

文章编号: 1001- 2486(2008) 04- 0116- 05

紧凑型 Tesla 变压器的参数测量*

张自成, 杨汉武, 张建德, 钱宝良, 孟志鹏, 李 达, 王松松, 曹亦兵
(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 对设计加工研制的 Tesla 变压器, 根据 Smith 建议的测量方法, 解决了对紧凑 Tesla 变压器耦合系数进行比较准确地测量的问题, 实测耦合系数高达 0.9, 并对耦合系数稍低于理论设计值的原因进行了探讨, 同时分析给出了物理原因。此外, 根据 Tesla 变压器电路在初次级初、次级短路和低电压充电情形下的实测电压波形, 估算出 Tesla 变压器电路各参数数值。这些数值与理论计算值吻合, 并能满足实际高压充电的要求。

关键词: Tesla 变压器; 紧凑; 耦合系数; 电路; 参数; 测试

中图分类号: TL503 **文献标识码:** A

A Test of Parameters of a Compact Tesla Transformer

ZHANG Zi cheng, YANG Han wu, ZHANG Jian de, QIAN Bao liang, MENG Zhi peng, LI Da, WANG Song song, CAO Yi bing
(College of Opto-electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Difficulties in the measurement of the couple coefficient for a compact Tesla transformer is solved using the method proposed by I. D. Smith. The couple coefficient was experimentally measured to be about 0.9, a little lower than the figure designed. The reasons for the decrease in the couple coefficient were presented. Electrical parameters of the Tesla transformer's circuits were estimated by experimental voltage waveforms, which is in good agreement with that from theoretical calculation. The Tesla transformer can meet the requirements of high-voltage charge to the forming line (FL).

Key words: tesla transformer; compactness; couple coefficient; electric circuit; parameter; test

高功率微波技术的发展, 要求脉冲功率调制器具有体积小、结构紧凑和重复频率高的特点。Tesla 变压器和形成线一体化结构, 将开环磁芯的 Tesla 变压器内置于形成线 FL (forming line), 具有结构紧凑、耦合系数大、能量传输效率高的特点, 并可以工作在较高重复频率, 因而在脉冲功率调制器领域得到了广泛的发展和应用。针对紧凑重频 Tesla 变压器这一热点, 国内外进行了大量的研究和设计^[1-8], 而对于设计制作的 Tesla 变压器的参数仍要以实际测试为准。对于设计加工后的 Tesla 变压器, 对其电路的参数进行全方位的测试, 以验证设计参数值的准确度, 并为高压充电提供依据, 是非常必要的。紧凑 Tesla 变压器中 FL 对于 Tesla 变压器参数的测量带来了不小的难度, 而这是 Tesla 变压器参数测量所必须要面对和解决的。

