



可展开结构

Deployable Structures

[意] S.Pellegrino

编

[意] 佩来格里诺

马小飞 宋燕平 等译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

可展开结构

[意] S. Pellegrino 编

[意] 佩来格里诺

马小飞 宋燕平 等译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2014-056 号

图书在版编目(CIP)数据

可展开结构/(意)佩来格里诺(S. Pellegrino)编;
马小飞等译. —北京:国防工业出版社,2016.6

书名原文:Deployable Structures

ISBN 978-7-118-11000-5

I. ①可… II. ①佩… ②马… III. ①空间结构-研究 IV. ①TU399

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 160423 号

Translation from the English language edition:

deployable structures

by S. Pellegrino

© Springer-Verlag Wien New York 2001

Springer is part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

本书简体中文版由 Springer-Verlag Wien New York 授权国防工业出版社独家出版发行。
版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 19¼ 字数 384 千字

2016 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 78.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

译者序

PREFACE

可展开结构一般是指具有展开和收拢两种几何状态的机构或结构。这种结构在日常生活中并不少见,例如雨伞、可卷曲窗帘、折叠椅等,由于其具备展开和收拢两种状态,且这两种状态能够根据需要进行转换,因此在航空航天领域有广泛的应用。

《可展开结构》是国内外较为全面、系统地介绍可展开结构概念、基本理论和工程技术方法的书籍,本书的主编 S. Pellegrino 教授是空间结构领域国际知名的学者,先后在英国剑桥大学、美国加州理工学院长期从事可展开结构领域的教学和科研工作,本书的翻译工作得到了他的支持和鼓励。

《可展开结构》从工程中的可展开结构实例入手,利用仿生学的概念,结合自然界生物的可展开特点,介绍了各种可展开结构;重点论述了可展开杆、可展开膜、可展开壳、双稳态结构等各种机构的基本原理、理论和分析方法;最后结合工程实例,介绍了运动学分叉、有限元、矩阵在可展开结构中的应用和理论推导。

本书的翻译得到了国家自然科学基金重大项目“大型可展开空间结构的非线性动力学建模、分析与控制”的资助。全书由马小飞统稿,张华振审校,在翻译过程中,前 JPL 资深专家卢兆麟和西安电子科技大学李团结教授都提出了很好的修改建议,在此表示感谢。

译者

前言

INTRODUCE

可展开结构能够从压缩、收拢状态自主改变形状,伸展成展开的工作状态,众所周知的简单实例如雨伞和可伸缩天线。

适用于工程的可展开结构起源于航空航天领域,最初是利用长的可展开支撑杆结构稳定宇宙飞船。随着宇宙飞船越来越大和功能越来越强,大型的太阳能帆板、通信反射器和望远镜等需要更复杂的可展开结构。目前可展开结构的发展趋势是更加简单、可靠,同时使用的机械装置尽可能少。在其他领域,近些年发展了多种可展开结构,如体育场可收展的屋面、可折叠汽车部件、便携式帐篷及展览显示屏。

本书是基于1999年7月5日至9日CISM举办的可展开结构课程的讲课笔记整理而成。该课程的目的是对多个领域内的可展开结构进行介绍,课程围绕三个主题进行,包括概念、工作原理以及展开结构的机制,这些将在本书中依次介绍。本书内容涵盖工程领域和生物学领域第1~第6章,可折叠杆结构的机理和可展开整体张拉结构的应用(第7~第11章);可展开结构的大转动分析及有限元方法(第12章)。

感谢CISM的科学委员会能够同意并为这次讲座的举办提供资助。同时,我代表本书的合著者,感谢CISM的院长Sandor Kaliszky教授,CISM的秘书长Giovanni Bianchi教授以及CISM秘书处的工作人员成功地举办这次讲座。在他们的帮助下,我们在意大利乌迪内的Palazzo Del Torso创造了记忆深刻、富有成果且促人奋进的讨论氛围。同样感谢本书的责任编辑Carlo Tasso教授,感谢他在本书的准备过程中对作者的鼓励和建议。

