无感 FOC 无刷直流电机驱动芯片

1. 特性与优势

- 工作电源电压范围 4.5-32V
- 内置 P+N 预驱（Predriver），驱动电流 30mA，死区时间可调
- 矢量控制（FOC）换相，运转平顺噪音低
- 无传感器位置检测技术，无需霍尔传感器
- 支持高速电机，最高转速可达 20 万转以上
- 支持恒转速、恒转矩/恒电流、恒功率和开环等多种控制模式，支持弱磁提速
- 支持初始位置检测和准闭环起动，起动扭矩大
- 支持负载自适应起动，自动适配宽范围负载
- 支持软启动软关断，降低对电源系统的冲击并减小噪音
- 提供模拟（Vsp）、PWM、PFM 和 I^2C 等多种控制接口，转速反馈（TACH）和故障指示输出
- 支持 FlexCurve™ 控制曲线调整技术，可灵活适配不同电机特性
- 支持全面的保护功能：欠压过压保护、过流保护、电流限制、短路保护（相间、相到地、相到电源）、缺相保护、堵转保护、防电压浪涌保护、过热保护和温度限制，支持紧急制动
- 内置 5V 高压 LDO，可供外部使用（<10mA）
- 单电阻电流采样，易于布线，降低方案成本

2. 产品简介

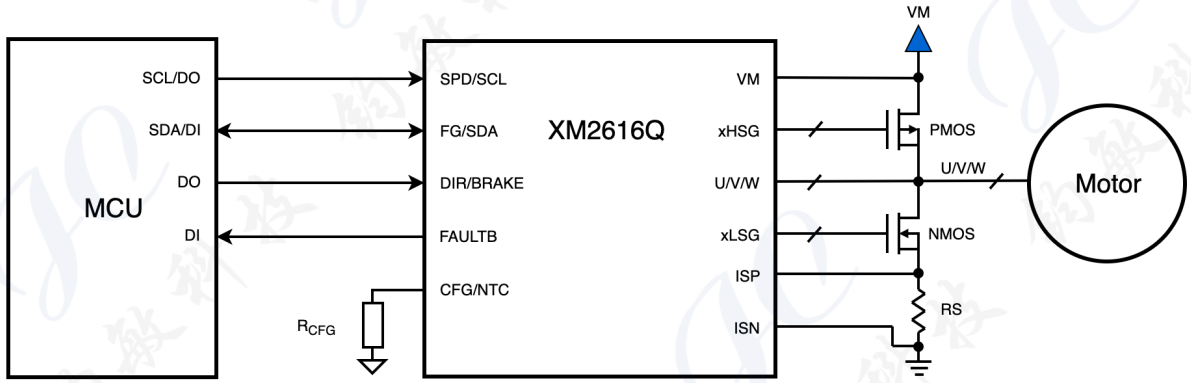
XM2616 采用无传感器矢量控制（无感 FOC）技术驱动三相无刷直流（BLDC）电机，可显著降低电机的运行噪声和振动，且无需使用不可靠的霍尔传感器。芯片内固化了控制算法，集成了低压、中小功率无刷直流电机驱动所需的大部分外围电路，外部仅需功率 MOSFET 及少量元器件，易于使用并大幅降低了系统成本。

XM2616 支持高达 20 万转的高速电机，特别适用于真空吸尘器等应用。芯片针对电池供电等应用场景优化，运行时工作电流低至 10mA，待机模式下静态电流仅为 50uA。

XM2616 应用灵活，支持恒转速、恒转矩/恒电流、恒功率和开环等多种控制模式，提供多种控制接口，并可根据电机特性匹配的需要灵活调整控制曲线。芯片提供可编程配置区（EFUSE），配合专用的 XMC-Optimizer 优化工具，可根据应用要求写入电机参数和起动、控制、保护等配置。

3. 应用场景

- 真空吸尘器
- 电动工具
- 吊扇、大功率风扇
- 低压水泵等



简化电路示意图

目 录

1. 特性与优势 1
2. 产品简介 1
3. 应用场景 1
4. 订购信息 2
5. 修订记录 2
6. 产品介绍 3
7. 系统框图 6
8. 引脚定义 7
9. 技术规格 9
10. 功能说明 15
11. 接口说明 21
12. 寄存器表 22
13. 典型应用 23
14. 电源供电建议 23
15. PCB 布局布线建议 23
16. 封装和包装信息 24
17. 重要声明和免责声明 25

4. 订购信息

订购号	封装	尺寸	功能及驱动接口
XM2616Q20	QFN20L	5mm X 5mm X 0.75mm	控制器，集成预驱

5. 修订记录

日期	修订版本	修订内容
2021-8-12	V0.3	初始版本

6. 产品介绍

6.1. 概述

XM2616 产品是基于无传感器矢量控制（无感 FOC）技术的三相无刷直流（BLDC）电机/永磁同步电机（PMSM）驱动器专用芯片，片内集成了低压、中小功率无刷直流电机驱动所需的大部分外围电路，外部仅需功率 MOSFET 及少量元器件，简单易用，并可大幅降低系统成本。

芯片内置独特的混合信号运动控制器 XMC（miXed-signal Motion Controller），支持 FOC（磁场定向控制，也称为矢量控制），可有效提升电机运行效率，并显著降低电机运行噪声和转矩脉动。基于独特的无传感器位置检测技术，XMC 可基于电机本体特性智能识别转子初始位置，并在电机运转时实时解算转子实时位置，从而无需安装不可靠的位置传感器。通过初始位置检测，XMC 可支持准闭环大扭矩起动，并避免起动时反转。XMC 采用了高效的控制算法，支持恒转速、恒转矩/恒电流、恒功率和开环等多种控制模式，并支持弱磁控制，可满足 20 万转以上的高速电机应用要求。针对不同的电机特性，XMC 支持 FlexCurve™ 控制曲线调整功能，可灵活调整电机转速、转矩对控制信号的响应。同时，XMC 支持欠压锁定（UVLO）、过压保护（OVP）、电流限制（CLP）、过流保护（OCP）、短路保护（包括相间短路保护、相到地短路保护和相到电源短路保护）、缺相保护（OPP）、堵转保护（LOCK）、电压浪涌保护（VSP）、过热保护（OTP）和温度限制自动降额（TLP）等多重保护功能，并支持紧急制动，提供全面的安全保障。

芯片提供可编程配置区（EFUSE），可根据应用要求写入电机参数和起动、控制、保护等运行参数。配合专用的 XMC-Optimizer 软件工具，可根据应用要求生成最优的配置参数。配置参数支持最多两次改写，以满足应用改型的灵活性要求。芯片内置 ECC 校验功能，对一配置位的缺陷失效可自动纠错，保证了寿命期间的安全性及可靠性。

