车载用大容量 IGBT 模块“M660”

“M660” High-Power IGBT Module for Automotive Applications

大泽 彰浩 OSAWA, Akihiro　　樋口 惠一 HIGUCHI, Keiichi　　仲野 逸人 NAKANO, Hayato

车载用 IGBT 模块为了高效利用电池的电力，不仅要降低损耗，还需要进一步小型化、轻量化。同时，也必须实现大容量化。为满足这些要求，富士电机开发了直接水冷式功率模块“M660”。在将传统内部配线的引线焊接方式改为引线框架结构的同时，还采用了改善了特性的 RC-IGBT（Reverse-Conducting IGBT：逆导型 IGBT）和水冷套一体型的冷却结构，从而实现了通用 6 in 1 IGBT 模块世界最大容量的额定 750 V/1200 A。

IGBT modules for automotive applications need to have low power loss to efficiently use battery power. They are also required to achieve small size and lighter weight while having high power. In response to these market demands, Fuji Electric has developed the “M660” direct water-cooled power module. This module adopts a lead frame structure, instead of wire bonding, which was conventionally used for internal wiring. It also employs the cooling structure that integrates a water jacket with reverse-conducting insulated gate bipolar transistors (RC-IGBTs) that have improved characteristics. With these structures, the M660 achieves the rated capacity of 750 V/1,200 A, which is the world’s highest power as a general-purpose 6-in-1 IGBT module.

1 引言

世界各国都在加快推进削减 CO_2 排放量和节能的措施。为支持这些措施，汽车制造商正积极推进从以传统的汽油、轻油为燃料、以内燃机构驱动的汽车，向以混合动力汽车（HEV）、电动汽车（EV）为代表的电动汽车转变。HEV 和 EV 为了运行电动机而采用的电力电子技术的关键组件之一就是 IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor）模块[(1)]。IGBT 模块为了高效利用电池的电力，不仅要降低损耗，还需要进一步小型化、轻量化。此外，也必须实现大容量化。

为满足这些要求，富士电机开发了直接水冷式功率模块。本文将对车载用大容量 IGBT 模块“M660”的特点和性能进行介绍。

2 “M660”的特点

图 1 中展示了 M660 的外观，**表 1** 中展示了其特点。

如**表 1** 所示，M660 相比传统产品，集电极 – 发射极饱和电压 $V_{CE\ (sat)}$ 降低了 22%，热阻 $R_{th\ (j-w)}$ 降低了 31%，电力密度提高了 58%。**表 1** 所示的电力密度、马达输出的定义如下。

(a) 电力密度 = 使用的直流电压 × 输出电流 / 模块体积

(b) 马达输出 = 使用的直流电压 × 输出电流 × 马达效率

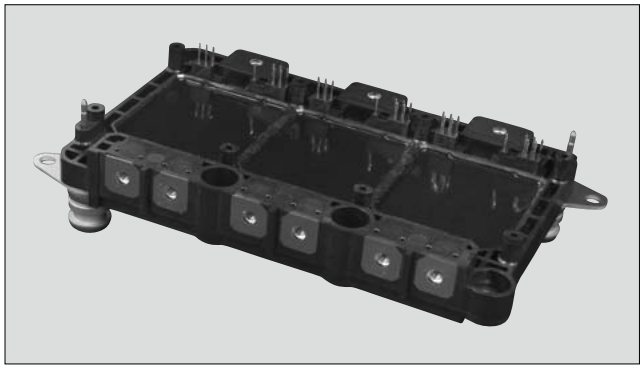

图 1 车载用大容量 IGBT 模块“M660”

表 1 “M660”的特点

项目	M660	传统产品
内部配线	引线框架	引线焊接
芯片	RC-IGBT	RC-IGBT
集电极 - 发射极电压	750 V	750 V
额定电流	1200 A	800 A
集电极 - 发射极饱和电压	1.54 V	1.98 V
热阻	0.09 ℃/W	0.13 ℃/W
外形尺寸（mm）	W178×D116×H24	W162×D116×H24
电力密度	684 kVA/L	433 kVA/L
马达输出	200 kW	150 kW

