



世界优秀教材中国版

柔顺机构学 (中文版)

Compliant Mechanisms

原著 Larry L. Howell

翻译 余跃庆

 高等教育出版社



John Wiley & Sons, Inc.

WILEY

1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2030, 2031, 2032, 2033, 2034, 2035, 2036, 2037, 2038, 2039, 2040, 2041, 2042, 2043, 2044, 2045, 2046, 2047, 2048, 2049, 2050, 2051, 2052, 2053, 2054, 2055, 2056, 2057, 2058, 2059, 2060, 2061, 2062, 2063, 2064, 2065, 2066, 2067, 2068, 2069, 2070, 2071, 2072, 2073, 2074, 2075, 2076, 2077, 2078, 2079, 2080, 2081, 2082, 2083, 2084, 2085, 2086, 2087, 2088, 2089, 2090, 2091, 2092, 2093, 2094, 2095, 2096, 2097, 2098, 2099, 2100, 2101, 2102, 2103, 2104, 2105, 2106, 2107, 2108, 2109, 2110, 2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2116, 2117, 2118, 2119, 2120, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2126, 2127, 2128, 2129, 2130, 2131, 2132, 2133, 2134, 2135, 2136, 2137, 2138, 2139, 2140, 2141, 2142, 2143, 2144, 2145, 2146, 2147, 2148, 2149, 2150, 2151, 2152, 2153, 2154, 2155, 2156, 2157, 2158, 2159, 2160, 2161, 2162, 2163, 2164, 2165, 2166, 2167, 2168, 2169, 2170, 2171, 2172, 2173, 2174, 2175, 2176, 2177, 2178, 2179, 2180, 2181, 2182, 2183, 2184, 2185, 2186, 2187, 2188, 2189, 2190, 2191, 2192, 2193, 2194, 2195, 2196, 2197, 2198, 2199, 2200, 2201, 2202, 2203, 2204, 2205, 2206, 2207, 2208, 2209, 2210, 2211, 2212, 2213, 2214, 2215, 2216, 2217, 2218, 2219, 2220, 2221, 2222, 2223, 2224, 2225, 2226, 2227, 2228, 2229, 2230, 2231, 2232, 2233, 2234, 2235, 2236, 2237, 2238, 2239, 2240, 2241, 2242, 2243, 2244, 2245, 2246, 2247, 2248, 2249, 2250, 2251, 2252, 2253, 2254, 2255, 2256, 2257, 2258, 2259, 2260, 2261, 2262, 2263, 2264, 2265, 2266, 2267, 2268, 2269, 2270, 2271, 2272, 2273, 2274, 2275, 2276, 2277, 2278, 2279, 2280, 2281, 2282, 2283, 2284, 2285, 2286, 2287, 2288, 2289, 2290, 2291, 2292, 2293, 2294, 2295, 2296, 2297, 2298, 2299, 2300, 2301, 2302, 2303, 2304, 2305, 2306, 2307, 2308, 2309, 2310, 2311, 2312, 2313, 2314, 2315, 2316, 2317, 2318, 2319, 2320, 2321, 2322, 2323, 2324, 2325, 2326, 2327, 2328, 2329, 2330, 2331, 2332, 2333, 2334, 2335, 2336, 2337, 2338, 2339, 2340, 2341, 2342, 2343, 2344, 2345, 2346, 2347, 2348, 2349, 2350, 2351, 2352, 2353, 2354, 2355, 2356, 2357, 2358, 2359, 2360, 2361, 2362, 2363, 2364, 2365, 2366, 2367, 2368, 2369, 2370, 2371, 2372, 2373, 2374, 2375, 2376, 2377, 2378, 2379, 2380, 2381, 2382, 2383, 2384, 2385, 2386, 2387, 2388, 2389, 2390, 2391, 2392, 2393, 2394, 2395, 2396, 2397, 2398, 2399, 2400, 2401, 2402, 2403, 2404, 2405, 2406, 2407, 2408, 2409, 2410, 2411, 2412, 2413, 2414, 2415, 2416, 2417, 2418, 2419, 2420, 2421, 2422, 2423, 2424, 2425, 2426, 2427, 2428, 2429, 2430, 2431, 2432, 2433, 2434, 2435, 2436, 2437, 2438, 2439, 2440, 2441, 2442, 2443, 2444, 2445, 2446, 2447, 2448, 2449, 2450, 2451, 2452, 2453, 2454, 2455, 2456, 2457, 2458, 2459, 2460, 2461, 2462, 2463, 2464, 2465, 2466, 2467, 2468, 2469, 2470, 2471, 2472, 2473, 2474, 2475, 2476, 2477, 2478, 2479, 2480, 2481, 2482, 2483, 2484, 2485, 2486, 2487, 2488, 2489, 2490, 2491, 2492, 2493, 2494, 2495, 2496, 2497, 2498, 2499, 2500, 2501, 2502, 2503, 2504, 2505, 2506, 2507, 2508, 2509, 2510, 2511, 2512, 2513, 2514, 2515, 2516, 2517, 2518, 2519, 2520, 2521, 2522, 2523, 2524, 2525, 2526, 2527, 2528, 2529, 2530, 2531, 2532, 2533, 2534, 2535, 2536, 2537, 2538, 2539, 2540, 2541, 2542, 2543, 2544, 2545, 2546, 2547, 2548, 2549, 2550, 2551, 2552, 2553, 2554, 2555, 2556, 2557, 2558, 2559, 2560, 2561, 2562, 2563, 2564, 2565, 2566, 2567, 2568, 2569, 2570, 2571, 2572, 2573, 2574, 2575, 2576, 2577, 2578, 2579, 2580, 2581, 2582, 2583, 2584, 2585, 2586, 2587, 2588, 2589, 2590, 2591, 2592, 2593, 2594, 2595, 2596, 2597, 2598, 2599, 2600, 2601, 2602, 2603, 2604, 2605, 2606, 2607, 2608, 2609, 2610, 2611, 2612, 2613, 2614, 2615, 2616, 2617, 2618, 2619, 2620, 2621, 2622, 2623, 2624, 2625, 2626, 2627, 2628, 2629, 2630, 2631, 2632, 2633, 2634, 2635, 2636, 2637, 2638, 2639, 2640, 2641, 2642, 2643, 2644, 2645, 2646, 2647, 2648, 2649, 2650, 2651, 2652, 2653, 2654, 2655, 2656, 2657, 2658, 2659, 2660, 2661, 2662, 2663, 2664, 2665, 2666, 2667, 2668, 2669, 2670, 2671, 2672, 2673, 2674, 2675, 2676, 2677, 2678, 26