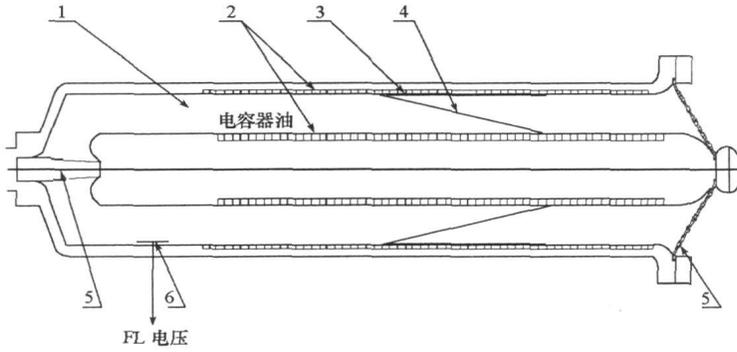
1 实验装置

内置于 FL 的紧凑 Tesla 变压器如图 1 所示。大耦合系数的 Tesla 变压器内嵌于充满电容器油的形成线 1 的内外不锈钢筒之间, 其中磁芯 2 由 0.08mm 厚的电工硅钢薄带 DG6 绕制而成, 同时又作为 FL 内外导体的一部分, 初级线圈 3 由单匝 0.3mm 厚的紫铜板绕制而成, 锥形次级线圈 4 由 888 匝的线径 0.16mm 的漆包线密绕而成。内筒两端的绝缘支撑件 5 分别由尼龙和有机玻璃组成, 以保证机械强度和对 FL 的耐电压强度。电容分压器 6 用来测量 FL 充电电压, 分压器用厚 0.2mm 的双面覆铜的介质薄膜制作而成, 分压器电容自感为 8.8nF, 分压比为 780, 初级电容的电压直接由同轴电缆线(低电压)或加电阻分压器(高电压)进行测量, 当 FL 电压较高时, 附加 740 倍电阻分压器。

* 收稿日期: 2008- 03- 11

基金项目: 国家 863 高技术发展计划项目(2007AA 803478)

作者简介: 张自成(1980-), 男, 博士生。



1- 内嵌 Tesla 变压器的 FL; 2- 磁芯; 3- 初级线圈; 4- 锥形次级线圈; 5- 绝缘支撑件; 6- 电容分压器

图 1 Tesla 变压器型脉冲功率调制器

Fig. 1 A pulse power modulator with a Tesla transformer

紧凑 Tesla 变压器的几何参数具体参见文献[9], 其中 FL、磁芯和线圈的长度分别为 $l_{FL} = 57.8\text{cm}$ 、 $l_T = 40\text{cm}$ 和 $l_k = 20\text{cm}$, FL 外筒或外磁芯的内径为 $2r_2 = 15.6\text{cm}$ 。相应地, FL 的电长度和波阻抗分别为 $\tau = 2.9\text{ns}$ 和 $\rho_{FL} = 30\Omega$ 。

2 Tesla 变压器电路

Tesla 变压器电路^[1,4]如图 2 所示, 其中 M 为互感, L_1 和 L_2 分别为初次级初、次级电感, R_1 和 R_2 分别为初、次级线圈电阻, R_{k1} 和 R_{k2} 分别为初、次级杂散电阻, L_{k1} 为初级杂散电感。图 3 为以匝数比 n_s 将次级等效到初级后的电路图^[1,4], 其中带“'”的参数表示折合到初级后的次级参数, L_μ 为磁化电感, L_{s1} 和 L_{s2} 分别为初次级初、次级漏电感。对于大耦合系数的 Tesla 变压器回路, $L_{se} \ll L_\mu$ (总漏电感 $L_{se} = L_{s1} + L_{s2} + L_{k1}$), 磁化电感 L_μ 可以看作开路, Tesla 变压器等效电路简化为初始电容 C_1 充有电压 U_0 的 LRC 电路^[9] ($L_{k1} + L_{s1} + L_{s2}$) - ($R_{k1} + R_1 + R'_2$) - ($C_1 + C'_2$)。初级电容 C_1 上初始电压 U_0 在 0~600V 内可调。

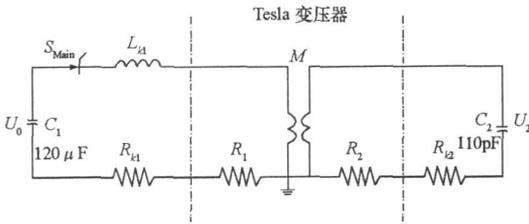


图 2 Tesla 变压器电路

Fig. 2 Tesla transformer circuit

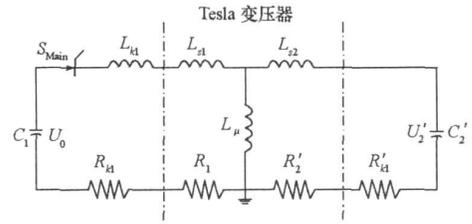


图 3 Tesla 变压器等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of the Tesla transformer

