

3.3 自动控制的核心分析曲线

3.3.1、用方块图表示的模型

系统方块图，是系统中每个元件的功能和信号流号的图解表示。方块图表明了系统中各种元件间的相互关系。方块图优于纯抽象的数学表达式，因为它能够清楚地表明实际系统中的信号流动情况。

在方块图中，通过函数方块，可以将所有的系统变量联系起来。“函数方块”或简称为“方块”，是对加到方块上的输入信号的一种运算符号，运算结果以输出量表示。元件的传递函数，通常写进相应的方块中，并以标明信号流向的箭头，将这些方块连接起来。应当指出，信号只能沿箭头方向通过。这样，控制系统的方块图就清楚地表示了它的单向特性。

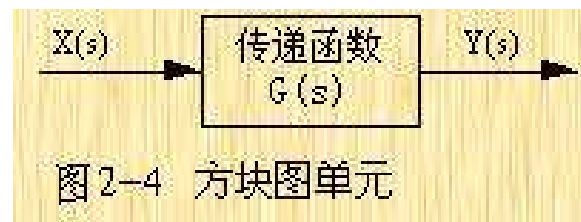
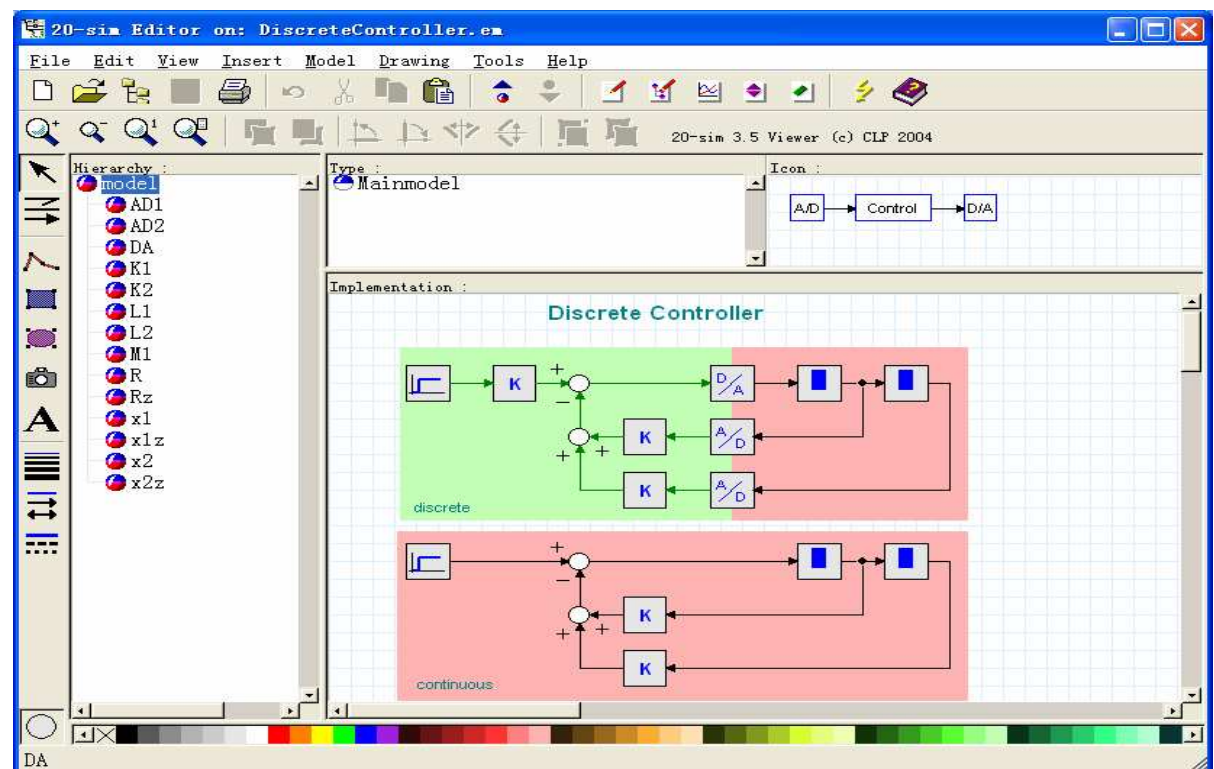


