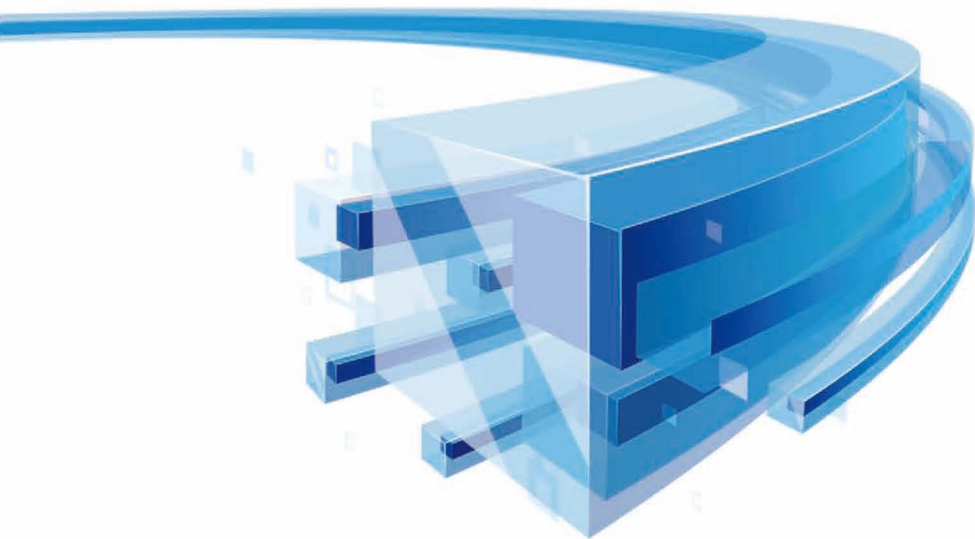


大载荷拉扭及 复合加载新型系统设计

DAZAIHELANIUIJIFUHEJIAZAIXINXINGXITONGSHEJI

陈希瑞 马斌 龚宪生 ◎ 著



天津出版传媒集团



天津科学技术出版社

作者简介

陈希瑞，男，1974年9月生，四川省南江县人，博士，制造装备机构设计与控制重庆市重点实验室研究人员，主要研究方向为机电系统设计和机械动力学。先后在国内著名期刊“复合材料学报”“材料科学与工艺”等期刊发表论文10余篇，并被EI收录3篇。主持重庆市基础与前沿研究计划项目1项，主研国家自然科学基金1项和重庆市科技攻关1项。

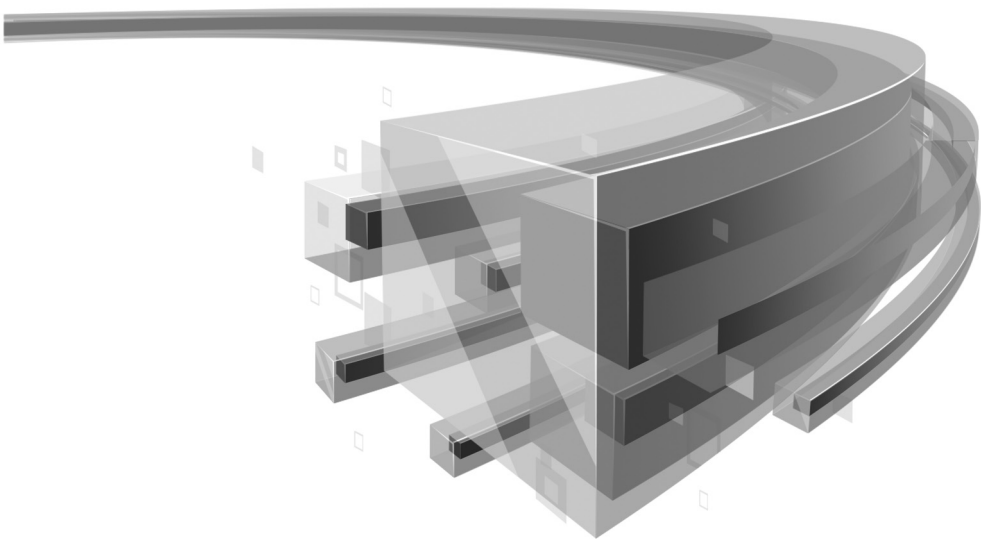
马斌，男，1972年9月生，重庆人，硕士、实验师，制造装备机构设计与控制重庆市重点实验室研究人员，主要研究方向为机电一体化系统设计。重庆大学机械设计及其理论专业工学硕士。先后在国内期刊发表论文5篇。参与重庆市基础与前沿研究计划项目1项和重庆市科技攻关1项。

