

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

SERGIO LAMARCK DE LEMOS VIEIRA

FUNDAMENTOS DE CONTROLE TÉRMICO EM ESPAÇONAVES

**São José do Campos – SP
2023**

FUNDAMENTOS DE CONTROLE TÉRMICO EM ESPAÇONAVES

FUNDAMENTOS DE CONTROLE TÉRMICO EM ESPAÇONAVES

INTRODUÇÃO

Em um projeto de espaçonave, em específico satélites, é levado em conta algumas condições do espaço, como a radiação que incide e é emitida pelo satélite, levando em consideração também sua altura em relação a terra e posição.

1. CONDIÇÕES ESPACIAIS DE UMA ESPAÇONAVE

O controle térmico de espaçonaves é um processo de gerenciamento de energia no qual o aquecimento ambiental desempenha um papel importante. As principais formas de aquecimento ambiental em órbita são a luz solar direta, a luz solar refletida na Terra e a energia infravermelha emitida pela Terra. Durante o lançamento ou em órbitas excepcionalmente baixas, há também um efeito de aquecimento molecular livre causado pelo atrito na atmosfera superior rarefeita. Este capítulo fornece uma visão geral desses tipos de aquecimento ambiental.

Ambiente térmico de satélite. Como a temperatura de uma espaçonave, a temperatura da Terra é o resultado de um equilíbrio entre energia absorvida e emitida. Isso significa que um satélite visualiza apenas uma pequena parte do globo inteiro em um determinado momento. O movimento do satélite enquanto orbita, portanto, o expõe a condições ambientais que mudam rapidamente à medida que passa por regiões com diferentes combinações de terra, oceano, neve e cobertura de nuvens.

Essas oscilações de curta duração nas condições ambientais não são muito preocupantes para componentes de espaçonaves massivas e bem isoladas. Componentes leves expostos, como painéis solares e radiadores implantáveis, no entanto, responderão aos ambientes extremos encontrados por curtos períodos de tempo, portanto, deve-se considerar esses ambientes no processo de design. Como mostra a discussão a seguir, quanto menor a constante de tempo térmica de um determinado componente, maior a gama de ambientes que devem ser considerados.

Luz solar direta

A luz solar é a maior fonte de aquecimento ambiental incidente na maioria das espaçonaves na órbita da Terra. Felizmente, o sol é uma fonte de energia muito estável. Mesmo o ciclo solar de 1 ano tem muito pouco efeito sobre a radiação emitida pelo sol, que permanece constante em uma fração de 1% em todos os momentos. No entanto, como a órbita da Terra é elíptica, a intensidade da luz solar que atinge a Terra varia aproximadamente 3,5%, dependendo da distância da Terra ao sol.

A distância média da Terra ao Sol é conhecida como constante solar e é igual a 1367 W/m².

IR, com a energia integrada total igual a 1322 a 1414.

Esses acabamentos minimizam as cargas solares e maximizam a capacidade da espaçonave de rejeitar o calor residual. A luz solar refletida em um planeta ou lua é conhecida como albedo.

Radiador de espelho de quartzo

Devido à maior cobertura de neve e gelo, diminuindo o ângulo de elevação solar e aumentando a cobertura de nuvens, o albedo também tende a aumentar com a latitude. Essas variações tornam a seleção do melhor valor de albedo para uma análise térmica específica bastante incerta, e as variações em toda a indústria não são incomuns. Outro

ponto importante é que o fluxo de calor de albedo que atinge uma espaçonave diminuirá à medida que a espaçonave se move ao longo de sua órbita e se afasta do ponto subsolar, mesmo que a constante de albedo permaneça a mesma. Isso acontece porque o fator albedo é uma refletividade, não um fluxo.

A carga térmica de albedo na espaçonave se aproximará de 0 perto do terminador, mesmo que o valor de albedo seja 1,0. O analista é apenas responsável por selecionar o próprio valor de albedo.

Valores recomendados para infravermelho da terra e albedo

A maioria dos estudos iniciais recomendava valores de projeto para IR da Terra e albedo com base em médias mensais dos dados de satélite. Essas recomendações foram feitas por causa da irracionalidade de recomendar que todo o hardware da espaçonave seja projetado para acomodar os valores extremos e de curto prazo de albedo e IR da Terra resultantes da superfície local e das condições atmosféricas. Infelizmente, a maioria do hardware de espaçonaves tem uma constante de tempo térmica na ordem de minutos a alguns dias, não meses.

