

机器人机构拓扑 结构设计

Theory and Application of Robot Mechanism Topology

杨廷力 刘安心 罗玉峰 著
沈惠平 杭鲁滨 金 琼



科学出版社

机器人机构拓扑结构设计

**Theory and Application of
Robot Mechanism Topology**

杨廷力 刘安心 罗玉峰 著
沈惠平 杭鲁滨 金 琼

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书介绍作者原创的基于方位特征的机器人机构和一般机构拓扑结构设计(发明新机构)的系统理论与方法,是20多年来国家自然科学基金连续资助项目的研究成果的系统总结。书中,第1~9章为基本理论,包括引入的三个新概念(尺度约束类型、方位特征集与单开链单元),导出的三个基本方程(串联机构方位特征方程、并联机构方位特征方程与机构自由度公式),基于有序单开链的机构组成原理及其拓扑结构特征,以及串联与并联机构拓扑结构设计的一般方法;第10~19章为十类并联机构的拓扑结构设计,包括每类并联机构拓扑结构设计的主要步骤,一种典型并联机构拓扑结构设计的详细过程及其性能分析,设计得到多种并联机构结构类型的性能分析及其分类,为优选结构类型提供依据;第20章为全书总结,并简述基于方位特征的方法与另外两种方法(基于螺旋理论的方法和基于位移子群的方法)的基本思想的内在联系与差异,以及主要特点和发展趋势。

本书可供从事机器人机构与一般机构创新设计的高等院校教师和从事机械工程设计的技术人员参考,也可作为高等院校机械工程专业研究生与高年级本科生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

机器人机构拓扑结构设计=Theory and Application of Robot Mechanism Topology/杨廷力等著. —北京:科学出版社,2012
ISBN 978-7-03-034183-9

I. ①机… II. ①杨… III. ①机器人-拓扑-结构设计 IV. ①TP242

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第081834号

责任编辑:裴育 杨然/责任校对:钟洋

责任印制:张倩/封面设计:科地亚盟

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>

源海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

*

2012年5月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012年5月第一次印刷 印张:25 1/4

印数:1—2 500 字数:475 000

定价:80.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

谨以此书献给我的父母与亲人们！

——杨廷力

前 言

现代机械系统（即信息化机械系统，机器人为其典型代表之一）的发展推动着现代机构学的发展。在机器人的各子系统（机构、驱动、控制、传感和信息处理等）中，机构是实现机器人基本功能的执行器与骨架，是机器人实现各种运动和完成各项指定任务的主体。因此，机器人机构创新设计属于机器人技术创新与发展的核心技术。更一般地，“机构是机械产品发明创造的源泉，是实现机器给定功能的主体”（国家自然科学基金委员会工程与材料科学部《机械工程学科发展战略报告（2011~2020）》）。

机构创新设计包括三个层次：机构拓扑结构创新设计（即发明新机构）、运动学创新设计和动力学创新设计。其中机构拓扑结构设计对机构原始创新具有决定性作用，属于知识产权的范畴。机构拓扑结构是指机构中构件、运动副等元素的连接方式，它不考虑运动副、构件等元素的距离和大小，但要保持运动副轴线之间的尺度约束类型不变（详见第3章）以及机构的拓扑结构特征不变（详见第7章）。150多年来，机构学未能建立机构拓扑结构设计的系统理论与方法，目前构建机构拓扑结构学已成为国际机构学界关注的热点与难点，也是机构学家的历史性任务。基于以上背景，本书详述作者原创的机器人机构拓扑结构学，为设计人员提供具有清晰物理意义与严格数学架构的系统理论，又提供易于理解与操作的机构拓扑结构设计的实用方法。

机构组成原理是构建机构拓扑结构学、运动学与动力学整体理论体系的基础。在机构学发展过程中，先后提出了三种机构组成原理及其相应的机构拓扑结构学、运动学与动力学的理论体系：19世纪下半叶，德国学者提出的基于杆、副单元的机构组成原理及其相应的机构学理论体系；20世纪上半叶，苏联（俄国）学者提出的基于 Assur 组单元的机构组成原理及其相应的机构学理论体系；20世纪下半叶，美国学者提出的基于回路单元（树和连支）的机构组成原理及其相应的机构学理论体系。基于以上背景，本书详述作者原创的基于有序单开链单元的机构组成原理及其拓扑结构特征，为优选机构结构类型提供理论依据，又为机构拓扑结构学、运动学与动力学提供了新的统一建模方法，从而为构建基于单开链单元的机构学新理论体系奠定了理论基础。

