xEV 用第 4 代铝制直接水冷封装技术

4th-Generation Aluminum Direct Liquid Cooling Package Technology for xEV

井上 大辅 INOUE, Daisuke　　玉井 雄大 TAMAI, Yuta　　小山 贵裕 KOYAMA, Takahiro

近年来，汽车行业混合动力汽车（HEV）和电动汽车（EV）的开发与普及不断加速，需要有低损耗化和高输出化的功率模块，并且通过小型轻量化来降低油耗。富士电机开发了高散热冷却器设计技术及将半导体元件上的主电路配线从原来的铝引线变更为引线框架的技术。车载用第 4 代直接水冷模块在改进了该高散热冷却器设计技术的基础上，还应用了引线框架配线技术，与第 3 代直接水冷模块相比，通过减少占用面积和薄型化，使单位体积的电力密度提高了 36%。

In recent years, the automotive industry has accelerated the development and spread of hybrid electric vehicles (HEVs) and electric vehicles (EVs). As a result, power modules need to be more compact and lightweight while achieving lower loss and higher output in order to improve fuel efficiency. Fuji Electric has developed a design technology for heat-dissipating cooling units, as well as a technology for replacing the aluminum wires in the main circuits of semiconductor devices with lead frames. 4th-generation direct liquid cooling modules for automotive applications use the lead frame wiring technology, as well as the enhanced design technology for heat-dissipating cooling units. They also reduce the footprint and height, thus improving power density per volume by 36% compared with 3rd-generation direct liquid cooling modules.

1 引言

在针对联合国的可持续发展目标（SDGs：Sustainable Development Goals）的举措中，为防止全球气候变暖而削减 CO_2 排放量和节能化在世界各国的重要性日益增加。混合动力汽车（HEV）和电动汽车（EV）等以电力为动力来源，用电机驱动行驶的电动车（xEV）的普及正在加速。这些用于电机控制的变频器单元安装在有限的空间内，因而要求小型化和安装方法的高度自由化，为了实现低油耗、低耗电量化还对轻量化和提高效率也提出了要求。在功率模块方面，正在推进可满足这些需求的小型、高输出产品的开发。

2 富士电机车载用直接水冷模块的开发经过

图 1 所示为各代车载用铝制直接水冷模块，**图 2** 所示为车载用直接水冷模块的电力密度趋势。富士电机开发了搭载轻量且耐腐蚀性优异的铝制冷却器的车载用铝制直接水冷模块。第 1 代（2012 年）、第 2 代（2015 年）、第 3 代（2017 年），每一代的电力密度提高了约 20% 以上[1]。为此，开发了高散热冷却器设计技术[1]~[3]，高可靠性锡焊技术[1]，超声波结合技术[2]、[3]，175 ℃连续动作保证技术[2]、[3]，及采用整合了半导体元件（芯片）IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）与 FWD（Free Wheeling Diode）的 RC-IGBT（Reverse-Conducting IGBT）4 等技术和芯片。

