

白皮书

缩短工业机械的多电机控制开发时间

花田 雅之，物联网及基础设施事业本部，瑞萨电子有限公司

川尻 洋之，物联网及基础设施事业本部，瑞萨电子有限公司

2020 年 10 月

概要

现今，使用电机的系统性能稳步提升，而与此同时，伴随着性能提升，BOM 成本上涨成为一大问题。此外，对于工业机械，应对故障的安全实施也是一个问题，以及还有遵守功能安全（IEC61508）的迫切需求，但开发成本的增长也是困扰开发人员的一个因素。

在本白皮书中，我们将介绍如何通过器件和解决方案来解决上述问题。

- **介绍用于电机控制的微控制器**

RX 系列中用于电机控制的 ASSP 微控制器（RX66T/RX72T 系列）可使用单个微控制器实现多电机控制



- **介绍电机控制开发解决方案**

- **BLDC 电机评估系统**

套件主要由可轻松评估永磁同步电机（无刷直流电机）的变频器组成

- **电机控制应用说明**

有关实施方法的详细信息，包括实现电机控制所需的知识以及可促进评估的源代码

- **Renesas Motor Workbench 2.0**

一款强大的开发工具，可缩短开发时间



- **介绍面向工业机械的功能安全解决方案**

解决方案可显著简化功能安全认证流程，减轻开发工作负担。



您在电机控制开发过程中是否有遇到以下问题？

1. 我们希望通过单个微控制器实现多电机控制，从而降低 BOM 成本。
2. 我们希望轻松构建一个开发环境来实施多电机控制。
3. 为提高安全性，我们想要开发一个支持功能安全（IEC61508）的系统。

下面列出了这些问题的解决方法。

1. 能够实现多电机控制的微控制器

要想通过单个微控制器实现多电机控制，必须克服以下障碍：

- A. 首先，如果三相互补 PWM 输出定时器的数量与驱动电机的数量不同，则无法控制多个电机。
- B. 为控制多个电机，需要足够强大的 CPU 处理能力（计算能力）。
- C. 为控制多个电机，这些电机需要具备反馈功能（位置检测）。对于反馈，有 1 至 3 分流方法、旋转变压器方法和编码器方法，每种方法都需要多个 A/D 转换器和相位计数功能。

RX 系列中用于电机控制的 ASSP 微控制器（RX66T/RX72T 系列）可满足 A.B.C. 功能。如图 1 所示，您可以构建一个具备单个微控制器的系统。

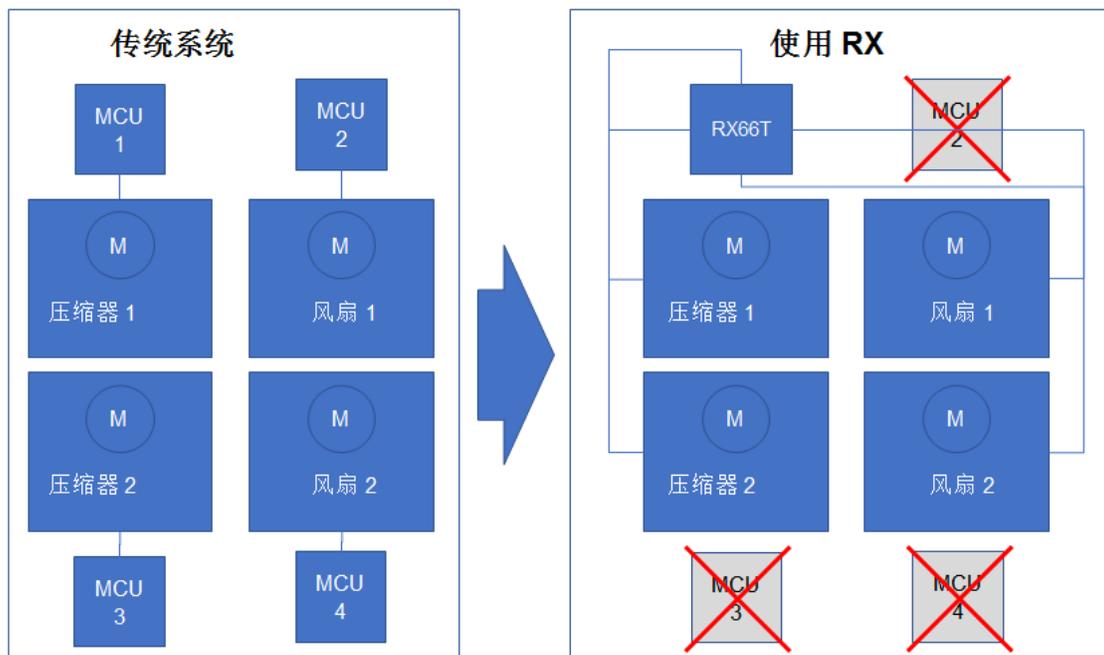
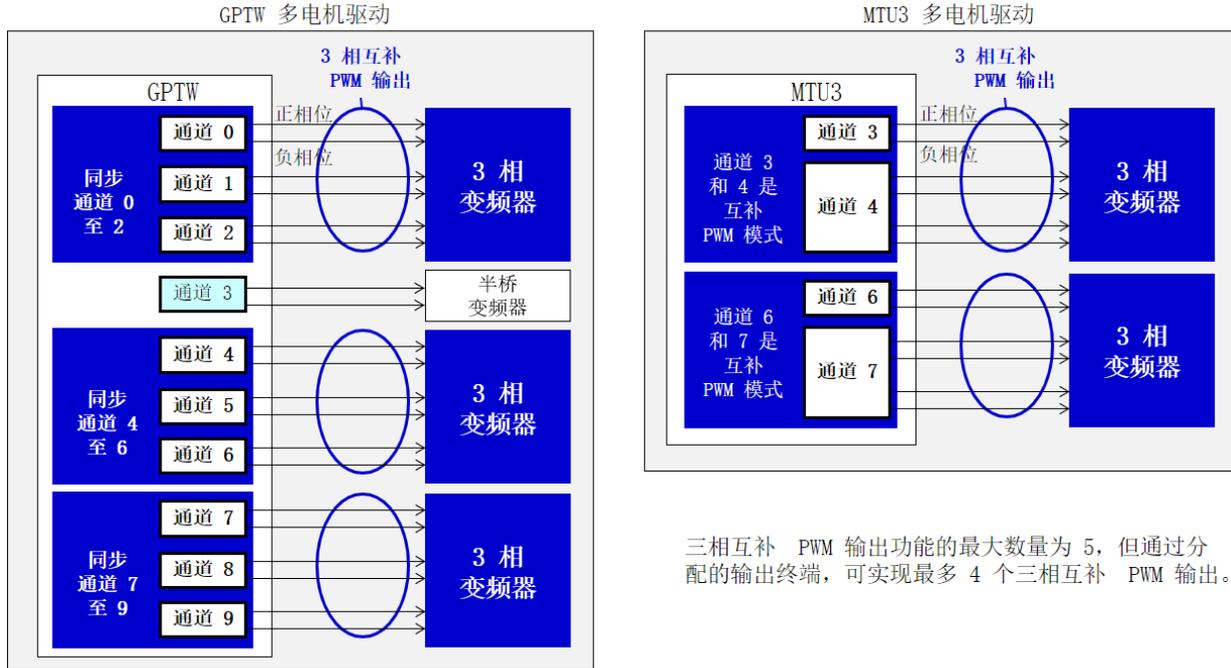


