

TANPUJI YUNPINGBAN De

Gouzao Jiqi Donglixue Tezheng

摊铺机熨平板的

构造及其动力学特征

孙健 / 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

摊铺机熨平板的构造 及其动力学特征

孙 健 著



中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

摊铺机熨平板的构造及其动力学特征 / 孙健著. —

徐州 : 中国矿业大学出版社, 2017. 11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3767 - 5

I. ①摊… II. ①孙… III. ①路面施工机械—沥青摊铺机—构造动力学 IV. ①U415.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 271010 号

书 名 摊铺机熨平板的构造及其动力学特征
著 者 孙 健
责任编辑 褚建萍
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83884103 83885105
出版服务 (0516)83995789 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 10.25 字数 270 千字
版次印次 2017 年 11 月第 1 版 2017 年 11 月第 1 次印刷
定 价 39.80 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

随着公路建设事业的迅速发展,对于路面的要求也在不断提升。路面的平整度和密实度是评价高等级公路修筑质量的主要指标,这与摊铺机的熨平板装置密切相关。熨平板的主要作用是把分料装置所输出的沥青混凝土、稳定土等混合摊铺材料进行整平、整形及预压实,是保证路面摊铺质量的重要装置之一。

本书分析了摊铺机熨平板的结构与工作原理,将模态分析理论、多体系统动力学和虚拟样机理论引入到熨平板的设计之中,采用理论和实验的方法,研究了摊铺机熨平板的动力学特性,主要对以下内容进行了研究和探讨:① 摊铺机熨平板的结构和压实机理;② 熨平板运动学及动力学分析;③ 应用有限元分析法对熨平板进行了结构动力学分析及动力学修改;④ 熨平板联合仿真虚拟样机模型建立;⑤ 熨平板三维可视化动力学仿真分析;⑥ 摊铺机熨平板实验研究;⑦ 研究提高熨平板振动稳定性的方法。

熨平板直接与摊铺材料接触,通过振捣、振动机构以及熨平板框架对路面进行预压实,其性态将直接影响摊铺后的成型路面。因此,对于熨平板压实机理的研究与动力学特性的研究有着更深刻的理论意义。本书的研究可为摊铺机熨平板的设计及施工参数的确定提供参考,也可作为从事摊铺机械的研究、设计、制造及应用等技术人员的参考书。

鉴于作者的水平和经验所限,书中难免会有不足和疏漏之处,敬请读者批评指正。

作 者

2017年8月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 国内外摊铺机的发展概况	2
第三节 摊铺机熨平板的研究现状	4
第四节 虚拟样机技术发展概况	7
第二章 摊铺机熨平板结构原理	12
第一节 摊铺机结构原理简介	12
第二节 摊铺机熨平板的结构	19
第三节 摊铺机熨平板的工作原理	22
第四节 摊铺机熨平板的调整	23
第五节 摊铺机熨平板的养护与故障排除	28
第三章 摊铺机熨平板压实机理	31
第一节 概述	31
第二节 土壤物理特性	32
第三节 摊铺机熨平板压实机理分析	34
第四节 摊铺机熨平板自动找平原理	42
第四章 摊铺机熨平板动力学建模与分析	48
第一节 摊铺机熨平板振动单元结构分析	48
第二节 摊铺机熨平板振动单元的动力学分析	51
第三节 摊铺机熨平板动力学模型	59
第四节 振动微分方程求解	65
第五章 摊铺机熨平板结构动力学分析与修正	72
第一节 有限元分析理论	72
第二节 摊铺机熨平板静力分析	76
第三节 摊铺机熨平板的固有特性分析	78
第四节 摊铺机熨平板结构动力学修正	81

第六章 摊铺机熨平板虚拟样机模型建立	93
第一节 摊铺机熨平板装置三维几何模型建立	93
第二节 摊铺机熨平板动力学仿真模型建立	96
第三节 柔性体建模	103
第四节 液压驱动模型建立	109
第七章 摊铺机熨平板虚拟样机仿真	113
第一节 ADAMS 仿真计算方法	113
第二节 熨平板振动单元仿真分析	117
第三节 摊铺机熨平板振动仿真分析	126
第八章 摊铺机熨平板动力学性能改进	140
第一节 压实机构参数的影响	140
第二节 摊铺材料刚度的影响	149
第三节 偏心振动轴位置及双振捣机构间相位差的影响	152
参考文献	159

第一章 绪 论

第一节 概 述

我国目前正处于从工业大国向工业强国发展的关键阶段。经过几十年的发展,国家的基础产业和基础设施建设有了长足的发展,特别是作为国民经济推动器的交通运输行业,发展更加迅速,至2016年年末全国的公路总里程达到469.63万km。全国公路网的迅速发展,给工程机械行业带来了巨大的发展机遇,国产路面机械逐渐发展,由弱到强、由小到大,一大批工程机械企业随之崛起。但随着具有高新技术装备且性能优良的国外路面机械产品大量涌入中国市场,这对产品技术含量相对较低的国内工程机械行业形成了巨大的冲击。如何进行产品结构调整、提高产品科技含量、改善产品技术性能、掌握核心技术、拥有自主知识产权将是我国工程机械行业面临和需要解决的重要问题。这些问题的解决将使我国的工程机械行业跳出简单模仿、低水平的模式,提高工程机械在国际上的竞争能力,实现可持续发展。

