

随从驱动原理

上册

苏联 A.Г. 約瑟夫揚 B.M. 卡岡著

電力工業出版社

随 从 驅 动 原 理

上 冊

苏联 A.Γ.約瑟夫揚 Б.М.卡岡著

左 宗 朴譯

电 力 工 業 出 版 社

本書(上、下冊)敘述了各種隨從驅動(隨動系統)的理論和計算的基礎,以及隨從驅動鏈路中的各種主要元件(自整角機、執行電動機、放大裝置、產生加速信號和阻尼信號的裝置等)的理論和計算的基礎。

本書適用於在自動控制、自動調整和電力驅動方面工作的研究人員、高等學校教師和工程技術人員。

2P86/3220

А. Г. ИОСИФЬЯН Б. М. КАГАН

ОСНОВЫ СЛЕДЯЩЕГО ПРИВОДА

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1954

隨從驅動原理 上冊

根據蘇聯國立動力出版社 1954 年莫斯科版翻譯

左宗朴譯

*

708D259

電力工業出版社出版 北京復興門外月坛南路(聯合路)

北京市書刊出版業營業許可証出字第082號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

*

787×1092¹/₂₅ 開本 * 12 壹印張 * 269 千字 * 定價(第10類)1.70 元

1957 年 12 月北京第 1 版

1957 年 12 月北京第 1 次印刷(0001—3,100 冊)

原 序

在国民經济的所有各部門中，工艺过程的机械化和自动化的不断增长，要求把自动技术發展成一門科学。随从驅动就是自动技术中的一个重要部門。

随从驅动可以应用于各种不同的自动控制和自动調整系統中。利用这种驅动，可以实现动力系統中的机組調整，軋鋼机、冶金爐和仿型机床的自动化，水工建筑的各种機構的控制，以及各种机械的鎮定及轉动等。

随从驅动的發展历史表明，在創立各种最重要的随从驅动和同步联系裝置方面，我国实居于先驅者的地位。

杰出的俄国發明家 А·П·达維多夫在 1865—1867 年就已經在世界上最先建立了一套随从驅动，并將它应用于海軍艦队方面。

1916—1921 年，М·П·科斯謙科院士曾經提出了一种使用交流整流子电机来作为电力放大机的大功率同步随从驅动，并且在實驗室的条件下进行了研究。

全苏列宁电工研究所(ВЭИ)曾經在 1931—1932 年建立了一套開流管同步随从驅动，并在 1938—1939 年建立了一套使用放大系数很高的直流电力放大机的同步随从驅动。在全苏电工研究所中，还曾經研究出来了一些新型的自整步电机(自整角机)。

現代的随从驅动理論，乃是在綜合电机理論和自动調整理論的基础上建立起来的。

由于苏联科学院院士 К·И·申菲尔、В·С·庫列巴金、М·П·科斯謙科、С·А·列比捷夫，通信院士 И·С·布魯克、А·Н·拉里昂諾夫、В·А·特拉畢茲尼可夫，教授 А·А·戈列夫、П·С·日丹諾夫、В·К·波波夫、Р·А·留捷尔、Д·А·戈罗斯基、Т·Г·索罗凱尔，以及其他許多苏联学者的工作，已經使得电机理論和复杂电

力系統理論方面，增添了許多新的研究方法，已經設計出來了适用于各种电机自动控制綫路——其中包括随从驅動——的各种現代电机机组，并已經創立了有关这些机组的理論。

自动調整理論这一門技术科学，最初是由俄国学者И·А·維什格拉斯基和Н·Е·茹可夫斯基創立的。

苏联的学者，如苏联科学院院士А·А·安德罗諾夫、М·Н·克雷洛夫、Н·Н·伯戈留博夫、В·С·庫列巴金，通信院士И·Н·伏茲涅仙斯基、А·В·米哈伊洛夫等，則为現代的自动調整理論奠定了基础。

