

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2023.02.008

馈源杯圆度误差对螺旋天线电性能的影响分析

王锦鑫¹, 王 勇², 曾令旗¹, 周兰兰², 刘 宁³, 刘海波¹

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 大连 116081; 2. 中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000;
3. 大连理工大学 电气工程学院, 大连 116081)

摘 要: 馈源阵作为星载天线的核心部件, 其馈源辐射杯圆度误差显著影响天线的馈电性能, 因此, 探究馈源单元电性能与圆度误差的关联性极为重要。以某卫星天线馈源阵三维单馈源为例, 基于几何绕射理论, 将圆度误差引入方向图函数, 建立了电磁耦合模型; 基于 FEKO 电磁软件, 分析了圆度误差对馈源单体最大增益、波束宽度等主要馈电性能指标的影响规律。研究结果表明, 频率越大, 增益与波束宽度对圆度误差越敏感。当馈源杯直径存在尺寸误差时, 圆度误差导致的电性能变化与尺寸误差之间为振荡关系。文章研究工作可为探求天线制造误差与电性能的关联性提供一定的借鉴与指引。

关键词: 电性能; 圆度误差; FEKO; 螺旋天线馈源杯

中图分类号: V443

文献标志码: A

文章编号: 1674-7135(2023)02-0048-06

Influence analysis of roundness error of feed cup body of helix antenna on electrical performance

WANG Jinxin¹, WANG Yong², ZENG Lingqi¹, ZHOU Lanlan², LIU Ning³, LIU Haibo¹

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116081, China;
2. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710000, China;
3. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116081, China)

Abstract: Antenna feed array is deemed as a core component of antenna on satellite, and its manufacturing errors significantly determines the electrical performance of antenna, so it is vital to explore the correlation between the electrical performance and the manufacturing errors. Based on geometrical theory of diffraction (GTD), the roundness error is introduced into the radiation pattern function, and the electromagnetic coupling model is established. Based on FEKO, the influence of roundness error on the electrical performance such as gain and half power beamwidth (HPBW) of feed cup body was analyzed. The results show that the gain and HPBW are more sensitive to roundness error with higher frequency. When there is a dimension error of the feed cup, there is an oscillatory relationship between the electrical property change caused by roundness error and dimension error. Research in this paper provides some reference and guidance for exploring the correlation between the manufacturing error and electrical performance of satellite-borne antenna.

Key words: electrical performance; roundness error; FEKO; feed cup body of helix antenna

收稿日期: 2022-04-28; 修回日期: 2022-05-19

基金项目: 国家自然科学基金联合重点项目 (编号: U20B2033)

引用格式: 王锦鑫, 王勇, 曾令旗, 等. 馈源杯圆度误差对螺旋天线电性能的影响分析[J]. 空间电子技术, 2023, 20(2): 48-53.
WANG J X, WANG Y, ZENG L Q, et al. Influence analysis of roundness error of feed cup body of helix antenna on electrical performance[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(2): 48-53.

0 引言

馈源阵是卫星通信系统中的重要组成部分,为卫星移动通信信号的发射与接收提供馈电“动力”,被誉为星载天线的“心脏”。馈源阵的电性能主要受与电磁场边界条件相关联的结构精度的影响^[1-2]。任何微小的制造误差及缺陷(如圆度误差等)都会使天线增益、波束宽度等馈电性能产生不同程度的退化。

目前,许多学者关于误差对天线馈电性能的影响,开展了一定的研究。Guo 等^[3]提出了一种改进的圆锥表示法,以考虑馈源阵的连续平面阵元的 γ 阶位置相关性。这种方法可以更精确地拟合实际的阵面。为解决热变形引起的阵面误差,Liu 等^[4]提出了一种有限元法与数据驱动模型相结合的热变形建模方法,称为 CIPs-FEM。此法的热变形预测精度比传统有限元方法提高了 85.6%。Azam 等^[5]推导了考虑信道相关性、硬件损伤和位置误差对于阵列天线上行信道影响的预估算法。周云霄^[6]设计了面向机电耦合的有源相控阵天线电性能计算系统,来分析几何误差对电性能的影响。胡雪梅等^[7]研究了平面六边形天线阵的平面度和安装精度对电性能的影响,并建立了电磁耦合模型。王从思等^[8]分析了天线阵面存在变形误差时对电性能的影响。李华春等^[9]提出了一种星载可动天线的安装误差补偿方法,该方法能够有效补偿,安装误

