

# 相控阵雷达发射单元供电建模及特性研究

孙 勇, 林 松

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

**摘要:**相控阵雷达阵面发射单元的供电性能对雷达性能有重要影响,研究供电性能指标和设计方法对指导大型相控阵雷达系统优化具有重要意义。基于发射单元的脉冲负载特性,建立了发射单元的等效电路和数学模型,分析了电压突变的产生机理。采用状态空间分段方法,研究了发射单元供电系统的四种工作状态。基于系统状态方程,推导了发射单元电压顶降的理论计算公式,得到电压顶降的主要影响因素。为满足电压顶降约束,推导了储能电容容量的精确和近似计算公式。通过仿真分析,验证了所提出结论的正确性。所提出的命题和推论构成了发射单元供电系统设计的基本理论,为长脉宽大型相控阵雷达的阵面供电系统设计奠定了理论基础,具有良好的工程应用价值。

**关键词:**雷达电源系统;发射单元;脉冲负载;电压顶降

**中图分类号:** TN959      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-7859(2020)09-0080-06

**引用格式:** 孙 勇, 林 松. 相控阵雷达发射单元供电建模及特性研究[J]. 现代雷达, 2020, 42(9): 80-85.

SUN Yong, LIN Song. A study on power supply model and characteristic of phased array radar transmitting unit[J]. Modern Radar, 2020, 42(9): 80-85.

## A Study on Power Supply Model and Characteristic of Phased Array Radar Transmitting Unit

SUN Yong, LIN Song

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

**Abstract:** Based on the pulse load characteristics of the transmitting unit, the equivalent circuit and the mathematical model of the transmitting unit are established. Four states of the transmitting unit power supply system are studied by the state space segmentation method. Based on the system states equations, the theoretical calculation formula of the voltage drop with the transmitting unit is derived. The main factors of the voltage drop are also obtained. In order to satisfy the constraint of the voltage drop, the accurate and approximate formulas of the capacitance for energy storage are derived. The achievements are verified by the simulation. The proposed propositions and inferences constitute the basic theory of the power supply system design of the transmitting unit. The conclusions lay a theoretical foundation for the design of power supply system of phased array radar with long pulse width, which has great engineering application value.

**Key words:** radar power supply system; transmitting unit; pulse load; voltage drop

### 0 引 言

随着电力信息设备和高性能装备的发展,脉冲性负荷设备对供电平台的影响日益突出,例如轨道炮、电磁弹射、激光武器等<sup>[1-3]</sup>。其中,相控阵雷达作为一个复杂的现代电子装备,其负荷特性也是一种典型的脉冲性负荷,为其提供可靠稳定的供电是保障雷达正常工作的基本前提。相控阵雷达电源系统是将各种平台上提供的不同体制的电能转换为雷达系统所需要的各种电压品种,雷达系统主要用电设备包括阵面发射、阵面接收、信号处理、显控和伺服等设备,其中阵面发射用电负荷占雷达系统供电总容量的大约 60% 以上,由于雷达工作模式多样,阵面发射的工作状态与雷达工作模式密切相

关,因此阵面发射的负荷特性表现出脉冲性负荷。针对平台供电的脉冲性负荷对供电平台造成的影响,文献[4]建立了含脉冲负载的综合电力系统仿真模型,分析了脉冲负载引起的电力系统功率震荡现象,但是对冲击性负荷产生的机理缺少必要的分析。

相控阵雷达的脉冲特性与其他脉冲性负荷不同,主要体现在脉冲负载重复周期相对较高,并且对供电性能指标要求较高,针对雷达阵面发射单元的脉冲负载引起的供电系统稳定性问题,开展了试验和仿真研究,分析了脉冲负载周期等参数对供电系统的影响<sup>[5-6]</sup>,部分学者对脉冲性设备也建立了仿真模型或者以脉冲负载为主负载柴油发电机组供电试验平台<sup>[7-8]</sup>。

相控阵雷达的发展对电源系统的供电品质提出了更高的要求,特别是雷达工作模式更加多样化,阵面发射的工作特性也更加复杂。文献[9]对相控阵雷达阵面电源分配网络特性进行了研究,得到了关于传输电

基金项目:中国电子科技集团公司资助项目(20180318120001)