S. Pellegrino

目 录

CONTENTS

第1章 工程中的可展开结构	1
1.1 引言	1
1.2 盘绕杆	2
1.3 柔性壳	6
1.4 薄膜	9
1.5 结构机构	13
1.5.1 环状缩放式结构	16
1.5.2 3D 机构	19
1.6 张拉桁架结构	19
1.7 刚性面板结构	22
1.8 可收拢屋面	24
参考文献	27
第2章 自然界中的可展开结构	29
2.1 自然界中的展开现象	29
2.2 伸缩管类	30
2.2.1 体积不变	30
2.2.2 体积可变	31
2.3 从管类到膜类	32
2.4 可收展的板类	33
2.4.1 昆虫的翅膀	33
2.4.2 树叶展开	34
2.5 刚性杆类和管类	37
2.6 驱动机构	39
2.6.1 液压机构	39
2.6.2 弹性机构	39
2.6.3 收缩机构	40

参考文献	40
第3章 从自然界获取灵感	42
3.1 仿生.....	42
3.2 灵感无处不在.....	43
3.3 仿生图.....	45
3.4 可展开结构仿生学.....	47
3.4.1 折叠板和管.....	47
3.4.2 内压.....	47
3.5 结论.....	48
参考文献	48
第4章 如何折叠薄膜.....	49
4.1 折叠规则.....	49
4.2 三浦折叠方法.....	51
4.3 简易折叠的薄膜机构.....	54
4.4 围绕中心体缠绕的薄膜结构.....	57
参考文献	60
第5章 壳结构的弹性折叠	62
5.1 引言.....	62
5.2 卷尺弹簧的弯折.....	63
5.2.1 有限元模拟.....	66
5.2.2 局部弯折的形成和扩展.....	68
5.2.3 M^* 值的预测.....	72
5.3 反射器天线的折叠概念.....	72
5.3.1 最大应力.....	73
5.3.2 收拢方案.....	74
5.3.3 计算过程.....	76
5.3.4 有限元证明及实验.....	78
参考文献	79
第6章 双稳态结构.....	81
6.1 实例.....	81
6.2 双稳态壳.....	83
6.3 热塑性复合材料.....	84

6.4 应变能分析.....	88
6.4.1 弯曲能.....	88
6.4.2 拉伸能量.....	89
6.4.3 总能量.....	90
6.5 能量图.....	90
6.6 结论.....	92
参考文献	92
第7章 无穷小机构及有限机构	93
7.1 铰连杆结构的静不定和动不定特性.....	93
7.1.1 平衡矩阵及协调矩阵.....	93
7.1.2 定义及简单陈述.....	98
7.2 临界形式	105
7.2.1 引言	105
7.2.2 对称环形支撑物的临界形式	106
7.2.3 对称圆柱形桁架	111
7.3 静力学和运动学特性的投影及反向恒定性	112
7.3.1 投影变换及配极变换	112
7.3.2 对偶性概念	113
7.3.3 张拉整体及冰棍棒板架	115
参考文献.....	117
第8章 运动分叉	119
8.1 分叉相容和分叉平衡之间的类比	119
8.2 有限机构的静—动态分析	123
8.2.1 动态分析	124
8.2.2 静态分析	125
8.2.3 推论	126
8.3 分叉点	127
8.4 极限点	130
8.4.1 动态研究	130
8.4.2 静态研究	132
8.5 误差敏感性	134
8.6 结论	136
参考文献.....	139

第 9 章 可展开结构矩阵	141
9.1 概述	141
9.2 驱动绳索	142
9.3 缩放单元	144
9.3.1 平衡矩阵	146
9.3.2 几何斜调矩阵和缩聚应变矢量	147
9.3.3 柔度矩阵	148
参考文献	148
第 10 章 张拉系统	149
10.1 历史和定义	149
10.1.1 历史	149
10.1.2 定义和例子	150
10.2 张拉系统基本定理	151
10.2.1 自应力	151
10.2.2 机构	151
10.2.3 无穷小机构的稳定性	152
10.2.4 张拉系统的力学规律	153
10.2.5 张拉结构中无穷小机构的稳定性	154
10.3 张拉和建筑	156
10.3.1 一些说明	156
10.3.2 柔性与刚性	157
10.4 找形:单参数	157
10.4.1 静力平衡方法	157
10.4.2 运动法	158
10.4.3 动力松弛法	158
10.5 找形:多参数	159
10.5.1 力密度法	159
10.5.2 自应力网状系统的应用	161
10.5.3 张拉结构的应用	162
10.5.4 结论	163
参考文献	164
第 11 章 可折叠张拉结构	165
11.1 折叠原理	165

