

文章编号: 1000-8055(2007)10-1685-05

轴对称推力矢量喷管载荷变形的控制补偿

王玉新¹, 王仪明², 李雨桐³

(1. 浙江大学 机械与能源学院, 杭州 310027; 2. 北京图形与传媒学院, 北京 100014;
3. 同济大学 机械学院, 上海 200092)

摘 要: 研究了温度场和气动载荷联合作用下的轴对称推力矢量喷管出口面积和偏转角度误差的补偿问题. 建立了扩张调节片位姿参数与其悬挂机构尺度之间的关系, 导出了悬挂机构关节角位移增量与构件长度增量之间的微分方程, 得到喷管出口面积误差和矢量偏转角误差与负载变形之间的解析表达式. 利用矢量偏转角度和面积与轴对称推力矢量喷管转向驱动机构动平台位姿之间的关系, 建立了受温度场和气动载荷联合作用下的动平台位姿补偿方程. 研究表明, 补偿后的矢量偏转角度和面积的相对误差不大于 1%.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 轴对称推力矢量喷管 (AVEN); 变形补偿; 温度载荷; 气动载荷
中图分类号: V231.3 **文献标识码:** A

Load deformation compensation of the axisymmetric vectoring exhaust nozzle

WANG Yu-xin¹, WANG Yi-ming², LI Yu-tong³

(1. College of Machine and Energy, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Beijing Graphics and Communication Institute, Beijing 100014;
3. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The compensation of the load deformations for axisymmetric vectoring exhaust nozzle (AVEN) under heat field and aerodynamic forces was analyzed. The correlation between expansion plates and suspension kinematic chains was set up, while a differential equation for the joint displacement increments and length increments of suspension kinematic chains was introduced. Then, the analytical expression for the deviations of the area/ vector deflection angle of the exhaust nozzle caused by the load deformations was expressed analytically. With the aid of the relationship among the deviations of the nozzle and the pose parameters of the driving platform of the AVEN, the dynamic compensation equation for correcting the deviations of the AVEN caused by the heat field and forces was deduced. The research results show that, the relative error of the area and deflection angle of AVEN is less than 1% after compensation.

Key words: aerospace propulsion system; axisymmetric vectoring exhaust nozzle (AVEN); compensation of deformation; heat load; pneumatic load

轴对称推力矢量喷管 (AVEN) 是 90 年代初 发展起来的一种用于推力矢量发动机的排气转向

收稿日期: 2006-10-09; 修订日期: 2007-01-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50375111/ 50675148)

作者简介: 王玉新 (1964-), 男, 河北黄骅市人, 教授、博士, 主要从事产品创新设计及其自动化方法研究, 并联机器人运动奇异性规避方法研究, 以及轴对称推力矢量喷管关键技术研究.

控制装置^[1].采用推力矢量技术,引起飞机的机身、机翼、操纵面和进气道附近的流场发生变化,造成气动力的改变.由于这种干扰的强弱与飞机的整体布局形式具有极强的关系,所以在飞机的气动布局设计中必须采用机体/推进系统一体化设计.要实现飞机机体与矢量推进系统的一体化设计,必须能够精确地确定推力矢量发动机的矢量偏转角、气动面积和尾喷流流场.

AVEN 装置是由 Gough-Stewart 并联机构驱动的复杂空间机构^[2].并联于动、静平台之间的若干组空间 RSRR 运动链导引具有特殊内曲面的 SR 构件包络成空间时变几何体(VGB).在动平台的驱动下,空间时变几何体实现喷管出口面积的变化和矢量转角的偏转.由于 AVEN 的分布参数,如喷管出口面积、矢量偏转角等,是按冷态进行设计的,当受到温度场和气动载荷的联合作用,空间 RSRR 运动链中的构件将产生载荷变形,引起 AVEN 装置的喷管出口面积和矢量偏转角产生误差.为了实现飞机机体与矢量推进系统的一体化设计,需要对空间 RSRR 运动链载荷变形所引起的 AVEN 装置的喷管出口面积和矢量偏转角误差进行补偿.

