

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
航天机构高可靠设计技术及其应用

绳索动力学 基础研究

谭春林 魏 承 著



科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
“航天机构高可靠设计技术及其应用”丛书

绳索动力学基础研究

谭春林 魏 承 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

全书共 5 章。第 1 章介绍绳索的种类与结构,重点介绍钢丝绳和纤维绳的基本特点、分类及其在渔业、纺织业、航天等行业中的应用。第 2 章介绍绳索本构力学问题和绳索运动行为引起的动力学问题,对绳索内部接触摩擦、拉伸和弯曲过程中的迟滞特性,以及时变的几何运动特性展开讨论。第 3 章系统总结由连续介质力学理论发展而来的绳索建模方法,通过柔性绳摆算例对比分析集中质量参数伪刚体建模方法、小变形有限元方法,以及大变形绝对节点坐标方法的建模精度与效率。第 4 章根据编制或捻制多股绳的几何构型,对绳索内部接触、摩擦及碰撞进行描述,建立拧绞绳等效模型和纤维绳松弛模型。第 5 章介绍一种自适应 ANCF 方法,通过自适应更新单元的分布或类型来提高绳索动力学计算的精度和效率。

本书可作为纺织、力学、航天等学科研究生的教材,也可作为科技工作者的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

绳索动力学基础研究/谭春林,魏承著. —北京:科学出版社,2018.8

(“航天机构高可靠设计技术及其应用”丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-058404-5

I. ①绳… II. ①谭…②魏… III. ①绳索力学-动力学-研究 IV. ①TB301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 171149 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 8 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018 年 8 月第一次印刷 印张:9 1/4

字数:187 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“航天机构高可靠设计技术及其应用”丛书编委会

主 编	谭春林		
副主编	于登云	刘日平	孙 京
编 委	孙汉旭	马明臻	赵 阳
	张建国	韩建超	魏 承
	张新宇	陈 钢	肖歆昕
	潘 博	刘永健	刘育强
	刘华伟		

前 言

绳索是一种长细比很大的结构,具有与自身重量特性相关的高轴向强度和刚度、低弯曲刚度等基本特性。本书针对工程领域中的绳索问题进行基础理论的探索与研究。在总结绳索基本概念、结构种类、应用范围的基础上,充分调研国内外一般力学、材料力学、纺织工业等领域绳索力学性能的研究进展,对绳索本构力学及运动行为中表现出的动力学特性进行研究。

本书主要从绳索的种类、分类、特点及工程应用出发,总结绳索动力学面临的本构难题及其在运动过程中引发的相关动力学问题,而后引出绳索动力学建模的难点:一是绳索本身的几何大变形,二是多根绳索编制后宏观特性的表征,三是绳索在运动过程中曲率不断变化引发的数值精度问题。针对绳索动力学面临的难题分别对绳线动力学建模,多根绳线编制而成的绳索动力学建模,以及绳索运动过程的自适应计算进行理论建模与分析,详细研究绳索从微观到宏观,从单根绳线到多股绳索,从预分网格计算到自适应动态求解的建模与计算体系。本书具有如下特点。

体系结构新。近年来国内外虽然出版了一些与绳索力学建模有关的书籍,但这些书籍主要集中在绳索基本力学性能的研究,很多已有的动力学建模理论仅散见于各类文献,在公开出版的书籍中很少涉及。本书针对绳索动力学这一问题进行了全面阐述与深入研究,各章之间联系紧密,系统性强。

内容覆盖广。绳索动力学涉及的理论非常丰富,为此调研了大量的国内外文献资料,从工程应用中的绳索基本理论问题出发,系统总结对比现有绳索动力学理论及建模方法,并给出各方法的优缺点及工程适用范围。

创新性强。尽管绳索动力学涉及的理论非常丰富,本书仍力求反映其最新的研究成果与研究进展。本书在研究绳索微观力学特性的基础上,提出更为准确和适用性更强的等效变刚度拧绞绳模型和纤维绳索松弛模型。此外,根据绳索的运动特点,提出一种自适应 ANCF 柔索模型,为提高绳索模型准确性及计算高效性提供了新的研究思路。

