

文章编号: 1000-8055(2009)01-162-07

轴对称推力矢量喷管运动奇异性分析

王玉新

(浙江大学 机械工程与能源学院, 杭州 310027)

摘 要: 通过建立轴对称推力矢量喷管(AVEN)的构型分岔方程,运用连续同伦方法,研究了 AVEN 装置驱动机构和扩张调节片导引机构的构型分岔特性,发现,无论推力矢量喷管是否发生偏转,当以喷口面积作为分岔参数时,AVEN 装置都存在转向点奇异位置;当以矢量偏转角为分岔参数时,AVEN 装置不存在奇异位置。当 AVEN 装置处于非矢量状态时,扩张调节片导引机构处于多重奇异位置状态。转向点奇异位置和扩张调节片导引机构多重奇异位置,将导致 AVEN 装置的运动输出具有不确定性,影响含 AVEN 装置飞机的空中飞行安全。

关 键 词: 运动奇异性; 轴对称推力矢量喷管; 不确定运动

中图分类号: V233

文献标识码: A

Singularity analysis of axisymmetric vectoring exhaust nozzle

WANG Yu-xin

(College of Mechanical Engineering and Energy,
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Setting up the configuration bifurcation equation of the axisymmetric vectoring exhaust nozzle (AVEN) and utilizing the homotopy tracing approach, the configuration bifurcation behaviors of the AVEN-driving parallel mechanism and the driving kinematic chains of the divergent flaps were analyzed. It is found that whether deflecting or not, the turning points will exist corresponding to the bifurcation parameter of the area exhaust nozzle, and the turning points will disappear corresponding to the bifurcation parameters of the deflecting angle. While the AVEN is in non-vector status, the driving kinematic chain of divergent flaps is at its multi-singular position. Both the turning points and multi-singular positions will lead the motion of the AVEN uncertain. This kind of motion uncertainty is harmful to the safety of aircrafts equipped with the AVEN.

Key words: singularity; axisymmetric vectoring exhaust nozzle (AVEN); motion uncertainty

轴对称矢量喷管(AVEN 装置)是第四代先进作战飞机的关键技术装备之一。从结构组成原理来看,如图 1 所示,AVEN 装置由双 Stewart 并联机构驱动,由十几组空间 $RRSR$ - RRR (S 代表球面运动副, R 代表转动副)运动链导引的收敛调节片和扩张调节片及其密封片包络组成的时变几

何体。在 A_9 转向控制环和 A_8 调节环的驱动下,实现 A_9/A_8 的面积变化和扩张段的矢量偏转。

由于运动奇异性是闭环机构或并联机构的固有特性^[1-3],作为 A_9 转向控制环的并联驱动机构,也不例外。同时,因 AVEN 装置的扩张段是由一系列成组的 $RRSR$ 运动链导引的扩张调节片

收稿日期: 2007-10-07; 修订日期: 2007-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(50375111;50675158)

作者简介: 王玉新(1964-),男,河北黄骅人,教授,博士,主要从事 AVEN 装置关键技术、复杂机械系统创新设计自动化理论与方法、并联机构运动奇异性规避理论等研究。E-mail: strath_tj@hotmail.com; wang_yuxin@eyou.com

所围成的,该运动链为闭环机构,存在奇异位置.因此,AVEN 装置的运动奇异性不仅存在于 A_9 转向控制环的驱动机构,而且还存在于扩张调节片的悬挂运动链,奇异性问题比较复杂.

根据对并联机构运动奇异性的研究,在奇异位置处,即使各驱动器的输出确定,动平台依旧可以获得一个或多个局部运动自由度,导致动平台的运动输出具有不确定性^[4-6].另一方面,为消除高温变形影响,扩张调片导引机构 $RRSR$ 运动链的运动副间隙一般比较大,在飞机机动力的扰动下, $RRSR$ 运动链很容易产生二次奇异,造成扩张调节片相互挤压,使扩张段破坏,影响含 AVEN 装置飞机的飞行安全.

无论是 AVEN 装置的运动奇异性问题,还是 $RRSR$ 运动链的扰动失控问题,用传统的运动可靠性设计方法都不能有效地发现和解决.因此,本文就 AVEN 装置的运动奇异性问题进行研究,为提高含 AVEN 装置飞机空中飞行的安全性,奠定理论基础.