3 “M660”所适用的技术

3.1 引线框架技术的采用

富士电机在直接水冷功率模块的主电路配线中采用了引线框架。采用引线框架结构代替引线焊接，有以下 2 个优点。

(a) 可通过缩小 DCB（Direct Copper Bonding）基板尺寸，实现产品的小型化。引线焊接时，必须将多根引线接合到 DCB 基板上，因而相比引线框架结构，DCB 基板的尺寸更大。

(b) 与芯片的接合面积更大的引线框架的散热量更大，可降低芯片的最高温度。

除了(a)、(b)的优点，通过使用树脂作为密封材料，可减少引线框架下焊锡部产生的应力，从而提升功率循环耐量。

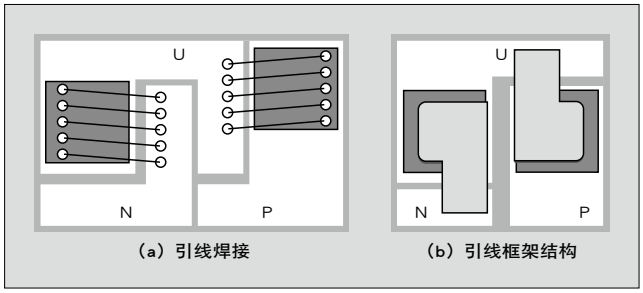

图 2　半桥电路的内部布局

此外，引线焊接需要多次焊接引线的工序。而引线框架结构只需要将单个引线框架接合到 DCB 基板上，因此在 IGBT 模块的生产效率方面更具优势。

图 2 中展示了采用了引线焊接和引线框架结构的、IGBT 模块的半桥电路的内部布局。

M660 因为采用引线框架技术，与使用引线结构时相比，IGBT 模块的尺寸减少了 23%。

3.2　RC-IGBT 的采用和特性改善

为实现模块的小型化，M660 采用了 RCIGBT（Reverse-Conducting IGBT：逆导型 IGBT）。RC-IGBT 是以带 FS（Field Stop）结构的 IGBT 为基础，将条纹状的 IGBT 单元和 FWD（Free Wheeling Diode）单元交错配置在一个芯片上的结构。RC-IGBT 的概要结构如**图 3** 所示。

凭借单芯片化，可削减确保芯片周围耐压的护环区域，相比以 IGBT 和 FWD 分离的芯片（分离式芯片）构成的传统产品，芯片面积更小。另外，IGBT 运行时可从 FWD 区域散热，FWD 运行时也可从 IGBT 区域散热，因而具有分别降低 IGBT 和 FWD 运行时的热阻的效果[2]。

过去，富士电机成功将搭载了 RC-IGBT 的车载用模块产品化[3]。此次，则实现了 IGBT 模块的进一步低损耗化。而通过减少芯片厚度削减导通损耗，就是实现所搭载的 RC-IGBT 芯片低损耗化的方法之一。因此，富士电机开发了最先进的薄晶圆加工技术，将晶圆厚度削减至 750 V 耐压所需的足够厚度，从而削减了 RC-IGBT 的导通损耗。另外，还对沟槽间隔、通道密度、接触层等表面结构进行了优化。**图 4** 中展示了 M660 与搭载传统 RC-IGBT 的模块的 $V_{CE\ (sat)}$ – 集电极电流 I_{CRM} 特性，**图 5** 中展示了二极管正向电压 V_F – 二极管正向电流 I_{FRM} 特性。

