

DOI: 10.3901/JME.2012.11.166

## 甚低频拖曳天线的稳态动力学研究

郑小洪<sup>1</sup> 侯志强<sup>2</sup> 韩维<sup>2</sup> 李冀鑫<sup>3</sup>

(1. 海军航空工程学院研究生管理大队 烟台 264001;  
2. 海军航空工程学院飞行器工程系 烟台 264001;  
3. 海军飞行学院教研部 葫芦岛 125001)

**摘要:** 甚低频(Very low frequency, VLF)拖曳天线力学特征和控制是飞机对潜通信系统进一步深入论证需要解决的关键问题之一, 而对其稳态动力学研究是进行甚低频拖曳天线力学特征和控制研究的基础。通过对载机盘旋时甚低频天线运动状态及其受力进行分析, 应用牛顿定律建立机载甚低频拖曳天线稳态动力学模型。运用打靶法对其稳态动力学模型进行求解, 分析载机速度、倾斜角和天线末端锥袋质量对天线末端锥袋量纲一半径和天线垂直度的影响。仿真结果表明在阻力系数较小时, 在一定的倾斜角和载机飞行速度范围内其垂直度和天线末端量纲一半径存在多值情况, 会导致拖曳天线系统的不稳定; 在一定的阻力系数下, 减小飞机速度, 增加载机的倾斜角, 能够提高甚低频拖曳天线的垂直度; 单一增加天线末端锥袋质量来提高垂直度是不可行的。

**关键词:** 拖曳天线 稳态 末端半径 垂直度

中图分类号: V243

## Research on the Steady Dynamic of VLF Trailing Antenna on an Aircraft

ZHENG Xiaohong<sup>1</sup> HOU Zhiqiang<sup>2</sup> HAN Wei<sup>2</sup> LI Jixin<sup>3</sup>

(1. Graduate Student's Brigade, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001;  
2. Department of Airborne Vehicle Engineering, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001;  
3. Teaching and Research Department, Naval Flying Academy, Huludao 125001)

**Abstract:** The dynamic character and control of very low frequency(VLF) trailing antenna on a aircraft is one of most important problems which needs to research. The steady dynamic is the base of the dynamic character and control of the VLF trailing antenna. The mathematics model based Newton law of the trailing antenna is founded, and solved via a shooting technique. The influences of the angle of bank and the velocity of aircraft to the non-dimensionnalization end radius and verticality are researched. The result shows that under the low drag, for certain ranges of the angle of bank and the velocity, the equilibrium solution is multivolume; under certain ranges of air drag, it is possible to descend the velocity of the aircraft and increase the bank angle to improve the verticality of the antenna. But it's impossible to increase the mass of the drogue only to improve the verticality of the antenna.

**Key words:** Trailing antenna Steady state The end radius Verticality

### 0 前言

飞机对潜通信是各国重点研究解决的关键技术, 其中甚低频飞机拖曳天线是机载发射系统的最关键部分。例如, 美国的塔卡木系统(Take charge and move out, TACAMO)开始时使用单根半波长拖曳天线, 天线长近万米, 为保证天线有效的正常工作状

态, 即保证天线的垂直度不小于70%(所谓垂直度是指载机和末端锥袋之间的垂直高度与天线总长度之比), 载机必须以一定状态进行稳定盘旋飞行。国内外研究和实践表明, 拖曳天线力学特征和控制是飞机对潜通信系统进一步深入论证需要解决的关键问题之一。而对其稳态动力学研究是进行拖曳天线力学特征和控制的基础<sup>[1]</sup>。

