

钽电容在便携式电池供电医疗设备使用的考量因素

1. 背景介绍

便携式电池供电医疗设备的种类繁多,而能够可靠地为这些设备供电的充电器控制电路也有多种选择。精心选择如钽电容这样的无源元件,可以提升便携式设备内充电器控制和储能系统的整体性能。便携式电池供电医疗设备的供电既可以使用一次性电池,也可以使用用电池充电器充电的后备可充电电池。

对医疗设备便携性和易用性的需求已经催生了充电控制电路的多项改良。充电器和电池系统已从由许多组件组成的电路,发展为基于集成微处理器的系统,不仅使用的无源元件少,而且布板空间也小。

鉴于医疗设备对高可靠性的要求,本文就商用钽电容和医用钽电容的设计取舍进行了举例,并介绍了有助于改善性能的一些新发展。本文还重点介绍了电容技术的一般性选择标准和可以在便携式医疗设备中使用的封装技术的进展情况。

在便携式医疗设备中最常用的大容量电容类型有多层陶瓷电容 (MLCC)、铝电解电容和固体钽电容。表 1 就每种电容技术的某些一般特性和可能的缺点进行了介绍。

表 1 便携式医疗设备使用的大容量电容的类型

类型	特性	缺点
MLCC	无极性、宽电压范围、超低阻抗、 低 ESR、无电压降额	容量随电压和温度变化; 难以做成大容量
铝	大容量、高额定电压、低成本、 低 ESR 和 ESL	必须按极性使用; 单位体积容量小; 长期寿命/可靠性不佳; 氧化膜性能逐渐下降
钽	寿命长、无损耗、体积小、容量大、良好的容量 温度特性、采用聚合物负极材料, ESR 低。	必须按极性使用; 有电压降额; 高压范围有限; 超低 DCL 需要筛选

2. 电池充电器基础知识

对使用可充电二次电池的便携式设备来说,可以使用多种类型的充电器: 降压充电器、离线充电器或者线性稳压器/充电器。最常用的类型是降压充电器。这种充电器可以把电池源电压转换为较低电压并予以稳压。转换器可通过外部交流/直流适配器或者内部适配器电路供电。线性稳压器结构紧凑,非常适用于低容量电池充电器应用。单芯片集成解决方案既可为便携式设备供电,同时还可单独对电池进行充电。

图 1 是小型直流/直流开关稳压器的例子。它可以为电池充电器提供同步脉冲开关。该脉冲电池充电系统散热小,采用 TSSOP 封装,高度仅 1.2 毫米。该器件特性丰富,其中包括可在关断时将电池 (V_{bat}) 和外部电源隔离开来。充电器中使用的电容有多种类型。输入去耦电容用于旁路噪声。一般将 $0.1\mu F$ MLCC 电容布置在 V_{cc} 引脚附近,用来滤除高频噪声

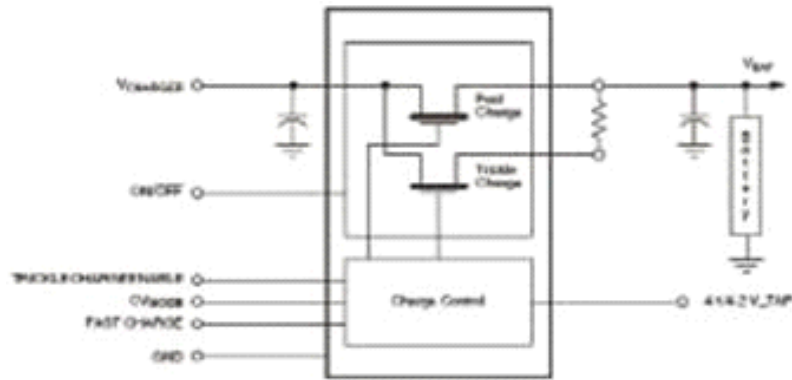


图 1 使用威世 Siliconix Si9731 实现的锂离子或镍镉/镍氢微处理器电池充电器

输出电容类型的选择应取决于合适的 ESR，以符合稳定负载线路范围，同时应进行下列项目的评估：

- (1). 能够降低功耗
- (2). 能够降低纹波电压
- (3). 能够满足系统负载线路的要求。

转换器负责提供负载电流和电压。随着负载的变化，电流的增加，电压会下降。稳压器可以保持恒定电压，但对负载电流的变化不能迅速做出响应，所以使用大容量电容来应对这样的变化，防止电压下降。如果转换器输出的电流要通过电感，它就无法瞬时响应，这时就需要在负载两端跨接一个并联电容组，来上拉电压。有时会混合使用 MLCC 和钽电容，以降低总体大容量电容的 ESR。由于 MLCC 的阻抗较低，会先充电，然后才是大容量钽电容。