3 Tesla 变压器参数测量

3.1 耦合系数测试量

Tesla 变压器外磁芯如图 4 所示。受变压器正上方开口 1 所限, 加工时外磁芯由几块扇形几何体 2 通过绝缘胶 4 粘接而成, 而每块扇形几何体事先由很多薄硅钢薄带 3 叠积而成。这样由于绝缘胶 4 较薄, 如果加工不慎, 有可能使得磁芯扇形几何体 2 之间存在角向短路环, 造成变压器耦合下降。于是需要测量 Tesla 变压器的耦合系数, 以验证变压器能否正常工作。

Tesla 变压器及其等效 Tesla 变压器分别如图 2 和图 3 中两竖直虚线间所示。由于初次级初、次级电感数值分别在数百纳亨和数百毫亨, 二者相差过大, 以致不能利用分别测量初次级初、次级电感和初次级初、次级串联后的电感(间接计算出互感)以计算耦合系数的方法^[10]; 由于 Tesla 变压器与形成线 FL

一体化,使得次级电容 C_2 (即 FL 电容, 约百皮法) 始终存在。考虑到该紧凑 Tesla 变压器具有的耦合系数较大, 因此采用 Smith 建议的耦合系数的测量方法^[9], 即在变压器一级开、短路的情况下, 分别测量另一级的电感。低频情况时可以忽略 FL 电容 C_2 的影响, 在次级线圈开路和短路下分别测量初级电感 L_{1o} (理论值为 $L_1 = L_\mu + L_{s1} \approx L_\mu + 1/2L_S$) 和初级漏电感 L_{1s} (理论值为总漏电感 L_S), 或在初级线圈开路和短路下分别测量次级电感 L_{2o} (理论值为 $L_2 = n_s^2(L_\mu + L_{s2}) \approx n_s^2(L_\mu + 1/2L_S)$) 和次级漏电感 L_{2s} (理论值为 $n_s^2L_S$), 于是耦合系数分别为 $k_1 = (1 - L_{1s}/L_{1o})^{1/2}$ 和 $k_2 = (1 - L_{2s}/L_{2o})^{1/2}$, 理论耦合系数为 $k = [1 - L_S/(L_\mu + L_S)]^{1/2} \approx 1 - 1/2(L_S/L_\mu)$, k_1 和 k_2 可以相互校对。

利用上述方法, 采用 HP4284A 精密 LCR 仪^[11] 测量变压器耦合系数, 测试结果如表 1 所示。Tesla 变压器耦合系数约为 0.9 (k_1 和 k_2 基本一致), 比理论设计值 $k = 0.95$ 要低; 在测试频率 40kHz 以上时, 次级电感 L_{2o} 的测量值为负, 由 LCR 仪阻抗分析测量 ($L_2 // C_2 // R_M$) + $R_2 \approx (L_2 // C_2) + R_2$ (其中 R_M 为磁芯铁损电阻, 较大) 的原理可知, 当频率 $f \gg f_0 \approx 1/[2\pi(L_2 C_2)]^{1/2} = 34\text{kHz}$ 时, $L_2 // C_2$ 测量阻抗表现为容性, 这是由于 C_2 的容抗小于 L_2 的感抗, 从而在 L_2 与 C_2 相并联的回路中起主要作用所致。

表 1 Tesla 变压器耦合系数测试
Tab. 1 Test of couple coefficient of Tesla transformer

f (kHz)	L_{1o} (nH)	L_{1s} (nH)	k_1	L_{2o} (mH)	L_{2s} (mH)	k_2
10	623.6	94.7	0.921	346.5	81.8	0.874
20	586.7	94.6	0.916	366.7	63.0	0.910
25	556.6	94.0	0.912	388.3	61.6	0.917
30	540.0	94.4	0.908	397.8	61.2	0.920
40	530.3	94.4	0.907	- 5.7	63.8	-
50	506.7	94.3	0.902	- 298.2	69.4	-

