

国家出版基金资助项目
湖北省学术著作出版专项资金资助项目
数字制造科学与技术前沿研究丛书

空间多环耦合机构 数字化构型综合

Digital Type Synthesis of
Spatial Multi-loop Coupling Mechanisms

曹文熬 丁华锋 著



武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

国家出版基金资助项目



湖北省学术著作
出版专项资金

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

数字制造科学与技术前沿研究丛书

空间多环耦合机构 数字化构型综合

曹文熬 丁华锋 著

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

内 容 提 要

本书建立了空间并联机构的全周自由度数字化自动分析原理,研究了分支的数字化构型综合并建立了分支数据库,研究了九种少自由度空间并联机构的数字化构型综合,提出了并联机械装备新机型,研究了两层两环空间机构的自由度分析原理及数字化实现、两层两环空间机构的构型综合原理及数字化实现,以期建立空间多环耦合机构的数字化构型综合理论,建立空间多环耦合机构的构型数据库,发明具有应用前景的新机型。

图书在版编目(CIP)数据

空间多环耦合机构数字化构型综合/曹文熬,丁华锋著. —武汉:武汉理工大学出版社, 2019. 9

ISBN 978-7-5629-6100-0

I. ①空… II. ①曹… ②丁… III. ①空间并联机构-数据库-研究 IV. ①TH112.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 163510 号

项目负责人:田 高 王兆国

责任编辑:李兰英

责任校对:张明华

封面设计:兴和设计

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市洪山区珞狮路 122 号 邮编:430070)

<http://www.wutp.com.cn>

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:武汉中远印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:10

字 数:179 千字

版 次:2019 年 9 月第 1 版

印 次:2019 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1500 册

定 价:78.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有,盗版必究 ·

数字制造科学与技术前沿研究丛书 编审委员会

顾 问: 闻邦椿 徐滨士 熊有伦 赵淳生

高金吉 郭东明 雷源忠

主任委员: 周祖德 丁 汉

副主任委员: 黎 明 严新平 孔祥东 陈 新

王国彪 董仕节

执行副主任委员: 田 高

委 员(按姓氏笔画排列):

David He	Y. Norman Zhou	丁华锋	马 辉	王德石
毛宽民	冯 定	华 林	关治洪	刘 泉
刘 强	李仁发	李学军	肖汉斌	陈德军
张 霖	范大鹏	胡业发	郝建平	陶 飞
郭顺生	蒋国璋	韩清凯	谭跃刚	蔡敢为

秘 书: 王汉熙

总责任编辑: 王兆国

总 序

当前,中国制造 2025 和德国工业 4.0 以信息技术与制造技术深度融合为核心,以数字化、网络化、智能化为主线,将互联网+与先进制造业结合,正在兴起全球新一轮数字化制造的浪潮。发达国家特别是美、德、英、日等先进制造技术领先的国家,面对近年来制造业竞争力的下降,最近大力倡导“再工业化、再制造化”战略,明确提出智能机器人、人工智能、3D 打印、数字孪生是实现数字化制造的关键技术,并希望通过这几大数字化制造技术的突破,打造数字化设计与制造的高地,巩固和提升制造业的主导权。近年来,随着我国制造业信息化的推广和深入,数字车间、数字企业和数字化服务等数字技术已成为企业技术进步的重要标志,同时也是提高企业核心竞争力的重要手段。由此可见,在知识经济时代的今天,随着第三次工业革命的深入开展,数字化制造作为新的制造技术和制造模式,同时作为第三次工业革命的一个重要标志性内容,已成为推动 21 世纪制造业向前发展的强大动力,数字化制造的相关技术已逐步融入到制造产品的全生命周期,成为制造业产品全生命周期中不可缺少的驱动因素。

数字制造科学与技术是以数字制造系统的基本理论和关键技术为主要研究内容,以信息科学和系统工程科学的方法论为主要研究方法,以制造系统的优化运行为主要研究目标的一门科学。它是一门新兴的交叉学科,是在数字科学与技术、网络信息技术及其他(如自动化技术、新材料科学、管理科学和系统科学等)与制造科学与技术不断融合、发展和广泛交叉应用的基础上诞生的,也是制造企业、制造系统和制造过程不断实现数字化的必然结果。其研究内容涉及产品需求、产品设计与仿真、产品生产过程优化、产品生产装备的运行控制、产品质量管理、产品销售与维护、产品全生命周期的信息化与服务化等各个环节的数字化分析、设计与规划、运行与管理,以及整个产品全生命周期所依托的运行环境数字化实现。数字化制造的研究已经从一种技术性研究演变成为包含基础理论和系统技术的系统科学研究。