机载甚低频拖曳天线在力学上属于绳索动力学研究范围, 具有无限自由度, 国内外学者对绳索

系统的复杂动力学问题进行了大量的研究<sup>[2]</sup>。PASCA 等<sup>[3]</sup>研究了大气阻力摄动下的近地轨道绳系系统的非线性动力学问题, 并分别建立了大气阻力摄动下的刚性和柔性绳系系统动力学模型。彭建华等<sup>[4]</sup>研究了由绳系的弹性因素引起的纵向振动与绳系系统姿态运动的耦合问题, 利用 Melnikov 方法和 Poincaré 截面的计算证明了绳系卫星具有不可预测的混沌动力学行为。杜敬利等<sup>[5-6]</sup>以牵引并联机器人跟踪控制为背景, 考虑柔索垂度影响推导出索端张力与索端位移和索长变化之间的关系。针对航空拖索系统, HUANG<sup>[7]</sup>以航空拖索为背景, 在圆柱坐标系下, 通过对作用在拖索元上的受力和为零来推导出拖索的静态形状; 文献[8-9]则根据弹性力学的方法, 建立柔索系统在圆周运动下的非线性动力学模型, 分析了柔索系统长度对稳定构型的影响; PAUL 等<sup>[10-12]</sup>采用多刚体动力学建模方法, 将索的质量集中在节点, 把刚性段当作为无质量的二力杆, 段与段之间用球铰连接。多刚体动力学模型能有效处理强非线性问题, 并在一定程度上反映绳索的实际工况。总之, 针对载机的飞行状态对拖索稳态的研究还存在一定的空间, 目前较多的文献多局限于研究拖索的构型及拖索的受力情况。

本文参考文献[8-9]的方法, 建立机载甚低频拖曳天线的非线性动力学模型, 运用打靶法计算甚低频天线的稳定构型, 讨论载机的飞行状态对天线稳定构型的影响, 为下一步研究天线的非线性动力学响应奠定基础。

## 1 甚低频拖曳天线的建模

针对机载甚低频天线建模研究, 为了简化系统, 结合国内外研究资料<sup>[7-12]</sup>, 在建模过程中作出如下合理假设。

- (1) 甚低频天线不能伸长, 但十分柔软。
- (2) 不存在风或不考虑风的剪切力。
- (3) 甚低频天线上的位移都是小位移。

在建立其动力学模型之前, 首先要选定合适的空间坐标系, 如图 1 所示, 建立惯性坐标系  $Ox'y'z'$  和旋转直角坐标系  $Oxyz$ , 旋转坐标系绕纵轴坐标系以载机旋转角速度旋转, 它们具有相同原点。设  $i', j', k'$  分别为惯性坐标系下沿  $Ox'$  轴、 $Oy'$  轴和  $Oz'$  轴方向的单位矢量,  $i, j, k$  分别为旋转坐标系下沿  $Ox$  轴、 $Oy$  轴和  $Oz$  轴方向的单位矢量。 $X_D$  为天线末端锥袋在旋转坐标系下的  $x$  轴坐标。

如图 1 所示,  $S_0$ 、 $S_1$  和  $S_2$  分别为拖曳天线自然无伸张状态、稳定状态和动态平衡状态下甚低频天线任意位置  $E$  的弧坐标。 $E$  点位移为

$$U(S_0, T) = R_2 - R_1 = U_1 i + U_2 j + U_3 k \quad (1)$$

式中  $U(S_0, T)$  ——  $E$  点从稳定状态到  $T$  时刻动态平衡状态的位移

$U_1, U_2, U_3$  ——  $U(S_0, T)$  在旋转坐标系下沿  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴方向的分量大小

$R_2$  —— 动态平衡下图 1 中  $O$  点到  $E$  点在  $T$  时刻的距离

$R_1$  —— 稳定状态下  $O$  点到  $E$  点的距离

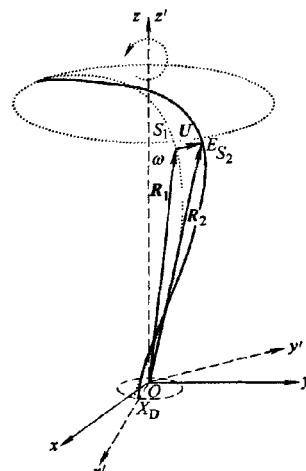


图 1 拖曳天线的相关坐标系

$E$  点速度  $v_E$  和加速度  $a_E$  分别为

$$v_E = \frac{\partial U}{\partial T} + \omega k \times (U + R_1) \quad (2)$$

$$a_E = \omega^2 k \times (k \times R_1) + \omega^2 k \times (k \times U) + 2\omega k \times \frac{\partial U}{\partial T} + \frac{\partial^2 U}{\partial T^2} \quad (3)$$

