

大型网状天线柔性连接结构热响应分析

闫森浩, 周佐新, 胡帼杰

(中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘要:大型网状天线在轨运行的交变热环境影响其温度均匀性,导致热变形,进而影响天线性能,因此准确预计天线在轨温度并分析天线热稳定性的影响因素是改善天线性能的基础。利用有限元热分析软件构建大型网状天线模型,仿真得到金属网反射面、张力绳索、肋组件等柔性连接结构对其连接关系的热响应。分析结果表明天线金属网及肋组件温度均对两者的连接关系敏感,各自对其与张力绳索的连接关系均不敏感;张力绳索对其与金属网的连接关系敏感,对其与肋组件连接关系不敏感。上述分析结论可为大型网状天线连接结构设计提供重要参考。

关键词:网状天线;柔性连接结构;连接关系;温度响应

中图分类号:TK124

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2018)05-1013-07

近年来随着深空探测、对地通信、空间科学等事业的快速发展,大口径、高精度星载天线的需求量日益增加,天线各项性能指标要求也越来越高。由于航天器运载工具的限制,星载天线向可展开方向发展,而网状天线因其在展开口径、收纳率、面密度、型面精度和工作频率等方面的优势,是目前应用最广泛的一种可展开天线类型,国内外学者对各类网状天线的结构形式、指向精度、在轨热变形等进行了大量研究^[1-3]。

研究表明受空间热环境的影响,大型网状天线在轨运行中要经历较大范围的周期性高低温变化,并在结构中产生较大的温度梯度,导致结构热变形。大型网状天线对型面变形十分敏感,热变形将直接影响天线的电性能,特别对高频段天线影响尤为显著。为将天线热变形控制在一定范围内,保证在轨正常工作,需确保其具有良好的热稳定性。因此,大型网状天线在轨热稳定性及其影响因素分析是大型网状天线的研究重点。马建等人^[4]通过RVE(representative volume element)方法对天线支撑结构进行热稳定性优化设计及热致变形分析。朱敏波等人^[5]利用正交试验法分析了影响星载天线温度场的主要因素,指出影响天线表面温度的主要因素是吸收-发射比,其次是比热容,再其次是热传导率,

影响最小的是密度。杨艳妮等人^[6]分析了温度梯度对天线热变形的影响,结合星载天线温度平均偏差和变形均方根误差,得出影响天线在轨热稳定性的判据。王婧等人^[7]通过对比分析得出卫星平台对大型网状天线温度影响较大,并分析了天线反射网面与柔性绳索所用材料对温度梯度的影响。综上所述国内外学者对大型网状天线在轨热稳定性开展了大量研究,但对于天线关键柔性部件,如金属网反射面、张力绳索及其支撑结构等关注较少,对于柔性部件连接关系对天线热响应的影响尚不清楚。天线在轨运行期间,金属网反射面自身热变形以及与其相连接的肋组件和张力的绳索的热变形均会影响天线型面精度,因此需对柔性连接结构热响应进行研究。当前热响应研究的主要方法包括地面热试验和热仿真分析,但考虑到地面热试验费用高昂,且对于大型星载部件来说,全尺寸热试验开展难度较大,因此,热仿真分析是研究大型网状天线更为常用的方法。

本文使用有限元软件构建大型网状天线热分析模型,开展天线柔性连接结构的热响应分析。文中基于热平衡试验数据修正获得准确的热分析模型,仿真分析得到天线金属网反射面、张力绳索、肋组件等柔性连接结构对不同形式连接关系的热响应规律,从而为大型网状天线的柔性连接结构设计提供

重要参考。

1 大型网状天线热分析建模

1) 有限元模型

大型网状天线主要由金属网反射面、张力绳索、肋组件、展开机构、馈源等组成,如图 1 所示,其中金属网反射面由镀金钼丝编织而成,通过绑扎固定在肋组件与张力绳索上;张力绳索施加有预紧力,并与肋组件相连接,两者共同为天线保证其型面精度提供支持;主肋连接在展开机构上,在轨到位展开后相对位置不再发生变化。由于天线在轨运行期间温度分布对其型面精度有重要影响,且张力绳索和肋组件作为金属网反射面的支撑结构,其热变形会直接影响天线型面精度,因此,为保证型面精度满足设计要求,需重点关注金属网反射面、张力绳索、肋组件等结构的温度分布。