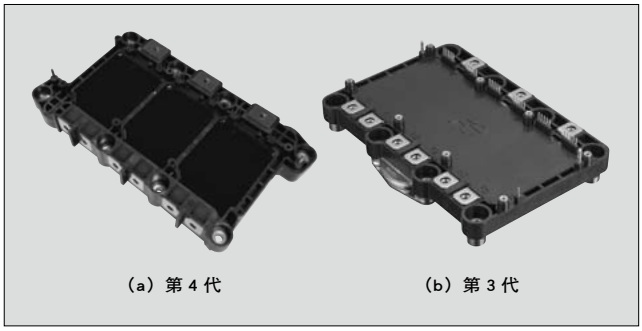

图 1　车载用铝制直接水冷模块

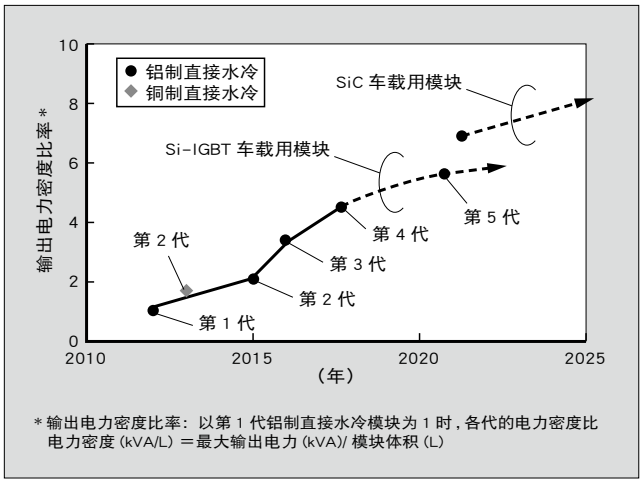

图 2　车载用直接水冷模块的电力密度趋势

第 4 代进一步以高电力密度化、高输出化为目标，在提高高散热冷却器设计技术的基础上，将芯片上的主电路配线从原来的铝引线变更为引线框架配线。通过这一效果，第 4 代模块与第 3 代相比，电力密度提高了 36%。

3 直接水冷封装技术的课题

高电力密度化需要兼顾高输出化和小型化。为达到兼顾的目的，需要以芯片尺寸为主的组成部件的小型化和高密度安装。**图 3** 所示为在电流值一定的条件下使用直接水冷模块，芯片尺寸对芯片结温 T_{vj} 影响的分析结果。芯片温度随着芯片面积的小型化而上升，芯片面积缩小 25% 时，T_{vj} 上升

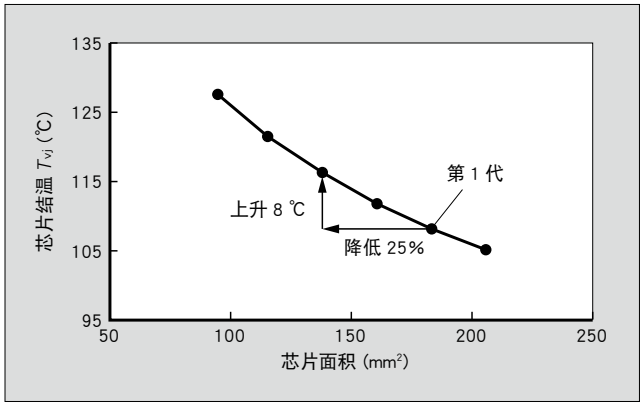

图 3　芯片尺寸对结温的影响

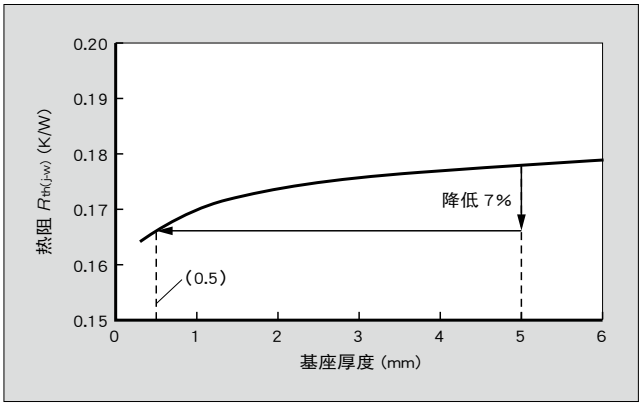

图 5　热阻与基材厚度之间的关系

8℃。为实现芯片的小型化，需要以下 2 点之一。

(a) 提高散热性能，降低芯片温度。

(b) 利用高耐热化提高运行保证温度（提高可靠性）。

因此，作为提高散热性能的冷却技术，开发了铝制直接水冷封装。

4　铝制直接水冷封装的开发

功率模块的散热性能取决于芯片产生的热量向散热片传导的性能的热传导性（热传导率 / 导热距离）和散热片与制冷剂之间的热交换性能的热导性（热导率 × 表面积 / 模块导热面积）。即，为改善冷却性能，着眼于冷却器自身的热传导性和与制冷剂之间的热导性的高散热化很重要。

4.1　低热阻化

将冷却器的构成材料从铜变更为铝，使重量减轻至约 1/3。另一方面，在冷却器的热传导性方面，铝的热传导率（170 ～ 210 W/mK）比铜（393 W/mK）低。因此，为提高铝制冷却器的性能，必须减薄将器件结合至冷却器的基材。对其影响度，进行了热流体分析。**图 4** 所示为用焊锡将用于分析的绝缘基板和简易冷却器进行结合的直接水冷模型。冷却器散热片的厚度为 1 mm、间隔为 1 mm、高度为 10 mm，制冷剂均匀地流入制冷剂导入口，以散热片截面中央的流速为代表流速。

