

此时输出与原边隔离， L_m 开始参与谐振，组成一个与 L_r 和 C_r 串联的谐振回路。

t_3 时刻 Q_1 关断， Q_2 导通，模式 3 状态结束。从波形图可以看出， Q_1 在 t_3 时的关断电流比峰值电流要小的多。

后半个周期工作方式可用相同的方法进行分析。

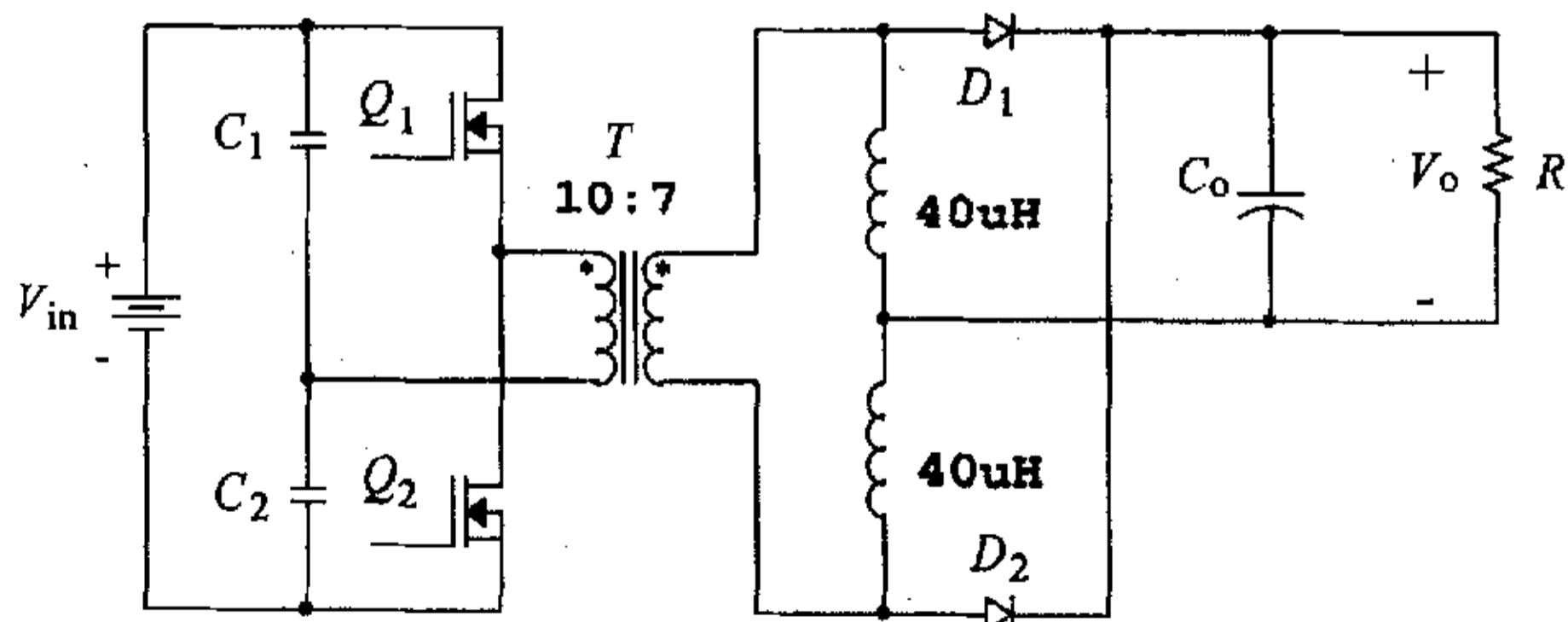
从仿真波形我们看到，MOSFET 管 ZVS 导通。关断电流的大小由励磁电感 L_m 决定，与负载条件无关，所以 ZVS 导通在任何负载条件下都能实现。MOSFET 关断时，关断电流比负载电流小的多，这样关断损耗也被大大减小。还有，次级二极管电流减少到零并关断，反向恢复电流也被减小。综上所述可知，这种开关变换器的损耗是非常小的。