通信作者:孙勇      Email:sunyong233@126.com

收稿日期:2020-04-23      修订日期:2020-06-29

缆电感和电源内阻对脉冲负载供电性能影响的一些规律。文献[10]针对脉冲负载的供电特点,提出了基本的周期性脉冲负载的等效电阻的概念,为分析含有储能电容的脉冲负载供电系统提供了基础。关于脉冲性负荷带来的问题主要是因为供电电源的容量有限,所以脉冲性负荷对有限容量的供电系统会产生影响,文献[11]提出了脉冲性负荷的定义和分类,为进一步研究提供了借鉴,文献[12]对脉冲性负荷的研究现状进行了总结,分析了脉冲负载当前存在的关键问题和未来研究方向。上述文献主要研究了脉冲性负荷对系统的影响,对脉冲性负荷的供电特性和电压波动机理关注较少,而雷达阵面发射的负载类型为典型的周期性脉冲负载,同时雷达工作模式随时间快速变化,因此阵面发射属于强非线性快时变的脉冲负载,这种特性给雷达电源系统的综合性能设计带来挑战。

随着相控阵雷达阵面规模不断扩大,功率需求达到兆瓦量级,并且雷达负载的工作模式更加复杂,工作脉宽达到毫秒量级,在长脉宽脉冲负载模式下,雷达发射单元的供电电压顶降对相控阵雷达的发射功率具有重要影响,因此发射单元对电压顶降有严格的约束要求。随着工作脉宽的增加,脉冲负载引起的电压顶降愈加剧烈,因此,亟需针对长脉宽工作模式下的发射单元的供电性能进行建模和理论分析,找到影响发射单元电压顶降的因素,提出长脉宽脉冲负载条件下阵面发射单元供电链路的设计方法,为兆瓦级雷达阵面供电系统设计奠定理论基础。

## 1 阵面发射单元建模

### 1.1 发射单元等效电路

相控阵雷达的阵面由发射单元、接收单元、天线和其他设备组成,其中发射单元按照一定方式分布在阵面上,发射单元的数量一般为数十至数万个,一般发射单元的工作状态由相同的激励信号控制。在一定周期和占空比的激励信号下,发射单元对应的工作状态,称为一种工作模式。

发射单元由储能电容、等效电阻、传输电缆、可控开关及其驱动信号组成,其中可控开关和等效电阻串联,构成脉冲负载,等效电路如图1所示。

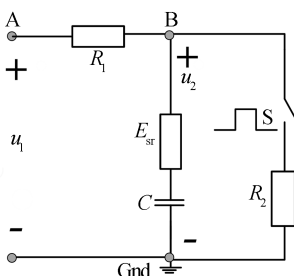


图1 发射单元等效电路

图中  $C$  为储能电容,  $E_{sr}$  为储能电容的等效串联电阻。  $R_1$  为电源输出端至发射单元输入端的线缆电阻,  $R_2$  为发射单元的等效电阻, 发射单元的工作状态受开关  $S$  的控制, 开关  $S$  的通断状态受到激励信号的控制, 激励信号为一定周期  $T$  和占空比  $D(0 \leq D \leq 1)$  的脉宽调制(PWM)信号, 在一个周期内, 开关  $S$  状态的特征函数如下

$$y(t) = \begin{cases} 1, & (0, DT], \\ 0, & (DT, T) \end{cases} \quad (1)$$

当  $y(t) = 1$  时, 开关  $S$  闭合, 电阻  $R_2$  流过峰值电流,  $y(t) = 0$  时, 开关  $S$  断开, 电阻  $R_2$  电流为 0。因此, 称由开关  $S$  和电阻  $R_2$  构成的串联支路为脉冲负载, 其特征是开关  $S$  的状态受到 PWM 信号控制。当 PWM 信号为某一固定周期和占空比时, 该负载又称为周期性脉冲负载。雷达根据不同功能, 其工作模式及切换规则各式各样, 但是均由基本的工作模式构成, 因此, 研究某一固定周期和占空比的工作模式下的发射单元工作特性是重要基础。

