

热分析在光电模块可靠性设计上的应用研究

宋蓓莉^{1,2} 杨电^{1,2} 赵先明^{1,2} 徐红春^{1,2}

(¹武汉邮电科学研究院光纤通信技术和网络国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

²武汉电信器件有限公司, 湖北 武汉 430074

摘要 元器件计数法是目前国内外针对光电模块可靠性设计的通用方法,为了改善没有成熟光电模块产品就无法有效进行可靠性预计的问题,在产品阶段通过运用流体仿真分析软件以 XFP(10 G 小型可插拔)模块为例模拟分析其不同温度条件下的工作状态。完成了 XFP 模块的热分析,给出了 XFP 模块可靠性设计的优化办法,得到了 XFP 模块可靠性预计的具体量化结果,实现了在设计阶段针对光电模块产品可靠性进行定量分析。

关键词 光通信; 可靠性预计; 热分析; XFP 模块

中图分类号 TN802 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.070602

Application of Thermal Analysis on Reliability Design of Optoelectronic Modules

Song Beili^{1,2} Yang Dian^{1,2} Zhao Xianming^{1,2} Xu Hongchun^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunication, Wuhan, Hubei 430074, China

² Wuhan Telecommunication Devices Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Components of counting method is the general method of the reliability design of optoelectronic modules at home and abroad. In order to improve the problem that no mature optoelectronic modules the reliability prediction can not be effectively carried out, in product design stage by using Flow Simulation softwar, and working status of XFP (10G small form factor pluggable) module, for example, is simulation analyzed under different temperature conditions. The thermal analysis of XFP module is finished, and the optimization approach of the reliability design of XFP module is given. Then the specifically quantified of the reliability prediction of XFP module and is expected, the quantitative analysis of reliability for optoelectronic modules in the design phase is achieved.

Key words optical communications; reliability prediction; thermal analysis; XFP module

OCIS codes 060.4510; 160.2100; 230.2090; 230.0250

1 引言

目前国内外业界针对光电模块的可靠性设计的通用方法是元器件计数法^[1],根据光电模块的各类元器件的通用失效率及其使用数量,来预计光电模块失效率的方法。各类元器件的通用失效率则是通过加速老化实验、市场信息或制造商提供 3 种途径得到,其中加速老化实验是在光电模块完成样机制作后才能运用,市场信息则是在光电模块批量使用后运用,制造商提供的信息更是特定温度下元器件的通用失效率,这与元器件实际运行环境有很大差别,参考价值很少。此 3 种办法均是综合归纳元器件的通用失效率并继而对其元器件的可靠性做出评估,无法在设计阶段对光电模块的可靠性做出预计。在设计阶段对光电模块进行有效的可靠性预计分析,并依此优化光电模块的整体设计已成为新时期光电模块发展亟待解决的瓶颈问题。针对光电产品的热设计和可靠性方面,刘刚等^[2]对半导体激光器进行了热设计,刘媛媛等^[3]对半导体激光器的热应力进行了研究分析,黄艳飞等^[4]对电路板的布局进行了热设计。

本文重点针对高速小封装 XFP 模块(10 G 小型可插拔模块^[5],简称 XFP 模块)进行分析,在业界首创通

收稿日期: 2010-12-13; **收到修改稿日期**: 2011-03-18; **网络出版日期**: 2011-06-03

作者简介: 宋蓓莉(1979—),女,硕士,工程师,主要从事光电产品热设计、可靠性设计等方面的研究。

E-mail: blsong@wtd.com.cn

过三维流体仿真分析软件对其进行热分析,运用分析结果对其可靠性进行评估计算,对仿真模型计算的评估值进行归纳汇总分析,得到 XFP 模块可靠性设计的新方法,为类似光电模块可靠性设计改进提供了明确方向。

2 XFP 模块的热分析

以 XFP 模块为例,运用三维流体仿真分析软件,模拟其在环境温度 313 K(中心机房)和环境温度 328 K(野外环境)不同情况下的工作状态,进行研究分析,依靠不同模拟状态下的分析数据进行模块的可靠性优化设计。

2.1 建立仿真模型

建立仿真模型时有必要对一些不影响计算结果的结构、元器件等做简化等效处理。图 1 为 XFP 模块的仿真模型,主要由外壳、塑料座、激光器、探测器、电路板、元器件、光纤连接器、外部散热器等组成。

