

摘要

本文档介绍 TC10 协议在利用 DP83TC812-Q1 以太网物理层 (PHY) 的完整汽车以太网系统中的设置和测量。

内容

1 引言	2
1.1 首字母缩写词.....	2
2 TC10 测试设置	3
2.1 概述.....	3
2.2 唤醒至链接序列.....	3
3 测量摘要	4
3.1 完整时序图.....	4
3.2 测量摘要.....	5
3.3 LP1 唤醒至链接时间.....	5
4 时序测量	6
4.1 LP1 WAKE 至 INH (T ₁).....	6
4.2 LP1 INH 至 WUP (T ₂).....	6
4.3 WUP 至 PHY INH (T ₃).....	7
4.4 PHY INH/降压 EN 至降压 nRESET (T ₄).....	7
4.5 降压 nRESET/PMIC 使能至 MCU nReset (T ₅).....	8
4.6 MCU nReset 至 MDIO 通信 (T ₆ 和 T ₇).....	8
4.7 MDIO 主器件配置 + 链接 (T ₈ 和 T ₉).....	9
5 测量评估	9
5.1 关于优化可变 TC10 时间的建议.....	9
5.2 替代 TC10 测试.....	11
6 结论	12
7 参考文献	12

插图清单

图 2-1. 系统唤醒序列.....	3
图 3-1. 唤醒至链接时序图.....	4
图 4-1. LP1 WAKE 至 INH.....	6
图 4-2. LP1 INH 至 WUP.....	6
图 4-3. WUP 至 INH.....	7
图 4-4. 降压 EN 至 nRESET 信号或至 PMIC 使能信号.....	7
图 4-5. 降压 nRESET/PMIC 使能至 MCU(TPR12) nReset.....	8
图 5-1. AM273x-Q1 SDK 的 MDIO 状态机.....	10

表格清单

表 3-1. 测量摘要.....	5
表 4-1. 主器件配置 + 链接的 MDIO 时间表.....	9

1 引言

在当今的汽车行业中，汽车（尤其是电动汽车 (EV)）面临着电子系统过度消耗电池的问题。这个问题可以通过使用 TC10 协议进行局部联网来缓解。TC10 允许在不使用以太网节点及其各自的电子控制单元 (ECU) 时将它们禁用，从而延长行驶里程并降低电池消耗。

Open Alliance TC10 规范是定义睡眠模式和唤醒机制的汽车以太网标准。要了解有关一般 TC10 睡眠和唤醒序列的更多信息，请参阅 [TC10 汽车以太网标准介绍及其重要性](#) 视频。

本文档将演示使用 DP83TC812-Q1 的完整以太网系统的测量；DP83TC812-Q1 是一款符合 100BASE-T1 标准且具有 TC10 睡眠和唤醒功能的以太网 PHY。当处于睡眠状态的 ECU 接收到 TC10 唤醒脉冲 (WUP) 时，ECU 必须在合理的时间内唤醒并建立以太网链路。因此，睡眠的 ECU 能够以极小的延迟唤醒并执行所请求的功能。本应用手册将分析 TC10 系统唤醒并链接以太网 PHY 所需要的步骤，并详细介绍为缩短 TC10 唤醒时间而可以进行的任何优化。更多有关 DP83TC812-Q1 PHY 的 TC10 配置的信息，请参阅 [DP83TC812](#)、[DP83TC813](#) : [Open Alliance TC10 睡眠/唤醒的系统实现](#) 应用手册。

1.1 首字母缩写词

本节定义了本文档中使用的首字母缩略词。

MDI	媒体相关接口
MDIO	管理数据输入/输出
MDC	管理数据时钟
PHY	物理层
PCS	物理编码子层
PMA	物理媒体连接
MAC	介质访问控制

2 TC10 测试设置

2.1 概述

测试中采用一块测试板来复制称为链路伙伴 2 (LP2) 并处于睡眠状态的车辆 ECU。LP2 中包含 LM62460-Q1 降压转换器、LP8762-Q1 电源管理集成电路 (PMIC)、基于 AM273x-Q1 Arm® 的 MCU 以及符合 DP83TC812-Q1 TC10 标准的汽车以太网 PHY。LP2 与 DP83TC812EVM-MC 结合使用，在两个器件之间建立链路，进入睡眠模式，然后执行远程 TC10 唤醒序列。DP83TC812EVM-MC 称为链路伙伴 1 (LP1)。图 2-1 展示了这些组件组成系统后的运行方式。

2.2 唤醒至链接序列

LP1 WAKE 引脚变为高电平之前的组件和步骤尤为重要，因为这些组件和步骤决定了系统唤醒的速度以及建立以太网链路以开始通信的速度。总的来说，硬件对唤醒时间设定一个严格的限制。软件也会影响这一时间，但软件添加到唤醒序列的时间因软件优化而异。

