

热变形对一种天线指向机构指向精度的影响分析^①

万小平·于新战·王 波

(中国空间技术研究院西安分院·西安 710000)

摘 要:热变形对天线指向机构的指向精度具有重要影响,但利用传统的设计方法很难实现对指向精度的准确计算,尤其是热变形对指向精度影响的研究工作更是少见。为此建立了机构的三维实体热-结构耦合有限元分析模型,根据有限元分析结果并结合机构的运动链关系,构建了各关键运动副运动误差的计算方法,在此基础上实现了机构指向误差的计算,研究了运动副名义、最大以及最小配合间隙条件下,温度载荷对各关键运动副运动误差和指向精度的影响。研究表明,温度载荷对关键运动副的运动误差以及机构的指向精度具有重要影响,随着温度载荷偏离常温数值的增加,指向误差不断增大,名义配合间隙条件下的指向误差最大。

关键词:天线指向机构;热变形;指向精度;有限元;热-结构耦合

0 引言

一种天线指向机构的指向精度直接影响到整个系统工作的可靠性,尤其是当受到温度载荷作用时,难以应用常规的设计方法计算由热变形引起的机构指向误差。因此,采用合理的计算手段以获得机构各个运动部件的配合状态,分析机构的运动误差,准确计算机构的指向精度,具有重要的工程价值^[1]。

热-结构耦合有限元分析方法是近年来发展起来的一种计算技术,采用有限元热-结构耦合分析可以实现对机构热变形的准确分析,并且可以根据热变形分析结果,获得规定温度载荷作用下机构各运动副之间的配合状态,从而为一定温度载荷下的机构指向精度分析提供了计算手段^[2-4]。在机构热-结构耦合分析的基础上,通过分析机构的运动链以及运动链所包含的各个运动部件之间的配合状态,建立了机构指向精度计算方法,结合热变形的分析结果,实现一定温度载荷影响下的机构指向精度分析。

1 天线指向机构的运动链及关键运动副

天线指向机构如图 1 所示。该机构由呈三角形结构布置的 3 个轴构成,每个轴的两端分别与上板和下板连接,其中,轴 1 与轴 2 均为有源驱动轴,能够在驱动机构的作用下实现轴向伸长与缩短,轴 3 为固定轴,其长度保持不变。驱动轴的结构如图 2

所示,其详细的工作原理为:驱动机构输出转轴与十字滑块连接、十字滑块与螺杆连接并驱动螺杆转动,通过螺杆与螺母的螺旋传动,并借助于螺母导向面 1/壳体 2 以及螺母导向面 2/端盖 2 两个运动副的导向,将螺杆旋转运动转化成螺母直线运动,螺母通过轴承与上板连接并推动上板绕 X 轴或 Y 轴旋转,实现天线指向机构的指向运动功能。

从天线指向机构的运动链看到,关键运动副有 6 个,按照在运动链中的功能分为 4 类,即连接运动副、进给运动副、导向运动副和功能运动副。连接运动副包括转轴凹槽/十字滑块下凸台连接运动副,十字滑块上凸台/螺杆凹槽连接运动副,进给运动副是螺杆/螺母进给运动副,导向运动副包括螺母导向面 1/壳体 2 导向运动副和螺母导向面 2/端盖 2 导向运动副,功能运动副是指轴承座/上板功能运动副。