3.2 耦合系数下降原因分析

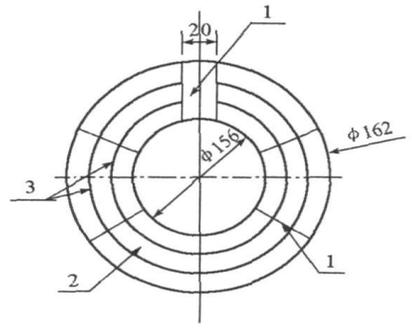
实测 Tesla 变压器耦合系数约为 0.9, 比理论设计值 $k = 0.95$ 要低。初步设想耦合下降的物理原因, 外磁芯加工方式使得外磁芯角向形成短路环, 造成变压器耦合降低, 而由于外磁芯上方开有方形口, 避免外磁芯完全短路环的形成, 使得变压器耦合系数降低不致十分剧烈。

为证实该物理设想, 分析研究短路环对磁芯耦合的影响, 分别测试以下两种情况下的次级电感: 第一种情况 (如图 1 所示) 为初级线圈短路, 第二种情况 (如图 5 所示) 为无外磁芯, 初级线圈完全短路。两种情况下内磁芯和次级线圈均为一体。

两种情况下实测次级电感如表 2 所示, 电感单位均为 mH。第二种情况下次级电感比第一种情况减小约 60%。

初级线圈短路和外磁芯短路均会造成次级电感的下降, 初级线圈短路造成局部角向短路环 (记作 EF1), 使得次级电感下降, 外磁芯短路造成完全角向短路环 (记作 EF2), 使得次级电感大大下降, 影响因素 EF2 对于次级电感下降的作用大于 EF1。在外磁芯不同的制作水平下, 两种情况下的次级电感及其影响因素如表 3

所示, 其中 k_{EF2} 为接近 1 的系数。三种外磁芯的第二种情况均相同, 初级线圈短路的影响因素 EF1 和初



1- 上方开口; 2- 外磁芯几何体; 3- 硅钢薄带; 4- 绝缘胶

图 4 Tesla 变压器外磁芯

Fig. 4 Outer magnetic core

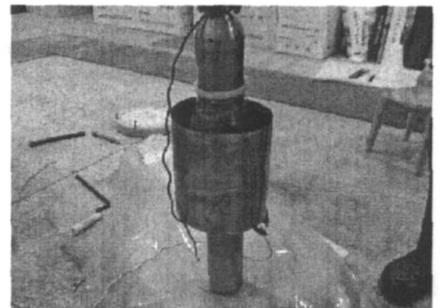


图 5 第 2 种情况 (完全短路初级线圈)

Fig. 5 Condition 2 with a full-short primary coil and no outer magnetic core

级线圈完全短路造成的角向完全短路环的影响因素 EF2 同时存在。关键是其对应于第一种情况次级电感的下降程度。对于理想外磁芯(外磁芯无角向短路), 第一种情况下影响因素仅有 EF1; 第二种情况下次级电感相比于第一种情况大大下降。对于极端不理想的外磁芯(外磁芯角向完全短路), 第一种情况下影响因素既有 EF1, 又有 EF2; 第二种情况下的次级电感与第一种情况基本相等。实际加工的外磁芯, 第一种情况下影响因素有 EF1 和 EF2(部分); 第二种情况下次级电感下降较大, 但不是很大, 其下降情况介于理想外磁芯和极端不理想外磁芯之间, 并且接近于理想外磁芯情况。以上表明, 实际外磁芯性能未达到理想状态, 但耦合尚可。

表 2 次级电感测量值

Tab. 2 Measured secondary inductances values in three conditions

f (kHz)	L_2	情况 1	情况 2
		L_2 (初级线圈短路)	L_2 (无外筒)
10	363	96.5	42.7
20	393	96.8	42.7
25	409	98	43.0
30	426	103.3	43.3
40	- 10	116	44.2
50	- 303	138	45.5

表 3 三种情况下次级电感及其影响因素

Tab. 3 Secondary inductances and their effect factors in three conditions for different outer magnetic cores