O programa da Estação Espacial reconheceu que os ambientes térmicos médios mensais geralmente usados pela comunidade de projeto de satélites não eram suficientes para projetar componentes críticos de segurança e com constante de tempo térmico curto, como os radiadores implantáveis da estação. Flight Center para melhorar a compreensão do ambiente térmico LEO para ISS e outros programas de naves espaciais. O ERBE é um experimento multissatélite que tem como objetivo principal a coleta de dados globais de tais parâmetros de balanço de radiação da Terra, como luz solar incidente, albedo e IR emitido pela Terra. Este experimento foi selecionado como fonte de dados por causa de sua cobertura completa e dados de alta qualidade de radiômetros de placa fiat de cavidade ativa em um modo de campo de visão amplo fixo.

Este tipo de instrumento mede diretamente o albedo e o IR da Terra como uma superfície de espaçonave os receberia. Os períodos de tempo foram selecionados para abranger a faixa de constantes de tempo térmicas encontradas na maioria dos hardwares de espaçonaves. Idealmente, tal estudo forneceria ao analista tanto uma taxa de aquecimento ambiental quanto a probabilidade de que o valor não fosse excedido durante a missão da espaçonave. Infelizmente, isso exigiria um conjunto de dados estatísticos cobrindo um período de tempo muito longo em comparação com a vida útil de uma espaçonave.

Devido ao conjunto limitado de dados disponíveis, os resultados são relatados aqui de acordo com a porcentagem de tempo que se pode esperar que o valor seja excedido em órbita.

Radiação infravermelho da terra

Toda a luz solar incidente não refletida como albedo é absorvida pela Terra e eventualmente reemitida como energia infravermelha. Essas variações localizadas no IR emitido pela Terra, embora significativas, são muito menos severas do que as variações no albedo.

Por causa disso, a energia IR emitida pela Terra pode apresentar uma carga de retorno particularmente pesada nos radiadores de espaçonaves em órbitas de baixa altitude. O conceito de IR emitido pela Terra pode ser confuso, uma vez que a espaçonave geralmente é mais quente que a temperatura efetiva da Terra e a transferência líquida de calor é da espaçonave para a Terra.

Correção de adição de ponto subsolar Órbita Correção de adição de 13 graus

Como outro ponto de referência, uma margem de incerteza de análise comumente usada de 10°C corresponde a cerca de 2 ou proteção contra uma temperatura prevista sendo excedida. Para os raros casos em que um componente leve crítico quebraria se exposto a um ambiente extremo pelo menos uma vez, observe que as piores medições no banco de dados excederam os valores de 3,3 t~ das tabelas e 2,2 por 17 W/m² para Earth IR e 0,06 para albedo para os períodos de medição de 16 segundos e 128 segundos. Durante o estudo, ficou claro que os valores de albedo e IR da Terra dependiam não apenas do período de tempo considerado, mas também da inclinação da órbita, ângulo beta da órbita e ângulo do ponto subsolar. O albedo, por outro lado, tende a aumentar em grandes ângulos a partir do ponto subsolar porque a luz solar é refletida na Terra com mais dispersão frontal nos baixos ângulos de incidência que ocorrem mais perto do terminador.

Este último efeito faz com que o fator de albedo médio da órbita aumente para órbitas de ângulo beta mais altas que mantêm a espaçonave mais próxima do terminador do que do ponto subsolar durante a porção iluminada pelo sol da órbita. Um ponto importante a ser observado é que o fator de correção mostrado nas Tabelas 2.1 a 2.4 deve ser adicionado aos valores tabulados de albedo para contabilizar esse efeito. Ao longo dos anos, alguns questionaram a adequação de usar o albedo mais alto e o IR mais alto ao realizar uma análise térmica de espaçonaves de caso quente, ou o albedo mais baixo e o IR mais baixo ao realizar uma análise de caso frio. A lógica é que, se o albedo é alto, então a temperatura local da Terra e, portanto, o IR planetário emitido, deve ser baixo porque muita luz solar está sendo refletida.

2. ACABAMENTOS DE SUPERFÍCIES TÉRMICAS

Projetos térmicos de naves espaciais empregam revestimentos de controle térmico dependentes do comprimento de onda para vários propósitos. Refletores solares, como espelhos de segunda superfície, tintas brancas e Teflon revestido de prata ou alumínio, são usados para minimizar a energia solar absorvida, mas emitem energia quase como um corpo negro faria. Para minimizar a energia solar absorvida e a emissão infravermelha, é usado metal polido, como folha de alumínio ou revestimento de ouro. As superfícies externas de uma espaçonave acoplam radiativamente a espaçonave ao espaço.

