

文章编号:1673-0062(2011)01-0042-07

力封闭自适应机构的创新设计方法

罗金良,文 群,王树国

(南华大学 机械工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:提出了选择初始运动链中适当的构件作为力封闭构件设计力封闭自适应机构的创新设计方法.根据初始运动链的自由度特征,指出了自适应机构设计需解决的主要问题,详细介绍了运动链的选择方法,给出了自适应机构设计的基本原则和方法,通过不同类型的设计实例,论证自适应机构设计方法的可行性,对自适应机构的创新设计,具有重大的理论意义和工程实用价值.

关键词:初始运动链;力封闭自适应机构;设计方法

中图分类号:TH112.1

文献标识码:B

Innovation Design Method of Force Closed Self-adaptive Mechanism

LUO Jin-liang, WEN Qun, WANG Shu-guo

(School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: An innovation design method of force closed self-adaptive mechanism is put forward by selecting the appropriate members in the incipient kinematic chain as force closure components. According to the freedom characteristics of the incipient kinematic chain of force closed self-adaptive mechanism, the main problems to be solved of self-adaptive mechanism design are pointed out. Selection method of kinematic Chain is introduced, and the design principle and method of self-adaptive mechanism is advanced also. The feasibility of the self-adaptive mechanism design method is proved by different types of design examples. It has important theoretical significance and practical value to innovation design of self-adaptive mechanism.

key words: incipient kinematic chain; force closed self-adaptive Mechanism; design method

随着对机械智能化及智能机械研究的不断深入与发展,自适应机构已成为机构学研究的新课题.自适应机构,是指无需通过测控,而是依靠机

构自身的结构来实现对外部工作对象、环境、条件及工作要求变化的自动适应,并可靠地完成预期工作要求的机械装置.如文献[1-6]等所述的一些

收稿日期:2010-11-04

基金项目:湖南省科技厅科技计划基金资助项目(2010GK3085);衡阳市科技计划基金资助项目(2009KJ11)

作者简介:罗金良(1968-),男,湖南醴陵人,南华大学机械学院高级工程师,博士.主要研究方向:自适应智能机械理论、机器人机构.

变结构、变自由度和内力加压装置以及具有形状自适应功能的欠驱动多指节机器人手指机构都是一些具有自适应功能的自适应机构. 文献[7]对自适应机构进行了详细的分类,并把其中内力封闭的加压装置,如夹持器、剪刀、差式制动器、差速器、某些机械手爪等,能自动适应工作对象的尺寸、位置和形状在一定范围内的变化而实现可靠地工作的一类自适应机构称为力封闭自适应机构. 并通过一对内力与二元素杆的等价替代,得到了此自适应机构的初始运动链,其自由度为0(力矩驱动机构)或-1(力驱动机构). 同时,文献[8]创新地提出了一种综合自由度为0或-1运动链的构型方法——胚图支链法,并通过此方法综合出了10杆及以下运动链的所有有用的构型^[7],为创新设计这类自适应机构提供了可靠的原型.

通常有了运动链,就能够设计出机构. 然而,由于自适应机构初始运动链包含了力的转化构件,其设计的理念和思路都与自由度为+1机构有所不同. 目前对其设计原则、通用方法和步骤的研究几乎是空白. 为此,提炼出自适应机构的设计方法、制定其设计的一般步骤,将为开拓自适应机构的研究领域和创新设计自适应机构提供重要的理论指导,具有重大的工程实用价值.

1 力封闭自适应机构的设计原则与方法

利用文献[7]综合出的 $F=0$ 和 $F=-1$ 的运动链,通过适当地选择、替代和布置代表系统封闭内力的二元素杆,使机构具有足够的自适应自由度,即可以达到实现机构自适应功能的目的,并创新设计出力封闭自适应机构. 为此,称由初始运动链设计出能满足具体的自适应功能要求的结构简图,称为力封闭自适应机构的功能化结构设计. 尽管自适应机构的选型及结构设计的方案会因采用不同自由度特征的运动链,而导致其驱动方式、设计对象和功能要求的不同,但是,其功能设计的一般原则和方法却是一致的,为此,针对该类机构的一些共性特征,特提出进行该类自适应机构设计的一般原则及方法.