John Wiley & Sons, Inc.

图字:01-2005-2294号

Compliant Mechanisms

Larry L. Howell

ISBN 0-471-38478-X

This book is printed on acid-free paper. ∞

Copyright © 2001 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

Published simultaneously in Canada.

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, scanning or otherwise, except as permitted under Section 107 or 108 of the 1976 United States Copyright Act, without either the prior written permission of the Publisher, or authorization through payment of the appropriate per-copy fee to the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, (978)750-8400, fax (978)750-4744. Requests to the Publisher for permission should be addressed to the Permissions Department, John Wiley & Sons, Inc., 605 Third Avenue, New York, NY 10158-0012, (212)850-6011, fax (212)850-6008, E-Mail: PERMREQ @ WILEY.COM.

This publication is designed to provide accurate and authoritative information in regard to the subject matter covered. It is sold with the understanding that the publisher is not engaged in rendering professional services. If professional advice or other expert assistance is required, the services of a competent professional person should be sought.

All Rights Reserved. This translation published under license.

图书在版编目(CIP)数据

柔顺机构学/(美)豪厄尔(Howell, L. L.)著;余跃庆译. —北京:高等教育出版社, 2007.5

书名原文: Compliant Mechanisms

ISBN 978-7-04-021256-3

I. 柔… II. ①豪…②余… III. 柔性结构-机构学 IV. TH112

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 039152 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京中科印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 23.25
字 数 560 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2007 年 5 月第 1 版
印 次 2007 年 5 月第 1 次印刷
定 价 29.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 21256-00

译者序

传统机械系统或机构都是由刚性构件以运动副连接而成的,这在高速、精密、微型等高性能的要求下就暴露出一些不可避免的问题,如由惯性引起的振动,由运动副带来的间隙、摩擦、磨损及润滑,由机械结构决定的加工、安装、误差等,这些问题使得机器的精度降低、寿命缩短、成本增加,因而其工作性能不能满足现代科技发展对机械装备的要求。机械科学家们为解决这些问题已经进行了大量的研究,并已取得了众多成果,而柔顺机构(compliant mechanisms)的出现则从机构设计这一根本角度为解决这些问题提供了新的、更彻底的方法。

柔顺机构不像传统刚性机构那样靠运动副来实现全部运动和功能,而主要靠机构中的柔性构件(杆件)的变形来实现机构的主要运动和功能,它同样也能实现运动、力和能量的传递和转换。柔顺机构比只是考虑机构中由于杆件变形带来影响的柔性机构又大大前进了一步,它不是停留在如何避免杆件变形产生的负面影响上,而是积极地利用杆件变形来改善和提高机构的性能。正是由于在结构上减少甚至没有了运动副,因此柔顺机构在构件数目上就比传统机构要少很多,由此带来的最直接的效果就是大大减少了机构的重量以及加工、安装的时间和费用。同时,它没有或大大减少了机构中的间隙、摩擦、磨损及润滑等复杂问题,从而可以提高机构精度、增加可靠性、减少维护等。所以,柔顺机构在降低成本和提高性能这两大方面比传统刚性机构具有明显的优势,它给机械科学和工程带来了革命性的冲击和变化,是现代机构和机械设备发展的新方向。

