

文章编号: 1001-4322(2001)05-0755-05

10MW 串级脉冲发电机的理论、设计、 实验及应用研究^{*}

李 格¹, 潘 垣², 刘保华², 奉文汀², 张延标

(1. 中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230026; 2. 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 脉冲发电机具有小型、机动、灵活、可靠、寿命长等特点, 作为高功率固体激光器和加速器电源是一新的技术路线。比较了各种类型脉冲电源的性能指标, 解释了旋转磁通压缩和串级原理, 提出串级脉冲发电机的自激、偏极与双机同壳概念, 给出电机的设计公式, 10MW 串级脉冲发电机的设计、实验及在强激光与粒子束领域中的潜在应用。

关键词: 10MW 串级脉冲发电机; 固体激光和加速器脉冲电源; 高平均功率激光与粒子束

中图分类号: TM37

文献标识码: A

可移动式高功率固体激光和粒子束系统目前面临的一个主要问题是电源小型化的问题, 其原因是目前所用的电容器储能密度过低, 使装置体积、重量大, 价格昂贵, 高储能密度的脉冲发电机(英文名 compulsator)恰可以解决这个问题。

各类可移动式的固体激光系统电源的能量流程图如图 1 所示, 从表 1 可以看出各种类型脉冲电源的性能指标。由图 1 知, 兼有电感储能的脉冲发电机具有直接与初始功率源耦合的特点, 它将惯性储能、机电能量转换和脉冲成形三者融为一体, 通过磁通的交替压缩与膨胀, 实现部分机电能量的可逆转换。既可以省去大电流多重重复的放电开关, 又能大大提高脉冲功率源的能量利用效率, 还可以进行重复连发, 这些优良性能是其它类型的脉冲功率源所无法比拟的。

脉冲发电机是美国七十年代末发展起来的一项新技术, 开始的研究是针对美国 Lawrence Livermore 国家实验室(LLNL)的惯性约束激光聚变装置的氙灯为负载的^[1]。以后的研究主要针对电磁炮负载^[2, 3]。近期的研究表明, 它在烟气脱硝技术用来改善环境上也有应用的潜力, 是典型的源于“星球大战”又可以用之于“拯救星球”的现代技术^[4, 5]。

表 1 各种储能类型的脉冲电源的主要性能指标^[6]

Table 1 Performance parameters of typical pulsed power supplies

energy method	energy storage device	energy density/(kJ · kg ⁻¹)	energy density/(MJ · m ⁻³)	power density/(kW · kg ⁻¹)
electrical field	capacitor	0.03~3	0.3	8000
magnetic field	inductance	1.3~3.1	3~40	70~1000
inertial energy	compulsator	20	100	210 ⁶
electro-chemistry	chemical battery	200	2000	0.3
chemical energy	explosive	5000	5000	

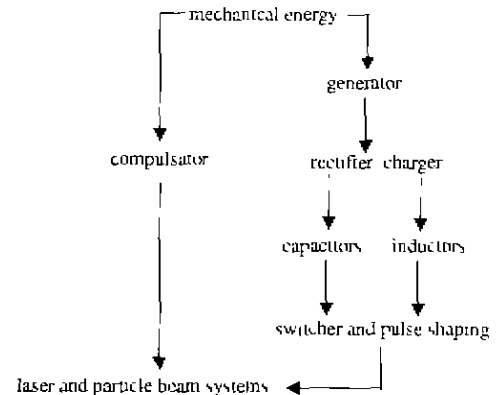


Fig. 1 Energy flow chart of pulsed power supplies for lasers and accelerators

图 1 各类用作固体激光和粒子束系统电源的能量流程图

* 收稿日期: 2001-04-09, 修订日期: 2001-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(批准号 60088021)和博士后基金(94.5)资助课题

作者简介: 李 格(1964-), 男, 副研, 博士, 研究方向为电机及电磁装置、插入元件与自由电子激光; E-mail: lge@ustc.edu.cn.

国内八十年代初对这一新技术进行了跟踪研究,做出几台模型机验证其基本原理,八十年代后期研制了一台被动式装置,成功驱动电磁连发炮系统^[20-22];九十年代初研制的另外一台串级主动装置,成功驱动大功率固体激光器,实现了电源的小型化^[20]。

1 基本原理

1.1 磁通压缩与压缩比的原理

脉冲发电机的基本原理如图 2(a)所示。电枢绕组串联一个与其几乎相同的静止绕组,当两绕组反相时,等效电感 $L_{\text{min}} = L_1 + L_2 - 2M$; 当两绕组同相时,等效电感为 $L_{\text{max}} = L_1 + L_2 + 2M$ 。高电感时注入一小电流,根据磁链守恒定律,在低电感即压缩输出一大的脉冲电流。单级一级放大式的电路接线原理图如图 2(b)。最大最小电感之比称电机的压缩比,也是电机注入电流的理论放大倍数 C_R 。