本书由谭春林主编,魏承、张越、过佳雯等参加编写。第1,2章由谭春林编写;第3章由魏承、黄意新编写;第4章由魏承、过佳雯编写;第5章由谭春林、杨帅、张越编写;算例由魏承、张越、过佳雯整理。在编写过程中,张江、张瑞雄、蔡盛龙在文字和图形编辑方面做了许多工作,在此表示感谢。此外,对本书参考文献的作者一并表示感谢。

限于作者水平,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

目 录

前言

第 1 章 绳索概念及其应用	1
1.1 绳索种类及结构	1
1.2 钢丝绳	2
1.2.1 钢丝绳的基本特点	2
1.2.2 钢丝绳的不同分类	2
1.3 纤维绳	6
1.3.1 纤维绳概念和分类	6
1.3.2 编制、捻制纤维绳	7
1.3.3 低捻率纤维绳	10
1.4 绳索的工程应用	10
第 2 章 绳索动力学问题概述	12
2.1 绳索本构力学问题	12
2.1.1 绳索结构组成	12
2.1.2 结构力学性能	14
2.2 运动行为引起的动力学问题	15
2.2.1 接触作用	15
2.2.2 运动状态	15
2.3 总结	16
第 3 章 绳线动力学建模	17
3.1 连续介质力学建模方法	18
3.1.1 弹性体模型	18
3.1.2 基本理论	18
3.2 绳线本构方程	21
3.2.1 绳线变形运动	21
3.2.2 绳线本构模型	22
3.2.3 梁位移振动方程	24
3.3 传统离散化建模方法	25
3.3.1 集中质量法	26

3.3.2 有限段法	29
3.3.3 有限元法	35
3.4 现代动力学建模方法	41
3.4.1 微分几何方法	41
3.4.2 绝对节点坐标方法	45
3.5 绳索实验验证	62
3.5.1 单目视觉测量原理	63
3.5.2 绳索点跟踪算法	65
3.5.3 实验结果与误差分析	66
3.6 总结	69
第4章 绳索动力学建模	70
4.1 绳索构型特征	70
4.1.1 捻制纤维绳	70
4.1.2 编制纤维绳	71
4.1.3 钢丝绳结构	72
4.2 绳索本构模型	73
4.2.1 单股绳索几何构型	74
4.2.2 轴向载荷	75
4.2.3 应力变形	76
4.3 绳索内部力学特性描述	77
4.3.1 接触压力	78
4.3.2 摩擦力	81
4.3.3 碰撞力	86
4.4 拧绞绳等效模型	87
4.4.1 含芯拧绞绳	87
4.4.2 双螺旋拧绞绳	100
4.5 纤维绳松弛模型	109
4.6 总结	116
第5章 柔索自适应计算	117
5.1 AANCF 方法的提出	117
5.1.1 柔索运动特点	117
5.1.2 传统 ANCF 和自适应 ANCF	118
5.1.3 自适应计算策略	118
5.2 AANCF 柔索计算模型	120
5.2.1 单元运动学描述误差	120

5.2.2 单元更新策略	121
5.3 CO-AANCF 柔索计算模型	128
5.3.1 连续性分析	129
5.3.2 连续性优化	130
5.4 总结	134
参考文献	135

第 1 章 绳索概念及其应用

绳索是一种长细比很大的结构,具有与自身重量特性相关的高轴向强度和刚度、低弯曲刚度等基本特性。具有这种力学特性的绳索一般由一定数量的与绳索等长的棉、麻、棕等纤维或金属丝通过扭或编加强而成。绳索在承受轴向载荷时,构成绳索的每根绳线提供相同的拉伸强度和刚度,但是绳索弯曲变形时,每根绳线提供的弯曲强度呈低耦合状态。为使绳索易于使用,必须使其具有一定的完整性,而非仅仅一组平行的绳线,这就需要将一组绳线扭或编加强结合成一根绳索。现代工艺几乎可以制造出满足各类工程要求的绳索,因此绳索在土木工程、电力与通信工程、船舶与海洋工程、航空航天、军事工业等领域得到了广泛应用^[1]。本章介绍绳索的种类及结构,重点介绍钢丝绳和纤维绳,并分析其特点。

