

用于正交发生器 RC 多相网络特性研究

胡一明^{*①} 余国文^② 张元发^②

^①(空军预警学院研究生管理大队 武汉 430019)

^②(空军预警学院五系 武汉 430019)

摘要: 正交信号发生器广泛应用于正交调制解调器、镜像抑制变频器等, RC 多相网络因其结构简单, 良好的线性性能而被作为常用的正交发生器。该文基于复信号性质及矩阵理论, 推导了 RC 多相网络传输函数的详细表达式, 构建了相关参数, 分析了 RC 多相网络输出信号 I/Q 的平衡特性, 为设计高平衡度的正交发生器提供了理论依据。

关键词: 正交信号发生器; RC 多相网络; 正交信号; 正交调制; I/Q 不平衡度

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2013)04-0476-05

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2013.13069

Research on Characteristics of RC Polyphase Network for Quadrature Signal Generator

Hu Yi-ming^① Yu Guo-wen^② Zhang Yuan-fa^②

^①(Department of Graduate Management, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

^②(No.5 Department, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: The quadrature signal generator is widely used in devices such as the quadrature modulator and image rejection frequency converter. An RC polyphase network is commonly used as a quadrature signal generator because of its simple structure and perfect linear performance. This study derives explicit transfer functions for the RC polyphase network based on the complex signal properties and the matrix theory. Moreover, build-related parameters are determined to analyze the I/Q amplitude and phase balance characteristic of the RC polyphase network, thus providing a theoretical guideline for the design of a high-balance quadrature signal generator.

Key words: Quadrature signal generator; RC polyphase network; Quadrature signal; Quadrature modulation; I/Q imbalance

1 引言

宽带微型高性能的射频集成电路 (RF Integrated Corporation, RFIC) 是射频电路的发展趋势, 其代表之一是实现射频系统的芯片化 (System on a Chip, SoC)。集成的正交调制解调器是射频 SoC 的重要组成部分, 它需要正交发生器为其提供良好的正交差分本振信号^[1], 因而正交发生器性能好坏影响着射频 SoC 的性能。

微型集成的正交发生器在窄频带的一种常用设计方法是 RC-CR 移相法^[2], RC-CR 移相网络通过将输入信号分别移相 $\pm 45^\circ$ 来实现正交。文献^[2]中设计的正交发生器在 900 MHz 处, I/Q 幅度不平衡度 0.35 dB, 相位不平衡度达到了 0.1° 。另一种设计方法是将正交压控振荡器 (Quadrature Voltage

Controlled Oscillator, QVCO) 交叉耦合连接^[3], 文献^[4]设计了一个低功耗正交差分输出的 QVCO, 应用于 2.4 GHz 的锁相环, 降低了功耗并改善了其噪声系数, I/Q 相位不平衡度 2.21° 。此外, RC 多相网络法也可用作设计宽带高性能的正交发生器^[5]。RC 多相网络具有结构简单, 易于集成^[6], 线性度高^[7], 带宽可扩展的优点^[8]。

本文基于复信号性质及矩阵分析方法, 推导了 RC 多相网络及等效网络的传输矩阵和传输函数, 构建了相关参数, 并分析了这些参数与输出信号 I/Q 平衡之间的关系, 这些结论在往高阶推导时依旧适用, 最后基于理论分析设计了一个 3 阶 RC 多相网络构成的正交发生器, 其输出信号 I/Q 幅度不平衡度小于 0.1 dB, 相位不平衡度小于 0.1° 。

2 正交信号发生器

正交信号发生器广泛应用于现代雷达及通信系统中调制解调部分, 如图 1 所示。

2013-07-23 收到, 2013-10-09 改回; 2013-10-21 网络优先出版

国家部委基金资助课题

*通信作者: 胡一明 foeh001@163.com

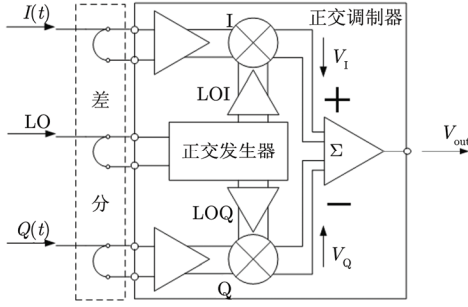


图1 正交调制电路结构

Fig. 1 The structure of quadrature modulation circuit

图1 中所示为一种典型的正交调制系统结构，设 ω_b 为基带信号角频率，基带信号 $I(t) = \cos \omega_b t$, $Q(t) = \sin \omega_b t$, ω_{LO} 本振信号角频率，3 路信号均差分后送入正交调制模块中，理想情况时：

