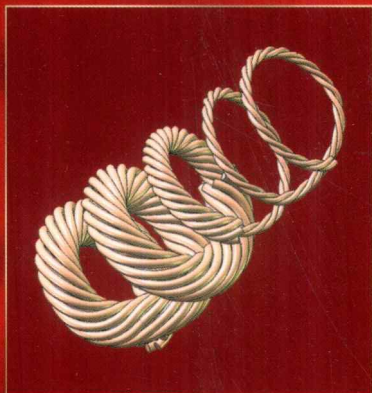




“十一五”国家重点图书出版规划项目
21世纪先进制造技术丛书

多股螺旋弹簧

· 王时龙 周 杰 李小勇 等 著 ·



科学出版社

“十一五”国家重点图书出版规划项目
21世纪先进制造技术丛书

多股螺旋弹簧

王时龙 周 杰 李小勇等 著

国家杰出青年科学基金(50925518)资助

科学出版社

北京

《21 世纪先进制造技术丛书》编委会

主 编:熊有伦(华中科技大学)

编 委:(按姓氏笔画排序)

丁 汉(上海交通大学/华中科技大学)

李涵雄(香港城市大学/中南大学)

王田苗(北京航空航天大学)

周仲荣(西南交通大学)

王立鼎(大连理工大学)

查建中(北京交通大学)

王国彪(国家自然科学基金委员会)

柳百成(清华大学)

王越超(中科院沈阳自动化所)

赵淳生(南京航空航天大学)

王 煜(香港中文大学)

钟志华(湖南大学)

冯 刚(香港城市大学)

徐滨士(解放军装甲兵工程学院)

冯培恩(浙江大学)

顾佩华(汕头大学)

任露泉(吉林大学)

黄 强(北京理工大学)

江平宇(西安交通大学)

黄 真(燕山大学)

刘洪海(朴次茅斯大学)

黄 田(天津大学)

孙立宁(哈尔滨工业大学)

管晓宏(西安交通大学)

宋玉泉(吉林大学)

熊蔡华(华中科技大学)

张玉茹(北京航空航天大学)

翟婉明(西南交通大学)

张宪民(华南理工大学)

谭 民(中科院自动化研究所)

李泽湘(香港科技大学)

谭建荣(浙江大学)

李涤尘(西安交通大学)

雒建斌(清华大学)

《21 世纪先进制造技术丛书》序

21 世纪，先进制造技术呈现出精微化、数字化、信息化、智能化和网络化的显著特点，同时也代表了技术科学综合交叉融合的发展趋势。高技术领域如光电子、纳电子、机器视觉、控制理论、生物医学、航空航天等学科的发展，为先进制造技术提供了更多更好的新理论、新方法和新技术，出现了微纳制造、生物制造和电子制造等先进制造新领域。随着制造学科与信息科学、生命科学、材料科学、管理科学、纳米科技的交叉融合，产生了仿生机械学、纳米摩擦学、制造信息学、制造管理学等新兴交叉科学。21 世纪地球资源和环境面临空前的严峻挑战，要求制造技术比以往任何时候都更重视环境保护、节能减排、循环制造和可持续发展，激发了产品的安全性和绿色度、产品的可拆卸性和再利用、机电装备的再制造等基础研究的开展。

《21 世纪先进制造技术丛书》旨在展示先进制造领域的最新研究成果，促进多学科多领域的交叉融合，推动国际间的学术交流与合作，提升制造学科的学术水平。我们相信，有广大先进制造领域的专家、学者的积极参与和大力支持，以及编委们的共同努力，本丛书将为发展制造科学，推广先进制造技术，增强企业创新能力做出应有的贡献。

先进机器人和先进制造技术一样是多学科交叉融合的产物，在制造业中的应用范围很广，从喷漆、焊接到装配、抛光和修理，成为重要的先进制造装备。机器人操作是将机器人本体及其作业任务整合为一体的学科，已成为智能机器人和智能制造研究的焦点之一，并在机械装配、多指抓取、协调操作和工件夹持等方面取得显著进展，因此，本丛书也包含先进机器人的有关著作。

最后，我们衷心地感谢所有关心本丛书并为丛书出版尽力的专家们，感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助，感谢广大读者对本丛书的厚爱。



