

文章编号:1007-2780(2016)02-0215-07

本质安全型防爆摄像仪的研发和应用

童建斌*

(四川省达州市中石化中原油田普光分公司生产服务中心,四川 达州 635000)

摘要:高清 4G 公网防爆摄像仪系统是为石油化工等高危防爆环境研制的便携移动防爆摄像系统。如何在高清 4G 模块高发射功率、多储能元件的前提下实现设备的总体防爆指标以满足国家标准是本文解决的重点问题。基于防爆理论,通过提高设备防爆电容设计门限和降低电路容值设计的电容管理手段,对整体设备的储能元件进行了极限防爆限制,优化设计了 4G-LTE 无线摄像模块的最低储能电容解决方案;利用双半波振子天线列阵技术实现天线设备的发射功率限制硬件保护,采用软件保护手段实现双重防爆保护,从设计原理上保证了研发的高清 4G 摄像仪满足《GB 3836.1-2000》防爆要求。在保证防爆性能和设备功能的前提下,设备电容容量降低了 50%,设备远场电场强度 9%。

关键词:无线摄像仪;基本电容电路;储能电容设计;双半波振子天线列阵

中图分类号: TM532.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20163102.0215

Research and application of intrinsically-safe explosion-proof environment camera

TONG Jian-bin*

(Sichuan Dazhou Puguang Sinopec Zhongyuan Oilfield Company
Production Service Center, Dazhou 635000, China)

Abstract: 4G-LTE high definition explosion-proof camera system is designed for petroleum, chemical and other high-risk environment. The most difficult point of device design is balancing the equipment features and explosion-proof performance. Based on explosion-proof theory, the design difficulties are equipment circuit capacitance and 4G-LTE transmit power. By increasing the capacitance limitation and reducing circuit, we can solve the high energy storage of explosion-proof circuit. 4G-LTE high definition explosion-proof camera system uses two half-wave dipole antenna array to maximize the transmit performance of device. Software protection achieves double explosion protection. After redesign, the two half-wave dipole antenna array can also enhance 9% effective isotropic radiated power than common antenna and the device can reduce 50% capacitance.

Key words: wireless camera; basic capacitor circuits; storage capacitor design; double half wave dipole antenna array

1 引言

防爆摄像电器设备在煤炭、石油、化工等具有潜在危险爆炸性的环境中应用频繁,但基于 4G 无线网络的便携轻量型专业摄像设备还没有成熟产品。主要原因是由于该类型设备的 4G 射频系统和编解码模块的储能元件过多,防爆性能太差;另一方面是由于射频无限功率限制方式的问题一直无法解决。

本文中通过基本电容电路理论、基于防爆理论的储能器件设计公式和电容隔离方法对整体设备的储能元件进行了极限的防爆限制,提高了整体的防爆性能。另外,系统还利用双半波振子天线阵列技术在低发射功率的基础上提升了设备发射接受范围,并且运用软件为双重保护手段限制了发射功率,使设备的防爆能力有了显著的提升。

2 防爆摄像系统概述

防爆型摄像设备依据其防爆措施的不同,主要分为:隔爆型、本质安全型和胶封型等 3 类。一般情况下,隔爆设备体积巨大^[1],笨重难以移动,图 1 为目前市场上常用的一款隔爆型摄像仪,其重量大于 6 kg 且难以移动;图 2 为市场上的一款胶封型摄像设备,胶封型产品是一次性产品,损坏后无法维修,会无形中提高生产运营成本;图 3 为本次研发生产成功的本质安全型防爆摄像仪,本质安全型设备是指设备电路本身是依照防爆电气设计要求设计的,不需要借助其他手段就可以拥有防爆能力的电气设备。该种设备与隔爆和胶封型防爆产品相比具有体积小、重量轻、方便维护等性能特点。目前,从原理上满足国家防爆标准的本质安全型摄像设备均存在功能简单、运行功率低等特点,从而可在具有危险易爆气体环境中的直接使用。