龚宪生，男，1954年9月生，重庆人，博士，重庆大学机械工程学院教授、博士生导师，主要研究方向为系统动力学及振动噪声分析与控制、高性能机电传动系统研究。在《机械工程学报》《振动工程学报》以及“The International Conference on Mechanical Transmissions”等国内外重要学术刊物和国际学术会议上发表论文70多篇，EI检索论文10余篇。获授权发明专利5项。作为项目负责人先后承担了国家自然科学基金项、国家科技支撑计划重点项目、重庆市科委科技计划项目攻关项目和国防科研项目等10多项。

大载荷拉扭及 复合加载新型系统设计

DAZAIHELANIUIJIFUHEJIAZAIXINXINGXITONGSHEJI

陈希瑞 马斌 龚宪生 © 著



天津出版传媒集团



天津科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

大载荷拉扭及复合加载新型系统设计/陈希瑞, 马
斌, 龚宪生著. -- 天津: 天津科学技术出版社, 2016. 5
ISBN 978-7-5576-1135-4

I. ①大… II. ①陈…②马…③龚… III. ①低速大
扭矩液压马达-系统设计 IV. ①TH137.51

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第108279号

责任编辑: 冀云燕

责任印制: 兰 毅

天津出版传媒集团

 天津科学技术出版社

出版人: 蔡 颢

天津市西康路 35 号 邮编 300051

电话 (022) 23332377

网址: www.tjkjcs.com.cn

新华书店经销

成都市天金浩印务有限公司印刷

开本 787×1092 1/32 印张 7 字数 200 000

2016 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

定价: 22.00 元

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 研究背景	(1)
1.2 研究思路	(4)
1.3 主要研究内容	(7)
参考文献	(9)
第一篇 载荷加载器结构设计	(10)
2 大负荷扭转/拉压及其复合振动试验机的结构设计	(10)
2.1 方案优选	(10)
2.2 滚珠逆螺旋机构输出拉压/扭转复合载荷的工作原理	(12)
2.3 拉压/扭转及拉(压)扭复合功能实验机的机械结构及工 作原理	(14)
2.4 力(运动)转换机构承载能力的计算	(20)



2.5	三维实体造型	(24)
3	直线/转动转换机构的 CAE 设计	(28)
3.1	机构运动仿真(ADAMS)设计	(28)
3.1.1	运动仿真(ADAMS)分析基础	(28)
3.1.2	逆螺旋转换机构运动仿真分析	(36)
3.1.3	仿真结果与分析	(39)
3.2	力(运动)转换机构 ANSYS 接触分析	(42)
3.2.1	力(运动)转换机构接触问题的理论分析 ...	(42)
3.2.2	有限元分析前处理	(46)
3.2.3	计算结果与分析	(54)
4	直线/转动转换机构的理论设计及优化计算	(57)
4.1	力(运动)转换机构各参数的设计计算	(57)
4.1.1	螺旋升角	(57)
4.1.2	滚道型面形状与接触角	(62)
4.1.3	螺旋中径与滚道曲率半径	(63)
4.1.4	滚珠直径/滚珠数/滚道数	(64)
4.2	滚珠运动及滑移分析	(68)
4.2.1	滚珠运动分析	(68)
4.2.2	滚珠螺旋副的自锁效应	(72)