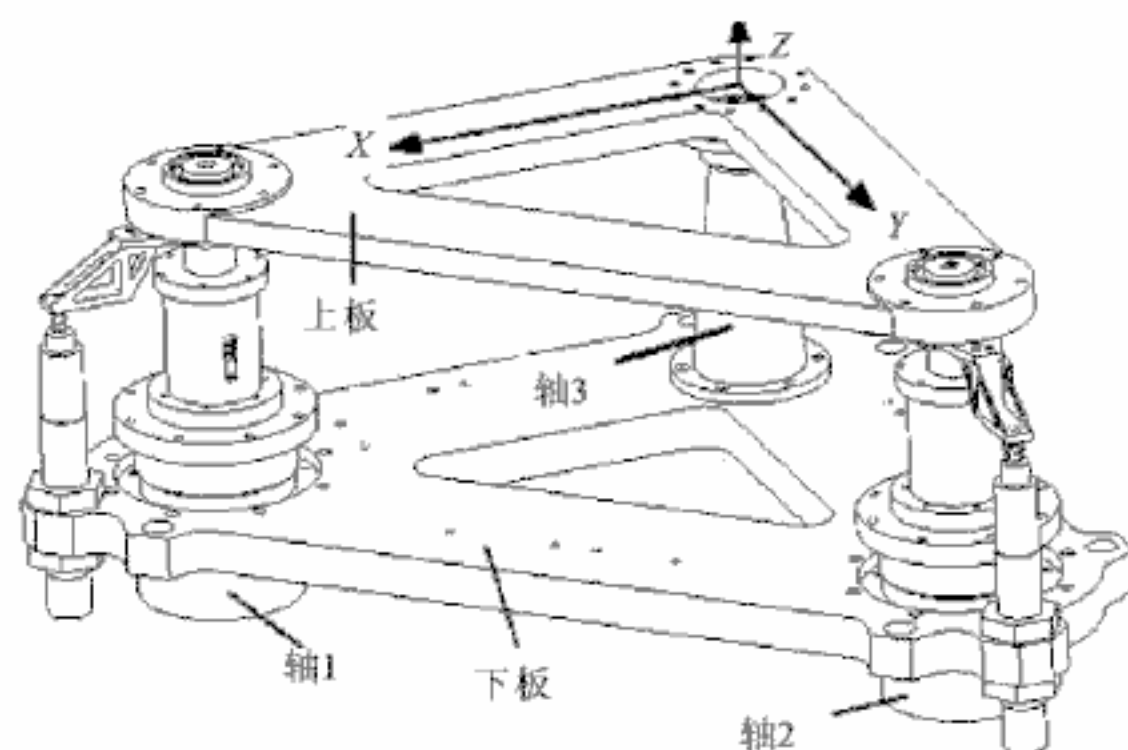


图 1 天线指向机构结构图示

① 收稿日期:2010-11-22;修回日期:2011-01-13。

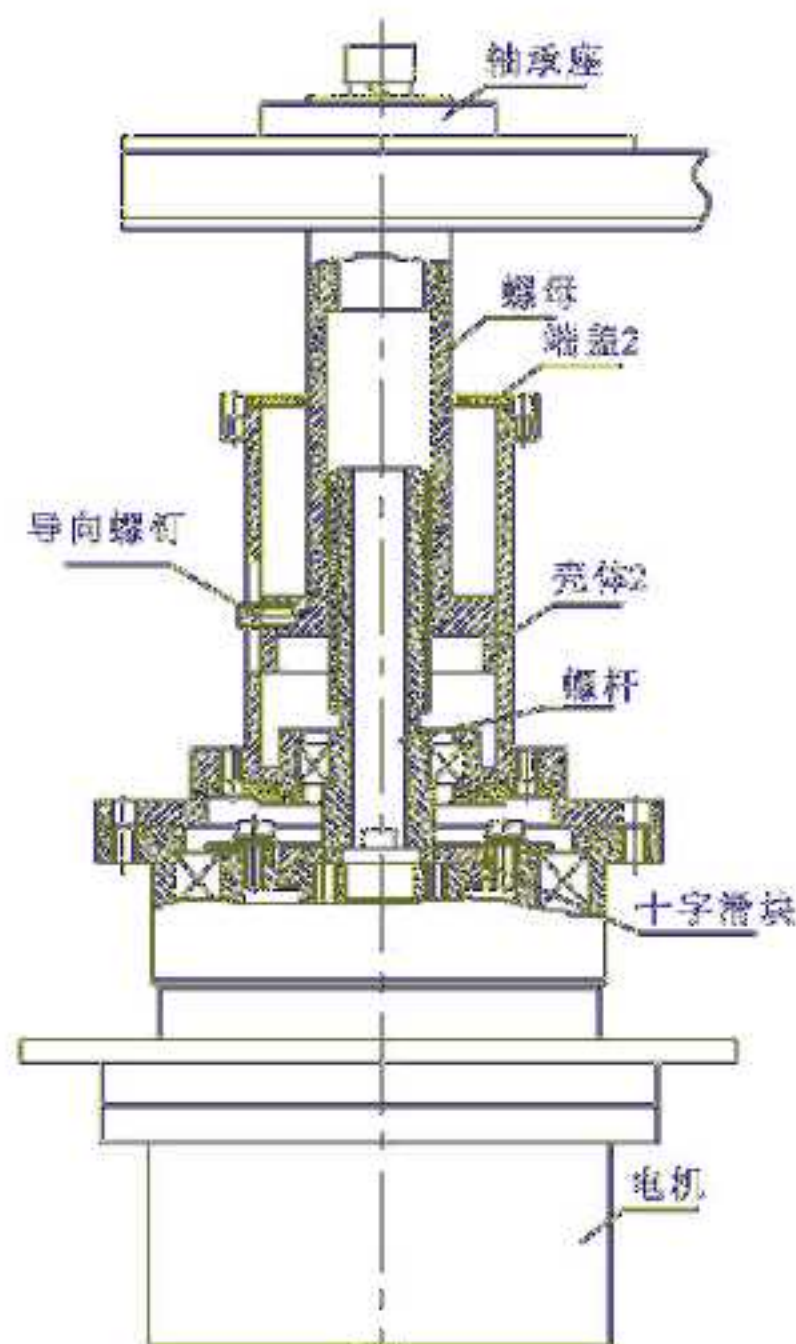


图2 驱动轴结构示意图

基于上述分析, 由于轴1与轴2具有相同的结构形式, 这里仅计算了指向机构单独绕X轴/Y轴转动时的指向精度计算方法。

2 基于热-结构耦合有限元分析的运动副运动误差计算及机构的累积指向误差分析

由于机构的指向误差是由各个运动副的运动误差导致的, 因此, 首先建立各类运动副的运动误差计算方法, 然后根据各类运动副的运动误差计算方法建立了机构指向误差的分析方法。

根据各类运动副的特点发现, 转轴凹槽/十字滑块下凸台连接运动副、十字滑块上凸台/螺杆凹槽连接运动副以及螺母/螺杆进给运动副对指向误差的影响形式可以归为一类, 它们的最终运动误差都间接体现在螺母的直线运动误差上。因此, 将这3个运动副的运动误差归为一类进行分析。

图3所示是2个连接运动副和1个进给运动副的三维几何图形。根据各个运动副的配合关系, 可以获得转轴凹槽/十字滑块下凸台连接运动副、十字滑块上凸台/螺杆凹槽连接运动副及螺母/螺杆进给运动副的运动误差计算公式, 分别如式(1)~式(3)所示。

$$\Delta\theta_1 = 2 \times \frac{(a_1 - b_1) + \Delta\delta_1}{d_1} \quad (1)$$

$$\Delta\theta_2 = 2 \times \frac{(a_2 - b_2) + \Delta\delta_2}{d_2} \quad (2)$$

$$\Delta\theta_3 = \frac{2\pi(0.1 + \Delta\delta_3)}{P \times X} \quad (3)$$

式中, a_1 为转轴凹槽的周向宽度; b_1 为十字滑块下凸台周向宽度; d_1 为十字滑块下凸台外圆直径; $\Delta\delta_1$ 为热变形引起的转轴凹槽/十字滑块下凸台连接运动副间隙变化量; a_2 为螺杆凹槽的周向宽度; b_2 为十字滑块上凸台周向宽度; d_2 为十字滑块上凸台外圆直径; $\Delta\delta_2$ 为热变形引起的十字滑块上凸台/螺杆凹槽连接运动副间隙变化量; $\Delta\delta_3$ 为热变形引起的螺母/螺杆进给运动副间隙变化量; P 为螺母和螺杆螺牙螺旋线的螺距; X 为螺母和螺杆的螺旋线连接数。

