

文章编号 : 0253-9721 (2007) 08-0120-04

# 地毯簇绒机械轴系动力学问题研究的现状与展望

丁彩红, 杨延竹, 孙以泽

(东华大学地毯装备研究中心, 上海 201620)

**摘要** 针对我国在地毯装备的研究、设计与制造方面差距, 对地毯簇绒机械的轴系动力学问题进行调研, 对该问题的国内外研究状况作了综述, 并进行了相关机械系统轴系动力学问题的对比分析, 提出地毯机械轴系动力学方面的研究内容。地毯簇绒机械的轴系动力学问题的提出和相关研究, 对缩小国内外技术差距, 进行地毯装备的创新设计有重要的指导作用, 对纺织工程中机械振动问题的研究也有很好的参考价值。

**关键词** 地毯机械; 轴系动力学; 机械振动; 多连杆机构

中图分类号: TSI03.336.3; TH113 文献标识码: A

## State and outlook of research on shafting dynamics of carpet tufting machine

DING Caihong, YANG Yanzhu, SUN Yize

(Carpet Equipment Research Centre, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**Abstract** Compared with the world advanced level, our country is relatively lagging behind in terms of research, design, and manufacture of carpet manufacture equipments. And an investigation and review are made on this subject. A comparative study of the related machinery shafting dynamics is performed and the main points of research on shafting dynamics of carpeting machine are suggested. The presentation and relative research of the subject have great significance in shortening the gap of technology between domestic and overseas, serving as a guide to the innovative design of carpet equipment, and in providing reference for the research on mechanical vibration problems in textile engineering.

**Key words** carpet machine; shafting dynamics; mechanical vibration; multi-linkage mechanism

随着人们生活水平的提高, 对地毯的需求量也不断增长。在地毯的市场份额中, 簇绒地毯占 80% 以上。目前, 全世界簇绒地毯产量约为 30 ~ 40 亿 m<sup>2</sup>, 我国的产量仅占 3%<sup>[1-2]</sup>。造成这种状况的根本原因之一是我国的地毯装备制造技术落后。一方面, 地毯织造机械严重依赖进口, 进口装备不仅价格高, 而且依靠进口的装备数量根本无法满足旺盛的国内外地毯市场的需求; 另一方面, 装备的先进制造技术被少数发达国家垄断, 关键技术受专利保护, 这些都严重制约了我国地毯装备制造及地毯生产工业的发展。地毯装备产业具有巨大的市场潜力, 要改变我国地毯装备产业的现状, 首先要打破国外技术的垄断, 开展核心技术研究, 从根本上掌握地

毯装备设计方法。为此, 本文综述了地毯簇绒机轴系动力学问题的研究现状, 并指出今后的研究方向。

## 1 地毯簇绒机轴系简介

地毯簇绒机是一种应用广泛的主要地毯织造装备, 而主轴系统是其核心系统。地毯的织造质量主要取决于地毯簇绒机主轴系统的运动平稳性和动力学特性。主轴系统的振动可引起地毯毯面不平, 绒高不到位, 甚至可使针钩的成圈动作失调或毯面无绒圈而产生废品。地毯簇绒机的主轴系统一般采用两端电机驱动, 主轴长径比可达 150, 以多组多套连杆机构为执行机构, 驱动簇绒针带着纱线刺入底布,

收稿日期: 2006-12-02 修回日期: 2007-05-23

基金项目: 上海市教委优青资助项目(04YQHB070); 上海市自然科学基金资助项目(05ZR14004)

作者简介: 丁彩红(1973—), 女, 副教授, 博士。主要研究方向为地毯簇绒技术、机械结构设计和故障诊断技术。

E-mail: dingch@dhu.edu.cn

底布和纱线的张力在簇绒运动过程中是变化的,而主轴系统驱动针排带着纱线在具有一定张力的底布上作往复穿刺运动。这样的主轴系统实际上是具有多点交变载荷作用的细长轴——多连杆复杂系统,而且属于时变系统,其动力学问题值得深入研究。

以隔距2.54 mm、幅宽4 m的地毯簇绒机为例,主轴系统包含约8 m长的主轴、约5 m的从动轴、4组主驱动曲柄连杆机构、7组从动曲柄滑块机构和8组从动曲柄摇杆机构,地毯簇绒机的主轴系统示意图如图1所示。该主轴系统带动约5 m长的针梁和钩梁分别作往复穿刺底基布的植绒运动和往复摆动的钩圈运动,其中针梁上安装一排(1 680根)簇绒针。