3. 电源及输出电容的要求

便携式医疗设备使用的电池或为一次性电池，或为二次电池。一次性电池一般只使用一次。在电路工作过程中，活性化学物质被消耗殆尽。一旦放电完毕，电路将停止工作，必须更换新的电池。二次电池可以在放电完毕后充电，因为产生电能的化学反应可以逆转，从而实现了对电池系统充电。电源、电池类型的选择视应用而定。医疗设备常用的一次性电池类型有碱性电池和锂电池。

二次电池有锂离子 (Li-ion) 电池、镍镉电池 (NiCad)、镍氢(NiMH) 电池和铅酸电池。其中锂离子电池最常用，这是因为锂离子电池的体积能量密度和质量能量密度最大，放电率极低，这意味着闲置时有良好的荷电保持能力。

表 2 钽电容的功耗及容量范围

外壳尺寸	系列代码	最大功耗(瓦)	4V 电压下最大电容	6.3V 电压下最大电容	10V 电压下最大电容
0603	298D	.025w	47 μ F	33 μ F	15 μ F
0805	292D	.025w	33 μ F	33 μ F	15 μ F
1206	572D	.060w	220 μ F	100 μ F	47 μ F
A	293D	.075w	100 μ F	47 μ F	22 μ F
B	593D	.085w	150 μ F	100 μ F	47 μ F
D	TM8	.085w	100 μ F	68 μ F	47 μ F
E	TM8	.095	150 μ F	100 μ F	68 μ F
F	TM8	.075w	220 μ F	150 μ F	100 μ F
E	194D	.095w	22 μ F	15 μ F	15 μ F
R	595D	1.5w	1500 μ F	1000 μ F	680 μ F

便携式设备电路需要输出电容，而输出电容通常由一次性或者二次电池供电，可以在负载瞬变过程中减轻电压过冲或者下冲。要有效地滤除噪声，电容的等效串联电阻 (ESR) 是重点考虑的参数。输出电容用来处理电路的纹波电流和电压。需要对电容组的过热予以控制，这样在电路工作中，不会超过最大允许功耗。需要确定的是，通过输出电容的纹波电流不超出允许值。

表 2 概述了在+25°C 和 f=100kHz 条件下各种封装(按外壳尺寸划分)的最大允许额定功率。对温升在+25°C 以上的应用，建议应进一步进行降额。请参考电容生产厂家关于针对可适用的钽电封装的功率降额建议。

可使用公式 $P=I_{rms}^2 \times ESR$ 计算出最大允许交流纹波电流 (Irms)，其中 P 表示钽电容外壳尺寸对应的最大允许功率，ESR 则可根据电容的工作频率计算得出。

对钽电容，还需要遵守合适的电压降额规范，不可超出生产厂家建议的额定值。输出电容的工作电压应由电压电路状态决定。其可根据公式 $V_{rated}=V_{peak}+V_{dc}$ 计算得出，即纹波电压加上直流电压噪声。允许的纹波电压的计算方法为 $E=I \times Z$ ，其中 Z 表示电容器电阻。总体来说，较低的 ESR 可以帮助降低输出纹波噪声。

在电路中加入大容量电容还能在无负载条件下（此时电池尚未工作，使用线路电流供电）起到上电作用。当使用线路电流供电时，在选择大容量钽电容的额定值的时候，应遵从降额规范。

4. 为电池供电的低压降稳压器(LDO)选择输出电容

便携式设备中的线性电压稳压器或低压降稳压器(LDO)均采用电池供电。电容的大小非常重要,因为 LDO 一般采用小型 SOT 封装。在负载变化时,常用 LDO 来确保提供高精度电压。在 50mA 负载电流下,出现 90mV 压降非常典型。举例来说,如果低压降稳压器的生产厂家规定使用电容的目的是降低噪声,那么在选择电容类型的时候应考虑:

- 医疗设备的性能要求
- 规定的 ESR 安全工作范围
- 电容的尺寸及成本
- 额定电压

表 3 各类型电容的 ESR 要求

类型	成本	电容/体积效率	纹波电流能力	DCL	ESR
X5R MLCC	高	1pF-100μF 中	高	极低	极低
钽注塑成形 SMD	中	1-680 μF 高	中	低	中
铝电解	非常低	1-106 μF 低-中	低	高	高
钽聚合物负极	高	1-1000 μF 中-高	中	中	低
钽保形涂敷	高	10-3300μF 非常高	中	低	低