	L_2	情况 1	情况 2
		L_{2s}	$\ll L_{2s}$
理想外磁芯	影响因素	EF1	EF1 & EF2
极端不理想外磁芯	L_2	L_{2s}	$\approx L_{2s}$
	影响因素	EF1 & EF2	EF1 & EF2
实际外磁芯	L_2	L_{2s}	$0.4L_{2s}$
	影响因素	EF1 & $(1 - k_{EF2}) \cdot EF2$	EF1 & EF2

3.3 Tesla 变压器回路参数的测试

初次级初、次级线圈短路测试电路参数的测量原理^[4, 12]如表 4 所示。具体而言, 对于欠阻尼振荡的 LRC 电路 $L_{k1} - R_{k1} - C_1$ (或 $(L_{k1} + L_{s1} + L_{s2}) - (R_{k1} + R_1 + R'_{2}) - C_1$), 已知回路的电容 C_1 , 那么根据测量得到的电容 C_1 上的电压波形 U_{C1} , 就可由回路的振荡周期 $2t_k$ (或 $2t_{kc}$) 推算出回路的电感 L_{k1} (或 $L_{k1} + L_{s1} + L_{s2}$), 由峰值电压随时间的下降速度 U_1/U_2 (或 U_3/U_4), 就可推算出回路的电阻 R_{k1} (或 $R_{k1} + R_1 + R'_{2}$)。低电压充电电路等效为初始电容 C_1 充有电压 U_0 的 LRC 电路^[9] $(L_{k1} + L_{s1} + L_{s2}) - (R_{k1} + R_1 + R'_{2}) - (C_1 + C'_{2})$, 该电路分为两个过程: 主控晶闸管开关 S_{Main} 未关断前, 初次级初、次级回路的电压对应充电情形; S_{Main} 自行断开(可由反向电压 $-U_r$ 恒定判断)后, 次级回路 $L_2 R_2 C_2$ 或 $L_{\mu} - R'_{2} - C'_{2}$ 仍存在不足阻尼振荡, 一直延续到次级电压为零、能量耗尽为止^[4]。于是, 根据初次级初、次级短路和低电压情形就可以确定 Tesla 变压器等效电路相关参数^[4]。

Tesla 变压器回路参数测试的详细电路图、实测电压波形以及参数计算公式如表 4 所示, 据此确定的电路参数数值以及与近似理论计算值^[4]的比较如表 5 所示, 其中理论计算值建立在 L_{k1} 和 R_{k1} 取实测值的前提下。表 4 和表 5 中, t_k 和 t_{kc} 分别为初次级初、次级线圈短路时初级电压的半周期, t_c 为次级峰值充电电压, t_{ex} 为次级回路振荡的半周期, $L_{Se} = L_{s1} + L_{s2} + L_{k1}$ 为 Tesla 变压器回路的总漏电感, $R_e = R_{k1} + R_1 + R'_{2} + R'_{k2}$ 为等效 Tesla 变压器电路的串联电阻, α 为 Tesla 变压器回路的频率失谐系数, U_3/U_6 表示次级回路峰值电压的下降速度(半周期), k 和 k_e 分别为 Tesla 变压器自身的和有效的耦合系数, n_e 和 n_v 分别为变压器自身的和有效的电压的变比, η 为 Tesla 变压器的能量传输效率。

由表 5 可见, 实测 Tesla 变压器电路各参数与理论计算值吻合较好。只是由于次级回路电阻稍大, 使得电压变比 n_v 由 832 略降到 800, 即次级峰值充电电压 U_{2max} 由 500kV 稍降到 480kV, 但足以满足 Tesla 变压器升压的要求。