芯片提供智能监控功能，通过 I²C 接口可改写配置参数，控制方向、转速、电流/转矩等运行参数，以及实时读取转速、温度、电流、电压、保护状态等状态信息。芯片提供多种控制接口，其中调速（SPD）接口兼容模拟输入、PWM、PFM 等控制方式，正反转控制（DIR）可动态控制电机转动方向。此外，专用的转速反馈（FG）、故障指示（FAULTB）信号输出可分别用于监测电机转速和堵转等异常情况。

根据控制模式的不同，恒转速、恒转矩/恒电流、恒功率和开环控制模式下，SPD 接口分别用于设定目标转速、目标转矩/输出电流、目标功率和开环转速。

芯片针对电池供电等应用场景优化，采用智能待机等低功耗技术设计，运行时工作电流低至 10mA，待机模式下静态电流仅为 50uA。

芯片采用先进的高压混合信号工艺设计，集成了电机控制所需的主要元器件。芯片内置预驱动级（Predriver）和单电阻电流采样电路，从而高度简化了外围电路的设计，有效提高了系统的可靠性。芯片采用针对散热优化的封装工艺，结合合理的引脚分布，易于布线和散热设计。

6.2. 产品特性概览

混合信号运动控制器 XMC（miXed-signal Motion Controller）

- 无感 FOC（矢量控制）换相控制模式
- 基于无传感器位置检测技术，无需位置传感器
- 支持恒转速、恒转矩/恒电流、恒功率和开环控制，支持高速模式（弱磁控制）
- 支持初始位置检测和闭环起动，避免起动时反转，起动扭矩大
- 支持负载自适应起动，自动适配宽范围负载 (1)
- 支持软启动软关断，可降低对电源系统的冲击并减小噪音
- 单电阻电流采样，易于布线，降低方案成本
- 支持多重保护功能：欠压锁定、过压保护、过流保护、电流限制、短路保护（相间、相到地和相到电源）、缺相保护、堵转保护、防电压浪涌保护、过热保护和温度限制
- 开环（起动）加速曲线、闭环调速曲线可配置 (2)
- 支持 FlexCurve™ 控制曲线调整技术，可灵活适配不同电机特性

电源与功耗

- 电源电压 VM：7.6V ~ 28V，耐压可达 30V
- 电源电压 VDD5：5V（可由片内 LDO 生成），可供外部使用（电流不大于 10mA）
- 工作电流小于 10mA
- 支持低功耗待机，待机电流低至 50uA

驱动接口

- 预驱动（Predirver）：内部集成预驱动，可驱动大功率 PMOS+NMOS 功率桥，死区时间支持灵活调整
- 驱动电流：驱动电流 30mA

传感器与控制接口

- SPD：转速/转矩控制输入，兼容模拟、数字 PWM 和 PFM 调速信号
- DIR：方向控制输入 (3)
- BRAKE：紧急制动输入 (3)
- CFG：控制模式配置 (4)
- NTC：温度传感器输入 (4)
- I²C：数字通信接口 (5)

输出指示

- FG：转速反馈（TACH）；开漏输出，带短路保护
- FAULTB：故障指示；开漏输出，带短路保护 (3)

