DOI: 10.3901/JME.2013.16.138

捣固机械激振技术现状与展望*

刘毅 龚国芳 闵超庆

(浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室 杭州 310027)

摘要: 捣固车是广泛应用于新建铁路和铁路大修中的养路机械。捣固装置是捣固车的核心部件,它是利用加压、冲击或振动的原理使得轨枕底部的道碴重新排列,紧固密实,并使枕下支撑力量均衡的一种专用机械装置。在综合分析国内外捣固装置及其激振技术的研究现状与进展的基础上,结合工程实际,指出现存捣固装置的激振技术在频率和振幅的无级可调等方面存在的问题,提出应用于捣固装置的新型电液激振技术。新型电液激振器在一定频率内能增大输出推力、实现高振幅以及解决液压缸振动时的偏置撞缸,其关键技术是通过步进电动机带动阀芯旋转、液流高频换向使得液压缸运动换向,以实现激振频率和振幅的控制。为满足不同工况的需求、克服强迫振动加速捣固镐磨损及捣镐振动产生夹持液压缸摆动的问题,采用负载自适应、频率和振幅的无级调节的液压激振技术是捣固振动发展的趋势。

关键词: 捣固装置 激振技术 电液激振 振动频率 振幅

中图分类号: U216 TH137

Present Status and Prospect of Tamping Device Exciting Technology

LIU Yi GONG Guofang MIN Chaoqing

(The State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract: Tamping machine is a kind of special engineering equipment which is used for railway construction. Tamping device being used to compact ballast is the key part of tamping machine, with which two main tamping processes, clamping and vibrating, could be carried out. Clamping squeezes the stones to flow under the sleeper and vibrating compresses ballast. The development of tamping device is briefly introduced, and then the current status of tamping device and the exciting technology are discussed in detail. Combining with project practice, the problems concerning excitation technology of tamping device in high frequency and adjustable amplitude are analyzed, and the new electro-hydraulic excitation for tamping device is proposed. The novel electro-hydraulic exciter can increase the export force, realize high amplitude during certain frequency range and solve the problem of bias impact to the cylinder. Its key technology is realizing the control of excitation frequency and amplitude through the rotation valve spool which is driven by step motor and the hydraulic cylinder changing direction lead by the high frequent oil flow direction. To meet the needs of different operating conditions, overcome the strong swing problem of the clamping cylinder generated by tamping bar vibration and the wear of tamping bar by forced vibration, exciting technology of load sensing and stepless regulation of frequency and amplitude is the trend of tamping device vibration development.

Key words: Tamping device Exciting technology Electro-hydraulic excitation Vibration frequency Oscillating amplitude

0 前言

捣固车是广泛用于在新建铁路、铁路大修和维修作业中高速、高质量地完成线路捣固、起拨道、整平等作业的养路机械。随着发达国家经济、科技的发展,铁路工程大规模的投入建设,促使捣固技

术取得了长足的发展,而我国还处于捣固车的引进消化吸收阶段。捣固装置是捣固车的核心部件,它是利用加压、冲击或振动的原理使得枕底部的道碴重新排列,紧固密实,并使枕下支撑力量均衡的一种专用机械装置^[1]。影响枕底部的道床捣固效果的因数分二方面,一方面为道床方面的客观条件,体现在碎石材料、碎石形状、碎石级配、碎石粒径及道床的厚度,另一方面捣固装置方面,取决于可人

* 国家自然科学基金资助项目(50975252)。20120903 收到初稿,20130412 收到修改稿

为控制的捣固频率、振幅、捣固力、捣固路径、捣固持续时间。全球捣固装置核心技术主要由 Plasser, Matisa 和 Harsco 三家国外公司所掌握, 且产品性能各有所长, 但这些装置存在强迫振动加速捣固镐磨损及捣镐振动产生夹持液压缸摆动的问题。捣固装置激振方式改进是实现铁路线路的平整性、一致性和均匀性的关键技术基础, 其施工的高效率、高精度和稳定性仍是需要突破的技术难题。

为使捣固车高精、高效的施工和线路维护, 实现整个捣固装置装备高度的自动化、智能化, 激振技术的研究已成为近年来振动领域一个新的热点。激振技术决定着振动机械和各类模拟振动台的技术水平, 是一项不可或缺的基础技术。激振器性能的好坏, 技术水平的高低直接影响到航空航天、建筑、机械制造等工业领域的进步和发展, 同时也是衡量一个国家的工业技术发展水平的重要标志之一。

