

文章编号:1000-6893(2010)09-1872-08

多维大偏差刚性对接研究及机构设计

王巍, 于文鹏, 李雄峰, 唐慧霖, 李宗良

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

Research and Mechanism Design of Rigid Docking Applied for Multi-dimension Position/Orientation Offset

Wang Wei, Yu Wenpeng, Li Xiongfeng, Tang Huilin, Li Zongliang

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

摘要: 针对野外崎岖地形、太空站舱内等复杂狭窄操作环境中的刚性对接问题,构造了一种刚性对接位姿偏差评估指数,建立了目前常见对接导引方式的几何约束模型,并采用偏差评估指数就对对接导引方式的约束效果进行了衡量和比较,提出逐级消除位姿偏差的基本对接方法。在此基础上设计了用于多维大偏差刚性对接的少自由度混联刚性对接机构,就对对接过程中各阶段位姿偏差的变化情况进行分析,并给出刚性对接机构的具体设计参数、最大对接位姿允差和与之相对应偏差评估指数。最后,搭建了 JL-2 多维大偏差刚性对接机构样机平台,并进行了相关实验,实验结果与理论计算值基本相符,证明该设计方案可有效满足多维大偏差情况下的刚性对接要求。

关键词: 对接; 位姿偏差; 混联机构; 少自由度; 导引方式

中图分类号: V526 **文献标识码:** A

Abstract: In this article, rigid docking technologies applied in complex working conditions; such as field rugged terrain outdoors, narrow space capsule, are specially mentioned, and a new evaluation indexes of position/orientation offset are introduced. This article builds geometric constraint models of common aligning methods applied nowadays, and makes a comparison among all methods by the evaluation indexes, as a result, gives out a "step-by-step" docking solution correspondingly. A new type of no-full degree of freedom (DOF) hybrid rigid docking mechanism, which combines several aligning methods mentioned in this article, is designed to eliminate multi-dimension position/orientation offset. This article analyzes the variation of position/orientation offset during the transition of different docking stages. Mechanism design parameters, maximum of allowable position/orientation offsets and corresponding evaluation indexes are also calculated and explained. Finally, this article develops JL-2 multi-dimension position/orientation offset docking mechanism platform and makes corresponding experiments. Experiment results meet theoretical values basically and testify the docking solution and physical design can work effectively.

Key words: docking; position/orientation offset; hybrid mechanism; no-full DOF; aligning method

刚性对接可保证对接体具有确定位置关系,并能传递较大驱动力,其较为成熟的形式分为“杆-锥”式和“周边”式两类^[1-2]。“杆-锥”式柔顺性较好,但易发生非确定性移位而导致对接失败;“周边”式能实现主动捕捉与可靠连接,但对位姿偏差敏感,机构设计难度大。近年来如美国密歇根航宇公司研制的 AMDS 小型对接系统^[3-6]与美国麻省理工学院(MIT)空间系统实验室设计的采用“异体同构双杆-锥”式的 MVDS 对接系统^[7],

分别改善了结构形式与连接可靠性,但尚未解决非确定性移位与位置偏差敏感等问题。

地面刚性对接机构如用于自重构机器人系统的 DRAGON 连接器^[8]、CONRO 卡销式对接机构^[9-10]与北京航空航天大学 JL-1 型移动车对接机构^[11-12]都沿用“杆-锥”式结构思路,前两者轴向角度偏差均小于 25°,后者适用于崎岖地形主动对接,但其主动捕捉能力较弱,当位姿偏差不能依靠本体移动克服时对接成功率较低。南丹麦大学的 ATRON 钩挂式对接机构^[13]和洛桑工学院的钳式对接机构^[14]将“周边式”思想移植于小型移动机器人的对接设计,提高了主动捕捉的成功率,其俯仰

方向的允许角度偏差可达±40°,但在其他维度的角度允差却很小,适用于特定方向的刚性对接。

目前多数刚性对接机构在多维大偏差补偿和强制纠偏方面均有所不足,本文在建立基本对接导引方式的几何约束模型基础上提出了多维大偏差刚性对接机构的组合导引机制,设计了 JL-2 型 3 自由度混联刚性对接机构。该机构集成多种对接导引方式,可补偿大范围位姿偏差并实现 6 维强制纠偏,扩大了对接机构的主动对接范围;并在移动机器人平台上对 JL-2 原型机构的对接性能进行了验证。

1 刚性对接机构的引出

在对接过程中,设坐标系 $OXYZ$ 、 $O'X'Y'Z'$ 分别与捕捉体、目标体固连,则两者之间的坐标系齐次变换矩阵为

$$T_{OO'} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & X_{OO'} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & Y_{OO'} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & Z_{OO'} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: $X_{OO'}$ 、 $Y_{OO'}$ 、 $Z_{OO'}$ 为坐标系 $O'X'Y'Z'$ 相对于坐标系 $OXYZ$ 的原点位移; k_{11} 、 k_{22} 、 k_{33} 分别为坐标轴 X' 与坐标轴 X 、坐标轴 Y' 与坐标轴 Y 、坐标轴 Z' 与坐标轴 Z 的夹角余弦值。

