大型空间环模器热沉热设计研究

姜传胜 王 浚
(北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系)

摘 要: 分析了大型空间环模器热沉壁面温度分布的主要影响因素,利用热沉管网动态仿真软件(HSDS)研究了不同热沉片结构对支管流量分配的影响,针对我国某大型空间环模器热沉在热设计方面存在的主要问题提出了简单可行的改进方案. 最后,给出了借助所开发的HSDS 仿真软件进行热沉热设计的一般步骤.

关 键 词: 航天模拟器; 热沉; 仿真; 热设计
中图分类号: V 416.8
文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2001)03-0305-04

大型空间环境模拟器热沉是由翅片管组成的巨型复杂管网,它是空间环模器的核心部件. 热沉温度均匀性指标是环模器最重要的性能指标之一. 如何从设计和控制两方面保证热沉壁面温度分布均匀是当前空间环境模拟中最重要的问题之一. 为了使热沉壁面温度分布满足均匀性要求,当前大型热沉一般分为若干片,每一片都有各自的流量控制回路,通过调节各路的液氮或气氮流量实现热沉套表面温度分布均匀. 但是,由于热沉片内部的支管流量分配是由其内部结构决定的,若热沉分片、各片结构及形状等设计不合理,整个热沉的壁面温度分布特性先天不足,则仅靠流量调节远不能使热沉壁面温度分布均匀. 尽管在80年代初已提出了热沉热设计的概念,但由于缺乏必要的理论方法和设计手段,故在设计时不能较精确地计算其流量分配和温度分布,在设计各热沉片时对温度均匀分布要求无法系统考虑,而只能根据所承受的总热载荷进行粗略估算,致使在许多情况下一些热沉片局部区域温度偏高或偏低.

本文结合某大型环模器气氮系统的仿真研究,建立了大型热沉管网动态仿真数学模型,并开发了热沉管网动态仿真软件(HSDS). 该软件综合考虑热沉支管流量分配和壁面温度分布的相互影响,融流场计算和温度场计算于一体,只需改动输入数据文件,便可以对任意结构大型热沉的任意工况进行整体动态仿真研究. 它可以作为一种通用的软件工具,帮助设计人员在选定设计方案时,预先计算出壁面温度分布的具体数值,从而使热沉热设计由定性设计阶段前进到定量设计阶段.

1 热沉壁面温度分布的影响因素

要进行热沉热设计,首先必须分析热沉壁面温度分布的主要影响因素. 影响热沉壁面温度分布的因素可分为内部和外部因素. 内部因素主要指热沉如何分片(热沉片的数目,每一片中支管的数目)、每片的结构(进出口数目及其相对位置)、支管长度、支管管径和支管翅片的高度等;外部因素主要有热载荷的大小及其分布和气氮流量等.

在内部因素中,整个热沉如何分片是最重要的影响因素,它基本上决定了不同热沉片之间的流量分配比例,因而对热沉壁面温度分布具有重要影响. 但是,热沉分片是一个经验性很强的课题,单凭软件计算很难选定一个很好的分片方案,只能先凭经验提供几种可行方案,然后用仿真软件帮助确定其中的最优方案.

热沉片的结构(进出口数目及其相对位置)对热沉壁面温度分布的影响,从某种意义上说比热沉如何分片还要大,因为热沉如何分片只是决定了不同热沉片之间的流量分配比例,而热沉片的结构则直接影响着片内支管的流量分配,也就直接影响着壁面温度分布. 热沉片的结构多种多样,它们对壁面温度分布的影响也各不相同,究竟那种结构更利于支管流量分配均匀,至今尚没有统一的看法,这样要在设计热沉时充分考虑热沉片结构对壁面温度分布的影响便很困难.

支管是热沉片的基本组成部分,它对热沉壁面温度分布的影响也非同小可. 一般说来,支管越

收稿日期: 1999-12-23
作者简介: 姜传胜(1971-),男,山东烟台人,博士生,100083,北京.