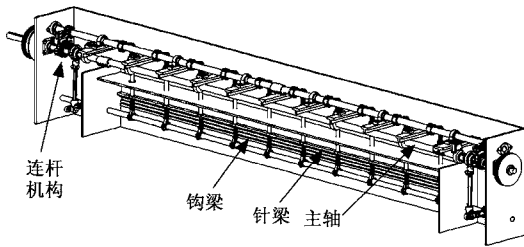


图1 地毯簇绒机的主轴系统示意图

Fig.1 Main shaft system sketch of carpet tufted machine

## 2 地毯簇绒机轴系动力学研究现状

地毯簇绒机发展趋势主要体现在高速化、数字化和信息化<sup>[3-5]</sup>。国外研发机构较好地适应了高速化地毯簇绒机的发展趋势,如美国的 Tuftco Corp、Card Monroe Corp、Spencer Wright Ind INC,英国的 Cobble Blackburn LTD 和 Singer Cobble LTD,日本山口产业株式会社等都进行了高速主轴机械系统的动力学问题分析及设计方法研究,并已获得专利技术,其中比较主流的研究有:1)从轴系动力学角度研究轴系质量偏心对轴系变形和振动的影响,提出将偏心曲柄安装在从动轴上,使主轴没有偏心载荷而仅仅传递扭矩,完全不承受径向交变应力,不存在主轴疲劳断裂问题,该主轴最高转速可达到1 320 r/min<sup>[6]</sup>。2)通过分析轴系旋转不平衡及对轴系振动的影响机制,提出多组曲柄滑块机构由2根平行的、转动方向相反的主轴驱动,改变了系统的受载方式,主轴系统达到动态平衡,减弱了系统的振动,该主轴最高转速近2 000 r/min且不失稳<sup>[7]</sup>。3)依据轴系激振的原因,提出将执行连杆机构的输出末端通过气缸与针、钩连接,主轴系统通过多组气缸的阻尼作用,使系统的激振大大减弱<sup>[8-10]</sup>。4)针对国内进口装备的主轴系

统,采用多组四连杆机构串联方式,为6杆或8杆机构,执行连杆机构组合简单,利用平衡块方式解决连杆机构不平衡问题,但只能局部平衡,主轴最高转速一般不超过900 r/min。

从上述研究可知,地毯簇绒机的主轴系统通过支承轴和连杆以不同数量、不同形式的结构配置,或引入先进的气动伺服控制技术,使主轴系统表现出不同的运动学和动力学特性,振动问题也不同,机械系统的高速化性能和主轴能够达到的转速均有明显差异。

国内对纺织机械的动力学研究主要集中在对引纬、打纬等机构的分析及对纤维、气流的动力学问题以及它们与机械系统的相互作用关系方面<sup>[11-14]</sup>;而对地毯簇绒机的动力学研究尚未见报道。部分地毯生产企业虽然也对机器进行了局部改造<sup>[15-16]</sup>,但与国际先进制造技术还有近20年的差距。目前,东华大学正在从事地毯簇绒装备设计与技术研究,已成功研制出幅宽2 m、高低圈提花,幅宽4 m、三圈高伺服提花,平圈等多种型号的地毯簇绒机,并已投入企业生产。

国内对其他设备轴系动力学和振动问题的研究主要集中在汽轮机、水轮机、内燃机、船舶推进轴系等,这些研究以流体-机械系统为主要对象,对轴系振动进行研究,从弯曲振动和扭转振动分开研究到两者的耦合研究,经过几十年的发展,取得了很多成果。多数成果以研究轴系的建模方法为主,建立精确的轴系模型一直是轴系振动特性研究的基础。文献[17]较早提出基于分段连续质量模型的轴系弯扭耦合振动数学模型,将轴系的不平衡、陀螺力矩、转动惯量、剪切变形及阻尼的影响考虑进去,其成果被后续的研究者多次引用。文献[18-19]提出的进一步研究汽(水)轮机组的轴系扭振问题实质上就是分析研究电网干扰与机械系统相互作用的关系,认为该轴系是一个极其复杂的弹性连续体,提出了轴系的连续质量模型,建立了一般多支承复杂转子轴系弹性连续体模型的弯扭耦合振动微分方程组,并将电网负荷变化作用到轴系模型中,其内容涉及到大型旋转机械振动问题的深层课题。在考虑轴系离心力的基础上,有人推导了动频问题的轴系扭振模型,研究多盘转子扭振动频的判定准则,提出了今后汽轮发电机组轴系扭振的一个研究方向<sup>[20]</sup>。还有不少文献研究了油膜振荡和碰磨等非线性因素对轴系振动问题的影响。文献[25-26]将内燃机的轴-轴承系统简化为一个典型的自动控制系统,并在考虑

油膜非线性特性的基础上,采用数值仿真方法,对变载荷作用下的轴-轴承系统的动力学行为进行研究。

### 3 地毯簇绒机轴系的动力学研究内容

机构复杂、高速、细长轴是纺织机械的普遍特征。地毯簇绒机的主轴系统具有细长轴、多组多套连杆机构、高速运动等特点,是一种典型的有代表性结构特征的现代纺织机械轴系系统。其主轴系统的执行机构由连杆机构组成,机构的传动与执行机构中包含多根细长轴。这样的机械系统存在惯性不平衡和交变载荷以及大量的振动问题,而振动问题是影响纺织机械高速运动的主要因素。