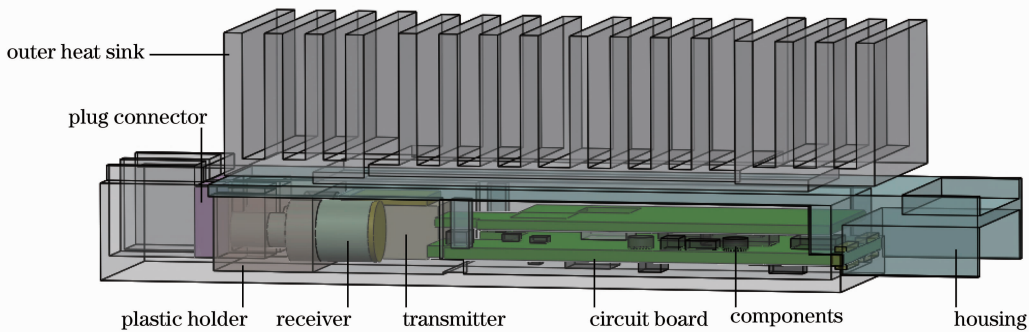


图 1 XFP 模块仿真模型

Fig. 1 Simulation model of XFP module

图中各部件材质,外壳为 ZAMAK3,塑料座和光纤连接器为 PSF,激光器和探测器材料为 AISI 304,电路板材料为 Epoxy,芯片材料为 Si,外部散热器材料为 2A12。各材质导热系数参见表 1 和图 2。

表 1 材料的导热系数

Table 1 Thermal conductivity of the materials

Material Name	ZAMAK3	AISI 304	Epoxy	PSF	2A12
Thermal Conductivity / [W/(m·K)]	113	16	Axial: 0.25 Radial: 16.5	0.26	190

2.2 环境温度 313 K 模拟状态下的热分析

2.2.1 参数设置

使用流体仿真软件的项目配置向导对初始条件进行详细设置:分析类型为内部分析,考虑传导和辐射,环境温度设定为 313 K,流体类型为空气,在外部壁面热边界条件中设置对流换热系数为 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[6]。需要注意的是在网格设置中必须手动设置最小间隙尺寸。网格最小间隙尺寸应小于模型中实体之间最小间隙尺寸的 1/3,如果网格最小间隙尺寸设置过小,会导致过度占用计算资源而无法得到结果,如果网格最小间隙尺寸设置过大,会导致计算结果失真。当设置的网格最小间隙尺寸大于实体之间的最小间隙尺寸,在仿真计算时,实体之间的最小间隙的特征将被忽略^[7]。

初始条件设置完成后,需要对模块施加热载荷:根据公式 $W = UI$,工作电流与工作电压的乘积是总功率,理论设想模块通电工作时其总功率全部转化为热耗,各主要元器件的热耗值参见表 2。

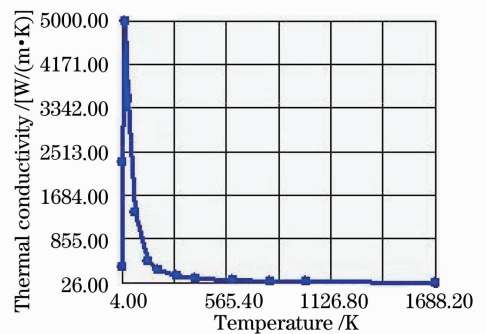


图 2 Si 热系数随温度变化的曲线图

Fig. 2 Curve diagram of the thermal conductivity of Si changing with the temperature

表2 元器件热耗

Table 2 Heat consumption of the components

Heating component	Receiver	Transmitter	EML driver	CDR chip1	CDR chip2	Schottky power rectifier	Inductor	DC-DC converter
Heat consumption /W	0.15	1.1	1.2	0.23	0.215	0.05	0.05	0.05

2.2.2 计算结果分析

流体仿真软件按照有限体积法^[8]进行计算,根据计算结果,模块外壳最高温度为 324 K,而模块其他各元器件温度则各不相同,热分布参见图 3。表 3 列出了部分主要元器件温度。模块的中心截面热分布参见图 4。

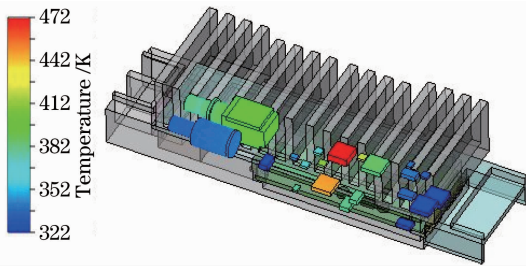


图3 元器件热分布(环境温度 313 K)

