现代应用数学丛书

自动控制理论

〔日〕喜安善市　池野信一　著

上海科学技术出版社

现代应用数学丛书

自动控制理论

〔日〕喜安善市 池野信一 著
翟立林 譯
宋健 校

上海科学技术出版社

內容提要

本书是日本岩波书店出版的現代应用数学丛书之一的中譯本。本书目的是概略地介紹自动控制理論中的一个重要的方面——頻率法的理論基础和它的应用范圍。扼要地闡明了自动控制的意义和种类及其系統的特性和設計方法等。可供高等院校师生、研究工作者以及工程技术人員等参考。

現代应用数学丛书

自动控制理论

原书名 自动制御理論

原著者 〔日〕喜安善市 池野信一 著

原出版者 岩波书店 1958

譯者 翟立林

校者 宋健

*

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业許可証出093号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店經售

商务印书館上海厂印刷

*

开本850×1168 1/32 印张2 16/32 字数57,000

1962年11月第1版 1962年11月第1次印刷

印数 1—4,500

統一书号：13119·486

定价：(十四) 0.46元

出 版 說 明

这一套书是根据日本岩波书店出版的"現代应用数学讲座"翻譯而成。日文原书共15卷60册，分成A、B两組，各編有序号。現在把原来同一題目分成两册或三册的加以合并，整理成42种，不另分組編号，陆續翻譯出版。

这套书涉及的面很广，其內容都和現代科学技术密切有关，有一定参考价值。每一本书收集的資料都比較丰富，而叙述扼要，篇幅不多，有利于讀者以較短时間掌握有关学科的主要內容。虽然，这套书的某些观点不尽适合于我国的情况，但其方法可供参考。因此，翻譯出版这一套书，对我国学术界是有所助益的。

由于日文原书是1957年起以讲座形式陆續出版的，写作时間和篇幅的限制不可避免地会影响原作者对內容的处理，为了尽可能地減少这种影响，我們在每一譯本中，特請譯者或校閱者撰写序或后記，以介紹有关学科的最近发展状况，并对全书內容作一些評价，提出一些看法，結合我国情况补充一些資料文献，在文內过于簡略或不足的地方添加了必要的注釋和改正原书中存在的一些錯誤。希望这些工作能对讀者有所帮助。

承担翻譯和校閱的同志，为提高书籍的质量付出了巨大劳动，在此特致以誠摯的謝意。

欢迎讀者对本书提出批評和意見。

上海科学技术出版社

目　　录

第1章 緒　　論

§1 自动控制的意义和种类

近代人类的生活，如果沒有机械，是不可想象的。以蒸汽机的发明为开端的机械化，其发展的趋势是正在用机械力来代替一切种类的劳动力。这不仅仅意味着单单用机械力来代替人类和动物的体力，而且意味着机械以它的力量、速度以及准确性，使得人們原来认为是不可能的事情变成可能。

机械的种类很多。但是不論哪一种机械，为了使之运轉，都必須輸入火力、水力、电力以及其他形态的能。机械的作用，归根結蒂可以看作是把这种輸入的能改变成另一种适当的形态而达到某种目的。但是，仅仅輸入能还是不够的。正象在使肌肉动作时必須有神經的作用一样，在使机械运轉时必須有各种各样的操纵，或者使机械的动作开始，或者使它停止，或者使它的各个部分按照一定的順序陆續动作，或者使它随着情况的变化而改变动作状态。这种操纵通常叫作控制。当然，控制并不限于机械的系統，例如在化学工业中調节溶液的濃度和温度等也是一种控制。总之，凡是可以按照所給定的指令来使系統中的某一个物理量发生变化的，就可以认为是控制（这个物理量叫作**受控量或被調查量**）。

重要的是，这里所謂給定的指令是指一种信息而言，而不是指使系統动作的能源。因此，在实行控制时，大抵是必須使具有大能量的流按照具有小能量的指令而增加或减少。这种作用通常叫作放大。

在实行控制时，首先必須知道受控量应当是怎样的一个数值。这个值叫作**目标值**。目标值是由預先編制的作业計划以及时时变

化的外部条件等确定的。例如当船追捕鯨魚的时候，对应于船的方向，这个受控量的目标值将随着鯨魚的移动这个外部条件而不断地变化。

在目标值变化的情形下，当然必須对于受控量进行控制，使之与目标值相符合。有时即使是目标值并不变化，受控量由于某种外部条件而发生不必要的变化，在这种情况下，也仍然需要进行控制，以使受控量回复到原来的数值。引起这种变化的原因，通常叫作**外部扰动**。