1.2 串级、自激与双机同壳概念

为了进一步提高电流放大倍数,我们发展了串级脉冲发电机,其基本设想是用另一台此类电机 G_2 对主机 G_1 进行脉冲励磁,形成串级,可以获得极大的脉冲电流与脉冲能量增益。在试验过程中又发现了 G_2 压缩的电流除给负载 load 外,另有一小部分电流通过 G_2 、 G_1 间的二极管正反馈给电机 G_1 , 形成闭环放大的自激现象,若参数匹配合适,在连续动能的输入下,系统将动能转变成脉冲电能,其示意图如图 2(c)所示;当用于可移动式系统时,该系统可以直接与发动机联轴,保证系统的紧凑。为减小整个装置的体积,将励磁机 G_1 与主机 G_2 设计在同一壳体内和同一主轴上,这就是双机同壳的概念。

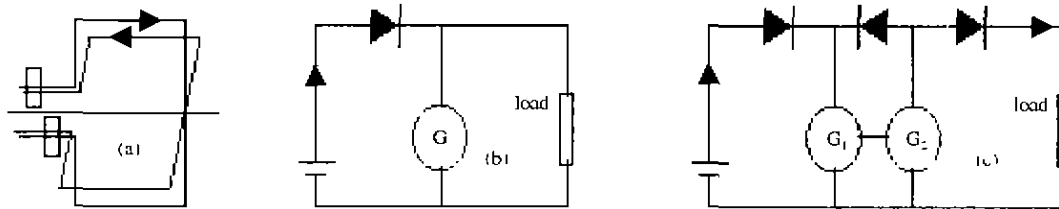


Fig. 2 (a) Compulsator theory, (b) one stage amplification, (c) cascade compulsator

图 2 (a)基本原理图,(b)一级放大式,(c)串级旋转磁通压缩脉冲发电机

1.3 偏极概念

在串级模型电机实验的过程中,我们发现主动式旋转磁通压缩电机输出的电脉冲有叠加的谐波存在,谐波脉宽分析表明,这是由于电机齿造成的,谐波的存在使固体激光性能变坏。为了有效消除齿谐波,除斜槽使每槽磁导变化均化外,采用了偏极手段。即将除一对定、转子极外的其它极对相对于其对称位置的偏离依次增加 β/p 角度(β 为每两邻槽间角, p 为极数),然后将 p 个绕组串起,这样,原来对称的 p 个绕组由于同时达到齿、槽位置而谐波较大,这样处理后,每次只有一个绕组磁导变化有跳跃性,从定性分析上,磁导的跳跃变化只有原来的 $1/p$,波形齿谐波亦只有原来的 $1/p$ 。且偏极后,各绕组并非同时达到电感最大或最小位置而使得压缩电流顶部变宽,输入激光器每波能量变大,波形变好,同时以牺牲电机的放大倍数为代价。

2 主动旋转磁通压缩脉冲发电机的设计

2.1 系统设计概述

按照用户设计的要求,所用的 kW 级固体激光器电源应在满足其性能的条件下,有尽可能小的齿谐波。另外要满足小型、机动、灵活的要求。按照这一原则,我们在机械上采用两机同壳,电气上采用串级、偏极电机的电磁设计,所需拖动该系统电机总功率为 $W_{\text{motor}} \geq W_{\text{laser}} / \eta_1 \eta_2 \eta_3$, 这里 W_{laser} 为激光器功率, $\eta_1 = 0.02$ 为激光器电光效率, $\eta_2 = 0.9$ 为拖动电机效率, $\eta_3 = 0.9$ 为串级脉冲发电机效率。折算后 $W_{\text{motor}} = 62 \text{ kW}$, 选 75 kW 的三相鼠笼式异步电动机拖动。

2.2 双机同壳、偏极主动式旋转磁通压缩电机的各设计公式的推导

根据以上基本原理与电磁场、电路的基本理论,导出以下电磁设计公式^[9]。

2.2.1 主动式旋转磁通压缩电机电感

引入偏极系数 $K_T = \sin(\pi/2Z_2)/p\sin(\pi/2pZ_2)$, 导出电机任意时刻的电感公式^[1]为

$$L_{\text{total}} = 2pL_c + 2pL_{11} \{1 - k_d k_s \cos[p\theta_1/2 - (p-1)\pi/p^2Z_2]\} \quad (1)$$