近十多年，国际上逐渐形成机器人机构拓扑结构设计的三种完全不同的理论与方法：基于位移子群的方法、基于螺旋理论的方法以及本书作者原创的基于方位特征的方法，都是对机械系统的不同理解方式。本书第20章简述了三种理论

与方法的基本思想、主要特点及其内在联系与不同点,以及方法论方面的思考与认识。

本书的基本思想与内容安排如下。

1) 引入三个新概念

(1) 尺度约束类型:用于描述构件对运动副轴线之间相对方位的约束类型(第2章)。

(2) 方位特征(POC)集:用于描述任意两构件之间相对运动的方位特征(第3章)。

(3) 单开链单元:作为机构拓扑组成的结构单元(第2章)。

2) 基于三个新概念构建拓扑结构学基本方程

(1) 串联机构方位特征方程(串联机构末端构件的POC集、拓扑结构与自由度三者之间的函数关系)以及POC集的并运算规则(第4章)。

(2) 并联机构方位特征方程(并联机构动平台的POC集、拓扑结构与自由度三者之间的函数关系)以及POC集的交运算规则(第5章)。

(3) 机构自由度公式(机构自由度、拓扑结构与构件POC集三者之间的函数关系)(第6章)。

3) 基于单开链单元的机构组成原理(第7章)

(1) 基于单开链单元的机构拓扑结构分解与合成方法。

(2) 单开链的约束度与机构耦合度。

(3) 机构的拓扑结构特征(不变量)。

4) 基于拓扑结构学基本方程的机构拓扑结构设计方法

(1) 串联机构的拓扑结构设计方法(第8章)。

(2) 并联机构的拓扑结构设计方法(第9章)。

5) 基于拓扑结构设计方法的十类并联机构的拓扑结构设计(第10~19章)

(1) 每类机构的拓扑结构设计过程。

(2) 综合得到的多种并联机构的特性分析。

(3) 基于拓扑结构特征的机构分类。

6) 全书总结与建议(第20章)

本章内容涉及机构学理论发展的基本思想、主要特点以及对方法论方面的思考与认识。建议有兴趣的读者先粗读此章,对理解全书是大有益处的。

本书是在国家自然科学基金连续资助下(平面及空间多杆机构的分析与综合(5870249);机构结构的拓扑特征、尺度特征及动力学模型的研究(59175160);以有序单开链为单元的(平面)机械系统新理论研究(59375203);以有序单开链为单元的空间机械系统新理论研究(59875084);以单开链为单元的机器人机型设计理论、方法及其应用(50275070);基于有序单开链的机器人机构运动学

和动力学新理论及其应用研究(50875261))所取得研究成果的系统总结。

2004年,本书第一作者撰写的《机器人机构拓扑结构学》(北京:机械工业出版社)是当时国内外该研究领域的第一本专著。随后的七年多时间中,在国家自然科学基金的连续资助下,作者的学术研究又取得诸多新进展,有必要进行系统总结并撰写新版专著《机器人机构拓扑结构设计》。期望本书既能为有关研究人员和工程设计人员提供具有明确物理意义与严格数学架构的机构拓扑学的系统理论,又能提供机构拓扑创新设计的实用方法。本书是中国学者提出的基于单开链单元机构学新理论体系的第一本专著,又是构建新理论体系的运动学与动力学系统理论的基石。

本书的撰写分工如下:杨廷力执笔第1~9章和第20章;刘安心博士(教授,解放军理工大学)执笔第13章和第16章;罗玉峰博士(教授,南昌大学)执笔第12章和第17章;沈惠平博士(教授,常州大学)执笔第10章、第15章和第19章;杭鲁滨博士(教授,上海工程技术大学)执笔第11章和第18章;金琼博士(Technical Specialist with General Dynamics Corporation, USA)执笔第14章并参与全书统稿;由杨廷力和刘安心负责全书统稿。