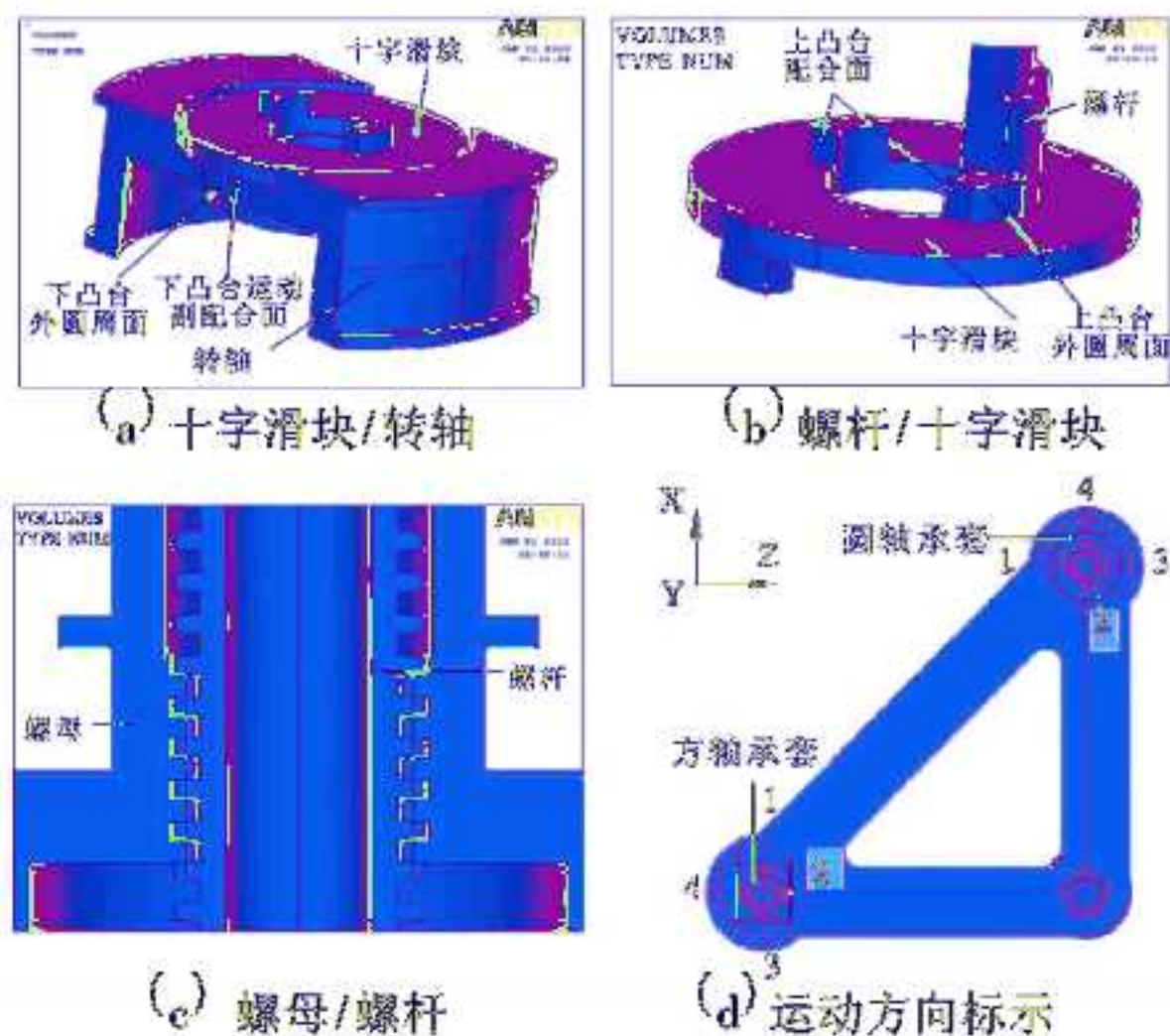


图3 运动副和运动方向标示

根据3个运动副的运动误差可以得到3个运动副形成的累积螺母直线运动误差 ΔL 为:

$$\Delta L = \frac{P \times X \times (\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 + \Delta\theta_3)}{2 \times \pi} \quad (4)$$

运动机构中除了2个连接运动副和1个进给运动副以外, 还包含有螺母导向面1/壳体2和螺母导向面2/端盖2这2个导向运动副。如果这2个导向运动副的配合存在误差, 则会导致螺母发生偏斜, 从而形成上板的指向误差。从图3中看到, 机构在2个对称布置的运动轴驱动下运动, 因此, 在运动副配合间隙均匀的情况下, 计算运动副配合间隙引起的运动误差时, 驱动轴沿2-4方向的偏斜误差大于沿1-3方向的偏斜误差。考虑到机构工作中发生偏斜的不确定性, 文中只分析最大偏斜误差的情况。

为了实现累积误差的计算,将转轴凹槽/十字滑块下凸台连接运动副、十字滑块上凸台/螺杆凹槽连接运动副对指向误差的影响带入到偏斜误差的计算过程,那么就可以获得计入所有运动副运动误差的累积效应,并获得由于累积运动误差所形成的机构累积指向误差。

计算螺母偏斜误差时,将 $\alpha' = \alpha + \Delta\alpha$ 作为不考虑螺母偏斜误差时,对应的螺母直线上行距离为 $L' = L + \Delta L$ 、下行距离为 $L' = L - \Delta L$ (包括 2 个连接运动副、1 个进给运动副的误差影响) 形成的上板摆角,计入螺母偏斜误差后上板的总摆角为 α'' 。

获得转轴凹槽/十字滑块下凸台连接运动副、十字滑块上凸台/螺杆凹槽连接运动副、螺母/螺杆进给运动副等 3 个运动副产生的螺母累积直线误差 ΔL 以后,图 4 给出了机构上行时螺母直线运动误差与上板摆角之间的几何关系。根据如图 4 所示的几何关系,可以进一步获得对应的机构指向角度 α' 计算过程如下:

根据图 4 中的几何关系有

$$BC' = 200 \tan \alpha - \Delta L \quad (5)$$

根据公式 (5) 和图 4 中的几何关系,获得计入累积直线误差 ΔL 后的指向角度 α' 计算公式为:

$$\begin{aligned} \alpha' &= \arctan \left(\frac{BC'}{BD} \right) \\ &= \arctan \left(\frac{200 \tan \alpha - \Delta L}{200} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