4.2.3 滚珠滑移及自锁对高速性的影响·····	(73)
4.2.4 滚珠滑移速度·····	(75)
4.2.5 减小滚珠滑移及自锁的方法·····	(81)
4.3 滚珠螺旋副的额定负载及工作寿命 ·····	(83)
4.3.1 滚珠与滚道处的塑性变形·····	(83)
4.3.2 滚珠螺旋副的额定负载·····	(85)
4.3.3 工作寿命计算·····	(87)
4.4 关键零件强度校核 ·····	(88)
4.4.1 推力球轴承校核·····	(88)
4.4.2 扭矩传感器连接螺栓校核·····	(89)
4.4.3 轴与法兰连接花键校核·····	(90)
参考文献 ·····	(91)
第二篇 载荷加载器动力系统设计 ·····	(94)
5 液压伺服系统静态设计 ·····	(94)
5.1 试验机液压伺服系统主要技术指标 ·····	(94)
5.2 液压伺服系统方案的确定 ·····	(95)
5.3 负载特性分析 ·····	(98)
5.4 液压动力系统的优化设计 ·····	(102)
5.5 液压缸主要参数的计算及伺服阀的选择 ·····	(107)



大载荷拉扭及复合加载新型系统设计

5.6	其他液压元件参数的计算及选型	(113)
5.7	最大功能曲线	(120)
6	基于 MATLAB 的电液伺服系统仿真	(123)
6.1	角位移控制系统	(123)
6.1.1	角位移控制系统结构原理	(123)
6.1.2	角位移控制系统数学模型	(125)
6.1.3	角位移控制系统动态分析	(130)
6.2	扭矩控制系统	(139)
6.2.1	扭矩控制系统结构原理	(140)
6.2.2	扭矩控制系统的数学模型	(141)
6.2.3	扭矩控制系统动态分析	(144)
6.2.4	扭矩控制系统总结	(156)
	参考文献	(157)
第三篇	载荷加载器控制系统设计	(161)
7	载荷加载器的控制系统硬件设计	(161)
7.1	控制系统硬件设计方案	(161)
7.2	下位高速伺服控制器电路设计	(163)
7.2.1	DSP 伺服控制器最小系统	(163)
7.2.2	控制器辅助电源模块	(164)

7.2.3	模拟量 A/D 前向采样电路	(166)
7.2.4	模拟量 D/A 后向输出电路	(169)
7.2.5	复杂可编程逻辑器件 CPLD 电路	(170)
7.2.6	串口通信模块	(172)
7.2.7	电机及电磁溢流阀控制电路	(173)
7.3	主要电气元件的设计与选择	(174)
7.3.1	伺服控制器	(174)
7.3.2	伺服阀放大器	(175)
7.3.3	传感器	(176)
7.3.4	数据采集卡	(180)
7.3.5	工业控制计算机系统	(181)
8	控制算法研究及控制软件设计	(183)
8.1	控制系统软件方案	(183)
8.2	控制算法研究	(185)
8.2.1	数字 PID 伺服控制算法	(186)
8.2.2	参数自整定模糊 PID 伺服控制算法	(187)
8.2.3	基于半实物仿真技术的控制算法验证	(192)
8.3	测试与控制软件设计	(196)
8.3.1	下位机 DSP 伺服控制器软件实现	(196)



大载荷拉扭及复合加载新型系统设计

8.3.2 上位工控机测控软件的编程实现	(199)
8.3.3 控制系统的抗干扰设计	(202)
参考文献	(208)
附 录	(213)
图 a. 往复直线运动转化为来回摆动的逆螺旋机构	(213)
图 b. 扭转试验机总体布置装配图	(214)
图 c. 液压动力系统设计图	(214)
图 d. 伺服控制系统设计图	(215)
图 e. 逆螺旋扭转疲劳试验系统试制装配实物图	(215)
后 记	(216)

