文章编号:1673-0291(2015)04-0007-05 DOI:10.11860/j.issn.1673-0291-2015.04.002

基于异型部件装配的位姿调整机构设计及自由度分析

房海蓉,王 楠
(北京交通大学 机械与电子控制工程学院,北京 100044)

摘 要:针对异型金属壳体和防热套部件精确装配的特殊要求,分析确定了用于装配精确定位的位姿调整机构的基本组成,以及3R-P-2R2T位姿调整机构的自由度组合方案.重点对2R2T金属壳体位姿调整机构进行了设计与分析,提出了一种新型4-UPS/UPP对称位姿调整并联机构,完成相应的支链结构配置,并利用螺旋理论对机构自由度进行计算.结果表明:所提新型机构能够满足金属壳体的位姿调整要求.

关键词:并联机构;位姿调整;自由度;结构配置;螺旋理论
中图分类号:TH112 **文献标志码**:A

Design of posture adjustment mechanism and DOF analysis for weird complex components assembly

FANG Hairong, *WANG Nan*
(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: According to the assembly requirements for weird complex metal shell and heat shield, the function and basic components of posture adjustment mechanism is determined for precise positioning assembly. Also 3R-P-2R2T as degree of freedom (DOF) combination plan is analyzed and determined. We focus on the design and analysis of 2R2T posture adjustment mechanism for metal shell, put forward a new 4-UPS/UPP spatial parallel mechanism, complete the structure configuration of branch chains and use screw theory to calculate the DOF of the mechanism. The results show that the proposed new mechanism can meet the requirements of the position adjustment mechanism of the metal shell.

Key words: parallel mechanism; posture adjustment; degree of freedom; structure configuration; screw theory

随着航空航天技术的发展,对飞行器速度的要求越来越高,飞行器形状由传统的规则结构逐渐向异型面复杂结构转变,而飞行器表面的防热问题成为决定飞行器的安全及顺利完成各项任务的最关键因素之一.防热套[1]主要依靠辐射方式散热,其为飞行器的主要组成部分,套装在飞行器的金属壳体之外并且能保证飞行器在飞行载荷和热载荷的作用下安全可靠.

由于飞行器热结构部段为异型面复杂结构,在装配金属壳体与防热套前,对两部件进行位姿调整是精确定位装配的关键.并联机构由于刚度大、精度高、逆解容易等特点被广泛用于位姿调整中,尤其是

收稿日期:2014-12-17
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175029)
作者简介:房海蓉(1968—),女,辽宁凌源人,教授,博士,博士生导师.研究方向为机械设计、反求工程与成型加工、机电一体化.
email:hrfang@bjtu.edu.cn.

少自由度并联机构还具有控制方便、结构简单等优点[2-4]，成为调姿机构领域中研究的热点. 但是并联机构由于杆长约束等因素，工作空间较小，往往无法满足一些特殊机器人大工作空间、结构紧凑等要求，而混联机构[5]则弥补了并联机构在该方面的不足.

关于并联机构结构综合方法的研究，有金琼等[6]提出的单开链法，Hunt 提出的螺旋法等. 2002 年，方跃法和 Tsai[7]运用线几何理论和螺旋理论对纯力或纯力偶约束的支链进行了研究，并在此基础上提出了多种具有对称结构的四、五自由度并联机器人机构. 房海蓉等[8]利用螺旋理论对少自由度并联机构进行了分析和结构综合，并利用反螺旋理论对三自由度并联机器人机构进行了奇点分析.

基于此研究背景，本文作者提出了一种位姿调整机构的设计方案，用于飞行器金属壳体和防热套装配前位置与姿态的调整，并重点对带有中心链的 2R2T 金属壳体位姿调整机构进行了设计与分析（其中：R 表示机构具有的转动自由度；T 表示机构具有的移动自由度）.