1 AVEN 装置构型方程

1.1 变几何体的分布参数

固定 A_8 收敛调节环, $RRSR-RRR$ 运动链退化为 $RRSR$ 运动链.此时,图 1 所示的 AVEN 装置的结构简图如图 2 所示. A_9 转向控制环为 6-SPS 并联机构的动平台.在固定平台上分布有 n 个轴线与分布圆相切,中心点为 D_i 的转动副 R ;在动平台上均匀分布有 n 个轴线与分布圆相切,中心点为 A_i 的 R 副. $RRSR$ 运动链通过 A_i 和 D_i 点两个 R 副,分别悬挂于固定平台和动平台上. $RRSR$ 运动链的 RS 构件 (C_iB_i) 导引具有特定内曲面的 π 和扩张密封片一起,包络形成 AVEN 装置的扩张段.称该扩张段为变几何体.改变 6-SPS

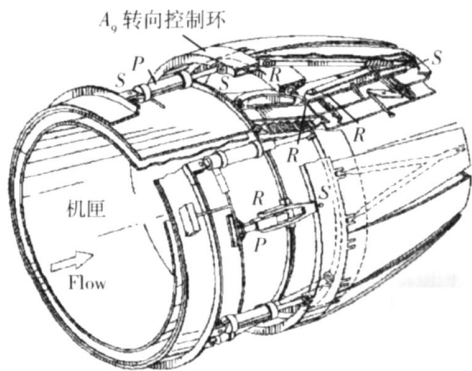


图 1 轴对称矢量喷管

Fig. 1 Axisymmetric vectoring exhaust nozzle

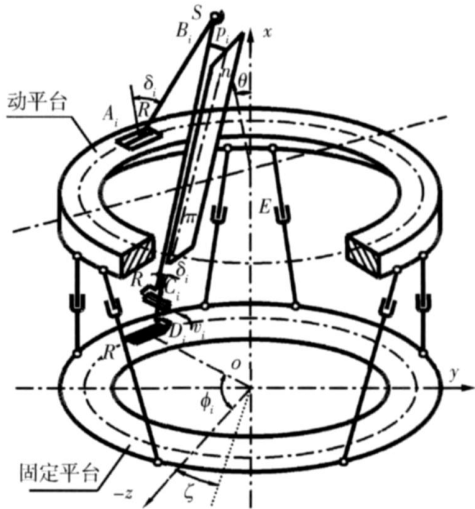


图 2 AVEN 装置的简化模型

Fig. 2 Simplified model for the AVEN

驱动构件的长度,动平台的位置将发生变化,从而引起变几何体的面积变化和矢量偏转角度的变化.

变几何体的形状由 3 个参数确定^[7]:变几何体的喷口面积 A_n 、偏转角 α 和方位角 β .近似地将变几何体的面积 A_n 用 $RRSR$ 运动链导引的 π 平面的末端中点 P_i (简称连杆末端点) 构成的多边形来表示.变几何体偏转角 α 为变几何体喷口中心 G 与喉道中心 O_8 的连线与固定平台法线 (中心轴线) 的夹角.方位角为变几何体出口截面中心 G 与喉道中心 O_8 点连线在固定坐标系 $yo z$ 平面的投影相对 y 轴的夹角.

对于由 6-SPS 驱动的 AVEN 装置,动平台的位姿参数有 6 个.当引入 3-PRS 约束后,动平台的位姿参数有 3 个:动平台左平面中心沿发动机轴线的距离 l_0 ,动平台法向量 n 与 x 轴的夹角 (称为动平台偏转角) θ ,以及该法向量在 zoy 平面中的投影与 y 轴夹角 ξ (称为动平台的偏转方位角).因结构的对称性, $\xi = \beta$. A_9 转向控制环的位姿也可以用其平面法向量 n 相对 y 轴的转角 μ 及相对 z 轴的转角 η 表示,其变换关系为

$$\begin{cases} \sin \mu = \sin \theta \sin \xi \\ \tan \eta = \tan \theta \cos \xi \end{cases} \quad (1)$$

当 A_9 转向控制环的位姿确定后, A_9 转向环的法线矢量为 $n = R_{\eta,z} R_{-\mu,y_1} x$,展开得

$$n = R_{\eta,z} R_{-\mu,y_1} X = \begin{bmatrix} c\mu c\eta & -s\eta & -s\mu c\eta \\ c\mu s\eta & c\eta & -s\mu s\eta \\ s\mu & 0 & c\mu \end{bmatrix} X = \begin{bmatrix} c\mu c\eta \\ c\mu s\eta \\ s\mu \end{bmatrix}$$