其后，自动調整理論又經苏联科学院通信院士В·В·布尔加可夫、В·Н·彼德罗夫，教授Я·З·澤普金、В·В·索洛多夫尼可夫等人，大大地加以發展。

对于随从驅動的技术和理論作出了重要貢獻的，有苏联学者Н·М·雅基勉科、А·А·阿斯美尔、В·Н·特列齐雅可夫、А·И·雅克申、Д·В·瓦西里也夫、Н·А·李夫施茨、Т·Н·索柯洛夫、И·А·德魯任斯基、И·И·波哥热夫、В·Д·薩多夫斯基、П·П·克洛布可夫、И·М·薩多夫斯基、Э·И·艾勒尔諸人。

本書的目的，是向讀者介紹随从驅動的理論和計算的基础。

为了好詳細地研究随从驅動的各个元件，書中闡述了一种可以用来对各种电机中的稳定过程及未稳定过程进行理論分析的普遍方法。这种方法使我們可以把电力放大机、二相及三相異步执行电动机、自整角机和电軸等的理論，看作是普遍理論的各种特殊情形，可以使关于綫路中的各种电机的参数及特性曲綫与系統中的自动控制和自动調整过程之間的相依关系的分析，較為容易。

書中討論了关于綫性化的随从驅動(同步随从驅動)和非綫性随从驅動(繼电随从驅動)的理論和計算的基本問題，分析了非綫性对于同步随从驅動的运行的影响，并闡述了关于处在連續变化的随机信号作用之下的系統的初步理論。

今天，在建立各种自动調整和自动控制系统时，已經广泛地利用了电路模型和計算机械。从有效地利用模型和計算机械來說，列出一

組能够充分反映發生于所研究的系統中的各种过程的微分方程式，实具有特殊重要的意义。因此在本書中，对于随从驱动的各种元件的微分方程式的組成法，給予了很大的注意。

作者清楚地知道，本書是不可能沒有缺点的，因此对于讀者的批評將至为感激。批評意見請寄下列地址：莫斯科水閘堤岸街10号，国立动力出版社电工書籍編輯部（Москва, Шлюзовая набережная, 10, Госэнергоиздат, Редакция электротехнической литературы）。

第四章、第五章和第六章是兩人合写的；第一章、第二章、第三章和第十二章是А·Г·約瑟夫揚写的；第七章、第八章、第九章、第十章和第十一章是В·М·卡岡写的；6-5节和10-8节是在作者的指导之下进行工作的研究生А·А·司徒宾和Г·К·克魯格写的。

作者謹向科学技术博士А·А·戈罗斯基教授、科学技术博士Я·З·澤普金教授、科学技术副博士Д·И·烏里揚諾夫斯基和科学技术副博士И·Я·列赫曼等敬致謝忱，感謝他們的宝貴意見。

作者 謹識

目 录

原序

第一章 基本概念	6
1-1. 关于自动调整的概念	6
1-2. 关于随从驱动的概念	10
1-3. 随从驱动的初步理论	22
1-4. 随从驱动的几项主要特性	37
1-5. 随从驱动的主要类型	40
第二章 研究随从驱动中的电机运行过程的普遍方法	44
2-1. 前言	44
2-2. 直流电机的微分方程式及其线性变换	48
2-3. 交流电机的微分方程式的变换理论	57
第三章 单相交流自整步同步傳遞系統(自整角机)	71
3-1. 对于同步傳遞裝置的基本要求	71
3-2. 自整角机。作用原理和基本联接线路	72
3-3. 無滑环的自整角机	77
3-4. 差动自整角机	79
3-5. 自整角机的理论	81
3-6. 自整角机的几项主要特性	93
第四章 位差量測裝置	97
4-1. 基本要求	97
4-2. 接触式量測裝置	98
4-3. 变阻式量測裝置	101
4-4. 电容式量測裝置	103
4-5. 电感式量測裝置	105
4-6. 量測位差角的自整角线路	110
4-7. 变压器式自整角线路的理论	114
4-8. 自整角线路在決定主令軸与执行軸的無位差位置时的誤差	118
4-9. 位差角的双重量測系統	127