要满足如表 3 所示的 ESR 要求,在电容技术方面有多项选择。通过检查电路负载线的稳定性,可以为线路的正常工作选择合适的电容技术。

对低压降 (LDO) 稳压器进行负载线稳定性分析可以得出各种负载情况下的最低和最高 ESR 值。

举例来说,如果使用 10μF 的钽电容用于负载线瞬态稳定,10kHz 下测得的 ESR 的安全工作范围为最大 10Ω,最低 10mΩ (见图 2)。

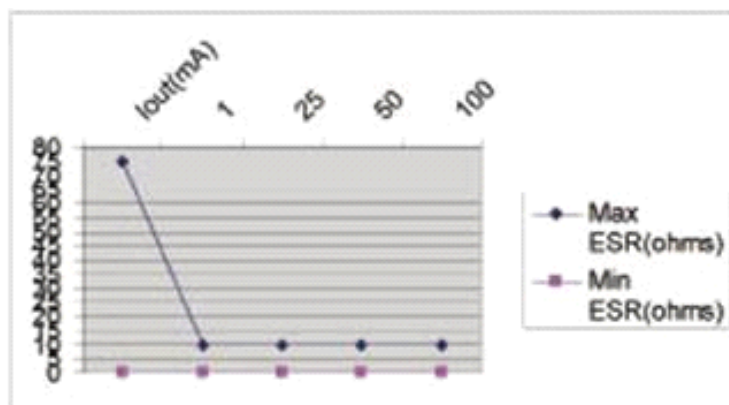


图 2 稳定运行的 LDO 稳压器对 ESR 的要求

在本例中，如果 LDO 要高效率地工作，则需要低 ESR 的最小尺寸的电容器。对该应用来说，符合要求的低 ESR 电容技术种类比较多。钽电容的 ESR 一般情况下都是生产厂家在 100kHz 条件下定义的。本应用需要 10kHz 下的 ESR，以便实现合适负载线稳定性。

选择合适的电容可以通过 10kHz 时的阻抗-频率关系来确定。如表 2 所示，有几种固态钽电容适用于该应用。MLCC、钽电容、铝电解电容的对应 ESR 请参见表 2。虽然与采用锰负极的标准固态钽电容相比，钽聚合物电容 ESR 更低，但由于近期采用二氧化锰(MnO₂) 负极对钽电容结构的改进，部分标准固态钽电容产品的 ESR 低于 50mΩ，完全可以用于 LDO 应用。

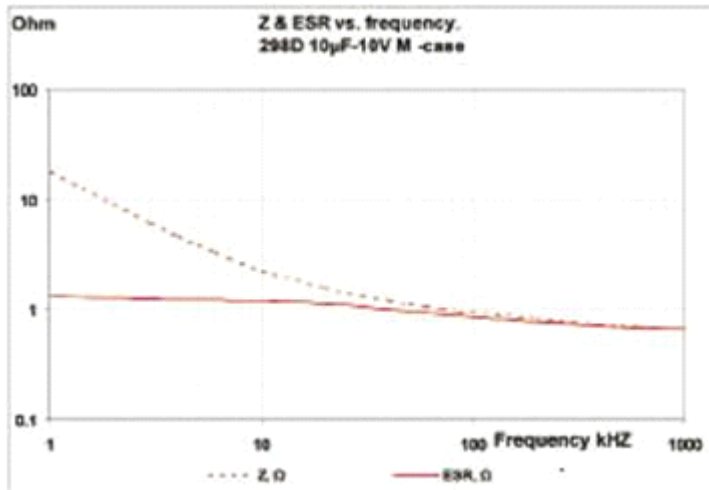


图 3 0603 钽电容的阻抗-频率曲线

图 4 显示了威世 TM8 -298D 系列 M 或 0603 外壳尺寸的电容器。0603 钽电容在 10kHz 时的 ESR 为 1.19 Ω，如图 3 的钽电容阻抗-频率曲线所示。该 ESR 正处于安全工作范围内，可实现出色的电路负载线稳定性。在本例中，如果采用具有 10 mΩ 以下超低 ESR 的 MLCC 电容，在电路中就需要给电容串联一个小电阻，以便为 ESR 提供安全工作范围。由于空间及组件数量有限，采用单个 0603 钽电容就可以同时满足 ESR 和空间要求。