在第一作者从事学术研究的40多年中,曾得到众多朋友与合作者的支持与帮助。为此,对 Prof. 张明、Dr. 罗玉峰、Dr. 刘安心、Dr. 孔宪文、Dr. 沈惠平、Dr. 金琼、Dr. 杭鲁滨、Eng. 孙东锦、Eng. 姚芳华、Dr. 褚金奎、Dr. 张宏、Prof. 刘川禾、Dr. 冯志友、MSc. 贾玉明、MSc. 石宝钱、MSc. 章剑青、MSc. 单松青、MSc. 李惠良和 Dr. 石志新等深表感谢!没有他们的合作、帮助与支持,就不可能取得系统的原创性研究成果。

对白师贤教授(北京工业大学)、曹惟庆教授(西安理工大学)、张启先教授(北京航空航天大学)和黄锡恺教授(东南大学)深表感谢!感谢他们对作者从事学术研究的热情鼓励与帮助!

特别感谢国内外学者对我们提出的理论的质疑与讨论,坦率的交流促进了我们对有关理论与方法更为深刻的理解与认识!

感谢国家自然科学基金委员会多年来对我们研究方向的支持!

感谢中国石化金陵石化公司和东南大学对我们学术研究的支持!

限于作者水平,本书不妥之处在所难免,敬请读者与专家指教!

2011年3月28日

于紫金山下锁金村

Preface

The systematic theory and method for topological structure synthesis of parallel mechanisms (PMs) has become a focus in the research field of mechanisms as a result of the increasing application of PMs in motion simulators, robots, parallel machine tools, micro manipulators, astronomical telescopes, and etc. during the past 20 years. Over the last decade, three major topological structure synthesis theories for PMs have been established. They are the Displacement Subgroup Theory, the Screw Theory, and the Position and Orientation Characteristics (POC) Theory that is introduced in this book. It is intended primarily as a reference book for researchers and developers who work on the novel design of mechanisms, and for graduate and undergraduate students majoring in mechanical engineering.

The purpose of this book is to present the theory and methodology for topological structure design of robot mechanisms based on the POC theory developed by the authors. The fundamental theory demonstrated in this book includes:

- (1) Three new concepts (dimensional constraint type, POC set and single-open-chain (SOC) unit);
- (2) Three basic equations (POC equation for the serial mechanism, POC equation for PMs, and the degree of freedom (DOF) formula for PMs and multi-loop spatial mechanisms);
- (3) The constitution principle of mechanism based on the SOC unit and the topological structure characteristics of mechanisms.

This book comprehensively systemizes the research results achieved by the lead author and his cooperative teams and supported by the National Nature Science Foundation of China (NSFC: No. 5870249, No. 59175160, No. 59375203, No. 59875084, No. 50275070, and No. 50875261). It consists of three parts. The POC based theory and method for topological structure design of mechanisms is described in the first part. Applications of the POC based method, i. e. , topological structure design of 10 types of PMs are introduced in the second part. A summary of the overall book and a comparative study of the three major methods

for topological structure synthesis of PMs are given in the third part. The principle presented in this book is also the foundation of the theoretical system of modern mechanisms, which is composed of mechanism topology, kinematics and dynamics.

Contents of the first part (Chapter 1 to Chapter 9) are arranged as follows:

Chapter 1 is the overview. Chapter 2 introduces the mathematical representation and the full-cycle invariance of mechanism topological structure based on three topological structure elements (kinematic pair type, dimensional constraint type and connection relationship between links). Chapter 3 introduces the POC set which is used to describe POCs of the relative motion between any two links. Chapter 4 introduces the POC equations for serial mechanisms and corresponding operation rules. The forward operation can be used to determine the POC set of the end link relative to the frame link based on the topological structure of a serial mechanism. The inverse operation can be used to determine the topological structure of a serial mechanism based on the POC set of the end link. Chapter 5 introduces the POC equation for PMs and corresponding operation rules. The forward operation can be used to determine the POC set of the moving platform relative to the fixed platform based on the topological structure of a PM. The inverse operation can be used to determine the topological structure of a PM based on the POC set of the moving platform. Chapter 6 introduces the general DOF formula for PMs and multi-loop spatial mechanisms. This DOF formula reveals the mapping relationship among the topological structure, DOF and POC of a mechanism. Chapter 7 introduces the mechanism constitution principle based on SOC units, i. e., any multi-loop mechanism is composed of several basic SOC units. This principle reveals the topological structure characteristics of a mechanism and can be used in performance assessment and classification of topological structure types of mechanisms. Chapter 8 introduces the general method for topological structure design of serial mechanisms or single-loop mechanisms, and the possible topological structure types of mechanisms. Chapter 9 introduces the general approach for the topological structure synthesis and its corresponding performance analysis of PMs.