式中,  $\omega$  为载机盘旋的角速度。

在  $E$  点取微元, 对其进行受力分析见图 2。

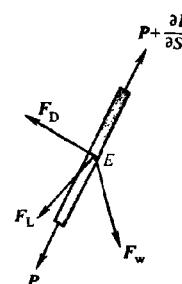


图 2 天线的受力示意图

由牛顿定律得天线的运动方程为

$$\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial S_0} + \mathbf{F}_w + \mathbf{F}_L + \mathbf{F}_D = 0 \quad (4)$$

由文献[8-9]可知, 切向阻力部分很小, 可以忽略, 因此本文中空气阻力只考虑法向空气阻力。式(4)中天线的拉力  $\mathbf{P}$ 、重力  $\mathbf{F}_w$ 、惯性力  $\mathbf{F}_L$  和法向空气阻力  $\mathbf{F}_D$  分别为

$$\begin{cases} \mathbf{P} = P \frac{\partial \mathbf{R}_2}{\partial S_0} \\ \mathbf{F}_w = -(\rho_b - \rho_a A_0) g \mathbf{k} \\ \mathbf{F}_L = -(\rho_b + \rho_a A_0) a_E \\ \mathbf{F}_D = -D_n |\mathbf{v}_n^f| \mathbf{v}_n^f \end{cases} \quad (5)$$

式中  $P$  —— 天线拉力的数值大小  
 $\rho_b$  —— 天线单位长度质量密度  
 $\rho_a$  —— 空气密度  
 $A_0$  —— 天线的横截面积  
 $g$  —— 重力加速度  
 $D_n$  —— 法向空气阻力系数  
 $\mathbf{v}_n^f$  —— 法向速度

$$\mathbf{v}_n^f = \frac{\partial \mathbf{R}_2}{\partial S_0} \times (\mathbf{v}_E \times \frac{\partial \mathbf{R}_2}{\partial S_0}) \quad (6)$$

机载甚低频拖曳天线末端连着一个锥袋, 由于锥袋的作用存在固有边界条件

$$\mathbf{P} + \mathbf{F}_{Dw} + \mathbf{F}_{DL} + \mathbf{F}_{DH} = 0 \quad (7)$$

锥袋受到的重力  $\mathbf{F}_{Dw}$ 、惯性力  $\mathbf{F}_{DL}$  和空气阻力  $\mathbf{F}_{DH}$  分别如下

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{Dw} = -(G - G') \mathbf{k} \\ \mathbf{F}_{DL} = -(m + m') \mathbf{a}_D \\ \mathbf{F}_{DH} = -D |\mathbf{v}_D| \mathbf{v}_D \end{cases} \quad (8)$$

式中  $G$  —— 锥袋重力  
 $m$  —— 锥袋质量  
 $D$  —— 锥袋的空气阻力系数  
 $G'$  —— 空气对锥袋产生的浮力  
 $m'$  —— 由于空气使得锥袋增加的附加质量  
 $\mathbf{v}_D = \frac{\partial \mathbf{U}_D}{\partial T} + \omega \mathbf{k} \times (\mathbf{U}_D + \mathbf{R}_1) \quad \mathbf{U}_D = \mathbf{U}(0, T)$   
 $\mathbf{a}_D = \omega^2 \mathbf{k} \times (\mathbf{k} \times \mathbf{R}_1) + \omega^2 \mathbf{k} \times (\mathbf{k} \times \mathbf{U}_D) +$   
 $2\omega \mathbf{k} \times \frac{\partial \mathbf{U}_D}{\partial T} + \frac{\partial^2 \mathbf{U}_D}{\partial T^2}$

## 2 稳态动力学模型

在稳态时, 即位移  $\mathbf{U} = 0$ , 将  $\mathbf{U} = 0$ 、式(1)、式(5)和式(6)代入式(4)并量纲一化得

$$\frac{d}{ds} \left( p \frac{dr}{ds} \right) = \rho \mathbf{k} + \omega'^2 \left[ \mathbf{k} \times (\mathbf{k} \times \mathbf{r}) + d_n |\mathbf{v}_n^f| \mathbf{v}_n^f \right] \quad (9)$$