从20世纪80年代后期开始,柔顺机构就引起了机械科学家和工程师的高度重视,其研究成果已经在一些日常的和有特殊要求的行业上开始应用,如日常用品、自行车、汽车、精密测量等,尤其是在轻型、微型化领域有着广泛的应用前景。例如,在微机电系统(MEMS)中,柔顺机构有着巨大的优势和潜力,它可以较大地提高MEMS中机械部分的尺寸微小化程度和机构的工作性能,从而大大促进了MEMS领域的发展。

美国Brigham Young大学的Howell教授被认为是现代柔顺机构研究的重要奠基人之一,他在柔顺机构的分析方法方面取得了重要进展,所提出的“伪刚体模型”(pseudo-rigid-body model)对奠定和加快柔顺机构研究的进展起到了重要作用。Howell教授现在已经成为这一领域国际著名的领头人之一,是Brigham Young大学机械工程系主任,其带领下的研究小组在世界柔顺机构研究领域占有重要地位。

《Compliant Mechanisms》一书就是在总结其多年研究成果的基础上写成的一部专著,这也是美国、甚至世界上仅有的有关柔顺机构的几本专著之一。

该书详细概述了柔顺机构学的发展和主要内容,介绍了进行柔顺机构分析与设计的最新有效方法,为工程师、学生及研究人员提供了大量有用的设计实例。

该书的章节安排简洁、合理,引导读者从简单开始,通过举例发展到更具有挑战的概念,最终进入针对特殊类型装置的实际应用。作者将注意力集中在可用标准线性梁方程和更先进的伪刚体模型进行设计的柔顺机构上,给出了若干具有广泛应用的特殊用途柔顺机构例子,并用实例介绍了柔顺机构在 MEMS 中的应用。

该书覆盖了材料强度、机械设计及运动学的基本问题,这使得它成为一本不太需要其他参考书就能解决柔顺机构问题的独立著作,可作为新学习者的基础,也可以为来自于其他领域而现在正在从事 MEMS 工作的读者提供一些参考资料。

该书既可以作为学生的入门课本,也可以作为实际工作者和研究人员的最新资源。它全面地覆盖了这个新兴领域。

我国开始进入柔顺机构研究领域的时间较晚,大约比国际上滞后十多年。在此方面,北京航空航天大学、华中科技大学、华南理工大学等在柔顺机构的结构和运动分析及设计研究上取得了可喜的成果。另外,在一些 MEMS 领域的研究中也涉及柔顺机构,这些工作对推动我国柔顺机构研究的发展起到了积极的作用。但真正从机构学角度开展柔顺机构研究的成果还不多,柔顺机构学方面的专著还很少,这对开展柔顺机构研究、大力发展 MEMS 都是十分不利的。

译者在美国 Brigham Young 大学进行合作研究期间,对该书相关章节进行了认真学习,对“伪刚体模型”有了较为深入的了解和应用,同时与 Howell 教授建立了良好的合作关系,并就开展柔顺机构动力学研究问题与他进行了多方面的讨论。该书的翻译工作就是在 Howell 教授的积极支持下才得以完成的。翻译该书的初衷是,把世界上最先进的柔顺机构学的理论和方法介绍给国内学者,使得有更多的人能够了解这个领域,带动更多的科研人员开展相关研究,以使我国尽快接近世界先进水平。我相信,它的出版对于发展我国的柔顺机构研究以及 MEMS 都将起到十分重要的作用。

在该书的翻译过程中,王雯静等研究生参加了一些录入及整理等工作,同时也得到了北京市教育委员会科技发展项目的支持,在此一并表示感谢。

为了保持原书风格,除易混淆之处外,书中所用变量符号与原书一致。

在翻译过程中,为了尽量保持原文的风格和科学的严谨性,部分语句难免有直译的痕迹。书中不妥或错误之处,敬请读者批评指正。

余跃庆

2006 年 10 月于北京工业大学

前 言

对于许多机械设计问题来说,柔顺机构可以提供更新、更好的解决方案。近些年来,在柔顺机构学的理论方面已经进行了许多研究,为工程界提供简洁、易懂、好用的丰富资料就显得十分重要。本书的目的就是满足学生、工程师以及研究人员这方面的需要。

本书介绍柔顺机构的分析和设计方法,并用实例加以说明。本书内容主要是为工程师提供一种设计思想,充分利用柔顺机构的有利条件,而这正是其他方法所不具备的。书中介绍了小变形装置的分析,但重点是具有非线性大变形的柔顺机构;引入伪刚体模型方法,运用传统机构的建模方法大大简化了大变形柔顺机构的分析过程,用这种简化方法就能进行各种用途柔顺机构的设计。书中还阐述了柔顺机构在微机电系统(MEMS)这一新兴领域中所显示出的优势,并给出了一些实例。

本书是按照从简单到复杂的思路来安排章节顺序的,全书以实际应用结束,主要分为绪论、基础、分析、设计、特殊用途机构几个部分。一般是先给出简单例子以帮助理解,然后用复杂的实例说明如何在实际中应用。