1 位姿调整机构的组成

根据金属壳体和防热套精确装配的要求，必须保证两部件在装配完成后位置与姿态完全一致、对接间隙均匀且无应力. 由于飞行器金属壳体与防热套的形状不规则，为满足精确装配的要求，需要在装配开始前对两部件进行位姿调整，确保在位姿调整完成后金属壳体和防热套在位置上是对中的、姿态上是一致的. 再对两部件进行套装加压. 由此可见，金属壳体位姿调整机构还需具有较高的强度和刚度，且结构上应具有对称性和可靠性.

根据位姿调整机构的功能分析，确定位姿调整机构的基本组成如图 1 所示，主要包括金属壳体位姿调整机构、防热套位姿调整机构、移动装配装置、数据检测与采集装置和控制系统. 金属壳体位姿调整机构主要用于调整金属壳体的位姿，防热套位姿调整机构主要用于调整防热套的位姿，通过两个位姿调整机构的共同调整使金属壳体和防热套的姿态完全一致，x、y 轴位置一致. 位姿调整到位后，移动装配装置将携带防热套沿 z 轴移动，从而完成金属壳体和防热套的装配工作. 由于并联机构具有刚度大、精度高、动态性能优越、逆解容易等特点，本文作者采用并联机构作为金属壳体和防热套的位姿调整机构.

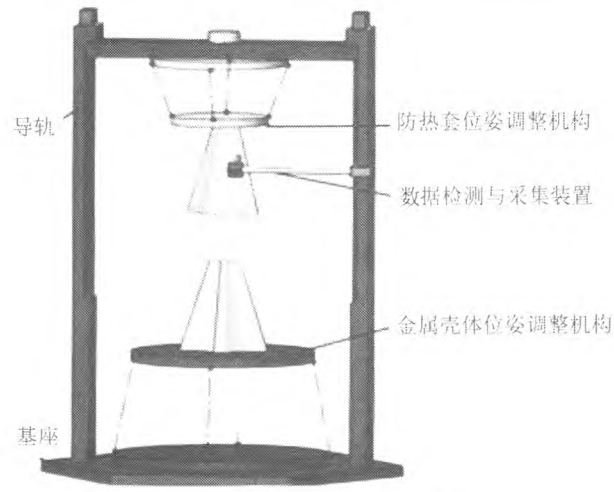


图 1 位姿调整机构基本组成

Fig. 1 Basic composition of posture adjustment system

2 位姿调整机构的自由度分析

为保证位姿调整的准确性，要求整个位姿调整机构至少具有 6 个相对自由度. 在实际装配时，移动装配加压过程只能沿铅垂方向进行，因此必须保证移动装配前两个工件的中轴线完全垂直于水平面. 考虑到将工件固定在平台时，工件会因受力不均匀而出现不同程度的轻微偏转，为保证移动装配过程顺利进行，要求金属壳体和防热套的位姿调整机构同时具有绕 x 轴和 y 轴转动的 2 个调平自由度. 根据上述分析，可以得到 8 种位姿调整机构的自由度组合方案，如表 1 所示.

确定具体位姿调整及装配过程如下：

1）位置调整. 以防热套位置为基准，利用金属壳体位姿调整机构调整金属壳体的位置，使其在 x、y 轴两个方向与防热套基准保持一致. 因此，金属壳体位姿调整机构须具有沿 x、y 轴移动两个平动自由度.

2）姿态调整. 利用金属壳体位姿调整机构调整金属壳体的姿态，直至其中轴线垂直于水平面；再以金属壳体姿态为基准，利用防热套位姿调整机构调整防热套 3 个方向的姿态，直至与金属壳体姿态达到完全一致.

3）移动装配. 位姿调整到位后，移动装配装置将携带防热套沿 z 轴移动，从而完成金属壳体和防热套的装配工作.

根据上述位姿调整过程，确定选择方案五 3R-P-2R2T 作为位姿调整机构的自由度组合方案. 以下将重点对 2R2T 金属壳体位姿调整机构进行设计与分析.