作为一门新兴学科,其科学问题与关键技术包括:制造产品的数字化描述与创新设计,加工对象的物体形位空间和旋量空间的数字表示,几何计算和几何推理、加工过程多物理场的交互作用规律及其数字表示,几何约束、物理约束和产品性能约束的相容性及混合约束问题求解,制造系统中的模糊信息、不确定信息、不完整信息以及经验与技能的形式化和数字化表示,异构制造环境下的信息融合、信息集成和信息共享,制造装备与过程的数字化智能控制、制造能力与制造全生命周期的服务优化等。本系列丛书试图从数字制造的基本理论和关键技术、数字制造计算几何学、数字制造信息学、数字制造机械动力学、数字制造可靠性基础、数字制造智能控制理论、数字制造误差理论与数据处理、数字制造资源智能管控等多个视角构成数字制造科学的完整学科体系。在此基础上,根据数字化制造技术的特点,从不同的角度介绍数字化制造的广泛应用和学术成果,包括产品数字化协同设计、机械系统数字化建模与分析、机械装置数字监测与诊断、动力学建模与应用、基于数字样机的维修技术与方法、磁悬浮转子机电耦合动力学、汽车信息物理融合系统、动力学与振动的数值模拟、压电换能器设计原理、复杂多环耦合机构构型综合及应用、大数据时代的产品智能配置理论与方法等。

围绕上述内容,以丁汉院士为代表的一批我国制造领域的教授、专家为此系列丛书的初步形成,提供了他们宝贵的经验和知识,付出了他们辛勤的劳动成果,在此谨表示衷心的感谢!

《数字制造科学与技术前沿研究丛书》的出版得到了湖北省学术著作出版专项资金项目的资助。对于该丛书,经与闻邦椿、徐滨士、熊有伦、赵淳生、高金吉、郭东明和雷源忠等我国制造领域资深专家及编委会讨论,拟将其分为基础篇、技术篇和应用篇3个部分。上述专家和编委会成员对该系列丛书提出了许多宝贵意见,在此一并表示由衷的感谢!

数字制造科学与技术是一个内涵十分丰富、内容非常广泛的领域,而且还在不断地深化和发展之中,因此本丛书对数字制造科学的阐述只是一个初步的探索。可以预见,随着数字制造理论和方法的不断充实和发展,尤其是随着数字制造科学与技术制造企业的广泛推广和应用,本系列丛书的内容将会得到不断的充实和完善。

《数字制造科学与技术前沿研究丛书》编审委员会

前 言

构型创新是机械装备的原始创新,构型综合是构型创新的有效手段。随着计算机技术的发展,将先进的计算机技术与机构学理论融合,建立数字化的机构学理论,进而实现机构概念创新设计的自动化、可视化、网络化和智能化是机构学研究的新趋势。构型综合的数字化是机构概念创新设计自动化的前提。平面机构的数字化构型综合已经取得了重要进展,而空间机构的数字化构型综合还处于初始阶段。

本书拟提出空间多环耦合机构的数字化构型综合理论,建立空间多环耦合机构的构型数据库。本书的工作为空间机构数字化性能分析、概念创新设计的自动化奠定了基础。本书主要包含如下内容:

(1) 建立了空间并联机构的全周自由度数字化自动分析原理。首先提出了空间并联机构构型的新描述方法,之后建立分支运动螺旋系和约束螺旋系的自动求解原理,进一步提出了自动求解过约束及自动判别瞬时性方法,最后开发了人机交互的软件平台。

(2) 研究了分支的数字化构型综合并建立了分支数据库。基于螺旋理论,分别证明了五自由度、四自由度和三自由度分支提供约束力或约束力偶的几何限定条件。对这三种自由度分支进行数字化综合,分别建立了三种自由度分支的构型数据库。

(3) 研究了九种少自由度空间并联机构的数字化构型综合。首先,建立了空间并联机构的数字化构型综合原理。其次,推导了各种自由度空间并联机构的可行约束模式。进一步研究了在给定可行约束模式下的构型综合。最终建立九种少自由度并联机构的构型数据库并开发了相应的人机交互的软件显示界面。