通过优化 IGBT 的单元设计，M660 在额定电流 1200 A 时相比传统产品，$V_{CE\ (sat)}$ 降低了 22%，V_F 降低了 4.2%。

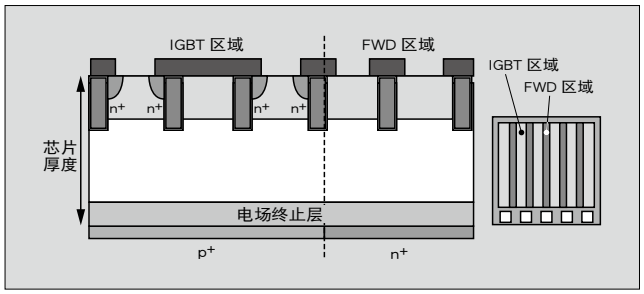

图 3　RC-IGBT 的概要结构

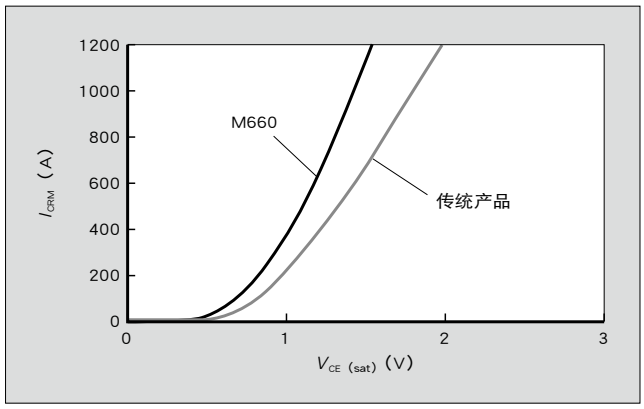

图 4　$V_{CE\ (sat)}$ – I_{CRM} 特性

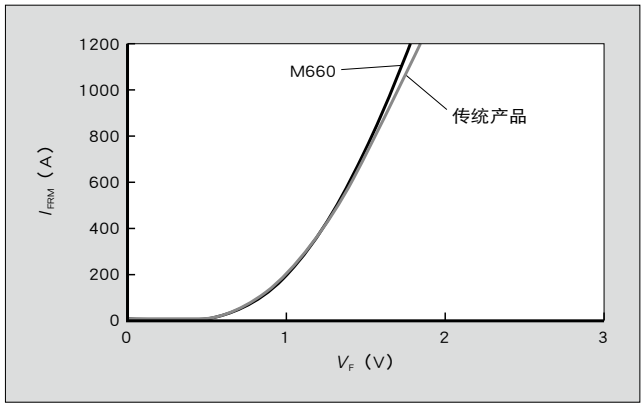

图 5　V_F – I_{FRM} 特性

3.3　I^2t 耐量

电流平方时间积 I^2t 是表现 IGBT 模块内置的 FWD 的过电流耐量的指标。变频器再生运行时，会有再生电流从 FWD 流过，为电容器充电（**图 6**），但 FWD 必须要能耐受这一再生电流的 I^2t，确保不会损坏。再生时 FWD 的主要故障模式是大电流通电导致元件受损，或引线发热导致引线发热受损[4]。

图 7 中展示了 M660 和分离式芯片上，引线焊接方式的 IGBT 模块的 I^2t 耐量。可以看出 M660 的 I^2t 耐量，是分离式芯片上引线焊接方式的 IGBT 模块的 3 倍以上。