随着各等级公路的延伸和使用,对公路路面的要求不断提高,我国的路面施工机械亟待发展,尤其是用于路面施工的摊铺机械。沥青混凝土摊铺机是把级配混合料按施工要求的宽度和厚度均匀地摊铺在已修好的路基或路面基层上,并对其进行一定程度预压实和熨平的专用机械。它集机电液一体化技术于一身,是路面机械中技术含量较高、结构比较复杂的专用设备之一,广泛应用于交通道路、机场、水利大坝、矿山、港口以及市政道路建设等工程的施工。

图1-1为摊铺机施工现场,图1-2表示了摊铺机的结构与工作原理。如图1-2所示,摊铺机主要由主机和熨平板两部分组成,主机主要包括推轮、受料装置、动力系统、履带装置、输料系统、分料系统、液压系统、电气控制系统等;熨平板包括双振捣机构、振动机构、框架、拱度调节装置以及加热装置等。

摊铺机工作过程为:作业前,先将摊铺机调整到位,按摊铺路面的厚度、宽度与拱度等施工要求,调整好摊铺机的各有关机构和装置,使其处于待摊铺状态;装料自卸车倒车至汽车后轮与摊铺机的推轮慢慢接触,启动摊铺机,打开输料、分料开关,自卸车车厢徐徐升起,将混合料缓缓卸入摊铺机受料装置内,位于受料装置底部的输料系统将摊铺材料传送到摊铺机后部的分料装置,混合料在分料叶片的旋转带动下往摊铺机两侧横向布料,然后开动熨平板的振动和双振捣机构,打开摊铺机主开关,摊铺机开始摊铺,摊铺材料经过熨平板压实装置的初步压实,形成平整、密实的路面。

路面的平整度和密实度是评价高等级公路修筑质量的主要指标,这与摊铺机的熨平板装置密切相关。熨平板作为摊铺机的一个关键工作装置,其作用主要是把分料装置所输出



图 1-1 摊铺机施工现场

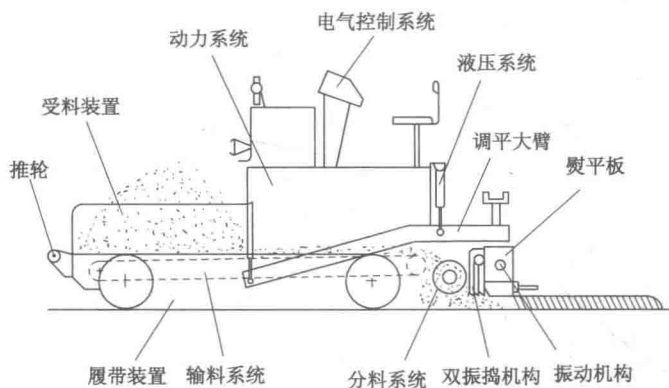


图 1-2 摊铺机结构与工作原理

的沥青混凝土、稳定土等混合摊铺材料进行整平、整形及预压实。由于熨平板直接与摊铺材料接触,其性态将直接影响摊铺后的成型路面,所以熨平板是保证路面摊铺质量的重要装置之一。目前对于熨平板的有关结构和工作参数与其动力学间的关系研究很少,从理论上分析研究摊铺机熨平板的动态特性及影响因素,对于设计出性能先进、使用方便、安装灵活、成本低廉的熨平板,从而提高摊铺机摊铺路面的摊铺质量有着重要的意义。

第二节 国内外摊铺机的发展概况

早在 20 世纪 30 年代,美国的 BIAW-KNOX 与 BARBER-GREENE 等公司就生产出了用于当时道路摊铺的专用摊铺机。当时,摊铺机采用刮板在 20 英尺宽度内对道路进行刮平,摊铺机由路拌设备牵引着前进,对混合料进行整平。随后对摊铺机进行了改进,工作时不需铺设轨道,由拖动式改为自行式,该机装有履带,机体两侧悬有大臂,借此对路面进行控制,滑板在一狭长面积上对混合料进行夯击及刮平。

1933年,美国 BARBER-GREENE 公司对摊铺机作了进一步研究改进,生产出了独立的浮动熨平板装置,这是现代摊铺机的雏形。该机型由牵引装置和熨平板两大部分组成,大臂的铰接点支撑在托板型滑动机构上,工作性能比较令人满意。到 20 世纪 50 年代中期,该公司又成功研制了 BG 系列摊铺机,这些机型已设计了刮板输料装置,大臂的铰接点支撑改在履带上,这种机型成为当时世界上各摊铺机厂商参考的标准机型。

自 1960 年以来,美国、欧洲与日本等工业比较发达的国家和地区,均有许多摊铺机制造厂商与相应的研发部门,不断地研发出各种适应市场需要的新款摊铺机。国际知名摊铺机专业制造厂商主要包括美国 BLAW-KNOX 公司、德国的 VOGELE、ABG、DYNAPC 和 DEMAG 公司。从 20 世纪 80 年代开始,研发了配置多种形式高密实度熨平板的摊铺机,使摊铺层的预压实密度达到了 90% 以上,大大提高了摊铺机的施工效率。尤其对超厚摊铺的基层稳定土材料,效果良好,使路面质量得到了较大的提升。