华中科技大学

2008年4月

前 言

多股螺旋弹簧(以下简称多股簧)是重要机械基础件。在高速往复复位过程中,弹簧各股钢丝紧密接触,产生摩擦阻尼作用,可达到良好的吸振和减振效果,因此它是航空发动机和自动武器等产品的关键零件。另外,多股簧还广泛应用于振动设备(如振动筛、振动粉碎设备等)、高精度台面和要求很平稳的运输车辆等,以取代传统的单股金属弹簧和橡胶弹簧。由于多股簧的设计和制造比单股弹簧(以下简称单股簧)复杂,成本略高,因此国内外学者对其研究不够重视,相关研究资料零散。在此背景下,作者以多股簧基本理论与先进制造技术为题,对多股簧的成形原理、设计方法、制造技术、加工机床、检测设备、材料磨损等进行了深入研究,并进行了大量试验验证。

国内外关于弹簧的设计手册对多股簧部分均只做简单介绍,并参照单股簧理论进行多股簧的静态设计和制造,缺乏试验验证,理论与实际相差甚远。本书是王时龙带领课题组经过长期艰苦努力的研究和试验总结而成,希望对多股簧的设计方法、成形原理、制造技术和使用提供理论依据。全书共分9章。第1、2章阐述了多股簧应用背景及基本理论。第3、4章提出了多股簧的理论设计方法及有限元仿真。第5章提出了多股簧制造工艺及成形后热处理技术,并通过大量试验研究了弹簧各种重要参数(如张力大小、钢丝直径、钢索索距、弹簧中径等)对弹簧回弹的影响。第6章介绍了作者自主研发的新型多股簧动态参数检测设备,该设备可以检测多股簧在冲击振动状态下,簧杆上各质点的运动位移、速度、加速度等。第7章研究了多股簧微动磨损,建立了多股簧在冲击载荷下,各股钢丝间法向接触力及角位移的数学模型;研究了不同工况及循环次数的变化对多股簧钢丝扭动微动运行行为和损伤机理的影响。第8章研发了多股簧加工机床。第9章给出了多股簧设计、制造及应用实例。

参与本书撰写工作的有王时龙(前言、第1章、第2章及第9章部分内容),周杰、闵建军(第3章),周杰、萧红(第4章),雷松(第5章),李小勇(第6章),张明明(第7章),赵昱(第8章、第9章)。康玲、易力力、田志锋、彭玉鑫、程建宏、洪茂成、邹政、杨建锁、赖斌武、李恩田等在本书撰写过程中做了大量的工作。全书由王时龙、李小勇统稿,周杰定稿。

本书力求全面地总结多股簧最新研究成果及发展趋势,供从事弹簧研究和设计制造的工程技术人员使用,为推广应用多股簧发挥作用。但我们也充分认识到,

多股簧的设计及制造技术的研究还有待进一步深入。

本书的撰写得到了国家自然科学基金委员会项目、教育部科学技术研究重点项目、重庆市科技攻关项目的资助,还得到了重庆望江工业有限公司及西南交通大学摩擦学研究所的大力支持与帮助,在此致以最诚挚的感谢。

限于作者水平,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

王时龙

2011年6月

目 录

《21 世纪先进制造技术丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 多股簧的特性	1
1.2 多股簧的用途	2
1.3 多股簧的国内外研究现状	5
参考文献.....	7
第 2 章 多股簧基本理论	8
2.1 空间曲线几何学原理	8
2.1.1 曲线几何学基本概念	8
2.1.2 坐标变换原理	9
2.2 钢丝中心线数学模型.....	11
2.3 多股簧参数计算.....	14
2.3.1 多股簧成形原理	14
2.3.2 钢丝的螺旋倍数	17
2.3.3 多股簧各层钢索外径计算.....	18
2.3.4 各层钢丝螺旋角及螺距计算	21
2.3.5 钢丝拧索螺距	23
2.3.6 并圈多股簧的三维几何模型	24
2.4 多股簧钢丝曲率和挠率变化规律.....	27
2.5 多股簧参数设计实例.....	34
参考文献	36
第 3 章 多股簧设计方法	38
3.1 多股簧静态设计方法.....	38
3.1.1 无中心股多股簧刚度计算.....	38
3.1.2 有中心股多股簧刚度计算.....	41
3.1.3 多股簧强度计算	43
3.2 多股簧动态设计方法.....	44
3.2.1 多股簧振动幅频计算	44
3.2.2 多股簧力学特性	47

