

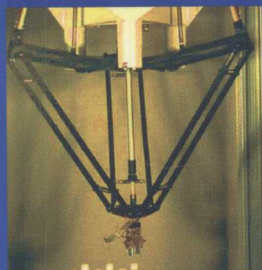


国际机械工程先进技术译丛

 Springer

并联机构构型综合

Type Synthesis of Parallel Mechanisms



]]

孔宪文 (Xianwen Kong) 著
克莱门特·戈斯林 (Clement Gosselin)
于靖军 周艳华 毕树生 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

· 014009703

TH112.1
06

国际机械工程先进技术译丛

并联机构构型综合

[加] 孔宪文 (Xianwen Kong) 著
克莱门特·戈斯林 (Clément Gosselin) 译
于靖军 周艳华 毕树生 译



机械工业出版社



北航

C1695938

TH112.1
06

307800310

并联装置应用十分广泛,如并联操作手、并联机床、运动模拟器、触觉装置、微纳操作手等。构型综合是并联装置创新设计阶段所面临的关键议题之一。因此,本书主要向读者介绍一种系统化的并联机构构型综合方法。

并联机构构型综合主要是指针对某种特定运动的需求找到所有相关的类型。本书内容不仅涵盖了并联机构的分类、实用有效的构型综合方法,而且提供了大量具有实用价值的并联机构。所提出的综合方法建立在虚拟链和旋量理论等基本概念基础之上。利用所提出的方法,多种类型的并联机构可以简单地通过一组复合单元组合而成。为便于理解并联机构构型,本书还给出了一种通用的并联机构自由度分析方法。

作为本书的预备知识,需要读者掌握有关线性代数和运动学的基本内容。

本书可作为对机器人学、机构创新设计或旋量理论感兴趣的科研人员、开发人员、工程师及研究生的参考用书。

Translation from English Language edition:

Type Synthesis of Parallel Mechanisms By Xianwen Kong, Clément Gosselin.

Copyright © 2007 Springer Berlin Heidelberg.

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved. 本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社独家出版。版权所有,侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记号:图字 01-2012-8915

图书在版编目(CIP)数据

并联机构构型综合/(加)孔宪文,(加)戈斯林(Gosselin,C.)著;于靖军,周艳华,毕树生译. —北京:机械工业出版社,2013.9

(国际机械工程先进技术译丛)

书名原文:Type Synthesis of Parallel Mechanisms

ISBN 978-7-111-43824-3

I. ①并… II. ①孔… ②戈… ③于… ④周… ⑤毕… III. ①空间并联机构-机构综合
IV. ①TH112.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 201965 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:舒雯 责任编辑:舒雯 版式设计:霍永明

责任校对:肖琳 封面设计:鞠扬 责任印制:张楠

北京玥实印刷有限公司印刷

2013 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·16 印张·307 千字

0001—2000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-43824-3

定价:58.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

策划编辑:(010) 88379733

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

译丛序言

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是 20 世纪 80 年代提出的，由机械制造技术发展而来。通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术的发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面，制造技术具有共性，又有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等；
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等；
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方面发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色化等。

二、图书交流源远流长

近年来,国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用,制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到,我国制造业与工业发达国家相比,仍存在较大差距。因此必须加强原始创新,在实践中继承和改造,学习国外的先进制造技术和经验,提高自主创新能力,形成自己的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史,可以追溯到唐朝甚至更远一些,唐玄奘去印度取经可以说是一段典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流方式,早在20世纪初期,我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》,其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》,对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体,图书是一个海洋,虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段,但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性,看书总比在计算机上看资料要方便,不同层次的要求可以参考不同层次的图书,不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书,同时它具有比较长期的参考价值 and 收藏价值。当然,技术图书的交流具有时间上的滞后性,不够及时,翻译的质量也是个关键问题,需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社希望能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者作出贡献,为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源,翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作,从而能够提升我国制造业的自主创新能力,引导和推进科研与实践水平不断进步。

三、选译严谨质高面广

1) 精品重点高质 本套丛书作为我社的精品重点书,在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量,力求为读者奉献一套高品质的丛书。

2) 专家选译把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担,充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书,组成一套“国际机械工程先进技术译丛”。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4) 内容先进丰富 在内容上应具有先进性、经典性、广泛性,应能代表相关专业的技术前沿,对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业,例如机械、材料、能源等,既包括对传统技术的改进,又包括新的设计方法、制造工艺等技术。