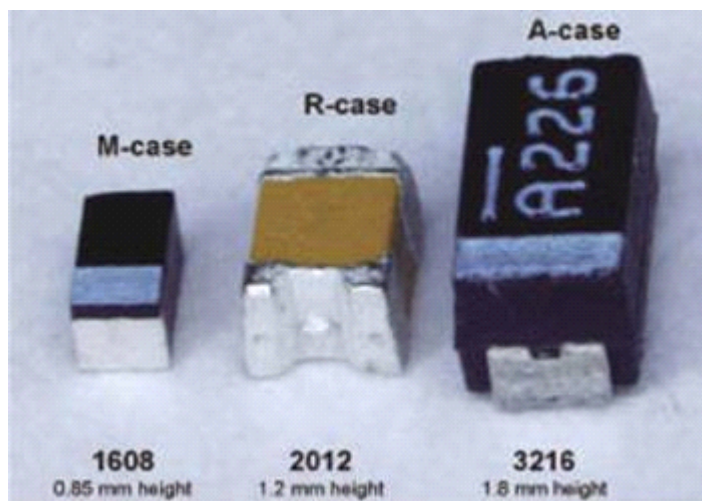


图 4 钽电容的尺寸缩减

在某些情况下，在电路中同时需要大容量电容来减少压降，以及超低 ESR 来处理纹波。在更高效率和更低功耗之间实现最佳平衡倾向于使用 ESR 较低的电容。

也可以使用其他具有较高 ESR 的电容技术。MLCC0 0805 是采用 400 层 0805 大小的 X5R 介电层的电容，规格为 $10\mu\text{F}\sim 10\text{V}$ 。另有采用 0603 X5R 介电层的 $10\mu\text{F}\sim 10\text{V}$ 电容。它们的 ESR 在 10kHz 条件下为 $20\text{m}\Omega$ 。与钽电容相比，MLCC 电容的 ESR 非常低。然而对于在本应用中用于 LDO 的电容来说，更低的 ESR 并不具有优势。

在本例应用的电容选择中，电路板空间和成本也是需要考虑的因素。

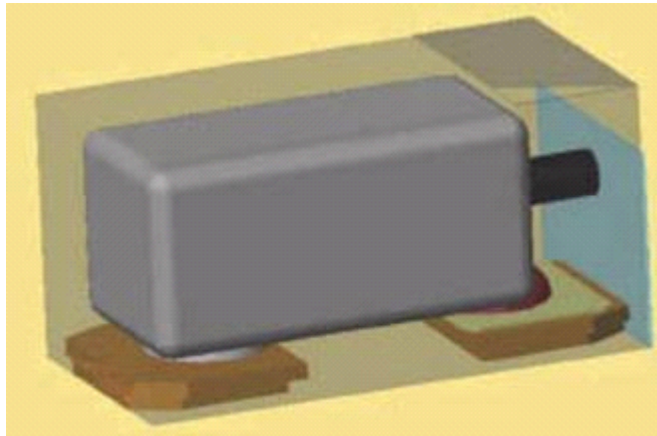


图 5 M.A.P. 钽电容封装

更先进的钽电容封装去掉了引线框，提高了体积封装效率和电气性能。图 6 对多阵列封装 (M.A.P.) 装配技术和传统封装技术进行了比较。在标准钽电容封装中取消引线框装配可以节省更多空间以容纳更多的钽芯。而在传统引线框封装中，钽电容封装的主体部分是 塑封材料或者封装物。如图 5 所示，连接到引线框的正极引线也会占用封装空间。总的来说，传统引线框架封装可用体积有效利用率仅 30%。

如图 6 所示，通过采用 M.A.P.工艺提升封装中的钽芯放置精度，从而缩减整体封装尺寸，实现更严格的尺寸误差控制。采用 M.A.P.工艺实现的封装还能够降低 净空和为垂直方向的高密度线路提供更好的“参照线”。举例来说，标准的注塑引线框架钽电容 D 型最大高度为 4.1mm，而采用 M.A.P.工艺生产的 D 型的高度为 1.65mm。

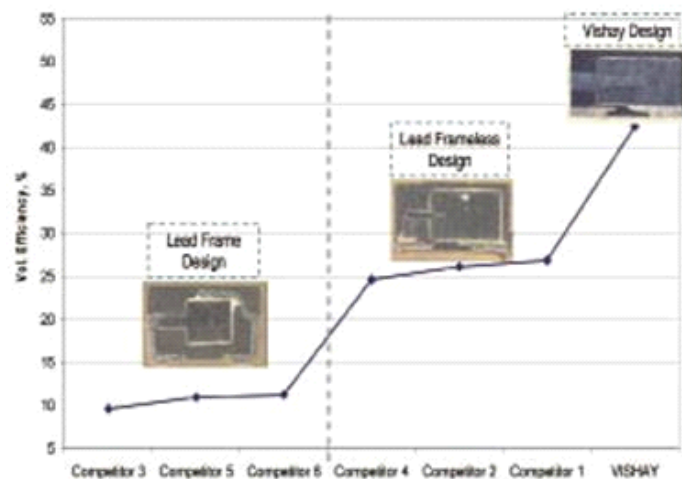


图 6 最新 MAP 钽电容封装具有最高体积效率

借助 M.A.P.工艺，钽电容的外壳尺寸一路从 A 下降到 0805(目前的技术)到 0603 或者 0402。钽粉的改良可以把 $10\mu\text{F}\sim 10\text{V}$ 容量的 0805 外壳尺寸减少到 0603 的外壳尺寸，如图 4 所示。