3.2.3	多股簧波动理论和阻尼效应	51
3.3	动态模型振动位移计算与分析	53
3.4	多股簧动态计算实例	55
	参考文献	57
第4章	多股簧绕制成形及回弹的数值模拟	58
4.1	弹塑性有限元法	58
4.1.1	弹塑性成形的基本理论	58
4.1.2	非线性的有限元求解	60
4.2	基于 ABAQUS 的分析方法	61
4.2.1	材料特性	62
4.2.2	分析步确定	64
4.2.3	单元类型及网格划分	64
4.2.4	ABAQUS 准静态分析	65
4.3	单股簧绕制成形及卸载回弹的模拟分析	67
4.3.1	有限元模型	68
4.3.2	有限元计算结果	68
4.4	多股簧绕制成形及卸载回弹的模拟分析	71
4.4.1	几何模型	71
4.4.2	边界条件及网格划分	72
4.4.3	有限元计算结果	72
4.4.4	多股簧股间钢丝的载荷分布分析	74
4.4.5	单股钢丝与单股簧的分析	75
	参考文献	78
第5章	多股簧的制造工艺	79
5.1	多股簧的材料	79
5.1.1	钢丝材料简介	79
5.1.2	钢丝材料的力学性能参数	81
5.2	多股簧的绕制成形方法	81
5.2.1	多股簧的绕制工艺	81
5.2.2	张力控制对多股簧绕制成形的影响	82
5.3	无中心股的多股簧回弹的影响因素	83
5.3.1	回弹影响因素概述	83
5.3.2	绕制张力对弹簧回弹的影响	85
5.3.3	弹簧螺距对弹簧回弹的影响	85
5.3.4	钢索索距对弹簧回弹的影响	86

5.3.5 绕制速度对弹簧回弹的影响	87
5.3.6 钢丝直径对弹簧回弹的影响	88
5.4 有中心股的多股簧回弹的影响因素	90
5.4.1 多股簧回弹影响因素概述	90
5.4.2 钢丝张力对弹簧回弹的影响	90
5.4.3 弹簧螺距对弹簧回弹的影响	92
5.5 多股簧的后处理	93
5.5.1 热处理	93
5.5.2 稳定化(立定)处理	94
5.5.3 机械强化处理	94
5.6 表面处理	95
5.6.1 表面预处理	96
5.6.2 表面氧化处理	96
5.6.3 表面磷化处理	97
参考文献	97
第6章 高精度数控多股簧机床	99
6.1 机床结构设计	99
6.2 机床加工工序	102
6.2.1 机床数控系统	102
6.2.2 张力控制系统	103
6.2.3 张力控制方法	105
6.3 机床虚拟机	105
6.3.1 虚拟样机技术概念	105
6.3.2 多股簧数控机床虚拟机	106
参考文献	108
第7章 多股簧的检测和试验	109
7.1 多股簧冲击试验机研发背景	109
7.2 冲击试验机的研制	111
7.2.1 总体方案设计	111
7.2.2 冲击试验机布局设计	112
7.3 检测装置设计	114
7.3.1 数据采集与处理	115
7.3.2 数据处理与算法	117
7.4 冲击试验机试验案例	120
7.5 多股簧疲劳试验	122

参考文献	124
第 8 章 多股簧扭动微动磨损机理研究	125
8.1 微动摩擦学及其相关理论	125
8.1.1 微动的运行模式	125
8.1.2 微动图理论	126
8.2 多股簧钢丝间的法向接触力及角位移	129
8.2.1 法向接触力计算	129
8.2.2 角位移幅值计算	130
8.3 试验方法与材料	131
8.3.1 试验装置简介	131
8.3.2 试验流程	132
8.3.3 试验材料与参数	133
8.4 多股簧钢丝扭动微动磨损特性	134
8.4.1 扭动微动磨损的运行行为	134
8.4.2 扭动微动磨损的损伤行为	142
参考文献	147
第 9 章 多股簧设计实例	148
9.1 多股簧的设计步骤	148
9.2 设计案例	151
9.3 应用实例	153
9.3.1 背景	153
9.3.2 设计流程	154
参考文献	160