差导致的天线指向异变,来维持天线指向精度,保障天线馈电性能。然而,上述研究,或运用数学方法拟合阵面形状,或控制阵元上的伺服单元来补偿阵元的位置误差,而对于馈源单元自身的制造误差的研究较少。为避免对 PIM 等其他天线性能的影响,当前对馈源阵的加工优先采用一体化的加工方法^[10]。对于一体化的馈源阵,在制造阶段消除了装配误差,但会引入更大的加工误差。

文章对馈源阵一体化加工过程中馈源杯主要的误差项—圆度误差进行分析,以某型号馈源阵单元为例,建立圆锥对数螺旋天线馈源杯的圆度误差对其电性能的电磁耦合模型,并基于 FEKO 进行仿真分析。研究结果可供结构设计参考。

1 电磁耦合模型

馈源杯作为卫星通信螺旋天线的后腔,能够吸收天线向载体内的辐射,强化天线的单向辐射特性^[11],其结构示意图如图 1(a)所示。圆锥对数螺旋天线的馈源杯为对称式结构,如图 1(b)所示,取对称截面进行分析,馈源杯为圆筒形状,如图 1(c)所示,假设口面半径为 R_d ,天线源点距口面高度为 h_0 ,距腔底高度为 h 。螺旋天线馈源杯产生的电场主要包括直射场、杯侧壁/杯底的反射场、绕射场等,馈源杯的总场是以上各场的叠加。

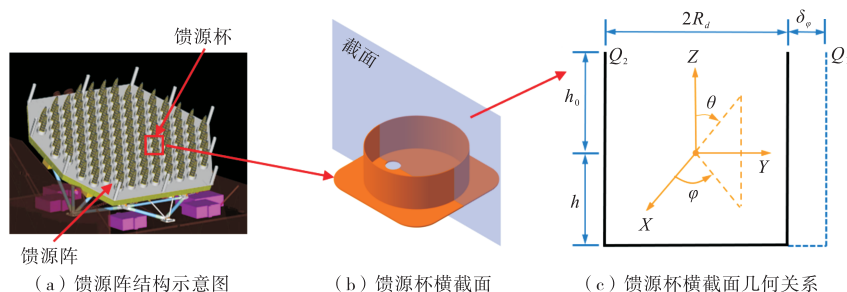


图 1 馈源杯示意图

Fig. 1 Schematic diagram of feed cup body

首先,获取馈源杯直射场矢量,假定圆锥对数螺旋天线的电场源点位于坐标原点处,将其辐射场沿 θ 和 Φ 方向进行分解,可得直射场矢量为^[12]:

$$(\vec{E}^i) = [E_{\theta}^i(\theta, \varphi) \hat{\theta} + E_{\varphi}^i(\theta, \varphi) \hat{\varphi}] \frac{e^{-jkR_n}}{R_n} \quad (1)$$

式(1)中, e^{-jkR_n}/R_n 为远场辐射球面波因子; λ 为辐射波长, $k = 2\pi/\lambda$; R_n 为场点到源点的距离;直射场矢量适用范围为 $0 \leq \theta \leq \alpha_1$, 其中, $\alpha_1 = \arctan(R_d/h_0)$ 。

分析直射场在馈源杯左侧壁反射场。根据电场反射理论,反射场在 θ 和 Φ 方向上的两个分量为^[12]:

$$\begin{cases} E_{\theta_1}^r = -jE_{\theta}^i(\theta) \cdot e^{-jk[2(R_d+\delta\varphi)\sin\theta+h_0\cos\theta]} \cdot \frac{e^{-jkR_n}}{R_n} \\ E_{\varphi_1}^r = jE_{\varphi}^i(\theta) \cdot e^{-jk[2(R_d+\delta\varphi)\sin\theta+h_0\cos\theta]} \cdot \frac{e^{-jkR_n}}{R_n} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $E_{\theta_1}^r$ 和 $E_{\varphi_1}^r$ 为 (θ, φ) 场点上的反射场分量; $E_{\theta}^i(\theta)$ 和 $E_{\varphi}^i(\theta)$ 为 (θ, φ) 场点上的两个入射场分量。其

