

15

变速箱控制单元的创新技术 产品成功的关键

Rudolf Stark
Bernhard Schuch
大陆集团



引言

汽车变速箱市场正在不断地发展中，除了提高产品本身驾驶便利性的吸引力之外，进一步提高燃油效率的期望已成为推动这一市场发展的重要因素。1982年，大陆集团开始生产变速箱控制单元（TCU），首先用于简易的传统三档变速箱（雷诺）。之后，于1985年用于全轮驱动系统（福特），1999年用于CVT自动变速箱（奥迪无级变速），2000年用于卡车变速箱（伊顿）。现在，已用于广泛使用的双离合变速箱。目前，大陆变速箱业务单元已成为全球各种汽车驱动系统变速箱控制单元市场的技术领导者。

大陆集团提供全系列的产品

大陆集团变速箱控制业务单元的产品是针对客户特定的需求而提供相应的解决方案。根据安装情况，基本分为独立式、附着式和集成式三种类型。独立控制单元（外置解决方案）通常不含传感器，且不装在变速箱上或变速箱内。这种外置解决方案适合装在环境条件（温度，振动）相对平稳的汽车中作为独立电子盒，一般采用印刷电路板（PCB）的形式。元器件通过各自的封装焊接到电路板上，其工作温度不能超过+125℃。附着式控制单元则安装在变速箱外壳上，因此设计上必须经得住变速箱所能承受的振动，而且要比独立控制单元耐受更高的温度。附着式控制单元的传感器和执行器一般通过线束与控制单元连接。集成式的机电一体变速箱控制单元具有最高集成度，其机械、液压、电子组件及传感器和执行器集成在一个单元中。这种结构的优点是可以降低系统和安装成本，而且可在安装之前测试整个变速箱（变速箱和控制单元）的工作状态。由于减少了线