图 1：系统比较 - 传统系统与使用 RX 系列的系统

接下来，深入了解可控制多个电机的 RX 系列的特性功能。

A. 三相互补 PWM 定时器

在 RX66T/RX72T 系列中，包括 MTU3 定时器和 GPTW 定时器具备三相互补 PWM 输出功能，如下方图 2 所示。该定时器可输出多个三相互补 PWM。具备一个特性功能，即在输出多个三相互补 PWM 时，能够降低软件负载。



三相互补 PWM 输出功能的最大数量为 5，但通过分配的输出终端，可实现最多 4 个三相互补 PWM 输出。

图 2: 三相互补 PWM 定时器的数量

- 三相互补 PWM 定时器 - 特性 1 (双缓冲器功能)

缓冲寄存器用于加减计数器的上计数和下计数，从而实现左右不对称的互补 PWM，适用于分流控制过程中的电流检测。此外，中断次数可减半（软件干预减少 50%）。通过减少软件干预，大量 CPU 资源可用于耗时的电机控制操作。

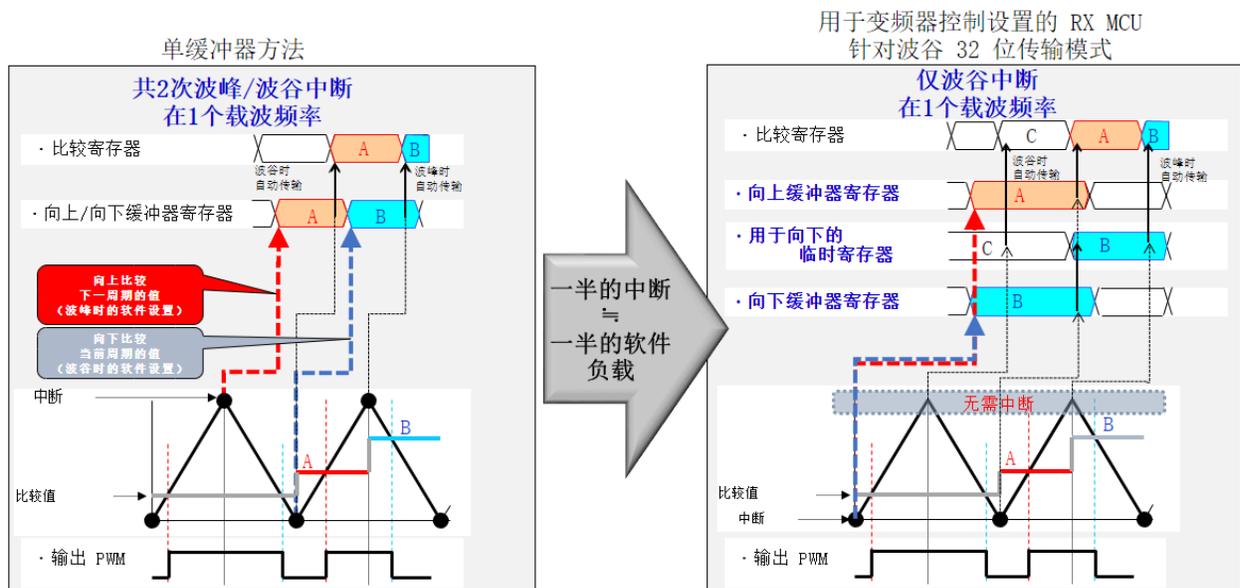
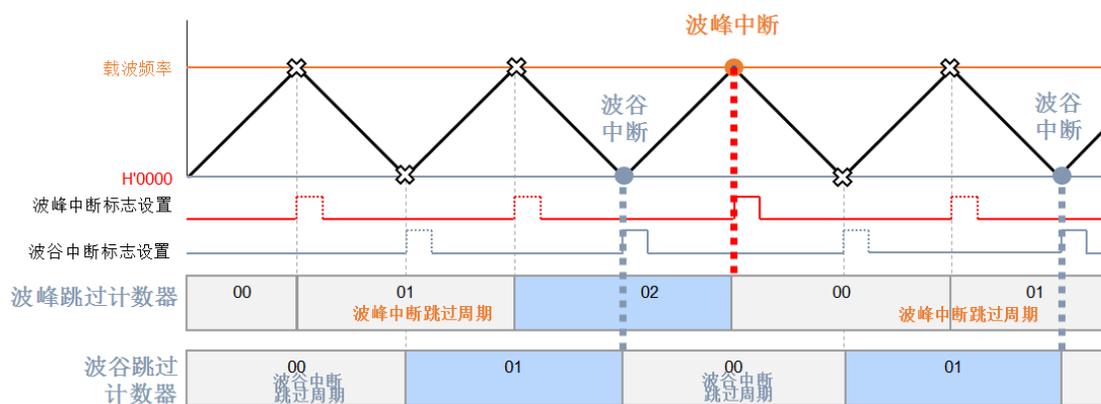


图 3: 三相互补 PWM 定时器的双缓冲器功能

• 三相互补 PWM 定时器 - 特性 2 (中断和 A/D 转换的细化功能)