唤醒至链接序列包括以下步骤：

1. LP1 WAKE 引脚变为高电平，将 LP1 INH 引脚拉至高电平。
2. LP1 将 WUP 发送到 LP2。
3. LP2 PHY INH 引脚和降压转换器 (LM62460-Q1) 的第一级使能上升。
4. 降压 nRESET 和 PMIC (LP8762-Q1) 使能上升。
5. PMIC 的 nRSTOUT 和 AM273x-Q1 的 nRESET 上升。MCU 启动过程开始。
6. MCU 管理数据输入/输出 (MDIO) 将 PHY 配置为主器件。PHY 开始其链路序列。
7. 链接两个 PHY 后，两个板上的 LED0 均亮起。

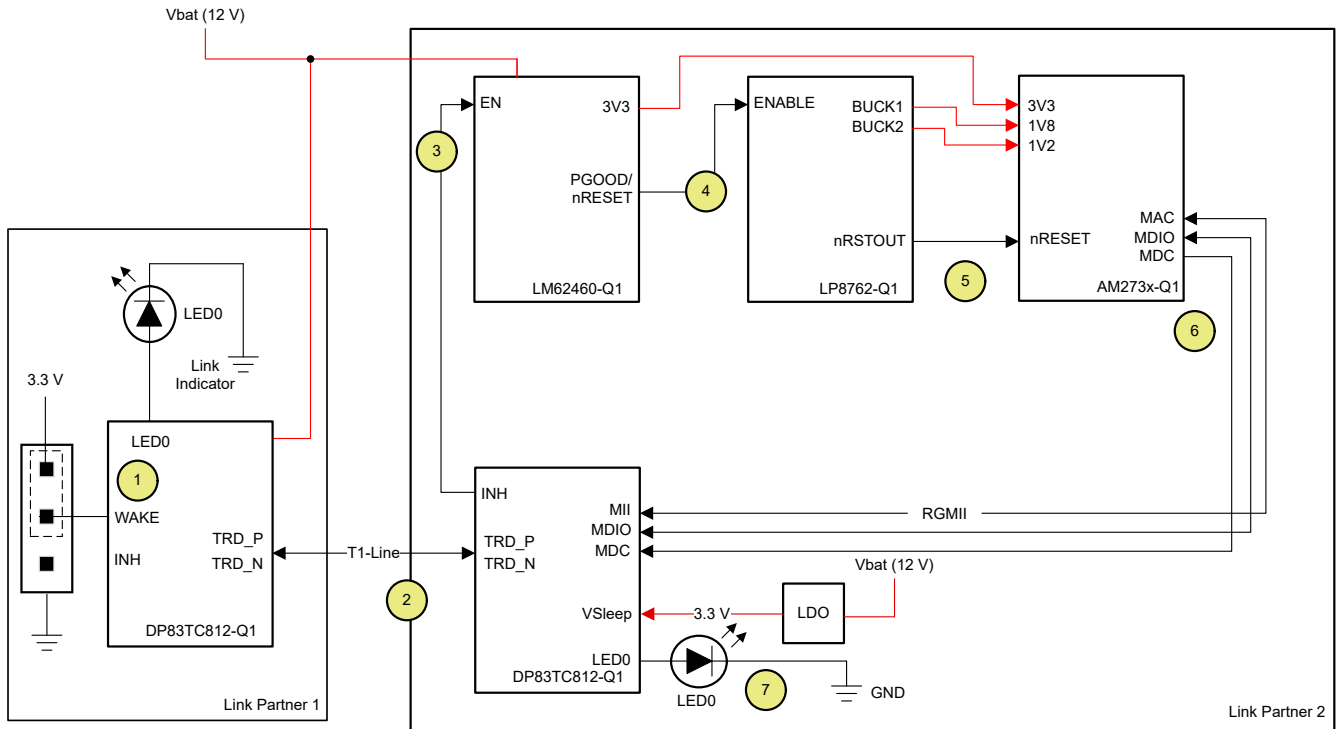


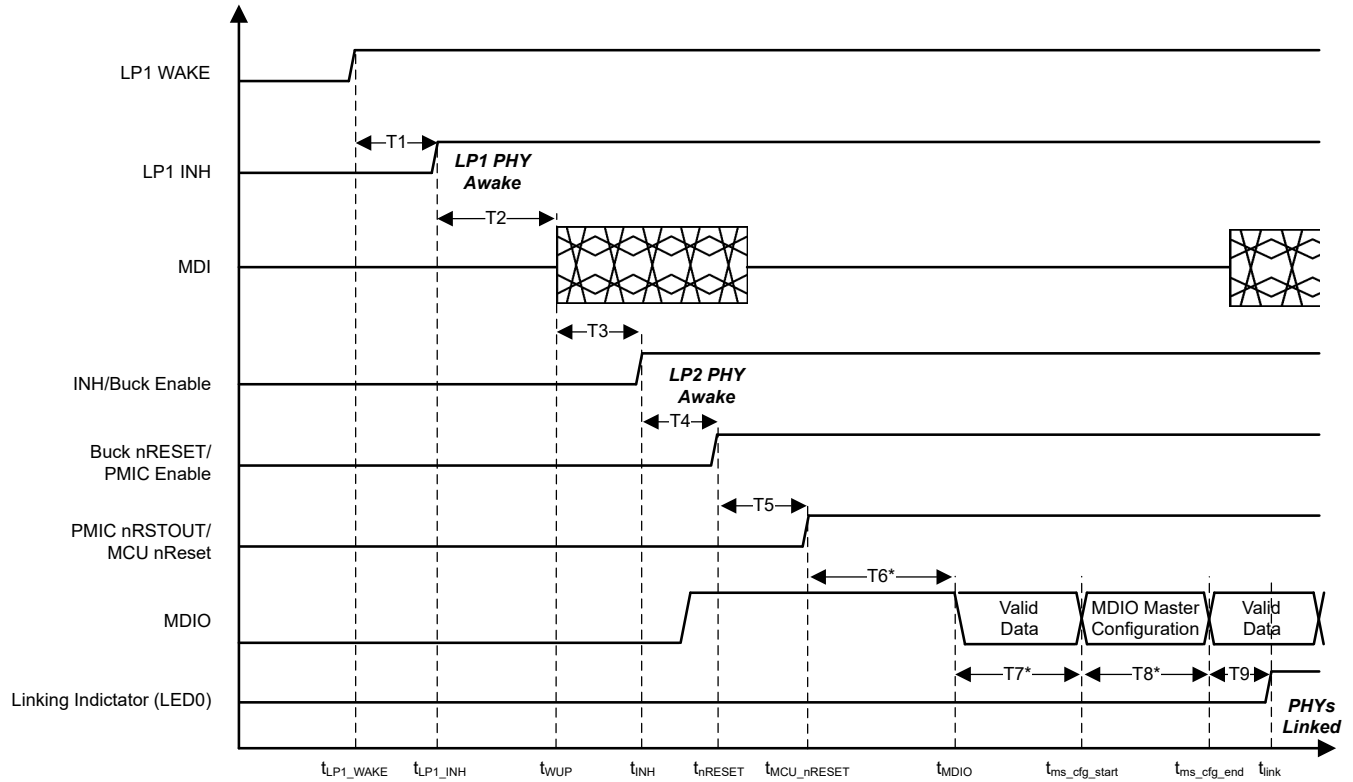
图 2-1. 系统唤醒序列

本测试中的两个 PHY 都作为从器件进行引导；但是，AM273x-Q1 将 LP2 的 PHY 配置为主器件，因此这些器件仅在 AM273x-Q1 已开启并准备好进行通信后才会进行链接。此操作旨在防止由于两个 PHY 在 MCU 未准备好接收数据包的情况下被唤醒并进行链接而导致的数据包丢失。因此，只有在 AM273x-Q1 完成启动序列并通过 MDIO 通信将 PHY 配置为主器件后，链接过程才会发生。

3 测量摘要

3.1 完整时序图

图 3-1 展示了每次测量的时间表。唤醒序列被分解为从 T1 到 T9 的步骤。T6、T7 和 T8 标有“*”（星号）的原因是它们依赖于软件。所以，在 T6、T7 和 T8 中，任何设计都可以寻求进一步优化 TC10 时序。其他时间间隔仅基于系统的硬件。



MDIO 最初会上升，因为 MDIO 连接到 LM62460-Q1 3V3 输出。

图 3-1. 唤醒至链接时序图

3.2 测量摘要

表 3-1 详细介绍了测量。

表 3-1. 测量摘要

时间间隔	时间标记	说明	测量