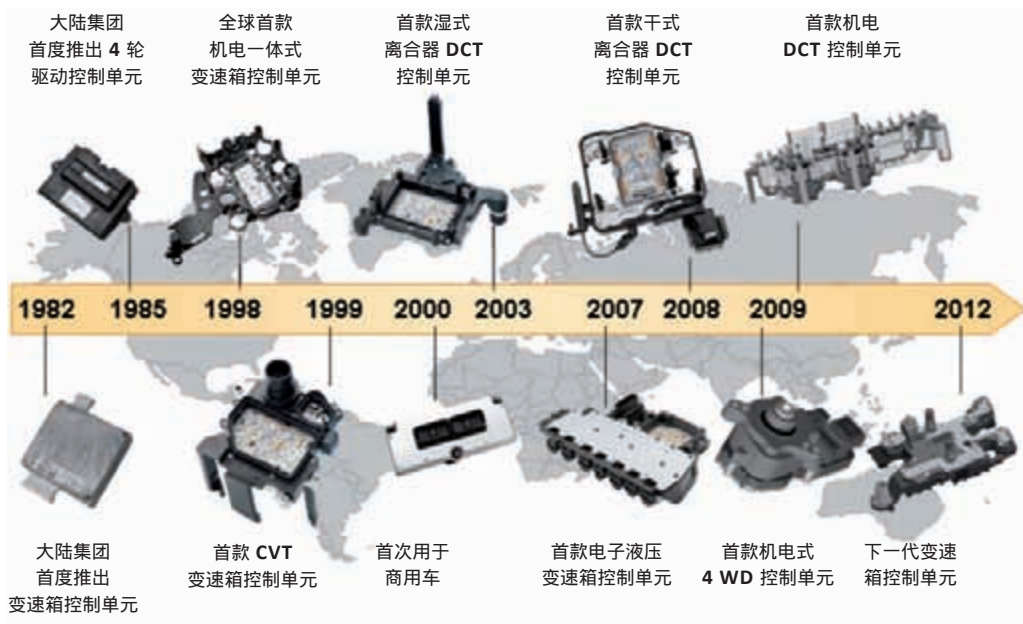


图1 大陆集团变速箱控制单元的演进过程

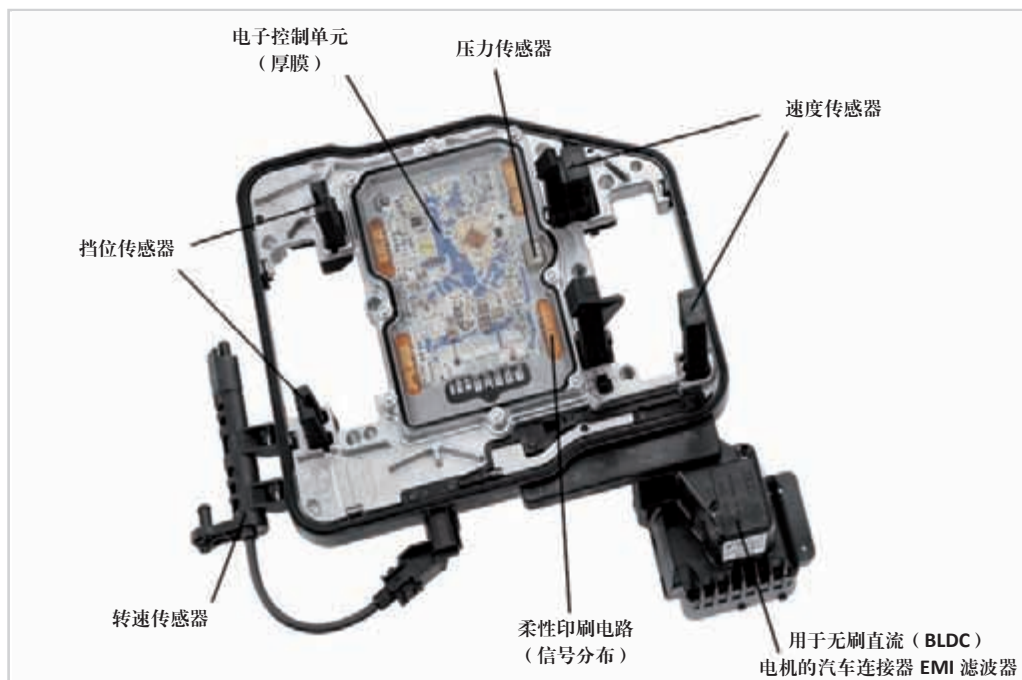


图2 大众汽车 DQ200 变速箱控制单元

束和接点以及插头数量，这种控制单元还具更高的系统稳定性。集成式控制单元可满足耐振动，特别是高温下正常工作的严苛要求。由于基片温度最高可达 $+180^{\circ}\text{C}$ ，因此一般采用金属陶瓷作为基片。半导体元件采用导电粘合剂直接键合到作为基底的基片上，本身不需要任何封装。由于热耗散和耐振动问题，这种环境条件下一般不能采用封装组件。且由于直接装在变速箱内，因此对介质的密封和对媒介的承受力提出了更高的要求。上述三种解决方案可用于：

- 传统步进式自动变速箱
- CVT（无级变速箱）
- DCT（双离合变速箱）
- AMT（手自一体变速箱）
- 线控换挡功能

大陆集团不仅在控制单元的硬件方面具有

独特的优势，而且可为客户提供上述所有应用领域完整的底层软件和功能软件。这是大陆集团在竞争中所具有的独特销售优势，而且是其成功的一个极为重要的因素。在收购之前的竞争对手——摩托罗拉汽车电子和西门子威迪欧之后，大陆集团确立了变速箱控制业务单元的市场主导地位，使其成为遥遥领先的市场领导者。大陆集团在全球双离合变速箱市场中占有显著份额！以 DQ200 为例，这是一种集成式变速箱控制单元，可直接安装在变速箱内，是专门为大众汽车的七挡干式双离合变速箱设计的（图2），它采用 32 位微控制器进行管理。控制单元中集成了所有变速箱传感器（如温度、转速和通道检测），工作温度 -40°C 至 $+140^{\circ}\text{C}$ 。通过其进行管理的执行器包括了八个阀门以及用于油泵的无刷励磁电机。所有外部连接都集中到 11 芯插座上。

平台及主要技术

机械式平台

大陆集团的变速箱控制单元主要采用三种机械式平台（图 3）：一种是基于导引支架的平台，另外两种采用柔性印刷电路（FPC）连接基片与传感器和执行器。所有基础结构均采用陶瓷基片。为了优化热耗散，基片都被直接粘在金属基板上。平台的根本区别在于传感器和阀体与主基片的连接方式。如果采用导引支架的解决方案，信号和电流将通过金属导引支架传导以实现最优化的散热效应。这种方案具有许多技术优点，例如载流容量，但也存在修改灵活性和易控性差的缺点。而采用聚酰亚胺导电材料的柔性印刷电路则便于修改。例如，改变传感器模块位置时，只需调整附属的柔性印刷电路板，主外壳则不用改动。这两种平台

的 FPC 数量不同：第一种平台采用多条柔性电路，第二种平台只采用一条共用柔性电路。针对具体客户项目，可采用其中一种解决方案，也可以结合使用以满足特定要求。

基片平台

选择正确的基片对于产品的成功设计具有重要影响。变速箱控制单元通过一个或多个基片上配置的组件、布线及其互连配置技术来实现各种功能。基片的选择直接关系到控制单元的尺寸以及电特性和成本。有机基片（印刷电路板，简称 PCB）与陶瓷基片存在明显区别。

印刷电路板技术（PCB）

PCB 解决方案可用于独立控制单元，也可用在附着式控制单元上。大陆集团全面采用目前市场上的各种 PCB 技术：刚性、柔性和刚柔

结合。其工作温度一般为 -40°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ 。主要采用标准 PCB（四层到八层之间），这种电路板也用于其它汽车电子产品。此外，也可以采用专用方案支持高达 $+140^{\circ}\text{C}$ 的工作温度和密度极高的布线。这类方案的显著特点是采用并以适用的焊接按技术予以组装总成方式封装元器件。