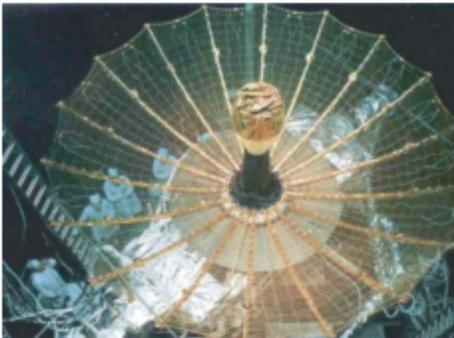


图 1 网状可展开天线

本文利用有限元热分析软件构建大型网状天线有限元模型,为方便分析计算,同时考虑到传热关系,在有限元建模中采用了如下简化与假设^[8]:简化肋板条与主肋的螺孔、螺钉等细小凸起部件及肋板条减轻孔;忽略金属网热物性的各向差异;金属网为带孔抛面,由于金属网孔径较小无法精确建模,因此建模时简化为实体;金属网太阳吸收率为 0.15,红外发射率为 0.3,由于在模型中选用 2D 壳单元构建的金属网反射面为连续的实体单元,其辐射面积较真实状态的金属网有所增加,因此需要根据金属网的孔隙率对太阳吸收率等各项辐射属性参数进行修正,本文所研究的金属网孔隙率为 0.5,经折算后其太阳吸收率为 0.075,红外发射率为 0.15。构建有限元模型如图 2 所示。

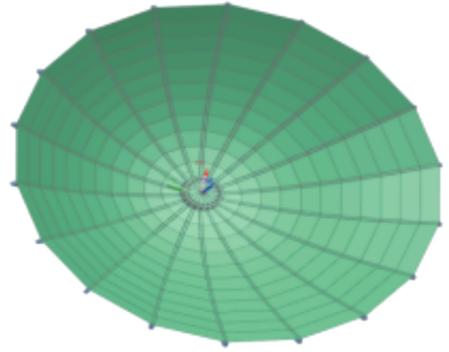


图 2 天线有限元模型

在热分析中主要部件的热物性参数如表 1 所示,金属网太阳透过率为 0.5,红外透过率为 0.7。此外,天线结构形式复杂,包含主肋与展开机构、金属网与张力绳索、金属网与肋组件以及张力绳索与肋组件等多种连接方式,其中主肋与展开机构、展开机构各部分之间均为螺栓连接,其热耦合系数已有成熟经验值可供选取,但对于肋板条与金属网、张力绳索与金属网、张力绳索与肋组件 3 类柔性连接关系的热耦合系数尚未有确定取值标准,需通过试验数据进行修正,具体见表 2。

表 1 材料热物理属性

部件	材料	热导率 $\lambda / (W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	发射率 ϵ	太阳吸收率 α
金属网	镀金钼丝	123	0.3	0.15
张力绳索	聚酰亚胺	0.3	0.8	0.35
肋组件	M40J	12.5	0.8	0.9

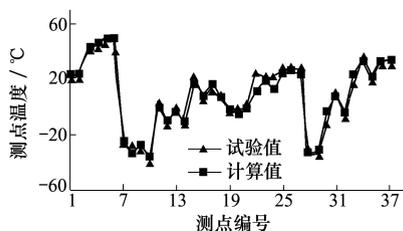
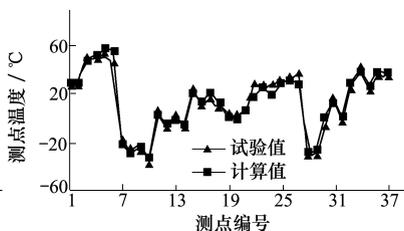
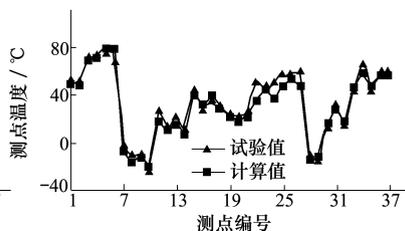
表 2 主要连接关系热耦合系数