尽管国内对大型旋转机械轴系的动力学和振动问题的研究取得了较丰硕的成果,并且还在进一步深入研究,但并不能将这些研究成果照搬到地毯簇绒机上。对大型旋转机械轴系与地毯簇绒机轴系作的比较分析如下:1)大型旋转机械都是以流体为工质的能量转换或传递机械,对轴系动态特性研究要考虑机械系统和流体的相互作用;而地毯簇绒机的动态特性研究要考虑机械系统和纱线、非织造布的相互作用。流体和纱线、非织造布的力学特性有非常大的差别,因此,对轴系动力学特性和振动问题的研究方法应不同。2)汽(水)轮机组轴系通常是由多级叶轮和轴组成的单支系统,转子系统轴跨度大(一般达到几十米),工作载荷均匀;而地毯簇绒机的轴系是一个分支系统,主轴带动多组多套连杆机构,使工作载荷不匀,主轴承受多点交变载荷,主轴的直径一般为40~50 mm,而长径比可达150,属于超细长轴,因此,引起轴弯振、扭振的激励因素不同,轴系的动态特性不同。3)地毯簇绒机的主轴由两端电机同步驱动,对两端驱动的细长轴系扭振问题及其控制技术的研究在国内还很少。

地毯簇绒机的轴系动力学问题研究以轴系的建模方法和振动问题分析方法为主题,分析轴系的载荷特性和影响轴系动力学性能的主要因素,提出振动问题的数学建模和分析方法,从而形成地毯簇绒机轴系的设计理论。主要研究内容包括以下几个方面:

1)轴系变载荷的产生及其对轴系振动的影响。地毯簇绒机械的主轴系统驱动上千根簇绒针带着纱线在底布上作往复穿刺运动,而纱线和底布都具有变化的张力;同时,多组连杆机构对主轴产生周期变化的扭矩。由此产生作用于主轴的变化载荷以及多

种频率成分的瞬态扭矩,它可能激发轴系的一个或几个模态的振动响应。当激发出振动幅值超过允许值时,就会导致轴系中的薄弱构件产生疲劳损伤,生产实际中出现过针排偏心连杆的连接螺栓断裂的故障。

2)轴系的动平衡技术研究。大型发电设备和高速细长轴因质量不平衡引起轴系的振动,而地毯簇绒机的主轴长径比达到150,有轴承、自重,存在不平衡;另外,由于材质的不均匀,安装误差等原因,主轴的不平衡总是存在的。除了主轴的质量不平衡外,地毯簇绒机的主轴系统还以多组多套连杆机构为主要特征,一般来说,连杆机构都存在不平衡情况,因此,地毯簇绒机主轴系统的不平衡情况比较复杂,不但要进行轴转子平衡,还需进行机构平衡。良好的动平衡方法可以有效的减少由于不平衡引起的弯曲振动,但同时还要分析局部动平衡后的残余不平衡量对轴系振动的影响。

3)轴系力学建模与轴系弯扭耦合问题的研究。一方面,地毯簇绒机种类、规格多,要对主轴驱动系统的实测点进行详细具体的布置是有一定难度的;另一方面,地毯簇绒机的主轴驱动系统的基本结构形式都采用电机驱动细长轴与多连杆机构,因此首先建立轴系的连续质量力学模型,应用有限元法和传递矩阵法,计算轴系固有扭振特性、刚度和阻尼特性,分析轴系的弯曲振动、扭转振动以及弯扭耦合问题。地毯簇绒机的轴细长,固有频率较低,而轴系的高速化又使得机械系统的激励频率提高,所以有可能使系统进入共振区而发生共振现象,因此有必要对轴系的弹性动力学问题进行分析。

4)现场实验测试和监测技术的研究。通过现场实验测试,对研究主轴系统的受载特性,探索轴系固有频率、振型的计算方法和振动原因分析有极大的辅助作用,为完善数学建模方法,准确约束条件提供参考数据。

5)新型执行机构的研究设计。地毯簇绒机的主轴驱动系统以连杆机构为执行器,多组连杆机构与针梁、钩梁组成框架结构,框架内节点、铰接点多,因此在进行高速运动时引起激振的内在因素复杂,对振动的影响关系难以用模型或实验获知。从国外的技术分析,主轴驱动系统执行机构的结构形式和设计都非常的严谨,力求从机构设计角度简化或减少激振因素。而目前,研究实际有效的执行系统是约束振动、实行主动控制的一个重要方面。