封装

- XM2616Q：超薄散热增强封装 QFN20L（5mm X 5mm X 0.75mm）

环境要求

- 工作温度：-40 ~ 105°C
- 储存温度：-65 ~ 150°C

注：

（1）自适应的起动负载范围可配置；

（2）曲线参数可配置；

（3）BRAKE 与 DIR 复用引脚；

（4）NTC 接口与 CFG 接口复用引脚；

（5）I^2C 接口与 SPD、FG 接口复用引脚。

6.3.简化应用电路

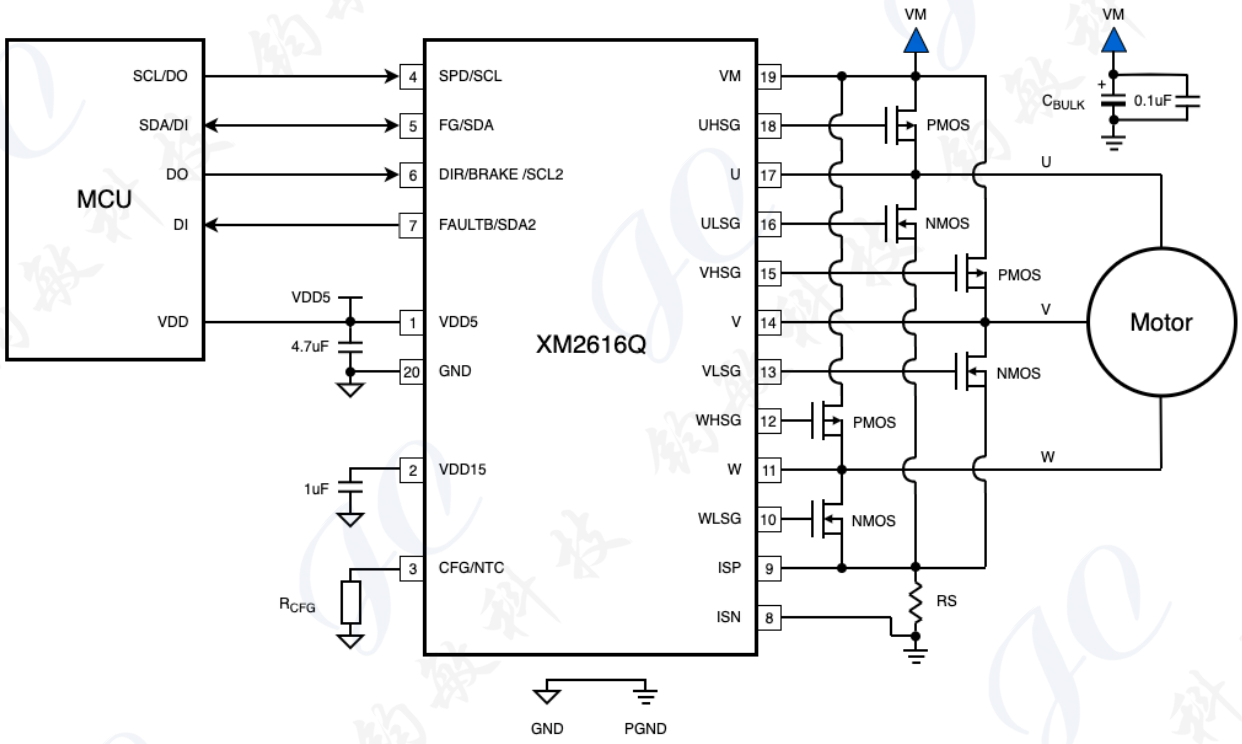


图 6-1 XM2616Q 的简化应用电路

7. 系统框图

7.1. XM2616 系统框图

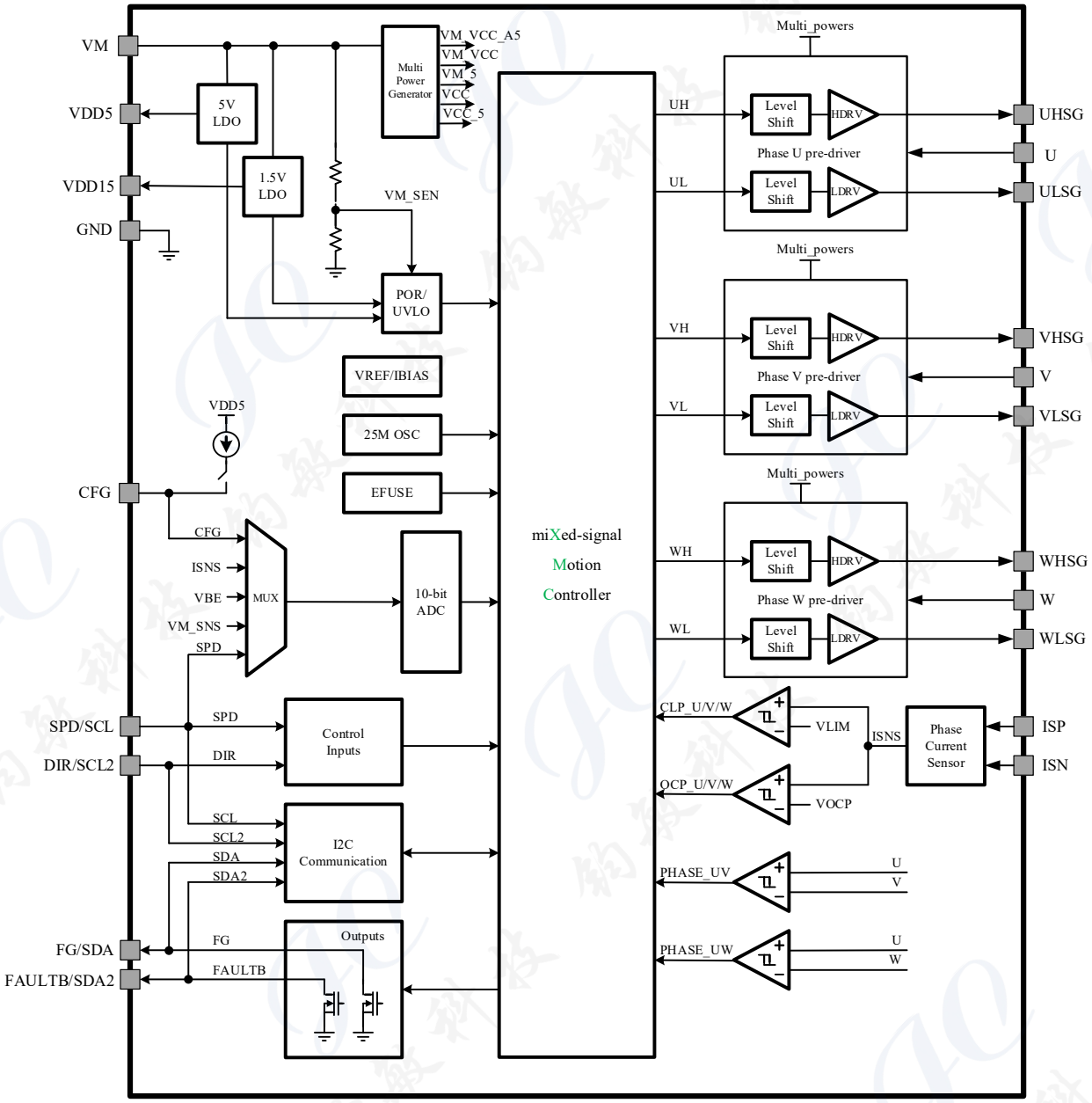


图 7-1 XM2616 系统框图

8. 引脚定义

8.1. XM2616

8.1.1.引脚定义

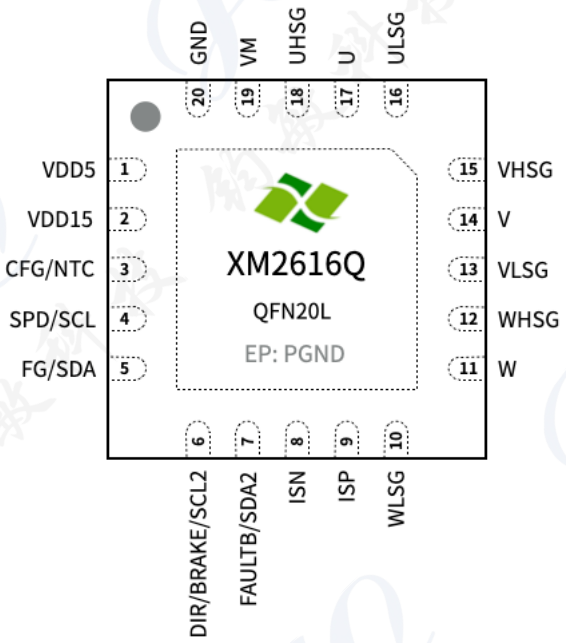


图 8-1 芯片引脚定义（顶视图）

8.1.2.引脚说明

引脚序号	名称	IO类型(1)	功能描述	外部连接
1	VDD5	P	5V 电源，片内 LDO 产生并输出或外部输入。	接 4.7μF 陶瓷电容至 GND。
2	VDD15	P	1.5V 电源，片内 LDO 产生，仅供内部数字内核使用。	接 1μF 陶瓷电容至 GND。
3	CFG	AI	配置信号接口，用于配置转速范围、驱动电流或 I²C 地址	接配置电阻到地。
	NTC	AI	温度传感器接口	接 NTC 温度传感器。
4	SPD	AI	模拟/PWM/PFM 调速，内置上拉电阻至 VDD5。	MCU 的控制信号，不用时浮空。
	SCL	DI	从机模式 I²C 时钟输入，最大速率 400KHz。内置上拉电阻至 VDD5。	MCU 的 I²C 时钟信号，不用时浮空。