控制多个电机时，处理可能无法及时完成。以前，软件用于减少中断，但由于 CPU 干预，出现了中断开销和计算中断等问题。而且，即使 A/D 转换结果已丢弃，仍会执行 A/D 转换，因此如果您想要在 A/D 转换过程中在别处使用它，就需要等待。

另一方面，对于中断和 A/D 转换启动触发器，细化功能具有其自己的细化计数器。只需通过设置细化计数器，不必要的中断和 A/D 转换启动触发器就会自动减少。由于该功能可以在不使用 CPU 资源的情况下进行处理，因此是最适合用来控制多个电机的功能。



* 图中显示了 MTU3 上中断跳过功能 1 的示例

示例：波峰时跳过 = 计数值 02，波谷时跳过 = 计数值 01

图 4: 三相互补 PWM 定时器的中断细化功能

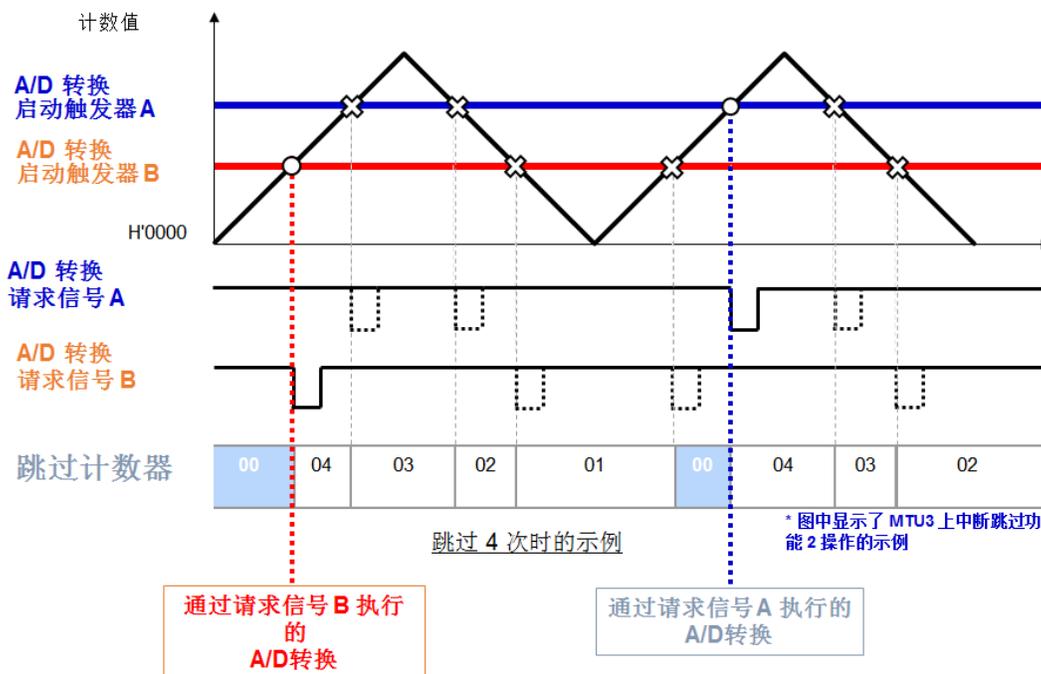


图 5: 三相互补 PWM 定时器的 A/D 转换细化功能

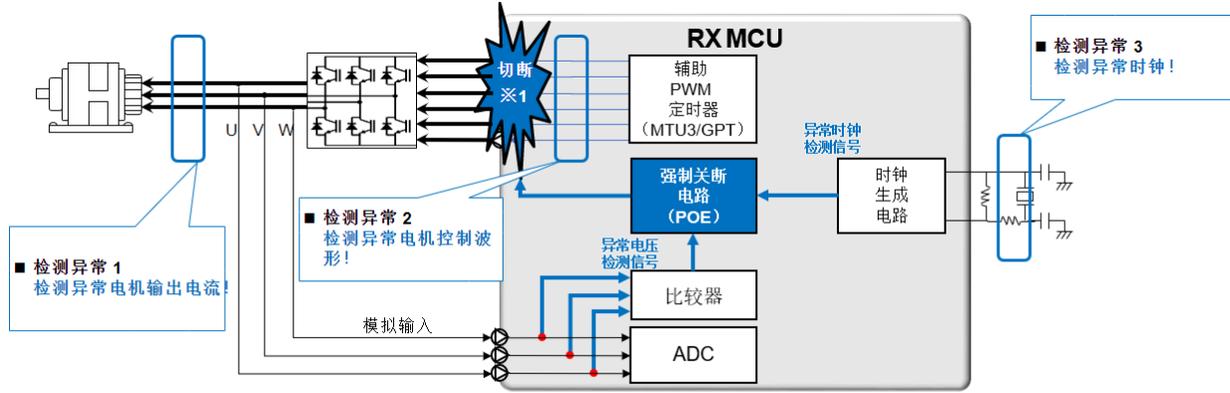
• 三相互补 PWM 定时器 - 特性 3 (PWM 输出保护功能)

电机控制所需的故障安全功能是 PWM 输出保护功能。如果在电机控制过程中出现问题，该功能可快速停止电机驱动，而 RX66T/RX72T 系列可强制对多个电机进行分别关闭。

- ✓ 在不同条件下，GPT 和 MTU3 输出可停止，无需软件干预。
- ✓ 无论定时器工作状态如何，都可以停止，这有助于实现强大的故障安全功能。
- ✓ 不仅可以强制关断定时器输出，还可以切换到通用 I/O。
- ✓ 当比较器检测到异常电压，以及电压异常消失时，自动释放强制关断。

触发因素	触发内容
POE# 输入终端	检测到低沿/采样产生的电平
振荡停止	检测到主时钟振荡器的振荡停止
互补 PWM 输出电平比较	正/负输出同时激活
比较器检测	检测到比较器输出
软件	由寄存器写入控制时