因此,2 个运动副形成的指向误差 $\Delta\alpha$ 计算公式为:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= \alpha' - \alpha \\ &= \arctan \left(\frac{200 \tan \alpha - \Delta L}{200} \right) - \alpha \end{aligned} \quad (7)$$

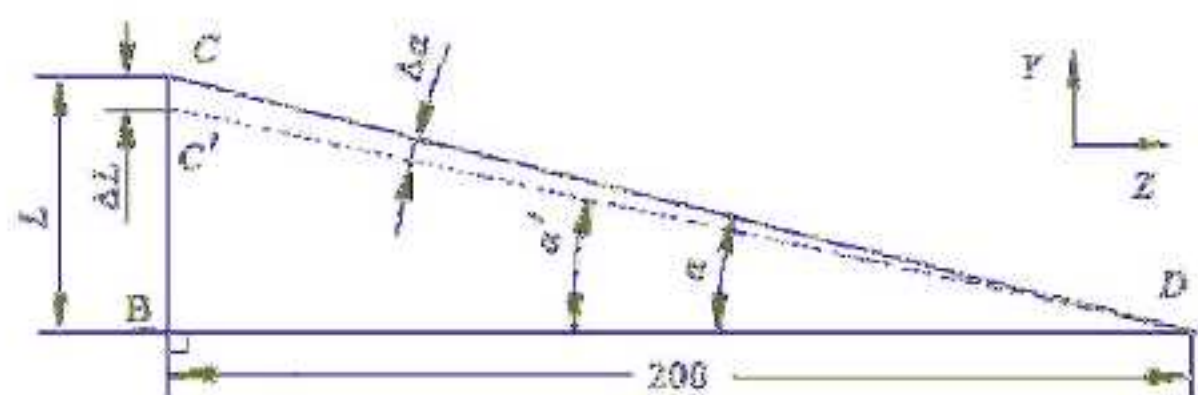


图 4 下行时螺母与上板运动关系

为了进一步计算计入所有运动副运动误差的累积效应,图 5 给出了两个导向运动副与上板之间的几何关系。根据图中的几何关系,当机构上行并沿 2-4 标志方位发生偏斜时,对应的几何关系简图如图 6 所示。

