



精密工程测量的自动化

苏三 阿. 维. 札. 查. 林. 阿

测绘出版社

内 容 提 要

本书研究基准线观测, 导轨和技术装备, 以及工业建筑物安装中精密工程测量的自动化问题。介绍工程测量中采用的各种自动化仪器和传感器的新式结构。介绍使用光量子发生器(激光器)进行精密测量的方法。叙述测量用的各种自动量测系统的设计原理和结构, 给出各种测试研究的结果。本书的读者对象为广大工程测量和普通测量工作人员、科研人员、仪器研制人员、研究生和高年级学生。

精密工程测量的自动化

[苏]阿·维·札查林内

蒋夏林 译

李青岳 刘筱谦 校

*

测绘出版社出版

测绘出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32·印张 8 1/2·字数 220 千字

1981 年 3 月第一版·1981 年 3 月第一次印刷

印数 1—8,100 册·定价 1.55 元

统一书号: 15039·新 167

前 言

最近十年在测量工作的实践中广泛地采用了半自动和自动测量装置、光量子发生器和电算技术装备。

测量工作及其成果处理的自动化，可以提高劳动生产率，大大提高精度，可以按新的方式组织测量工作。

因此，国内外都很重视测量工作自动化方面的研究。苏联在这方面已经取得很大成功，并制造出一些结构新颖的精密测量仪器和系统。精密测量自动化的工作，在莫斯科测绘学院已有了广泛的开展，这种情况，为编写这本书准备资料奠定了基础。

本书编写的目的，是向广大测量工作人员介绍精密工程测量自动化的基本原理，总结工程测量中自动化的现代方法和手段。

本书的篇幅不允许详细地讨论进行精密工程测量时的一些专门问题。因此，书中只是反映工程测量自动化中面临的若干问题，并指出工程测量中自动化手段的发展方向。

本书的读者对象是广大测量工作人员与从事新测量仪器设计的专业人员，以及对高等测量院校和测量系的科研工作者、研究生、学生，作为工程测量学有关部分的教学参考书。

为此，本书包括：为测量的目的所使用的部件和自动量测系统的一般性能的阐述、精密测定直线位移和角度位移所使用的传感器和光源的特点的详细分析。

作者十分感激 В.Д.Большаков, В.С.Усов, М.Д.Крашин, И.А.Науменко, В.К.Осипов 在本书编写过程中给予的宝贵建议和指示。

目 录

绪 论	(1)
第一章 测量用的元件和自动测量系统的基本性能	(3)
§ 1 基本概念和定义	(3)
§ 2 自动控制系统的传递函数	(7)
§ 3 自动控制系统的典型环节	(10)
§ 4 自动系统结构图的一般概念和典型环节的连 接方法	(13)
§ 5 自动系统的频率特性和稳定性	(16)
§ 6 对测量用的自动系统元件的基本要求	(20)
第二章 精密测定长度和角度位移的传感器	(24)
§ 7 概 述	(24)
§ 8 电位计式传感器	(26)
§ 9 电感式传感器	(29)
§10 电容式传感器	(33)
§11 光电传感器	(37)
§12 角度测量用的象扫摄像管传感器	(69)
§13 利用波纹效应的传感器	(76)
§14 摆锤传感器	(77)
第三章 精密工程测量自动化中采用的光源	(83)
§15 热光源	(83)
§16 作为工程测量光源的光量子发生器	(88)
第四章 利用光线形成控制线和测量平面的方法	(97)
§17 用视准激光来形成控制线	(97)
§18 用波带板形成控制线	(102)
§19 利用热辐射线形成控制线的方法	(104)
§20 对测量平面的激光扫描法	(106)