	$t_{\text{link}} - t_{\text{LP1_WAKE}}$	LP1 WAKE 变为高电平至链接 (系统唤醒至链接时间)	$33.32\text{ms} + T^*$
T_1	$t_{\text{LP1_INH}} - t_{\text{LP1_WAKE}}$	LP1 WAKE 变为高电平至 LP1 INH 变为高电平 (LP1 唤醒序列已启动)	$20.6 \mu\text{s}$
T_2	$t_{\text{WUP}} - t_{\text{LP1_INH}}$	LP1 INH 变为高电平至发送 WUP	10.53ms
T_3	$t_{\text{INH}} - t_{\text{WUP}}$	发送 WUP 至 LP2 INH 变为高电平 (LP2 唤醒序列已启动)	$45.8 \mu\text{s}$
T_4	$t_{\text{nRESET}} - t_{\text{INH}}$	LP2 INH 变为高电平至降压 nRESET 变为高电平 (降压准备就绪)	6.00ms
T_5	$t_{\text{MCU_nRESET}} - t_{\text{nRESET}}$	降压 nRESET 变为高电平至 MCU nRESET 变为高电平 (PMIC 准备就绪)	2.184ms
T_6^*	$t_{\text{MDIO}} - t_{\text{MCU_nRESET}}$	MCU nReset 变为高电平至 MDIO 通信开始 (MCU 启动)	*
T_7^*	$t_{\text{ms_cfg_start}} - t_{\text{MDIO}}$	MDIO 通信开始至主器件配置开始	*
T_8^*	$t_{\text{ms_cfg_end}} - t_{\text{ms_cfg_start}}$	主器件配置时间	3.914ms^*
T_9	$t_{\text{link}} - t_{\text{ms_cfg_end}}$	主器件配置结束至链接	14.541ms

