

自動控制系統

A.M. 苏啓林 編



國防工業出版社

自动控制系统

A. M. 苏啓林 編

清华大学自动控制系譯

中国科学院数学研究所

內 容 簡 介

本書——Система автоматического управления 系苏联專家苏啓林(А. М. Сучилин) 副教授 1956~57 年在清华大学自动控制系为教师及部分同学講授“自动控制系统”这门課时的講稿。

本書講述电的自动控制系统(主要是电机自动系统和随动系统)的元件、綫路、原理和計算方法。書中采用結構圖和函数圖这个方便的工具来分析自动控制系统的工作。

本書可作为高等学校自动控制、企业电气化等专业的教学参考書,也可供从事各种对象的自动控制这一方面工作的人員使用。

由于各方面需用迫切,征得專家同意,未加修改,仍按講义形式出版。因出版時間很紧,未能仔細校閱,如有錯誤概由譯校者負責。希望讀者不吝指正,意見請寄国防工业出版社或清华大学自动控制系。

國防工業出版社

北京市書刊出版業營業許可証出字第 074 号
机械工业出版社印刷厂印刷 新华書店發行

*

850×1168 $1/32$ · 印張 $9\frac{3}{4}$ · 267 千字

1959 年 2 月第一版

1959 年 2 月第一次印刷

印数: 0,001—4,700 册 定价: (10)1.40 元

№ 2551

目 录

序言	5
第一章 自动控制系统的概念	9
§1 手动控制和自动控制的概念	9
§2 自动控制系统的结构圖	10
第二章 电动机	17
§1 概述	17
§2 他激直流电动机	18
1) 他激直流电动机的机械特性和傳遞特性	21
2) 他激直流电动机的过渡过程	29
a) 当 u_a 突变时的过渡过程(29)——б) 当 M_c 突变时的过渡过程	
(33)——B) 当 u_B 突变时的过渡过程(35)——2) 在各种負載力	
矩特性下电动机工作的稳定性(38)	
§3 串激直流电动机	40
§4 异步电动机	44
1) 三相异步电动机	45
2) 空心轉子兩相异步电动机	48
§5 电动机的制动	53
1) 动力制动	54
2) 反接制动	55
3) 能量回饋制动	56
第三章 电动机的繼电器——接触器控制	58
§1 概述	58
§2 利用繼电接触装置自动起劢电动机	58
1) 作为轉速的函数起劢电动机	59
2) 作为時間的函数起劢电动机	63
3) 作为电流的函数起劢电动机	67
4) 作为加速度的函数起劢电动机	69
§3 利用繼电接触装置自动制动电动机	70
1) 动力制动的自动控制	71
2) 反接制动的自动控制	72
第四章 电动机的連續控制	77
§1 發电机——电动机 Γ — Π 系統	77
1) 概述	77
2) Γ — Π 系統中过渡过程的强化	81
3) Γ — Π 系統中电动机的制动与逆轉	83
4) 串激电动机的 Γ — Π 系統	91
5) 三繞組發电机的 Γ — Π 系統	93
§2 利用电机放大器 (ЭМУ) 自动控制电动机的轉速	100
1) 电机放大器 (ЭМУ)	100
a) 交磁放大机 (101)——б) 交磁放大机中的反饋(116)——B)	
自激放大机(120)——2) 飽和放大机(129)	