第五章 准直测量的自动化	(108)
§21 准直测量的自动化和半自动化方法.....	(108)
§22 遥控的活动觇牌.....	(111)
§23 利用活动觇牌进行准直测量中读数的远距离 传送方法.....	(114)
§24 准直测量自动化使用的光电装置.....	(119)
第六章 长距离直线导轨装置及工艺设备精密校验的 自动化	(137)
§25 对直线性的校验所用的方法和手段的基本要 求.....	(137)
§26 利用光电装置进行直线性校验的方法.....	(143)
§27 直线性检测仪器中的光电跟踪测角装置.....	(152)
§28 脉冲数积分器和直线性检测仪的记录装置.....	(164)
§29 根据递次积分法检测直线度的自动化仪器的 构造原理.....	(177)
第七章 激光仪器在施工安装自动化中的应用	(180)
§30 激光仪器在施工安装中的应用范围.....	(180)
§31 激光照准仪.....	(181)
§32 激光水准仪.....	(189)
§33 垂直投影的激光仪器.....	(198)
§34 激光经纬仪.....	(206)
第八章 设备安装于设计位置和沉降与位移观测的自动 化仪器	(210)
§35 精密电子对中仪器.....	(210)
§36 电子记录的微水准仪.....	(213)
§37 液体静力水准测量的自动装置.....	(218)
§38 利用波纹传感器的长度位移测量仪.....	(226)
第九章 研究外界条件对工程测量精度影响的方法和设 备	(230)
§39 决定视准线在空间不稳定的外界条件的主要	

	因素.....	(230)
§40	精密热梯度仪.....	(234)
§41	研究激光束角度位移和波动的自动光电仪器...	(237)
§42	在研究外界条件对测量精度的影响时信息处 理的光学方法.....	(242)
参考文献		(251)

绪 论

就广义说来，用仪器和自动装置来转达测量功能的过程，就叫做测量生产的自动化。

生产自动化并不是无条件的，也不是由自动装置完全代替人，但是，人们活动的目的、人与机器之间的关系性质改变了，劳动在性质上具有新的意义，变得更复杂，内容更丰富了。人的劳动的重心，转移到在技术上看管自动装置，变成分析调度活动〔11〕。

当前，有种类极其繁多的自动系统，在各个技术领域，担负着管理各种操作过程的任务。在这些自动系统中，装配着多种机械装置、电气装置和其它装置，形成一个互相发生作用的复杂的综合体。

现代科学技术的发展，必须建造各种尖端工程项目，如基本粒子加速器、长距离传送线高精度的导轨、塔式高层建筑物、大功率水电站等等。

这些工业项目的建设和运营，都要求研究和制定出新的精密工程测量方法。

在尖端的工程项目上进行各种精密测量工作，常常遇到很多困难，因为从安装条件来说，要求在有限的时间内，完成安装、调整和量测的各项作业。这种情况，就需要测量工作具有较高的作业率。除此之外，由于作业时对人有较大的危险性，在尖端的工程项目中，不能采用一般的作业方法来进行必要的各种测量工作。这里首先要指出的是下列因素，如放射现象、高温、大功率磁场和电场等。在这些条件下，必须采取专门的方法，以便使测量过程用遥控进行。

尖端工程建设项目的精密测量的实践表明，精度的进一步提高，以及劳动生产率的大幅度提高，直接与在工程测量中采用现代化的自动测量系统有关。

利用光学、电子学、自动化、物理学的新成就制造和使用各种新型测量仪器的经验说明，这种仪器具有广泛应用的可能性和远大的发展前景。

在工程测量中实现自动化，可以有效地解决下列各项主要任务：

- 提高测量精度；
- 对被测物体实现遥控观测；
- 提高劳动生产率；
- 大量降低工作成本。

第 一 章

测量用的元件和自动测量系统的基本性能

§ 1 基本概念和定义

在工程测量工作中，所要测量的各种自然现象的本质是各种各样的：如建筑物和其构件的变形，导轨的变形，光线在大气中的折射和起伏等等。

但是，不论测量任务如何，制造任何自动测量系统，都要根据一定的原理进行。要根据自动控制的理论研究自动测量系统的构造原理。

自动控制理论中最普通的概念，就是“自动控制系统”这个术语。

从广义上来说，自动控制系统包括闭环系统（包括反馈）和开环系统（断开的主电路）。自动控制系统本身包括跟踪系统、自动调整系统和自动量测系统，此外，还包括一些既不能完全列入跟踪系统，又不能属于自动调整系统或自动量测系统的系统。

在研究自动控制理论的基本原理时，主要注意力不放在各部件的技术性能方面，而放在它们在控制系统中所起的作用，以及它们之间相联系的性能方面，因此要能识别框图、功能图和结构图。

