

设计高性能 65W 双路输出 1/4 砖型模块电源的技术介绍

DENSEI-LAMBDA 电盛兰达公司

摘要：本文介绍了设计 65W 双路输出 1/4 砖型模块电源 PAQ65D48-* 系列的技术，包括应用有源嵌位软开关单端正激变换技术，双路同步整流技术，第二路输出采用电子模拟磁饱和放大器（斩波式稳压器）技术以及应用多层印刷线路板制作功率线圈。由于这些技术所拥有的公认的诸多优点，采用后大大降低了初、次级开关元件的电压应力，大大降低了二次侧整流损耗，也同时提高了第二路输出的效率，实现了更好的两路电压交互调节特性（可完全空载），以及更佳的动态负载响应特性，达到了小型化、薄型化的要求。最后附有必要的实验测试结果。

关键词：标准 1/4 砖型模块电源、有源嵌位软开关单端正激变换、同步整流、电子模拟磁饱和放大器（斩波式稳压器）、印刷线路板功率线圈

一. 前言

当今世界信息技术的高速发展，促使其设备在向大容量，高性能及小型化发展的同时，对所使用的电源模块也提出了更高的要求。即外型尺寸更小，厚度更薄；电气特性方面要求电压控制精度更高，动态响应更快，电磁干扰更低等；可靠性方面要求功耗、发热温升更低等等。

二. 设计方案的确定：

基本性能指标：(1). $P_{max}=65W$, (2). $V_{in} = 36\sim76VDC$, (3). $V_{o1}/V_{o2} : 5V/3.3V$ 等多种组合，输出可调范围： $\pm 10\%$, (4). $I_{o1}+I_{o2}=18A$, $I_{o1max}=13A$, $I_{o2max}=16A$, (5). 效率 $\eta = 90\%$ (5V/3.3V 组合) , (6). 标准 1/4 砖型结构尺寸 , (7). 基本模块厚度低于 9mm。

1. 主变换电路选择：经对比单端正激式、准谐振式、ZVS 全桥相移式及有源嵌位单管正激等几种变换方式，采用有源嵌位软开关单管正激方式。其显著特点是功率器件较少，控制相对简便可靠；固定的工作频率有利于输入滤波器的设计；初、次级开关电压应力更低，初级导通损耗低，开关损耗低；变压器利用率更高，变压器波形好，使通过耦合对二次侧同步驱动更易实现。二次侧用同步整流方式，经对比了几种诸如两路单独变换、主输出降压变换、可饱和磁放大器等方式，确定用电子模拟磁放大器（斩波式稳压器）方式做为第二路稳压方式。即用一只 MOS 管替代磁放大器电感，通过模拟磁放大器原理调节此开关管的导通时间实现稳压。实际对变压器次级电压进行了斩波。这样最大限度减少了磁性功率器件的数量，提高了变换效率，充分发挥了线路的效能。这使得二次侧具有一系列优点，如两路输出无需最小负载；因占空比不必变化很大，大范围动态响应同样好；两路输出的交互负载调整率很低等等。

2. 机械结构设计：为实现 1/4 砖标准要求 36.8mm 50.8mm，选用新型小尺寸 SMD 封装功率开关器件，第二路输出滤波电感选用标准 SMD 平面型产品以及采用 PCB 板制作变压器及电感线圈，上层元件高度 3.3mm，下层元件 3.55mm，PCB 板厚度 2.05mm，则总厚度 8.9mm。最终保证了在 1/4 砖小面积上完成设计指标要求。