11.1.1	张拉结构的折叠:新原理	165
11.1.2	杆模式的折叠	168
11.1.3	索模式的折叠	168
11.1.4	结论	171
11.2	折叠模型	172
11.2.1	引言	172
11.2.2	四杆模型	172
11.2.3	六杆模型	174
11.3	可折叠的组合结构	177
11.3.1	张拉结构桅杆	177
11.3.2	双层网格	177
11.3.3	结论	179
11.4	折叠设计	179
11.4.1	引言	179
11.4.2	四杆张拉结构的折叠	180
11.4.3	结论	187
11.5	折叠过程模拟	187
11.5.1	引言	187
11.5.2	机构的确定	187
11.5.3	折叠的数值建模	190
11.6	两支杆的接触建模	191
11.6.1	简介	191
11.6.2	永久接触的两支杆的运动建模	191
11.6.3	实例 1	194
11.6.4	实例 2	194
11.6.5	结论	196
	参考文献	197

第 12 章 可展开结构的有限元仿真

12.1	引言	198
12.2	广义坐标	199
12.2.1	引言	199
12.2.2	四连杆机构例子	200
12.2.3	最小数量坐标系的描述	201
12.2.4	Lagrangian 坐标系的描述	203
12.2.5	Cartesian 坐标系的描述	206

12.2.6	有限元坐标系的描述	207
12.2.7	实例:太阳能电池板的展开运动学	212
12.2.8	运动方程的时间积分	214
12.2.9	实例:双摆	219
12.3	有限运动动力学	223
12.3.1	矢量操作的矩阵表示法	223
12.3.2	刚性体运动的运动学描述	226
12.3.3	球形运动的速度分析	234
12.3.4	角速度的显式表示	235
12.3.5	球形运动的加速度分析	236
12.3.6	无限小球形运动和转动增量	237
12.3.7	移动坐标系中的角速度	239
12.3.8	未知的增量转动	239
12.3.9	刚体球形运动的参数化	240
12.3.10	有限转动的几何描述	241
12.4	刚体动力学	245
12.4.1	运动描述	245
12.4.2	动能	246
12.4.3	势能	247
12.4.4	标准形式的运动方程	248
12.4.5	运动的参数方程	250
12.4.6	运动方程的增量形式	251
12.4.7	实例:重力场中的陀螺运动	254
12.5	弹性梁	256
12.5.1	梁的动力学分析	256
12.5.2	变形的位移梯度测量	258
12.5.3	平衡的局部形式	259
12.5.4	本体平衡方程的表达式	261
12.5.5	梁应变的变分	262
12.5.6	有限元单位模型的位移	265
12.5.7	剪切自锁和降阶积分	269
12.5.8	算例	272
12.6	运动学连接	274
12.6.1	引言	274
12.6.2	运动学分析中的约束类型	275
12.6.3	代数约束问题的数值算法	277

12.6.4	无约束系统的动力学问题.....	280
12.6.5	含约束系统的动力学问题.....	281
12.6.6	运动副的分类.....	283
12.6.7	低运动副建模.....	285
12.6.8	铰连接约束方程.....	285
12.6.9	柔性铰连接.....	287
12.7	多体系统的子结构.....	289
12.7.1	应变能计算.....	292
12.7.2	动能的共旋计算.....	293
12.8	结构展开实例.....	296
12.8.1	三纵梁桁架的折叠.....	296
12.8.2	MEA 天线的展开运动	300
参考文献.....		302

第1章

工程中的可展开结构

Sergio Pellegrino

英国剑桥, 剑桥大学

马小飞 译

1.1 引言

本章讨论能够自主进行构型改变的可变形结构(deployable structures)。在大多数情况下,该类结构能够在紧凑的收拢形态(stowed condition)和大尺寸的展开状(deployed condition)之间转换:从收拢状态到展开状态称之为展开过程(deployment);反之,称之为收拢过程(retraction)。

在通常情况下,可展开结构在存储和运输过程处于收拢状态,并根据需要展开到其工作状态。最古老的实例就是具有收拢和展开功能的雨伞,近些年,还出现了具有一键式展开功能的更紧凑型雨伞。日常生活中还有许多可展开结构的实例,例如折叠椅等。本书主要研究工程中的可展开结构,但从中引申出来的原理和方法所能适用的范围很广泛。