第五章 执行电动机	128
5-1. 概述	128
5-2. 他激直流电动机中的过渡过程	132
5-3. 他激直流电动机的电气机械时间常数和电磁时间常数	137
5-4. 标准动力环节和电动机方程式	142
5-5. 他激直流电动机的幅相特性曲线	147
5-6. 改变激磁电压以控制直流电动机	150
5-7. 二相异步电动机	153
5-8. 二相异步电动机的幅相特性曲线	170
5-9. 各种数量的折算到负载轴。有关电动机容量计算的注意事项	175
第六章 随动驱动的放大装置	178
6-1. 放大装置的用途与类型	178
6-2. 检相整流线路	180
6-3. 电子管放大器	186
6-4. 闸流管放大器	200
6-5. 磁放大器	211
6-6. 电力放大机	239
6-7. 具有正交磁场的电力放大机	241
6-8. 正交磁场电力放大机作用于他激直流执行电动机的情形	250
6-9. 自激电力放大机	257
6-10. 水力放大机	263
6-11. 各种放大装置的比较	270
第七章 产生加速信号和阻尼信号的装置	271
7-1. 测速发电机	271
7-2. 用来获得与位差微商成正比例的信号的双测速发电机线路	276
7-3. 加速度量测器	277
7-4. 利用执行电动机的电枢电路中的电压和电流来产生阻尼信号	278
7-5. 微分变压器	280
7-6. 电容-电阻式微分回路	284
7-7. 利用直流电动机来作为“动电容”	288
7-8. 微分交流信号的回路	290
7-9. 积分回路	297
7-10. 微分积分组合回路	299

第一章 基本概念

隨從驅動乃是自動調整及自動控制技術的主要部門之一。

在許多工業部門中，都有必要在兩種裝置之間沒有機械聯接的情形下，用其中的一種裝置來復演另一種裝置的位移。

例如在仿型機床中，靠尺沿模型的表面而滑動。這種模型的形狀必須在很高的準確程度之下，由機床的切削工具在被加工的零件之上自動地複製出來。在軋制鋼材時，功率強大的軋輥調整機構，應當自動地依照一個用來規定軋制程序的小功率機構的運動，來將軋輥加以移動。

在量測技術中，例如在對於各種容器內的液平面、各種汽門和閥門的位置、以及船艦的速度和航向等作遠距離測量時，都有必要將某些位移在遠距離之外加以復演。

在對於各種生產過程進行遠距離控制時，在許多情形下，調整機構（如閘門、閥門等）的運動，都必須是那些與控制對象相距甚遠的主令機構的運動的復演。

為了復演各種運動，就需要使用稱為隨從驅動的各种裝置。

現在我們就來討論幾種有關隨從驅動的基本概念。為了便於闡明隨從驅動裝置與自動調整器之間的相同和相異的特性，我們的敘述將從自動調整的一般概念開始。

1-1. 關於自動調整的概念

自動調整技術可以保證工藝過程始終保持在規定的情況之下進行。將工藝過程的進行保持在規定條件之下的這一工作，是由一個包括量測儀器、控制設備和驅動機構的複合機構來執行的。

在調整技術發展的最初階段中，量測和控制的任務是由人來執行的，他必須不斷地注視着工藝過程的進行情況，並根據測量的結果和

工艺过程的规定情况，不断地进行这种或那种操作，来使工艺过程的进行恢复到所规定的规律之下。由于这样的结果，参与工艺过程的能量或物质数量就发生了变化。

在大多数的情形下，能量和物质数量的改变，都是用移动某一机构的办法来实现的。这种可以使能和物质发生量的变化的机构，就其本质而言，都是具有惯性的，因此在它们运动时，必然有动能贮存于其中。此外，在被调整的系统中，总还会有一些可以贮积位能的元件。

因此，当被调整的系统中发生扰动时，就可能有振荡过程产生。

当工人用手来进行调整时，为了力图将工艺过程准确地保持在规定的情况之下，通常总是根据自己的经验，稍许超前一些来进行必要的控制操作，以避免在工艺过程的进行中发生较大的振荡。

随着技术的发展，工艺过程的进行也日趋迅速，因而要用人力来保证调整具有规定的速度和准确性已经是不可能的了。现阶段的技术发展所带来的，是各种自动调整系统的广泛运用，它们无须人的参与，就可以保证使工艺过程在规定的条件之下进行。

