



国家自然科学基金研究专著

NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA

机械工业出版社出版基金资助项目



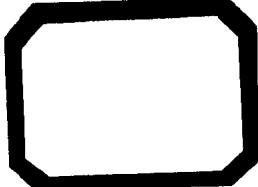
# 机器人机构拓扑结构学

TOPOLOGY STRUCTURE DESIGN OF ROBOT MECHANISMS

杨廷力 著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



国家自然科学基金研究专  
机械工业出版社出版基金资助项目

# 机器人机构拓扑结构学

杨廷力 著

**Topology Structure Design  
of Robot Mechanisms**



机械工业出版社

本书介绍机器人机构拓扑结构设计的一种系统理论与有效方法及其应用。内容有如下特点:

1. 从机器人整体功能出发, 进行机构拓扑结构设计。不仅考虑机构的运动学、动力学要求, 如运动确定性、运动输出特征、运动学与动力学问题复杂性等, 亦考虑控制系统、驱动系统的要求, 如控制解耦、驱动器位置可选择性等。

2. 在深入、系统地揭示机构拓扑结构——功能之间的内在联系与规律性基础上, 建立了机构拓扑设计的数理模式, 减少设计中的经验性因素, 开拓了以功能为导向的创造新机构的系统理论与方法。亦有利于建立机构拓扑结构学、运动学与动力学研究的统一模型, 使之逐渐成为理论更加严密、方法更为有效的一门学科。

3. 对活动度为 3~6, 且相应于 10 种不同运动输出特征矩阵的并联机构, 进行拓扑结构综合, 发现众多新机构, 其性能较好者已申请廿多项(包含 100 多种新机构)国家发明专利, 其中 2001 年申请的已全部获发明授权证书。

本书是国内外第一本系统阐述机器人机构拓扑结构设计理论与方法及其应用的学术专著。

本书可供高等院校有关专业教师及研究生阅读, 以及有关机械设计、机器人研究的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

机器人机构拓扑结构学/杨廷力著. —北京: 机械工业出版社, 2003.11  
ISBN 7-111-13422-2

I. 机… II. 杨… III. 拓扑-应用-机器人-机构综合  
IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 103600 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: 曲彩云 责任编辑: 张亚秋 责任校对: 刘志文

封面设计: 陈 沛 责任印制: 施 红

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 3 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5·8.125 印张·314 千字

0 001—3 500 册

定价: 29.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

**谨以此书献给我的父母和亲人们!**

# 前 言

机器人技术的进步推动着现代机构学发展。在机器人的各子系统(机构、驱动、控制、传感与信息处理等)中,机构是机器人的骨架与执行器,须满足系统整体提出的功能要求,亦应满足其他子系统(如控制、驱动等)提出的功能要求。

机器人机构设计过程中,拓扑结构类型综合与类型优选(简称为拓扑结构设计或拓扑方案设计)是最具有原始创新性的设计阶段。但长期以来,机构发明主要依赖设计者的经验、知识及直觉与灵感思维—致使新机构发明甚为困难。

现代机构学的最高任务是发明新机构,探索减少筛选盲目性,开拓以功能为导向,实现特定性能的创造新机构的途径,发展专一、高效、高选择性的机构创新设计(综合与方案优选)方法。现代机构学应为创造新机构提供系统的理论与有效的方法。为此,应深入、系统地揭示机构系统结构与功能之间的内在联系与规律性。既与机构拓扑结构、运动学和动力学密切相关,又涉及多学科(控制、驱动、计算机技术等)的交叉与融合,是现代机构学的一个研究热点,也是一个长期未能很好解决的难点。

本书第一部分为理论内容:串联机器人机构拓扑结构特征与类型综合(第2章);单回路机构过约束性及其拓扑结构综合(第3章);并联机器人机构的拓扑结构特征与拓扑结构综合方法(第4章)。理论内容围绕机构拓扑结构组成(不同层次结构单元及单元之间联接关系等)的数学表述;机构与单元基本功能的数学表述;机构系统结构——功能之间的内在联系与规律性的数学表述及其运算规则。本书第二部分为上述理论与方法的应用,分别为10种不同运动输出特征的并联机器人机构的拓扑结构综合、基于拓扑结构特征的分类,以助优选类型(第5章~第13章)。希望本书内容能减少机构拓扑结构设计的经验性因素,并利于使现代机构学的拓扑结构学、运动学与动力学逐渐成为理论较为严密、方法更为有效的一门学问。