式中, $L_c = L_{11} + L_{12} + L_{13} + L_c$ 为一个电枢绕组的漏感; L_{11} , L_{12} , L_{13} , L_c 分别为槽漏感、端部漏感、导线内感、气隙漏感等几部分; $L_{11} = \frac{2\mu_0 N^2 l r}{\delta} (\frac{\pi}{p} - \frac{2\alpha}{3})$, 其中 N 为一个电枢绕组的匝数, δ/m 为定、转子间气隙, r/m 为气隙处半径, l/m 为电机有效长度, $2\alpha/\text{rad}$ 为电枢绕组所占弧度; θ_1 为第一对定转子绕组间磁轴夹角; Z_2 为转子每极齿数; k_d 为转子斜槽系数^[10]。

所以最大电感: $I_{\text{max}} = 2pL_c + 2L_{11}p(1 - k_d k_s)$ (2)

最小电感: $L_{\text{min}} = 2pL_c + 3L_{11}p(1 - k_d k_s)$ (3)

电机理论压缩倍数 $C_R = L_{\text{max}}/L_{\text{min}}$ 。

2.2.2 电机压缩电流脉冲半高脉宽^[3]

$$\Delta t_{1/2} = (4/\omega p) \arccos[(C_R - 3)/(C_R - 1)] \quad (4)$$

式中: ω/rad 为电机旋转机械角速度。

2.2.3 主动式旋转磁通压缩电机压缩电流有效值^[9]

$$I = I_{\text{max}} \sqrt{(C_R + 1)/2C_R^{1/2}} \quad (5)$$

式中: I_{max}/A 为所需发电机输出的最大峰值电流。

2.2.4 主动式旋转磁通压缩电机饱和注入电流^[9]

主动补偿电机在稳态运行时, 连续发出的两个电脉冲之间可以认为各绕组的磁链守恒, 当定、转子绕组所流电流方向相同, 位置一致, 整个脉冲电机电感处于最大值时, 定、转子磁轭所穿过的为定、转子绕组正向迭加的磁通, 这时磁轭的磁密最大, 此时绕组中的饱和注入电流决定了该电机的容量。

$$I_s = Bh\delta/[N\mu_r(2\pi/p - \alpha)] \quad (6)$$

式中: B/T 为电机所选的最大磁密, 一般取 $1.2 \sim 1.6\text{T}$; h/m 为磁轭高度。由磁链守恒定律可得压缩后的最大电流

$$I_{\text{max}} = C_R I_s \quad (7)$$

2.2.5 电机发热损耗计算

电机发热损耗共分两部分, 绕组铜耗及电机铁耗。电刷接触损耗发热直接在外散掉^[11]。

根据这些设计公式, 我们完成励磁机 G_1 与主机 G_2 的电磁优化设计, 半高脉宽在 3120 转/min 的常用工业转速下为 $391\mu\text{s}$ 。

3 10MW 串级主动旋转磁通压缩脉冲发电机实验

3.1 旋转磁通压缩电机的静态实验

电机研制完成后, 我们用直流电桥对电机内电阻进行了精确测试; 用 100Hz 的交流电桥对电机每隔 5° 机械角度的电感进行了测试; 表 2 为大小机的特征参数表。实测最大电感与最小电感值的大小与理论计算结果的比较如表 3 所示。从表 3 可看出, 电机电磁设计结果与实验基本吻合, 验证了所设计公式的正确性。

表 2 励磁机 G_1 与主机 G_2 的特征参数表(测量值)

	L_{max}/mH	L_{min}/mH	resistance $R/\text{m}\Omega$
G_2	27	0.352	27.5
G_1	4583	62.33	10.5855

表 3 大小机电感理论计算与测量值的比较表

Table 3 Design and measurement results of the inductance of G_1 and G_2

	L_{max}/mH		L_{min}/mH	
	theory	measurement	theory	measurement
G_2	28.7	27	0.353	0.352
G_1	1850	4583	66.996	62.33

3.2 固体激光器负载调试

电路接线图如图 3, 负载为固体激光器, 用氩氦激光器调好光路, 通以冷却水, 系统运行加电后, 激光器出光, 将正前方砖靶块玻璃化成一直径 0.5mm 左右的小孔。脉冲发电机峰值电压 1kV, 电流 2.5kA, 功率 10MW, 平均功率最高可达到 255kW。

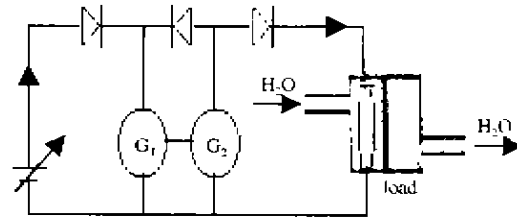


Fig. 3 Circuit of cascade compulsators driving solid state laser

图 3 串级脉冲发电机驱动固体激光器负载的电路接线图

4 结论与展望

对脉冲发电机的研究结果表明: 对有槽的脉冲发电机, 采用传统的斜槽和本文提出的偏极概念, 可以有效地消除齿谐波, 获得光滑的脉冲电流波形; 同一机座号下的有槽电机理论压缩比远大于无槽电机, 从而可以获得小得多的输出脉冲电流的半高脉宽; “串级”电机可解决主机励磁问题, 本文在“串级”电机基础上发现并提出了“串级自激”概念, 可以解决电机用于可移动式系统的运行问题; 本文提出的励磁机与主机“双机同壳”的设计新概念, 不仅解决了电机紧凑性的问题, 又解决了两机扭力传递的问题; 该电机的成功研制与实验验证了所推导设计公式的正确性与所提偏极可以有效地消除脉冲电流齿谐波、有槽电机理论压缩比远大于无槽电机, 励磁机与主机“双机同壳”等新概念。