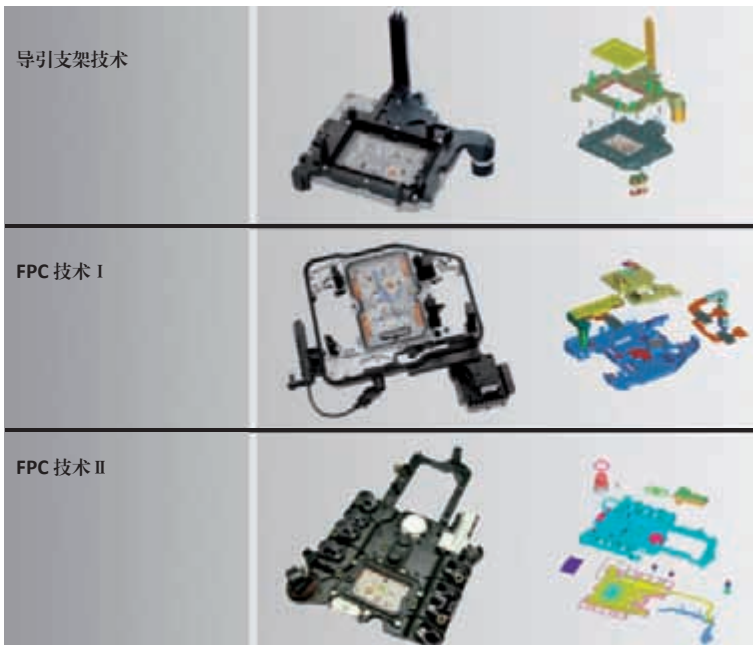


图 3 实现集成式变速箱控制单元的机械式平台

陶瓷基片

在集成式变速箱控制单元中，组件或基片的局部温度可以达到 $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上，同时振动负荷高达 50 g 。大部分封装半导体器件实际上难以承受如此高的负荷。因此，必须采用陶瓷基片和非封装半导体器件组成的方案。相对于竞争对手，大陆集团不仅拥有完整的专有技术和丰富的量产经验而且全面掌握了三种陶瓷技术，因此可提供性价比优异的变速箱控制单元（图 4）。

1. 厚膜基片
2. LTCC（低温共烧陶瓷）基片
3. DCB（金属线直接接合敷铜）基片

在数字和模拟电路以及高耗散功率电路组件方面，每种陶瓷基片技术有其各自的优缺点。由于客户的要求因产品而异，所以针对特定产品来选择最佳基片解决方案具有十分重要的意义。大陆集团掌握所有相关技术，并拥有利用这些技术进行量产的经验，因此可利用优化的基片技术满足客户的每一种特定要求。从而保证每一种情况下都能为客户提供最佳技术解决方案。

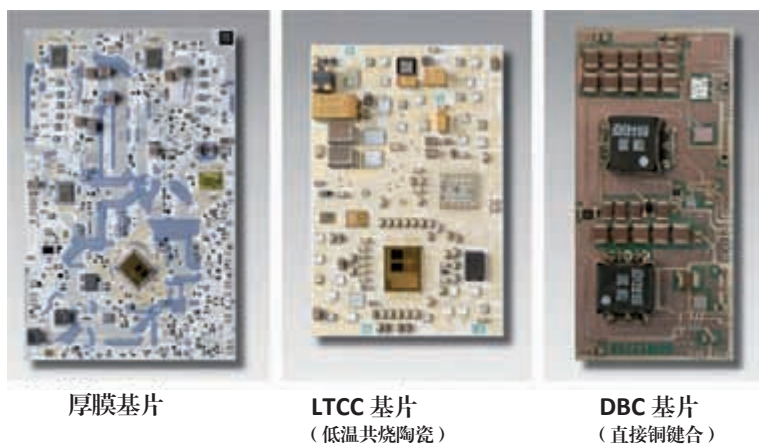


图 4 采用陶瓷基片技术的平台

装有大陆厚膜基片的集成式变速器控制单元

LTCC 和 DCB 技术的基片是向外部供应商采购的。自 1972 年以来，大陆集团一直自行开发和生产厚膜基片，目前已成为复杂厚膜电路的领导者。由于自主技术的日益完善以及创新解决方案的不断发展，这种基片目前仍能满足变速箱控制的需求。到目前为止，厚膜技术的主要使用者是（如传感器模块厂商）在产品中主要采用模拟电路，而大陆集团已将模拟电路、数字电路和功放级集成在用于变速箱控制的厚膜基片中。为更好地了解这种自主研发的厚膜基片解决方案，图 5 以集成式变速箱控制单元为例加以说明：厚膜半导体电子电路产品——DQ200。这种产品最底层为氧化铝陶瓷金属（厚度约为 0.6 mm ），上面敷以丝网印刷的导体线路、电阻和介质，然后进行烧结。电阻严格按照允差采用激光进行切割。电阻的精度以激光切割的方式来实现精度的修整。以高聚激光束来切除电阻材料（在膜精切）以减小电阻的截面并增长其有效长度。这样可以增强基电阻效应。基片加工完成后，采用模板印刷