为使本书成为不依赖于很多其他参考文献就能独立解决柔顺机构问题的专著,我们将机械强度、机械设计、运动学等有关基础知识纳入书中,这有助于读者把精力着重放在他们所研究的问题上,也可为那些从其他方面转入现在进行 MEMS 或相关领域研究的学者提供一些资料。从附录中可以快速查到书中所用的一些重要公式。

柔顺机构学领域的确立应归功于 Ashok Midha 教授的远见卓识。很多学者为柔顺机构学的发展做出了贡献,但 Midha 教授可以说是现代柔顺机构学之父。他的洞察力和想象力对此领域及其合作者都产生了深刻的影响,我本人就是一个范例,从其柔顺机构研究中和对我的指导中受益匪浅,对此我十分感激。

本书的早期版本曾作为 Brigham Young 大学、Purdue 大学和 Missouri-Rolla 大学柔顺机构学课程的讲义,学生们提出了许多有益的改进意见。

在本书的部分章节中,同行们无私地贡献了他们的时间和才能,Pennsylvania 大学的 G. K. Ananthasuresh 教授和 Pennsylvania 州立大学的 Mary I. Freck 教授撰写了第 9 章,Delphi 汽车系统公司的 Morgan D. Murphy 博士提供了附录 G,第 11 章则在很大程度上依赖于 Brian Jensen 在 Brigham Young 大学做研究生时所完成的工作。

本书中的部分文字和图表是从以前的作品中总结出来的,包括一些与研究生和同行们一起发表在由美国机械工程师协会(ASME)出版的各种会议论文集和《机械设计》期刊上的论文以及一些研究生的学位论文。这里谨向那些曾参与这项工作的人们表示衷心的感谢,他们是:James Derderian、Patrick Opdahl、Brian Edwards、John Parise。对为本书做出重要贡献的 Brian Jensen、Scott Lyon、Brent Weight 和 Creg Roach 以及其他很多学生的贡献也一并感谢,是他们的努力才使本书得以出版。另外,还要感谢 Megan Poppitz 的帮助。

在本书的完成过程中,Brigham Young 大学机械工程系给予了积极的支持和大量物质上的帮助,Brigham Young 大学工学院和行政部门也给予了作者多方面的支持。

除了那些给这部著作提出了建议和鼓励的学生外,还应该感谢那些为改进本书初稿提出过建设性评阅意见的人们,特别要感谢 G. K. Ananthasuresh 教授、Morgan D. Murphy 博士、Kenneth W. Chase 教授和 Brigham Young 大学英语系的 Don Norton 教授,以及学校出版编辑部门对于本书初稿的那些富有价值的审阅和建议。

在柔顺机构学方面的很多基础性研究工作得到了美国国家科学基金(NSF)的财政支持,这是一项明智的投资,它将在未来的许多年里产生深远的影响。作者在柔顺机构领域的研究工作得到以下 NSF 基金项目的支持:MDI-9624574(获成就奖),CMS-9978737,ECS-9528238 和 MDI-9980835。还要感谢“Utah 卓越规划中心”在对“Utah 柔顺机构中心”实现柔顺机构学理论商业化过程中的大力支持。

在此,我要衷心感谢我的妻子和孩子们所给予我的一贯热爱、支持和友谊,还要感谢我父母的爱心和所做出的牺牲。最后,我虔诚地感激上帝的恩赐,我无法用语言来表达我的谢意。

LARRY L. HOWELL

于 Provo, Utah

目 录

前言	I
----------	---

第 1 章 绪论	1	1.5.1 柔顺机构与柔顺结构	10
1.1 柔顺机构的优越性	3	1.5.2 术语	10
1.2 柔顺机构的挑战	6	1.5.3 图表	12
1.3 历史背景	7	1.6 柔顺 MEMS	13
1.4 柔顺机构与大自然	9	习题	15
1.5 术语和图表	10		

第 2 章 柔性与变形	17	2.5.4 蠕变和应力松弛	26
2.1 线性与非线性变形	18	2.6 线性弹性变形	27
2.2 刚度和强度	18	2.7 能量储存	30
2.3 柔性	19	2.8 应力刚化	32
2.4 位移与力载荷	21	2.9 大变形分析	33
2.5 材料方面的考虑	23	2.9.1 末端受力矩载荷的梁	33
2.5.1 柔性梁的最大变形	23	2.9.2 椭圆积分解法	35
2.5.2 强度与杨氏模量之比	24	2.9.3 数值方法	41
2.5.3 材料选择的其他准则	24	习题	41

第 3 章 失效预防	45	3.3.1 疲劳基础	57
3.1 应力	46	3.3.2 疲劳失效预测	57
3.1.1 主应力	47	3.3.3 疲劳极限和疲劳强度估计	60
3.1.2 应力集中	49	3.3.4 疲劳极限和疲劳强度修正 系数	60
3.2 静态失效	50	3.3.5 表面系数	61
3.2.1 延性材料	50	3.3.6 尺寸系数	61
3.2.2 脆性材料	54	3.3.7 载荷系数	62
3.3 疲劳失效	57		