表 1　位姿调整系统自由度组合方案

Tab.1　DOF allocation plan for posture adjustment system

自由度的分配		绕 x 转动	绕 y 转动	绕 z 转动	沿 x 移动	沿 y 移动	调姿机构
方案一	防热部件调姿平台	√	√	√	√	√	3R2T
	金属壳体调姿平台	√	√				2R
方案二	防热部件调姿平台	√	√	√	√		3R1T
	金属壳体调姿平台	√	√			√	2R1T
方案三	防热部件调姿平台	√	√	√		√	3R1T
	金属壳体调姿平台	√	√		√		2R1T
方案四	防热部件调姿平台	√	√		√	√	2R2T
	金属壳体调姿平台	√	√	√			3R
方案五	防热部件调姿平台	√	√	√			3R
	金属壳体调姿平台	√	√		√	√	2R2T
方案六	防热部件调姿平台	√	√		√		2R1T
	金属壳体调姿平台	√	√	√		√	3R1T
方案七	防热部件调姿平台	√	√			√	2R1T
	金属壳体调姿平台	√	√	√	√		3R1T
方案八	防热部件调姿平台	√	√				2R
	金属壳体调姿平台	√	√	√	√	√	3R2T

3　金属壳体并联位姿调整机构的设计

3.1　并联机构组成

金属壳体位姿调整并联机构采用 2R2T 并联机构,基本组成如图 2 所示,由上平台(动平台)、下平台(基础平台)及连接上下平台的若干条支链组成.

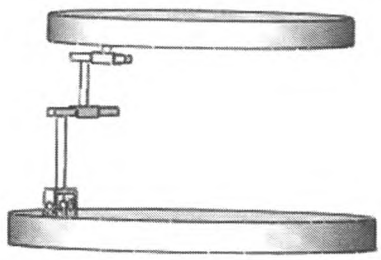


图 2　2R2T 并联机构示意图

Fig.2　Sketch map of 2R2T parallel mechanism

在对 2R2T 四自由度并联机构进行结构设计时,可分 3 种情况:①2R2T 四自由度非对称并联机构,即连接并联机构的上下平台各个支链结构不完全相同;②2R2T 四自由度完全对称并联机构,即组成并联机构所有支链的结构配置均完全相同;③由一个中间支链即约束支链加上若干个六自由度无约束驱动支链组成的带中间支链的四自由度对称并联机构.由于非对称并联机构稳定性较差,满足自由度要求的四自由度完全对称并联机构无法综合出来,本文作者采用带有中间支链的 2R2T 四自由度对称并联机构进行设计与分析.

六自由度无约束支链有 RRRRRR、SPS、UPS、URS、CPS 等多种配置方案,由于 UPS 支链具有结构简单,运动副少,控制方便等优点,本文将选择其作为无约束支链.2R2T 并联机构的动平台需具有 2 个转动自由度和 2 个移动自由度,这决定了中间约束支链必须为提供一个力约束和一个力偶约束的四自由度运动支链,即 CF 支链.

3.2　并联机构 CF 支链的结构配置

螺旋理论被广泛应用于空间机构分析和结构配置.根据螺旋理论可知,空间任何一条直线可以用一个旋量来,并联机构的每条支链也可以用运动螺旋表示出来.若两个螺旋 $\$$ 和 $\$_r$ 的互易积等于零,那么这两个螺旋互为反螺旋.根据反螺旋理论可知,当 $\$_1,\$_2,\cdots,\$_n$ 表示并联机构某一支链的运动螺旋系时,其反螺旋 $\$_r$ 表示该支链运动螺旋系施加给动平台的结构约束螺旋,即支链机械结构对动平台的约束力和力偶.