连接机构	连接方式	热耦合系数 $/(W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1})$	来源
主肋与展开机构	螺栓连接	200	成熟经验值
金属网与肋板条	细绳绑扎	待定	试验数据修正
金属网与张力绳索	细绳绕缝	待定	试验数据修正
肋组件与张力绳索	缠绕	待定	试验数据修正

2) 模型修正

本文根据试验数据修正金属网反射面与肋板条、金属网反射面与张力绳索以及张力绳索与肋组件 3 类柔性连接关系的热耦合参数,并以不同工况下的试验数据对参数的准确性进行验证。前期以大型网状天线为对象开展了热试验,试验在真空罐中

进行,环境温度为 -175°C ,辐射热流分别为 $1\ 322\ \text{W}/\text{m}^2$, $1\ 414\ \text{W}/\text{m}^2$ 以及 $1\ 760\ \text{W}/\text{m}^2$,参与试验的结构包括金属网反射面、张力绳索以及肋组件,并在试验件上布置多个测温点,其中测温点1~6位于肋板条上,测温点7~18位于主肋上,测温点19~33位于张力绳索上。根据辐射热流为 $1\ 322\ \text{W}/\text{m}^2$ 工况条件下试验数据,迭代修正各连接关系热耦合参数,最终确定当前连接关系下金属网与张力绳索连接关系热耦合系数为 $15\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,金属网与肋板条连接关系热耦合系数为 $7\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,张力绳索与肋

图3 $1\ 322\ \text{W}/\text{m}^2$ 温度拟合情况图4 $1\ 414\ \text{W}/\text{m}^2$ 温度拟合情况图5 $1\ 760\ \text{W}/\text{m}^2$ 温度拟合情况

组件连接关系热耦合系数为 $2\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。图3为光源辐射强度为 $1\ 322\ \text{W}/\text{m}^2$ 工况下计算值与试验值的温度对比情况,试验测试值与有限元模型计算值偏差平均值为 4.01°C ,可见当前参数下模拟拟合状况良好。

以当前模型分别计算辐射强度为 $1\ 414\ \text{W}/\text{m}^2$ 和 $1\ 760\ \text{W}/\text{m}^2$ 时的温度分布,温度偏差平均值分别为 4.11°C , 4.44°C ,与试验测试值拟合状况良好,认为该热耦合参数准确,具体情况如图4、图5所示:

3) 计算结果分析

根据模型计算结果可知,天线各部件间温度有较大差异。相同光照条件下肋组件温度最高,张力绳索次之,金属网反射面温度最低。这是由于金属网反射面太阳吸收率为0.15,张力绳索太阳吸收率为0.35,肋组件太阳吸收率为0.9,各部件表面辐射属性的差异导致其吸收辐射量有所不同,因此金属网温度低于对应位置张力绳索和肋组件的温度。

天线各柔性连接结构温度最值出现的区域有所不同。金属网反射面最高温度出现在与肋板条相连接区域,主要是由于肋板条温度较高,对金属网接触区域有加热作用;张力绳索与肋组件最高温度出现在光照区域中心,主要由其表面辐射属性所决定;而三者最低温度均出现在无光照区。

各柔性连接结构自身温度均匀性有所差异。由于金属网自身热导率远大于张力绳索和肋组件,因此对于同处于局部受照工况下的区域,金属网反射面温度分布均匀性优于张力绳索与肋组件的温度分布均匀性。