The second part (Chapter 10 to Chapter 19) introduces the topological structure design of 10 types of PMs (3T-0R, 0T-3R, 2T-1R, 1T-2R, 2T-2R, 3T-1R, 1T-3R, 3T-2R, 2T-3R and 3T-3R). For each type of PMs, the major design process and step-by-step procedures for a specific mechanism design are

provided. Based on this methodology, dozens of mechanisms with different topological structure characteristics have been obtained, which makes it possible to optimize the design of robot mechanisms.

The third part (Chapter 20) draws overall conclusions on the POC theory. A comparison of this theory with other two known topological structure synthesis theories of PMs (the Displacement Subgroup and the Screw Theory) in correlations, differences, individual characteristics and developing trends are also discussed.

In 2004, the first book in the field of topological structure synthesis, *Structure synthesis of Robot Mechanisms*, was written by Prof. Ting-Li Yang and published by China Machine Press. Seven years later, our theory has been developed more maturely as more research achievements have been accomplished. It is time to deliver a new book, *Theory and Application of Robot Mechanism Topology*, which includes a systematic theory with clear physical meanings and meticulous mathematical logic and a practical method for topological structure design of mechanisms.

The lead author expresses his thanks to the following co-authors' cooperation:

Dr. An-Xin Liu, Professor of PLA University of Science and Technology, for Chapters 13 and 16;

Dr. Yu-Feng Luo, Professor of Nanchang University, for Chapters 12 and 17;

Dr. Hui-Pin Shen, Professor of Changzhou University, for Chapters 10, 15 and 19;

Dr. Lu-Bin Hang, Professor of Shanghai University of Engineering Science, for Chapters 11 and 18;

Dr. Qiong Jin, Technical Specialist with General Dynamics Corporation, USA, for Chapter 14.

Great thanks go to Prof. Ming Zhang, Eng. (Senior) Zhen Xu, Prof. Mei-Yu Lin, Dr. Yu-Feng Luo, Dr. An-Xin Liu, Dr. Xian-Wen Kong, Dr. Hui-Pin Shen, Dr. Qiong Jin, Dr. Lu-Bin Hang, Eng. Dong-Jin Sun, Eng. Fang-Hua Yao, Prof. Jin-Kui Chu, Dr. Hong Zhang, Prof. Chuan-He Liu, Prof. Zhi-You Feng, MSc. Yu-Ming Jia, MSc. Bao-Qian Shi, MSc. Jian-Qing Zhang, MSc. Song-Qin Shan, MSc. Hui-Liang Li and Dr. Zhi-Xin Shi for their continuous contributions and assistances to the lead author in his past 40 years theoretical re-

search.

The lead author is deeply grateful for the invaluable encouragement and help provided by the following first generation mechanism scholars of China: Prof. Shi-Xian Bai (Beijing University of Technology), Prof. Wei-Qing Cao (Xi'an University of Technology), Qi-Xian Zhang (Beijing University of Aeronautics and Astronautics) and Xi-Kai Huang (Southeast University).

Sincere appreciations and thanks to the National Nature Science Foundation of China, the SINOPEC Jinling Petrochemical Corporation and Southeast University for their great support in our research work.

Limited by the authors' academic knowledge, there must be some defects or even mistakes in this book. Any suggestions and comments to this book will be gratefully appreciated by the authors.