的方法涂敷含银量很高的导电胶，基片上安装半导体芯片——称为裸片或无封装元器件——以及无源器件，如电容和线圈。

最后，芯片信号接点连接采用金引线键合互连（直径 $25\text{ - }50\text{ }\mu\text{m}$ ）的方法键合到基片的键合区，功

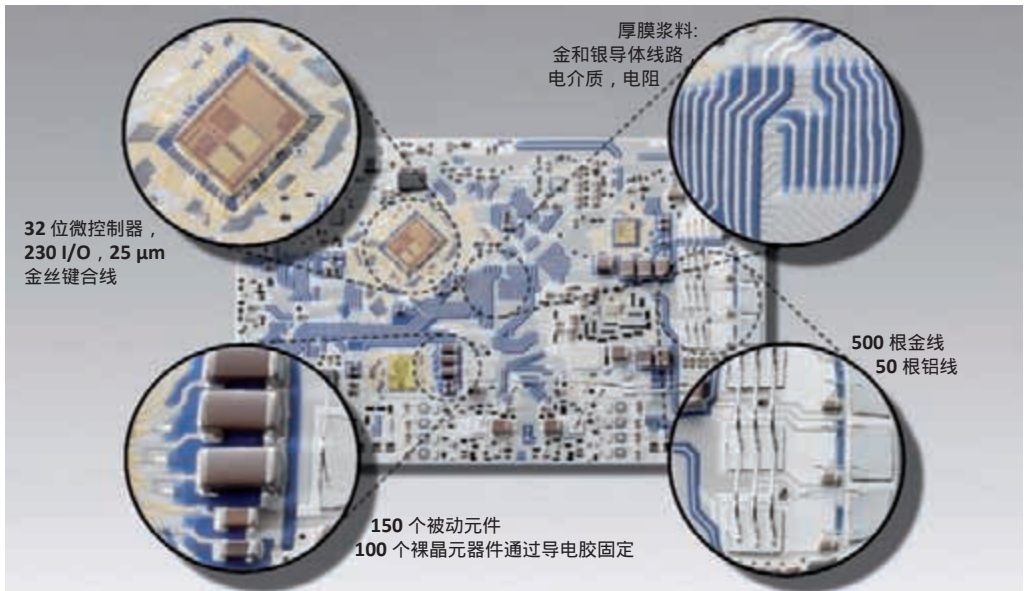


图5 基于厚膜技术安装器件并采用引线键合互连的基片（产品 DQ200）

率器件采用铝引线键合互连（直径 125 - 400 μm ，取决于安培大小）的方法键合。

以支持。下面我们来讨论一下温度曲线的技术要求以便给大家一个客户技术指标的概念。

变速箱控制技术的发展动力

客户需求驱动

为满足变速箱控制不断提高的性能要求，大陆集团积极推动新技术的发展。其目标是集成更多的功能，同时减小体积和重量，并进一步提高质量和可靠性。泵和电机控制以及类似功能使目前的工作电流达到 60 A，并相应加大了功耗。这对基片技术以及散热提出了更高的要求。如果工作频率提高到 200 MHz 以上，则需要采用复杂的电磁兼容（EMC）的解决方案加

一个日趋严峻的问题是在不断提高工作温度的同时进一步提高使用寿命。目前，量产乘用车产品的使用寿命需要达到 6000 到 8000 小时，商用车产品为 42000 小时。这些要求以负载曲线/温度曲线（也称工况曲线），结合环境温度数据和相应时间百分比的形式定义性能（参见附表）。由于器件功耗，特别是功率输出级，TCU 基片某些点的实际温度更高，甚至达到 180 $^{\circ}\text{C}$ 。在产品开发过程中，大陆集团必须选择耐受峰值温度的材料并采用新的设计理念。同样，由于这些因素的影响，对可靠性也提出了更高的要求。

表 1（见下页）所示为大陆集团开发的乘用车变速箱控制单元在环境温度达到 +150 $^{\circ}\text{C}$ 时的典型值。由于组件增加的热损耗，组件峰值温度会更高，如热成像图所示（图 6）。