## 4 结束语

地毯装备是制约地毯产业发展的关键因素,对地毯簇绒机轴系的动力学特性和振动问题的研究是实现系统高生产率和运动高速化的关键技术,不仅是地毯簇绒装备设计的基础理论和方法的研究,更重要的是揭示机械系统和非织造布在动态运动过程中的相互关系作用下所体现的若干动力学问题。开展这方面的基础研究和探索,对缩小国内外技术差距,进行地毯装备的创新设计,形成大型纺织机械的设计理论和方法有重要的指导作用。

FZXB

### 参考文献:

- [ 1 ] 国际家用纺织品发展趋势[ J ]. 新纺织, 2003(3) : 2 - 3 .
- [ 2 ] 中国机制地毯进入有序发展轨道[ J ]. 纺织指导, 2006(7) : 42 - 42 .
- [ 3 ] Crumbliss T. Carpet manufacturing technology — latest developments in carpet tufting technology [ J ]. Carpet Manufacturing, 2000(8) : 15 - 16 .
- [ 4 ] Anon. World of tufting equipment[ J ]. Textile Month, 1993(5) : 39 - 40 .
- [ 5 ] Allen Michael. Tufting under control[ J ]. Textile Horizons, 1987, 7(1) : 38 - 40 .
- [ 6 ] Card Roy T, Card Joseph L. High speed tufting machine : US Patent, US4665845[ P ]. 1987 - 05 - 19 .
- [ 7 ] Beatty Paul, Neely Marshall A. High speed dynamically balanced tufting machine : US Patent, US5287819[ P ]. 1994 - 02 - 22 .
- [ 8 ] Price Herbert B. Dual needle controlled needle tufting machine : US Patent, US4815402[ P ]. 1989 - 03 - 28 .
- [ 9 ] Bennett Neale, Reid Alan. Tufting machine : WO Patent, WO 0120069[ P ]. 2001 - 03 - 22 .
- [ 10 ] Crossley Phillip Harold. Tufting machine with independent control of the needle bars : GB Patent, GB2357301[ P ]. 2001 - 06 - 20 .
- [ 11 ] 周井玲,徐山青.弹性打纬机构的动力学分析及试验研究[ J ].纺织学报, 2001, 22(6) : 357 - 358 .
- [ 12 ] 詹葵华,中泽贤.双气圈动力学模型的建立与求解[ J ].力学学报, 2004, 36(2) : 229 - 234 .
- [ 13 ] 刘志海.剑杆织机新型引纬机构的设计与分析研究[ D ].南京:东南大学, 2004 .
- [ 14 ] 曾泳春.纤维在喷嘴高速气流场中运动的研究和应用[ D ].上海:东华大学, 2003 .
- [ 15 ] 董卫民.应用变频调速技术改造进口簇绒地毯设备[ J ].电工技术, 1996(4) : 20 - 23 .
- [ 16 ] 蔡春伟.簇绒机电控系统[ J ].工业控制计算机, 2003, 16(12) : 24 - 25 .
- [ 17 ] 张勇,蒋滋康.轴系弯扭耦合振动的数学模型[ J ].清华大学学报:自然科学版, 1998, 38(8) : 114 - 117 .
- [ 18 ] 刘峻华,黄树红,陆继东.大型汽轮发电机组轴系扭振的动频研究[ J ].热能动力工程, 2005, 20(3) : 234 - 238 .
- [ 19 ] 张俊红,高文志,付鲁华.大型汽轮发电机组轴系振动及其控制的研究[ J ].动力工程, 2003, 23(4) : 2490 - 2494 .
- [ 20 ] 张俊红,孙少军,程晓鸣,等.弯扭耦合的旋转机械轴系弯振特性的研究[ J ].动力工程, 2005, 25(3) : 305 - 311 .
- [ 21 ] 谢诞梅,刘占辉,杨长柱.汽轮机组轴系扭转振动实验模型设计研究[ J ].汽轮机技术, 2005, 47(3) : 199 - 202 .
- [ 22 ] 荆建平,孟光,李剑钊,等.实际高维转子-轴承系统非线性动力学行为计算研究[ J ].热能动力工程, 2005, 20(3) : 242 - 245 .
- [ 23 ] 祝长生.部分充有两种不相溶流体转子系统振动和稳定性的实验研究[ J ].振动工程学报, 2004, 17(2) : 175 - 179 .
- [ 24 ] 王福军. CFD在水力机械湍流分析与性能预测中的应用[ J ].中国农业大学学报, 2005, 10(4) : 75 - 80 .
- [ 25 ] 李震,桂长林,李志远,等.变载荷作用下轴-轴承系统动力学行为研究[ J ].机械设计与研究, 2005, 21(1) : 12 - 16 .
- [ 26 ] 李震,桂长林,孙军.内燃机曲轴轴系振动分析研究的现状、讨论与展望[ J ].内燃机学报, 2002, 20(5) : 469 - 474 .