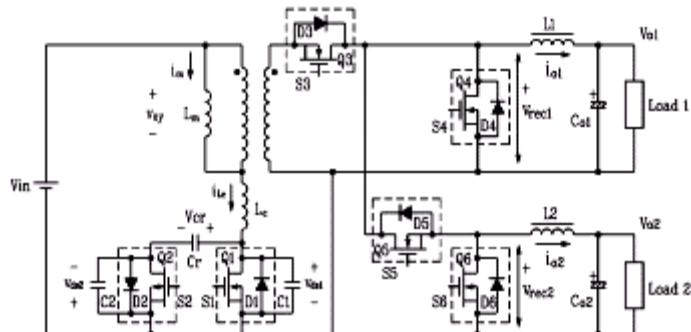


图 1. 有源嵌位单端正激变换及电子模拟磁放大器原理

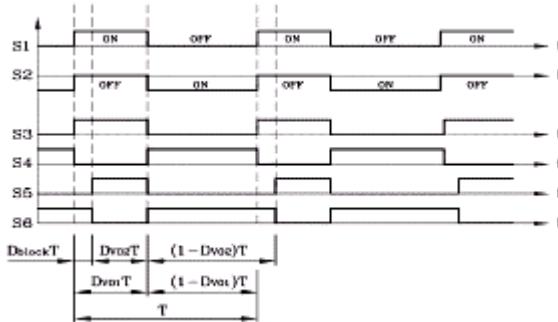


图 2. 开关管 S_1, S_2, \dots, S_6 的驱动电压波形

三. 工作原理：

1. 线路拓扑结构及简要说明：

如图 1 所示， L_m 表示变压器初级励磁电感， L_e 表示初级漏感， C_r 是变压器复位嵌位电容， C_1, C_2 分别是 MOS 管 Q_1, Q_2 的寄生电容， D_1, D_2 是 Q_1, Q_2 固有的体二极管，各 MOS 管的沟道与并联的体二极管组成总开关， S_3, S_4 是二次侧主输出的同步整流续流开关管， S_5, S_6 是第二路输出的整流续流开关管。其中 S_2 选用 P 沟道 MOS 管，便于设计它的驱动电路。另外注意 S_5 的体二极管方向。

各开关管 S_1, S_2, \dots, S_6 的驱动电压时序波形如图 2 所示，在 S_1 与 S_2 驱动信号之间设有一定的死区以完成软开关过渡过程。另外，参数设置要保证初级电感 L_m 与 C_r 的谐振频率小于变换器的工作频率 f_s 。

基本关系式：

D_{v1} —主路导通占空比， D_{v2} —第二路导通占空比， n —变压器变比

(1). 根据变压器等效伏-秒公式， C_r 上的电压为 $V_{cr}=V_{in}/(1-D_{v1})$

(2). 根据输出电感的等效伏-秒公式，有 $nV_{o1}/V_{in}=D_{v1}$

(3). 对于第二路输出有 $nV_{o2}/V_{in}=D_{v2}$

S_5 的导通量与 S_3 的导通量相差： $D_{block}=D_{v1}-D_{v2}$ ，因此 $V_{o1} < V_{o2}$ 。

2. 工作过程分析：

(1). 稳态波形如图 3 所示，以一个稳态周期为例，分为从 M_1 到 M_{10} 的 10 个阶段进行分析。各阶段的等效电路如图 4 所示。其中 M_1 到 M_3 阶段是功率由变压器向二次侧传输过程，在 M_3 阶段同时又向第二路输出传送功率。 M_2 阶段是第二通道开关 S_5 与 S_6 换流过程（即续流转向整流）， M_4 与 M_5 阶段是软开关过渡过程， M_6 与 M_7 阶段和 M_9, M_{10} 阶段同样是由于变压器初级漏感的作用形成的二次侧输出换流阶段。

(2). 以下从 M_1 阶段分析，注意开关 S 的导通包括 MOS 管沟道 Q 导通与体二极管 D 导通。

M_1 阶段：(S_1, S_3, S_6 导通， S_2, S_4, S_5 关断)

S_1 导通， V_{in} 加至变压器初级，功率传至二次侧第一通道。 S_5 尚未导通， S_6 处于续流状态，这阶段到 S_5 开始导通结束。

M_2 阶段：(S_1, S_3, S_5, S_6 导通， S_2, S_4 关断)

