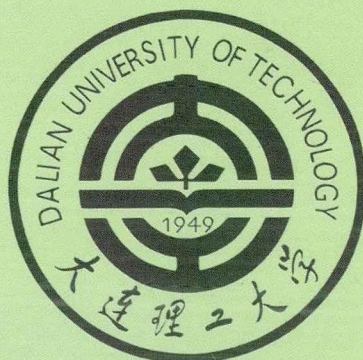


工程硕士学位论文

MASTERAL DISSERTATION



空间用微波光传输收发模块的热管理与 封装设计研究

工程领域 光学工程

作者姓名 李宝龙

指导教师 赵明山 教授

答辩日期 2014年6月

专业学位硕士学位论文

空间用微波光传输收发模块的热管理与封装设计研究

**Thermal Management and Package Design of RoF Link
Transceiver Module For Space Application**

作者姓名: 李宝龙
工程领域: 光学工程
学 号: 31202006
指导教师: 赵明山 教授
完成日期: 2014-05

大连理工大学

Dalian University of Technology

大连理工大学学位论文独创性声明

作者郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用内容和致谢的地方外，本论文不包含其他个人或集体已经发表的研究成果，也不包含其他已申请学位或其他用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文题目：空间用微波光传输收发模块的热管理与封装设计研究

作者签名：李宝龙 日期：2014年6月12日

摘 要

微波光传输技术结合了光通信技术和微波通信技术的优势，既有了光通信技术大带宽、低损耗、抗电磁干扰和重量轻等优势，又兼有微波通信技术的高灵活性、广覆盖和可移动的优势。在卫星通信、国防工业和民用通信中有了广泛的应用，受到了高度的关注。

由于面对空间环境，处在真空条件下，无法实现对流散热，对微波光传输收发模块的散热提出了更高的要求。同时，面对卫星内部空间狭小，载荷众多等特点，对模块的小型化同样具有较高要求。

本文基于模块散热和小型化的考虑，借助有限元软件 *ANSYS* 对微波光传输收发模块中大功耗器件进行了热分析，在充分分析大功耗器件发热的基础上，利用卫星舱内的温控板，对激光器、放大器大功耗器件在模块化封装中的散热过程进行了细致的模拟，得到了详细的热分析结果，并对热分析结果进行了合理化的热管理和布局，通过增加导热系数较高的铜导热板，加大了大功耗器件的散热效果，实现了器件的有效散热，使器件能够长期稳定的工作在正常温度范围内。

本文还从热控、抗辐照、电磁兼容和抗力学环境的角度对模块的封装进行了分析和设计，同时，借助三维立体设计软件 *SolidWorks* 对微波光传输收发模块中的有源、无源器件进行了封装尺寸绘图。最终，对系统模块进行了高度集成化的封装，实现了模块的小型化封装设计。

关键词：微波光传输；热管理；模块封装

Thermal Management and Package Design of RoF Link Transceiver Module For Space Application

Abstract

Radio over Fiber (RoF) communication technology combines the advantages of optical communication technology (wide bandwidth, low loss, anti-electromagnetic interference and light weight) and microwave communication technology (high flexibility, wide coverage and movable). It has been widely used in the fields of satellite communication, national defense industry and civilian communication. And, more and more researchers began to pay attention to this technology.

For the systems applied to space, the vacuum environment, there are two major issues in the process of system integration. One is the thermal dissipation issue, because it is more difficult to achieve since there is no convection in a vacuum environment. The other is the miniaturization issue because of the narrow volume, numerous payloads and concentrated components of satellite.

In this paper, based on this two considerations, thermal dissipation models of the high-power devices in RoF transceiver module, for example lasers and amplifier, in the process of RoF's miniaturization is analyzed by using *ANSYS*, a finite element analysis software. On this basis, effective thermal management solutions have been proposed and used, such as adding heatsinks with big thermal conductivity coefficient. Result shows that the system can work within an appropriate temperature range in a long term by using this cooling solution.

In addition, packaging solutions for RoF transceiver module has been designed in this paper by using *Solidworks* software, based on the analysis of thermal control, anti-radiation, electromagnetic compatibility and some other issues. Eventually, the RoF transceiver module has been packed with a high level of integration, thereby achieve a compact package design.

Key Words: RoF; Thermal Management ; Package Design of Module

目 录

摘 要	I
Abstract	II
1 引言	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 微波光传输系统概念	2
1.2.1 微波光传输系统的结构与原理	2
1.2.2 微波光传输系统的优点及应用	2
1.3 微波光传输收发模块的关键器件	3
1.3.1 激光器	4
1.3.2 调制器	5
1.3.3 光电探测器	6
1.4 本文研究内容	7
2 热分析基本理论	8
2.1 热传递基本方式	8
2.1.1 热传导	8
2.1.2 热对流	11
2.1.3 热辐射	12
2.2 热分析的分类	12
2.2.1 稳态热分析	12
2.2.2 瞬态热分析	13
2.3 热分析的边界条件与初始条件	13
2.4 材料基本属性	14
2.5 本章小结	15
3 ANSYS 热分析	16
3.1 有限元法的基本思想	16
3.2 ANSYS 软件介绍	16
3.3 ANSYS 热分析基本过程	18
3.4 大功率器件的热分析	19
3.4.1 驱动放大器热分析	19
3.4.2 激光器热分析	22
3.5 热管理	24

3.5.1 驱动放大器的热管理	24
3.5.2 激光器的热管理	26
3.5.3 微波光传输收发模块热管理	26
3.6 本章小结	29
4 模块封装设计研究	30
4.1 热控设计	30
4.2 抗辐照设计	30
4.2.1 空间辐射分析	30
4.2.2 抗辐照方法与措施	31
4.3 电磁兼容性设计	32
4.4 抗力学环境设计	32
4.5 <i>SolidWorks</i> 软件简介	33
4.6 器件的封装设计	34
4.6.1 有源器件封装尺寸	34
4.6.2 无源器件封装尺寸	36
4.7 模块壳体封装设计	38
4.7.1 模块封装设计注意事项	38
4.7.2 相关模块壳体设计图	39
4.8 本章小结	40
结 论	41
参 考 文 献	43
致 谢	46
大连理工大学学位论文版权使用授权书	47

1 引言

1.1 研究背景及意义

随着通信技术的迅猛发展,人们对图像、视频等新型多媒体业务的需求不断增加,由此导致了多媒体新业务对通信系统的带宽的要求逐渐提高。众所周知,在一定载波频率下信道带宽是有限的,外加信道噪声等因素的影响,传输容量同样有限,所以要想获得大的传输容量就要提高信道带宽和载波频率,因而高频微波传输成为热点,其具有信道宽、传输数据速率高、抗干扰能力强等优点,是高速带宽通信的一个理想选择。

在微波通信系统中,微波信号在自由空间传播时,由大气中的反射、吸收等原因引起的损耗会随着其频率的增加而逐渐增加。同时,由于建筑物、山坡等地形因素引起电磁波的反射等损耗使得微波信号传输受到限制,使得系统不得不架设更多的基站;此外,微波在同轴电缆中传输的损耗随着频率的增加也不断增大^[1]。当微波频率达到 $2GHz$ 时,其同轴电缆中的传输损耗高达 $1.0 dB/m$;当微波频率达到 $10GHz$ 时,损耗增加到 $2.5 dB/m$,已经几乎不能在同轴电缆中传输了^[2]。所以,单纯的微波通信限制了信号的远距离传输,制约了远距离通信系统的发展。

与此同时,随着半导体激光器、电光调制器和集成光学等关键器件的发展与技术上的突破,光纤传输技术在近年来取得了长足的进步,并以其高带宽、低损耗、重量轻、低成本^[3,4]等众多优点成为了大容量远距离传输系统中的关键传输技术。近年来,光纤通信技术快速发展,光纤链路传输容量和传输带宽不断提升,光纤链路能提供超带宽、超高速和大容量的通信系统,但是我们应注意到其缺乏灵活的接入方式^[5]。而微波通信有灵活的分配和接入方式,但却受到带宽的限制。因此低成本、简单可靠的微波光传输技术成为研究热点。

微波光子学产生于上世纪70年代,是随着光纤传输技术、微波技术和光电子器件的发展而发展起来的,是一个将光子技术和微波技术优势相结合起来的新兴学科^[6],得益于微波光子学的发展,微波光传输越来越受到人们的关注。微波光传输 RoF 是指将微波信号调制到光信号上,经过光纤链路来传递微波信号的一种技术, RoF 技术因为其灵活性,大带宽和高性价比,被认为是未来无线光接入技术的选择^[7,8]。

微波光传输系统有着诸多的优势,但是面对空间的特殊环境,微波光传输收发模块存在着散热问题。我们知道,热传递的方式有三种,即热传导传递方式、热对流传递方式和热辐射传递方式^[9]。在大气环境下,热传导和热对流是主要的散热方式,尤其是热对流传递,通过强迫对流的方式能够很好的导出器件产生的热量,使器件能在其工作温度

范围内正常工作；而在空间环境下，属于真空环境，没有气体存在，就意味着没有对流导热介质，所以，热对流这种传递方式失效。众所周知，光电子器件在工作时往往会产生多余的热量，这些热量如果不能很好的导出，器件的温度就会升高，当温度超过器件工作的正常范围时，器件就会失效，产生热失效效应，从而导致系统失效，系统的稳定性不能得到保障。所以，对空间用微波光传输收发模块进行热分析，并采取有效措施对系统模块进行热管理具有重要意义。

由于卫星空间狭小的特殊性，模块进行热管理的同时要兼顾着模块的小型化封装设计，两者相辅相成，都是微波光传输收发模块在空间环境下成熟使用的关键。

1.2 微波光传输系统概念

1.2.1 微波光传输系统的结构与原理

RoF 系统一般由中心站、基站和光链路组成^[10]。其中，光链路包括上行链路和下行链路，两者的具体含义分别是^[11]：下行链路——中心站产生光载波信号，将微波射频信号调制到光载波上，并将调制好的射频信号经过光纤传输到基站，基站再进行光电转换，将光载波信号恢复获得射频信号，最终发送到终端上。上行链路——基站将把收到的微波射频信号调制在光载波上，并由基站经过光纤传输到中心站进行信号处理。在此过程中，中心站集中对信号处理，基站只需要实现简单的光电和电光转换功能¹²。

典型的微波光传输收发链路由调制端、传输链路、接收端等部分构成。其实现方式是：在调制端将微波射频信号调制到光载波上，然后经过光纤传输，待到达接收端后利用光电探测器对微波射频信号进行恢复，继而通过天线发射出去。

1.2.2 微波光传输系统的优点及应用

RoF 系统结合了光通信技术和微波通信技术的优势，相对于传统通信技术，*RoF* 系统有以下几个特点^[13,14]：

(1) 大带宽。在 *RoF* 系统中，中心站与基站之间通过光纤传输微波信号，属于光纤通信，光纤具有大的带宽资源，现在的光纤通信已经能够传输几十 Gbit/s 的数据率，由于光纤的巨大传输能力，其必将成为未来通信中的主要载体。

(2) 低损耗。微波信号在大气、同轴电缆传播时的损耗很大。采用成熟的光纤技术来传输微波信号，能够实现远距离传输。

(3) 抗干扰。光纤具有良好的防电磁干扰特性，对恶劣的传输环境有较强的适应能力。此外，光纤传输时不会向外部辐射能量，具有良好保密性。

(4) 重量轻。以光纤代替同轴电缆来传输信号, 可以大幅降低系统重量。

由于 *RoF* 系统具有上述诸多优点, 因此在很多领域中都有着广泛的应用。

(1) 蜂窝网络^[15]

RoF 系统使用光纤链路直接将所要发射的射频信号分配到各个基站, 因此不会受到微波频率上的限制, *RoF* 技术可以用在传统的蜂窝移动通信网络中来拓展其容量和范围。目前 *RoF* 被应用于第二、三代通信网络中, 由于 *RoF* 系统中建造基站的成本低, 同时具有轻小、有效灵活的接入方式^[16], 所以可以架设大量远端基站, 通过远端基站扩展办公大楼、地下停车库、机场和商业街等地区网络的容量和覆盖面积范围^[17]。在日本, 数据蜂窝网信息的 *RoF* 网络已经实现, 并进入了实用化阶段。对于第四代移动通信技术, *RoF* 能提供更大的带宽, 同时, 更高的载波频率可以有效地降低基站的建设成本, 并简化复杂程度。

(2) 交通系统^[18,19,20]

随着现在社会经济的高速发展, 交通安全问题也成为国内外重点研究问题之一。*RoF* 智能交通系统是当前研究热点, 利用中心站和基站之间可以进行大量的信息交换的特点, 在道路两旁建立基站, 沿路分布的基站能够形成无缝覆盖的无线信号网络, 可为公路与车辆、车辆与车辆之间的通信提供传递语音、图像和视频等多媒体服务业务, 提高车辆通行, 交通控制, 道路监控和交通服务等功能的质量。

(3) 雷达技术^[21]

用光纤取代传统的同轴线, 不仅可以增加天线与基站之间的距离数十倍, 同时也降低了线路上近一半的重量, 将微波光传输技术应用到雷达技术中, 特别是在相控阵雷达领域, 已经逐渐成为雷达技术不断向前发展进步的新方向, 同时也受到了广大研究人员的重视。在相控阵雷达技术范围内, 相控阵天线是最为关键的技术, 而雷达功能的发挥也在很大程度上受到天线性能的影响。光相控阵天线利用微波光子链路的波束形成方法^[22], 实现了高宽带信号的波束指向无偏斜。

(4) 卫星应用

用光纤直接传输卫星频段信号, 利用光纤传输具有的低损耗优势, 星载望远镜观测到的微弱信号可以通过光纤很好地传输到测试设备上, 利于帮助人们探索宇宙奥秘。

1.3 微波光传输收发模块的关键器件

对于 *RoF* 通信链路而言, 发射模块的作用是将电信号调制到光载波上, 通过光纤传输到接收端。发射模块质量、性能的好坏, 直接决定了接收端光信号质量的好坏, 进而决定了最终解调出电信号质量。发射模块中最核心的器件是光源, 其性能直接影响光载

波的质量,光通信中常用的光源主要有LED和半导体激光器^[23]。其中LED,体积小,成本低,使用方便,但是其依靠载流子的复合的自发辐射发光,光源的相干性差,而且谱线较宽,不适宜用在带宽大、传输距离远的通信链路中。而半导体激光器的发光原理为受激辐射,光的单色性,方向性和相干性都显著强于LED,更适合于长距离传输。在RoF链路中,绝大多数链路都是以半导体激光器作为光源来构建发射模块的^[24]。