1 绪 论

1.1 研究背景

随着计算机控制技术和集成传感技术的发展,为电子技术和液压伺服技术的结合奠定了基础,极大增强液压控制系统的功能和提高了完成复杂控制的能力。液压技术同智能控制技术、微电子技术、摩擦磨损技术、可靠性技术及新工程材料等技术融合,不仅继承了传统液压技术的传递功率大和单位功率质量比小等优点,同时由于微控智能技术和先进算法的引入,极大地提高了伺服液压控制的精度。装备了微处理器、DSP 控制器的国产万能试验机和液压万能试验机,整体性能大幅度提高。在计算机技术尤其是微处理器技术被广泛地用于材料试验机的同时,相关控制算法和应用程序(试验软件)也得到了迅速发展,并在不断改版升级和完善。国外主要生产电液伺服试验机的公司有 MTS、Instron、Amsler、Sehench 和岛津等^[1~3],产品覆盖静、动态的拉压及扭转试验机。国内对材料试验机的研究开发经过多年的不断努力,涌现



出了一批如长春试验机研究所、长春试验机厂、红山试验机厂和济南试验机厂等厂家。其产品涉及由静态到动态,由单参数到多参数,具有生产低载荷低频的高性能静动态材料试验机的能力,主要产品是静态拉压万能试验机、松弛试验机和持久强度试验机等。目前国产大部分微机控制液压万能试验机和电子万能试验机的性能指标已和国际同类产品的性能指标相接近,甚至其中部分产品的性价比已优于国外同类产品,正因为此,近年来,国外同类材料试验机产品的进口量在大幅度下滑。然而,在大载荷高频扭转试验机的研制方面还没有明显突破,尤其是产生大转矩的结构没有明显突破。

国内在动态扭转材料试验机方面的主要进步同拉压动态疲劳试验机一样,即利用智能控制技术对传统伺服控制进行改造升级,在物理量检测及控制精度方面去得了较大进步。国内已有的大扭矩摆振(疲劳)试验机主要有如下几种:

(1) 伺服摆动液压缸型试验机:根据摆动液压缸种类的不同又可分为螺旋式摆动缸型、叶片式摆动缸型、齿轮齿条式摆动缸型三种,特点是在很小的空间里运用液压集合了非常高的扭矩,其输出频率 $0.1 \sim 20\text{Hz}$; 输出扭矩 $\pm 1\text{kN} \cdot \text{m}$; 扭转角位移可达 $\pm 50^\circ$ 。采用电液伺服控制技术,自动控制试验过程,具有超载、超压、超温、试件断裂等保护功能。动态试验可选用不同的波形:正弦波、三角波、方波、斜波及自定义组合斜波,可确定试样的振动频率、动态扭转刚度和阻尼系数等。其输出扭矩不能满传递大载荷扭矩部



件的实验要求,且易漏油,受油温、流量等非力值因素的影响较严重。

(2) 伺服电机型试验机:采用伺服电机驱动加载,即直接由伺服电机输出扭转运动,通过行星减速器调节伺服电机转速。试验过程由计算机自动控制,自动描绘试验曲线,其输出频率 $\leq 0.3\text{Hz}$;输出扭矩 $1\text{kN}\cdot\text{m}$;可连续扭转;采用独立的电子测控系统,具有扭转力值和扭转角位移自动跟踪测量和加荷速度指示及峰值保持等功能;主要用于金属及非金属等各种材料扭转试验,能实现扭矩及角位移控制。针对弹性联轴器测试,其频率太低,输出扭矩不能满足弹性联轴器的要求。

(3) 摆臂联动机构型试验机:采用液压缸(或电机)驱动动力机构带动运动摆臂,由摆臂输出扭摆运动,摆臂主要由曲柄连杆及凸轮组成,其输出频率 $0\sim 25\text{Hz}$,摆动角位移可达 $\pm 65^\circ$,输出扭矩较小。采用电气控制系统,定位准确、换向平稳、触发灵敏。可对金属软管、双质量飞轮等零件进行静、动态性能试验和耐久性试验。针对传递大扭矩的弹性联轴器测试实验,输出扭矩不能满足弹性联轴器的要求,其低副中存在间隙,会引起运动误差,且设计比较复杂,不易精确实现复杂的运动规律。