5. 电容直流漏电/绝缘电阻比较

在用电池作为电源的时候，电容直流漏电流 (DCL) 应被视为损耗，因为电容会影响电池的使用状况和寿命。除了电池，大容量电容也用作便携式设备中的补充电源，以应对电路负载的变动。

许多便携式设备应用要求低 DCL，以实现长时间、高效率的电池寿命。为应对负载变化，与电池并联一个大容量输出电容可以保持储电能力。在某些应用中，设备的运行时间是时断时续的短周期，在大多数时间里电池处于闲置状态。因此，该电容需要极低的 DCL 来满足便携式设备的应用需求，尽量延长电池的使用寿命。

直流漏电数值很小，所有电容都有这个问题。钽电容的漏电流为数微安，而 MLCC 的漏电流为数微微安。直流漏电流的测量方法是采用等效的电阻-电容串联电路，加上直流电压，在室温下测量电流。电容应串联一个 1000Ω 的电阻，以限制充电电流。

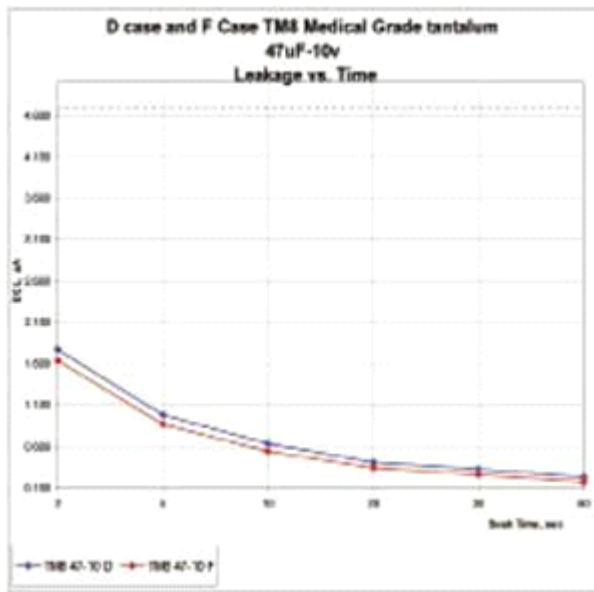


图 7 钽电容的 DCL 曲线

描述 DCL 的术语和测量单位随电容技术不同而不同。DCL 是用于钽电容的测量单位，而绝缘电阻 (IR) 则是用于 MLCC 的测量单位。根据电介质类型，MLCC 有一个 IR 限值。对采用 X5R 电介质的电容 MLCC，IR 限值为 $>10,000M\Omega$ 或 $(R \times C) \geq 500\Omega F$ ，以低者为准。MLCC 均采用符合军用产品规范 55681 的自动 IR 测试仪进行过 IR 最小值筛选。

DCL 可根据欧姆定律，用电容的 IR 和额定电压计算得出。举例来说，MLCC 的 IR 限值为 $100M\Omega-\mu F$ ，相当于钽电容标准 DCL 限值则为 0.01，即(电容 x 电压)= $0.01\mu A/\mu F V$ 。

钽电容均根据规定的 DCL 最小值进行过筛选，或者不超过规定的最大值。钽电容 DCL 的测试系根据军用产品规范 55365F。各种规格的钽电容之间的 DCL 差异比较明显，所以每种规格的钽电容的限值都是单独规定的。

在便携应用中，较长保压时间(soak time)下的 DCL 是电容重要的指标。对于有具体规格和钽芯设计的钽电容，某个生产批次中的 DCL 分布是可以量化的。如果应用要求极低 DCL，可以方便地从某个批次中自动筛选出某个额定电压下具有特定 DCL 符合便携式设备使用条件的钽电容。

图 8 是一种 47 μ F-10V 的钽电容，虽然其最大 DCL 为 4.7 μ A，根据特定的保压时间筛选后，可为应用提供超低 DCL。以图 8 的元件为例，该批量可以按照 10 秒钟 DCL 600nA 的标准筛选，从而把总体 DCL 从 4.7 μ A 降至 600nA 限值。