2) $\Theta MY-\Pi$ 系统中的转速自动控制	130
a) 具有内反馈的 $\Theta MY-\Pi$ 系统(131)—— b) 具有外反馈的 $\Theta MY-\Pi$ 系统(148)—— B) $\Theta MY-\Pi$ 系统中的电流截止反馈和镇定连接(152)	
3) 利用 ΘMY 做激磁机的连续控制系统	157
a) 用交磁 ΘMY 作激磁机的 $\Gamma-\Pi$ 系统(157)—— b) 用自激放大机作激磁机的 $\Gamma-\Pi$ 系统(161)	
§ 3 电动机转速的电子-离子控制	163
1) 闸流管——电动机系统	163
2) 用电子-离子设备自动控制直流电动机转速的线路	172
§ 4 用磁放大器 (MY) 来控制电动机的转速	179
1) 用 MY 控制直流电动机的转速	180
2) 用 MY 控制异步电动机的转速	181
第五章 距离傳遞	189
§ 1 距离傳遞的基本特性	189
§ 2 直流距离傳遞	190
1) 指示型距离傳遞	190
2) 自平衡距离傳遞	197
§ 3 交流距离傳遞	199
1) 感应自同步式距离傳遞	199
2) 永磁整角机距离傳遞	207
第六章 随动系统	211
§ 1 随动系统的分类	213
§ 2 随动系统的输入量和品质指标	218
§ 3 最简单随动系统的分析	220
§ 4 附加积分——微分联接及其对随动系统工作品质的影响	230
1) 输出角一次导数(转速)的负反馈	231
2) 输出角二次导数(加速度)的负反馈	234
3) 与差角导数成比例的附加联接	238
4) 差角积分的正反馈	242
5) 输入角导数的正反馈	245
6) 附加联接对随动系统动作速度的影响	247
§ 5 自整角机随动系统	252
1) 自整角机的变压器工作状态	252
2) 具有电子放大器和电机放大器的自整角机随动系统	256
3) 具有磁放大器和电机放大器的随动系统	267
4) 精粗测量随动系统	271
§ 6 永磁整角机随动系统	278
§ 7 感应式随动系统	280
§ 8 电位器式随动系统	284
§ 9 电-液动随动系统	287
§ 10 随动系统的设计	291
1) 选择随动系统各个元件时的一般原则	292
2) 随动系统的静态计算	294
3) 随动系统的动态计算	295
a) 用分析法计算校正装置(295)—— b) 用综合法计算校正装置(301)	

自动控制系统

A. M. 苏啓林 編

清华大学自动控制系譯

中国科学院数学研究所

內 容 簡 介

本書——Система автоматического управления 系苏联專家苏啓林(А. М. Сучилин) 副教授 1956~57 年在清华大学自动控制系为教师及部分同学講授“自动控制系统”这门課时的講稿。

本書講述电的自动控制系统(主要是电机自动系统和随动系统)的元件、綫路、原理和計算方法。書中采用結構圖和函数圖这个方便的工具来分析自动控制系统的工作。

本書可作为高等学校自动控制、企业电气化等专业的教学参考書,也可供从事各种对象的自动控制这一方面工作的人員使用。

由于各方面需用迫切,征得專家同意,未加修改,仍按講义形式出版。因出版時間很紧,未能仔細校閱,如有錯誤概由譯校者負責。希望讀者不吝指正,意見請寄国防工业出版社或清华大学自动控制系。

國防工業出版社

北京市書刊出版業營業許可証出字第 074 号
机械工业出版社印刷厂印刷 新华書店發行

*

850×1168 $1/32$ · 印張 $9\frac{3}{4}$ · 267 千字

1959 年 2 月第一版

1959 年 2 月第一次印刷

印数: 0,001—4,700 册 定价: (10)1.40 元

№ 2551

目 录

序言	5
第一章 自动控制系统的概念	9
§1 手动控制和自动控制的概念	9
§2 自动控制系统的结构图	10
第二章 电动机	17
§1 概述	17
§2 他激直流电动机	18
1) 他激直流电动机的机械特性和传递特性	21
2) 他激直流电动机的过渡过程	29
a) 当 u_a 突变时的过渡过程 (29) —— b) 当 M_c 突变时的过渡过程 (33) —— B) 当 u_B 突变时的过渡过程 (35) —— 2) 在各种负载力矩特性下电动机工作的稳定性 (38)	
§3 串激直流电动机	40
§4 异步电动机	44
1) 三相异步电动机	45
2) 空心转子两相异步电动机	48
§5 电动机的制动	53
1) 动力制动	54
2) 反接制动	55
3) 能量回馈制动	56
第三章 电动机的继电器——接触器控制	58
§1 概述	58
§2 利用继电器接触装置自动起动电动机	58
1) 作为转速的函数起动电动机	59
2) 作为时间的函数起动电动机	63
3) 作为电流的函数起动电动机	67
4) 作为加速度的函数起动电动机	69
§3 利用继电器接触装置自动制动电动机	70
1) 动力制动的自动控制	71
2) 反接制动的自动控制	72
第四章 电动机的连续控制	77
§1 发电机——电动机 $\Gamma-\Pi$ 系统	77
1) 概述	77
2) $\Gamma-\Pi$ 系统中过渡过程的强化	81
3) $\Gamma-\Pi$ 系统中电动机的制动与逆转	83
4) 串激电动机的 $\Gamma-\Pi$ 系统	91
5) 三绕组发电机的 $\Gamma-\Pi$ 系统	93
§2 利用电机放大器 (ЭМУ) 自动控制电动机的转速	100
1) 电机放大器 (ЭМУ)	100
a) 交磁放大机 (101) —— b) 交磁放大机中的反馈 (116) —— B) 自激放大机 (120) —— 2) 饱和放大机 (129)	