(4) 提出并联机械装备新机型。基于建立的并联机构构型数据库,分别提出了三自由度、四自由度和五自由度并联机械装备新机型,进一步分析了新机型特点。

(5) 研究了两层两环空间机构的自由度分析原理、构型综合原理及数字化实

现。首先建立了两层两环空间机构运动螺旋方程的一般形式,提出了这类机构中的刚性子结构判别方法,并研究了这类机构的自由度数字化分析方法;其次基于自由度分析的原理,提出了这类机构的构型综合方法,对十四种少自由度两层两环空间机构分别进行了构型综合,并研究了这类机构的数字化构型综合。

作者

2018年12月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 机构构型数字化综合概述	(1)
1.2 空间多环耦合机构的自由度研究现状	(2)
1.2.1 空间并联机构的自由度研究现状	(2)
1.2.2 空间耦合链机构的自由度研究现状	(4)
1.2.3 空间多环耦合机构自由度数字化分析要解决的问题	(5)
1.3 空间并联机构的构型综合发展现状	(6)
1.3.1 空间并联机构构型综合研究现状	(6)
1.3.2 空间耦合链机构构型综合研究现状	(11)
1.3.3 空间多环耦合机构数字化构型综合要解决的问题	(11)
2 空间并联机构的自由度数字化分析	(13)
2.1 螺旋理论的基本概念	(13)
2.1.1 螺旋的互异性	(14)
2.1.2 螺旋的相关性	(14)
2.2 构型描述	(15)
2.2.1 分支的描述	(16)
2.2.2 平台的描述	(19)
2.2.3 机构的描述	(19)
2.3 分支运动螺旋系和分支约束螺旋系的自动求解	(21)
2.3.1 建立参考坐标系	(21)
2.3.2 分支运动螺旋系的自动求解	(21)
2.3.3 分支约束螺旋系的自动求解	(23)
2.4 过约束数目的自动求解	(23)
2.5 自由度自动分析	(24)
2.5.1 自由度解算	(24)
2.5.2 自由度瞬时性自动判别	(24)

2.6	例子	(26)
2.6.1	例 2-1	(26)
2.6.2	例 2-2	(32)
3	分支的数字化构型综合及分支数据库建立	(37)
3.1	五自由度分支构型综合及数据库建立	(37)
3.1.1	只提供约束力或约束力偶的几何条件	(37)
3.1.2	只含转动副的五自由度分支综合	(41)
3.1.3	含移动副的五自由度分支综合	(42)
3.1.4	五自由度分支数据库	(43)
3.2	四自由度分支综合及数据库建立	(44)
3.2.1	只提供约束力或约束力偶的几何条件	(44)
3.2.2	只含转动副的四自由度分支综合	(48)
3.2.3	含移动副的四自由度分支综合	(49)
3.2.4	四自由度分支数据库	(49)
3.3	三自由度分支综合及数据库建立	(49)
3.3.1	只提供约束力或约束力偶的几何条件	(49)
3.3.2	三自由度分支数据库	(50)
4	空间并联机构数字化构型综合	(51)
4.1	空间并联机构的数字化构型综合原理	(51)
4.2	线矢和偶量在特殊几何条件下的线性组合	(53)
4.3	两转一移并联机构的数字化构型综合	(53)
4.3.1	一般几何关系下的可行约束模式	(54)
4.3.2	特殊几何关系下的可行约束模式	(57)
4.3.3	可行约束模式下的构型综合	(60)
4.4	两移一转并联机构的数字化构型综合	(62)
4.4.1	一般几何关系下的可行约束模式	(63)
4.4.2	特殊几何关系下的可行约束模式	(64)
4.4.3	可行约束模式下的构型综合	(65)
4.5	三移并联机构的数字化构型综合	(67)
4.6	三转并联机构的数字化构型综合	(70)
4.7	两转两移并联机构的数字化构型综合	(73)