1.1 选取机构的初始运动链

选择运动链的一般原则和方法为:

1) 确定初始运动链的自由度特征.

初始运动链的自由度特征是根据机构实际的驱动方式来确定的. 若采用力驱动,选取自由度 $F=-1$ 的初始运动链,若采用力矩驱动,则选择自由度 $F=0$ 的初始运动链.

2) 确定初始运动链中二元素杆的最少数目 n_{2min} .

对于力封闭自适应机构其自适应自由度数 n_{dv} 等于其需适应工作对象的尺寸参数的变化数量 δ ,再根据力(力矩)驱动确定系统实现内力封闭的内力对数 n_{if} . 由此确定代替这些内力所需二元素杆的最少数目.

采用力矩驱动时:

$$n_{2min} = n_{if} = n_{dv} = \delta \quad (1)$$

而采用力驱动:

$$n_{2min} = n_{if} = n_{dv} + 1 = \delta + 1 \quad (2)$$

3) 确定最少工作构件数 n_{wmin} 及中间构件数 n_{cmin} .

工作构件是执行构件(指对工作对象施加工作力的构件)和主动构件(指施加驱动力的构件)的统称;中间构件则是指在主动与执行构件之间传递力和运动的构件,也称为连接构件或传力构件.

(1) 如果系统中 $n_{if}=1$,机构无需传力构件,就能形成封闭的系统,因此, $n_{wmin}=1$;如果 $n_{if}=2$,则至少需要一个传力构件,将两者的合力传递到机架,才能形成封闭的系统,所以, $n_{wmin}=1$, $n_{cmin}=1$.

(2) 多数情况下,特别是有两对或更多内力作用的情况下,执行构件数量等于内力数,驱动力可作用于其中一个执行构件上,或两个执行构件之间. 这时执行构件也可直接与支架连接,所以机构 $n_{wmin}=2$.

(3) 若需增加力的作用效益,则主动构件必须与执行构件分离,同时,主动构件到执行构件之间至少还要增加一个传力构件,通过传力构件将动力传至执行构件,构成复式杠杆系统,机构最少需要等于工作内力数的执行构件,以及1个传力构件和1个主动构件. 实际上,依据运动链的自由度及其构件数的关系,在需要获得机构大的机械增益时,所需增加的中间构件数量应该为2的倍数.

这样可以根据以上原则,确定机构的最少工作构件数及中间构件数.

4) 确定基础构件数 n_b (或称机架)及其杆型.

一个内力封闭自适应机构一般都有一个固定的构件——机架;但有时也可以是一个几乎要承受所有构件传递过来的力的构件,作为系统内部的主要支承件,称为相对机架;将这样的构件称为力封闭自适应机构的基础构件. 通常基础构件一般都是运动链中包含运动副元素最多的多元素

杆. 一般, 基础构件数 $n_b = 1$, 关键是确定其杆型, 确定其最少运动副元素的数量. 其数量可根据封闭内力数量 n_{if} 、传力构件的数量 n_{cm} 以及主动构件数及其与基础构件是否联接来确定.

5) 自适应机构的总构件数 N

自适应机构所需的最少构件数由需适应的工作对象尺寸参数变化量相等的二元素杆、代表驱动力的二元素杆、必需的工作构件和中间构件及基础构件四部分组成, 所以:

$$N \geq n_{2min} + n_w + n_{cm} + n_b \quad (3)$$

1.2 功能结构设计的主要问题与一般原则

在机构的功能结构设计时, 必须着重考虑以下问题:

1) 同一条初始运动链可以设计出不同功能的机械装置, 而实现不同功能的机械装置, 其内力作用方式、工作对象的形状以及其工作构件(头、指、块等)的结构形状都将不同;

2) 驱动力(力矩)的施加方式将决定机构的具体结构;

3) 考虑力在装置中的传递和变换及工作力的施加与释放的运动传递趋势;

4) 要保证系统工作时, 各构件能实现自动调整达到力的静定或超静定状态.