对于 2R2T 并联机器人机构,动平台需要具有 2 个移动(沿 x、y 轴)、2 个转动(绕 x、y 轴)共 4 个自由度,平台将失去沿 z 轴方向的 1 个移动自由度和绕 z 轴方向的 1 个转动自由度,因此必须有 1 个约束力螺旋和 1 个约束力偶同时作用在动平台上,即中间 CF 支链约束力螺旋的基础解为

$$\begin{cases} S_1^r = (s_1^r; s_{01}^r) = (0\ \ 0\ \ 1; 0\ \ 0\ \ 0) \\ S_2^r = (0; s_2^r) = (0\ \ 0\ \ 0; 0\ \ 0\ \ 1) \end{cases} \tag{1}$$

约束力螺旋与支链运动螺旋系中的每个螺旋均相逆,即

$$\$_r \circ \hat{\$}_i = 0 \tag{2}$$

式中 $\hat{\$}_i (i=1,\cdots,5)$ 是第 i 个关节的单位运动螺旋.

通过式(1)可以求得下式所表示的支链约束力螺旋互逆的 4 个运动基螺旋为

$$\hat{\$}_1 = (1\ 0\ 0; 0\ 0\ 0), \hat{\$}_2 = (0\ 1\ 0; 0\ 0\ 0),$$

$$\$_3 = (0\ 0\ 0;1\ 0\ 0), \$_4 = (0\ 0\ 0;0\ 1\ 0) \quad (3)$$

通过对以上4个基螺旋的线性组合可得到CF支链中运动螺旋的基本表达式为

$$\$ = a\$_1 + b\$_2 + c\$_3 + d\$_4 = (a\ \ b\ \ 0;c\ \ d\ \ 0) = \begin{cases}(s;s_0)\\(0;s)\end{cases} \quad (4)$$

式中：a,b,c,d 是不同时为零的任意常数；$(s;s_0)$ 表示转动副；$(0;s)$ 表示移动副.

1)转动副的配置. 当 $s\cdot s_0=0$ 和 $s\cdot s=1$ 时，节距为0的转动副单位运动螺旋为

$$\$ = (s;s_0) = (a\ \ b\ \ 0;c\ \ d\ \ 0) \quad (5)$$

式中：$a^2+b^2=1, ac+bc=0$.

由于 $s\cdot s_1^r = s\cdot s_2^r = 0$，所以机构中转动副的轴线必垂直于约束力偶和约束力线矢，即CF支链中的转动副轴线垂直于 z 轴.

2)移动副的配置. 当 $a=b=0$ 且 $s\cdot s=1$ 时，可得到一节距为无穷大的单位运动螺旋形式，即机构中的移动副单位运动螺旋为

$$\$ = (0;s) = (0\ \ 0\ \ 0;d\ \ e\ \ 0) \quad (6)$$

式中 $d^2+e^2=1$.

因为 $s\cdot s_1^r = s\cdot s_2^r = 0$，所以此类机构中移动副螺旋的轴线垂直于约束力偶和约束力线矢，即移动副轴线垂直于 z 轴.

由于CF支链的自由度运动是一个4阶运动螺旋系，其线性无关零节距运动螺旋数目最多为4，所以支链中的线性无关转动副的数目最多为4. 在三维空间中，线性无关且节距为无穷大的运动螺旋数目最为3. 由运动螺旋分析可知，CF支链移动副的轴线总垂直于 z 轴，所以支链中线性无关的移动副的数目最多为2. 所以，如将基本副R和P作为组成支链的运动副，则可以得到3杆4副的基本支链类型有4R、3R1P和2R2P型，运动副符号前面的数字表示机构中线性无关的运动副的数目. 应用运动副等效替换的方法，还可以得到2R1U，1R1U1P，2R1C，1R1C1P和1U2P的2杆3副分支类型. 图3为几种CF支链配置的举例.

本文作者选择如图4所示的4-UPS/UPP作为金属壳体调姿机构. 其有以下几点优势：

1)4-UPS/UPP机构的各条支链上都有且仅有3个运动副，其结构简单且符合金属壳体调姿机构的自由度要求.

2)飞行器金属壳体的质量较重，可达到数吨重且调姿完成后还有加压要求，可以增加设计好的UPS支链的数量来适应载荷的增加，并且增加UPS支链的数量会增加系统的支撑刚度，并且不影响整体机构的自由度.