2 柔性连接结构热响应分析

大型网状天线柔性连接结构包括金属网反射面、张力绳索以及肋组件,其中肋组件和张力绳索分别通过绑扎、绕缝等方式与金属网反射面连接,使其

保持良好的型面状态,张力绳索则通过与肋组件相连接,保持自身预紧力。为确定柔性连接结构温度分布对其连接关系的敏感度,需给出合理判据。

本文开展对上述柔性连接结构热响应分析,分别以金属网反射面、张力绳索、肋组件的最高温度、最低温度以及温度平均偏差随连接关系变化的情况作为其对相应柔性连接关系热响应的判据。为使大型网状天线在轨正常工作,需确保其具有较高的热稳定性。保证热稳定性一方面要求天线温度波动在一定范围内,本文为准确反映柔性连接结构对金属网、肋组件及张力绳索温度的影响程度,因此选用各部件的最高温度、最低温度随热耦合强度变化的情况作为其对相应柔性连接关系的敏感度判据。另一方面要求天线温度分布的均匀程度满足要求,当天线处于非均匀受照,即只有部分区域能接收太阳辐射,其余部分由于结构遮挡等原因处于阴影区的情况下自身温度梯度到达最大,此时温度场均匀性最差,热变形情况最为剧烈。因此,本文在对金属网反射面、肋组件及张力绳索温度梯度的变化情况进行讨论时,均选取各结构非均匀受照区域温度的平均偏差作为其温度均匀性的判据。此外由于天线各柔性连接结构温度分布对其连接关系的敏感性主要受连接方式影响,与太阳热流方向无关,为避免其他因素的干扰,本文在进行分析工作时采用与地面热试验相同的边界条件,通过改变接触传热系数的大

小分析各柔性连接结构温度分布对其连接关系的敏感性。

1) 肋板条与金属网热耦合关系

试验设计状态中金属网反射面通过细绳绑扎固定在肋板条上,其接触界面间无填料,热耦合系数为 $7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。该连接关系接触传热系数主要由界面接触压力、接触表面粗糙度、材料热导率、温度等因素决定,本文主要分析不同压紧力连接关系对所连接部件的温度响应。

根据相关研究^[9],接触传热系数随压紧力的增大而逐渐增大;已有试验测得界面接触压力为 25 kPa 时, $\text{Ly}12$ 硬铝合金接触传热系数为 $127 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,本文分析模型中肋板条与金属网反射面所用材料分别为 M40J 和镀金钼丝,镀金钼丝热导率与 $\text{Ly}12$ 硬铝合金接近, M40J 热导率约为 $\text{Ly}12$ 硬铝合金的十分之一。金峻峰^[10]指出当接触面一方导热系数减小时,其接触换热系数随之降低。因此,若使金属网与肋板条接触换热系数约为 $30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,其连接压紧力需控制在 $25 \sim 35 \text{ kPa}$;接触换热系数约为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,其连接压紧力需控制在 $5 \sim 10 \text{ kPa}$ 。

通过计算结果可知,在柔性连接关系增强的过程中,接触换热量随之增加,这是由于接触面压紧力改变时对应区域温度改变,自身辐射、导热也有不同。依据能量守恒原理,其接触换热量必然发生变化。

肋板条与金属网反射面的最高温度、最低温度随连接强度变化的情况如图 6 所示。

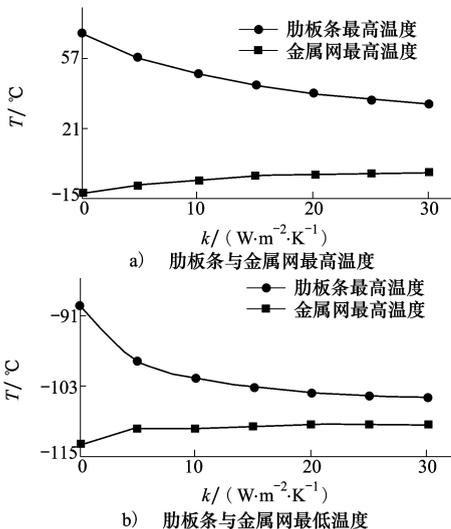


图 6 肋板条与金属网温度响应

由图可以看出肋板条与金属网反射面对两者连接关系的温度响应敏感。随着该连接关系压紧力的增加,肋板条的最高温度和最低温度在逐渐变小,而金属网的最高温度和最低温度在逐渐变大。说明肋板条与金属网反射面连接关系对两者温度均有一定程度的影响,且肋板条温度受影响程度高于金属网。这是由于同一区域内金属网温度低于肋板条温度,当压紧力升高时,两者换热量增加,考虑到金属网自身热导率高于肋板条,综合作用下产生如图所示的温度变化。此外,随连接强度的增加,两者温度变化率不断减小。