本文阐述了捣固装置的发展概况, 重点论述了捣固装置激振技术研究现状, 最后, 指出了目前存在的问题, 并对解决方法进行了探讨。

1 国内外捣固装置现状和研究概况

国际捣固车的发展过程经历了由步进式发展为连续式, 单枕捣固到双枕捣固乃至多枕捣固, 单一的捣固模式到多种作业模式, 检测方式由弦线检测发展到光学检测, 由线路几何参数相对基准的检测发展到线路几何参数绝对基准检测。捣固技术一直是沿着提高作业效率、提高作业控制精度、提高作业质量的轨迹发展。

国外 Plasser 公司、Matisa 公司和 Harsco 三家公司产品技术已趋成熟, 生产的捣固机械大多为重型、高效、多功能等形式。Plasser 公司成立于 1953 年, 总部在奥地利, 是当今全球最著名的铁路工程机械制造商之一; 是专门从事对铁路线路、道岔和接触网的新建、大修与养护作业的机械和车辆的研究、开发、制造和销售的专业厂家。目前, 所制造的 D09-32 型捣固车采用连续式捣固作业, 弦线检测方式, 能以三点或四点法引导作业, 其捣固装置采用偏心轴连杆摇摆式激振方式。Matisa 公司是世界著名的大型养路机械制造商, 从 1945 年在瑞士正式成立以来, 以生产捣固机驰名世界。振动、夹持捣固法就是它的专利。该公司产品一度垄断国际市场, 行销世界各地。主要产品有抄平、起拨道捣固机及其他大型养路机械等, 目前作业检测采用光学检测方式, 作业精度高, 其捣固装置采用双轴椭圆激振方式。Harsco 公司是美国专业生产铁路养路机械,

具有 100 年的历史, 在美国南卡罗来纳、密执安、明尼苏达、和澳大利亚及英国有生产基地。其主要产品有 MARK 系列捣固车及其他线路维修车, 所制造的捣固车在北美洲拥有大部分市场, 目前作业检测采用光学检测方式, 控制系统采用总性控制技术, 其捣固装置采用水平面扭转激振方式。有关国外这方面的相关技术多查询于国外专利, 因为在该方面相关的研究文献及技术资料涉及到企业生存发展, 所以相关研究资料鲜有公开。

目前, 国外捣固机械的主要发展研究方向如下^[1]。

(1) 向高效率发展。捣固装置向同时捣固多根轨枕的方向发展以提高作业效率。当今, 捣固车作业效率可达 2 000 m/h。

(2) 向综合作业发展。捣固车大都设有抄平装置、起拨道装置, 有的还装有枕端夯实装置, 故可同时完成多项作业任务。

(3) 向高精度、自动化发展。大多数捣固车都应用激光抄平、光电转换、计算机控制捣固起拨道装置, 使线路高度差在 0.8~1.0 mm。

(4) 向高运行速度发展。捣固机械在作业时采取不间断的连续运行方式; 区间运行速度可达到 80 km/h。联挂列车运行时, 允许速度达到 100 km/h。

我国是从 20 世纪 50 年代开始使用机械捣固的, 捣固机械的发展大致经历了三个阶段: 20 世纪 50~70 年代, 以电动捣固机为主, 依据操纵方式分为手提式和上架式两种; 20 世纪 70~80 年代, 发展液压中小型捣固机, 仅适用于新建铁路或线路大修捣固作业, 在列车密度不大的区段亦可用于线路维修; 20 世纪 80~90 年代, 国内开始引进国外先进技术, 制造大型高效综合作业捣固机械。目前, 襄樊金鹰重型工程机械有限公司和昆明中铁大型养路机械集团有限责任公司通过引进技术、消化吸收再创新, 打破国外技术壁垒, 开发出了一批具有自主知识产权的新产品, 并创立了符合国情的大型养路机械发展模式和技术体系, 站在国内铁路养路机械技术的最前沿, 但现有产品关键技术和核心元件基本依赖引进^[2]。

随着国内对国外三家公司各种捣固车的引进, 不同类型捣固装置的技术理论研究也不断在深入, 主要集中在捣固装置的振动方式、振动频率、振幅、结构组成与激振原理等方面。

1997 年, 韩志青^[3]分析了 D08-32 型双枕捣固车的捣固装置, 捣固镐振动原理为偏心连杆摇摆式机械强迫振动, 方式为简谐振动^[4], 同时论文依据“振动对道床效应”试验报告认为, 振动器与道床道