1.1 绳索种类及结构

绳索分类的标准众多,按原材料可分为天然纤维绳、化学纤维绳、钢丝绳、混合绳。天然纤维绳主要为植物纤维绳,如亚麻绳、天麻绳等;化学纤维绳也称作合成纤维绳,如 Kevlar 绳、Vectran 绳等;钢丝绳为一定规格钢丝按照一定规则捻制而成的螺旋状钢丝束,一般由钢丝、绳芯、润滑脂组成;混合绳为天然纤维、化学纤维与钢丝按照一定比例混合制成的绳索,如尼龙绳、涤纶绳等。按截面特性可分为单股绳、1+6 股绳、多股绳,如图 1-1 所示。按制造工艺可分为捻绳、编绳(编织绳、编绞绳)、低捻率纤维绳,如图 1-2 所示。

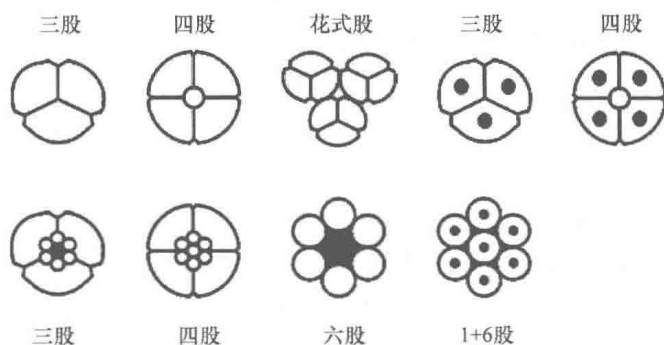
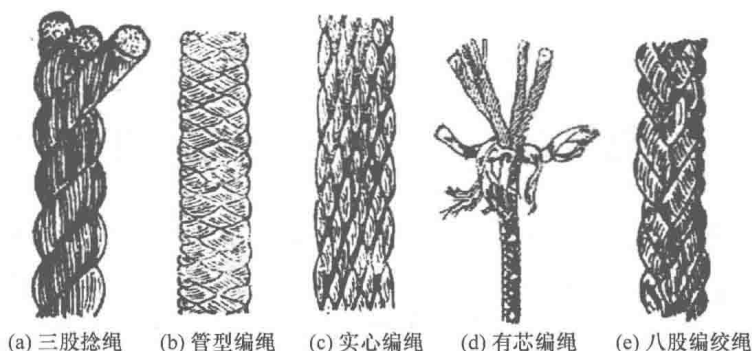


图 1-1 从横截面看绳索结构^[2]

图 1-2 绳索种类^[2]

1.2 钢 丝 绳

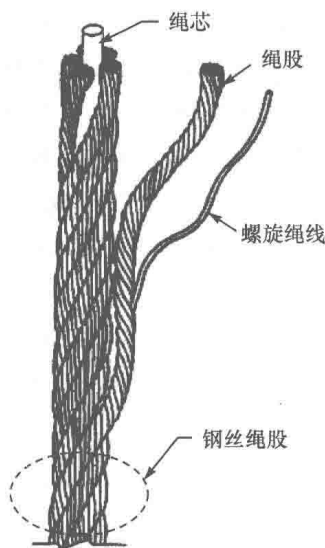
1.2.1 钢丝绳的基本特点

钢丝绳是由一定规格的细钢丝拧成的柔性绳索,可用于牵引、承载、提升和拉紧,具有韧性好、无噪声、强度高、使用方便等优点,广泛应用于机械、采矿、造船、林业和冶金等行业^[3]。在上述工程领域,钢丝绳具有较好的材料结构性能与力载传递特性。首先,绳索具有较好的柔韧性、抗拉及抗疲劳强度高,并且耐腐蚀、耐磨损,因此能在极端、恶劣条件下体现出运动传输的稳定性,且便于运输及安装。其次,绳索具有抗拉不抗压的特点,一般能承受大重量负载、安全系数较高,张紧状态下也能够适应各种变化载荷。

另外,钢丝绳的应用也具有一定的局限性。绳内的局部断裂与结构失效会导致绳索结构尺寸变化,使绳索性能分布不再均匀。绳股内部由于编捻工艺成型造成的接触摩擦影响绳索使用寿命并限制运输对象。在特种环境下,如海洋工程中钢丝绳易发生化学腐蚀,从而缩短绳索的使用寿命。