随着技术装备与工业技术水平的不断发展和提高,摊铺机也逐渐发展为具有多种结构型式与功能的系列化装备,在公路的铺筑中起到越来越重要的作用。

我国在 20 世纪五六十年代,修筑沥青路面采用的大都是二级以下的公路标准。由于受当时各方面条件限制,沥青面层基本上采用层铺法施工,即先用沥青洒布机在已修好的路基上喷洒沥青,再用人工或机械均匀地撒布石料,最后用压路机压实。依据不同的施工要求,可进行这种单层或多层的路面表处施工。当时曾从日本等国进口少量的摊铺机,但也仅限于少数城市的个别路段施工。

20 世纪 70 年代初期,交通部公路科学研究所与交通部西安筑路机械厂共同开发研制了我国第一台摊铺宽度为 4.5 m 的 LT6 型轮胎式沥青混合料摊铺机。迄今为止该机已成为我国累计产量和年生产量最多的摊铺机品种,累计共生产了 1 000 多台套,它遍布全国各公路施工单位,成为沥青路面摊铺作业的主导机械。西安筑路机械厂在引进制造技术和生产 LT6 型摊铺机的基础上,又先后开发出了 LT5、LTY4500 以及 LTU4 型摊铺机。

镇江路面机械总厂与天津工程机械研究所合作,于 20 世纪 80 年代中期从日本 NIIGATA 公司引进了摊铺宽度为 5 m 和 8 m 的摊铺机制造技术,目前也已形成机械式摊铺机批量生产能力。

从 1978 年我国实行改革开放以后,随着高等级公路建设迅速发展,开始逐步进口适用于高等级公路路面摊铺作业的高等级摊铺机。据粗略统计,到 2013 年年底已累计进口上万台套这种摊铺机。在进口的高等级摊铺机中,德国的 ABG 和 VOGELE 公司两家的产品占据了主导地位,达 80% 以上,此外,还进口了德国 DEMAG、DYNAPAC(制造厂在德国)、美国 BLAW-KONX、BARBER-GREENE,意大利 MARINI 以及日本 NIIGATA 等公司生产的产品。目前,进口的摊铺机多为摊铺宽度 9 m 以上的高密实度摊铺机产品。

通过多种形式的技术交流和多种进口摊铺机使用经验的积累,国内逐步了解了高等级摊铺机的先进技术和结构型式。为了尽快地掌握和赶上世界先进水平,交通部西安筑路机械厂与交通部公路科学研究所合作,于 1987 年引进了德国 DYNAPAC-HOSE 公司的摊铺机制造技术。经过消化、吸收和国产化工作,分别研制出摊铺宽度 8 m 的 LTY8(轮胎式)和 GT-LY7500(履带式)高等级摊铺机。

20世纪80年代末,徐州工程机械厂引进了德国福格勒(VOEGELE)公司具有世界领先水平的沥青混凝土摊铺机生产制造技术,在不断消化吸收和综合集成国际领先技术的基础上进行创新发展,形成了拥有自主知识产权的大型高档多功能沥青混凝土系列(9.0~12.5 m)、中型多功能沥青混凝土系列(6~8 m)、稳定材料系列(7.5~12.5 m)、机械式多功能沥青混凝土系列(4.5~9 m)四大系列二十多个品种规格的高技术含量产品。

陕西建设机械厂于1993年与德国ABG公司合作生产TITAN423、325型沥青混合料摊铺机,目前也形成了批量生产能力。

通过引进多家的摊铺机制造技术,一方面我国具备了批量生产制造高等级摊铺机的能力,更重要的是,我国的整体技术水平上了一个台阶,向世界先进水平跨进了一大步。从以前的引进国外摊铺机制造技术到目前的自主研制开发,我国摊铺机整体技术水平上升很快,但由于国内的产品大多是在引进国外图纸基础上生产的,对于熨平板的有关工作参数与其动力学间的关系了解不多,因此研究熨平板装置的工作机理,分析其动力学性能,对改善摊铺机性能、提高铺筑路面的平整度和密实度具有重要意义。

第三节 摊铺机熨平板的研究现状

一、国内外摊铺机熨平板技术发展现状

现代施工项目对沥青混凝土摊铺机的要求越来越高,一定程度上促使机电液一体化技术应用于摊铺机,使其成为最具技术含量的一种筑路机械。熨平装置结构复杂,对保证摊铺质量至关重要,其工作性能的好坏对路面预压实度和平整度有很大影响。

早期的熨平板配置单振捣和振动器,其结构简单,摊铺压实度可达到75%~85%,但仍需要压路机进行多次碾压才能达到规范要求的密实度,且压实变形量较大使得最终的路面平整度较差。