5) 要考虑机构自由度变化的结构特征, 保证机构能顺利的实现自由度的变化; 同时, 由于机构一般只有一个驱动自由度, 是属于欠驱动的状态, 所以为了保证机构可靠的工作, 还需要解决机构自适应自由度的顺序约束与释放的问题.

从以上问题可以看出自适应机构功能结构设计的过程比较复杂, 因而特提出以下一些基本的设计程序与原则.

1) 确定运动链中各构件在实现机构功能时所起的功用, 即确定运动链中作为机构基础构件、执行构件、主动构件、传力构件和替代封闭力(包括驱动力)的构件.

2) 根据工作对象的形状、位置及机构所实现的功能等, 设计执行构件的形状及其与基础构件(机架)的联接方式. 充分考虑机械装置内力封闭数量及方位, 以便于实现机构的内力封闭. 工作头部分要与工作对象保持可靠的接触, 可尽量设计成易于确定其工作反力的形状, 方案设计时, 一般均可设计成高副接触的形状.

3) 设计主动构件, 确定其与基础构件的联接方式. 通过机构的驱动方式以及力的传递方式, 确定其与中间构件或执行构件的联接状态.

4) 设计力和运动的传递路线及要求, 确定中间构件及驱动力、阻力的联接和作用点, 及其与驱动力发生器的配置方位. 按照取得最大的力的增益效果的原则来配置执行构件、中间构件及主动构件. 保证从主动力到阻力有显著扩力作用, 并按动力臂大于阻力臂的原则选择适当的杠杆比确定中间构件的可动铰接点, 并确定好主力和阻力的作用点. 中间构件的方位, 应按照构成大传动角的原则来布置. 各构件的运动副类型、位置及方位的配置设计时, 要特别注意主动件到执行构件的运动传递状况, 确保执行构件能按预期方向实现工作封闭与释放运动.

5) 选择驱动装置, 合理布置各铰链连接点的位置, 保证整个系统具有良好的传力特性, 并能自动适应尺寸参数的变化, 且工作时机构能够处于静定或超静定的稳定工作状态.

6) 按照力流优先向阻力最小的路径传递、流动的原则, 检验确保机械装置工作前后阶段自由度可变的结构特征, 实现在欠驱动的条件下具有确定的运动.

按照上述的要求, 绘制出机构的结构及各杆的形状, 就可以得到机械装置的结构设计简图, 其功能设计工作也就得以完成.

2 自适应机构的创新设计

2.1 力驱动夹紧装置的功能结构设计

例: 设计用于夹紧工件如图 1 所示工件的夹紧装置, 要求用规定的垂直力 V 和水平力 H , 能够适应长度和高度尺寸在一定范围内变化, 并要求系统具有较大的机械效益.

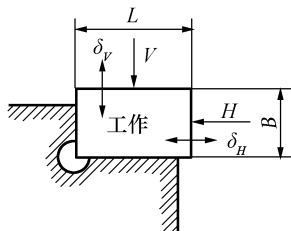


图 1 基本要求

Fig.1 Basic demand

1) 选择初始运动链.

(1) 依题意, 夹紧装置采用力驱动 $F = -1$;

(2) 机构自动适应的变化参数为工件长度 L 和高度 B , 即自适应自由度 $n_{dr} = \delta = 2$. 此时, 封闭力的对数 $n_{if} = 3$, 即 $n_{2min} = n_{if} = 3$.

(3) 此时, $n_{\min} = 2, n_b = 1$. 所以运动链的构件总数: $N \geq n_{2\min} + n_w + n_{c\min} + n_b = 6$.

(4) 由于二夹持力及其合力将传至基础构件, 为了使驱动力具有扩力作用, 应有支点在基础件上, 故基础构件运动副元素数大于或等于 4; 再根据夹紧装置需要较大的机械效益, 则还需要至少增加 2 个中间构件, 所以, 选择如图 2 所示的 $F = -1, N = 8$ 的运动链.