5	FG	OD	转速反馈指示。内置上拉电阻至 VDD5。	MCU 的 IO，不用时浮空。
	SDA	DIO	从机模式 I²C 数据，最大速率 400KHz。输出时为开漏输出，内置上拉电阻至 VDD5。	MCU 的 I²C 数据信号，不用时浮空。
6	DIR	DI	电机转动方向控制。高电平时，换相顺序为 U -> V -> W；低电平时，为 U -> W -> V。	MCU 的 IO，不用时浮空。
	SCL2	DI	从机模式 I²C 时钟输入，最大速率 400KHz。内置上拉电阻至 VDD5。	MCU 的 I²C 时钟信号，不用时浮空。
	BRAKE	DI	紧急刹车制动	MCU 的 IO，不用时浮空。
7	FAULTB	OE	故障状态指示。发生堵转等保护时，输出低电平（开漏）。内置上拉电阻至 VDD5。	MCU 的 IO，不用时浮空。
	SDA2	DIO	从机模式 I²C 数据，最大速率 400KHz。输出时为开漏输出，内置上拉电阻至 VDD5。	MCU 的 I²C 数据信号，不用时浮空。
8	ISN	AI	电流采样信号差分输入	电流采样电阻低端
9	ISP	AI	电流采样信号差分输入	电流采样电阻高端
10	WLSG	AO	W 相 H 桥低端栅极驱动	接 W 相 H 桥低端(NMOS)栅极
11	W	AI	W 相	接电机 W 相。
12	WHSG	AO	W 相 H 桥高端栅极驱动	接 W 相 H 桥高端（PMOS）栅极。
13	VLSG	AO	V 相 H 桥低端栅极驱动	接 V 相 H 桥低端(NMOS)栅极。
14	V	AI	V 相	接电机 V 相。
15	VHSG	AO	V 相 H 桥高端栅极驱动	接 V 相 H 桥高端（PMOS）栅极。
16	ULSG	AO	U 相 H 桥低端栅极驱动	接 U 相 H 桥低端(NMOS)栅极。
17	U	AI	U 相	接电机 U 相。
18	UHSG	AO	U 相 H 桥高端栅极驱动	接 U 相 H 桥高端（PMOS）栅极。
19	VM	P	主电源输入。	接主电源。
20	GND	P	地。	接地。
EP	PGND	P	散热焊盘。	接地。

(1) AI：模拟输入；DI：数字输入；DO：数字输出；DIO：数字输入/输出；OD：开漏输出；P：电源

9. 技术规格

9.1. 电气特性绝对最大值

表 9-1 电气特性绝对最大值（工作环境温度范围内）

参数		最小值	最大值	单位
输入电压 (1) (2)	VM	-0.3	40	V
	U、V、W	-0.3	40	V
	SPD/SCL、DIR/SCL2、CFG/NTC	-0.3	6.5	V
输出电压 (1) (2)	VDD5	-0.3	6.5	V
	VDD15	-0.3	2	V
	UHSG、VHSG、WHSG	VM-20	VM+1	V
	ISP、ISN	-0.3	2	V
	FG/SDA、FAULTB/SDA2	-0.3	30	V
T_A 工作环境温度 (3)		-40	105	°C
T_J 工作时结温		-40	150	°C
T_{STG} 储存温度		-60	150	°C

（1）运行条件超过上述绝对最大值可能对器件造成永久性损坏，并影响器件的运行稳定性。上述条件仅为允许的最大值范围，非推荐的工作范围。器件运行在推荐工作范围之外可能导致部分功能不可用，并缩短器件的使用寿命。
（2）所有电压均相对于地电位（GND）。
（3）自然散热。

9.2. ESD 特性

表 9-2 ESD 特性

参数	条件	值	单位
$V_{(ESD)}$静电放电电压	空气放电 （HBM 模型），ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 标准，所有引脚 (1)	±2,000	V
	接触放电（CDM 模型），JEDEC specification JESD22-C101 标准，所有引脚 (2)	±500	V

(1) JEDEC 文档 JEP155 声明 500V HBM 模型可满足装配过程中的标准静电防护要求。

(2) JEDEC 文档 JEP157 声明 250V CDM 模型可满足装配过程中的标准静电防护要求。

9.3. 电气特性推荐值

表 9-3 电气特性推荐值

参数		最小值	典型值	最大值	单位
电源电压 (1)	VM	4.5	12/24	32	V
	VDD5	4.75	5	5.25	V
	VDD15	1.425	1.5	1.575	V
电压范围 (1)	U、V、W	-1.0		VM+1	V
	SPD/SCL、FG/SDA、DIR/SCL2、CFG/NTC、FAULTB/SDA2	-0.3		5.5	V
电流范围	VDD5 输出 (2)			30	mA
T_A 工作环境温度 (3)		-40		105	°C

（1）所有电压均相对于地电位（GND）；
（2）外部可用最大为 10mA；
（3）自然散热。

9.4. 封装热阻

表 9-4 封装热阻

参数	条件	值		单位
		QFN20	SOP8	
$R_{\Theta JA}$ 芯片结温相对环境温度	（1）、（2）	TBD	TBD	°C/W

注：
（1）JEDEC 标准，单层 PCB 板；
（2）测试结果与实际应用条件相关。

9.5. 电气特性

表 9-5 电气特性

参数		条件 (1)	最小值	典型值	最大值	单位
工作电流						
I_{VDD5_ACTIVE}	工作电流	V_{SPD} > 0V，全温度范围		8	10	mA
I_{VDD5_SDB}	待机电流	V_{SPD} = 0V，T_A = 25°C		50	55	μA
		V_{SPD} = 0V，全温度范围			120	μA
LDO 输出						
VDD5	输出电压	全温度范围	4.75	5	5.25	V
I_{VDD5_MAX}	最大输出电流	供外部电路使用部分			10	mA
待机模式						
$V_{SPD_AN_EN_SDB}$	模拟调速进入待机电压	模拟调速模式	0		100	mV
$V_{SPD_AN_EX_SDB}$	模拟调速退出待机电压	模拟调速模式	200			mV
$t_{SPD_AN_EN_SDB}$	模拟调速进入待机时间	模拟调速模式 $V_{SPD} < V_{SPD_AN_EN_SDB}$		6		ms
$t_{SPD_PWM_EN_SDB}$	PWM 调速进入待机时间	PWM 调速模式 $V_{SPD} < V_{SPD_PWM_IL}$		60		ms
$t_{SPD_PFM_EN_SDB}$	PFM 调速进入待机时间	PFM 调速模式 $V_{SPD} < V_{SPD_PWM_IL}$		60		ms
$t_{EX_SDB_DR}$	从待机模式退出到开始驱动电机的唤醒时间	可配置为 100ms、200ms、350ms、500ms	100	350	500	ms
R_{SPD_PD}	SPD 引脚内置下拉电阻	待机模式 V_{SPD} = 0		500		KΩ
配置引脚（CFG）						
R_{CFG}	CFG 引脚外接配置电阻	16 档可选，最低到最高分别为：0（或接地），3.57KΩ，6.98KΩ，10.70KΩ，15KΩ，19.6KΩ，24.9KΩ，30.9KΩ，37.4KΩ，45.3KΩ，56.2KΩ，	0			KΩ