框图说明组成一个系统的各结构的方框（电源方框、读取信息方框等）。

功能图提供自动控制系统各部件功能的清晰概念和它们之间相互联系的特性。

全部自动系统可以分为以下两大类：

既能进行一次，又能进行多次某种动作的自动系统；

在相当长的时间内，以必要的方式，在运营过程中改变或者维持某些物理量的自动系统。

这种系统本身又分成闭环和开环自动系统。

图 1 为开环系统的功能图。这是最简单的半自动控制系统，因为它的作用源是人。

如果作用源为某些外部条件（如压力、温度、照度）的改变，那么这种控制系统就是自动控制系统。

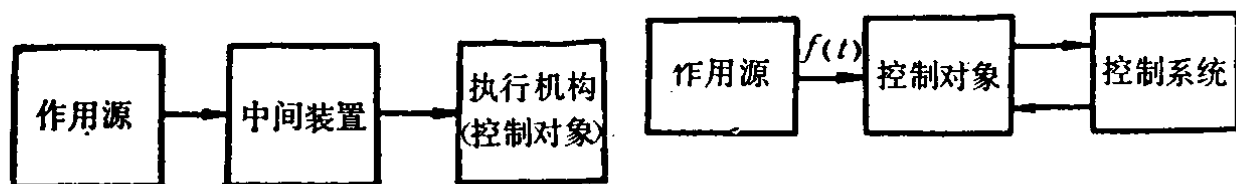


图 1 开环系统图

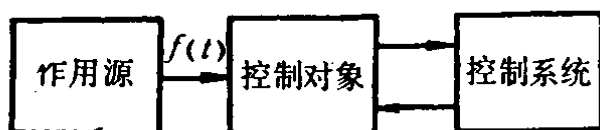


图 2 闭环系统图

具有特点的是，在任何开环自动系统中，系统的工作过程与它对控制对象的作用结果没有直接的关系。

为了获得闭环控制系统，在开环系统的输出端上，接以检测仪器，将它的检测结果，输向自动系统的输入端，其作用量按控制对象上的测量数值与所要求的数值的差数有多大来确定。

闭环系统的功能图最紧凑的形式见图 2。

现在我们来研究剖析闭环系统功能图的工作（图 3）。在受外界扰动 F 影响下的控制对象上，施以控制作用 x_c （它是自动系统控制部分的输出量）。信号形成装置（变换部件）、放大装置和执行装置就构成系统的基本轮廓。