下边，通过对 LLC 谐振变换器与 PWM 变换器的比较，显示了 LLC 谐振电路的优点。

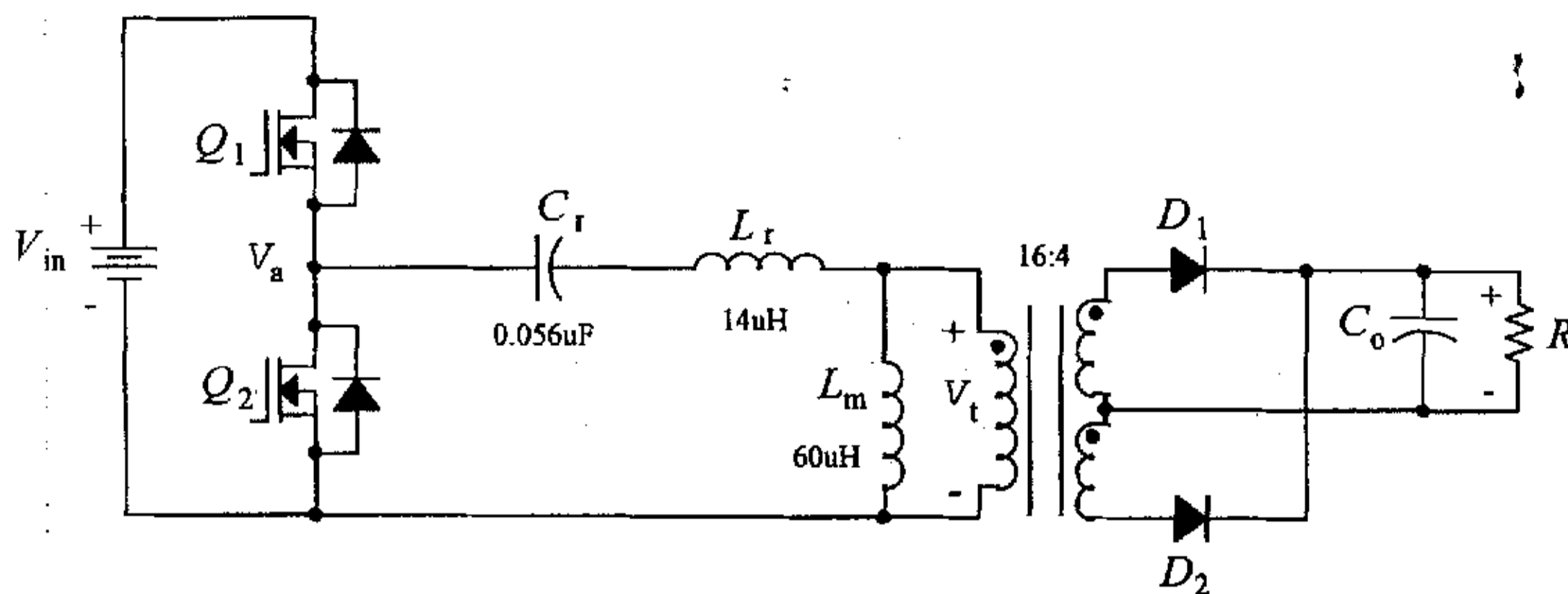
4.1.3 效率比较

这部分将比较一下 LLC 谐振变换电路与不对称半桥电路的效率。不对称半桥是简单高效的，因此选它作为比较对象。比较是在仿真的基础上进行的。两个变换电路的仿真模型是同一设计规格。两个电路如图 4—6 所示。两变换器的设计规格为：

$V_{in}=300\sim 400V$ ， $V_o=48V$ ， $P_o=1kW$ ，PWM 开关频率为 200kHz，LLC 开关频率为 150kHz 到 200kHz。