4.8	三转一移并联机构的数字化构型综合	(76)
4.9	三移一转并联机构的数字化构型综合	(79)
4.10	三转两移并联机构的数字化构型综合	(81)
4.11	三移两转并联机构的数字化构型综合	(83)
5	并联机械装备新机型	(86)
5.1	串并联机床新机型	(86)
5.1.1	两个机构中的约束对比	(87)
5.1.2	位置反解对比	(90)
5.2	手术机器人新机型	(92)
5.2.1	现存的机型	(92)
5.2.2	新机型	(93)
5.3	CT扫描仪新机型	(96)
5.3.1	现存的机型	(96)
5.3.2	新机型	(98)
6	一类重要空间耦合链机构的自由度分析	(101)
6.1	运动螺旋方程的基本概念	(101)
6.2	两层两环空间机构的运动螺旋方程	(103)
6.2.1	运动螺旋方程的建立原理	(103)
6.2.2	中间平台的运动螺旋系及它们的相关性	(104)
6.2.3	运动螺旋方程	(105)
6.3	刚性子结构判别	(106)
6.4	自由度分析	(109)
6.4.1	自由度解算	(109)
6.4.2	自由度性质分析	(114)
6.5	两层两环空间机构自由度分析的数字化实现	(115)
6.5.1	机构的构型描述	(115)
6.5.2	自由度分析的数字化实现	(116)
7	一类重要空间耦合链机构的构型综合	(118)
7.1	两层两环空间机构构型综合原理	(118)
7.2	一自由度两层两环空间机构的构型综合	(119)
7.2.1	一移机构的构型综合	(119)

7.2.2	一转机构的构型综合	(121)
7.3	二自由度两层两环空间机构的构型综合	(123)
7.3.1	两转机构的构型综合	(123)
7.3.2	两移机构的构型综合	(124)
7.3.3	一转一移机构的构型综合	(125)
7.4	三自由度两层两环空间机构的构型综合	(127)
7.4.1	三转机构的构型综合	(127)
7.4.2	三移机构的构型综合	(128)
7.4.3	两移一转机构的构型综合	(129)
7.4.4	两转一移机构的构型综合	(131)
7.5	四自由度两层两环空间机构的构型综合	(132)
7.5.1	三移一转机构的构型综合	(132)
7.5.2	三转一移机构的构型综合	(132)
7.5.3	两转两移机构的构型综合	(133)
7.6	五自由度两层两环空间机构的构型综合	(134)
7.6.1	三转两移机构的构型综合	(134)
7.6.2	三移两转机构的构型综合	(135)
7.7	两层两环空间机构构型综合的数字化实现	(136)
参考文献	(137)

1

绪论

1.1 机构构型数字化综合概述

机构是由两个或两个以上的构件通过活动连接以实现确定运动的构件组合。机构是机械装备的“骨架”，是用来传递运动或力的装置。构型综合也被称为结构综合或拓扑结构综合，主要研究机构的运动副数、构件数以及构件与运动副之间的连接关系^[1]。

18 世纪的第一次工业革命以后，蒸汽机和纺织机的工业应用促进了机器的飞跃发展，促使人们不断地发明新机构以满足生产和生活的需要^[2]。早期的机构发明主要依赖人的经验和直觉，直到 20 世纪 60 年代之后，一些系统的构型综合方法才不断被提出^[3]。

后来先进的计算机技术与机构构型综合理论融合在了一起，形成了数字化机构构型综合理论，进而实现构型综合的计算机化、自动化、可视化，引起了许多学者的兴趣。

数字化的构型综合可以追溯到 1963 年，Dobranskyj 和 Freudenstein^[4]以图论为基础开始研究平面机构的自动构型综合。Woo^[5]用计算程序系统地综合了 10 杆 1 自由度的平面机构。Thompson 等^[6]开发了平面机构构型的计算机辅助设计专家系统。Olson 等^[7]，Belfiore 和 Pennestri^[8]研究了自动绘制无交叉线平面运动链的计算机程序。Mruthyunjaya 等^[9]也开展了平面机构的数字化构型综合研究。王玉新等^[10]提出了一种机械系统创新设计的计算机化符号生成方法。Hwang 等^[11]研究了平面单铰机构的数字化构型综合。颜鸿森等^[12]研究了多种平面机构，包括连杆、齿轮和凸轮等的计算机化创新设计。Saura 等^[13]提出

了一种含低副和高副平面多体系的计算机化构型综合方法。丁华锋等^[14-17]系统地研究了平面机构的数字化构型综合理论并建立了多种平面机构的构型图谱库。

利用数字化的构型综合理论,不但容易完成数目庞大的构型综合,而且便于分类与存储综合结果,进而便于高效快捷地进行构型创新设计。到目前为止,平面机构的数字化构型综合已经取得了很大进展,但空间机构的数字化构型综合还处在起步阶段。