碴的谐振频率为 42 Hz^[5]。2003 年,李毅松等^[6]敏红对 D09-32 型捣固车捣固装置进行了分析研究,并系统阐述了该捣固装置的功能特点、结构组成、振动夹持方式以及异步稳压捣固原理。2005 年,高兵等^[7]就 CD08-475 型道岔捣固车捣固装置的结构原理进行了总结分析,阐述了异步定压力捣固原理及其压实过程,认为捣固镐头最佳振动频率为 35 Hz,在一定激振力下,轨枕随捣固频率的变化而变化,在 35 Hz 左右对轨枕有小幅的提升作用。经验认为最佳捣固振幅为 3~5 mm,最佳挤压时间为 0.8~1.2 s。2008 年,应立军等^[8-9]介绍了国外捣稳一体化设备研制的新进展。文献[9]分析了捣固、稳定联合作业模式的工作原理,文献同时分析了 Matisa 捣固装置的捣实机理,指出采用双轴椭圆振动的捣固装置能对道碴产生竖直和水平双向的振动,能有效提高道碴的密实度,改善道床的稳定性,并对捣固频率的选择进行了探讨,依据 Plasser 公司提供的轨枕随捣固频率的变化图得出轨枕的下沉量在 60 Hz 附近最大,高频率的振动下,道碴流动性强,轨道下沉量明显,有助于提高轨枕稳定性。在捣固机理方面,赵明华等^[10-11]用振动波理论来解释振动机理,阐述了横波、纵波对道碴的作用。利用振动波理论提出了一种推论:在初始的振动、捣固次数增加时,道碴的密实度有所提高,道碴密实度提高到一定程度后,随着振动、捣固次数的增加,道碴密实度反而减小。

总的来说,国内高校及企业对捣固装置技术的研究仅停留在对已有捣固装置的技术参数及结构方面的分析,没有形成对捣固装置的技术参数及结构优化理论的指导,更未解决强迫振动加速捣固镐磨损、捣固镐振动产生夹持液压缸摆动和捣固镐振幅和频率不能无级可调的问题。

2 捣固装置激振形式

激振器是附加在某些机械和设备上用以产生激励力的装置,是产生机械振动的重要部件。激振器能使被激物体获得一定形式和强度的振动,实现振动模拟或利用振动完成捣固、破碎等任务,已广泛应用于地震模拟、汽车、航空航天、机电系统及其零部件性能和寿命试验,以及机械捣固、振动破岩和钻孔等领域。

从振动动力元件的工作原理上看,按激励形式的不同,激振形式分为机械式、电动式、液压式、电致或磁致伸缩效应式和气动式等形式。现有各类振动激振装置的性能特点如下。

(1) 机械式:主要分为离心式和直接作用式两类。离心式机械振动装置的频率范围一般为 5~100 Hz,负载为 50~10 000 N;直接作用式机械振动装置的频率范围为 1~200 Hz,可得到很大的推力和较大的振幅。这类振动装置结构简单、成本低,但上限频率较低,广泛应用于各种低频振动场合^[12]。

(2) 电动式:能产生复杂的振动波形,具有波形失真度较小、工作频率范围大等优点,由于受到固有磁饱和的限制,不易获得大激振力^[13-14],此外,设备结构复杂、振动位移有限并需要辅助冷却装置,因此,主要应用于振动试验台。小型电磁式振动台的频率范围为 0~10 kHz,大型电动式振动台频率范围为 0~2 kHz,主要应用于航空、航天及国防等领域^[15-16]。

(3) 液压式:广泛地应用于振动打桩、振动锻造、振动造型、振动剪切、振动压实、振动输送、振动筛、农业机械和振动试验台等^[17-18]。

(4) 电致或磁致伸缩效应式:最新发展的一类微型振动器^[19],能达到极高的振动频率,可实现超声振动,振动波形基本不失真,但输出振幅及功率都很小,目前的振动辅助加工大都采用此类振动器,也成功地应用于非圆车削^[20-21]。

(5) 气动式:主要应用于振动台,与常规电动振动台相比,气动式振动台能够产生一种超高斯幅值分布的宽带随机振动,其振动激励的最高频率可达 10 000 Hz,有效频带约为 20~6 000 Hz^[22-23]。