为描述两者的位姿关系及逼近程度,令 h_p 与 h_q 分别代表位置与姿态偏差,则建立相互位姿评价指数 h :

$$h = \{h_p, h_q\} =$$

$$\{\sqrt{X_{OO'}^2 + Y_{OO'}^2 + Z_{OO'}^2}, \sqrt{k_{11}^2 + k_{22}^2 + k_{33}^2}\} \quad (1)$$

规定完全约束时两坐标轴重合,此时 $T_{OO'}$ 为单位阵 I , h 收敛于 $\{0, \sqrt{3}\}$ 。分析 h 逼近 $\{0, \sqrt{3}\}$ 的程度可获知位姿偏差的状况。

1.1 “锥-锥”对接导引方式的几何约束分析

对接导引方式可分为“锥-锥”式、“杆-锥”式、“柱-孔”式和“爪-爪”式 4 种基本类型。在对接过程中捕捉体和目标体之间角度与位移的复合偏离最为普遍^[15-16],且“锥-锥”式的位姿和作用力关系如图 1 所示。

图 1 中,设捕捉体与目标体锥顶坐标原点分别为 O 、 O' ,两锥面轴线单位矢量为 S 、 S' , S 与 Z 轴、 S' 与 Z' 轴重合。对接接触力 F 沿 S' 反方向, Q 为接触点,其反力分解为 N_x 、 N_y 、 N_z ,其中 N_x 、 N_z 使矢量 S' 与 S 的夹角及距离发生变化, N_y 仅能使 S' 绕 S 周向运动,故先讨论 N_x 、 N_z 的影响。

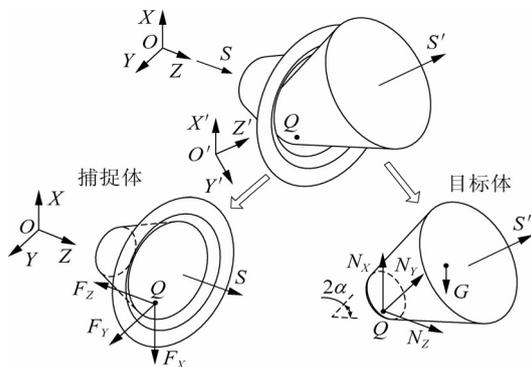


图 1 “锥-锥”对接导引位姿及作用力关系简图

Fig. 1 Diagram of position/orientation and force between cone chaser and target

考虑目标体重力(如地面对接情况),则目标体向锥顶滑行的充分条件为

$$F_z > \frac{G \sin \alpha + G \mu_q \cos \alpha}{\cos \alpha - k \sin \alpha - (\sin \alpha + k \cos \alpha) \mu_q} \quad (2)$$

$$k = \frac{S'_X}{S'_Z} < \frac{\cos \alpha - \mu_q \sin \alpha}{\sin \alpha + \mu_q \cos \alpha}$$

式中: S'_X 、 S'_Z 为 S' 在 X 轴、 Z 轴的分量; μ_q 为最大静摩擦因数; G 为目标体重力; α 为锥顶半角。由于 N_y 引起的侧滑仍能导致对接失败,为保证两者能实现滑行导引,如图 2 所示,若矢量 S' 、 S 相交时,则需目标体小端锥面在捕捉体大端锥面的投影域 C' 位于大端锥面域 C 内。

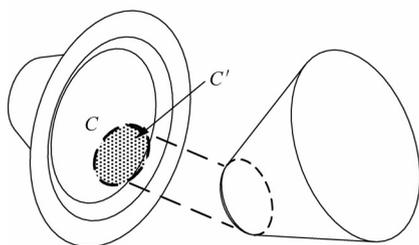
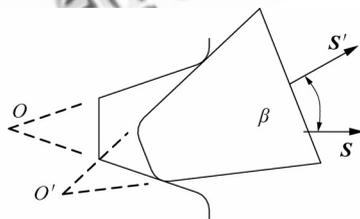


图 2 “锥-锥”对接导引的充分条件示意图

Fig. 2 Sufficient executable condition diagram of cone/cone aligning method

当捕捉体和目标体锥面贴合后, S 与 S' 重合, O 与 O' 重合, $h_p \rightarrow 0$, $k_{33} \rightarrow 1$, $h_q \in [1, \sqrt{3}]$,仅有 4 个位姿变量收敛于某一常数, h 无法收敛于 $\{0, \sqrt{3}\}$,即无法保证捕捉体和目标体形成完全几何约束。因此某些对接机构采用多“锥-锥”式,其可

执行的充分条件为

$$\left. \begin{aligned} F_{zi} &> \frac{G_i \sin \alpha + G_i \mu_{qi} \cos \alpha_i}{\cos \alpha_i - k_i \sin \alpha_i - (\sin \alpha_i + k_i \cos \alpha_i) \mu_{qi}} \\ \beta_i &< \arctan \frac{\cos \alpha_i - \mu_{qi} \sin \alpha_i}{\sin \alpha_i + \mu_{qi} \cos \alpha} \end{aligned} \right\} \text{且 } C'_i \subset C_i$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