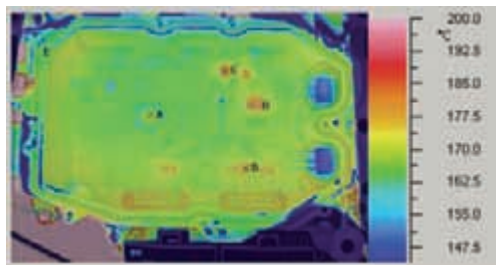


图 6 达到 +180 °C 峰值温度时的电路热成像图

乘用车变速箱温度曲线（典型数据）

环境温度 (°C)	时间 (%)	持续时间 (小时)
135 ... 150	1 %	70
120 ... 135	15 %	1050
20 ... 120	64 %	4480
-20 ... 20	10 %	700
-40 ... -20	10 %	700

高温是变速箱控制业务单元所面临的主要挑战。以前的变速箱控制单元采用的是电子封装方案，而现在正受到所用材料物理和/或化学特性的限制。材料在更高工作温度下的特性往往难以准确掌握，必须在更大的温度范围内进行耐用性测试和认证。无疑，材料暴露在变速箱机油下受到的影响没有充分的数据，例如密封或外壳材料。变速箱机油因客户和产品而不同。同时，变速箱控制单元在使用过程中，变速箱机油也会发生变化，这意味着，必须针对各种变化对材料特性重新进行检测。可靠性的极限也必须重新确

定并得到保证。考虑到使用期间电子负载面临的各种特殊性（温度 + 振动 + 机油影响 + ……），我们必须掌握所有相关的故障机制。若在新产品开发时，现成的材料和封装不能满足需要，那么我们必须开发新的方案。这些在材料和流程方面创新的例子将在下一节列举说明。

新器件提出挑战也提供了动力

多样化新器件配置是开发新型电子封装解决方案的主要动力。变速箱控制必须满足的功能要求往往以更加高度集成的硅片来实现。随着半导体技术的进步，包括实现半导体结构小型化，半导体厂商不断缩小芯片尺寸，增加每块晶元的芯片数量，从而降低芯片单位成本。这种发展推出的新一代半导体使大陆集团所收到的晶片在更紧凑的接线区上具有多得多的 I/O。这对于芯片在基片上的组装有重大的影响。图 7 以 32 位微控制器为例说明新器件产生的影响，微控制器是变速箱控制的核心器件。

目前，变速箱控制单元使用的 32 位微控制

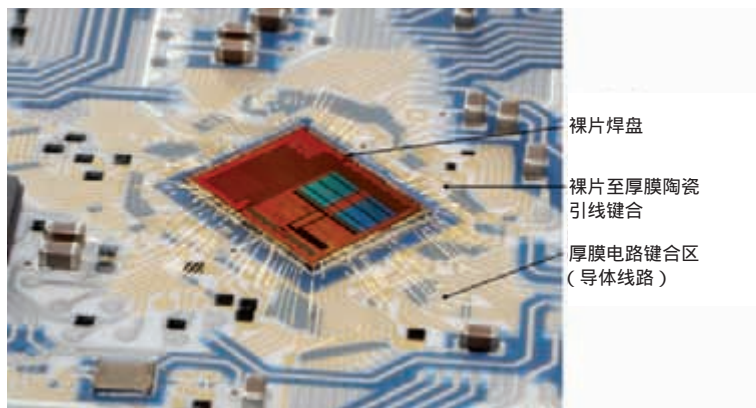


图 7 采用 32 位微控制器芯片的变速箱控制单元局部放大图

器芯片约有 200 至 250 个键合区，相互间距为 $80\ \mu\text{m}$ ，键合区面积为 $65 \times 65\ \mu\text{m}^2$ 。在目前开发的相应产品中使用的微控制器具有 300 到 400 个引脚且线间距为 $60\ \mu\text{m}$ ，其接线端尺寸仅有 $52 \times 52\ \mu\text{m}^2$ 。这在相应的小型化元件的外形尺寸也能见到，不过这里列出的是无源器件。

为推出新的产品方案，大陆集团必须不断对新的器件方案作出响应，并在电子封装领域推进新的研发。在上面所提及的微控制器的例子中，需要采取以下措施才能将新型微控制器应用到新的 TCU 产品中：

1. 开始开发控制单元时，不可能采用当时使用的 $25\ \mu\text{m}$ 厚的引线在芯片缩小的键合区进行引线键合，必须减小引线厚度，因此需要进行新材料和新工艺的认证。
2. 将所有必要的互连由芯片键合到基片上。为保证可靠性，必须显著缩短薄引线允许的引线长度。然后，还要减小基片键合区键合引线的间距和导体宽度（目前为 $150\ \mu\text{m}$ ）。由于这种新要求采用当时的丝网印刷工艺不可能制作精细的导体线路，因此需要改进基片技术。
3. 大陆集团集成式变速箱控制单元中，陶瓷基片一般采用导热胶固定到外壳板上。硅片集成度的提高通常会产生更大的功耗密度。为保证芯片充分冷却，需要改进导热胶（高导热率材料或减小导热胶膜的厚度）。