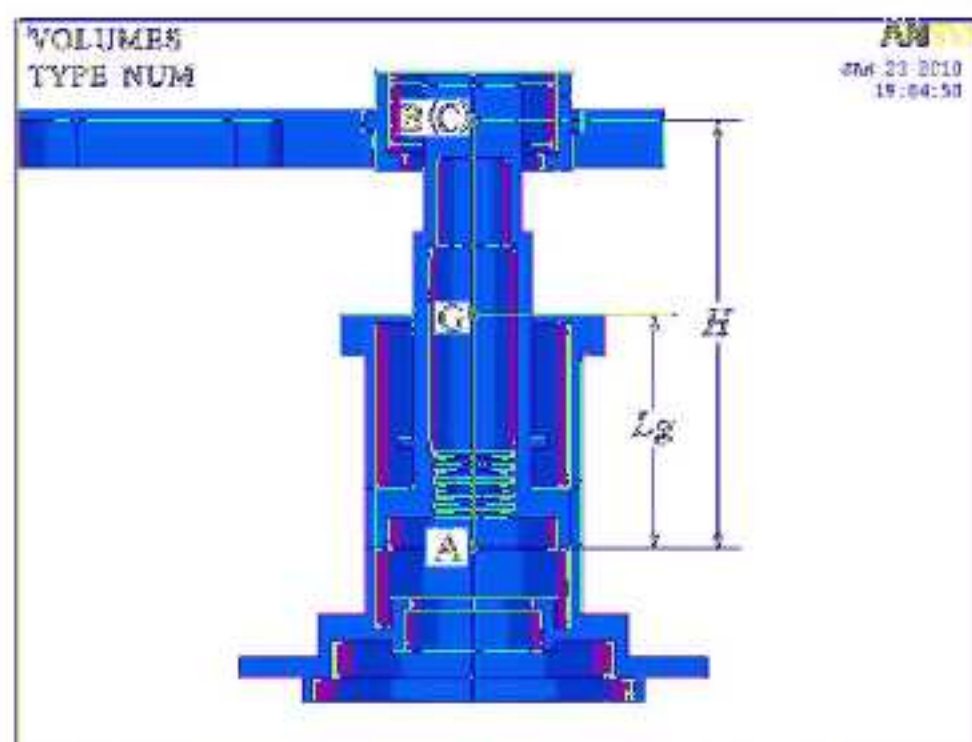


图 5 导向运动副与上板之间的几何关系

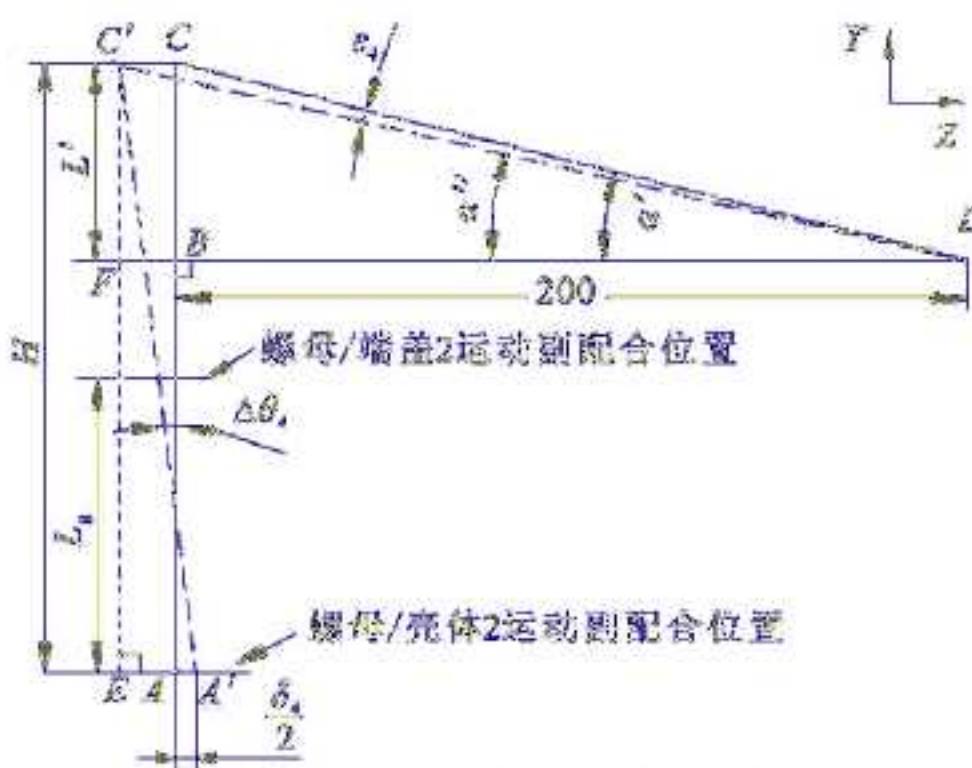


图 6 沿 2-4 方向偏斜时的几何关系

如图 6 所示,考虑到连接运动副累积误差的影响,但不考虑螺母偏斜误差影响时,当天线指向机构上行到某个位置沿 2-4 标志方向向左偏斜时,即上摆角度为 α' 时,螺母上升的直线距离为 L' 。图中的偏斜角度 $\Delta\theta_4$ 由螺母在两个导向运动副配合位置处产生的最大偏斜位移之和 $\Delta\mu$ 和偏斜距离 L_g 控制, $\Delta\mu$ 、 L_g 和 $\Delta\theta_4$ 的计算公式分别如下:

$$\begin{aligned} \Delta\mu &= \frac{\delta_4}{2} + \frac{\delta_5}{2} \\ &= \frac{(d_2 - d_1 + \Delta\delta_4) + (d_4 - d_3 + \Delta\delta_5)}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

$$L_g = 35 - L \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta\theta_4 &= \arctan \left(\frac{\Delta\mu}{L_g} \right) \\ &= \arctan \left(\frac{(d_2 - d_1 + \Delta\delta_4) + (d_4 - d_3 + \Delta\delta_5)}{2L_g} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

式中, d_1 为螺母导向面 1 的配合位置处的直径; d_2 为壳体 2 导向配合位置处的直径; $\Delta\delta_4$ 为热变形引起的螺母导向面 1/壳体 2 导向运动副间隙变化量; $\Delta\delta_5$ 为热变形引起的螺母导向面 1/端盖 2 导向运动

结果中的累积指向角度误差用 ε 表示, 指向角度误差率用 γ 表示, 热变形单独引起的指向角度误差率用 μ 表示。

表 1 热变形对运动副配合间隙的影响

运动副		原始 间隙 (mm)	-40℃	
			平均 间隙 (mm)	间隙 变化率 (%)
驱动组件	轴承套/上板 X	0.020 0	0.008 0	-60.0
	轴承套/上板 Z	0.520 0	0.508 7	-2.2
	螺母/盖板 2	0.022 5	0.026 3	16.9
	螺母/壳体 2	0.022 5	0.028 8	28.0
	螺杆/十字滑块	0.025 0	0.025 0	0.0
	十字滑块/转轴	0.022 5	0.022 9	1.8
	螺母/螺杆	0.100 0	0.100 1	0.1

