

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.01.006

3(3-RPS) 并-串联机构及其运动学分析研究^{*}

梁 辉, 胡同帅, 王 蕾, 杨加礼
(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要:针对并联机构运动学和动力学性能方面存在的问题,提出了一种新结构-3(3-RPS)并-串联机构,对3(3-RPS)并-串联机构进行了运动学方面的研究,对3(3-RPS)并-串联机构的结构特点进行了介绍,利用螺旋理论及修正的Kutzbach-Grüble公式对3(3-RPS)并-串联机构进行了自由度计算,利用机构影响系数法和螺旋理论对3(3-RPS)并-串联机构的速度和加速度进行了建模,得到了3(3-RPS)并-串联机构速度和加速度的理论模型,利用工程分析软件ADAMS和Abaqus对3(3-RPS)并-串联机构进行了运动学仿真及结构受力分析,得到了上平台在空间中的速度和加速度曲线变化图与机构的结构受力变形图。研究表明:3(3-RPS)并-串联机构的自由度数为9,速度和加速度值等于各层之和;本研究分析3(3-RPS)并-串联机构运动学的方法也适合其他并-串联机构。

关键词:并-串联机构;自由度;速度;加速度;仿真

中图分类号:TH112

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)01-0028-06

3(3-RPS) Parallel-serial manipulator and its kinematics analysis

LIANG Hui, HU Tong-shuai, WANG Lei, YANG Jia-li

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Aiming at the kinematics and dynamics performance of parallel mechanism, a novel structure-the 3(3-RPS) parallel-serial manipulator was proposed, and its aspects of the kinematics were studied. The 3(3-RPS) parallel-serial manipulator structural features were introduced, and the degrees of freedom of the 3(3-RPS) parallel-serial manipulator were calculated based on screw theory and Kutzbach-Grüble formula. The velocity and the acceleration models of the 3(3-RPS) parallel-serial manipulator were established based on the theory of influence coefficient and screw theory, and the velocity and the acceleration theoretical models of the 3(3-RPS) parallel-serial manipulator were given. The kinematic simulation and mechanical analysis to the 3(3-RPS) parallel-serial manipulator were done by engineering analysis software ADAMS and Abaqus, and curves of velocity and acceleration of the top platform in space and distribution of stress deformation of mechanism were given. The results indicate that the degrees of freedom of the 3(3-RPS) parallel-serial manipulator are 9, and the velocity and the acceleration value are equal to the sum of the layers. The methodology for analyzing the 3(3-RPS) parallel-serial manipulator kinematics is also suitable for other parallel-serial manipulators.

Key words: parallel-serial manipulator; degrees of freedom; velocity; acceleration; simulation

0 引 言

近几十年来,并联机构引起了国内外学者的广泛研究,新机构不断涌现^[1-3],尤其在少自由度并联机构

领域出现了很多性能优越的新构型,例如,3-RPR,3-PSR,3-RRS,3-UPU,3-RRUR,4-CRR,4-UPU,4-RRUR等。将多个少自由度并联机构串接成多层并-串联机构是该领域未来发展的新方向,此类机构大多有6个

收稿日期:2016-07-19

基金项目:国家自然科学基金青年资助项目(51305219);山东省自然科学基金青年资助项目(ZR2013EEQ020)

作者简介:梁 辉(1971-),男,山东青岛人,博士,副教授,主要从事并联运动机床(机器人)及其机构学理论、先进加工装备及控制技术方面的研究。E-mail:ilianghui@126.com

或者6个以上的自由度,对于改善机构的运动学和动力学性能具有重要意义。这类机构在整体上可以理解为串联机构,不过是用少自由度并联机构代替了传统的串联机构的构件。因此,这类机构不仅具有并联机构的优点,还兼具了串联机构的优势。