5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、

研究人员和工程技术人员，高等院校的教师和学生，可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版“国际机械工程先进技术译丛”的专家学者，积极推荐国外相关优秀图书，仔细评审外文原版书，推荐评审和翻译的知名专家，特别要感谢承担翻译工作的译者，对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意，同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助，欢迎广大读者不吝指教，提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

译者序

进入 21 世纪以来, 并联机构的应用越来越广泛, 无论工业界的自动化生产线与数控机床, 还是服务娱乐界的医疗机器人与运动模拟器等, 都可以找到并联机构的影子。但作为“知识密集型”机构的典型代表, 其构型设计问题仍是具有很强挑战性和创新性的议题。系统的构型综合方法对提高机械产品及机器人的创新设计与竞争力大有裨益。

本书是一本教授如何采用系统化的方法实现并联机构构型综合的专著。本书作者孔宪文博士和戈斯林教授是并联机构学领域的资深学者和知名专家, 在并联机构学方面都有长达数十年的积累, 发表了许多有关并联机构的高影响力的学术论文。书中的许多机构模型与样机都具有很大的实用价值, 是作者长期工作的经验总结。

本书分两大部分。第 1 部分为综合方法, 主要介绍了并联机构构型分析与综合过程中所涉及的数学理论及简图表达方法、单运动分支的构型综合、并联机构的分类等。第 2 部分针对不同的机构类型进行了 8 类常用少自由度并联机构的构型综合研究。最后根据构型综合的结果, 介绍了几种用于操作手、触觉装置、医疗机器人、显微操作的并联机构, 并研究了并联机构的运动特性等。

本书利用现代数学工具, 结合不同自由度类型的并联机构实例, 对并联机构进行了全面的构型综合, 内容系统深入, 对于科研工作者有极高的参考价值, 也非常适合作为研究生及教师的参考教材。同时, 该书也是作者根据自己多年的研究成果撰写的并联机构学专著, 具有很高的学术价值。突出体现在: ①将抽象的综合理论及方法形象化、简单化, 便于理解; ②图文并茂、内容翔实; ③提供了丰富的综合实例, 以便于读者迅速提高机械创新的技能和驾驭复杂机械分析与设计的能力。

本书尽管蕴含了深刻的机构学理论, 但表达上多采用描述性语言, 而且运用了大量线框形式表达的三维机构模型。另外, 全文鲜有公式, 这使得本书具有较强的可读性。

值得注意的是, 本书的俄文版也已经由俄罗斯的出版社 FIZMATLIT-Nauka Publishers 出版。

本书第 1~5 章及附录由北京航空航天大学于靖军和毕树生翻译, 第 7~15 章由海军航空工程学院周艳华翻译。

本书的出版得到了机械工业出版社的大力支持, 在此表示诚挚的谢意!

本书的翻译工作得到了国家自然科学基金会 (51175010, 51175011)、北京航空航天大学校级精品课建设经费的大力资助, 在此表示特别的感谢!

限于水平, 书中难免有疏漏之处, 敬请读者和专家批评指正。

前 言

学而不思则罔，思而不学则殆。

——孔子（公元前 551—479）

并联机构应用十分广泛，比如运动模拟器、并联操作手、微纳操作手等。人们利用直觉和天才的想法，相继发明了著名的 Gough-Stewart 平台、Delta 机器人、鹰眼等并联机构。不同于种类有限的串联运动链，对于同一种运动类型，我们总能找到大量的并联构型。这时，系统的综合方法对找到所有机构构型变得非常必要，由此可以进一步找到最优的设计。这个主题我们称为构型综合，也是本书关注的焦点。

本书是作者过去 10 余年来在并联机构构型综合方面研究工作的总结和深入^①。全书主要包含两个部分。其中第 1~5 章为第 1 部分，介绍一种系统化并联机构构型综合的虚拟链法；第 6~15 章为第 2 部分，是虚拟链法在不同运动模式并联机构中的应用。所选择的运动模式都与机器人的应用紧密相关。实例中包含有与大家熟悉的直角坐标机器人和 SCARA 机器人具有相同运动特征的并联机构。此外，还给出了 3 个附录，主要讨论一些与正文相关的重要概念及方法，例如如何应用所提方法来设计新型并联装置、并联机构自由度分析方法及基于位群理论的并联机构构型综合等。