根据 B_i 点分别在构件 $C_i B_i$ 上和在构件 $A_i B_i$ 上,得到 $RRSR$ 运动链的构型方程为

$$\begin{cases} f_{1i} = [l_{BD} C V_i \omega_i - l_h S V_i + l_{CD} C V_i + X_8 - l_{AB} C \delta_i \theta - l_i C \theta - l_0] \sqrt{1 - S^2 \xi^2} \theta + \\ (l_{AB} S \delta_i + R_2) (C \phi_i C \xi + S \phi_i S \xi C \theta) S \theta = 0 \\ f_{2i} = [l_{BD} (C \phi_i S V_i \omega_i - S \phi_i S \omega_i) + l_h C \phi_i C V_i + l_{CD} C \phi_i S V_i + R_{8j} C \phi_i - l_{AB} C \xi C \delta_i S \theta - l_i C \xi S \theta] \times \\ \sqrt{1 - S^2 \xi^2} \theta - (l_{AB} S \delta_i + R_2') [C \phi_i C \theta - S \phi_i S \xi C \xi S^2 \theta] = 0 \\ f_{3i} = l_{BD} (S \phi_i S V_i \omega_i + C \phi_i S \omega_i) - l_{AB} (S \xi C \delta_i S \theta + S \phi_i S \delta_i \sqrt{1 - S^2 \xi^2} \theta) + \\ l_h S \phi_i C V_i + l_{CD} S \phi_i S V_i + R_{8j} S \phi_i - R_2' S \phi_i \sqrt{1 - S^2 \xi^2} \theta - l_i S \xi S \theta = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (2)$$

当动平台的位姿参数 l_0, θ, β 确定后,从式(2) 角 α 的计算如下:

可解得 $RRSR$ 运动链各运动副角位移 $v_i, \omega, \delta, \phi$ 张调节片末端 P_i 点的坐标为
张调节片末端的位置坐标,喷口面积 A_n 以及偏转

$$P_i = \begin{bmatrix} l_D C V_i \omega_i + l_{CD} C V_i + X_8 + l_h S V_i \\ l_D (C \phi_i S V_i \omega_i - S \phi_i S \omega_i) + l_{CD} C \phi_i S V_i + R_{8j} C \phi_i - l_h C \phi_i C V_i \\ l_D (S \phi_i S V_i \omega_i + C \phi_i S \omega_i) + l_{CD} S \phi_i S V_i + R_{8j} S \phi_i - l_h S \phi_i C V_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

A_9 喷口面积中心 G 的坐标为

$$\begin{aligned} G_x &= \frac{\sum_{i=1}^n A_i (P_{xi} + P_{xi_1} + G_{Sx})}{3A_{n_2}}, \\ G_y &= \frac{\sum_{i=1}^n A_i (P_{yi} + P_{yi_1} + G_{Sy})}{3A_{n_2}}, \\ G_z &= \frac{\sum_{i=1}^n A_i (P_{zi} + P_{zi_1} + G_{Sz})}{3A_{n_2}} \end{aligned}$$

AVEN 装置的矢量偏转角度 α 为

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{G_x}{\sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2}} \quad (4)$$

喷口面积 A_n 等于一系列小三角形 $\Delta G_5 P_i P_{i-1}$ 面积的和,即

$$A_n = \sum_{i=1}^n A_i = \sum_{i=1}^n \sqrt{A_{1i}^2 + A_{2i}^2 + A_{3i}^2} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} A_{1i} &= (G_{Sy} P_{zi} + P_{yi} P_{zi_1} + G_{Sz} P_{yi_1} - \\ &G_{Sy} P_{zi_1} - G_{Sz} P_{yi} - P_{zi} P_{yi_1}) / 2 \\ A_{2i} &= (G_{Sz} P_{xi} + P_{zi} P_{xi_1} + G_{Sx} P_{zi_1} - \\ &G_{Sz} P_{xi_1} - G_{Sx} P_{zi} - P_{xi} P_{zi_1}) / 2 \\ A_{3i} &= (G_{Sx} P_{yi} + P_{xi} P_{yi_1} + G_{Sy} P_{xi_1} - \\ &G_{Sx} P_{yi_1} - G_{Sy} P_{xi} - P_{yi} P_{xi_1}) / 2 \end{aligned}$$