### 1.2 发射单元建模

根据发射单元等效电路, 假设脉冲负载工作在周期  $T$  和占空比  $D$  的工作模式下, 根据电路工作状态可以建立脉冲负载的数学模型。

考虑一个周期时间段内, 脉冲负载的工作脉宽为  $t_1$ , 空载状态时长为  $T - t_1$ , 则有如下关系

$$t_1 = DT \quad (2)$$

根据开关  $S$  的工作特点, 在开关  $S$  闭合期间  $[0, t_1]$ , 有如下关系

$$C = \frac{du_c}{dt} = \frac{u_2(t) - u_c(t)}{E_{sr}} \quad (3)$$

$$\frac{u_1(t) - u_2(t)}{R_1} = \frac{u_2(t) - u_c(t)}{E_{sr}} + \frac{u_2(t)}{R_2} \quad (4)$$

式中:  $u_2$  是点 B 与 Gnd 之间的电压;  $u_c$  是储能电容的电压。其中储能电容的初始条件为

$$u_c(0) = u_1(0) \quad (5)$$

对式(4)化简可得

$$u_2(t) = \lambda_1 u_1(t) + \lambda_2 u_c(t) \quad (6)$$

其中

$$\lambda_1 = \frac{R_2 E_{sr}}{R_1 R_2 + R_2 E_{sr} + E_{sr} R_1} \quad (7)$$

$$\lambda_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 R_2 + R_2 E_{sr} + E_{sr} R_1} \quad (8)$$

在该状态下,储能电容和外部电源共同给脉冲负载提供电流。

在开关 S 断开期间 $[t_1, T]$ ,有如下关系

$$C \frac{du_C}{dt} = \frac{u_2(t) - u_C(t)}{E_{sr}} \quad (9)$$

$$\frac{u_1(t) - u_2(t)}{R_1} = \frac{u_2(t) - u_C(t)}{E_{sr}} \quad (10)$$

其中储能电容的初始条件为

$$u_C(t_1) = u_{C,t_1} \quad (11)$$

对式(10)化简可得

$$u_2(t) = \lambda_3 u_1(t) + \lambda_4 u_C(t) \quad (12)$$

其中

$$\lambda_3 = \frac{E_{sr}}{R_1 + E_{sr}} \quad (13)$$

$$\lambda_4 = \frac{R_1}{R_1 + E_{sr}} \quad (14)$$

上述微分方程和等式构成了雷达阵面发射单元的供电关系数学模型。考虑到发射单元的实际工作特点,基于上述模型,对发射单元的工作特性进行分析。

### 1.3 电压突变分析

在脉冲负载开关闭合的 0 时刻瞬间,电压  $u_2$  将产生电压突变。假设在 0 时刻之前,脉冲负载开关处于断开状态,电路为稳定状态,即

$$u_2(0) = u_1(0) = u_C(0) = u_N \quad (15)$$

式中: $u_N$  为输入电源的额定电压  $V$ 。

在脉冲负载开关闭合的 0 时刻,根据式(6),脉冲负载前端的电压  $u_2$  为

$$u_2(0_+) = (\lambda_1 + \lambda_2) u_N \quad (16)$$

则电压  $u_2$  产生了电压突变,电压突变值为

$$\Delta u_2(0) = u_2(0_+) - u_2(0_-) = \frac{-E_{sr} R_1}{R_1 R_2 + R_2 E_{sr} + E_{sr} R_1} u_N \quad (17)$$

一般情况下, $R_1 \ll R_2, E_{sr} \ll R_2$ ,则上式可以近似为

$$\Delta u_2(0) = \frac{-E_{sr} R_1}{(R_1 + E_{sr}) R_2} u_N \quad (18)$$

因此,可得以下命题:

命题 1:在图 1 所示的发射单元供电链路中,当脉冲负载开关闭合的瞬间,脉冲负载上的电压突变与输入电压  $u_N$ 、线路阻抗  $R_1$ 、脉冲负载阻抗  $R_2$  和储能电容的等效串联电阻  $E_{sr}$  有关,与电容容量无关,且电压突

变由式(17)或(18)计算。

考虑到雷达发射单元的实际储能电容的等效串联电阻和线路阻抗远小于脉冲负载电阻,即: $E_{sr} \ll R_2, R_1 \ll R_2$ ,因此,下文中假定  $E_{sr} = 0, R_1 = 0$ ,则由式(17)可知

$$\Delta u_2(0) = 0 \quad (19)$$

因此,储能电容的  $E_{sr}$  和线路阻抗是引起电压突变的根本原因,选择低  $E_{sr}$  的储能电容或较粗的传输电缆有利于降低脉冲负载的电压突变。