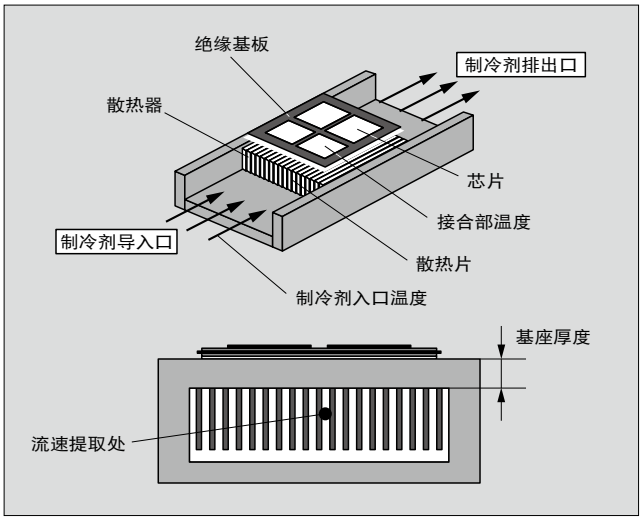

图 4　热液体分析模型

分析结果如**图 5** 所示。作为功率模块散热性能指标的热阻 R_{th}，是 T_{vj} 与作为比较对象部位的温度间产生的温度差除以耗散功率所得到的值。从**图 5** 可知，随着基材变薄，T_{vj} 与代表流速提取点的制冷剂温度 T_w 之间的热阻 $R_{th(j-w)}$ 降低，散热性能提高。从 5 mm 减薄至 0.5 mm 时，$R_{th(j-w)}$ 预计可改善 7%。

4.2　热导率的提高

作为决定冷却器性能的第二个参数，考察了表示散热片与制冷剂之间的热交换性能的热导率。制冷剂在冷却器内循环，制冷剂在功率模块中产生的热量经制冷剂通过散热器排放至外部空气中。此时，冷却器和制冷剂之间的热交换性能决定着散热能力。

特别地，散热能力（热导）取决于制冷剂的流量和散热片形状。

制冷剂流量对热导率的影响可通过[5]、式(1)和式(2)求出。热导率 h 使用制冷剂接触面的表面积 A 和热阻值 R_{th}，用式(1)表示。

$$h=\frac{1}{R_{th}A} \quad \cdots\cdots (1)$$

h：热导率

R_{th}：热阻

A：制冷剂接触面的表面积

另外，热导率可使用制冷剂的特性和制冷剂接触面的长度 L、努塞尔数 N_u 和组成部件的热传导率 λ，置换成式(2)来表示。

$$h=\frac{N_u\lambda}{L} \quad \cdots\cdots (2)$$

L：制冷剂接触面的长度

N_u：努塞尔数

λ：热传导率

努塞尔数可使用形状参数，根据雷诺数 R_e 和普朗特数 P_r，用式(3)来计算。此时，雷诺数可用制冷剂的密度 ρ、速度 ν 和粘度 η，表示为式(4)。普朗特数 P_r 可用比热容