不对称半桥倍流整流电路



LLC 谐振变换电路

图 4—6 用于效率比较的两个电路图

两个变换电路所选器件为：

原边开关：IXFN26N50 500V 21A MOSFET

不对称半桥次级整流电路：

STTH3003, 300V (超快速二极管), 正向压降 1.1V。

LLC 谐振变换电路次级整流管：

IXYSS20-015A, 150V 肖特基二极管, 正向压降 0.65V。

不对称半桥变换电路, 在高输入电压下的电流波形是极不对称的。当变换电路工作于这种状态时, 导通损耗和开关损耗都将增加。变换电路在宽输入范围时的效率将受到损害, 不对称的占空比也将增加次级二极管的电压应力。因此, 必须选用电压比较高的器件, 正向压降将加大, 次级导通损耗将占总损耗的大部分。

在高输入电压下, LLC 谐振变换器输入电流的峰值和均方根值都较小, 因此导通损耗也较小, 而且它的次级二极管的电压应力也被限制在二倍的输出电压。可选用低压肖特基二极管, 减少次级导通损耗。

导通损耗的增加将会使开关损耗减小而得到的优点变的没有意义, 因此, 对于谐振变换电路, 我们还应该关心它的大电流应力或者电压应力。

图 4—7 显示了原边导通损耗的比较结果^[18]。在大电压输入下, PWM 变换电路的占空比较小, 因此, 电流均方根值比谐振变换电路大。输入电压减小时, 谐振变换器工作状态更对称, 电流均方根值将变的较大, 导通损耗也较大。但由于在正常工作状态下, 它的输入电压在 360V 到 400V 之间, 这种