2) 应用上述的功能结构化设计的具体原则和方法, 将图 2 所示的运动链进行结构化.

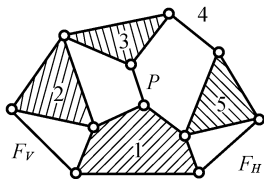


图 2 运动链
Fig. 2 Kinematic chain

在进行机构配置时, 通常保证机构可靠工作所需的作用力是已知的, 而工作构件及其与基础件的联接可以按前述的方法确定. 因此, 系统能否处于最佳受力状态的关键就是中间构件的布置和驱动力 (力矩) 的大小及方向的确定.

首先, 对图 3 中确定的工作部分 (执行构件) 进行分析. 由静力学定理可知, 工作时, 构件 5 能处于静平衡状态的一个必要条件是铰链 o 产生的反力 R_5 处于 xoy 坐标系的 2、3 象限; 同理, 构件 2 实现静平衡状态的一个必要条件是铰链 o' 产生的反力 R_2 处于 $x'o'y'$ 坐标系的 1、4 象限内. 当 R_5 与 ox 共线时, 机构的传力特性最佳, 封闭力最大, 从而确定将中间构件 4 水平配置. 再根据 R_2 产生的作用力方位和执行构件 2、5 的压紧运动趋势以及整个系统力的传递与效益, 确定主动件 3 的方位及各铰链点的配置, 得到如图 4 所示的机构.

3) 机械系统的静定平衡分析

按照设计要求, 所设计的力封闭自适应机构必须能够实现静定或超静定的封闭状态. 为此, 可按静力学原理, 对该机构进行受力分析, 结果如图 4 所示. 在图示工作位置, 要使构件 2 处于平衡状态, 支座反力 R_{12} 、 R_{32} 和垂直方向的夹紧力 F_V 必然汇交于一点 O , 且符合矢量封闭法则. 由于 F_V 已知, 其方向线必须过 B 点并垂直于接触面, 由构件 3 的受力状况可确定 R_{23} 必通过 C 点及 R_{43} 与 P 的交点, 从而得到 F_V 与 R_{32} 的交点 O , 则可确定

铰链 A 的反力 R_{12} 的作用线沿 AO .

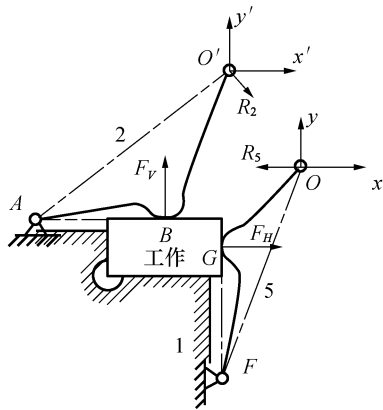


图 3 工作部分
Fig. 3 Executive members

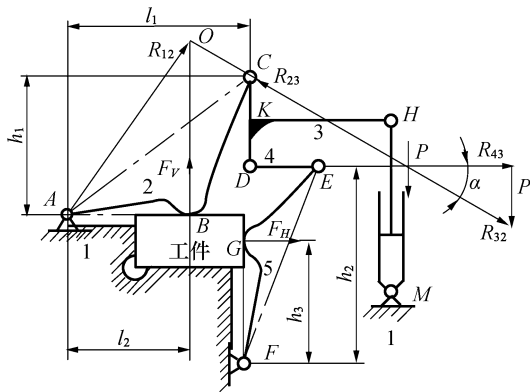


图 4 力驱动的夹紧装置
Fig. 4 Clamp device driven by force

保证机构能够可靠地夹紧, 达到机构静定的基本原则是尽可能保持两夹紧力大小相等, 即 $F_V = F_H$. 下面将探讨保持 $F_V = F_H$ 的几何条件.