$$\begin{cases} r = R_1 / a & s = \frac{S_0}{a} & t = \omega T \\ \omega^2 = \frac{a \omega'^2}{g} & d_n = \frac{D_n a}{\rho_b + \rho_a A_0} \\ p = \frac{P}{(\rho_b + \rho_a A_0) a g} & \rho = \frac{\rho_b - \rho_a A_0}{\rho_b + \rho_a A_0} \\ \mathbf{v}_n^f = \frac{dr}{ds} \times \left[ (\mathbf{k} \times \mathbf{r}) \times \frac{dr}{ds} \right] \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $a$  为载机盘旋半径,  $\mathbf{r} = xi + yj + zk$ ,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  分别是  $\mathbf{r}$  在旋转坐标系下沿  $Ox$  轴、 $Oy$  轴和  $Oz$  轴方向的分量大小。

同理, 稳态时天线末端锥袋的位移  $\mathbf{U}_D = 0$ , 将  $\mathbf{U}_D = 0$  和式(8)代入式(7)并量纲一化得到

$$p_d \frac{dr}{ds} = w \mathbf{k} + m_1 \omega'^2 \mathbf{k} \times (\mathbf{k} \times \mathbf{r}) + d \omega'^2 |\mathbf{k} \times \mathbf{r}| (\mathbf{k} \times \mathbf{r}) \quad (11)$$

式中  $p_d$  ——  $s = 0$  时绳索的张力, 即  $p_d = p(0)$

$$w = \frac{G - G'}{(\rho_b + \rho_a A_0) a g}$$

$$m_1 = \frac{m + m'}{(\rho_b + \rho_a A_0) a}$$

$$d = \frac{D}{\rho_b + \rho_a A_0}$$

$$\text{令 } \frac{dr}{ds} = \tau / p, \text{ 则}$$

$$p = (\tau, \tau)^{1/2} \quad (12)$$

由式(9)可以得到

$$\begin{cases} \frac{d\tau_1}{ds} = -\omega^2 x - d_n \omega'^2 |\mathbf{v}_n^f| [y - \tau_1(y\tau_1 - \tau_2 x) / p^2] \\ \frac{d\tau_2}{ds} = -\omega^2 y - d_n \omega'^2 |\mathbf{v}_n^f| [x - \tau_2(x\tau_2 - \tau_1 y) / p^2] \\ \frac{d\tau_3}{ds} = 1 + \omega'^2 d_n |\mathbf{v}_n^f| [\tau_3(y\tau_1 - \tau_2 x) / p^2] \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $|\mathbf{v}_n^f| = [\tau_3^2(x^2 + y^2) + (x\tau_1 + y\tau_2)^2]^{1/2} / p^2$ 。

上述量纲一化模型的边界条件如下。在  $s = 0$  处

$$x = X_D / a = x_d \quad y = z = 0 \quad (14)$$

在  $s = L / a = l$  处

$$x^2 + y^2 = 1 \quad u = 0 \quad (15)$$

式中,  $u$  为  $\mathbf{U}$  的量纲一量,  $u = \mathbf{U} / a$ 。

由式(11)、(12)、(14)可以得到

$$\tau(0) = -\omega^2 m_1 x_d i + d\omega^2 x_d^2 j + w k \quad (16)$$

### 3 基于打靶法的稳态动力学仿真

为保证甚低频天线的有效正常工作状态, 即保证天线的垂直度在允许范围内, 载机必须以特定的状态进行稳定盘旋飞行。 $\phi$ 是载机盘旋时的倾斜角,  $v_{\text{air}}$ 是载机的真实空速。则载机的旋转半径和旋转角速度为

$$a = \frac{v_{\text{air}}^2}{g \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \phi} - 1}} \quad (17)$$

$$\omega = \frac{v_{\text{air}}}{a} \quad (18)$$

式(13)是一个具有两点边值问题的常微分方程组, 式(14)~(16)是该方程组的初始条件,  $x_d$ 为假定初值, 可以用打靶法进行求解<sup>[13-14]</sup>。已知甚低频天线长度  $L=7520 \text{ m}$ , 末端椎体的质量  $m=40 \text{ kg}$ , 单位长度的天线密度  $\rho_a=0.598 \text{ kg/m}$ ,  $d=0.1d_n$ 。由于空气密度相对天线密度较小, 在求解过程中忽略空气的影响, 取  $\rho=1$ 。