1 空间 RSRR 运动链的位姿

1.1 AVEN 结构原理

为了便于分析空间 RSRR 运动链构件变形对 AVEN 装置矢量偏转角、喷管出口面积等的影响,这里不考虑 AVEN 装置的喉道面积变化.此时,AVEN 装置的结构模型如图 1 所示.

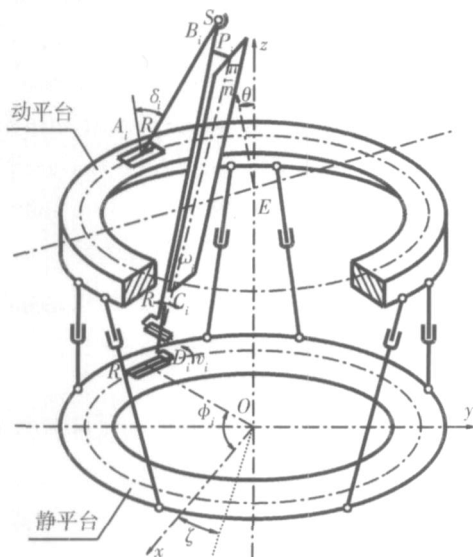


图 1 AVEN 装置机构简图

Fig. 1 Simplified sketch of the AVEN

在该图中,AVEN 装置由并联于 Stewart 动静平台之间的十几组空间 RSRR 运动链($A_iB_iC_iD_i$)组成.空间 RSRR 运动链导引具有特定内空间曲面 π 的构件 B_iC_i ,包络形成空间时变几何体(VGB).VGB 有两个端面:进口端面和出口端面.由内空间曲面 π 末端中点 P_i 所形成的空间多边形称为喷口端面.与喷口端面相对的端面为进口端面.进口端面中心到喷口端面中心 G 之间的连线与 Stewart 机构的静平台中心法线之间的夹角定义为矢量偏转角度,用 α 表示.固定坐标系 $Oxyz$ 固定在 Stewart 机构的静平台上,中心 O 与该平台的中心相重合,其中心法线作为 z 轴.转动副 A_i 分布在以 R_2 为半径的动平台上,转动副 D_i 分布在以 R_3 为半径的静平台上. RSRR 运动链的其他两个运动副分别为 C_i 和 B_i .空间运动链 RSRR 的定位由转动副 D_i 相对 x 轴的方位角 ϕ_i ($\phi_i = 2\pi i/n$) ($i = 1, 2, \dots, n$) 来确定.

1.2 VGB 分布参数

喷管出口面积 A_n :喷口端面中心 G 与两相邻内空间曲面 π 末端中点 P_i 所形成的三角形面积 ΔP_iGP_{i+1} 之和.

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

其中

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

矢量偏转角 α :当构件 D_iC_i 相对构件 C_iB_i 足够短,认为进口端面近似处于静平台所在的平面内.由 AVEN 装置的对称性可知,进口端面的中心应与坐标原点 O 重合.此时,VGB 的矢量偏转角度 α 为从坐标原点 O 到喷口端面中心 G 连线与 z 轴夹角为

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

$$\text{其中: } G_{ax} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i G_{xi}}{A_a}, G_{ay} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i G_{yi}}{A_a}, G_{az} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i G_{zi}}{A_a}$$

$$\begin{aligned} G_{xi} &= \frac{1}{3} (p_{xi} + p_{xi_1} + N_{sx}), G_{yi} = \frac{1}{3} (p_{yi} + \\ &\quad p_{yi_1} + N_{sy}), G_{zi} = \frac{1}{3} (p_{zi} + p_{zi_1} + N_{sz}) \end{aligned}$$

偏转方位角 β 在 VGB 中有一个平面通过固定坐标系的中点和喷口端面中心 G , 而所有 RSRR 运动链的运动参数相对该平面对称, 称该平面为偏转平面. 偏转平面所在的方位角称为偏转方位角, 如图 2 所示, 用 β 表示, $\beta \in [0, 2\pi]$.