目前国内外针对多层并-串联机构的相关研究很少,且针对这类机构研究也多停留在由两个并联机构串联而成的机型上^[4-5]。Lu^[6]将2个3-RPS机构串接起来,设计出一种6自由度2(3-RPS)并-串联机构。文献[7-8]对该机构进行了更加深入的探讨。Gallardo^[9]对Lu提出的2(3-RPS)并-串联机构进行了动力学和运动学分析。Arash Rahmani^[10]研究了由2个6-UPS并联机构串联起来的2(6-UPS)并-串联机构,并对该机构进行了正向求解。Fan^[11]对3-PRS并-串联机床的主轴运动平台进行了敏感性分析。Zheng^[12]在其发表的文章中对3-UPU并联机构及2(3-UPU)并-串联机构进行了动力学分析。胡波^[13]提出了2(SP+SPR+SPS)并-串联机构和2(3-SPR)并-串联机构,并以这两个机构为例介绍了并-串联机构的运动学、静力学、刚度求解方法。对三层及多层并-串联机构方面的研究,李树军^[14]给出了一种由上下平台及2个中介平台和12个运动副组成的三层闭环空间3自由度并-串联机构。胡波、宋春晓^[15]建立了一种多层并-串联机构的静力学和刚度模型,通过对机构模型进行有限元分析和模拟仿真,验证了机构刚度和变形模型的正确性。梁辉^[16]以2(3-RPS)为例,运用螺旋理论得到了三层及多层3-RPS并-串联机构的静力雅克比矩阵,通过分析矩阵是否降秩,研究了该机构的奇异位形。

本研究致力于采用虚拟机构的影响系数法对3(3-RPS)并-串联机构进行运动学分析,并利用ADAMS软件对该机构进行运动学模拟仿真,得到分析曲线图,以验证理论结果的正确性。针对3(3-RPS)并-串联机构进行的运动学分析可为其他多层并-串联机构在此方面的研究提供一定的理论参考基础。

1 机构介绍及其自由度计算

1.1 机构特点

本研究的3(3-RPS)并-串联机构是由3个具有相同构型的3-RPS并联机构串联而成的机构。它的每一层都是一个3-RPS并联机构,每一个3-RPS并联机构是由一个下平台、一个上平台以及连接上下平台的3条RPS支链组成,每条支链通过球副S与上平台联接,通过转动副R与下平台连接,中间是移动副P,作为驱动

副。其中,第2个3-RPS并联机构的下平台与第1个3-RPS并联机构的上平台共用一个平台,并且中心重合,第3个3-RPS并联机构的下平台与第2个3-RPS并联机构的上平台共用一个平台,并且中心重合。3(3-RPS)并-串联机构模型及其机构简图如图1所示。