3.3 LP1 唤醒至链接时间

从 LP1 WAKE 上升至链接的时间可通过以下函数估算：

$$t_{\text{link}} - t_{\text{LP1_WAKE}} = (T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_9) + (T_6^* + T_7^* + T_8^*) \quad (1)$$

$$t_{\text{link}} - t_{\text{LP1_WAKE}} = 33.32\text{ms} + (T_6^* + T_7^* + T_8^*) \quad (2)$$

$$T^* = (T_6^* + T_7^* + T_8^*) \quad (3)$$

$$t_{\text{link}} - t_{\text{LP1_WAKE}} = 33.32\text{ms} + T^* \quad (4)$$

备注

T^* 是 TI TC10 时序测量中的一个变量，用于汇总可通过软件优化的时间。节 5.1.3 中讨论了这些建议。

4 时序测量

4.1 LP1 WAKE 至 INH (T_1)

从图 4-1 可以看出，当 LP1 PHY 的 WAKE 脉冲变为高电平时，INH 引脚在 20.60 μ s 内被驱动为高电平。

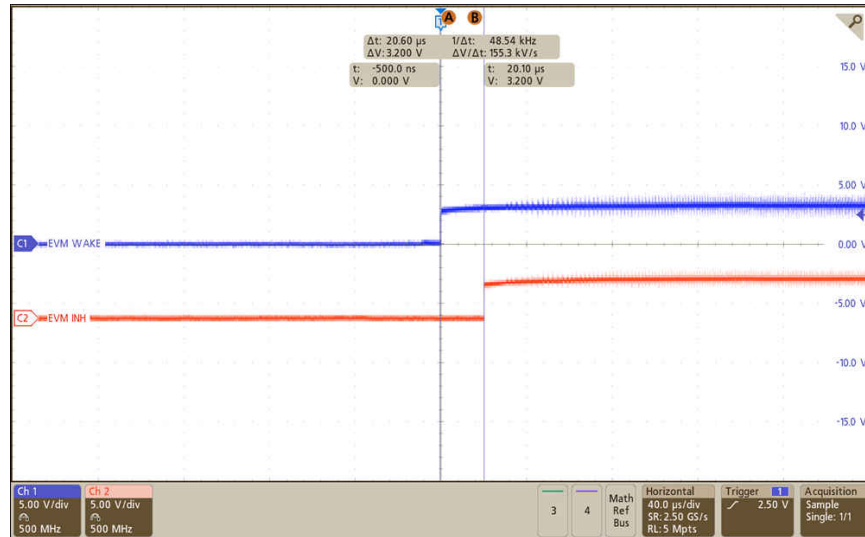


图 4-1. LP1 WAKE 至 INH

DP83TC812EVM-MC 经过修改，断开了 INH 引脚与 MCU GPIO 引脚的连接。此做法可以中断不明的 MCU GPIO 引脚的额外泄漏路径，从而防止 INH 上升时间过长。或者，可以在 INH 和 MCU GPIO 引脚之间添加一个电阻来限制漏电流。

