

用于燃料电池电动汽车的双单端正激变换器

沈玉琢, 张剑飞, 张逸成, 任恒良

(同济大学沪西校区 电气工程系, 上海 200331)

摘要: 由于燃料电池的输出特性比较软, 难以直接与电动汽车的电机驱动器相匹配, 必须采用 DC/DC 变换器来改善其输出特性. 采用正激变换器必须要有磁复位电路才能正常工作. 单管正激变换器由于输出功率不大、效率不高, 不能满足电动汽车对 DC/DC 变换器大功率输出的要求, 而双单端正激变换器则能够从质量、效率、体积和可靠性等方面满足燃料电池电动汽车对 DC/DC 变换器的要求, 是合适的 DC/DC 变换器主电路方案. 据此分析比较了正激变换器的 4 种磁复位技术, 在此基础上, 详细分析了双单端正激变换器的工作原理和独特优点, 并对双单端正激变换器在燃料电池电动汽车中应用的可行性及相应的控制方案进行了研究.

关键词: 正激变换器; 磁复位; 燃料电池电动汽车

中图分类号: TN 624

文献标识码: A

文章编号: 0253-374X(2004)01-0113-05

Double Cycle Feed Forward Converter Used in Fuel Cell Electrical Vehicle

SHEN Yu-zhuo, ZHANG Jian-fei, ZHANG Yi-cheng, REN Heng-liang

(Department of Electrical Engineering, Tongji University West Campus, Shanghai 200331, China)

Abstract: Because the soft output characteristics of fuel cell are difficult to match with motor driver, DC/DC converter must be used to improve the output characteristics. Only with the magnetic reset circuit, can the forward converter work. Since the single cycle feed forward converter can not satisfy the demanding for electrical vehicle, the double cycle feed forward converter is suitable for the main circuit for DC/DC converter. This paper analyzes four kinds of magnetic reset technology of the forward converter. On this base, the paper analyzes the principle and special characteristics of the double cycle feed forward converter in details, and studies the application feasibility and controlling design of this converter in fuel cell electrical vehicle.

Key words: forward converter; magnetic reset; fuel cell electrical vehicle(FCEV)

燃料电池的输出特性比较软^[1], 难以直接与电机驱动器匹配, 因此必须采用 DC/DC 变换器来改善输出特性. 一般电动汽车要求 DC/DC 变换器输出额定功率为数十千瓦以上, 这就限制了普通 DC/DC 变换

器的应用. 为此, 本文分析比较了正激变换器的磁复位技术, 在此基础上, 对其在燃料电池电动汽车中应用的可行性及相应的控制方案进行了研究.

收稿日期: 2003-04-10

基金项目: 科学技术部“八六三”高技术研究发展规划重大资助项目(2001AA2501052)

作者简介: 沈玉琢(1963-), 男, 安徽涡阳人, 副教授, 工学硕士. E-mail: syzmi@mail.tongji.edu.cn

1 正激变换器与磁复位技术

正激变换器电路具有结构简单、可以多路输出等优点.其中采用变压器不仅能够实现电气隔离,而且由于变压器本身具有变压功能,还能扩大变换器的应用范围.但是这类变换器也有其固有的缺陷,即其中的变压器必须采用磁复位技术,为此需要引入磁复位电路,否则变压器的磁通将会不断增加,最终导致磁芯饱和而毁坏.

正激变换器磁复位的基本思路是:实现变压器原边绕组(或副边绕组)上的正向电压伏秒面积等于负向电压伏秒面积.正激变换器常用的磁复位技术有绕组复位、阻容二极管(RCD)复位、电感电容二极管(LCD)复位和有源箝位等方法^[2].以下分析比较这 4 种磁复位技术,并提出各自的适用场合.

1.1 绕组复位

图 1 为绕组复位正激变换器原理图,复位绕组 w_3 与变压器 T_{X1} 绕在同一铁芯上,复位绕组 w_3 与变压器原边绕组 w_1 的匝数比为 K_{13} .变压器副边绕组 w_2 , D_2, D_3, L_f, C_f 和 R_{Ld} 构成输出电路.