从20世纪80年代至今,道路建设要求摊铺施工时不但有好的平整度,而且有高压实度和均匀性。目前一般采用三种措施提高压实度:①在熨平板上加强,做强夯型熨平板;②在夯锤上加强,做双夯锤;③在熨平板后加装两个高强压力梁。

高压实度熨平板的摊铺预压实度比标准型高出5%~7%,减少了压实次数,提高了生产效率和摊铺平整度。国外各厂家高压实度熨平板技术各有优势,如ABG采用双夯锤+振动单元,VOEGELE采用单夯锤+振动单元+双压力梁,DYNAPAC采用强夯熨平板。目前国外摊铺机各主要生产厂家的熨平板系列丰富,可以根据不同的工况为主机配备合适的熨平装置,满足施工要求。

强夯熨平板可以使黏结层的压实度达到98%,与压路机压实的效果一样,从而使“热对热”的双层摊铺工艺成为可能。在传统摊铺工艺下,由于黏结层的温度相对于磨耗层下降幅度较大,低温时磨耗层和黏结层间的黏结能力降低,从而影响路面压实度的均匀性。双层摊铺同时摊铺磨耗层(面层)和黏结层(中间层)沥青,两层沥青间的黏结力同时可以减少面层沥青的摊铺厚度,VOEGELE和DYNAPAC已经生产出适合该项技术的摊铺机,节约了面层材料,提高了生产效率,目前已参与了多段道路的修筑工作。双层摊铺工艺将广泛地

应用于未来的高等级公路施工中。

二、国内外摊铺机熨平板动力学研究现状

对熨平板的动力学研究方面,研究重点主要集中在对其主要工作装置振捣机构和振动机构的研究,还有对整个熨平板的动力学分析。

早期的文献中,研究者将振捣机构运动简化为单自由度简谐振动,列出了振捣机构运动微分方程:

$$m\ddot{x} = -kx - c\dot{x} + m_1 e\omega_1^2 \sin \omega_1 t$$

在此基础上分析了振捣装置各种参数对摊铺路面压实度和平整度的影响规律。

许庆等人通过对振捣机构的压实过程分析,分析了振捣机构的压实机理,发现振捣压实机构对混合料的压实与摊铺的虚铺厚度 H 和振捣梁行程 l 相关。振捣机构的压实不是由振捣梁所产生的冲击力进行压实的,即振捣压实的机理不是基于冲击力压实的,故振捣机构工作时产生的机构振动有害,应在设计中尽量避免。并将双振捣机构细化为平面四连杆机构,具有一个自由度实现给定的运动。建立了振捣机构的结构模型,并根据简化模型运用封闭向量法建立了双振捣机构的运动学方程,详细分析了各构件的位移、速度和加速度等运动学参数,但未对动力学进行分析。

赵紫苓等分析了振动机构的结构,指出偏心振动机构通过旋转带动整个熨平板振动,能够有效提高摊铺层的密实度,使摊铺路面平整。如偏心振动机构设计与使用不当,会使摊铺材料产生离析,故研究振动机构在熨平板上的安装位置是很有必要的。在此基础上运用三维软件 PRO/E 建立了熨平板实体装配模型,对熨平板振动器安装位置进行了探讨。部分学者建立了振捣机构的简化计算模型,将振捣机构视为单自由度弹簧阻尼系统,计算了各段熨平板振捣机构所产生的惯性力,在此基础上推导出了熨平板振捣机构的总惯性力 $P(t)$,采用 MATLAB 软件对系统进行了仿真分析与计算,发现各段振捣机构间的相位关系对机构产生的惯性力影响较大,应在摊铺机施工时设置合适的振捣机构相位角。

在对整个压实机构的研究中,阮国平等人对熨平板的主要结构和工作机理进行了分析,提出熨平板的工作状态是设计的理论基础。只有合理设计熨平板的结构、比压、刚度、几何参数以及与摊铺机的连接方式,才能保证摊铺机在施工时,尽管会受到多种因素的干扰,熨平板仍能够处于较稳定的动力平衡状态下作业,铺筑出较平整与密实的路面。熨平板的振动机构应该尽量在熨平板的质心位置,振动机构的振幅和频率并非越大就越好,如过大可能会影响摊铺路面的平整度,甚至会造成细骨料上浮,产生离析现象,在摊铺不同材料时,应设置不同的振动振幅和频率。熨平板的振捣压实是通过振捣机构的上下运动来压实材料的,与振捣机构本身产生的振动无关,因此设计时应尽量减少其产生的振动。摊铺时,振捣机构的频率应随着摊铺速度的变化而改变,保证相邻两次振捣运动的夯击面重叠,同时振捣机构的频率不宜设置过高。

刘刚等人将熨平板组成了两个自由度的动力学系统,建立了熨平板的动力学分析模型,如图 1-3 所示。利用计算机仿真计算,研究了熨平板的动力学问题,分析了熨平板动力学参数变化对该系统动态特性的影响。该模型将双振捣机构简化为两套简谐振动,考虑了熨平板所受的垂向惯性力及在垂直方向的运动情况。