图 2-4 表示了一个方块图单元。指向方块的箭头表示输入，而从方块出来的箭头则表示输出。在这些箭头上标明了相应的信号。



应当指出，方块输出信号等于输入信号与方块中传递函数的乘积。

用方块图表示系统的优点是：只要依据信号的流向，将各元件的方块连结起来，就能够容易地组成整个系统的方块图，通过方块图，还可以评价每一个元件对系统性能的影响。

3.3.2、信号流程图

信号流图，是一种表示线性方程组中变量间关系的一种图示法。当将信号流图法应用于控制系统时，首先必须将线性微分方程变换为以 s 为变量的代数方程。

信号流图是由网络组成的，网络中各节点用定向支线段连接。每一个节点表示一个系统变量，而每两节点之间的联结支路相当于信号乘法器。应当指出，信号只能单向流通。信号流的方向由支路上的箭头表示，而乘法因子则标在支路线上。信号流图描绘了信号从系统中的一点流向另一点的情况，并且表明了各信号之间的关系。

正如所料，信号流图基本上包含了方块图所包含的信息。用信号流图表示控制系统的优点，可以应用所谓梅逊增益公式。根据该公式，不必对信号流图进行简化，就可以得到系统中各变量之间的关系。

定义 在讨论信号流图之前，首先必须定义如下一些术语：

节点，节点用来表示变量或信号的点。

传输，两个节点之间的增益叫传输。

支路，支路是连接两个节点的定向线段。支路的增益为传输。

输出节点或源点，只有输出支路的节点，叫输出节点或源点。它对应于自变量。

输入节点或阱点，只有输入支路的节点，叫输入节点或阱点。它对应于因变量。

混合节点，既有输入支路，又有输出支路的节点，叫混合节点。

通道，沿支路箭头方向而穿过各相连支路的途径，叫通道。如果通道与任一节点相交不多于一次，就叫做**开通道**。如果通道的终点就是通道的起点，并且与任何其它节点相交不多于一次，就叫做**闭通道**。如果通道通过某一节点多于一次，但是终点与起点在不同的节点上，那么这个通道既不是开通道，又不是闭通道。

