

文章编号:1000-582X(2002)05-0021-04

平面机构过约束分析方法的综合应用^{*}

安培文, 黄茂林

(重庆大学机械工程学院, 重庆 400044)

摘要:平面闭链机构及机械系统中广泛存在的过约束导致了机械性能的一系列有害影响,已经受到机械结构设计者的充分重视,提出了多种机构过约束的分析方法,但是这些方法还存在一些不足,还需进一步发展完善。笔者针对2种常用的机构过约束分析方法公式计算法和回路自由度分析法存在的不足,在对其深入、系统研究的基础上,将2种方法相结合,得到了一种较实用的、且便于计算机辅助分析的机构过约束分析方法,并提出了一些机构过约束分析的新的见解。

关键词:机构过约束;公式计算法;回路自由度分析法

中图分类号:TH112

文献标识码:A

由于不可避免的制造误差,平面闭链机构中广泛存在的过约束造成对机械性能的一系列有害影响,因而越来越受到机械结构设计者的重视。要有效地消除或减小过约束造成的有害影响,使机构及机械系统具有自调、自适应性以及制造、装配的顺应性,首要的问题是要能够快速、准确地确定机构中存在的过约束,包括过约束的数量、类型及其所在回路,因而对机构过约束的分析方法进行深入、系统的研究具有十分重要的理论价值和实际意义。目前,已有多种机构过约束的分析方法,但是这些方法还存在一些不足,还需进一步发展完善。笔者针对公式计算法和回路自由度分析法存在的不足,在对其深入、系统研究的基础上,将两种方法相结合,得到了一种较实用的、且便于计算机辅助分析的机构过约束分析方法,并提出了一些机构过约束分析的新的见解。

1 公式计算法和回路自由度分析法存在的不足

1.1 公式计算法及其存在的不足

机构过约束的公式计算法有多种,但易于理解和应用的有马雷舍夫公式和阿诺尔公式两种^[1-2]。

马雷舍夫公式如下:

$$q = F - 6n + \sum_{i=1}^5 ip_i \quad (1)$$

其中: $F = F_0 + F_p$

式中: F_0 是机构的基本自由度, F_p 是机构中的局部自由度(包括构件的局部自由度和杆组的局部自由度), q 是机构的过约束数, n 是机构中的活动构件数, p_i 是机构中 i 级运动副的数量。

阿诺尔公式如下:

$$q = F + 6k - f \quad (2)$$

式中: q 和 F 同上, k 是机构中的闭合回路数, f 是机构中运动副的自由度数之和。

由式(1)、(2)可以看出,利用公式计算法计算机机构的过约束时必须已知机构的自由度 F (包括机构的基本自由度 F_0 和机构中的局部自由度 F_p),然而,在进行消除或减小过约束影响的自由度设计时,局部自由度事先常常是难以知道和确定的,因而造成了公式计算法应用的困难和局限性,尤其是公式计算法对机械系统设计缺乏具体的指导作用。例如对于图1所示的曲柄滑块机构,通常都只注意其基本自由度,即构件 AB 的定轴转动, $F = 1$, 则 $q = 1 - 6 \times 3 + 5 \times 2 + 4 + 3 = 0$, 若用回路自由度分析法分析,将会发现该机构的自由度 $F = 2$, 其中一个是局部自由度,且该机构存在一个过约束。此外,公式计算法虽然可以快速、准确地得到机构中的过约束数量,但是无法确定机构中过约束的类型和所在回路,这是公式计算法的另一个不足之处。

* 收稿日期:2002-01-05

基金项目:国家自然科学基金资助(50075087)、油气藏地质及开发工程国家重点实验室基金(PLN9909)

作者简介:安培文(1964-),男,山西人,重庆大学博士研究生,主要从事机械原理教学及机构学的研究工作。

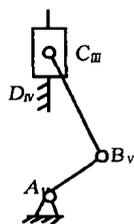


图1 曲柄滑块机构

1.2 回路自由度分析法及其存在的不足

在分析、设计机构和机械系统时,应当能够确定系统中任一存在的自由度和过约束,以便评价设计的合理性。运用前述的公式计算法还难以确定过约束的类型和所在回路,究其原因在于:首先,公式计算法没有将自由度(或约束)明确地进行分类,即没有将6个自由度分为平面自由度(s_x, s_y 和 θ_z)与非平面自由度(θ_x, θ_y 和 s_z),其中, s 表示沿坐标轴的移动自由度, θ 表示绕坐标轴的转动自由度;其次,公式计算法是以运动副的自由度(或约束)为对象进行分析计算,而忽视了自由度和约束在机构回路中构件间的传递和衍生。因此,在对机构进行过约束分析时必须注意以下2点:

1) 应对运动副的自由度进行分类;

2) 应进行自由度“替代”。鉴于此,为了弥补公式计算法的不足,并得到既可用于过约束分析、又可用于消除或减小过约束影响设计的过约束分析方法,因而提出了以自由度的分解和替代为基础、以闭合回路为对象的回路自由度分析法。