当沿着基本反馈电路传送时，控制电路便被接通，而反馈本身包括量测装置及信息和控制量的预先处理装置。

向比较装置上施加的作用 x_s ，可能与输入量 x_A 的量程不同，本身除了有效输入信号以外，还有偶然的扰动（干扰、噪音），它们之间有一定的关系。

闭环自动系统在技术上有各种不同形式的自动控制系统：如

自动调整系统、跟踪系统、计算系统、量测的补偿系统等等。

自动调整系统是一种自动控制装置，它的用途是按规定的条件，利用专门的仪器（自动调整仪）来改变某种量值。

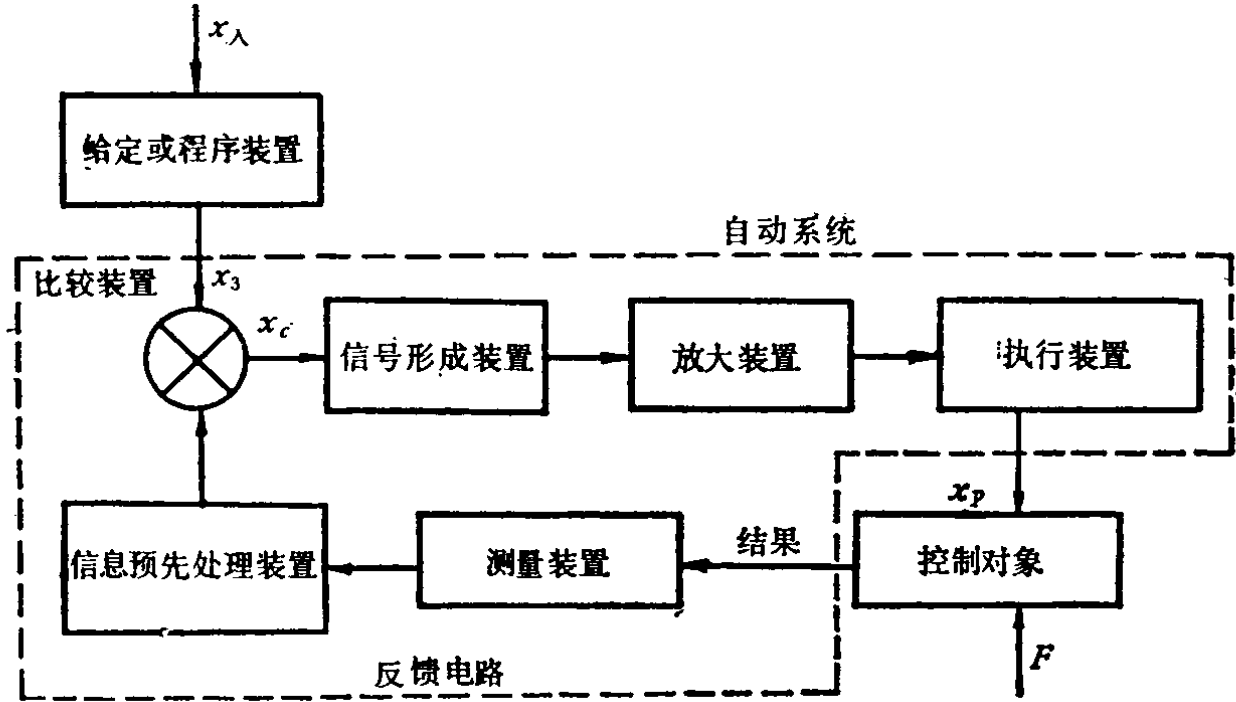


图 3 闭环系统的剖析图

与自动调整系统不同，跟踪系统是表达按任意规律改变的量值的自动控制装置。跟踪装置可以自动地表达按任意规律改变的、预先不知道的给定作用（例如给定量值的位移），一般在给定元件与执行元件之间没有机械连接。

不论结构如何，跟踪装置都是闭环自动控制系统，也就是有反馈的系统。

跟踪系统的特点，是主反馈电路传输信号的精度高。在跟踪系统中，信号传输给比较元件的系数是一。在功能图上，这种反馈以一条线表示。

自动系统的分类，可按不同的方式进行，这与复杂的结构、各种物理性质、用途、使用范围等等有关。

按自动系统的结构原理所确定的分类是基本的分类方式，它

可以认为是按自动控制系统的一般作用或自动控制的状态来分类。

我们可以按下列基本状态，对自动控制系统进行分类：

自动调整系统（调整系统）；

自动程序控制或调整系统（程序控制或调整系统）；

自动跟踪系统（跟踪系统）。

可以根据控制系统中各环节的线性关系进行分类。按这种方式分类，全部自动控制系统可分成线性系统和非线性系统。

线性系统本身又可分成：

不变参数系统（线性系统的参数与时间和系统上作用的变化无关）；

变参数系统（系统的参数依赖于时间）。

在系统中，即使有一个说明动态系统性能变化的参数是非线性的量，此系统就叫做非线性系统。

重要的是按处理给定的输入作用的性质来分类。

按这种方式分类，控制系统可以分成：

连续处理输入作用的系统；

不连续处理输入作用的系统。

控制系统工作质量的一个最重要的指标，就是它的误差，包括静态误差和动态误差。因此，有时自动控制系统根据在一定输入作用的情况下，误差信号的情况进行分类。

从这个观点出发，线性自动控制系统又可分成具有零误差的下列各种系统：

静态（具有速度误差）；

常速状态（具有加速度误差）；

固定加速度状态（具有加速度改变的误差）。

在自动控制理论中，自动系统还有其它的分类方式：如根据特征方程的次数，根据系统或其中某个环节的物理性质，根据电流的种类（交流电系统和直流电系统），根据使用领域，根据操

作部分的功率等等。

在精密工程测量自动化中，目前既采用半自动化又采用自动化系统，其中包括闭环、开环、跟踪、测量补偿等系统。

在测量仪器中，使用最广泛的是测量补偿系统，因为它与位置感受传感器相配合，能提高测量的精度。

§ 2 自动控制系统的传递函数

任何自动控制系统，其中包括测量使用的，都有两种工作状态——静态和动态。工作状态要用方程式来描述。

自动控制系统的静态性能，在数学上以静态代数方程式表示。静态方程式的图解表示就是静态特性曲线。

自动控制系统的动态性能，在数学上用微分（有时也用微积分）方程式表示。

根据所研究的物理过程的复杂程度，来决定描述控制系统性能的微分方程式的形式。在大多数情况下，当计算时，尽量用近似等值的线性系统代替实际的系统（它往往是非线性的）。在线性系统中，转换过程用常系数的线性微分方程式表示，这种线性化方法，可以使微分方程式以算子形式出现，并将它们以传递函数的形式来表示。