表 9-5 电气特性

参数		条件 (1)	最小值	典型值	最大值	单位
		88.7KΩ，127KΩ，169KΩ，221KΩ和300KΩ（或浮空），电阻精度要求 1%				
数字输入（DIR）						
V_{IH}	输入高电平最小值		2.2			V
V_{IL}	输入低电平最大值				0.6	V
开漏输出（FG、FAULTB）						
I_{OD_SINK}	灌电流能力	V_O = 0.3V	2			mA
I_{OD_SHORT}	短路灌电流			20	25	mA
SPD - 模拟调速输入						
$V_{SPD_AN_FS}$	模拟调速全速电压			3		V
$V_{SPD_AN_ZERO}$	模拟调速零速电压		0		100	mV
SPD – PWM/PFM 数字调速输入						
$V_{SPD_PWM_IH}$	PWM/PFM 调速输入高电平		2.2			V
$V_{SPD_PWM_IL}$	PWM/PFM 调速输入低电平				0.6	V
f_{SPD_PWM}	PWM 调速输入频率		0.1		100	KHz
f_{SPD_PFM}	PFM 调速频率范围	频率上限可配置为1kHz/100kHz	0.1		100	KHz
I^2C 串行总线接口						
V_{I2C_IH}	I^2C 输入高电平最小值		2.2			V
V_{I2C_IL}	I^2C 输入低电平最大值				0.6	V
f_{I2C}	I^2C 时钟频率		0		400	KHz
PWM 特性						

表 9-5 电气特性

参数		条件 (1)	最小值	典型值	最大值	单位
f_{PWM}	PWM 频率可配置范围	10KHz，20 KHz，25 KHz，40 KHz，50 KHz 五档	10	25	50	KHz
t_{PWM_DT}	死区时间设置	32 档可配?	0.9	1	1.1	us
集成预驱（Predriver）						
V_{H_HSG}	高端栅极驱动输出高电平			VM		
V_{L_HSG}	高端栅极驱动输出低电平	VM 电压不低于 15V		VM-15		V
		VM 电压低于 15V		0		V
V_{H_LSG}	低端栅极驱动输出高电平	VM 电压低于 15V		VM		V
		VM 电压不低于 15V		15		V
V_{L_LSG}	低端栅极驱动输出低电平			0		V
T_{on}	开通时间	C_{load}=500pF, 20% to 80%, VM=12V		200		ns
T_{off}	关断时间	C_{load}=500pF, 80% to 20%, VM=12V		200		ns
T_{on_delay}	开通延迟		200	250	400	ns
T_{off_delay}	关断延迟		200	250	400	ns
$R_{HSG_PULL_UP}$	高端栅极驱动导通电阻（输出高电平）	可配置		17		Ω
$R_{HSG_PULL_DOWN}$	高端栅极驱动导通电阻（输出低电平）	可配置		28		Ω
$R_{LSG_PULL_UP}$	低端栅极驱动导通电阻（输出高电平）	可配置		24		Ω
$R_{LSG_PULL_DOWN}$	低端栅极驱动导通电阻（输出低电平）	可配置		20		Ω
EFUSE 可编程配置区						

表 9-5 电气特性

参数		条件 (1)	最小值	典型值	最大值	单位
V_{PROG}	写入电压			5		V
t_{RET}	保存时间		10			年
堵转保护（LOCK）						
t_{LOCK_OFF}	堵转时的关断时间	可配置为 2s、3s、4s 或保持		3		s
t_{LOCK_ETR}	堵转判定时间	可配置为 0.3s、0.5s、1s 和 1.5s		0.5		s
欠压锁定（UVLO）保护						
$V_{VM_UVLO_R}$	VM 欠压锁定上升阈值电压	全温度范围	TBD	4.5	TBD	V
$V_{VM_UVLO_F}$	VM 欠压锁定跌落阈值电压	全温度范围	TBD	4.1	TBD	V
$V_{VM_UVLO_HYS}$	欠压锁定保护迟滞		-	0.4	-	V
$V_{VDD15_UVLO_R}$	VDD15 欠压锁定上升阈值电压			1.4		V
$V_{VDD15_UVLO_F}$	VDD15 欠压锁定跌落阈值电压			1.15		V
$V_{VDD5_UVLO_R}$	VDD5 欠压锁定上升阈值电压			4.5		V
$V_{VDD5_UVLO_F}$	VDD5 欠压锁定跌落阈值电压			4.1		V
过压保护（OVP）						
V_{OVP}	过压保护电压		25.4	36	36.6	V
V_{OVP_HYS}	过压保护迟滞电压		-	1	-	V
过流保护（OCP）						
I_{OCP}	过流保护门限	可配置	TBD	TBD	TBD	A
最大电流限制（ILIMIT）						
I_{LIMIT_MAX}	驱动电流限制最大值	可配置	TBD	TBD	TBD	A
过热保护（OTP）和温度限制（TLP）						

表 9-5 电气特性

参数		条件 (1)	最小值	典型值	最大值	单位
T_{TLP}	过热保护门限	可配置为 140°C、150°C	130	140	150	°C
T_{TLP_HYS}	过热保护迟滞		-	15	-	°C
T_{TLP}	温度越限自适应降额开启门限	越限后自动降额 20%，温度每上升 10°C，降额增加 10%（最多不超过 50%）	105	110	115	°C

注：除非特殊说明，T_A = 25°C，VM = 24V。

10. 功能说明

芯片的电机控制功能由混合信号运动控制器 XMC 专用内核完成，本章详细描其控制逻辑、保护机制和调试诊断方法。

10.1. 电机初始状态

初始时，电机可能处于静止（或低速转动）、正转和反转等不同状态，XMC 针对这些状态采用多种策略来确保电机能够顺利起动。

10.1.1.静止或低速转动

针对静止或低速转动状态的电机，XMC 支持采用强制对位、开环拖动（FR）、初始位置检测（IPD）等策略来起动电机。

10.1.2.正转

针对处于正转状态且反电动势足够大的电机，XMC 采用重新同步策略来快速起动电机，也可通过配置选择等待或制动策略。

10.1.3.反转

针对反转状态的电机，XMC 可采用自停、制动等多种策略来停止电机，然后重新起动电机至正转状态。制动策略可快速停止电机，但需注意防止能量反向注入到供电电源，避免损坏芯片或外围电路。

10.2. 电机起动策略

10.2.1.电机起动流程

XMC 在起动时，首先执行初始速度检测（ISD），识别电机的正反转状态及速度；当电机处于正转状态且速度满足要求时，可直接重新同步以快速起动；当电机处于反转状态时，根据配置执行自停或制动动作。

当电机初始速度很小或静止时，XMC 根据配置执行强制对位（FA）或初始位置检测（IPD）起动流程，并启动开环加速，直到转速达到闭环控制要求后转入闭环控制状态；XMC 支持准闭环启动，可跳过开环加速过程，直接提供大力距起动。

XMC 在起动过程中提供多重保护功能，避免芯片过流、过压、过热。

10.2.2.初始速度检测（ISD）

初始状态时，MOSFET 输出关断，通过检测 U、V、W 三相的电压幅值和相位关系，可判断电机正转或反转，并得到电机的初始转速。当线电压幅值低于阈值，或一定时间内线电压未发生变化时，可判定电机处于静止状态。

