

文章编号: 1000-5013(2007)03-0345-05

FAST 馈源舱绳牵引并联支撑系统的机构设计

郑亚青¹, 朱文白², 刘雄伟³

(1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021; 2. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012;

3. 赫特福德大学 飞机汽车与设计工程学院, 英国 赫特福德郡)

摘要: 在不考虑驱动系统功率大小的限制和机构的组成要素满足一定理想条件下,以舱体实现 2 个转动自由度和 3 个平动自由度为前提,从绳牵引并联机构学的角度出发,为 500 m 口径球面大射电望远镜(FAST)的馈源支撑寻找可行的机构类型.结果表明,6 根绳牵引的 6 自由度的不完全约束定位机构(IRPM)、6 自由度的完全约束定位机构(CRPM),以及 6 自由度的过约束定位机构(RRPM)都是可选的机构类型,但各自要解决的关键技术并不相同.

关键词: 绳牵引; FAST; 并联支撑系统; 机构设计

中图分类号: TH 112; TH 132

文献标识码: A

随着射电天文科学的发展,国际社会对射电天文望远镜的观测能力提出了新的要求.500 m 口径大射电望远镜(Five-hundred Meter Aperture Spherical Radio Telescope,FAST)的创新设计方案是,由若干根柔索控制具有 6 自由度馈源舱作跟踪射电源运动^[1-2].其工作特点类似并联机器人,因此可以被看作绳牵引并联机器人.绳牵引并联机器人作为馈源舱支撑机构,属于 FAST 一级粗调系统,可保证馈源舱的运动定位精度达到厘米级.同时,安装在馈源舱内的 Stewart 平台,对馈源的动态运动定位精度进行实时误差补偿,使馈源的动态运动定位精度保持在毫米级.本文以满足馈源运动的参数为目的,在不考虑目前驱动系统功率大小的限制,以及在机构的组成要素满足一定理想条件下,从绳牵引并联机构学的角度,寻找可行的机构类型.最后,用实例验证所提出的机构能实现支撑系统的平动馈源轨迹的要求.

1 FAST 的馈源轨迹^[3]

馈源球冠是 FAST 要求的平动工作空间,对应每一点的姿态要求是舱体的轴线指向球心,如图 1 所示.当所观测射电源用 $P(Z_a, A_z)$ 表示时,对 FAST 取馈源工作球冠半径为 160 m,馈源所在位置 $(X, Y, Z): X = -160 \times \sin Z_a \times \cos A_z; Y = -160 \times \sin Z_a \times \sin A_z; Z = -160 \times \cos Z_a$. 这里, $A_z \in [0, 360^\circ], Z_a \in [0, 60^\circ]$.

设馈源的姿态角 (α, β, γ) 以 Z-Y-Z 型 3 个欧拉角方式表示较方便,局部随体坐标 $Pxyz$, 按照 1-2-3 次序旋转,即为馈源所需的姿态,且必需满足以下 3 个关系. (1) $\alpha = A_z$, 绕 P_z 轴右旋 A_z , 旋转矩阵 $R_z(A_z)$. (2) $\beta = Z_a$, 绕 P_y 轴右旋 Z_a , 旋转矩阵 $R_y(Z_a)$. (3) $\gamma = -A_z$, 绕 P_z 轴左旋 A_z , 旋转矩阵 $R_z(-A_z)$. 所以,馈源 P 的位姿可表示为 $(X, Y, Z, \alpha, \beta, \gamma)$.

收稿日期: 2006-12-12

作者简介: 郑亚青(1974-),女,博士,主要从事绳牵引并联机构的研究. E-mail: yq_zheng@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50475099); 中国科学院国家天文台 FAST 预研究子项目(340601); 福建省青年人才创新项目(2006F3083)

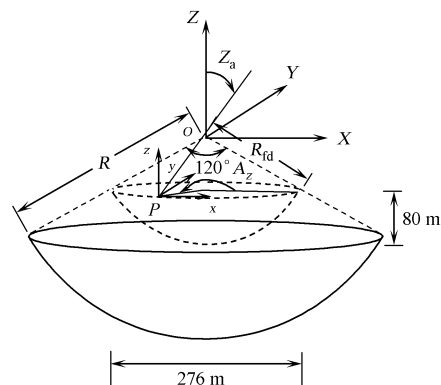


图 1 FAST 馈源球冠的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spherical map of feed trace for FAST

2 绳牵引并联机构设计

2.1 研究前提

(1) 绳能沿任何方向无摩擦运动的点状铰链是可以实现的. (2) 绳的长度能够得到精确控制. (3) 舱体和机架都是刚体, 而绳始终形成直线且不发生弹性变形. 从绳牵引并联机构学的角度, 为 500 m 口径球面大射电望远镜(FAST)的馈源支撑寻找可行的机构类型. 实际上在大跨度的情况下, 绳会发生弹性变形, 而且会产生悬链线问题. 弹性变形可以通过在控制时加以补偿来解决, 而悬链线问题不可忽略. 考虑悬链线问题的机构学分析相当复杂, 这里暂且忽略.