对于闭链机构而言,要在无应力情况下实现装配,即要在无障碍情况下使回路闭合,必须满足 $\theta_x \geq 1, \theta_y \geq 1$ 和 $\theta_z \geq 1$ (其中, θ_x, θ_y 和 θ_z 分别表示绕 x, y 和 z 轴的转动自由度)。这些自由度缺少一个就意味着机构装配时由于制造误差的影响,构件将产生变形。对于移动自由度 s_x, s_y 和 s_z ,当存在多余的转动自由度时,上述条件是不必要的。这是因为末杆的移动自由度可以由转动自由度衍生出来,也就是说移动自由度可以由转动自由度来“替代”。应当注意的是,“替代”移动自由度时必须要有相应的替代构件(或“集构件”,即构件组);一个转动自由度只能“替代”一个相应的移动自由度,但移动自由度不可能实现对转动自由度的“替代”。

下面以图2所示的六杆机构为例来说明机构中过约束分析的回路自由度分析法。在分析时需将该机构划分为 ABCD 和 DEFG 两个回路,其过约束分析过程和结果如表1所示,并将表1称之为该机构的结构简图。在结构简图中,将运动副的自由度分为平面自由度

(s_x, s_y 和 θ_z) 和非平面自由度(θ_x, θ_y 和 s_z) 两类,其中,中栏为平面自由度,右栏为非平面自由度,左栏表示回路构成。每个字母在机构简图中表示运动副,在结构简图中则标明一个相应的自由度。字母在结构简图中出现的次数与该运动副的自由度相同,若为0,则表示回路中所有运动副缺少的自由度。自由度“替代”用带箭头的折线表示,箭头指向相应的0,折线上的2根小引线所指为相应的替代构件。如果箭头向上且不指向0,则表示机构的自由度(包括基本自由度和局部自由度),这时,2根小引线所指为输出(或具有)该自由度的构件。仔细观察表1中的分析结果可以看出,该机构具有一个自由度(即该机构的基本自由度),存在绕 x 轴、 y 轴转动的过约束和沿 z 轴移动的过约束,即 $q_{\theta_x} = 1, q_{\theta_y} = 1$ 和 $q_{s_z} = 1$ 。

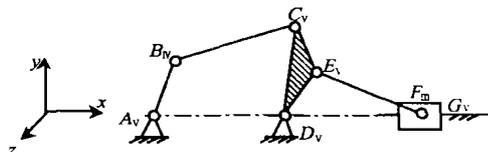


图2 六杆机构

表1 过约束分析

	$s_x + s_y + \theta_z$			$\theta_x + \theta_y + s_z$		
ABCD	0	0	0	0	0	B
DEFG	G	0	EF	F	F	0

由上述利用回路自由度分析法对机构进行过约束分析的过程可以看出,回路自由度分析法可以得到机构中过约束的数量、类型及其所在回路,但该方法复杂、繁琐,且还需划分机构中的回路(若研究的机构比较复杂,划分回路时可能会遇到困难),因而不便于一般的机械设计人员掌握和使用;另外该方法也不便于计算机辅助过约束分析的实现。

2 两种方法的改进与综合应用

为了克服公式计算法需已知自由度 F 的不足,可以将式(2)的形式改变一下,即可以将其变为如下的形式:

$$q - F = 6k - f \tag{3}$$

式中 k 可由公式^[4]: $k = 1 + p - N$ (其中: k 是机构中的回路数, N 是机构中的构件数, p 是机构中的运动副数) 计算得到。

通过计算 $6k - f$, 然后再进行自由度“替代”, 可得出 $q - F$ 的值, 最后根据得到的 $q - F$ 值即可确定机构中存在的过约束, 同时还可确定机构的自由度(包括机

构的基本自由度和局部自由度)。为方便计算, 给出表 2 如下(注: 自由度符号根据式(3) 约定为负号)。

表 2 机械过约束分析计算表

	$s_x + s_y + \theta_z$			$\theta_x + \theta_y + s_z$		
P_V	$-s_{V_x}$	$-s_{V_y}$	$-\theta_{V_z}$	$-\theta_{V_x}$	$-\theta_{V_y}$	s_{V_z}
$2P_{IV}$	$-s_{IV_x}$	$-s_{IV_y}$	$-\theta_{IV_z}$	$-\theta_{IV_x}$	$-\theta_{IV_y}$	$-s_{IV_z}$
$3P_{III}$	$-s_{III_x}$	$-s_{III_y}$	$-\theta_{III_z}$	$-\theta_{III_x}$	$-\theta_{III_y}$	$-s_{III_z}$
$4P_{II}$	$-s_{II_x}$	$-s_{II_y}$	$-\theta_{II_z}$	$-\theta_{II_x}$	$-\theta_{II_y}$	$-s_{II_z}$
$5P_I$	$-s_{I_x}$	$-s_{I_y}$	$-\theta_{I_z}$	$-\theta_{I_x}$	$-\theta_{I_y}$	$-s_{I_z}$
$6k$	k	$+k$	$+k$	k	$+k$	$+k$
自由度替代	$-\sum_{i=1}^V s_{ix} + x - \sum_{i=1}^V s_{iy} + k - \sum_{i=1}^V \theta_{iz} + k$			$-\sum_{i=1}^V \theta_{ix} + k - \sum_{i=1}^V \theta_{iy} + k - \sum_{i=1}^V s_{iz} + k$		
$q - F$						