图 7 为肋板条与金属网反射面温度均匀性随其连接关系变化的情况。

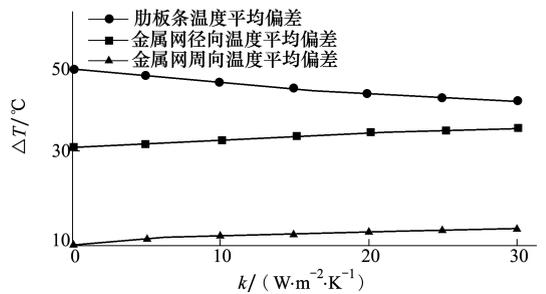


图 7 肋板条与金属网温度均匀性变化情况

由图可知,肋板条与金属网反射面温度均匀性对其连接关系敏感。肋板条温度平均偏差值随界面接触压力的增加而逐渐减小,即其温度均匀性变好;金属网反射面径向与周向温度平均偏差均随界面接触压力的增加而逐渐增大,即金属网温度均匀性逐渐变差。由于金属网反射面自身温度均匀性优于肋板条,当其相互之间连接关系增强时,肋板条温度均匀性将得到改善,而金属网径向温度场均匀性会随之恶化。同时,由于连接关系增强,金属网反射面上接触位置温度随之升高,与周向区域温差逐渐变大,导致其周向温度均匀性变差。

2) 张力绳索与金属网热耦合关系

试验状态中张力绳索与金属网通过细绳绕缝连接,为保证该连接关系可靠,满足其力学性能要求,在连接处加入少量硅胶,接触传热系数为 $15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。本节分析该连接关系热响应时,主要研究当缠绕强度变化,即接触界面压紧力发生改变导致接触传热系数不同时,张力绳索和金属网反射面对应的热响应。本文分析模型中张力绳索热导率远低于 $\text{Ly}12$ 硬铝合金,考虑到硅胶对导热性能的提

升,若使张力绳索与金属网接触传热系数约为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,其界面压紧力需控制在 $3 \sim 8 \text{ kPa}$;接触传热系数约为 $60 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,界面压紧力需控制在 $30 \sim 40 \text{ kPa}$ 。

张力绳索与金属网反射面温度随连接强度变化的情况如图 8 所示。从图中可以看出张力绳索温度响应对连接关系敏感,金属网反射面温度相应对该连接关系不敏感。当界面接触压力增加时,张力绳索的最高温度随之降低,金属网的最高温度略有升高,但其变化情况相对于张力绳索可以忽略,同时两者的最低温度基本保持不变。这是由于这是由于两者连接处接触面积相比于金属网整体面积比例极小,且金属网自身热导率远高于张力绳索,因此造成该连接关系对金属网温度基本无影响。且两者最低温度区域都处于无光照区,接触区域温差较小,接触换热效果微弱导致最低温度基本无变化。

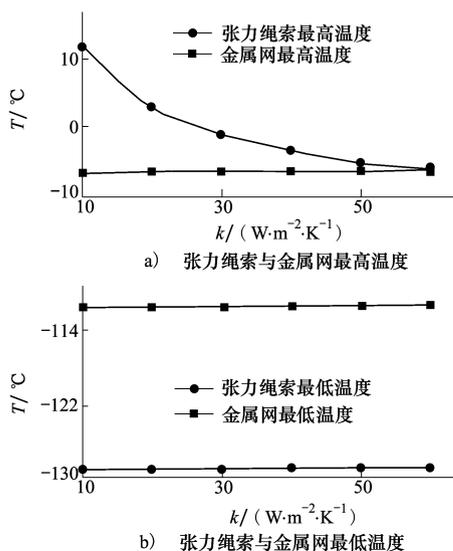


图 8 张力绳索与金属网温度响应

由上述分析可知金属网温度不受其与张力绳索连接关系影响,因此本节重点关注张力绳索温度均匀性的受影响程度。图 9 为张力绳索温度均匀性随热耦合强度变化曲线图,由图可知,张力绳索温度均匀性对该连接关系敏感。张力绳索温度平均偏差随界面接触压力的增加而逐步减小,即温度均匀性得到改善。因此,在天线设计工作中可充分利用金属网反射面自身导热系数大、温度均匀性良好的特点,加强张力绳索与金属网的连接,强化两者接触换热,以此达到改善张力绳索温度均匀性的作用,同时也