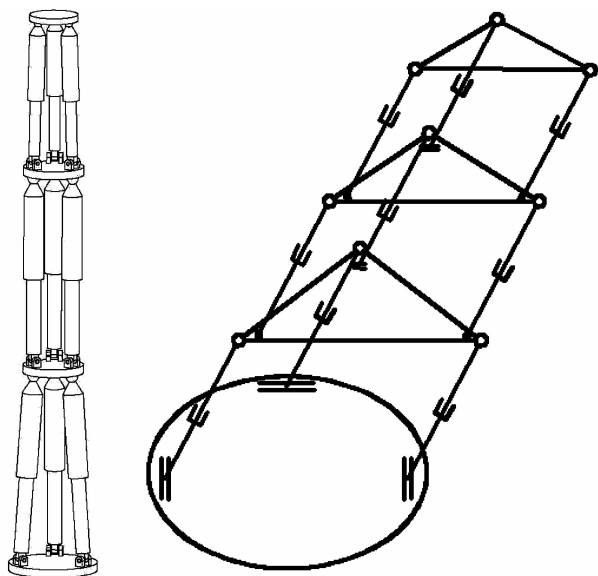


图1 3(3-RPS)并-串联机构模型及机构简图

1.2 机构的自由度计算

螺旋理论是研究机构自由度^[17]的一种重要工具,3(3-RPS)并-串联机构CAD结构模型如图2所示。

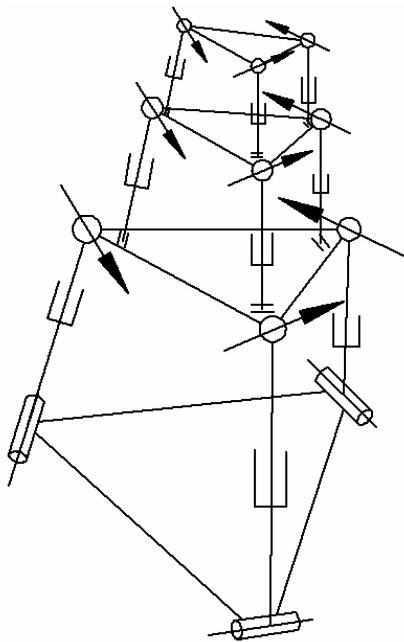


图2 3(3-RPS)并-串联机构的CAD结构模型

从图2中可以看出,该机构一共有9个运动反螺旋矢量,每条支链的约束反螺旋经过该支链球铰中心,且平行于转动副轴线。结合在不同空间几何关系下螺

旋矢量的线性相关性可知,在非奇异形下,所有支链所组成的反螺旋系的最大线性无关数是 6,所以,该并-串联机构既没有公共约束,也没有冗余约束,用修正的 Kutzbach-Grüble 公式计算 3(3-RPS)并-串联机构的自由度为:

$$M = d(I - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v - \zeta = 6(22 - 27 - 1) + 45 = 9 \quad (1)$$

式中: M —机构的自由度, d —机构的阶, I —含机架在内的构件数目, g —机构运动副的数目, f_i —第 i 个运动副的自由度, v —冗余约束的个数, ζ —局部自由度。

2 速度与加速度分析

2.1 3(3-RPS) 并 - 串联机构的虚拟机构法

3(3-RPS) 并 - 串联机构的虚拟机构法,就是把每条支链上的运动副用单自由度的运动副表示出来。根据 RPS 支链运动副的特点,支链上的转动副和移动副无需改变,只需要将支链上的球副转化为 3 个共点不共面的转动副来表示。为了将每一层 3-RPS 并联机构虚拟转化为 6 自由度机构,需要将每条分支增加一个杆和一个运动副,为了计算方便,所增加的转动副轴线的矢量方向应该与原来的分支所构成的螺旋系线性无关。

3(3-RPS) 并 - 串联机构的虚拟机构如图 3 所示。

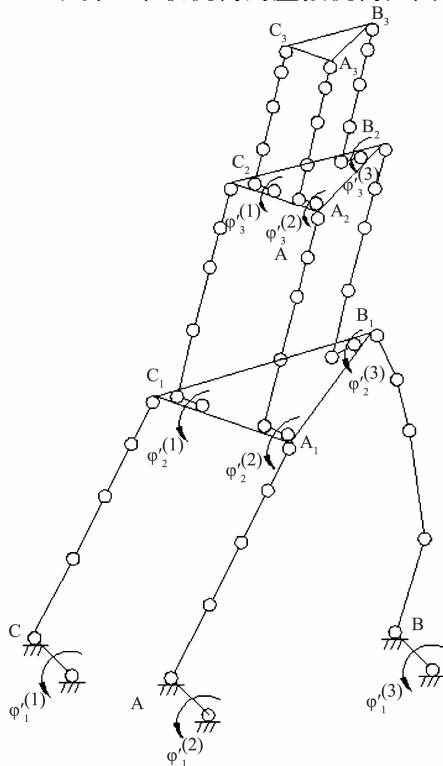


图 3 3(3-RPS) 并 - 串联机构运动平台的虚拟机构

为了使虚拟机构的运动与原始机构相同,所增加的运动副的运动必须为 0,因此对每一级虚拟机构有下式成立:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_1^{(1)} &= \dot{\varphi}_1^{(2)} = \dot{\varphi}_1^{(3)} = 0 \\ \dot{\varphi}_2^{(1)} &= \dot{\varphi}_2^{(2)} = \dot{\varphi}_2^{(3)} = 0 \\ \dot{\varphi}_3^{(1)} &= \dot{\varphi}_3^{(2)} = \dot{\varphi}_3^{(3)} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\dot{\varphi}_i^{(i)}$ ($i = 1, 2, 3$)—第 i 个分支的第 1 个转动副的速度。