对于多“锥-锥”对接导引方式, h 终将收敛于 $\{0, \sqrt{3}\}$ 且目标体与捕捉体形成完全几何约束。

1.2 “柱-孔”对接导引方式的几何约束分析

若图 1 中锥顶角半径为 0, 则“锥-锥”式转化为如图 3 所示的“柱-孔”式, 其剖分型在捕捉体合拢后可形成完整型。图 3 中, R_1, R_2 为圆柱目标体、弧面捕捉体半径, L_1, L_2 为两者径向长度且 $L_1 > L_2$, S_3, S_4 为其轴向单位矢量且与轴 Z, Z' 重合。 B 为捕捉体剖分缝隙宽度, 两者约束情况视 B 的大小而定。

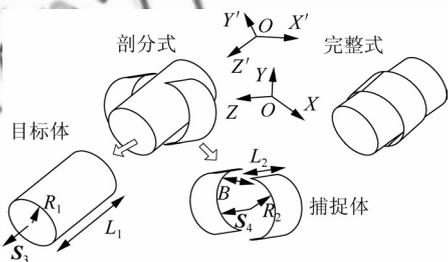


图 3 “柱-孔”对接导引位姿关系简图

Fig. 3 Position/orientation diagram of hole chaser and axle target

(1) 当 $B \geq 2R_1$ 时, 捕捉体目标体无法形成约束。

(2) 当 $0 < B < 2R_1$ 时, S_3, S_4 之间的夹角范围为

$$\angle S_3 S_4 < \max \left\{ \arctan \frac{2R_2}{L_2} - \arcsin \frac{\sqrt{4R_1^2 - B^2}}{\sqrt{4R_2^2 - L_2^2}}, \arctan \frac{2R_2 + B}{L_2} - \arcsin \frac{2R_1}{\sqrt{(2R_2 + B)^2 + L_2^2}} \right\} \quad (4)$$

(3) 当 $B=0$ 时, S_3, S_4 之间的夹角范围为

$$\left. \begin{aligned} \text{若 } R_1 < R_2, \angle S_3 S_4 &< \arctan \frac{2R_2}{L_2} - \arcsin \frac{2R_1}{\sqrt{4R_2^2 + L_2^2}} \\ \text{若 } R_1 = R_2, \angle S_3 S_4 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

则

$$\left. \begin{aligned} h_p &\in (-\infty, \infty); h_q \in [q_{zk}, \sqrt{3}] \\ q_{zk} &= \sqrt{\sin^4 \angle S_3 S_4 + \frac{1}{2} (2 - \sin^2 \angle S_3 S_4)^2 - 1} \leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

只有当“柱-孔”式满足式(4)、式(5)时, 二者之间才能形成姿态约束, 调整 B 的大小, 以改变约束状态。但目标体仍能沿轴线方向前后滑动, 无法形成有效的位置约束。

1.3 “爪-爪”对接导引方式的几何约束分析

“爪-爪”式的捕捉体和目标体可抽象为点 W, W' , 两点之间距离不大于某一固定值。如图 4 所示, 坐标系 $OXYZ, O'X'Y'Z'$ 分别与捕捉体、目标体固连, W, W' 在各自坐标系内坐标值相同, 模 r 表征手爪臂长。捕捉体和目标体之间的位置允差为空间包络域 U , 则 W 将 W' 约束在空间曲面 U 中。虽无法形成完全几何约束, 但原点 O' 会围绕空间 U 形成空间包络域 U_r, U_r 为 U 沿空间表面法向外偏置距离 r 形成。 L 为坐标原点 O 到曲面 U_r 上任一点的距离, 即

$$U_r = U'(U, r), L = L(U') \quad (7)$$

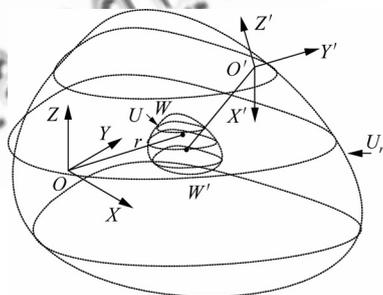


图 4 “爪-爪”对接导引位姿关系简图

Fig. 4 Diagram of position/orientation envelope between claw-shaped chaser and target

其形成的几何约束为

$$h_p \in [0, \max(L)]; h_q \in [0, \sqrt{3}] \quad (8)$$

式中: $\max(L)$ 为 L 的最大值; h_p 的大小取决于 U, r , 且随 U, r 增大而增大。“爪-爪”式不能完全约束两者的位姿偏差, 但能保证可靠连接。

1.4 导引方式的对比

分析并比较上述模型的约束情况, 如表 1。

表 1 各对接导引方式的约束情况比照

Table 1 Comparison of constraint conditions of fundamental aligning methods

指 标	“锥-锥”式		“柱-孔”式	“爪-爪”式
	单	多		
h_p	0	0	$0, \infty$	$[0, \max(L)]$
h_a	$[1, \sqrt{3}]$	$\sqrt{3}$	$[q_{zk}, \sqrt{3}]$	$[0, \sqrt{3}]$
h	有限闭域	点	开域	有限闭域
可约束 维度数	4	6	3	3
位置偏 差约束	完全	完全	不完全	不完全
姿态偏 差约束	不完全	完全	不完全	不完全