对两者的力学连接关系有所加强,使得天线网面型面更加符合理想状态,对网面预张力及结构设计调整有正面效应。

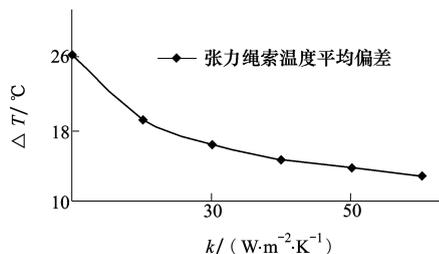


图 9 张力绳索温度均匀性变化情况

3) 张力绳索与肋组件热耦合关系

试验设计状态中张力绳索端头与螺钉相连接,并通过螺钉固定在肋组件上,即张力绳索通过第三方介质与肋组件连接,接触传热系数为 $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。本节在分析张力绳索与肋组件连接结构热响应时,主要研究张力绳索与螺钉不同连接强度对张力绳索与肋组件温度分布的影响。由于螺钉与张力绳索、螺钉与肋组件均为金属与非金属连接,张力绳索与肋组件热导率均小于 Ly12 硬铝合金,考虑到螺钉在热传递过程中带来的热阻,若使张力绳索与肋组件的接触传热系数约为 $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,界面压紧力需控制在 $5 \sim 15 \text{ kPa}$;接触传热系数约为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,界面压紧力需控制在 $40 \sim 50 \text{ kPa}$ 。

张力绳索与肋组件连接强度对两者温度的影响如图 10 所示。

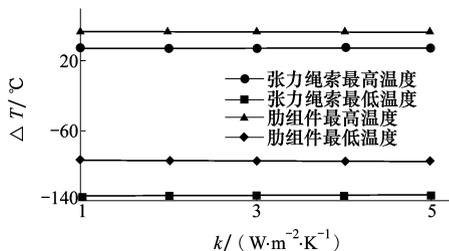


图 10 张力绳索与肋组件温度响应

由图可知张力绳索与肋组件温度响应对该连接关系均不敏感。当界面接触压力增加时,张力绳索与金属网的最高温度、最低温度均不发生变化,即张力绳索与肋组件的连接关系对其温度分布范围无影响。张力绳索与肋组件温度梯度变化情况如图 11

所示,从图中可以看出张力绳索与肋组件的温度均匀性不受两者连接强度的影响。因此,本文认为张力绳索与肋组件连接关系对两者温度响应无影响。

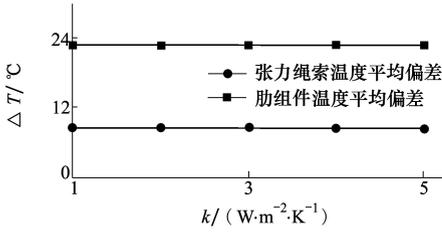


图 11 张力绳索与肋组件温度均匀性

衡量天线最重要的指标是其电气性能指标,而天线温度分布会对其电气性能产生重要影响。天线在轨运行期间由于受到空间环境的影响产生温度梯度,导致结构发生热变形,产生反射面型面精度误差,进而影响天线电气性能。基于本文分析结果,可得出准确的天线温度分布情况,从而分析其电气性能指标是否满足设计要求。

3 结 论

大型网状天线在轨运行期间受空间环境影响产

生温度梯度,由此导致的热变形会直接影响天线电性能,因此需保证天线工作期间温度稳定性,并掌握各结构温度分布的影响因素。本文使用有限元软件构建大型网状天线热分析模型,研究金属网反射面、张力绳索、肋组件等柔性连接结构的热响应规律。分析结果表明:金属网反射面与肋组件温度对两者的连接关系敏感,各自对其与张力绳索的连接关系均不敏感,且随两者连接关系增强,肋板条温度均匀性有所改善,而金属网温度均匀性呈恶化趋势;张力绳索温度对其与金属网的连接关系敏感,对其与肋组件的连接关系不敏感,当张力绳索与金属网连接关系的增强时,前者温度均匀性逐渐改善。根据热响应分析结果,金属网与张力绳索、金属网与肋板条的连接关系均会影响结构温度均匀性,在设计中建议增强金属网与张力绳索的连接关系,改善张力绳索温度分布均匀性;对金属网与肋板条的连接关系,需综合考虑其对两者温度均匀性的影响,确定最佳连接强度。

参考文献:

[1] 李彬. 网状反射面可展开天线的结构优化设计研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2010
Li Bin. Research on Optiminization of Structure Design for Mesh Deployable Antenna [D]. Xi'an, Xidian University, 2010 (in Chinese)

[2] 高扬. 大型星载网状天线分析模型调整与测量[D]. 西安:西安电子科技大学,2015
Gao Yang. Measurement and Adjustment of Large Deployable Antenna [D]. Xi'an, Xidian University, 2015 (in Chinese)

[3] 吕庆. 一种大型可展开网状天线的结构和热分析[D]. 西安:西安电子科技大学,2014
Lü Qing. Design and Thermal Analysis of a Large Deploable Mesh Antenna [D]. Xi'an, Xidian University, 2014 (in Chinese)

[4] 马建,肖刚,肖鹏飞,冉治国. 基于 RVE 模型的空间天线结构热稳定性优化设计与热变形分析[J]. 空间科学学报,2016, 36(3):386-394
Ma Jian, Xiao Gang, Xiao Pengfei, Ran Zhiguo. Thermal Stability Optimization Design and Thermal Deformation Analysis of Space Antenna Structure Based on Representative Volume Element Method [J]. Journal of Space Science, 2016, 36(3):386-394 (in Chinese)

[5] 朱敏波,钟杨帆,段宝岩. 星载天线在轨热变形多因素影响仿真分析[J]. 系统仿真学报,2007,19(6):1376-1378
Zhu Minbo, Zhong Yangfan, Duan Baoyan. Multiply Factors Simulation Analysis for Thermal Deformation of Space-Borne Antenna [J]. Journal of Syatem Simulation, 2007, 19(6):1376-1378 (in Chinese)

[6] 杨艳妮. 星载天线在轨热稳定性影响因素分析[D]. 西安:西安电子科技大学,2007
Yang Yanni. A Study on Factors Influencing Thermal Stability of Satellite Antenna in Orbit [D]. Xi'an, Xidian University, 2007 (in Chinese)

[7] 王婧. 空间大型轻柔系统结构热分析[D]. 西安:西安电子科技大学,2014
Wang Jing. Thermal Analysis on Space Large Flexible Structure System [D]. Xi'an, Xidian University, 2014 (in Chinese)

- [8] 刘百麟,胡帼杰,周佐新. 太阳窗口抑制空间激光通信天线在轨热致温度场扰动研究[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(2):326-332
Liu Bailin, Hu Guojie, Zhou Zuoxin. Depression Effect of Solar Window on Thermal-Induced Temperature Disturbance for Space Laser Communication Optical Antenna[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(2):326-332 (in Chinese)
- [9] 祁宁. 固-固界面接触热阻的实验研究及数据库查询系统的开发[D]. 南京:南京理工大学, 2013
Qi Ning. Experiment Study on Thermal Contact Resistance Between Solid-Solid Surfaces and Development on Database Query System[D]. Nanjing, Nanjing University of Science and Technology, 2013 (in Chinese)
- [10] 金峻峰. 金属/复合材料机械连接热接触效应研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2015
Jin Junfeng. Research of Thermal Contact Effect on Metal/Composite Mechanical Connection[D]. Wuhan, Wuhan University of Technology, 2015 (in Chinese)

Thermal Response Analysis of Flexible Connecting Structure of Large Mesh Antenna

Yan Senhao, Zhou Zuoxin, Hu Guojie

(China Academic of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The thermal uniformity of large mesh antennas in orbit is influenced by the thermal environment, which results in thermal deformation and affects the performance of the antenna. Therefore, it is the basis of improving antenna performance to accurately predict the temperature and analyze the influence factors of the thermal stability of the antenna. In this paper, a large mesh antenna model is constructed by using the FEM analysis software to simulate the thermal response of the flexible connecting structure of the metal mesh reflector, tension cable and rib component. The analysis results show that the temperature of antenna metal mesh and rib components are sensitive to the connection of the two, and their connection to tension rope is not sensitive. The tension cable is sensitive to the connection of the metal mesh and is insensitive to the connection of the rib components. The above analysis can provide an important reference for the design of large mesh antenna connection structure.

Keywords: mesh antenna; flexible connecting structure; connection relation; temperature response