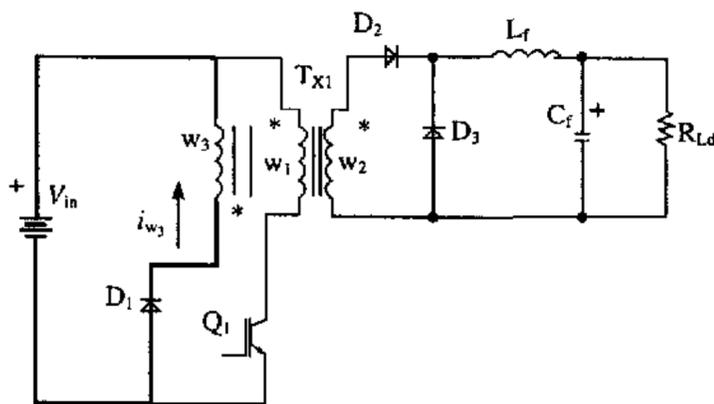


图 1 绕组复位正激变换器原理图
Fig.1 Round reset forward converter

当开关管 Q_1 关断时,变压器中的励磁电流转移到复位绕组 w_3 上,这时加在原边绕组上的电压大小为 $K_{13} V_{in}$,方向与 V_{in} 相反,铁芯去磁,铁芯中磁通 Φ 逐渐减小,当二极管 D_1 的电流 i_{w_3} 降为零时,变压器完成磁复位.

1.2 RCD 复位

图 2 为 RCD 复位正激变换器原理图,图中箝位电阻 R_c 、电容 C_c 和二极管 D_1 构成磁复位电路, i_p 为复位电流.其中箝位电容 C_c 必须足够大,其两端电压 V_{Cc} 基本保持不变,可把它看作电压源.

关断开关管 Q_1 , Q_1 的结电容 C_s 被充电,当 C_s 的电压上升到 V_{in} 时,励磁电流达正向最大值,继续上升

时,加在变压器原边绕组的电压为负向电压;这时变压器的励磁电感与结电容 C_s 谐振工作,励磁电流流经箝位二极管 D_1 ,从正向最大值开始减小,结电容 C_s 电压被箝在 $V_{in} + V_{Cc}$,加在变压器原边绕组电压大小变为 V_{Cc} ,方向为负,励磁电流逐步下降到零.箝位二极管 D_1 自然截止,结电容 C_s 开始放电,励磁电流从零开始反向增加.当结电容电压下降到输入电压 V_{in} 时,励磁电流达到负向最大值;结电容电压继续下降,开通 Q_1 ,变压器原边绕组电压为正,励磁电流又开始反向减小到零时,变压器完成磁复位.

1.3 LCD 复位

图 3 为 LCD 复位正激变换器原理图,图中复位电感 L_c 、箝位电容 C_c 、辅助二极管 D_{C1} 和 D_{C2} 构成复位电路, i_p 为复位电流.