由表 1 可知采用单一导引方式,无法满足多维大偏差刚性对接要求。若以 $(0, \sqrt{3})$ 为邻域中心,各导引方式对应的邻域半径也不同,依收敛原则可得 h 值渐次收敛途径,如图 5 所示。

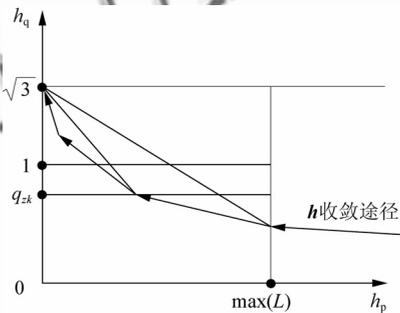


图 5 h 值收敛途径

Fig. 5 Convergence path of h

该途径反映在对接机构设计中,即要求逐级过渡消除位姿偏差,依次实现“位置偏差限制→姿态偏差限制→强制纠偏→完全几何约束”,因此需将上述 4 种对接导引方式进行组合,设计在多维大偏差与复杂环境中可完成对接的机构。

2 少自由度多维大偏差刚性对接机构的设计

遵循上述思路设计了 3 自由度混联刚性对接机构。如图 6,捕捉体由调姿和抓持机构组成。调姿电机通过并联调姿机构驱动凸轮抓持机构(捕捉体)围绕主虎克铰回转中心完成偏摆、俯仰动作,以便在对接过程中补偿各方向上的偏差。对接电机通过滑键、齿轮单元、夹持丝杠驱动对接套和机械手指沿凸轮滑槽运动,该运动可保证在对接过程中,单“锥-锥”式向多“锥-锥”式对接的过渡与完成。机械手指闭合后,指端可形成一个夹

持弧面,可实现“柱-孔”式的对接过程与“爪-爪”式的可靠约束。

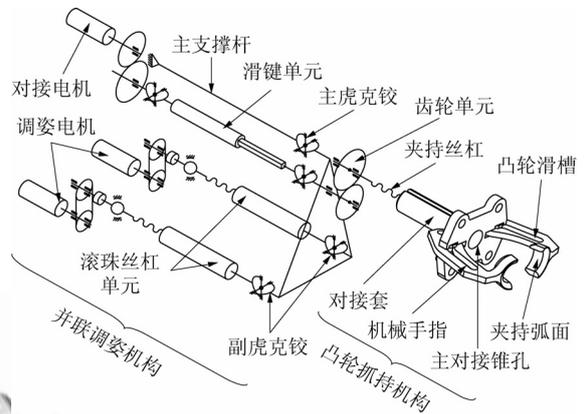


图 6 捕捉体机构原理图

Fig. 6 Mechanism principle of chaser

图 7 所示的目标体机构具有 1 个可整周转动的翻滚对接盘(目标体),中心部位有 1 个主对接锥,为保证翻滚俯仰等动作受力均匀,在其四周均布 4 个副对接锥,与滑动对接套上的 1 主 4 副对接锥孔相互配合,实现逐级导引过程。

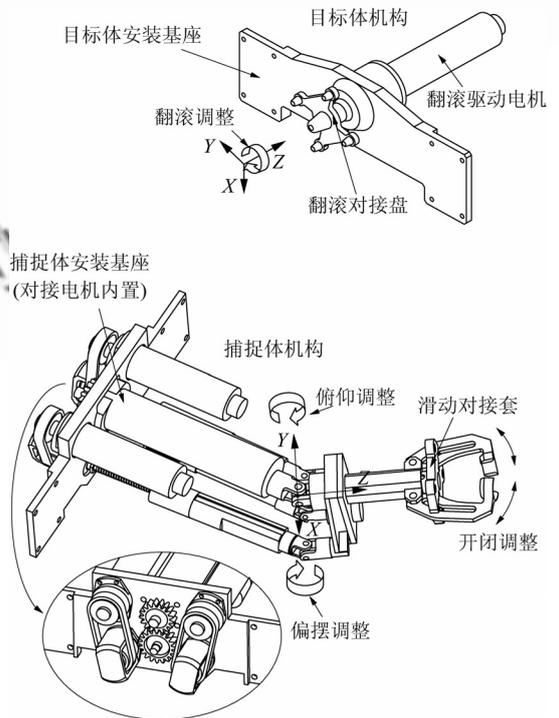


图 7 捕捉体机构与目标体机构结构图

Fig. 7 Structure diagram of chaser mechanism and target mechanism

捕捉体机构和目标体机构位姿关系如图 8 所示。原点位于主虎克铰回转中心的坐标系 $O_0 X_0 Y_0 Z_0$ 与捕捉体安装基座固连,坐标系 $O_1 X_1 Y_1 Z_1$