10.2.3.重新同步

当初始速度检测判定电机处于正转状态时，XMC 可利用初始速度检测过程中获得的速度、角度信息，直接进入闭环控制状态，无需停止电机，从而大大加快起动速度。

重新同步时，芯片支持软启动功能，驱动电流逐步加大，可降低启动过程中的噪音和振动。

10.2.4.自停与制动

当初始速度检测判定电机处于反转状态，需要停止电机时，XMC 支持自停和制动两种模式。

自停模式下，XMC 停止驱动电机（MOSFET 桥上下管输出均为高阻态），等待电机自行停止。

制动模式下，XMC 同时导通 3 个 MOSFET 下管或上管来实现制动。制动过程中，芯片支持软关断功能，逐渐减小驱动电流，让电机缓慢减速，降低制动过程的噪音和振动。

10.2.5.电机起动

XMC 支持强制对位（FA）和初始位置检测（IPD）两种起动方式。

10.2.5.1.强制对位（FA）

XMC 通过在 U 相和 V 相之间注入特定幅值的电流，并保持设定的时间，来实现转子的强制定位。强制定位时电机可能反转一定角度。强制对位的电流幅值和持续时间需要根据起动负载来调整，当起动负载较大时所需要的电流也较大。

10.2.5.2.初始位置检测（IPD）

XMC 采用无传感器位置检测技术，通过在 U、V、W 相之间按特定顺序注入探测电流脉冲，估算出转子的位置，该方法称为初始位置检测（IPD）。IPD 注入的电流脉冲时间很短，转子因转动惯量通常可保持静止或仅发生轻微位移，因此几乎没有噪音，且几乎不会发生反转。

10.2.5.3.电机加速

通过强制对位或初始位置检测后，转子位置得以确定，可以开始起动电机。电机起动是对转子加速至指定转速的过程。在转速较小时，电机产生的反电动势较小，不足以可靠地确定转子的实时位置，因此通常采用开环拉动的方式，对转子逐渐加速，直至达到可产生足够幅值的反电动势电压的转速后转入闭环控制。XMC 支持准闭环启动，可跳过开环加速过程，提供大力距起动，可有效提高起动成功率。

10.2.6.起动时序

起动时序包括三部分：

（1）初始化时间，由起动策略和初始状态决定。在静止状态下，由起动策略及对应的强制对位时间、初始位置检测时间确定；

（2）开环加速时间（可选），由开环加速曲线参数和闭环切换速度决定；

（3）闭环加速时间，由目标转速和闭环调速曲线参数决定。

10.3. 起动电流设置

10.3.1.强制对位电流

强制对位时，XMC 在 W 相和 V 相之间注入特定幅值的电流，让转子强制对位，电流的幅值 I_{FA} 和施加时间 t_{FA} 可设置。在特殊情况下，转子与期望的位置可能正好反向，此时需要两次强制对位才能让转子对位到期望位置。此时，XMC 先在 W 和 U 相之间注入电流，然后再在 W 和 V 相之间注入，确保转子处于预期位置。

10.3.2.起动电流限制

起动过程中，XMC 可限制初始化及开环加速阶段的峰值电流，防止电流过大导致拉低直流母线电压，也避免加速过快导致噪声太大或失步。

10.3.3.软启动（起动电流上升率限制）

起动过程中，驱动电流快速增大拉低直流母线电压，还造成输出力矩的突变，导致产生较大的起动噪音。XMC 支持软启动功能，可设置电流上升曲线，防止出现这种情况。

10.4. 起动负载自适应

在落地扇应用中，同一种电机匹配的风叶型号较多，而不同型号风叶的转动惯量差异较大，整机调试时需要逐一匹配，工作量较大。XMC 具备起动负载自适应能力，按照最大转动惯量的机型设置好参数后，可以适配小风叶机型，同时结合大力距准闭环起动功能，可有效提高起动成功率，无需逐一调试整机。

10.5. PWM 输出

调速指令通过芯片内部逻辑转换为 PWM 输出，控制 MOSFET 的开通占空比，从而改变施加到电机上的驱动电压的有效值。

PWM 频率提供 10KHz、20KHz、25KHz、40KHz、50KHz 五档。更高的 PWM 频率可远离音频范围，降低音频噪声，同时减小了电源纹波，并支持更高的电机转速，代价是开关损耗更大。

PWM 输出可设置死区时间，防止上下管同时导通。死区时间会导致相电流出现谐波，XMC 支持自动补偿功能，消除死区的影响。

XMC 支持五段式和七段式两种调制模式，五段式调控损耗小，但电流谐波略大。

10.6. 正反转控制

XMC 支持电机的正反转控制，正转时驱动顺序为 U->V -> W，反转时为 U -> W -> V。正反转方向切换时，无需手动停止电机。

10.7. 换相控制

XMC 支持 FOC（Field Oriented Control, FOC）矢量控制，通过巧妙地控制驱动电流形成的定子空间磁场矢量与转子磁场矢量保持特定角度关系，可实现对电机转速、转矩和运行效率等多个维度的优化控制。

10.8. 开环控制

在电机转速较小时，产生的反电动势较小，不足以可靠地确定转子的实时位置，此时采用开环控制的方式。此外，开环控制提供了一种简单易用的机制，无需了解电机的参数，即可让电机在指定的驱动电流和转速下运行，且可运行在极低的速度下。开环运行的效率较低，且应注意低速时避免过流。

10.9. 闭环控制

不同应用对电机的控制目标提出了不同的需求，例如风扇类应用中通常需要控制电机的转速，伺服控制中需要控制电机的转矩，在抽油烟机、空调风管机内机等应用中还需要控制出口风量，XMC 支持多种闭环控制模式，可以单独或组合使用。

10.9.1.开环到闭环的切换

从开环控制切入到闭环控制时，XMC 可实现平滑切换，防止出现转速、转矩波动。

10.9.2.恒转速控制

恒转速控制是针对电机转速的闭环控制，设定目标转速后，XMC 自动控制驱动输出，使得电机的实际转速跟随目标转速，跟随速度由调速参数决定。

10.9.3.恒转矩/恒电流控制

恒转矩/恒电流控制是针对电机输出转矩的闭环控制，设定目标转矩/相电流后，XMC 自动控制驱动输出，使得电机的实际输出转矩/电流跟随目标转矩/电流，且保持最佳效率。