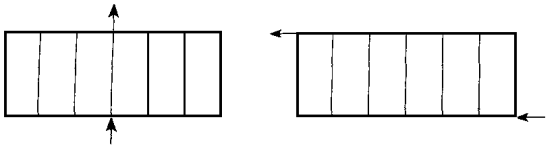
长,其壁面沿程温升越大,因而壁面温度分布越不均匀.翅片越高,从翅片根部到顶端的温差越大,不利于壁面温度分布均匀.但是,管长和翅片高度同时受到若干因素的制约,不可能随意缩短和降低,但它们对壁面温度分布的影响方式是显而易见的,因而在设计时,容易将这些因素考虑进去.

在外部影响因素中,热载荷的大小及分布是主要的影响因素,也是热沉壁面温度分布不均匀的决定因素之一.但对热沉来说,热载荷的大小及分布是给定的设计要求,在试验中不可能改变.

热沉总流量的大小既影响到各支管流量大小,又影响到支管之间的流量分配比例,因而对热沉壁面温度分布具有重要影响.此外,对于已定热沉,流量调节是试验过程中控制热沉壁面温度分布最主要的手段.但是,流量调节对于改善壁面温度分布的作用在很大程度上取决于支管流量分配的均匀程度,而支管流量分配的均匀程度又在很大程度上取决于热沉片的结构.对于已有的热沉而言,要提高其壁面温度分布的均匀程度,最便捷的方法是改变其进出口数目及其相对位置.

2 热沉片结构对支管流量分配影响

按进出口的数目,热沉片可分为单进单出和多进多出两种结构.单进单出热沉片只有一根进液总管和一根出液总管,多进多出热沉片则有多根进液总管或(和)出液总管.单进单出热沉片,按进出口的相对位置又可分为U型和Z型两种结构.如图1所示.多进多出热沉片从一定意义上可以看成Z型和(或)U型的组合.



a U型结构 b Z型结构

图1 单进单出热沉片的两种形式

将某大型环模器的一个热沉片分别分成相同的两片U型热沉和Z型热沉,利用HSDS软件计算了两种结构的支管流量分配(图2)和壁面温度分布(该片共有168根支管,所有支管的长度均为5.34 m,进口流体温度为193 K,总流量为0.334 36 kg/s,U型热沉和Z型热沉的流量均为原热沉片流量的一半).两种结构与原热沉片原来的支管流量分配和壁面温度分布的对比见表1.

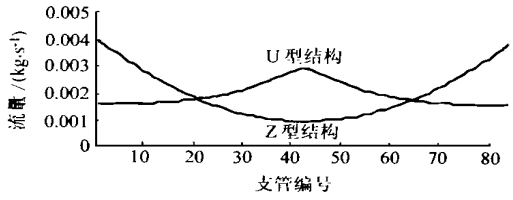


图2 U型结构和Z型结构支管流量分配对比

表1 不同结构热沉支管流量分配和壁面温度分布比较

流量分配和温度分布		原热沉片	U型结构	Z型结构
流量分配/(kg·s⁻¹)	G_{max}	0.003 964 4	0.002 987 9	0.003 965 5
	G_{min}	0.000 992 1	0.001 623 3	0.000 997 4
	G_{max}/G_{min}	3.996	1.841	3.975
温度分布/K	ΔT_{wmax}	20.116	13.064 4	20.108
	ΔT_{wbmax}	15.765	9.771	15.662

注: G_{max}为支管最大流量; G_{min}为支管最小流量; ΔT_{wmax}为最大壁面温差; ΔT_{wbmax}为支管最大沿程温差.

从上述图表可看出,在总流量相同的情况下,U型结构热沉片的 G_{max}/G_{min}仅为1.841,远小于原热沉片原来 G_{max}/G_{min}(3.996);而Z型结构热沉的 G_{max}/G_{min}则为3.975,与原热沉片原来的 G_{max}/G_{min}(3.996)基本相同,所以U型热沉片的支管流量分配远比Z型热沉片均匀.从壁面温度分布特征看,U型热沉的 ΔT_{wmax}仅为13.07644 K,远小于原热沉片原来的 ΔT_{wmax}(20.116 K);而Z型热沉的 ΔT_{wmax}则为20.108 K,与原热沉片原来的 ΔT_{wmax}(20.116 K)不相上下,所以U型热沉的壁面温度分布要比Z型热沉片均匀得多.当然,同一片热沉内的支管数目多少和支管间距大小都会影响到U型和Z型热沉的支管流量分配特征及壁面温度分布特征.就本文的仿真结果看,结论应该是:在其它条件相同的情况下,U型热沉的支管流量分配和壁面温度分布比Z型热沉均匀得多.