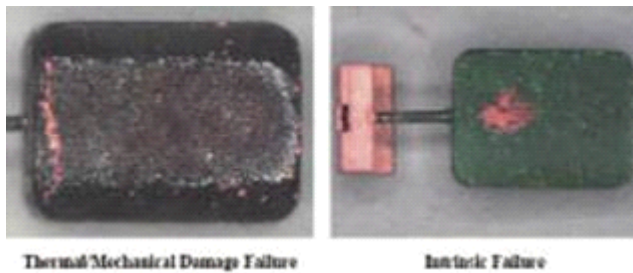


图 8

DCL 限值应根据电池供电设备的工作时间和非工作时间来决定。举例来说，如果某便携式设备的工作时间很短，只有几秒钟，而随后长期处于闲置状态，那么大容量电容应具备低 DCL，以保证较长的电池使用寿命。另外，应该对电路的总体静态电流和工作电流进行评估，以确定是否需要低 DCL 电容。

6. 电池运行时间和 DCL

对可充电二次电池来说，DCL 也很重要，这样可以延长充电间隔时间，不过总体工作电流中可以允许输出电容一定程度的漏电流存在。评估电路在各种使用状况下的电流要求，了解电容的 DCL，可以显著延长电池使用寿命。

通过测量 DCL 或者 IR 可以了解电容电介质的性能以及电介质层的质量。DCL 电流在加电的情况下，会流经或者跨越电容电介质隔离层。对钽电容这样采用氧化膜制造的电容来说，DCL 电流的主体构成部分是多种电流混合而成，有流经电介质的表面漏电流、因电介质材料极化而出现的电介质吸收 (DA) 电流、流经电介质材料的原生漏电流。类似的，采用基于钛酸钡的陶瓷电介质的 MLCC 的漏电流主要是流经电介质的漏电流，以及 DA 损耗和原生漏电流。

MLCC 具有良好的低 DCL 特性，但在某些情况下，钽电容能够以更小的体积提供同样低的 DCL。表 5 比较说明了根据 DCL 要求正确评估和选择合适的电容的计算方法。如表 5 所示，钽电容一般按照 DCL 最大值来确定规格。标准二氧化锰 (MnO₂) 构造的钽电容在生产厂家处是按照 (.01xCV) 进行分级的。某些电容生产厂家还会随 DCL 信息提供具体的保压时间，并且根据比同级别的 DCL 最大值低得多的具体 DCL 限值进行电容器的预筛选。

7. 选择适用的低 DCL 电容

举例来说，某种短工作占空比的便携式电池供电医疗设备需要线路每天启动电机几秒钟，然后关闭。这样的应用可以使用低 DCL 的大容量电容。

具体使用：

- DC/DC 转换器，用于电机驱动
- 输入电压：1.5V

- 固定输出电压：3.3V
- 输出电流：200mA@2V
- 大容量输出电容：47μF
- 保压时间 60 秒时的 DCL = 200nA

如果该 47μF 大容量电容是钽电容，则应进行适当的电压降额。降额应根据钽电容生产厂家的降额规范，具体示例见表 4。本示例选择了 10V 的额定电压。

表 4 钽电容的降额规范

工作电压	要求的电容额定电压
2.2 V	4 V
3.6 V	6.3 V
6 V	10 V

MLCC 的额定电压可以与工作电压相同或者略高，因此 6V 的额定电压已经足够。对 MLCC 而言，如果已知 IR（见表 5）和工作电压（4V），可以计算出 DCL。适用于低 DCL 应用的 MLCC 有 X5R 和 X7R 两种电介质。根据额定工作电压，可以根据欧姆定律，用元件的 IR 值计算出 DCL。

表 5 低 DCL 电容器选择

电容类型	47μF-10v 电容在+25℃时的最大 DCL 或者 IR 限值	60 秒保压时间、4V 额定工作电压下的最大 DCL	空间占用	说明
钽 MnO2	$DCL = .01(CV) = 4.7\mu A$	$DCL = .179 \mu A$	长=3.8mm；宽=2.55mm 高=1.27mm； 体积=12.30mm ³	外壳尺寸为 B 或 D 的钽电容
MLCC X7R	IR=45.5MΩ	$DCL = 2(4v/45.5M\Omega)$ $DCL = .176\mu A$	长=3.2mm；宽=1.6mm 高=1.78mm 体积=9.11mm ³	需要两个外壳尺寸为 1206 的 22μF 电容并联
MLCC X5R	IR=21.3MΩ	$DCL = 4v/21.3M\Omega$ $DCL = .187 \mu A$	长=3.2mm；宽=1.6mm 高=1.78mm 体积=9.11mm ³	外壳尺寸为 1206 的 47μF-6v 电容