以上列出了厚膜基片采用微控制器芯片需要对电子封装进行的改进，以便采用新的方法将基片和互连技术应用到解决方案中。

大陆集团通过创新技术方案以确保先进性、适用性和竞争力

综上所述的技术创新和优化测试及技术认证是大陆集团成功的关键。为巩固这种优势，大陆集团需要不断开发新的方案，将所需的技术解决方案在可预知的时间内融入到具体产品中，实现量产并得到客户的认可，这样的市场需求切实存在。同时，满足不断增长的产品需求，以保证大陆集团在产品细分市场的主导地位（如 DCT），这些都需要不断提高技术水平。

以下方案可以作为大陆集团目前在新型材料领域创新的例证：

- 新型耐高温外壳材料
- 硅片特殊类型金属涂敷保证高度可靠的引线键合（耐受 $+175\ ^\circ\text{C}$ 高温负荷的能力至少达到 10 000 小时）
- 改进导热材料的传热性，保证器件产生的热量有效散热到外壳底座
- 改进器件与基片之间的导电材料，如导电胶和耐高温引线键合材料
- 工作温度一般为 $+175\ ^\circ\text{C}$ 新材料

大陆集团变速箱控制业务单元利用测试专用的总成对这种新材料解决方案进行例行检测和认证。例如，图 8 所示为新型导电胶材料与新组件封装粘合的检测步骤。检测目的是保证新组件本身以及导电胶互连能够耐受相关产品的温度（ $+200\ ^\circ\text{C}$ ）和非常高的振动要求。



图8 检测用于变速箱控制的新型组件封装导电胶互连基片（局部放大图）

所有材料的开发必须采用相应的分析方法和工具确定这些新材料的特性。大陆集团变速箱控制业务单元以热力学和化学分析为主，非常注意努力提高分析和检测能力并发展出针对变速器控制技术要求的专用测试方法。

下面以小型化厚膜陶瓷电路的最新研发成果为例，说明基片和互连领域的创新。

如前所述，新型高密度引脚半导体器件对基片导体线路宽度和间距提出了相应的要求。由于烧结过程中厚膜浆料的流动，现有的工艺受限于导体线路和可达到的间距状况的制约。在量产条件下，金浆料可达到的最低线路宽度为 $150\ \mu\text{m}$ ，间距为 $100\ \mu\text{m}$ 。这样的结构对于未来高密度引脚芯片过于稀疏。在密度要

求更高的情况下，需要增加介质层和第二金属层。

大陆集团新型激光成型解决方案避免了这些相关工艺的限制。与直接丝网印刷线迹不同，这些区域首先按连续的区域印制，然后利用激光切割线路间距，最后灌入浆料烧结。

这样的加工结果具有显著的优点：

- 这种工艺可以实现 $35 - 40\ \mu\text{m}$ 非常小的线路间距，换句话说，获得丝网印刷在基片上不可能达到的间距。量产情况下，目前激光成型已经可以加工 $100\ \mu\text{m}$ 线路间距（=导体线路加间距）（相比之下，传统丝网印刷金导体线路的行距为 $250 - 300\ \mu\text{m}$ ）。
- 全面降低导体线路和间距可以减少厚膜基片布线所需的总面积，从总体上缩小陶瓷基片。
- 降低间距可以提高布线密度，在大多数情况