2.2 力学模型^[4]

绳牵引并联机构, 是将驱动器的运动和力以绳为介质并行转换成动平台的运动和力的封闭装置. 其组成元素包括机架、滑轮、绳、动平台、连接滑轮, 绳的点状铰链与连接绳及动平台的点状铰链示意图参见文[5]. 假设动平台除了受到 m 根绳的拉力外, 还受到力旋量 W (包括动平台的惯性力、重力和其他外力) 的作用, 则动平台基于动态静力的平衡方程可表示为

$$\sum_{i=1}^m F_i + f_p = 0, \quad \sum_{i=1}^m r_i \times F_i + p = 0. \quad (1)$$

这里, $F_i = F_i u_i$ ($i = 1, \dots, m$) 为第 i 根绳的拉力矢量, F_i 为对应的拉力值, u_i 为第 i 根绳的单位方向矢量, r_i ($i = 1, \dots, m$) 为动平台的参考点 P 到绳与动平台的点状铰链点 P_i 的矢量. 因此, 式(1)可表示为

$$J^T F + W = 0. \quad (2)$$

这里, $F = (F_1, \dots, F_m)^T$, 力旋量 W 是由 n 个分量组成的矢量且 $W = [f_p, p]^T$, 且结构矩阵 J^T 满足

$$J^T = \begin{bmatrix} u_1 & \dots & u_m \\ r_1 \times u_1 & \dots & r_m \times u_m \end{bmatrix}_{n \times m}. \quad (3)$$

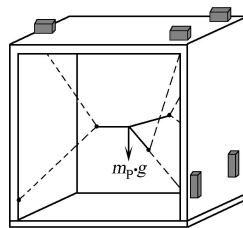
J^T 记的第 i 个列矢量为 $v_i = \begin{bmatrix} u_i \\ r_i \times u_i \end{bmatrix}$, $i = 1, \dots, m$, 通常也称 v_i 为一个旋量. 在这种意义上说, J^T 是

个旋量组成的一个旋量系. 显然, 如果要在动平台上作用力旋量 W , 则一个最低的要求 $F > 0$ 是即式(2)是否有正解. 该问题就变成了 J^T 的所有列矢量是否能正张成 R^n (其中 n 为机构的自由度) 的问题. 由 Caratheodory 定理可知, 在不考虑动平台的重力时, J^T 的所有列矢量 $\{v_1, \dots, v_m\}$ 正张成 R^n 的一个必要条件是, 绳的数目必须大于或等于 $n + 1$.

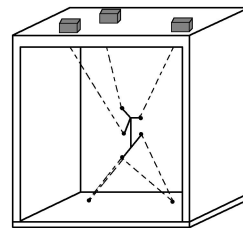
将末端执行器的自由度定义为 J^T 的所有列矢量(即每根绳的旋量)正张成的空间 R^n 的维数 n .

方程(2)的可解性引起了研究学者对绳牵引并联机构进行基于 J^T 维数的分类. 当绳的数目 m 小于

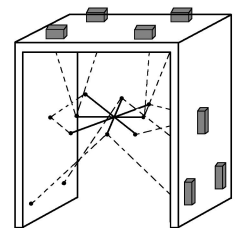
或等于自由度数 n 时, 方程(2)最多有一个解(奇异位姿除外). 若 $W = 0$, F 没有正解, 这说明动平台只有在受外力(如重力)作用时, 机构才能被使用. 这种机构被称为不完全约束定位机构(Incompletely Restrained Positioning Mechanisms, IRPMs), 如图



(a) IRPM(3R3T)



(b) CRPM(3R3T)



(c) RRPM(3R3T)

图2 绳牵引并联机构的分类

Fig. 2 Types of wire-driven parallel manipulators

2(a) 所示. 当动平台不受到外力

作用时, 机构能工作的最小要求是 $m = n + 1$, 这种机构称为完全约束定位机构(Completely Restrained Positioning Mechanisms, CRPMs), 如图 2(b) 所示. 当 $m > n + 1$ 时, 机构称为过约束定位机构(Reducantly Restrained Positioning Mechanisms, RRPMs), 如图 2(c) 所示.