情况下导通损耗与 PWM 变换电路相差不大，只是在错误的工作状态下，电路才工作在非常低的输入电压下。因此，使用 LLC 谐振变换器，导通损耗的增加并不是问题。

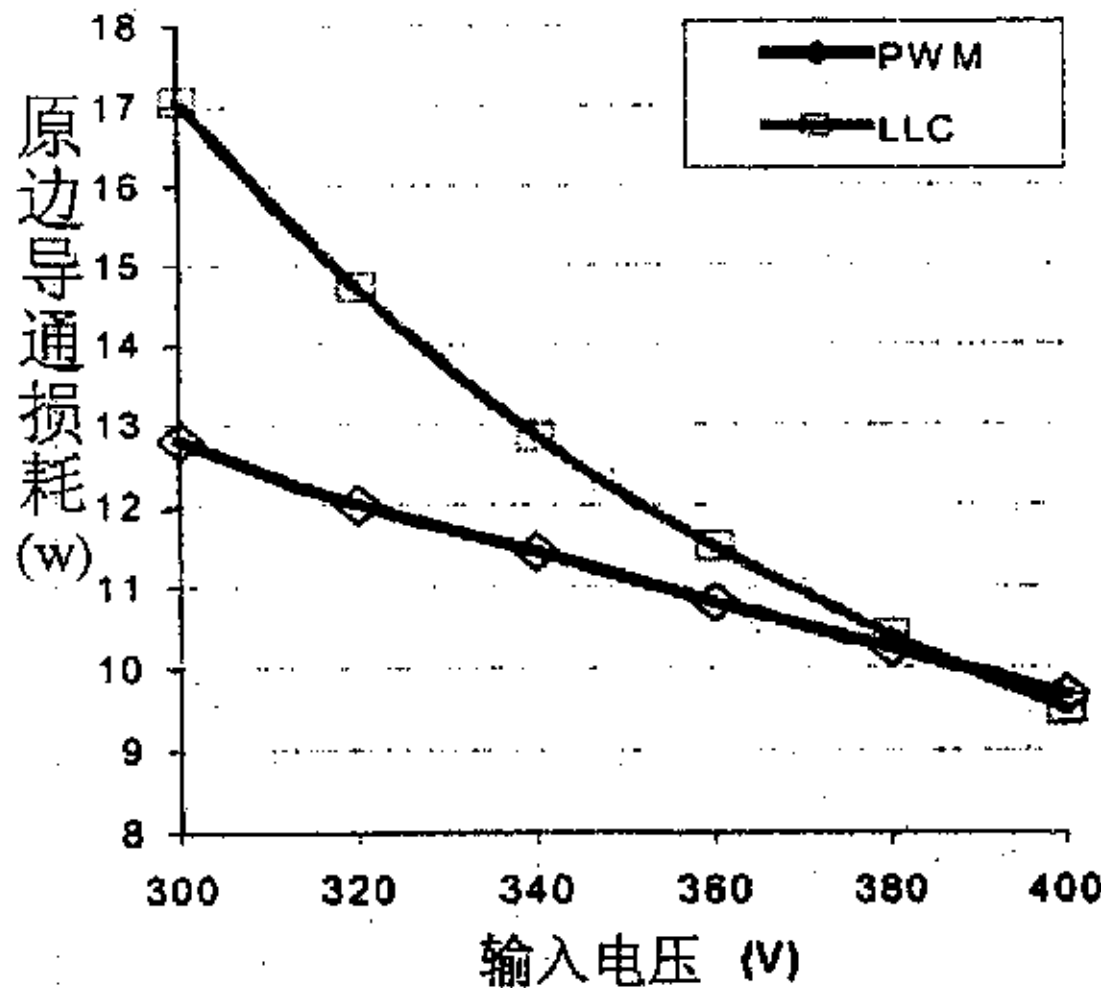


图 4—7 原边导通损耗比较

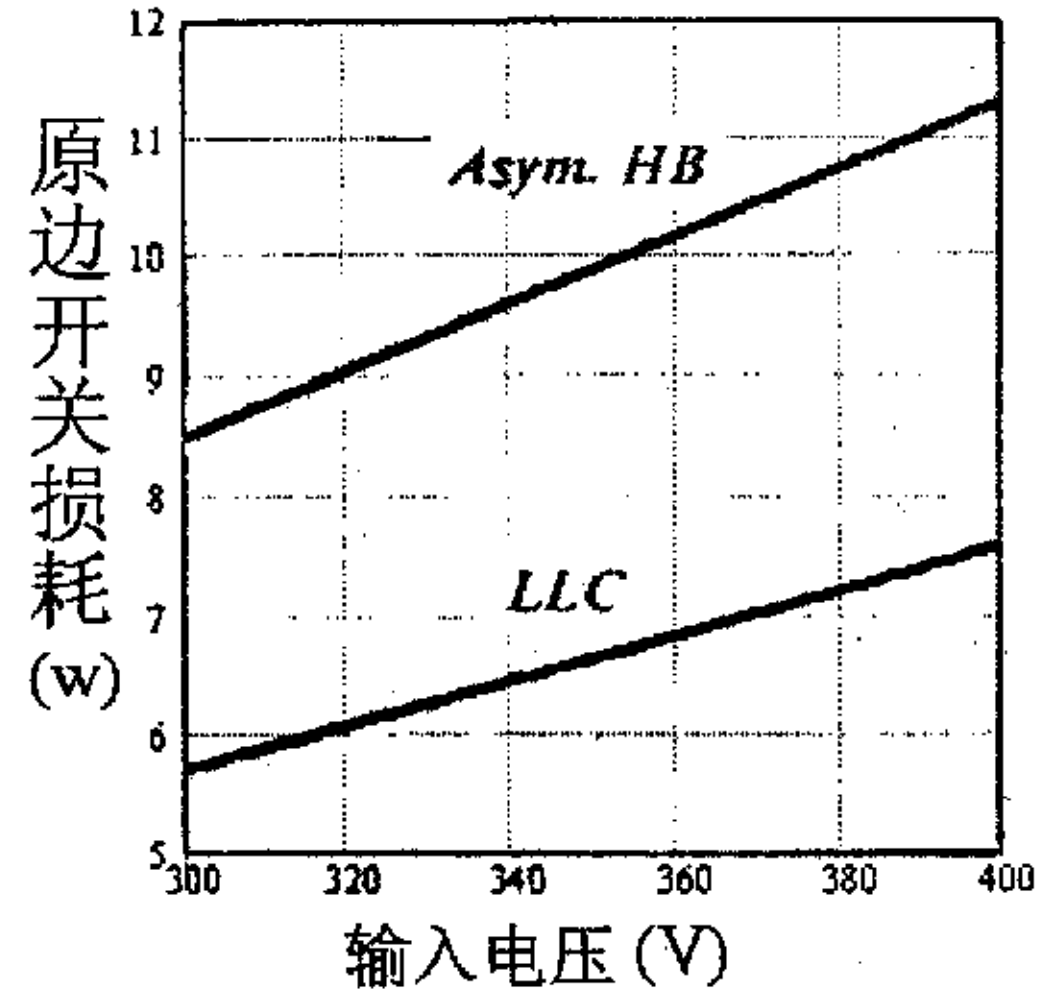


图 4—8 原边开关损耗比较

图 4—8 是不对称半桥电路与 LLC 谐振电路原边开关损耗的比较图^[18]。

由图可知，LLC 的开关损耗比 PWM 变换电路低 40%，在高开关频率下，总损耗的差别是非常重要的。

LLC 谐振变换电路的另一个优点是次级整流管的电压应力比不对称半桥低的多。不对称半桥变换电路次级整流管的最高电压应力将大于 250V，因此，必须使用 300V 的二极管。而 LLC 谐振变换器的电压应力被限制在两倍的输出电压，可使用 150V 的肖特基二极管，减小次级导通损耗。比较时，PWM 变换电路使用 STTH-3003，正向压降为 1.1V。