10.9.4.恒功率控制

恒功率控制是针对系统电源输入功率的闭环控制，设定目标转速后，XMC 自动补偿电源电压变化、控制电机输出功率，使得电源输入功率保持恒定。

10.10. 高速模式（弱磁控制）

针对高转速应用，XMC 支持弱磁控制，可有效提升电机最大转速。

10.11. 运动控制

10.11.1.开环加速曲线

为提高电机起动的平顺性和成功率，可设置开环加速曲线，让电机平缓加速至最小速度。

10.11.2.闭环调速曲线

在闭环控制运行过程中，为防止调速过程中电机转速突变，减轻噪声的干扰及提高运转的平顺性，可设置闭环调速曲线，以及限制调速过程中目标转速的变化率。

10.11.3.转速控制

电机的转速控制可通过调整 VM 电源电压，或通过调速指令来实现。调速指令可来自模拟调速、PWM 数字调速、PFM 调速或 I^2C 通信接口。

10.11.4.负载突变响应

电机运行时负载可能发生突变造成失步，XMC 可快速响应负载突变，保持电机的平顺运行。

10.12. 保护逻辑

10.12.1.欠压锁定（UVLO）

欠压锁定功能持续监测电源电压，当 VM 电源电压低于 $V_{VM_UVLO_F}$ 时自动锁定，并在恢复到 $V_{VM_UVLO_R}$ 时以上时自动解锁，恢复正常工作状态，滞回阈值电压为 $V_{VM_UVLO_HYS}$。此外，VDD5 电源和片内的 1.8V 电源也有类似功能。

10.12.2.过压保护（OVP）

当 VM 电源电压超过推荐工作范围时，过压保护逻辑停止驱动电机，防止损坏芯片和电机。当 VM 电压恢复到推荐工作范围内时，芯片自动恢复到正常工作状态。

10.12.3.过流保护（OCP）

过流保护逻辑用于检测相间短路、相到地短路和相到电源短路，保护 MOSFET 不会因过流而损坏。

过流保护逻辑持续监测内置 MOSFET 的电流，当电流超过阈值 I_{OCP} 时自动关断 MOSFET 并置位故障指示信号。

10.12.4.电流限制（CLP）

电流限制逻辑允许设置电机在加速、减速及运转过程中的最大电流限制，防止 MOSFET 和芯片过热。电流限制在每个 PWM 周期和每个驱动周期中均执行，限制每个 PWM 周期的最大输出占空比，保证每个驱动周期的平均电流不超过预设值。

10.12.5.过热保护（OTP）

过热保护逻辑利用片内温度传感器监测 MOSFET 桥的温度，当温度超过设定阈值时自动关断，并置位故障指示信号。

当温度下降超过温度迟滞值时，芯片自动恢复正常工作状态。

10.12.6.温度限制（TLP）

温度限制逻辑类似过热保护逻辑，但当温度超过设定的温度告警监测阈值时，不关断芯片，而是自动降低工作电流，并置位温度告警信号。

当温度下降超过温度迟滞值时，芯片自动恢复正常工作状态。

10.12.7.堵转保护（LOCK）

堵转保护逻辑持续检测因外力导致电机锁死（堵转）的异常状态，及时关断驱动电流，防止过热或损坏电机和芯片。当发生堵转后，保护逻辑置位故障指示信号，并在间隔 t_{LOCK_OFF} 时间后自动重试，探测堵转条件是否已经消除，自动重试的间隔时间可设置。在堵转消除后，保护逻辑自动恢复电机的正常运行状态。

XMC 可支持堵转的多种检测方法，确保能快速、准确地识别堵转状态。检测方法包括：电流异常、转速异常、磁链异常等。

10.12.8.电压浪涌保护（VSP）

电机运转时，能量从电源转换为机械能，部分能量储存在相电感中，还有一部分能量以机械能方式储存。当电机减速或制动时，电机工作在发电机状态，这两部分能量重新释放出来，并可通过 MOSFET 桥反送到电源端，从而可能导致电源端电压上升，损坏芯片及外围电路。

XMC 支持电压浪涌保护功能，可通过主动控制 MOSFET 桥上下管的导通状态释放这两部分能量。

10.12.9.缺相保护（OPP）

缺相保护逻辑持续检测 U、V、W 相线是否开路，当开路时及时关断驱动电流，置位故障指示信号

10.13. 状态反馈输出（FG）

FG 接口输出电机的实时转速信息，也可根据配置提供驱动状态（开环、闭环、故障）信息。FG 为开漏输出，可通过电阻上拉到任意电源。推荐上拉电阻阻值为 100KΩ。为防止 FG 引脚短路对芯片造成损害，片内限制最大灌电流能力为 20mA。

在开环状态下，FG 输出状态根据配置可以为高阻态、或输出与开环拉动的转速相同频率的方波信号；进入闭环工作状态后，FG 输出 50%占空比的方波信号，频率与电机转速相同。FG 输出可根据电机的极对数配置分频比，最高可支持 8 对极；FG 还支持输出倍频功能，最高可输出 8 倍频；分频和倍频还可组合使用，输出分数频率。在发生堵转等故障时，FG 输出高阻态，直至故障消除。当电机转速低于最低转速时，FG 输出为高阻态。

10.14. 故障指示信号输出（FAULTB）

故障指示信号 FAULTB 为开漏输出，可通过电阻上拉到任意电源。推荐上拉电阻阻值为 100KΩ。为防止 FAULTB 引脚短路对芯片造成损害，片内限制最大灌电流能力为 20mA。

正常情况下，FAULTB 输出为高阻态，当发生堵转等故障时，输出低电平。

10.15. 调试、故障诊断与可视化

芯片启动时从 EFUSE 中读取预置的参数至内部寄存器中。同时，芯片提供了 I^2C 接口，可读写片内寄存器，支持：

- 覆盖 EFUSE 中的设置
- 查询芯片的内部工作状态

- 根据寄存器内容诊断故障

通过配套的 XMC Optimizer 软件，可以直观地查看芯片的工作状态，对芯片进行控制和读写 EFUSE。

11. 接口说明

11.1. 内置线性稳压电源（LDO）

芯片内集成了高压 LDO，从输入电源 VM 转换到 5V 输出，供芯片内部及外部电路使用。片外需使用 4.7μF 陶瓷电容去耦，并尽量靠近芯片引脚放置。外部电路可使用该电源，但需要注意，外部使用的最大电流不能超过 10mA。

芯片内部的数字电路内核采用 1.8V 供电，该电源由完全内置的 LDO 生成，无需外部器件。

11.2. I^2C 通信

I^2C 通信时序详见用户手册。

11.3. 调速

11.3.1.模拟调速

模拟调速模式下，电机转速随 SPD 引脚电压线性变化，调速范围可设置。

11.3.2.PWM 数字调速

PWM 数字调速模式下，电机转速随 SPD 引脚输入占空比线性变化，调速范围可设置。通过 PWM 频率的变化，还可以控制电机的转动方向。

11.3.3.PFM 调速

PFM 调速模式下，电机转速随 SPD 引脚输入的时钟频率线性变化，调速范围可设置。

通过 PFM 信号的占空比，还可以控制电机的转动方向。

11.3.4.I^2C 调速

可通过 I^2C 接口配置目标转速

11.4. 电机转动方向控制（DIR）

电机运转过程中，可通过 DIR 接口切换转动方向。DIR 接口为低电平时，换相顺序为 U->V->W；为高电平时，换相方向为 U->W->V。改变转动方向时，芯片自动控制电机减速，然后重新加速至设定的转速。