2.3 可行的机构类型

因为舱体至少要实现 3 个平动自由度(3T)和 2 个转动自由度(2R)共 5 个自由度, 而绳牵引并联机构在所有位姿处所能有的末端执行器自由度的组合为 1T, 2T, 3T, 1R2T, 2R3T 和 3R3T. 其中 2R3T 要求末端执行器实现的是杆状的空间运动. 但由于舱体是个很重的实体, 绳索与其连接方式若为杆状,

则定位不合理. 所以,采用 3R3T 的 6 自由度绳牵引并联机构作为 FAST 馈源舱支撑系统比较合理,具体可采取 5 种类型. (1) 不完全约束定位机构 IRPM6-3R3T. 6 根绳牵引的 3R3T 不完全约束定位机构,如图 3(a)所示. 能使馈源舱实现 6 自由度的运动,但不完全约束会影响到馈源舱姿态控制的稳定性问题. 若能解决此问题,又能满足工作空间的要求和绳拉力的限制等,则 IRPM6-3R3T 是个可行的选择. 但具体什么构型才能满足要求,必须进行机构设计. (2) CRPMs(RRPMs)-3R3T. 7 根或 7 根以上的绳牵引的 3R3T 完全约束定位机构或过约束定位机构,如图 3(b),(c)所示,能使馈源舱实现 6 自由度的运动. 若能较好解决绳拉力分布优化问题,又能满足工作空间的要求和绳拉力的限制等,也是个可行的选择. 但具体什么构型才能满足要求,必须进行机构设计. (3) CRPM4-3T+2 个转动机构. 用纯平动的 3 自由度绳牵引并联机构来实现馈源舱的平动运动,然后串联 2 个转动机构来实现馈源舱的转动运动,如