4.2 LP1 INH 至 WUP (T_2)

图 4-2 显示当 INH 引脚为高电平时 LP1 PHY 处于唤醒状态，并在 10.53ms 内向 LP2 PHY 发送 WUP。

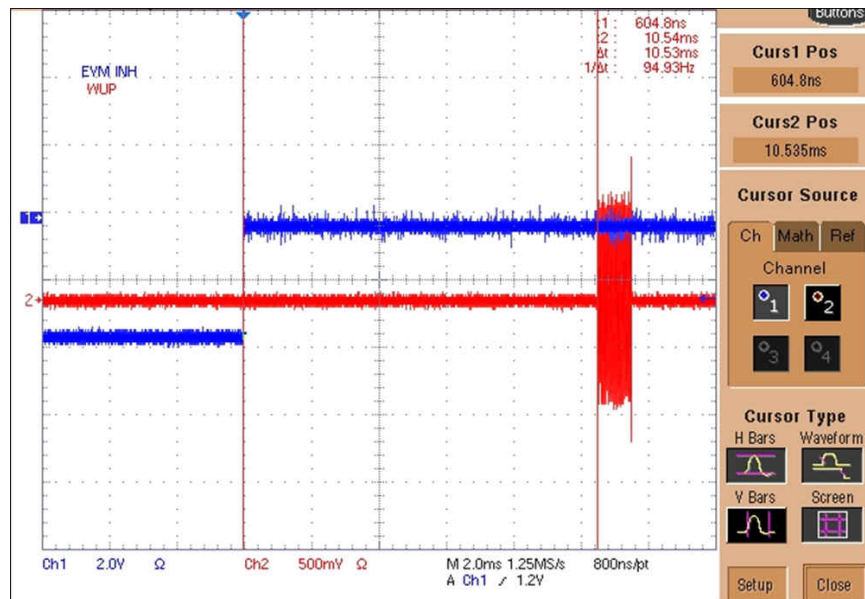


图 4-2. LP1 INH 至 WUP

4.3 WUP 至 PHY INH (T_3)

从图 4-3 可以看出，在 T1 线路上接收到 WUP 时，LP2 PHY 会检测到能量并将 INH 拉至高电平。 T_3 间隔时间为 $45.8 \mu\text{s}$ 。