自动控制系统要以一定的方式反应加在它的输入端上的某种作用。

一般说来，用解算在某种扰动形式下描述控制系统性能的微分方程式，来确定上述的反应方式。

对于线性化的控制系统而言，这种微分方程式的形式如下〔4〕：

$$a_0 \frac{d^n x_{\text{出}}}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x_{\text{出}}}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dx_{\text{出}}}{dt} + a_n x_{\text{出}} =$$

$$\begin{aligned}
&= b_0 \frac{d^m x_{\lambda}}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x_{\lambda}}{dt^{m-1}} + \dots \\
&+ b_{m-1} \frac{dx_{\lambda}}{dt} + b_m x_{\lambda}
\end{aligned} \tag{1}$$

式中 $x_{\lambda} = x_{\lambda}(t)$ ——输入端的扰动作用； $x_{\text{出}} = x_{\text{出}}(t)$ ——输出端的反应； $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_m$ ——由控制系统参数决定的常系数。

在实际的系统中，一般 $n > m$ 。此方程式的算子形式如下：

$$\begin{aligned}
&(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n) x_{\text{出}} \\
&= (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m) x_{\lambda}
\end{aligned} \tag{2}$$

式中 p ——微分符号。

用普通方法解算上列微分方程式相当复杂。采用算子法，可以用代数演算代替微分和积分演算，并且不须要根据给定的起始条件求出任何常数。

采用拉普拉斯直接变换来解算是最有效的。拉普拉斯变换是用复变量的函数 $F(S)$ 表示某一实变量的函数 $f(t)$ ， $f(t)$ 的作用在于体现 $x_{\text{出}}(t)$ ，以及利用由函数 $F(S)$ 到函数 $f(t)$ 的逆变换来实现。

表示拉普拉斯正变换的方程式如下：

$$F(S) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \tag{3}$$

引入符号

$$F(S) = L[f(t)] \tag{4}$$

式中 $F(S)$ ——函数 $f(t)$ 表象函数，它是复变量 S 的函数； $f(t)$ ——表象函数的原函数。

这个变换，只适用于能满足 $f(t) = 0$ （当 $t < 0$ 时）的函数。

根据拉普拉斯变换规则，时间的某一函数 $x(t)$ 的 n 阶导数的正变换如下：

$$\text{如果 } x(0) = \frac{dx(0)}{dt} = \dots\dots = \frac{d^{n-1}x(0)}{dt^{n-1}} = 0$$

$$\text{则 } L\left[\frac{d^n x(t)}{dt^n}\right] = S^n X(S) \quad (5)$$

式中 $X(S)$ ——函数 $x(t)$ 的表象； $x(0)$ —— $t = 0$ 时函数 $x(t)$ 的起始值； S ——复变量。

将此规则应用于微分方程 (1)，得

$$\begin{aligned} & (a_0 S^n + a_1 S^{n-1} + \dots\dots + a_{n-1} S + a_n) X_{\text{出}}(S) \\ & = (b_0 S^m + b_1 S^{m-1} + \dots\dots + \\ & \quad b_{m-1} S + b_m) X_{\text{入}}(S) + X_H(S) \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $X_H(S)$ ——起始条件的函数； $X_{\text{出}}(S)$ ， $X_{\text{入}}(S)$ ——函数 $x_{\text{出}}(t)$ ， $x_{\text{入}}(t)$ 的表象。

在分析自动控制系统在各种作用下的工作时，通常是假定在此作用出现以前，自动控制系统处在静止或稳定的运动过程中。在这种情况下，起始条件的函数所有导数均等于零，这相当于在所获得的方程式中消去了 $X_H(S)$ 项，于是方程式可写为：

$$\begin{aligned} & (a_0 S^n + a_1 S^{n-1} + \dots\dots + a_{n-1} S + a_n) X_{\text{出}}(S) \\ & = (b_0 S^m + b_1 S^{m-1} + \dots\dots + b_{m-1} S + b_m) X_{\text{入}}(S) \end{aligned} \quad (7)$$