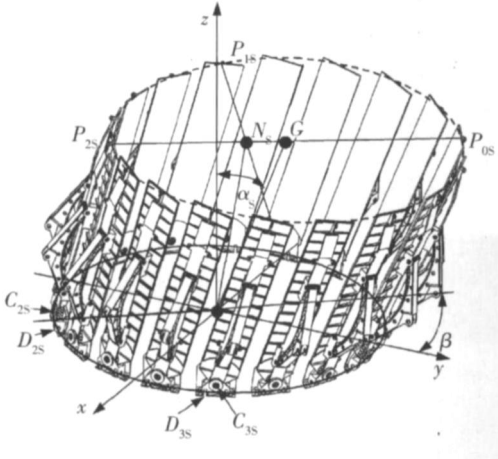


图 2 空间曲面 π 在 VGB 上的分布

Fig. 2 Distribution of surface π on the VGB

1.3 空间 RSRR 运动链的位姿方程

喷管出口面积 A_n , 偏转矢量角 α , 偏转方位角 β 是 VGB 的三个重要描述参数, 也是 AVEN 装置运动反解的三个重要给定参数. AVEN 装置运动反解的主要问题为^[31]: 对于给定的喷管出口面积 A_n 、偏转矢量角 α 和偏转方位角 β , 确定 Stewart 动平台的位姿参数.

基于密封性和不产生运动干涉等多方面的考虑, 其一, 要求 Stewart 动平台的中心 E 应该位于 z 轴上, 即 $E(0, 0, l_0)$; 其二, 要求动平台绕其法线无相对转角. 此时, 动平台的角度位姿可以用图 1 所示的两个参数 θ 和 ξ 来表示. 由结构的对称性可知, $\xi = \beta$ 基于以上考虑, 动平台的位姿参数为

$$\{l_0, \theta, \xi\}$$

用 δ 表示连杆 $A_i B_i$ 绕运动副 A_i 的转角, ω 表示连杆 $B_i C_i$ 相对运动副 C_i 的转角, v_i 为连杆 $C_i D_i$ 相对转动副 D_i 的转角, 则空间曲面 π 上末端中点坐标 P_i 为

$$P_i = \begin{bmatrix} l_{CP}(C\phi_i S v_i C\omega_i - S\phi_i S\omega_i) + l_{CD} C\phi_i S v_i + R_3 C\phi_i \\ l_{CP}(S\phi_i S v_i C\omega_i + C\phi_i S\omega_i) + l_{CD} S\phi_i S v_i + R_3 S\phi_i \\ l_{CP} C v_i C\omega_i + l_{CD} C v_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中 $C = \cos$, $S = \sin$.

根据矢量方程

$$r_{B_i} = r_{A_i} + L_{B_i A_i} = r_{D_i} + L_{C_i D_i} + L_{B_i C_i} \quad (4)$$

得到 RSRR 运动链的位姿方程

$$\begin{cases} f_{1i} = [l_{BC}(-S\phi_i S\omega_i + C\phi_i S v_i C\omega_i) + l_{CD} C\phi_i S v_i + R_3 C\phi_i] \sqrt{1 - S^2 \beta^2 \theta} - l_{AB}(C\phi_i C\theta S\delta_i + C\beta S\theta C\delta_i) - R_2 C\phi_i C\theta - l_{EF} C\beta S\theta = 0 \\ f_{2i} = [l_{BC}(C\phi_i S\omega_i + S\phi_i S v_i C\omega_i) - l_{EF} S\beta S\theta C\theta + R_3 S\phi_i] \sqrt{1 - S^2 \beta^2 \theta} - l_{AB}[-C\phi_i S\beta C\beta S^2 \theta S\delta_i + S\phi_i(1 - S^2 \beta^2 \theta) S\delta_i + S\beta S\theta C\theta C\delta_i] + l_{CD} S\phi_i S v_i + R_2[C\phi_i S\beta C\beta S^2 \theta - S\phi_i(1 - S^2 \beta^2 \theta)] = 0 \\ f_{3i} = l_{BC} C v_i C\omega_i + l_{CD} C v_i + l_{AB}(C\phi_i C\beta S\theta S\delta_i + S\phi_i S\beta S\theta S\delta_i - C\theta C\delta_i) + R_2(C\phi_i C\beta S\theta + S\phi_i S\beta S\theta) - l_0 - l_{EF} C\theta = 0 \end{cases} \quad (5a) \quad (5b) \quad (5c)$$