2.2 3(3-RPS) 并 - 串联机构的速度分析

从基座开始,笔者把每一层 3-RPS 并联机构编上号,分别为 1、2、3 号。设每一层并联机构的上平台相对下平台的速度为 v_H^h (其中: $h = 1, 2, 3$),那么,3(3-RPS) 并 - 串联机构平台末端执行器的速度为:

$$v_H = \sum_{h=1}^n v_H^h \quad (3)$$

从 1 号开始进行速度分析,对于其中的一个分支有如下关系:

$$v_H^1 = [G_\varphi^H]^{(i)} \dot{\varphi}^{(i)} \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

式中: $[G_\varphi^H]^{(i)}$ —第 i 个分支的一阶影响系数。

因为 $[G_\varphi^H]^{(i)}$ 一定为非奇异,式(4)有逆解为:

$$\dot{\varphi}^{(i)} = [G_\varphi^H]^{(i)-1} v_H^1 \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

因此,当知道机构的位置和上平台的 6 维运动,就可以计算各条分支中任何铰链的速度。因为原机构平台的运动是由 3 个主动杆的伸长决定的,而虚设的 3 个杆在分析中不发生运动,所以下式成立:

$$(\dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2 \cdots \dot{\varphi}_6)^{T(i)} = [0 \dot{\varphi}_2 L_3 \dot{\varphi}_4 \cdots \dot{\varphi}_6] \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

从式(7)的每个矩阵式中取出 2 个线性方程,并进行合并得:

$$\dot{q}_1 = [G_H^q] v_H^1 \quad (7)$$

式中: $\dot{q}_1$ —机构的广义输入速度, $[G_H^q]$ —并联机构的雅克比矩阵。

$$\dot{q}_1 = (L_1 \quad L_2 \quad L_3 \quad 0 \quad 0 \quad 0) \quad (8)$$

$$[G_H^q] = \begin{bmatrix} [G_\varphi^H]_{3;}^{(1)-1} \\ [G_\varphi^H]_{3;}^{(2)-1} \\ [G_\varphi^H]_{3;}^{(3)-1} \\ [G_\varphi^H]_{1;}^{(1)-1} \\ [G_\varphi^H]_{1;}^{(2)-1} \\ [G_\varphi^H]_{1;}^{(3)-1} \end{bmatrix} \in R^{6 \times 6} \quad (9)$$

对式(7)求逆解,当 $[G_H^q]$ 在该位置非奇异时得:

$$v_H^1 = [G_H^q] \dot{q}_1 \quad (10)$$

式中: v_H^1 —1 号 3-RPS 并联机构的速度。

同理,求出 v_H^2, v_H^3 。因此,3(3-RPS) 并-串联机构平台末端执行器的速度为:

$$v_H = v_H^1 + v_H^2 + v_H^3 \quad (11)$$

2.3 3(3-RPS) 并-串联机构的加速度分析

笔者分析3(3-RPS) 并-串联机构的加速度,同样使用虚拟机构法。对每条分支都添加一个杆件和一个回转副,保证回转副的轴线与分支其它轴线所构成的螺旋线线性无关,同时虚设杆的速度和加速度为0。笔者从下往上先分析1号3-RPS 并联机构的加速度,可以得到其上平台的加速度列矢量关系:

$$\mathbf{A}_H^1 = \dot{\boldsymbol{\varphi}}^T [\mathbf{H}_\varphi^H] \dot{\boldsymbol{\varphi}} + [\mathbf{G}_\varphi^H] \ddot{\boldsymbol{\varphi}} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{A}_H^1$ —1号3-RPS 并联机构的加速度, $[\mathbf{H}_\varphi^H]$ —机构的二阶影响系数, $[\mathbf{G}_\varphi^H]$ —机构的一阶影响系数, $\ddot{\boldsymbol{\varphi}}$ —运动副的相对角加速度。

每条分支又有如下关系:

$$\ddot{\boldsymbol{\varphi}}^r = [\mathbf{G}_\varphi^H]^{(r)-1} \{ \mathbf{A}_H^1 - \dot{\boldsymbol{\varphi}}^{(r)T} [\mathbf{H}_\varphi^H]^{(r)} \dot{\boldsymbol{\varphi}}^{(r)} \} \quad r = 1, 2, 3 \quad (13)$$