3)中间UPP支链既约束了两个不需要的自由度，同时也增加了系统的刚度，提高整体机构的承载能力.

4)每条支链结构简单、驱动容易、控制简单.

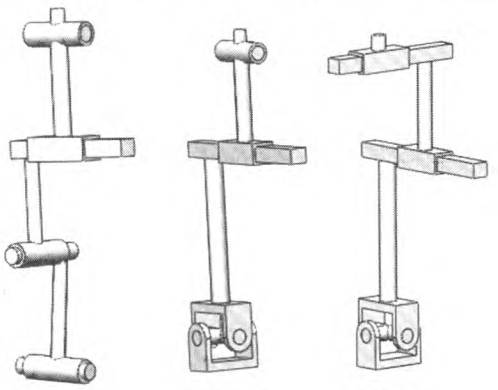


图3 CF支链配置

Fig. 3 Structure configuration of CF branch chain

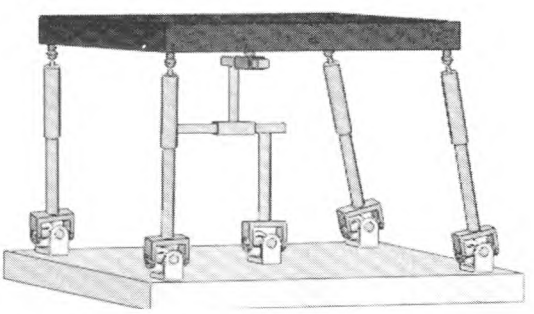


图4 4-UPS/UPP并联机构

Fig. 4 4-UPS/UPP parallel mechanism

3.3 2R2T并联机构自由度分析

对于4-UPS/UPP并联机构，U副为万向绞，其运动可以用2个轴线互相垂直的运动螺旋表示；S副为球铰，其运动用3个轴线互相垂直并且相交于一点的运动螺旋表示. 4-UPS/UPP机构中每个运动关节的运动用运动螺旋表示如图5所示.

基于螺旋理论可知螺旋的相逆性与坐标系的选择无关，可以取分支坐标系的直向上，得出UPS分支所有运动副的运动螺旋为

$$\begin{cases}\$_1 = (1\ \ 0\ \ 0;0\ \ 0\ \ 0)\\ \$_2 = (0\ \ 1\ \ 0;0\ \ 0\ \ 0)\\ \$_3 = (0\ \ 0\ \ 0;d_3\ \ e_3\ \ f_3)\\ \$_4 = (1\ \ 0\ \ 0;d_4\ \ e_4\ \ f_4)\\ \$_5 = (0\ \ 1\ \ 0;d_5\ \ e_5\ \ f_5)\\ \$_6 = (0\ \ 0\ \ 1;d_6\ \ e_6\ \ f_6)\end{cases} \quad (7)$$

可见UPS分支对动平台并无非零的约束螺旋，

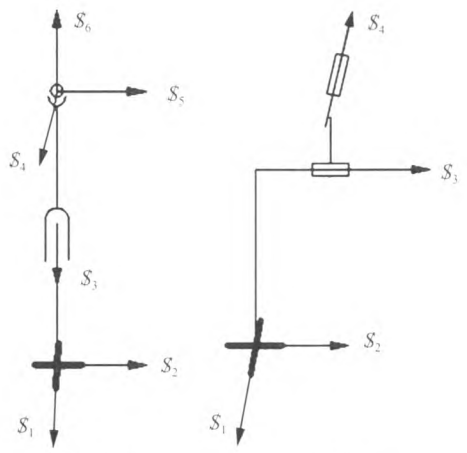


图 5　支链运动螺旋

Fig. 5　Kinematic screw of branch chain

即 UPS 分支不对并联机构动平台运动形成限制.