Como essas superfícies também são expostas a fontes externas de energia, como luz solar e infravermelho emitido pela Terra, suas propriedades radiativas devem ser selecionadas para alcançar um equilíbrio de energia na temperatura desejada entre dissipação interna da espaçonave, fontes externas de calor e reirradiação para o espaço. , conforme ilustrado na Fig. As duas propriedades de superfície primárias importantes são a emitância de infravermelho e a absorptância solar. A Figura 4.2 indica a gama de propriedades disponíveis para diferentes tipos de materiais. Às vezes, dois ou mais revestimentos são combinados em um padrão quadriculado ou listrado para obter a combinação desejada de absorptância e emitância médias.

Cargas ambientais +T_e, Q_{in} t= Energia reirradiada

Visto na maioria das espaçonaves, estão a camada externa de mantas de isolamento, revestimentos de radiadores e tintas. As caixas eletrônicas localizadas dentro da espaçonave e os painéis estruturais aos quais estão conectadas geralmente são pintadas para obter uma alta emitância. O Kapton aluminizado é um material de cor dourada que possui uma absorção solar moderada, uma alta emitância de infravermelho

e uma espessura típica de 1 a 3 mils. Black Kapton tem uma alta absorvância solar porque é carregado com carbono para melhorar a condutividade elétrica para fins de aterramento.

O tecido Beta é um tecido de vidro revestido de Teflon muito resistente que possui baixa absorção solar e alta emitância.

Quase todas as tintas têm alta emitância, então a escolha é realmente entre absorção solar, facilidade de aplicação e condutividade elétrica para atender aos requisitos de aterramento. A maioria das superfícies internas da espaçonave é pintada de preto para alta emitância, enquanto as superfícies externas, incluindo radiadores, são frequentemente pintadas de branco para minimizar a energia solar absorvida. Ao escolher uma tinta branca, deve-se considerar que algumas tintas terão um aumento maior na absorvância do que outras como resultado m Absorvedor solar o 1.

As tintas metálicas, como a tinta de folha de alumínio, podem ter uma emitância tão baixa quanto 0,2, mas raramente são usadas em espaçonaves. Aplicações típicas são fita aluminizada em linhas de propelente e tanques para limitar a perda de calor e escudos de radiação de aço inoxidável para bloquear a visão radiativa de bicos propulsores quentes para componentes sensíveis de espaçonaves. Vários acabamentos especiais encontram uso ocasional no controle térmico de espaçonaves.

O engenheiro térmico deve ter muito cuidado ao usar os valores de absorvância e emitância relatados na literatura para superfícies anodizadas ou alodinas porque as propriedades ópticas da superfície são altamente dependentes do processo específico usado.

Raios solares refletidos

Processo de anodização de ácido crômico controlado desenvolvido pela NASA/Langley para alumínio que permite ao usuário selecionar qualquer combinação de emitância e absorvância e obter ambos os valores dentro de ____." 4"2' 4.3 Embora as propriedades relatadas tenham sido obtidas do que se acredita serem fontes confiáveis, as diferenças nos valores relatados não são incomuns. Portanto, em projetos sensíveis às propriedades da superfície, recomenda-se medir a absorvância e a emitância de amostras do acabamento real do voo.

Diversos 1/4-mil Mylar aluminizado, 0.

Contaminação

Em muitos casos, os efeitos da contaminação são os principais contribuintes para a degradação óptica das superfícies das espaçonaves. A degradação de superfícies ópticas com vida útil da missão aparece como um aumento na absorção solar de materiais de controle térmico ou uma perda de transmissão ou reflexão de superfícies sensíveis de telescópios e detectores. Algumas partículas estão presentes dentro da carenagem do veículo de lançamento que envolve a espaçonave até alguns minutos após a decolagem, e mais são geradas como resultado dos disparos do motor do foguete durante a decolagem, separação de estágio e controle de atitude. Essas partículas são depositadas nas superfícies da espaçonave como resultado do impacto direto da pluma do motor do foguete ou da turbulência dentro da carenagem da carga útil que faz com que as partículas e outros contaminantes que já estão presentes circulem durante a subida do lançamento.

Uma vez que a migração de constituintes voláteis através de sólidos é um processo lento em temperaturas normais de espaçonaves, essas frações de baixo peso molecular continuam a desgaseificar por vários anos.

3. RADIADORES

O calor residual da nave espacial é finalmente rejeitado para o espaço pelas superfícies do radiador. Os radiadores ocorrem em várias formas diferentes, como painéis estruturais da espaçonave, radiadores de placa plana montados na lateral da espaçonave e painéis implantados após a espaçonave estar em órbita. Seja qual for a configuração, todos os radiadores rejeitam calor por radiação infravermelha de suas superfícies.