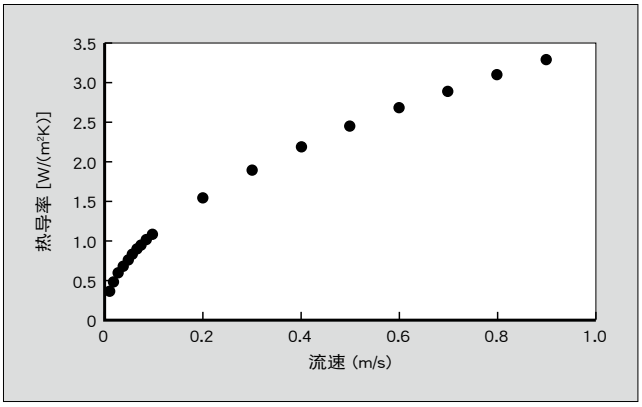

图 6　热导率与制冷剂流速的关系

C_p 和制冷剂的热传导率 λ，表示为式(5)。

$$N_u=0.664R_e^{1/2}P_r^{1/3} \quad \cdots\cdots (3)$$

R_e：雷诺数
P_r：普朗特数

$$R_e=\frac{\rho\nu L}{\eta} \quad \cdots\cdots (4)$$

ρ：制冷剂密度
ν：速度
η：粘度

$$P_r=\frac{\eta C_p}{\lambda} \quad \cdots\cdots (5)$$

C_p：比热容

组合这些公式，可像式(6)那样求出热导率 h 与流速 ν 的关系，热导率与流速的平方根成正比。

$$h=0.664\left(\frac{\rho^3\lambda^4C_p^2}{\eta L^3}\right)^{\frac{1}{6}}\nu^{\frac{1}{2}} \quad \cdots\cdots (6)$$

根据该公式计算出的各流速下的热导率如**图 6** 所示。从该图表可知，制冷剂流速越快，热导率越大，在从散热片至制冷剂的热交换中，加快散热片表面的制冷剂流速可有效地提高散热性能。

4．3　制冷剂在散热片间的流动

在冷却器内部流动的制冷剂，其流动方向会因制冷剂流动时的摩擦、表面形状及制冷剂的粘性等发生变化。要在有限空间内提高冷却性能，散热片会变得复杂。制冷剂在封闭空间内流动的情况如**图 7** 所示。假设像散热片间之类的平行平板内部的制冷剂流速在上游是均匀的，则越向下游，在中央处的流速越快，在平板表面处的流速越慢。这是因为平板表面的摩擦和制冷剂的粘性所造成的影响，速度边界层扩张[6]、[7]。

比较散热片表面和流道中央处的流速时，随着从上游向下游流动，散热片表面的流速大幅降低，与中央处的流速之差变大。散热性能取决于散热片表面的制冷剂流速，因此在流速分布差增大的下游侧，散热性能可能下降。

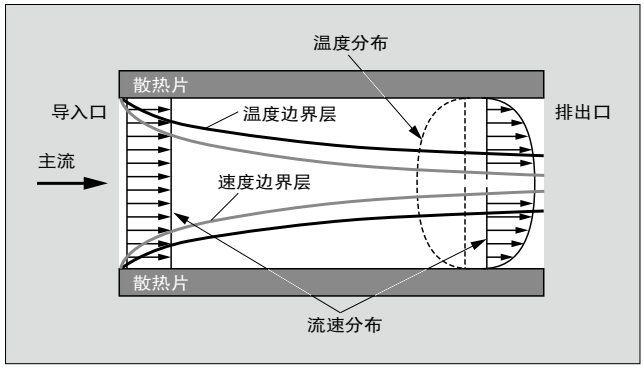

图 7　流道长度与速度边界层的关系

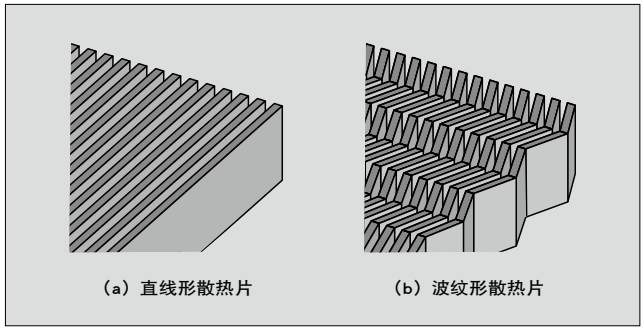

图 8　铝制直接水冷结构的散热片形状

在考虑了热交换性能的情况下，如何保持散热片表面的流速很重要，抑制该边界层的扩张可提高冷却性能。

为得到考虑到这些因素的最佳散热片形状，富士电机迄今为止开发了直线形散热片和波纹形散热片，每一代的散热性能提高了约 10%，如**图 8** 所示。

4．4　第 4 代直接水冷封装

根据 4.1 节至 4.3 节所得到的结果，设计了第 4 代铝制直接水冷封装。以从第 2 代开始采用的散热器和水冷套一体化的冷却结构为基础，优化了基材厚度。并且，第 3 代为二维散热片，第 4 代为三维散热片。这样，通过强制性地使制冷剂流在三维空间中进行弯曲，产生朝散热片表面的流动，提高散热片表面的制冷剂流速，减薄边界层。