1.3.1 激光器

半导体激光器具有结构紧凑,效率高,易于集成等特点,能产生承载微波射频信号的光载波,它的增益介质是半导体材料,是目前在微波光传输系统中应用最为广泛的光源^[25]。波长在1310nm和1550nm波段的光波在普通光纤中分别具有低的色散和损耗,被广泛应用于光通信。该波段的光载频约为200THz,低于300THz,微波信号可以通过直接调制^[26]或外调制承载到光载频上面。

光源是任何一个微波光传输系统的起点,对半导体激光器进行调制才能实现微波信号向光信号的转换。这种调制方式分为直接调制和外调制,其中直接调制具有许多优点,如低价格、简单、容易实现,是光纤通信系统中最常用到的调制方式,但是直接调制的调制效率和带宽受限,而当采用外调制方式时,则需要可以提供高功率和小噪声幅度的连续波光源^[27,28]。

(1) 直接调制半导体激光器

微波光传输系统中利用半导体激光器*P-I*曲线阈值以上的线性部分,可以实现模拟信号的直接调制,以改变驱动电流大小的方式来改变输出光功率的大小,并由此完成在光信号上加载微波信号的过程。然而,这一过程要求激光器必须具有能控制的驱动电路,对其功率和温度进行控制,从而确保激光输出的稳定性。此外,还必须具备能够发挥防止激光器损坏作用的保护电路^[29]。

(2) 外调制半导体激光器

直接调制受到电光延迟和张弛振荡等光源振荡频率的限制,再加上啁啾的影响,因此,在高速光通信中,很少应用到直接调制,通常使用外调制器调制高速光通信。外调制不对光源直接调制,而是调制已输出的激光,所以可以把激光器做得相当稳定,消除光源的啁啾现象^[30]。在外调制方式的微波光传输链路中^[31],需要激光器具有较窄的光谱线宽,而且需要较高的输出光功率,这样可以使链路有比较理想的增益以及噪声性能,因此固体激光器、半导体激光器和光纤激光器都是比较好的选择。而在光通信系统中通常使用1550nm的通信窗口,这与固体激光器的输出波长难以匹配。在实际系统应用中,激光器的直流功耗也是一个不容忽视的因素,由于光纤激光器需要光泵浦,从功耗上看,

相比而言，半导体激光器的功耗较小，特别是在 *RoF* 系统等需要避免高功耗的应用中，半导体激光器将会扮演更为重要的角色。

1.3.2 调制器

在微波光传输链路中，直接调制激光器很难实现较大带宽，主要是因为受到光源相对强度噪声、啁啾效应及非线性效应等因素的影响。若需调制微波高频信号，就需要加入外调制器，外调制器可以很好地克服直接调制中存在的问题，与此同时，还要求外调制器具有较大的带宽，而光电调制器就具有这一特点，因此，通常选择基于电光效应的铌酸锂调制器和基于电吸收效应的电吸收调制器^[32,33]。

电吸收型强度调制器主要是基于器件的电吸收效应，比较铌酸锂晶体的马赫-曾德调制器 (*MZM*) 来说，其优点是体积小，可集成度好，驱动电压低，并且调制速率高，但是其饱和功率比较低，啁啾现象明显，带宽受限，且对温度和波长敏感，有很大的插入损耗，其量值可达每毫米 $15-20\text{dB}$ ，如果将其作为模拟调制器，其性能也不是很理想^[34-36]。

铌酸锂晶体的马赫-曾德调制器 (*MZM*) 是当前使用最为普遍的调制器，其特征为电光效应明显，光吸收少，波导损耗小，同时对波长依赖弱，相对容易制造，重现性好，可以获得大的均匀的衬底材料，制造工艺技术成熟等。此外，将铌酸锂调制器应用到微波光传输系统或模拟光纤链路中还有其他一些优势。例如，铌酸锂调制器能与光纤有效耦合，能实现很小的调制啁啾，甚至可调，可调制的带宽较大等。所以，铌酸锂调制器是电光转换中的重要性器件，在微波光传输系统中得到了广泛的应用。

MZM 调制器是基于 *MZ* 干涉结构设计的，可以将相位信息转变为幅度或强度信息，其结构如图 1.1 所示。

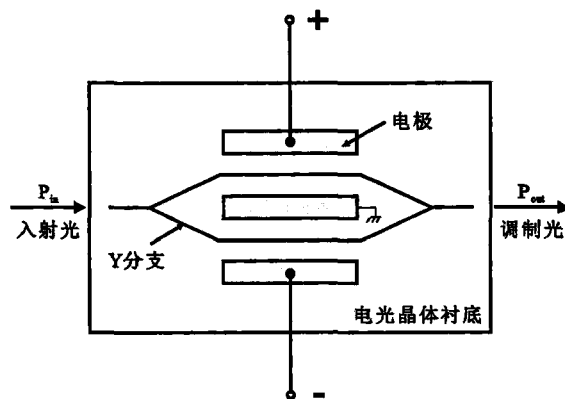


图 1.1 *MZM* 调制器内部结构

Fig. 1.1 The internal structure of the *MZM* modulator

在 *MZM* 调制器中, 将输入光信号等分成两路, 这两路光信号将在分离的两段光波导中传播, 在输出端又合成一路。两个臂必须至少有一个设计为电光波导结构, 当电压被施加到调制器的数值是零时, 两臂的光将在同一时刻达到输出端, 在这种零偏置的状态下, 光在调制器中达到最大输出。当调制器的电极存在电压时, 光在两臂中传输到输出端时存在着相移, 相移的大小与晶体的折射率有关, 而晶体的折射率受施加在晶体上的电场影响, 晶体的变化随电场电压的变化成正比关系, 正是利用这种原理, 任何电信号都可以被转换成光信号, 随着偏置电压的升高, 输出波导的光强度将下降。光调制器的一个特别重要的参数就是半波电压 V , 它被定义为当调制光载波相移达到 180° 时, 所需的电压。在此偏置电压下, 两臂的光会在输出端发生干涉叠加, 叠加后振幅相消, 振幅变零, 将没有光输出。当臂上的电压继续增加时, 两臂的相位差会变减小, 最终变为同相。当调制器工作在线性偏置点时, 在调制器中会产生固有的 3dB 的损耗, 另外, 调制器半波电压目前还较高, 调制效率较低。

1.3.3 光电探测器

光电探测器是光接收机的核心部件, 其作用和调制器的作用相反, 就是将接收到的光信号转成电信号, 产生电信号的大小与入射光功率成正比, 它是微波光传输系统和光纤链路的重要器件。在光通信系统中, 最为常用的光电探测器主要分为: *PIN* 光电二极管和雪崩光电二极管 (*APD*)。通常, 光电探测器输出的信号微弱, 需要配合低噪声前端放大器使用, 将产生的信号进行放大, 要达到一个可以应用的水平^[37]。

光电探测器基本工作原理: 基本机制是光吸收, *PIN* 光电二极管是微波光传输系统中最为常用的光电探测器, 是由半导体材料制成的, 入射光在进入半导体结构后被吸收, 在耗尽区产生电子空穴对, 在反向偏压的作用下, 耗尽区扩散至整个本征层, 而电子和空穴在反向电场的作用下向相反方向运动, 从而形成光电流, 光电流的大小与入射到探测器上的光功率成正比。根据光电效应的基本原理^[38], 一个电子只能吸收一个光子能量, 所以入射光子的能量必须要高于或者等于带隙能量, 只有如此才会产生光电流。光子的能量和其波长成反比关系, 所以, 对于已知的能量带隙, 就会有一个能产生光电流的最大入射波长和最小入射频率, 此波长即截止波长, 若入射光的波长大于截止波长, 则不能产生光电流。半导体材料不同, 截止波长就会不同。

在光电转换的过程中, 光电探测器不单转换出有用的电信号, 还会伴随着噪声信号的产生, 比如热噪声、散粒噪声和暗电流噪声等, 这些噪声会直接影响到探测器的性能和系统的信噪比。

1.4 本文研究内容

本文以空间环境下微波光传输收发模块的热管理和封装设计为研究内容，目的是对微波光传输收发模块的散热进行合理化设计，使其在空间特殊环境下仍能长时间稳定的工作，并对模块进行小型化封装设计，为卫星节省宝贵的空间体积。

论文的研究内容和结构安排如下：

第一章：引言

主要介绍了微波光传输系统的概念、原理、优点及应用，并对微波光传输收发模块中的关键器件进行了阐述。介绍了微波光传输收发模块进行热管理和封装性研究的背景及意义。

第二章：热分析的基本理论

本章首先详细地介绍了热传递的三种基本方式和热分析类型，并对热分析需要的边界条件和相关材料属性进行了详细的阐述，为模拟器件热分析提供了理论基础。

第三章：热分析

本章主要利用有限元分析软件 *ANSYS* 对大功耗器件进行模拟热分析，并在对结果进行分析的基础上，对系统模块进行热管理设计。

第四章：模块的封装设计

从热控、抗辐照、电磁兼容和抗力学环境的角度对模块的封装进行了分析和设计，并用 *SolidWorks* 绘出系统模块中各器件的封装尺寸，并设计出系统模块壳体结构图。

最后，对研究工作进行了总结和展望，对设计中存在的不足进行了分析，提出未来工作中需要解决的问题。

2 热分析基本理论

2.1 热传递基本方式

热传递在自然界中普遍的存在着，是一种自然现象，当物体之间，或物体内部存在差温度差异时，就会有热传递现象发生，而且，热传递过程将一直进行，直到温度平衡稳定为止。存在温度差是热传递发生的唯一条件，它与物体所处的状态，物体间是否接触没有关系。

热传递主要有三种传递方式，即热传导、热对流及热辐射。

2.1.1 热传导

如果物体内部存在着温差，也就是存在着温度梯度，热量就会从物体高温处传递到低温处；如果物体温度不同而又相互接触，热量就会从高温物体传递到低温物体，这种热传递的方式称为热传导。

物体各部分间当不发生相对位移时，依靠物体内部的微观粒子，如原子、分子及自由电子等的热运动而产生的热能，这种传递过程称为热传导。

1) 傅里叶定律

傅立叶定律是热传导基础定律，能用来计算热能的传导量。傅里叶定律指出：在热导热现象中，单位时间里通过给定截面的热量，与它垂直在该界面方向上的截面面积和温度变化率成正比关系，但是热量传递的方向与升温方向相反。

$$q = -k \partial t / \partial n \quad (2.1)$$

$$Q = -kA \partial t / \partial x \quad (2.2)$$

q ， 热流密度， W / m^2 ；

$\partial t / \partial n$ ， 法向温度梯度， $^{\circ}C / m$ ；

K ， 导热系数， $W / (m \cdot ^{\circ}C)$ ；

Q ， 热流量， W ；

A ， 传热面积， m^2 ；

t ， 温度， K ；

x ， 导热面上的坐标， m 。

式(2.1)和(2.2)中的负号的意思为热量流动的方向和温度梯度方向是相反的，即热传递的方向是从高温传至低温。所有物质都适用傅立叶定律，无论它处在什么状态。

导热系数 k 即热导率是一个很重要的热物性参数，导热系数在数值上等于在单位温度梯度下，在单位时间里通过单位导热面积传递的热量，这同样是导热系数的物理含义。导热系数的数值大小反映了物体导热能力的强弱， k 越大，导热性越强。导热系数和物体的结构和状态有密切的关联性，如材料的类型、材料的成分以及温度、密度、压力、湿度等因素，跟物体的几何外形没有关系，导热系数客观反映了物质微观粒子热传递的性质。导热系数通常采用实验的方法进行测量，一般金属的导热系数大，非金属物体的导热系数比较小，液体就更小了，气体的导热系数是最低的。

2) 平壁的稳定热传导

从傅里叶定律可知：热流密度：

$$q = -k dt / dx \quad (2.3)$$

热流量：

$$Q = -kA dt / dx \quad (2.4)$$

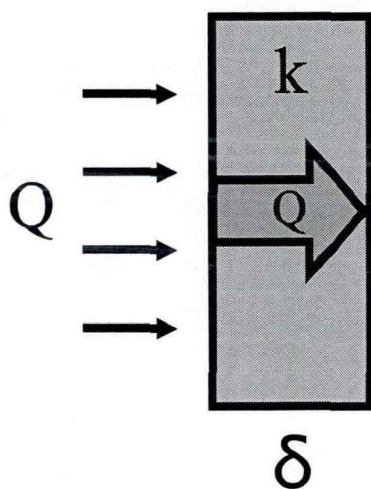


图 2.1 平壁的热传导

Fig. 2.1 Heat conduction process through the single flat wall

图 2.1 所示的为一稳态传热系统，器件模块所产生的热量 Q 是一个定值，而器件与壳体的接触平壁面积 A 也是一个定值，通过壳体接触平壁的热流密度 q 也是一个定值。当式中的 k 为常数时， dt/dx 为常量，这时温度将呈线性梯度分布。

$$Q = \frac{kA\Delta t}{\delta} = \frac{\Delta t}{\delta/kA} = \frac{\Delta t}{R} = \frac{\Delta t}{\text{导热热阻}} \quad (2.5)$$

式(2.5)中， δ ，平壁厚度； $R = \delta/kA$ 为热传递时所需克服的热阻，单位 $^{\circ}\text{C}/W$ 。

对于多层平壁，在稳定导热情况下，器件模块产的热量在传递途中没有积累，通过各层平壁的热量相等，这是串联热传导过程，每个导热层都会对热量的传递有阻碍作用。

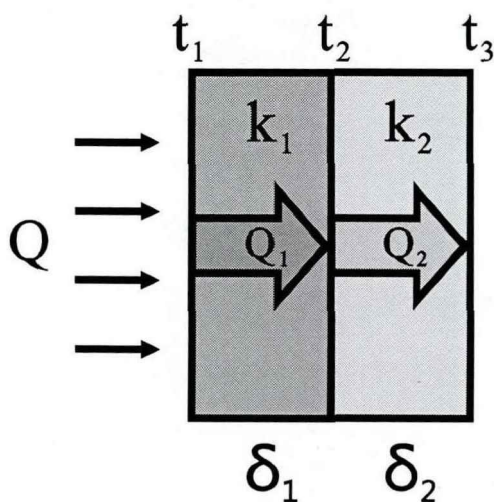


图 2.2 两层平壁的热传导

Fig. 2.2 Heat conduction process through the two flat walls

图 2.2 两个导热层的传热过程，由上面可知，通过这两导热层的热量是相等的，两导热层的热量分别是： $Q = Q_1 = Q_2$ 。

可以假设，两导热层的相接触的面光滑平整，接触面是无空隙紧密接触的，所以就认为接触面两侧不存在温度差异，即界面温度相同。此外，假设两导热层材料的导热系数是常量，不随温度的变化而变化。