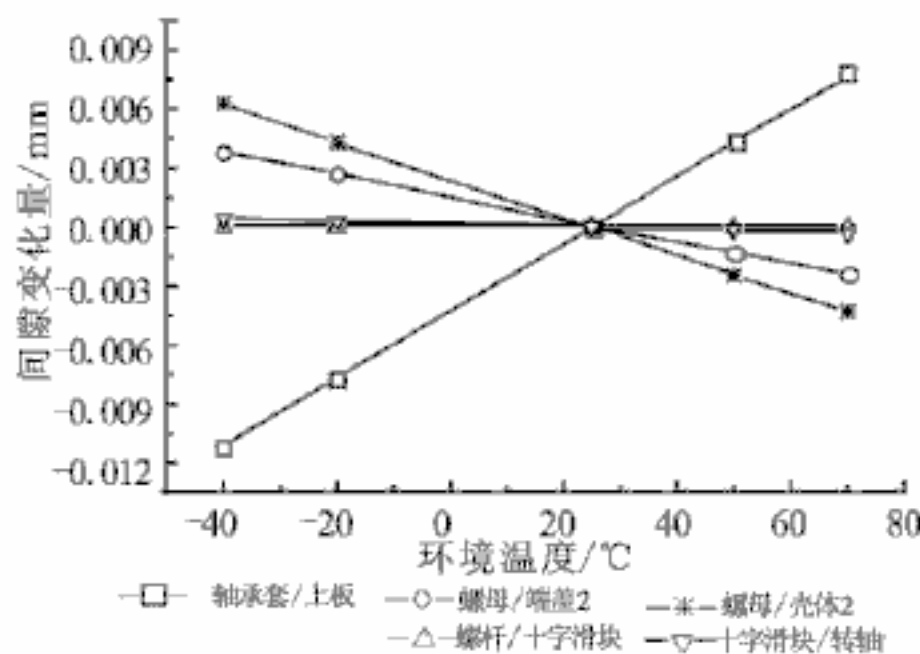


图 9 温度载荷对运动副影响的灵敏程度

表 2 给出了机构上行时, 名义配合间隙条件下各个运动副包括热变形在内的运动误差。运动副的运动误差计算结果表明十字滑块/转轴运动副的运动误差随温度载荷的升高而减小, 螺母/壳体 2 和螺母/端盖 2 这 2 个运动副产生的偏斜误差也随着温度载荷的升高而减小, 其他 2 个运动副的运动误差受到温度载荷的影响不明显。

根据表 2 中的运动误差计算结果, 利用建立的机构累积指向误差计算方法, 表 3 给出了螺母沿 2-4 标志方向发生偏斜时机构的累积指向误差计算结果。结果表明, 在同样的温度载荷条件下, 有热变形后驱动组件沿 2-4 标志位置方位向左偏斜计算出的天线指向机构指向角度误差率明显大于向右偏斜计算出的天线指向机构指向角度误差率。表 3 中的计算结果还表明, 机构的累积指向误差随温度载荷偏离常温 (25℃) 程度的增加而增大。在规定温度载荷

条件下 (-40 ~ 70℃) 计算得到的最大指向误差率发生在 -40℃ 温度载荷下机构向左偏斜时, 数值为 -0.0106%。

表 2 名义配合间隙条件下运动副的运动误差

变量名称		$\Delta\theta_1/(\circ)$	$\Delta\theta_2/(\circ)$	$\Delta\theta_3/(\circ)$	$\Delta\theta_4/(\circ)$
驱动组件上行	-40℃	0.206 0	0.410 0	0.314 4	0.078 7
	-20℃	0.205 1	0.410 0	0.314 3	0.074 4
	25℃	0.202 4	0.410 0	0.314 2	0.064 2
	50℃	0.201 5	0.410 0	0.314 2	0.059 0
	70℃	0.199 7	0.411 6	0.314 2	0.054 5