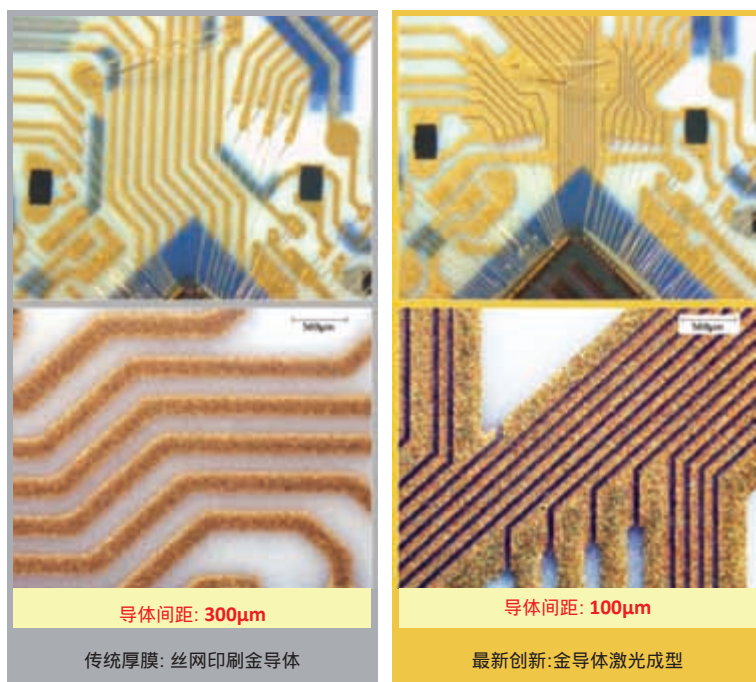


图9 传统厚膜技术丝网印刷金导体（左图）与金导体激光成型新工艺（右图）对比

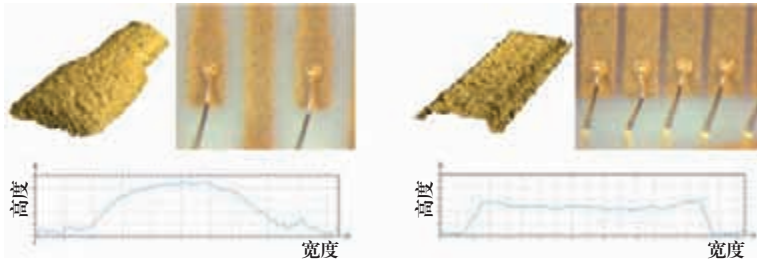


图 10 激光成型金引线键合工艺提高质量
左图: 传统陶瓷基片印刷键合区平度

右图: 激光成型后键合区平度

下, 可免去增加金属层和相应的介质层, 从而节省材料、减少加工步骤并降低成本。

- 降低导体间距可以相应缩短金线键合的键合区距离。由于键合区距离比过去缩短, 因此可以采用含有大量 I/O 的半导体芯片。

现在, 接线区不仅排列更加均匀, 而且与过去采用的厚膜技术相比更短了。由于激光成型切割在大面积导体面进行, 基片接线端比采用丝网印刷技术更加一致。这样, 可以进一步提高引线键合互连的可靠性。

总之, 激光成型导体线路创新工艺可保证自主开发的厚膜基片满足今后几年的电路复杂性和密度提高的要求。

竞争优势源于高效的技术网络

控制单元电子的封装创新不仅依赖于产品开发期间的自主设计, 大陆集团变速箱控制业务单元还充分利用研究机构、大学、供应商及其它外部和内部单位组成的高效技术合作网络。联合研发项目往往得到客户, 甚至竞争对手的积极参与, 从而可以洞察其它行业的应用, 借

助外部力量促进创新。目前进行的微控制器封装概念的改进, 延长使用寿命的新型焊接材料开发项目就是有力证明。

大陆集团始终将技术创新放在首位。

为建立下一代变速箱控制系统的优势和确保今后产品的竞争力, 必须推动内部的基础技术及高级技术的发展。设计标准、新型材料和生产工艺等方面企业间的技术合作将促进这一目标的实现。

最新系统化集成产品

大陆集团与舍弗勒集团的汽车客户进行合作, 积极提高变速箱电子、传感器模块和液压单元的集成度, 以减少空间要求, 消除不必要的互连, 从而降低成本并提高可靠性。图 11 所示为大陆集团产品目前达到的技术水平以及将产生于进一步集成的新产品:

图中深蓝色部分为无传感器的变速箱基本电子控制单元, 大陆集团为客户提供的独立单元和附着式产品解决方案都是这样的系统。集成传感器模块(浅蓝色部分)扩展了变速箱控制单元向集成式方向发展的功能范围, 变速箱控制单元已成为现代汽车自动变速箱的标配设备(传统自动变速箱、双离合变速箱和 CVT)。

目前产品开发以及新产品还将进一步整合泵和发动机控制系统。这些系统额定容量典型值为 150 - 500 W。把这些附加的功能添加到变

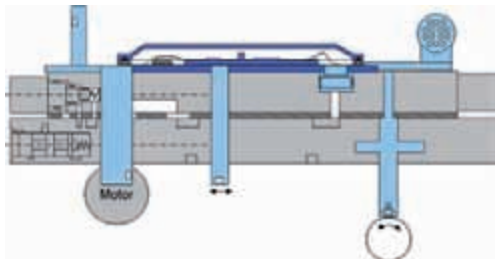


图 11 集成度更高的系统与产品

速箱控制器已经是一个很大的技术挑战，因为我们需要面对更大的电流和抗压保护的额外费用。如果最终整合了阀体和液压单元（灰色部分），大陆集团和舍弗勒还将继续开发集成度更高的单元和产品。这将使我们面临新的问题，需要我们在材料和电子封装方面为产品提供新的解决方案。

电子封装解决方案的新方法

汽车电子占整个电子市场的 5% 到 7%。电信、工业和军工技术等其它应用领域已确定了诸如半导体技术、组件封装技术、基片技术等方向的主要发展方向。为保证下一代变速箱控制单元取得成功，大陆集团必须调查整个电子领域的发展趋势，分析可行性，以满足变速箱控制的特定需求。某些情况下，现有解决方案（极少）必须针对汽车行业的更高要求进行认证。而大部分情况下，往往需要全面的技术去适应（如加宽间距、加大导体线路支持更大电流、专用基础材料……），或全新解决方案（激光成型厚膜电路，如前面举例所述）。