Cargas ambientais $+T_{\infty} Q_{\text{rad}} = \text{Energia reirradiada}$

A potência radiante de um radiador é uma forte função da temperatura. Em temperaturas criogênicas, o efeito é ainda mais pronunciado, com um radiador de 70 K tendo apenas 1/300 da capacidade de rejeição de calor de um radiador de temperatura ambiente. Esta característica torna os radiadores criogênicos extremamente sensíveis ao aquecimento ambiental e vazamentos de calor através de isolamento e suportes, e leva a considerações especiais de projeto. A maioria dos radiadores de espaçonaves rejeita entre 100 e 350 W de calor eletrônico residual gerado internamente por metro quadrado.

A extremidade superior dessa faixa é típica de um radiador que funciona a uma temperatura razoavelmente alta e experimenta uma carga de calor relativamente modesta do ambiente ou de outras superfícies da espaçonave. A extremidade inferior da faixa pode representar um radiador funcionando abaixo da temperatura ambiente em órbita baixa da Terra, onde as cargas ambientais podem ser substanciais.

Radiadores de estrutura passiva

Uma parede de painel alveolar de alumínio existente da espaçonave serve tanto como parte da estrutura quanto como um radiador, com seu peso normalmente carregado no subsistema de estruturas. As folhas do painel espalham o calor das caixas eletrônicas com uma área na face externa atuando como superfície radiante.

Radiadores implantáveis

Neste momento, a maioria das espaçonaves não tripuladas pode rejeitar o calor residual interno usando painéis estruturais ou radiadores montados no corpo. Em tal situação, às vezes são necessários radiadores implantáveis para aumentar a área de radiação disponível. Um exemplo de um radiador destacável é o Alpha Deployable Radiator fabricado pela Swales Aerospace. 6.7, o Alpha usa tubos de calor redundantes para transportar calor através de juntas flexíveis para um painel de radiador de quatro metros quadrados de dois lados.

O Alpha foi projetado para ser conectado a uma espaçonave por meio de dobradiças esféricas, atuadores pirotécnicos ou de liberação de parafina e amortecedores. Tem uma capacidade declarada de 1250 W a uma temperatura do evaporador de 36°C. A Lockheed Martin/Vought Systems desenvolveu vários sistemas de radiadores implantáveis para espaçonaves tripuladas que usam circuitos de fluido bombeados

mecanicamente para transportar calor.

O ônibus espacial usa radiadores implantáveis Vought com um loop de transporte de calor freon bombeado mecanicamente.

Quase todos os radiadores que usam circuitos de fluido bombeados mecanicamente até o momento foram desenvolvidos para sistemas tripulados que têm durações de missão curtas ou são massivamente redundantes e utilizáveis por astronautas. Espaçonaves não tripuladas, no entanto, são geralmente projetadas para missões de longa duração sem manutenção. À medida que os níveis de potência das espaçonaves não tripuladas continuam a aumentar, os sistemas de resfriamento de loop bombeados mecanicamente podem, em algum momento, demonstrar uma vantagem de peso significativa em relação aos sistemas passivos concorrentes.

Radiador Congelando

Testes adicionais mostraram que o degelo local de uma linha produzia pressões internas de até $2,96 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, o que estava além da tensão de escoamento dos tubos do radiador de aço inoxidável. O programa da Estação Espacial investigou várias opções para evitar o congelamento, incluindo pré-aquecer os radiadores antes dos eclipses, usar berílio ou lítio em vez de alumínio ou embalar o radiador com material de mudança de fase para aumentar a capacitância térmica e usar aquecedores ou retração do radiador durante condições frias. Depois de analisar essas e outras opções, a NASA decidiu que a solução mais confiável e econômica era projetar o radiador para congelar sem danos ou impactos operacionais. Variando o espaçamento dos tubos em cada painel do radiador.

Este esquema evita o congelamento completo do radiador, mesmo nas piores condições de caixa fria.

CONCLUSÃO

Neste trabalho podemos verificar um pouco de como um espaçonave se comporta no espaço e quais parâmetros devem-se ser levados em conta. Alguns deles são a radiação solar, o albedo, a radiação de outros corpos como a lua, também como a radiação emitida pelo próprio satélite. Nesse contexto, o controle térmico da espaçonave é de feito por meio de radiadores, que são peças feitas de materiais específicos para a melhor absorção, ou dissipação de calor na mesma. Todos esses parâmetros serão utilizados para a definição de um projeto de satélite.

REFERÊNCIAS

- GILMORE, David g. Spacecraft Thermal Control Handbook: Fundamental Technologies. 2nd ed. The Aerospace Press 2350 E. E1 Segundo Boulevard E1 Segundo, California 90245-4691; American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. 1801 Alexander Bell Drive Reston, Virginia 20191-4344. The Aerospace Corporation, 2002