为了进一步分析发射单元供电链路的周期特性,在上述假设条件下,忽略储能电容  $E_{sr}$  的影响。实际相控阵雷达阵面电源的设计思路有两种方式:

(1) 按照脉冲负载的平均功率供电模式设计电源容量;

(2) 按照脉冲负载的峰值功率供电模式设计电源容量。其中,第一种供电模式在实际工程中比较常见,本文对第一种供电模式进行分析。

## 2 平均功率供电模式设计及特性分析

### 2.1 平均功率供电模式特点

由于相控阵雷达发射单元的负载特性为周期性脉冲负载,为相控阵雷达发射单元供电的阵面电源的功率一般按照脉冲负载的最大平均功率设计,以保证在其他较小占空比工作模式下,电源系统可以提供足够的功率。这种设计方式就是按照平均功率供电模式设计,其电源的特点如下:

(1) 给发射单元供电的电源只能提供有限的最大输出电流;

(2) 电源的最大输出电流小于发射单元的峰值电流,即  $I_m < u_C / R_2$ ;

(3) 电源的额定功率大于或等于发射单元峰值功率与最大占空比之积;

(4) 必须配置一定的储能电容,以满足发射单元工作时脉冲负载端电压顶降要求。

在占空比固定的工作模式下,脉冲负载支路的峰值功率与脉冲负载的电压和电阻有关<sup>[10]</sup>,当脉冲负载支路上的电压  $u_2$  为定值  $u_{2,est}$  时,脉冲负载消耗的峰值功率  $P_{pk}$  为

$$P_{pk} = \frac{u_{2,est}^2}{R_2} \quad (20)$$

在一个周期中负载消耗的平均功率  $P_{avg}$  为

$$P_{avg} = D P_{pk} = \frac{D u_{2,est}^2}{R_2} \quad (21)$$

相控阵雷达工作模式存在最大占空比  $D_{max}$ ,则脉冲负载消耗的平均功率存在最大值,即

$$P_{\text{avg, max}} = D_{\text{max}} P_{\text{pk}} = \frac{D_{\text{max}} u_{2,\text{est}}^2}{R_2} \quad (22)$$

上述结论只在外部电源的输出阻抗和线路阻抗均为零的理想条件下才成立。实际电路中电源的输出特性不可忽略,使得脉冲负载消耗的实际功率小于上述结果,因此必须考虑供电系统的实际特点,进一步分析发射单元电压顶降、储能电容容量的计算方法。

## 2.2 电压顶降特性分析

假设电源的额定输出电压为  $u_N$ , 并且电源的最大输出电流  $I_m$  为一定值, 电流环的响应时间为  $\tau_1$ , 即电流从 0 过渡到  $I_m$  所需要的时间。根据脉冲负载工作的特点, 将一个周期分为四个阶段:

第一阶段为  $[0, \tau_1]$ , 在该阶段, 外部电源的输出电流以近似线性速率从 0 上升到最大电流  $I_m$ , 则系统状态方程为

$$\frac{du_C(t)}{dt} + \frac{u_C(t)}{R_2 C} = \frac{I_m}{\tau_1 C} \quad (23)$$

初始条件为

$$u_C(0) = u_1(0) = u_N \quad (24)$$

解方程可得

$$u_C(t) = u_N \exp\left(-\frac{t}{b_2}\right) + \frac{I_m b_2}{\tau_1 C} \left[ (t - b_2) + b_2 \exp\left(-\frac{t}{b_2}\right) \right] \quad (25)$$

其中

$$b_2 = R_2 C \quad (26)$$

则有

$$u_C(\tau_1) = u_N \exp\left(-\frac{\tau_1}{b_2}\right) + \frac{I_m b_2}{\tau_1 C} \left[ (\tau_1 - b_2) + b_2 \exp\left(-\frac{\tau_1}{b_2}\right) \right] \quad (27)$$

由于  $u_C$  在该时间段内变化很小, 因此在式(23)中的第二项中可以近似认为  $u_C$  不变, 对式(23)积分可得

$$u_C(t) = u_N \left(1 - \frac{t}{b_2}\right) + \frac{I_m t^2}{2\tau_1 C} \quad (28)$$

$$u_{C,\tau_1} = u_C(\tau_1) = u_N \left(1 - \frac{\tau_1}{b_2}\right) + \frac{I_m \tau_1}{2C} \quad (29)$$