I 路输出： $V_I = \cos \omega_b t \cos \omega_{LO} t$ ；

Q 路输出： $V_Q = \sin \omega_b t \sin \omega_{LO} t$ ；

调制输出表示为：

$$V_{out} = V_I - V_Q = \cos(\omega_b + \omega_{LO})t \quad (1)$$

一般情况时，正交发生器 I/Q 会失配，设 ε 和 σ 分别表示正交本振信号的幅度和相位不平衡度，此时 I、Q 路的输出分别如下：

$$\begin{cases} V'_I = \cos \omega_b t \cos \omega_{LO} t \\ V'_Q = (1 + \varepsilon) \sin \omega_b t \sin(\omega_{LO} t + \sigma) \end{cases}$$

相加后其输出信号如下：

$$\begin{aligned} V'_{out} = & \frac{1 + (1 + \varepsilon) \cos \sigma}{2} \cos(\omega_{LO} + \omega_b)t \\ & - \frac{1 - (1 + \varepsilon) \cos \sigma}{2} \cos(\omega_{LO} - \omega_b)t - \frac{(1 + \varepsilon) \sin \sigma}{2} \\ & \cdot [\sin(\omega_{LO} + \omega_b)t - \sin(\omega_{LO} - \omega_b)t] \quad (2) \end{aligned}$$

可以看出，此时输出不仅有上变频分量 $\omega_{LO} + \omega_b$ ，还产生了镜像分量 $\omega_{LO} - \omega_b$ 。

由上面的分析可知，正交发生器 I/Q 幅度和相位不平衡将使调制器产生镜频，进而影响通信或雷达系统的工作性能。因此，需对正交发生器的正交特性进行研究，以指导设计高平衡度的正交发生器。下面主要讨论基于 RC 多相网络设计宽带高平衡正交发生器的方法。

3 RC 多相网络

本文提出的 RC 多相网络是由电阻和电容组成的一个无源线性网络，其作为正交发生器时的电路结构如图 2 所示。

图中 4 个输入信号分别是 V_{inIp} , V_{inQp} , V_{inIn} , V_{inQn} ，表示一组正交差分的输入信号，4 个输出信

号依次为 V_{outIp} , V_{outQp} , V_{outIn} , V_{outQn} ，根据无源线性网络的叠加定理，可得出下面关系式：

$$\begin{cases} V_{outIp} = V_{inIp} \frac{1}{1 + j\omega RC} - V_{inQn} \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} \\ V_{outQp} = V_{inQp} \frac{1}{1 + j\omega RC} - V_{inIp} \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} \\ V_{outIn} = V_{inIn} \frac{1}{1 + j\omega RC} - V_{inQp} \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} \\ V_{outQn} = V_{inQn} \frac{1}{1 + j\omega RC} - V_{inIn} \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} \end{cases} \quad (3)$$

为简化公式，令 $h = 1/(1 + j\omega RC)$, $h' = -j\omega RC/(1 + j\omega RC)$ ，则式(3)可以写作：

$$\mathbf{V}_{out} = \mathbf{H} \mathbf{V}_{in} \quad (4)$$

其中： $\mathbf{V}_{in} = [V_{inIp}, V_{inQp}, V_{inIn}, V_{inQn}]^T$ ， $\mathbf{V}_{out} = [V_{outIp}, V_{outQp}, V_{outIn}, V_{outQn}]^T$ ，分别表示输入和输出信号，

$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h & 0 & 0 & h' \\ h' & h & 0 & 0 \\ 0 & h' & h & 0 \\ 0 & 0 & h' & h \end{bmatrix}$ 是 1 阶 RC 多相网络的传输矩阵。