3.3.8 可靠性	62
3.3.9 综合影响	62
3.3.10 完全反向载荷	63
3.3.11 脉动应力	66

3.3.12 聚合材料的疲劳	70
3.3.13 试验	73
习题	74

第4章 刚性构件机构

4.1 引言	80
4.1.1 活动度	80
4.1.2 运动链及转化	81
4.1.3 四杆机构的分类	81
4.1.4 机械增益	82
4.2 位置分析	83
4.2.1 四杆机构:封闭形方程	83
4.2.2 曲柄滑块机构:封闭形方程	84
4.2.3 复数法	84

4.3 速度和加速度	88
4.4 运动系数	89
4.4.1 四杆机构的运动系数	89
4.4.2 曲柄滑块机构的运动系数	90
4.5 机构综合	90
4.5.1 函数生成	90
4.5.2 轨迹生成	91
4.5.3 运动生成	92
习题	93

第5章 伪刚体模型

5.1 短臂柔铰	98
5.1.1 主动力与被动力	101
5.1.2 应力	102
5.1.3 活动铰链	104
5.2 自由端受力的悬臂(固定-铰接)梁	104
5.2.1 梁变形轨迹的参数化近似法	106
5.2.2 特征半径系数	107
5.2.3 梁末端坐标	108
5.2.4 特征半径系数的经验算法	108
5.2.5 角变形近似	109
5.2.6 刚度系数	110
5.2.7 扭簧常数	113
5.2.8 应力	113
5.2.9 固定-铰接片段的实际应用	115

5.3 固定-导向柔性片段	117
5.4 末端受力矩载荷	118
5.5 初始弯曲悬臂梁	119
5.5.1 初始弯曲梁的刚度系数	121
5.5.2 初始弯曲梁的应力	122
5.6 铰接-铰接片段	122
5.7 受力和力矩载荷的(固定-固定)片段	125
5.8 模拟铰链的其他方法	129
5.8.1 活动铰链	130
5.8.2 被动铰链	131
5.8.3 Q 铰	132
5.8.4 交错轴柔铰	135
5.8.5 扭转铰链	137
5.8.6 开口管道柔铰	138
5.9 机构建模	139
5.10 机构分析商业软件的应用	147
习题	149

第 6 章 力与变形的关系	157	6.7 固定 - 铰接构件的弹簧函数 ...	169
6.1 自由体图解法	158	6.8 伪刚体四杆机构	170
6.2 广义坐标	162	6.9 伪刚体滑块机构	176
6.3 功与能	162	6.10 多自由度机构	180
6.4 虚位移与虚功	163	6.11 结论	181
6.5 虚功原理	165	习题	181
6.6 虚功原理的应用	165		
第 7 章 数值方法	185	7.2 链式算法	187
7.1 有限元分析	186		
第 8 章 柔顺机构综合	197	8.3 其他综合方法	212
8.1 转换刚体(运动)综合	198	8.3.1 有限位移的 Burmester	
8.2 柔顺综合:运动静力综合	206	理论	213
8.2.1 附加方程和未知量	206	8.3.2 无限位移	213
8.2.2 方程的耦合	207	8.3.3 伪刚体模型的优化	213
8.2.3 设计约束	208	8.3.4 最优化方法	213
8.2.4 $\theta_0 = \theta_j$ 的特殊情况	209	习题	213
第 9 章 连续模型的优化综合	215	9.3.1 尺度优化	225
9.1 引言	217	9.3.2 形状优化	229
9.1.1 分布柔顺	218	9.3.3 拓扑优化	230
9.1.2 连续模型	219	9.4 计算方面	232
9.1.3 用有限元法进行弹性静力		9.4.1 优化算法	233
分析	219	9.4.2 灵敏度分析	233
9.1.4 结构优化	220	9.5 最佳准则法	234
9.2 优化问题方程式	221	9.5.1 最佳准则的导出	235
9.2.1 目标函数、约束条件和设		9.5.2 求解过程	236
计变量	221	9.5.3 例题	236
9.2.2 刚性和柔性的度量	222	9.6 结论	239
9.2.3 多准则方程式	223	9.7 致谢	239
9.3 尺度、形状及拓扑优化	224	习题	239