因此，在实行控制时，归根結蒂必須加上某种控制装置，这种装置能够发出指令，使受控量根据目标值或外部扰动作必要的变化。如果能够作出这样的指令的操纵装置本身也是由机械来完成的，那么就叫作自动控制。因为这种操纵总是以某种判断作为根据，所以可以說它是脑力劳动的机械化。換句話說，相当于动物的神經的控制系統，当加上了某种程度的大脑的作用，就变成了自动控制系統。所謂自动化，不过是自动控制系統的高度利用而已。

自动控制有許多种类。首先，按照其基本的动作原理，可以分为**开路控制**和**閉路控制**。开路控制是把給定的目标值或外部扰动改变成适当的形态之后，直接作为控制的指令。例如在控制电动机的速度时，可以首先找出电流和速度的关系，然后調整电流的大小，使之剛好对应于所給定的目标值。这种方法看来好象很簡单，但是如果想一想电流和速度两者之間的关系并不一定是簡单的关系，而且要想对于电源电压或負荷的变动以及其他許多外部扰动等因素全部都圓满地进行控制，几乎是不可能的，那就只好說要想采用这种方法来实行严格的控制是十分困难的。

与此相反，所謂閉路控制，是指把受控量同目标值互相比較，以檢測出偏差，并且使控制系統趋向于減小这种偏差而工作。这种控制，由于受控量是控制系統的輸出，而它的变动着的值又回輸

到控制系統的輸入端，所以可以叫作**反饋控制**。按照这种方法，不論造成偏差的原因是什么，控制系統总是趋向于减小偏差而工作。因此，不論函数关系如何，也不論加上怎样的外部扰动，都有可能只用一个装置实行控制。由此可以知道，閉路控制具有很大的优越性。通常只要提到自动控制，就可以认为指的是这种控制而言。本书也是专門討論这种控制。

其次，自动控制又可以根据目标值的性质分为两类。一类是目标值固定不变的，它用来作为使温度、电压、速度等保持不变的装置。这样的控制叫作**恒值控制**或**自动調整**，其目的完全在于消除外部扰动的影响。另一类，象在自动記录装置、自动操纵装置等中所应用的控制那样，目标值在随着时間变化。这种控制叫作**随动控制**或**自动追踪**。这种控制的目的当然主要是准确地追随目标值的变化。在随动控制中，还需要研究其目标值是怎样給定的。有的是由人給定的；也有的是自动地給定的。此外，也有的象自动操纵装置等那样，其目标值是随着外部条件变化的；也有的象工作机床的控制那样，其目标值是按照預定的程序变化的。后一种控制也叫作程序控制。

以上是从两个方面把控制作了分类。現在再从理論方面稍加探討。如以前所說明，控制系統可以认为是一种信号傳送系統。因此，它的理論可以根据信号傳送理論的观点一般地加以闡明。信号傳送理論在电信工程学中是重要的理論。以后将知道，自动控制理論的发展在很大程度上依赖于电信工程学。

在信号傳送系統的理論中，按照系統是綫性的或非綫性的，其处理方法有很大的不同。为了处理上的簡单，最好只采用綫性系統，但是实际上非綫性系統也在相当广泛地采用。如以前所說明，閉路控制的特点是，系統中元件的輸入量和輸出量的函数形式的差别对于整个系統的特性并不发生重大的影响，因此，即使是非綫

性系統，綫性理論經过适当的修改之后，也仍然能够近似地应用。

在綫性系統的情况下，由于叠加定理可以成立，因而信号总可以当作是由各种不同頻率的正弦波所合成的，并且系統的特性可以用正弦波的傳送特性来規定，这样一来，处理方法就可以大大簡化。这就是在网絡理論中所說的**頻率特性**。它的性质，当研究了把它推广了为复变函数的**傳遞函数**之后，就可以更清楚地理解。