从式(14)所表示的18个线性方程中取出含有 $\ddot{\boldsymbol{\varphi}}_1^{(1)}, \ddot{\boldsymbol{\varphi}}_1^{(2)}, \ddot{\boldsymbol{\varphi}}_1^{(3)}, \ddot{\boldsymbol{\varphi}}_3^{(r)} = \mathbf{L}_r (r = 1, 2, 3)$ 的6个方程:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\boldsymbol{\varphi}}_3^{(1)} &= [\mathbf{G}_\varphi^H]_{3;:}^{(1)-1} \{ \mathbf{A}_H^1 - \dot{\boldsymbol{\varphi}}^{(1)T} [\mathbf{H}_\varphi^H]^{(1)} \dot{\boldsymbol{\varphi}}^{(1)} \} \\ \ddot{\boldsymbol{\varphi}}_3^{(2)} &= [\mathbf{G}_\varphi^H]_{3;:}^{(2)-1} \{ \mathbf{A}_H^1 - \dot{\boldsymbol{\varphi}}^{(2)T} [\mathbf{H}_\varphi^H]^{(2)} \dot{\boldsymbol{\varphi}}^{(2)} \} \\ \ddot{\boldsymbol{\varphi}}_3^{(3)} &= [\mathbf{G}_\varphi^H]_{3;:}^{(3)-1} \{ \mathbf{A}_H^1 - \dot{\boldsymbol{\varphi}}^{(3)T} [\mathbf{H}_\varphi^H]^{(3)} \dot{\boldsymbol{\varphi}}^{(3)} \} \\ \ddot{\boldsymbol{\varphi}}_1^{(1)} &= [\mathbf{G}_\varphi^H]_{1;:}^{(1)-1} \{ \mathbf{A}_H^1 - \dot{\boldsymbol{\varphi}}^{(1)T} [\mathbf{H}_\varphi^H]^{(1)} \dot{\boldsymbol{\varphi}}^{(1)} \} \\ \ddot{\boldsymbol{\varphi}}_1^{(2)} &= [\mathbf{G}_\varphi^H]_{1;:}^{(2)-1} \{ \mathbf{A}_H^1 - \dot{\boldsymbol{\varphi}}^{(2)T} [\mathbf{H}_\varphi^H]^{(2)} \dot{\boldsymbol{\varphi}}^{(2)} \} \\ \ddot{\boldsymbol{\varphi}}_1^{(3)} &= [\mathbf{G}_\varphi^H]_{1;:}^{(3)-1} \{ \mathbf{A}_H^1 - \dot{\boldsymbol{\varphi}}^{(3)T} [\mathbf{H}_\varphi^H]^{(3)} \dot{\boldsymbol{\varphi}}^{(3)} \} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

将式(11)代入式(6)得:

$$\dot{\boldsymbol{\varphi}}^{(r)} = [\mathbf{g}_q^e] \dot{\mathbf{q}}_1 \quad r = 1, 2, 3 \quad (15)$$

式中: $\mathbf{g}_q^e$ —导出的 6×6 影响系数矩阵。

将式(15)代入式(14)并按照速度的分析方法将式(14)化简:

$$\ddot{\mathbf{q}}_1 = [\mathbf{G}_H^q] \mathbf{A}_H^1 - \left\{ \begin{aligned} &\dot{\mathbf{q}}_1^T [\mathbf{L}]^{(1)} \dot{\mathbf{q}}_1 \\ &\dot{\mathbf{q}}_1^T [\mathbf{L}]^{(2)} \dot{\mathbf{q}}_1 \\ &\vdots \\ &\dot{\mathbf{q}}_1^T [\mathbf{L}]^{(6)} \dot{\mathbf{q}}_1 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: $\ddot{\mathbf{q}}$ —广义输入加速度, $\dot{\mathbf{q}}$ —广义输入速度。