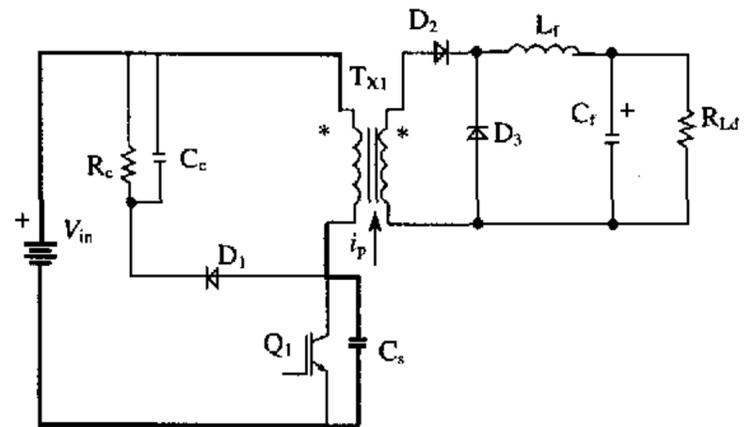


图 2 RCD 复位正激变换器原理图
Fig.2 RCD reset forward converter

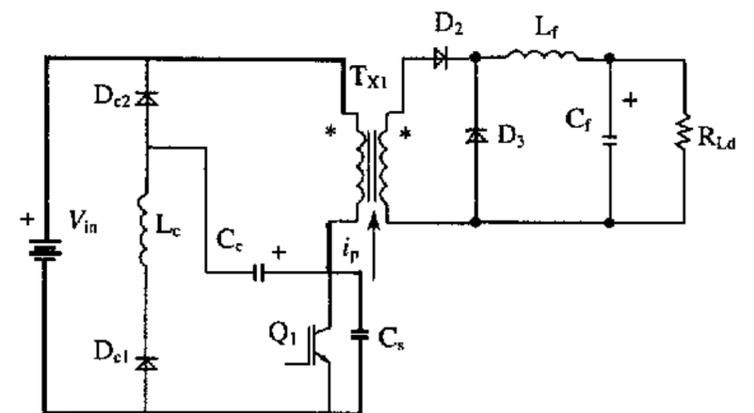


图 3 LCD 复位正激变换器原理图
Fig.3 LCD reset forward converter

当 Q_1 导通, L_c 和 C_c 谐振工作,箝位电容 C_c 电压从 $-V_{Ccm}$ 变为 $+V_{Ccm}$, V_{Ccm} 为电容 C_c 两端的最大电压值.当 Q_1 关断时,箝位电容 C_c 被放电, Q_1 的结电容 C_s 被充电到最大值 $V_{in} + V_{Ccm}$ 时,变压器原边绕组电压大小为 V_{Ccm} ,方向为负,副边绕组电压也为负,励磁电流开始线性减小到零,箝位二极管 D_{C1} 自然关断.结电容 C_s 开始放电,励磁电流从零开始反向增加,当结电容电压降到 V_{in} 时,达反向最大

值,结电容电压继续下降,变压器原边绕组电压为负,励磁电流又开始反向减小到零,铁芯去磁,变压器完成磁复位。

1.4 有源箝位

图4为有源箝位正激变换器原理图,图中开关管 Q_C 、二极管 D_C 和箝位电容 C_c 构成磁复位电路。箝位电容 C_c 足够大,其电压保持不变,可以看成电压为 V_{C_c} 的电压源。

当开关管 Q_1 和 Q_C 都关断时, Q_1 的结电容 C_s 和箝位电容 C_c 被充电,励磁电流开始减小,当 C_s 电压上升到最大值 $V_{C_c} + V_{in}$ 时,励磁电流减小到零,箝位二极管 D_C 导通;零电压开通 Q_C 后,二极管 D_C 自然截止,励磁电流经 Q_C 反向流动。当关断 Q_C 后,励磁电流流过结电容 C_s , C_s 开始放电,励磁电流继续反向增加到最大值,当结电容电压下降到低于 V_{in} 时,变压器原边绕组电压为正,励磁电流又开始反向线性减小到零时,变压器完成磁复位。

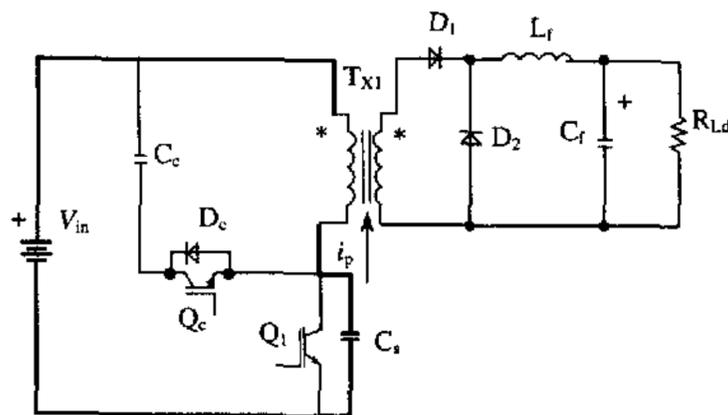


图4 有源箝位正激变换器原理图
Fig.4 Active reset forward converter

1.5 4种复位电路的性能比较

4种复位电路的共同点是:主开关管 Q_1 都是零电压关断,容性开通,有开通损耗。

以下讨论4种复位电路的不同点。

绕组复位电路:为了减小开关管关断时的电压尖峰,复位绕组和原边绕组要紧密耦合,因此变压器的设计和制作比较复杂。主开关管电压应力为 $2V_{inmax}$,变压器是双向不对称磁化,变换效率中等。

RCD复位电路:电路结构简单,成本低廉,主开关管电压应力小于 $2V_{inmax}$,但是部分励磁能量消耗在箝位网络中,变换效率低。适合于容量小、成本要求十分严格,而对变换效率要求不高的场合。

LCD复位电路:箝位网络中不含电阻,损耗小,主开关管电压应力小于 $2V_{inmax}$,但是箝位元件在谐振时峰值电流较大,增加了开关管的电流定额和通态损耗,变换效率中等。