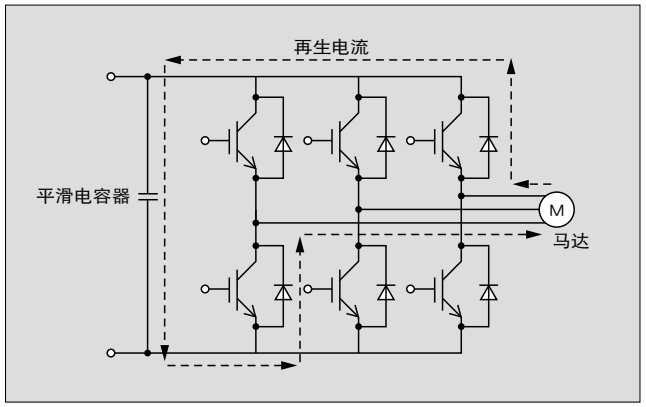

图 6　变频器的再生运行

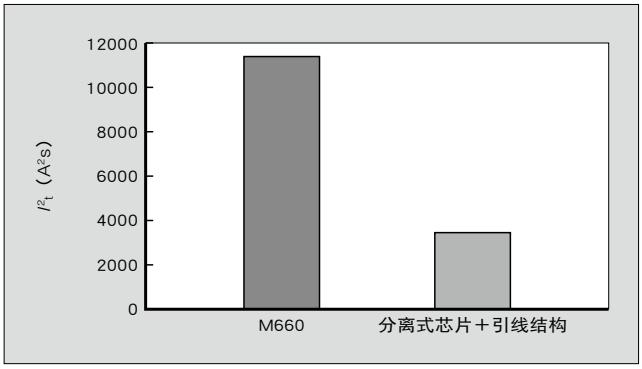

图 7　I^2_t 耐量

RC-IGBT 当 FWD 区域有电流流过时，发热也会扩散到 IGBT 区域，从而可缓解 FWD 区域的升温。另外，M660 中采用的引线框架结构相比引线焊接方式，与芯片的接触区域更大。因此，发热会传递到引线框架表面，缓解局部升温。

3.4　高散热冷却器的采用

富士电机明确了水冷散热片和水冷套间的空间是导致热阻劣化的原因，因此开发了散热器和水冷套一体化的高效冷却结构[5]。

M660 为进一步提升这一水冷套一体型冷却结构的冷却效率，改良了冷却器的内部结构。

结果，相比传统产品的热阻 $R_{th\ (j-w)}$ 0.13 ℃ /W，M660 的 $R_{th\ (j-w)}$ 下降了 23%，实现了 0.1 ℃ /W。但在进行热设计时，$R_{th\ (j-w)}$ 必须使用模块内的最大值。因此，富士电机认为减少冷却性能的面内偏差，可进一步降低热阻。**图 8** 中展示了 M660 的相的位置关系，与冷却体内部结构优化前后的 $R_{th\ (j-w)}$ 的面内偏差。

从**图 8**(b)中可以看出，通过改善 VH 相的冷却性能的面内分布，可使 $R_{th\ (j-w)}$ 再改善 10%，达到了 0.09 ℃ /W。

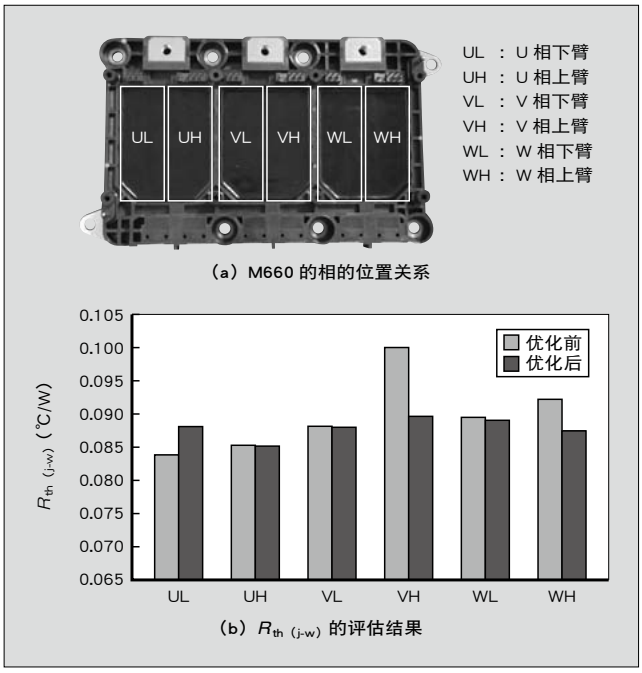

图 8　冷却体改善前和改善后的热阻 $R_{th\ (j-w)}$ 评估结果

4　可运行电流

为预估最大允许电流，富士电机以输出电流为参数，对 M660 和传统产品（搭载 RC-IGBT、使用引线焊接方式）实施了芯片温度 T_{vjop} 的仿真。

仿真条件为电池电压 V_{DC}=450 V，PWM 开关频率 f_c=5、8、10 kHz，冷媒温度 T_w=65 ℃，冷媒流量 =10L/min。**图 9** 中展示了 M660 的 T_{vjop} 仿真结果，**图 10** 中展示了传统产品的 T_{vjop} 仿真结果。

另外，**图 9**、**图 10** 未考虑 RC-IGBT 的特性偏差，以及模拟实际使用状况时的焊锡裂纹所导致的热阻的变化。可以看出 f_c=10 kHz 时，T_{vjop} 不足 150 ℃的最大输出电流，传统产品为 390 Arms，而 M660 为 525 Arms，达到了传统产品的 1.35 倍。