对构件 2 所受外力对 A 点取矩, 对构件 4 和 5 组成的系统对 F 点取矩, 根据静力平衡条件, 它们的合力矩必为 0, 即:

$$\sum M_A = 0: -R_{32x}h_1 - R_{32y}l_1 + F_Vl_2 = 0 \quad (4)$$

$$\sum M_F = 0: R_{34}h_2 - R_Hh_3 = 0 \quad (5)$$

根据图中的力学及几何关系, 可得出:

$$F_V = \frac{P}{l_2}(h_1 \cot \alpha + l_1) \quad (6)$$

$$F_H = \frac{h_2}{h_3} P \cot \alpha \quad (7)$$

对于构件 3 的平衡方程为:

$$\sum M_D = 0: -Pl_{KH} + R_{23x}l_{CD} = 0 \quad (8)$$

综合上述方程, 可以解出能够保持 $F_V = F_H$

的几何条件如式(9)所示,同时,该方程还可以作为参数优化设计时的一个约束方程来使用.

$$l_1 h_3 l_{CD} + h_1 h_3 l_{KH} - l_2 h_2 l_{KH} = 0 \tag{9}$$

上述系统配置,在图示工作位置,驱动力 P 的大小及方向都是确定且唯一的,各构件也都处于静平衡状态,能够保证夹紧工作.因此,该系统是静定的,能够处于稳定的工作状态.中间连杆组成了复式杠杆系统,从而使机构具备了较大的机械效益.实际上,以 F_H 为输出机械效益为:

$$\eta = \frac{F_H}{P} = \frac{h_2}{h_3} \cot \alpha = \frac{h_2 l_{KH}}{h_3 l_{CD}} \tag{10}$$

从式(10)可以看出,只要 l_{KH} 足够大,机构力的增益效果将非常明显,机械效益得到大大的提高.

4) 欠驱动条件下系统运动趋势与自适应性能分析

该机构在所有内力未封闭前,其自由度为 2,但只有一个驱动力作用,是一种欠驱动方式,运动是不确定的.为了实现可靠的夹紧及松开过程,机构必须具有确定的运动传递规律.因此在设计时必须合理的配置系统的构件,特别是执行构件的位姿,分析其力能的传递路线及运动趋势.为此,将执行构件 2 配置在近似的水平方位,保证在夹紧时,其在重力的作用下能首先与工件接触于 B 点,产生了垂直方向的夹紧力.此时, B 就可以看作是机构的一个高副接触点,增加了一个约束.机构的自由度 $F = 3 \times 6 - 2 \times 8 - 1 = 1$ (液压油缸看成两个构件),在驱动力 P 的作用下,具有确定的运动.当构件 5 与工件接触于 G 点时,产生了水平方向的夹紧力,最后这两个方向的夹紧力不断地进行动态的调整,直到系统处于静定或超静定状态.当工件的尺寸发生变化,尽管约束反力 R_{34} 不再处于 ox 轴上,且 P 力也不一定处于 oy 轴方向时,由于机构具有 2 自由度,它总可以按前述过程,根据工件的尺寸变化,自动调整其构件的位姿,最终达到系统的静定或超静定状况,使系统的自由度变为 -1 .因此,该机构能够实现其变自由度特征,具有自适应调整的运动,能够自动适应工件两个方向尺寸的变化.

2.2 力矩驱动制动器的功能结构设计

利用力矩驱动,设计一制动器,该制动器通过一对相反的制动瓦作用到一个给定的旋转制动轮上,如图 5 所示.制动轮的直径 d 及制动瓦的摩擦角 θ 已知.制动瓦作用力 F_L 和 F_R 构成一个作用在制动轮上的制动力偶矩 $M_r = F_R d \sin \theta$.制动器必须适应左瓦和右瓦上的各自磨损,即要自动适

应 δ_L 和 δ_R 两个尺寸的变化.

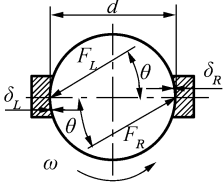


图 5 制动器的基本问题
Fig. 5 Basic demand of arrester

从初始运动链的自由度特征分析可知,应该选取自由度为 0 的运动链来进行功能结构设计.能满足基本要求的最简单的运动链是 $F = 0$, $N = 7$,为使机构具有更好的增益效果,现选择图 6 所示的 $n_2 = 5, N = 9, F = 0$ 的运动链来进行力矩驱动制动器的功能结构设计,其中构件 6、7 是作为实现力矩传递的构件.