(1) 载机倾斜角对甚低频拖曳天线稳定特性的影响。当载机真实空速  $v_{\text{air}}=114 \text{ m/s}$ , 甚低频拖曳天线末端椎袋的量纲一半径和天线的垂直度随倾斜角的变化情况分别如图3、4所示。由图3、4中可以知道, 随着阻力系数的增大, 甚低频天线末端椎袋的量纲一半径不断减小, 当  $38.0^\circ < \phi < 41.5^\circ$  时, 其量纲一半径的值出现多值情况。当  $20^\circ < \phi < 38^\circ$  时, 甚低频天线的垂直度随空气阻力系数的增加而增加, 当空气阻力系数较小时, 垂直度小于 70%, 机载甚低频拖曳天线系统不能正常工作; 当  $38.0^\circ < \phi < 41.5^\circ$  时其垂直度也出现多值情况, 当  $41.5^\circ < \phi < 50.0^\circ$  时其垂直度随空气阻力系数的增加而减小, 其垂直度均大于 70%, 系统均可以正常工作。

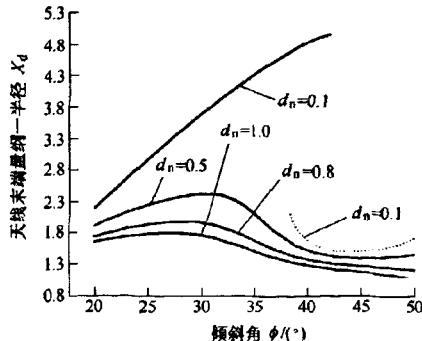


图3 不同空气阻力系数下天线末端量纲一半径随倾斜角变化情况

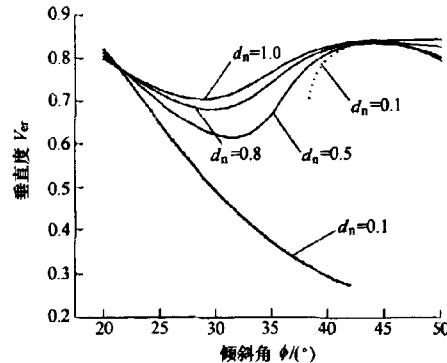


图4 不同空气阻力系数下天线垂直度随倾斜角变化情况

(2) 载机飞行速度对甚低频拖曳天线稳定特性的影响。当载机倾斜角  $\phi=32^\circ$  时, 甚低频拖曳天线末端椎袋的量纲一半径和天线的垂直度随载机速度变化情况分别如图5、6所示。由图5、6中可以知道, 随着空气阻力系数的增大, 甚低频天线末端椎袋的量纲一半径不断减小, 当  $91.0 \text{ m/s} < v_{\text{air}} < 95.5 \text{ m/s}$  时, 其量纲一半径的值出现多值情况。当  $60.0 \text{ m/s} < v_{\text{air}} < 91.0 \text{ m/s}$  时, 甚低频天线的垂直度均大于 70%, 机载甚低频拖曳天线系统均可以正常工作; 当  $91.0 \text{ m/s} < v_{\text{air}} < 95.5 \text{ m/s}$  时其垂直度也出现多值情况; 当  $95.5 \text{ m/s} < v_{\text{air}} < 120.0 \text{ m/s}$  时其垂直度随空气阻力系数的增加而增加, 当空气阻力系数较小时, 垂直度小于 70%, 系统不能正常工作。

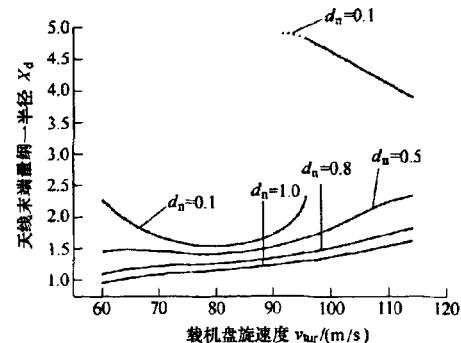


图5 不同空气阻力系数下天线末端量纲一半径随载机速度变化情况

(3) 末端椎袋质量对甚低频拖曳天线稳定性的影响。当  $d_n=0.5$ ,  $v_{\text{air}}=114.0 \text{ m/s}$  时, 甚低频拖曳天线末端椎袋的量纲一半径和天线的垂直度随倾斜角变化情况分别如图7、8所示。在载机倾斜角较大时, 随着椎袋质量的增加才可能使天线末端量纲一半径变小, 垂直度变大; 当载机倾斜角较小时, 随着天线末端椎袋质量的增加, 天线末端量纲一半径