2002年10月在加拿大魁北克市召开的关于并联机构与机器人专题的国际研讨会上,法国著名教授(计算运动学杂志主编(EJCK);美国IEEE机器人与自动化杂志副主编)Merlet J. P. 教授的主报告(An initiative for the kinematics study of paral-

lel manipulators. Proc. of the Workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators, 2002, Quebec, pp. 2~9)提出: 并联机构与机器人(PKS)的优化设计可分为两个主要课题: 拓扑综合与尺度综合, 虽然还不清楚拓扑综合能否与尺度综合分离, 而 PKS 的性能与这两类综合密切相关。其优化设计是开发 PKS 的关键。这是一个很大的课题, 只有在该领域的研究者、对此问题有兴趣的数学家以及使用者协同工作才能完成, 并由 IFToMM 的计算运动学专业委员会(The Computational Kinematics Technical Committee of the International Federation on the Theory of Machine and Mechanisms)协调这一研究计划。

基于上述背景, 本书成为国内、外第一本系统阐述机器人机构拓扑结构设计理论与方法及其应用的学术专著。

一般地, 机构拓扑结构创新设计有两类: 机构集成创新与机构原始创新。机构集成创新是通过对已知基本机构(元机构)及其元功能进行重组, 以实现较复杂机构系统的整体功能与原理创新, 已知元机构及其子功能是机构集成创新知识库的基础。机构原始创新是发现具有特定功能的新基本机构, 可直接开发为新产品, 又可作为机构集成创新的元机构, 扩大了知识库中元机构空间。本书主要涉及机构原始创新设计的理论与方法, 但对机构集成创新具有积极作用。

本书是作者及周围学者群体承担国家自然科学基金项目(以有序单开链为单元的机械系统理论的研究, 编号:59375203;以有序单开链为单元的空间机械系统新理论研究, 编号:59875084;以单开链为单元的机器人机型设计理论、方法及其应用, 编号:50275070)研究成果的系统总结。罗玉峰博士、金琼博士、刘安心博士、沈惠平教授、孔宪文博士、杭鲁滨博士、姚芳华工程师、石宝钱硕士、单松青硕士、章剑青硕士、李惠良硕士等, 与作者合作完成有关研究课题。对此深表感谢!

本书涉及的研究工作, 得到国家自然科学基金资助和中国石化金陵石化公司的大力支持, 得到北京工业大学白师贤教授、西安理工大学曹惟庆教授、北京航空航天大学张启先教授和东南大学黄锡恺教授的热情鼓励与帮助, 特一并深表感谢!

限于作者水平, 本书定有不少缺点与错误, 敬请读者与专家指教!

杨廷力 2003年3月28日

于紫金山下锁金村

# 符号索引

- $a_i$ ——杆长 …………… (11)  
 BKC——基本运动链 … (75)  
 $C$ ——圆柱副 …………… (10)  
 $d_i$ ——轴长 …………… (11)  
 $F$ ——机构活动度  
 …… (13, 44, 59)  
 $f_i$ ——运动副自由度  
 …………… (44)  
 $H$ ——螺旋副 …………… (10)  
 HSOC——混合单开链 … (56)  
 $KC$ ——运动链 …………… (75)  
 $M_S (\theta_1 \sim \theta_F)$ ——单开链位移输出  
 矩阵 …………… (12)  
 $\dot{M}_S (\dot{\theta}_1 \sim \dot{\theta}_F)$ ——单开链速度输出  
 矩阵 …………… (13)  
 $M_S$ ——单开链位移输出特征  
 矩阵 …………… (14)  
 $\dot{M}_S$ ——单开链速度输出特征  
 矩阵 …………… (14)  
 $M_R (\dot{M}_R)$ ——转动副位移(速度)输  
 出特征矩阵 … (21)  
 $M_P (\dot{M}_P)$ ——移动副位移(速度)输  
 出特征矩阵 … (21)  
 $M_H (\dot{M}_H)$ ——螺旋副位移(速度)输  
 出特征矩阵 … (22)  
 $M_{Pa} (\theta_1 \sim \theta_F)$ ——并联机构位移输出矩  
 阵 …………… (63)
- $M_{Pa} (\theta_1 \sim \theta_F)$ ——并联机构速度输出矩  
 阵 …………… (63)  
 $M_P (\dot{M}_P)$ ——并联机构位移(速度)  
 输出特征矩阵  
 …………… (63)  
 $M_1 (\dot{M}_1)$ ——支路位移(速度)输出  
 特征矩阵 …………… (64)  
 $m$ ——机构运动副数 … (12)  
 $N_1$ ——支路数 …………… (64)  
 $N_{KC}$ ——运动链装配构  
 形数 …………… (76)  
 $N_{BKC}$ ——基本运动链装配构  
 形数 …………… (76)  
 $n$ ——构件数 …………… (55)  
 $P$ ——移动副 …………… (10)  
 PKM——并联机构 …… (55)  
 $R$ ——转动副 …………… (10)  
 $S$ ——球面副 …………… (10)  
 $S$ ——螺旋系 …………… (18)  
 SOC——单开链(串联机  
 构) …………… (12)  
 SLC——单闭链(单回路机  
 构) …………… (39)  
 $\widetilde{SOC}$ ——SLC的转化单开  
 链 …………… (41)  
 $S(S_0)$ ——三维实空间矢  
 量 …………… (16)