第 10 章 特殊用途机构	243	10.1.6 举例	249
10.1 柔顺常力机构	244	10.2 平行机构	250
10.1.1 柔顺滑块机构的伪刚体 模型	244	10.2.1 柔顺平行导向机构	251
10.1.2 尺度综合	245	10.2.2 应用	251
10.1.3 确定力的大小	247	10.2.3 伪刚体模型	253
10.1.4 举例	248	10.2.4 其他设计因素	254
10.1.5 柔性铰链中应力的估算 ..	249	习题	255
第 11 章 双稳态机构	257	11.4.3 各种弹簧位置举例	270
11.1 稳定性	259	11.5 双滑块机构	274
11.2 柔顺双稳态机构	260	11.5.1 用铰链连接滑块的双滑 块机构	274
11.3 四杆机构	261	11.5.2 用连杆连接滑块的双滑 块机构	275
11.3.1 能量方程	261	11.5.3 双稳态性能要求	276
11.3.2 双稳态性能要求	262	11.6 弹簧波纹梁	277
11.3.3 杨氏双稳态机构	266	11.7 双稳态凸轮机构	278
11.4 曲柄滑块或摇杆滑块机构	269	习题	278
11.4.1 能量方程	270		
11.4.2 双稳态性能要求	270		
附录 A 参考文献	280		
附录 B 截面特性	293	B.4 实心半圆	294
B.1 矩形	293	B.5 直角三角形	294
B.2 圆	293	B.6 等厚凸缘工字梁	294
B.3 空心圆	293		
附录 C 材料特性	295		
附录 D 线弹性梁变形	299	D.2 沿长度方向受力的悬臂梁	299
D.1 自由端受力的悬臂梁	299	D.3 受均布载荷的悬臂梁	299

D.4 自由端受力矩作用的悬臂梁 ...	300	D.8 一端固定另一端简支的梁	301
D.5 中点受力的简支梁	300	D.9 中点受载荷的两端固定梁	301
D.6 沿长度方向受力的简支梁	300	D.10 受均布载荷的两端固定梁	302
D.7 受均布载荷的简支梁	301	D.11 一端固定另一端导向的梁	302

附录 E 伪刚体模型	303	E.4 固定 - 导向梁	306
E.1 短臂柔铰	303	E.5 自由端受力矩作用的悬臂梁 ...	306
E.2 自由端受垂直力作用的悬臂梁	303	E.6 初始弯曲悬臂梁	307
E.3 自由端受力的悬臂梁	304	E.7 铰接 - 铰接片段	309
		E.8 力 - 力矩复合的末端载荷	310

附录 F 椭圆积分计算	311
--------------------------	-----

附录 G 柔顺机构的型综合	313	G.4 型综合	319
G.1 刚性构件机构的矩阵表达式 ...	313	G.5 设计要求的确定	319
G.2 柔顺机构矩阵	315	G.6 柔顺机构的拓扑综合	320
G.2.1 片段类型规定	315	G.6.1 片段类型枚举	320
G.2.2 连接类型规定	315	G.6.2 连接类型枚举	321
G.2.3 例子	316	G.6.3 片段和连接类型的组合结果	323
G.3 同构机构的判定	317	G.6.4 柔顺机构的构成	325
G.3.1 刚体机构同构的检测方法 ...	317	G.7 举例	327
G.3.2 柔顺机构的同构检测	317		

中英文名词对照	332
----------------------	-----

第1章 绪 论

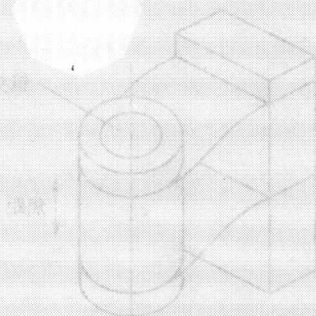


图 1-1 圆柱和棱柱的三视图

(a) 圆柱的三视图 (b) 棱柱的三视图

(c)

机构是用来进行运动、力或能量传递或转换的机械装置^[1-2]。传统刚性机构是由运动副连接的刚性杆件组成的,图 1.1a 所示的往复式发动机就是一个例子,其中,线性输入转换成转动输出,输入力转换成为输出扭矩。图 1.1b 所示的扁嘴钳是又一例子,此机构将能量从输入端传递到输出端。因为能量在输入和输出之间守恒(忽略摩擦损失),因此输出力可能比输入力要大得多,但输出位移却要比输入位移小得多。像机构一样,结构也可能是由铰链连接刚性杆件组成的,但各杆件间不允许有相对刚体运动。

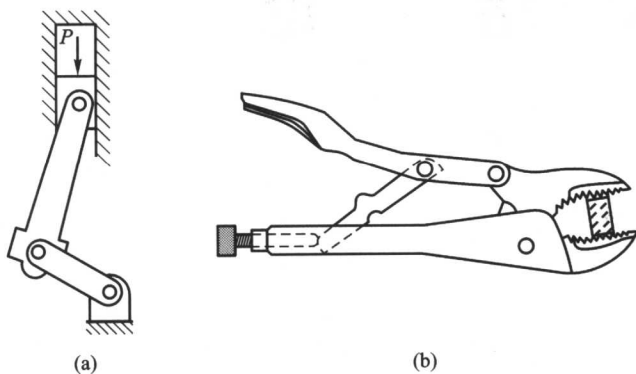


图 1.1 刚性机构举例

(a) 往复式发动机的一部分 (b) 扁嘴钳

柔顺机构也能传递或转换运动、力或能量,但与刚性机构不同,柔顺机构不仅由运动副传递运动,还至少从其柔性部件的变形中获得一部分运动。图 1.2a 所示为一个柔顺卷边机构,与扁嘴钳类似,其输入力传递到了输出端,只是这里有一部分能量以应变能的形式储存在柔性部件中。注意,如果整个装置都是刚性的,那么它将不能运动,因而变成一个结构。图 1.2b 所示的设备也需要有柔顺部件来使镜片聚焦^[4-5]。