§2　自动控制系統的构成

图2.1表示自动控制系統的基本結构。其中受控对象是指系統的完成預定工作的部分。影响它的动作的量，就是要利用控制系統加以調节的量，也就是系統的受控量。受控量由檢測裝置变換成适当的形式，在比較点处和同样变换的目标值相比較，就能够把它們之間的差异即偏差求出。控制装置是一种放大器，它按照偏差的性质和大小来增加或減少提供到受控对象中去的操作量的功率。本图所表示的情形是外部扰动加在受控对象上的；也有外部扰动加在其他部分上的。

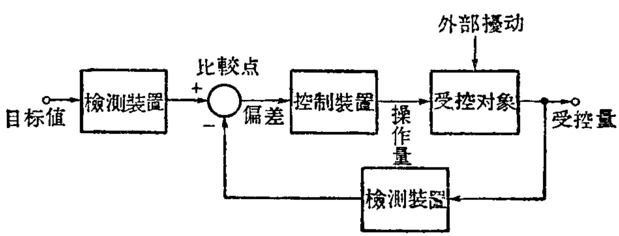

图　2.1

图2.2是一种稍微簡单的情形。它是直接从目标值和受控量求出偏差。即使是如图2.1所表示的情形，由于檢測裝置通常可以实行比較准确的变換，因而如果把被变換的量作为目标值和受控量，并且使受控量的檢測裝置包含在受控对象之內，那么就也可

以表現为如图 2.2 那样的形式。因此，通常多把图 2.2 的形式作为标准型来討論。此外，在这个图中，外部扰动是通过一个变换装置而加到受控量上；如果外部扰动是加到控制装置和受控对象的中間，也仍然能够等价地写成这种形式。

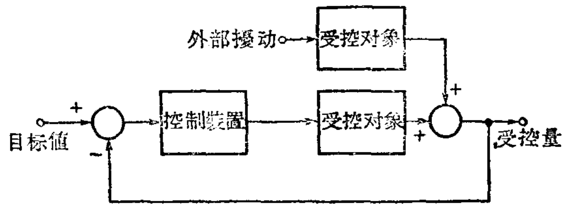

图 2.2

图 2.3 表示一种为使某一个物体，例如船舵，对准某一个指定的方向的自动控制系統。由电动机和齿輪、目标所組成的部分，是受控对象；回轉角是受控量；电位計是檢測装置。

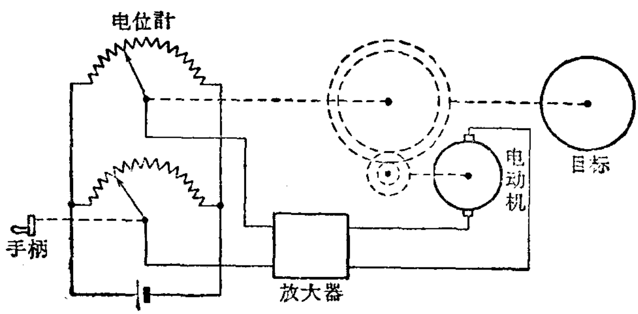

图 2.3

第2章 綫性系統特性

§3 傳遞函数[1]

物理系統的状态可以通过其中各部分的力、压力、位移、速度、流量、电压、电流、电場强度、磁場强度、温度、热量、濃度等諸如此类的物理变量表示出来。但是，沒有必要經常地把所有这些变量都加以考虑，而只要考虑直接影响到所研究現象的那些变量所表示的状态，也就是从某一个特殊方面所观察到的状态，也就够了。例如在电网絡中，除特別的場合之外，就沒有必要考虑温度、压力等变量。又如在电子管放大器中，灯絲电流等通常就不必考虑。以下叫作状态的，就是指这样的状态而言[2]。

当系統中的若干个变量确定之后，系統的状态就可以完全加以規定。这就是說，如果这些变量在某一瞬間的値确定，那么以后的状态就可以根据从外部所加进来的信号完全决定。这样的变量的最小数目，叫作系統的次数[3]。次数实质上就是为确定系統的状态所必需的初始条件的数目。系統的次数不大于构成系統的各个元素的次数之和。由有限个元素組成的集中参数系統，其次数是有限的；分布参数系統具有无限的次数。

如果不加輸入信号，使系統状态保持不变的初始条件一般是存在的。我們以后将取这时的变量的値为 0，而把离开这个値的偏差作为变量。在某些場合下，这样的状态也可能不是完全确定

---

[1] 参照本丛书《网絡理論》§4.