表4 Tesla变压器电路参数测试的原理

Tab.4 Principle of parameters test of Tesla transformer circuits

情况	初级线圈短路	次级线圈短路	FL 充电
电路图			参见图3
时间周期测量值	$t_k = 9\mu s$	$t_k = 12.2\mu s$	$t_z = 7.52\mu s, t_{zx} = 24.1\mu s$
LRC 电路	$L_{k1} - R_{k1} - C_1$	$(L_{k1} + L_{s1} + L_{s2}) - (R_{k1} + R_1 + R_2') - C_1$	$(L_{k1} + L_{s1} + L_{s2}) - (R_{k1} + R_1 + R_2') - (C_1 + C_2')$
导出参数	$L_{k1} \approx t_k^2 / (\pi^2 C_1),$ $R_{k1} \approx 2/\pi (L_{k1}/C_1)^{1/2} \ln(U_1/U_2)$	$L_{s2} \approx t_k^2 / (\pi^2 C_1),$ $R_c \approx 2/\pi (L_{s2}/C_1)^{1/2} \ln(U_3/U_4)$	$L_\mu \approx t_{zx}^2 / (\pi^2 C_2'), R_2' \approx 2/\pi (L_\mu/C_2')^{1/2} \ln(U_5/U_6)$ $\alpha \approx t_{kz}^2/t_z^2 + t_z^2/t_{zx}^2 - 1, C_2' \approx C_1/\alpha, k_e \approx [1 - (1/\alpha)t_{kz}^2/t_z^2]^{1/2}$

表5 Tesla变压器电路参数的实测值和理论计算值

Tab.5 Tesla circuits parameters' values measured by experiment and calculated by theory

参数	L_1/nH	L_2/nH	L_{s2}/nH	$R_1/\text{m}\Omega$	R_2/Ω	$R_{k1}/\text{m}\Omega$	L_1/nH	L_2/mH	k	k_e	α	$t_z/\mu s$	n_e	n_i	η
实测值	700	60	123	0.2	10k	14	730	576	0.960	0.910	1.6	7	840	800	50%
计算值	680	57	120	0.2	254	14	709	560	0.957	0.907	1.5	7	851	832	50%

4 结论

对设计加工的Tesla变压器,运用HP4284A精密LCR仪冷测变压器电感和耦合系数,解决了紧凑Tesla变压器耦合系数测量的问题,实测耦合系数高达0.9,但略低于设计值0.95,对耦合稍有下降的原因进行了测试,分析给出了物理原因。根据Tesla变压器电路在初、次级短路和低电压充电情形的电压波形,运用Tesla变压器和LRC电路的理论,估算出了Tesla变压器电路各参数数值,与理论计算值吻合,并能满足实际高压充电变比的要求。

参考文献:

[1] Mesyats G A, Korovin S D, Gunin A V, et al. Repetitively Pulsed High-current Accelerators with Transformer Charging of Foming Lines[J]. Laser and Particle Beams, 2003, 21: 197- 209.

[2] Korovin S D, Rostov V V. High-current Nanosecond Pulse periodic Electron Accelerators Utilizing a Tesla Transformer[J]. Russian Physics Journal, 2006, 39(12): 21- 30.

[3] Gubanov V P, Korovin S D, Pegel I V, et al. Compact 1000 PPS High-voltage Nanosecond Pulse Generator[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1997, 25(2): 258- 265.

[4] 柯罗文. 用在强脉冲重复频率加速器中的特斯拉变压器[J]. 国外核试验技术, 1996, 19(1)

[5] 张永辉, 常安碧, 康强, 等. 重复脉冲强留电子束源长时间稳定运行实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(5): 751- 755.

[6] 康强, 常安碧, 李名加, 等. 带脉冲形成线的1.0 MV 100 Hz紧凑型Tesla变压器的研制[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(3): 451- 454.

[7] 樊亚军. 高功率亚纳秒电磁脉冲产生[D]. 西安: 西安交通大学, 2004.

[8] 彭建昌, 宋晓欣, 刘国治, 等. Tesla型重频脉冲电子束加速器及其应用[C]//第十届高功率粒子束学术交流会议, 2006.

[9] Adler R J. Pulse Power Formulary[M]. North Star Research Corporation: Albuquerque, New Mexico, 2001.

[10] 刘金亮, 张建德, 李永忠, 等. 一种给脉冲形成线充电的带绕式高压脉冲变压器[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(4): 394- 396.

[11] 杨汉武. 脉冲功率及其诊断技术讲义[R]. 长沙: 国防科技大学, 2003.