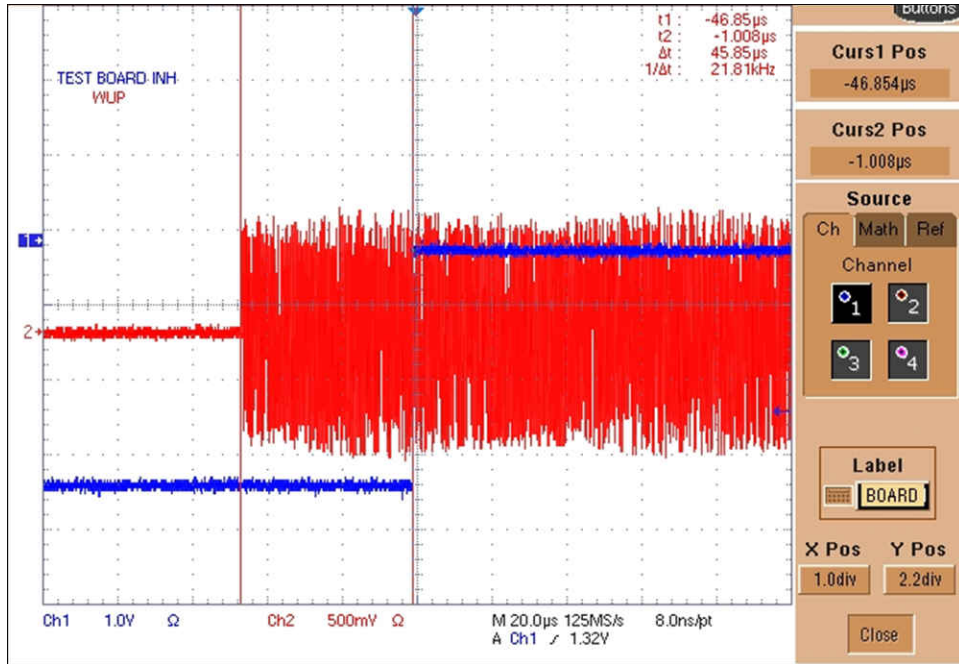


图 4-3. WUP 至 INH

4.4 PHY INH/降压 EN 至降压 nRESET (T_4)

测得第一级降压的使能引脚将 nRESET 引脚驱动为高电平所需的时间为 6ms (请参阅图 4-4)。

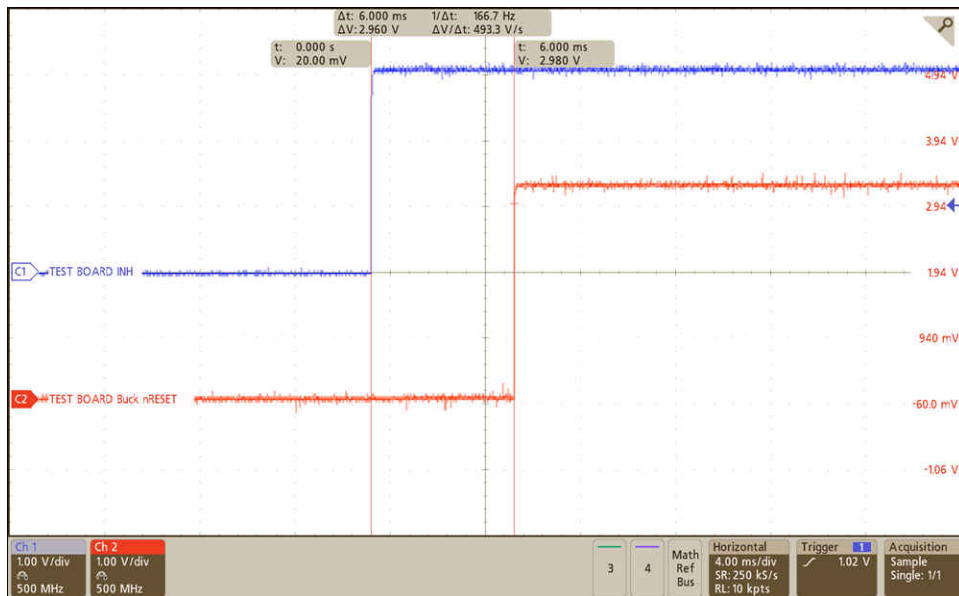


图 4-4. 降压 EN 至 nRESET 信号或至 PMIC 使能信号

4.5 降压 nRESET/PMIC 使能至 MCU nReset (T_5)

PMIC 使能和 MCU nReset 都连接至 PMIC 的 GPIO 引脚。图 4-5 展示了这两个波形的时间间隔。测得 T_5 间隔时间为 2.184ms。

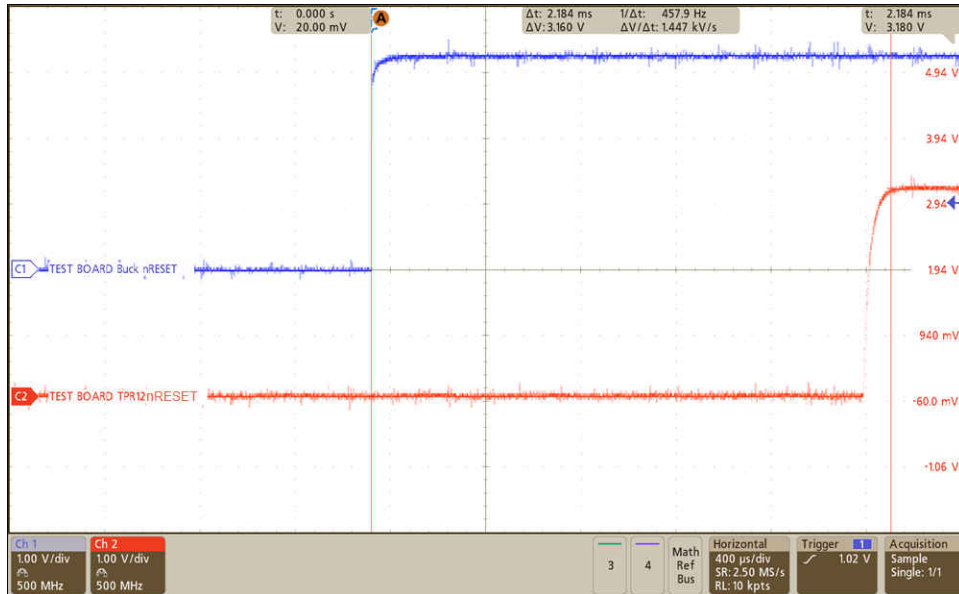


图 4-5. 降压 nRESET/PMIC 使能至 MCU(TPR12) nReset

4.6 MCU nReset 至 MDIO 通信 (T_6 和 T_7)

一旦 nReset 变为高电平，AM273x-Q1 便会开始执行启动过程。引导后，MDIO 最终会开始主器件配置，具体时间取决于在软件中开始配置的时间。如节 5.1 所示，这些步骤取决于软件。因此，对于时间 T_6 和 T_7 ，最好查看有关缩短 TC10 唤醒时间的建议。

4.7 MDIO 主器件配置 + 链接 (T_8 和 T_9)

将 PHY 配置为主器件需要写入一系列寄存器，这是为了符合 Open Alliance 规范而需要满足的最低要求。更多有关这些规范的信息，请参阅 [DP83TC812](#)、[DP83TC813](#) 和 [DP83TC814 : Open Alliance 规范合规性测试所用的配置](#) 应用手册。

表 4-1 是 MDIO 线路上的数据写入时间表。总的来说，对发送的数据进行解码显示，该系统的时间间隔 T_8 (将 PHY 配置为主器件所需的时间) 为 3.914ms。

PHY 成功配置为主器件后，主 PHY 和从 PHY 开始握手过程以建立链路。PHY 的回波抵消器、扰频器、均衡器和时序将经过训练以提供正确的通信。测得的时间间隔 T_9 为 14.541ms。

表 4-1. 主器件配置 + 链接的 MDIO 时间表

时间 (ms)	寄存器	数据 (写入)	操作
0			$t_{ms_cfg_start}$: MDIO 主器件配置开始
0.010	0x001F	0x8000	硬复位
0.225	0x0523	0x0001	禁用链路
0.396	0x0834	0xC001	将 PHY 配置为主器件
0.396 - 2.370			为缩短链路时间而进行的配置
2.370	0x001F	0x4000	软复位
2.584	0x0523	0x0000	启用链路
3.914	0x001F	0x4000	$t_{ms_cfg_end}$: 软复位
18.455			t_{link} : LED0 亮起。PHY 已链接。