Ting-Li Yang
Senior Engineer, Professor,
SINOPEC Jinling Petrochemical Corp. , China
March 28, 2011

符 号 表

a_i	构件杆长
BKC	基本运动链
C	圆柱副
$D_{\text{red.}}$	冗余度
d_i	构件轴长
$\dim. \{M\}$	方位特征集的维数
$\dim. \{M(r)\}$	方位特征集的独立转动元素数
$\dim. \{M(t)\}$	方位特征集的独立移动元素数
E	平面副
e_R	R 副轴线的单位矢量
e_P	P 副轴线的单位矢量
e_ρ	径矢的单位矢量
DOF	自由度
F	自由度
f_i	运动副的自由度
H	螺旋副
HSOC	复杂支路
KC	运动链
$M(\dot{M})$	方位特征集 (速度特征集)
$M_b(\dot{M}_b)$	支路末端构件的方位特征集 (速度特征集)
$M_H(\dot{M}_H)$	H 副的方位特征集 (速度特征集)
$M_P(\dot{M}_P)$	P 副的方位特征集 (速度特征集)
$M_{Pa}(\dot{M}_{Pa})$	并联机构动平台的方位特征集 (速度特征集)
$M_R(\dot{M}_R)$	R 副的方位特征集 (速度特征集)
$M_S(\dot{M}_S)$	单开链 (串联机构) 的方位特征集 (速度特征集)
$M_{S(L)}$	回路对应 SOC 的方位特征集
M_{S_j}	子 SOC 末端构件的方位特征集
m	运动副数目
m_P	P 副数目
m_R	R 副数目

m_s ——S 副数目

N_{BKC} ——BKC 的构形数

N_{ov} ——过约束数

N_{dr} ——驱动副数

n ——构件数

n_b ——支路数

P——移动副

PM——并联机构

POC——方位特征

P^* ——P 副的移动或 R (H) 副的伴随移动

R——转动副

$\overbrace{RR \cdots R}$ ——若干个 R 副轴线相交于同一点

r^0 ——不存在有限转动

$r^1(\text{dir.}), r(\text{dir.})$ ——在 (dir.) 方向, 存在一个有限转动

$r^2(\|\diamond(R, R^*))$ ——在平行于 R 副和 R^* 副两轴线的平面内, 存在两个有限转动

r^3 ——存在三个有限转动

$\{r^i(\text{dir.})\}$ ——非独立有限转动

S——球副

SOC——单开链或串联机构

SLC——单回路运动链

$SOC_{(SLC)}$ ——SLC 的对应 SOC

Sub-pa——子并联机构

t^0 ——不存在有限移动

$t^1(\text{dir.}), t(\text{dir.})$ ——在 (dir.) 方向, 存在一个有限移动

$t^2(\perp R)$ ——在垂直于 R 副轴线的平面内, 存在两个有限移动

$t^2(\perp \rho)$ ——在垂直于径矢 ρ 方向的平面内, 存在两个有限移动

$t^2(\|\diamond(P, P^*))$ ——在平行于 P 副和 P^* 副两个方向的平面内, 存在两个有限移动

t^3 ——存在三个有限移动

$\{t^i(\text{dir.})\}$ ——非独立有限移动

U——虎克副

$\cup$ ——集合的“并”运算

$\cap$ ——集合的“交”运算

VC——速度特征

α ——构件扭角

ξ ——KC 的独立位移方程数

ξ_L ——SLC 的独立位移方程数

Δ_j ——SOC 的约束度

κ ——BKC 的耦合度

ν ——KC 的独立回路数

ω ——构件角速度

$v_{O'}$ ——基点 O' 的移动速度

| ——重合于

⋈ ——不重合于

|| ——平行于

≠ ——不平行于

⊥ ——垂直于

⊥̸ ——不垂直于

◇(R_i, R_j)——平行于 R_i 副与 R_j 副两轴线的平面

目 录

前言

符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 现代机械系统	1
1.2 现代机构学	2
1.3 机构拓扑结构学	4
1.4 本书的目标与主要内容	5
1.5 本书的基本思想与主要特点	6
第 2 章 机构的拓扑结构及其符号表示	9
2.1 机构拓扑结构的基本要素	9
2.2 机构拓扑结构的符号表示	12
2.3 机构拓扑结构的运动过程不变性	13
2.4 基于拓扑结构的机构分类	14
2.5 本章小结	15
第 3 章 机构运动构件的方位特征集	17
3.1 概述	17
3.2 运动副的方位特征集	18
3.3 运动构件的速度特征集	22
3.4 运动构件的方位特征集	24
3.5 方位特征集的基本类型	27
3.6 本章小结	28
第 4 章 串联机构方位特征方程	29
4.1 串联机构的速度分析	29
4.2 串联机构速度特征方程	30
4.3 串联机构方位特征方程及其运算规则	32
4.4 方位特征方程运算的主要步骤	35
4.5 尺度约束类型的 POC 集	42
4.6 单回路机构的独立位移方程数	48
4.7 本章小结	51