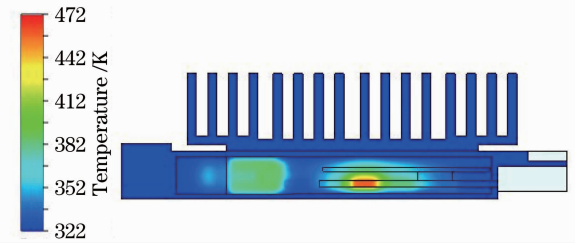
Fig. 3 Heat distribution of the components
(ambient temperature is 313 K)

图4 中心截面热分布(环境温度 313 K)

Fig. 4 Heat distribution of the central cross-section
(ambient temperature is 313 K)

对图 3,4 及表 3 进行分析,发现模块中温度最高的元器件为激光器驱动芯片,其温度为 472 K,与模块外壳温差达到 148 K,表明 XFP 模块散热很不充分,并且表 3 中的各元器件温度均超过最高许可温度。

表3 部分主要元器件温度(环境温度 313 K)

Table 3 Temperatures of some main components
(ambient temperature is 313 K)

Component name	Temperatures /K
Transmitter	397
Electroabsorption modulated laser (EML) driver	472
Clock and data recovery (CDR) chip1	386
CDR chip2	448
Operation amplifier 1	371
Schottky power rectifier	381
Operation amplifier 3	421
Operation amplifier 4	412
Operation amplifier 5	370
DAC	382
Operation amplifier 6	462
Buffer	379

表4 部分主要元器件温度(环境温度 328 K)

Table 4 Temperatures of some main components
(ambient temperature is 328 K)

Component name	Temperatures /K
Transmitter	411
EML driver	483
CDR chip1	399
CDR chip2	459
Operation amplifier 1	384
Schottky power rectifier	393
Operation amplifier 3	433
Operation amplifier 4	424
Operation amplifier 5	382
DAC	394
Operation amplifier 6	473
Buffer	392

2.3 环境温度 328 K 模拟状态的热分析

除了在设置环境温度时将温度值设定为 328 K 之外,其余设置与环境温度为 313 K 模拟状态时的设置完全相同。根据计算结果,模块外壳最高温度为 339 K,模块其他各元器件温度值同时发生变化,热分布参见图 5。表 4 列出了此工作状态下部分主要元器件温度。模块的中心截面热分布参见图 6。

对图 5,6 及表 4 进行分析,发现此温度工作状态下模块中激光器驱动芯片的温度依旧最高,其温度为 483 K,与模块外壳温差达到 144 K,表明 XFP 模块散热依旧很不充分。

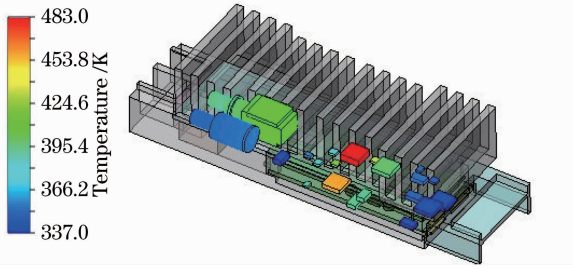


图5 元器件热分布(环境温度 328 K)

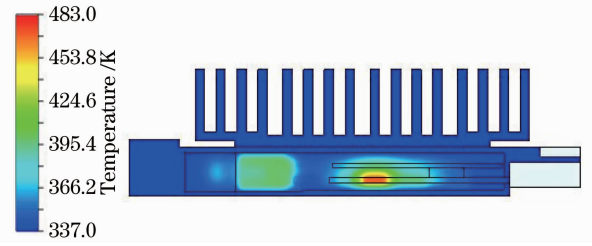
Fig. 5 Heat distribution of the components
(ambient temperature is 328 K)

图6 中心截面热分布(环境温度 328 K)

Fig. 6 Heat distribution of the central cross-section
(ambient temperature is 328 K)

3 XFP 模块的可靠性预计

3.1 MTBF 的概念

平均无故障工作时间(MTBF)是表征光电模块可靠性的一个重要参数,这个时间一般以“小时”为单位来计算,MTBF 这个技术指标越高,说明光电模块的可靠性越好,出故障的可能性越低^[9]。