回路，回路就是闭通道。

回路增益，回路中各支路传输的乘积，叫回路增益。

不接触回路，如果一些回路没有任何公共节点，就把它叫做不接触回路。

前向通道，如果从输出节点（源点）到输入节点（阱点）的通道上，通过任何节点不多于一次，则该通道叫做前向通道。

前向通道增益，前向通道中，各支路传输的乘积，叫前向通道增益。

图 2-9 表示了节点、支路和支路传输。

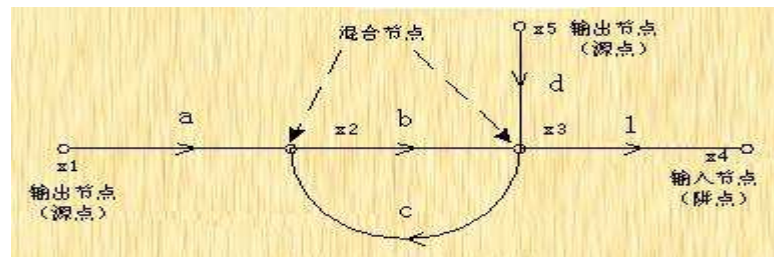


图 3. 信号流图

3.3.3、Nyquist 图-（极坐标图）

如前所述，频率特性法是一种工程方法，主要采用的是一种图解法。常用的频率特性图示方法分两种：极坐标图示法、对数坐标图示法。本节介绍极坐标图示法。

由于频率特性 $G(j\omega)$ 是一个复数，因而可在复平面上用直角坐标形式表示：

$$G(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) \quad (5-21)$$

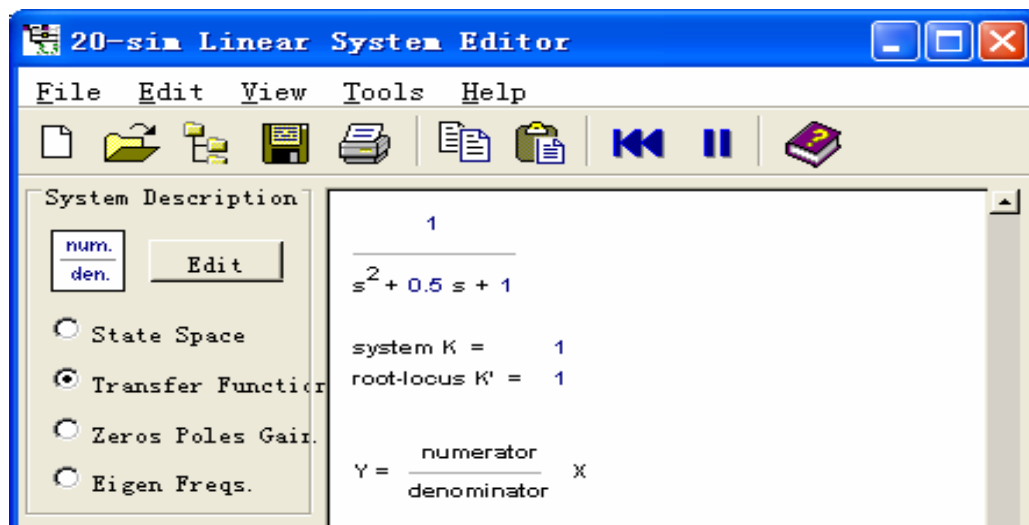
同样也可用极坐标形式写成：

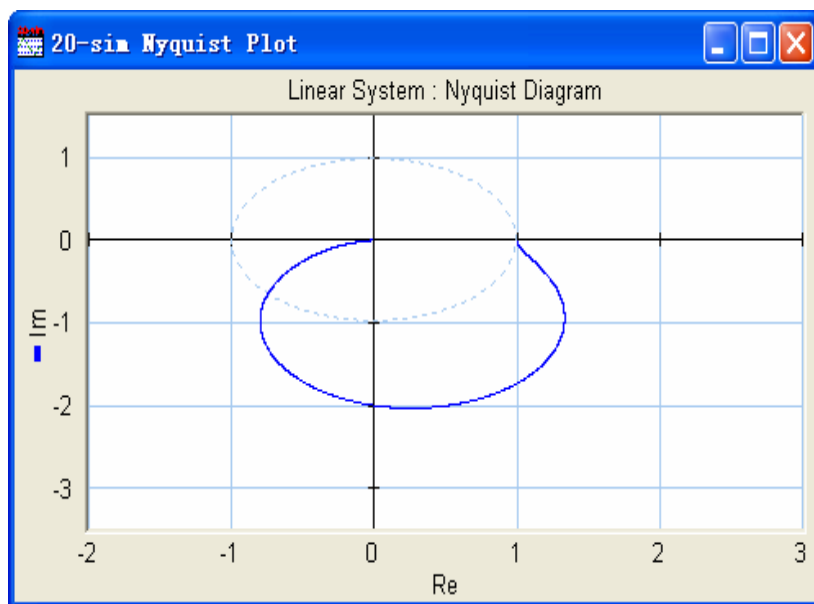
$$G(j\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)} e^{j\varphi(\omega)} \quad (5-22)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}$$

式中， $G(j\omega)$ 可用幅值为 $|G(j\omega)|$ 、相角为 $\varphi(\omega)$ 的向量来表示。当输入信号的频率 ω 由 $0 \rightarrow \infty$ 变化时，向量 $G(j\omega)$ 的幅值和相位也随之作相应的变化，其端点在复平面上移动而形成的轨迹曲线，称为**极坐标图**，又称为 $G(j\omega)$ 的幅相特性或奈奎斯特(Nyquist)曲线，简称奈氏图。

频率特性表达式： $G(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) = |G(j\omega)| e^{j\angle G(j\omega)}$ ，极坐标图（乃奎斯特曲线、乃氏图）：当输入信号的频率 ω 由 $0 \rightarrow \infty$ 时，向量 $G(j\omega)$ 的幅值和相位也随之变化，其端点在复平面上移动的轨迹即是**极坐标图**。



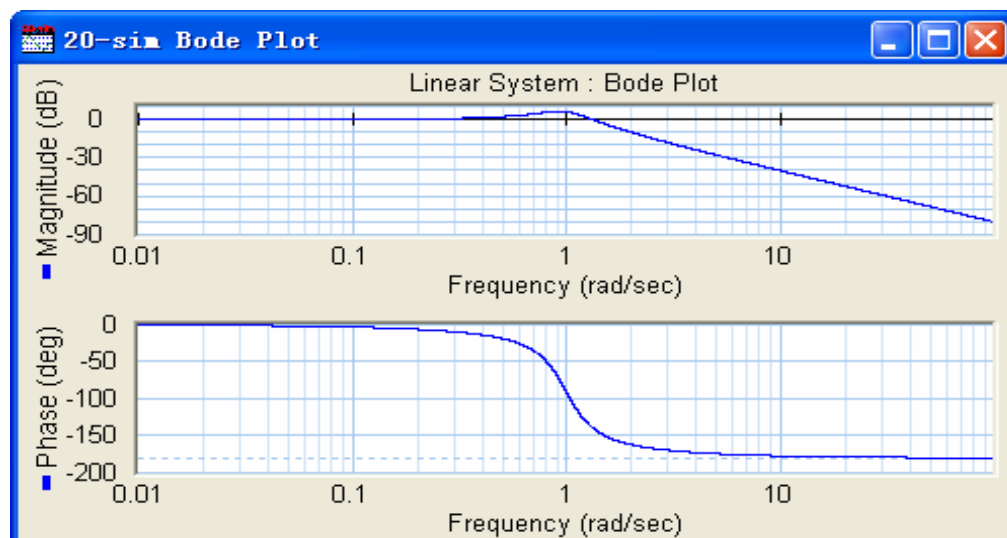


3.3.4、Bode 图-（对数坐标图）

如果要比较精确地计算和绘制极坐标图，一般来说是比较麻烦的，为此可用频率特性的另一种图示法：对数坐标图。对数坐标图法不但计算简单，绘图容易，而且能直观地表现开环增益、时间常数等参数变化对系统性能的影响。