图 1 所示为 5 类振动装备振动频率及振幅范围比较,激振频率范围皆可满足捣固装置。不同激振方式各具特点,在一定程度上能满足不同的需要。下面将阐述应用不同激振技术捣固装置的工作原理。

图 1 五种类型振动设备应用区域

全球捣固装置核心技术主要由 Plasser、Matisa 和 Harsco 三家国外公司所掌握,它们分别一直沿用其传统的机械机构来实现捣固镐的振动,进而夯实捣固石碴,其各自工作原理如下。

表 不同捣固机械激振方式对比

捣固机械	振动方式	振幅/mm	振动频率/Hz	激振装置/套	工作关联性	单个镐头的 激振力/N
Harsco	水平扭转振动	9.5	53	8	两个捣固臂共用一套激振装置	3 600
Matisa	垂直平面椭圆振动	11	45	2	八个捣固臂共用一套激振装置	—
Plasser	垂直平面摇摆振动	8.75	35	2	八个捣固臂共用一套激振装置	3 633
TYD-16	垂直平面摆动振动	10	30	4	两个捣固臂共用一套激振装置	—
小型液压捣固机	垂直平面摆动振动	10~15	57~67	2	两个捣固臂共用一套激振装置	15 000~20 000
电动捣固机	椭圆振动	35~40	47	1	单个捣固臂工作	2 500~3 500
软轴捣固机	偏心旋转的滚锥产生离心振动	1.25	150~177	1	单个捣固臂工作	4 000~5 400

现有的捣固装置也是按照激振方式进行分类,对上述捣固装置的分析可知,捣固装置的激振系统是用来实现与捣固臂固定联接的捣镐的振动的部分,应用最多的是偏心轴激振。**Plasser** 公司捣固装置的偏心轴是装在夹持液压缸与箱体的铰接点, **Matisa** 公司捣固装置的偏心轴是装在内、外捣固臂与箱体的铰接点, **Harsco** 公司捣固装置是通过偏心轴和偏移补偿连接器驱动捣镐振动。捣固装置的结构特点主要是根据所采用的激振方式决定的,按照驱动方式,上述捣固装置激振方式多为机械式。机械式激振装置一般是利用凸轮或曲柄连杆等机构直接对对象施加周期性载荷,或者是利用偏心质量块旋转产生的离心力作为激励力来对对象施加周期性载荷,其工作原理如图 8 和图 9 所示^[12]。**Plasser**、**Harsco** 捣固装置激振原理属于曲柄滑块直接驱动式机械激振原理,而 **Matisa** 捣固装置激振属于离心式机械激振原理。

图 8 直接驱动式机械激振装置

图 9 离心式机械激振装置

机械式激振器主要适用于激振幅值较大及频率较低的工况中,激振波形一般为等振幅正弦波,而只能在停机的状态下改变激励振幅。而捣固装置

激振的一个共同特点是要求载荷和输出功率大,频率高且可变,为获得好的振动性能往往还需要振幅和波形可调可控。

3 新型液压激振技术研究现状

随着现代工业、土木建筑,尤其重载大型工程机械、航空航天等高科技领域的大量需求及不断发展,对激振技术的工作频率范围及输出推力的要求也越来越高。

从图 1 不同类型振动设备应用区域中可以看出,液压式激振的力和振幅最大,液压激振一般是指通过对液压控制元件输入来实现液压执行元件作往复运动,进而使施振对象起振,主要有交流液压激振、直流液压激振、液压自激振荡、液压射流和电液激振等多种方式等。传统液压激振技术的优点是输出功率大,能量利用率高,输出特性易于调节,机构简单,运行可靠,适宜在特殊作业环境下工作^[30]。缺点是高频性能较差,期望振动波形很难实现,且波形失真比电动激振大,整套系统复杂,成本较高^[31]。如何在高频范围增大输出推力及振幅始终是液压激振技术应用在工程机械所要突破的技术难题。因此,传统液压振动技术通常应用于低频、大推力振动领域。在工业生产中应用的液压激振器,主要是以液控换向阀或伺服阀控制流体的通断而产生振动,由于性价比及使用场合等因素的限制,在一般的振动机械中难以普及使用。传统的电液式激振工作原理如图 10 所示,它是通过对电液伺服阀输入振动激励信号控制液压执行元件作扭转运动或往复直线运动。振动的激励信号通过输入的期望振动信号与传感器实际测得的振动信号进行对比,并通过振动控制算法而获得。频率范围很大程度取决于伺服阀的频宽,一般为 0~100 Hz,台面负载可达数万牛顿^[17, 32]。