第二通道开始由变压器供电。在 S_5 导通之前， Q_6 沟道关断，靠体二极管 D_6 续流。 S_5 一开始导通， S_5 与 S_6 开始换流。注意在这一换流过程中，变压器次级线圈有一瞬间电压跌落。这一跌落的程度取决于 S_5 导通速度，变压器初级漏感以及第二路输出电流的大小。假设 S_5 瞬间导通， V_{in} 将全部加在初级漏感 L_e 上。使二次侧出现电压瞬间跌落至零。这阶段至 S_6 关断为止。

M_3 阶段：(S_1, S_3, S_5 导通， S_2, S_4, S_6 关断)

第一、第二路输出完全由变压器供电。

M4 阶段 : (S3 , S5 导通 , S1 , S2 , S4 , S6 关断)

Q1 关断的过渡。从 Q1 关断开始 , i_{Le} 基本恒定 , $C1$ 线性充电 , $C2$ 通过 Cr 线性放电 , 这一阶段至 $C1$ 被充至 V_{in} 结束。变压器初级电压降至零。S3 与 S4 换流之前 , Q3 沟道应该关断以防止交叉导通。而 Q4、Q6 应在各自换流后导通。Q1 的关断属一定程度的软关断。

M5 阶段 : (S3 , S4 , S5 , S6 导通 , S1 , S2 关断)

Q1 关断后初、次级的继续过渡。变压器初、次级电压降为零 , 无功率传输。 Le 与 $C1$, $C2$ 谐振 , $C1$ 充电上升至 V_{cr} , $C2$ 通过 Cr 通路被放电至零 , 此时 Le 经 $D2$ 放电 , 这时 Q2 实现 ZVS 导通。在二次侧 , S3 与 S4 , S5 与 S6 继续换流。

M6 阶段 : (S2 , S3 , S4 , S5 , S6 导通 , S1 关断)

Q2 导通时初、次级的过渡。变压器初级电压仍被嵌位在零电压。 Cr 开始通过 Q2 向 Le 加上电压 $V_{cr}-V_{in}$, 使 i_{Le} 下降 , 当 i_{Le} 降至与 i_m 相等时 , 这一阶段结束。在二次侧 , S3 与 S4 , S5 与 S6 继续换流。

M7 阶段 : (S2 , S4 , S6 导通 , S1 , S3 , S5 关断)