则有：导过平壁的热流量：

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\delta_1 / k_1 A_1} = \frac{t_2 - t_3}{\delta_2 / k_2 A_2} \quad (2.6)$$

$$Q = \frac{t_1 - t_3}{\delta_1 / k_1 A_1 + \delta_2 / k_2 A_2} = \frac{t_1 - t_3}{R_1 + R_2} \quad (2.7)$$

式(2.7)说明传热过程中总的热阻为热量通过各个传热层产生的热阻的总和。

此时的热流率为：

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{t_1 - t_3}{\delta_1 / k_1 + \delta_2 / k_2} \quad (2.8)$$

$$\frac{t_1 - t_2}{t_2 - t_3} = \frac{\delta_1 / k_1 A_1}{\delta_2 / k_2 A_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (2.9)$$

式(2.9)说明在多层平壁情况下,各层的温度下降和热阻有正比关系。

在实际中,器件与壳体、导热片之间的接触面不可能完全平滑,做不到无缝接触,接触面必然存在粗糙度,而粗糙势必会增加导热过程中的热阻,即接触热阻。所以,在实际工程中,就需要在接触面上添加导热膏,从而减小接触热阻。

2.1.2 热对流

热对流是指物体表面和与它接触的周围流体之间,在存在温差的情况下,进行的热量交换。热对流是以流体为介质,根据流体的热胀冷缩原理和流动性来传递热能。热对流主要靠液体或是气体的流动,把内能从高温部分传到低温的部分。液体和气体热传递的主要方式是热对流,而气体的对流要比液体对流效果明显。对流可分自然对流和强迫对流两种。自然对流依靠物体间的密度差,而物体的密度差是由于温度不均匀而引起的,温度高的流体膨胀密度变低,质量变轻,相对就会向上运动。相反地,温度较低的流体,密度大,所以就会向下运动,导致这种热传递的根本原因就是流体之间存在温度差,提供了热传递的动力。强迫对流是由于外界的影响对流体搅拌而形成的,如电风扇吹动空气气流,驱动力能驱动流体的运动方向,因此强迫对流更有效率和指向性。

当流体静止时,通过热传导进行传热。流体的流动可以将热传导所产生的热量带走,使流体与热传递对象的温差变小,增大互相接触部分的温度梯度,进而增加散热量。所以,热对流中既有热传导,又有流体流动散热。流体流动的速率越大,热对流的效率就会越高。强制对流换热就是增加了流体的流动速率,所以,强制对流的换热效率要比自然对流换热效率高。

热对流用牛顿冷却定律来描述,牛顿冷却方程:

$$q = h(t_w - t) \quad (2.10)$$

式(2.10)中, h , 对流系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; t_w , 固体表面温度, $^\circ C$; t , 周围流体温度, $^\circ C$ 。

则热流量:

$$Q = hA(t_w - t) = hA\Delta t \quad (2.11)$$

式(2.11)中 Q 为热量,即热对流带走的能量; h 为热对流系数, A 表示热对流的有效接触面积; Δt 表示物体表面和流体间的温度差额。因此,在热对流传递过程中,热对流传递的能量与热对流系数、表面温度差和有效接触面积存在正比关系;热对流的系数越高、表面的温度差值越高、有效面积越大,热对流所传递的能量就越多。

然而，如果空间环境为真空，此时没有空气作为介质进行对流换热，热对流也就无法实现，由此可见，基于空气介质的散热片、风扇等都不能对器件进行有效散热。

2.1.3 热辐射

热辐射是指物体发射的电磁能，同时被其他物体吸收从而转为热能的交换过程。热辐射量与温度有关，物体温度越高，在单位时间里辐射的能量越多。与热传导、热对流这两种传递方式都需要传热介质这一要求有所不同，热辐射传递方式不需要任何介质，热辐射以光的速度在真空中传递热能，从一个物体传给另一个物体。任何温度高于绝对零度的物体，都会辐射出电磁波。实际在真空环境下，热辐射效率很高，但是与热传导相比，导热有限，所以真空环境下，最主要的散热方式是热传导。

在系统中，每一个物体都在同时进行辐射和吸收热量。当一个物体向外界释放的能量与自己吸收的能量不相等时，就会和外界发生能量的交换与传递。辐射能传递到达物体表面时，会有热量的吸收、反射和传递。它们彼此之间的净能量能够用斯蒂芬-波尔兹曼方程计算：

$$q = \varepsilon \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.12)$$

式中， q 为热流率； ε 为辐射率，也可以称为黑度，数值介于 0~1 之间； σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数，其数值约为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ； A_1 为辐射面面积； F_{12} 为从辐射面 1 到达辐射面 2 的形状系数； T_1 、 T_2 分别为辐射面 1 和 2 的绝对温度。

从斯蒂芬-波尔兹曼方程可以看出，热辐射能力和表面绝对温度的四次方成正比关系。辐射在低温时表现的不明显，因此低温时通常忽略热辐射。但是，高温时热辐射则成为主要的传热方式。

2.2 热分析的分类

热分析种类很多，通常有稳态热分析、瞬态热分析、热辐射分析、非线性热分析和相变分析。其中根据温度场随时间的变化可以分为稳态热分析和瞬态热分析两种。

2.2.1 稳态热分析

如果热能的流动是不随着时间的变化而变化的，这种热传递就视为稳态的。因为热能的流动是不随时间变化的，所以系统温度与热载荷也都不会随时间变化。稳态的热平衡是满足热力学的第一定律。

如果系统的净热流率为 0，即系统自身产生的热量加上系统流入的热量等于系统流出的热量，此系统处于热稳态。热稳态的条件可表示为：

$$Q_{in} + Q_{generate} - Q_{out} = 0 \quad (2.13)$$

稳态下热分析的能量平衡方程:

$$(K)\{T\} = \{Q\} \quad (2.14)$$

(K) , 传导矩阵, 含有导热系数、辐射率、对流系数与形状系数;

$\{T\}$, 温度向量;

$\{Q\}$, 热流率向量, 包括热生成。

稳态热传递适用于分析稳定的热载荷对部件或是系统的影响, 通常情况下, 往往在先利用稳态热分析确认初试温度分布之后, 再进行瞬态热分析。除此之外, 如果遇到从瞬态传热到稳态传热逐渐过渡的情况, 通常将稳态热分析放在瞬态热分析的最后一步进行, 以此来确认稳态下的系统所处情况。稳态下热分析能通过有限元分析的方法计算出由热载荷引起的温度参数、热梯度参数、热流率参数和热流密度参数等。

2.2.2 瞬态热分析

瞬态热传递过程就是系统加热或是冷却的过程。在这个过程中, 系统的热流率、温度、热边界条件和系统内能都会有显著的变化。同时, 以能量守恒原理为依据, 瞬态热平衡用公式可以表达为:

$$(C)\{\dot{T}\} + (K)\{T\} = \{Q\} \quad (2.15)$$

(K) , 传导矩阵, 含有导热系数、辐射率、对流系数和形状系数;

(C) , 比热矩阵, 有系统内能的增加;

$\{T\}$, 节点的温度向量;

$\{\dot{T}\}$, 温度对时间的导数;

$\{Q\}$, 节点热流率向量, 含有热生成。

当温度场和其他热参数随着时间而变化时, 则适用于进行热瞬态分析。在工程实际中, 当需要测量温度场时, 通常运用瞬态热分析, 并且以此为热载荷, 进行热应力分析。瞬态或是稳态分析在基本步骤上是相似的, 但不同于稳态热分析, 瞬态热分析的热载荷随时间的变化而变化。

2.3 热分析的边界条件与初始条件

为了使模型上单个节点的热平衡方程都能有唯一解, 就需要附带初始条件和边界条件, 这些条件统称定解条件。

三类型边界条件:

1) 第一类型边界条件

温度函数在物体边界处是已知的, 公式表达为:

$$T|_{\Gamma} = T_0 ; T|_{\Gamma} = f(x, y, z, t) \quad (2.16)$$

Γ , 物体边界; T_0 , 已知温度; $f(x, y, z, t)$, 温度函数。

2) 第二类型边界条件

热流密度在物体边界处是已知的, 公式表达为:

$$-k \frac{\partial t}{\partial n}|_{\Gamma} = q; -k \frac{\partial t}{\partial n}|_{\Gamma} = g(x, y, z, t) \quad (2.17)$$

q , 热流密度; $g(x, y, z, t)$, 热流密度函数。

3) 第三类型边界条件

物体接触的媒介对流系数和温度是已知的, 公式表达为:

$$-k \frac{\partial t}{\partial n}|_{\Gamma} = \alpha(T - T_f)|_{\Gamma} \quad (2.18)$$

α , 对流系数; T_f , 媒介的温度。 α 和 T_f 既可以是常熟, 又可以是随位置和时间变化的函数。

初始条件:

初始条件就是说热传递过程开始时, 物体在整个空间内具有的初始温度为已知的, 公式表示为:

$$T|_{t=0} = \varphi(x, y) \quad (2.19)$$

$\varphi(x, y)$, 已知的温度函数。

2.4 材料基本属性

对材料进行热分析就需要了解材料的相关属性, 主要包括 6 种: 热传导系数、比热容、对流换热系数、焓、辐射系数、生热率。

1) 热传导系数: 又称热传导率、导热系数, 反应物质的热传导能力。稳定传热条件下, 按傅立叶定律, 其含义是指在单位温度梯度下, 在单位时间内通过单位导热面积传导的热量, 单位为 $W/(m^3 \cdot ^\circ C)$, 是物质的物性常数。

2) 比热容: 单位质量的物质每升高 (或者降低) $1^\circ C$ 所吸收 (或者放出) 的热量, 简称比热, 其单位 $J/(Kg \cdot ^\circ C)$ 。

3) 对流换热系数: 指流体与固体在接触表面的换热能力, 当物体表面温度和其附近空气相差 1°C 时, 在单位面积上, 经过单位时间, 通过对流的方式和其附近空气交换的热量, 单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。对流换热系数的大小和换热接触表面的位置、几何形状、温度差、换热过程中流体的物理性质、以及流体的流速等都有密切关系。在真空环境里, 无对流介质, 因而, 无法实现热对流。

4) 焓: 焓是一个热力学系统中的能量参数, 定义式为:

$$H = U + PV \quad (2.20)$$

式(2.20)中, H , 焓; U , 内能; P , 压力; V , 体积。在常压下, 焓的变化等于热量的变化。

5) 辐射系数: 又称辐射率, 是衡量物体表面通过辐射的方式释放能量强弱的能力。在一定温度下, 物体辐射率等于物体辐射能量和同温下的黑体辐射能量的比, 黑体辐射率等于1, 除了黑体意外, 其他物体的辐射率都介于0和1之间。

6) 生热率: 用于模拟化学反应生热或者电流生热, 单位为 W/m^3 。

2.5 本章小结

本章主要介绍了热传递三种基本方式, 分别为热传导、热对流和热辐射, 还介绍了热分析类型, 主要为稳态热分析和瞬态热分析, 同时介绍了热分析需要的边界条件、初始条件和器件材料属性, 为下一章对器件具体热分析建模打下理论基础。

3 ANSYS 热分析

3.1 有限元法的基本思想

有限元分析就是利用数学近似方法对真实的物理系统进行模拟,通过用较简单的问题来替代复杂问题后再去求解。在物理数学模型确定之后,即基本变量和基本方程,外加求解域和边界条件都确定之后,有限元分析方法的基本思想可简单概括为以下3点。

1) 将一个结构或是连续体的求解域离散成多个子域,通过它们边界处的结点相互联结成为一个组合体。

2) 用每个子域内假设的近似函数分段地表示全求解域中待求解的未知场变量。

3) 采用变分原理和加权余量法建立原数学模型,建立求解基本未知量的常微分方程组。

有限元法适用于复杂几何构形,因为单元在空间上能是多维的,并且每种单元都有不同的形状,各种单元还能采用不同的连接方式。所以,实际中遇到的非常复杂的结构也可以离散成多个单元组合体。

有限元法适用于各种物理问题,单元近似函数可以分段对求解域的未知函数进行表示,同时未限制函数的形式,也未限制每个单元对应的方程需要有相同的形式,所以它适用于各种物理问题。

有限元法建立基于严格的理论,具有很强的可靠性,这是因为变分原理和加权余量法在数学上证明是正确的,所以数学模型只要是准确的,有限元算法的求解就是稳定可靠的。

有限元法有利于计算机实现高效性,分析的每个步骤可以表示成矩阵形式,特别适合计算机的编程和执行。

3.2 ANSYS 软件介绍

ANSYS 软件是结合了结构、热、流体、电磁、声学于一身的大型有限元分析软件,可广泛用于核工业、石油化工、航空航天、能源动力、机械制造、国防军工等一般工业产业级科学研究。此软件可以在大多数计算机及操作系统中使用,ANSYS 兼容计算机上所有系列的平台。

ANSYS 可进行结构分析、热力学分析、电磁分析、流体分析和耦合场分析,并具有多物理耦合场功能,可以在同一个模型上进行多样式的耦合,如热-结构耦合、磁-结构耦合和电-磁-流体-热耦合。

ANSYS 包含 3 个处理器，前处理器、求解器和后处理器。前处理器具有强大的实体建模和网格划分功能，可以便捷地构造有限元模型；求解器功能强大，可以对各种分析进行模拟，如热力学分析和结构分析，能模拟多种介质相互作用，具有灵敏度分析和优化分析能力；后处理器可将分析结果以彩色云图显示、梯度显示和矢量图显示，也可以将分析结果以图表、列表、曲线形式显示和输出。

ANSYS 的热分析模块通常包括 ANSYS / *Multiphysics*、ANSYS / *Mechanical*、ANSYS / *Thermal*、ANSYS / *FLOTRAN*、ANSYS / *ED* 5 种，其中 ANSYS / *FLOTRAN* 不含相变热分析。