LLC 谐振变换电路选用 IXY SS2-015A，正向压降为 0.65V，这将使次级导通损耗从 22W 减小为 13W，也就提高了 1%的效率。分析时，整流二极管的反向导通损耗没有被考虑。PWM 变换电路的二极管在有负载电流时关断，电压应力 dv/dt 较大，反向恢复损耗非常高，而 LLC 谐振变换电路二极管在接近零电流时关断，因此反向恢复损耗减小许多。

表 4—1 显示了不对称半桥变换电路和 LLC 谐振变换电路的损耗分配图^[18]。不考虑次级反向恢复损耗，LLC 谐振变换电路比不对称半桥电路在效率上提高了 1.5%。

表 4—1 PWM 变换器与 LLC 变换器损耗对比

损耗	PWM	LLC
原边导通损耗	9.67	9.49
原边开关损耗	11.3	7.5
副边导通损耗	22.0	13.0
副边开关损耗	≥ 0	0
总损耗	≥ 42.97	29.99

4.1.4 测试结果

这部分，给出了不对称半桥和 LLC 谐振变换器的测试结果。图 4—9 是在 400V 输入电压，不同负载条件下，LLC 谐振变换电路与不对称半桥变换电路的功率比较图。图 4—10 是全载下，不同输入电压时两变换电压的效率比较图^[18]。