当动平台的位姿参数确定后, 通过方程(5)便可以求得 RSRR 运动链的角位移 v_i, ω, δ .

2 RSRR 运动链的角位移增量

对方程组(5)中 f_{1i}, f_{2i}, f_{3i} 分别求变量 $l_{AB}, l_{BC}, l_{CD}, v_i, \omega, \delta$ 的偏导数, 得到 f_{1i} 对各变量的偏导数

$$\frac{\partial f_{1i}}{\partial l_{BC}} = C v_i C\omega_i, \quad \frac{\partial f_{1i}}{\partial l_{CD}} = C v_i, \quad \frac{\partial f_{1i}}{\partial \omega} = -l_{BC} C v_i S\omega_i$$

$$\frac{\partial f_{1i}}{\partial l_{AB}} = -(C\mu C\eta C\delta_i - C\phi_i S\eta S\delta_i - S\phi_i S\mu C\eta S\delta_i)$$

$$\frac{\partial f_{1i}}{\partial v_i} = -l_{BC} S v_i C\omega_i - l_{CD} S v_i - l_{EF} C v_i$$

$$\frac{\partial f_{1i}}{\partial \delta} = -l_{AB}(-C\mu C\eta S\delta_i - C\phi_i S\eta C\delta_i - S\phi_i S\mu C\eta C\delta_i)$$

f_{2i} 对各变量分别求偏导数

$$\frac{\partial f_{2i}}{\partial l_{BC}} = (C\phi_i S v_i C\omega_i - S\phi_i S\omega_i), \quad \frac{\partial f_{2i}}{\partial l_{CD}} = C\phi_i S v_i$$

$$\frac{\partial f_{2i}}{\partial l_{AB}} = -(C\mu S\eta C\delta_i + C\phi_i C\eta C\delta_i - S\phi_i S\mu S\eta S\delta_i)$$

$$\frac{\partial f_{2i}}{\partial v_i} = l_{BC} C\phi_i C v_i C\omega_i + l_{CD} C\phi_i C v_i - l_{EF} C\phi_i S v_i$$

$$\frac{\partial f_{2i}}{\partial \omega} = l_{BC}(-C\phi_i S v_i S\omega_i - S\phi_i C\omega_i)$$

$$\frac{\partial f_{2i}}{\partial \delta} = -l_{AB}(-C\mu S\eta S\delta_i - C\phi_i C\eta S\delta_i - S\phi_i S\mu S\eta C\delta_i)$$

f_{3i} 对各变量分别求偏导数:

$$\frac{\partial f_{3i}}{\partial l_{BC}} = (S\phi_i S v_i C\omega_i + C\phi_i S\omega_i), \quad \frac{\partial f_{3i}}{\partial l_{CD}} = S\phi_i S v_i$$

$$\frac{\partial f_{3i}}{\partial l_{AB}} = -(S\mu C\delta_i + S\phi_i C\mu S\delta_i)$$

$$\frac{\partial f_{3i}}{\partial v_i} = l_{BC} S\phi_i v_i C\omega_i + l_{CD} S\phi_i C v_i - l_{EF} S\phi_i S v_i$$

$$\frac{\partial f_{3i}}{\partial \omega} = l_{BC}(-S\phi_i S v_i S\omega_i + C\phi_i C\omega_i)$$

$$\frac{\partial f_{3i}}{\partial \delta} = -l_{CD}(-S\mu S\delta_i + S\phi_i C\mu C\delta_i)$$