3 某大型热沉的改进设计

用HSDS软件对某大型热沉管网进行动态仿真发现,在其当前的热沉管网中,当热沉入口气氮总流量为1.958 38 kg/s时,热沉片1,2,3,4和12在流量自然分配的情况下,壁面温度分布不能满足均匀性指标要求.实施在线自动控制后,2和4的壁面温度分布仍不均匀.因此,单纯凭借流量调节,已不能保证整个热沉壁面温度分布达到均匀性指标要求,需对现有热沉进行改进设计.

主要做法是:原来是单进单出结构的1,4和12,进口位置不动,增加1个出口,同时调整原来出口位置,使1个进口、2个出口三者在圆周上均匀分布;对于原来是一进二出的热沉片2,原来所有进出口均不变,增加1个进口,该进口位于原来稳态情况下流量最小的支管旁边;对于原来是二进一出的热沉片3,原来所有进出口均不变,增加

1 个出口, 该出口位于原来稳态情况下流量最小的支管旁边. 新增进(出) 液总管与原来的进(出) 液总管完全相同, 新增各出液总管上的阀门与本片热沉原出液总管上的调节阀完全相同.

为了检验上述改进方案的实际效果, 针对上面的工况, 用 HSDS 软件对整个热沉管网进行了仿真. 结构改变前后整个热沉管网的流量分配和温度分布均匀程度对比见表 2 和表 3. 由表 2 可以清楚地看到, 结构改变后, 热沉片 1, 2, 3, 4 和 12 的支管流量分配均比结构改变前均匀得多. 结构改变后, 支管流量分配最不均匀的仍是热沉片 2, 但其 G_{max}/G_{min} 降低了 58%, 热沉片 3 的 G_{max}/G_{min} 降低了 62%, 热沉片 4 的 G_{max}/G_{min} 也降低了 17%. 所以, 结构改变后, 总流量的调节对于改变支管流量的作用大大增强, 这样通过改变各出口阀开度控制不同热沉片壁面温度分布效果比以前显著得多.

由表 3 可以看出, 结构改变后, 热沉片 2, 8 和 9 的壁面温度分布仍不均匀. 之所以会出现这种情况, 是因为结构改变后, 整个热沉的阻力分布发生了变化, 使得 2, 8 和 9 的流量大大减少. 其中 2 的流量减少了 20%, 8 的流量减少了 27%, 9 的流量也减少了 20%.

综合以上图表, 可得结论: 结构改变后, 各片热沉流量分配均匀程度和支管流量对于总流量变化的敏感程度都大大提高, 通过改变总流量控制热沉壁面温度分布的方法要比以前有效得多. 在流量自然分配的情况下, 由于结构改变后, 阻力分布发生变化, 从而使得各片的流量发生了明显变化, 因而改变结构并不意味着不调节阀门便可使各片热沉壁面温度分布自然满足均匀性要求.

为了检验结构改变后, 流量调节对控制热沉壁面温度分布的作用, 针对上面的工况, 用 HSDS 软件对实施控制后的热沉流量分配和壁面温度分布情况进行了仿真研究, 主要结果见表 4. 由表 4 可以看出, 结构改变后, 再进行控制, 各片热沉的 $\Delta T_{w\,max}$ 均比结构改变前有明显降低. 其中, 热沉片 1, 3, 4 和 12 的流量虽比结构改变前有所减少, 但其 $\Delta T_{w\,max}$ 却有减无增, 特别是热沉片 4, 其流量从 0.271 390 1 kg/s 减少到 0.260 019 5 kg/s, 其 $\Delta T_{w\,max}$ 却由 23.313 K 降低到 17.918 K. 所有这些都表明, 结构改变后, 各热沉片的支管流量分配和壁面温