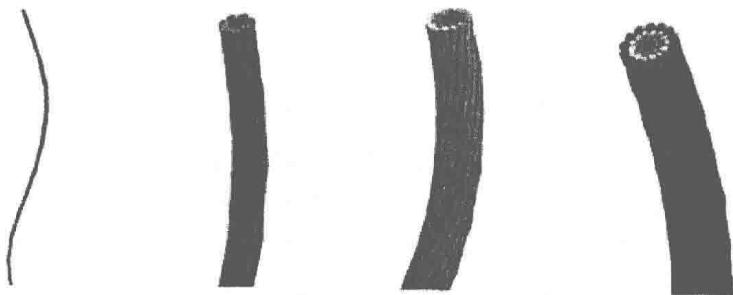
1.2.2 钢丝绳的不同分类

钢丝绳广泛应用于起重机、电梯、矿井、桥梁、电缆、泊船缆绳等,根据特定的工程需求,相应的钢丝绳类型也各有不同,通常表现为钢丝绳具有多个层级结构和不同横截面特性,且由不同材料属性的钢丝编捻而成。与其他绳索相比,钢丝绳具有强度高、韧性好、使用方便等优点。如图 1-3 所示为钢丝绳的纵向视图。钢丝绳一般由平直绳芯、螺旋绳线、单层绳股直至多股构成,其横截面构型一般有同向捻绳、1+6 型和多层绳股。由于钢丝绳结构复杂,种类繁多,分类标准也不同,我们将按照层级结构及截面特性两方面分类介绍。

图 1-3 钢丝绳纵向视图^[4]

1. 按层级结构分类

钢丝绳是由金属材料制成的钢丝按照一定的空间几何关系缠绕而成的一种具有柔性的空间螺旋结构,一般由平直绳芯、螺旋钢丝、单层多层绳股组成。钢丝绳成型过程是先由钢丝捻制成绳股,再由绳股绕绳芯捻制成钢丝绳。如图 1-4 所示,其捻制成型大致过程可以描述为:捻制钢丝以一定角度围绕绳芯形成圆柱体,被捻制钢丝一端固定,一端运动,固定端与绳芯外表面相切,围绕中心绳芯做旋转运动,直至完全缠绕在中心绳芯上且与钢丝外表面相切。这个过程称为捻股,被捻制钢丝为一次捻制钢丝。绳股捻制成钢丝绳的过程与钢丝捻制成股的过程类似,被捻制绳股围绕绳芯做旋转运动,最终形成钢丝绳,这个过程称为合绳。在整个过程,中心绳芯轴线为一次螺旋线,被捻制钢丝中心轴线为二次螺旋线。钢丝绳本身结构复杂,其受力状态也很复杂,即使在固定张拉的情况下,也要承受拉应力、丝与丝之间的接触应力、弯曲应力和扭转应力。

图 1-4 钢丝绳成型过程^[5]

绳芯主要对钢丝绳起到支撑作用,从而形成稳定的横断面结构。绳芯一般有三种类型。第一种是纤维芯,由合成材料或剑麻、黄麻等天然纤维组成。合成纤维更强、更均匀,但不能吸收太多的润滑剂。天然纤维能吸收自身重量 15% 的润滑剂,相比合成纤维耐腐蚀性能更好,可延长钢丝绳使用寿命。同时,纤维芯具有很好的灵活性和弹性,但容易压碎。第二种类型是钢丝股束芯,绳芯由一根附加的钢丝股组成,通常用于悬挂场合。第三种类型是独立的钢丝绳芯,相比其他两种绳芯,具有较长的使用寿命。

螺旋钢丝通常由含碳量 0.4%~0.95% 的高强度非合金碳钢材料制成,较小直径的钢丝能够承受较大的拉伸载荷。常见的同向捻钢丝绳不同层螺旋线相互平行,呈线接触状态。外层的钢丝均由两根内层钢丝支撑,所有的钢丝均具有相同长度且一次捻制成股,在使用中常在相邻层钢丝之间添加润滑剂以达到增加使用寿命的目的。