第 1 章 绪 论

多股簧是由钢索(通常由 3~14 股、1~3 层、0.4~14mm 的碳素弹簧钢丝缠绕而成)卷制而成的圆柱形螺旋弹簧,如图 1-1 所示。多股簧最初用于西班牙内战中的苏制机关枪,由三根钢丝绕制而成作为复进簧使用。经过几十年的深入研究和不断探索,科研人员研制出的具有中心股的多层螺旋弹簧已被生产制造并投入实际应用中。现在,多股簧主要由多股压缩弹簧、多股拉伸弹簧和多股扭转弹簧组成。其中,应用最为广泛的是多股压缩弹簧,而多股扭转弹簧则应用较少。与单股簧相比,多股簧具有更好的强度及独特的吸振、减振效果,因而它是航空发动机和自动武器等产品的关键零件。另外,多股簧还广泛应用于振动设备(如振动筛、振动粉碎设备等)、高精度台面和平衡性要求很高的运输车辆等,以取代传统的单股金属弹簧和橡胶弹簧^[1~4]。

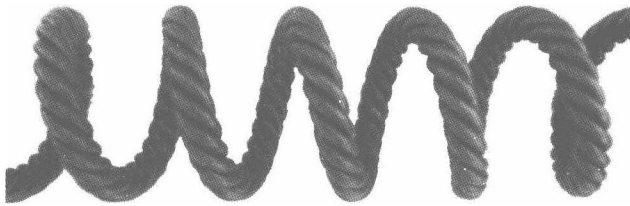


图 1-1 多股簧

1.1 多股簧的特性

多股簧的特性之一是弹簧在高速往复复位过程中,钢索本身将受到扭矩作用,使钢丝产生拧紧和角偏转,各股钢丝紧密接触,产生摩擦阻尼作用,以达到良好的吸振和减振效果。多股簧的特性之二是强度好、使用寿命长。对于普通的单股簧,若簧丝出现断裂等情况,弹簧即失效,只能重新更换,而很多情况下没有时间和机会更换已失效的弹簧。多股簧的某根簧丝断裂时,弹簧本身的使用不会受到较大影响,而且多股簧多采用直径较小的碳素弹簧钢丝制成,钢丝直径越小,强度越高。因此,相对于单股簧,多股簧因其强度高、消振及抗冲击能力强、寿命长和安全性高等优点,具有广泛的应用前景,几乎所有使用单股簧的场合,均可考虑使用多股簧进行替代以提高使用性能^[5,6]。但是由于多股簧制造工艺复杂、制造成本高、产品

质量难以可靠保证,因此它的应用领域又受到了一定限制。

1.2 多股簧的用途

目前,多股簧主要用于一些对持久强度和安全性要求较高的特殊场合,如自动武器发射系统的复进簧、航空发动机的减振簧以及外部管路支撑用的隔振器、汽车内仪器仪表的多股簧减振器、山地自行车后悬架的减振装置等,具体介绍如下。

1. 自动武器发射系统的复进簧

在自动武器中,复进簧的作用是在活动机件后退时期存储能量,而在复进时期释放能量使活动机件复进。在后坐和复进时期,活动机件带动各机构完成自动工作,如退壳、供弹、闭锁和击发等。现代大口径的自动武器中几乎毫无例外地使用无中心股的三股(高射机枪)或四股(航空自动炮)螺旋弹簧作为复进簧。多股簧能完成的射弹发数可达同截面单股簧的3~5倍。以多股簧作为复进簧,簧圈振动较快地衰减,动态应力低;加之多簧各股钢丝较细,抗拉强度较高,因此将复进簧的使用寿命提高3倍以上,如图1-2所示^[7]。