ANSYS 热分析提供了 40 余种单元，专门用于热分析的单元有 16 种。如表 3.1 所示。

表 3.1 热分析单元

Tab. 3.1 The structure unit of thermal analysis

单元类型	单元符号	单元属性
点	<i>MASS71</i>	1节点单元
线	<i>LINK32</i>	二维2节点热传导单元
	<i>LINK33</i>	三维2节点热传导单元
	<i>LINK34</i>	2节点热对流单元
	<i>LINK31</i>	2节点热辐射单元
面	<i>SURF151</i>	二维2,3,4节点单元
	<i>SURF152</i>	三维4,5,8,9节点单元
二维实体	<i>PLANE35</i>	6节点三角形单元
	<i>PLANE55</i>	4节点四边形单元
	<i>PLANE75</i>	4节点轴对称单元
	<i>PLANE77</i>	8节点四边形单元
	<i>PLANE38</i>	8节点轴对称单元
三维实体	<i>SOLID70</i>	8节点六面体单元
	<i>SOLID87</i>	10节点四面体单元
	<i>SOLID90</i>	20节点六面体单元
壳	<i>SHELL57</i>	4节点壳单元

本文主要用三维实体单元 *SOLID90* 进行热分析。*SOLID90* 具有 20 个节点，是三维热实体单元的高阶形式，每个节点只有一个温度自由度，20 个节点单元具有协调的温度形函数，尤其适用于描述弯曲的边界，能用于分析三维的稳态或瞬态热传导问题。

ANSYS 提供了 6 种载荷，无论是在实体模型，还是单元模型，都可以施加以下 6 种载荷，分别为温度、热流率、对流、热流密度、生热率、热辐射率。

1) 温度：作为自由度约束，能施加于温度已知的边界上，均匀温度能施加到所有节点上，当温度不作为一种温度约束时，一般只用于确定初始温度，在瞬态或者稳态的第一个子步骤施加在所有节点上。

2) 热流率：是集中的节点载荷。正值的热流率表示能量的流入模型。跟温度载荷一样，热流率也能施加在关键点上。如果热流和对流不能施加，则通常运用这种载荷。

3) 对流：是一种面载荷，可以施加在模型的外表面上，来模拟平面与周围流体之间的热量交换。真空环境下，对流载荷施加无效。

4) 热流密度：是一种面载荷，是在通过面的热流率已知的情况下使用。若输入正值，则代表有热流要流入单元。热流密度虽说是一种面载荷，但它对实体单元同样适用，无论是热流密度，还是对流，都可以在同一外表面施加载荷，但 *ANSYS* 只读取最后施加的面载进行计算。

5) 生热率：作为体载荷施加，代表体内生成的热，单位是单位体积的热流率。

6) 热辐射率：是一种面载荷，经常施加在实体物体的外表面上，能施加在有限元模型单元或单元节点上，也能施加在实体模型的面或线段上。

3.3 *ANSYS* 热分析基本过程

ANSYS 热分析大体可分为 3 个步骤。

(1) 通用前处理：首先进行建模，选择单元类型，定义材料属性参数，若进行稳态热分析，则只需要定义材料的导热系数，最后创建几何图形，并进行网格的划分。若进行瞬态热分析，则必须定义材料的导热系数、比热和密度。

(2) 求解过程：首先选择热分析类型，是进行稳态分析还是瞬态分析，之后对所建模型施加载荷，载荷一共有 6 种，本文热分析只用到一种，即生热率。

(3) 通用后处理：查看分析结果，分析结果可以用彩色云图，矢量图，列表等形式表示。

3.4 大功耗器件的热分析

随着器件密度,工作速度的增加,器件的不断小型化,器件的能耗也越来越大,导致器件温度越来越高,并且这种增长趋势一直在持续中。温度的增长对器件性能的影响是巨大的,器件温度的升高会影响器件的正常工作,降低系统的可靠性。研究数据显示,有55%的器件都是因为温度超过规定值而失效的。

在正常环境下,器件的散热方式有很多种,热传导和热对流是主要的散热方式,如:导热片、散热片、风扇、水冷等手段。然而,在空间环境下,处于真空状态,地面上经常使用的对流散热不再生效,所以,对空间环境下的器件进行热分析和热管理尤为重要。

3.4.1 驱动放大器热分析

在微波光传输收发模块系统中,常常用到微波放大器,而在此系统中,就属驱动放大器的功耗很大,一般在5W左右,驱动放大器的正常工作温度范围是0℃~70℃。放大器的工作温度影响着其工作的状态,间接就影响到系统的状态。

放大器的封装已经做好了放大器内部芯片与封装外壳的导热,为分析简单起见,我们将放大器作为一个整体考虑,将放大器简化为一长方体,则放大器的结构尺寸为:长度0.06m、宽度0.05m、高度0.01m。放大器的材料为铝金属,其导热系数为 $230W/(m\cdot^{\circ}C)$,密度为 $2.7\times 10^3kg/m^3$,比热为 $900J/(kg\cdot^{\circ}C)$,这是进行瞬态热分析必不可少的三个基本属性。

(1) 建立模型

为了提高分析效率,特做以下假设:

- 1) 忽略驱动放大器内部结构的热阻,将整个放大器器件视为热源,且温度分布均匀;
- 2) 忽略驱动放大器接口结构,将其视为正六面体结构,便于建模;
- 3) 忽略由于接触面粗糙、不光滑而引起的接触热阻;
- 4) 忽略驱动放大器与壳体壁、壳体壁与温控板之间导热硅胶热阻;
- 5) 视驱动放大器与壳体壁、壳体壁与卫星舱温控板之间完全接触,无接触热阻;
- 6) 忽略器件的辐射散热。

模型选用具有对称性的六面体实体单元,类型为Brick 20 node 90,即SOLID90,单位采用默认国际制单位。

采用自底向上的建模方式,截取部门壳体底板,截取尺寸:长度0.150m、宽0.150m、壳体板厚度0.005m。放大器的结构尺寸:长度0.06m、宽度0.05m、高度0.01m。放大器与壳体底板完全接触。

(2) 参数设定

模型建立后, 需要对其进行参数设定, 在不接触卫星舱内温控板的情况下, 只能对放大器进行瞬态热分析, 需要设定热传导系数、密度和比热三个基本属性。属性如表 3.2 所示。

表 3.2 器件材料的基本属性

Tab. 3.2 The basic material properties of the device

	放大器-铝	壳体-铝合金
热传导系数 Conductivity (KXX)	$230W/(m \cdot ^\circ C)$	$138W/(m \cdot ^\circ C)$
密度 Density (DENS)	$2.7 \times 10^3 kg/m^3$	$2.68 \times 10^3 kg/m^3$
比热 Specific heat (C)	$900J/(kg \cdot ^\circ C)$	$880J/(kg \cdot ^\circ C)$

(3) 网格划分

定义完单元类型、模型尺寸、材料定义之后, 对已建立的模型进行网格划分, 网格采用手动划分, 对放大器重点分析的器件划分密度较大, 对壳体底板划分相对较小, 这是为了提高对器件进行热分析的效率。但值得注意的是, 在进行网格划分之前, 要将各个实体单元进行布尔操作, 布尔操作的合并一共有 3 种方式, *add*、*overlap* 和 *Glue*, 本文使用的是 *Glue* 操作, 把重叠处变成公共边界, 这样在之后的施加载荷阶段, 模块中各个不同部分的热量和能量才可以进行传递。图 3.1 为放大器模型的网格划分。

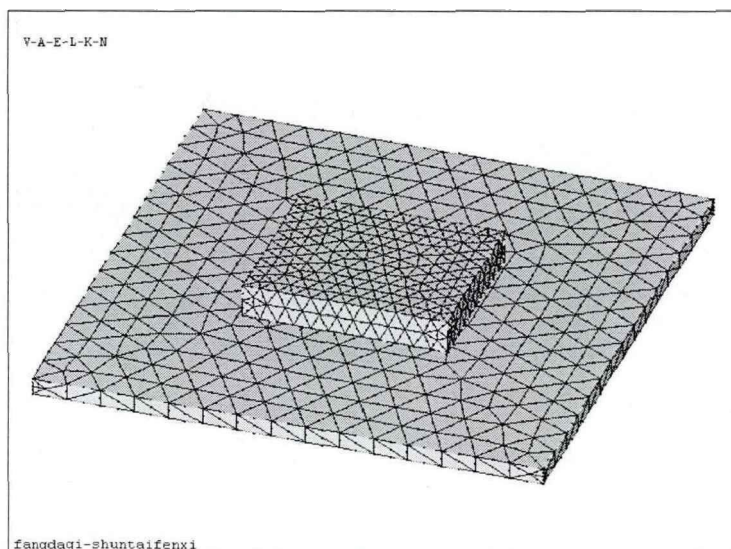


图 3.1 放大器网格划分

Fig. 3.1 The meshing of amplifier

(3) 对模型施加载荷

ANSYS 热分析模拟中一些参数:

1) 初始温度: 设定初始温度为 20℃;

2) 放大器的生热率: 已知放大器的功耗为 5W, 则生热率为

$$Q = 5W / (0.06m \times 0.05m \times 0.01m) = 1.67 \times 10^4 W / m^3$$

对放大器和壳体底板施加初始温度载荷, 再对放大器施加生热率载荷 *Heat Generat*。

(4) 通用后处理

对放大器进行瞬态热分析, 设定时常为 1 小时, 即 3600 秒。为了直观, 在 ANSYS 中进行后处理得到彩色云图, 如图 3.2 的温度分布图。

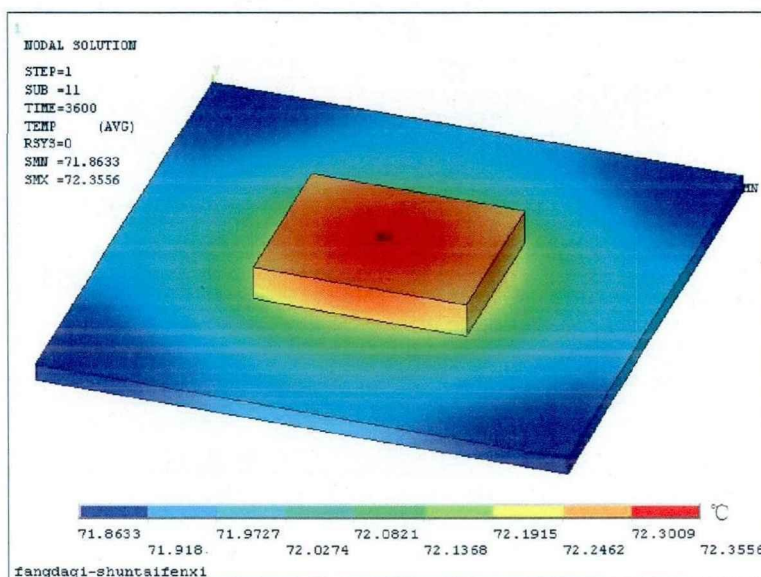


图 3.2 放大器运行第 3600s 的温度分布图

Fig. 3.2 Temperature distribution diagram of the amplifier of 3600s

在生成彩色云图的同时，在放大器上选一节点，生成节点温度与时间的关系图，如图 3.3 所示。

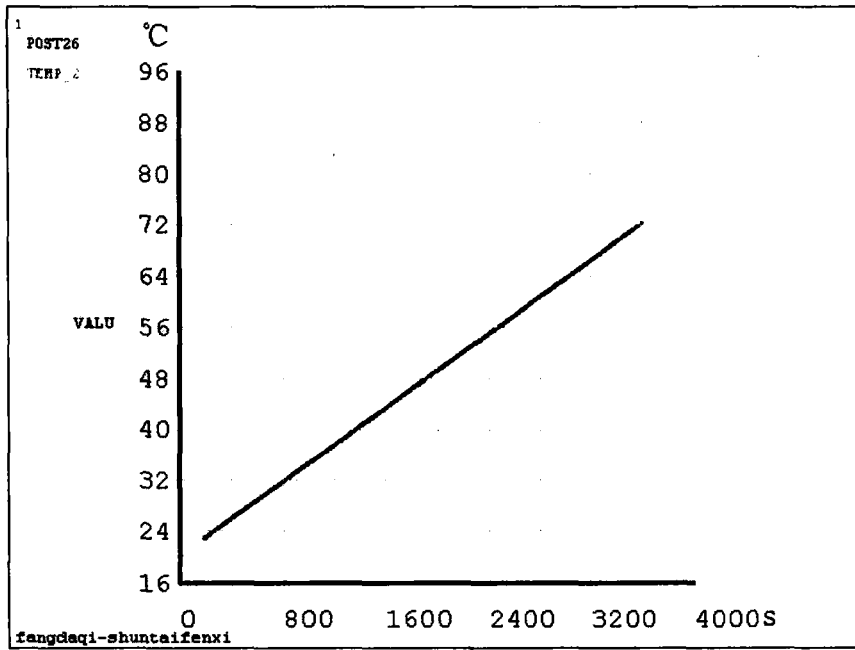


图 3.3 放大器上一节点温度随时间变化曲线

Fig. 3.3 The temperature of an amplifier node versus time

由图 3.2 和图 3.3 可知，在空间环境中，缺少热对流散热，并且在无温控板进行热传导的情况下，驱动放大器的升温速率很快，工作 1 小时就超过了放大器的正常工作温度范围，所以必须采取有效的措施对发热器件进行散热处理。

3.4.2 激光器热分析

本文分析的是分布反馈式半导体激光器，半导体激光器的波长容易受温度影响而发生漂移。

同样为了使热分析简化，像分析放大器一样，将激光器简化为一长方体，则激光器的结构尺寸为：长度 $0.030m$ 、宽度 $0.014m$ 、高度 $0.010m$ 。激光器的正常工作温度范围是 $-20^{\circ}C \sim 50^{\circ}C$ 。激光器的最大功耗为 $15W$ ，换算成生热率为 $3.57 \times 10^6 W / m^3$ 。