表 1: 三相的触发因素



※1: 计时器输出 Hi-Z, 或切换通用 I/O

图 6: PWM 输出保护功能

B. 计算能力

• CPU 能力

由于 CPU 性能超过竞争对手产品，多电机控制计算可顺利执行。RX66T/RX72T 系列配备最新的 RXv3 内核，提高了 RX72T 在 200MHz 时的性能，使其远远高于 RX62T 在 100MHz 时的性能。在相同频率 160MHz 下，RX66T 的性能比竞争对手的 ARM 内核微控制器（Cortex-M4（CM4））高大约 1.7 倍。因此，可以在不提高工作频率的情况下表现出与竞争对手微控制器相同的性能，这有助于降低功耗。

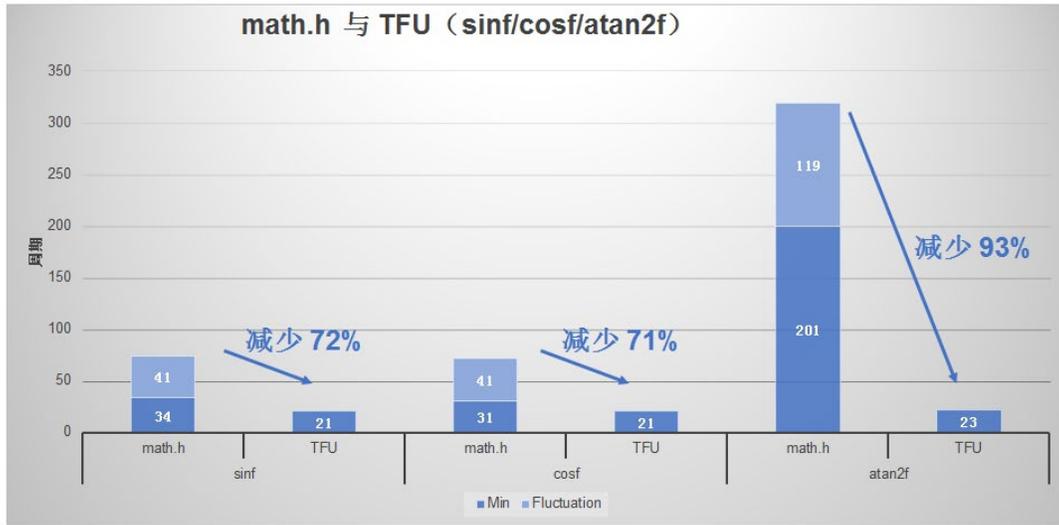
- ✓ RX72T Maximum 1160 CoreMark 是 RX62T 的 3.7 倍，是 RX24T/U 的 3.3 倍，远超同频段的竞争对手产品。
- ✓ 凭借作为 5V 兼容产品的最高性能水平，这有助于提高系统性能、功能和响应能力。



图 7: Coremark 基准比较

• 三角函数加速器 (TFU)

RX72T 配备三角函数加速器，能够高速执行 FOC 控制所需的三角函数运算。与标准库中的“math.h”相比，使用 TFU 时，“sin”函数的处理时间可缩短多达 72%；“cos”函数的处理时间可缩短多达 71%；而“atan”函数的处理时间可缩短多达 93%。CPU 负荷可显著减少，同时突显了 RX72T 针对多电机控制的性能。



该结果是由 CC-RX V3.01 测量的参考值，不是详尽的输入值。

图 8: TFU 的效果 (math.h vs. TFU)

• 寄存器保存区功能

由于许多中断处理是在多电机控制中执行的，因此中断处理程序负荷较重。通过使用 RX72T 中配备的寄存器保存区功能，中断处理程序处理时间缩短 50% 甚至更多。

请参考 APN: 使用寄存器保存区功能的 RX72T 组 (R01AN4436)

例如：用于异常处理程序的寄存器保存/恢复

▪ 传统软件操作

- 保存：(寄存器数量) 周期
- 恢复：(寄存器数量) 周期

```

C source:
#pragma interrupt
handler
void handler(void){
...
...
...
}
                    
```

Output code:

```

_handler:
PUSHM R14-R15 } 7cycle*
PUSHM R1-R5
...
...
...
POPM R1-R5 } 7cycle*
POPM R14-R15
RTE
                    
```

通过寄存器数量增加运算周期

*保存/恢复寄存器的数量取决于处理程序结构

▪ RXv3 寄存器保存区功能的 (RX72T)

- 保存：1 个周期
- 恢复：3-6 个周期

```

C source:
#pragma interrupt
handler(bank=3)
void handler(void){
...
...
...
}
                    
```

Output code:

```

_handler:
SAVE #03H } 1cycl
...
...
...
RSTR #03H } 3-6cycle
RTE
                    
```

通过快速寄存器保存，缩短有效例程的响应时间

*该描述以 CC-RX 为例。

图 9: 寄存器保存区功能的效果 - 传统微控制器与 RX72T

C. 电机的反馈功能（A/D 转换器、编码器）

RX66T/RX72T 系列具备获取多电机反馈信息的功能。尤其 A/D 转换器最多配备 3 个单元，对于 3 分流方法，最多有 2 个 3 通道单元同时采样和保持。与传统扫描转换相比，电流获取点不变，软件不需要进行校正处理。该系列还配备数据复制寄存器，可保存 1-分流方法的每个转换触发器的转换结果，因此可以使用单模拟路径转换两个点。这不仅简化了电路板设计，也减少了开销中断。此外，配备伪差分输入类型运算放大器的 6 个通道来获取分流电流。传统的单端类型受常见噪声的影响，外部电路配置变得复杂，但伪差分输入类型运算放大器可解决这一问题，并减少外部运算放大器。编码器功能具有支持各种编码器输出的模式，可直接导入到微控制器中，无需经过外部电路的转换。这是一个灵活的系统。