虽然本书主要面向从事并联操作手、并联机床以及触觉装置的研究与开发人员，但同时也诚挚地希望能让更多的读者感兴趣：①从事以上研究的研究生和高年级本科生，并且对线性代数和运动学的基本知识比较熟悉；②从事纳米技术和 MEMS 研究的研究人员和研究生，因为本书可为其设计微纳操作手提供坚实的基础；③从事有关机构创新设计方面的研究人员和研究生，该书提供了丰富的机构创新设计实例；④从事旋量理论方面的研究人员，本书完全可以作为旋量理论成功应用的典范。

^① 有关更加详细的论文发表及作者开发的样机可参看 Laval 大学机器人学实验室的网站（www.robot.gmc.ulaval.ca）。

本书有关内容的研究，同时得到了很多同仁的大力支持。这里特别感谢 Pierre-Luc Richard 先生和 Mathieu Goulet 先生提供了许多 CAD 模型，Thierry Laliberte 构建了诸多塑料模型，Simon Foucault 设计了最能体现本书应用成果的 Tripteron 机器人。同时感谢 Laval 大学机器人学实验室的几名毕业生，特别是 Jonathan Levesque 先生帮助绘制了书中大多数的机构简图。Boris Mayer-St-Onge 在 Letex 编辑使用上也提供了大量的帮助。最后，我们同时感谢加拿大国家自然科学与工程研究基金会（NSERC）和加拿大研究主席团对项目的资助。

魁北克城，加拿大

孔宪文

2007. 2

克莱门特·戈斯林

1	.....	1.1
2	.....	2.1
3	.....	3.1
4	.....	4.1
5	.....	5.1
6	.....	6.1
7	.....	7.1
8	.....	8.1
9	.....	9.1
10	.....	10.1
11	.....	11.1
12	.....	12.1
13	.....	13.1
14	.....	14.1
15	.....	15.1
16	.....	16.1
17	.....	17.1
18	.....	18.1
19	.....	19.1
20	.....	20.1
21	.....	21.1
22	.....	22.1
23	.....	23.1
24	.....	24.1
25	.....	25.1
26	.....	26.1
27	.....	27.1
28	.....	28.1
29	.....	29.1
30	.....	30.1
31	.....	31.1
32	.....	32.1
33	.....	33.1
34	.....	34.1
35	.....	35.1
36	.....	36.1
37	.....	37.1
38	.....	38.1
39	.....	39.1
40	.....	40.1
41	.....	41.1
42	.....	42.1
43	.....	43.1
44	.....	44.1
45	.....	45.1
46	.....	46.1
47	.....	47.1
48	.....	48.1
49	.....	49.1
50	.....	50.1
51	.....	51.1
52	.....	52.1
53	.....	53.1
54	.....	54.1
55	.....	55.1
56	.....	56.1
57	.....	57.1
58	.....	58.1
59	.....	59.1
60	.....	60.1
61	.....	61.1
62	.....	62.1
63	.....	63.1
64	.....	64.1
65	.....	65.1
66	.....	66.1
67	.....	67.1
68	.....	68.1
69	.....	69.1
70	.....	70.1
71	.....	71.1
72	.....	72.1
73	.....	73.1
74	.....	74.1
75	.....	75.1
76	.....	76.1
77	.....	77.1
78	.....	78.1
79	.....	79.1
80	.....	80.1
81	.....	81.1
82	.....	82.1
83	.....	83.1
84	.....	84.1
85	.....	85.1
86	.....	86.1
87	.....	87.1
88	.....	88.1
89	.....	89.1
90	.....	90.1
91	.....	91.1
92	.....	92.1
93	.....	93.1
94	.....	94.1
95	.....	95.1
96	.....	96.1
97	.....	97.1
98	.....	98.1
99	.....	99.1
100	.....	100.1