一般对数坐标图由两部分组成：一张是对数幅频特性图，它的纵坐标为 $20\lg|G(j\omega)|$ ，单位是分贝，用符号 dB 表示。通常为了书写方便，把 $20\lg|G(j\omega)|$ 用符号 $L(\omega)$ 表示。另一张是相频图。两张图的纵坐标都是按线性分度，单位分别为 dB 和 $(^\circ)$ ，横坐标是角频率 ω 。

为了更好地体现开环系统各频段的特性，可对横坐标采用 $\lg \omega$ 的对数坐标分度，从而形成了半对数坐标系。这对于扩展频率特性的低频段，压缩高频段十分有效。在以 $\lg \omega$ 分度的横坐标上，1 到 10 的距离等于 10 到 100 的距离，这个距离表示十倍频程，用符号 dec 表示。对数幅频特性的“斜率”一般用分贝/十倍频 (dB/dec) 表示。对数坐标图又称**伯德图**(Bode 图)。



1. Bode 图的构成

对数幅频 $L(\omega) = L|G(j\omega)| = 20\lg G(\omega)$

对数相频 $\phi(\omega) = \angle G(j\omega)$

采用半对数坐标纸绘制。

2. 开环对数频率特性曲线又称 Bode 图，画图步骤：

(1) 将传递函数分解成典型环节并按转角频率从小到大排序，计算斜率累加值。

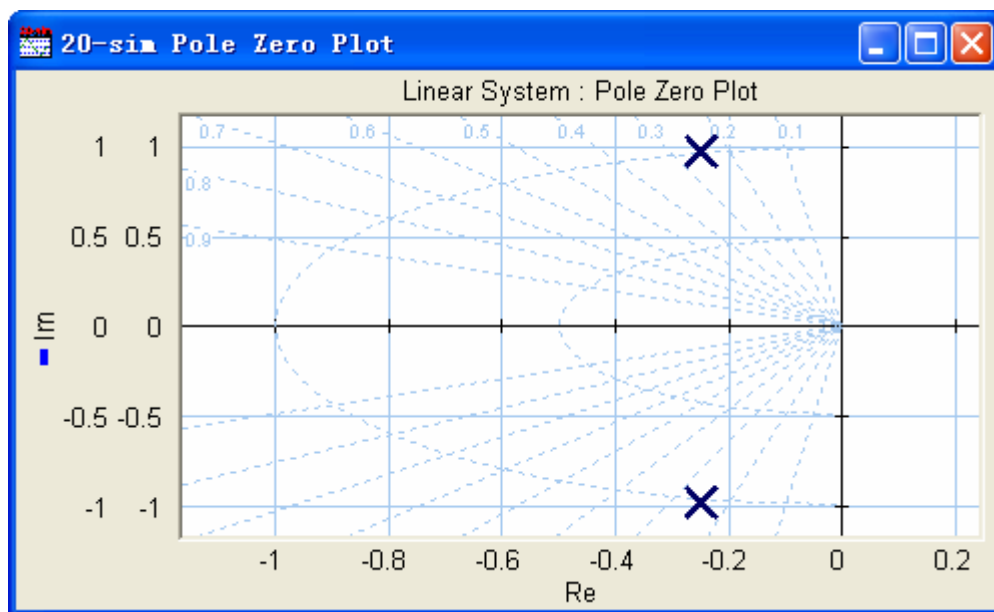
(2) 过 $(1, 20\lg K)$ 点作低频渐进线，斜率为 -20γ dB/dec， γ 为积分因子的个数。

(3) 根据斜率累加值，每遇转角频率即改变渐进线斜率，作出幅频特性。斜率改变取决于典型环节种类。例如：在 $G(S) = (Ts+1)^{\pm 1}$ 的环节，在 $\omega = 1/T$ 处斜率减少 ± 20 dB/dec，而在 $G(S) = (T^2s^2 + 2\zeta Ts + 1)^{\pm 1}$ 的环节，在 $\omega = 1/T$ 处斜率改变 ± 40 dB/dec。

(4) 用描点连线的方法绘制相频特性

图 3.

零极点图如下：



尼科尔斯图：