表 **2**　结构改变前后支管流量分配对比

编号	结构改变前(t = 40 ks)				结构改变后(t = 40 ks)			
	G/(10 kg·s^{-1})	G_{max}/(10^3 kg·s^{-1})	G_{min}/(10^4 kg·s^{-1})	G_{max}/G_{min}	G/(10 kg·s^{-1})	G_{max}/(10^3 kg·s^{-1})	G_{min}/(10^4 kg·s^{-1})	G_{max}/G_{min}
1	2.120 23	2.916 0	8.644	3.373	3.005 38	2.974 2	16.361	1.818
2	3.887 96	6.156 1	7.623	8.076	3.100 11	2.589 9	7.670	3.377
3	3.139 64	5.006 6	6.965	7.188	4.269 18	3.743 0	13.636	2.745
4	2.042 24	2.352 6	7.193	3.271	2.690 36	3.106 6	11.472	2.708
5	2.962 65	7.316 5	43.197	1.694	2.159 92	5.349 7	31.473	1.700
6	0.400 00	2.736 1	26.346	1.039	0.292 36	2.000 0	19.255	1.039
7	2.120 67	6.449 7	37.536	1.718	1.551 10	4.671 6	27.600	1.693
8	0.267 54	1.238 3	7.524	1.646	0.195 11	0.939 1	5.473	1.716
9	0.376 98	2.100 9	20.911	1.005	0.274 00	1.528 3	15.197	1.006
10	0.704 83	3.010 7	28.995	1.038	0.512 66	2.195 2	21.095	1.041
11	0.704 83	3.010 7	28.995	1.038	0.512 66	2.195 2	21.095	1.041
12	0.856 23	3.198 5	5.408	5.914	1.020 57	2.552 6	10.352	2.466

注: G 为热沉片总流量.

表 **3**　结构改变前后热沉片流量分配和壁温分布

编号	结构改变前(t = 40 ks)				结构改变后(t = 40 ks)			
	G/(kg·s^{-1})	$T_{w\,mean}$/K	$T_{w\,max}$/K	$T_{wb\,max}$/K	G/(kg·s^{-1})	$T_{w\,mean}$/K	$T_{w\,max}$/K	$T_{wb\,max}$/K
1	0.300 538	198.166	11.073	8.599	0.212 023	201.065	21.179	15.894
2	0.310 010 1	201.782	27.922	21.444	0.388 796	201.674	28.001	21.587
3	0.426 918	198.599	14.870	9.525	0.313 964	202.096	22.477	16.762
4	0.269 036	200.645	17.409	13.701	0.204 224	204.153	28.527	21.402
5	0.215 992	198.504	11.875	10.617	0.296 265	197.016	8.685	7.773
6	0.029 236	198.856	10.458	8.227	0.040 000	197.330	7.726	6.058
7	0.155 150	196.966	8.014	6.511	0.212 067	195.949	5.939	4.792
8	0.019 511	207.390	23.222	11.409	0.026 754	202.127	15.471	8.821
9	0.027 400	204.408	21.744	18.959	0.037 698	201.330	15.963	13.941
10	0.051 266	200.104	13.250	11.149	0.070 483	198.198	9.698	8.139
11	0.051 266	200.104	13.242	11.149	0.070 483	198.199	9.698	8.138
12	0.102 057	197.014	8.514	4.808	0.085 623	199.853	20.088	8.226

注: $T_{w\,mean}$ 为平均壁温.