适用范围为 $\alpha_1 \leq \theta \leq \alpha_2$, 其中, $\alpha_2 = \arctan(3R_d/h_0)$ 。

获取直射场在 Q_1 处的绕射场。由几何绕射理论^[13-14]可知,入射场在遇到不连续物体,如杯边缘等,会形成绕射场,绕射场在 θ 和 Φ 方向上的分量为^[12]:

$$\begin{cases} E_{\theta_1}^d = E_{\theta}^i(Q_1)D_h(Q_1)\left(\frac{R_d + \delta_\phi}{\sin \theta}\right)^{\frac{1}{2}} e^{jk(R_d + \delta_\phi)\sin \theta} \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} \frac{e^{-jkR_n}}{R_n} \\ E_{\phi_1}^d = E_{\phi}^i(Q_1)D_s(Q_1)\left(\frac{R_d + \delta_\phi}{\sin \theta}\right)^{\frac{1}{2}} e^{jk(R_d + \delta_\phi)\sin \theta} \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} \frac{e^{-jkR_n}}{R_n} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, $E_{\theta_1}^d$ 和 $E_{\phi_1}^d$ 为 (θ, ϕ) 场点上的绕射场分量; $D_h(Q_1)$ 和 $D_s(Q_1)$ 分别为馈源杯右边缘 Q_1 上的硬边界绕射系数和软边界绕射系数; 其中, $R_1^2 = (R_d + \delta_\phi)^2 + h_0^2$, 其适用范围为 $0 \leq \theta \leq \pi$ 及 $3\pi/2 \leq \theta \leq 2\pi$ 。

获取左壁反射场在 Q_1 处的二次绕射场, 基于 GTD 理论, 在 Q_1 处的二次绕射场在 θ 和 Φ 方向上的分量为^[12]:

$$\begin{cases} E_{\theta_{1r}}^d = E_{\theta_1}^r(Q_1)D_h(Q_1)\left(\frac{R_d + \delta_\phi}{\sin \theta}\right)^{\frac{1}{2}} e^{jk[(R_d + \delta_\phi)\sin \theta + h_0 \cos \theta]} \frac{e^{-jkR_n}}{R_n} \\ E_{\phi_{1r}}^d = E_{\phi_1}^r(Q_1)D_s(Q_1)\left(\frac{R_d + \delta_\phi}{\sin \theta}\right)^{\frac{1}{2}} e^{jk[(R_d + \delta_\phi)\sin \theta + h_0 \cos \theta]} \frac{e^{-jkR_n}}{R_n} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, $D_h(Q_1)$ 和 $D_s(Q_1)$ 为反射场在 Q_1 的硬边界绕射系数和软边界绕射系数, 其适用范围为 $0 \leq \theta \leq \pi$ 及 $3\pi/2 \leq \theta \leq 2\pi$ 。其中, $E_{\theta_1}^r$ 和 $E_{\phi_1}^r$ 为^[12]:

$$\begin{cases} E_{\theta_1}^r(Q_1) = -jE_{\theta}^i(\theta) \frac{\sqrt{3}}{R_2} e^{-jkR_2} \\ E_{\phi_1}^r(Q_1) = -jE_{\phi}^i(\theta) \frac{\sqrt{3}}{R_2} e^{-jkR_2} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, $R_2 = [9(R_d + \delta_\phi)^2 + h_0^2]^{\frac{1}{2}}$

星载天线馈源阵单元馈源杯, 在引入误差的条件下, 可以通过对以上直射场、反射场、绕射场进行叠加获得单元馈源杯的总场。

2 馈源单元几何建模

馈源杯圆度误差是主要误差项, 此处对圆度误差进行几何建模。圆度误差是指实际圆相对理想圆的变动量, 用以表征一个圆的标准程度。如图 2 所示, 圆度误差为:

$$\delta_\phi = R_o - R_i \quad (6)$$

式(6)中, R_o 为同心的最小外接圆半径; R_i 为同心

的最大内切圆半径。圆度误差 δ_ϕ 越小, 表示实际轮廓越接近理想圆, 即圆度越好。

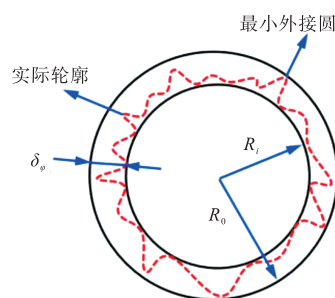


图 2 圆度误差

Fig. 2 Roundness error

馈源杯为圆柱体结构, 基板开有通孔, 便于同轴线缆的穿过。此外, 为保证同轴线缆与双工腔的位置关系, 通孔设置于偏离馈源杯轴线的位置, 其结构如图 3 所示。

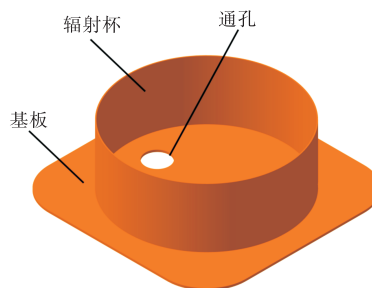


图 3 馈源杯结构

Fig. 3 Feed cup body structure

建立天线几何模型, 设定天线的工作频段为 L/S 频段, 如图 4 所示, 天线的锥顶直径 $d = 2$ mm, 锥底直径 $D = 26$ mm, 天线的高度 $H = 42$ mm, 天线单根螺旋臂的绕制圈数 $n = 2.5$, 圆锥对数螺旋天线的角宽度 $\varphi = 70^\circ$ 。对螺旋天线进行参数转换, 表 1 为转换结果, 转换方式如式(7)所示:

$$r = r_0 e^{(a \sin \theta_0) \varphi} \quad (7)$$

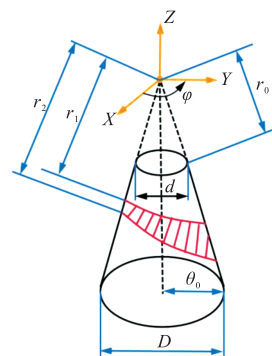


图 4 圆锥对数螺旋天线示意图

Fig. 4 Schematic diagram of helical antenna

表 1 圆锥对数螺旋天线参数

Tab.1 The helical antenna parameters

参数	r_0/mm	α/mm	$\theta_0/(\text{^\circ})$	φ
数值	3.64	0.594395	15.95	$0 \sim 5\pi$

利用公式(8)将圆锥对数螺旋天线的球坐标系转换为笛卡尔坐标系,并设置功能参数 $\varphi = t$,具体参数设置,如表 2 所列。在馈源单元几何模型中,馈源杯端口内径为 137.6 mm,在馈源杯横截面圆周样条曲线上,引入圆度误差点。

$$\begin{cases} x = r \sin \theta \cos \varphi \\ y = r \sin \theta \sin \varphi \\ z = r \cos \theta \end{cases} \quad (8)$$

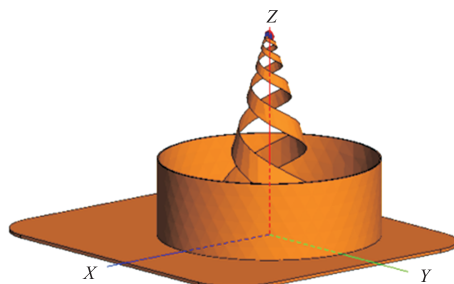
表 2 圆锥对数螺旋线表达式

Tab.2 The helical antenna equation

变量	公式	值/mm	类型
t	0	0	
r	$3.64 \exp(0.594395 \cdot 0.274721129 \cdot 5\pi(\cdot) \cdot t)$	3.64	
xt	$r \cdot 0.2747 \cdot \cos(360 \cdot 2.5 \cdot t)$	0	数量
yt	$r \cdot 0.2747 \cdot \cos(360 \cdot 2.5 \cdot t)$	0	
zt	$-r \cdot 0.9615 + 45.5$	42.00	

3 馈电性能仿真分析

在引入误差条件下,分析螺旋天线电性能变化。首先,获取 L/S 波段内的最佳频点,频率为 0.5 GHz ~ 2.5 GHz,调整远场环境下, θ 的增量为 0.5° , φ 的增量为 5° ;模拟结果如图 5 所示,中心频率为 1.8 GHz 时,增益最大,为 7.965 dBi,其最大辐射方向与轴线重合。以中心频率为对称点,取 1.4 GHz ~ 2.2 GHz 的频段,分析不同频率下误差对电性能的影响。



(a) 装配图

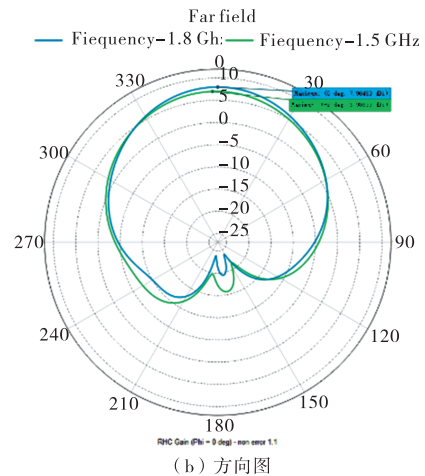
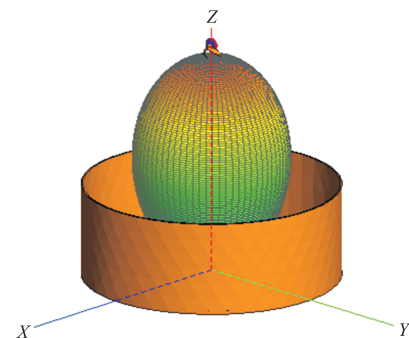


