

泰坦 VH模块

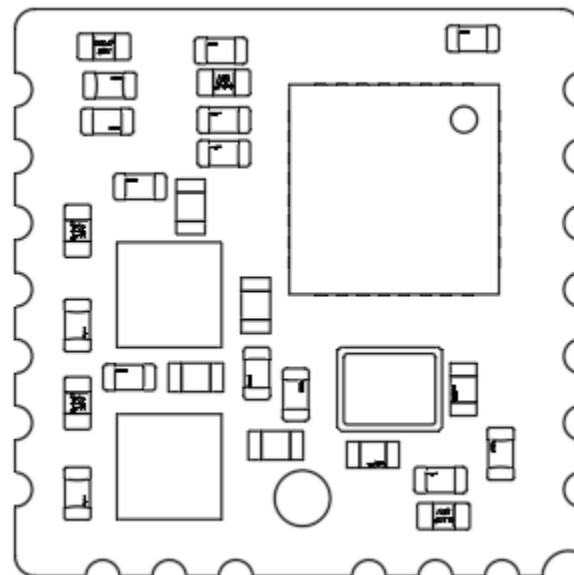
宽带触觉驱动模块

功能齐全的触觉模块，带双放大功能
输出、音频到触觉反馈、通用触觉反馈
基于 *HIF UHP 1.0* 规范的 *API* (TITAN VH 2.2)

产品: TITAN VH 模块 V1

产品 ID:

修改: 2026年6月23日



特征:

- 双路放大输出(每声道 **3W**)
- 音频到触觉的转换
- 通用触觉 **API** (符合 **HIF UHP 1.0** 标准)
- 实时音频+**API**混音
- 数字信号处理 (**DSP**)
- 紧凑型 **10.8 毫米 × 10.8 毫米** 尺寸
- 已准备好量产

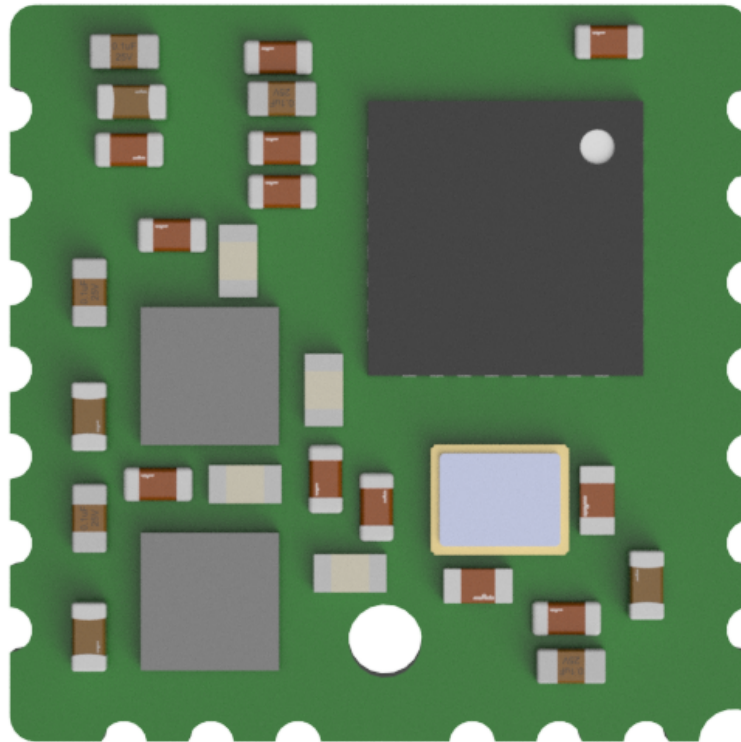
1. 简介

1.1 概述

TITAN VH 模组是一款紧凑型嵌入式触觉播放模组, 专为集成到电子产品中而设计。该模组以 10.8 mm × 10.8 mm 焊接收纳封装形式, 集成了主机通信、存储效果播放、音频转触觉串流、波形生成和双放大触觉输出功能。

该模组通过半孔边缘焊盘直接安装到应用 PCB 上。主机系统提供 5 V 电源、接地、命令输入以及可选的 I²S 音频或波形数据。TITAN VH 模组在内部处理触觉播放, 并通过左右放大输出通道驱动连接的致动器。

主机系统可以使用串行命令触发存储的触觉效果, 或提供 I²S 流进行实时音频转触觉播放。



1.2 主要用途

TITAN VH 模块旨在将触觉集成到紧凑型电子产品中，例如可穿戴设备、游戏控制器、手持外设、XR/VR 配件、医疗和健康设备、触摸界面、控制表面和紧凑型消费电子产品。