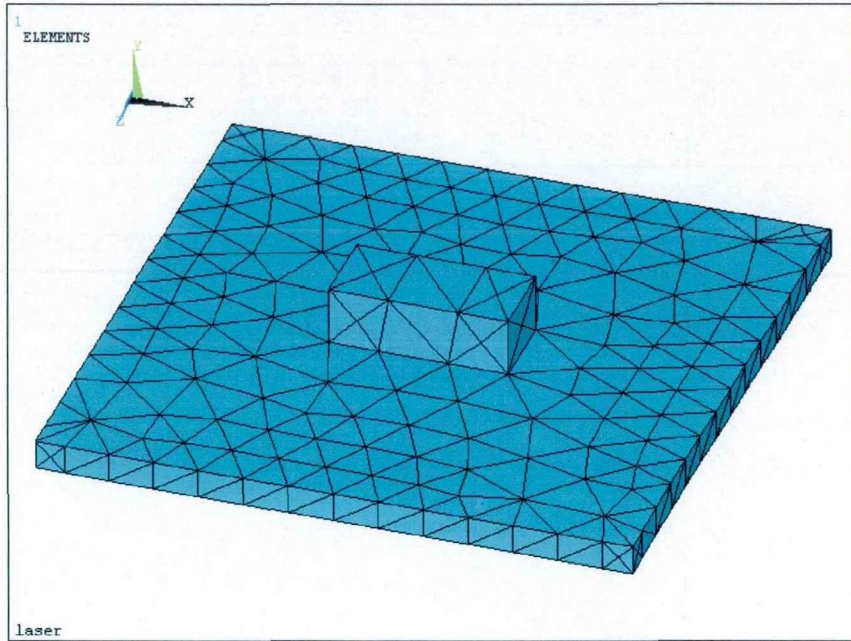


图 3.4 激光器网格划分
Fig. 3.4 The meshing of laser

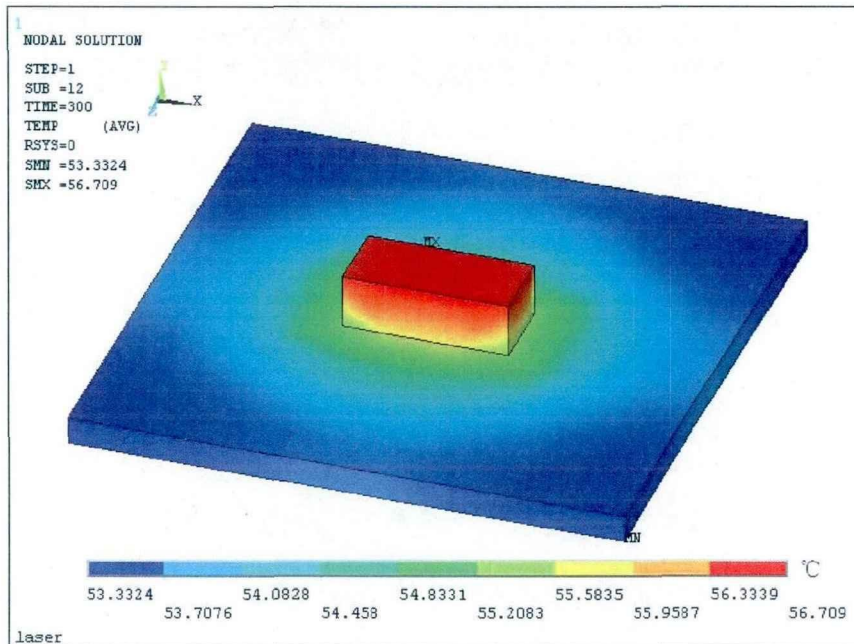


图 3.5 激光器工作第 300s 时的温度分布图
Fig. 3.5 Temperature distribution diagram of the laser of 300s

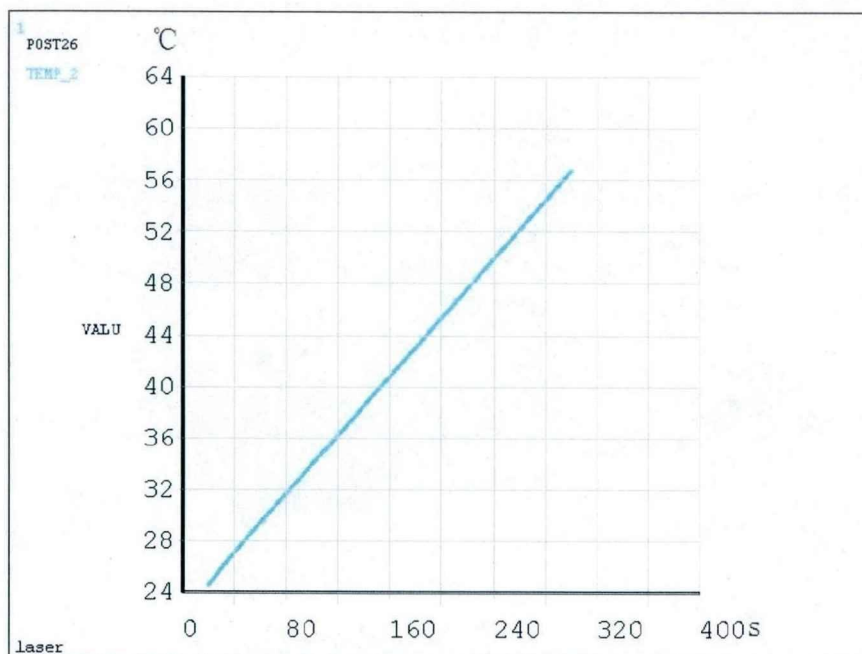


图 3.6 激光器上一节点的温度随时间变化曲线

Fig. 3.6 The temperature of an laser node versus time

由图 3.5 和图 3.6 可知, 在空间环境中, 同样对于激光器, 在无温控板进行热传导的情况下, 激光器线性升温, 工作 5 分钟就超过了其正常工作温度范围, 所以必须采取有效的措施对发热器件进行散热处理。

3.5 热管理

通过上节对微波光传输收发模块中大功耗器件放大器和激光器的瞬态热分析, 得出在空间环境下, 在没有利用温控板的情况下, 器件的温度会不断升高, 器件的温度随时间快速升高, 并且在短时间内, 器件自身会温度超出其正常的工作范围, 这样给系统的可靠性带来了严重的威胁。

在空间环境下, 即真空条件, 器件失去了热对流的散热方式, 从而, 热传导散热方式成为了器件散热的主要依靠方式。在卫星舱中, 有温度约在 $10^{\circ}\text{C}\sim 15^{\circ}\text{C}$ 的温控板, 所以, 合理的利用卫星舱内的温控板是降低器件温度, 保证器件正常工作, 进而保证系统可靠性的关键。

3.5.1 驱动放大器的热管理

设定卫星舱内的温控板温度为 15°C ，器件初始温度 20°C 。如图 3.7 所示，底板为卫星舱内温控板，中间板为模块壳体板，最上层的就是放大器器件。在有温控板接触热传导的条件下，对放大器进行热分析，分析结果如图示。

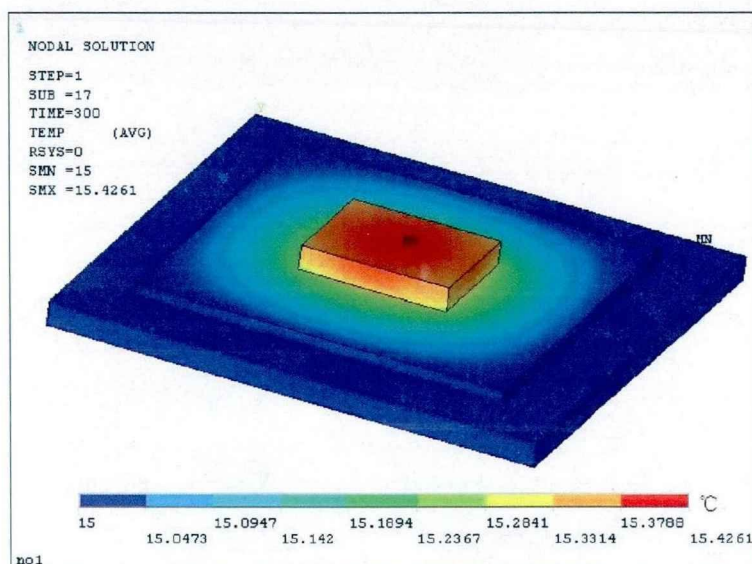


图 3.7 放大器的稳态热分析

Fig. 3.7 Analysis of steady-state thermal on the amplifier

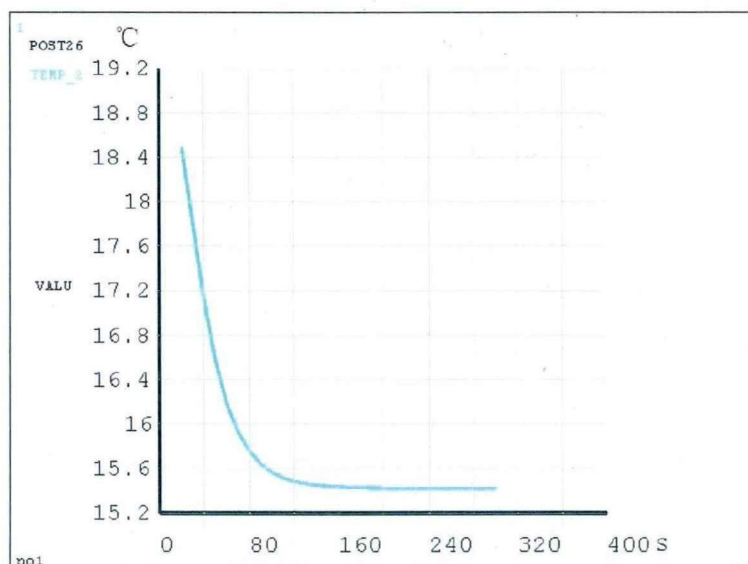


图 3.8 放大器的温度随时间变化曲线

Fig. 3.8 The temperature of an amplifier versus time

由图 3.7 和图 3.8 可知,温控板的温度是 15℃,驱动放大器工作的局部最高温度约为 15.38℃,所以可得,驱动放大器通过与温控板的热传导效果良好,能及时有效的传递出放大器所产生的热量,最终使放大器的工作温度与温控板的温度相差不超过1℃。

3.5.2 激光器的热管理

同样设定卫星舱内的温控板温度为15℃,器件初始温度20℃。对与温控板相接触的激光器进行稳态热分析,得热分析彩色云图如图 3.9。

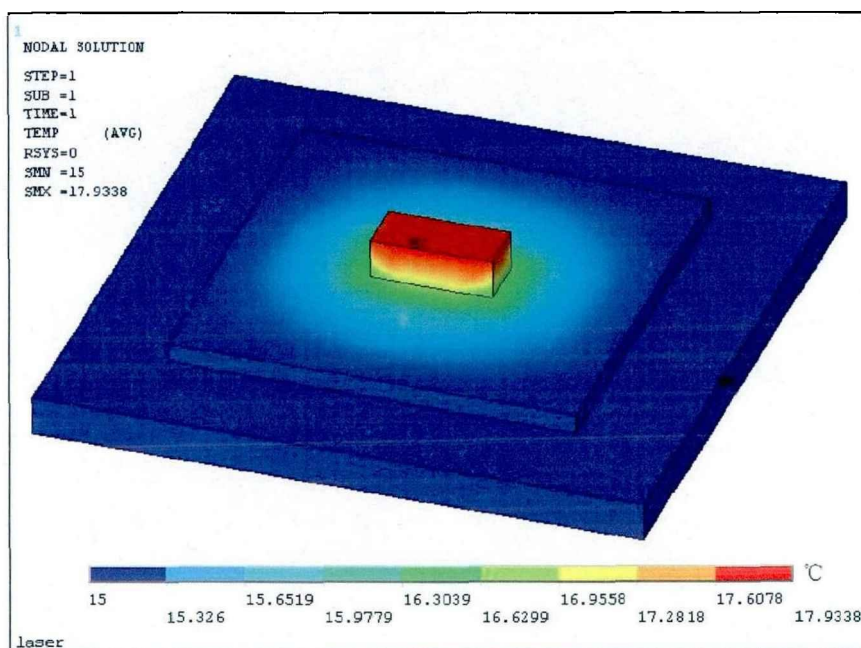


图 3.9 激光器的稳态热分析

Fig. 3.9 Analysis of steady-state thermal on the laser

由图 3.9 可知,激光器通过与温控板的热传导效果良好,同样能及时有效的传递出放大器所产生的热量,最终使放大器与温控板的温差在3℃以内。

3.5.3 微波光传输收发模块热管理

卫星舱的空间是有限的,在卫星中使用的系统模块都应该秉着小型化的设计原则,更多的利用纵向空间,所以在设计微波光传输收发模块时,需要对器件进行分层设计,这就意味着,不能把所有的器件放在壳体底板上,也就是说存在着部分器件不能直接与卫星舱内的温控板相接触。

在微波光传输收发模块中，有光纤走线、电信号走线和电源走线，所以分层设计可以依据走线类型来分，这样有利于布线，尤其是光纤的布线，以防止光纤跨层布线而折损。因此，可以把微波光传输收发模块系统分为两层，光纤走线层与电线走线层。在微波光传输收发模块中，驱动放大器的尺寸较大，功耗较高，所以应把驱动放大器放在底板层，就是说底板层是电线布线层，二层是光纤布线层，这样就导致光源激光器需要放置在第二层，所以需要利用 *ANSYS* 软件对系统模块进行分层热分析，以确保器件都能工作在其正常的温度范围内。

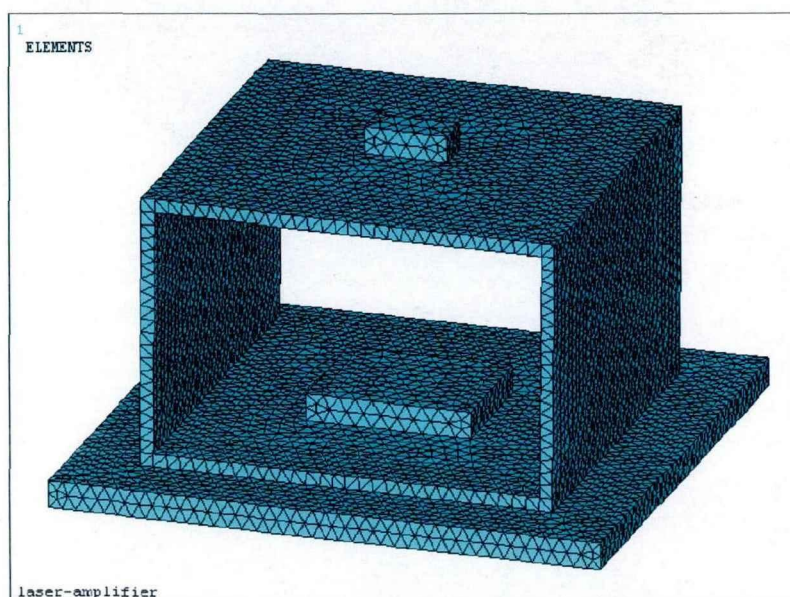


图 3.10 放大器-激光器耦合结构网格划分图

Fig. 3.10 The meshing of coupling structure between amplifier and laser

图 3.10 为简化微波光传输收发模块结构图，图中省去了微波光传输系统中的其他器件，只留下功耗较大的驱动放大器和激光器，驱动放大器位于模块壳体底板层，激光器位于第二层上。图中底层为卫星舱内温控板，依旧设定温控板的温度是 15°C 。