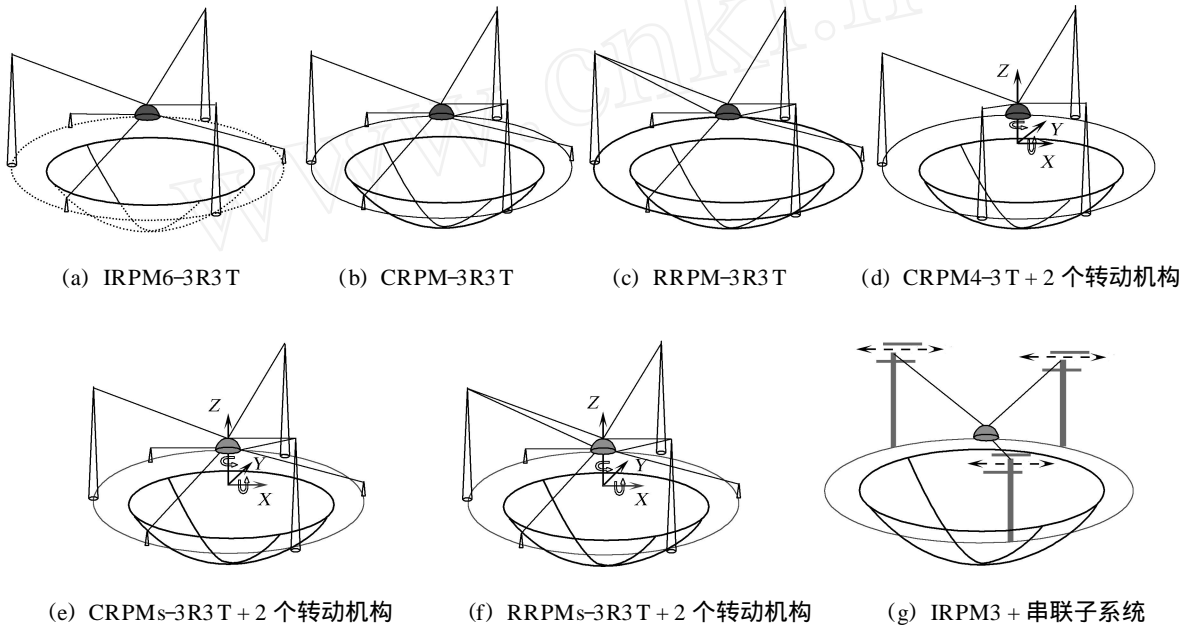


图 3 可行的 5 种机构类型

Fig. 3 Five types of mechanism available

图 3(d)所示. 这种思路理论上是可行的,但用纯平动的绳牵引机构实现舱体的位置控制,在结构上不合理. (4) CRPMs(RRPMs)-3R3T+2 个转动机构. 用 CRPMs(RRPMs)3R3T 实现舱体的位置控制,2 个转动机构实现姿态控制,如图 3(e),(f)所示. 若在解决好机构学和控制上的问题,也是个比较稳妥的方案. (5) IRPM3+串联子系统. 不建议使用该方案,如图 3(g)所示. 方案(1),(2),(4)比较合理. 下一部分选择方案(1)中的 1 个实例机构,并对其进行平动馈源轨迹验证.

3 实例机构

3.1 机构参数

设 $X = (X_P, X_{ang})^T$ 为动平台的参考点 P 相对于坐标系 $OXYZ$ 的位姿. X_P 为 P 的位置坐标 (X_P, Y_P, Z_P) , X_{ang} 为坐标系 $PX_PY_PZ_P$ 相对于坐标系 $OXYZ$ 的姿态坐标: (γ, β, α) . 动平台的 3 个姿态角分别为滚转角 α (相对于 X 轴正方向的旋转)、俯仰角 β (相对于 Y 轴正方向的旋转)和偏航角 γ (相对于 Z 轴正方向的旋转). 已知绳与机架的各个连接点在固定坐标系 $OXYZ$ 下的坐标为 $A_i = (X_{A_i}, Y_{A_i}, Z_{A_i})$ ($i = 1, \dots, 6$),其具体的坐标值为 $A_1: (R\cos(180^\circ), R\sin(180^\circ), 105) \text{ m}$, $A_2: (R\cos(300^\circ), R\sin(300^\circ), 105) \text{ m}$, $A_3: (R\cos(60^\circ), R\sin(60^\circ), 105) \text{ m}$, $A_4: (R\cos(240^\circ), R\sin(240^\circ), 90) \text{ m}$, $A_5: (R, 0, 90) \text{ m}$, $A_6: (R\cos(120^\circ), R\sin(120^\circ), 90) \text{ m}$, 其中 $R = 280 \text{ m}$. 绳与动平台的各个连接点在局部坐标系 $PX_PY_PZ_P$ 下的坐标为 $B_i = (X_{B_i}, Y_{B_i}, Z_{B_i})$ ($i = 1, \dots, 6$),而相应具体坐标值为 $B_1: (r\cos(\alpha + 120^\circ), r\sin(\alpha + 120^\circ), -3.6) \text{ m}$, $B_2: (r\cos(\alpha + 240^\circ), r\sin(\alpha + 240^\circ), -3.6) \text{ m}$, $B_3: (r\cos(\alpha), r\sin(\alpha), -3.6) \text{ m}$, $B_4: (rr\cos(240^\circ), rr\sin(240^\circ), 6.4) \text{ m}$, $B_5: (rr, 0, 6.4) \text{ m}$, $B_6: (rr\cos(120^\circ), rr\sin(120^\circ), 6.4) \text{ m}$, 其中 $r = 6 \text{ m}$, $rr = 0.5 \text{ m}$, $\alpha = 46^\circ$. 舱体质量为 30 t. 实例机构简图,如图 4 所示.

3.2 运动学位姿逆解^[6]

若已知舱体位姿 X , 则 6 根绳与舱体上的连接点 $B_i (X_{B_i}, Y_{B_i}, Z_{B_i}) (i = 1, \dots, 6)$ 在固定坐标系 $OXYZ$ 中的坐标满足

$$\begin{bmatrix} X_{B_i} \\ Y_{B_i} \\ Z_{B_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} + T \begin{bmatrix} X_{B_i} \\ Y_{B_i} \\ Z_{B_i} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$T = \begin{bmatrix} C_P C_Y & C_Y S_P S_R & -S_Y C_R & S_Y S_R + C_Y S_P C_R \\ C_P S_Y & C_Y C_R + S_R S_P S_Y & S_P S_Y C_R - C_Y S_R & \\ -S_P & S_R C_P & C_P C_R \end{bmatrix}. \quad (5)$$

上式中, $C_R = \cos R$, $C_P = \cos P$, $C_Y = \cos Y$, $S_P = \sin R$, $S_P = \sin P$, $S_Y = \sin Y$. 而 $(X_{B_i}, Y_{B_i}, Z_{B_i})$ 为 $B_i (i = 1, \dots, 6)$ 在局部坐标系 $PX_P Y_P Z_P$ 中的坐标.