[2] 这里是指决定客体状态的主要参数而言，即关于在复杂的物理現象中找出决定状态的主要因素。——校者注

[3] 这里所謂"次数"，通常多称之为系統的維数。——校者注

的。这种系統叫作**无定位**系統。例如电流被切断的电动机，它可能停止在任意的回轉面。这时，只要选定适当的值作为基准值就可以了。

有限次数系統的状态，一般可以用微分方程来描繪。現在研究以一个輸入变量 x 和 n 个变量 y_1、y_2、…、y_n 所規定的系統。如果在某一瞬間这些値被确定，那么以后的 y_1、y_2、…、y_n 的值可以根据 x 的变化方式决定。因此，可以得到下列方程組：

$$\frac{dy_\nu}{dt}=f_\nu\left(x,\ \frac{dx}{dt},\ \frac{d^2x}{dt^2},\ \cdots,\ y_1,\ y_2,\ \cdots,\ y_n\right) \qquad (3.1)$$

$$(\nu=1,\ 2,\ \cdots,\ n)$$

如果系統是綫性的❶，則它变成下列的綫性方程組：

$$\left.\begin{array}{l} \left(a_{11}+\frac{d}{dt}\right)y_1+a_{12}y_2+\cdots+a_{1n}y_n=\sum b_{1\mu}\left(\frac{d}{dt}\right)^\mu x, \\ a_{21}y_1+\left(a_{22}+\frac{d}{dt}\right)y_2+\cdots+a_{2n}y_n=\sum b_{2\mu}\left(\frac{d}{dt}\right)^\mu x, \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \end{array}\right\} \qquad (3.2)$$

描繪系統动态的方程，除此以外，还可以写成种种形式。通常不一定只用次数的变量。电网絡的綫路方程和节点方程就是这种例子。

为了簡单起見，这里假定

$$x=y_1=y_2=\cdots=y_n=0 \quad (t<0). \qquad (3.3)$$

要想求出带有这个初始条件的綫性方程的解，可以利用 Laplace 变换。令

$$\left.\begin{array}{l} X(\lambda)=\int_{-0}^{\infty}x(t)\,e^{-\lambda t}\,dt, \\ Y_\nu(\lambda)=\int_{-0}^{\infty}y_\nu(t)\,e^{-\lambda t}\,dt, \end{array}\right\} \qquad (3.4)$$

利用 Laplace 变换

❶ 自然，作者这里是指常系数綫性方程組而言。——校者注

$$\int_{-0}^{\infty}\frac{d^{\mu}x(t)}{dt^{\mu}}e^{-\lambda t}\,dt=\lambda^{\mu}X(\lambda),\tag{3.5}$$

(3.2) 可以变换成下列代数方程組：

$$\left.\begin{aligned}&(a_{11}+\lambda)Y_1+a_{12}Y_2+\cdots+a_{1n}Y_n=\sum b_{1\mu}\lambda^{\mu}X,\\&a_{21}Y_1+(a_{22}+\lambda)Y_2+\cdots+a_{2n}Y_n=\sum b_{2\mu}\lambda^{\mu}X,\\&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\end{aligned}\right\}\tag{3.6}$$

它們的解可以写成下列形式：

$$Y_{\nu}(\lambda)=K_{\nu}(\lambda)X(\lambda)\quad(\nu=1,2,\cdots,n)\tag{3.7}$$

这里的 $K_{\nu}(\lambda)$ 是 λ 的实系数有理函数，它就是在网絡理論中所讲的傳遞函数。以下取 $Y_{\nu}(\lambda)$ 中的一个作为輸出量来研究，附加以符号 ν 表示之。当根据这样所求出来的 $Y(\lambda)$ 求 $y(t)$ 时，可以应用 Laplace 反变换，即

$$y(t)=\frac{1}{2\pi j}\int_{c-j\infty}^{c+j\infty}Y(\lambda)e^{\lambda t}\,d\lambda.\tag{3.8}$$