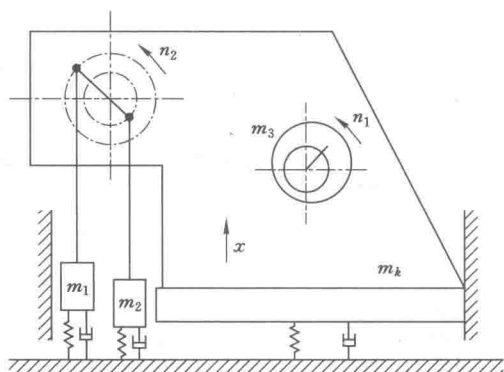


图 1-3 熨平板压实机构双自由度动力学模型

王润宝等人将双振捣机构看作主副两个旋转偏心质量,列出了振捣梁在工作中产生的垂向总惯性力 $P(t)$,即

$$P(t) = \sum_{i=1}^k m_{Zi} (\ddot{x}_{ZYi} + \ddot{x}_{ZZi}) + \sum_{i=1}^k m_{Fi} (\ddot{x}_{FYi} + \ddot{x}_{FZi})$$

式中 m_{Zi}, m_{Fi} ——第 i 段主副振捣梁质量,其中 Z 表示主振捣梁, F 表示副振捣梁;

x_{ZYi} ——右侧主振捣梁位移,函数关系为:

$$x_{ZYi} = e_z \sin[\omega t - (i-1)\beta - \pi/2], i=1, 2, \dots, k;$$

x_{ZZi} ——左侧主振捣梁位移,函数关系为:

$$x_{ZZi} = e_z \sin[\omega t + \alpha + (i-1)\beta - \pi/2], i=1, 2, \dots, k;$$

x_{FYi} ——右侧副振捣梁位移,函数关系为:

$$x_{FYi} = e_f \sin[\omega t + \varphi - (i-1)\beta - \pi/2], i=1, 2, \dots, k;$$

x_{FZi} ——左侧副振捣梁位移,函数关系为:

$$x_{FZi} = e_f \sin[\omega t + \varphi + \alpha + (i-1)\beta - \pi/2], i=1, 2, \dots, k.$$

在此基础上将总惯性力 $P(t)$ 分配到各段振捣梁上,分析了双振捣机构在各频率工作下对整个熨平板的影响。该模型将主副振捣梁简化为两个旋转偏心质量,分析了熨平板垂直方向的运动规律。

针对摊铺机熨平装置一些重要参数的确定,国内于槐三研究了振捣比功率和路面压实度之间的关系,并给出振捣功率计算和熨平板比压计算公式。胡永华以提高路面平整度、密实度为出发点,探讨了摊铺机熨平装置的振捣梁、夯锤、前挡板、熨平板箱体底板、熨平板刚度的设计原则,以及确定振捣频率、各段熨平板振动轴相位角的一些经验性原则。姚运仕等研究了振捣机构的组成结构和振捣冲程的调节原理,建立振捣梁的运动方程,通过数值仿真分析各段振捣梁之间相位角大小与振捣机构惯性力的相互关系,并给出了较合理的相位角取值。于槐三详细论述了强制摊铺和浮动摊铺的作业原理以及浮动摊铺下路面厚度的变化情况,系统介绍了摊铺机行走系统、刮板输送机、螺旋布料器、振捣机构、振动器、液压系统等的设计计算方法和相应经验公式。王翠芳总结了路面施工过程中摊铺机的常见参数,如摊铺宽度、摊铺厚度、熨平板初始工作仰角、拱度、振捣冲程及频率、刮料板高度

等的选择方法,并对选定摊铺机行驶速度作了详细说明;这些经验对摊铺机的结构设计及相关参数取值有一定的指导作用。冯忠绪等在 ANSYS 中建立了熨平板的有限元模型,根据熨平板底板在施工时与热沥青混合料相接触的工作状态施加载荷和约束,求解得到熨平板上温度和位移分布云图,根据熨平板热变形提出了相应补偿方法,大大减小熨平板的热变形量。张超群等分析了沥青摊铺机熨平板与混合料相互作用的特点,对振动振捣装置部分参数取值进行了研究。以上研究结合摊铺机施工作业要求,对常用参数的选择进行了探讨。

和晓军等根据动态设计理论,由摊铺机振动梁固有频率对振动梁结构参数的灵敏度分析确定了主要优化参数,利用神经网络方法对振动梁的尺寸参数进行了优化设计。汤柄新等基于振动梁的有限元模型对振动梁的动力学特性的总体优化方案进行了设计,计算了动力方程的特征值对主要参数的灵敏度,得到了优化设计参数;采用人工神经网络方法对振动梁的固有频率进行了优化。王占军等用有限元法对摊铺机振动梁进行了固有频率和谐波分析,发现振动梁无论长短,其在工作频率下的振幅分布都是不均匀的,且长梁的不均匀度更大;在振动梁长度相同的情况下,振幅不均匀程度随工作频率增高而加大。以上研究根据动态设计原理结合熨平板振动特性对其截面积、截面惯性矩等结构参数进行了研究,从熨平板的固有频率着手借助灵敏度方法确定了修改变量,从而完成结构动力修改。但是熨平装置与工程结构不同,决定压实系统动态性能的是其在外激励作用下的振动响应特性,而非频率特性。而且以上研究没有考虑其他重要参数的影响。对摊铺机来说,其作业性能的优劣很大程度上取决于振动振捣机构作用下压实系统的动态性能,因而以灵敏度分析为基础的结构动力优化是实现其各项性能指标最优的唯一途径。