2) $\Theta MY-\Pi$ 系统中的转速自动控制	130
a) 具有内反馈的 $\Theta MY-\Pi$ 系统(131)——б) 具有外反馈的 $\Theta MY-\Pi$ 系统(148)——в) $\Theta MY-\Pi$ 系统中的电流截止反馈和锁定连接(152)	
3) 利用 ΘMY 做激磁机的连续控制系统	157
a) 用交磁 ΘMY 作激磁机的 $\Gamma-\Pi$ 系统(157)——б) 用自激放大机作激磁机的 $\Gamma-\Pi$ 系统(161)	
§ 3 电动机转速的电子-离子控制	163
1) 闸流管——电动机系统	163
2) 用电子-离子设备自动控制直流电动机转速的线路	172
§ 4 用磁放大器 (MY) 来控制电动机的转速	179
1) 用 MY 控制直流电动机的转速	180
2) 用 MY 控制异步电动机的转速	181
第五章 距离傳遞	189
§ 1 距离傳遞的基本特性	189
§ 2 直流距离傳遞	190
1) 指示型距离傳遞	190
2) 自平衡距离傳遞	197
§ 3 交流距离傳遞	199
1) 感应自同步式距离傳遞	199
2) 永磁整角机距离傳遞	207
第六章 随动系统	211
§ 1 随动系统的分类	213
§ 2 随动系统的输入量和品质指标	218
§ 3 最简单随动系统的分析	220
§ 4 附加积分——微分联接及其对随动系统工作品质的影响	230
1) 输出角一次导数(转速)的负反馈	231
2) 输出角二次导数(加速度)的负反馈	234
3) 与差角导数成比例的附加联接	238
4) 差角积分的正反馈	242
5) 输入角导数的正反馈	245
6) 附加联接对随动系统动作速度的影响	247
§ 5 自整角机随动系统	252
1) 自整角机的变压器工作状态	252
2) 具有电子放大器和电机放大器的自整角机随动系统	256
3) 具有磁放大器和电机放大器的随动系统	267
4) 精粗测量随动系统	271
§ 6 永磁整角机随动系统	278
§ 7 感应式随动系统	280
§ 8 电位器式随动系统	284
§ 9 电-液动随动系统	287
§ 10 随动系统的设计	291
1) 选择随动系统各个元件时的一般原则	292
2) 随动系统的静态计算	294
3) 随动系统的动态计算	295
a) 用分析法计算校正装置(295)——б) 用综合法计算校正装置(301)	

序 言

自动控制系统是許多生产对象和国防对象自动化的基础。自动控制系统在国民經济中的意义和作用可以由自动化在工业、科学研究工作以及国防技术中的意义和作用来说明。如果說机械化是把人从沉重的劳动中解放出来的話，那末自动化則使人免除了用手去操作机器的必要，并且大大的提高了劳动生产率。

利用自动装置来控制生产过程和單个对象，就有可能提高这些过程的进行速度，提高控制的准确度。一部現代的初軋机一年要軋一百万吨鋼，而在手动控制时就不得不降低金屬的压軋速度，以便人能够对金屬的位置有所反应并采取相应的控制动作。这时不可避免地会有間歇。經驗說明：这样一年中将損失掉20%的工作時間，也就是說將近20万吨軋成品。有一种磨床能在几秒鐘之內加工好一个零件，同时加工精度达到一微米(1μ)。要是用手控制砂輪的送进，恐怕就会有很高的廢品率了。采用适当的自动控制系统可以保証要求的控制速度和准确度并且几乎完全消除廢品。

目前，对于完全自动化的工段、單个車間以及整个工厂的建立給予很大注意。在苏联有完全自动化的生产汽車發动机活塞的工厂，有生产軸承的自动化企业，并正在建設一系列的自动机床作业綫。