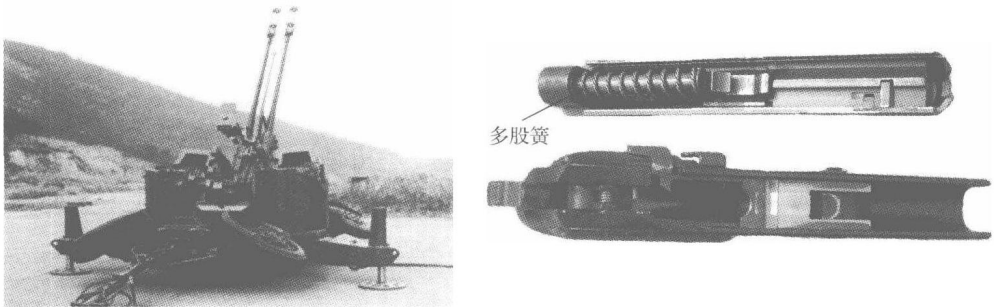


图 1-2 自动武器发射系统中的复进簧

2. 航空发动机减振簧及外部管路支撑用的隔振器

多股簧用在航空发动机与飞机机翼结构的连接部分,具有低频大阻尼及高频低刚度的变参数性能,因而能有效地降低机体振动。与传统橡胶减振源相比,其具有抗油、抗腐蚀、抗温差、抗高温、耐老化以及体积小等优点,如图1-3所示^[8]。

作为外部管路支撑用的隔振器,多股簧主要用于安装固定各种液压、燃油管路,对振动加以控制,利用隔振装置耗散振动能量,减少或削弱振动的传播,从而以降低传递率来提高管路系统的环境适应性。

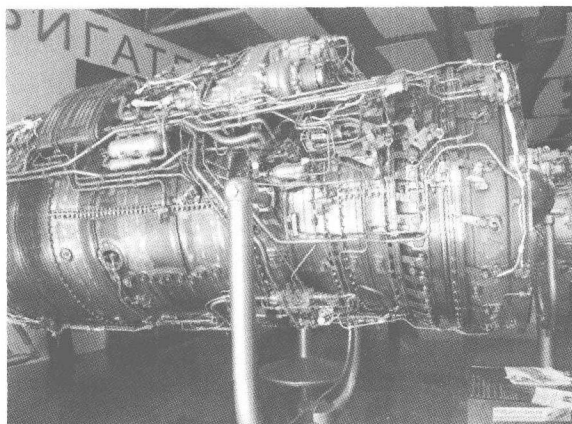


图 1-3 航空发动机中的减振簧

3. 汽车内仪器仪表的多股簧减振器

安装在汽车内的仪器仪表设备,虽经底盘悬挂系统的第一次减振,但在汽车行驶过程中由于惯性及动载荷的作用,仍会产生一定程度的振动。为保证仪器仪表的示值精度,维持其正常的使用寿命,要在仪器仪表和安装机座之间安装减振器,对仪器仪表整体进行隔振或减振。现有的汽车仪器仪表系统减振器一般是传统的单股簧减振机构或橡胶减振器。单股簧减振机构靠弹簧材料的内摩擦产生阻尼,但是该阻尼作用不大,且易产生谐振,减振效果并不理想;橡胶减振器虽然内摩擦和阻尼较大,但是易老化且弹性受温度变化影响。

多股簧减振器是一种新型的减振器,具有强度高、能承受较大载荷、快速吸收能量使振动迅速衰减、结构简单、体积小、使用寿命长等优点,可以用作减振器或隔振器弹簧,能解决装在汽车上的自重较大的精密仪表的减振问题,具有较好的应用前景^[9]。

4. 山地自行车后悬架的减振装置

目前,自行车使用的弹簧减振器基本都是由单股圆柱螺旋压缩弹簧组成,当自行车车轮受到路面冲击时,弹簧减振器会起到缓冲作用。但当路面激励频率与自行车系统的固有频率相同或接近时,将发生共振现象,这时由于弹簧减振器中的单股圆柱螺旋压缩弹簧不具有阻尼作用,不能有效衰减振动,因此易造成严重的颠簸而影响骑乘舒适性。

如图 1-4 所示,将普通自行车用减振器中的单股簧改为多股簧,而且弹簧的刚度和阻尼大小可通过弹簧丝的材料、中心股和外股股数以及不同的缠绕方式来改

变。受到路面冲击时,自行车后悬架将冲击力传至减振器,减振器弹簧被压缩,上、下导向杆产生相对滑动,由于多股簧各股钢丝在压缩和回弹的过程互相摩擦,消耗了一定的动能,使减振器具有了一定的阻尼效果,从而起到衰减振动的效果,提高了骑乘舒适性。同时将体重刻度标注于外套筒上,可使骑行者根据个人体重调节预应力大小,从而使减振器效果达到最佳^[10]。