表4 结构改变前后在线自动控制法控制效果

编号	结构改变前(t=80 ks)					结构改变后(t=80 ks)				
	调节阀开度	G/(kg·s^{-1})	T_{wmean}/K	T_{wmax}/K	T_{wbmax}/K	调节阀开度	G/(kg·s^{-1})	T_{wmean}/K	T_{wmax}/K	T_{wbmax}/K
1	1.000	0.2814117	199.0641	16.2206	12.452	0.748	0.2428385	199.3671	13.5870	10.495
2	1.000	0.5127027	199.7493	23.5928	18.656	1.000	0.5360086	198.4751	20.3267	16.131
3	1.000	0.4165159	199.9051	18.7512	14.197	0.761	0.3767690	199.2964	16.2611	12.888
4	1.000	0.2713901	201.4913	23.3131	18.022	0.783	0.2600195	200.9146	17.9182	14.064
5	0.667	0.1421282	201.3200	17.8801	15.950	0.743	0.1778651	199.6644	14.3597	12.830
6	0.650	0.0172916	202.9382	17.5982	13.705	0.745	0.0232232	200.3452	13.0852	10.270
7	0.595	0.0750589	200.9209	15.5822	12.665	0.728	0.1153462	198.2569	10.5889	8.630
8	0.841	0.0210676	205.5851	21.158	10.594	0.912	0.0259380	202.4968	16.1602	9.161
9	0.830	0.0303473	203.3079	19.6846	17.080	0.900	0.0366096	201.5768	16.4304	14.320
10	0.673	0.0387923	202.3555	17.3922	14.604	0.718	0.0434183	201.3726	15.6008	13.070
11	0.673	0.0387654	202.3614	17.3998	14.614	0.718	0.0434172	201.3725	15.5828	13.054
12	1.000	0.1129085	197.6345	13.1928	6.894	0.671	0.0769270	198.5260	11.9031	6.345

度分布都趋于均匀,通过调节流量控制壁面温度分布的方法比结构改变以前更加有效,因而在线自动控制法的控制效果也比以前更好.

4 大型热沉热设计的一般步骤

结合前面的分析和计算结果,可以总结出借助HSDS软件进行大型热沉热设计的一般步骤:

1) 综合考虑各方面的因素,凭经验初步确定热沉分片方案;

2) 假定各热沉片均为单进单出的U型结构,初步选定出口调节阀;

3) 利用HSDS软件计算在热载荷最大的工况下,所有阀门全开时各片热沉的流量分配和壁面温度分布;

4) 如果若干热沉片的壁面最大温差远大于所要求的壁面最大温差,则需返回1),重新调整分片方案;

5) 若各热沉片的壁面最大温差与温度均匀性指标要求相差不多,则将其中不能满足要求的几片热沉各增加1个出口,同时调整原来的出口位置,使得2个出口在进口两侧对称布置;

6) 利用HSDS软件重新计算在热载荷最大的情况下,各调节阀全开时各热沉片的流量分配和壁面温度分布;

7) 若此时仍有部分热沉片的壁面温差过大,则继续利用HSDS软件确定各片壁面温度分布均满足要求时各出口调节阀的相对开度;

8) 根据此时各出口调节阀的阻力系数,并结合液氮系统对调节阀的具体要求,重新选定各出口调节阀,尽可能使得不调阀门,便可使各热沉片的壁面温度分布满足均匀性要求.

5 结 论

借助热沉管网动态仿真软件HSDS,可以实现热沉定量热设计,从而使得设计出来的热沉在流量自然分配的情况下壁面温度分布比较均匀;另外,此时通过调节流量可以有效地控制壁面温度分布,这样足以确保热沉壁面温度分布最终能够达到其均匀性指标要求.

参 考 文 献

[1] 王 浚. 环境模拟技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.

[2] 姜传胜. 大型空间环模器热沉管网仿真及热设计研究[D]. 北京: 北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系, 1999.

Quantitative Thermal Design of Heat Sinks in Large Space Simulators

JIANG Chuan-sheng WANG Jun

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics)

Abstract: The main factors influencing heat sink wall temperature distribution of large space simulators are analyzed. Fin-tube flow rate allocation of heat sinks with different structures are studied with heat sink dynamic simulation software HSDS. Simple and feasible improvements as for thermal design are made to promote the performance of the heat sinks in a large space simulator. Finally, the typical procedure to perform quantitative thermal design of heat sink with HSDS is provided.

Key words: space simulators; heat sink; simulation; thermal design