显然,可展开结构在其工作状态所需满足的要求(例如雨伞能够遮雨,或可展开通信天线展开后能够形成正确的反射面)会不同于在其收拢状态(主要要求是体积尽可能小)。但是,一个能够保持结构完整、自主展开和可靠展开的展开过程一定是最基本的要求。

通常,在研发一种新型可展开结构的工作中,展开过程不但是最具挑战性,而且其能否实现的约束条件也极为严格。因此,不可能有一个单独的概念或理论可以被通用来研发可展开结构。很多可展开结构和相关概念的成功研发都是能够在一个不连续的设计空间中先识别出一些“可行(feasible)”的小领域,再继续深入研究去拓宽这些领域。

在下面四节中,我们将介绍一些用不同的结构形式去设计能做出大幅度几何

变形的结构的方法。这些方法绝非只是一般简单的标准设计原理的应用。读者们将会很快地发现:每一个方法都是基于极为精巧的发明,其中一些方法甚至可以被称为真正的技术突破。利用这些方法设计出的一些实用结构的例子,则会在本章的后四节中介绍。

1.2 盘绕杆

简单的线性可展开结构能够通过半径为 r 的圆截面细杆绕半径为 R 的圆形成,见图 1.1。如果 $\varepsilon_{\max}$ 是细杆材料的屈服应变,根据梁理论:

$$\varepsilon_{\max} = r/R$$

因此

$$R_{\min} = r/\varepsilon_{\max}$$

例如,S2 型玻璃纤维和树脂做成的细杆的 $\varepsilon_{\max}$ 为 2%,取直径为 5mm,则 $R_{\min} = 125\text{mm}$ 。同样直径的高强钢材细杆, $\varepsilon_{\max} = 0.5\%$,因此 $R_{\min} = 500\text{mm}$ 。这一最小半径对于许多应用来讲有些大。简单的螺旋线可展开结构及其安装示意图如图 1.1 所示。

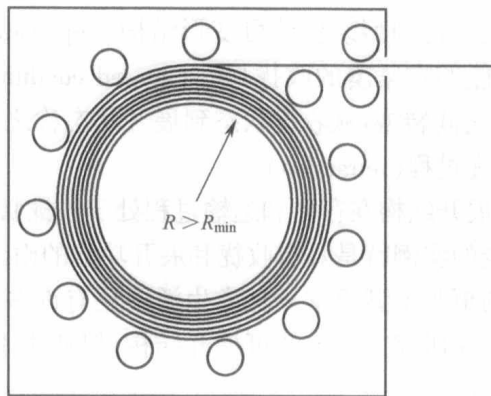


图 1.1 一种简单的盘绕杆结构及其截面图

计算表明,设计出一个能绕在直径约为 250mm 的线轴上并被收拢在小型外壳中的简单可展开结构是可行的。然而,用此设计的、仅有数米长的杆结构的刚度将不会比一般钢卷尺大,这对于很多实际应用来讲其刚度太小。

一种更有效的可展开结构,被称为可盘绕桅杆(Coilable Mast),在 1967 年由美国 Astro 公司的 H. R. Mauch 发明,并将其专利授权给了 NASA(Webb 和 Mauch, 1969)。Mauch 指出,由若干个纵杆(longeron)、垂直于纵杆的横杆(batten)和斜支撑(brace)组成的框架柱(lattice column)有较低的自重,并能够承受较高的负载。而且,由于这种结构的横截面积较小,因此所承受风阻小,如果在空间使用,其遭受空间碎片撞击破坏的可能性也大大减小。

该发明的关键是充分利用了杆结构的基本属性,这一属性首先是被 Kirchhoff 提出并在 1944 年“Love”上首次报道;即任何弹性杆,在两端通过刚性单元施加大小相等、方向相反的力 F 后,会能够被约束成螺旋形状,见图 1.2。 F 和杆变形后的结构参数之间的关系为

$$F = EI \cos^2 \alpha / R^2 \sin \alpha$$

式中: α 是螺旋线的斜率; R 是半径; E 和 I 分别是弹性模量和转动惯量。

根据这一现象,杆结构能够弹性变形为均匀半径或非均匀半径的规则螺旋线结构,该类螺旋线结构的节距可以被压缩变小直到完成最终的全收拢状态。注意:杆结构绕成螺旋线结构的模式不同于图 1.1 中提出的平面模式。