式(29)的计算方法比较简单, 精度较高。

第二阶段为  $[\tau_1, t_1]$ , 在该阶段, 外部电源持续以最大电流输出, 储能电容电压继续下降到最小值。系统的状态方程为

$$\frac{du_C(t)}{dt} + \frac{u_C(t)}{R_2 C} = \frac{I_m}{C} \quad (30)$$

求解方程可得

$$u_C(t) = \left[ u_{C,\tau_1} - \frac{I_m b_2}{C} \right] \exp\left(-\frac{t}{b_2}\right) + \frac{I_m b_2}{C} \quad (31)$$

将式(29)代入到上式, 可得从 0 时刻到  $t_1$  时刻储能电压的最小值为

$$u_C(t_1) = \left[ u_N - \frac{\tau_1 u_N}{b_2} + \frac{\tau_1 I_m}{2C} - I_m R_2 \right] \exp\left(-\frac{t_1 - \tau_1}{b_2}\right) + I_m R_2 \quad (32)$$

因此, 可得命题 2:

命题 2: 在图 1 所示的发射单元供电链路中, 忽略储能电容  $E_{\text{sr}}$  的影响, 从脉冲负载开关闭合, 经过  $DT$  时间后断开时, 储能电容电压达到最小值, 由式(32)计算, 脉冲负载的电压顶降为

$$\Delta u_C = u_N - u_C(t_1) \quad (33)$$

第三阶段为  $[t_1, t_2]$ , 在该阶段, 脉冲负载的开关断开, 电源以最大电流向储能电容充电, 储能电容的电压达到额定电压的时刻  $t_2$  为

$$t_2 = t_1 + \frac{\Delta u_C C}{I_m} \quad (34)$$

第四阶段为  $[t_2, T]$ , 在  $t_2$  时刻储能电容的电压达到额定电压, 电源的输出电流变为零。

通过上述分析, 在脉冲负载工作时, 发射单元的电压顶降与电源的输出电流上升时间、脉宽、电容等参数有关, 根据命题 2, 可得以下推论:

推论 1: 发射单元的电压顶降  $\Delta u_C$  是关于脉宽时间  $t_1$  的增函数, 是关于储能电容  $C$  的减函数。

相控阵雷达发射单元的电压顶降如果过大, 则影响雷达的工作性能, 因此阵面供电系统设计对电压顶降具有特殊要求, 下面对储能电容容量进行理论计算。

## 2.3 储能电容容量计算

发射单元一般要求相对于额定电压的电压顶降百分比满足下式

$$\Delta u_C = u_N - u_C(t_1) \leq \beta u_N \quad (35)$$

将式(32)代入式(35), 可得

$$[u_N - W(C) - I_m R_2] \exp\left(-\frac{t_1 - \tau_1}{R_2 C}\right) \geq (1 - \beta) u_N - I_m R_2 \quad (36)$$

其中



$$W(C) = \frac{\tau_1}{C} \left( \frac{u_N}{R_2} - \frac{I_m}{2} \right) \quad (37)$$

可得不等式

$$\frac{u_N - I_m R_2 - W(C)}{(1 - \beta) u_N - I_m R_2} \geq \exp \left( \frac{t_1 - \tau_1}{R_2 C} \right) \quad (38)$$

对上式化简,可得

$$C \geq \frac{t_1 - \tau_1}{R_2 \ln \frac{u_N - I_m R_2 - W(C)}{(1 - \beta) u_N - I_m R_2}} \quad (39)$$

因此,可得命题3:

命题3:在图1所示的发射单元供电链路中,为了满足发射单元电压顶降的指标要求式(35),储能电容必须满足式(39)。

由于式(39)中右侧含有变量 $C$ ,在计算时可采用迭代算法,首先估算电容的值,代入到式(37)计算 $W$ ,然后计算式(39),得到电容 $C$ ,再重复上述步骤,直到两次电容 $C$ 的差值满足一定的误差要求。该过程稍复杂,不利于工程应用,下面对其进行化简。

当脉宽时间 $t_1 \leq 0.2R_2C$ 时,有

$$\exp \left( \frac{t_1}{R_2 C} \right) \leq 1 + \frac{1.222t_1}{R_2 C} \quad (40)$$

