

GigaDevice Semiconductor Inc.

GD32H7xx 系列热特性设计指南

应用笔记

AN166

1.1 版本

(2024 年 3 月)

目录

目录.....	2
图索引.....	3
表索引.....	4
1. 前言.....	5
2. 选择正确热管理方法.....	6
2.1. 使用系统散热能力曲线(SYSTEM THERMAL CHARACTERISTIC)评估系统热失控.....	6
2.1.1. 耗散功率 (Power Dissipation)	6
2.1.2. 系统热阻 (Theta_j_sys)	6
2.1.3. 使用 STC 评估系统热失控.....	7
2.1.4. 改善系统散热常用方法.....	8
3. 实例量测.....	10
3.1. 测试环境.....	10
3.2. 实例量测对比.....	10
3.2.1. 供电方式、环境温度、封装对比.....	10
3.2.2. 主频对温升的影响.....	11
3.2.3. 系统散热设计对温升的影响.....	12
4. 设计实施建议.....	15
5. 版本历史.....	16

图索引

图 2-1. T_J-P_D 曲线	6
图 2-2. 系统散热能力曲线(STC).....	7
图 2-3. STC 直线温度平移	7
图 2-4. STC 和 T_J-P_D 交点绘制	8
图 2-5. 系统热失控情形.....	8
图 3-1. 实验室测试硬件.....	10
图 3-2. STC 直线绘制.....	12
图 3-3. 绘制 T_J-P_D 曲线.....	13
图 3-4. 平移 STC 确定系统热失控.....	13

表索引

表 2-1. GD32H7xx 系列电源设计	9
表 3-1. 封装、环境温度、电源模式对温升的影响	11
表 3-2. 主频对温升的影响($T_A = 85^{\circ}\text{C}$).....	11
表 3-3. 测试板 Θ_{j_sys} 计算.....	12
表 5-1. 版本历史.....	16

1. 前言

本文是专门为开发 GD32H7xx 系列的工程设计人员提供, 主要介绍了 MCU 温度管理的影响因素、散热方法以及相关基本概念等。随着半导体技术的发展, 芯片内部电路集成度越来越高, 随之而来的就是芯片的发热密度提升。随着芯片的结温 (Junction Temperature, T_J) 的上升, 器件的寿命就会下降, 故障率也会随之增加。因此, 我们会规定芯片的最大允许结温, 芯片必须工作在最大允许结温以下, 才能保证其性能和寿命。

本文主要介绍 GD32H7xx 系列高性能、高功耗使用场景下的热特性以及温度管理方案。

2. 选择正确热管理方法

2.1. 使用系统散热能力曲线(System Thermal Characteristic)评估系统热失控

2.1.1. 耗散功率 (Power Dissipation)

设备使用的电流有两种:

- 1、静态电流(Static Current):也称为泄漏电流,取决于工艺(Process)、电压(Voltage)和结温(T_J),但不依赖于活性(活跃度)(Activity);
- 2、动态电流(Dynamic Current)依赖于工艺(Process)、电压(Voltage)和活性(活跃度)(Activity),但不依赖于结温(T_J) (至少近期研究表明)。

使用公式可表示为:

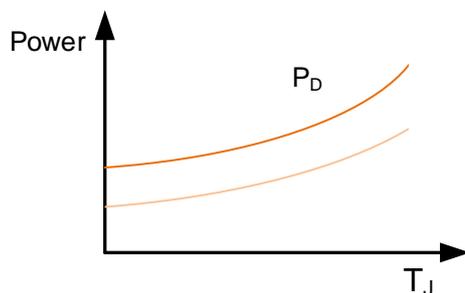
$$I_{\text{Total}}(P,V,T_J,\text{Activity})=I_{\text{static}}(P,V,T_J)+I_{\text{Dynamic}}(P,V,\text{Activity}) \quad (2-1)$$

静态泄漏电流会随结温上涨呈指数增长趋势, 而动态电流则不升高。

耗散功率随 PVTA 条件的变化而变化, 可以计算为设备上产生的电压和消耗的平均电流的乘积。

在高性能高功耗 MCU 系统中, 当程序保证固定时(即认为动态电流基本平衡不变时), 可认为耗散功率只与 T_J 有关。环温和系统散热能力的改变最终影响的还是 T_J , 进而导致其静态电流呈指数变化。如 [图2-1. \$T_J\$ - \$P_D\$ 曲线](#) 所示:

图 2-1. T_J - P_D 曲线



2.1.2. 系统热阻 (Θ_{j_sys})

当芯片运行, 结温(T_J)升高于环境温度(T_A), 其温差可计算为耗散功率和系统热阻的乘积:

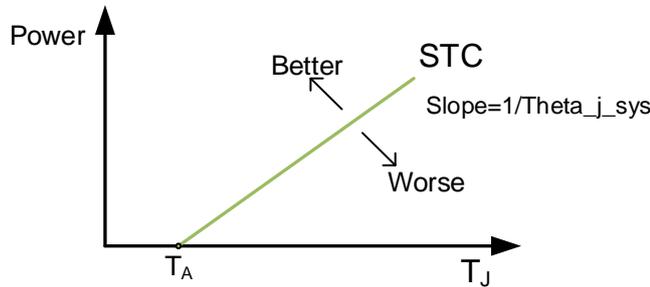
$$T_J=T_A+P_D\times\Theta_{j_sys}<T_{J_max} \quad (2-2)$$

在公式中, Θ_{j_sys} 是一个复杂系数的简化, 它不是芯片特性, 而是系统特性(设备+其他组件+电路板+外壳+其他散热条件)。结温必须保持低于上式给出的最大目标。

Theta_{j_sys} 可以体现系统的散热能力，我们可以用系统散热能力(System Thermal Characteristic, STC)来表示:

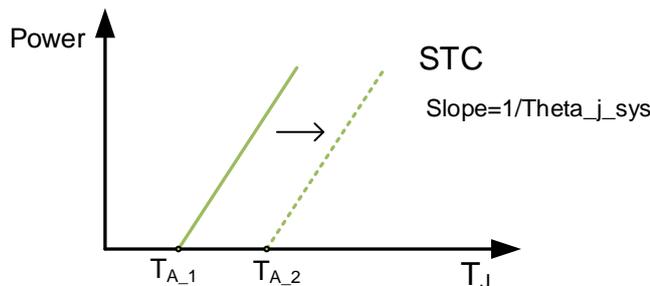
$$STC = \frac{(T_J - T_A)}{\Theta_{j_sys}} \quad (2-3)$$

图 2-2. 系统散热能力曲线(STC)



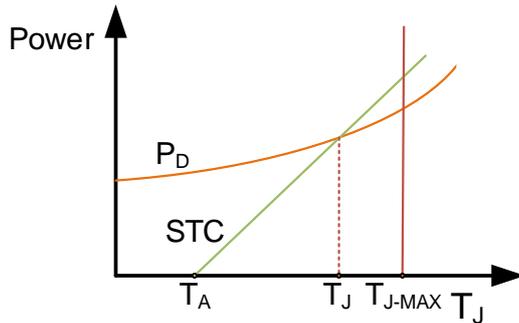
[图 2-2. 系统散热能力曲线\(STC\)](#)中，斜率越大表示系统散热能力越好，斜率越小，表示系统散热能力越差。它代表着所设计的系统可耗散热功率的能力，理想情况下，当系统散热方式固定时，STC 的斜率就固定不变。环境温度上升导致芯片启动温度上升，可将 STC 曲线进行左右平移，得到不同温度下启动的 STC，如[图 2-3. STC 直线温度平移:](#)

图 2-3. STC 直线温度平移



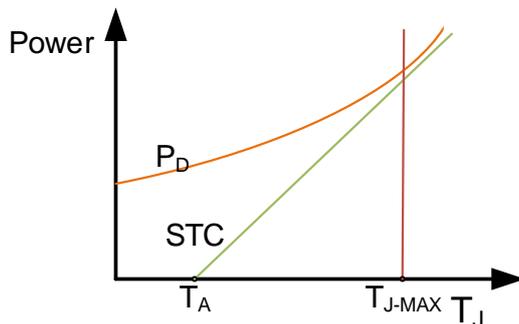
2.1.3. 使用 STC 评估系统热失控

当系统散热方式确定，程序固化时，可以使用 STC 评估系统是否存在热失控。如[图 2-4. STC 和 T_J-P_D 交点绘制](#)所示，当 STC 与 T_J-P_D 曲线存在交点，且交点 T_J < T_{J-MAX}，则认为没有热失控。它代表系统的散热能力与芯片实际的耗散功率的匹配度。

