

电子模拟装置 及其在研究 自动调节系统中的应用

波·雅·柯 崗

科学出版社

~~51.87~~ 73.87
~~4~~ 9

电子模拟装置
及其在研究
自动调节系统中的应用

波·雅·柯崗 著

中国科学院自动化研究所 譯
清华大学自动控制系

科学出版社

Б. Я. КОГАН
ЭЛЕКТРОННЫЕ МОДЕЛИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Физматгиз, Москва, 1959

內 容 簡 介

电子模拟装置是近代先进科学技术成就之一,它在自动调节理論和其他科学技术领域中获得了极其广泛的应用。

本书在总结苏联和国外經驗的基础上,相当詳尽的提供了电子模拟装置及其基本运算元件的完整概念,闡述了应用这些装置研究綫性和非綫性自动调节系統的方法和特点,并且着重論述了某些基本問題的发展方向。

本书可供从事研究、設計自动调节系統或对电子模拟計算技术感兴趣的广大科学工作者、工程技术人员閱讀之用,也可供高等学校計算技术专业及自动化专业学生作参考用。

电 子 模 拟 装 置
及其在研究
自动调节系統中的应用

波·雅·柯崗 著

中国科学院自动化研究所 譯
清华大学自动控制系

*

科学出版社出版 (北京朝陽門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1960 年 3 月第 一 版

书号: 2100

1960 年 3 月第一次印刷

字数: 381,000

精: 1—5,500

开本: 850×1168 1/32

(京) 平: 1—4,500

印张: 12 3/4 插图: 31

定价: 精装本 2.90 元
平装本 2.40 元

、作者为中文版寫的序言

在写本书的时候，作者努力以求的不仅仅在于論述所研究裝置的个別的结构特征，也不在于叙述个别解题原理的概念的发展，而把注意力着重放在那些尚未获得解决的问题的发展方向上。这就有理由相信，尽管計算技术、特别是数学模拟发展得非常快，但发表这本在几年前写成的书，仍然是有一定的意义的。

作者愉快地看到：自从他有机会了解数学模拟領域在中国开展的工作情况以来的很短期間內（不到两年），中国的学者和工程师們在这个科学技术領域中已获得了重大的成就。

本书中文版的出版，将有助于使它的内容为伟大的中华人民共和国的广大的工程师和科学工作者所熟悉。我感到非常高兴的是：本书的第一个国外版本是在中国出版的。这是由于朱培基、屠善澄同志和中国科学院自动化研究所、清华大学自动控制系全体科学工作者的建議并有賴于他們的努力。

朱培基同志补充了中国学者的論文目录并使我有可能在中文版中作某些修正。

我对朱培基同志、屠善澄同志、中国科学院自动化研究所、清华大学自动控制系全体工作人員以及出版社为把本书翻譯成中文并出版所作的大量工作，表示最真摯的謝意。

B. Korany

莫斯科，1959年

前 言

自动调节及控制系统的发展在自动调节理论和实践面前提出了新的、愈来愈复杂的问题。

最近8~10年,在解决这些问题时,已经广泛地应用了直流电子模拟装置。在建立试验性的研究和调整时,被用来进行计算;而近来,则进一步被用来作为控制及调节系统的元件。但是电子模拟装置的作用远不止限于这些应用。

电子模型与电子数字计算机结合起来所构成的复合的断续-连续计算装置,在模拟技术中展现出新的、宽广的前途。

尽管这样,但是,在我国的文献中,实际上一直到现在还缺少将一些理论问题、一般原理和直流电子模型的使用方法等概括起来并予以系统化的这样一本书,虽然这方面在苏联和国外已累积了不少的经验。

本书的目的在于弥补有关上述问题的文献中所存在的空白。书的内容限于研究电子模型及其基本运算元件,以及应用模型来解决自动调节系统的动态问题。

在叙述中,假设运算放大器具有理想的频率特性,也就是在开环情况时,它的传递函数等于常数,即它的放大系数。在这本供广大读者初步了解电子模拟技术用的书中,不涉及一些复杂的、十分重要的、有趣的、但在目前还未完全研究好的问题,这个假设是允许的。

鉴于书的篇幅有限,作者从审核中删除了一些在解决自动调节问题时意义不大的问题,或利用计算技术的其他方法能更有效地解决的问题。其中主要的如用电子模型来解代数方程、偏微分与积分方程这一些问题。

本书供熟悉自动调节与控制理论、实践问题及电子学基础的

讀者用。

在編写本书时，利用了作者及其同事在苏联科学院自动学和远动学研究所中作出的 ЭМУ 型系列电子模型的研究成果，以及利用了 1950 年至 1956 年期間作者在莫斯科高等技术学校高級工程師訓練班、在对苏联科学院自动学和远动学研究所的科学工作人員和在莫斯科物理技术研究所所講授的“自动調节系統的模拟”讲义中的材料。