Q2 导通后初、次级的继续过渡。 Cr 以电压 $V_{cr}-V_{in}$ 使变压器复位 , 二次侧完全由 S4 , S6 续流。

M8 阶段 : (S4 , S6 导通 , S1 , S2 , S3 , S5 关断) S2 关断的过渡。

M9 阶段 : (S3 , S4 , S6 导通 , S1 , S2 , S5 关断) S2 关断后初、次级的继续过渡。

M10 阶段 : (S1 , S3 , S4 , S6 导通 , S2 , S5 关断) S1 导通的过渡。

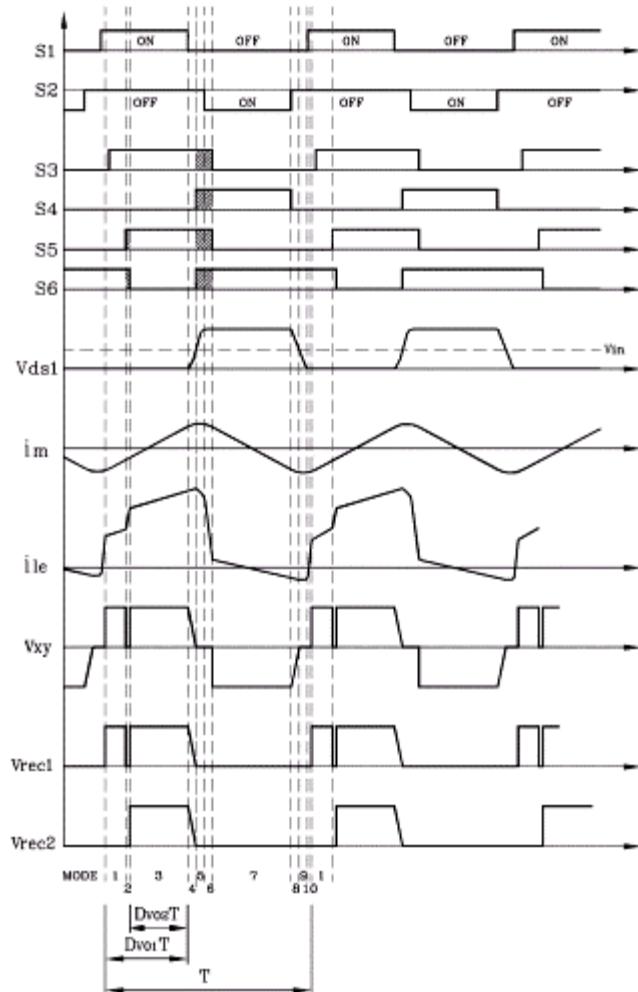


图 3. 稳态时的相关电流电压原理性波形图

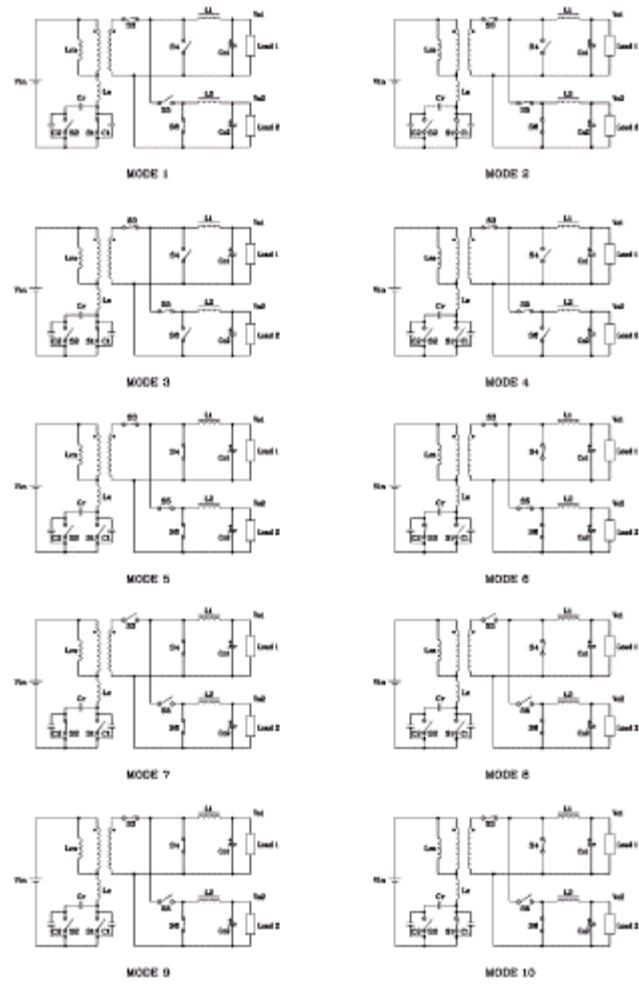


图 4. 各不同阶段的等效电路

这三个阶段相应地分别与 M4 , M5 , M6 三个阶段的变换过程相似。在 M8 阶段 , S1 , S2 上的电压开始过渡过程 , im 使 C1 线性放电 , C2 线性充电。M9 阶段 , Le 与 C1 , C2 的谐振作用使 C1 放电 , C2 充电继续进行。与 M2 和 M3 阶段相比 , 使 S1 达到 ZVS 过渡更困难 , 因为没有等效负载电流对谐振环进行补充。但在设计上 , 如果通过减小励磁电感 , 使励磁电流有较大峰-峰值 , 可以达到 ZVS 过渡。但是这样在谐振环路中会有较大环流引起较大损耗 , 这与主变换器工作频率也有关。然而实际上 , S1 的导通过程是 ZCS 过渡。在 M9 , M10 阶段 , S3 (D3) 和 S4 (D4) 开始换流 , 当 S3 完全导通后 , 这一阶段结束 , 然后回到 M1 阶段 , 完成一个完整周期的变换。