该模块也适用于需要两个独立触觉执行器通道或音频同步触觉反馈的原型到生产系统。

1.3 主要特点

TITAN VH 模块提供 10.8 毫米 × 10.8 毫米的半孔焊接封装、两个放大触觉输出通道以及用于左右输出的独立 NS4151D 放大器级。

该模块支持通过串行命令包播放存储的触觉效果，并通过 I²S 输入实现实时音频到触觉的流传输。触觉输出通过差分 L+/L- 和 R+/R- 执行器连接提供。

电源由主机系统的 5V 和 GND 引脚提供。底部半圆形焊盘仅用于刷写和编程。

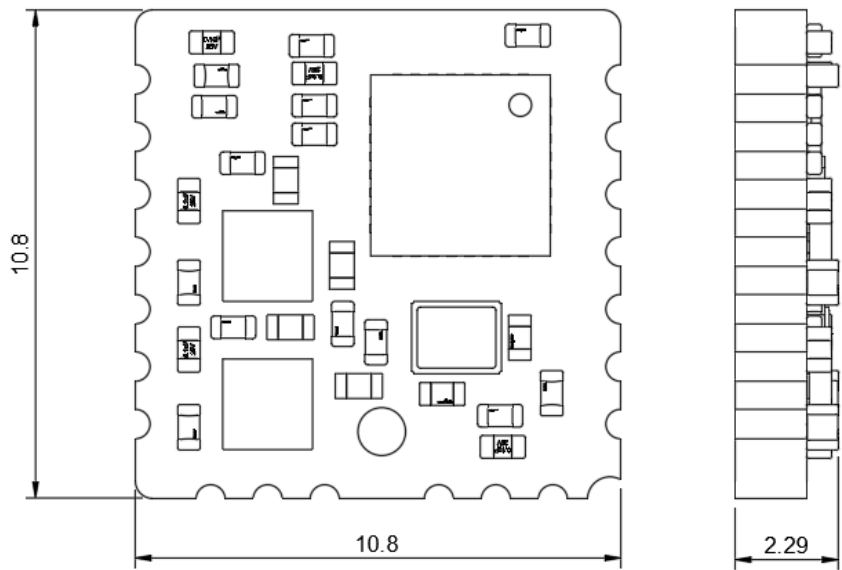
2. 技术规格

2.1 电气规格

范围	敏	典型的	最大限度	单位	笔记
供电电压	5.0	5.0	5.0	在	由主机系统提供
地面参考	—	公共接地	—	—	共享系统接地
逻辑输入电压		3.3		在	串行和I ² S输入引脚
空闲电流	待定	待定	待定	硕士	未激活触觉播放功能
电流	待定	待定	待定	硕士	取决于执行器负载和播放强度
峰值电流	待定	待定	待定	硕士	取决于同时播放的频道
触觉通道	—	2	—	—	左声道和右声道
放大器集成电路	—	NS4151D	—	—	每个声道一个放大器
输出类型	—	微分	—	—	L+/L- 和 R+/R-
推荐负载阻抗	4	8	8	哦	执行器和放大器相关
通信接口	—	串行/I ² S	—	—	主机控制
编程接口	—	底部垫	—	—	仅供刷机使用

2.2 机械规格

范围	典型值	单位	笔记
板长	10.84	毫米	PCB边缘到PCB边缘
板材宽度	10.84	毫米	PCB边缘到PCB边缘
板材高度	2.29±0.5	毫米	最大安装组件高度
安装方式	城堡状的	—	焊接至应用PCB
附件方法	背驮式模块	—	表面贴装子板
重量	0.58 +/- 0.10	克	仅限模块
连接器类型	城堡状垫	—	无需插入式连接器



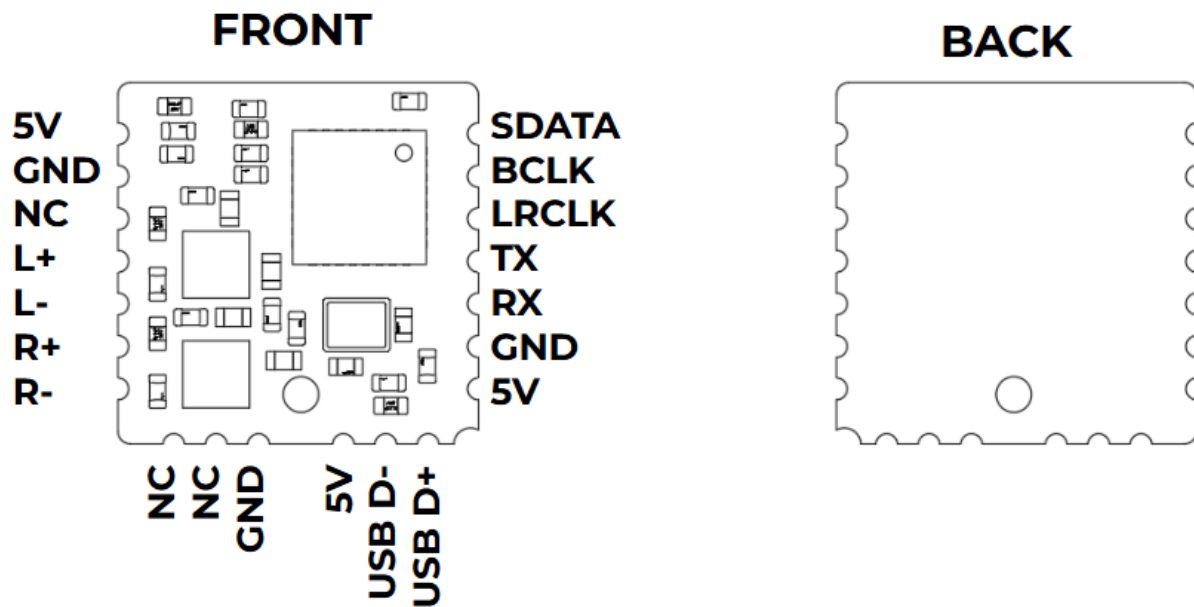
2.3 触觉输出规格

该模块提供两个放大后的差分触觉输出：**L+/L-**左声道和**R+/R-**右声道。每个声道均由独立的 NS4151D 放大器级驱动。

两个通道可以同时使用，但需满足电源、执行器负载和温度限制。输出端口专为 TITAN 宽带触觉执行器设计。其他类型的执行器或第三方负载在使用前需要进行验证。

3. 引脚排列和连接方式

3.1 引脚图



别针名称	类型	方向	描述
5伏	力量	输入	主模块电源输入
接地	力量	—	共同基础参考
RX	数字的	输入	来自主机MCU的串口命令输入
德克萨斯州	数字的	输出	如果支持，则输出串行响应、调试信息或状态信息。
时钟	数字的	输入	I ² S 位时钟输入
LRCLK	数字的	输入	I ² S字选择/左右时钟输入
SDATA	数字的	输入	I ² S 音频或波形数据输入
L+	触觉输出	输出	左侧触觉致动器正输出
L-	触觉输出	输出	左侧触觉致动器负输出
R+	触觉输出	输出	右侧触觉致动器正输出
R-	触觉输出	输出	右侧触觉致动器负输出
USB D+	编程	预订的	底部闪光
USB D-	编程	预订的	底部闪光
NC / 保留	无连接/已预留	—	请勿连接