5 测量评估

5.1 关于优化可变 TC10 时间的建议

下一节将说明如何优化 T_6^* 、 T_7^* 以及 T_8^* ，以便缩短从 PHY 唤醒至成功链接的时间。

5.1.1 缩短 MCU 启动时间 (T6)

需要尽可能缩短的一个重要时间为系统指定的 MCU 启动时间。这一时间之所以重要，是因为在 MCU 启动之前不会启动 PHY 主器件配置。

除了尽可能全面优化用于 MCU 的软件外，还可以使用 MCU 的快速引导选项 (如果该功能可供使用)。例如，AM273x-Q1 可通过以下方式缩短启动时间：

1. 尽可能减小可配置的复位延迟
2. 尽可能减小 nRESET 变为高电平后进行启动的可配置延迟。如果器件由振荡器源而不是晶体源供电运行，则可以更快地启动。

5.1.2 改进 MDIO 状态机 (T7)

时间间隔 $t_{link} - t_{MDIO}$ 取决于 PHY 主器件配置实际开始的时间。优化 T7 可以让 T8 和 T9 更快发生。保持 T7 处于闲置状态的时间过长只会增加 PHY 链路时间。

T7 的缩短情况取决于在 MCU 中的 PHY 状态机实现情况。PHY 状态机定义了 MDIO 处于活动状态时主器件配置前后的步骤。例如，图 5-1 所示为 AM273x-Q1 SDK 的 MDIO 状态机。

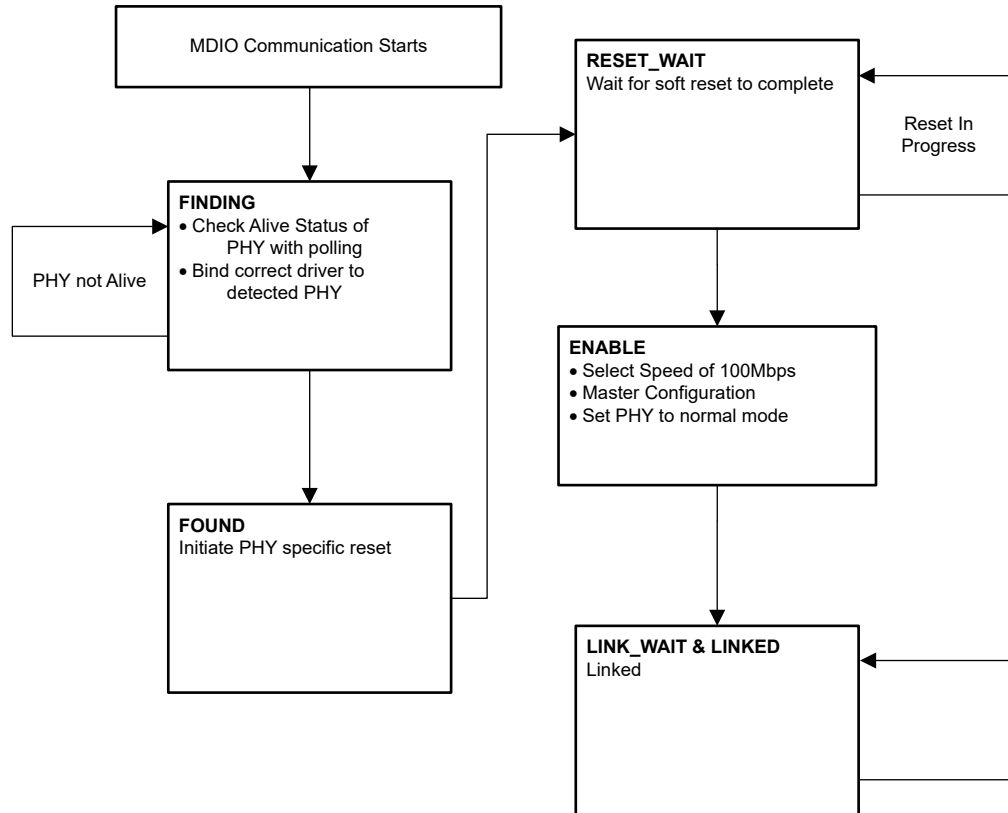


图 5-1. AM273x-Q1 SDK 的 MDIO 状态机

此状态机的可能优化包括：

- AM273x-Q1 软件开发套件 (SDK) 包含许多适用于各种 PHY 的驱动程序。但是，可以优化 AM273x-Q1 来使用 DP83TC812-Q1 驱动程序，从而节省时间。
- DP83TC812-Q1 始终以 100Mbps 的速率发送或接收数据。无需特别选择 100Mbps 的速度。

5.1.3 优化 MDIO 时间表 (T8)