1.2 AVEN 装置构型方程

设给定的喷口面积和矢量偏转角度分别为 A_9 和 α ,则式(4)和式(5)确定的矢量偏转角度 α 和喷口面积 A_n 应该满足

$$\begin{cases} A_9 - A_n = 0 \\ \alpha - \alpha = 0 \end{cases} \quad (6)$$

为了降低方程(2)的维数,以特殊位置 $RRSR$

运动链的参数 $x = [x_1, x_2, L, x_{13}]^T$ 表达方程(2).

考虑式(6),得到低维的 AVEN 装置构型方程为

$$\begin{cases} f_1 = A_9 - A_n = 0 \\ f_2 = \alpha - \alpha = 0 \\ f_3 = (x_5 - R_4)^2 + x_6^2 - (l_{CD} + l_{CB})^2 = 0 \\ f_4 = (x_1 - x_5)^2 + (x_2 - x_6)^2 - l_{AB}^2 = 0 \\ f_5 = (x_7 + R_3)^2 + x_8^2 - (l_{CD} + l_{CB})^2 = 0 \\ f_6 = (x_3 - x_7)^2 + (x_4 - x_8)^2 - l_{AB}^2 = 0 \\ f_7 = [x_9 - 0.5(x_1 + x_3)]^2 + (x_{10} - R_1)^2 + \\ [x_{11} - 0.5(x_2 + x_4)]^2 - l_{AB}^2 = 0 \\ f_8 = x_9^2 + (x_{12} - x_{10})^2 + (x_{13} - x_{11})^2 - l_{CB}^2 = 0 \\ f_9 = (x_{12} - R_3)^2 + x_{13}^2 - l_{DC}^2 = 0 \\ f_{10} = -\frac{\sqrt{l_{DC}^2 - x_{13}^2}}{l_{CD}} (x_{12} - x_{10}) + \\ \frac{x_{13}}{l_{CD}} (x_{13} - x_{11}) = 0 \\ f_{11} = \frac{x_1 - x_3}{2R_1} [x_9 - 0.5(x_1 + x_3)] + \\ \frac{x_2 - x_4}{2R_1} [x_{11} - 0.5(x_2 + x_4)] = 0 \\ f_{12} = (x_1 - x_3)^2 + (x_2 - x_4)^2 - 4R_1^2 = 0 \\ f_{13} = c_1 c_2 x_9 (x_8 - x_6) - (c_1 x_5 - c_3 R_3) \cdot \\ (c_1 x_8 - c_2 x_{11} + c_4 x_{13}) + (c_1 x_7 + c_2 R_3) \cdot \\ (c_1 x_6 - c_2 x_{11} + c_4 x_{13}) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

令 $\mu = \{A_n, \alpha\}^T$ 和 $F = [f_1, f_2, \dots, f_{13}]^T$,则 AVEN 装置构型方程的集成形式为

$$F(x, \mu) = 0 \quad (8)$$

运用连续同伦方法跟踪方程(8),求出作动筒位移输出与 AVEN 装置喷口面积和矢量偏转角度之间的关系。

2 AVEN 装置奇异性分析

2.1 装配构型

单一的 6-SPS Gough-Stewart 类并联机构最多存在 40 组解^[8]. 而由 6-SPS 并联机构和若干组 RRSR 运动链组合而成的 AVEN 装置的装配构型

远远多于这一数目. 经过基本同伦法求解式(7), 得到 AVEN 装置构型方程对应的 224 组解. 在这 224 种复域装配构型中, 104 对为共轭复根(208 组复根), 16 组为实根. 表 1 列出了 AVEN 装置的 16 种实域装配构型.