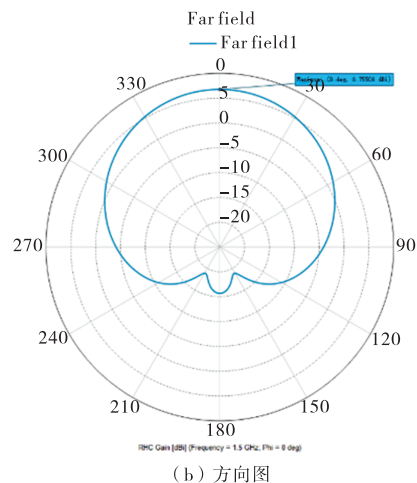
图 5 天线仿真结果

Fig.5 Simulation results of antenna

接地面基板的通孔影响馈源杯结构的轴对称性,诱导最大辐射方向偏离馈源杯轴线方向。如图 6 所示,为对称式结构下最大辐射方向图。对比图 5 和图 6,可知最大辐射方向偏离是由馈源杯结构的非轴对称性造成的。但实际加工中,通孔是不可避免的,所以保留通孔进行分析。



(a) 装配图



(b) 方向图

图 6 对称式结构天线仿真结果

Fig.6 Simulation results of symmetrical antenna

在引入不同圆度误差的条件下,对比螺旋天线电性能变化规律。图7绘制了最大增益损失量和波束宽度变化量在不同频率下的变化曲线。通过模拟结果可知,通常情况下,圆度误差会使最大增益减小,波束宽度增大。随频率增大,增益损失和波束宽度变化量呈振荡上升趋势。当天线处于中心频率1.8 GHz时,对增益影响由大到小依次是0.0506 mm, 0.044 mm, 0.0256 mm, 0.0206 mm, 0.0147 mm, 0.0323 mm, 0.0060 mm,即并非圆度误差越大,损失量就越大。这是因为圆度误差本身具有一定随机性,同一圆度误差值能表征很多种圆的形态,但电性能整体上具有随圆度误差值增大而恶化的趋势。

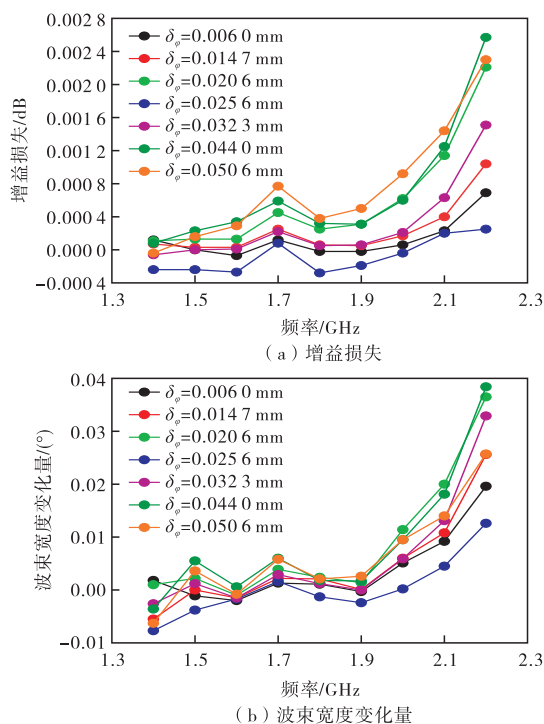


图7 天线仿真结果

Fig.7 Simulation results of antenna

对比分析不同尺寸精度下的圆度误差对天线电性能的影响关系。保证误差值相同的情况下,逐步增大馈源杯半径,其结果如图8所示。在馈源杯半径尺寸存在小范围加工误差时,圆度误差对电性能的影响成振荡关系。综上所述,天线馈源单元的最大增益和波束宽度与馈源杯的圆度误差之间没有明确的单调关系,但会随着频率的增大而恶化。此外,天线电性能对不同尺寸精度的圆度误差的敏感度不同。