图 9 所示为各结构的热阻。新结构通过提高基材的热传导性和提高散热片的热导性，与传统结构相比热阻降低了

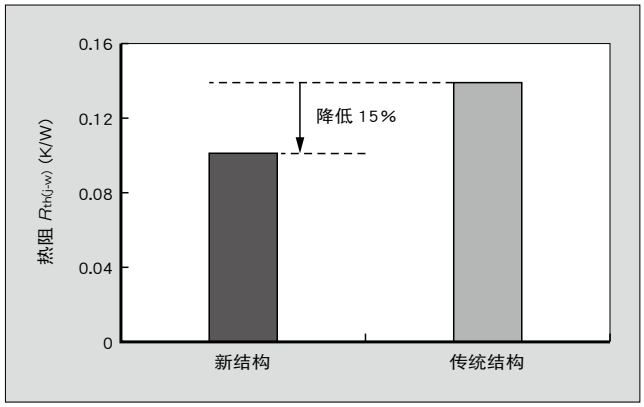

图 9　热阻比较结果

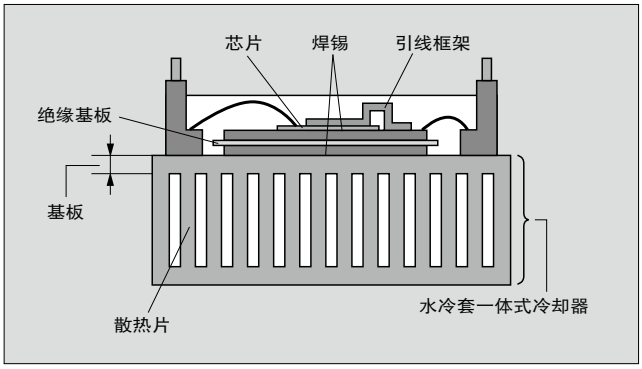

图 10　第 4 代铝制直接水冷结构

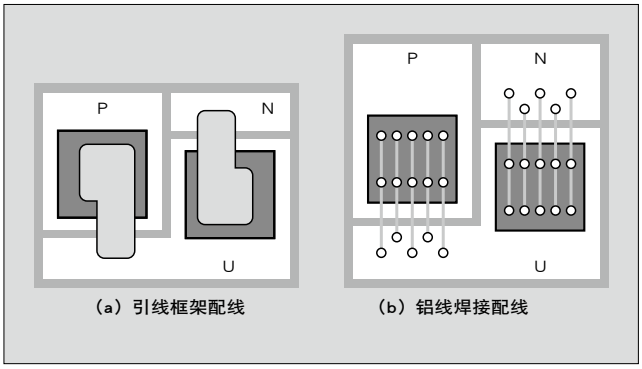

图 13　内部布置

15%。

另外，直接水冷封装的冷却器不仅需要确保散热性能，还需要同时确保变频器安装时的密封性能。在组成部件中，冷却器热膨胀系数大（23 ppm），因此有必要采取措施抑制其变形。迄今为止，适用于第 2、第 3 代的直接水冷结构，通过使形成流道的水冷套进行一体化，可限定、缩小需要确保密封性能的区域，使密封设计变得简单[3]。

该一体化结构将散热片作为应力缓和层，即使在基板减薄的情况下也可抑制热变形，确保散热性能和密封性能（**图 10**）。

5　引线框架配线结构

第 3 代及之前的铝制直接水冷封装在内部芯片上的主电路配线中采用了铝引线。使用铝引线时，为了确保根据电流容量所选择的最佳引线根数，所以需要确保引线所需的焊接区。为实现高密度化（小型、轻量化），第 4 代模块在内部的主电路配线中采用了引线框架配线。