4 基于 RC 多相网络正交发生器的设计与实现

为实现 S 波段微型高性能的正交调制器，本文需设计实现一个工作在 S 波段，幅度不平衡度小于 0.1 dB，相位不平衡度小于 0.1° 的正交发生器。

4.1 正交发生器的设计

为便于讨论，对式(4)描述的图 2 网络进行等效变换，定义：

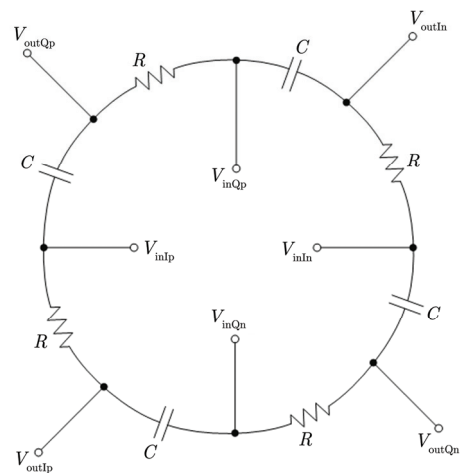


图2 RC 多相网络

Fig. 2 RC Polyphase network

$$\begin{cases} V_{inI} = V_{inIp} - V_{inIn} \\ V_{inQ} = V_{inQp} - V_{inQn} \\ V_{outI} = V_{outIp} - V_{outIn} \\ V_{outQ} = V_{outQp} - V_{outQn} \end{cases} \quad (5)$$

式中 V_{inI}, V_{inQ} 表示输入的 I, Q 信号, V_{outI}, V_{outQ} 表示输出的 I, Q 信号。则图 2 所示的网络等效为一个 2 输入 2 输出的 4 端口网络, 如图 3 所示。

由式(4)和式(5)可以推出该网络的传输关系:

$$\begin{bmatrix} V_{outI} \\ V_{outQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h & -h' \\ h' & h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{inI} \\ V_{inQ} \end{bmatrix} \quad (6)$$

将输入和输出信号用复数形式表示:

$$\begin{cases} V_{in} = V_{inI} + jV_{inQ} \\ V_{out} = V_{outI} + jV_{outQ} \end{cases}$$

至此, 可以得出该网络的传输函数 G , 并引入参数 S_I, S_Q 及 S_{QI} , 定义如下:

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = S_I + jS_Q \quad (7)$$

解得: $S_I = h, S_Q = h'$, 且 $S_{QI} = S_Q / S_I = h' / h$ 。

参数 S_I, S_Q 描述了传输矩阵 $\begin{bmatrix} h & -h' \\ h' & h \end{bmatrix}$ 对于输入信号的旋转和衰减作用, S_{QI} 描述了输出信号 I/Q 的平衡度, 并有以下关系:

$$\text{I/Q 相位不平衡度: } P_{\text{miss}} = \left| \frac{\pi}{2} - \angle S_{QI} \right|$$

$$\text{I/Q 幅度不平衡度: } K = \left| 20 \lg |S_{QI}| \right|$$

又 $S_{QI} = h' / h = -j\omega RC$, 可见输出的两路信号始终正交, 因而设计主要考虑两点: 一是带宽的扩展; 二是实现高的 I/Q 幅度平衡(即 K 值要小)。

(1) 带宽扩展的设计。

若将两个 RC 多相网络级联, 如图 4 所示。

第 1 阶的输出 V_{1outI}, V_{1outQ} 作为第 2 阶的输入, 最后输出 V_{2outI}, V_{2outQ} 。将式(6)经过级联运算, 并同样利用式(7)的定义, 可以得出此时 2 阶 RC 多相网络的输出信号 I/Q 幅度不平衡度:

$$K_2 = \left| 20 \lg \frac{2(\omega/\omega_0)}{1 + (\omega/\omega_0)^2} \right| \quad (8)$$

其中 $\omega_0 = 1/RC$, 对比 1 阶时的情形:

$$K_1 = \left| 20 \lg |-j\omega RC| \right| = \left| 20 \lg \frac{\omega}{\omega_0} \right| \quad (9)$$

