统及控制系统组

成机载自动控制系统，机载自动控制装置实时接收远程质量监控中心发来的自动导航指令、遥控驾驶信息，并与传感系统、RTK-系统检测的速度、转向角度、位置信息比较，偏差经PID算法调整后传送至执行元件，控制振动碾压机完成期望的无人驾驶碾压作业。

6、根据权利要求5所述土石方智能碾压系统，其特征在于，所述RTK-系统为RTK-GPS系统或RTK-BDS系统，主要由GPS或BDS接收机、RTK-GPS或BDS基准站、现场流动站、卫星共同组成，实时提供精确的无人碾压机的空间位置信息、行车速度信息和其他运行状态信息，实时计算车体与最优路径之间的距离偏差和角度偏差，从而计算出调整转向角，为无人碾压机提供高精度定位导航服务。

7、根据权利要求5所述土石方智能碾压系统，其特征在于，所述传感系统包括防撞雷达装置和碾压轮传感装置，所述控制系统包括智能运算装置、压实质量在线检测装置和碾压机操控装置，所述压实质量在线检测装置由传感器、传感器安装装置、数据采集卡、数据处理与分析装置构成，通过测量碾压过程中与填筑料压实质量相关的信号，实时在线获取填筑材料的压实效果指标即RICMMV、ICMV或SCV，并通过压实效果指标来表征填筑料的压实质量，不同的压实效果指标均可用于表征填筑料压实质量；所述压实质量在线检测装置（210）周期性地检测当前位置当前时刻的压实效果指标值，当前的位置信息通过碾压机上的定位装置获得，压实效果指标值通过无线装置传输到远程质量监控中心，压实效果指标值用可视化效果展示。

8、根据权利要求1所述土石方智能碾压系统，其特征在于，所述无线通信系统主要由机载通信装置、通信中转站、远程监控平台通信系统组成，实现无人碾压机与远程质量监控中心之间的信息和指令的传输，并实现机载自动控制装置各部分之间、多台无人碾压机之间，以及与附近其他施工设备间的信息通信。

9、根据权利要求1所述土石方智能碾压系统，其特征在于，所述无人碾

压机的机群协同碾压作业系统基于无人碾压机、远程质量监控中心多机调度系统、工程场地路径规划算法和 RTK-GPS 或 RTK-BDS 导航技术构建，远程质量监控中心制定导航线路并通过无线通信系统向无人碾压机自动控制装置提供，根据碾压机工作参数自主决策控制系统得出的碾压机实时工作参数控制无人碾压机的动作执行，进行多机协作智能碾压作业以及自动碾压，所述远程质量监控中心多机调度系统根据现场实际情况给出无人碾压机调度实施方案，实现多台无人碾压机的有效调度，为无人碾压机机群协同碾压作业提供基础服务；所述工程场地路径规划算法为无人碾压机提供最优的碾压作业和避障导航路径。

10、根据权利要求 9 所述土石方智能碾压系统，其特征在于，所述远程质量监控中心实时显示碾压施工作业现场情况，在紧急或特殊情况下进行人机交互远程操控无人碾压机作业，其中碾压施工作业现场情况包含现场填筑料碾压质量信息、碾压施工参数信息和现场环境视频信息。