式(16)可以进一步化为:

$$\ddot{\mathbf{q}}_1 = [\mathbf{G}_H^q] \mathbf{A}_H^1 - \dot{\mathbf{q}}_1^T [\mathbf{H}_H^q] \dot{\mathbf{q}}_1 \quad (17)$$

式中: $[\mathbf{H}_H^q]$ — 6×6 标量矩阵。

这样,3(3-RPS) 并-串联机构上平台的6维加速度可以用给定的输入加速度表示为:

$$\mathbf{A}_H^1 = [\mathbf{G}_H^q]^{-1} \{ \ddot{\mathbf{q}}_1 + \dot{\mathbf{q}}_1^T [\mathbf{H}_H^q] \dot{\mathbf{q}}_1 \} \quad (18)$$

式(18)进一步化为:

$$\mathbf{A}_H^1 = [\mathbf{G}_q^H] \ddot{\mathbf{q}}_1 + \dot{\mathbf{q}}_1^T [\mathbf{H}_q^H] \dot{\mathbf{q}}_1 \quad (19)$$

式中: $\mathbf{A}_H^1$ —1号3-RPS 并联机构的加速度, $[\mathbf{H}_q^H] = [\mathbf{G}_q^H] * [\mathbf{H}_H^q]$ 。

同理,求出第2个3-RPS,第3个3-RPS 并联机构的加速度 $\mathbf{A}_H^2, \mathbf{A}_H^3$ 。因此,3(3-RPS) 并-串联机构上平台的加速度为:

$$\mathbf{A}_H = \mathbf{A}_H^1 + \mathbf{A}_H^2 + \mathbf{A}_H^3 \quad (20)$$

3 运动学仿真与结构受力分析

3.1 机构的运动学仿真

本研究利用三维绘图软件Creo对3(3-RPS)并-串联机构进行结构建模,然后将其导入到分析软件ADAMS中,并对其添加约束,该模型如图4所示。

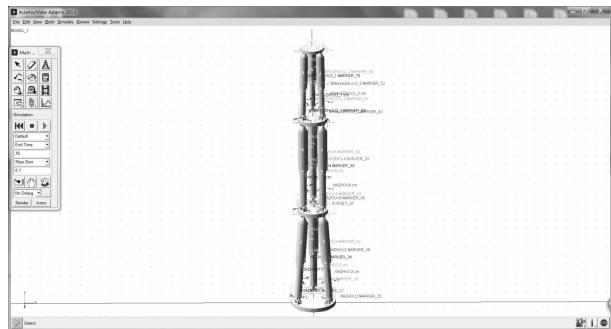


图4 导入到ADAMS中的三维模型

约束添加完成后,分别为3(3-RPS)并-串联机构的9个驱动副编号,并对驱动电机的STEP函数进行编辑。下层支链驱动副的编号依次为1、2、3,中层支链驱动副的编号依次为4、5、6,上层支链的驱动副编号依次为7、8、9,STEP函数的数值设置如表1所示。

表1 驱动副的STEP函数数值设置

驱动副	位置设置
1	STEP(time,0,0,2,50)
2	STEP(time,2,0,4,50)
3	STEP(time,4,0,6,50)
4	STEP(time,6,0,8,50)
5	STEP(time,8,0,10,50)
6	STEP(time,10,0,12,50)
7	STEP(time,12,0,14,50)
8	STEP(time,14,0,16,50)
9	STEP(time,16,0,18,50)