取 $K_1 = K_2 = k > 0$, 解式(9), 得相对带宽



图 3 等效 4 端口 RC 多相网络

Fig. 3 The equivalent of four port RC polyphase network

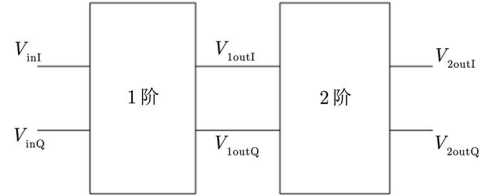


图 4 2 阶 RC 多相网络

Fig. 4 Two stage RC polyphase network

$\Delta\omega_1 = 10^{k/20} - 10^{-k/20}$; 而由式(8), 可解得相对带宽 $\Delta\omega_2 = 2(10^{k/10} - 1)^{1/2}$ 。运算可知 $\Delta\omega_1 < \Delta\omega_2$, 可见在输出信号 I/Q 幅度不平衡度一致的情况下, 级联可以扩展带宽。

(2) I/Q 幅度平衡的设计。

若将 S_I, S_Q 的角度分别记为 $\angle S_I, \angle S_Q$, 由式(7)得:

$$\angle S_I = \arctan(-\omega RC)$$

$$\angle S_Q = \arctan\left(\frac{1}{\omega RC}\right)$$

易知 $\angle S_Q - \angle S_I = \pi/2$, 令 $\angle S_Q = \alpha$, 可得参数 S_I, S_Q 对输入信号的转换关系如图 5。

从图 5 中可见, 要使 I/Q 幅度不平衡度小, 则需使 S_I, S_Q 幅值之差小, 理想情况时 $|S_I| = |S_Q|$, 此时 $K = 0$ dB, 输出信号 I/Q 幅度完全平衡, 解得 $RC = 1/\omega$ 。可见, 在设计时, 保证 $|S_I|$ 与 $|S_Q|$ 接近, 即 $1/RC$ 取值越靠近中心频率 ω , 输出信号的 I/Q 幅度不平衡度越小。

此外, 若为多阶 RC 多相网络, 以图 4 所示 2 阶网络为例, 其输入输出信号如图 6 所示。

图 6 中, V_{out1} 为第 1 阶输出 V_{1outI} 与 V_{1outQ} 的合成, 其作为第 2 阶的输入, V_{out2} 为第 2 阶输出 V_{2outI} 与 V_{2outQ} 的合成。若输出信号 I/Q 完全平衡时, 其合成信号应落在图中所示的 I/Q 平衡线位置(该线在 I, Q 坐标轴夹角的平分线位置), 因而可以将输出信号 I/Q 的不平衡程度用其合成信号与 I/Q 平衡线的夹角大小来衡量, 记为 β 。

从图 6 中可以看出, 在第 2 阶 RC 网络中, 只须将 $\angle S_I$ 适当减小, 并将 $|S_Q|$ 适当增大, 就可使输出 V_{out2} 向着 I/Q 平衡线靠近, 即图中所示 $\beta_2 < \beta_1$ 。可见在多阶 RC 多相网络中, 通过调整每阶的 S_I ,