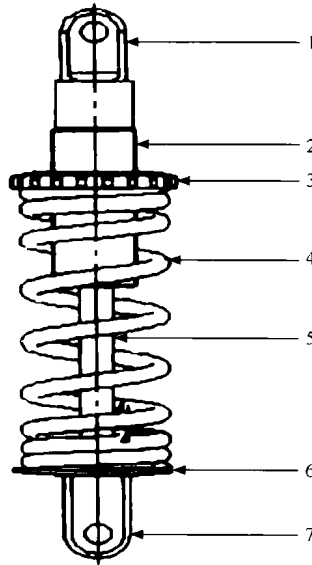


图 1-4 自行车用多股簧减振器

1-上连接端; 2-上导向杆; 3-调节螺母; 4-多股簧; 5-下导向杆; 6-下挡片; 7-下连接端

5. 其他方面的应用

黄之初将多股簧应用于新型变激励振动磨上,保证了磨机在变激励作用下四维运动的稳定性和安全性,同时对磨机共振时出现的大振幅起到弹性限位的作用^[9]。宋方臻等从转子系统的动力学角度入手,将多股簧应用于立式冲击破碎机,利用其非线性特性降低共振幅值,提高机器的稳定性,实现良好的减振降噪和延长轴承寿命的效果^[11,12]。田正东基于多股簧和磁流变阻器相结合的思想设计出船用智能抗冲击隔离器,同时解决了中低频减振和高频抗冲击的问题^[13]。李志远将多股簧应用于汽车后桥减振器,该减振器具有减振频率范围相对较宽、能利用阻尼消耗振动能量及寿命长的优点^[14]。

1.3 多股簧的国内外研究现状

早在第二次世界大战时期,德国就采用多股簧作为MP38/40 ERMA 9mm冲锋枪的复进簧。20世纪90年代,德国Rohrs公司加大研发投入力度,成功研发了多股簧的专用卷簧机和用于检测多股簧持久性能和动力学性能的冲击试验机,已能为客户提供多股簧的非标设计。但由于多股簧的设计和制造技术是涉及敏感领域,国外一直对我国进行技术封锁和进口限制,因此国内研究者难以查阅到国外关于多股簧制造技术的文献资料。

国内关于多股簧的研究主要体现在以下几个方面:

1. 多股簧的理论设计研究现状

多股簧钢丝的数量和钢丝的索距对弹簧的特性有很大的影响。钢丝的索距就是单股钢丝自绕一圈的距离在弹簧轴向平行位置上的投影长度。当三股簧钢丝的索距和簧圈的直径之比为5.0~5.5时,弹簧疲劳寿命最长。钱学毅等将数学规划理论与计算机程序设计方法相结合对多股簧的优化设计进行了初步探讨^[15]。多股簧钢索的精确设计对多股簧能否表现出良好的性能具有重要意义。在设计多股簧时,钢索捻角和钢索直径通过钢索索距、钢丝直径和钢索股数计算得到。

张英会和王茂林等提出了“相邻两根钢丝中心线的最短距离等于钢丝直径”来计算钢索直径的方法。这一方法是先假定一个钢索捻角,然后利用这个假定的钢索捻角,通过查表的方法来获得钢索直径;而钢索捻角需要通过钢丝直径、钢索索距以及钢索股数才能确定^[1]。因此,该方法没有从根本上解决多股簧钢索捻角和钢索直径的计算问题。张东文等提出了“钢索横截面为椭圆相切”的近似模型来计算钢索捻角和钢索直径的方法。该模型能够近似解决三股和四股钢索捻角和直径的计算,但是一旦钢索的股数超过四股,用该模型来计算就不可行了。即使是对于三股和四股的钢索,也需要通过查表和插值的方法才能从根本上解决其计算问题。该方法也被Costello、Clark和Sathikh提到,但与张东文等相比,他们的论文还没有详细的计算过程^[16,17]。事实上,沿着多股簧的钢索法向方向截取一个截面,该截面是由不规则图形相切而成,既不是圆也不是椭圆。