表 1 AVEN 装置的实域全部构型
Table 1 Assembly configurations in the real domain of the AVEN

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
1	108.530	131.360	- 91.452	80.993	195.716	- 76.375	197.062
2	60.240	155.103	- 137.668	127.481	174.564	- 103.372	187.280
3	64.826	211.379	- 131.096	125.198	175.949	- 102.127	187.829
4	- 66.128	243.535	133.030	- 84.931	176.108	80.983	178.402
5	141.778	122.433	- 55.573	109.384	184.486	- 121.630	178.034
6	138.452	248.176	- 57.610	108.932	184.705	- 120.775	178.519
7	- 130.796	139.052	66.591	- 75.182	181.563	90.681	172.553
8	- 64.183	109.246	134.384	- 84.960	176.092	80.986	178.400
9	100.130	- 130.061	- 99.870	78.237	- 196.553	- 78.298	- 196.535
10	55.574	- 157.418	- 141.123	122.648	- 177.450	- 110.264	- 184.058
11	58.010	- 208.876	- 138.057	121.019	- 178.382	- 109.380	- 184.489
12	- 74.523	- 241.455	125.161	- 89.768	- 173.136	74.509	- 181.915
13	138.595	- 128.696	- 60.262	101.541	- 188.085	- 125.323	- 175.875
14	131.968	- 251.107	- 64.034	101.180	- 188.241	- 124.637	- 176.284
15	- 134.986	- 133.506	63.547	- 81.184	- 178.288	85.362	- 175.851
16	- 68.940	- 106.457	128.627	- 89.299	- 173.431	74.489	- 181.925

	X8	X9	X10	X11	X12	X13
1	7.668	77.865	196.452	36.953	57.555	128.739
2	- 45.270	46.768	185.662	- 0.656	56.332	126.257
3	- 42.426	47.462	186.151	- 0.949	56.223	251.554
4	28.236	59.249	177.697	- 8.640	52.723	225.211
5	50.462	46.697	183.426	- 1.094	56.769	154.872
6	49.438	46.952	183.659	- 1.191	56.132	208.690
7	- 22.931	59.258	179.119	- 8.319	52.896	106.829
8	28.302	59.238	177.692	- 8.637	52.724	133.132
9	0.088	78.278	- 196.544	37.057	- 57.524	- 129.937
10	- 50.911	46.352	- 183.546	- 0.868	- 56.254	- 121.227
11	- 49.009	46.836	- 183.969	- 1.057	- 56.183	- 248.346
12	22.104	59.758	- 178.657	- 8.635	- 52.725	- 230.231
13	44.111	47.519	- 185.429	- 1.134	- 56.154	- 150.047
14	43.230	47.731	- 185.582	- 1.221	- 56.121	- 211.317
15	- 28.858	59.047	- 177.776	- 8.537	- 52.779	- 109.337
16	20.920	59.927	- 178.701	- 8.696	- 52.692	- 137.550

2.2 构型分岔特性

2.2.1 AVEN 装置无偏转

当 AVEN 装置无偏转时, AVEN 装置及其驱动并联机构关于 z 轴对称. 图 3 给出了不同解曲线上作动筒位移输出随喷口面积的变化情况.

图 3 中, 曲线 $b_k(k=1, 2, \cdots, 8)$ 为基础平台上空间的 8 条构型曲线, P_{ji} 为输入参数 l_i 对应的第 j 个分岔点. 当喷口面积由 $5\,000\text{ mm}^2$ 增大到 $8\,500\text{ mm}^2$ 时, 构型 3 和构型 6 的解曲线相交, 形成转向点分岔点, 记为 P_1 . 在转向点分岔位置, 当喷口面积减少时, AVEN 装置驱动作动筒的位移输出可