UPP 分支所有运动副的运动螺旋可表示为

$$\begin{cases} \$_1 = (1 \quad 0 \quad 0;0 \quad 0 \quad 0) \\ \$_2 = (0 \quad 1 \quad 0;0 \quad 0 \quad 0) \\ \$_3 = (0 \quad 0 \quad 0;d_3 \quad e_3 \quad 0) \\ \$_4 = (0 \quad 0 \quad 0;d_4 \quad e_4 \quad 0) \end{cases} \tag{8}$$

由式(8)可计算出与 UPP 支链运动螺旋系相逆的支链约束力螺旋系为

$$\begin{cases} \$_1^{\mathrm{r}} = (0 \quad 0 \quad 1;0 \quad 0 \quad 0) \\ \$_2^{\mathrm{r}} = (0 \quad 0 \quad 0;0 \quad 0 \quad 1) \end{cases} \tag{9}$$

式(9)表明中间 UPP 支链约束了动平台沿 z 轴的移动和绕 z 轴的转动两个自由度,而 UPS 支链对动平台无约束,正好符合金属壳体调姿系统对运动维数的要求.

4　结论

1)对异型面飞行器装配机构的功能与要求进行了分析,确定了位姿调整机构的组成和自由度组合原则,提出采用 3R-P-2R2T 自由度组合方案对位姿调整机构进行设计.

2)对 2R2T 金属壳体位姿调整机构中的 CF 支链进行结构的配置,提出了采用带有中间支链的 4-UPS/UPP 四自由度并联机构作为金属壳体调姿机构,采用螺旋理论计算了 4-UPS/UPP 并联机构的自由度.

参考文献(References):

[1] 郭朝邦,李文杰. 高超声速飞行器结构材料与热防护系统[J]. 飞航导弹,2010(4):88－94.
GUO Chaobang, LI Wenjie. Hypersonic aircraft structural materials and thermal protection system[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2010(4):88－94. (in Chinese)

[2] 房海蓉,陈江红. 一种新型四自由度并联机构设计与分析[J]. 北京交通大学学报,2011,35(4):134－137.
FANG Hairong, CHEN Jianghong. Structure synthesis and analysis of a novel four-degree-of-freedom parallel manipulator[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(4):134－137. (in Chinese)

[3] 郭盛,方跃法. 并联机器人机构综合方法比较研究[J]. 北京交通大学学报,2007,31(1):41－45.
GUO Sheng, FANG Yuefa. Comparative study on structural synthesis methods for parallel manipulators[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007, 31(1):41－45. (in Chinese)

[4] 曲海波,方跃法,郭盛. 一种少自由度并联机器人雅克比分析的新方法[J]. 北京交通大学学报,2010,34(4):136－140.
QU Haibo, FANG Yuefa, GUO Sheng. A new method for Jacobian analysis of low-DoF parallel manipulators[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010, 34(4):136－140. (in Chinese)

[5] 沈惠平,赵海彬,邓嘉鸣,等. 基于自由度分配和方位特征集的混联机器人机型设计方法及应用[J]. 机械工程学报,2011,23:56－64.
SHEN Huiping, ZHAO Haibin, DENG Jiaming, et al. Type design method and the application for hybrid robot based on freedom distribution and position and orientation characteristic set[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 23:56－64. (in Chinese)

[6] 金琼,杨廷力,刘安心,等. 基于单开链单元的三移动一转动并联机器人机构型综合及其分类[J]. 中国机械工程,2001,12(9):1038－1043.
JIN Qiong, YANG Tingli, LIU Anxin, et al. Structural synthesis and classification of the 4-DOF(3T-1R) parallel robot mechanisms based on the units of single-opened-chain[J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(9):1038－1043. (in Chinese)

[7] Fang Yuefa, Tsai Lungwen. Structural synthesis of 4-DOF and 5-DOF parallel manipulators with identical limbs[J]. International Journal of Robotics Research, 2002, 21(9):799－810.

[8] Fang Hairong, Fang Yuefa, Zhang Ketao. Reciprocal screw theory based singularity analysis of a novel 3-DOF parallel manipulator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(4):647－653.