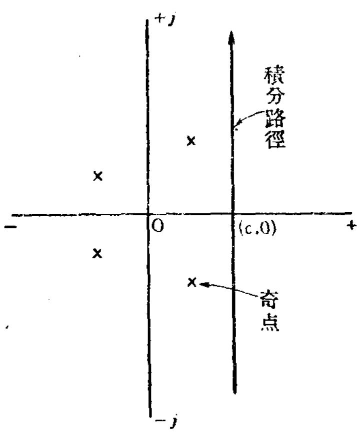

图　3.1

上式的积分路徑如图 3.1 所表示，是一条通过实軸上的点 $(c,0)$ 而平行于虛軸的直綫。在选择 c 的值时，应該使 $Y(\lambda)$ 的全部奇点位在积分路徑的左側。

当輸入信号等于单位脉冲时，也就是

$$x(t)=\delta(t),$$

而且

$$\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon}\delta(t)\,dt=1\quad(\varepsilon>0),$$

$$\delta(t)=0\quad(t\neq 0)$$

时，由于 $X(\lambda)=1$，因而系統对它的响应，也就是脉冲响应，可写作

$$k(t)=\frac{1}{2\pi j}\int_{c-j\infty}^{c+j\infty}K(\lambda)\,e^{\lambda t}\,d\lambda. \tag{3.9}$$

反之，有

$$K(\lambda)=\int_{-0}^{\infty}k(t)\,e^{-\lambda t}\,dt. \tag{3.10}$$

应用这个公式，即使是分布参数系統，它的运动不能用(3.2)那样的微分方程表示的情形，如果知道它的脉冲响应，傳递函数仍然能够求出❶。例如在理想的滞后回路中，由于

$$k(t)=\delta(t-t_0),$$

因而

$$K(\lambda)=\int_{-0}^{\infty}\delta(t-t_0)\,e^{-\lambda t}\,dt=e^{-\lambda t_0}. \tag{3.11}$$

应用脉冲响应，对应于任意輸入量$x(t)$的輸出量，可以用下式表示：

$$y(t)=\int_{-0}^{t}k(\tau)x(t-\tau)d\tau. \tag{3.12}$$

这正象在网络理論中所有的情况一样。

其次，对于

$$x(t)=0 \quad (t<0), \quad x(t)=1 \quad (t>0)$$

的所謂阶跃函数，由于

$$X(\lambda)=1/\lambda,$$

其响应(或称过渡过程)是

$$k(t)=\frac{1}{2\pi j}\int_{c-j\infty}^{c+j\infty}\frac{K(\lambda)}{\lambda}\,e^{\lambda t}\,d\lambda. \tag{3.13}$$

这叫作指数响应。因为它代表在輸入突然变化的情况下的过渡过程，所以常常用来表示自动控制系統的动作性能。

当 $Y(\lambda)$ 和 $K(\lambda)$ 是有理函数时，如果把它們展开为部分分式，并且应用公式

❶ 同上，作者这里是指常系数綫性方程組而言。——校者注

$$\frac{1}{2\pi j}\int\frac{1}{(\lambda+a)^r}e^{\lambda t}d\lambda=\frac{t^{r-1}}{(r-1)!}e^{-at},\qquad(3.14)$$

就能够很容易地实行Laplace反变换。由此可知，如果以λ_μ ($\mu=1, 2, \cdots, n$)代表$K(\lambda)$的极点，則$k(t)$、$h(t)$等可以用$t^r\exp(\lambda_\mu t)$这样形式的函数的和表示出来。但是，在$K(\lambda)$的极点，即使$X(\lambda)$等于0，也存在着不等于0的$Y(\lambda)$。这也就是說，$t^r\exp(\lambda_\mu t)$的振动，即使沒有輸入，也在系統中存在，它叫作固有振动。要想把系統的固有振动全部求出，可以回过来考察(3.6)式。应該令公式的右边等于0来求解。以$\Delta(\lambda)$表示左边系数构成的行列式，解代数方程

$$\Delta(\lambda)=0,$$

就可以求出各个根λ_μ。在傳递函数的形式中，需要注意有时分子、分母的公共因子被約去，因而λ_μ可能消失。以下将假定只用傳递函数就能够把全部的固有振动求出。

当傳递函数的极点λ_μ的实数部分是負的时候，振动将随着时間的增加而衰減；在正的情形下，振动就将无限地发散。在多重极点时，即使实数部分等于0，也有同样的情况。这种情况叫作**不稳定**❶。虽然說它是不稳定的，但是并不是說要产生象由于接点接触不良等原因所引起的、同輸入量无关的那样随机的輸出。这就是說，因果关系仍然是經常成立的，相同輸入总是引起相同的輸出。因此，有人认为叫作非稳定更为合适。实际上可能由于杂音等微小的随机的輸入而引起振动，看起来好象是在产生随机的輸出。当初始条件确定，并且仅仅在短时間內使用时，即使是不稳定的系統，也完全可以应用。此外，如果作为系統的整体是稳定的，即使部分系統中存在有不稳定的情况，也沒有什么妨碍。