将各偏导数代入方程(5), 令 $\Delta f_{ji} = 0$, 得到

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta f_{1i} &= \frac{\partial f_{1i}}{\partial l_{BC}} \Delta l_{BC} + \frac{\partial f_{1i}}{\partial l_{CD}} \Delta l_{CD} + \frac{\partial f_{1i}}{\partial l_{AB}} \Delta l_{AB} + \\ &\frac{\partial f_{1i}}{\partial v_i} \Delta v_i + \frac{\partial f_{1i}}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial f_{1i}}{\partial \delta_i} \Delta \delta_i = 0 \\ \Delta f_{2i} &= \frac{\partial f_{2i}}{\partial l_{BC}} \Delta l_{BC} + \frac{\partial f_{2i}}{\partial l_{CD}} \Delta l_{CD} + \frac{\partial f_{2i}}{\partial l_{AB}} \Delta l_{AB} + \\ &\frac{\partial f_{2i}}{\partial v_i} \Delta v_i + \frac{\partial f_{2i}}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial f_{2i}}{\partial \delta_i} \Delta \delta_i = 0 \\ \Delta f_{3i} &= \frac{\partial f_{3i}}{\partial l_{BC}} \Delta l_{BC} + \frac{\partial f_{3i}}{\partial l_{CD}} \Delta l_{CD} + \frac{\partial f_{3i}}{\partial l_{AB}} \Delta l_{AB} + \\ &\frac{\partial f_{3i}}{\partial v_i} \Delta v_i + \frac{\partial f_{3i}}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial f_{3i}}{\partial \delta_i} \Delta \delta_i = 0 \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式(6)中RSRR运动链的载荷变形如图3所示.从方程(6)中可以得到 $\Delta v_i, \Delta \omega, \Delta \delta_i$ 与载荷变形 $\Delta l_{BC}, \Delta l_{CD}, \Delta l_{AB}$ 之间的线性关系.考虑变形后RSRR各构件的旋转角度 v_i', ω', δ_i' 为

$$\left\{ \begin{aligned} v_i' &= v_i + \Delta v_i \\ \omega' &= \omega + \Delta \omega \\ \delta_i' &= \delta_i + \Delta \delta_i \end{aligned} \right. \quad (7)$$

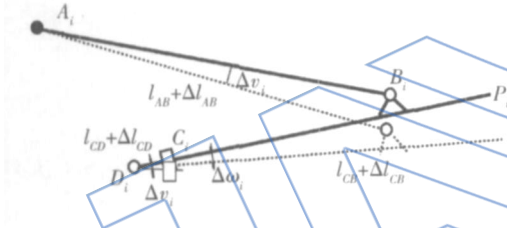


图3 构件变形对RSRR运动链位姿的影响

Fig. 3 Deformations of links in RSRR kinematic chains

3 载荷变形的控制补偿

将(7)式代入(3)式,解得RSRR运动链载荷变形后特定内空间曲面 π 末端中点 P_i' 的坐标.将 P_i' 代入式(1),并求关于 $\Delta l_{AB}, \Delta l_{BC}, \Delta l_{CD}$ 的偏导数,得

$$\begin{aligned} \Delta A_n &= \sum_i^n dA_i = \sum_i^n \left(\frac{\partial A_i}{\partial A_{1i}} dA_{1i} + \frac{\partial A_i}{\partial A_{2i}} dA_{2i} + \frac{\partial A_i}{\partial A_{3i}} dA_{3i} \right) = \\ &\frac{\partial A_n}{\partial l_{AB}} \Delta l_{AB} + \frac{\partial A_n}{\partial l_{BC}} \Delta l_{BC} + \frac{\partial A_n}{\partial l_{CD}} \Delta l_{CD} = \\ &\sum_i^N (c_{1i} dv_i + c_{2i} d\omega) \end{aligned} \quad (8)$$

这里 c_{1i} 为中间系数.