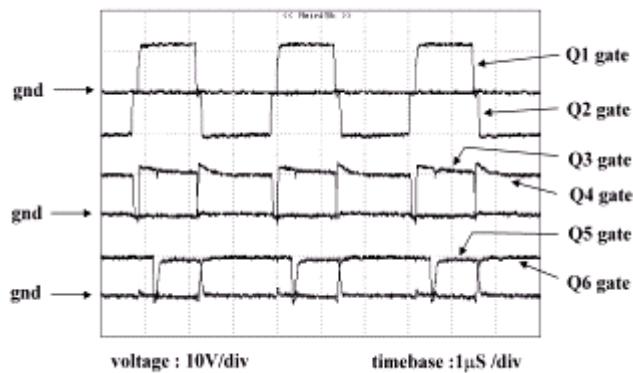


图 5. 开关管驱动电压波形图

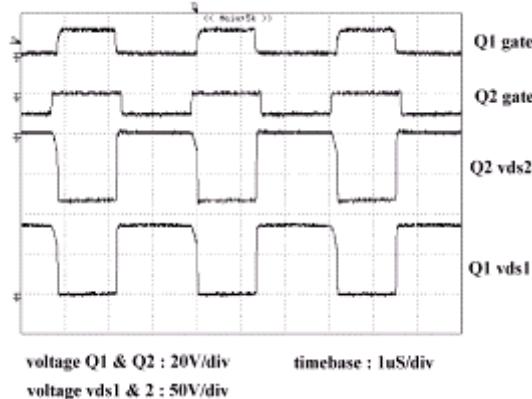


图 6. 开关管 Q1 、 Q2 驱动及漏极电压波形

四. 实验结果：

1. 测试条件 : $V_{in}=48V$, $V_{o1}=5V$, $V_{o2}=3.3V$, $I_{o1}=6.5A$ (半载), $I_{o2}=8A$ (半载)
 2. 各开关管驱动电压波形如图 5 所示, Q1 与 Q2 驱动时序有一定死区以完成软开关过渡。Q5、Q6 驱动波形虽有一定交叉, 但此刻变压器不传输功率, 不会引起交叉导通损耗问题。
- 从放大的图 7(a) 中明显看出, 在 Q1 关断 Q2 导通的过渡过程中, Q1 实现软关断, Q2 是零电压导通。图 7(b) 所示为 Q2 关断 Q1 导通的过渡过程, Q2 是软关断; Q1 如前所述不是零电压导通, 但可看出 Q1 实现了零电流导通, 而且从总体效率指标比较, 这样的结果最好。