• A/D 转换器功能

改善了现有产品的模拟功能。更易于使用。

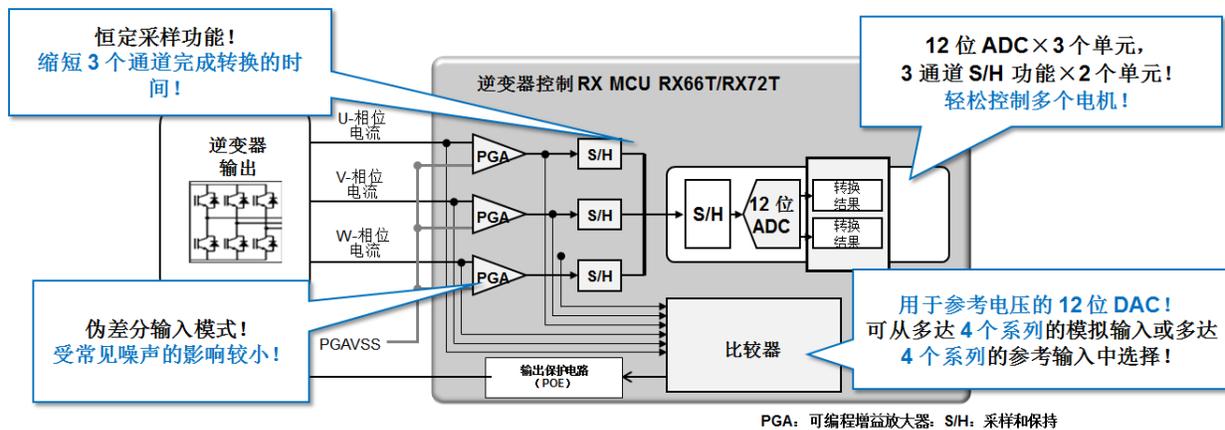


图 10: RX66T/RX72T 系列配备的 A/D 转换器的特性

• 编码器功能

最适合用于测量 2 相编码器和脉冲输入。将具有相位差的 2 个脉冲信号输入到 MTCLKA (MTCLKC、GTIOcNA) 和 MTCLKB (MTCLKD、GTIOcNB) 终端，并计算（加/减）边缘的数量。相位计数有 5 个模式，支持各种编码器/脉冲输入类型。

计数方向	模式 1		模式 2		模式 3		模式 4		模式 5	
	计数条件	计数边缘	计数条件	计数边缘	计数条件	计数边缘	计数条件	计数边缘	计数条件	计数边缘
加 (正向)	相位 A 相 > B 相	A 相和 B 相 上升/下降	B 相高	A 相下降 A 相上升 A 相两个边缘	B 相高	A 相下降 A 相上升 A 相两个边缘	相位 A 相 > B 相	B 相上升/下降	A 相高/低 B 相高/低	B 相下降 A 相下降
减 (反向)	相位 A 相 < B 相	A 相和 B 相上 升/下降	B 相低	A 相下降 A 相上升 A 相两个边缘	A 相高	B 相下降 B 相上升 B 相两个边缘	相位 A 相 < B 相	B 相上升/下降	无	无

图 11: RX66T/RX72T 系列配备的编码器功能的特性

2. 电机控制的开发环境

从规格审核到测试，系统开发要经历多个流程。在规格审核流程中，我们会考虑微控制器的功能和性能是否符合要求，以便实现系统所需的规格。瑞萨电子应用说明提供电机控制所需的全部信息。接下来，在软件开发流程中，需要构建硬件平台（电路板开发）。瑞萨电子提供一个可用作硬件平台的解决方案（BLDC 电机评估系统）。开发硬件时，您也可以使用提供的电路信息作为参考。此外，在软件开发时，操作可视化可以显著提高开发效率。以前，客户需要准备原始工具（RAM 监控器等），但现在瑞萨电子提供“Renesas Motor Workbench 2.0”（RAM 监控器、参数更改、波形显示）来替代这些工具。这样一来，瑞萨电子拥有每个开发流程所需的解决方案，可以快速、高效、低成本地实现系统开发。

• BLDC 电机评估系统

该套件主要由可轻松评估永磁同步电机（无刷直流电机）的变频器组成。凭借套件中包含的电路板、电机以及可从网站下载的软件，在购买了套件和 CPU 卡后，您可以立即开始评估。该套件可用作硬件开发的参考板和平台。

套件的特性如下：

- 支持 48V/5A，可在购买后立即评估
- 通过更换 CPU 卡，可评估各种微控制器
- 支持 2 电机控制（需要 2 个套件）

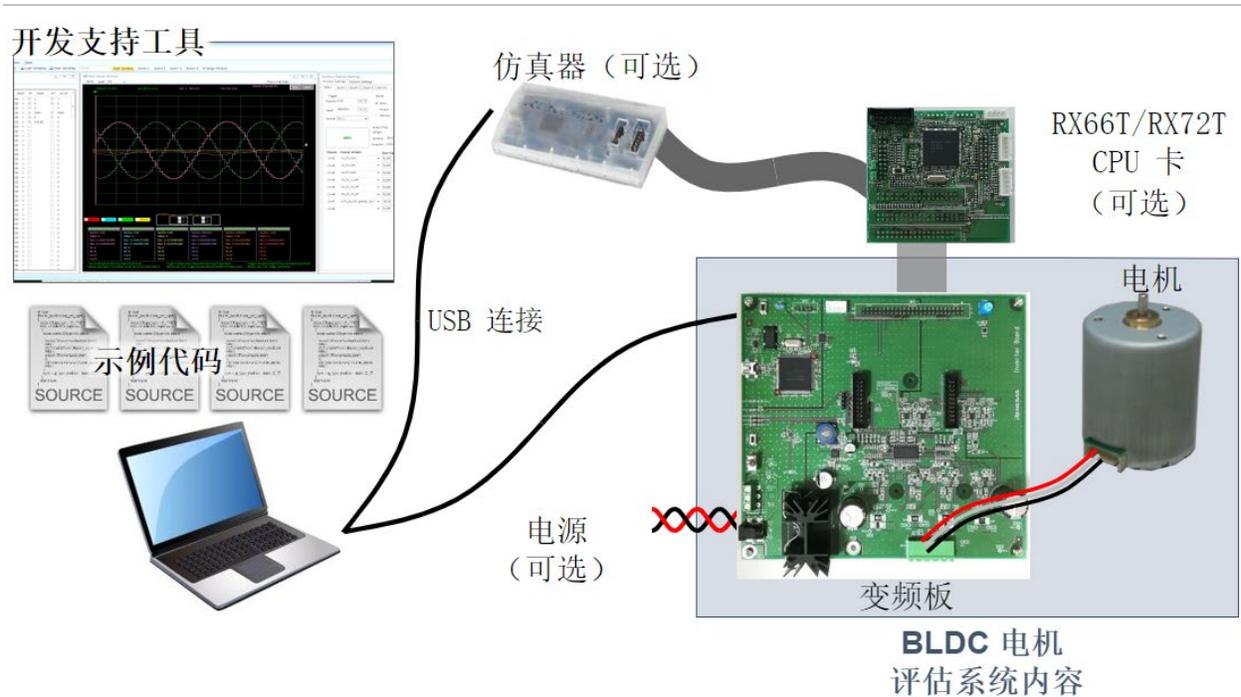


图 12: BLDC 电机评估系统的配置

- [电机控制应用说明](#)