目前扭转疲劳试验机在融入智能控制技术后,在测试和控制精度方面取得了长足进步,但是我们也看到当前扭转疲劳试验机的试验对象主要针对材料实验和小刚度部件,这些对象需要的载荷要求不高,在大载荷时频率要求低,在高频率时载荷较小。当针



对高刚度实验件的高频率实验时,不能提供高频大载荷。目前没有突破既能高频又能大载荷的瓶颈在于产生转矩的结构没有取得突破,在于原动力转化为转矩的效率低,因此在当前智能控制技术和智能算法具有突破应用的形势下,有必要研究新型机构,提高动力转化为转矩的效率和放大倍数。

1.2 研究思路

在提高原动力转化为转矩效率和放大倍数的目标指引下,提出新型转矩加载机构势在必行。我们注意到:滚珠螺旋副为滚动摩擦,其传动摩擦很低、效率高,尤其采用双螺母预紧的方式可使滚珠丝杠与螺母间的轴向间隙为零,滚珠螺旋传动效率高达 0.9;现代的加工方法和技术,使得高精度滚珠螺旋副的制造成为可能;丝杠、螺母与滚珠之间是滚动传动,大大减少磨损,从而滚珠螺旋副具有良好的耐磨性;滚珠螺旋副的运动极为灵活、反应非常灵敏,消除了机械系统滞后和爬行等现象,所以,滚珠螺旋副可以实现精确的同步运动;滚珠螺旋传动具有传统螺旋传动的各种优点,同时具有输出力矩大、结构简单等多种特性和优点。由于滚珠螺旋传动优秀的性能,在发动机、航天飞机、航空工业、机器人关节等领域得到了广泛应用。

国外对滚珠螺旋传动的研究比较早且研究成果也很多,美国 Larson Aircraft 公司设计了一种基于滚珠螺旋传动的产品^[4],它由三层套子组成,其中外套固定不动,中间的套子直线往复运动,内

套则输出左右往复摆动。美国 Williams 申请了一种滚珠旋转作动器^[5],这种机构由滚珠螺旋传动的逆传动实现,其主要由液压油缸驱动,可以输出极大的扭矩,主要用于航天飞机机翼转动上,但是其制造加工要求较高,滚珠需要回珠结构,而且它的回珠结构过于复杂,回珠路程长,滚珠与槽和回珠机构有较大冲击。随后美国 NASA 公司也提出了将逆螺旋传动应用于方向舵转向、飞机机翼折叠的方案,但其结构也是过于复杂,远远没有达到工业应用的水平。其他如前苏联和英国也进行了类似的研究。我国对滚珠螺旋传动的研究起步比较晚,以重庆大学教授梁锡昌为首课题组成功研制出了基于逆螺旋传动机构的螺旋减速器,相比其他减速器,这种减速器结构紧凑,减速比大,很适应于对尺寸要求紧凑的机械中使用。同时还研制出一种适用于轮船舵机、飞机翼面转动的旋转作动器^[1]。

目前国内的扭矩摆振疲劳试验机的试验量程较小,一般低频输出扭矩峰值为 $\pm 1\text{kN} \cdot \text{m}$,在高频时,扭矩峰值更低。随着我国工业的快速发展,尤其船舶、航空、航天等工业部门的发展,对传递大扭矩和隔振减振的大刚度扭转减振器的实验研究非常急迫,然而目前的扭转疲劳试验机的输出载荷值远达不到实验部件的实际载荷值。目前试验机输出载荷远远不够实验所需的 $\pm 10\text{kN} \cdot \text{m}$ 的大扭矩,且频率同时达到 10Hz 的疲劳试验要求。而国外少数几个发达国家的产品可以达到这个要求,他们对我国的技术封锁也比较严重,且价格一直居高不下。针对船舶、汽车、航空、航天等的