用脉冲发电机作为高功率固体激光器和加速器电源是一新的技术路线, 比之传统的电容器驱动型, 该类电源具有小型、机动、灵活、可靠、寿命长等特点。10MW 串级脉冲发电机的设计、研制、驱动固体激光器的成功实验, 表明可移动式固体激光系统是可行的, 不论对高平均功率激光器, 还是高峰值功率激光器, 并使之具有向硬破坏发展的潜力^[11]。另外它还具有批量生产廉价等优势, 它的成功研制与实验必将推进激光加工和加速器在各领域的应用。

近期实验表明, 该类脉冲发电机可驱动负载匹配合适的加速器, 产生高平均功率粒子束; 该方法在电子束烟气脱硫硝环保技术上有应用的潜力, 具有无可比拟的技术竞争优势^[11-13]。另外, 这种电子束加上波荡器和谐振腔, 可以用于发展紧凑型自由电子激光装置。

参考文献:

- [1] Bird W L, et al. The compensated pulsed alternator program—a review [A]. The Third IEEE International Pulsed Power Conf [C]. Albuquerque, NM, 1981: 134.
- [2] Spain M L, et al. Compulsator research at the University of Texas at Austin—an overview [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1979, 25(1): 529.
- [3] Pratap S B, Driga M D. Compensation in pulsed alternators [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1979, 35(1): 372—377.
- [4] Lee G. Novel pulsed power source for electrostatic precipitator [A]. The Third International Conf. on Applied Electrostatics [C]. Shanghai, 1997: 138—141.
- [5] Lee G, He D H. Novel technology for pollution control [A]. The Third International Conf. on Applied Electrostatics [C]. Shanghai, 1997: 13—16.
- [6] Li G. Analyzed computation to the airgap armature coils of the passively compensated pulsed generator [J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2004, 20(2): 125—128.
- [7] Li G, Wang Y, Pan Y, et al. Design and experiments of the 25MW passive compulsator [J]. *Journal of China University of Science and Technology*, 2000, 30(5): 561—566.
- [8] Li G, Pan Y, Liu B H, et al. Novel high power supply for YAG laser [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, 30(1): 48—51.
- [9] Li G. Ph. D. Dissertation. Theory and experimental investigation of compensated pulsed alternators [D]. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, 1993, Hefei, China.
- [10] 陈世坤. 电机设计 [M]. 北京: 机械工业出版社出版, 1982. (Cheng S S. Design of electrical machines. Beijing, Publication Company of Mechanical Industry, 1982)
- [11] Murthy S K, Weldon W F, et al. Power supplies for airborne laser systems [A]. The Ninth IEEE International Pulsed Power Conf [C]. Albuquerque, 1993: 44.
- [12] 石 磊, 何小平, 张嘉生, 等. 一台小型强流脉冲离子束加速器 [J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(3): 382—384. (Shi L, He X P,

Zhang J S, et al. A miniature intense pulsed ion beam accelerator. *High power laser and particle beam*, 2002, **12**(5), 352-354)

Theory, design, tests and applications of 10MW compulsator for high power beams

LI Ge¹, PAN Yuan¹, LIU Bao-hua², QIN Wen-ding², ZHANG Yan-hua¹

1. National Synchrotron Radiation Lab., University of Science and Technology of China, Anhui, Hefei 230029, China;

2. Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei 230031, China

Abstract: Powering solid state lasers and accelerators with compulsator is a novel technology, which could reach high average beam power for wide industry applications. As shown in the paper, the novel route is emerging due to successfully lasering experiments driven by the compulsators. It has merits of high specific power and energy storage, reliability, high rates of pulse repetition and long life. The specific power and energy storage of all possible pulsed powers are listed and compared. The theory of flux compression and the two stage amplification of the cascade compulsator are explained. The principles of self-exciting and two devices in one shell in the system of cascade compulsators are explained. The basic design equations, the design and experimental results of a 10MW cascade compulsators for solid state laser are given. The novel power supply drives the solid state laser successfully in the primary experiments. A hole about 0.5mm in diameter is glassified in a brick target by the output laser beam.

Key words: 10MW cascade compulsators; compact pulsed power source for lasers and accelerators; high average power beams of lasers and particles