3.2 引脚定义说明

5V 输入必须由主机系统供电。所有数字接口必须与主机系统共用一个公共接地参考。

串行引脚用于命令控制和存储效果触发。I²S 引脚用于音频到触觉反馈的流传输和实时波形输入。

L+/L- 和 R+/R- 是放大的触觉输出，不能连接到主机 MCU 引脚。

底部的半圆形焊盘仅用于烧录和编程，请勿将其用作应用程序的输入/输出接口。

PCB发布前应考虑编程访问问题。由于编程焊盘位于模块底部，模块组装完成后可能无法使用标准编程电缆直接访问。如果需要组装后编程，请将所需的编程信号路由至易于访问的测试焊盘、弹簧针焊盘或专用编程夹具。

4. 通信接口

4.1 串行命令接口

串行接口允许主机MCU触发存储的触觉效果。主机向模块发送命令数据包。固件解码命令，选择所需的效果，并通过选定的输出通道播放相应的触觉波形。

典型的串行命令功能可能包括按 ID 播放效果、选择左声道或右声道、双声道播放、停止命令、强度控制、持续时间控制、重复次数、固件版本查询和效果库版本查询。

范围	价值	笔记
接口类型	UART/串口	具体实施方案待定
方向	主机到模块	用于命令输入
波特率	115200	取决于固件
逻辑级	3.3伏	必须与主机 I/O 级别匹配

4.2 I²S 音频到触觉流接口

I²S 输入接口支持音频到触觉信号的转换。主机提供 I²S 时钟和数据信号，模块将输入的音频或波形流转换为触觉输出。

此模式适用于需要将触觉反馈与音频、系统事件或实时波形内容同步的应用。

范围	价值	笔记
接口类型	I ² S	输入到 TITAN VH 模块
功能	音频到触觉流	将输入的 I ² S 流转换为触觉播放

位时钟	时钟	由主机提供
单词选择	LRCLK	由主机提供
数据输入	SDATA	由主机提供
采样率	44.1kHz	取决于固件
位深度	16 位	取决于固件
频道格式	立体声	单声道/立体声行为待定
回放目标	左/右触觉输出	固件相关的通道映射

4.3 接口选择

对于预定义的触觉效果，建议使用串行命令回放。对于连续音频、音频衍生波形或实时主机生成的触觉内容，建议使用 I²S 音频到触觉的流传输。

PCB发布前，应确认所选接口模式和固件配置。

5. 触觉输出通道

5.1 输出概述

TITAN VH 模块提供两个放大后的差分触觉输出通道。每个通道均由一个独立的 NS4151D 放大器驱动。

左声道被划分为 **L+ / L-** 右声道使用 **R+ / R-**。

5.2 输出路由指南

将 L+/L- 和 R+/R- 作为模块到执行器连接点的短直通输出路径。走线宽度应根据预期的执行器电流和 PCB 铜箔厚度进行选择。

避免将执行器输出布线靠近射频天线、麦克风、电容式触摸线、晶体振荡器或高阻抗模拟输入。尽可能保持左右输出路径一致。

5.3 执行器连接说明

该模块专为 TITAN 宽带触觉执行器设计。其他类型的执行器或第三方负载需要进行验证。

执行器阻抗、电流消耗和热特性必须与模块输出级兼容。

除非系统已验证支持热插拔操作，否则请勿在播放过程中连接或断开执行器。

6. 电气特性和推荐工作条件

6.1 绝对最大额定值

范围	象征	等级	单位	笔记
供电电压	5伏	5.5	在	5V 输入时的最大电压
逻辑输入电压	电压最大值	3.3	在	串口和I ² S引脚
最小负载阻抗	—	4	哦	最小执行器负载
输出短路	—	不允许	—	请勿将输出引脚短路。
工作温度	—	70	摄氏度	模块附近的环境温度
储存温度	—	150	摄氏度	无源存储

超过绝对最大额定值可能会对模块造成永久性损坏。在推荐工作条件之外，无法保证功能正常运行。

6.2 推荐操作条件

范围	敏	典型的	最大限度	单位	笔记
供电电压	5	5.0	5.5	在	由主机系统提供

环境温度	-20	25	70	摄氏度	系统相关
逻辑高输入	待定	待定	待定	在	串口和I ² S引脚
逻辑低输入	待定	待定	待定	在	串口和I ² S引脚
执行器负载	4	8	8	哦	取决于执行器选择