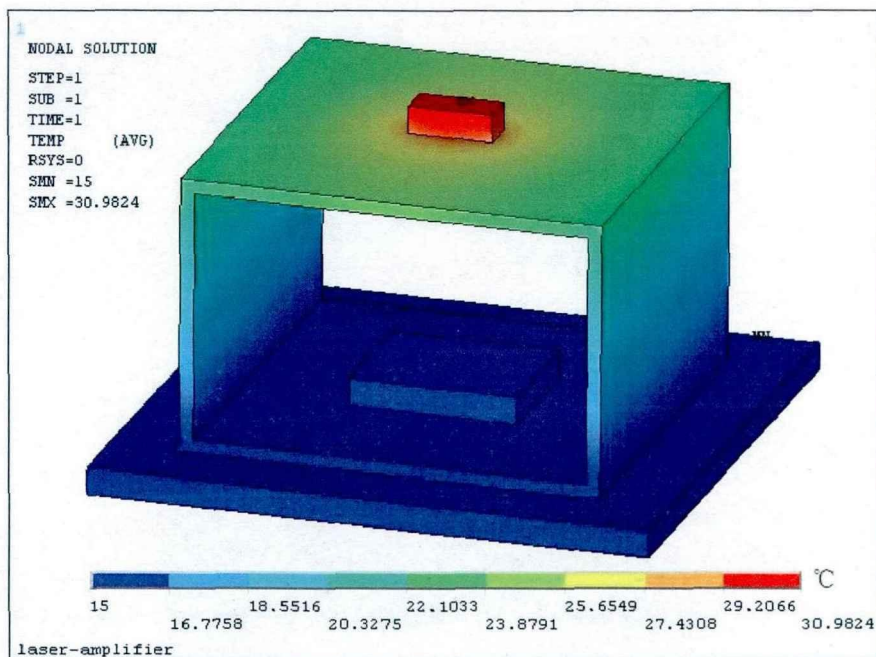


图 3.11 放大器-激光器耦合结构稳态热分析

Fig. 3.11 Analysis of steady-state thermal on the coupling structure

由图 3.11 可知，位于底板层的驱动放大器温度与温控板的温度非常接近，工作必定在其正常温度范围内；而激光器通过模块壳体侧壁间接与温控板相接触，热传导效果有所下降，激光器与温控板的温差从低于 3°C 变为 14°C 左右。

为了更好的降低激光器的器件温度、缩小二层板与温控板的温差，采用对模块壳体侧壁加导热板，导热板选用铜材料，这是因为铜的热传导系数很高，为 $383\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

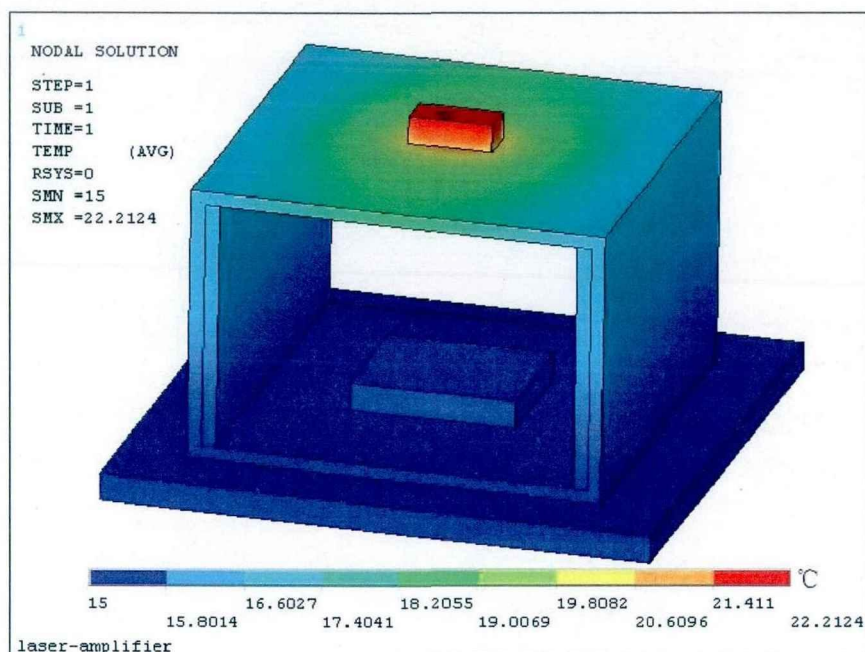


图 3.12 放大器-激光器-铜导热板耦合结构稳态热分析

Fig. 3.12 Analysis of steady-state thermal on the coupling structure

由图 3.12 很容易看出,模块壳体两侧加入铜导热板后,激光器的工作温度约为 21°C,与未加导热板的情况相比,激光器的工作温度缩小近 8°C。所以,加导热板取得了良好的效果。

3.6 本章小结

本章主要对系统模块中的较大功耗器件,放大器和激光器进行了建模热分析,通过分析可知,无温控板对器件进行热传导的情况下,器件升温很快,无法维持器件正常工作;在有温控板对器件进行热传导的情况下,器件都能保持在良好的工作温度点。

在模块为了小型化,而分层设计时,本章同样对工作在二层板上的较大功耗器件进行了热分析,分析结果显示器件仍能工作在正常温度范围内,为了更好的进行热传导,借助导热板进行导热处理,大大降低了二层板的温度,达到了预期效果。

4 模块封装设计研究

4.1 热控设计

系统模块的散热首先需要合理性的布局,尤其是在空间环境下,借助于卫星舱体的温控板,让系统模块内尽可能多的生热率大的器件封装在温控板一侧上,由于温控板能很好的保持在较低温度,这样利用较大的温度差,可以很好的进行热传导。

在真空条件下,只能利用固体与固体直接接触的热传导。由于不能保证两个物体绝对的接触,接触面不能保证完全密合,会存在一定的空隙,这就需要借助填充界面材料来达到直接接触热传导的目的。

常规的填充界面材料是导热硅胶。导热硅胶的热传导系数不高,一般在 $0.1\sim 1.5W/(m\cdot k)$,远比不上金属的热传导系数,所以,在填充导热硅胶时,不宜填充剂量过多,只需要填充好物体与物体接触时的空隙,一般厚度为 $0.1\sim 0.5mm$,这样就提高了真空下热传导的效率。

在微波光传输链路的收发模块中,属激光器与驱动放大器的功耗较大,最理想的方案是直接贴附在散热板上,并与卫星舱安装面直接接触进行热传导散热。从上一章节对激光器和驱动放大器的 ANSYS 热分析图可知,直接与卫星舱内温控板相接处的器件,温控效果很好,能很好的工作的正常温度范围内。但由于受卫星空间狭小性、模块小型化的限制,需要对模块分层处理,考虑到光纤走线层和电线走线层的问题。所以,把激光器安装在了第二层板上,并对此模块布局下的器件进行了热分析。分析结果显示,激光器较直接接触温控板而言,温度有所升高,但仍处于正常工作温度范围内。为了使激光器工作在较理想的温度条件下,借助热传导系数较高的铜导热板,将其固定在模块壳体两侧,促进对上层板热传导散热。ANSYS 模拟热分析的结果图显示,借助铜导热板的效果明显,激光器的温度明显下降。

对于其它发热量较低的器件,可单独借助导热管来进行热传导,通过导热管把系统模块与温控板相连,构成热传导的条件,提高系统的热传导效率。

4.2 抗辐照设计

4.2.1 空间辐射分析

在空间环境下,由于缺少大气层的屏蔽,器件直接受到宇宙射线的辐照,为确保系统的可靠性,必须对器件进行抗辐照设计。空间辐射效应有很多种,主要起到影响作用

的是：总剂量辐射效应、单粒子辐射效应、高能量电子的内带电效应、表面的充放电效应等。

影响载荷寿命的一个主要因素是辐射总剂量，不同轨道高度下的辐射剂量率如表 4.1 所示：

表 4.1 不同轨道高度下的辐射剂量率
Tab. 4.1 Radiation dose rate under different orbital height

轨道高度 (单位: <i>km</i>)	辐射剂量率 (<i>rad/min</i>)
低于 500	0.01~0.1
500~700、8000~10000	0.035~0.3
7000~8000	0.03~0.5
高于 60000	0.5 以上

4.2.2 抗辐照方法与措施

(1) 器件抗辐照设计。

器件抗辐照设计首先要从自身着手，选择耐高总辐射剂量的材料或是元器件，只要材料或是器件的耐辐射总剂量比其工作的位置的辐射剂量大就可以。元器件和材料对辐射的敏感程度不是一个定值，存在很大的不确定性，有离散属性，所以在对产品进行抗辐射设计时要按照大辐射设计余量。在此情况下，仍然不能够达标的器件，需要对其采取特殊防护措施，对其局部屏蔽防护，通常是针对对辐射剂量较为敏感的器件，在需要防护的器件上附加可防护材料，如钽片或者铅片，这都是可用于抗辐照加固的材料，这些材料密度都比较大，钽片的密度为 $16.6g/cm^3$ ，一般使用 0.5mm 的钽片对重要关键器件进行屏蔽。

(2) 封装布局与壳体防护

优化系统封装中的模块布局，避开辐射剂量主要来源方向的器件放置，壳体采用抗辐照屏蔽材料。如铝合金，其不仅抗辐照性能好，密度也小，有效降低系统重量。屏蔽材料厚度的设计原则是，在不超过卫星总体分配给系统模块质量的前提下，尽可能的增加壳体厚度，一般在 2~3mm。采用共烧 Al 屏蔽封装技术为封装的整个周边提供有效的屏蔽。

(3) 抗辐照涂层

除了采用抗辐照材料加固外，也可以在壳体内壁涂层，一般是由聚合物或是粘结剂与颜料结合的涂层所组成，给铝合金壳体内涂层会使系统的抗辐照性能加强；对系统内各器件模块采用抗辐照涂层，同样会加强每个器件对抗辐照的能力，确保器件正常工作。

4.3 电磁兼容性设计

电磁兼容性(EMC)是指在电磁环境中,系统或者设备正常地运行工作,不会对环境中的其他设备产生无法承受的电磁干扰的能力。而电磁干扰就是指会导致设备性能降低的电磁现象,这种干扰会引发设备或传输通道性能的下降。电磁干扰有三要素,分别是电磁干扰源、耦合途径或耦合通道、敏感设备。针对这三个方面进行合理设计,来改善系统的电磁兼容性。

主要减少辐射干扰的措施:

(1) 辐射屏蔽:就是采取有效的措施对电磁干扰进行屏蔽,通常会使用金属板、网、盖、罩、盒等结构进行屏蔽,去阻止或者减小电磁能的干扰。电磁场经过金属材料隔离时,其场强会明显降低,这就是金属材料的屏蔽作用。通常是在干扰源和被干扰对象间放入金属屏蔽物,用来阻挡电磁干扰的传播。本系统中模块采用铝合金封装,铝合金屏蔽板具有可靠的电磁屏蔽性,在封闭外壳与连接器之间的微小间隙,采用导电胶条密封,从而隔绝了模块内部器件向外泄漏电磁波,同时也避免了外界电磁波对模块的干扰,起到屏蔽电磁辐射的作用。

(2) 距离隔离:就是要拉开干扰源和被干扰源之间的距离,这是因为场强与距离的平方或是立方成比例,所以在近场区,电磁干扰很大,所以当拉开距离后,场会衰减的很快。

本模块系统中,通过合理摆放器件位置,科学地布线,保证器件间的距离,增强电磁兼容性。

(3) 吸收涂层法:对电磁辐射强或抗干扰较弱的器件单元涂复吸收电磁波的材料,以减小干扰。

4.4 抗力学环境设计

载荷系统在发射和工作中会承受瞬时高能及耐久振动的强冲击,恶劣的环境很可能会破坏器件或者设备的结构,特别对于精密器件。为确保系统正常工作,必须采取一定的工艺措施对产品进行力学防护加固。在加固过程中主要是对载荷系统功能模块中 PCB 电子线路、射频电缆、器件和外壳的加固。

(1) 模块整体加固

选择比刚度较高的材料,提高零件自身的刚度;尽量减小模块壳体的整体尺寸,一方面,可以减轻壳体重量,另一方面,可以提高壳体的结构刚度。如合理的减小各器件间距,压缩无效空间。

壳体壁可以采用加筋板结构,这样能在整体重量不变的情况下,很大程度增加了抗弯刚度。

凸耳设计原则:凸耳和壳体连接部位要采取圆弧加工设计,同时要保证两凸耳间距在 $25\text{mm} \sim 150\text{mm}$ 之间,模块凸耳的数量与系统的模块重量有关,具体关系如表 4.2 所示。

表 4.2 凸耳数量与模块重量的关系

Tab. 4.2 The relationship between the number of lug and the weight of device

模块重量 (单位: kg)	凸耳数量
≤ 3	4
6	6
8	8~10

(2) 印制板加固

用弹性材料固封在印制板的板面,需要时可以增加固封面积,甚至整体固封。对焊接器件进行粘固和灌封,使用的材料可选用单组份硅橡胶 ($GD-414$ 、 $GD-401$ 等),个别大体积和大质量元器件可使用环氧树脂加固;

在印制板边缘增加连接阻尼,并在设备器件与平台安装位置加设阻尼隔振垫,用来吸收振动能量。

(3) 线缆加固

通常使用 $GD-414$ 胶加固线缆。线缆避免悬空敷设,悬空敷设的线缆尽量靠近结构件侧壁或其它部件走线,并用胶将其粘固在零件侧壁或其他部件上。线缆中的甩线的焊接点不能作为该导线束的固定措施。

各导线从焊点引出后在靠近结构件、微波件和 PCB 处就近点 $GD-414$ 胶加固,对线缆可采用锦丝线进行绑扎和聚四氟乙烯薄膜进行包扎或采用透明热缩套管热缩固定。