在煤炭、石油、化工等具有潜在危险爆炸性环境的行业中迫切需要拥有高清、全网通 4G 公网数据传输、高敏感度信号收发、全双工语音对讲等众多功能的防爆摄像电器设备。目前,基于 4G 无线网络的便携轻量型专业摄像设备还没有成熟产品。主要原因是由于该类型设备的 4G 射频系统和编解码模块的储能元件过多,防爆性能太差;



图 1 腾达 BJK-S 隔爆型摄像仪
Fig. 1 Tenda BJK-S Flameproof Camera



图 2 宏视胶封型摄像仪
Fig. 2 Hongshi resin encapsulation camera

另一方面是由于射频无限功率限制方式的问题一直无法解决。

本文通过提高设备防爆电容容量和降低电路容值设计的电容管理手段和通过软硬件结合限制发射功率的方法,解决了具有高清 4G 功能摄像的设备功能和防爆设计之间无法统一的技术困境,研制出一款拥有硬件直调分辨率、激光指针、多编码格式、全网通 4G 公网数据传输、高敏感度信号收发、全双工语音对讲等众多功能的、拥有 Exib IIC T4 Gb 防爆等级的专用于石化类高性能本质安全型移动摄像产品,该产品相较常见的隔爆型防爆摄像系统功耗更低,重量更轻,体积更小等优势,拥有更多的应用场景^[2]。

3 本质安全型 4G 无线摄像系统的电容优化设计

4G 无线摄像系统在功能设计的时候,由于电路工作的基本要求,需要大量的储能元件进行能量支持。但是,在危险区域应用的防爆本质安全型电路对电路电容要求是非常苛刻的,因此电路的电容设计成为了保证设备防爆性能的基础。

在本文中,将会以描述 4G-LTE 无线模块的

电容设计为例,展示如何通过基本电容电路理论和限制无线模块的最低储能电容设计的手段来保障设备在能够利用足够电容容量的同时又可以满足防爆需求。

3.1 提高 4G-LTE 无线模块电容数量门限值的理论基础

4G-LTE 模块设计的过程中,通过尽量降低工作时所需要的峰值电压,可使模块的电容容量门限值得以提高,具体原理如下。



图 3 本质安全型 4G 无线摄像仪产品图

Fig. 3 Intrinsically safe 4G wireless camera product image

假设如图 3 所示的基本电容电路中电容 C 是线性的^[3],设电流经过该电容的电流为 $I(t)$,两端电压为 $U(t)$,则得到下式作为结果:

$$I(t)=-C \frac{dU(t)}{dt} . \tag{1}$$

此时电容消耗的功耗为:

$$P(t)=U(t)I(t) . \tag{2}$$

从而,在 0 到 t_0 的时刻内电容 C 贮存的能量 $W_c(t)$ 为:

$$W_c(t)=\int_0^{t_0} U(t)I(t)dt , \tag{3}$$

将式(1)结果带入上式,可得:

$$W_c(t)=\frac{1}{2} CU^2(t_0) . \tag{4}$$

稳态时,电容贮满能量,此时设定 $U(t_0)=U$,则电容贮存的总能量 W_c 为:

$$W_c=\frac{1}{2} CU^2 . \tag{5}$$

由式(1)和式(5)可知:施加在电容器两端的电压不可能发生跃变,只能是连续变化的。这个结论是分析电容电路的基础。电容电压不能跃变也是这些元件贮能不能跃变的反映。由式(5)可

知:对于确定的电容元件,其贮存的能量与其端电压高低有关。电容器的放能过程是其贮能过程的逆过程。通过式(5)不难得出结论:在电容能量不变的情况下,电容容量和电压值成反比^[4]。防爆技术准则是对设备整体能量的限制,也就是说,在能量一定的条件下,降低设备的电压就可以提升电容容量门限值,使设备在防爆评估时能够获得更多的储能容量。