与凸轮抓持机构固连,主对接锥孔轴线为 Z_1 轴,两坐标系初始位置重合;坐标系 $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ 、 $O_3 X_3 Y_3 Z_3$ 分别与翻滚对接盘和目标体安装基座固连且初始位置重合。 T_{ij} 为坐标系 $O_i X_i Y_i Z_i$ 到 $O_j X_j Y_j Z_j$ 的齐次转换矩阵。

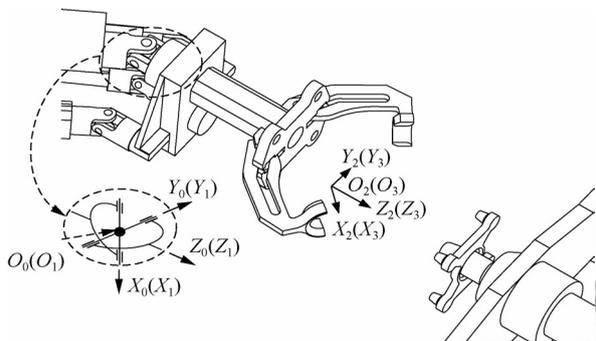


图8 捕捉体机构与目标体机构位姿关系简图

Fig.8 Diagram of position/orientation between chaser mechanism and target mechanism

刚性对接成功的标志为坐标系 $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ 与 $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ 完全重合,则捕捉体和目标体的位姿偏差可通过 T_{03} 衡量,即有

$$T_{03} = T_{01} \cdot T_{12} \cdot T_{23} \quad (9)$$

T_{03} 所示的位姿偏差可通过以下方式消除:

- ①通过并联调姿机构调姿补偿 T_{01} ;
 - ②通过强制纠偏补偿 T_{12} ;
 - ③通过翻滚对接盘的旋转补偿 T_{23} 。
- 位姿偏差消除是上述方式共同作用的结果。

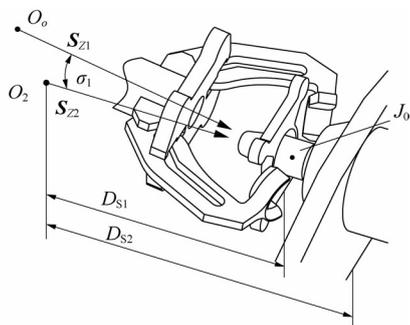
3 对接过程中位姿偏差情况分析

捕捉体和目标体从彼此分离到完全约束需经5个阶段:①相互分离;②“爪-爪”导引;③“柱-孔”导引;④单“锥-锥”导引;⑤多“锥-锥”导引。刚性对接的首要问题是判断当前位姿关系能否满足对接要求,即确定两者实现各步导引的可执行条件。其中“爪-爪”和“柱-孔”导引阶段的可执行条件最为重要,其决定了对接机构的最大对接位姿允差。

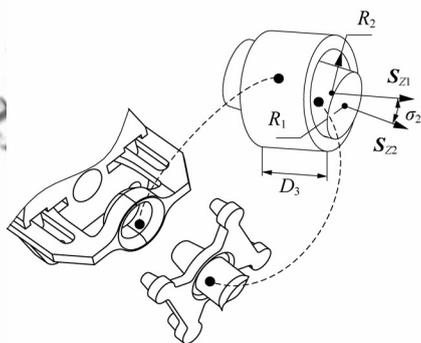
3.1 “爪-爪”与“柱-孔”式导引阶段的位姿偏差分析

机械手指和翻滚对接盘在第2、3阶段的几何约束形式如图9所示。

图9中, Z_1 、 Z_2 轴单位矢量为 S_{Z1} 、 S_{Z2} ,两轴交点 J_0 。 $O_0 J_0$ 为机械手指抓取半径,其前端弧面与翻滚对接盘尺寸如图9所示,根据式(4)、式(8)可得执行该阶段导引对接的充分条件为



(a) “爪-爪”导引前



(b) “柱-孔”导引后

图9 第2、3阶段位姿偏差情况

Fig.9 Position/orientation in stage 2 and 3

$$\left. \begin{aligned} D_{S1} \leq |O_2 J_0| \leq D_{S2} \\ 0 \leq \angle S_{Z1} S_{Z2} \leq \sigma_1 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: D_{S1} 、 D_{S2} 为安全距离,在该区间内可安全抓握翻滚对接盘; σ_1 为许用角; D_{S1} 、 D_{S2} 、 σ_1 取决于机构的具体设计尺寸。

由式(10)知导引完成后形成的几何约束为

$$\left. \begin{aligned} D_{S1} \leq |O_2 J_0| \leq D_{S2}; 0 \leq \angle S_{Z1} S_{Z2} \leq \sigma_{m2} \\ \sigma_{m2} = \arctan \frac{2R_2}{D_3} - \arcsin \frac{2R_1}{\sqrt{4R_2^2 + D_3^2}} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: σ_{m2} 为导引结束后 S_{Z1} 、 S_{Z2} 形成的最大夹角,考虑到纠偏力矩的限制,设 $R_1 < R_2$, 因此 $\sigma_{m2} > 0$ 。