几乎在国民经济的所有部门中，都有着这样的过程。

在热力工程中，通常都需要将温度和压力的大小自动地保持在规定的范围之内；在水力工程中，需要将水平面的高度保持在规定的范围之内；而在机器制造工业中，则需要将机器的转速保持在规定的范围之内。在电力系统中，必须在规定的准确程度下，将电压的频率和大小保持恒定。而在控制技术中，则必须在一定的准确程度之下，将规定的运动加以复演。

在上述的所有情形中，那些可以决定工艺过程的进行是否正确的代表性数量，都叫做调整参数。在上面谈到的这些例子中，这种参数是：温度、压力、高度、角速度、电压、空间角度等。

显然，调整参数的数值的改变，是由于在工艺过程所规定的参数数值及由于调整的结果而得到的实际参数数值之间的平衡遭受了破坏而引起

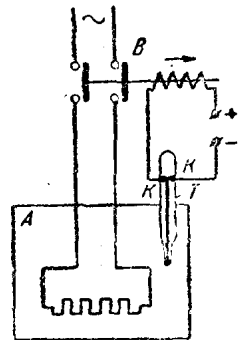


圖 1-1 最簡單的温度自动調整器的簡圖

的。

事实上，例如在溫度的自动調整中，用来測量溫度与其規定值之間的偏差的仪器，應該在每一給定的瞬間，指出溫度的实际值 τ_{ϕ} ，并將它与規定值 τ_s 相比較，以確定它們的差值

$$\Delta\tau = \tau_s - \tau_{\phi},$$

然后再利用这一差值，以直接或間接(即通过放大器)的方式来控制执行机构，而使执行机构以适当的方式將溫度加以改变，以便使偏差的絕對值 $\Delta\tau$ 不超出所規定的范围。圖 1-1 中所示，就是实现这一原理的調整系統圖。

自动控制和自动調整系統，又叫做閉环控制和閉环調整系統，或称具有反饋的系統。对于这两个名詞，只要研究一下圖 1-2 中所示的結構圖就可以明白，这个結構圖所表示的就是恒温器中使用触点溫度計的上述溫度調整系統。

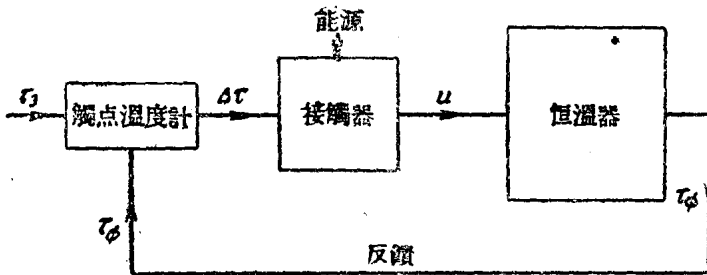


圖 1-2 溫度自动調整器的結構圖

这个結構圖指出了調整系統的各个元件之間的相互作用。触点溫度計 T 可以开啓或关闭自己的触点 K 和 K' 以控制接觸器 B 。而接觸器則控制着恆溫器 A 的發热元件。恆溫器中的溫度是由触点溫度計來測量的。这样，調整系統的輸出元件——即調整对象(恆溫器)，就对于輸入元件(溫度計)發生了作用。这样的作用就叫做反饋。

在所討論的例中，調整系統的控制作用(接觸器的接通或开断)，是根据对控制結果所得参数值的測量而自动發生的。

在这个系統中，溫度計是一个量測機構。它量出恆溫器的溫度 τ_{ϕ} ，并將它与溫度的規定值 τ_s 相比較，而溫度計的触点位置就是由

这个規定值来决定的。溫度計將根据調整参数的偏差，也就是溫度差 $\Delta\tau$ 的大小，来对調整机构發生作用。在所討論的系統中，接触器就是执行調整的机构。触点溫度計將根据調整参数的偏差的符号，使接触器接通或开断。

从关于这个結構圖的討論，还很容易發現自动調整和自动控制系統的一个重要的特点。对于恒温器的控制，就在于將輸入其中的能量加以改变。能量是从輔助能源輸入恒温器的，在所討論的情形中，这个能源就是交流電網。