图 2-4. STC 和 T_J - P_D 交点绘制

但若图线不存在交点或交点 $T_J < T_{J-MAX}$ ，如 [图 2-5. 系统热失控情形](#) 所示，则认为发生热失控。

图 2-5. 系统热失控情形



因此可以通过如下思路改善，使交点位于安全线内：

- 1、改善散热条件，使 STC 斜率变大；
- 2、降低或限制芯片使用的环境温度，使 STC 向左平移；
- 3、通过改变程序内容，降低功耗，使 T_J - P_D 曲线向下移动。

2.1.4. 改善系统散热常用方法

一般来说，芯片工作在较高的温度下，功耗将会提升且可靠性会降低。为了芯片更好的工作，保证芯片可靠性，需要选择正确的芯片散热方法。

选择合适的芯片封装：随着内部芯片尺寸的增加，可以将热量散发到更大的面积上，提高热量的耗散速度，热阻也会随之降低。外部封装的改变会导致散热面积与散热路径的改变，也会导致热阻的改变。在选择芯片封装时，除了出于价格、布板、安装的考虑外，也应将封装的散热性能考虑在内，尤其是将芯片使用在大功耗的场合，可以选择散热好的芯片封装。

外部环境的改变：外部环境的改变（如温度、风速、海拔等）也会导致系统热阻的改变，海拔的变化会导致空气压力的变化，进而导致芯片散热能力的变化。

外加装置散热：为芯片添加散热片、增加风扇散热都是很好的散热方式。

合理布板散热：在不添加外部装置为芯片散热的情况下，芯片产生的热量大多是通过 PCB 散发，因此良好的布板布局对于芯片散热有着至关重要的影响。对于需要散热的芯片，在芯片下

方 PCB 大面积铺铜、打散热过孔可有效散热，增加铺铜厚度以及增加板子层叠数量（推荐四层及以上）也可增加散热效率，同时，将散热量较大的芯片分开布局也可增加散热效率。

合理的电源设计：GD32H7xx 系列在部分封装增加了 SMPS 模块用于提高芯片电源的转化效率，大大降低了温升以及功耗。也可以直接通过外灌电源到 $V_{0.9V}$ 电源域的方式来减小温升。通过设计合理的电源模式，可达到温升与性能的均衡分配，但要求所有的工况结温不允许超过 125°C 。如[表 2-1. GD32H7xx 系列电源设计](#)说明：

表 2-1. GD32H7xx 系列电源设计

Mode	Description
1	LDO 供电模式，电源转换效率低，温升明显。
2	SMPS 供电模式，电源转换效率高，温升小
6	旁路模式，功耗主要来自外灌到 V _{CORE} 的电流，温升小，但要保证外灌源的稳定可靠

适宜的主频：在芯片使用时应使用内部高精度温度传感器检测芯片温度。温度过高，要采取措施，比如降频等。

3. 实例量测

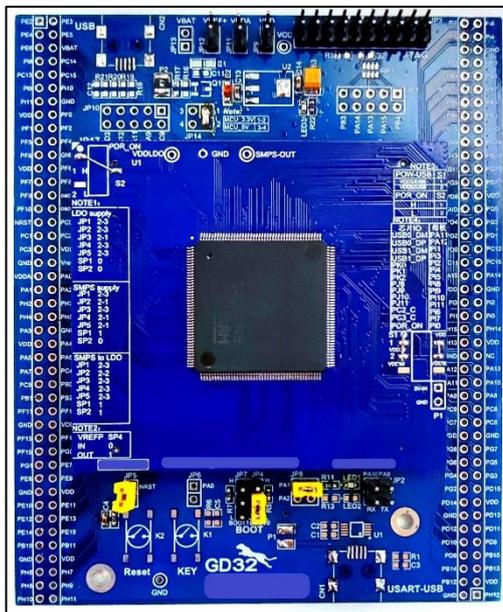
为更好的展示芯片温升与供电方式、环境温度、主频等的关系，分别在 GD32H7xx 系列不同封装的芯片设计比对实验。