本研究通过仿真模拟3(3-RPS)并-串联机构的运动,测出上平台在空间中运动的变化曲线如图5所示。

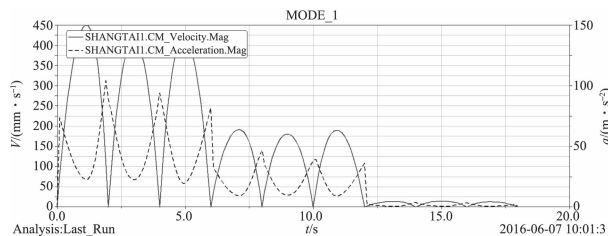


图 5 上平台在空间中运动的变化曲线

从图 5 中能够发现,上平台在 0~6 s 这个时间段内速度和加速度变化幅度最大,这是由于 3(3-RPS)并-串联机构在的上、中、下 3 层 9 个驱动副共同作用下导致的;在 7 s~12 s 这个时间段内速度和加速度变化幅度相对减小,这是由于该机构在中间和上层 6 个驱动副作用下导致的;在 13 s~18 s 这个时间段内变化幅度最小,这是由于该机构只在上层 3 个驱动副作用下的结果。因此,当上、中、下 3 层结构的 9 个驱动副共同作用时,上平台的速度和加速度变化最大,这也与式(11)和式(20)所表达的规律相符。

3.2 机构的结构受力分析

机构的设计合理性判别的一种重要指标是结构受力。笔者建立 3(3-RPS)并-串联机构的实体模型,将其导入到分析软件 Abaqus 中,设置相关参数,其中实体单元为 45 号钢,弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5$ MPa,泊松比 $\gamma = 0.29$,密度为 $\rho = 7.85 \times 10^{-9}$ t/mm³,采用软件系统默认的网格进行划分。本研究把 100 N 的力施加在上平台的上平面,约束条件施加在下平台的下平面,即为固定下平面,运行得到的结果如图 6 所示。

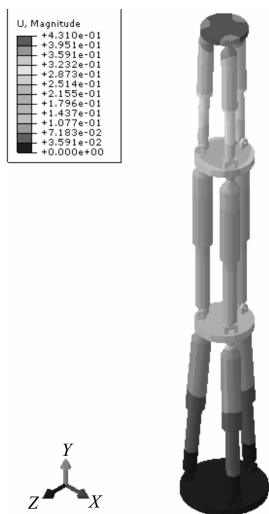


图 6 机构受力变形图

通过图 6 可以得出该机构大体的变形大小,为结构的优化和改进提供了参考。由于上部是面力的直接作用处,变形最为明显;在每个支链的杆长最长的时候,各个支链的受力是均匀的,因而受力变形分布是相同的。但是机构的位姿不同,结构的刚度变形也会有变化。

4 结束语

本研究提出了 3(3-RPS)并-串联机构,绘制出其三维模型和机构简图,并分析了该机构的结构组成、连接方式以及相关运动副特点。笔者研究了 3(3-RPS)并-串联机构的自由度、速度和加速度,并运用分析软件 ADAMS 和 Abaqus 对 3(3-RPS)并-串联机构进行了运动学仿真和结构受力分析。研究发现:

(1) 运用螺旋理论及修正的 Kutzbach-Grübler 公式计算出 3(3-RPS)并-串联机构的自由度数为 9;

(2) 基于机构影响系数法,省去了繁琐的位置方程的一次,二次求导过程,结合螺旋理论,建立了 3(3-RPS)并-串联机构的速度和加速度理论模型,为该机构的运动学分析提供了理论指导;

(3) 通过运用 ADAMS 软件对 3(3-RPS)并-串联机构进行运动学仿真,得到了上平台在空间中的速度和加速度变化曲线图;然后利用 Abaqus 软件对机构进行了结构受力分析,得到该机构的受力变形图,为结构的优化和改进提供了参考。本研究中的方法也适合其他并-串联机构。

参考文献 (References):

- [1] MERLET J P. Parallel robots [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [2] HUANG Z, LI Q C. General Methodology for Type Synthesis of Lower-Mobility Symmetrical Parallel Manipulators and Several Novel manipulators [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2002, 21(2): 131-145.
- [3] GAO F, LI W, ZHAO X. New kinematic structures for 2-, 3-, 4-, and 5-dof parallel manipulator designs [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2002, 37(11): 1395-1411.

(下转第 78 页)

本文引用格式:

梁 辉,胡同帅,王 蕾,等. 3(3-RPS)并-串联机构及其运动学分析研究[J]. 机电工程, 2017, 34(1): 28-32, 78.

LIANG Hui, HU Tong-shuai, WANG lei, et al. 3(3-RPS) Parallel-serial manipulator and its kinematics analysis [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(1): 28-32, 78.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>