扭转传动实验的需要,大载荷扭矩摆振疲劳试验机已成为研究转矩传动和扭转振动控制必不可少的关键设备。虽然在常规电液伺服标准材料试验机技术方面,我们有了一定的发展,但在大扭矩高频动态疲劳试验机方面距国外某些发达国家的技术水平仍有很大的差距,因此尽快开展这方面的研究并快速形成产品显得十分迫切^[6]。自主研发和制造大载荷高频扭矩摆振疲劳试验机的优化设计,减少消耗、降低成本、提高效率,打破国外对这一技术的长期垄断。伴随着国家经济建设、国防建设、科学研究及人民生活的发展,大载荷扭矩摆振疲劳试验机必将发挥更大的作用。

综上所述,基于目前实际需求和当前技术状态出发,提出设计一种基于滚珠逆螺旋传动的大扭矩多功能扭转试验机,其输出扭矩为 $0 \sim 10\text{kN} \cdot \text{m}$, 输出力 $0 \sim 70\text{kN}$, 频率 $0 \sim 12\text{Hz}$, 其值均可控可调, 试验机精度 1%。主要研究思路为: 1) 基于滚珠螺旋传动理论, 研究设计一种将往复直线运动转化为来回摆动的逆螺旋机构, 并以此机构为基础设计实现扭转、拉压和扭转拉压复合的机构。通过仿真技术和理论定量计算给出机构输出扭矩为 $0 \sim 10\text{kN} \cdot \text{m}$ 、输出力为 $0 \sim 70\text{kN}$ 、输出扭转摆角 $-10 \sim +10^\circ$ 和频率为 $0 \sim 12\text{Hz}$ 的结构形态和相应技术参数; 2) 针对设计的摆振结构, 研究设计能输出相应载荷的液压动力系统及其控制电路, 通过仿真和理论计算, 给出液压系统和电气系统的技术参数; 3) 研究动力-检测-机构的数学模型、研究实验机构实现实验功能的控制模型和控制算法、研究实验数据的处理算法, 集成实验控制软件和集成实验仪

器。最终满足螺旋传动动作器输出转矩、角位移和频率可控可调,扭转摆动频率 $0.001 \sim 12\text{Hz}$, 输出正反最大扭矩 $10\text{kN} \cdot \text{m}$, 角度、转矩精度 $0.5 \sim 1\%$ 。测试及其数据处理软件部分实时显示输出端的角位移值、转矩值, 实时显示时间 - 角位移 ($t - \varphi$)、时间 - 转矩 ($t - M$)、角度 - 转矩 ($\varphi - M$) 的曲线关系, 实时存储和分析试验数据, 得到扭转刚度、扭转阻尼性能曲线并打印试验报告。

1.3 主要研究内容

针对当前扭转疲劳试验机主要针对国家标准的材料实验件, 其输出转矩小、频率低, 无法对承载大转矩的关键零部件进行校检和研究实验, 因此提出采用逆螺旋机构作为直线转化为转动的机构, 以液压动力为原动力, 结合智能检测伺服控制技术构建大载荷高频试验机。具体研究内容如下:

1) 逆螺旋扭转摆振机构的理论计算及仿真设计

本部分主要针对试验机输出转矩为 $0 \sim 10\text{kN} \cdot \text{m}$ 、输出力为 $0 \sim 70\text{kN}$ 的核心力学技术指标, 设计大转矩多功能扭转摆振试验机的直线位移转化为角位移的摆振机构及其结构参数。以滚珠螺旋传动为理论基础, 设计将直线位移转化为转动的逆螺旋结构, 首先以螺旋传动的理论计算方法初步计算确定大转矩多功能扭转试验机的各个参数, 然后采用 Pro/E、ADAMS 及 ANSYS 等 CAE 计算方法对转换机构进行建模、动态仿真及动静态应力分析计算, 最后根据分析结果对逆螺旋结构进行修改最终确定各个参数。根据最终