$S$ ——螺旋 .....	(16)	$\xi_{SR}$ ——SOC 的独立转动输出数 .....	(15)
$\hat{S}$ ——单位螺旋 .....	(18)	$\xi_{SP}$ ——SOC 的独立平移输出数 .....	(15)
$S_P^{(0)}$ ——P 副运动螺旋 .....	(20)	$\xi_{Pa}$ ——并联机构的秩 .....	(64)
$S_R^{(0)}$ ——R 副运动螺旋 .....	(21)	$\xi_{PaR}$ ——并联机构独立转动输出数 .....	(63)
$S_H^{(0)}$ ——H 副运动螺旋 .....	(22)	$\xi_{PaP}$ ——并联机构独立平移输出数 .....	(63)
$U$ ——万向节 .....	(10)	$\Delta_j$ ——单开链约束度 .....	(72)
$\alpha_i$ ——扭角 .....	(11)	$\kappa$ ——机构耦合度 .....	(73)
$\xi$ ——机构位移方程组的秩 ...	(59)	$\Omega$ ——机构虚约束数 .....	(59)
$\xi_1$ ——SLC 的秩 .....	(39)	$\nu$ ——机构基本回路数 .....	(55)
$\xi_{i1}$ ——第 $i$ 条支路的秩 .....	(66)		
$\xi_{\bar{S}}$ ——( $\widehat{SOC}$ ) 的秩 .....	(41)		
$\xi_s$ ——SOC 的秩 .....	(15)		



# 目 录

## 前 言

第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 机电一体化技术与现代机构学 .....	1
1.1.1 现代机械系统与机构系统 .....	1
1.1.2 机构系统创新设计的一般过程 .....	2
1.1.3 现代机构学研究的基本问题 .....	3
1.2 本书主要内容与特点 .....	5
1.2.1 机器人机构拓扑结构综合研究现状 .....	5
1.2.2 本书主要内容 .....	5
1.2.3 本书主要特点与建议 .....	7
第 2 章 串联机构拓扑结构特征与综合 .....	10
2.1 串联机构拓扑结构特征 .....	10
2.1.1 串联机构结构组成及其符号表示 .....	10
2.1.2 串联机构活动度公式 .....	12
2.1.3 串联机构运动输出特征矩阵 .....	12
2.2 螺旋理论基本知识 .....	16
2.2.1 螺旋 .....	16
2.2.2 螺旋运算 .....	17
2.2.3 螺旋系及其基本定理 .....	18
2.2.4 螺旋系的线性相关性 .....	19
2.3 串联机构运动输出特征方程 .....	20
2.3.1 运动副运动输出特征矩阵 .....	20
2.3.2 串联机构运动输出特征方程 .....	23
2.4 运动输出特征矩阵运算 .....	25
2.4.1 特征矩阵运算规则 .....	25