为确定钽电容的 DCL 限值，对多个生产批次中的外壳尺寸为 D 和 F 的 MAP 47μF-10V 电容进行了批量测试，并对每个电容的在不同保压时间（60 秒）下的 DCL 和对应的保压时间都进行了记录，如图 7 所示。然后采用统计分析方法，确定每个批次的较低 DCL。另

外，还采用独特的成型工艺强化了负极，以提升和降低电容的 DCL 性能。对任何与标准批次相悖的 DCL 曲线都予以关注，最后找出 DCL 的较低限值。

图 4 所示的是各种封装选择和每种封装选择的体积要求。威世的 572D 系列钽电容既能满足 DCL 要求，又具有最高的体积效率，体积仅为 8.39 mm³。如果对空间的要求不是那么严苛的话，该应用也可使用 MLCC。X5R 电介质 MLCC 的 DCL 低至 187nA，与选择钽电容一样，只要一个大容量电容就能满足要求。MLCC X7R 电介质电容的电容温度系数比 X5R 更加优越，但要组成大容量电容需要两个 MLCC 电容并联。

在某些电路中，施压后电容器保持电容的能力是一个重要的考量因素。对 X5R 电介质 MLCC，在选择元件的额定电压时，应考虑其电容电压系数 (VCC)。如果包括纹波电压在内的直流应用电压接近 MLCC 的额定电压，VCC 效应会导致该元件损耗部分电容。电容损耗可能会影响电路工作。另外，在选择元件的时候，还需要考虑温度对 MLCC 的 IR 的影响以及电容温度系数 (TCC)。生产厂家会提供特定电介质随温度上升 IR 的劣化曲线。设计时应应对温度效应进行评估。

8. 改善钽电容的 DCL

钽电容的电介质层是一层五氧化二钽薄膜，覆盖在每颗钽芯表面上。其采用阳极化工艺，由厚 5nm~10nm 的 N 型氧化钽层和五氧化二钽纯半导体层复合而成。层厚与阳极化电压成比例，同时决定了元件的额定电压。对于 6V 电池应用的固钽电容而言，最终的钽电介质层厚度为 0.04 微米或者 40 纳米。

超大容量的 MLCC 则采用浇覆厚度为 2.0 微米的陶瓷电介质薄层的方式来制造，这样比钽电容的要厚得多。MLCC 采用层叠工艺，最终制造出多层电容。与钽电容一样，MLCC 的电介质层厚度决定了额定电压，电介质层数决定了容量。介电常数的差异导致了 IR 的巨大差别。

钽电容的 DCL 会因为正极表面的机械损坏或者氧化层表面的破裂而上升。如图 8 所示，正极的外表面属于易损部分，受到热、机械和电气作用的共同影响。表面 DCL 会受湿度的影响，并导致长时间工作的不稳定。

改进钽芯的生产工艺，更好地控制氧化物层的厚度，可以帮助消除如图 8 所示的表面 DCL 问题。在钽芯的外表面生成较厚的电介质薄膜，防止其受到机械损坏，从而大幅改善 DCL 性能，降低 DCL。除了改进钽电容的正极结构，与聚合物负极结构相比，钽电容的二氧化锰负极结构具有更为优异的 DCL 性能，因该材料有更好的导电性。

图 9 显示了采用这种新技术制造而具有出色 DCL 性能的新型 MAP 0603 封装。结合对钽芯的改进，最新 MAP 系列钽封装能够改善装配、封装和端接工艺，避免机械损坏，提升电容的体积效率。

9. 改进医用级钽电容的 DCL 可靠性

因为某些医疗设备需要高可靠性，特别是对关键任务型应用而言，电容生产厂家提供稳健且保守的设计来满足性能需求。通过精心的钽芯和钽粉设计，医用钽电容的性能会高出标准的商用钽电容以及采用传统技术生产的高可靠产品。