1.2 空间多环耦合机构的自由度研究现状

根据结构形式的不同,空间机构可以分为三类:串联机构、并联机构和空间耦合链机构,分别如图 1-1(a)、(b)和(c)所示。其中可以将含三个或三个以上分支的空间并联机构以及空间耦合链机构称为空间多环耦合机构。

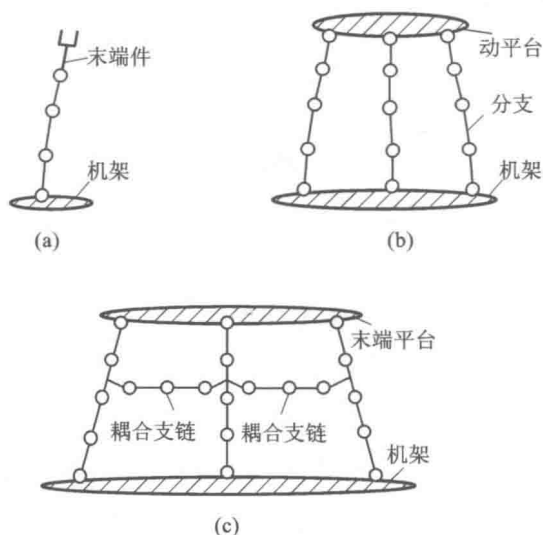


图 1-1 空间机构的三种形式

(a)串联机构;(b)并联机构;(c)空间耦合链机构

1.2.1 空间并联机构的自由度研究现状

自由度分析是机构构型综合要研究的第一个问题。俄国学者 Chebychev^[18]

提出了自由度为 1 的平面机构的活动构件数与运动副数应该满足的公式:

$$3m - 2p = 1 \quad (1-1)$$

式中 m —— 活动构件数;

p —— 运动副数。

之后 Sylvester^[19]、Somove^[20]等相继对自由度开展了研究。在 1883 年,德国学者 Grübler 提出了自由度不为 1 的平面机构的自由度公式:

$$M = 3n - 2j - 3 \quad (1-2)$$

式中 n —— 构件数;

j —— 运动副数。

在 1929 年,德国学者 Kutzbach^[21]建立了更有一般性的自由度计算公式:

$$M = b(n - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i \quad (1-3)$$

式中 b —— 结构参数 (平面机构 $b=3$, 空间机构 $b=6$);

n —— 构件数;

j —— 运动副数;

f_i —— 第 i 个运动副的自由度数。

对于式 (1-3), 在 $b=3$ 时, 它与式 (1-2) 相同。通常, 人们称式 (1-3) 为 Grübler-Kutzbach (G-K) 公式。在很长的时间, 人们应用这个公式来分析平面机构和空间机构的自由度。

然而, 随着机构学的发展, 出现了许多空间过约束机构不能用 G-K 公式正确分析其自由度的问题, 严重制约了机构学的发展。进而, 许多学者试图提出具有一般性的改进 G-K 公式。

在 20 世纪 60 年代, Voinea 和 Atanasiu^[22]、Waldron^[23]开始以螺旋理论为基础求解机构的自由度。1978 年, Hunt^[24]基于螺旋理论提出了一个自由度计算公式。1991 年, 黄真教授^[25]用约束螺旋来分析球面四杆机构的自由度, 他在 1997 年将约束螺旋应用于多环路的空间并联机构^[26], 之后他对这一问题继续深入研究, 提出了修正的 G-K 公式^[27, 28]。

$$\begin{cases} M = 6(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + \mu \\ M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + \nu \end{cases} \quad (1-4)$$

式中 d ——机构的阶, $d=6-\lambda$ (λ 为公共约束数);

n ——构件数;

g ——运动副数;

f_i ——第 i 个运动副的自由度数;

μ ——过约束数;

ν ——虚约束数。

Kong 和 Gosselin^[29] 提出了以约束螺旋为基础的“虚链”概念来分析并联机构的自由度。其他的一些学者^[30, 31] 也研究了约束螺旋分析空间机构的自由度。

Herve^[32]、Fanghella 和 Galletti^[33]、Rico 等^[34] 提出了基于位移群论的自由度分析方法。杨廷力教授等^[35] 提出了方位特征集的概念来分析自由度。Gogu^[36, 37] 提出了一个基于线性变换的自由度分析方法。

Gogu^[38] 在 2005 年对各种主要改进的 G-K 公式的优缺点做了详细的对比, 并指出了许多古典机构和现代并联机构很难用改进 G-K 公式分析它们自由度的问题, 被学界称为“Gogu 问题”。后来, 黄真教授和他的学生对“Gogu 问题”进行了深入的研究^[39-41], 论证了他提出的公式能正确分析现代并联机构和古典机构的自由度。