3.2 单“锥-锥”式与多“锥-锥”式导引阶段的位姿偏差分析

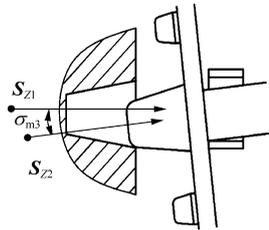
由于“柱-孔”约束的限制,在该阶段 Z_2 轴只能绕 Z_1 轴做有限幅度的摆动,如图10所示。

依几何约束模型得执行该阶段的充分条件为

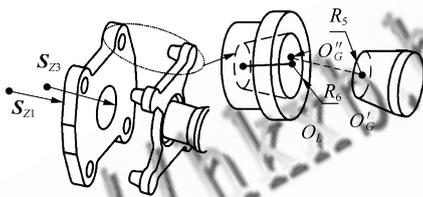
$$\left. \begin{aligned} \sigma_{m3} \geq \sigma_{m2} \geq \frac{\cos \alpha - \mu_q \sin \alpha}{\sin \alpha + \mu_q \cos \alpha} \\ |O'_G O_L| \leq \Delta r \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: σ_{m3} 为主对接锥头进入主对接锥孔的最大夹角^[15]; O_L 为副对接锥孔大端圆心; O'_G 为对应副对

接锥头小端圆心; O'_C 为 O'_C 在副对接锥孔大端的投影点; μ_q 为锥头锥孔接触面的最大静摩擦因数; 变量 Δr 为线段 $O_L O'_C$ 的许可长度, 取决于滑动对接套和翻滚对接盘的位姿状况, 当小于某个许用值时, 可确保锥头进入对应锥孔。



(a) 单“锥-锥”导引前



(b) 多“锥-锥”导引前

图 10 第 4、5 阶段位姿偏差情况

Fig. 10 Position/orientation in stage 4 and 5

4 对接机构设计参数的确定及评估

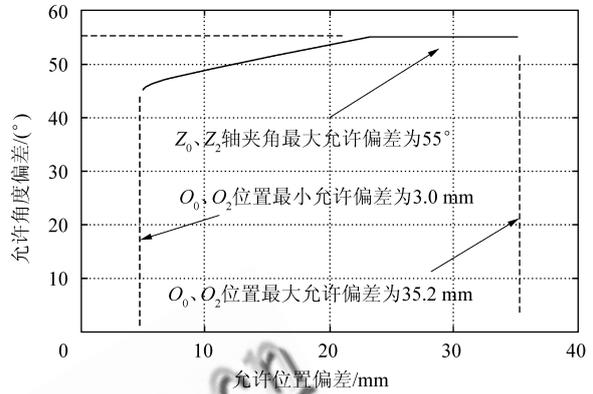
对接机构基本设计参数主要包括: 并联调姿机构的俯仰及偏摆角度范围(取决于虎克铰的自由旋转角度)、翻滚对接盘的旋转角度范围、各对接阶段纠偏能力, 其参数取值如表 2 所示。

表 2 对接机构基本设计参数

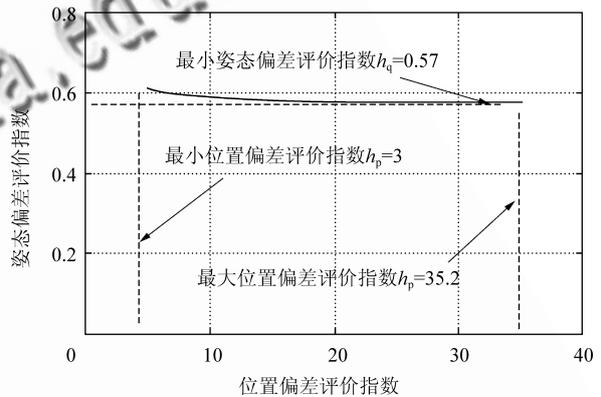
Table 2 Basic design parameters of rigid docking mechanism

参数	数值	参数	数值
主虎克铰自由旋转角度/(°)	45	R_1 /mm	7.0
俯仰角度/(°)	45	R_2 /mm	7.5
偏摆角度/(°)	45	D_3 /mm	7.0
翻滚角度/(°)	360	σ_{m2} /(°)	7.2
$O_2 J_0$ /mm	130	σ_{m3} /(°)	25
D_{S1} /mm	135	D_{S2} /mm	150
σ_1 /(°)	10		

由于翻滚对接盘可整周旋转, 所以 X_0 与 X_2 轴以及 Y_0 与 Y_2 轴夹角允许偏差为 360° 。根据设计参数及上述推导得 Z_0 与 Z_2 轴夹角的允许偏差及原点距离值, 并计算评价指数 h , 如图 11 所示。



(a) 位置偏差与姿态偏差示意图



(b) 位置偏差指数与姿态偏差指数示意图

图 11 最大允许对接位姿偏差及其评价

Fig. 11 Max allowable position/orientation offset and evaluation of chaser and target mechanism