6.3 电源和接地要求

主机系统必须提供稳定的 5V 电源和低阻抗接地连接。供电路径必须能够支持空闲运行、固件活动以及来自两个放大器通道的触觉回放峰值电流。

在模块电源输入端附近放置局部去耦电容。考虑左右声道同时播放，并验证最大强度效果期间的供电下降情况。

不良的电源或接地布线可能会增加噪声、降低输出一致性或导致通信问题。

7. 机械集成指南

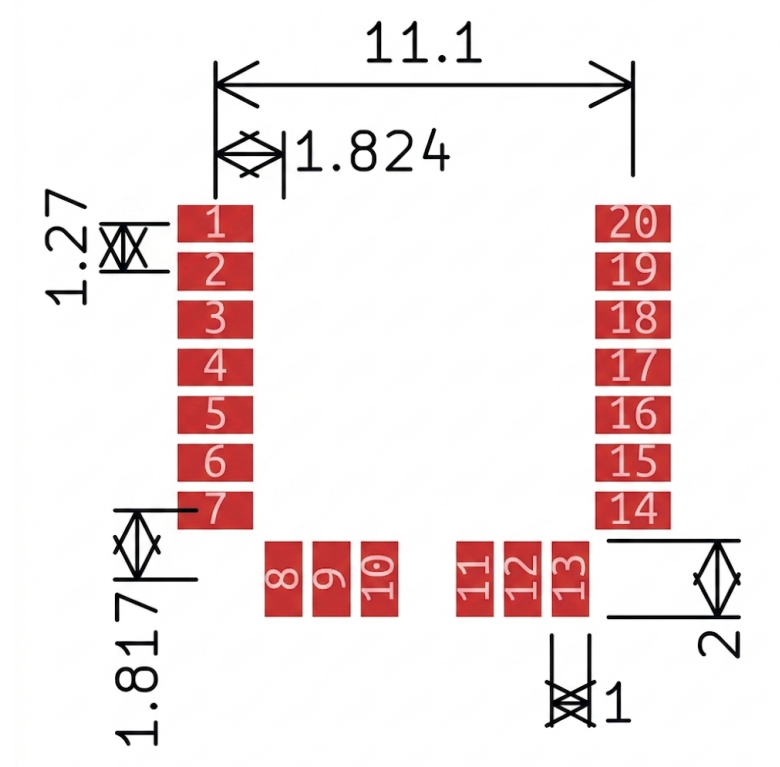
7.1 模块安装

TITAN VH 模块设计为以半孔板的形式安装在应用 PCB 上。PCB 必须包含推荐的焊盘布局 and 方向标记。

放置模块时, 请确保电源、接地、通信和执行器输出线路保持短而直接。确保模块上方留有足够的空间, 并避免与外壳部件、屏蔽层、泡沫、粘合剂或紧固件发生机械干涉。

7.2 推荐的PCB封装尺寸

安装方向错误可能会永久损坏模块或周围电路。

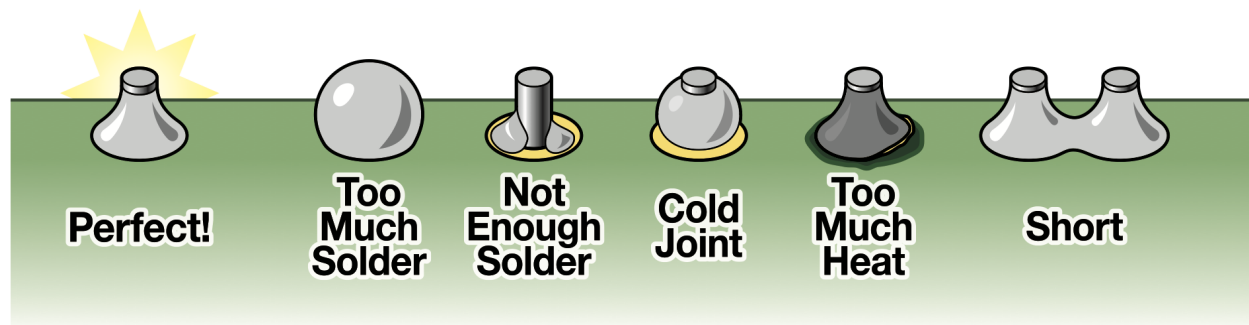


VH模块占地面积(毫米)

7.3 开槽垫组件

半孔焊盘焊接在对应的PCB焊盘上。应尽可能检查可见的侧面焊盘边缘。

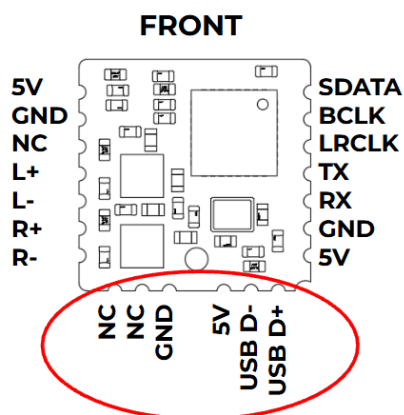
生产检验应确认焊盘对齐、润湿良好、无焊锡桥接、电源/输出焊盘上焊锡充足，以及无意外连接到预留焊盘。



7.4 底部闪光垫

这底部半圆形焊盘专用于烧录和编程，不得用作普通应用程序的 I/O 引脚。

由于这些焊盘位于模块的底部，一旦模块焊接至应用PCB，可能无法使用标准编程电缆直接访问。需要在组装后加载固件或重新编程的设计必须通过测试焊盘、弹簧针焊盘或经认可的编程夹具来暴露所需的闪烁信号。



7.5 高度和净空

机械设计必须考虑模块的最大高度。最终模块高度为 3.00 毫米 +/- 0.1 毫米，应在外壳模具制造前确认。

除非机械载荷已得到验证，否则应避免外壳与模块组件直接接触。

8. PCB布局指南

8.1 总体布局建议

尽可能将 TITAN VH 模块放置在靠近执行器布线路径的位置。保持 5V 和 GND 走线短而低阻抗。

将 L+/L- 和 R+/R- 作为成对的输出走线布线。使执行器输出走线远离敏感的模拟电路、射频电路、麦克风、天线、电容式触摸电路和传感器电路。

在条件允许的情况下，提供电源、接地、通信和编程的测试接口。

8.2 电源路由

根据预期的最大模块和执行器电流来设计 5V 输入路径。如果两个触觉通道可以同时工作，则应设计电源路径以满足同时出现的峰值电流要求。

如果最终电气设计需要，可在模块 5V 输入端附近放置大容量电容。

8.3 信号路由

尽可能将串行和 I²S 走线远离高电流执行器输出端。保持通信走线短，并避免与触觉输出走线进行过长的并行布线。

8.4 触觉输出路由

将触觉输出走线视为电源输出走线。使用合适的走线宽度，避免线颈过窄，并避免在执行器输出线上设置不必要的测试短截线。

确认长时间或重复触觉回放过程中的热行为。

9. 固件和命令接口

9.1 固件概述

TITAN VH 模块固件支持串行命令播放和 I²S 音频到触觉流传输。

串行命令允许主机系统触发触觉原语、存储的效果、队列操作、配置更改和系统信息请求。建议在嵌入式集成中使用二进制命令，因为它们提供紧凑的数据包格式、确定性的解析以及对 EffectReceiver 接口的直接访问。