有源箝位电路:变压器是双向对称磁化的,得到了充分的利用,因此占空比可以大于0.5,适合于输入电压变化范围大的场合,主开关管电压应力小于 $2V_{inmax}$,箝位开关管实现了零电压开通和关断。适合于对变换效率要求高、输出功率比较大的场合。

2 用于燃料电池电动汽车的双单端正激变换器

2.1 双单端正激变换器工作原理

采用图5所示的双单端正激变换电路^[3],变压器既可以磁复位,复位时能量也可以传送到负载,变换器的输出功率是单管正激变换电路的2倍以上。

图5中,电感 L_1 和 L_2 是倍流整流电路电感。 D_5 和 D_6 是整流二极管。变压器的原边有2个绕组 w_1 和 w_2 ,所以绕制这种变压器时绕组要紧密耦合,以减小漏感,提高变换效率。 D_1, D_2, D_3 和 D_4 是功率二极管,不仅可以起到续流作用,在功率开关管关断时还可以减小开关管的电压应力。 Q_1, Q_2, Q_3 和 Q_4 是功率开关管,一般采用绝缘栅双极性晶体管(IGBT),与功率场效应晶体管(Power MOSFET)相比,虽然工作频率有所降低,但是IGBT的导通压降比MOSFET小得多,只有2V左右,因此可以大大降低变换电路的通态损耗,提高变换器的转换效率,而且随着电力电子技术的日益成熟,在高频大功率应用场合,IGBT将会取代MOSFET成为主流。

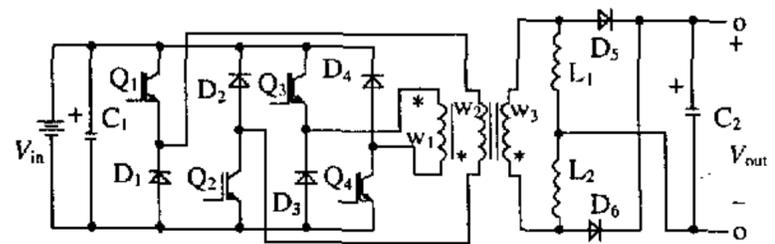


图5 双单端正激变换电路

Fig.5 Double cycle feed forward converter

通过控制 Q_1, Q_2 的同时导通与关断,使绕组 w_2 工作,副边绕组 w_3, L_2 和 D_6 构成输出整流回路;控制 Q_3, Q_4 的同时导通与关断,使绕组 w_1 工作,副边绕组 w_3, L_1, D_5 和负载 R_L 构成输出整流回路。通过以上工作方式,轮流控制两组功率开关管导通与关断,变压器原边绕组 w_1 和 w_2 轮流工作,由于绕组 w_1 和 w_2 绕向相反,与有源箝位技术一样,变压器得以双向对称磁化,得到了充分利用,并且无需另加磁复位电路,简化了电路的设计制作。

2.2 仿真结果与分析

图6给出了双单端正激变换电路的仿真波形,仿真所用的主要数据为:输入直流电压 $V_{in} = 200$ V,输出直流电压 $V_{RLD} = 360$ V,变压器原副边匝比 $K = 3$,开关频率 $f_s = 10$ kHz.图6的上半部分是变压器的磁感应强度曲线,下半部分近似方波的是变压器原边电压波形,另外一条曲线是负载电压波形.从图中可以看出,变压器得到了双向对称磁化,也没有出现偏磁现象,得到了很好的利用.

2.3 双单端正激变换器用于燃料电池电动汽车中的可行性

2.3.1 双单端正激DC/DC变换器的优点

根据以上对双单端正激变换器电路的分析,可以得出该电路具有以下优点:

(1) 采用脉冲脉宽调制(PWM)功率变换技术,功率开关管的驱动电路简单,没有桥式变换器的驱动电路那么复杂,提高了电路工作的可靠性.

(2) 保留了单管正激变换电路功率开关管不直通的最大优点,不会出现桥式电路同一桥臂上的功率开关管直通导致器件损坏无法正常工作的现象,其可靠性比采用桥式电路的可靠性高得多.这对于作为交

通工具的燃料电池电动汽车来说是至关重要的.

(3) 采用双单端正激变换电路拓扑形式,可以得到和桥式电路一样的变换功率,易于实现大功率输出.能满足燃料电池电动汽车用DC/DC变换器的大功率输出要求.

(4) 隔离变压器的副边输出采用倍流整流电路,无须采用中间抽头变压器,不仅输出纹波小,而且变压器的利用率也高.