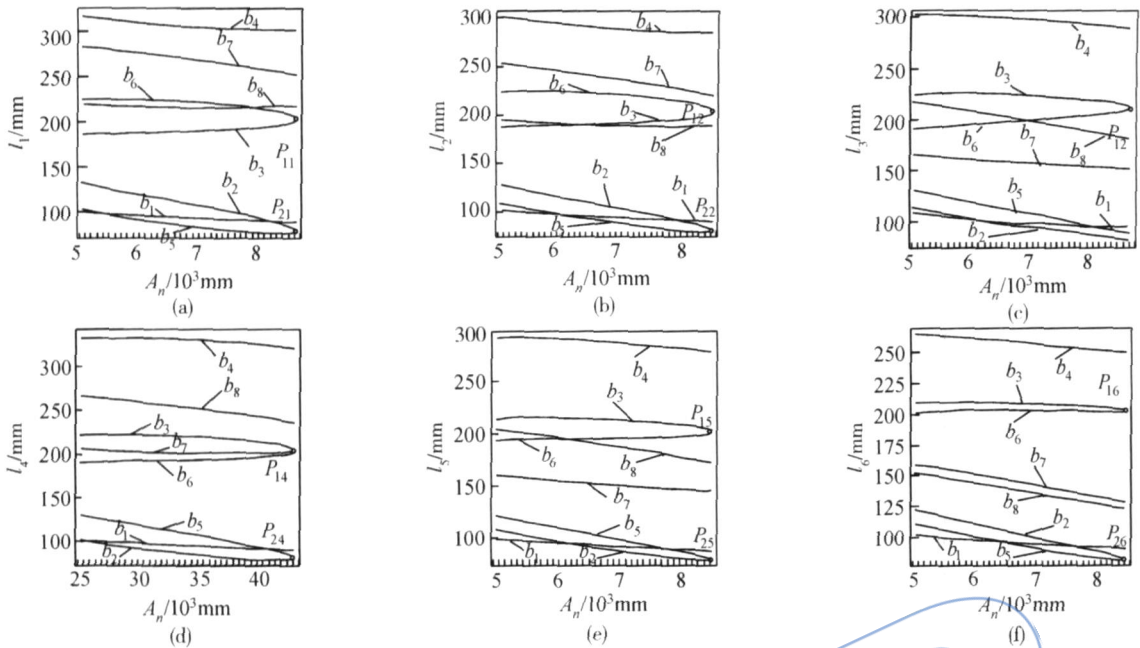


图 3 构型曲线随分岔参数 A_n 的变化情况
Fig. 3 Configuration curves going with A_n

以分别沿构型曲线 3 或构型曲线 6 给出输出,这两种输出都可以满足 A_9 面积控制的要求.但是,由于输入参数的设计是沿着其中某一条构型曲线给出的,如果 A_9 面积沿着与设计构型曲线不同的另一构型曲线变化,使 A_9 的实际输出值与输入参数控制模式给出的 A_9 面积不一致,将导致推力矢量控制的不确定性,使含推力矢量发动机的飞机-AVEN 装置一体化控制模式失效.同样,在构型 2 和构型 5 解曲线的交点,转向点分岔点 P_2 处,也会产生类似的现象.

在图 3 所示的其它 4 条构型曲线上,构型曲线不发生交叉,AVEN 装置具有确定的运动输出.这一点告诉我们,当 AVEN 装置的装配构型位于恰当的构型曲线上,AVEN 装置能够获得确定的运动,不会遇到转向点奇异问题.反之,若初始装配构型选择不恰当,有可能将存在转向点奇异位置的构型曲线作为其工作构型曲线,导致 AVEN 装置的运动具有不确定性.

用 Q_{ji} ($j=1,2;i=1,2,\cdots,6$) 表示伴随 l_i 的解曲线的第 j 个交叉点.从图 3 可以看出,当 $A_n=5\,300\text{ mm}^2$ 时,伴随 l_1 的构型曲线 b_1 和 b_5 交于点 Q_{11} ;当 $A_n=8\,200\text{ mm}^2$ 时,伴随 l_1 的构型曲线 b_1 和 b_2 交于点 Q_{21} ;当 $A_n=6\,100\text{ mm}^2$ 时,伴随 l_2 的构型曲线 b_1 和 b_5 交于点 Q_{12} ;当 $A_n=8\,100\text{ mm}^2$ 时,伴随 l_2 的构型曲线 b_1 和 b_2 交于点 Q_{22} ;当 $A_n=7\,900\text{ mm}^2$ 时,伴随 l_3 的构型曲线 b_1 和 b_5 交于点 Q_{13} ;当 $A_n=6\,200\text{ mm}^2$ 时,伴随 l_3 的构

型曲线 b_1 和 b_2 交于点 Q_{23} ;当 $A_n=8\,100\text{ mm}^2$ 时,伴随 l_4 的构型曲线 b_1 和 b_5 交于点 Q_{14} ;当 $A_n=5\,200\text{ mm}^2$ 时,伴随 l_4 的构型曲线 b_1 和 b_2 交于点 Q_{24} ;当 $A_n=7\,900\text{ mm}^2$ 时,伴随 l_5 的构型曲线 b_1 和 b_5 交于点 Q_{15} ;当 $A_n=6\,300\text{ mm}^2$ 时,伴随 l_5 的构型曲线 b_1 和 b_2 交于点 Q_{25} ;当 $A_n=6\,400\text{ mm}^2$ 时,伴随 l_6 的构型曲线 b_1 和 b_2 交于点 Q_{16} ;当 $A_n=7\,700\text{ mm}^2$ 时,伴随 l_6 的构型曲线 b_1 和 b_2 交于点 Q_{26} .