因此,设备设计的过程中,通过尽量降低工作时所需要的峰值电压,就可以使本质安全型 4G 无线摄像仪设备的防爆门限值得以提高。

3.2 4G-LTE 无线模块的最低储能电容优化设计

4G-LTE 无线模块的供电采用单电源供电方式,VBAT 范围在 3.3~3.6 V 之间,为了能够满足防爆需求,降低设备功耗和温升,设备推荐使用 3.3 V 电压进行供电。但是设备在 HSPA/UTMS/GSM 网络下工作,数据传输时,瞬间大功率发射会形成高达 2 A 的电流峰值,从而导致 VBAT 大的纹波出现,瞬间压降造成 VBAT 供电电压过低,模块将会出现自动关机的情况。为了解决因防爆措施导致的这一问题,需要给该模块设计储能电路^[5]。但是由于防爆应用对电容容量的限制,设计将利用 4G-LTE 无线模块的最低储能电容设计方式作为解决方案,来保障设备功能和防爆性能的平衡。

在这部分设计之中,第一步,将会按照设备功能需求,在不考虑防爆要求的情况下,直接应用推荐电容容值;第二部,将会依照设备功率需求,在考虑防爆要求的基础上,计算出最低的旁路储能电容容值。然后利用 2 个不同电容容量搭建测试电路,并且测试模块工作情况,取能使设备正常运转的最小值来作为本质安全电路中 4G-LTE 无线模块的最低储能电容。

3.2.1 初步设计

在第一步设计过程中,先不考虑防爆性能进行储能电容设计。为保证模块能在低功耗情况下正常工作,要求电源供电必须具备足够的供电能力。在确保 VBAT 电源供电能力足够(3.3 V, 1 A 负载)的前提下,电路接法如图 4 所示,在 VBAT 输入靠近模块侧接一个(2200 UF/10 V)电解电容(CA),再并上一个 0.1 UF~1 UF 的陶瓷电容(CB)。因此依照一般设计思路,4G-LTE 无线模块的储能电容最少需要 2200 UF 的电容

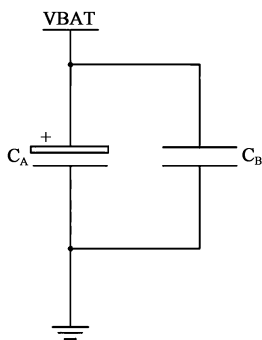


图 4 4G-LTE VBAT 模块基本输入电路

Fig. 4 4G-LTE VBAT module basic input circuit

容量。

在得到首次设计的电容容值后,按照防爆标准的曲线数值进行相关计算。模块供电电压为 3.3 V,依照 1.5 倍安全标准来进行计算,可以得出 4.95 V 为设备的 1.5 倍工作电压。然后,按照该电压在《GB3836.4-2010 本质安全型“i”保护的 设备》中附录部分查询电压和设备类别相对应的 允许电容(又称为:电压电容曲线表格)。在表 1 中可见最大允许电容值为 1000UF。

因此,依据首次电容分析的储能电容 2 200 UF 容量大大超出了防爆标准的电压电容曲线表格中的相关数值,与此同时,该模块的电容设计过大也会导致整个本质安全型摄像系统的电容容量过大。因此,防爆设计需要在保证设备每一部分功能工作稳定的同时,还需要最小化每一个功能部分的电容容量。

表 1 电压电容曲线

Tab. 1 Voltage capacitor curve

电压/V	IIC 类设备允许 电容/UF
	X1(安全系数)
5.6	1 000
5.7	860
5.8	750
5.9	670
6.0	600
6.1	535
6.2	475

3.2.2 优化设计

第二步设计过程中,将通过理论分析计算及优化电路系统,获得可以等效使用的最低电容容值,然后长时间测试并且得到经验数据来替换该储能电容(CA)。为了尽量保障 4G-LTE 模块供电稳定还要满足电路防爆要求,需要确定电路电压波纹周期和电压补偿所需的电容最小容量。