2.4.2	举例 .....	26
2.4.3	运动副轴线配置类型及其输出特征 .....	29
2.5	串联机构拓扑结构综合 .....	31
2.5.1	拓扑结构综合主要步骤 .....	32
2.5.2	举例 .....	32
2.5.3	串联机构拓扑结构类型 .....	37
第 3 章	单回路机构拓扑结构综合 .....	39
3.1	单回路机构过约束性及其分类 .....	39
3.2	一般过约束回路秩的判定 .....	40
3.2.1	基本原理 .....	40
3.2.2	举例 .....	42
3.3	单回路机构活动度与运动副特性 .....	44
3.3.1	活动度公式 .....	44
3.3.2	消极运动副及其判定 .....	44
3.3.3	主动副及其判定 .....	47
3.4	一般过约束回路拓扑结构综合 .....	48
3.4.1	基本原理 .....	48
3.4.2	拓扑结构综合主要步骤 .....	48
3.4.3	一般过约束回路的拓扑结构类型 .....	50
3.5	特殊过约束回路研究简介 .....	53
3.5.1	特殊过约束回路的主要特点 .....	53
3.5.2	主要研究方法 .....	53
3.5.3	典型特殊过约束回路及其存在条件 .....	54
第 4 章	并联机构拓扑结构特征 .....	55
4.1	并联机构结构组成 .....	55
4.1.1	并联机构结构分解 .....	55
4.1.2	支路基本类型 .....	56
4.1.3	并联机构结构组成的符号表示 .....	56
4.2	机构活动度 .....	59

4.2.1	活动度公式 .....	59
4.2.2	虚约束类型及其判定 .....	60
4.2.3	消极运动副及其判定 .....	61
4.3	并联机构运动输出特征方程 .....	63
4.3.1	并联机构运动输出特征矩阵 .....	63
4.3.2	并联机构运动输出特征方程 .....	64
4.3.3	举例 .....	67
4.3.4	并联机构支路数目 .....	70
4.4	多回路机构耦合度 .....	71
4.4.1	多回路机构结构组成 .....	71
4.4.2	单开链约束度与机构耦合度 .....	72
4.4.3	基本运动链及其判定 .....	75
4.5	活动度类型与控制解耦原理 .....	77
4.5.1	活动度类型及其判定 .....	77
4.5.2	运动输入——输出控制解耦原理 .....	77
4.6	主动副位置及其判定 .....	79
4.6.1	主动副数目 .....	79
4.6.2	主动副判定准则 .....	79
4.7	并联机构拓扑结构综合方法 .....	80
4.7.1	基本方法 .....	80
4.7.2	拓扑结构综合的一般过程 .....	82
第 5 章	(3T-OR) 并联机构拓扑结构综合与分类 .....	83
5.1	支路结构类型与支路组合 .....	83
5.1.1	单开链支路结构类型 .....	83
5.1.2	混合单开链支路结构类型 .....	83
5.1.3	支路组合方案 .....	87
5.2	(3T-OR) 并联机构拓扑结构综合 .....	88
5.2.1	并联机构拓扑结构综合过程 .....	88
5.2.2	举例 .....	93

5.3	(3T-0R)并联机构拓扑结构类型及其分类	97
5.3.1	并联机构拓扑结构类型	97
5.3.2	基于瞬时运动输出特性的拓扑结构综合	99
5.3.3	并联机构拓扑结构特征及其分类	103
第 6 章	(0T-3R)并联机构拓扑结构综合与分类	108
6.1	支路结构类型与支路组合	108
6.1.1	单开链支路结构类型	108
6.1.2	混合单开链支路结构类型	108
6.1.3	支路组合方案	111
6.2	(0T-3R)并联机构拓扑结构综合	112
6.2.1	并联机构拓扑结构综合过程	112
6.2.2	举例	117
6.3	(0T-3R)并联机构拓扑结构类型及其分类	119
6.3.1	并联机构拓扑结构类型	119
6.3.2	并联机构拓扑结构特征及其分类	120
第 7 章	(2T-1R)并联机构拓扑结构综合与分类	124
7.1	支路结构类型与支路组合	124
7.1.1	单开链支路结构类型	124
7.1.2	混合单开链支路结构类型	124
7.1.3	支路组合方案	126
7.2	(2T-1R)并联机构拓扑结构综合	127
7.2.1	并联机构拓扑结构综合过程	127
7.2.2	举例	130
7.3	(2T-1R)并联机构拓扑结构类型及其分类	132
7.3.1	并联机构拓扑结构类型	132
7.3.2	并联机构拓扑结构特征及其分类	133
第 8 章	(1T-2R)与(1T-3R)并联机构拓扑结构综合与分类	136
8.1	(1T-2R)并联机构拓扑结构综合与分类	136