一个框架柱结构可由至少三根平行的竖杆和与这些杆连接的支撑部件组成。大多数可盘绕桅杆的设计是将用横杆构成的三角形单元以等间距和竖杆连接,从而形成多个相连的框架节 (lattice bays)。每节框架的三个纵向侧面上安排斜置的预应力索以维持柱结构的整体稳定性。图 1.3 呈现可盘绕桅杆基本结构的示意图。

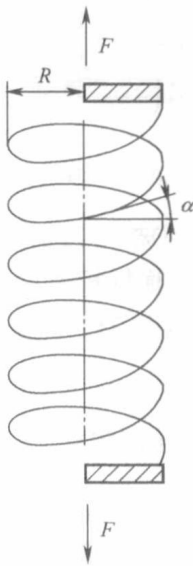


图 1.2 盘绕杆结构示意图

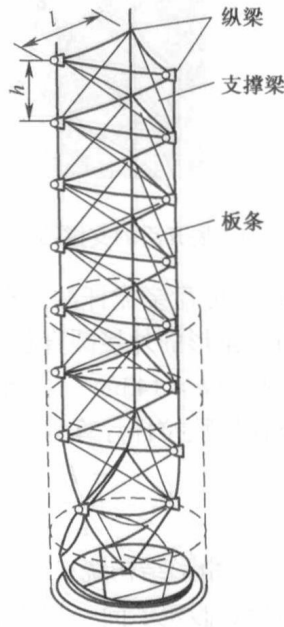


图 1.3 可盘绕桅杆结构示意图

图 1.4 是采用这一设计概念的两个实例,在 1.4(b)中可以看到在已展开部分的横杆呈现屈曲的形态,这是由于横杆本身的长度被设计成比横杆三角单元之间的距离长。此一设计有利于使斜置索处于预拉紧状态。

每个单元框架节的高度 h 如何确定呢? 首先,为了保证支撑组件设计合理,框架的纵向侧面应该是接近正方形,即 $h/l \approx 1$ 。其次,因为竖杆盘绕收拢后最好是

在圈与圈之间没有过大的间隙,因此,所有连接横杆与竖杆的接头应该尽量安排在一条螺旋线上,从而避免它们在收拢后会相互重叠放在一起,见图 1.4(b)。接头在收拢后会相互重叠的情况会出现在设计为 $h = 2\pi R/3$ 的、其框架节比较高的框架柱中。第三,竖杆的局部屈曲载荷应该比框架柱的整体屈曲载荷小,但不能太小。在设计实际结构时,这第三点是最重要的要求,一般取 $h/l \approx 2/3$ (Crawford, 1971)。

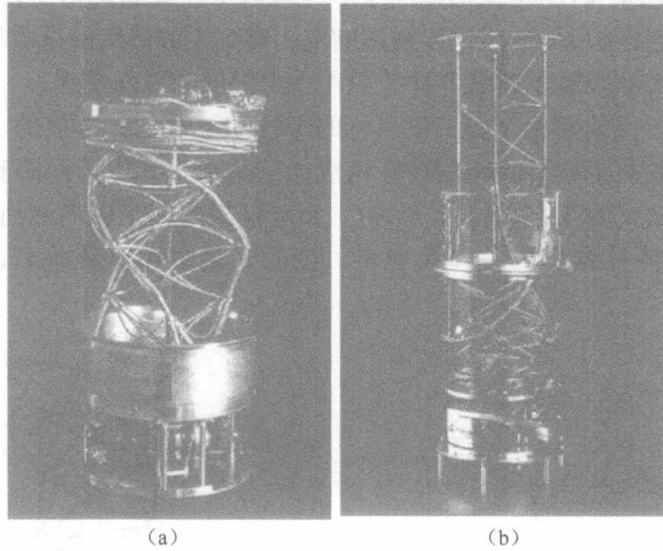


图 1.4 展开后的支撑结构:(a)支撑索展开和(b)金属管展开(AEC Able 提供)

例如,一可盘绕桅杆的三根竖杆为直径 4mm 的 S 型玻璃纤维杆,其横杆所构成的等边三角形的外接圆直径 $2R = 250\text{mm}$ (由几何导出横杆长为 $l = 216\text{mm}$),每个框架节高为 $h = 143\text{mm}$,共有 50 个框架节,则桅杆总长为 7150mm。桅杆整体的屈曲载荷根据欧拉杆计算为

$$P_1 = \frac{\pi^2 EI_c}{L^2} = \frac{\pi^2 \times 52000 \times 2.9 \times 10^5}{(50 \times 143)^2} = 2950\text{N}$$