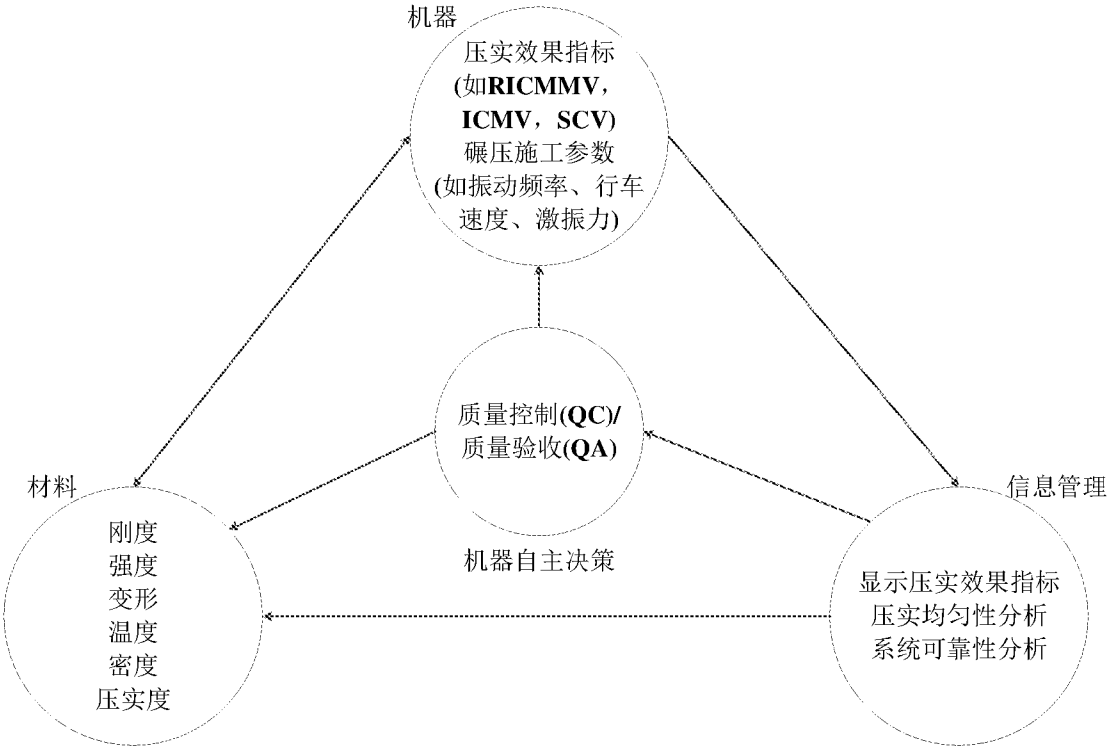


图 1

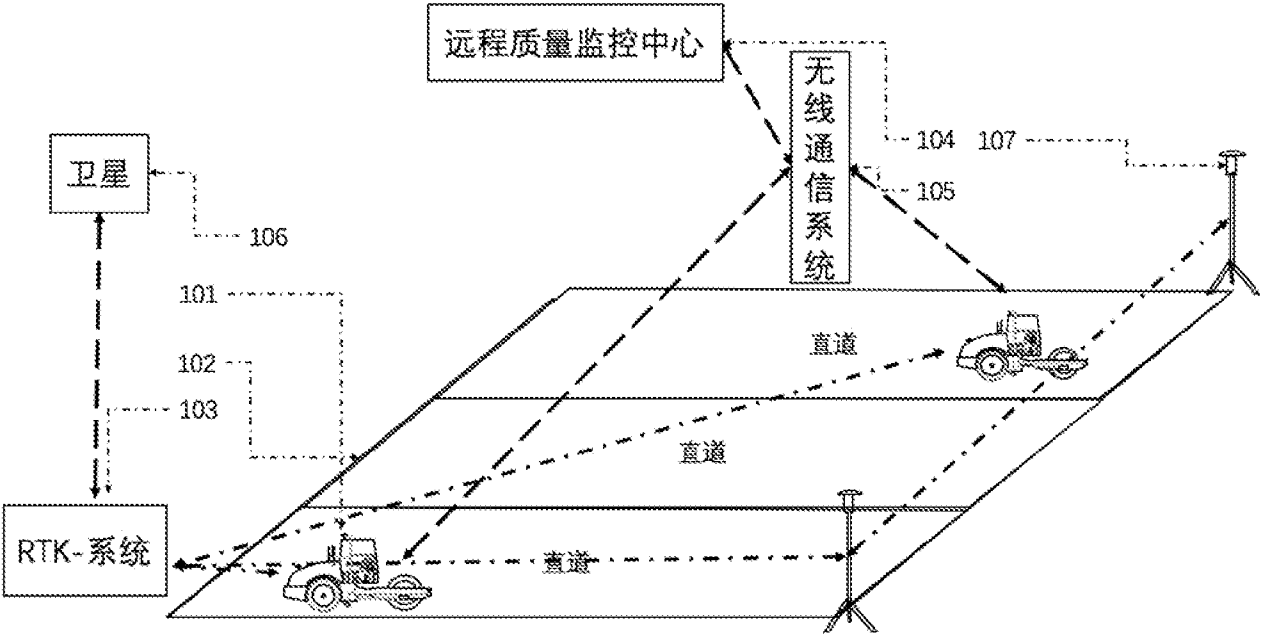


图 2

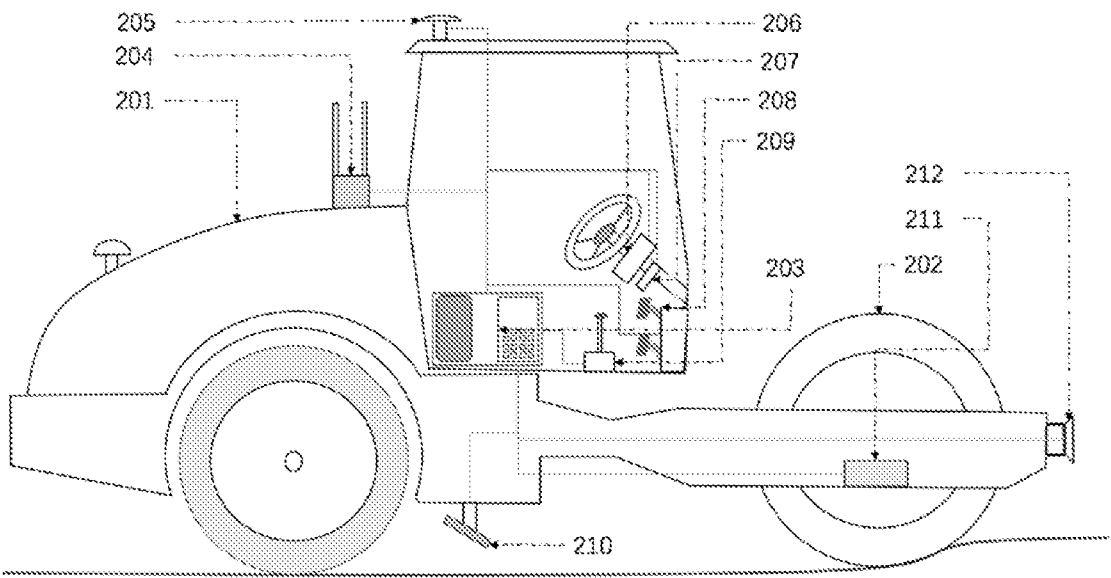


图 3

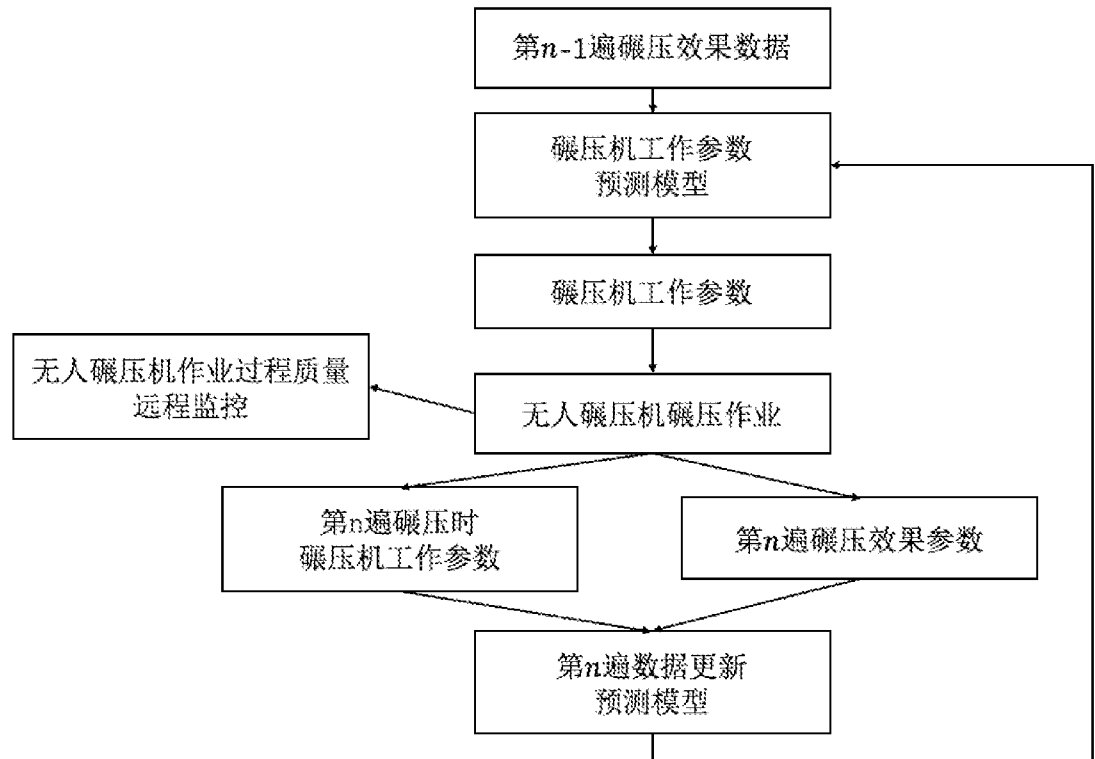


图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2018/094460

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

E01C 19/23(2006.01)i; G05D 1/02(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

E01C19/-; G05D1/-

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNKI, CNABS, CNTXT, DWPI, SIPOABS: 碾压, 压实, 压路机, 智能, 自动驾驶, 无人驾驶, 学习, 训练, 模型, compact, roll, intelligent, automatic, learn, train

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 102289716 A (HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 21 December 2011 (2011-12-21) description, paragraphs [0019]-[0028], and figure 1	1, 2, 8
Y	CN 105137997 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 09 December 2015 (2015-12-09) description, paragraphs [0011]-[0028]	1, 2, 8
A	CN 107761701 A (SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY) 06 March 2018 (2018-03-06) entire document	1-10
A	CN 105002810 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 28 October 2015 (2015-10-28) entire document	1-10