今后变速箱控制的开发重点包括：

- 增加功能（在空间允许的情况下）

- 系统集成（控制电子、执行器技术、传感器、机械部件）
- 小型化（器件、基片、互连、整体器件）
- 降低成本
- 坚固性（更高的工作温度、延长使用寿命、降低故障率……）

从大量客户调查来看，电子单元需要多大的空间是主要问题。对集成式变速箱控制更是如此。因此，作为讨论重点，在此主要说明非封装半导体芯片的小型化在未来解决方案中的可能性（图 12）：

以前半导体芯片采用导电胶组装，之后采用引线键合。虽然这种工艺被普遍采用，但它需要在芯片之外增加引线键合区域，取决于需要互连的引线键合数量和行数。大陆集团正在利用这种工艺实现四行引线，线径为 23 μm 。这种方法可使微控制器与基片的互连点达到 600 个（图 12 中左图所示）。

变速箱控制单元尺寸主要取决于所需基片面积、无源器件数量、芯片数量、芯片自身面积以及基片引线键合互连需要增加的面积。如果完全消除引线键合互连，采用焊锡（焊球）将芯片焊接到基片连接区上，基片（2D）上芯片所需面积最小。根据系统相关的原因，这种称为“倒装芯片”（FC）的技术基于基片上的导体线路宽度和间距与芯片本身相当。而且，安装和检验的生产技术十分复杂，所有这些说明了为什么 FC 技术到现在才达到了一个可接受的状态。大陆集团也在这方面进行努力，目前正在进行技术调查，以确定应用于变速箱微控制器是否，以及在何种条件下可以采用倒装芯片技术（中图：大陆集团倒装芯片固定微

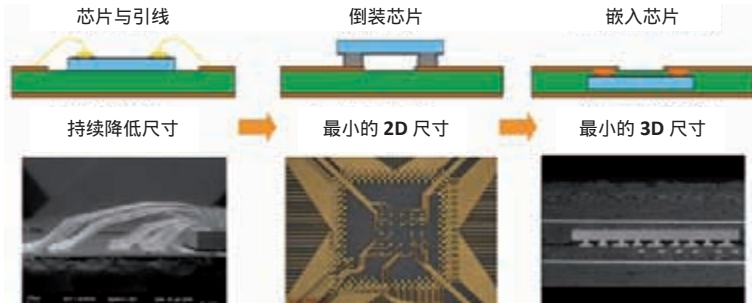


图 12 芯片结构小型化解决方案新概念

控制器的测试电路)。

进一步实现微型 2D 解决方案小型化的唯一办法是将其植入基片中 (3D)，而不是安装到基片上。

这种情况下，芯片通过多种工艺嵌入基片。这类称为“芯片嵌入技术”的新概念是目前 PCB 开发中的主要问题，用以满足未来汽车电子及其它应用需求。与竞争对手一样，大陆集团也在通过研究项目积极开发新方法。例如，大陆集团变速箱控制业务单元目前正在开展 VISA BMBF 研究项目 (全面集成汽车电子中的功率电子系统)。项目的目标是将有源器件 (如变速箱控制中的微控制器) 和无源器件 (如电阻) 嵌入到电路板中，然后检测它们在变速箱应用中的实用性。

总结

对于大陆集团变速箱控制业务单元来说，技术创新是其产品获得技术和商业成功，保持并进一步提高竞争力、创新力和市场主导地位的重要因素。所涉及的标题的重要性是非常明显的。选择正确的材料，实施新的电子封装概

念对未来变速箱控制将产生决定性的影响。这将关系到能否满足客户尺寸与重量、可靠性、质量、环保和成本的需求。

变速箱控制是一个完全以客户为中心的整体解决方案。每种产品在许多重要方面各不相同，如功能、传感器系统、设计、使用寿命要求、温度、可靠性等。这说明必须始终围绕客户需求来定制解决方案，以便为每个客户提供最佳的技术解决方案来保持竞争优势。为此，大陆集团开发了完备的、可大规模量产的设计概念。在前面已讨论过的大陆集团自主拥有的厚膜技术就是其中的一个例子。

所有上面所涉及的各个方面会一直延伸到将来。仅仅依靠目前材料解决方案绝不可能满足未来产品开发的需求。材料的适用性和认证需要反复进行，即使已实现规模量产的产品也应如此——例如，当客户改变使用的变速箱机油时。客户对汽车电子的工作温度、使用寿命以及提高可靠性日益严格的要求，促使大陆集团不断努力开发已知材料和电子封装概念，分析、认证并推出新的解决方案。基础研发成果、积极从事的研究项目以及公司内部和外部高效的技术合作网络为大陆集团提供了极为有利的条件。大陆集团变速箱控制单元的生产已完全实现全球化，在欧洲、亚洲 (中国) 和美洲都建立了生产工厂。公司已在汽车厂商设有工厂的国家建立了当地机构。这使得大陆集团缩小了专有技术研发与生产之间的距离，能及时针对客户的特定需求提供乘用车和商用车变速箱的解决方案。