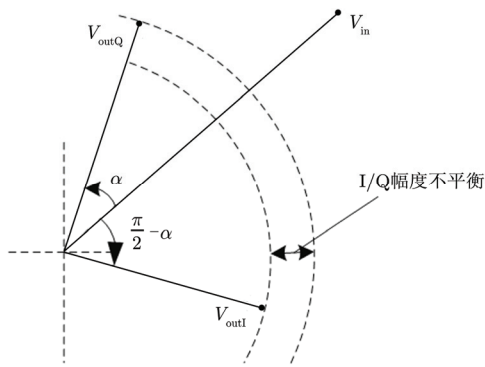


图 5 S_I, S_Q 对输入信号的转换

Fig. 5 S_I, S_Q Transformation of input signal

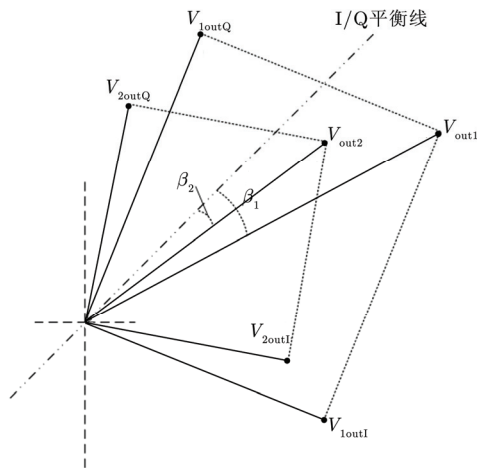


图 6 2 阶 RC 多相网络输入输出关系

Fig. 6 Two stage RC polyphase network input/output relationship

S_Q , 在实现带宽扩展的同时, 还可以改善输出信号 I/Q 的平衡度。

4.2 宽带高平衡正交发生器的实现

根据前面的分析, 为满足设计指标要求, 本文设计了由 3 阶 RC 多相网络构成的正交发生器, 如图 7 所示。

图 7 中每阶设计的 S_I, S_Q 参数如下:

$$\text{第 1 阶: } \begin{cases} S_I = 0.80 - j0.40 \\ S_Q = -0.20 - j0.40 \end{cases}$$

$$\text{第 2 阶: } \begin{cases} S_I = 0.91 - j0.29 \\ S_Q = -0.09 - j0.29 \end{cases}$$

$$\text{第 3 阶: } \begin{cases} S_I = 0.96 - j0.21 \\ S_Q = -0.04 - j0.21 \end{cases}$$

图 8 所示是正交发生器输出 I/Q 相幅度和相位不平衡度曲线, 可见在 S 波段内, 其幅度不平衡度小于 0.1 dB, 相位不平衡度小于 0.1° 。

5 总结

本文基于信号的复数表示及矩阵分析方法, 分析了 RC 多相网络作为正交信号发生器的特性, 提出了衡量 RC 多相网络特性指标的参数, 分析了这些指标参数与 RC 多相网络 I/Q 幅度及相位平衡的关系, 最后设计了一个 S 波段, 幅度不平衡小于 0.1 dB, 相位不平衡度小于 0.1° 的正交发生器。根据级联网络的特性, 该推导结论及正交发生器的设计方法在高阶 RC 多相网络中依然适用, 为设计宽带高平衡度的 RC 多相网络提供了理论指导。