设电路正常工作时的输入功率为 P ,储能电容的容量为 CA ,其两端的正常工作电压为 U_1 ,则电容储存的能量为:

$$W_1 = CA \frac{U_1^2}{2}, \tag{6}$$

当输入电源掉电后,经过时间 t ,电容两端的电压为 U_2 ,此时电容剩余的能量为:

$$W_2 = CA \frac{U_2^2}{2}, \tag{7}$$

在这一过程中储能电容释放的能量,用式(6)减去式(7),可得:

$$W = W_1 - W_2 = CA \frac{U_1^2 - U_2^2}{2}, \tag{8}$$

它应该等于电路维持正常工作所需的能量:

$$W = Pt \text{ (即输入功率乘以时间)}, \tag{9}$$

所以有:

$$CA = \frac{2Pt}{U_1^2 - U_2^2}, \tag{10}$$

由此就可以得到电路维持时间 t 所需的最小电容量为:

$$CA = \frac{2Pt}{U_1^2 - U_2^2}. \tag{11}$$

根据以上一系列公式推导,采用如图 5 所示的优化设计电路,最后可以推导得出储能电容的最小容量可以为 204.33 μ F。因此,此处电容

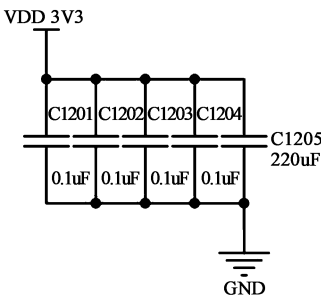


图 5 4G-LTE VBAT 模块优化电源输入电路

Fig. 5 4G-LTE VBAT module power input optimization circuit

的电容值将采用 220 μF , 电容类型将采用钽电容。

经过第二步优化后的设计结果为 204.33 μF , 与第一步中所得到的 2 200 μF 相对比, 204.33 μF 比 2 200 μF 要小很多。经过实际电路功能测试, 使用 220 μF 的储能电容能够使系统稳定运行。

4 本质安全型 4G 防爆摄像仪的无线功率限制

无线摄像仪使用的是 4G-LTE 技术, 其接收发射频率范围在 1 880~2 635 MHz 之间。在发射微波信号遇到含有极性分子的物质时^[6], 极性分子碰撞, 而导致突然发热、升温, 有可能成为点火源, 因此本质安全型防爆摄像仪的功率限制是设备的研发关键点之一。

与此同时, 在《GB 3836. 1-2000 爆炸性气体环境用电气设备 第 1 部分: 通用要求》中的第 6. 6. 1 条中提到, 射频为 (9 kHz~60 GHz) 的连续发射和脉冲时间超过热起燃时间的脉冲发射的阈功率, 不应超过表 2 的值。

因此, 移动环境下无线发射功率是移动防爆无线摄像终端的无线防爆的关键部分。射频信号由振子类引出并增益, 所以移动无线设备的天线防爆更是需要关注的技术难题。

表 2 射频阈功率
Tab. 2 RF threshold power

设备类别	阈功率/W	热起燃时间 (平均时间)/ μs
I 类	6	200
IIA 类	6	100
IIB 类	3. 5	80
IIC 类	2	20
III 类	6	200

注: 由于有较大的安全系数, 这些值适用于 Ma、Mb、Ga、Gb、Gc、Da、Db、Dc 级别的设备。

4. 1 双半波振子天线列阵限制发射功率

在表 2 中, 可以查到 IIC 等级防爆设备的无线发射阈功率为 2 W。也就是说明本质安全型 4G 防爆摄像仪的射频模块和天线增益相加后的

总发射功率不可以大于 2 W(33 dB)。

为了使本质安全型 4G 防爆摄像仪在使用过程中拥有更强的信号收发灵敏度, 设备将采用双半波振子天线列阵。双半波振子天线列阵可以在保证设备的发射功率不变的前提下, 增加远场电场强度, 从而提升无线设备发射接收范围和强度^[7]。

考虑到设备射频输出功率主要影响的是空间周围的电场强度, 那么该远场电场强度^[7]用 EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) 来表示, 其计算关系为 EIRP=设备输出功率+天线增益。设定两个半波振子天线与设备输出功率之和均为 0. 5 W。因此两个天线的远场电场强度 EIRP1 与 EIRP2 应是相等的(以下简称为 E_1 与 E_2)。