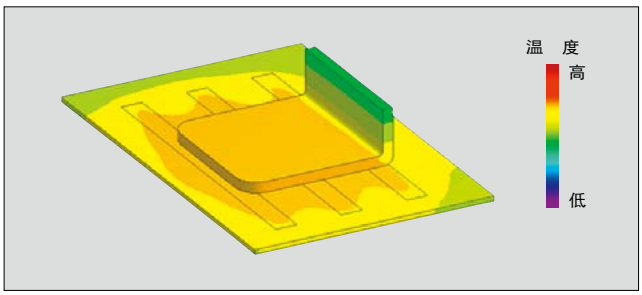

图 11　引线框架配线结构的芯片温度分布

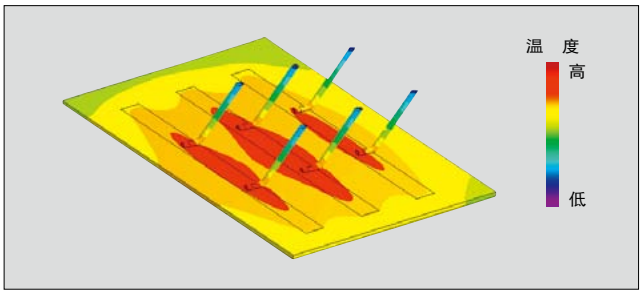

图 12　铝线配线结构的芯片温度分布

5. 1　热扩散效果

引线框架配线使用与芯片的结合面积大、电导率高的铜材，引线框架结合面的热扩散效果引起的芯片温度下降，通过引线框架配线结构使芯片温度均匀化，如**图 11** 所示。这样，与铝引线配线结构（**图 12**）相比，芯片最高温度降低了约 16 ℃[8]。

5. 2　利用引线框架配线进行高密度安装

图 13 所示为铝引线配线与引线框架布线的内部布置。在引线框架配线中，铜端子和绝缘基板铜电路与芯片和铜电路之间的结合一样是通过焊锡结合的，因此制造简单且接合部牢固。

另外，通过对电导率高的铜端子进行锡焊结合，引线框架配线结构与铝引线焊接配线结构相比，安装面积缩小了 15%。因此，有望提高模块的小型化、高电流密度化效果。

通过在提高直接水冷封装散热性能的基础上，使用引线框架配线技术，与第 3 代模块相比，第 4 代铝制直接水冷模块减少了占用面积，实现了薄型化。这样，单位体积的电力密度提高了 36%。

6　后记

本文对 xEV 用第 4 代铝制直接水冷封装技术进行了论述。

今后，富士电机仍将以这些技术为基础，继续推进技术开发，在提供顾客满意度高的产品的同时，努力减少 CO_2 排放量，采取节能化举措，为应对全球气候变暖做出应有的贡献。

参考文献

(1)　**郷原広道ほか. ハイブリッド自動車用 IPM のパッケージ技術. 富士電機技報. 2013, vol.86, no.4, p.258-262.**

(2)　乡原广道等. 混合动力车用第 2 代铝制直接水冷封装技术. 富士电机技报. 2015, vol.C7, no.1, p.20-24.

(3)　乡原广道等. 车载用第 3 代功率模块的封装技术. 富士电机技术期刊. 2016, vol.C8, no.1, p.34-37.

(4)　佐藤宪一郎等. 搭载 RC-IGBT 的车载用第 3 代直接水冷型功率模块的高功能化. 富士电机技术期刊. 2017, vol.C9, no.1,

p.37-40.
⑸ Gohara, H. et al. “Next-gen IGBT module structure for hybrid vehicle with high cooling performance and high temperature operation”. Proceedings of PCIM Europe 2014, May 20-22, Nuremberg, p.1187-1194.
⑹ **石塚勝. 熱設計技術解析ハンドブック. 三松株式会社出版, 2008, p.52-58.**
⑺ Kays, W.M. And London, A. L., “Compact Heat Exchangers, 3rd edition”. Reprint (1998), McGraw-Hill, p.108-114.
⑻ Osawa, A. et al. “High I 2 t capability power modules for xEV power train with leadframe and RC-IGBT combination”. Proceedings of PCIM Asia 2018, June 26-28, Shanghai, p.176-180.

井上　大辅
从事车载用 IGBT 模块的封装结构开发和设计。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部开发统括部封装开发部。

玉井　雄大
从事车载用 IGBT 模块的封装技术开发和设计。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部开发统括部封装开发部。电子工业实装学会会员。

小山　贵裕
从事车载用 IGBT 模块的封装技术开发和设计。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部开发统括部封装开发部。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。