3.1. 测试环境

本文设计的热特性实验使用环境如下：

- 1、硬件使用子主板设计，母板采用通用接口，设计必要的通讯、电源接口，子板搭载芯片，如 [图 3-1. 实验室测试硬件](#)；
- 2、实验使用内部高精度温度传感器的读值作为芯片结温，以不超过结温作为芯片正常可靠工作的依据。
- 3、除环境温度对比实验外，其余实验的环境温度都设置为 **datasheet** 所规定的最大工作温度 85°C。
- 4、所有数据来源于批量样本中的极大值样本，仅供参考。

图 3-1. 实验室测试硬件



3.2. 实例量测对比

3.2.1. 供电方式、环境温度、封装对比

通过对不同供电方式、环境温度、封装的改变，来观察对芯片温升的影响。

其中，主频 600 MHz，所有外设全部打开， $V_{DD} = V_{DDA} = V_{DDSMPS} = V_{DD33USB} = 3.3V$ (GD32H7xx 输入电压域宽泛，实际电源电压越低，功耗越低，本文以 3.3V 为例)，电源设置为 Mode 2、

Mode 6。使用 Mode 6 时，单独灌入 $V_{CORE} = 0.9V$ 。测试系统无其他散热方式。实验以内部高精度温度传感器读值作为 T_J 值，得出实验数据如[表 3-1. 封装、环境温度、电源模式对温升的影响](#)：

表 3-1. 封装、环境温度、电源模式对温升的影响

封装	$T_A / ^\circ C$	Mode	$T_J / ^\circ C$	I_{VIN} / mA	I_{CORE} / mA
BGA176	25	6	32	7	190
	85	6	100	7	324
LQFP176	25	2	30	73	-
		6	29	7	187
	85	2	95	140	-
		6	92	7	246
	105	2	120	218	-
	LQFP144	25	6	31	7
85		6	92	7	248
LQFP100	25	6	30	7	176
	85	6	94	7	222
BGA100	25	6	31	7	182
	85	6	94	7	245

注意：

- 1、 I_{VIN} 为芯片 $V_{IN} = V_{DD} + V_{DDA} + V_{DDSMPS} + V_{DD33USB}$ 输入电流， I_{CORE} 为 Mode 6 V_{CORE} 引脚单独灌入电流。使用 Mode 2 时，芯片输入电流全部来源于 V_{IN} ，使用 Mode 6 时，芯片输入电流大部分来源于 V_{CORE} 灌入电流，少量来源于 V_{IN} 。
- 2、在没有优良的散热条件时，若使用最高主频 600MHz，仅建议采用上述表 3-1 中各封装对应的供电模式。系统散热设计对温升影响可参考 3.2.3 小结。

3.2.2. 主频对温升的影响

GD32H7xx 系列在高功耗运行时，若使用 Mode 1 供电模式，会因为环温较高时内部 LDO 发热导致结温上升明显，因此需通过降低主频来保证芯片安全。

本实验通过在环温(T_A)85°C 时，使用 Mode 1 进行降频实验来观察主频对温升的影响。其中，所有外设全部打开， $V_{DD} = V_{DDA} = V_{DDSMPS} = V_{DD33USB} = 3.3V$ ，电源设置为 Mode 1，系统无其他散热方式。结果如[表 3-2. 主频对温升的影响](#)所示：

表 3-2. 主频对温升的影响($T_A = 85^\circ C$)

封装	主频 / MHz	$T_J / ^\circ C$	I_{VIN} / mA
BGA176	340	117	345
	400	125	412
LQFP176	460	113	266
	520	118	295
LQFP144	340	107	278
	400	109	300
LQFP100	460	109	252

封装	主频 / MHz	T _J / °C	I _{VIN} / mA
LQFP100	520	116	280
BGA100	340	109	230
	400	111	254