I²S 音频到触觉流允许主机系统将音频或波形数据直接发送到模块，以实现实时触觉输出。

9.2 二进制命令格式

EffectReceiver 接收二进制数据包，该数据包包含 5 字节的头部、可选的有效载荷和 1 字节的 CRC，用于大多数 PLAY、QUEUE 和 QUEUE_REPLACE 命令。

所有数据包均使用以下头部格式：

场地	尺寸	描述
同步1	1 字节	同步字节 1:0xAA
同步2	1 字节	同步字节 2:0x55
命令	1 字节	命令类型
子命令	1 字节	子命令、效果类型或查询类型
数据长度	1 字节	接下来的有效载荷字节数

必要时，有效载荷和 CRC 校验和会跟随头部。

所有多字节字段，包括漂浮和 `uint16_t`是小端字节序。

9.3 命令类型

价值	姓名	结直肠癌	描述
0	CMD_TYPE_CONFIG	不	配置命令
1	CMD_TYPE_SYSTEM	不	系统查询
2	CMD_TYPE_PLAY	是的	立即播放效果
3	CMD_TYPE_QUEUE	是的	将效果添加到渲染队列
4	CMD_TYPE_QUEUE_REPLACE	是的	清除目标通道队列，然后将新效果加入队列。

PLAY、QUEUE 和 QUEUE_REPLACE 共享相同的子命令值和有效负载布局。只有命令数值变化。

QUEUE 会将新命令序列追加到每个目标通道的渲染队列中。QUEUE_REPLACE 会在添加新命令序列之前清空目标通道上的渲染队列。

9.4 CRC-8

PLAY、QUEUE 和 QUEUE_REPLACE 结构体风格的命令使用 CRC-8。

CRC 设置：

None

多项式：0x07

初始值：0x00

范围：仅限有效载荷字节，不包括最后一个 CRC 字节

算法：

None

$CRC = 0x00$

对于作用域内的每个字节 b :

$CRC \wedge= b$

对于位 $= 0$ 到 7 :

如果 CRC 校验和为 $0x80$:

$crc = (crc \ll 1) \wedge 0x07$

别的 :

$crc = crc \ll 1$

最终的 CRC 校验码作为有效载荷的最后一个字节附加到数据中。

PCM 和自定义原始命令也使用 CRC-8, 但它们的 CRC 范围由其可变长度的有效载荷结构定义。

9.5 系统命令

系统命令用于检索设备和通道信息。这些命令通过消息/日志系统以响应字符串的形式返回, 而不是以二进制响应数据包的形式返回。

子命令	姓名	有效载荷	描述
1	VH_HDI	0 或 1 字节	通道信息。不提供有效载荷时，返回所有通道。单个字节返回特定通道。
2	VH_HDI_D	没有任何	设备信息，包括自定义原语
3	VH_HDI_C	没有任何	所有频道信息

在初始化期间使用系统查询来确认固件版本、通道映射、支持的基本功能、设备信息和自定义基本功能定义。

9.6 配置命令

配置命令使用 `cmd = 0` 这些命令不需要 CRC 校验。

子命令	姓名	有效载荷	描述
1	VH_SETDEFAULT	6 字节	设置基本类型的默认参数值
2	VH_SETMIN	6 字节	设置原始参数的最小值
3	VH_SETMAX	6 字节	设置原始参数的最大值
4	VH_SETPCMSAMPLERATE	4 字节	设置PCM播放采样率
5	VH_SETDEFMINMAXDUR	13 字节	设置自定义原始持续时间的默认值、最小值和最大值
6	VH_SETDEFMINMAXPARAM	14 字节	设置自定义原始参数的默认值、最小值和最大值
10	VH_SETDEVICENAME	1-32 字节	设置设备名称

11	VH_SETMANUFACTURER	1-32 字节	套装制造商
12	VH_SETMODELNUM	1-32 字节	设置型号
13	VH_SETSERIALNUM	1-32 字节	设置序列号
14	VH_SETVERSIONNUM	1-32 字节	设置版本号
15	VH_SETVERBOSITY	1 字节	设置详细程度位掩码
40	VH_SETMIXINGSTRATEGY	2 字节	设置PCM和原始混合策略
41	VH_SETAUDIODSP	3 字节	设置音频采集 DSP 预设和截止频率
42	VH_SETANTIALIAS	3 字节	设置输入抗锯齿模式和截止频率

配置命令可以更改播放行为、输出电平、滤波、混音和音频处理。生产固件应使用固定且经过验证的配置值。

9.7 基本参数配置

VH_SETDEFAULT, VH_SETMIN, 和 VH_SETMAX使用相同的 6 字节有效载荷。

None

偏移尺寸类型字段

0 1 uint8 原始类型

1 1 uint8 参数索引

2 4 浮点值

原始 ID:

ID	原始
0	脉冲
1	打钩
2	暂停
3	颤动
4	PCM
5	企业风险管理
6	扫

参数索引:

原始	参数索引	范围
脉冲, 滴答	0	期间

脉冲, 滴答	1	强度
脉冲, 滴答	2	清晰度
暂停	0	期间
颤动	0	期间
颤动	1	强度
颤动	2	频率
颤动	3	清晰度
PCM	0	采样率
企业风险管理	0	期间
企业风险管理	1	强度
扫	0	期间
扫	1, 4	强度
扫	2, 5	频率
扫	3, 6	清晰度
扫	7	强度转变

扫	8	频率转换
扫	9	锐度过渡

对于SWEEP跃迁参数, `VH_SETDEFAULT`可与 TransitionType ID 一起使用。不支持 SWEEP 过渡参数。`VH_SETMIN` 或者 `VH_SETMAX`。

9.8 附加配置有效载荷

PCM采样率

`VH_SETPCMSAMPLERATE`使用 4 字节小端序有效载荷。

None

偏移尺寸类型字段

0 4 uint32 采样率Hz

示例值包括8000 或者 16000。

冗长

`VH_SETVERBOSITY`使用 1 字节位掩码。

价值	意义
0	沉默的

1	仅错误
2	仅供参考
4	仅警告
7	冗长的

位掩码可以组合使用。

设备元数据

以下配置命令使用长度为 1 到 32 字节的可变长度字符串有效负载：

None

VH_SETDEVICENAME

VH_SETMANUFACTURER

VH_SETMODELNUM

VH_SETSERIALNUM

VH_SETVERSIONNUM

标题**数据长度**该字段的值等于字符串的字节数。空终止符是可选的。如果存在空终止符，则仅使用第一个空字符之前的字节。

混合策略

VH_SETMIXINGSTRATEGY使用 2 字节的有效载荷。

None

偏移尺寸类型字段

0 1 uint8 策略

1 1 uint8 参数

战略价值观：

价值	战略
0	中断混合
1	最大值混合
2	加料混合物
3	非线性混合
4	TANH_CLIP_MIX
5	LOG_CLIP_MIX
6	鸭子混合

当策略是鸭子混合参数字节设置 PCM 鸭子级别0-100%对于其他策略，参数字节将被忽略。

音频DSP

VH_SETAUDIODSP使用 3 字节小端序有效载荷。

None

偏移尺寸类型字段

0 1 uint8 预设
1 2 int16 截止频率Hz

预设值：

价值	预设
0	没有任何
1	低通
2	瞬态增强

截止值必须大于零。LOW_PASS 直接使用截止值。TRANSIENT_BOOST 忽略截止值，使用固件定义的瞬态检测常量。

抗锯齿

VH_SETANTIALIAS使用 3 字节小端序有效载荷。

None
偏移尺寸类型字段
0 1 uint8 模式
1 2 int16 截止频率Hz

众数：

价值	模式
0	没有任何
1	简单的
2	双二阶

临界值0选择自动截止。值大于0选择以赫兹为单位的明确截止频率。

9.9 通道掩码格式

PLAY、QUEUE 和 QUEUE_REPLACE 有效载荷以通道掩码开头。

None

偏移尺寸类型字段

0 1 uint8 maskLengthN

1 N uint8 通道掩码

第一个有效载荷字节是N掩码数据字节数。N可能是 1 到 32 之间的数字。

在第一个掩码字节中，位 0 是最低有效位。如果位 0 被设置为 1 该命令适用于所有通道，所有其他掩码位均被忽略。

如果位 0 设置为 0，少量 k 选择频道 k 位以最低有效位优先的方式打包到掩码字节中。

对于 TITAN VH 模块，通常使用掩码来选择左声道输出、右声道输出或同时选择两个输出。最终的通道映射应与已发布的固件进行确认。

9.10 PLAY、QUEUE 和 QUEUE_REPLACE 子命令

PLAY、QUEUE 和 QUEUE_REPLACE 使用相同的子命令值和有效负载布局。

子命令	姓名	描述
0	VH_PULSE	脉冲原语
1	VH_TICK	滴答原语
2	VH_振动	振动原始
3	VH_PAUSE	暂停原语
4	VH_PCM	原始PCM触觉数据
5	VH_ERM	ERM 风格的原语
6	VH_SWEEP	扫描原语
7	VH_AUDIO_STREAM	音频流基元
8	VH_CUSTOM_PRIM	自定义原语

结构体风格的命令在 CRC 字节之前对整个有效载荷进行 CRC 校验。PCM 和自定义原语命令对其可变长度的有效载荷字段进行 CRC 校验，仅排除最后一个 CRC 字节。

9.11 播放参数范围和单位

范围	类型	单位/范围	笔记
期间	漂浮	毫秒	用于脉冲、滴答、振动、暂停、ERM、扫描、音频流和自定义原语
强度	uint8	0-255	除以 255 得到等效的归一化值0.0-1.0 价值
清晰度	uint8	0-255	除以 255 得到等效的归一化值0.0-1.0 价值
频率	uint16	赫兹	典型的触觉使用频率为 1-300 Hz
方向	uint8	固件定义	企业风险管理 (ERM) 使用
音频通道	uint8	固件定义	音频流使用
过渡	uint8	转换类型 ID	扫帚

9.12 基本有效载荷布局

偏移量是从 5 字节头部之后的有效载荷的第一个字节开始测量的。每个 PLAY、QUEUE 和 QUEUE_REPLACE 有效载荷都以通道掩码开头。

脉冲和滴答

None

偏移尺寸类型字段

0 1 uint8 maskLengthN

```
1 N uint8 通道掩码  
1 + N 4 float duration_ms  
5 + N 1 uint8 强度  
6 + N 1 uint8 锐度  
7 + N 1 uint8 crc
```