针对如何获得冲击和噪声小的期望振动波形以及提高工作频率范围、增大输出推力以及实现大

图 10 电液激振原理图

振幅的问题,近年国内外开展了许多研究,如:通过三状态反馈和极点配置的方法,消除液压谐振,来拓宽电液伺服系统的频宽^[33];采用专用的动圈式伺服阀^[34-35]及德国 Rexroth 的电液伺服阀^[36]等,提高伺服阀的频宽,如图 11 所示。但是,由于阀芯往复这种结构原理的限制,难以解决过流面积、阀芯行程与振动频率和波形的矛盾,即使采用工艺复杂、价格昂贵、对油液污染极其敏感的三级电液伺服阀,其频宽也难以取得较大的突破,振动波形的控制更是难以实现,目前在振动波形有较高要求时的振动频率只能限制在较低范围,一般小于 20 Hz。

图 11 伺服阀剖面结构

为了突破阀芯往复激振存在的局限以满足具体的工程要求,近年许多学者一直在寻求一种新的激振形式,人们试图采用新的控制元件取代电液伺服阀以提高电液激振性能,如图 12 所示,多位学者采用阀芯连续转动结构来提高电液激振器的激振频率,液压缸一腔与高压油连通,改变另一腔的压力实现往复振动,通过控制输入油液压力控制振动幅值^[37-38]。

图 12 转阀结构的电液激振器

浙江工业大学阮健等提出了一种旋转阀芯结构新型高频电液激振器结构用于大推力液压振动台,如图 13 所示,并对电液激振器的频率特性、高频信号的采集与幅值提取技术、典型激振波形的实现与控制等进行了充分研究。在频宽方面取得重要突破,使得电液激振频率大幅提高。此外,应用 2D 激振阀与普通伺服阀控制液压缸,通过分别调整 2D 激振阀轴向位移、伺服阀开口及阀芯旋转的相位则可对输出液压振动的幅值、偏置及相位进行独立控制。该方案相当于传统电液激振器的半开环控制,但由于采用转阀取代伺服阀,可以使液压激振频率大幅提高^[39-41]。

图 13 2D 阀控电液激振器原理图

其他类似的进展还有浙江大学研制的平衡台阶式液压转阀和回转直动式电液伺服阀^[42-44]、日本井上久男设计的回转式方向切换阀^[45]、MARCUS 设计的转轴式液压转阀^[46]等。

4 存在的问题与展望

虽然各种型号捣固装置的国产化已经取得了很大进展,但国内外生产捣固装置的企业都是偏重于产品的实用性和制造生产,缺少对捣固装置的理论研究。在具体对比目前国外三家公司不同捣固装置激振原理,作者认为捣固装置在激振方面还存在以下几个方面的问题。

(1) 捣固装置捣固振动的偏心轴偏心率和振动频率不能无级调节,不能更好地满足在板结道床,捣固装置的高频率低振动幅值捣固工作要求,而在松散道床的低频率高振动幅值捣固工作要求。

(2) 捣固装置在作业时,捣固臂的旋转偏心轴与夹持液压缸的活塞杆或缸筒直接或间接的铰接,捣固臂夹持与振动不独立,使得偏心轴的高速旋转将对夹持液压缸产生振动,影响了夹持液压缸作业性能,容易造成液压缸损坏和泄漏等问题,影响夹持液压系统工作稳定性。