11.5. 待机与唤醒

芯片采用智能待机技术，当满足特定条件时，芯片停止驱动电机并自动进入低功耗待机状态。待机状态下，寄存器内容保持不变，可通过 SPD/I^2C 接口快速唤醒，恢复正常工作状态。

11.5.1.进入待机状态

当电机处于静止状态，且 SPD 引脚电压低于阈值并保持超过时间，芯片自动进入待机状态。待机状态下，内置 LDO 保持输出，I²C 功能保持开启，寄存器值保持不变，电机驱动输出被关断（高阻态），其他功能均自动停止。

11.5.2.唤醒

待机状态下，可通过 SPD/I²C 引脚唤醒。

11.6. 驱动电流设置

可设置电机驱动电流和门驱动电流的上升率，改善 EMI 特性。

11.7. EFUSE 编程

可通过 I²C 接口对 EFUSE 进行编程。

11.8. 故障诊断

可通过 I²C 接口读写片内寄存器，查看芯片工作状态，诊断故障。

12. 寄存器表

寄存器定义详见用户手册。

13. 典型应用

XM2616 采用高度集成化的设计，外围器件很少，所有相关电路可放置在一个小型的双层板上，从而大幅降低整体方案成本。该芯片特别适用于 12V/24V 低压直流电机应用，例如真空吸尘器、吊扇、低压水泵等。本章给出了一个低成本、小型化的驱动板参考设计，该设计适用于 12V/24V 供电，最大电流 10A 的直流无刷电机，其中 PCB 为双层板。

13.1. 参考设计原理图

TBD

图 13-1 XM2616Q 参考设计原理图

13.2. 参考设计 PCB 图

TBD

图 13-2 XM2616Q 参考设计 PCB 图

14. 电源供电建议

XM2616 设计为可在 VM 电源电压 4.5V 至 32V 范围内可靠运行，需要在 VM 直流母线上放置大的储能电容，该电容应能满足系统设计的纹波要求。

在 VDD5 和 GND 之间放置 4.7μF 陶瓷电容，并尽量靠近 VDD5 和 GND 引脚。必要时该电容可减小至 2.2μF。

推荐 PGND 和 GND 在芯片底部的散热焊盘处单点连接。

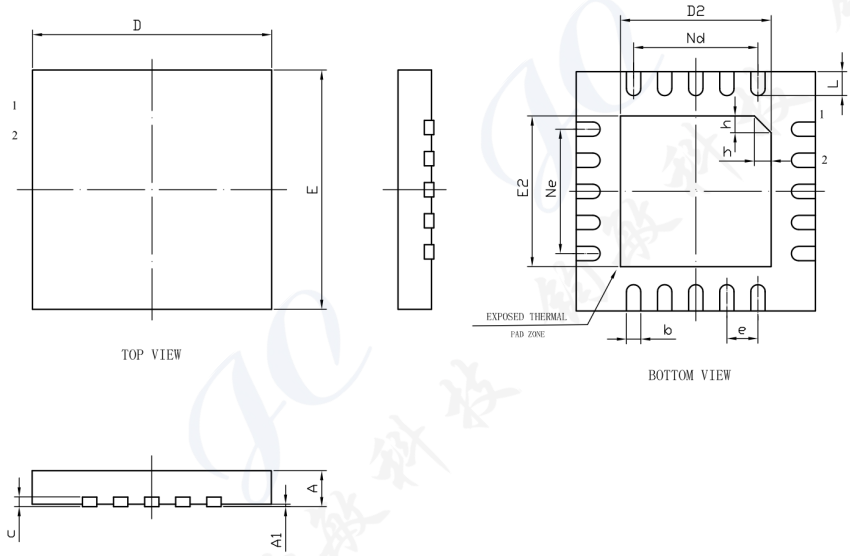
15. PCB 布局布线建议

布局布线时，请遵循以下指引：

- VM、PGND、U、V、W 等需要流过大电流的引脚，请采用粗导线引出和连接
- 在 VM 和 PGND 之间放置一个大的储能电容
- 在 VDD5 和 GND 之间放置 4.7μF 陶瓷电容，并尽量靠近 VDD5 和 GND 引脚
- PGND 和 GND 在芯片底部的散热焊盘处单点连接
- 将散热焊盘连接到地平面，并尽量增大地平面面积
- 对多层板设计，在 TOP 和 BOTTOM 层布置地平面，并采用多个热过孔连接
- 为进一步降低热阻，芯片散热焊盘底部 PCB 板的反面位置可铺设地平面，且阻焊层开窗

16. 封装和包装信息

16.1. QFN20L 封装尺寸图



SYMBOL	MILLIMETER		
	MIN	NOM	MAX
A	0.70	0.75	0.80
A1	—	0.02	0.05
b	0.25	0.30	0.35
c	0.18	0.20	0.25
D	4.90	5.00	5.10
D2	3.05	3.15	3.25
e	0.65BSC		
Ne	2.60BSC		
Nd	2.60BSC		
E	4.90	5.00	5.10
E2	3.05	3.15	3.25
L	0.45	0.55	0.65
h	0.30	0.35	0.40
L/F载体尺寸 (MIL)	138X138		

图 16-1 QFN20L 封装尺寸

NOTE:

1. 以上封装外形未严格按比例绘制；
2. 所有标注数据的单位均为毫米；
3. 底部散热焊盘尺寸不包括阻焊窗口，阻焊窗口每边应留出至少 0.15mm；
4. 底部散热焊盘应开阻焊。
4. 底部散热焊盘尺寸不包括阻焊窗口，阻焊窗口每边应留出至少 0.15mm。

16.2. 包装

TBD

17. 重要声明和免责声明

芯格诺微电子所提供的产品规格书、参考设计、应用建议等技术资料，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的明示或暗示的担保。 给出的典型应用仅供设计参考，非芯格诺微电子产品的一部分，芯格诺微电子不保证参考设计的完整性和精确性。设计人员应自行根据应用要求选择合适的器件，并对设计方案进行充分的验证和测试。

所述资源供专业开发人员应用芯格诺微电子产品进行设计使用，如有变更，恕不另行通知。

联系地址：北京市海淀区知春路 1 号学院国际大厦 1707
邮政编码：100191
电话：010-8208 6826
邮箱：info@x-signal.com
网址：www.x-signal.com

Copyright © 2021 北京芯格诺微电子有限公司