3.2 经验公式

根据行业国际电子设备可靠性标准^[1,10~13],得到以下经验公式。

对于一般情形的元器件稳态失效率 λ_{SS_i} ,可假定

$$\lambda_{SS_i} = \lambda_{G_i} \pi_{Q_i} \pi_{S_i} \pi_{T_i}, \quad (1)$$

式中 λ_{G_i} 为 i 类型元器件的一般稳态失效率, π_{Q_i} 为 i 类型元器件的质量因子, π_{S_i} 为 i 类型元器件的应力因子, π_{T_i} 为稳态正常使用下的 i 类型元器件温度因子。本文每个单独元器件的 λ_{G_i} 均由制造商给出,设定质量因子 π_{Q_i} 与应力因子 π_{S_i} 均为 1.0,而温度因子 π_{T_i} 可表示为

$$\pi_{T_i} = \frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1} \right), \quad (2)$$

式中 T_0 为实验温度, T_1 为运行温度,是热分析计算得到的元器件温度, E_a 为激活能, $k = 8.62 \times 10^{-5}$, 为玻耳兹曼常数。元器件的实验温度 T_0 , 激活能 E_a 和一般稳态失效率 λ_{G_i} 见表 5。

表5 部分主要元器件的可靠性预计参数

Table 5 Parameters of reliability prediction of the components

Component name	T_0 /K	E_a	λ_{G_i}
Transmitter	349	0.62	291
EML driver	358	0.7	5
CDR chip1	348	0.35	40
CDR chip2	363	0.35	60
Operation amplifier 1	347	0.8	25.5
Schottky power rectifier	353	0.7	9
Operation amplifier 3	354	0.8	25.5
Operation amplifier 4	353	0.8	25.5
Operation amplifier 5	346	0.8	25.5
DAC	351	0.8	28.8
Operation amplifier 6	357	0.7	5
Buffer	348	0.7	2.9

模块稳态失效率 λ_{SS} , 可以计算为对于模块中所有元器件失效率的和,与模块环境因子相乘:

$$\lambda_{SS} = \pi_{E_i} \sum_{i=1}^n N_i \lambda_{SS_i}, \quad (3)$$

式中 n 为模块元器件中不同元器件类型的数目, N_i 为 i 类型元器件种类的数目, π_{E_i} 为 i 类型模块环境因子。在此平均无故障工作时间可表示为

$$f_{MTBF} = 1/\lambda_{SS}. \quad (4)$$

3.3 环境温度 313 K 和 328 K 两种模拟状态下 XFP 模块的可靠性预计

将元器件的实验温度 T_0 、激活能 E_a 、一般稳态失效率 λ_{G_i} 和热分析的计算结果运行温度 T_1 代入(2)式得到温度因子 π_{T_i} ，然后依次按照(1)式、(3)和(4)式进行测算，得到环境温度 313 K 模拟状态及 328 K 模拟状态下 XFP 模块的平均无故障工作时间分别为 17931.7 h 和 9061.0 h，XFP 模块平均无故障工作时间较短，说明 XFP 模块在工作时极易失效。

4 散热优化分析和计算

4.1 散热优化的热分析

对热分析结果数据和经验公式测算结果数据研究分析，发现 XFP 模块必须进行散热优化后才能正常工作。XFP 模块内空气流动速度很低，自然对流换热对元器件散热的贡献很低，元器件主要以热辐射方式散热，但根据图 3~6 和表 3,4 显示，部分主要元器件与外壳温差较大，说明辐射方式散热满足不了 XFP 模块散热需求。

为了能将温度较高的元器件的热量迅速散到外壳上，需要在元器件与外壳间提供一条低热阻通路^[14,15]。根据 XFP 模块小封装的结构特点，可以通过在元器件与外壳之间填充散热胶建立低热阻通路，散热胶富有弹性，尺寸大小可灵活变化，对 XFP 模块非常适用。元器件与外壳的间距各有不同，若间距较大，堆积较厚的散热片既不利于散热，又不利于结构的稳定性，此时需要在外壳内对应需要散热的元器件的位置增加一定高度的凸台结构，减小外壳与元器件间距后再贴散热胶。