这个系統的功率微小的量測机构(即触点溫度計)本身并不能控制这个較为强大的能量流。触点溫度計所控制的，只是激發接触器的綫圈所必需的微小能量。而接触器則控制着輸入恒温器中的能量流。由此可見，在所討論的系統中，接触器同时又起着放大器的作用。具有放大裝置，这是多数类型的自动調整系統的一个特征。

上面所講述的，同样也适用于压力、速度、液平面等的自动調整系統。

在調整压力的情形下，調整器的量測机构應該量出压力的实际数值 p_{ϕ} ，并將它与压力的規定数值 p_s 相比較，以求出差值 $\Delta p = p_s - p_{\phi}$ ，然后再依照这一差值的大小和符号，去控制調整机构。

在調整汽輪机的速度时，調整器的量測机构應該量出机組的实际角速度 ω_{ϕ} ，并將这一速度与規定的角速度 ω_s 相比較，以求出它們的差值 $\Delta\omega = \omega_s - \omega_{\phi}$ ，然后再利用这一差值，以适当的方式来对調整机构加以控制，以使速度偏差的絕對值不超过規定的大小。

在任何一个机械裝置、热力裝置、液压裝置或电气裝置中，控制的过程总是与能量和物質数量的变化相关联的。尽管在不同的自动調整系統中，調整参数完全不同(如溫度、压力、液平面、电压、电流等)，但在所有这些系統中，調整过程的基本規律却是完全相同的。

事实上，在任何一个調整系統中，都可以把調整参数的实际数值的瞬时大小表作某一輸出函数 $\theta_{\text{вых}}(t)$ 的形式，把調整参数的規定数值表作某一輸入函数 $\theta_{\text{вх}}(t)$ 的形式，而把它們之差表作另一函数形式：

$$\delta(t) = \theta_{\text{вх}}(t) - \theta_{\text{вых}}(t). \quad (1-1)$$

这个差值通常叫做实际数值与规定数值之间的偏差。

我们可以把偏差 $\delta(t)$ 这个变量看作是一个广义坐标。数量 $\delta(t)$ 乃是自动调整的质量的一项主要特性，它往往被叫做误差或位差。

从上述可知，自动调整系统就是由调整对象（炉子、蒸汽锅炉、汽轮机等）和调整器所组成的。

在一般情形下，自动调整器包括有下述几个主要环节：

1) 量测机构，或称感受机构，它可以量出调整参数的实际大小，并将这一大小与参数的规定数值（可以是常数，也可以是随时间而变的变数）相比较，以确定是否有偏差存在，并确定偏差的大小。

2) 功率放大器，它可以放大感受元件的信号，并对于调整器的控制机构发生作用。

3) 控制机构，它可以对调整机构进行控制。

4) 调整机构，它可以改变输入调整对象的能量和物质数量。

除此之外，在大多数的情形下，调整器还包括有这样一种装置：它可以发出信号，以消除系统中所出现的振荡。

在温度、压力、角速度、电压、电流、液体耗量和液平面的自动调整系统中，调整参数的规定值通常都是一个比较稳定的数量，其变化是相当缓慢的。

1-2. 关于随从驱动的概念

如果一套机械、电气、水力或压缩空气的复合装置，可以保证在某一定的准确程度之下，用它的被控制机构（即执行机构）来复演它的控制机构（即主令机构）所规定的运动，那末，这样一套装置就叫做随从驱动。

属于随从驱动的概念之内的，还有各种可以使两个或数个物体作同步运动的装置。

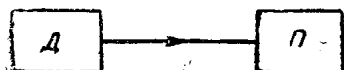


圖 1-3 結構圖

A—發送器；B—接收器。

由这一定义可知，在最简单的情形下，随从驱动应该包含两个主要元件，即用来确定运动规律的装置 A，和用来复演这一运动规律的装置 B（圖 1-3）。

在一般情形下，裝置 I 和裝置 II 可以彼此相距甚遠。

在隨從驅動技術中，通常把裝置 I 叫做發送器、發送機構，或主令機構，主令軸；而把用來復演運動規律的裝置 II 叫做接收器，或執行機構、執行軸。

發送裝置的運動以及這一運動的復演，可以按照一個坐標或多個坐標來進行。舉例來說，在明渠中，或是在用來儲存液體燃料的貯器中，液平面的位移的復演，就是按照一個坐標，即按照高度來進行的。仿型機床的將圖樣輪廓复制于零件之上，就是按照兩個坐標來進行的。望遠鏡的復演行星或恒星的運動，也是按照兩個坐標來進行的。