(3) 部分产品中多个捣固臂共用一个振动偏心轴, 该振动偏心轴和某一捣固臂若出现故障将影响其他捣固臂的工作, 造成捣固装置使用和维修的不便。

(4) 各捣固装置的捣固镐振动是机械式的强迫振动, 加快捣固镐磨损速度。

因此, 捣固装置的可靠性和作业效率主要取决于该装备所能产生的激振频率和波形, 并针对不同的道碴特性进行调整优化的能力, 激振技术是此类装备性能进一步提高的关键。

针对捣固装置对激振力、频宽和波形等的要求, 考虑到应用在捣固机械控制元件的经济性, 研制出一种能提高液压激振系统的大推力、频率和流量的阀芯旋转式四通高速换向阀(专利号 20101010305.1)以及一种自动限位的微行程双作用激振液压缸(专利号 201110229855.8 和 201110229924.5)。该阀是采用旋转式阀芯和阀套的配合结构, 利用电动机带动阀芯的旋转运动来实现液压缸瞬间运动换向, 液压缸中的活塞杆设有限位孔和单向阀来实现液压缸小幅高频振动和自动限位。基于阀芯旋转式大功率电液激振技术研究, 利用激振液压缸带动捣固臂来回振动以替代原有捣固机械的激振方式, 开发两种各具特色的新型捣固装置: 液压激振与夹持运动独立的捣固装置(专利号 201010104672.9)和液压直接激振捣固装置(专利号 201010104678.6), 其中, 液压激振负载自适应特性解决了传统捣固装置机械强迫振动的问题, 降低捣固镐的磨损速度, 液压激振与夹持运动独立的捣固装置结构也解决捣固头振动产生的夹持液压缸的摆动问题。

在此基础上, 利用计算流体动力学数字模拟和模型样机物理试验相结合, 研究新型电液激振器内流体流动, 揭示阀芯转速、振动、阀口结构尺寸、液动力等的变化规律, 通过找到阀芯液动力、摩擦阻力等非线性因素对转速稳定性的影响规律, 提出以转速可控和稳定为目标的液动力补偿办法, 实现阀芯转速的稳定控制, 满足不同工况下, 捣固频率和振幅的无级调节。因此, 阀芯旋转式大功率电液激振技术在捣固装置的应用实现了捣固装置在激振技术上的跨越式发展, 这也是捣固装置未来发展的趋势^[47-48]。

5 结论

为了实现拥有自主知识产权的捣固车, 提高我国大型养路机械整体水平, 克服强迫振动加速捣固

镐磨损及捣固振动产生夹持液压缸摆动的问题, 采用负载自适应、频率和振幅的无级调节的液压激振技术是捣固装置发展的趋势。随着科学技术的迅速发展, 电液激振技术应用的越来越广泛, 尤其在工程机械领域, 电液激振的理论研究和实际工程应用都取得了巨大进步, 但是对于满足电液激振器在高频率区域增大输出推力、实现大流量, 还存在诸多技术难题和科学挑战, 捣固效果与捣固装置结构参数、工作参数和道碴特性的相关关系也需要进一步深入研究, 尤其以适应不同的工况要求、实现自动化、液压负载自适应以及有利于提高综合作业精度和捣固寿命的新型捣固装置激振技术开发问题是亟待解决的重大技术难题。

参 考 文 献

- [1] 寇长青, 周海浪. 铁道工程施工机械[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
KOU Changqing, ZHOU Hailang. Machinery on railway construction[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [2] 程文明. 回眸中国铁路养路机械装备的发展[J]. 现代管理, 2006, 10(4): 181-182.
CHENG Wenming. A retrospect of the development of mechanical equipments for railway maintenance in china[J]. Modern Management, 2006, 10(4): 181-182.
- [3] 韩志青. 捣固装置的振动分析[J]. 工程机械, 1997(9): 19-21.
HAN Zhiqing. Vibration analysis for tamping device[J]. Construction Machinery and Equipment, 1997(9): 19-21.
- [4] 应立军, 周书武, 元琳, 等. 08-32 捣固车作业电气救援系统的研制[J]. 铁道学报, 2004, 26(6): 33-36.
YING Lijun, ZHOU Shuwu, QI Lin, et al. Design and development of the rescue system for electric system of tamper 08-32[J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(6): 33-36.
- [5] MARK R. Effect of vibration on ballast[J]. Magazine of British Geography, 1981(9): 43-49.
- [6] 李毅松, 翁敏红. D09-32 型捣固装置的结构、功能及运动分析[J]. 机车车辆工艺, 2003(2): 4-7.
LI Yisong, WENG Minhong. Analysis of structure, function and movement on type D09-32 tamping unit[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2003(2): 4-7.
- [7] 高兵, 王有虹. CD08-475 型捣固装置的结构原理分析[J]. 机车车辆工艺, 2005(4): 27-29.
GAO Bing, WANG Youhong. Analysis of the structure of CD08-475 tamping unit[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2005(4): 27-29.