(5) 主电路采用峰值电流控制模式,动态响应快,控制电路简单,还可抑制变压器的偏磁现象,便于实现均流控制.

(6) 采用双单端正激变换器升压变压器,副边电压的波动耦合到原边,电压波动幅值会大大减小.这样可以避免对燃料电池的冲击,有效地保护燃料电池,延长其使用寿命.

(7) 采用双单端正激变换器,不仅能够实现电气隔离,还易于实现高频化.工作频率的提高,可以减小变换器的体积,减轻变换器的质量,提高变换器的效率,从而满足电动汽车对DC/DC变换器体积小、质量轻、效率高的要求.

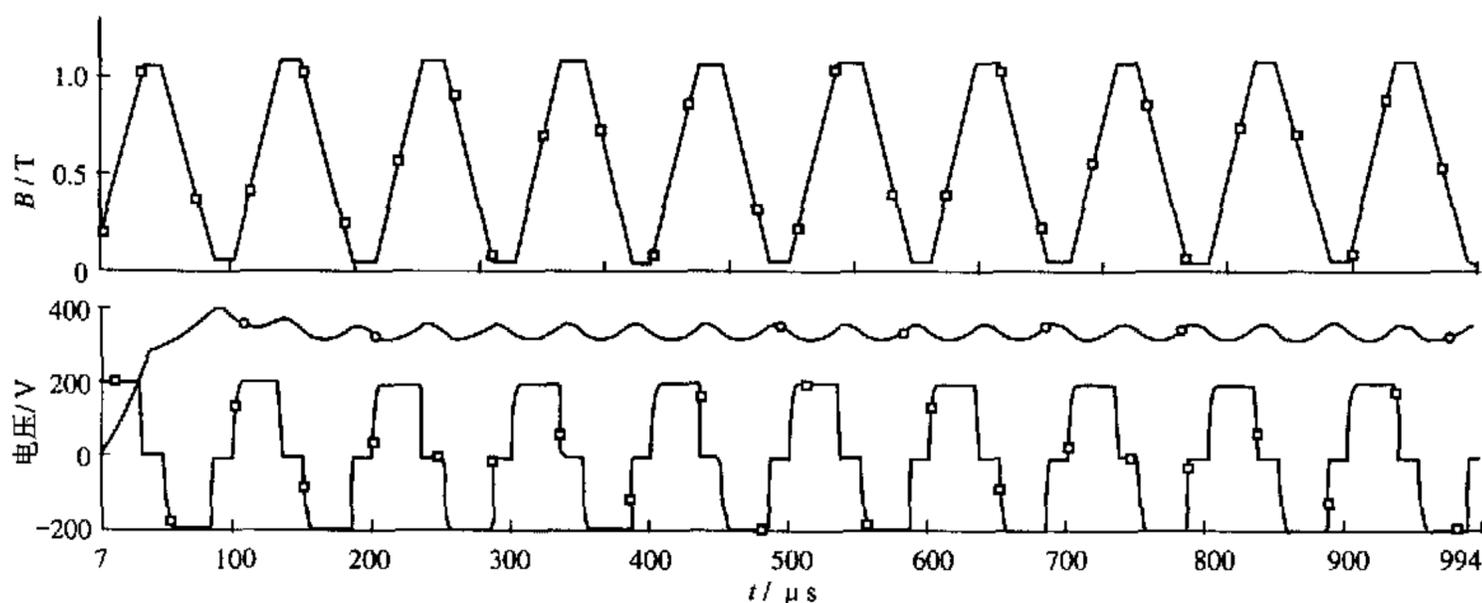


图6 双单端正激变换电路仿真波形

Fig.6 Simulation wave of the double cycle feed forward converter

2.3.2 双单端正激变换器用于燃料电池电动汽车时的控制方案

电动汽车在行驶过程中,会经常出现启动、加速、急刹车和上坡、下坡等不同的工况转换,即燃料电池的负载变化范围很大,因此对DC/DC变换器的输出特性提出了很高的要求.除此以外,燃料电池电动汽车还要求DC/DC变换器体积小、质量轻、效率高、可靠性高.这些技术指标要求对于作为交通工具的燃料电池电动汽车来说是至关重要的.