A	WO 0008535 A1 (CATERPILLAR INC.) 17 February 2000 (2000-02-17) entire document	1-10

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

27 March 2019

Date of mailing of the international search report

10 April 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

State Intellectual Property Office of the P. R. China
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2018/094460

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	102289716	A	21 December 2011	None			
CN	105137997	A	09 December 2015	CN	105137997	B	19 December 2017
CN	107761701	A	06 March 2018	None			
CN	105002810	A	28 October 2015	CN	105002810	B	15 March 2017
WO	0008535	A1	17 February 2000	AU	754837	B2	28 November 2002
				AU	5246299	A	28 February 2000
				JP	2002522673	A	23 July 2002
				DE	19983437	T1	02 August 2001
				US	6112143	A	29 August 2000

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2018/094460

A. 主题的分类

E01C 19/23(2006.01)i; G05D 1/02(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

E01C19/-; G05D1/-

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNKI, CNABS, CNTXT, DWPI, SIPOABS: 碾压, 压实, 压路机, 智能, 自动驾驶, 无人驾驶, 学习, 训练, 模型, compact, roll, intelligent, automatic, learn, train

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
Y	CN 102289716 A (合肥工业大学) 2011年 12月 21日 (2011 - 12 - 21) 说明书第[0019]-[0028]段, 图1	1, 2, 8
Y	CN 105137997 A (清华大学) 2015年 12月 9日 (2015 - 12 - 09) 说明书第[0011]-[0028]段	1, 2, 8
A	CN 107761701 A (上海交通大学) 2018年 3月 6日 (2018 - 03 - 06) 全文	1-10
A	CN 105002810 A (清华大学) 2015年 10月 28日 (2015 - 10 - 28) 全文	1-10
A	WO 0008535 A1 (CATERPILLAR INC) 2000年 2月 17日 (2000 - 02 - 17) 全文	1-10

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2019年 3月 27日

国际检索报告邮寄日期

2019年 4月 10日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局 (ISA/CN)
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

受权官员

孙丽艳

电话号码 62084993

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2018/094460

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	102289716	A	2011年 12月 21日	无			
CN	105137997	A	2015年 12月 9日	CN	105137997	B	2017年 12月 19日
CN	107761701	A	2018年 3月 6日	无			
CN	105002810	A	2015年 10月 28日	CN	105002810	B	2017年 3月 15日
WO	0008535	A1	2000年 2月 17日	AU	754837	B2	2002年 11月 28日
				AU	5246299	A	2000年 2月 28日
				JP	2002522673	A	2002年 7月 23日
				DE	19983437	T1	2001年 8月 2日
				US	6112143	A	2000年 8月 29日

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2015年1月)