第四节 虚拟样机技术发展概况

一、多体系统动力学的发展

虚拟样机技术是多种技术的综合,其核心的内容是基于多体系统运动学和动力学的建模理论与其技术实现。数值算法及时地提供了求解这种问题的快速算法。计算机的可视化技术及其动画技术的快速发展给这项技术提供了较好的界面。CAD/FEA 等相关技术的迅速发展也为该项技术的应用与发展提供了较好的技术环境。

多个部件通过各种运动副所连接的复杂的机械系统,称为多体系统,其目的是利用计算机技术处理复杂系统的动态分析和仿真,它是由经典力学而来的,以经典的系统动力学为基础,经历多体系统动力学与计算多体系统动力学两个阶段,目前已日益成熟。

多体系统动力学中最简单情况——自由的质点和少数刚体的运动,是经典力学研究的内容。多刚体动力学是由多个刚体元件组成的复杂机械系统的分析而建立的适用于计算机求解的数学模型,并寻求高效而稳定的数值方法。早在 17 世纪 80 年代,牛顿就建立了牛顿方程来解决质点的动力学问题。刚体的概念最早在 1775 年由欧拉提出,他采用了反作用力的概念来隔离刚体用以描述铰链等约束,并建立了牛顿-欧拉方程的矢量力学方法。在 1788 年,拉格朗日发表了著作《分析力学》,其中系统地研究了约束机械系统,提出了广义坐

标的定义,采用变分原理来考虑机械系统的动能和势能,从而得出了第二类拉氏方程,并应用约束方程和牛顿定律得出了带拉氏乘子的第一类拉氏方程(具有最大数量坐标的动力学微分代数方程)。1908年,若丹提出了若丹原理,用它可以方便地讨论机构碰撞问题与非完整机械系统的动力学问题。

对于包含多个刚体的复杂系统,理论上说可以采用牛顿-欧拉方程和分析力学的方法求解,但是由于刚体数量的增多,方程的复杂程度会成倍增长,进行解析计算往往很难实现。后来随着采用计算机进行数值计算的出现,使对不同多刚体问题写出其数学方程,并编制计算程序来求解成为解决该类问题的可选方案。但是,如果针对各种复杂系统都需要编制计算程序进行求解,显然这个过程的重复是让人不能忍受的,于是迫切需要适合计算机求解及操作的建模方法。这种情况下,在航天等高新技术领域进行了多体系统动力学的探索与研究,并出现了多种派别的研究理论。具有代表性的方法是图论方法(即 R-W 方法)、凯恩(Kane)方法和变分方法。

图论方法是由罗伯逊和威登伯格应用图论的部分概念及数学工具描述复杂刚体系统,选用铰链间相对运动的变量为广义坐标,导出适用任意复杂多体系统的一般形式上的微分方程。该系统动力学微分方程是一组较为精确的非线性微分方程。图论方法很好地解决了树结构的多体系统,而对于非树系统,则可通过刚体分割法把非树系统变换为树系统来处理。

凯恩方法主要是用于建立机构的多自由度离散系统的动力学微分方程,利用广义速率代替广义坐标描述机构的运动,对完整系统和非完整系统均适用。采用凯恩方法,计算推导规格化,既有矢量力学又有分析力学的特点,便于使用计算机进行计算。

变分方法是采用高斯最小约束原理进行多刚体系统的动力学研究,变分方法的原理不是直接表述系统的运动规律,而是将真实运动与可能发生的运动进行对比,在相同条件下所发生的可能运动中指出真实运动所应满足的条件。这种方法以加速度为变量,根据称为约束的泛函的极值条件,采用机械系统在每个时刻的位移与速度求解出其真实加速度,来确定机构的运动规律。

这几种主要的研究方法,虽然着眼点不同,但它们的目标是研究一种适于计算机编程的、高度程式化的建模方法。多刚体系统动力学各种方法可归纳为纯动力学微分方程组与微分-代数混合的方程组这两种类型。

20 世纪的 80 年代,Haug 等确立了“计算多体系统动力学”这门新学科。多体系统动力学的研究内容也由多刚体系统转向多柔体系统,多柔体系统的计算逐渐变得日益重要。在一些系统(如航空航天器、高速运动车辆、机器人系统、精密机械系统等)中柔性体变形会对机构的动态特性影响很大。一直以来出现了许多新方法和概念,如有限元法、运动-弹性力学方法和浮动标架法等。

计算多体系统动力学主要是用计算机数值计算手段研究复杂的机械系统,关心的问题主要是运动学分析、静力学分析、动力学分析和控制系统分析的理论和方法。与多刚体系统相比,柔体和多体与控制相混合的问题的研究是其重要特征。其主要任务为:

(1) 构建复杂系统的运动学与动力学比较程式化的数学模型。开发实现这个数学模型

的软件系统,借助计算机自动进行程式化处理。

(2) 运动学与动力学方程的自动求解。实施有效计算方法,通过计算机以便采用仿真方法自动进行系统的动力学计算。

(3) 实现有效的数据后处理。

多体系统动力学作为虚拟样机技术的基础理论,极大地改变了传动机构动力学分析的面貌,使工程师摆脱了传统的手工计算,只要根据实际情况建立合适的模型,就可用计算机自动求解,并能够提供丰富的结构后处理,对于原来求解很困难或不能求解的大型复杂问题,可以利用计算机的强大计算功能顺利求解。同时,现在许多动力学软件提供了强大的接口功能,能与其他辅助设计软件或分析软件进行连接,满足人们的使用要求。

二、动态设计研究现状

摊铺机的摊铺效果很大程度上取决于压实系统的动力学特性,但是在确定摊铺机压实系统的设计参数时并未考虑所引起的熨平板动态响应不均匀性问题,导致摊铺路面横向平整度不佳。摊铺机是利用振动工作的机械,振动作用能使摊铺路面具有所需的预压实度,但是同时又要设法减轻或消除振动可能引起的不利影响,例如振捣机构对熨平板振动响应的影响、熨平板振动响应不均匀性对铺层材料平整度的影响等。随着摊铺机的大型化趋势,对熨平装置动力学特性的要求也越来越高,因此,对于承受工作动载荷的机械系统,对整体系统及其零部件按照动态设计理论与方法进行较全面和系统的设计是一项不可缺少的工作,是保证该类机械和整个系统可靠和有效运行的重要措施和必要手段,也是保证机械系统满足设计要求和性能指标的有效方法。因此,对于摊铺机熨平装置,通过动态设计达到改善熨平板结构的振动均匀性、提高摊铺机作业质量等目的,这也与国际、国内机械系统设计发展新方向相一致。

近十多年来,动力学理论与方法、现代设计理论与方法、计算机技术等得到了迅速发展,为机械系统动态设计理论的形成和发展奠定了基础。动态设计是处于发展中的新的设计理念,它考虑机械系统的动态载荷和系统的动态特性,以动力学分析为基础实现产品设计,使得在设计阶段就能准确地预测机械系统的动态性能,并进行相应的优化。目前机械系统设计一般是采用传统的设计方法,按照静力准则设计,考虑结构的强度、刚度、稳定性等满足设计要求,这种设计方法目前已经发展得非常成熟。但是对于多体系统来说,部件间的约束形式多样,传统设计方法难以综合考虑约束以及动载荷的影响,也无法满足机械系统动态特性方面的要求。随着机械系统向大型化、高速化、轻质化、复杂化方向发展,其振动问题对系统性能的影响越来越大。对于振动机械来说,其静强度、刚度等并非其设计主要考虑的问题,而其动态性能决定了机械系统的性能,传统设计方法不再适用于这类机械系统的设计。动态设计方法的基本思想是在设计阶段就建立系统的动力学模型,继而分析其动态特性或动响应,并按照对系统的动态特性、动态响应等方面的要求,进行结构动力修改和重分析,以满足其动力学性能的要求。机械系统动态设计理论和计算方法研究始于20世纪70年代,美国、西欧等工业发达国家已经在某些领域取得了很多突出的研究成果,结构动态设计已经成为结构设计的主要研究方向。

不同机械系统或结构进行动态设计的内容一般有所不同,但总的设计流程是:初步设

计符合工作要求的机械结构;按设计图纸或机械结构实物建立动力学模型;根据动力学模型分析系统的动态性能及响应特性;进行实物试验或模型试验;最后根据动态特性及响应分析数据和试验数据,按照给定的要求及设计目标对机械系统进行动力修改,使其动态特性获得预期的改善。动力修改一般包括对机械结构的外部激励进行修改,对结构的质量、刚度、阻尼等物理参数进行修改,对结构的固有频率、振型、动态响应等进行修改。复杂机械系统包含的设计参数较多,为使结构动力修改更有针对性,可在修改之前进行系统动态灵敏度分析,找出对系统动态特性以及响应有较大影响的敏感参数作修改。

结构的动力修改主要有两种方法:一是修改结构设计参数,并对修改之后的结构动态特性进行计算分析,即动态重分析,这类动态设计方法目前使用较为广泛。二是根据给定的动态特性要求,求解结构设计参数。一般应用约束优化设计等方法确定结构的设计变量,也就是结构系统的逆特征值问题优化求解。这一问题的研究与应用不如动态重分析问题那样迅速,往往借助计算机求解,且由于结构设计参数较多,一般是对由灵敏度分析指出的敏感参数进行修改。

结构的动力修改是一个反复的过程,实际上也就是对机械结构进行动态优化设计,以获得最佳机械系统设计方案的过程。按照研究内容不同,动力学优化设计可分为系统动态特性设计和动态响应设计。系统动态特性设计以结构特征值或特征向量为优化目标进行约束优化,主要针对系统振型和固有频率进行优化,适合于各类工程结构。从数学角度看,属于逆特征值问题,根据已知的特征向量或特征值求解系统的设计参数。对于实际工程问题,可将逆特征值问题表述为优化问题,求取最优解。动态响应设计以结构动态响应为优化目标进行约束优化,主要针对加速度、速度、位移、应变、应力响应等物理量,其设计目标是谋求给定激励下系统的最优动响应,适用于各类机械系统。关于动载荷作用下结构的振动响应约束优化设计,目前已经在结构重分析及性能约束、目标函数等对设计变量的灵敏度方面进行了一些研究。