导线靠近壳体壁、支撑杆和支架等金属件走线或固定,或沿结构件的棱角,或跨过凸台棱角边,或通过结构尖角结构时,对导线和导线束采取二次绝缘与保护措施。

(4) 紧固件的加固

装配弹垫按照 $QJ2963.2$ 《专用弹簧垫圈标准型不锈钢弹簧垫圈》规定要求操作。受结构限制不能安装弹垫的场合,采用螺纹上点胶等工艺进行加固。

4.5 SolidWorks 软件简介

SolidWorks 软件是世界上首个基于 Windows 三维 CAD 系统开发的, *SolidWorks* 软件组件众多,功能模块强大,并且容易学习,上手快,这都是 *SolidWorks* 软件较其他三

位立体设计软件独有的优势，使得 *SolidWorks* 受到了极高的好评，视为世界领先的三维 CAD 软件。

SolidWorks 虽然功能强大，但操作并不繁琐，简单易学，只要你熟悉微软系统的用户，你就能很轻松的使用 *SolidWorks* 软件了。

SolidWorks 提供了人性化的操作功能，你可以通过拖拽的功能复制出相同的配件图，为用户节省了大量的时间。同时，*SolidWorks* 软件的工程图设计功能强大，工程图示具有关联的，它跟三维模型和各个视图都有关联性，当修改工程图时，三维模型和各视图会跟着自动改动。

本文使用 *SolidWorks* 软件，对系统模块中的各器件绘制了封装尺寸图，并利用 *SolidWorks* 软件设计了模块的壳体结构图。

4.6 器件的封装设计

由于卫星空间有限，对应用于卫星上的模块设计有更高要求，要在实现功能的基础上，设计小型化的模块是发展趋势，模块的小型化可以在较小的空间内实现更多的功能，对于空间有限的卫星来说，是合理的选择。模块的小型化设计需要了解模块内各器件的详细封装尺寸，从而对模块内的器件进行合理化的布局，最终达到节省空间体积的效果。

4.6.1 有源器件封装尺寸

在微波光传输收发模块系统中，必不可少的有源器件有激光器光源、光电探测器，在外调制链路中，同时需要调制器，可能还会需要到驱动放大器和偏置点控制器。所以，下文中列出了这五种器件的封装尺寸。

(1) DFB 激光器：

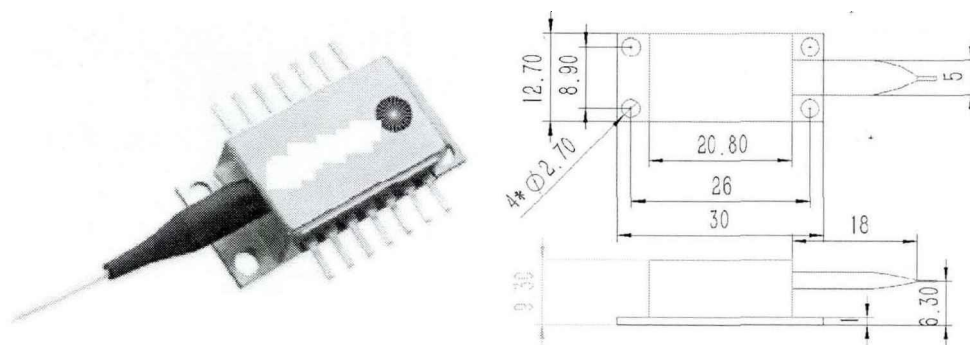


图 4.1 DFB 激光器封装尺寸

Fig. 4.1 Package of the laser device

(2) 调制器:

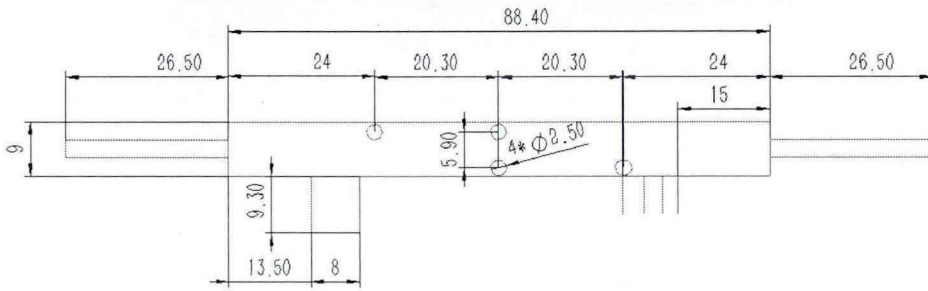
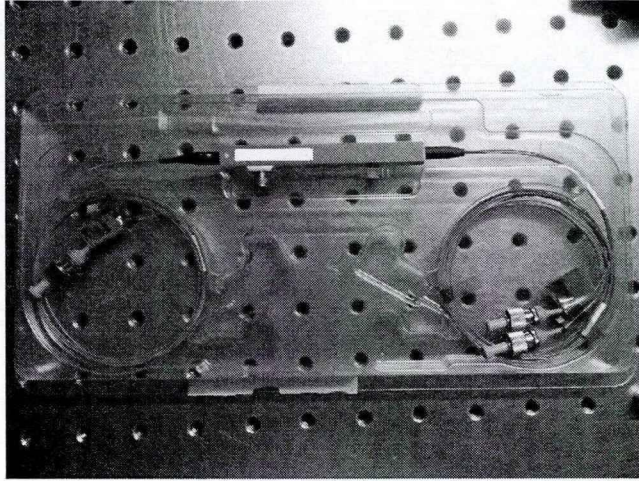


图 4.2 调制器封装尺寸

Fig. 4.2 Package of the modulator

(3) 驱动放大器:

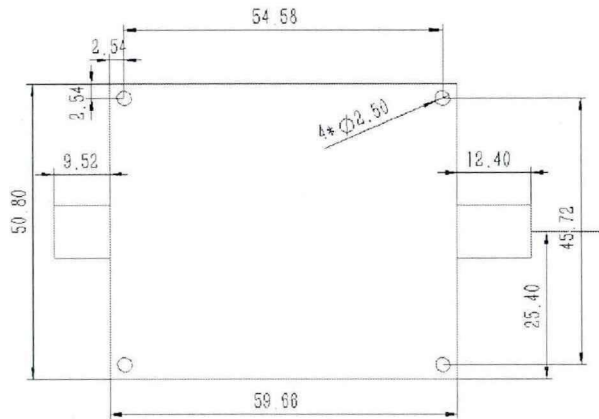
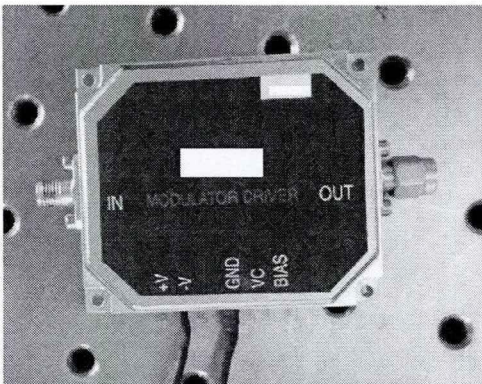


图 4.3 驱动放大器封装尺寸

Fig. 4.3 Package of the amplifier

(4) 偏置点控制器:

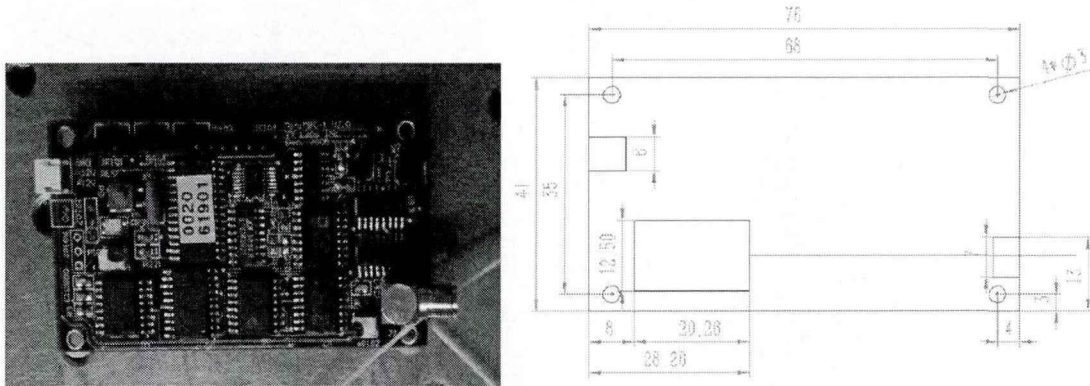


图 4.4 偏置点控制器封装尺寸

Fig. 4.4 Package of the bias point controller

4.6.2 无源器件封装尺寸

(1) 光法兰连接头: 这是在光通信领域中经常使用的无源连接器件,

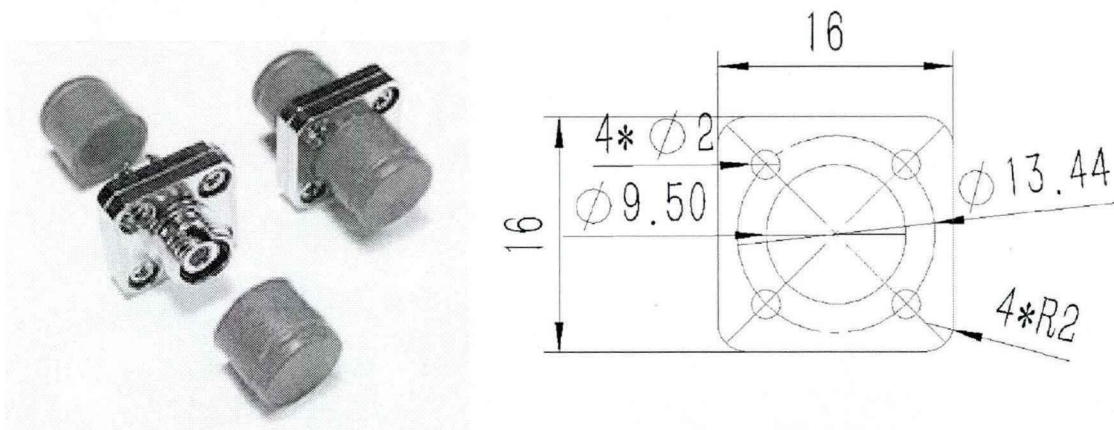


图 4.5 光法兰连接头封装尺寸

Fig. 4.5 Package of Fiber Optic Connector

(2) 射频连接头:

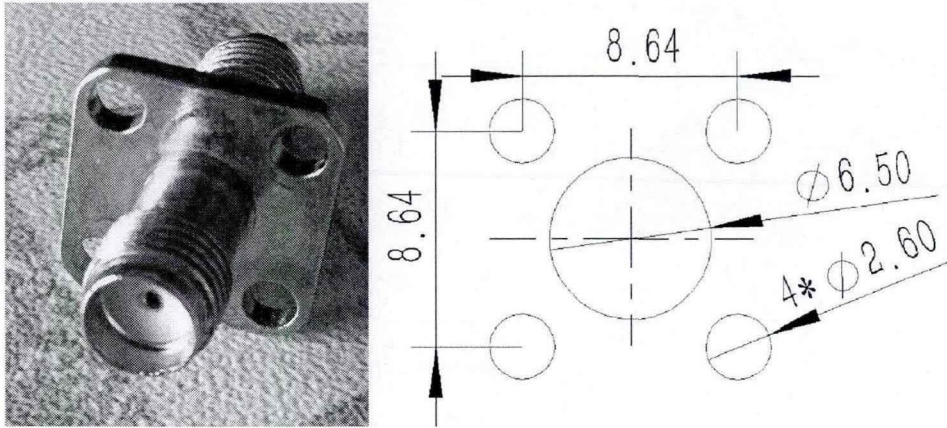


图 4.6 射频连接头封装尺寸

Fig. 4.6 Package of Electrical connector

(3) 光纤固定座:

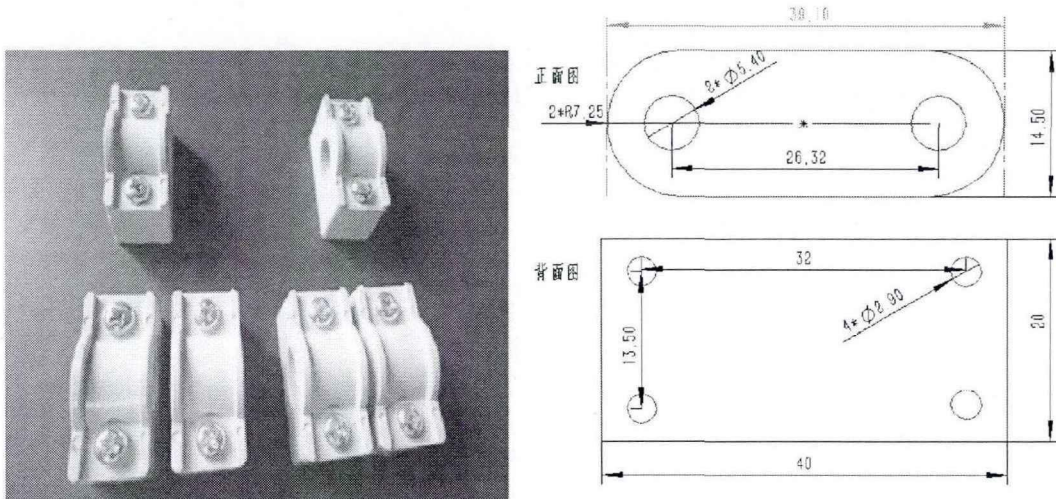


图 4.7 光纤固定座封装尺寸

Fig. 4.7 Package of Fiber Holder

(4) 九针电源插口:

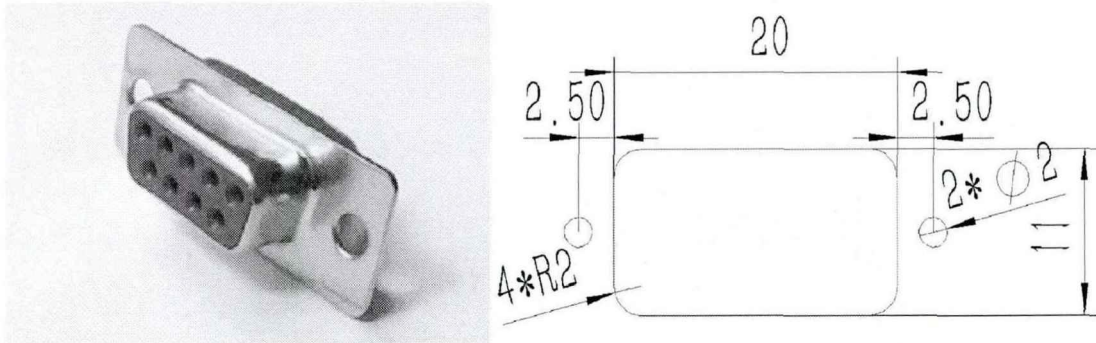


图 4.8 九针电源插口封装尺寸

Fig. 4.8 Package of Nine-pin power socket

系统模块中，需要多个电源供电参数，各器件供电参数如表 4.3 所示：

表 4.3 各器件供电电源参数

Tab. 4.3 Power supply parameters of each device

器件	供电
激光器	+5V, -5V, GND
驱动放大器	+8V, -5V, GND
偏置点控制器	+12V, -12V, GND

电源是热耗特别大的器件，产热能量很强，需要特殊集中进行散热，所以在卫星中，电源是以单独模块形式存在的，并对其它各功能模块统一供电。电源模块对其它各功能模块供电时，对每个供电模块只提供一个供电端口，所以在系统模块中当存在多个参数电源电压值时，就需要采用九针电源插口进行供电。

4.7 模块壳体封装设计

4.7.1 模块封装设计注意事项

模块的小型化设计需要通过合理的布局对器件最高效率的布置，以达到节省空间的效果。小型化设计就会拉近每个器件间的距离，但是在拉近器件间具体的时候，应该注意一下事项：

(1) 光纤尾纤的预留空间：在系统中，有许多光器件，都带有光纤，如激光器、调制器、偏置点控制器等，预留空间不要使光纤圈的直径过小而发生损耗；同时，模块中若需要法兰支架，也要考虑法兰支架两侧预留的空间是否满足光纤相连；

(2) 射频接头预留空间：器件间的射频通信，都是通过射频传输线与器件相连接的，接头有直头、拐头之分，有公头、母头之分，各种型号的尺寸也不一样，不光要考虑器件的摆放尺寸，还需考虑连接器件所需空间；

(3) 模块多层化，就难免会发生层与层之间的器件相连，若开孔和卡槽，要确保接头能够顺利通过；

(4) 考虑电源接口预留空间；

(5) 考虑线布局：包括光纤布局、信号线布局和电源线布局；

(6) 螺孔位置、数量的选择：首先，知道器件的螺孔的大小，其次，确认是否为有螺纹，是正面固定还是背面固定，这些因素都影响在模块壳体上开孔的位置；若需要沉头孔，要考虑沉头直径，防止伸出壳体边缘；还要防止单个螺丝脱落失效原则，允许单个螺丝脱落而不影响系统正常工作；

(7) 抗震性设计里提到，要最终对接头进行胶固，防止接头松动。

4.7.2 相关模块壳体设计图

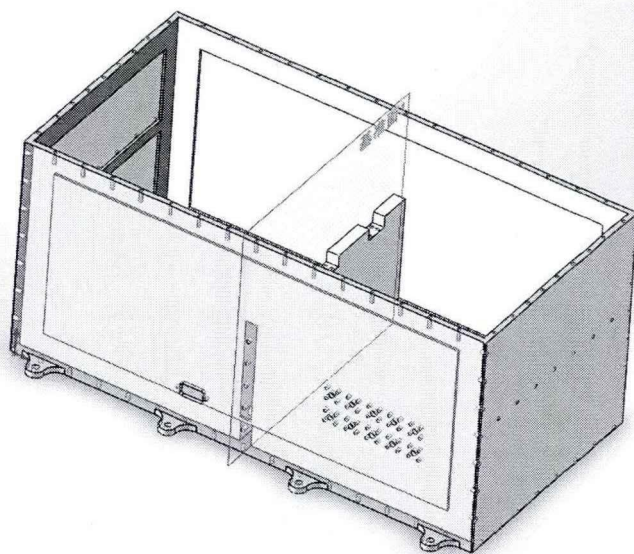


图 4.9 模块壳体设计图

Fig. 4.9 The design of module

4.8 本章小结

本章对模块的封装性设计进行了详细的阐述，从热控、抗辐照、电磁兼容、抗力学环境的角度去考虑设计模块壳体，并分别对系统中常用有源、无源器件进行了封装尺寸绘图，提出了壳体封装的注意事项和要有空间冗余，并设计出相关工程模块壳体图。

结 论

微波光传输技术是结合了光通信技术和微波通信技术的优势,在广泛的领域得到了应用,微波光传输技术在面向空间上的应用必不可少。微波光传输收发模块工作的可靠性与器件的工作温度密切相关,所以,在空间真空的特殊环境下,对模块进行热分析与管理显得尤为重要。

本文完成了对微波光传输收发模块中较大功耗器件激光器和放大器的热分析,基于 ANSYS 有限元分析建立了三维热分析模型。

首先,在没有接触卫星舱内温控板的条件下,分别对激光器和放大器进行了热分析,分析结果显示,在空间真空条件下,在无温控板热传导的情况下,器件工作温度线性升温很快,激光器在工作 300s,即 5 分钟的时间,温度就超过了 50℃;而放大器在工作 3600s,即一个小时的时间,温度超过了 70℃,都各自超过了器件的正常工作温度范围,所以,在空间环境下,必须对工作器件进行热传导散热处理。

其次,做了对比热分析模拟实验,在都与卫星舱温控板接触的条件下,分别对激光器和放大器进行热分析。分析结果显示:在直接接触温控板的情况下工作,器件温度最终稳定在正常工作温度范围内,放大器的工作温度与温控板的温差不超过 1℃,而激光器的工作温度与温控板的温差不超过 3℃。从而,得出结论:与温控板直接接触的器件,能有效的将热量传导出去,所以不需要再特殊对器件进行散热。

最后,考虑到卫星空间狭小,模块要小型化设计,外加考虑到光纤走线和电信号走线的因素,把模块分成两层,把放大器放在了底板层,激光器放在了二层板上,并对此情况进行了热分析。分析结果显示:放大器的工作温度无变化,激光器的工作温度从之前的 17℃ 左右,升高到了 29℃,仍能工作在正常的温度范围内。为了达到更好的导热效果,使器件工作在较理想的温度条件下,在模块壳体两侧固定了导热系数较高的铜导热板,并进行了热分析。分析结果显示:加导热板后,二层板降温效果明显,激光器的器件温度也降到了 21℃ 左右。

从而得出结论,借助卫星舱的温控板可以有效的降低模块中器件的工作温度,保证模块可靠性长久工作。

本文同时还对模块进行了封装性设计,从热控、抗辐照、电磁兼容、抗力学环境的角度去考虑设计模块壳体,并利用 SolidWorks 软件分别对系统中常用有源、无源器件进行了封装尺寸绘图,提出了壳体封装的注意事项和空间冗余,并设计出相关工程模块壳体图。

本论文在工作上还存在一些不足,在日后的工作中会对其进一步深入研究:

(1) 对器件的热分析做了一些简化, 器件与面板的接触性问题, 实验分析中假设为完全接触, 能够进行良好的热传导, 没有对加入界面填充材料导热硅胶后的模型进行热分析。

(2) 实验模拟中的器件都是模块化的, 没有对器件内部结构进行热分析, 实际上, 模块化器件的内部与器件外壳存在着一定的温度梯度。

参 考 文 献

- [1] 茂章, 微波技术, 克潜. 微波技术[M]. 清华大学出版社, 1989.
- [2] Yao J. Microwave Photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-35.
- [3] Yu J, Zhou X, Huang M F, et al. Tb/s (161× 114 Gb/s) PolMux-RZ-8PSK transmission over 662 km of ultra-low loss fiber using C-band EDFA amplification and digital coherent detection[C]//Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC), Th. 17, 3.
- [4] Charlet G, Renaudier J, Mardoyan H, et al. Transmission of 16.4-bit/s capacity over 2550 km using PDM QPSK modulation format and coherent receiver[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 153-157.
- [5] Y.X. Guo, L.C. Ong, B.Luo. An LTCC optical transceiver for Radio over Fiber[C]. Microwave Conference 2005 European. 2005(9).139-141.
- [6] Rappaport T S, Reed J H, Woerner B D. Position location using wireless communications on highways of the future[J]. Communications Magazine, IEEE, 1996, 34(10): 33-41.
- [7] 左磊. 毫米波微波光子链路性能分析与优化[D]. 南京邮电大学, 2012.
- [8] Y.X. Guo, L.C. Ong, B.Luo. An LTCC optical transceiver for Radio over Fiber[C]. Microwave Conference 2005 European. 2005(9).139-141.
- [9] H. Al-Raweshidy, K.M. Glaubbitt, and P. Faccin. In-building coverage for UMTS using radio over fiber technology[J]. in Proc. IEEE Wireless Pers. Multimedia Commun. 2002, 2: 581-585.
- [10] Cox III C H, Ackerman E I, Betts G, et al. Limits on the performance of RF-over-fiber links and their impact on device design[J]. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 2006, 54(2): 906-920.
- [11] Smith G H, Novak D, Lim C. A millimeter-wave full-duplex fiber-radio star-tree architecture incorporating WDM and SCM[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 1998, 10(11): 1650-1652.
- [12] 张博. ROF 无线接入技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2007.
- [13] Sauer M, Kobayakov A, George J. Radio over fiber for picocellular network architectures[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(11): 3301-3320.
- [14] Wu J S, Wu J, Tsao H W. A radio-over-fiber network for microcellular system application[J]. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 1998, 47(1): 84-94.
- [15] Goloubkoff M, Penard E, Tanguy D, et al. Outdoor and indoor applications for broadband local loop with fibre supported mm-wave radio systems[C]//Microwave Symposium Digest, 1997., IEEE MTT-S International. IEEE, 1997, 1: 31-34.
- [16] Chung Y, Cho D H. Performance evaluation of soft handoff for multimedia services in intelligent transportation systems based on CDMA[J]. Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on, 2003, 4(4): 189-197.
- [17] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319-330.
- [18] SUN L, GAO J. Next Generation Traffic Information Service in the Era of Mobile Internet[J].

- [19] 李沫. KOF 系统中 60GHz 传输技术及光域微波信号处理技术研究 [D][D]. 清华大学, 2011.
- [20] 冀云帅. 智能交通系统中 RoF 技术的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [21] Jager D. 5.1. Microwave Optical Interaction Devices[J]. Microwave Photonics: From Components to Applications and Systems, 2003: 82.
- [22] Zmuda H, Soref R A, Payson P, et al. Photonic beamformer for phased array antennas using a fiber grating prism[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 1997, 9(2): 241-243.
- [23] 黄章勇. 光纤通信用光电子器件和组件[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2007.
- [24] RoF 收发模块研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [25] Hayashi I, Panish M B, Foy P W, et al. Junction lasers which operate continuously at room temperature[J]. Applied Physics Letters, 2003, 17(3): 109-111.
- [26] Stephens W E, Joseph T R. System characteristics of direct modulated and externally modulated RF fiber-optic links[J]. Lightwave Technology, Journal of, 1987, 5(3): 380-387.
- [27] Smith G H, Novak D, Ahmed Z. Overcoming chromatic-dispersion effects in fiber-wireless systems incorporating external modulators[J]. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 1997, 45(8): 1410-1415.
- [28] Gliese U, Norskov S, Nielsen T N. Chromatic dispersion in fiber-optic microwave and millimeter-wave links[J]. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 1996, 44(10): 1716-1724.
- [29] 方磊. 基于直接调制 DFB 激光器的 RoF 链路收发模块研究[D]. 大连理工大学, 2013.
- [30] Betts G E, Johnson L M, Cox III C H, et al. High-performance optical analog link using external modulator[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 1989, 1(11): 404-406.
- [31] 金丽丽. 高性能微波光子链路研究 [D][D]. 电子科技大学, 2010.
- [32] Betts G E, Johnson L M, Cox III C H, et al. High-performance optical analog link using external modulator[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 1989, 1(11): 404-406.
- [33] Blumenthal R H. Design of a microwave-frequency light modulator[J]. Proceedings of the IRE, 1962, 50(4): 452-456.a
- [34] Davies B, Conradi J. Hybrid modulator structures for subcarrier and harmonic subcarrier optical single sideband[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 1998, 10(4): 600-602.
- [35] Corral J L, Marti J. Single sideband optical modulation on chirped fibre grating based delay lines for optically controlled phased array antennas[J]. Electronics Letters, 1999, 35(10): 761-762.
- [36] Fuster J M, Novak D, Nirmalathas A, et al. Single-sideband modulation in photonic time-stretch analogue-to-digital conversion[J]. Electronics Letters, 2001, 37(1): 67-68.
- [37] Attygalle M, Hunter D B. Improved photonic technique for broadband radio-frequency measurement[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2009, 21(4): 206-208.

[38] Chi H, Zou X, Yao J. An approach to the measurement of microwave frequency based on optical power monitoring[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2008, 20(14): 1249-1251.

致 谢

研究生两年的生活即将画上一个圆满的句号，在毕业论文完成的时候，我也将背上行囊步入社会，踏上新的人生旅程。大学的时光中发生的点点滴滴现在回想起来还历历在目，其中包含着太多人对我的关怀与帮助。

在此，我要诚挚地感谢我的导师赵明山老师，从论文的选题到写作，他给予了我悉心的指导和教诲，启迪了我的思维，让我在论文的写作过程中少走弯路。赵明山老师严谨的学风和认真的工作态度，让我在学到知识的过程中，更懂得了为人的道理。

另外，我要特别感谢韩秀友老师、谷一英老师、武震林老师和胡晶晶老师在研究工作中对我的指导，与老师多次的学术方面的探讨深化了我在专业方面的知识，丰富了论文的研究内容，使我增长了知识。开阔了视野。

再次，我要感谢石暖暖师姐、康子建师兄、王永香师姐、王瑜师姐、佟超、彭昊良、梁宇鑫和我的同学、好友，正是他们陪伴我度过了我人生中最宝贵的时光，使我的生活更加丰富多彩，感谢他们的支持、帮助与理解。我还要感谢父母对我的关怀与培养，感谢他们的默默付出。


最后，感谢曾经对我言传身教的所有老师，感谢物理与光电工程学院这个大家庭给我带来的收获与温暖。

大连理工大学学位论文授权使用授权书

本人完全了解学校有关学位论文知识产权的规定，在校攻读学位期间论文工作的知识产权属于大连理工大学，允许论文被查阅和借阅。学校有权保留论文并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印、或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

学位论文题目：空间用微波光传输收发模块的热管理与封装设计研究

作者签名：李宝龙 日期：2014年6月12日

导师签名： 日期：2014年6月12日