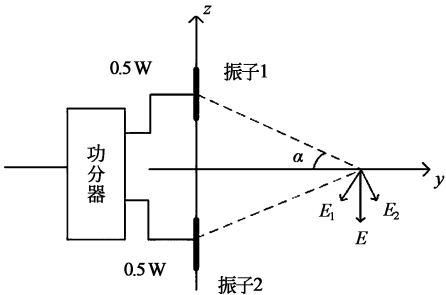


图 6 两个半波振子组成的垂直阵列
Fig. 6 Two half-wave dipole vertical array

如图 6 中所示, 在观察电的场强为两个振子产生场强的矢量叠加, 假设观察点与-y 轴的夹角为 α , 单一振子在此点的场强为 E_1 , 则合成的场强为:

$$E(y) = E_1 + E_2 = E_1 \cos \alpha .$$

当远场场景 ($\alpha < 5^\circ$, 观察点离天线距离大于 6 个天线口径尺寸), 此时 $\cos \alpha \approx 1$, 则电场迁都为两个振子的同相叠加, 即 $E = 2E_1$; 相比单一振子辐射, 单一振子不需要功分器, 因此激励电压是阵列馈电时的倍, 也即单振子辐射的场强为。

通过计算不难得出, 通过功分器后的双半波振子天线阵列, 在其发射功率与单振子天线的发射功率相同的情况下, 在远场实现了比单振子天线多 3 dB, 高出约 8% 的能量增益。对于天线采用阵列形式实现的辐射单元, 按照单振子的最大输出功率来界定阈值, 可以使列阵天线防爆性能明显优于单振子天线^[9], 在保证功能的前提下可降低约 9% 的天线发射功率。

4.2 软件方式限制发射功率

在《GB 3836.1-2000 爆炸性气体环境用电气设备 第 1 部分:通用要求》中,不允许仅通过软件来限定功率。在本质安全型 4G 防爆摄像系统的硬件方面已经做出了符合国家防爆标准硬件设计。但是,在设备应用的过程中,由于无线发射模块本身的生产误差值的原因,可能会出现设备无线发射功率超出防爆标准限定值的问题。虽然这样的问题属于极小概率事件,但是危险区防爆工作是不可以出现丝毫松懈的。因此,设备要用尽一切手段来提高防爆性能。软件防爆是作为硬件出现问题时候的保障性措施,更是保证设备在保有防爆功能的同时,可以将无线性能提高到最佳状态的调节手段^[10],具体软件功率优化流程图如图 7 所示。

当设备启动时,设备通信模块会开始向外发

射电磁信号,该信号将会通过传感器进行数据化读取,并由命令行进行判断过程。

当信号传感器读取到的信号幅值与系统的最小值进行对比,若小于最小值的时候,系统将会与信号的防爆阈值进行对比,若大于防爆阈值系统将会降低设备输出功率;若小于防爆阈值,系统将会将数值重新返回传感器。该过程将反复进行发射功率对比,以保证设备的防爆性能。若通过信号传感器的信号数值大于系统最小值,设备将会判断设备现在是否处于最大发射功率状态,若不是,系统将提高发射功率,并返回传感器与防爆阈值进行对比;若已经是最大发射功率状态,系统将再次将信号幅值与系统防爆阈值进行对比。

整个对比交接过程将保证系统的发射功率在不超过防爆功率阈值的状态下,能够保有最强大的无线传输性能,为摄像仪设备提供除硬件防爆保障以外的软件保护手段。

5 结 论

利用文中的电容管理和功率管理方式,解决了常规高清 4G 无线摄像设备中由于功能需求导致系统电容容量过大、发射功率过高带来的防爆设计难题,研制了一款通过国家防爆认证的本质安全型高清 4G 无线摄像系统。在设计优化的整体过程中,成功降低了设备电容容量近 50%,且提高了设备 9% 的远场电场能量强度,使设备的防爆性能和功能应用达到了一个平衡状态,可广泛应用于煤炭、石油、化工等具有潜在危险爆炸性环境。现阶段该防爆摄像仪已经成功生产并投入了使用,成为了石油石化领域客户视频监控系统中的重要组成部分。