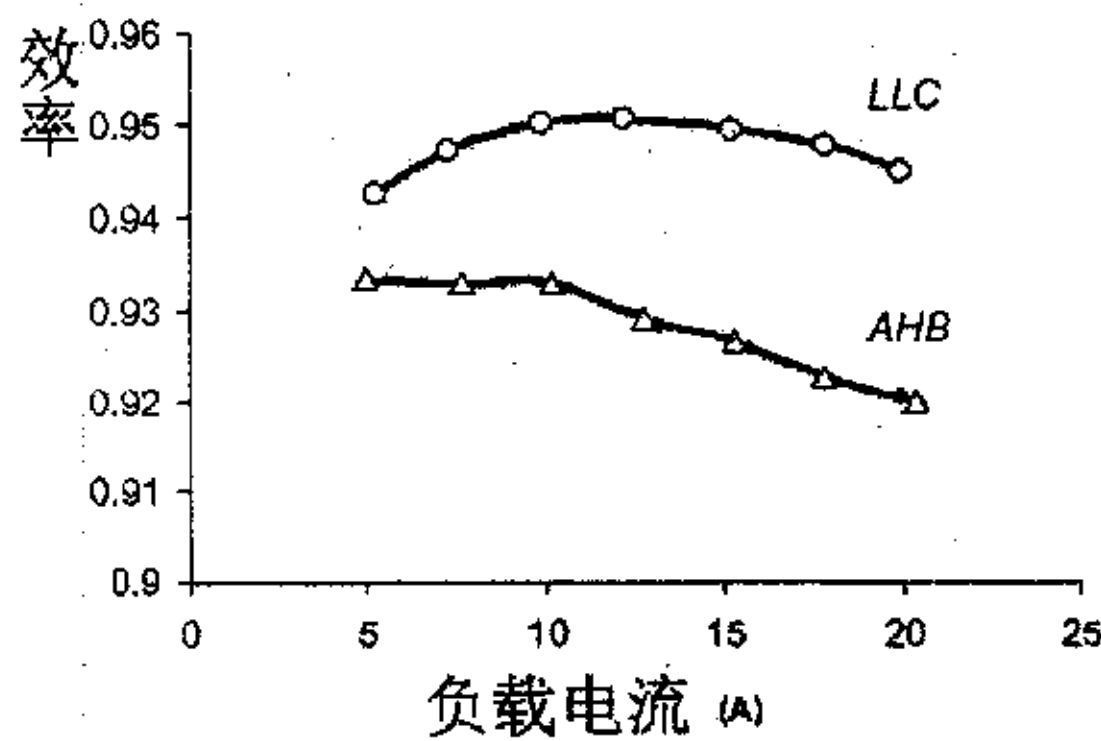


图 4—9 负载变化时的效率比较

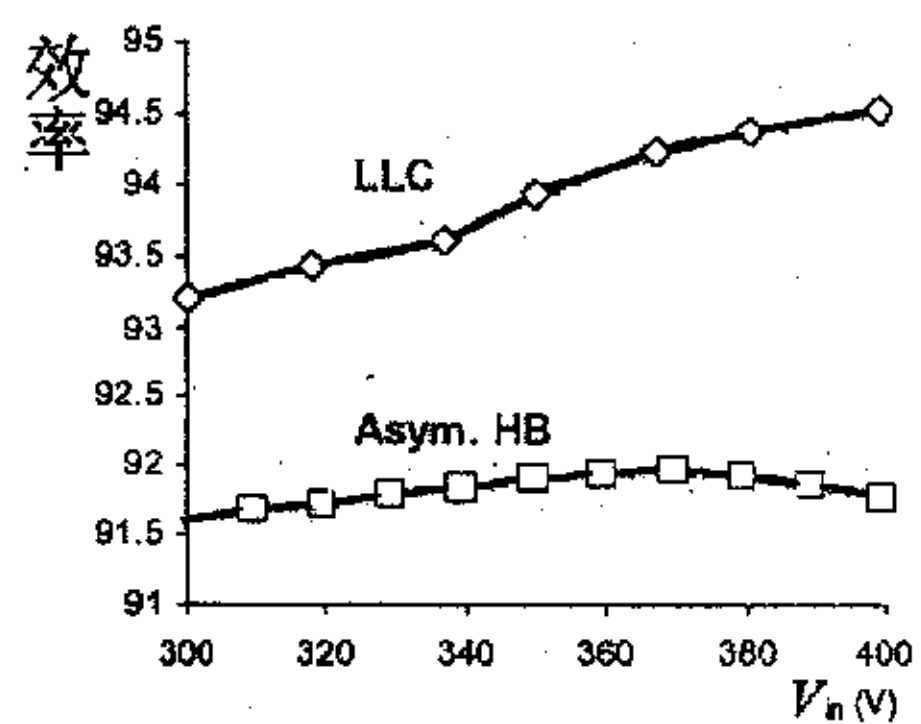


图 4—10 输入电压变化时的效率比较

4.2 应用于 LLC 谐振变换器中的集成磁件

4.2.1 介绍

与 PWM 变换器相比较，LLC 谐振变换器提供了更低的开关损耗和导通损耗，可得到更高的工作效率和发挥更大的高频工作潜能。而且，在高输入电压下，能够确定变换器的最佳特性，这在所知的 PWM 变换器中是不可能