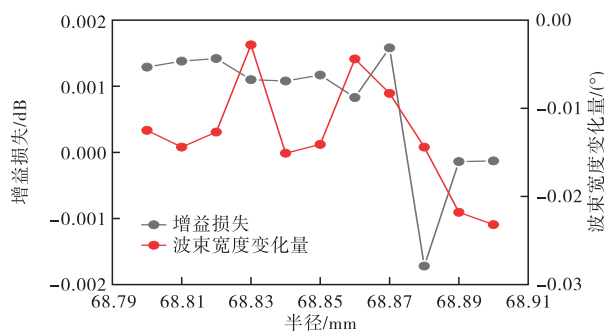


图8 不同馈源杯尺寸电性能仿真结果

Fig.8 Simulation results of electrical performance of different feed cup sizes

4 结论

文章研究了馈源杯圆度误差对螺旋天线馈电性能的影响。首先分析馈源杯电磁耦合模型,并对馈源杯引入圆度误差,获取圆度误差诱导下,馈源杯馈电性能(如最大增益、波束宽度等)的变化规律。研究发现,馈源杯的圆度误差一般会使增益减小,波束宽度增大。基于数值分析结果,可知增益和波束宽度与圆度误差没有明显的线性关系,但会随频率升高呈现增益减小、波束宽度增大的趋势。不同尺寸精度下,圆度误差的对电性能的影响是小范围振荡的。此外,圆度误差不同于尺寸偏差,圆度误差分布具有随机性,对辐射场的影响,在数值上,没有明确的关系,只表现出整体变化方向的大致相同。

参考文献:

- [1] HAUPT R L. Calibration of cylindrical reflector antennas with linear phased array feeds[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(2): 593-596.
- [2] 宋立伟,段宝岩,郑飞. 反射面表面与馈源误差对天线方向图的影响[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(6): 1269-1274.
- [3] GUO F, LIU Z Y, SA G D, et al. A γ -conical position error representation method considering high-order position relevance of array elements[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2022, 64(2): 344-350.
- [4] LIU H, WANG W, TANG D F, et al. Thermal deformation modeling for phased array antenna compensation control[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2022, 22(6): 2325.
- [5] AZAM M A, DUTTA A K, MUKHERJEE A. Uplink channel estimation with hardware imperfections, antenna posi-

- tion error and channel correlation for nested and linear array antennas [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 15412-15426.
- [6] 周云霄. 面向机电耦合的有源相控阵天线电性能计算、补偿和集成设计软件[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018: 19-61.
- [7] 胡雪梅, 康明魁, 王伟, 等. 六边形相控阵天线阵面误差的影响分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(12): 1629-1632 + 1664.
- [8] 王从思, 康明魁, 王伟, 等. 结构变形对相控阵天线电性能的影响分析[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(8): 1644-1649.
- [9] 李华春, 孙正海, 余晓川. 星载可动天线安装误差补偿方法[J]. 空间电子技术, 2019, 16(5): 63-66.
- [10] 李静, 程宝, 李静, 等. 天线一体化馈源杯体电弧增材制造探讨[J]. 空间电子技术, 2021, 18(6): 24-30.
- [11] SADEGHKIA F, MAHMOODI M, HASHEMI-MENEH H, et al. Helical antenna over different ground planes [C]// The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014), 2014: 2185-2188.
- [12] 刘其中, 李莉. 带后腔螺旋天线辐射场的计算[J]. 西安电子科技大学学报, 1994, 21(2): 141-147.
- [13] PATHAK P, WANG N, BURNSIDE W, et al. A uniform GTD solution for the radiation from sources on a perfectly conducting convex surface [C]// Antennas and Propagation Society International Symposium, 2003: 536-539.
- [14] KOUYOUJIAN R G, PATHAK P H. A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface [J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(11): 1448-1461.

作者简介:王锦鑫(1999—), 吉林省吉林市人, 硕士研究生。主要研究方向为制造偏差对天线电性能影响分析与建模。E-mail: wjx27@mail.dlut.edu.cn

通讯作者:刘海波(1983—), 山东济宁人, 教授, 博士生导师。主要研究方向为测量-加工一体化制造方法与装备; 在机/在位精密测量技术与系统; 相变固持自适应加工方法与技术; 工业机器人辅助制造技术与系统; 智能制造柔性单元与产线技术。E-mail: hbliu@dlut.edu.cn