- [8] 应立军, 李云召. 新型捣稳一体化捣固装置的研究[J]. 工程机械, 2008, 39(6): 20-23.
YING Lijun, LI Yunzhao. Research on a new type tamping device integrating tamper and stabilizer[J]. Construction Machinery and Equipment, 2008, 39(6): 20-23.
- [9] 李云召. 新型捣稳一体化技术的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
LI Yunzhao. Research on integrating tamper and stabilizer[D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [10] 赵明华, 曾广洗, 刘江波. 填石料的振动压实变形特性及压实机理试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2006, 3(4): 41-45.
ZHAO Minghua, ZENG Guangxian, LIU Jiangbo. Experimental research on transforming characteristics and compaction mechanism of rockfill under the process of vibration compaction[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2006, 3(4): 41-45.
- [11] 李夕兵, 古德生, 陈寿如. 应力波作用下散体岩料的压实与能量耗损[J]. 中南矿冶学院学报, 1994, 25(5): 570-574.
LI Xibing, GU Desheng, CHEN Shouru. The dynamic reinforce and energy dissipation of rock bulk under impulsive loads[J]. Journal of Central South Institute of Mining and Metallurgy, 1994, 25(5): 570-574.
- [12] YAMASHITA I, ORO K, SEIKAI S. A study of mechanical vibration signal transmission using position modulated optical pulses[J]. IEEE Transactions on Electronics Information and Systems, 2007, 127(11): 1951-1952.
- [13] LANG G F, SNYDER D. Understanding the physics of electrodynamic shaker performance[J]. Sound and Vibration, 2001(10): 324-335.
- [14] CHEN T H, LIAW C M. Vibration acceleration control of an inverter-fed electrodynamic shaker[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 1999, 4(1): 60-67.
- [15] UNDERWOOD M A, KELLER T. Recent system developments for multi-actuator vibration control[J]. Sound and Vibration, 2001, 35(10): 16-23.
- [16] UNDERWOOD M A, KELLER T. Applying coordinate transformations to multi-DOF shaker control[J]. Sound and Vibration, 2006, 40(1): 14-27.
- [17] 陈云敏, 韩超, 凌道盛, 等. ZJU400 离心机研制及其振动台性能评价[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1887-1894.
CHEN Yunmin, HAN Chao, LING Daosheng, et al. Development of geotechnical centrifuge ZJU400 and performance assessment of its shaking table system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1887-1894.
- [18] 何清华. 液压冲击机构研究与设计[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2009.
HE Qinghua. Research and design of hydraulic impact mechanism[M]. Changsha: Central South University Press, 2009.
- [19] GRASTY L. New electro-magnetic shaker technology[J]. Sound and Vibration, 2002(3): 68-78.
- [20] BREHL D E, DOW T A. Review of vibration-assisted machining[J]. Precision Engineering, 2008(32): 153-172.
- [21] MA Chunxiang, SHAMOTO E, MORIWAKI T, et al. Study of machining accuracy in ultrasonic elliptical vibration cutting[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2004(44): 1305-1310.
- [22] 王考. 气动式振动台振动激励能谱优化研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
WANG Kao. Research on energy spectrum optimization of vibration excitations produced by repetitive shock machine[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009.
- [23] 王考, 陶俊勇, 陈循, 等. 气动式振动台理想激励信号的特性[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 142-147.
WANG Kao, TAO Junyong, CHEN Xun, et al. Characteristics of ideal exciting signals of repetitive shock machine[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 142-147.
- [24] JOSEF T. Ballast tamping machine and method for tamping a railway Track: (AT)EP, 1403433A3 [P]. 2004-05-26.
- [25] JOSEF T. Tamping machine: (AT)EP, 1387003A2 [P]. 2004-02-04.
- [26] YVO C S, YVAN D. Railway track tamping device: (CH)EP, 0050889A1[P]. 1982-05-05.
- [27] GANZ J. Railway ballast tamping machine: (CH) EP, 0424322A1[P]. 1991-04-24.
- [28] SANDSTED C A, MOORE R J, DELUCIA A P, et al. Split tool mechanical vibrator: US, 5584248[P]. 1996-12-17.
- [29] OHN M, PETER Y. Single shaft tamper with reciprocating rotational output: US, 6386114[P]. 2002-05-14.
- [30] RUAN J, BURTON R T. An electrohydraulic vibration exciter using a two-dimensional valve[J]. Journal of Systems and Control Engineering, 2009, 223(2): 135-141.
- [31] 任燕, 阮健. 典型波形作用下电液激振器输出波形研究