3.2.3. 系统散热设计对温升的影响

不同系统 PCB 设计对温升影响较大，下面展示了使用 BGA176 封装做样本，使用 STC 评估系统散热性能。

本小结使用相同一颗芯片（来源于批量样本中筛选的功耗极大值）分别搭载在内部测试板 A 和内部测试板 B 上，使用相同程序，量测并描绘 STC 与 T_J-P_D 曲线。

其中，主频设置为 600 MHz，所有外设全部打开，V_{DD} = V_{DDA} = V_{DDSMPS} = V_{DD33USB} = 3.3V，电源设置为 Mode 1，系统主要通过 PCB 散热。

步骤如下：

1、确定两块测试板 STC

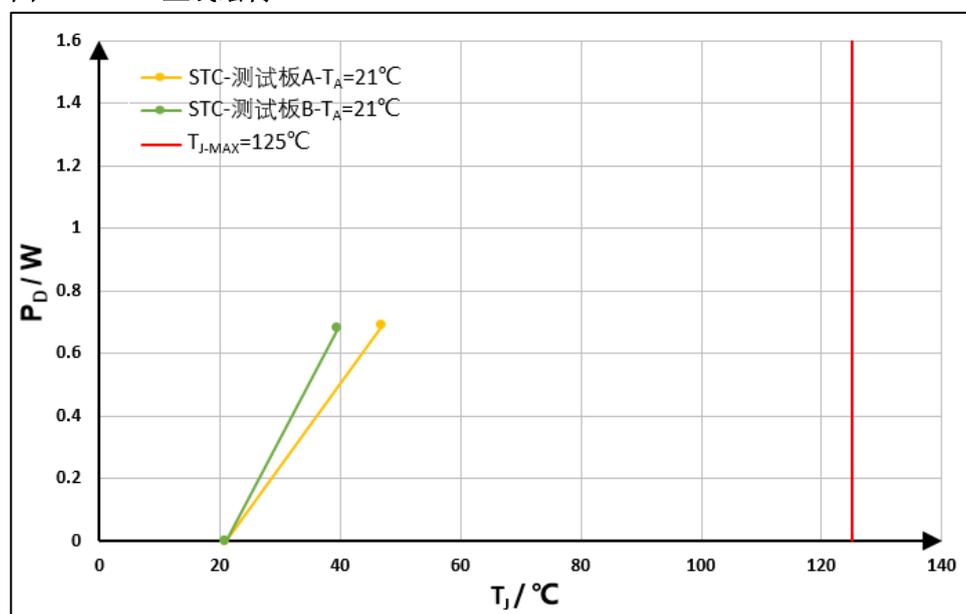
在常温下启动，通过量测内部测试板输入电流和监测 T_J，可得到 Theta_{j_sys}，如[表 3-3. 测试板 Theta_{j_sys} 计算](#)所示：

表 3-3. 测试板 Theta_{j_sys} 计算

系统板	T _A / °C	T _J / °C	I _{VIN} / mA	P _D / W	Theta _{j_sys}
测试板 A	21	47	254	0.838	31.02
测试板 B	21	39.6	206	0.68	27.36