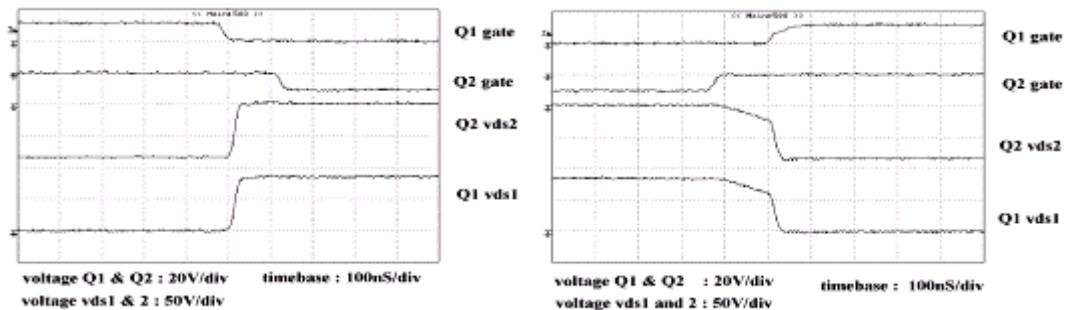


图 7. 放大量程后开关管 Q1 、 Q2 驱动及漏极电压过渡波形

图 8 显示 S5 的调节作用, 即对整流前变压器二次侧的输出电压进行了斩波。

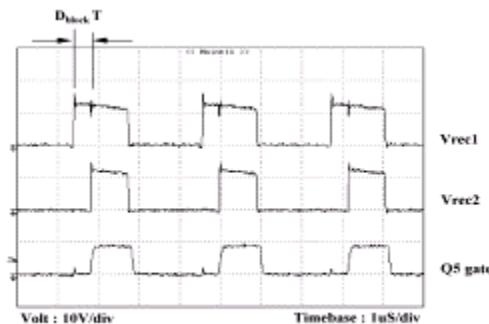


图 8. 二次侧第一、第二路输出整流前电压波形

图9是实测的效率-负载曲线，在轻载时就有较高的效率，在半载至满载时，效率一直保持在90%左右。

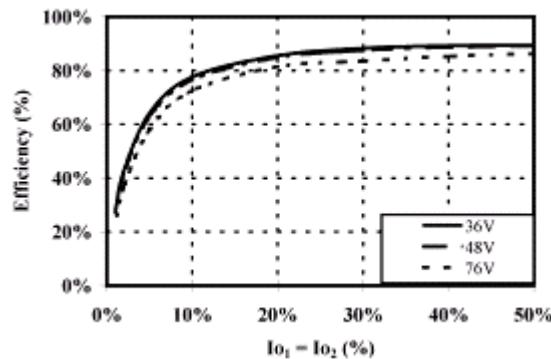
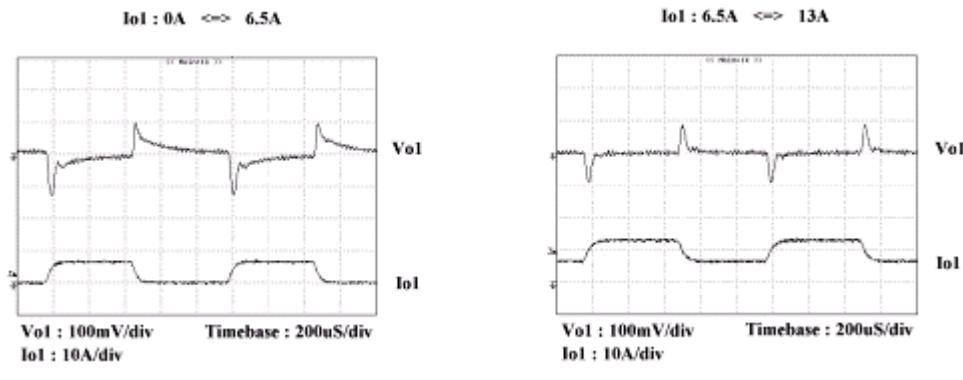


图9. 实测的效率-负载曲线



(a) 图10. 动态负载响应特性

(b)

图10显示动态负载响应快，电压变动小。如图10(a)所示，当Io1从0->6.5A变动时，电压变化量只有120mV，恢复时间小于250ms。

五. 结束语：

以上理论分析及实验数据表明，应用所介绍的技术使这款双路输出1/4砖型模块电源表现出优异的特性。其它特性还有诸如双路输出可各自调整；在各种不同负载条件下，输出电压极为稳定；可靠性很高等等，解决了以往其它双路输出电源存在的许多问题。本系列产品现已经量产，并广泛应用于通讯等领域。

射 频 和 天 线 设 计 培 训 课 程 推 荐

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表：<http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



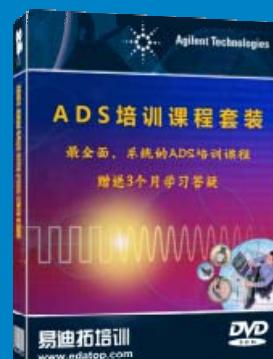
射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材；旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习，能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程，共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解，并多结合设计实例，由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS，迅速提升个人技术能力，把 ADS 真正应用到实际研发工作中去，成为 ADS 设计专家…



课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程，是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装，可以帮助您从零开始，全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装，更可超值赠送 3 个月免费学习答疑，随时解答您学习过程中遇到的棘手问题，让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅…

课程网址：<http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出, 是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装, 所有课程都由经验丰富的专家授课, 视频教学, 可以帮助您从零开始, 全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装, 还可超值赠送 3 个月免费学习答疑…



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线, 让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…



详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>