目 录

译丛序言

译者序

序

前言

第1部分 综合方法

第1章 绪论	3
1.1 并联机构及其应用	3
1.2 并联机构的构型综合	6
1.3 并联机构的结构组成	6
1.4 文献综述	11
1.5 本书主旨及主要内容	15
第2章 结构分析	17
2.1 旋量理论	17
2.2 运动链的瞬时活动度分析	32
2.3 并联机构中驱动副的选取条件	38
2.4 小结	40
第3章 单环运动链的构型综合	41
3.1 引言	41
3.2 构型综合的一般过程	41
3.3 满足 $c-\zeta$ 系的单环运动链类型	46
3.4 小结	51
第4章 并联机构的分类	52
4.1 并联机构的运动模式	52
4.2 虚拟链的概念	52
4.3 运动模式的初步分类及其相对应的并联机构	55
4.4 小结	57
第5章 并联机构构型综合的虚拟链法	58
5.1 引言	58
5.2 成为 V 型并联运动链的条件	58
5.3 V 型并联机构的系统化构型综合步骤	60
5.4 步骤 1: 对并联运动链的约束旋量系进行分解	60

5.5	步骤 2: 分支的构型综合	69
5.6	步骤 3: 分支的组装	72
5.7	步骤 4: 驱动副的选取	73
5.8	小结	76
第 2 部分 综合实例		
第 6 章	三维平动并联机构	79
6.1	引言	79
6.2	PPP 型并联运动链的约束旋量系	79
6.3	PPP 型并联运动链应满足的条件	80
6.4	三维平动并联机构构型综合的一般过程	80
6.5	步骤 1: 对 PPP 型并联运动链的约束旋量系进行分解	81
6.6	步骤 2: 分支的构型综合	81
6.7	步骤 3: 分支的组装	87
6.8	步骤 4: 驱动副的选取	88
6.9	小结	96
第 7 章	三维球面转动并联机构	98
7.1	引言	98
7.2	S 型并联运动链的约束旋量系	98
7.3	S 型并联运动链应满足的条件	99
7.4	三维球面转动并联机构构型综合的一般过程	99
7.5	步骤 1: 对 S 型并联运动链的约束旋量系进行分解	99
7.6	步骤 2: 分支的构型综合	100
7.7	步骤 3: 分支的组装	104
7.8	步骤 4: 驱动副的选取	108
7.9	小结	111
第 8 章	三自由度 PPR 型并联机构	114
8.1	引言	114
8.2	PPR 型并联运动链的约束旋量系	114
8.3	PPR 型并联运动链应满足的条件	115
8.4	三维圆柱运动并联机构构型综合的一般过程	115
8.5	步骤 1: 对 PPR 型并联运动链的约束旋量系进行分解	116
8.6	步骤 2: 分支的构型综合	117
8.7	步骤 3: 分支的组装	122
8.8	步骤 4: 驱动副的选取	123
8.9	小结	127
第 9 章	四自由度 PPPR 型并联机构	129
9.1	引言	129

9.2	PPPR 型并联运动链的约束旋量系	130
9.3	PPPR 型并联运动链应满足的条件	130
9.4	PPPR 型并联机构构型综合的一般过程	131
9.5	步骤 1: 对 PPPR 型并联运动链的约束旋量系进行分解	131
9.6	步骤 2: 分支的构型综合	132
9.7	步骤 3: 分支的组装	137
9.8	步骤 4: 驱动副的选取	139
9.9	小结	145
第 10 章	四自由度 SP 型并联机构	146
10.1	引言	146
10.2	SP 型并联运动链的约束旋量系	146
10.3	SP 型并联运动链应满足的条件	147
10.4	SP 型并联机构构型综合的一般过程	147
10.5	步骤 1: 对 SP 型并联运动链的约束旋量系进行分解	148
10.6	步骤 2: 分支的构型综合	149
10.7	步骤 3: 分支的组装	152
10.8	步骤 4: 驱动副的选取	154
10.9	小结	158
第 11 章	五自由度 US 型并联机构	159
11.1	引言	159
11.2	US 型并联运动链的约束旋量系	159
11.3	US 型并联运动链应满足的条件	160
11.4	US 型并联机构构型综合的一般过程	160
11.5	步骤 1: 对 US 型并联运动链的约束旋量系进行分解	161
11.6	步骤 2: 分支的构型综合	161
11.7	步骤 3: 分支的组装	164
11.8	步骤 4: 驱动副的选取	165
11.9	小结	168
第 12 章	五自由度 PPPU 型并联机构	169
12.1	引言	169
12.2	PPPU 型并联运动链的约束旋量系	169
12.3	PPPU 型并联运动链应满足的条件	170
12.4	PPPU 型并联机构构型综合的一般过程	170
12.5	步骤 1: 对 PPPU 型并联运动链的约束旋量系进行分解	171
12.6	步骤 2: 分支的构型综合	171
12.7	步骤 3: 分支的组装	176
12.8	步骤 4: 驱动副的选取	178
12.9	小结	181