表 3 名义配合间隙条件下机构的指向精度

变量名称		沿 2-4 标志位置偏斜					
		右偏			左偏		
		$\varepsilon/(\circ)$	$\gamma/\%$	$\mu/\%$	$\varepsilon/(\circ)$	$\gamma/\%$	$\mu/\%$
驱动组件下行	-40℃	-0.029 012	-1.934 1	0.004 6	-0.030 324	-2.021 6	-0.010 5
	-20℃	-0.029 012	-1.934 1	0.004 6	-0.030 257	-2.017 2	-0.006 1
	25℃	-0.029 080	-1.938 7	0.000 0	-0.030 167	-2.011 1	0.000 0
	50℃	-0.029 116	-1.941 1	-0.002 4	-0.030 121	-2.008 1	0.003 0
	70℃	-0.029 147	-1.943 2	-0.004 5	-0.030 084	-2.005 6	0.005 5

文中还计算了驱动组件下行时机构的累积指向误差。计算结果表明驱动组件下行时, 温度载荷对机构累积指向误差率的影响规律与驱动组件上行时相同, 相同温度载荷条件下机构的累积指向误差都小于驱动组件上行时的指向误差。

4 结论

(1) 温度载荷对指向机构运动副的配合间隙有影响, 进而对运动副的运动误差产生严重影响。机构的热分析结果表明, 轴承套/上板配合运动副受到温度载荷的影响程度最大, 其次是螺母/壳体 2 和螺母/端盖 2 运动副。温度载荷对其他运动副运动误差的影响相对较小。

(2) 热变形对机构的指向精度有影响, 温度载荷偏离常温越大, 热变形造成的指向误差也就越大, 而且在相同变化幅度条件下, 当温度载荷偏离常温减小时产生的指向误差更大。

(3) 相对于驱动组件下行的情况, 驱动组件上

行时机构的指向误差受到温度载荷的影响更大些。

Technologies, 2003, 26(1): 48 ~ 54.

参考文献:

- [1] 周密, 杨田, 谢俊, 等. 基于热-结构耦合效应的阀体可靠性分析 [J]. 四川大学学报, 2009, 41(5): 187 ~ 192.
- [2] 陶文铨. 传热学 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- [3] Sirdhar M R, Yovanovich M M. Thermal contact conductance of tool steel and comparison with model [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1995, 39(4): 831 ~ 839.
- [4] Milanez F H, Yovanovich M M, Culham J R. Effect of surface asperity truncation on thermal contact conductance [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging

作者简介:

万小平 1977 年生, 毕业于西北工业大学机械设计专业, 硕士, 工程师。主要研究方向为星载天线的结构与机构设计。

于新战 1974 年生, 毕业于西安电子科技大学机械工程专业, 硕士, 高工。主要研究方向为星载天线的结构与机构分析。

王 波 1980 年生, 毕业于中国空间技术研究院航空宇航制造工程专业, 硕士, 工程师。主要研究方向为天线机构及可靠性研究。

Analysis of Influences of Thermal Distortion on Pointing Precision of a Kind of APM

WAN Xiao-ping, YU Xin-zhan, WANG Bo

(China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710000, China)

Abstract Thermal distortion imposes significant influences on the pointing precision, which could not be calculated accurately using traditional design methods. Research on thermal distortion influencing machine pointing precision seems rare. So a solid thermal and structure finite element method (FEM) model of the antenna pointing mechanism (APM) is built. Then the movement error calculation method of different motive fits is established in light of analyzed results. Based on this method, the APM pointing precision calculation algorithm is put forward and the pointing precision is studied under different cooperation clearance conditions. The results primarily show that the movement error of motive fits and APM pointing precision are influenced by thermal load momentarily. The pointing error increases with the increasing of temperature load deviating to normal temperature. It is also shown that the pointing error is biggest under nominal cooperation clearance.

Key words APM; Thermal distortion; Pointing precision; FEM; Heat and structure

动态信息

“风云二号”07 星发射成功

据报道, 1 月 13 日 8 时 56 分, 我国在西昌卫星发射中心用“长征三号甲”运载火箭, 成功将“风云二号”07 星送入太空。“风云二号”07 星定点在东京 112°赤道上空的地球同步轨道, 并命名为风云二号 F 星。其采取自旋稳定方式, 设计工作寿命为 4 年。

风云二号 F 星是风云二号 03 批 3 颗卫星中的首发星。星载两个主要载荷: 扫描辐射计和空间环境监测器。扫描辐射计可实现非汛期每小时、汛期每半小时获取覆盖地球表面约 1/3 的全圆盘图像。空间环境监测器可实现对太阳 X 射线、高能电子、高能质子和高能重粒子的多能段监测, 用于开展空间天气监测、预报和预警业务。卫星的成功发射, 将增强我国气象卫星在轨连续、稳定运行的可靠性, 为我国及周边国家天气观测、气象预报和防灾减灾发挥重要作用。

摘自《人民日报》2012 年 01 月 14 日

《科技日报》2012 年 01 月 14 日

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)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)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、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)，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>