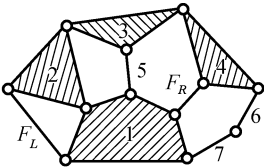


图 6 $F = 0$ 的运动链
Fig. 6 Kinematic chain with $F = 0$

首先,按照功能结构化的原则和方法,对系统的各构件及其联接进行布置.为了更好的传力特性,使铰链点 A, B 以及 E 分别配置在二切向摩擦力的作用线上,且铰链点 B 和 E 的连线与法向力平行.中间构件 5 处于铅垂位置并使其力作用线通过制动轮中心.根据对系统的静力分析可得到最佳布置方案如图 7 所示.而机构的机械效益为:

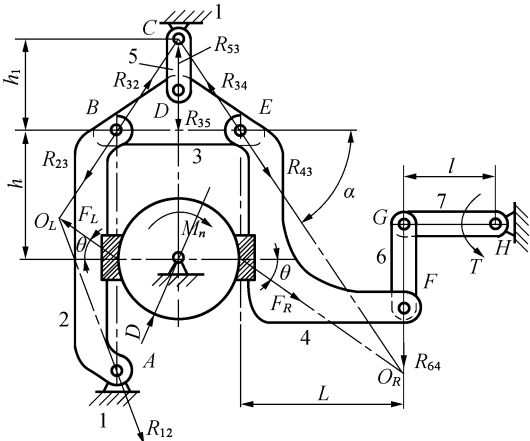


图 7 力矩驱动制动器
Fig. 7 The arrester driven by twist

$$\eta = \frac{M_n}{T} = \frac{(h + 2h_2)LD\tan \theta}{2h_2lh} \quad (11)$$

调整好式(11)中相应的参数,系统可以以较小的驱动力矩,实现较大的制动力矩,使机构具有较高的机械效益。

2.3 同一运动链实现不同功能的功能结构化设计

用同一条初始运动链,根据功能要求,选择不同构件为执行构件,可以设计出能够实现不同的自适应功能的力封闭自适应加压装置.如图 8 所示,同样是 $F=0,N=-1$ 的运动链,可以创新设计出不同的自适应机构。