第 13 章 五自由度 PPS 型并联机构	182
13.1 引言	182
13.2 PPS 型并联运动链的约束旋量系	182
13.3 PPS 型并联运动链应满足的条件	182
13.4 PPS 型并联机构构型综合的一般过程	183
13.5 步骤 1: 对 PPS 型并联运动链的约束旋量系进行分解	184
13.6 步骤 2: 分支的构型综合	184
13.7 步骤 3: 分支的组装	188
13.8 步骤 4: 驱动副的选取	190
13.9 小结	193
第 14 章 含并联虚拟链的并联机构	194
14.1 引言	194
14.2 并联机构构型综合的一般过程	194
14.3 3-PPS 型并联机构的构型综合	195
14.4 2-PPPU 型并联机构的构型综合	198
14.5 US-PPS 型并联机构的构型综合	201
14.6 小结	203
第 15 章 结论	204
15.1 主要贡献	204
15.2 未来展望	205
附录	207
附录 A 并联装置的设计	207
A.1 共性问题	207
A.2 特性问题	208
A.3 小结	213
附录 B 并联机构活动度分析	214
B.1 全周活动度校验原理	214
B.2 活动度分析的一般过程	215
B.3 实例分析	218
B.4 小结	223
附录 C 基于位移群理论的构型综合方法	224
C.1 位移群及其生成元	224
C.2 位移子群的运算	225
C.3 运动连接	228
C.4 并联运动链构型综合的一般过程	228
参考文献	230

第 1 部分

综合方法

工欲善其事，必先利其器。

——孔子（公元前 551—479）

第 1 章 绪 论

在过去的 20 年间, 并联机构的应用越来越广泛。例如用作运动模拟器、工业机器人、微纳操作手等。人们利用直觉和天才的想法, 相继发明了著名的 Gough-Stewart 平台、Delta 机器人、鹰眼等并联机构。不同于种类有限的串联运动链, 对于同一种运动类型, 我们总能找到大量的并联构型。这时, 系统的综合方法对找到所有机构构型变得非常必要, 由此可以进一步找到最好的设计。这个主题我们称为构型综合, 也是本书关注的焦点。本章主要介绍并联机构构型综合的研究背景及最新的研究进展, 最后给出了全书的内容提纲。

1.1 并联机构及其应用

1.1.1 并联机构

虽然并联机构有数种定义 (参见参考文献 [99]), 但是从构型综合的角度来看, 将运动链包含在定义中非常重要。

为此, 本书将采用如下定义: 并联机构是一类在动平台 (moving platform) 与基座 (base) 之间包含至少两个串联运动链的多自由度机构 (图 1.1)。这里的串联运动链通常又称为“腿或分支 (leg, limb)”。本书不考虑那些在分支中包含闭环运动链的并联机构。此外, 应该指出: 并联机构中, 驱动器通常安装在基座上或在其附近。

1.1.2 特征及应用

与串联机构相比, 并联机构经过合理设计, 通常具有刚度大、精度高等优点。虽然并联机构的工作空间相对较小, 但并联机构的应用范围却越来越广泛^[5, 6, 7, 11, 97, 108, 116]。如果想了解最新的并联机构的应用, 请参看参考文献 [8, 99]。六腿并联机构的最早应用可以追溯到 20 世纪 50 年代, Gough 设计了一款用于检测轮胎的并联装置 (图 1.2a^[106])。20 世纪 70 年代, 基于并联机构的飞行模拟器开始投入使用。20 世纪 80 年代, 有关并联操作手的研究引发了众多研究者的兴趣。时至今日, 这方面的研究仍方兴未艾。并联操作手应用甚广, 如装配、检测等。一些并联操作手, 如 Gough-Stewart 平台、Delta 机器人等已成为当今商家的宠儿。不仅如此, 过去的 10 年间, 并联机构也逐渐用于并联运动