由以上分析可知,正激变换器必须要有磁复位

电路才能正常工作,而单管正激变换器用来磁复位的能量不是消耗在复位网络中就是回馈给电源,并没有传送到负载,所以变换器输出功率不大,效率不高,不能满足电动汽车对DC/DC变换器大功率输出的要求.特别对于燃料电池电动汽车,不允许DC/DC变换器有能量向燃料电池回馈,否则会给燃料电池造成损坏.而双单端正激变换器具有以上所述优点,能够很好地从质量、效率、体积和可靠性等方面满足燃料电池电动汽车对DC/DC变换器的要求,是合适的DC/DC变换器主电路方案,如图7所示.

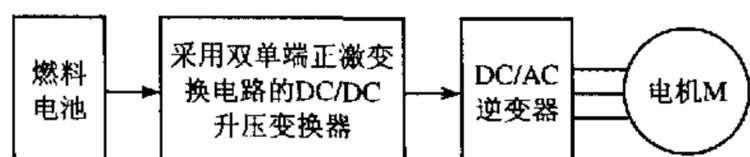


图 7 正激变换器用于燃料电池电动汽车

Fig.7 Forward converter applied in FCEV

用作燃料电池电动汽车 DC/DC 变换器主电路的双单端正激变换器的控制方案如图 8 所示. 其中的数字信号处理(DSP)芯片采用美国德州仪器公司的 TMS320 系列, 利用 DSP 的高速处理和高精度性能, 不仅可以快速实现电流、电压双环反馈控制和高频脉冲脉宽调制(PWM)脉冲, 满足主电路高频工作的要

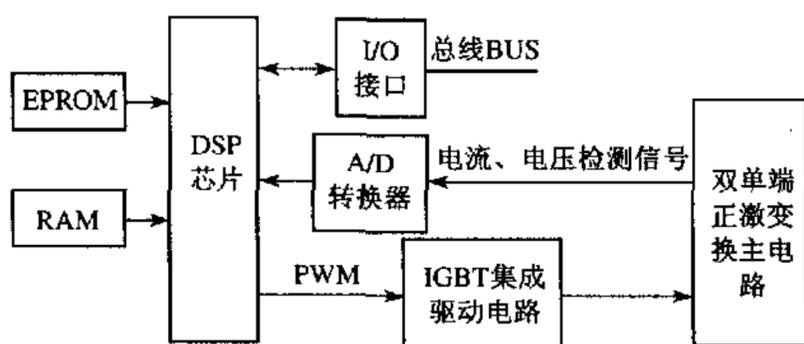


图 8 变换器控制系统

Fig.8 Control system of the converter

求, 还可以方便地和汽车总线接口, 满足汽车智能化需求. DSP 系统以数字信号处理为基础, 受环境温度以及噪声影响较小, 可靠性高, 编程调试方便. 图 8 中 RAM 为外部存储器, EPROM 为外部可编程存储器.

3 结论

(1) 分析比较了单管正激变换器的绕组复位、RCD 复位、LCD 复位和有源箝位等磁复位方法, 指出这类单管正激变换器难以满足燃料电池电动汽车对 DC/DC 变换器的要求.

(2) 分析了双单端正激变换器的工作原理和独特优点, 指出双单端正激变换器电路是适用于燃料电池电动汽车 DC/DC 变换器主电路的可行方案.

参考文献:

- [1] 李 瑛, 王林山. 燃料电池[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [2] 阮新波. 直流开关电源的软开关技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [3] 李爱文. 现代通信基础开关电源的原理和设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

·下期文章摘要预报·

时间 - 空间 GIS 时空数据库基础模型初探

刘妙龙, 吴原华

时间 - 空间尺度的数据表达、基础模型的研究与处理是时间地理信息系统发展的关键. 时间地理信息系统(TGIS)的建立, 可以记录历史的地理实际状况, 有助于解释与分析地理变化的动力学过程, 研究导致地理现象时间演化的各种相关过程与机理. 时间 - 空间数据的一体化定义与表达、基础模型的类型体系划分、模型构筑与模拟实现是 TGIS 研究与建立的基础. 从 TGIS 提出伊始, 基础模型基本上按照应用中可能进行的查询类型——什么、哪里、何时(分别对应于空间、特征与时间), 或按照所使用的建模工具——实体关系图(ERD)、语义模型(SM), 或面向对象模型(OOM)等进行分类. 因此通过对 TGIS 中不同尺度、不同分类方法所定义的基础模型的区别与联系等的分析, 尝试在基本、组合、高级 3 个层次上划分与研究基础模型, 讨论相应的模型表述, 为进一步研究 TGIS 模型提供一些设想和参考.