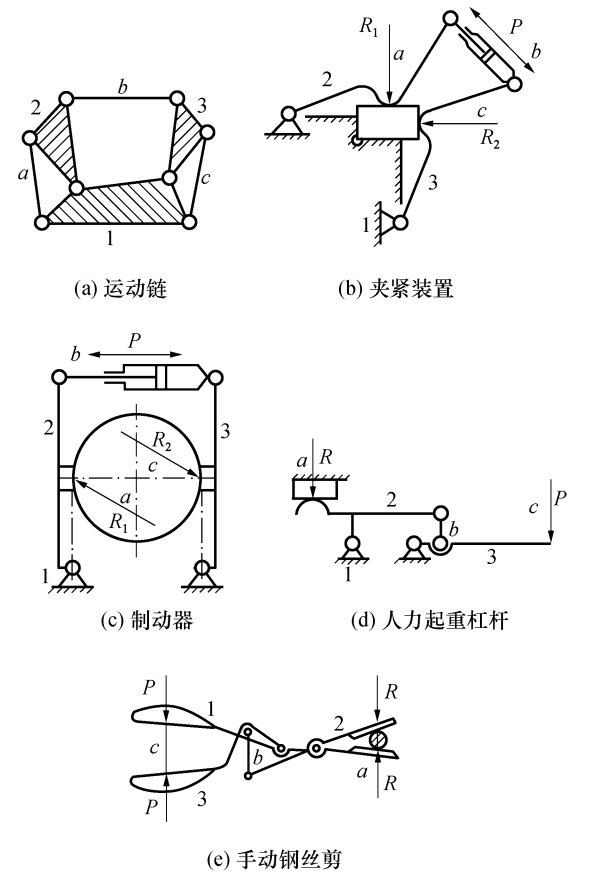
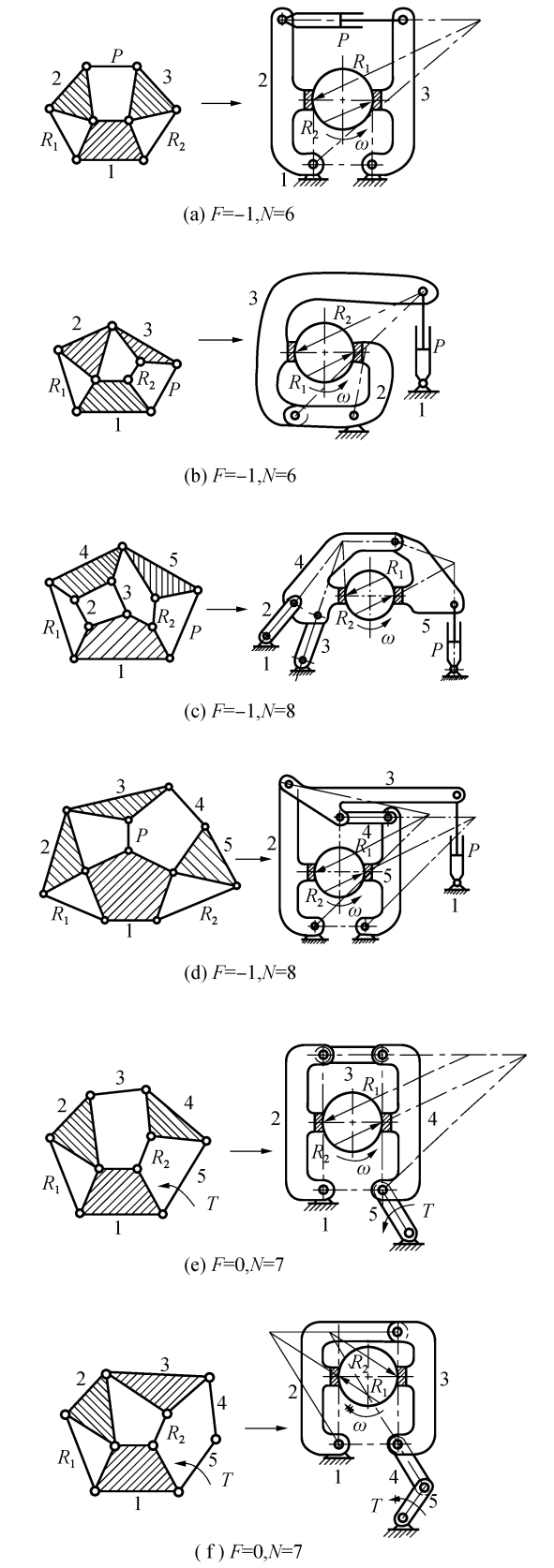


图 8 同一运动链实现多功能的结构图
Fig.8 Different function structures with same kinematic chain

2.4 自适应机构的多方案功能设计方法

1) 选择多种不同的运动链实现同一自适应功能
多方案设计是指利用不同的运动链对实现同一自适应功能的机械装置进行多种方案的功能结构设计,再根据实际的工作要求及其工作环境选择其最佳的方案.如图 9 所示的自适应制动器.其中方案(a)、(b)是满足最基本要求的力驱动方式制动器结构图;方案(c)、(d)、(g)则是具有更好