表 4-1 展示了主器件配置的时间表。请注意，如果 MAC 接口仅与一个 PHY 通信，则不需要轮询等功能，因为 MAC 始终与相同的 PHY 地址进行通信。由于 MAC 必须不断读取每个 PHY 地址的活动状态，此功能会延迟主器件配置。

5.1.3.1 通过去除轮询来优化主器件配置

由于 MDIO 数据遵循第 22 条，因此每个 MDIO 帧为 64 位。第 22 条的数据格式如以下列表所示。

- 32 位前导码 (可选)
- 2 个起始位
- 2 位操作码 (仅限写入和读取操作)
- 5 位 PHY 地址
- 5 位寄存器地址
- 2 位周转时间
- 16 位数据

总的来说，表 4-1 中的主器件配置序列在使用轮询的情况下接收 179 条读取或写入指令。MDC 的测量值为 3MHz。

通过去除轮询，主器件配置时间会减少，因为轮询会创建不必要的读取指令。在去除所有不必要的读取指令后，只需 90 条指令即可将 PHY 配置为主器件。这些写入指令中大多数都涉及扩展寄存器，即需要 4 次写入才能成功写入这些寄存器。

去除可选的前导码也是有益的，因为读取和写入事务不需要前导码。这样会将每个 MDIO 帧的大小减小到 32 位。

$\Delta t_{ms_cfg} = 90 \text{ 条指令} \times 32 \text{ 位} \times (1/3\text{MHz}) = 0.960\text{ms}$ 。这一时间比实际测量到的时间短 2.954ms。

5.1.3.2 通过改进 MDC 来优化主器件配置

DP83TC812-Q1 支持高达 25MHz 的 MDC。如果 MAC 接口支持 25MHz 的 MDC，则可以进一步优化该时间，如下式所示。

$\Delta t_{ms_cfg} = 90 \text{ 条指令} \times 32 \text{ 位} \times (1/25\text{MHz}) = 0.23\text{ms}$ 。这一时间比实际测量到的时间短 3.799ms。

5.1.4 睡眠期间的 PHY 配置

目前，DP83TC812-Q1 在从 TC10 睡眠模式唤醒后始终执行硬复位，因此所有寄存器都会恢复到默认状态。

下一代 100BASE-T1 TI PHY 在从睡眠模式唤醒时可立即配置多达 20 个寄存器。这意味着会完全忽略时间间隔 T7 和 T8，让 PHY 可以直接建立与链路伙伴的链路，而无需等待 MCU 进行配置。事件序列如以下列表所示：

1. 电路板 MCU 在 PHY 进入睡眠模式之前对 PHY 中的一系列寄存器地址 + 内容进行编程
2. PHY 进入 TC10 睡眠模式
3. PHY 接收 WUP，将 INH 驱动为高电平，并开始执行唤醒序列 (详见节 2.2)
4. PHY 自动配置在保留存储器中存储的寄存器地址 + 内容
5. PHY 建立与链路伙伴的链路

5.1.5 其他可配置的值

LP8762-Q1 PMIC 有一个可配置的复位延迟。缩短此延迟有助于 MCU nRESET 上升更快，从而缩短从唤醒至链接的总时间。

5.2 替代 TC10 测试

另一个 TC10 测试会保持 LP2 PHY 引导至主模式。具体而言，LP2 立即作为主器件唤醒，LP1 作为从器件唤醒。

为了防止在 MAC 接口准备好进行通信之前建立链路，可以将 PHY 引导至受管运行状态。在受管运行中，通过 MDIO 发出的命令允许 PHY 退出待机模式并启用 PC 和 PMA，以便器件能够成功链接。使用此测试时还会完全忽略 T7 和 T8，从而允许通过 MDIO 配置单个寄存器，开始进行链路训练。

6 结论

TC10 是一项定义以太网 PHY 唤醒和睡眠协议的 Open Alliance 标准。由于 TC10 必须为车辆提供降低功耗的选项，因此将 TC10 整合到实际系统中对于电源管理系统至关重要。

随着车辆（尤其是电动汽车）将其电源管理系统推向极致，延长电池寿命的想法只会变得愈加重要。

7 参考文献

1. 德州仪器 (TI), [DP83TC812](#)、[DP83TC813](#) 和 [DP83TC814](#) : *Open Alliance 规范合规性测试所用的配置* 应用手册
2. 德州仪器 (TI), [DP83TC812](#)、[DP83TC813](#) : *Open Alliance TC10 睡眠/唤醒的系统实现* 应用手册
3. 德州仪器 (TI), [DP83TC812EVM-MC](#) : *DP83TC812 100BASE-T1 转 100BASE-TX 介质转换器评估模块* 产品文件夹
4. 德州仪器 (TI), [TC10 汽车以太网标准介绍及其重要性](#), E2E™ 论坛

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司