實現隨從驅動的技术原理是很多的。但這些為數眾多的隨從驅動系統，可以恰當地分為如下的兩種基本類型：

- a) 自整步的隨從驅動；
- 6) 人工外力整步的隨從驅動。

所謂隨從驱动的自整步，就是指接收裝置的這樣一種行為：在接收裝置上的負載力矩完全除去之後，依靠在位差發生時所貯存於系統中的位能，就可以使發送裝置與接收裝置之間的位差在過渡過程終了之後自行消失。

自整步隨從驱动的特征是，其中沒有特設的裝置來感受主令軸與執行軸之間的位差。在這種系統中，執行軸與主令軸之間的自整步，是在接收器與發送器之間的內力彈性反饋的作用之下發生的。

力矩的強力自整角傳遞就是這種自整步隨從驱动的一個例子。

人工外力整步的隨從驱动的特点，在於它要利用一種可以量測位差，並可以控制驱动的主力部分的特設輔助裝置來實現整步。這種輔助裝置可以用电的或机械的方法把主令軸和執行軸聯結起來。這種聯結通常叫做外反饋。

這樣的一種使用直流電動機的系統，就可以作為人工外力整步的隨從驱动的一個例子：在這個系統中，直流電動機是從功率放大器獲得電能，而功率放大器則是利用分別安裝在發送器軸和接收器軸上的兩個電位計之間的電氣聯系來加以控制的。

自整步的随从驱动

一个联接于发送装置(发送器)和接收装置(接收器)之间的截面均

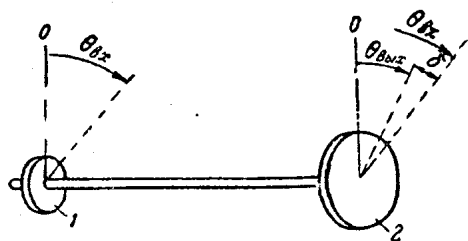


圖 1-4 弹性轴

匀而硬度一律的弹性轴, 就可以作为自整步的随从驱动装置的一个最为简单而明显的例子(圖 1-4)。

在这一系统中, 轴的发送端 1 的运动是通过弹性轴杆而传递到接收端 2 去的,

这样就可以保证轴的接收端

能够作同步的转动或同步的旋移^①。这就是说, 接收器可以在某一准确程度之下, 将发送端的运动复演出来。

为了使接收器能够复演位于远处的发送器的运动, 就需要把转动力矩从主令点传递到接收点去。在接收点上, 这一力矩是被阻力矩所平衡的。

在接收端没有负载的情形下, 轴的两端的运动将为严格的同步而同相的, 也就是说, 在每一瞬间, 两端的转角、角速度、角加速度都将是完全相同的, 即:

$$\begin{aligned}\theta_{\text{out}}(t) &= \theta_{\text{in}}(t), \\ \frac{d\theta_{\text{out}}(t)}{dt} &= \frac{d\theta_{\text{in}}(t)}{dt}, \\ \frac{d^2\theta_{\text{out}}(t)}{dt^2} &= \frac{d^2\theta_{\text{in}}(t)}{dt^2}.\end{aligned}\quad (1-2)$$

在接收装置中有阻力矩存在的情形下, 则 $\theta_{\text{in}}(t) \neq \theta_{\text{out}}(t)$, 也就是说, 在发送装置与接收装置之间将有位差 $\delta(t)$ 发生。这个位差的大小就是输入函数与输出函数之差:

$$\delta(t) = \theta_{\text{in}}(t) - \theta_{\text{out}}(t). \quad (1-3)$$

① 旋移就是角速度 $\rightarrow 0$ 的转动。——译者

如果認為軸的主動端的運動，即 $\theta_{ax}(t)$ ，是已經給定的，那末，接收端上的負載力矩的任何變化，都將要影響位差角的大小。另一方面，如果作用於軸的主動端上的驅動力矩發生變化，位差角的大小也將要發生變化。