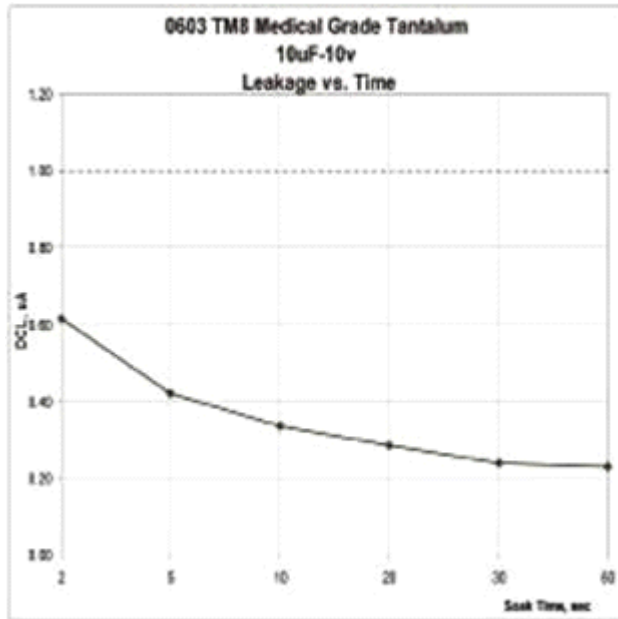


图 9

生产厂家会对每种设计适用的钽粉进行评估。随电容器 CV 的增长，失效率随之增长，因此应针对具体的设计选择合适粒径的钽粉。对医用级设计而言，其目的是在可用的外壳尺寸范围内提供更为可靠的 DCL 性能。对商用级设计而言，其目的是通过以最小的可用外壳尺寸提供更高的 -k CV 钽粉，从而尽量降低成本，最大化设计收益。因此商用钽电容的 DCL 总体上会高于医用钽电容。

下面举例说明目前的医用 TM8 系列 DCL 改进后与传统高可靠 194D 系列的对比情况。

图 10 对 F 外壳尺寸的 194D 系列设计与 TM8 系列设计进行了比较。194D 是一种用于众多高可靠应用中的老式设计。钽芯设计采用高-k CV 粉末，为 23kCV。而 TM8 是一种较新的医用级设计，使用 10Kvc 粉末，大幅度改善了 DCL 性能，而且采用的最新 MAP 装配工艺，不会增加板级空间占用。

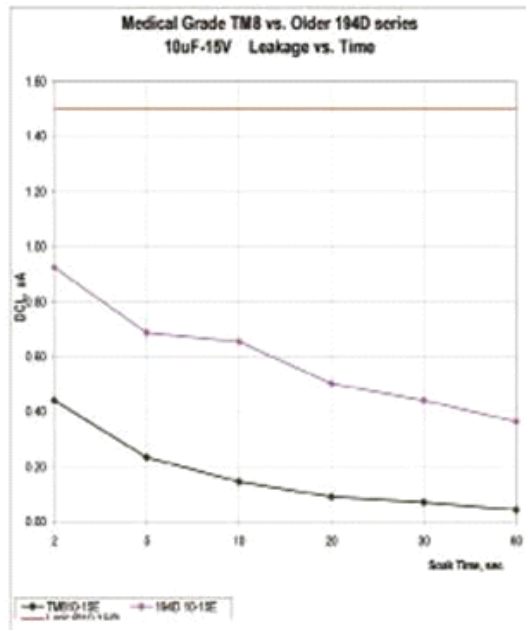


图 10

医疗设备中的高蓄能钽电容

小型便携式或者植入型心律转复除颤器 (ICD) 适用于与可能因室性快速型心律失常而突发心脏病死亡的患者。便携式除颤器与 ICD 具有类似功能，都是设计用于为心脏提供电疗，恢复正常心律。电疗线路采用高能充电电容，用于电击心脏组织。

某些设计采用高能铝电解电容，但需要后备电池以及一个用来实现重整期的程序，以在设备的生命周期内保持良好的充电效率。与铝电解电容相比，高能湿钽充电电容无需重整，且具有更高的能量密度。

电容的储能能力取决于电介质的相对电容率的值的大小和材料内的最大可允许电压。当电场出现后，任何电容电介质的导电行为都会导致电容损耗。而且损耗会随电场变化而加大，比如交流电。电介质的分子存在出现某种程度的极化，而在电场出现后，初始的时候这些分子的位移是相反的。部分能量消耗在分子的位移上，并在这个过程中消耗殆尽。当电场变化或者消失，这种损耗就体现为热量。

箔式铝电解电容浸没在导电电解质中。电介质由铝箔表面的氧化膜构成，其厚度一般为 50 到 100 纳米，其决定了单位电极面积的容量。钽电容也有氧化物膜层，但厚度要小得多，一般只有 5 到 10 纳米。选择储能设备使用的电容类型时，需要考虑工作寿命、板级空间和成本要求。因为心脏除颤需要非常高的能量，所以只有铝电解电容和湿钽电容适用。

结论

本文讨论了便携式医疗设备的各种应用及其使用的电路。针对这些便携式应用，有多种电容可供选择。选择适用于这类应用的电容时，优先考虑的电气参数是电容的 DCL 和 ESR。由于某些医疗应用对可靠性和电池使用寿命要求极高，一些电容无法适用。