3.3 平动馈源轨迹仿真

3.3.1 平动馈源轨迹方程 馈源舱的位置坐标 $X_P: (X_P, Y_P, Z_P)$ 满足第 1 部分所提到的方程, $X_P = -160 \times \sin Z_a \times \cos A_z$, $Y_P = -160 \times \sin Z_a \times \sin A_z$, $Z_P = -160 \times \cos Z_a$. 这里 $A_z \in [0, 360^\circ]$, $Z_a \in [0, 60^\circ]$, 而令姿态坐标为 $X_{ang}: (Y = 0, P = 0, R = 0)$.

3.3.2 平动馈源轨迹仿真 根据运动学位姿逆解的思路, 对舱体进行平动馈源轨迹进行仿真, 所提出的机构能达到平动馈源轨迹上的每一点. 当 $A_z \in [0, 360^\circ]$, Z_a 分别为 $20, 40, 60$ 时, 6 根绳的绳长(L)和绳拉力值(F)随轨迹的变化情况, 如图 5 所示. 在图 5 中, (a), (d), (g) 为 6 根绳的绳长随轨迹的变化情况

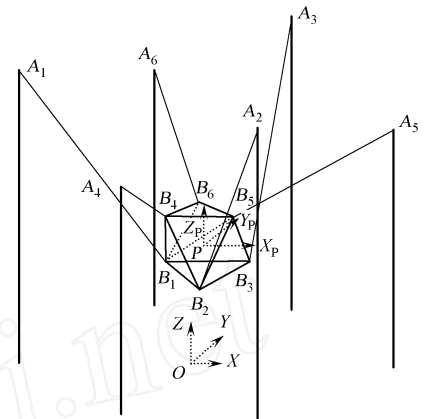


图 4 IRPM6-3R3T 的机构简图

Fig. 4 Sketch of IRPM6-3R3T

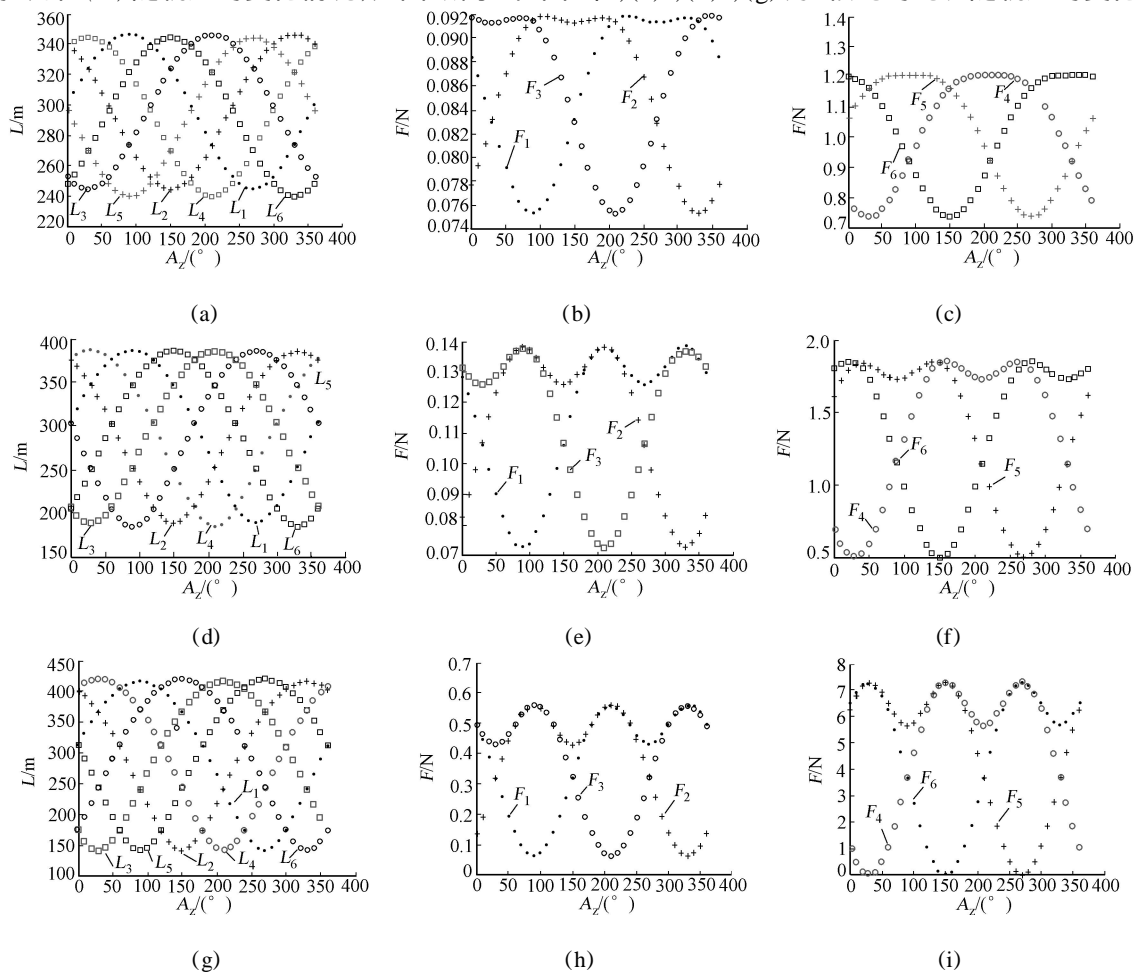


图 5 舱体的平动馈源轨迹仿真

Fig. 5 Simulation of translational feed trace of the cabin

况;(b),(e),(h)为绳1,2,3的拉力值随轨迹的变化情况;(c),(f),(i)为绳4,5,6的拉力值随轨迹的变化情况.从图5的仿真结果可以看出,在同一轨迹中,绳1,2,3的拉力值比较小,而绳4,5,6的拉力值比较大;随着 z_a 的增大,每根绳的拉力值也随着增加.

4 结束语

适用于500 m口径球面大射电望远镜(FAST)的馈源支撑的绳牵引并联机构的类型,比较合理的有IRPM6-3R3T,CRPM(RRPM)-3R3T和CRPM(RRPM)-3R3T+2个转动机构.所提出的1个实例机构(IRPM-3R3T)能实现支撑系统的平动馈源轨迹的要求,但是否能满足实际馈源轨迹的要求,有待于进一步研究.如果能满足,则可进一步分析考虑绳的悬链线问题的机构学问题;如果不满足,则需要所设计的机构上加上二级的转动机构,或者重新选择新构型.

参考文献:

- [1] DUAN B Y. A new design project of the line feed structure for large spherical radio telescope and its nonlinear dynamic analysis[J]. Journal of Mechatronics, 1999, 9(1):53-64.
- [2] 南仁东. 500 m 球面反射面射电望远镜 FAST[J]. 中国科学(G), 2005, (35):449.
- [3] NAN R, PENGB. A Chinese concept for the 1 km² radio telescope[J]. Acta Astronautica, 2000, 46(12):667.
- [4] 郑亚青. 绳牵引并联机构若干关键理论问题及其在风洞支撑系统中的应用研究[D]. 泉州:华侨大学, 2004: 36-56.
- [5] 郑亚青. 绳牵引并联机器人的样条函数法运动轨迹规划[J]. 华侨大学学报:自然科学版, 2007, 28(2):113-116.