比较方程式 (7) 和 (2)，可以看出，它们是恒等的。因此，为了保持最常用的符号，常常用

$$p = S$$

于是，方程式 (7) 就成为下列形式

$$X_{\text{出}}(p) = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots\dots + b_{m-1} p + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots\dots + a_{n-1} p + a_n} X_{\text{入}}(p) \quad (8)$$

采用符号

$$\frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots\dots + b_{m-1} p + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots\dots + a_{n-1} p + a_n} = W(p) \quad (9)$$

于是

$$X_{\text{出}}(p) = W(p) X_{\text{入}}(p) \quad (10)$$

$W(p)$ 叫做系统的传递函数，它可以表示分析系统的特征，所以也可以叫做特征传递函数。

若传递函数不仅决定系统的特征，而且又决定扰动的性质，它就叫做综合传递函数。

这样，在零起始条件下，输出端量值的拉普拉斯变换与输入端作用的拉普拉斯变换之比，就叫做网络、环节分段电路或整个控制系统的传递函数，即

$$W(p) = \frac{X_{\text{出}}(p)}{X_{\text{入}}(p)} \quad (11)$$

§ 3 自动控制系统的典型环节

任何自动控制系统的数学描述，都是以其元件的特性为基础，同时又要考虑到各元件所起的作用。但是，这样的描述太复杂，而且难于对许多控制系统研究所得的结果进行综合。

如果把所研究的控制系统分成几个环节，每一环节用一个线性微分方程式表示，不着眼于它的物理性能和所起的作用来研究，而着眼于各环节对于它的输入端所施加的外部扰动所生的反应，这样就简单多了。在这种情况下，大部分元件都可以归纳成数量不大的可以用简单的微分方程式表示的等价环节。此时，系统中的非线性元件要单独考虑。这些环节的总合，以及表示它们之间相互作用的连接线，就形成自动控制系统的结构图。

采用等价环节法可以大大简化控制系统的研究方法，可以进行综合理论研究，以及比较各种系统的性能。

等价环节的基本类型为：无惯性环节，无周期性环节，积分环节，振荡环节与微分环节。

1. 无惯性环节 能够改变传输信号的量值，但是在时间上并不影响其变化特性的环节，叫做无惯性环节。

这种环节的实例为电子放大器，对于它来说，可以足够的精

度写出下式:

$$U_{\text{出}}(t) = kU_{\text{入}}(t)$$

式中 $U_{\text{入}}(t)$, $U_{\text{出}}(t)$ ——分别为系统输入端和输出端上的电压;
 k ——比例系数, 它叫做静态放大系数。

对于其它各种放大元件, 如杠杆传动装置、齿轮传动装置、电位计等, 也可以写出类似的等式。

因此, 得出无惯性环节的方程式为:

$$x_{\text{出}}(t) = kx_{\text{入}}(t) \quad (12)$$

此环节的传递函数为 $W(p) = k$ 。

2. 无周期性环节 无周期性环节的变化状态的微分方程式可以写成:

$$T\dot{x}_{\text{出}}(t) + x_{\text{出}}(t) = kx_{\text{入}}(t) \quad (13)$$

式中 T ——时间常数。

无周期性环节的传递函数为:

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1} \quad (14)$$

在稳定状态中, $dx_{\text{入}}(t)/dt = 0$, 在这种情况下, 传递函数为 $W(p) = k$ 。

和直流电源接通的电感线圈电路就是无周期环节的例子。

3. 积分环节 积分环节用下列微分方程式来描述。

$$T\dot{x}_{\text{出}}(t) = kx_{\text{入}}(t) \quad (15)$$

在一般情况下, 环节的传递函数的形式为:

$$W(p) = \frac{k}{Tp} \quad (16)$$

积分环节的实例为: 积分状态的运算放大器, 积分传动装置, 例如, 假如以转速作为输入函数、旋转角作为输出函数的主控电动机轴。

4. 振荡环节 当突然向环节的输入端加以量值固定的扰动时, 在环节的输出端上量值改变的特点是产生振荡, 此环节就因