钢丝绳的使用过程需要承受交变载荷的作用,其使用性能主要由钢丝力学性能、钢丝表面状态和钢丝绳结构决定。钢丝材质包括碳素钢或合金钢,通过冷拉或冷轧而成,钢丝绳股横断面有圆形或异形(T形、S形、Z形)。异形横断面钢丝主要用于密封钢丝绳的生产,具有较高的抗拉强度和韧性,并对钢丝绳股进行适宜的表面处理以满足不同使用环境条件的需求。

2. 按截面特性分类

钢丝绳结构通常为连续的层交替捻向的相互缠绕在一起,在桥梁缆索、矿井升降机、升降机和起重机等应用广泛。由于钢丝绳具有高强度,加上绳索结构灵活,形状和尺寸可根据工程需求相应改变,因此钢丝绳常应用于承重事业。虽然钢丝绳的主要功能为传递拉力,但是绳索结构导致其内部钢丝也受到弯曲力矩和扭转力矩、摩擦和轴承载荷,以及张力的影响。钢丝绳在这些载荷作用下产生的应力大小和分布等响应,通常表现为钢丝绳的伸长和扭转。钢丝通过编捻形成的高强度、复杂、紧固的钢丝绳,通常可由横截面特性来加以区分,以适用于不同场合,一般可分为同向捻绳、1+6 型和多层绳股。

(1) 同向捻制绳股

同向捻钢丝绳为普通型钢丝绳,如图 1-5 所示。同层股中钢丝直径均相等(绳芯除外),但内外层可由不同直径的钢丝组成。因为各层钢丝具有相同捻向和捻角,相邻层钢丝交互交叉,通常呈线接触状态,较粗的钢丝配置在相邻内层的凹槽间,而较细的钢丝配置在凸起的部分上。仅当各层钢丝直径均相等,为点接触状态,而点接触钢丝绳受力后钢丝间会产生较大的滑动,导致伸长较大,结构松散。

如图 1-6 所示为同向捻绳的纵向截面示意图,同向捻制钢丝绳由于钢丝与绳芯的夹角较大(约为 30°),钢丝与机械(滑轮)表面几乎呈短线状接触,接触面积

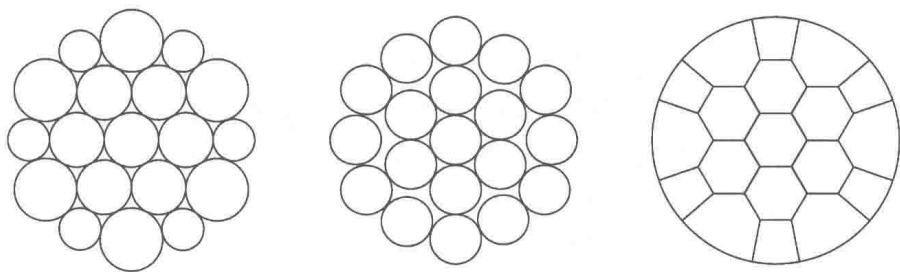


图 1-5 同向捻绳

大,在承受拉力载荷情况下,钢丝绳内的钢丝有向两侧散开的趋势,自转性稍大,容易发生松捻和扭结,因此起重机很少使用。但同向捻制钢丝绳柔软性较好,有较好的抗弯曲疲劳强度,表面平滑,磨损比较均匀,钢丝不容易发生爆断,使用的寿命较长,因此常用于升降机、牵引机及其他两端固定的场合。