的机械效益的力驱动制动器结构图;方案(e)、(f)是满足最少构件数的力矩驱动的制动器结构图;而(h)则是具有较大力增益效果的力矩驱动制动器结构图。



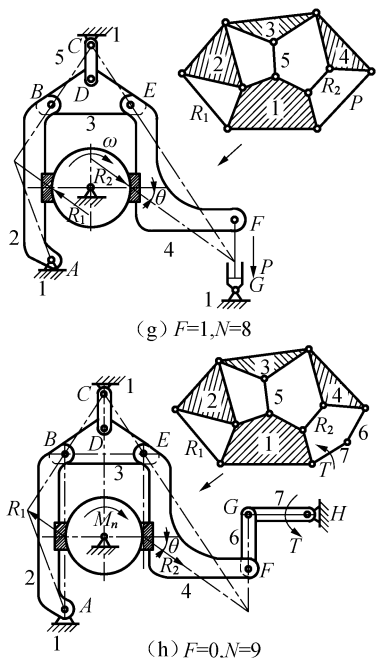


图9 制动器的多方案结构图

Fig.9 Different function structures of arrester

2) 选择同一运动链不同的工作构件实现同一功能

多方案设计的另一种形式是选择同一运动链,根据工作环境及外部条件的要求,选择不同的构件作为工作构件来实现同一自适应功能的多种方案的功能结构设计.如图10所示,图(b~d)为通过选择不同的工作构件得到的夹紧装置.

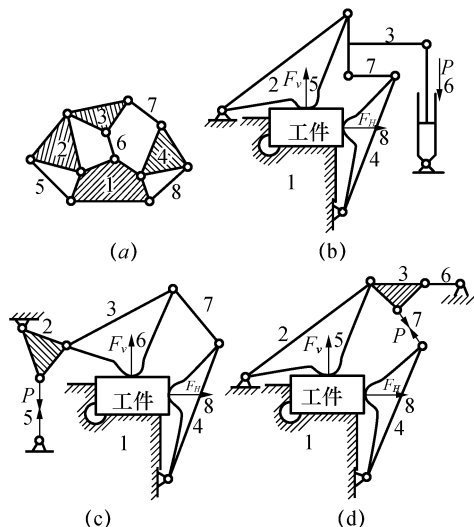


图10 同运动链不同工作构件的夹紧装置多方案结构

Fig.10 Structures of clamp device with different operation members of same kinematic chain

这三种方案都能够实现可靠的夹紧工作,而且都具有自动适应两个参数变化的功能,只是在空间布置及力的增益效果上,方案(b)更具有优势.

3 结 论

系统地提出了通过选择自适应机构初始运动链中适当的构件作为力封闭构件来设计力封闭自适应机构的创新设计方法.指出了设计需考虑且必须解决的主要问题,介绍了在功能结构设计中自适应机构初始运动链的选择方法和步骤,给出了自适应机构功能结构设计的原则和详细步骤.

通过示例指出既可以利用同一初始运动链设计出不同功能要求的自适应机构;也可以应用不同自由度特征的初始运动链设计出具有相同功能要求的自适应机构;还可以利用多种运动链设计完成相同功能的自适应机构;还可以选择同一运动链,通过选择不同的工作构件来设计具有相同功能要求的自适应机构.

设计实例充分论证了本文提出的自适应机构的创新设计方法是切实可行的,为自适应机构的不断创新与应用拓展提供了重要的理论依据及具有工程实际价值的范例.

参考文献:

- [1] Birglen L, Gosselin C. Kinetostatic analysis of underactuated fingers[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(2): 211-221.
- [2] 郭宗和, 马履中, 杨启志. 基于变胞原理的变自由度机构拓扑型分析[J]. 中国机械工程, 2006, 16(1): 1-4.
- [3] 张文增, 陈强, 孙振国, 等. 拟人机器人手的设计与实现[J]. 机械工程学报, 2005, 41(5): 123-126.
- [4] 曲志刚, 安子君, 杜秀菊, 等. 变自由度机构的功能及应用研究[J]. 机械传动, 2001, 25(2): 6-8.
- [5] 张文增, 陈强, 孙振国, 等. 高欠驱动的拟人机器人多指手[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(5): 587-600.
- [6] 骆敏舟, 梅涛, 汪小华. 形状自适应欠驱动三关节机器人手指设计[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2005, 17(2): 353-358.
- [7] 罗金良. 可变约束和机械自适应结构的综合设计与应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [8] 罗金良, 黄茂林, 文群. 内力封闭自适应机构初始运动链综合的胚图支链法[J]. 中国机械工程, 2007, 18(12): 1470-1474.