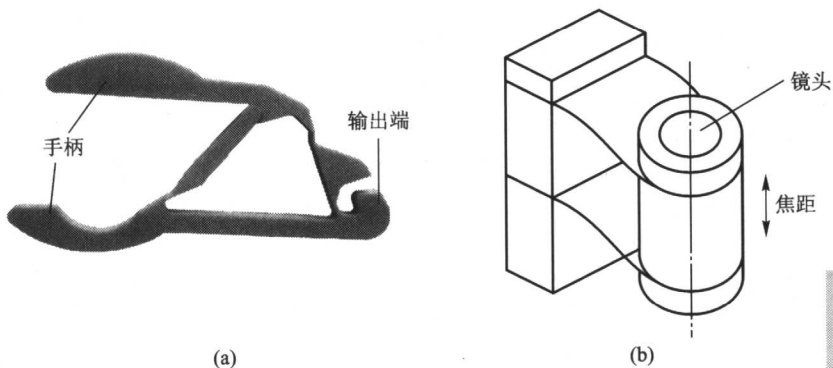


图 1.2 柔顺机构举例

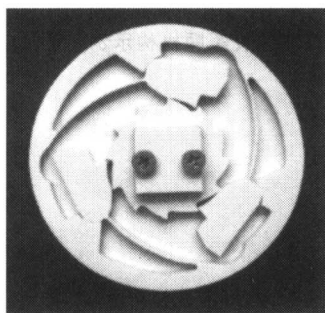
(a) 卷边机构(出自文献[3])

(b) 平行导向机构

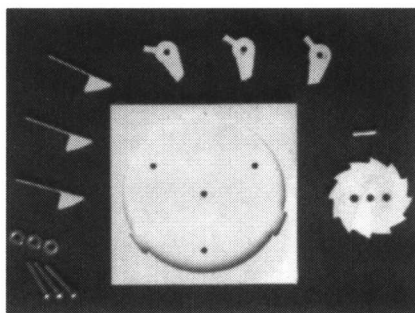
1.1 柔顺机构的优越性

在很多特殊应用场合下可考虑使用柔顺机构。柔顺机构的优越性主要表现在两方面:降低成本(减少零件数目,减少装配时间,简化制造过程)和提高性能(提高精度,增加可靠性,减少磨损,减轻重量,减少维护)。

柔顺机构的一个优点是能够大大减少要实现某一特定任务的零件总数。有些机构可以用注压材料做成一体,例如,从图 1.3a 所示的柔顺超越离合器^[6-7]以及图 1.3b 所示的相应刚性零件可以看出,柔顺机构要比刚性机构少很多构件。构件数目的减少可以减少加工和装配的时间及降低成本。图 1.4 所示柔顺机构及其相应刚性机构是部件减少的另一实例。



(a)



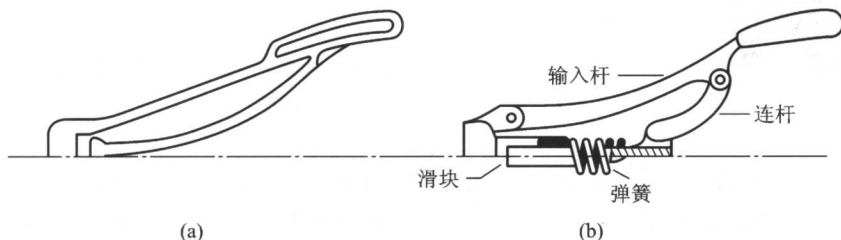
(b)

图 1.3

(a) 柔顺超越离合器

(b) 拆散的刚性零部件

(出自文献[6-7])



(a)

(b)

图 1.4

(a) AMP 公司开发的柔顺卷边机构 (b) 刚性零部件。由于对称性,只给出机构的一半

(出自文献[4])

柔顺机构中也有很少的运动副,如(转动)铰链和移动副,这使得磨损降低,所需润滑减少。这些特性对于那些不宜接触到的机构或在恶劣环境中运转而易损坏运动副的机构具有重要的应用价值。运动副数目的减少还可以提高机构的精度,因为运动副数目的减少可减少或消除回差,这是精密仪器设计的一个重要因素^[8-9]。图 1.5 所示的是一个高精度柔顺机构实例,由于其运动是靠变形而不是靠相邻部件间的相互摩擦产生的,因此也可降低振动和噪声。

图 1.6 所示是为有害环境设计的一个柔顺机构例子,在操作中,这种简单的抓持装置拿着一个冲模(例如计算机芯片),要求这个冲模在几种不同的化学药品中传送而不被损坏,抓持器由很难被化学药品腐蚀的 Teflon 制成,它不用附加外力就能夹住冲模。