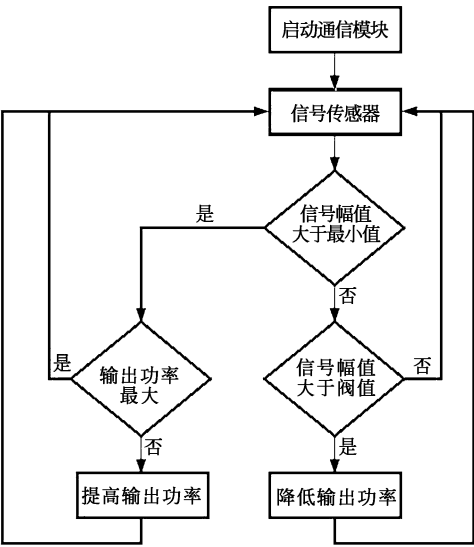


图 7 软件功率优化示意框图

Fig. 7 block diagram of power optimization software

参 考 文 献:

[1] 刘凯,魏坛霖,仓基素,等.安全型压电式蜂鸣器:中国,CN203415225U[P].2014-01-29.
LIU K, WEI T L, CANG J S, et al. Safety type piezoelectric buzzer; CN, CN203415225U[P]. 2014-01-29. (in Chinese)

[2] 王华仁,张伯民.防爆摄像仪:中国,CN102868854A[P].2013-01-09.
WANG H R, ZHANG B M. Explosion proof camera; CN, CN102868854A[P]. 2013-01-09. (in Chinese)

[3] 杨平,谢颖,曹俊华.关于线性电容之静态电容和动态电容作用的研究[J].电气电子教学学报,2008,30(2):27-28,32.
YANG P, XIE Y, CAO J H. The study on the dynamic capacity and static capacity of linear capacity[J]. Journal of Electrical & Electronic Education, 2008, 30(2): 27-28, 32. (in Chinese)

- [4] 崔文静,邢红玉,叶文江,等. 液晶可调电容器的研究[J]. 液晶与显示,2013,28(2):173-178.
CUI W J, XING H Y, YE W J, *et al.* Liquid crystal tunable capacitor [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(2): 173-178. (in Chinese)
- [5] 李云飞,王永生,张晓龙,等. a-Si:H TFT OLED 驱动电路中存储电容对显示性能的影响[J]. 液晶与显示,2008,23(5):572-577.
LI Y F, WANG Y S, ZHANG X L, *et al.* Influence of storage capacitance on character of a-Si:H TFT OLED driving circuit [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2008, 23(5): 572-577. (in Chinese)
- [6] 彭桦,沈潜. 测定磷矿石中的硫应用微波炉加热恒重[J]. 磷肥与复肥,2004,19(2):64.
PENG H, SHEN Q. Application of microwave oven baking sample to constant weight for determination of sulfur in phosphate rock [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2004, 19(2): 64. (in Chinese)
- [7] SUN H J, CHANG L, WANG Q W, *et al.* A novel double half-wavelength dipole antenna and its application[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2008, 28(5): 426-428, 436.
- [8] 谢雪望. 射频识别阅读系统的技术研究[D]. 厦门:厦门大学,2008.
XIE X W. *Research on technology of radio frequency identification reader system*[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008. (in Chinese)
- [9] SMITH C. Explosion proof communications relay and communications system; US, US8086280 B2[P]. 2011-12-27.
- [10] BOHNE W C, OGLESBEE J W. Method and apparatus for intrinsically safe operation of a communication device; US, US20100323766 A1[P]. 2010-12-23.

作者简介:童建斌(1970—),男,高级工程师,从事通信网络、技术的规划和实施。E-mail:tjblytxabc@sina.com