由于喷管出口面积为动平台位姿的函数,通过式(1)得到

$$dA_n = d_{11} dl_0 + d_{12} d\theta \quad (9)$$

将 P_i' 代入式(2),并求关于 $\Delta l_{AB}, \Delta l_{BC}, \Delta l_{CD}$

的偏导数,得到

$$\begin{aligned} \Delta \alpha &= \frac{G_{xy} dG_{xy} + G_{xz} dG_{xz}}{\sqrt{(G_{ax}^2 + G_{ay}^2 + G_{az}^2)(G_{ay}^2 + G_{az}^2)}} = \\ &\frac{\partial \alpha}{\partial l_{AB}} \Delta l_{AB} + \frac{\partial \alpha}{\partial l_{BC}} \Delta l_{BC} + \frac{\partial \alpha}{\partial l_{CD}} \Delta l_{CD} = d_{21} dl_0 + d_{22} d\theta \end{aligned} \quad (10)$$

因矢量偏转角度必须满足 $\Delta \alpha = 0$ 的控制要求,通过式(9)和式(10)得到

$$\left\{ \begin{aligned} dl_0 &= \frac{d_{22} \Delta A_n}{d_{11} d_{22} - d_{12} d_{21}} \\ d\theta &= \frac{-d_{21} \Delta A_n}{d_{11} d_{22} - d_{12} d_{21}} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

将由式(6)求得的 $\Delta v_i, \Delta \omega, \Delta \delta_i$ 代入式(8),和式(10),展开得到

$$\left\{ \begin{aligned} dl_0 &= \frac{d_{22}}{d_{11} d_{22} - d_{12} d_{21}} \left\{ \sum_i^N [(c_{1i} s_{1i} + c_{2i} t_{1i}) \Delta l_{BC} + \right. \\ &\left. (c_{1i} s_{2i} + c_{2i} t_{2i}) \Delta l_{CD} + (c_{1i} s_{3i} + c_{2i} t_{3i}) \Delta l_{AB} \right\} \\ d\theta &= \frac{-d_{21}}{d_{11} d_{22} - d_{12} d_{21}} \left\{ \sum_i^N [(c_{1i} s_{1i} + c_{2i} t_{1i}) \Delta l_{BC} + \right. \\ &\left. (c_{1i} s_{2i} + c_{2i} t_{2i}) \Delta l_{CD} + (c_{1i} s_{3i} + c_{2i} t_{3i}) \Delta l_{AB} \right\} \end{aligned} \right. \quad (12)$$

其中, $a_{ki}, b_{ki} s_{ki}, t_{ki}, k=1,2,3$ 为与结构有关的系数.

由此得到作动筒位移输出修正量为

$$\Delta l_{di} = \frac{l_{ix} \frac{\partial l_{ix}}{\partial l_0} dl_0 + \left[l_{ix} \frac{\partial l_{ix}}{\partial \theta} + l_{iy} \frac{\partial l_{iy}}{\partial \theta} + l_{iz} \frac{\partial l_{iz}}{\partial \theta} \right] d\theta}{l_{wi}} \quad (13)$$

$$\text{其中 } l_{ix} = R_2 \frac{\cos \theta \cos \lambda_i - s \beta \cos \theta \cos \lambda_i}{\sqrt{1 - S^2 \beta^2 \theta}} + l_0$$

$$l_{iy} = R_2 \frac{\cos \theta \cos \lambda_i - s \beta \cos \theta \cos \lambda_i}{\sqrt{1 - S^2 \beta^2 \theta}} - R_1 \cos \lambda_i$$

$$l_{iz} = R_2 \sqrt{1 - S^2 \beta^2 \theta} \cos \lambda_i - R_1 \sin \lambda_i$$

$$\lambda_i = \lambda + (i-1) \frac{2\pi}{3}$$

由于方程(12),(13)是解析分析表达的形式,因而能够满足实时求解的要求.

4 数值分析

利用有限元方法,分析构件 $A_i B_i$ 、构件 $B_i C_i$ 、构件 $C_i D_i$ 在温度场和负载联合作用下的变形分别为: $\Delta l_{AB} = 0.84 \text{ mm}, \Delta l_{BC} = 2.113 \text{ mm}, \Delta l_{CD} = 0.26 \text{ mm}$.