由于柔顺机构依赖于柔性构件的变形,其能量便以应变能的形式存储在柔性构件中,这种存

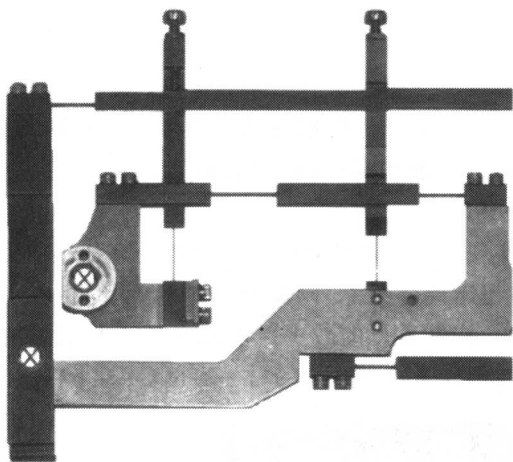
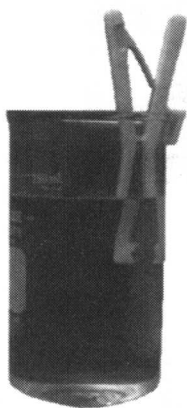


图 1.5 高精度柔顺机构示例

图 1.6 用于在若干不同的强烈化学药品中
抓持冲模的柔顺钳

储的能量很像是变形弹簧中的应变能,因而弹簧的功能可以应用到柔顺机构的设计中。按照这种方式,可以很容易先将能量储存起来而后再释放出来或转换成其他形式。弓箭就是一个简单的例子,拉弓的时候能量存储在弦内,而后转换成箭的动能。这种储能特性也可以用来设计那些具有特殊力与变形关系的机构,或使该机构趋向于某些特定位置。例如,图 1.7 所示机构是一种机器人末端执行器,无论输入位移怎样,其输出力保持不变。

使用柔顺机构可比使用刚性构件大大减轻重量,这点在航空及其他应用领域中是一个至关重要的因素。柔顺机构还可以为各公司在减少消费品的重量和运输费用方面带来效益。

柔顺机构的另一个优点是很容易实现微型化^[10-19]。简单的微型结构、驱动器和传感器正显现出广阔的应用前景,在许多微机电系统(MEMS)中蕴藏着巨大的潜力。柔顺机构具有能够减少部件和运动副总数的特性,这对于微型机构的制作是十分有利的,可以用类似于制作集成电路的材料和工艺来加工柔顺微型机构。有关 MEMS 的内容将在 1.6 节中详细讨论。

图 1.8 所示的柔顺鱼钩钳(柔顺钳)就体现了上面讨论的这些优越性,最明显的是其部件减

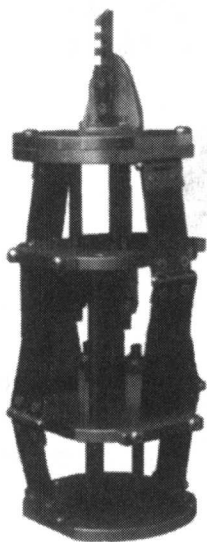


图 1.7 柔顺常力机器人末端执行器

少特性,它被铸成了一个单件体。它适用于那种会使铰链生锈的恶劣环境,可以减少维修。它很轻便,不仅便于携带,而且如果垂钓者将其掉在水里,它还可以自己漂浮起来。

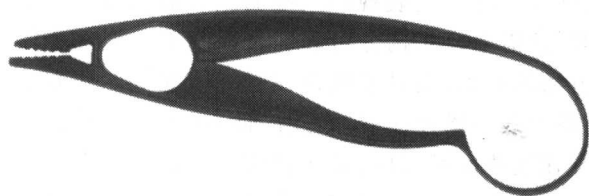


图 1.8 柔顺钳或鱼钩去除钳

图 1.9 所示的高性能自行车制动器是表现柔顺机构众多优点的又一范例。与传统悬臂梁型的制动器不同,此制动器的刹车片在其运动中不转动,最初能有这种运动的制动器是用传统的平行四杆机构来实现所要求运动的,用一根复位弹簧来保证在驾驶者松开把手时制动器不会脱离。由于两个铰链和复位弹簧被集成为一根柔性钛棒或不锈钢棒,因此,柔顺制动器的构件数目得以减少。制造商表示,此加工费用仅为其他平行运动型制动器的三分之一。由于损坏件减少,常被消费者抱

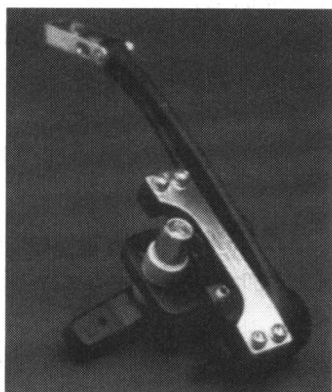


图 1.9 柔顺平行运动自行车制动器