根据上述分析，XFP 模块做如下优化：

1) 在对应激光器驱动芯片的外壳上增加一定高度的凸台结构；2) 在凸台与激光器驱动芯片以及电路板之间增加散热胶；3) 在激光器热沉面与外壳之间增加散热胶。

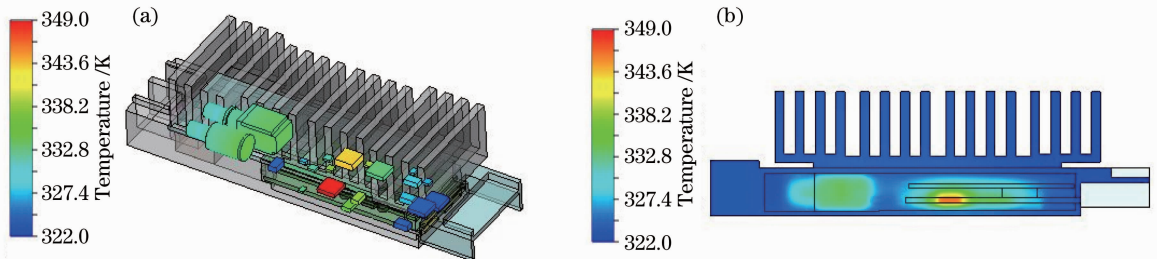


图 7 优化后的元器件(a)和中心截面(b)热分布(环境温度 313 K)

Fig. 7 Optimized heat distribution of the components (a) and central cross-section (b) (ambient temperature is 313 K)

根据提出的优化方案具体操作后[选用的散热胶导热系数为 $1.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]，优化后的仿真模型分别在环境温度 313 K 模拟状态和环境温度 328 K 模拟状态下重新进行计算，计算结果见图 7,8。可以发现，在环境温度 313 K 的模拟状态下，模块元器件的最高温度为 349 K；在环境温度 328 K 的模拟状态下，模块元器件的最高温度为 363 K；优化后仿真计算结果与优化前仿真计算结果相比均有大幅降低，同时可以发现在模拟状态下，模块元器件的最高温度点由激光器驱动芯片转移到时钟数据恢复芯片 2 上。

表 6 为优化前后 XFP 模块的部分主要元器件温度，从图中可以发现优化前后 XFP 模块的部分主要元器件

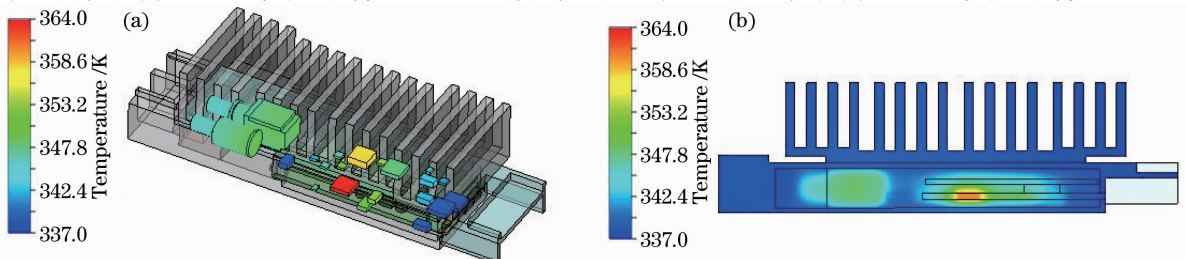


图 8 优化后的元器件(a)和中心截面(b)热分布(环境温度 328 K)

Fig. 8 Optimized heat distribution of the components (a) and central cross-section (b) (ambient temperature is 328 K)

温度存在很大差异。313 K 环境温度模拟状态和 328 K 环境温度模拟状态下,模块优化后降幅最大的均是激光器驱动芯片,313 K 环境温度条件下激光器驱动芯片温度从 472 K 降到了 344 K,328 K 环境温度条件下激光器驱动芯片温度从 483 K 降到了 358 K。据此分析,优化后的 XFP 模块散热效果显著。

表 6 优化前后部分主要元器件温度对比

Table 6 Contrast of some main components temperatures before and after optimization

Main component	Component temperature			
	Ambient temperature 313 K		Ambient temperature 328 K	
	Not optimized	Optimized	Not optimized	Optimized
Transmitter	334	397	349	411
EML driver	344	472	358	483
CDR chip 1	333	386	348	399
CDR chip 2	349	448	363	459
Operation amplifier 1	332	371	347	384
Schottky barrier diode	338	381	353	393
Operation amplifier 3	339	421	354	433
Operation amplifier 4	338	412	353	424
Operation amplifier 5	332	370	346	382
DAC	337	382	351	394
Operation amplifier 6	342	462	357	473
Buffer	333	379	348	392