从 20 世纪末开始, 人们对空间机构的自由度分析已不再仅仅只针对计算机机构的自由度, 还包含末端杆自由度的计算和末端杆自由度性质分析^[40]。

然而, 空间并联机构的自由度分析面临新的问题。现有的文献主要呈现的是基于手工去完成自由度分析过程。在面对成千上万的机构需要分析自由度时(数字化构型综合中会产生这一问题), 这种手工的方法很难完成任务。另外, 人们在用改进 G-K 公式分析自由度时, 不但要求使用者掌握某些专业的数学理论, 如螺旋理论和群论等, 而且还需要使用者深刻理解数学理论和物理结构间的对应关系, 才能正确分析空间机构的自由度。所以即便有了这些改进的 G-K 公式, 对于许多设计人员来说, 要正确地分析空间过约束机构的自由度并不容易, 特别是分析那些包含复杂几何关系的机构时更是如此。

1.2.2 空间耦合链机构的自由度研究现状

一些空间耦合链机构已经被应用到人们的生活中, 如图 1-2(a) 所示的变色球、图 1-2(b) 所示的魔术花球、图 1-2(c) 所示的魔方块等。

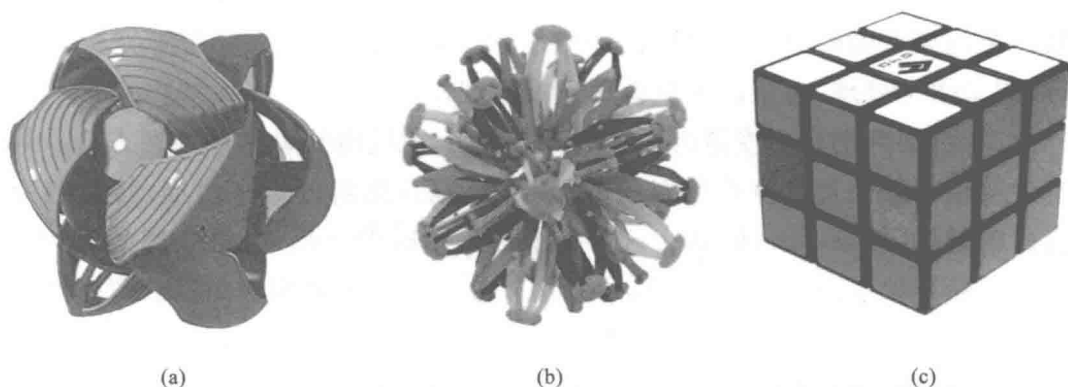


图 1-2 一些典型的空间耦合链机构

(a) 变色球; (b) 魔术花球; (c) 魔方

空间耦合链机构比空间并联机构包含了更加复杂的耦合关系,涉及这类机构自由度分析的文献很少。黄真教授等^[40]用约束螺旋法分析了变色球机构和魔方机构的自由度。Wei等^[42]用环路螺旋方程分析了变色球机构的自由度。戴建生等^[43]基于结构分解和等效螺旋系分析了魔术花球机构的自由度。Zoppi等^[44]采用添加附加约束的方式分析了两个空间耦合链机构的自由度。

现有的文献呈现了少数特殊空间耦合链机构的自由度分析,相关的方法是在约束螺旋法的基础上增加一些等效处理。实际上,耦合支链与空间并联机构的分支不同,它提供的约束和运动是直接作用于其他支链而不是末端平台,导致分析并联机构自由度的经典方法,如约束螺旋法和位移群论法不能直接应用于这类机构的自由度分析。到目前为止,耦合支链带来的耦合关系的数学模型尚未被建立,分析空间耦合链机构自由度的方法尚不完善。

1.2.3 空间多环耦合机构自由度数字化分析要解决的问题

从现有的分析空间并联机构自由度的方法来看,基于约束螺旋的方法主要涉及线性运算^[40],能用计算机程序来实现自由度分析过程的可行性较大。但是,现有的约束螺旋法很难直接用计算机程序实现,有三个问题需要解决:

首先,自动求解分支运动螺旋系。现有的方法是基于人的观察来确定每个螺旋的轴线相对于参考坐标系的方向矢量和位置矢量,这个过程难以用计算机程序来实现。