8.1.1	支路结构类型与支路组合 .....	136
8.1.2	(1T-2R)并联机构拓扑结构综合 .....	138
8.1.3	(1T-2R)并联机构拓扑结构类型及其分类 .....	141
8.2	(1T-3R)并联机构拓扑结构综合与分类 .....	143
8.2.1	支路结构类型与支路组合 .....	143
8.2.2	(1T-3R)并联机构拓扑结构综合 .....	145
8.2.3	(1T-3R)并联机构拓扑结构类型及其分类 .....	149
第 9 章	(3T-1R)并联机构拓扑结构综合与分类 .....	152
9.1	支路结构类型与支路组合 .....	152
9.1.1	单开链支路结构类型 .....	152
9.1.2	混合单开链支路结构类型 .....	152
9.1.3	支路组合方案 .....	153
9.2	(3T-1R)并联机构拓扑结构综合 .....	155
9.2.1	并联机构拓扑结构综合过程 .....	155
9.2.2	举例 .....	159
9.3	(3T-1R)并联机构拓扑结构类型及其分类 .....	162
9.3.1	并联机构拓扑结构类型 .....	162
9.3.2	并联机构拓扑结构特征及其分类 .....	162
第 10 章	(2T-2R)并联机构拓扑结构综合与分类 .....	166
10.1	支路结构类型与支路组合 .....	166
10.1.1	单开链支路结构类型 .....	166
10.1.2	混合单开链支路结构类型 .....	167
10.1.3	支路组合方案 .....	168
10.2	(2T-2R)并联机构拓扑结构综合 .....	168
10.2.1	并联机构拓扑结构综合过程 .....	168
10.2.2	举例 .....	173
10.3	(2T-2R)并联机构拓扑结构类型及其分类 .....	175
10.3.1	并联机构拓扑结构类型 .....	175
10.3.2	并联机构拓扑结构特征及其分类 .....	175

第 11 章 (3T-2R) 并联机构拓扑结构综合与分类 .....	178
11.1 支路结构类型与支路组合 .....	178
11.1.1 单开链支路结构类型 .....	178
11.1.2 混合单开链支路结构类型 .....	178
11.1.3 支路组合方案 .....	179
11.2 (3T-2R) 并联机构拓扑结构综合 .....	181
11.2.1 并联机构拓扑结构综合过程 .....	181
11.2.2 举例 .....	185
11.3 (3T-2R) 并联机构拓扑结构类型及其分类 .....	188
11.3.1 并联机构拓扑结构类型 .....	188
11.3.2 并联机构拓扑结构特征及其分类 .....	189
第 12 章 (2T-3R) 并联机构拓扑结构综合与分类 .....	193
12.1 支路结构类型与支路组合 .....	193
12.1.1 单开链支路结构类型 .....	193
12.1.2 混合单开链支路结构类型 .....	193
12.1.3 支路组合方案 .....	194
12.2 (2T-3R) 并联机构拓扑结构综合 .....	196
12.2.1 并联机构拓扑结构综合过程 .....	196
12.2.2 举例 .....	200
12.3 (2T-3R) 并联机构拓扑结构类型及其分类 .....	203
12.3.1 并联机构拓扑结构类型 .....	203
12.3.2 并联机构拓扑结构特征及其分类 .....	203
第 13 章 (3T-3R) 并联机构拓扑结构综合与分类 .....	208
13.1 支路结构类型与支路组合 .....	208
13.1.1 单开链支路结构类型 .....	208
13.1.2 混合单开链支路结构类型 .....	208
13.1.3 支路组合方案 .....	210
13.2 (3T-3R) 并联机构拓扑结构综合 .....	211

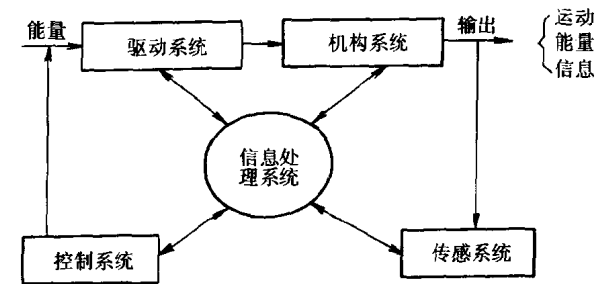
13.2.1 并联机构拓扑结构综合过程 .....	211
13.2.2 举例 .....	216
13.3 (3T-3R)并联机构拓扑结构类型及其分类 .....	219
13.3.1 并联机构拓扑结构类型 .....	219
13.3.2 并联机构拓扑结构特征及其分类 .....	220
参考文献 .....	224
后 记 .....	233
英文摘要 .....	235
英文目录 .....	239