CRC 范围: 字节0 通过 $6 + N$ 。

颤动

None

偏移尺寸类型字段

```
0 1 uint8 maskLengthN  
1 N uint8 通道掩码  
1 + N 4 float duration_ms  
5 + N 1 uint8 强度  
6 + N 2 uint16 frequency_hz  
8 + N 1 uint8 锐度  
9 + N 1 uint8 crc
```

CRC 范围: 字节0 通过 $8 + N$ 。

暂停

None

偏移尺寸类型字段`0 1 uint8 maskLengthN``1 N uint8 通道掩码``1 + N 4 float duration_ms``5 + N 1 uint8 crc`CRC 范围: 字节0 通过 $4 + N$ 。**企业风险管理**

None

偏移尺寸类型字段`0 1 uint8 maskLengthN``1 N uint8 通道掩码``1 + N 4 float duration_ms``5 + N 1 uint8 强度``6 + N 1 uint8 方向``7 + N 1 uint8 crc`CRC 范围: 字节0 通过 $6 + N$ 。

方向 0 表示负方向。非零值表示正方向。

扫

None

偏移尺寸类型字段

```
0 1 uint8 maskLengthN
1 N uint8 通道掩码
1 + N 4 float duration_ms
5 + N 1 uint8 起始强度
6 + N 2 uint16 startFrequency_hz
8 + N 1 uint8 起始锐度
9 + N 1 uint8 endIntensity
10 + N 2 uint16 endFrequency_hz
12 + N 1 uint8 endSharpness
13 + N 1 uint8 透射强度
14 + N 1 uint8 转换频率
15 + N 1 uint8 透明锐化
16 + N 1 uint8 crc
```

CRC 范围: 字节 0 通过 $15 + N$ 。

音频流

None

偏移尺寸类型字段

```
0 1 uint8 maskLengthN
```

```

1 N uint8 通道掩码

1 + N 4 float duration_ms

5 + N 1 uint8 强度

6 + N 1 uint8 音频通道

7 + N 1 uint8 crc

```

CRC 范围: 字节 0 通过 $6 + N$ 。

持续时间值 -1 表示固件支持时可无限播放。

音频通道行为:

```

None
0 = 混合

1 = 第一个音频通道

2 = 第二音频通道

...

```

PCM

PCM 使用可变长度的有效载荷。

```

None
[通道掩码] [uint8 pcm_data...] [uint8 crc]

```

数据长度 = $(1 + N) + \text{长度}(\text{pcm_data}) + 1$

CRC 校验范围: 通道掩码长度字节、掩码字节和 PCM 数据。最后一个 CRC 字节不参与 CRC 校验计算。

自定义主程序

自定义原语使用可变长度的有效载荷。

None

```
[通道掩码] [uint8 索引] [float 持续时间_毫秒] [float 参数0] [float 参数1] ... [uint8 CRC]
```

CRC 校验范围: 通道掩码、自定义原始索引和所有浮点字节。最后一个 CRC 字节不参与 CRC 校验计算。

自定义原始索引和参数顺序由设备定义, 应通过以下方式检索: **HDI D**。

9.13 自定义原始发现

自定义原始索引和参数列表由设备定义。

发送前 **VH_CUSTOM_PRIM** 数据包, 使用以下方式查询设备 **HDI D** 设备信息响应包含一个自定义原语部分, 其中列出了每个自定义原语索引和参数顺序。

示例响应结构:

None

自定义基本元素:

```
[0] MyPrim => 参数1 : 0.50, 参数2 : 1.00
```

```
[1] AnotherPrim => 频率 : 100.00, 强度 : 0.80
```

括号内的值是二进制中使用的索引。**VH_CUSTOM_PRIM** 数据包。参数必须按照设备信息响应中显示的顺序发送。

9.14 I²S 音频到触觉流传输

I²S 输入支持实时音频到触觉反馈的转换。在此模式下, 主机提供 I²S 音频或波形流, 模块将输入数据转换为触觉输出。

此模式适用于需要与音频、动态波形内容或实时主机生成的触觉信号同步的触觉反馈的应用。

支持的采样率、位深度、通道格式、通道映射、DSP 行为和预期信号范围取决于固件，应在 PCB 发布前确认。

9.15 重新同步行为

如果 EffectReceiver 接收到无效的同步字节，它会向右偏移一个字节并重试，直到接收到有效的同步字节为止。0xAA 0x55 已找到头部信息。这使得解析器能够从数据流中丢失的字节、多余的字节或不完整的包中恢复数据。

9.16 二进制数据包示例

以下示例展示了数据包的构造过程。除非根据最终有效载荷计算得出，否则 CRC 值将显示为占位符。

请求设备信息

None

命令：SYSTEM / VH_HDI_D

数据包：AA 55 01 02 00

分解：

None

AA 55 同步字节

01 cmd = 系统

02 子命令 = VH_HDI_D

```
00 dataLen = 0
```

在所有频道上播放振动

示例参数：

None

持续时间：500毫秒

强度：128

频率：85赫兹

锐度：255

频道目标：所有频道

包：

None

AA 55 02 02 0B 01 01 00 00 FA 43 80 55 00 FF CC

分解：

None

AA 55 同步字节

02 命令 = 播放

02 子命令 = VH_VIBRATE

0B 数据长度 = 11

01 maskLengthN = 1

01 通道掩码 = 所有通道

00 00 FA 43 持续时间 = 500.0 毫秒

80 强度 = 128

55 00 频率 = 85 Hz

FF 锐度 = 255

CC CRC占位符

左声道播放 Tick

示例参数：

None

持续时间：30毫秒

强度：200

锐度：255

声道目标：左声道

包：

None

AA 55 02 01 09 01 02 00 00 F0 41 C8 FF CC

分解：

None

AA 55 同步字节

02 命令 = 播放

01 子命令 = VH_TICK

09 数据长度 = 9

01 maskLengthN = 1
02 通道掩码 = 左声道
00 00 F0 41 持续时间 = 30.0 毫秒
C8强度 = 200
FF 锐度 = 255
CC CRC占位符