却逐渐变大,天线垂直度逐渐变小。

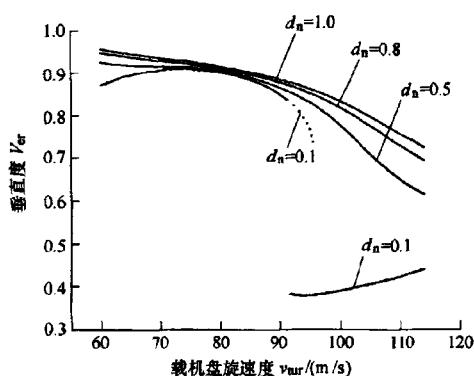


图6 不同空气阻力系数下天线垂直度随载机速度变化情况

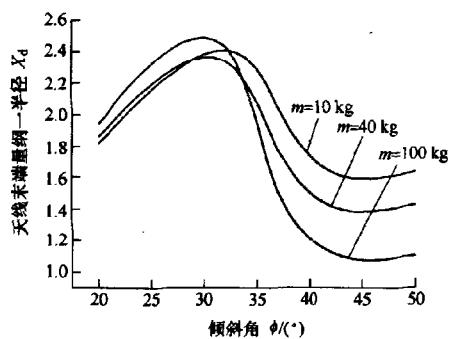


图7 不同锥袋质量下天线末端量纲一半径随倾斜角变化情况

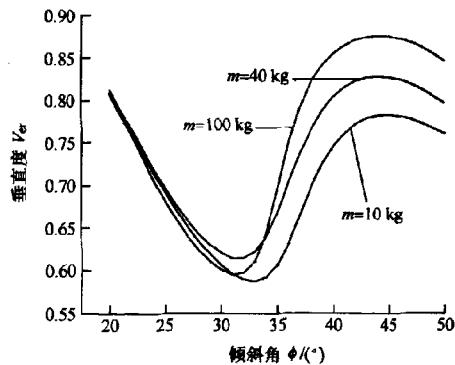


图8 不同锥袋质量下天线垂直度随倾斜角变化情况

当  $d_a = 0.5$ ,  $\phi = 32^\circ$  时,甚低频拖曳天线末端锥袋的量纲一半径和天线的垂直度随载机速度变化情况分别如图 9、10 所示。当速度较小时,随着天线末端锥袋质量的增加,天线末端量纲一半径逐渐变小,天线垂直度却逐渐变大。当速度较大时,锥袋质量的增加却可能适得其反,天线末端量纲一半径变大,垂直度变小。

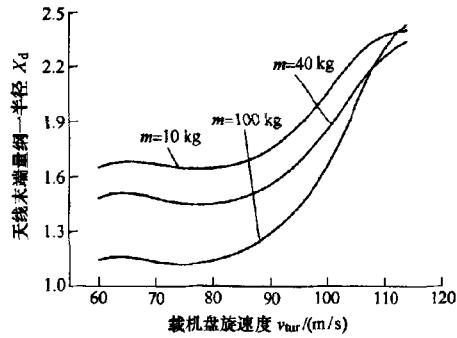


图9 不同锥袋质量下天线末端量纲一半径随载机速度变化情况

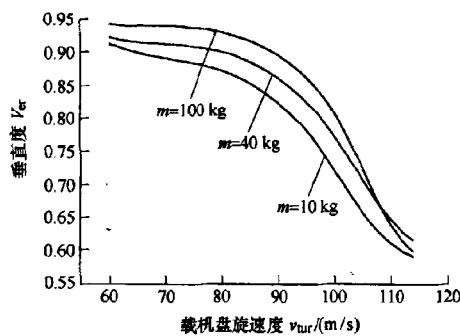


图10 不同锥袋质量下天线垂直度随载机速度变化情况

#### 4 结论

(1) 在阻力系数较小时,在一定的倾斜角和载机飞行速度范围内其垂直度和天线末端量纲一半径存在多值情况,即存在多个平衡状态,这与文献[15]得到的结论是相符的。由文献[15]可以知道,当工作条件使得有多种稳态形状同时存在时,甚低频拖曳天线会发生相当大的偏移,导致整个系统工作的不稳定。因此在实际的问题中应加以避免。