而在实际产品中，必须考虑搭载的芯片的特性偏差、实际运行中的焊锡裂纹，确保容限。M660 中安装的 RC-IGBT 芯片的保证温度是 175 ℃。f_c=10 kHz 时，在考虑了容限的最恶劣的情况下，M660 的电流最大可输出约 600 Arms。

M660 采用了引线框架技术、改善了特性的 RC-IGBT 芯片、经过优化的水冷套一体型冷却结构，因此芯片损耗小，散热性能出众。最终，M660 相比传统产品，可输出更大

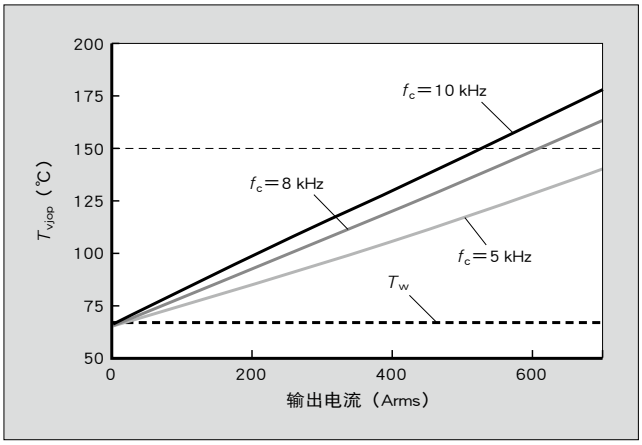

图 9　M660 的 T_{vjop} 仿真结果

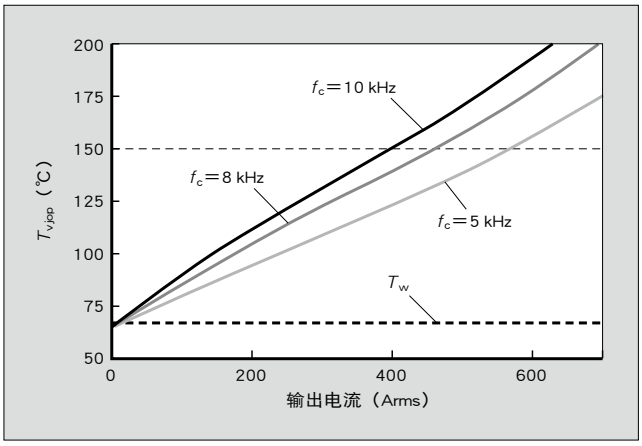

图 10　传统产品的 T_{vjop} 仿真结果

的电流。

5 后记

本文对车载用大容量 IGBT 模块“M660”进行了介绍。通过采用引线框架、改善了特性的 RC-IGBT 以及经过优化的直接水冷式水冷套一体型冷却结构，M660 实现了通用 6 in 1 IGBT 模块世界最大容量的额定 750 V/1200 A。

今后，富士电机也将满足不断加速的汽车电动化趋势的要求，为缓解全球变暖做贡献。

参考文献

⑴ 安達新一郎ほか. 車載用 IGBT モジュールの直接水冷技術. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.435-439.

⑵ 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.

⑶ 榎本一雄等. 车载用第 3 代直接水冷型功率模块. 富士电机技术期刊. 2017, vol.C9, no.2, p.116-117.

⑷ Osawa, A. et al, “700 kVA/L power density IGBT module for xEV power density”, PCIM Asia 2017, p.137-143.

⑸ Gohara, H. et al, “Next-gen IGBT module structure for hybrid vehicle with high cooling performance and high temperature operation”, PCIM Europe 2014, p.1187-1194.

大泽　彰浩

从事电动、混合动力车用 IGBT 模块和 IPM 的开发。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部事业统括部电装模块部。

樋口　惠一

从事电动、混合动力车用 IGBT 模块和 IPM 的开发。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部事业统括部电装模块部。

仲野　逸人

从事电动、混合动力车用 IGBT 模块和 IPM 的开发。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部事业统括部电装模块部。

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。