- [6] 郑亚青,刘雄伟. 6自由度绳牵引并联机构的运动轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2005, 41(2):77-81.

Mechanism Design of a Wire-Driven Parallel Suspension System for the Feed Cabin of Fast

ZHENG Ya-qing¹, ZHU Wen-bai², LIU Xiong-wei³

- (1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;
2. The National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Science, Beijing 100012, China;
3. School of Aerospace, Automotive and Design Engineering, University of Hertfordshire, Hertfordshire, U K)

Abstract: Disregarding further restrictions due to currently available technology and considering that the elements of wire-driven parallel manipulators are in the ideal conditions, mechanism configuration of the wire-driven parallel suspension system for the feed cabin of five-hundred-meter aperture spherical telescope (FAST) is studied to fulfill that the feed cabin can move in the 3 dimensional space with 3-degree-of-freedom (3-DOF) translation and 2-DOF rotation. The results of research show that 6-DOF incompletely restrained positioning mechanisms (IRPMs) with 6 wires, 6-DOF completely restrained positioning mechanisms (CRPMs) and 6-DOF redundantly restrained positioning mechanisms (RRPMs) are optional, but the respective key issues are different when they are used. A kind of IRPM with 3R3T type is introduced to the use of the wire-driven parallel suspension system for the feed cabin of FAST, and the simulation results of the translational feed trace show the correctness of the mechanism configuration.

Keywords: wire-driven; FAST; parallel suspension system; mechanism design

(责任编辑:黄仲一)