(2) 在一定的空气阻力系数下,为保持垂直度大于 70%,载机应减小速度,增大倾斜角,由此来增加垂直度。

(3) 在机载甚低频天线系统中,不能通过单一的增加天线末端锥袋质量来提高垂直度。

#### 参 考 文 献

- [1] 韩维,侯志强.机载拖曳系统的建模和若干动力学问题[C]//中国2005年飞行力学与飞行实验学术年会论文集.西安:中国飞行试验研究院飞行力学杂志社,2005:1-5.
- HAN Wei, HOU Zhiqiang. The modeling and some

- dynamic problem of the trailing cable on an aircraft[C]//The Flight Dynamic and Flight Experimentation Conference of China. Xi'an: The Flight Dynamic Press, 2005: 1-5.
- [2] 金栋平, 文浩, 胡海岩. 绳索系统的建模、动力学和控制[J]. 力学进展, 2004, 34(3): 304-313.  
JIN Dongping, WEN Hao, HU Haiyan. Modeling, dynamics and control of cable systems[J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(3): 304-313.
- [3] PASCA M, LORENZINI E C. Two analytical models for the analysis of a tethered satellite system in atmosphere[J]. Meccanica, 1997(32): 263-277.
- [4] 彭建华, 刘延柱. 绳系卫星的混沌运动[J]. 上海交通大学学报, 1996, 30(11): 32-35.  
PENG Jianhua, LIU Yanzhu. Chaos in tethered satellite system[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1996, 30(11): 32-35.
- [5] 杜敬利, 保宏, 段宝岩. 考虑柔索垂度影响的索牵引并联机器人跟踪控制[J]. 机械工程学报, 2010, 46(3): 17-21.  
DU Jingli, BAO Hong, DUAN Baoyan. Tracking control of cable-driven parallel robots considering cable sag effects[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(3): 17-21.
- [6] 杜敬利, 段学超, 保宏. 考虑柔索垂度影响的索支撑系统静刚度[J]. 机械工程学报, 2010, 46(17): 29-34.  
DU Jingli, DUAN Xuechao, BAO Hong. Static stiffness of a cable-supporting system with the cable sag effects considered[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(17): 29-34.
- [7] HUANG S L. Mathematical model for long cable by orbiting aircraft[R]. Johnsville, Pa.: Naval Air Development Center, 1969.
- [8] ZHU F, RAHN C D. Stability analysis of a circularly towed cable-body system[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 217(3): 435-452.
- [9] ZHU F, SHARMA R, RAHN C D. Vibrations of ballooning elastic stings[J]. Transactions of ASME, 1997, 64: 676-683.
- [10] PAUL W, PAVEL T. Periodic solutions for flexible cable-body systems towed in circular and elliptical paths[C/CD]//AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, August 21-24, 2006, Keystone, Colorado, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [11] PAUL W, PAVEL T. A study on the transitional dynamics of a towed-circular aerial cable system[C/CD]// AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, August 15-18, 2005, San Francisco, California, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [12] PAUL W, DANIEL S, PAVEL T. Motion planning for an aerial-towed cable system[C/CD]// AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, August 15-18, 2005, San Francisco, California, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [13] WANG Zhongming, GAO Jingbo, LI Huixia, et al. Non-linear dynamic behavior of thermelastic circular plate with varying thickness subjected to non-conservative loading[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 21(6): 65-69.
- [14] REN Kun, FU Jiaohong, CHEN Zichen. Motion velocity smooth link in high speed machining[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(2): 17-20.
- [15] FERN D G. Electrical and dynamic analysis of the TACAMO dual trailing wire antenna system[R]. Washington, D. C.: Naval Ocean Systems Center, 1986.

作者介绍: 郑小洪, 男, 1983年出生, 博士研究生。主要研究方向为飞行器动力学。

E-mail: zxh3031@sina.com

侯志强, 男, 1959年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为飞行器动力学。

E-mail: hou5615@sohu.com

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>