瑞萨电子具备可实现系统功能的算法说明、各种功能的示例代码、实施指导等。我们提供电机控制所需的知识以及可轻松评估的源代码。

应用说明的特性:

- 适用于各种微控制器的 120 度导电控制和 FOC 控制 (霍尔传感器、编码器和无传感器) 软件
- 在每个应用说明中说明控制方法
- 即便是电机控制新手也可以处理的软件, 与电机控制开发支持工具兼容
- 非常适用于检查电机控制寄存器的初始设置
- RX66T/RX72T 系列软件可从 MTU3 和 GPTW 中选择三相互补 PWM 的输出
- RX72T 软件使用三角函数运算器 (TFU) 高速处理 FOC 控制

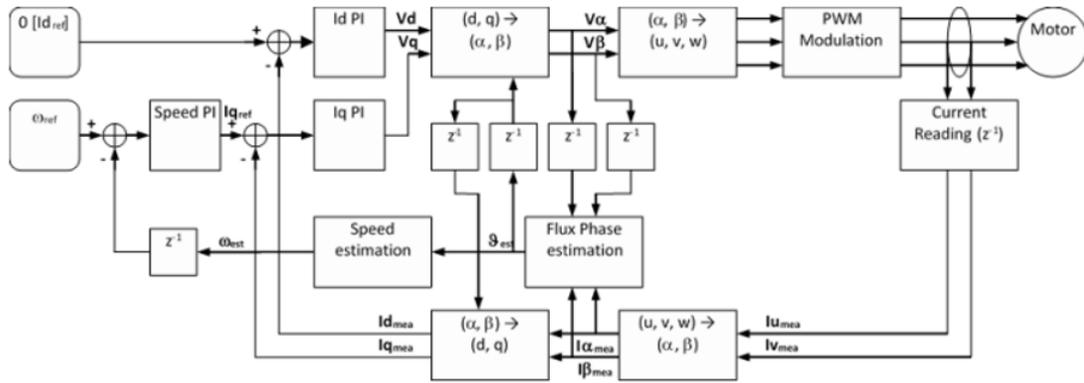


图 13: FOC 算法配置

提供物		目标 MCU	提供途径	收费/免费
软件（电机控制软件和应用笔记）				
使用编码器的磁场定向控制 （CS+ 版本、e2studio 版本）		RX23T、 RX24T、 RX24U、 RX66T、 RX72T	从 网站下载	免 费
相关文档	应用笔记-算法 应用笔记-实施方案			
无传感器磁场定向控制 （CS+ 版本、e2studio 版本）		RX13T、 RX23T、 RX24T、 RX24U、 RX66T、 RX72T		
相关文档	应用笔记-算法 应用笔记-实施方案			
无传感器 120 度导电控制 （CS+ 版本、e2studio 版本）		RX23T、 RX24T		
相关文档	应用笔记-算法 应用笔记-实施方案			
使用霍尔传感器进行 120 度导电控制（CS+ 版本、 e2studio 版本）				
相关文档	应用笔记-算法 应用笔记-实施方案			

表 2：应用说明列表

- [Renesas Motor Workbench 2.0 \(RMW\)](#)

RMW 是一款可轻松集成到用户项目中的软件工具，不需要专用硬件。在传统开发方法中，微控制器的内部变量（A/D 转换结果等）通过串行通信等输出到外部，从而获得控制状态。然后执行电机参数校正、程序更改和编译，重复进行操作评估。RMW 能够在操作电机的同时动态读取和写入变量、显示变量波形并输出

示波器等波形显示数据，无需修改和编译程序。此外，还能够自动识别 FOC 控制所需的电机参数和控制增益（这往往是需要专业知识才能掌握的），结果可以 PDF 文件或头文件的形式生成。RMW 是一款强大的开发工具，能够显著缩短开发时间。

Renesas Motor Workbench 在与目标变频器相连的 PC 上运行，为电机控制开发提供强大支持



分析仪

广泛功能包括触发、缩放和 Commander 传输等，可用于调试和评估。也可作用用户 I/F。

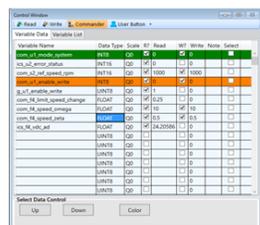
调谐器

轻松实现矢量控制，无需专业知识。利用手动调节功能轻松进行微调，以及快速结果检查。

图 14: Renesas Motor Workbench 2.0 的特性

• 分析仪功能

- 驱动电机时，可动态读取和写入变量
- 驱动电机时，可动态显示变量波形
- 可为波形显示设置触发设置和各种显示设置
- 可以提前为任何变量创建运算序列，然后发送
- 带有批处理按钮，用户可定义和使用此按钮

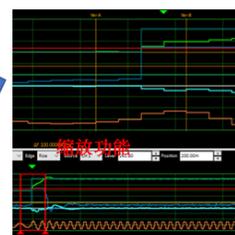


自由读取和写入任意变量，可用于调试和评估。也可作用用户 I/F



8 个通道的变量显示
(每个通道的缩放和偏移设置)