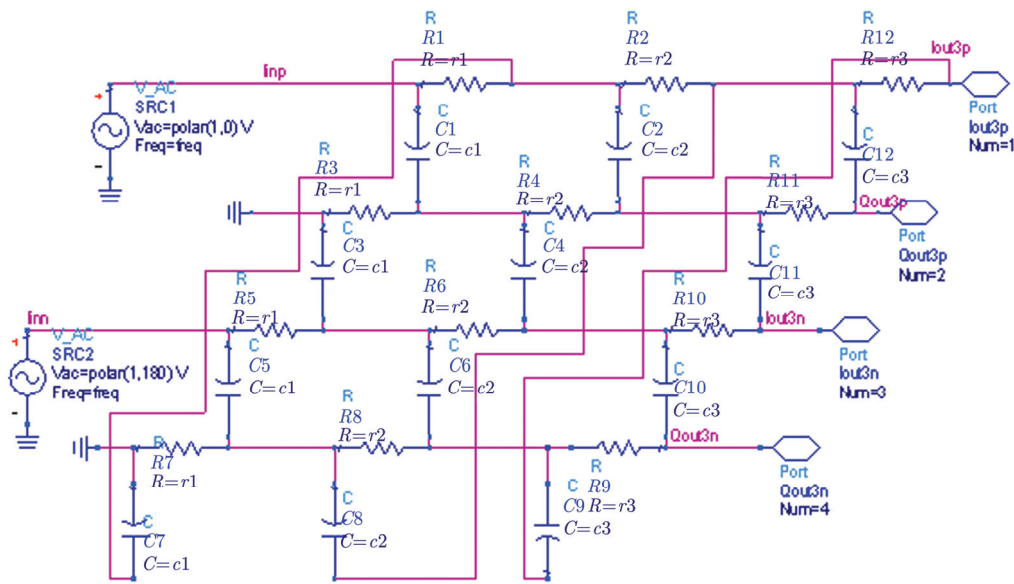


图 7 3 阶 RC 多相网络

Fig. 7 Three stage RC polyphase network

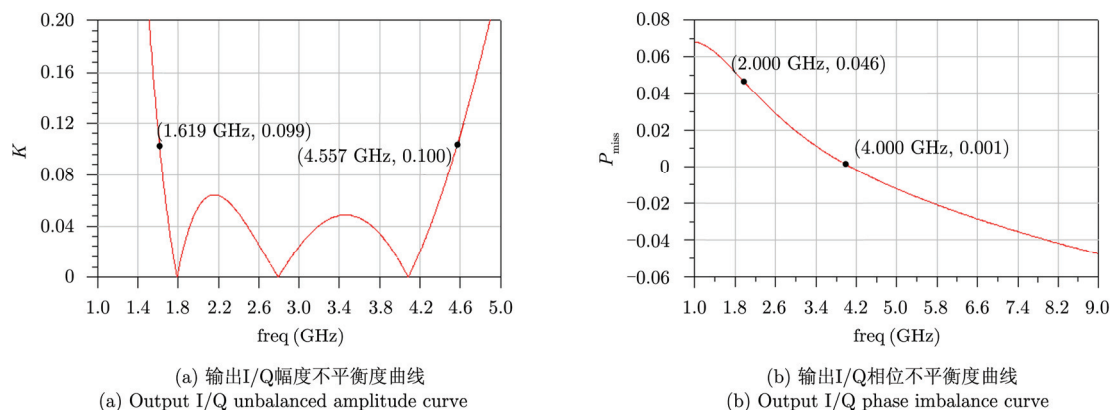


图8 3阶RC正交发生器I/Q不平衡度曲线

Fig. 8 The I/Q unbalanced curve of 3 stage quadrature signal generator

参考文献

- [1] 李智群, 王志功. 射频集成电路与系统[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 293-294.
Li Zhi-qun and Wang Zhi-gong. Radio Frequency Integrated Circuit and System[M]. Beijing: Science Press, 2008: 293-294.
- [2] Maloberti F and Signorelli M. Quadrature waveform generator with enhanced performances[C]. 1998 Symposium on VLSI Circuits, Digest of Technical Papers, Honolulu, USA, June 11-13, 1998: 56-57.
- [3] Rofougaran A, Rael J, and Rofougaran M. A 900 MHz CMOS LC-oscillator with quadrature outputs[C]. IEEE International Solid-State Circuits Conference, Los Angeles, CA, USA, Feb. 1996: 392-393.
- [4] Lu Chung-Ting and Hsieh Hsieh-Hung. A low-power quadrature VCO and its application to a 0.6-V 2.4-GHz PLL[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2010, 57(4): 793-802.
- [5] WEST J D K. The application of the asymmetric polyphase filter in an SSB transceiver[C]. 1991 Communications and Signal Processing, COMSIG'91, Proceedings, Pretoria, Aug. 30, 1991: 85-92.
- [6] Tormanen, Markus Axholt, and Andeeas Lindstrand. A 2 GHz Tx LO generation circuit with active PPF and 3/2 divider in 65 nm CMOS[C]. 13th International Symposium on Integrated Circuits (ISIC), Singapore, Dec. 12-14, 2011: 208-211.
- [7] Hu Song, Li Weinan, and Huang Yumei. Design of a high-linearity RF front-end with IP2 calibration for SAW-less WCDMA receivers[C]. IEEE 9th International Conference on ASIC (ASICON), Xiamen, Oct. 25-28, 2011: 1090-1093.
- [8] Kaltiokallio M, Saari V, and Kallioinen S. Wideband 2 to 6 GHz RF front-end with blocker filtering[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2012, 47(7): 1636-1645.

作者简介



胡一鸣(1988-), 男, 籍贯湖北武汉, 电子科技大学电子工程学院电磁场与无线技术工学学士, 现为空军预警学院信息对抗系硕士研究生, 研究方向为射频电路, 主要成果为小型宽带射频收发端设计。

E-mail: foeh001@163.com



余国文, 男, 博士, 副教授。参与科研项目 10 多项, 多次获军队科技进步奖, 撰写论文 20 多篇。目前主要从事通信、雷达和电子对抗等方向的研究。