由图 11 可知, 该对接机构 Z_0 、 Z_2 轴夹角最大允许偏差为 55° , 原点 O_0 、 O_2 最大位置允许偏差为 35.2 mm, 所对应的位姿偏差评价指数组 $h = \{0.57, 35.2\}$, 其中 h_a 为峰值的 33.4%, h_p 为抓持半径的 27%, 相对于对接机构的结构尺寸而言, 均有较大的位姿偏差裕度。各维度极限位姿偏差的计算结果可见表 3。

表 3 极限位姿偏差值

Table 3 Maximum allowable position/orientation offsets

偏差类型	最大偏差	参数
姿态偏差	X_0 、 X_3 夹角最大偏差 $\pm 180^\circ$	$k_{11} = -1$
	Y_0 、 Y_3 夹角最大偏差 $\pm 180^\circ$	$k_{22} = -1$
	Z_0 、 Z_3 夹角最大偏差 $\pm 55^\circ$	$k_{33} = 0.57$
位置偏差	O_0 、 O_3 坐标 X 最大偏差 22.3 mm	$X_{OO'} = 22.3$ mm
	O_0 、 O_3 坐标 Y 最大偏差 22.3 mm	$Y_{OO'} = 22.3$ mm
	O_0 、 O_3 坐标 Z 最大偏差 15 mm	$Z_{OO'} = 15$ mm

5 对接机构平台搭建、实验及结果分析

根据上述构思研制了如图 12 所示的 JL-2 对接机构, 并以移动机器人作为搭载平台进行实验。

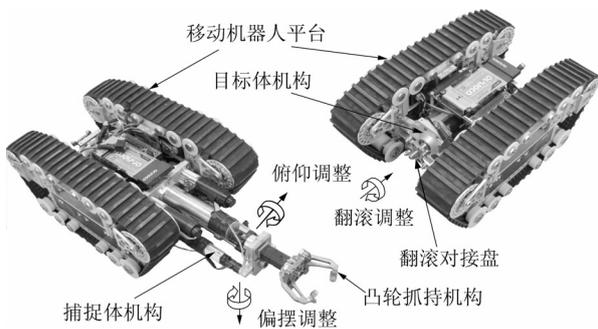


图 12 JL-2 型对接机构及搭载机器人

Fig. 12 JL-2 docking mechanism and mobile robot platform

5.1 强制纠偏性能实验及分析

对接机构强制纠偏性能实验如图 13 所示。

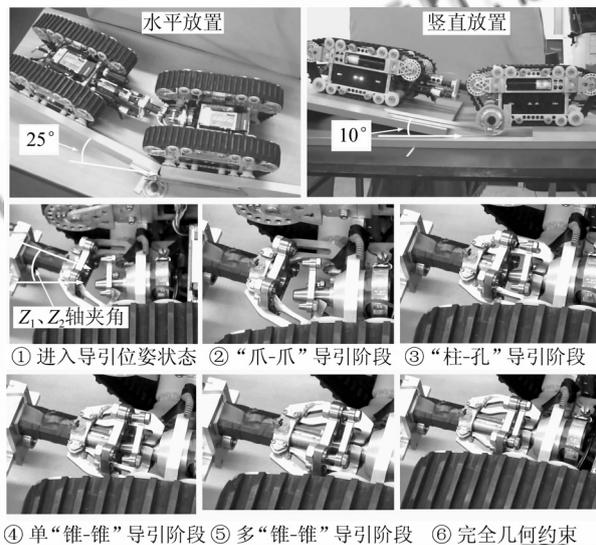


图 13 强制纠偏实验过程

Fig. 13 Forced alignment procedure

实验发现对接机构的强制纠偏能力在各方向上并不完全一致。当竖直方向摆放时， Z_1 、 Z_3 轴的最大强制纠偏夹角为 10° ，与设计结果相符；当对接机构水平摆放时， Z_1 、 Z_3 轴最大强制纠偏夹角为 25° ，优于理论计算结果。出现较大差异的主要原因是：对接机构水平放置时，只需克服机器人平台与支撑面的摩擦力，即可改变位姿关系；而竖直放置时，需要克服机器人平台重力才能改变整个机构位姿关系，因此造成强制纠偏角度不同。

5.2 最大位姿允差实验及分析

最大位姿允差实验与计算结果如表 4 所示。由表 4 可知，实际最大允差中的 $X_{00'}$ 、 $Y_{00'}$ 比表 3 中略大， $Z_{00'}$ 则略小。综合分析整个实验可知：

① 凸轮抓持机构与翻滚对接盘接触时，两者的被动性姿态调整有利于对接；② 接触部位均有圆角过渡，提高了对接的顺应性；③ $Z_{00'}$ 实际值略小主要是未考虑整体装配制造误差，因此需加误差修正量以消除影响。

表 4 极限位姿偏差值实验结果

Table 4 Maximum allowable position/orientation offsets of tests

位姿偏差	计算值	测试值
X_0 、 X_3 夹角最大偏差/ $^\circ$	± 180	± 180
Y_0 、 Y_3 夹角最大偏差/ $^\circ$	± 180	± 180
Z_0 、 Z_3 夹角最大偏差/ $^\circ$	± 55	± 55
O_0 、 O_3 坐标 X 最大偏差/mm	22.3	28.0
O_0 、 O_3 坐标 Y 最大偏差/mm	22.3	28.0
O_0 、 O_3 坐标 Z 最大偏差/mm	15.0	12.0