通过使用 Commander 功能，轻松评估阶跃响应（创建和发送指令值）

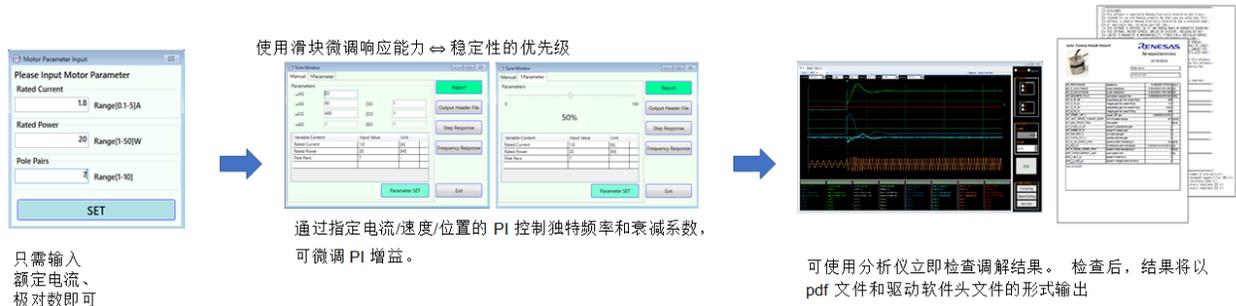


通过触发和缩放功能，轻松进行分析

图 15: Renesas Motor Workbench 2.0 的分析仪功能

• 调谐器功能

- 自动测量电机特定参数（电阻、电感、感应电压常数、惯性）
- 自动调节电流、速度、位置 PI 控制增益
- 自动调节无传感器 FOC 控制的估算增益
- 每个 PI 控制可通过手动调谐进行微调
- 结果可以 PDF 文件或驱动软件头文件的形式生成



*在 BLDC 电机评估系统上工作

图 16: Renesas Motor Workbench 2.0 的调谐器功能

• 如何实施 Renesas Motor Workbench 2.0

为了使用 Renesas Motor Workbench 2.0，仅需在用户程序上设置下列的简单更改。

A. 用户程序更改

- DTC 设置 RAM 区域使用的设置
- 中断设置 SCI TX, RX 中断设置
- 在主进程中调用“ics2_init”初始化函数
- 在指定中断进程中调用“ics2_watchpoint”数据传输函数

B. 通过您的程序编译 Renesas Motor Workbench 2.0 通信库

```
#include "ics_RX23T.h"
#pragma section DTCTBL
unsigned long dtc_table[256]; // caution alignment 0x000
#pragma section
void main (void)
{
  ics2_init ( (void*)dtc_table, port, level, speed, mode);
}
```

```
void int_TM100u (void) /* 100usec 間隔 */
{
  if (3 <= g_u1_cnt_decimation) /* decimation of ICS call */
  {
    g_u1_cnt_decimation = 0;
    ics2_watchpoint (); /* data transfer */
  }
  g_u1_cnt_decimation++;
}
```

3. 工业机械的功能安全 (IEC61508)

获得 IEC61508 认证要花费大量时间和金钱。从开始开发到获得认证，在整个流程中，需要完成如下所示的各种任务。为了减轻这项工作，瑞萨电子提供“面向工业机械的功能安全解决方案”，使微控制器具备安全功能，并进一步简化安全系统认证流程。瑞萨电子通过这些解决方案支持客户开发。

SIL 认证获取流程

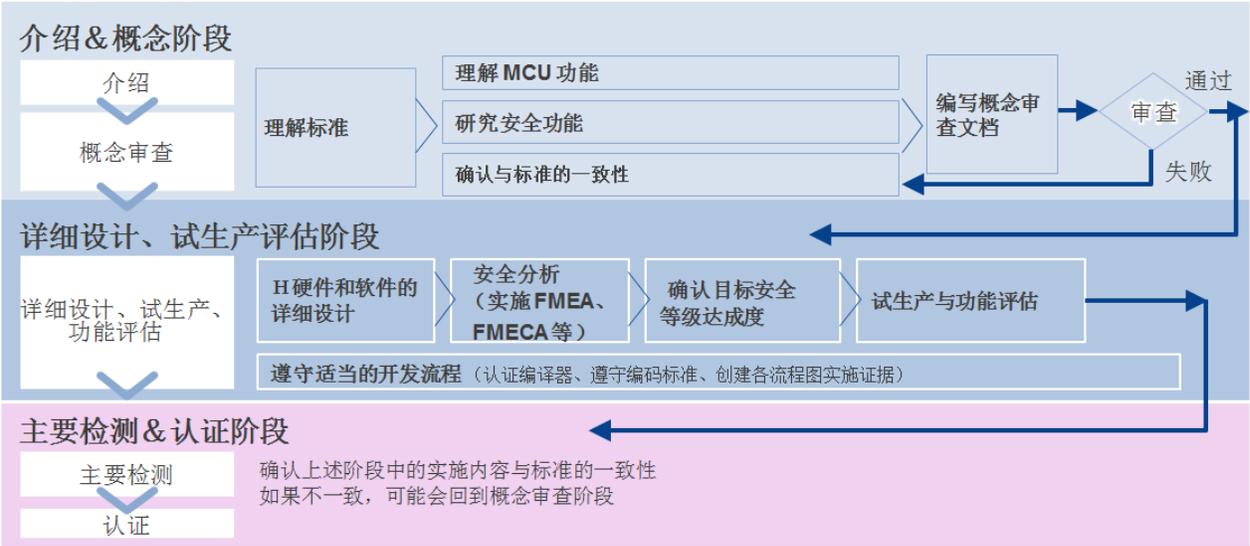


图 17：功能安全系统开发流程

• 面向工业机械的功能安全解决方案的应用开发

在零基础上开始开发应用功能安全的系统将大幅提高成本。瑞萨电子提供的“面向工业机械的功能安全解决方案”，可显著简化功能安全认证流程，并大幅减轻面向工业机械的功能安全系统的开发工作。