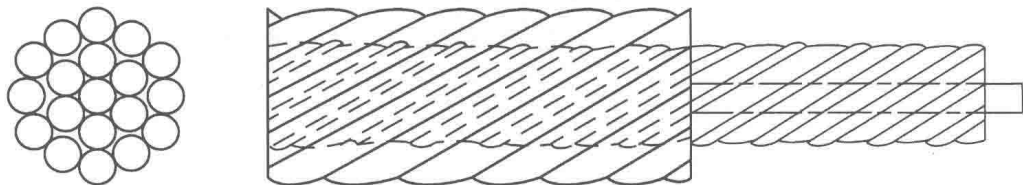


图 1-6 同向捻绳纵向截面视图

(2) 1+6 型绳股

1+6 型钢丝绳为中心单独绳芯外层包络六根钢丝绳股。绳芯一般为单根钢丝绳股,是最典型的钢丝绳结构形式。1+6 型钢丝绳股内相邻层钢丝之间呈面状接触形式,在捻制过程中,经由模拔、轧制、锻打等变形加工,钢丝形状和股的尺寸均发生变化,而钢丝的金属横截面积保持不变,形成股绳压实、钢丝压实、绳股双压实等面接触形式。压实后钢丝绳股的截面形状不同,可分为圆股钢丝绳和异形股钢丝绳。圆股钢丝绳断面形状为圆形,内部钢丝接触方式可以为点、线、面任意接触方式,圆股钢丝绳易于制造生产,且价格低廉。异形股钢丝绳由于其断面为特殊非圆形而得名,主要包括扁带形、椭圆形、三角形、梯形及其他特殊断面形状。几种典型的 1+6 型钢丝绳截面如图 1-7 所示。

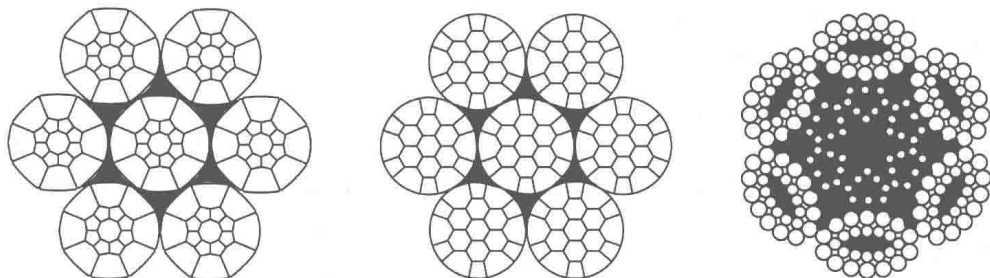


图 1-7 1+6 型钢丝绳

(3) 多层绳股

多层股绳即在股中内层和外层钢丝之间的空隙处填充较细直径的钢丝。此种类型最简单的股的结构由两层钢丝组成,把细钢丝填充在两层钢丝之间的缝隙中。外层钢丝与内层钢丝数目一样时,外层钢丝位于相邻次层的两根钢丝的槽中且相对较粗。外层钢丝的数目为内层钢丝数的两倍时,填充钢丝的数目与内层钢丝的数目相同。内层钢丝直径与外层钢丝直径的关系需要依据内层钢丝的数量来确定,特别当内层钢丝数量为6时,内层钢丝的直径要求小于或等于外层钢丝,而细钢丝填充在两相邻层钢丝的空隙中。几种典型多层股绳如图1-8所示。

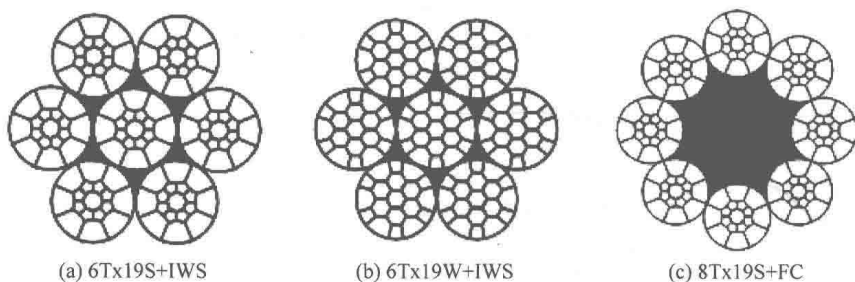


图 1-8 多层股绳

1.3 纤维绳

1.3.1 纤维绳概念和分类

人工合成纤维绳索由纺织纤维结构构成,可近似看作长径比很大的圆柱形纺织体,主要用来承受拉伸载荷。合成纤维绳是由大量排列一致、紧凑且柔软的纤维构成,通常由最少的纤维合成一种合适断裂强度和伸长率的纤维绳。相对弯曲、扭转载荷来说,纤维绳能承受比较大的轴向拉伸载荷,因此纤维绳索主要作为传递载荷,或者牵引、固定、连接某些物体的工具。如钢丝绳一般,合成纤维绳也是生产生活中最常见的结构,常应用于工业生产、海洋、娱乐和其他领域,例如从小型的织物绳到大型的泊船缆绳。然而,低捻绳常应用于某些特定工程需求中,要求绳索具有较高的比强度和较低的伸长率。低捻绳通常应用于桅杆系绳、深海打捞回收绳索、浮动平台泊绳和深矿吊缆等。