在有位差時，軸桿體內就有某一定數量的位能貯存。如果接收器的阻力矩變為零，則在所貯存的位能作用之下，位差就會在某一定的時間之內逐漸消失，而接收器（在沒有摩擦的情形下）就自動地向發送器整步。

上述例中的這種自整步性能，是由內在機械彈性“反饋”的性能所決定的。顯然，在彈性變形的限度之內，發送器的轉動力矩 M_e 和接收器的負載力矩與位差角之間將有如下的關係存在：

$$M_e = M_n = k[\theta_{ax}(t) - \theta_{eux}(t)], \quad (1-4)$$

式中 k ——每單位位差角的轉動力矩。

力矩 M_e 包括加於系統的所有各項驅動力矩；力矩 M_n 包括所有的慣性力矩，以及由於摩擦和有效負載而產生的阻力矩。

在最簡單的情形下，關於軸桿輸出端的運動的普遍方程式將具有如下的形式：

$$J \frac{d^2 \theta_{eux}(t)}{dt^2} + F \frac{d\theta_{eux}(t)}{dt} + M_c = k[\theta_{ax}(t) - \theta_{eux}(t)] \\ = k\delta(t). \quad (1-5)$$

顯然，如果接收器的轉動慣量 J 、力矩係數 k 、接收器的黏滯摩擦係數 F 、阻力矩 M_c 和輸入函數 $\theta_{ax}(t)$ 的形式等，都已給出，則解出這個方程式，就可以確定輸出函數 $\theta_{eux}(t)$ 的變化規律。

不难看出，如果系統中的損失等於零，則軸的接收端的功率就將等於軸的發送端的功率，而前一功率就等於軸上力矩與旋轉角速度的瞬時值之積。

如果軸桿體內的應力是在彈性變形的限度之內，則在軸桿體內所貯存的位能就是

$$P = \frac{k\delta^2}{2}.$$

因为驱动具有慣性質量，因而当它以最終的速度而运动时，是貯有动能的；同时在軸身中又貯存有彈性变形的位能，故当發送裝置或接收裝置上的力矩發生变化时，就將有振盪發生。在有摩擦存在的情形下，这种振盪將逐漸衰減。在过渡过程終了后，軸的發送端与接收端之間的位差角靜态值，將只取决于驅動軸上的阻力矩。

在許多情形下，要想利用这种韌性軸来复演运动，实际上是不可能的，因此就出現了利用电机来傳遞角位置的方法，譬如說，利用感应电动机——即自整角机的方法，这种自整角机既可以保証实现同步运动，也可以保証实现同步旋移。

电机式自整步系統，就是兩台或数台彼此相距甚远的电机之間的这样一种电的联系：在这种联系之下，可以保証这些电机的轉子在空間的运动是彼此同步的。如果在兩台具有叠片轉子的同步电机中，各以交变电流通入轉子繞組来激磁，并將它們的三相或多相定子繞組并联起来，則当其中一个轉子在給定的方向之下發生旋移或运动时，第二个轉子便將追隨第一个轉子的运动而运动。

如果在作为發送器和接收器的兩台电机中，磁極軸綫与三相繞組的各相軸綫在空間的相对位置是相同的，則两个三相繞組中的电流便將等于零，或者是其大小和方向恰能使得加于两个轉子之上的轉动力矩等于零。如果發送裝置的轉子在轉动力矩的作用之下，旋移了某一角度，而在接收裝置之上又加有制动力矩，那末，在这种情形下，根据楞次定律，系統中便將有电流产生，并且所产生的电流应与引起这种电流的轉子旋移相反对。

圖 1-5 中所說明的，就是發送器与接收器中，电流和磁通的相互作用过程，由于这种作用的結果，就产生了一种彈性力矩，力圖把两个轉子轉到彼此一致的位置^①。

这种具有交变磁場的电气系統，可以象彈性軸桿一样的工作。因此在工程上，通常把这样的电机联接方式叫做电軸。

上面所討論的电軸系統，乃是一种閉环控制系統，因为它的控制

① 关于自整角机的工作原理，將在第三章中詳細討論。