在完全自动化的工作条件下，人的作用只在于監視机器及其控制系统的工作，只在于調整它們。

从技术文献上知道，在美国已經有几乎完全自动地加工和装配汽缸体的流水作业綫。此外文献中也提出在美国已經有几乎完全自动化的电视机装配流水綫。

加工汽車零件的自动工厂的建立，噴气發动机和飞机的生产的高度自动化，使得对金屬切削机床的自动化加以特別的注意。由

于汽車、透平、飞机的型式經常变化，其零件不断改善，有必要經常改变由同一組机床加工的零件的形状，这引起人們想法制造能够很快地从生产这种产品改装成生产另一种产品的 万能 机床。这样就出现了第一批加工形状复杂的零件用的、由计算机控制的机床。在机床工作的过程中，计算机計算刀具的运动，使刀具按着被加工零件外形曲綫运动。这样一来，就有可能免去画零件的复杂的視圖的必要，有可能使由于机床改装而引起的停頓減到最小，有可能提高加工精度和速度。并且人也不必監視机床的工作，因为当有故障时，須要換刀、加油等时，机床会把磁帶上記錄的信号（通常就是人的話語）用声音發出通知，在許多場合下还会指示出人应当去做的操作。

自动化在科学研究中也有重大意义。用模拟的办法可以研究各种对象及其控制系統的工作。在苏联用这个办法研究了古比雪夫水电站的發電机的各种励磁系統以及它們的水輪机的工作。使复杂运算过程自动化的计算机的应用正日益推广。用计算机有可能解綫性和非綫性微分方程以及偏微分方程。

在苏联建造了自动計算火車运行圖的装置。这里需要解二阶的非綫性微分方程。

現代飞机的飞行高度和速度要求防空技术的改进，必須提高炮口瞄准的速度和准确度，要求准确到 0.05 度，炮身速度要达到每秒 $30 \sim 40^\circ$ 。此外，須要以很高的速度和准确度測定目的物的座标，并把炮身引导到超前点，以便击中运动着的目的物。人既不能以应有的速度和准确度轉动沉重的炮身，也无法在很短的时间內測定目的物的座标并进行必要的計算。在目前高射武器都装备有复杂的自动控制系统，其中包括雷达設備，机电式和电子式計算仪器、高射炮射击指揮仪以及随动系統。

現在正在加速研究基于利用放射性同位素的自动装置。

根据上面所叙述的可以作出結論：現代技术的水平在很大程度上取决于其自动化的程度。由于解放了人——用自动装置来代

替他，因而提高了劳动生产率，这样得到的高度經濟效果对于一系列工艺过程的自动化是个强有力的刺激。

在目前，自动装置已应用于許多工业部門、运输业以及复杂的战斗武器中了。現在，人应当保証复杂的自动系統的正确工作，应当进行它們的調节和調整，这就要求他具有高度的水平。此外应用复杂的自动系統大大提高了劳动生产率。因此在社会主义陣营各国自动化的作用特別日益显得重要。在苏联，二十次党代表大会在关于第六个五年計劃的指示中指出了一系列的措施来創設新的自动装置，并把它們运用到各种生产过程中。注意要建立流水綫、自动車間和自动工厂，注意研究和發展新的自动装置，注意必需發展数学計算机的生产并应用它們来控制生产过程。为此設立了仪表制造及自动化設備部，負責建立工厂、研究所、實驗室来研究和大量生产自动装置和計算机。在苏联，有苏联科学院自动学和远动学研究所、一系列的專門實驗室和別的組織，从事自动装置的研究和应用到国民經济中去。在許多大工厂中設有生产自动化处。

重工业生产部門中自动化得到特別广泛的采用。因此在社会主义陣营各国自动化作用更加显得日益重要。

中华人民共和国成功地恢复和改进了旧有工厂，建立了新的拥有現代化装备的工厂。按照科学技术發展的十二年规划，中华人民共和国将成为科学技术先进的国家之一。因此必須迅速掌握現代技术并向前發展，而这要是不研究新的自动装置，不在国民經济中采用自动化是不可想像的。

冶金企业和机器制造企业中愈来愈多地采用自动装置。在鞍鋼采用了控制初軋机、鋼軌压軋机和控制高爐进料的自动設備。正在建設的和已建成的汽車工厂和生产噴气飞机的工厂都拥有流水綫、傳送帶、自动鑄造以及其他自动化了的对象。

正在建設的工厂应当用最新的，建立在广泛自动化和采用自动学最新成就的基础上的設備来装备。

在这样的情况下，自动学和远动学的专家应当很好地知道现有的自动控制系统，要会设计新的自动控制系统和应用它们来使生产对象自动化。除此之外，必须仔细研究自动化的对象，对因自动化而得到的效果有清楚的概念。这一切都要求自动学和远动学的专家有广阔的技术视野，善于独立解决复杂的技术任务，创造性地对待工作，不断地学习。