纤维绳索有多种分类方法。按采用的纤维种类分类,可将纤维绳索分成天然纤维绳和化学纤维绳。亚麻绳、天麻绳属于天然纤维绳索,Kevlar 绳、Vectran 绳则属于化学纤维绳。按制造工艺分类,可将纤维绳索分为编绳、捻绳、低捻绳。根据结构,纤维绳索又可细分为三股绳、八股绳、双层编绳和低捻绳(图1-9)。

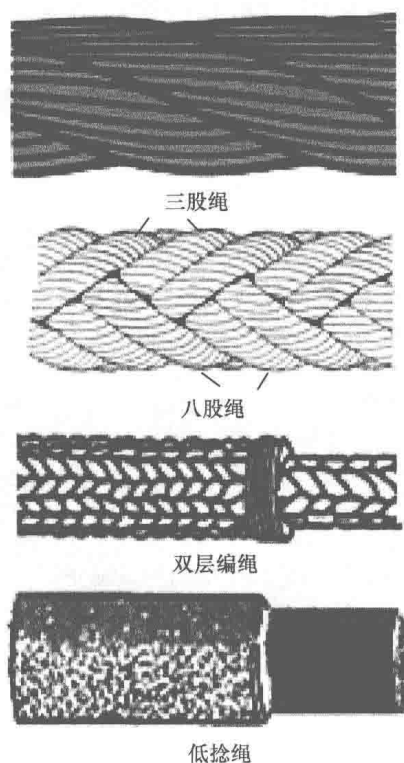


图 1-9 纤维绳分类

1.3.2 编制、捻制纤维绳

编制、捻制纤维绳是指由天然纤维或化学纤维经过编和捻工艺制成的合成纤维绳,通常称为编绳和捻绳。

编绳是由若干绳股采用编织或编绞的方式制成的有芯或无芯绳索,具有不易发生扭结和回转的特点。其绳股不是以加捻的方式绞合在一起的,而是以一种穿插形式相互交叉在一起。绳股本身根据产品的需要可以加捻或不捻。编绳根据加工工艺的不同,可进一步分为编织绳和编绞绳。编织绳具有不易发生扭结回转缩水等优点,但由于编织结构绳索内外层独自承载拉伸载荷,易导致绳受力不平衡而拉断。编织绳常应用于降落伞绳、救生索、攀登绳、旗杆绳、包扎绳等小载荷场合。编绳的另一种结构编绞绳具有强度高、耐磨性好、柔软性好、延伸率小等优点,能够承受较大载荷,主要用于大质量船舶系绳。

捻绳由三股或更多股绳捻制而成。捻绳的制造过程:纤维或单丝初捻制成绳纱→两根或多根绳纱捻成绳股(绳股捻向与绳纱捻向相反)→多根绳股即可捻制后加工为绳索。捻绳按捻合的股数可分为三股绳、四股绳、八股绳等,其中三股绳最为普遍,如图 1-10 所示。按捻合的方式可以分为单捻绳、复捻绳、复合捻绳。捻绳

的捻向有 z 捻和 s 捻,但通常采用 z 捻,且股捻向同绳捻向相反,绳索的捻度视捻距而定。捻距是绳中的一股沿轴完整地盘绕一圈的起止点间的直线距离。捻制纤维绳可作为防静电绳,能够有效消除机械上摩擦产生的静电,也叫做拧绞绳。拧绞绳具有安装方便简单、导电性能好、使用寿命长等优点,适用于油船、火药库、油库、化学品仓库、电子行业、矿山矿井等易燃易爆场所。