按上表可绘制两块系统板 STC，如[图 3-2. STC 直线绘制](#)：

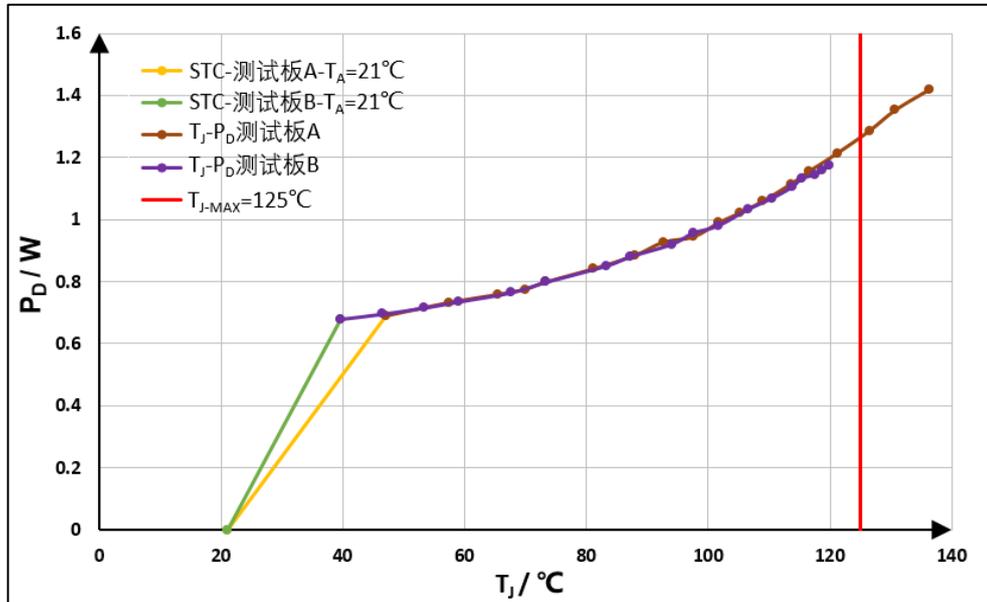
图 3-2. STC 直线绘制



2、绘制 T_J - P_D 曲线

当测试程序固定后,我们认为 P_D 变化只与 T_J 的改变有关, 因此可以通过改变环境温度 T_A 来改变 T_J 。将测试板置于高温环境, 开机后时刻监控其 T_J 温升情况与 P_D 变化, 并绘制 T_J - P_D 曲线。如 [图 3-3. 绘制 \$T_J\$ - \$P_D\$ 曲线](#) 所示:

图 3-3. 绘制 T_J - P_D 曲线

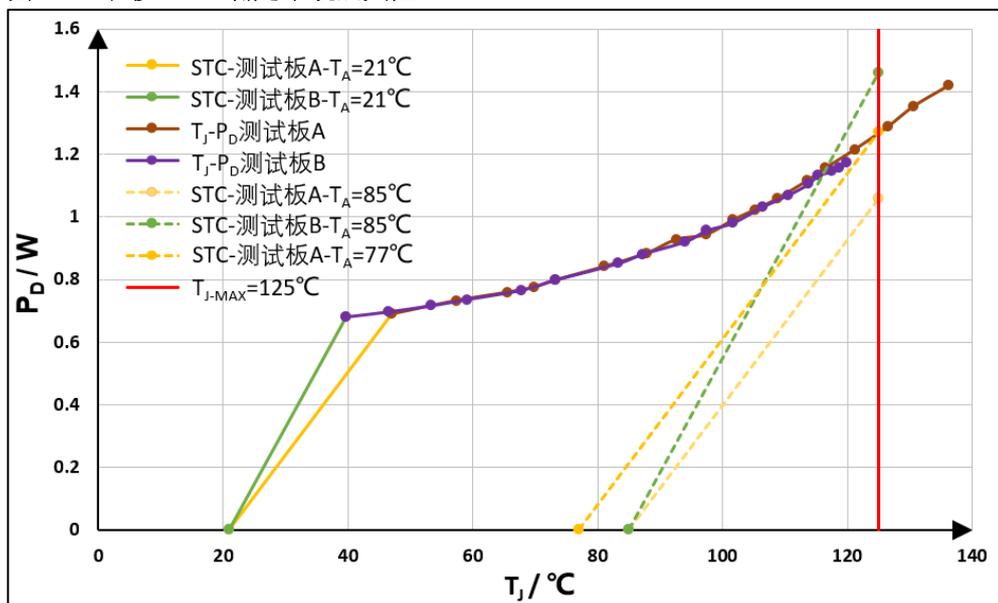


由图中可见, 同一芯片置于不同测试板, 绘制的 T_J - P_D 曲线重合, 说明程序固定后, P_D 基本只与 T_J 有关, 系统板设计改变影响的是散热情况, 最终影响的还是 T_J 改变。

3、平移 STC 确定系统热失控

将两条 STC 直线通过坐标轴平移的方式预测高温情况, 以环境温度 $T_A = 85^\circ\text{C}$ 为例, 如 [图 3-4. 平移 STC 确定系统热失控](#) 所示:

图 3-4. 平移 STC 确定系统热失控



GD32H7xx 系列热特性设计指南

如上图所示，测试板 A 向右平移 STC 直线至 $T_A = 85^\circ\text{C}$ 时，发现与 $T_J\text{-}P_D$ 曲线在 $T_J < 125^\circ\text{C}$ 范围内并无交点，则认为该测试板的散热性能表现不好，高温 85°C 存在热失控风险。将 STC 往左返回，直至与 $T_J\text{-}P_D$ 曲线存在交点，此时可观察直线底端 $T_A \approx 77^\circ\text{C}$ ，则可认为该测试板在环温约 77°C 时， $T_J = 125^\circ\text{C}$ ，使用该测试板环境温度不应超过 77°C 。

如上图所示，测试板 B 向右平移 STC 直线至 $T_A = 85^\circ\text{C}$ 时，发现与 $T_J\text{-}P_D$ 曲线在 $T_J < 125^\circ\text{C}$ 范围内存在交点，则认为该测试板的散热性能表现良好，高温 85°C 未发生热失控。

4. 设计实施建议

为保证开发者在使用 GD32H7xx 系列过程中的系统可靠性，可作如下建议：

- 1、PCB 保证覆铜完整性情况下多在发热处打散热过孔，且发热器件尽可能远离芯片；
- 2、BGA 封装的中心地引脚在设计时每个引脚都应单独扇出过孔到 GND 层，并缩减走线-铜皮距离，保证最大化建立中心地引脚与大铜皮的接触面积，保持良好散热路径；
- 3、靠近芯片端的顶层/底层死铜不去除，使用多个过孔连接到地平面，增大散热面积；
- 4、综合评估 MCU 电源使用模式，推荐使用 Mode 2、Mode 6；
- 5、使能内部高精度温度传感器，实时监测 T_J ，若结温超过最大限定值 125°C ，应采取主动降频策略以保证芯片安全；
- 6、必要时可使用散热器、风扇等手段对芯片进行降温以保证芯片可靠性。

5. 版本历史

表 5-1. 版本历史

版本号.	说明	日期
1.1	1、增加 LQFP176 MODE 2 常高温数据。 2、删减 BGA176 MODE 2 高温数据。 3、增加表 3-1 注意事项。	2024 年 3 月 15 日

Important Notice

This document is the property of GigaDevice Semiconductor Inc. and its subsidiaries (the "Company"). This document, including any product of the Company described in this document (the "Product"), is owned by the Company under the intellectual property laws and treaties of the People's Republic of China and other jurisdictions worldwide. The Company reserves all rights under such laws and treaties and does not grant any license under its patents, copyrights, trademarks, or other intellectual property rights. The names and brands of third party referred thereto (if any) are the property of their respective owner and referred to for identification purposes only.

The Company makes no warranty of any kind, express or implied, with regard to this document or any Product, including, but not limited to, the implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose. The Company does not assume any liability arising out of the application or use of any Product described in this document. Any information provided in this document is provided only for reference purposes. It is the responsibility of the user of this document to properly design, program, and test the functionality and safety of any application made of this information and any resulting product. Except for customized products which has been expressly identified in the applicable agreement, the Products are designed, developed, and/or manufactured for ordinary business, industrial, personal, and/or household applications only. The Products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems designed or intended for the operation of weapons, weapons systems, nuclear installations, atomic energy control instruments, combustion control instruments, airplane or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, life-support devices or systems, other medical devices or systems (including resuscitation equipment and surgical implants), pollution control or hazardous substances management, or other uses where the failure of the device or Product could cause personal injury, death, property or environmental damage ("Unintended Uses"). Customers shall take any and all actions to ensure using and selling the Products in accordance with the applicable laws and regulations. The Company is not liable, in whole or in part, and customers shall and hereby do release the Company as well as its suppliers and/or distributors from any claim, damage, or other liability arising from or related to all Unintended Uses of the Products. Customers shall indemnify and hold the Company as well as its suppliers and/or distributors harmless from and against all claims, costs, damages, and other liabilities, including claims for personal injury or death, arising from or related to any Unintended Uses of the Products.

Information in this document is provided solely in connection with the Products. The Company reserves the right to make changes, corrections, modifications or improvements to this document and Products and services described herein at any time, without notice.