- [J]. 中国机械工程, 2009, 20(24): 2963-2968.
- REN Yan, RUAN Jian. Study on output waveforms of an Electro-hydraulic vibration exciter under actions of typical waveforms[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2009, 20 (24): 2963-2968.
- [32] SU D H, CUI X, WU X H. Analysis and simulation of dynamic properties of high frequency hydraulic vibration[C]//7th International Conference on Progress of Machining Technology, Nanjing, 2004: 918-922.
- [33] 徐洋, 华宏星, 韩俊伟. 结构主动控制中液压振动台的控制器设计[J]. 机械工程学报, 2008, 44(12): 314-318.
- XU Yang, HUA Hongxing, HAN Junwei. Controller design for hydraulic shaking table in active structural control[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(12): 314-318.
- [34] NASCUTIU L. Voice coil actuator for hydraulic servo valves with high transient performances[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, Cluj—Napoca. Romania: IEEE, 2006: 185-190.
- [35] MTS. 1000Hz high-cycle fatigue test system [EB/OL]. [2008-02-02]. http://www.mts.com/stellent/groups/public/documents/library/dev_003810.pdf.
- [36] 李其朋. 直动式电液伺服阀关键技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- LI Qipeng. Research on the key technologies of direct drive servo valve[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [37] 廉红珍, 寇子明. 振动机械液压激振方式的特点分析和综述[J]. 煤矿机械, 2007, 27(11): 12-14.
- LIAN Hongzhen, KOU Ziming. Characteristics analysis and development summary on hydraulic exciting ways of vibrating machine[J]. Coal Mine Machinery, 2007, 27 (11): 12-14.
- [38] 郝建功, 张耀成. 新型电液激振装置的性能研究[J]. 太原理工大学学报, 2003(6): 706-709.
- HAO Jiangong, ZHANG Yaocheng. Study on the properties of a new electro-hydraulic exciting system[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2003(6): 706-709.
- [39] 阮健, 裴翔, 李胜. 2D 电液数字换向阀[J]. 机械工程学报, 2000, 36(3): 86-89.
- RUAN Jian, PEI Xiang, LI Sheng. 2D Digital directional control valve[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(3): 86-89.
- [40] 阮健, 李胜, 裴翔, 等. 数字阀的分级控制及非线性[J]. 机械工程学报, 2005, 41(11): 91-97.
- RUAN Jian, LI Sheng, PEI Xiang, et al. Stage control and nonlinearities of digital valves[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(11): 91-97.
- [41] 阮健, 李胜, 裴翔, 等. 2D 阀控电液激振器[J]. 机械工程学报, 2009, 45(11): 125-132.
- RUAN Jian, LI Sheng, PEI Xiang, et al. Electrohydraulic vibration exciter controlled by 2D valve[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(11): 125-132.
- [42] CUI Jian, DING Fan, LI Qipeng. Novel bidirectional rotary proportional actuator for electrohydraulic rotary valves[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(7): 3254-3258.
- [43] 崔剑, 丁凡, 李其朋. 耐高压双向旋转比例电磁铁的静态力矩特性[J]. 浙江大学学报, 2007, 41(9): 1578-1581.
- CUI Jian, DING Fan, LI Qipeng. Static torque characteristics of high-pressure bidirectional rotary proportional solenoid[J]. Journal of Zhejiang University, 2007, 41(9): 1578-1581.
- [44] 崔剑. 回转直动式电液伺服阀关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- CUI Jian. Key technical research of rotary electrohydraulic directdrive servo valve[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [45] INOUE H. Rotary system direction Changing-over valve: Japan JP53089850[P]. 1978-07-21.
- [46] MARCUS B L. Rotary servo valve: United states US5954093[P]. 1999-09-21.
- [47] 刘毅, 龚国芳, 闵超庆, 等. 新型捣固装置的结构建模与仿真[J]. 浙江大学学报, 2011, 45(11): 1941-1947.
- LIU Yi, GONG Guofang, MIN Chaoqing, et al. Structure modeling and simulation of new type of tamping device [J]. Journal of Zhejiang University, 2011, 45(11): 1941-1947.
- [48] MIN Chaoqing, GONG Guofang, LIU Yi. Design and simulation research on new tamper based on ADAMS[C]// 2010 International Conference on Digital Manufacture and Automation, Hunan, 2011: 494-498.
-
- 作者简介: 刘毅, 男, 1985 年出生, 博士研究生。主要研究方向为液压传动与控制。
- E-mail: 8303446@qq.com
- 龚国芳(通信作者), 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为液压传动与控制。
- E-mail: gfgong@zju.edu.cn