❶ 作者的意思是說此时綫性系統的任何一个运动都是不稳定的。請参看校后記中文献[2, 3]。——校者注

其次，当 λ_μ 的实数部分等于 0，而极点的位数等于 1 时，振动虽然不会独立地发展起来，但是不論由于何种原因，振动一經出現，就将无限地継續下去，而且如果在輸入方面加上和輸入頻率相同的、振幅有限的波动信号，振动仍然会无限制地发散。因此，这种情形通常也列入不穩定的范圍。

由此可知，一个系統成为穩定的条件，是傳递函数在包含虛軸在內的右半面卽右閉半平面內是正則的。

穩定性的定义，如在网絡理論中所說明的，其基本的要点是：“对于一个正数 M_1，如果❶

$$|x(t)|<M_1 \quad (t<t_0),$$

則有一个

$$|y(t)|<M_2 \quad (t<t_0)$$

的数 M_2 存在。” 当傳递函数是有理函数时，不难理解，为了得到在这种意义規定下的穩定性，必要而充分的条件就是在右閉半平面內是正則的。当傳递函数不是有理函数时，关系虽然不是那样簡单，但是也容易理解那是充分的条件。为什么呢？因为傳递函数在虛軸上是正則的，也就意味着 Laplace 变換

$$\int_{-0}^{\infty} k(t)\, e^{-\lambda t}\, dt$$

在虛軸的稍左方的点也是收斂的。这意味着在虛軸上絕对收斂，卽

$$\int_{-0}^{\infty} |k(t)|\, dt<\infty.$$

在网絡理論中已經說明，这个条件和根据上述定义的穩定性是等价的。

傳递函数在 Laplace 变換不收斂的区域內不一定是 1 价的。但是在有理函数的場合下，卽在奇点只是极点的場合下，它是 1 价的。当不是有理函数时，如果右半平面內的奇点不只是极点，則它

❶ t_0 为任意大数。請参看校后記中文献[3, 13]。——校者注

在右半平面內也是1价的。以下只考虑这种情形。这时，只要知道傳递函数在虛軸上的值，根据解析的延拓，它在右半平面內的值就全部可以确定。如在下一节将要說明的，虛軸上的值 $K(j\omega)$，可以給出对应于正弦波的响应特性，这叫做频率特性。以后将闡明，在判断稳定性时，它具有重要的作用。

频率特性，用它的对数表示有許多方便。为此，可以写成

$$\alpha+j\beta=\log A(j\omega),$$

α 叫作振幅特性(增益特性)，β 叫作相位特性。各量的单位，α 用奈貝，β 用弧度。在实用上，大多代替 α 而采用

$$\alpha'=20\log_{10}|A(j\omega)|,$$

它的单位叫作 db (分貝)。例如輸入与輸出之比为 2 时大約是 6 db；为 10 时大約是 20 db。另一方面，β 通常多用度表示。

傳递函数和频率特性在綫性系統的处理中占有重要地位。其原因很多，例如在計算响应时不需要对于微分方程一一求解，就能够写出 Laplace 反变換；又如它的計算在大多数情形下都可以利用公式进行；又如把信号作为各种频率的正弦波的合成，可以很清楚地知道其各个成分是怎样被傳送的；等等。此外，还有一个重要的原因是，如在网絡理論中所說明的，系統的傳递函数能够根据系統各个部分的傳递函数用代数的計算方法求出。特别是象控制系統那样的包含放大作用的情形，系統的元素大多是单向的，卽信号只能够向一个方向傳递，在这种情形下，系統的傳递函数可以簡单地用各部分的傳递函数的积表示出来。因此，增益特性、相位特性就可以用和的形式表示出来。

§4 信号及其傳送

以上只考察了当 $t<0$ 时信号等于0的情形。这只是为了方便。一般說来，并不需要作这样的限制。但是当把时間区域延长