曲率和挠率是描述空间曲线局部性质的重要微分几何参数,曲率反映了曲线的弯曲程度,挠率反映了曲线的扭转程度。在刚性截面假定基础上,曲杆的几何形态由截面沿中心线的移动和转动来体现。假设钢丝的横截面为刚性平面,则钢丝的几何形态是由其横截面沿其中心曲线的移动和转动形成。故钢丝的弯曲变形与中心曲线的曲率有关,而钢丝的扭转变形则由钢丝中心曲线的挠率体现。作者主持的课题组将多股簧的各股钢丝作为独立的弹性细杆,从微分几何学角度研究了

钢索拧角参数的影响,建立了多股簧各股钢丝中心线的数学模型,实现了多股簧钢索直径的精确求解^[18,19]。

2. 多股簧制造的研究现状

多股簧的制造工艺过程一般分为缠制(包括拧索)、切断、焊头、弯头、回火、立定或强压处理和表面处理等。多股簧的缠制方法有两种:拧索与绕簧同时进行及拧索与绕簧分别进行。采用前者方法卷制的弹簧质量好,但机床及工装结构较复杂;而后者卷簧方法尽管工装结构简单,但钢索拧好后易由于反弹而发生松散现象,钢索索距及钢索直径均匀性较差,现在已很少采用此方法加工。

作者致力于自主研发具有独立知识产权的多股簧数控加工机床。针对多股簧加工的主要特点,研发了多股簧数控加工机床(见图 1-5),并取得了以下突破:采用数控系统进行精密加工成型控制;通过四轴联动的无级速度匹配,克服了传统挂轮传动的分级速度控制的缺点,使数控加工机床能够加工任意结构参数的三层有芯多股簧;开发了张力控制器控制多股簧拧索过程的各股钢丝的张力平衡;使用蓝牙技术实现了 PC 机与整个旋转拧索过程的通信。整套系统采用上位计算机+PLC 的结构,具有良好的人机交互性能^[20~24]。

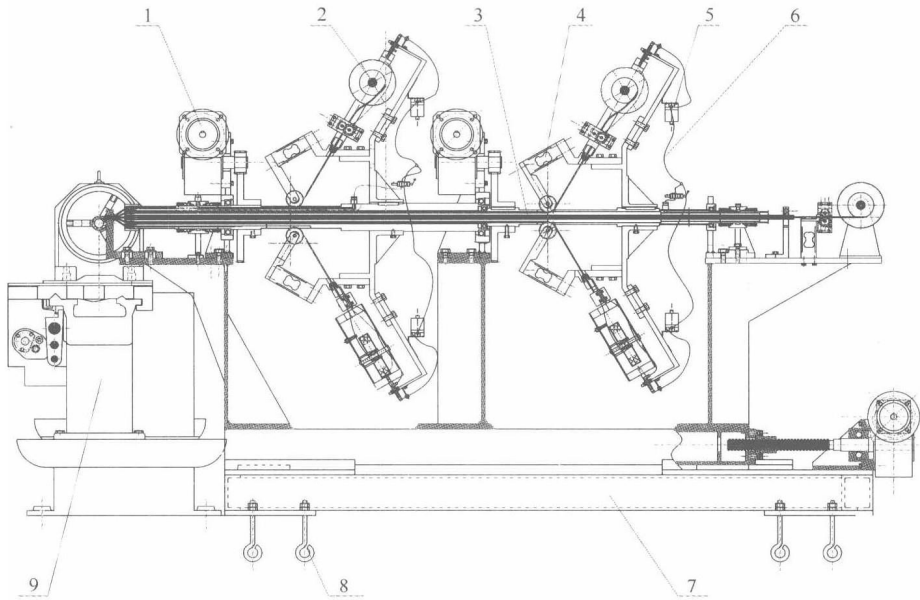


图 1-5 第一代数控多股簧加工机床总装图

1-伺服电机; 2-拧索机架; 3-主轴; 4-张力传感器; 5-压力变送器; 6-导管; 7-床身; 8-地脚螺栓; 9-车床部件