式(38)成立的充分条件是以下不等式成立

$$\frac{u_N - I_m R_2 - W(C)}{(1 - \beta) u_N - I_m R_2} \geq 1 + \frac{1.222t_1}{R_2 C} \quad (41)$$

将式(41)化简,可得

$$C \geq \frac{1.222t_1}{\beta_N R_2} [(1 - \beta) u_N - I_m R_2] + \frac{\tau_1}{\beta u_N R_2} (u_N - 0.5I_m R_2) \quad (42)$$

根据式(42)可得命题4:

命题4:在图1所示的发射单元供电链路中,为了满足发射单元电压顶降的指标要求式(35),当脉宽时间满足 $t_1 \leq 0.2R_2C$ 时,储能电容必须满足式(42)。

采用式(42)可以直接计算出所需要的储能电容容量,但是要对脉宽时间满足的前提条件进行检验。该结果具有一定的余度,如果要得到储能电容最小值的精确解,则需要采用命题3的方法,进行迭代计算。

由命题4易得以下推论:

推论2:在供电电源最大输出电流固定的条件下,当脉宽时间满足 $t_1 \leq 0.2R_2C$ 时,发射单元所需配置的储能电容容量与电压顶降成反比。

传统的储能电容计算方法是假定外部电源在脉动宽度时间内的输出电流为零,脉冲负载的电流只由储

能电容输出,并且输出电压保持不变,则满足以下关系

$$\Delta u_C C = \frac{u_N t_1}{R_2} \quad (43)$$

根据式(35),可得

$$C = \frac{t_1}{\beta R_2} = \frac{t_1 I_{pk}}{\beta u_N} \quad (44)$$

式中: $I_{pk} = u_N / R_2$ 为脉冲负载在额定电压下的峰值电流。

由于上述计算方法的假设条件过于苛刻,所以式(44)的计算结果具有很大的保守性。

综上所述,本文提出的命题3和命题4分别为发射单元储能电容的容量计算的精确算法和近似算法,其中命题4的算法具有较小的保守性,对于大型相控阵雷达,对阵面的体积重量具有严格的约束条件,降低储能电容的容量对于减轻阵面重量具有重要的意义,因此上述两种算法构成了雷达阵面发射单元供电系统储能电容容量计算的理论基础,特别是命题3给出了储能电容的精确算法,也就是为了满足阵面发射单元供电性能要求的最小电容值,因此所提出的两种算法具有良好的工程应用价值。

## 2.4 电源额定功率计算

通过对发射单元四个阶段工作特点的分析,储能电容的电压在 $t_2$ 时刻达到电源的额定输出电压,要求外部电源的最大输出电流需要满足一定的条件,根据上述分析,将储能电容的电压下降曲线近似为线性关系,在一个周期中的电流有如下关系

$$\frac{u_N}{R_2} \left( 1 - \frac{1}{2}\beta \right) t_1 = t_1 I_m - \frac{1}{2} \tau_1 I_m + (t_2 - t_1) I_m \quad (45)$$

为了保证在一个周期结束时,储能电容的电压达到额定电压,必须满足

$$t_2 \leq T \quad (46)$$

根据上述不等式,式(45)等价于

$$I_m \geq \frac{2}{2T - \tau_1} \left( 1 - \frac{1}{2}\beta \right) t_1 I_{pk} \quad (47)$$

由上式可得命题5:

命题5:在图1所示的发射单元供电链路中,为了满足发射单元电压顶降的指标要求式(35),外部电源的最大输出电流需要满足式(47),则电源的额定功率的最小值为

$$P_{N,\min} = \frac{2}{2T - \tau_1} \left( 1 - \frac{1}{2}\beta \right) t_{1,\max} I_{pk} u_N \quad (48)$$

式中: $t_{1,\max}$ 为发射单元的最大工作脉宽。

因此,为发射单元供电电源的额定功率最小值由上式计算,脉宽时间应取发射单元的最大工作脉宽,否则不能满足发射单元的供电要求。

3 工程计算实例

3.1 基本参数

以某型雷达阵面发射单元供电系统设计为例,对所提出的算法进行验证。以雷达阵面一个T/R组件中的发射通道为例进行计算,其中发射单元的参数如下

$$u_N = 32\text{ V}, R_2 = 0.1024\Omega, \beta = 0.1$$

选择一种长脉宽工作模式进行分析: $T=30\text{ ms}$ ,  $t_1=6\text{ ms}$ ,  $D=0.2$ , 电源参数: $I_m=100\text{ A}$ ,  $R_1=0.4\text{ m}\Omega$ ,  $\tau_1=1\text{ ms}$ , 下面根据所提出的算法进行计算。