6 结论

(1) 本文提出组合多种导引方式才能实现多维大偏差刚性对接，据此设计的 JL-2 型刚性对接机构能够有效克服多个维度的复合位姿偏差，具有结构紧凑、对接位姿允差大、连接可靠等优点。

(2) 理论计算及实验结果证明：① 在多维大偏差对接中需对位置与姿态偏差同时约束，才能保证各维度偏差收敛于 0；② 该机构角度偏差中俯仰与偏摆为 55° ，翻滚达 $\pm 180^\circ$ ；③ 采用 3 个自由度驱动实现了 6 个维度的偏差补偿，在紧凑化设计上实现创新，对接可靠。

(3) 实验表明，这类对接机构适用于崎岖地形或者狭窄环境下的刚性对接，具有广泛应用前景和推广价值；但其在对接过程中会对机构位姿状态实时监测与调整，因此对位姿检测精度、控制算法等提出了更高要求，在野外环境中地面带来的非确定性扰动偏差补偿、自主对接的算法与实现都需进一步研究解决。

参考文献

- [1] 林来兴. 空间交会对接技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
Lin Laixing. Space rendezvous and docking technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [2] 姜汉文, 曲广吉, 刘济生. 空间对接机构[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.
Lou Hanwen, Qu Guangji, Liu Jisheng. Space docking machine [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1992. (in Chinese)

- [3] Jane P, Pete T, Anthony H, et al. KC-135 Zero G testing of a micro satellite docking mechanism[C]//Proceedings of SPIE. 2003, 5088:31-42.
- [4] Guru P, Eddie T, James S. Autonomous docking system for space structure & satellites[C]//Proceedings of SPIE. 2005, 5799:20-27.
- [5] Daniel E R, Pejmun M. Modeling and simulation of the michigan autonomous satellite docking system II[C]//Proceedings of SPIE. 2005, 5799:82-91.
- [6] Anthony B H, Peter T, Jane C P, et al. Advancements in KC-135 microgravity testing of an autonomous satellite docking system[C]//Proceedings of SPIE. 2004, 5419: 119-129.
- [7] Lennon R, Simon N, David W M. Development of the miniature video docking sensor[C]//Proceedings of SPIE. 2006, 6221:62210E-1-62210E-12.
- [8] Nilsson M. Connectors for self-reconfigurable robots[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(4): 473-474.
- [9] Andres C, Alberto B, Peter M W. The conro modules for reconfigurable robots[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(4):403-409.
- [10] Behrokh K, Peter W, Shen W M. Highly compliant and self-tightening docking modules for precise and fast connection of self-reconfigurable robots[C]//Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2003: 2311-2316.
- [11] 王巍, 张厚祥, 邓志诚, 等. 基于串并联机构的自重构移动机器人[J]. 机械工程学报, 2008, 44(5):92-101. Wang Wei, Zhang Houxiang, Deng Zhicheng, et al. Reconfigurable mobile robot based on serial and parallel mechanism [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(5):92-101. (in Chinese)
- [12] Wang W, Zhang H X, Zong G H, et al. Force cooperation in a reconfigurable field multi-robot system[J]. Journal of Field Robotics, 2008, 25(11-12): 922-938.
- [13] Esben H Φ , Kristian K, Richard B. Design of the AT-IRON lattice-based self-reconfigurable robot[J]. Autonomous Robots, 2006, 21(2):165-183.
- [14] Tuci E, Gross R, Trianni V, et al. Cooperation through self-assembling in multi-robot systems[J]. ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems, 2006, 1(2):115-150.
- [15] 陈明, 宇可, 战强. 一种对接机构的纠偏能力分析[J]. 机电产品开发与创新, 2006, 19(4):19-21. Chen Ming, Yu Ke, Zhan Qiang. Analysis of the deflection rectifying ability of a docking mechanism[J]. Development and Innovation of Machinery and Electrical Products, 2006, 19(4):19-21. (in Chinese)
- [16] 张大伟, 田浩, 赵阳, 等. 类杆锥式对接机构捕获动力学分析与参数设计[J]. 宇航学报, 2008, 29(6): 1717-1722. Zhang Dawei, Tian Hao, Zhao Yang, et al. Quasi probe-cone docking mechanism capturing dynamics analyses and parameter design [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(6):1717-1722. (in Chinese)

作者简介:

王巍(1973—) 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 移动机器人、爬壁机器人等。

Tel: 010-82314554

E-mail: wangweibuaa@126.com

于文鹏(1975—) 男, 博士研究生。主要研究方向: 移动机器人、可重构机器人、刚性对接技术、机构学。

李雄峰(1985—) 男, 硕士研究生。主要研究方向: 高速振动机械、移动机器人、机构学。

唐慧霖(1985—) 硕士研究生。主要研究方向: 移动机器人、自重构机器人及对接技术。

李宗良(1985—) 男, 硕士研究生。主要研究方向: 机器人传感器技术、移动导航、机构学。

(编辑: 蔡斐)