式中: I_c 是三角形结构绕三角形中心的惯性矩; $E = 52000 \text{ N/mm}^2$ 是型玻璃纤维杆的弹性模量。假定了同一框架节中的三根竖杆同时屈曲成 S 形,则这三根竖杆的局部屈曲载荷为

$$P_2 = 3 \frac{\pi^2 EI_l}{l^2} = 3 \frac{\pi^2 \times 52000 \times 12.6}{143^2} = 945\text{N}$$

式中, I_l 为单根竖杆绕中心的惯性矩。

因此,此一可盘绕桅杆发生屈曲时的最大轴向载荷是 P_1 和 P_2 中的最小值 945N,这个值能够通过减小框架节单元的高度增加,但单元高度的降低会带来单元数量的增加。

知道了如何设计可伸展桅杆结构的承力部件以后,需要进一步确定展开和收拢特性,为此,需要观察 1986 年日本的 Natori 等人的实验结果,他们采用了比上述例中的桅杆短的桅杆,但两者的展开和收拢的特性是一样的。

图 1.5 是可盘绕桅杆结构在受压收拢过程拍的一系列照片和相应的加载-位移响应曲线。从照片可以看出,桅杆最初的失稳是从端部的局部屈曲开始的,接着,最上面框架节的横杆开始变形,直至扭曲失稳和到达收拢状态。随着进一步的压缩,紧邻的第二个框架节开始失稳,桅杆端部逐渐形成一个均匀的螺旋区域。被继续压缩以后,螺旋区域变成了一个盘绕线圈,并通过一个形状复杂的过渡区与桅杆未变形的区域连接。依次类推,进一步的压缩推动变形过渡区向桅杆底部移动,同时线圈区域也平顺地增长。从图 1.5(b)可以看出,桅杆上的轴向载荷在最初达到一个峰值,然后随着失稳的逐渐开始,很快下降到一个相对稳定的值。

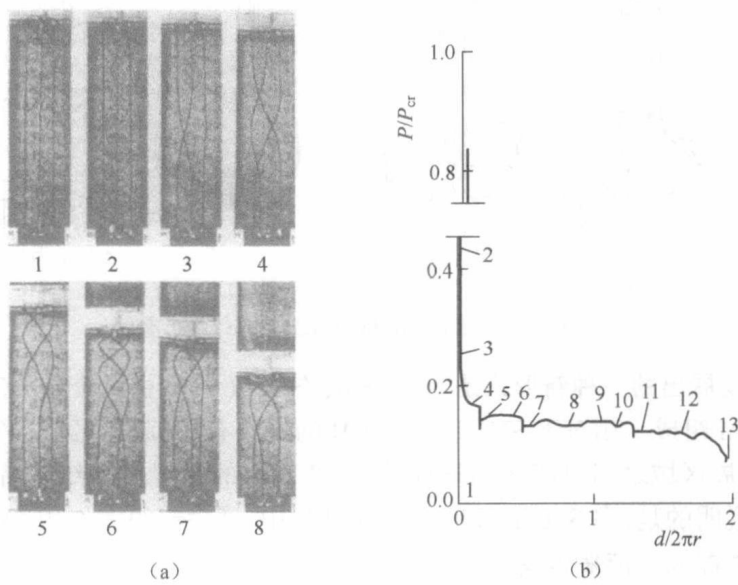


图 1.5 (a) 桅杆收拢序列照片和(b)对应的力-位移曲线 (来自 Natori 等,1986)

可盘绕桅杆广泛应用于航天器,用于展开和收拢诸如科学仪器和太阳阵等有效载荷。研究表明,长度小于 3m 的短桅杆的展开/收拢过程不需要其他支撑结构,只需要一条通过由电机操作、穿过桅杆中轴的索来控制,如图 1.4(a) 所示。此一控制索所提供的力已由 Natori 所做实验测定。

对于更长的桅杆(实际已经做的桅杆长度达到 46m),由于在收拢过程中过渡区的刚度太小,不能支撑在其上方已被压缩成盘绕线圈的部分。克服这个困难的设计方法是,使线圈部分在桅杆的基部形成并将其放置在一个盒体内,桅杆的展开和收拢则通过盒体的旋转来控制,图 1.4(b) 呈现此设计。