三、虚拟样机技术的发展和應用

虚拟样机技术是在产品结构研发时,将各零件与部件的设计及分析融合在一起,利用计算机构建产品的结构模型,并对其各种使用工况运行仿真实验分析,提前预测产品的使用性能并进行产品改进,提高产品使用性能及可靠性的一项新技术。

传统设计与产品制造过程中,先进行产品的概念设计,再进行方案设计与论证,然后开始产品设计,接着是物理样机的制造,最后为物理样机的验证和修改,即当实验出现问题时,又需要再次修改方案及设计并再次生产样机来验证,经过反复的“设计—实验—设计”过程,产品才能基本定型满足使用性能,其过程较长,尤其是对于复杂的结构系统,设计周期很长,很难快速满足市场需求。因此,基于物理样机的设计制造及验证改进的传统方式,极大地制约了产品的质量与性能的提高。

虚拟样机技术是从分析解决产品性能的角度出发,研发人员可利用原型机的各种几何及物理信息,采用各种专业计算机软件建立零部件的数字模型,并进行虚拟装配,得到系统虚拟样机。使用计算机仿真软件模拟机械结构的运动,并对各种工况进行运动学与动力学仿真,可以在计算机上方便地修改设计缺陷,仿真实验不同的设计方案,对整个系统不断改

进,直到获得较优设计方案后,再生产物理样机。当虚拟样机用来代替物理样机验证设计时,不但能降低研发成本、缩短产品的开发周期,同时可以很好地提高产品的质量。

虚拟样机技术源于对多体系统动力学的研究。随着多体系统动力学研究的深入,许多动力学分析软件被开发出来,极大地推动了虚拟样机技术的发展,促进了虚拟样机技术由实验室向市场化和通用化的转变。目前,比较有影响的国外虚拟样机软件产品有美国 MSC 公司的 ADAMS、比利时 LMS 公司的 DADS、德国航天局的 SIMPACK 以及其他一些公司开发的 IDEAS、Folw3D、Phoenix、ANSYS 等,其中美国 MSC 公司的 ADAMS 软件占据的市场份额达 50% 以上。

虚拟样机技术已广泛应用到航空航天业、汽车制造业、工程机械、农业机械、生物力学、机械电子工业、国防工业、造船业等很多方面,在各领域,相对于多种不同产品,采用虚拟样机技术都使用户缩短了设计时间,降低了研发成本,提高了产品设计质量。

在飞机制造业方面,因飞机成本较高,系统非常复杂,制造多台物理样机用于实验基本不可能,故其对虚拟样机技术的需求极为迫切,美国波音 777 飞机是世界上首架以无图纸方式研发和生产的飞机。其设计、装配、性能评价及分析就是采用了虚拟样机技术。波音公司采用 SGI 计算机系统成功地建立了波音 777 飞机的虚拟样机模型,使设计师们能通过建立的虚拟飞机,验证飞机的各项设计与性能。波音 777 飞机包括 300 万个零部件,采用计算机能调出其中的任一个零件,进行设计修改及性能分析,保证产品一次装配成功。

在汽车行业,20 世纪 90 年代,通用公司采用虚拟样机技术建造了第一个数字化的汽车虚拟样机,在此基础上进行产品分析与制造及工装设计。福特公司在某新产品的开发设计时也利用了虚拟样机技术,结果研发费用减少了 4 000 万美元,制造费用节省了 10 亿美元,同时缩短了开发周期 70 余天。由于缩短了产品设计制造周期,故新车上市较早,公司因此额外获得的利润是其成本的数倍。

在工程机械行业,Caterpillar 公司为提高产品竞争力,采用虚拟样机技术,改进了产品设计、分析和实验方法,并对多种方案进行了快速虚拟仿真实验,从而降低了产品成本,缩短了产品制造周期,使产品性能更优越。

近年来,我国在虚拟样机技术的应用方面取得了长足的进步。2004 年,管希强在其博士论文中利用多体理论建立了某客车空气悬架系统并对其性能进行了仿真与实验分析。2005 年,华中科技大学唐新蓬教授基于虚拟样机技术对汽车电动转向系统进行了仿真分析研究。2008 年,华中科技大学任会礼在其博士论文中,利用虚拟样机技术建立了刚柔耦合锚泊起重船虚拟样机模型,研究了各设计参数对系统特性的影响。2010 年,杜文华博士建立了人-电动自行车-路虚拟样机模型并进行了仿真研究。2011 年,吉林大学郝赫博士依据国家标准中的相关实验规定,建立了多轴重型汽车刚弹性耦合虚拟样机,在 ADAMS 软件环境下,对整车虚拟样机模型进行了仿真分析与研究。

虚拟样机仿真技术是一门新兴的科学技术,其有着广阔的应用发展前景及市场空间。