另请参考此[白皮书](#)，详细了解瑞萨电子的功能安全倡议和解决方案。有关详细信息，请参见针对工业机械的[功能安全网页](#)。

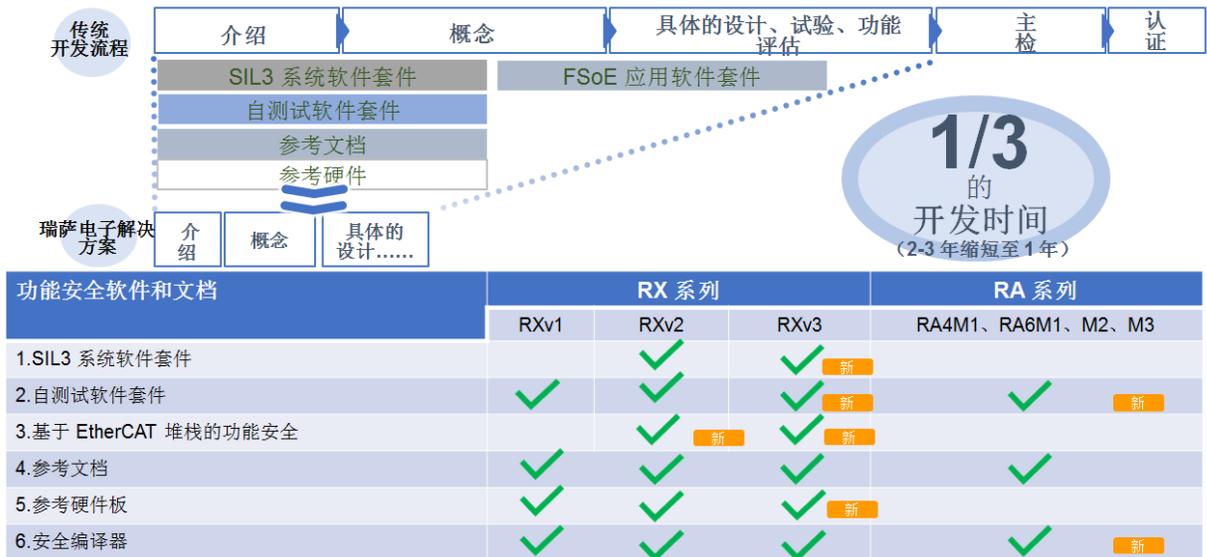


图 18：瑞萨电子面向工业机械应用的功能安全解决方案的效果

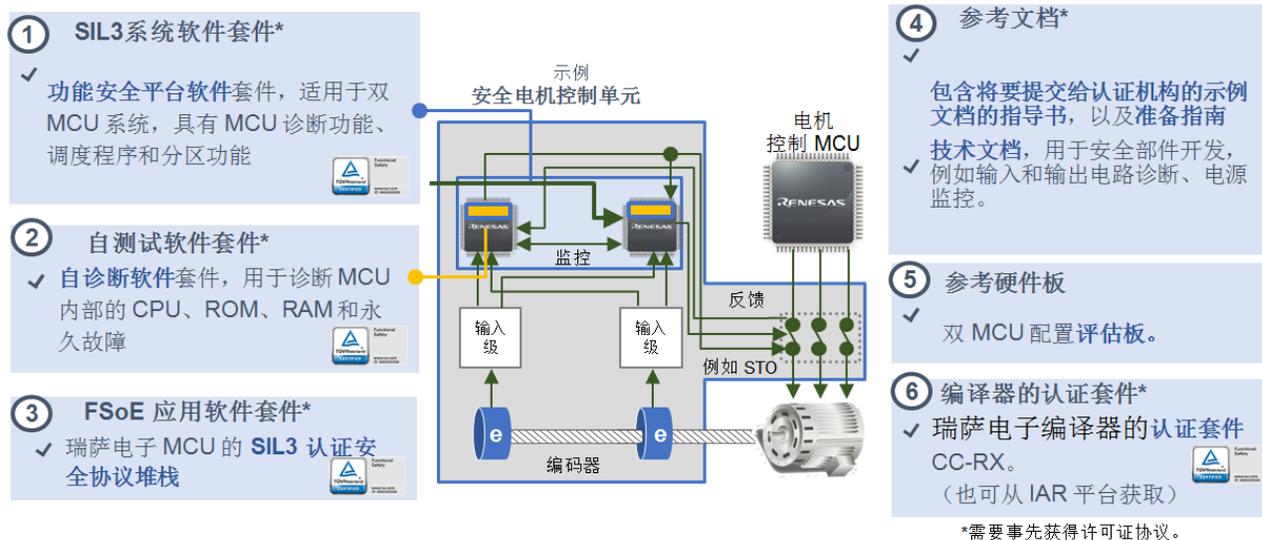


图 19: 瑞萨电子功能安全解决方案

总结

RX66T/72T 配备最新的 RXv3 内核 (CPU) 与三角函数加速器, 与传统 MCU 相比, 性能可提升 3.7 倍。该 MCU 还配备非常适合用来控制多个电机 (最多同时控制 4 个电机) 的外围设备。此外, 其具备用于通信数据加密处理的加密密钥 (AES 和 RSA), 并提供 ROM 数据读保护等加密功能。仅使用该 MCU, 便可以轻松构建安全的环境。

通过使用电机控制开发解决方案的变频器评估板、示例软件和调试工具, 缩短从原型制作到开发和调试的时间。对于功能安全的开发, 与传统开发方法相比, 符合 IEC61508 SIL3 的“面向工业机械的功能安全解决方案”可使功能安全开发时间缩短 60% 或更多。

瑞萨电子帮助降低客户系统的 BOM 成本, 改善功能, 提高开发效率。

了解更多

1. [RX66T](#): 32 位电机控制微控制器 MCU / 64 至 144 引脚
160MHz / 高达 1MB 的闪存 / USB / CAN / PGA / 安全性
2. [RX72T](#): 32 位电机控制微控制器 MCU / 100 至 144 引脚
200MHz / 高达 1MB 的闪存 / USB / CAN / PGA / 安全性 / 寄存器保存区 / TFU
3. [RX 电机控制解决方案](#)
4. [面向工业机械的功能安全解决方案](#)

© 2020 Renesas Electronics Corporation or its affiliated companies (Renesas). All rights reserved. 所有商标或商业名称均是其各自所有者的资产。瑞萨电子认为本档所含的信息在提供时准确无误，但对其质量或使用不承担任何风险。所有信息均按原样提供，不作任何种类的担保，无论是明示、暗示、法定担保，还是因交易、使用或贸易惯例引发的担保，包括但不限于对适销性、对特定目的适宜性或非侵权性的担保。瑞萨电子对因使用或依赖本档所含信息造成的任何直接、间接、特殊、结果、偶然或其他损失概不负责，即使已提示相关损失的可能性亦不例外。瑞萨电子保留停止这些产品或更改其产品设计或规范或本档其他信息的权利，恕不另行通知。所有内容均受美国和国际版权法保护。除非本档特别准许，否则未经瑞萨电子事先书面许可，不得以任何形式或通过任何方式复制本材料的任何部分。访客或用户不得因任何公开或商业目的而修改、分发、发布、传送本材料的任何内容，亦不得对其创建衍生作品。