第 5 章 并联机构方位特征方程	52
5.1 并联机构速度特征方程	52
5.2 并联机构方位特征方程及其运算规则	55
5.3 并联机构支路的基本特性	59
5.4 方位特征方程运算的主要步骤	61
5.5 本章小结	74
第 6 章 机构自由度公式与驱动副判据	75
6.1 概述	75
6.2 自由度公式	77
6.3 并联机构的独立位移方程数	79
6.4 消极运动副与驱动副判定准则	79
6.5 计算自由度的主要步骤	80
6.6 本章小结	99
第 7 章 机构组成原理与拓扑结构特征	101
7.1 概述	101
7.2 基于单开链单元的机构组成原理	107
7.3 自由度类型及其判定方法	115
7.4 机构运动输入-输出的解耦性	118
7.5 机构的拓扑结构特征	120
7.6 本章小结	122
第 8 章 串联机构的拓扑结构综合	123
8.1 串联机构拓扑结构综合方法	123
8.2 串联机构的拓扑结构类型	129
8.3 单回路机构的拓扑结构综合方法	131
8.4 单回路机构的拓扑结构类型	135
8.5 本章小结	137
第 9 章 并联机构拓扑结构设计方法	138
9.1 并联机构拓扑结构设计的基本思想	138
9.2 并联机构拓扑结构设计的一般过程	139
9.3 支路结构类型及其组合方案	140
9.4 支路在两平台装配的几何条件	142
9.5 选定机构驱动副	147
9.6 并联机构结构类型的特性分析及其分类	149
9.7 本章小结	150

第 10 章 (3T-0R) 并联机构的拓扑结构设计	151
10.1 (3T-0R) 并联机构的基本功能	151
10.2 支路拓扑结构类型与支路组合方案	151
10.3 (3T-0R) 并联机构拓扑结构设计过程	156
10.4 (3T-0R) 并联机构的拓扑结构类型及其分类	162
第 11 章 (0T-3R) 并联机构的拓扑结构设计	175
11.1 (0T-3R) 并联机构的基本功能	175
11.2 支路拓扑结构类型与支路组合方案	175
11.3 (0T-3R) 并联机构拓扑结构设计过程	179
11.4 (0T-3R) 并联机构的拓扑结构类型及其分类	185
第 12 章 (2T-1R) 并联机构的拓扑结构设计	196
12.1 (2T-1R) 并联机构的基本功能	196
12.2 支路拓扑结构类型与支路组合方案	196
12.3 (2T-1R) 并联机构拓扑结构设计过程	200
12.4 (2T-1R) 并联机构的拓扑结构类型及其分类	207
第 13 章 (1T-2R) 并联机构的拓扑结构设计	215
13.1 (1T-2R) 并联机构的基本功能	215
13.2 支路拓扑结构类型与支路组合方案	215
13.3 (1T-2R) 并联机构拓扑结构设计过程	218
13.4 (1T-2R) 并联机构的拓扑结构类型及其分类	224
第 14 章 (2T-2R) 并联机构的拓扑结构设计	231
14.1 对 (2T-2R) 并联机构的基本功能	231
14.2 支路拓扑结构类型与支路组合方案	231
14.3 (2T-2R) 并联机构拓扑结构设计过程	236
14.4 (2T-2R) 并联机构的拓扑结构类型及其分类	243
第 15 章 (3T-1R) 并联机构的拓扑结构设计	252
15.1 (3T-1R) 并联机构的基本功能	252
15.2 支路拓扑结构类型与支路组合方案	252
15.3 (3T-1R) 并联机构拓扑结构设计过程	256
15.4 (3T-1R) 并联机构的拓扑结构类型及其分类	262
第 16 章 (1T-3R) 并联机构的拓扑结构设计	270
16.1 (1T-3R) 并联机构的基本功能	270
16.2 支路拓扑结构类型与支路组合方案	270
16.3 (1T-3R) 并联机构拓扑结构设计过程	272
16.4 (1T-3R) 并联机构的拓扑结构类型及其分类	280