3.2 储能电容量计算

为了保证在6 ms脉宽条件下发射单元的电压顶降满足要求,下面首先采用传统的算法计算储能电容,由式(44)可得,电容 $C=0.585\text{ 9 F}$ 。

采用命题3的迭代算法,可得储能电容 $C=0.384\text{ 1 F}$ 。  
采用命题4算法,可得储能电容 $C=0.497\text{ 3 F}$ 。  
基于上述计算结果,进行仿真分析,结果汇总如表1所示。

表 1 发射单元供电特性仿真结果

算法	电容/F	电压 最小值/V	电压 顶降百分比/□
式(44)	0.585 9	29.82	6.8
命题 3	0.384 1	28.82	9.9
命题 4	0.497 3	29.49	7.8

其中,当储能电容 $C=0.384\text{ 1 F}$ 时的仿真结果如图2所示。

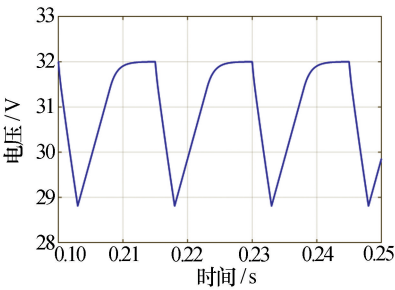


图 2 储能电容电压

通过表1的对比可知,采用传统算法式(44)的结果,具有较大的余度;采用命题3的算法可以得到准确的电容的最小容量;采用命题4的算法可以得到较小余度的电容容量,并且相对于命题3,命题4的算法简单,便于工程应用。

4 结束语

本文针对相控阵雷达发射单元的脉冲负载工作

特性,首先提出了发射单元的等效电路,建立了发射单元在脉冲负载条件下的数学模型,考虑储能电容的等效串联电阻,推导了线路阻抗和等效串联电阻引起的电压突变计算公式。然后研究了采用平均功率供电模式下的发射单元工作特性,推导了电压顶降的理论计算公式,并对理论计算公式进行了简化,基于电压顶降的计算公式,研究了储能电容的理论计算方法。为了保证发射单元供电性能指标要求,推导了外部供电电源的最小额定功率。最后通过仿真实验验证了文中的主要结论。本文提出的分析方法、命题、推论和算法,构成了相控阵雷达发射单元供电系统设计的基本理论,为长脉宽大型相控阵雷达的阵面供电系统设计和方案优化奠定了理论基础,具有良好的工程应用价值。

参 考 文 献

[1] BERNARDES J S, STUMBORG M F, JEAN T E. Analysis of a capacitor-based pulsed-power system for driving long-range electromagnetic guns[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(1): 486-490.

[2] MCNAB I R, STEFANI F, CRAWFORD M, et al. Development of a naval railgun[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(1): 206-210.

[3] HE Y, GUAN Y C, GAO G S, et al. Efficiency analysis of an electromagnetic railgun with a full circuit model[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(12): 3425-3428.

[4] 陈宇航,王 刚. 含脉冲负载的综合电力系统运行特性分析[J]. 船电技术, 2016, 36(6): 1-5.  
CHEN Yuhang, WANG Gang. Analysis of operating characteristics of integrated power system with pulse load[J]. Electric Power Technology, 2016, 36(6): 1-5.

[5] 侯朋飞,王金全,季少卫,等. 柴油发电机组带雷达脉冲负载暂态特性研究[J]. 现代雷达, 2017, 39(5): 89-93.  
HOU Pengfei, WANG Jinqun, JI Shaowei et al. A study on transient characteristics of diesel generating sets with radar pulsed load[J]. Modern Radar, 2017, 39(5): 89-93.

[6] SUDHOFF J M. Reducing impact of pulsed power loads on microgrid power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(3): 270-277.

[7] TAHER A B, JAFARI M. A new approach for modeling electromagnetic railguns[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(5): 1733-1742.

[8] MCNAB I R, FISH S, STEFANI F. Parameters for an electromagnetic naval railgun[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(1): 223-228.

(下转第90页)