图 1-10 典型三股捻绳结构示意图

1. 三股绳

编绳是由若干根绳股采用编织或编绞的方式制成的有芯或无芯绳索。最传统,也是最常见的纤维绳结构由三股编捻而成。绳股捻向通常采用 z 捻(右螺旋),且绳线捻向与绳纱捻向相反(左螺旋 s 捻),如图 1-11 所示。这使得三股绳具有最佳的抵抗外部磨损的结构。当绳索受到轴向载荷作用时,绳子会沿着轴向旋转,并且股线随着轴向伸长而趋于平整,不同类型的纤维可以任意组合构成纤维绳结构。例如,每条绳股的中心可以用聚丙烯制作,而绳子可以由聚酯纤维组成。这种结构的优点是外层的聚酯纤维具有较高的耐磨性,而内部的聚丙烯轻质且低成本。一般来说,三股绳的强度和伸长率要比相同尺寸和材料的编织绳低,但是它们与八股绳的强度、延伸特性几乎是一样的。

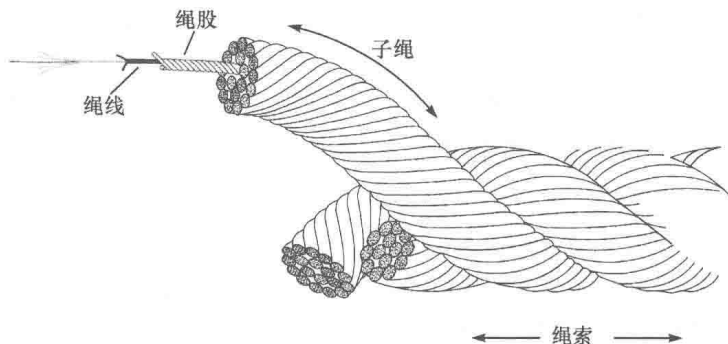


图 1-11 三股绳结构

2. 八股绳

八股绳是一种由8根拧绞的绳股分成4组,每组两股平行,其中两组为右搓绳,两组为左搓绳,绳股呈相反的方向,以8字形轨道相对交叉编织制成,具有扭转力矩平衡结构的编织绳,并且可由高、低不同弹性模量的材料制成,常应用于船舶系绳和公共设施等,也可如三股绳一样具有一般用途,如图1-12所示。

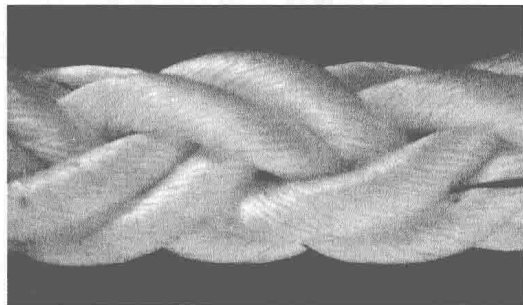


图1-12 八股绳结构

3. 双层编绳

双层编绳是指将编捻的绳股作为绳芯,并在外层编捻一层覆盖的绳股,如图1-13所示。此种结构的绳索可由内外两层共同承受轴向拉伸载荷。大多数双层编绳由尼龙或其他的聚酯纤维制成,根据不同应用需求可以采用不同的纤维材料。高模量的外层纤维和内层绳芯很少遇到载荷分布不均匀的情况,并且外层纤维可提供磨损保护。双层编绳一般有管形编绳和实芯编绳两种。管形编绳又称圆形编绳,由于绳股采用z捻和s捻的交互捻制方式,绳中间的空隙与股的数量和细度成正比,因此管形编绳具有各股间受力均匀的特点。同时,编绳的股数、股纱的根数、股纱的细度及绞拉的速度对编绳紧密程度产生影响,如图1-2(b)所示。实芯编绳又称美式编绳,编织时加捻的股相互交叉排列,且股捻向相同,花节行走向呈螺旋状。这种编织方式的细绳中央没有空隙,粗绳会有空隙,因此实芯编绳通常仅适用于生产较细的或中等粗细的绳,如图1-2(c)所示。双层编绳由于其强度高、

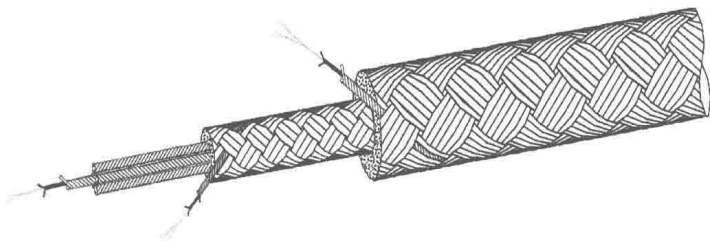


图1-13 双层编绳结构