利用表 2 对机构进行过约束分析时, 在自由度替代完成后, 对应的自由度符号如下: 如果 $q - F < 0$, 表示机构具有相应的自由度, 其绝对值为机构的该自由度数; 如果 $q - F = 0$, 表示机构无相应的过约束; 如果 $q - F > 0$, 则表示机构存在相应的过约束。

下面用上述方法对图 2 所示的机构进行过约束分析, 其分析过程与结果如表 3 所示。从表 3 所列的分析过程可以看出, 进行了 $6k - f$ 的计算后, $\theta_z = 4$ 。利用替代构件和 3 个多余的 θ_z “替代” 缺少的自由度 s_x 和 s_y (替代过程用带箭头的折线表示, 其中折线上的数字表示替代次数) 后, $\theta_z = 1$ 为机构的基本自由度。另外, 根据替代后 $q - F$ 的数值可以得出, 该机构无平面过约束, 而存在绕 x 轴、 y 轴转动的过约束和沿 z 轴移动的过约束, 即 $q_{0x} = 1$ 、 $q_{0y} = 1$ 和 $q_{0z} = 1$ 。分析结果与回路自由度分析法的结果完全一致。

表 3 过约束分析

	$s_x + s_y + \theta_z$			$\theta_x + \theta_y + s_z$		
$p_V = 5$	-1	+0	-4	0	+0	+0
$p_{IV} = 1$	0	+0	-1	0	+0	-1
$p_{III} = 1$	0	+0	-1	-1	-1	+0
$6k$	2	+2	+2	2	+2	+2
$6k - f$	2	+2	-4	1	+1	+1
自由度替代						
$q - F$	0	+0	-1	1	+1	+1

3 结束语

由文中得到的方法对图 2 所示的六杆机构进行过约束分析, 其结果与回路自由度分析法的结果是一致的, 说明文中得到的方法是完全正确和可行的, 而且在分析过程中不需要已知机构的自由度 F , 也不需对机构划分回路; 另外由于采用了数字化的分析过程, 所以非常便于计算机辅助过约束分析的实现。但是, 应该注意到, 本文得到的方法不能确定过约束所在的回路。如何将该方法再进一步发展完善, 并利用可视化程序设计语言(如 VB、VC 等) 实现计算机辅助过约束分析, 从而得到机构中过约束的数量、类型及其所在回路, 还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Релистов Л. Н. Самоустанавливающиеся механизмы [M]. Москва: Машиностроение, 1985.
- [2] 秦伟. 基于约束的自调机械结构理论与工程设计研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 1999.
- [3] MAVROIDIS C, ROTH B. Analysis of Overconstrained Mechanisms [J]. Transactions of the ASME, 1995, 117(3): 69-74.
- [4] 曹惟庆. 机构设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [5] Озол О. Г. 机械原理教程 [M]. 唐炜柏, 黄茂林等译. 重庆: 重庆大学出版社, 1992.
- [6] HAUG E. J. 机械系统的计算机辅助运动学和动力学 [M]. 刘兴祥译. 北京: 高等教育出版社, 1996.

Synthetic Application for Analysis Methods of the Planar Mechanism Overconstraints

AN Pei - wen, HUANG Mao - lin

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Overconstraints exist widely in planar closed chain mechanisms and mechanical systems result in a series of detrimental influences on behavior of machines, and attention is given to them by machine designer. Some analysis methods of overconstraints in planar closed chain mechanisms are presented, and more study due to the faultiness of these methods. In accordance with faultiness of two common kind of methods, formulas method and loop analysis method of degrees of freedom, and by combining these two methods, an useful mechanism overconstraints analysis method which is convenient for computer aided overconstraints analysis is gained via research on the two methods thoroughly and systematically, and some new views about mechanism overconstraints analysis are presented.

Key words: mechanisms overconstraints; formulas method; loop analysis method of degrees of freedom

(责任编辑 张小强)

~~~~~  
(上接第 20 页)

## Order Tracking Method Based on Time-Frequency Analysis

*GUO Yu, QIN Shu - ren, LIANG Yu - qian*

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The fault character of moving parts of rotating machinery most time is speed-related. The method of order spectrum analysis is more efficient than usual frequency analysis. Two general methods for realizing order tracking are discussed, and a new order tracking method based on time - frequency analysis is proposed. The time-frequency order tracking method only depends on software for order tracking, which is a strong supplement to traditional methods, and specially satisfied the require of virtual instruments, so there is a good prospect for its using.

**Key words:** rotating machinery; order tracking; time-frequency analysis; virtual instruments

(责任编辑 成孝义)