应该记住，自动学和远动学是发展最快，最迅速地趋于完善的科学技术部门之一。

关于“自动控制系统”课的一般介绍

“自动控制系统”这门课由三部分组成。

第一部分包括电力拖动理论的几个问题和电动机的接触器——继电器控制系统。这里面讲电动机的静态及动态特性，电动机的起动和制动用的接触——继电控制系统的建立；

第二部分中讲电动机的连续控制，其中包括用电机放大器和电子放大器的连续控制。这里讲电机放大器（ЭМУ）工作的分析，以及直流电动机自动调速系统；

第三部分用来研究远距离传递和随动系统。

本课程是自动学远动学专业的基础课之一。

我们假定同学事先已全部或部分地学过：“调节原理”、“自动元件”、“应用电子学”、“电机学”。本课程的任务是研究自动控制系统的静态和动态的现代分析方法以及它们的计算和设计方法。课程大纲中规定学生做8个实验每个3小时，并有课程设计。

“自动控制系统”课的主要参考书为：

Т. Н. Соколов——“Электромеханические системы автоматического управления”，
Госэнергоиздат, 1952.

М. Г. Чиликин——“Общий курс электропривода”，
Госэнергоиздат, 1953.

А. Г. Иосифьян, Б. И. Каган——“Основы следящего привода”，
Госэнергоиздат, 1954.

Х. Джемс, Н. Никольс, Р. Филлипс, под редакцией Я. З. Цыпкина,
“Теория следящих систем”，苏联外文出版社, 1951.

第一章 自动控制系统概念

§1 手动控制和自动控制的概念

为数众多的各种各样的自动控制系统不可能在本课程的范围內一一包括。但是，考虑到它們构造上相似之处，在研究了它們之中用得最普遍的一些系統之后，是可以得到足够的能力来计算和分析任何自动控制系統的。

自动控制系统之間的主要区别在于其各个元件构造之不同以及它們工作所依据的物理过程之不同。这些元件的作用是放大和变换控制訊号和檢查訊号。这些元件串联起来就形成控制系统。

控制分为手动和自动两种。手动和自动控制可以是直接的或是远景的。

手动直接控制（圖 1）和手动距离控制（圖 2）都以有操作人为前提。

操作人根据测量仪表的指示操作控制机构，控制的质量完全取决于操作人的技术。控制迴路經過操作人的动作而闭合，操作人好比是控制迴路中不可分割的一个元件——环节。显然，操作

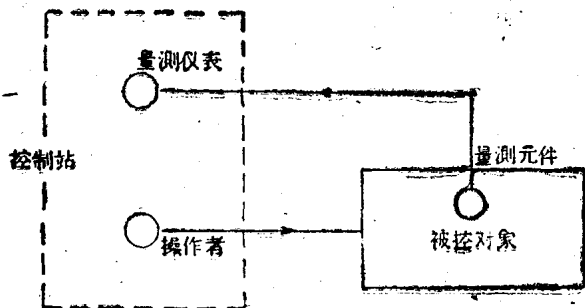


圖 1

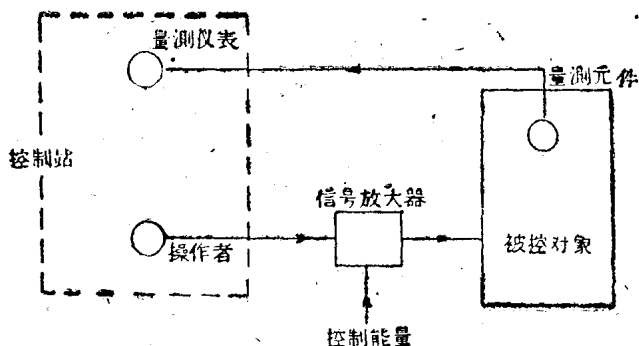


圖 2

人不在时就要失去控制。

在手动距离控制中，操作者要操作离他很远的对象，不像在直接手动控制时对象就在操作者身边。考虑到在把讯号传给远处的对象时不可避免的能量损失，在远距离控制中必须有放大器（圖 2）。

在自动控制中，計算装置（在自动线路中常常称做显示元件）代替了操作人。当支配装置发出的给定信号和从被控制对象传来的被检查信号之间发生差异时，計算装置就发出控制讯号。操作人的作用缩小到安排支配装置或者是向計算装置发信号。应当注意，在自动控制系统中控制迴路是封闭的。这样，封闭结构是绝大多数自动控制系统的特点；或者更确切地说，现代的自动控制系统总是有反馈的。