4.2 散热优化后的可靠性预计

根据散热优化的热分析结果和经验公式,计算得出环境温度 313 K 模拟状态和环境温度 328 K 模拟状态下 XFP 模块的平均无故障工作时间分别为 893294.7 h 和 180904.4 h。从模块优化前后的数据对比可以看出:1) 在环境温度 313 K 模拟状态下,散热优化后的模块失效率较未进行散热优化设计的模块明显降低,其降幅为 97.99%,而反应产品平均寿命的平均无故障工作时间则明显延长,较未进行散热优化的模块延长 48.82 倍。2) 在环境温度 328 K 模拟状态下,散热优化后的模块失效率较未进行散热优化设计的模块明显降低,其降幅为 94.99%,而反应产品平均寿命的平均无故障工作时间也明显延长,较未进行散热优化的模块延长 18.97 倍。

5 结 论

通过运用流体仿真分析软件对 XFP 模块进行热分析,可以快速得出 XFP 模块的热分布并进行可靠性优化设计,并据此分析结果评估测算 XFP 模块的可靠性;这种崭新的解决方案,使我们能够在预研阶段判知模块热分布及可靠性,对缩短产品研发周期,降低产品研发成本起到了极大的推动作用,同时也有待科研人员进一步研究开发和论证分析。

参 考 文 献

- 1 Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment. TR-332[S]. 1997. 6-1~6-5
- 2 Liu Gang, Zhu Chen, Lin Jixiang. Numerical simulation based on computational fluid dynamics method for a semiconductor laser external heat dissipation design[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **37**(s1): 81~85
刘刚,朱辰,林佶翔. 基于计算流体力学方法的半导体激光器外部散热设计的数值模拟[J]. *中国激光*, 2009, **37**(s1): 81~85
- 3 Liu Yuanyuan, Wang Jun, Li Wei *et al.*. Thermal analysis of high power diode laser arrays with hundred-watt continuous-wave output power[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(9): 091403
刘媛媛,王俊,李伟等. 连续百瓦级高功率半导体阵列激光器热效应分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(9): 091403
- 4 Huang Yanfei, Zhang Rongbiao, Ling Wanshui *et al.*. The analysis of heat reliability of the key component on PCB board [J]. *Microcomputer Information*, 2005, **21**(11-2): 164~165
黄艳飞,张荣标,凌万水等. 基于有限元的 PCB 板上关键元件热可靠性分析[J]. *微计算机信息*, 2005, **21**(11-2): 164~165
- 5 SFF Committee. INF-8077i. 10 Gigabit Small Form Factor Pluggable Module[S/OL]. http://www.xfpmsa.org/XFP_

Rev4_5_SFF_INF_8077i[1]. pdf

- 6 Zhao Zhennan. Heat Transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. 13
赵镇南. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. 13
- 7 Solidworks Flow Simulation 2009 Tutorial[Z]. 2009. 2~5
- 8 李人宪. 有限体积法基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. 1~13
- 9 Feng Jingdong, Lai Ping. Discussion on actual meaning and calculating method of MTBF for electronic product[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2008, (2): 15~24
冯敬东, 来 萍. 电子产品 MTBF 的意义及工程化计算方法[J]. *电子产品可靠性与环境实验*, 2008, (2): 15~24
- 10 Xiao Hong, Tian Yu, Cai Shaoying *et al.*. Research progress on reliability of foreign military electronic components[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2005, (s0): 184~188
肖 虹, 田 宇, 蔡少英 等. 国外军用电子元器件可靠性技术研究进展[J]. *电子产品可靠性与环境实验*, 2005, (s0): 184~188
- 11 Generic Reliability Assurance Requirements for Optoelectronic Devices Used in Telecommunications Equipment. GR-468-CORE[S]. 2004. 3~56
- 12 Methods and Procedures for System Reliability Analysis (a module of RQGR, FR-796), SR-TSY-001171[S]. 1989
- 13 Reliability Prediction of Electronic Equipment. MIL-HDBK-217F[S]. Griffiss Air Force Base, 1991
- 14 Thermal Design Handbook for Reliability of Electronic Equipment. GJB/Z 27-92[S]. Military Standard of The People's Republic of China, 1993. 3~24
电子设备可靠性热设计手册. GJB/Z 27-92[S]. 中华人民共和国国家军用标准, 1993. 3~24
- 15 Thermal Design Criteria of Electronic Installations. QJ 1474-88[S]. Aerospace Industry Ministry Standards of The People's Republic of China, 1988. 1~11
电子设备热设计规范. QJ 1474-88[S]. 中华人民共和国航天工业部部标准, 1988. 1~11