将上述载荷变形代入式(8)和式(10),得到喷管出口面积误差和矢量偏转角误差,分别如图4

和图 5 所示.

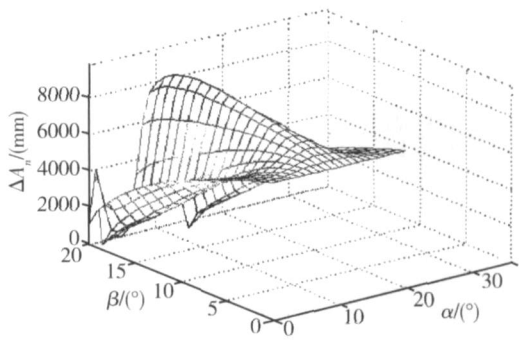


图 4 ΔA_n 与 α, β 的关系
Fig. 4 ΔA_n relative to α and β

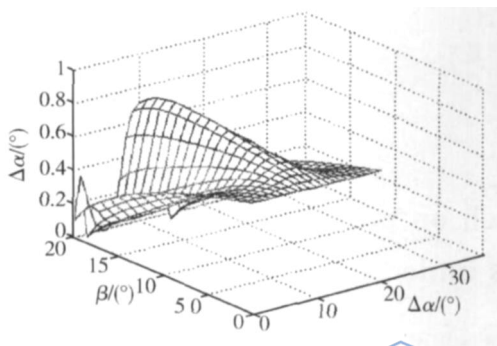


图 5 $\Delta \alpha$ 与 α, β 的关系
Fig. 5 $\Delta \alpha$ relative to α and β

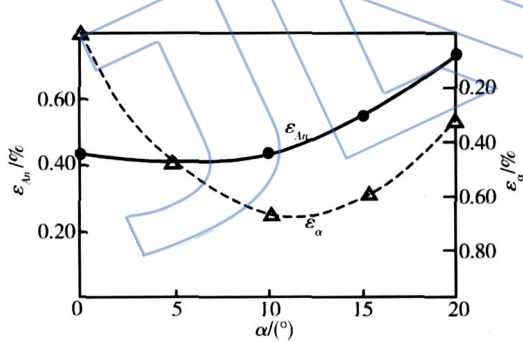


图 6 补偿后的喷口出口面积 A_9 相对误差
Fig. 6 Relative error of A_9 after compensation

对于图 4 所示的喷管出口面积误差和图 5 所示的矢量偏转角误差,通过式 (13) 给出的作动筒位移补偿量进行控制补偿,其补偿后的 VGB 喷管出口面积的相对误差小于 0.8%,如图 6 所示,能够满足控制要求.

5 结 论

本文研究了 AVEN 装置在温度场和载荷联合作用下,因导引扩张调节片的空间 RSRR 运动链的载荷变形,引起喷管出口面积和矢量偏转角产生误差的控制补偿问题.首先,建立了动平台位姿与空间 RSRR 运动链位姿角之间的关系方程,通过对关系方程的求导,给出了空间 RSRR 运动链的角位移增量与构件长度增量之间的线性微分方程.在此基础上,利用 AVEN 装置的矢量偏转角度和面积与动平台位姿之间的微分关系,给出了 AVEN 装置受温度场和气动载荷联合作用时的动平台位姿补偿的解析方程.利用本文的方法,补偿后的 VGB 喷管出口面积的相对误差不大于 1%.

参考文献:

[1] McLafferty H G, Thayer E B, Stewart J D. Axisymmetrical nozzle with gimbaled unison ring [P]. US Patent (US005261605A).
[2] 王玉新. 喷气发动机轴对称推力矢量喷管 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
[3] Wang Y X, Wang Y M. Inverse kinematics of variable geometry parallel manipulator [J]. Mechanism and Machine Theory, 2005, 2: 141-155.