队列替换为暂停

示例参数：

None
持续时间：100毫秒
频道目标：所有频道

包：

None
AA 55 04 03 07 01 01 00 00 C8 42 CC

分解：

None
AA 55 同步字节
04 命令 = QUEUE_REPLACE
03 子命令 = VH_PAUSE
07 数据长度 = 7

01 maskLengthN = 1
01 通道掩码 = 所有通道
00 00 C8 42 持续时间 = 100.0 毫秒
CC CRC占位符

开始音频流

示例参数：

None
持续时间：-1 毫秒 / 无限长
强度：180
音频通道：0
频道目标：所有频道

包：

None
AA 55 02 07 09 01 01 00 00 80 BF B4 00 CC

分解：

None
AA 55 同步字节
02 命令 = 播放

```
07 subCmd = VH_AUDIO_STREAM

09 数据长度 = 9

01 maskLengthN = 1

01 通道掩码 = 所有通道

00 00 80 BF 持续时间 = -1.0 毫秒 / 无限

B4强度=180

00 音频通道 = 混合

CC CRC占位符
```

设置PCM采样率

示例参数:

```
None
采样率: 8000 Hz
```

包:

```
None
AA 55 00 04 04 40 1F 00 00
```

分解:

```
None
AA 55 同步字节

00 cmd = 配置

04 子命令 = VH_SETPCMSAMPLERATE

04 数据长度 = 4
```

40 1F 00 00 采样率Hz = 8000

设置音频DSP低通滤波器

示例参数：

None

预设：低通

截止频率：160 Hz

包：

None

AA 55 00 29 03 01 A0 00

分解：

None

AA 55 同步字节

00 cmd = 配置

29 subCmd = VH_SETAUDIODSP

03 数据长度 = 3

01 预设 = 低通

A0 00 截止频率 Hz = 160

设置抗锯齿模式

示例参数：

None

模式：双二阶

截止频率：自动

包：

None

AA 55 00 2A 03 02 00 00

分解：

None

AA 55 同步字节

00 cmd = 配置

2A 子命令 = VH_SETANTIALIAS

03 数据长度 = 3

02 模式 = 双二阶

00 00 截止频率 = 自动

9.17 固件更新

固件更新通过预留的刷写焊盘进行。这些焊盘不用于常规应用程序的 I/O 操作。

生产固件加载可在组装前进行，也可在组装后通过经认可的编程夹具进行。模块焊接至应用PCB后，除非系统设计已暴露所需的闪烁信号，否则可能无法直接通过编程电缆进行操作。

请勿将闪烁焊盘连接到无关电路，请勿将其用作 GPIO，或施加超出批准范围的编程电压。

10. 整合审查

在发布使用 TITAN VH 模块的 PCB 设计之前，请确认已审查以下方面。

10.1 占地面积和组装

确认 PCB 封装符合最新的 TITAN 焊盘图案，包括模块方向、引脚 1 标记、半孔焊盘位置以及任何要求的禁区。

如果需要进行组装后固件编程，请确认可以通过测试焊盘、弹簧针焊盘或经认可的编程夹具访问闪烁信号。如果组装后无法访问编程接口，则应在安装前对模块进行编程。

10.2 电源和信号路由

确认 5V 和 GND 布线能够满足触觉播放峰值电流的要求，包括左右声道同时运行。

串口和/或 I²S 路由应与所选固件配置相匹配。如果使用流媒体播放，I²S 路由应支持所需的音频到触觉流媒体格式。

10.3 触觉输出路由

确认 L+/L- 和 R+/R- 直接连接到预期的执行器位置，并具有适当的走线宽度，且与敏感的模拟电路、射频电路、麦克风电路、天线电路、电容式触摸电路和传感器电路保持适当的距离。

应根据模块输出级、预期电流消耗和热性能对所选执行器进行验证。

10.4 机械和系统验证

确认已检查模块上方和周围的机械间隙，包括外壳特征、屏蔽层、泡沫、粘合剂和紧固件。

应使用最终产品设计和预期播放用例来验证热性能、系统级电磁兼容性、安全性和可靠性。

11. 合规与处理

11.1 监管合规性

TITAN VH 模块是一个嵌入式子组件。最终的法规遵从性由成品负责。

必须使用最终的 PCB 布局、外壳、电源系统、执行器配置、布线、固件行为和运行环境来评估系统级合规性。

11.2 安全和环境

成品应根据适用的安全、环境、电磁兼容性、热学和可靠性要求进行验证。

11.3 静电放电处理

使用标准的防静电操作规程处理 TITAN VH 模块。组装前，请将模块存放在防静电包装中。

11.4 装配搬运

该模块应采用经批准的焊接工艺进行组装。回流焊工艺参数、湿度敏感等级、钢网设计和检验标准待定，应在生产前确认。

[插图 11.1: 如有需要，可插入推荐的搬运、包装或组装工艺流程图]

12. 免责声明和版权声明

本文档中的信息，包括规格、引脚排列、固件行为、推荐工作条件和集成指南，如有更改，恕不另行通知。

本文件按“原样”提供，不提供任何形式的明示或暗示保证。TITAN Haptics 特此声明免除所有保证责任，包括但不限于适销性、特定用途适用性和不侵权保证。

TITAN Haptics 对使用本文档所含信息不承担任何责任。本文档未授予任何明示或暗示的知识产权许可。

最终系统验证、监管批准、电气安全、EMC合规性、热性能和机械可靠性是成品设计的责任。

所有产品名称、商标和注册商标均为其各自所有者的财产，并已得到承认。

© 2026 TITAN Haptics Inc. 保留所有权利。