# 第 1 章 绪 论

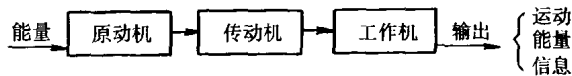
## 1.1 机电一体化技术与现代机构学

### 1.1.1 现代机械系统与机构系统

20 世纪 80 年代发展的机电一体化技术，是微电子技术向传统机械系统渗透、融合而成的现代机械系统。机电一体化技术使机械系统产生了革命性变化，数控机床与机器人等是其典型代表。以机电一体化技术为核心的现代机械系统的组成如图 1-1a 所示；传统机械系统的组成如图 1-1b 所示。



a) 现代机械系统



b) 传统机械系统

图 1-1 机械系统的组成

在现代机械系统的 5 个子系统中，机构子系统是系统的骨架与执行器。机器人机构与微型机构是现代机构的典型代表，其地位、作用以及与其他子系统的相互联系与制约，决定了现代机构系统的主要特点(如表 1-1 所示)。

表 1-1 机构系统的主要特点

现代机构	传统机构
1. 一般地，机构活动度 $d.o.f. \geq 2$ 2. 机构运动输出包括： 输出构件的运动输出类型 输出构件位姿可实现高精度连续复杂变化 3. 可变主动输入 4. 可变拓扑结构 5. 可变尺度参数 6. 可变惯性参数	1. 一般地，机构活动度 $d.o.f. = 1$ 2. 机构运动输出(函数、导引、轨迹)可实现若干精确点，但过程为近似实现 3. 主动输入基本不变 4. 拓扑结构不变 5. 尺度参数不变 6. 惯性参数不变



### 1.1.2 机构系统创新设计的一般过程

以机电一体化技术为核心的现代机械系统的发展，要求相应的机构创新设计。一般地，机构系统创新设计过程如图 1-2 所示。

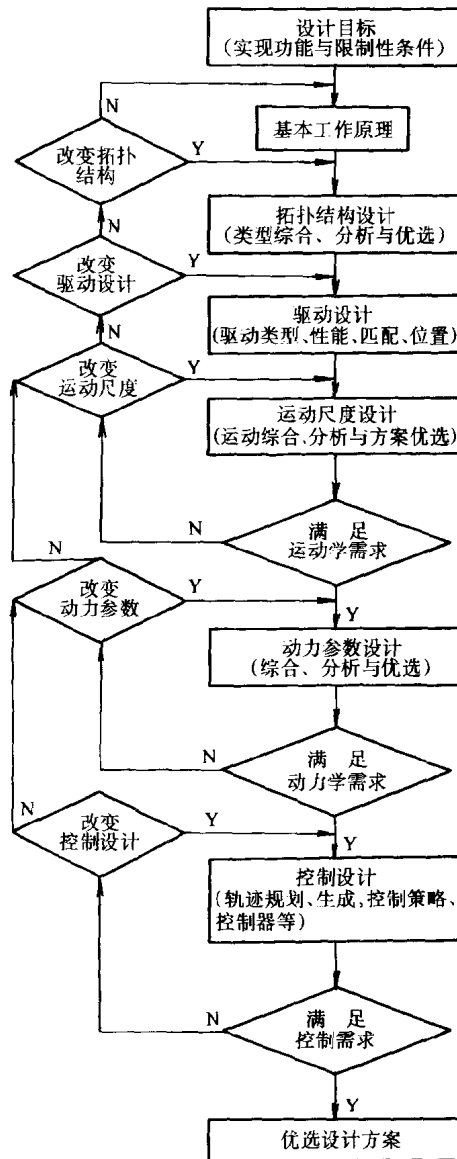


图 1-2 机构系统创新设计的一般过程

机构系统设计是一个从预定目标出发，不断进行综合(提出多种方案)、分析(方案性能分析)和决策(方案优选)的过程。