一般说来，自动控制系统可以有不只一个，而是许多个反馈，因此它们的结构就不是单閉路，如同圖 3 所示的，而是多閉路的自动控制系统实质上是距离控制的，因为它们的迴路中总是有放大器。

§ 2 自动控制系统的结构圖

按照其用途，組成自动控制系统的元件分为：执行元件，放大元件，計算元件（显示元件），支配元件和測量元件。每种元件

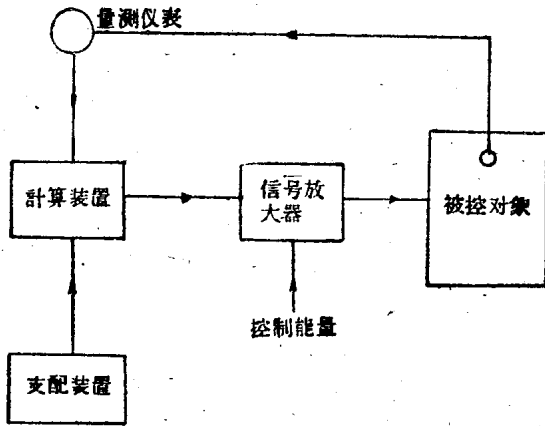


圖 3

的作用可以从圖 3 很方便地看出来。

在分析自动控制系统的工作时，特别重要的是要知道信号是如何在元件之間傳遞的，信号如何放大，有哪些慣性引起的畸变，在傳遞当中有沒有积分或微分。此外还必須找出元件之間的一切連系以及这些連系的連接处，这一切都可从結構圖得到完整的概念。

結構圖由基本动态环节組成，并标明了它們之間的連系。根据对組成自动控制系統的元件或装置的分析，可得到它們的傳遞函数，傳遞函数用算子的形式写出来。每个环节都有确定的傳遞函数。

动态环节有許多种，各以它們的傳遞函数而互相区别开来(关于基本环节及其傳遞函数的概念在“自动調节理論”中有詳細叙述，所以在这里就不談了)。

这样，分析自动控制系統的第一步就是画結構圖。关于建立結構圖的問題在“自动調节理論”中有詳細叙述。上面已經指出，自动控制系统(CAV)的特点是具有反饋。因此，應該講一講具有反饋的結構圖的变换。

假定有一自动控制系统(CAV)的結構圖(圖 4)。把这个圖

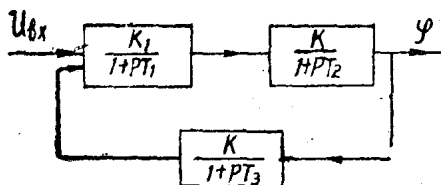


圖 4

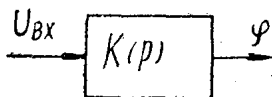


圖 5

变成圖 5 的样子，得到

$$K(p) = \frac{K_1 K_2 (1+pT_3)}{(1+pT_1)(1+pT_2)(1+pT_3) + K_1 K_2 K_3} \quad (1-1)$$

变换已完成了，因为我们已经找到了就动态特性说来和 CAV 等价的环节的传递函数。从这个式子中可以决定 CAV 的特征方程

$$(1+pT_1)(1+pT_2)(1+pT_3) + K_1 K_2 K_3 = 0. \quad (1-2)$$

如果已经知道结构图的话，比较 (1-1)、(1-2) 两式以及圖 4 可以得到迅速找出單閉路系統的傳遞函数和特征方程的規則。單閉路系統的傳遞函数是一个分式，其分子等于各正饋环节的傳遞函数的分子和各反饋环节的傳遞函数的分母的乘积，分母則等于閉环所有环节的傳遞函数的分母的乘积再加上所有环节的分子的乘积，系統的特征方程是閉环中各傳遞函数的分子乘积和分母乘积的和，并讓它等于零。

如果 CAV 是多閉路的，則首先应当变换內环，然后变换外环。圖 6 是二閉路 CAV 的结构圖。相当于迴路 I 的环节的傳遞函数是

$$K_I(p) = \frac{K_1 p T_3}{(1+pT_1)pT_3 + K_1},$$

这样便得到圖 7 所示的單閉路圖，这个圖可以用上面講的方法繼續变换。

CAV 的结构圖取决于信号在其各元件間的傳遞方向。CAV 基本上是由定向作用的装置組成的。例如：电子管放大器只能通过方向为由入端到出端的信号，磁放大器和其他元件也只能这样通过信号。因此一般說来 CAV 具有完全肯定的唯一正确的结构圖。