根据以上分析,当 $A_n \in [5\,200\text{ mm}^2, 8\,200\text{ mm}^2]$,构型曲线 b_1 将分别与 b_2 和 b_5 交叉.而构型曲线 b_2 和 b_5 随着喷口面积的增加,最终形成转向点分岔点.当 $A_n \in [5\,300\text{ mm}^2, 6\,400\text{ mm}^2]$, l_1, l_2, l_6 的构型曲线 b_1 分别与 b_5 交于点 Q_{11}, Q_{12} 和 Q_{16} ,在扰动等影响下,将导致 AVEN 装置的构型由构型曲线 1 变换到构型曲线 5 上;当 $A_n \in [7\,700\text{ mm}^2, 8\,200\text{ mm}^2]$,分量 l_1, l_2, l_6 对应的构型曲线 b_1 分别与 b_2 交于点 Q_{21}, Q_{22} 和 Q_{26} .同样,在扰动等的影响下,AVEN 装置的构型可能由构型曲线 1 变换到构型曲线 2 上.构型曲线的变换同样引起 AVEN 装置的运动不确定性.

2.2.2 AVEN 装置偏转

当 AVEN 装置发生偏转时,AVEN 装置将不再保持轴对称性.研究表明,AVEN 装置喷口面积随输入参数 l_i ($i=1,2,\cdots,6$) 的变化情况(矢量喷管偏转 $\alpha=15^\circ$)与图 3 类似.当以矢量偏转角度 α 作为分岔参数时,AVEN 装置的构型曲线

只存在个别构型曲线的交叉点,而不存在转向点奇异位置.这表明,矢量偏转角度的变化,不会导致 AVEN 装置产生运动奇异性.

2.2.3 RRSR 运动链奇异性

为了研究 RRSR 运动链的运动奇异性问题,图 4 给出了以偏转角度 α 为分岔参数,RRSR 运动链的分岔特性.图 4 中, x_{10} , x_{11} 为与偏转平面垂直的平面内的 RRSR 运动链 B 点的 y 坐标和 z 坐标; x_{12} , x_{13} 为 C 点的 y 坐标和 z 坐标.

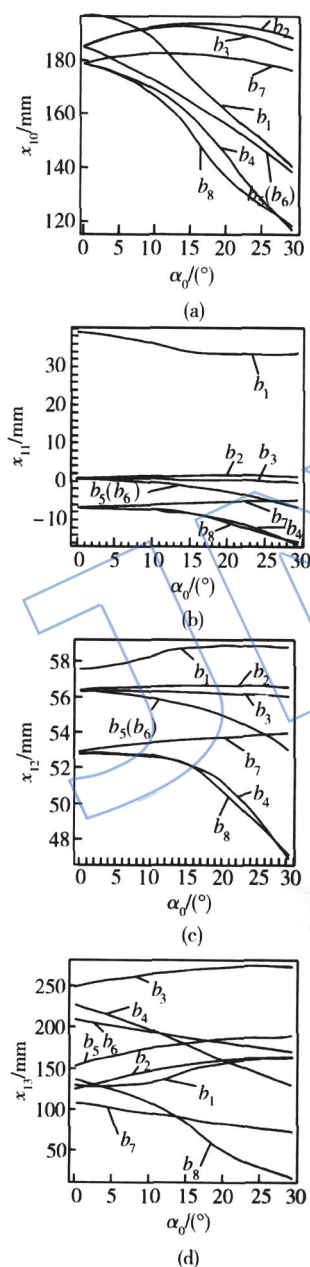


图 4 RRSR 运动链分岔特性($\alpha = \alpha_0$)

Fig. 4 Configuration bifurcation behaviors of the RRSR kinematic chains($\alpha = \alpha_0$)

考察图 4 可以清楚地发现,在非矢量状态,即 $\alpha=0$,构型曲线明显存在转向点奇异位置,如图 4(a)所示,甚至多重奇异位置,如图 4(b)和图 4(c)所示.这表明,非矢量状态下的 RRSR 运动链处于奇异(含多重奇异,最高达四重)位置状态.特别是由于对消除高温变形的考虑,RRSR 运动链的运动副间隙设计的比较大,在飞机机动等扰动力的作用下,很可能导致 RRSR 运动链处于另外的构型曲线上,导致扩张调节片相互挤压,造成 AVEN 装置扩张段的破坏.

通过以上分析可知,尽管 AVEN 装置整体不处于奇异位置,但组成 AVEN 装置收扩喷管的扩张调节片悬挂机构 RRSR 运动链处于奇异位置,在飞机机动力的扰动下,可能导致扩张调节片产生非确定性运动,引起 AVEN 装置扩张段的破坏.

3 讨论与结论

本文利用建立的 AVEN 装置构型方程,分别研究了 AVEN 装置驱动机构的构型分岔特性和扩张调节片导引机构 RRSR 运动链的构型分岔特性.发现,无论 AVEN 装置是否发生偏转,当以喷口面积作为分岔参数时,AVEN 装置都存在转向点奇异位置;当以矢量偏转角为分岔参数时,AVEN 装置不存在奇异位置.当 AVEN 装置处于非矢量状态时,扩张调节片导引机构 RRSR 运动链处于多重奇异位置状态.无论是转向点奇异位置,还是 RRSR 运动链的多重奇异位置,都可能引起 AVEN 装置出现不确定的运动,使含 AVEN 装置飞机的空中飞行安全受到影响.

并联机构的运动不确定性与运动可靠性或运动失效模式存在明显的区别.前者是该类机构的固有特征,是当并联机构的尺度、位置处于某一特殊关系时,即便是将驱动构件固定,执行构件仍然可以获得或失去一个或几个自由度,使执行构件产生不可控的局部自由运动,其运动具有不确定性.而后者是指机构间隙、构件尺度误差等原因造成的机构运动输出的失效模式.后者可以采用可靠性理论进行控制和设计;而对于前者,可靠性设计理论不能有效地解决运动奇异性带来的运动不确定性问题,只能通过分析、设计的方法,规避运动奇异性问题.

AVEN 装置是一个非常庞大、复杂的空间多连杆机构.运动关系复杂,单纯通过设计、仿真和可靠性设计,并不能完全解决该装置的运动可靠

性和上天试飞的安全性问题,必须系统、全面、彻底地研究尺度参数与其运动奇异性、运动确定性之间的关系.通过完善、修改设计方案,在设计阶段有效地规避 AVEN 装置并联驱动机构和 $RRSR$ 运动链的运动奇异性问题.

参考文献:

- [1] Hunt K H, Kinematic geometry of mechanisms [M]. Cambridge: Oxford University Press, 1978.
- [2] Bandyopadhyay S, Ghosal A. Analysis of configuration space singularities of closed-loop mechanisms and parallel manipulators [J]. Mechanism and Machine Theory, 2004, 39(5): 519-544.
- [3] Chowdhury P, Ghosal A. Singularity and controllability analysis of parallel manipulators and closed-loop mechanisms [J]. Mechanism and Machine Theory, 2000, 35: 1455-1479.
- [4] LI Huade, Gosselin C M, Richard M J, et al. Analytical form of the six-dimensional singularity locus of the general Gough-Stewart platform [J]. Trans. of ASME, Journal of Mechanical Design, 2006, 128(1): 279-287.
- [5] HUANG Zhen, CHEN Lihua, LI Yanwei. The singularity principle and property of Stewart parallel manipulator [J]. Journal of Robotic System, 2003, 20(4): 163-176.
- [6] Innocenti C, Castelli V P. Singularity-free evolution from one configuration to another in serial and fully-parallel manipulators [J]. Trans. of ASME, Journal of Mechanical Design, 1998, 120(3): 73-79.
- [7] 王玉新,王仪明,李雨桐. 轴对称推力矢量喷管载荷变形的控制补偿 [J]. 航空动力学报, 2007, 22(10): 1685-1689.
WANG Yuxin, WANG Yiming, LI Yutong. Load deformation compensation of the axisymmetric vectoring exhaust nozzle [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(10): 1685-1689. (in Chinese)
- [8] HAN Lin, LIAO Qizheng, LIANG Chonggao. Forward displacement analysis of one kind of general 5-5 parallel manipulators [J]. Mechanism and Machine Theory, 2000, 35(2): 271-289.