所引用的文献索引是根据作者姓名的原文及其論文的順序(标在方括号內)来表示。书后的参考文献目录表是按作者姓名根据俄文字母順序排列¹⁾。

作者深切地感謝費列巴姆 (А. А. Фельдбаум)，崔普金 (Я. З. Цыпкин)，捷捷里巴姆 (И. М. Тетельбаум) 和雅姆沙諾夫 (Л. В. Ямшанов) 校閱原稿并提供許多有价值的意見。在最后校訂本书时考虑了这些意見。对特拉培茨尼科夫 (В. А. Трапезников) 表示謝意，在电子模拟領域十年的共同工作中我經常利用他的意見，并感謝与作者一起在自动学和远动学研究所工作的全体工作人員。

在准备出版手稿时，特拉宁 (Ф. Е. Транин)，古洛夫 (В. В. Гуров)，馬斯洛夫 (А. А. Маслов) 及彼利图罗 (Т. В. Прицулло) 給作者很大的帮助。为此，作者向他們表示自己衷心的感謝。

莫斯科，1957 年 4 月

1) 从 1947 年至 1955 年期間較完全的有关模拟問題的文獻目录請參閱“自动学和远动学”(Автоматика и телемеханика) 雜誌 1956 年 17 卷第三及第四期。

目 录

作者为中文版写的序言	(i)
前言	(iii)
緒論	(1)

第一編 电子模拟装置及其元件

第一章 数学模拟方法	(7)
§ 1. 以相似为基础的模拟	(7)
§ 2. 利用解算装置的模拟	(15)
§ 3. 模拟装置和数字计算机	(18)
§ 4. 数学模拟方法的复合	(19)
第二章 綫性运算元件	(23)
§ 1. 解綫性微分方程所需的解算元件	(23)
§ 2. 开环型綫性运算元件	(27)
§ 3. 带有参数补偿的綫性运算元件	(35)
§ 4. 閉环型(带有负反饋的)运算元件	(42)
§ 5. 各种类型积分装置的比較	(58)
第三章 綫性运算元件的誤差	(65)
§ 1. 誤差理論的概述	(65)
§ 2. 运算元件的原始誤差	(71)
§ 3. 运算元件誤差的随机分量	(79)
第四章 直流运算放大器綫路	(85)
§ 1. 运算放大器的基本要求	(85)
§ 2. 具有参数补偿零点漂移的綫路	(87)
§ 3. 自动稳定零点的运算放大器綫路	(98)
第五章 二极管函数轉換器	(114)
§ 1. 概述	(114)
§ 2. 二极管通用函数轉換器	(116)
§ 3. 二极管专用函数轉換器	(126)

第六章 二极管函数轉換器的基本原理……………(147)

- § 1. 在应用分段綫性近似法时宗量軸的分段規律及在每一段上
綫路的微分电导值的确定……………(147)
- § 2. 二极管非綫性轉換器的誤差……………(157)
- § 3. 构成二极管函数轉換器綫路的方法……………(167)
- § 4. 两个和两个以上宗量的二极管函数轉換器……………(177)

第七章 利用电子射綫管的函数轉換器……………(189)

- § 1. 基于靜态随动系统原理的閉环型裝置……………(189)
- § 2. 函数轉換器的誤差……………(191)
- § 3. 可控扫描射綫的函数轉換器……………(199)
- § 4. 开环型脉冲函数轉換器……………(203)

第八章 乘法和除法裝置……………(205)

- § 1. 乘法裝置的分类和构成原則的概述……………(205)
- § 2. 基于自动調節传递系数原理組成的乘法裝置……………(213)
- § 3. 由平方函数轉換器組成的乘法裝置……………(234)
- § 4. 基于上述原理复合的乘法裝置……………(253)

第九章 直流电子模拟裝置的构成原理……………(260)

- § 1. 运算元件組成, 在裝置中的配置及解題时相互間联接的方
法……………(260)
- § 2. 初始条件及运算元件传递系数的設置方法……………(263)
- § 3. 运算放大器零点的单个及成組的設置, 防止漏电的方法和
过载的指示方法……………(271)
- § 4. 模拟裝置控制系統的基本职能及构成原則……………(278)
- § 5. 解答的觀察和記錄……………(284)

第二編 电子模型在研究自动調節系統中的应用

第十章 題目的編排和解題方法……………(289)

- § 1. 在解給定微分方程式时, 联接各运算元件的結構图的組成
……………(289)
- § 2. 根据原始方程式的系数各个运算元件传递系数的确定。
表示因变量和時間的比例尺的选择……………(298)
- § 3. 初始条件和扰动力的确定……………(305)
- § 4. 具有极大時間常数的自动調節系統的模拟……………(306)
- § 5. 解題举例……………(308)

第十一章 綫性化自动調节系統的模拟	(314)
§ 1. 帶有常参数的普通綫性化自动調节系統的模拟	(315)
§ 2. 具有参量随時間变化的自动調节系統的模拟	(322)
§ 3. 变系数器	(330)
§ 4. 存在恆定延迟时的自动調节系統的模拟	(336)
§ 5. 存在干扰时自动調节系統的模拟	(349)
第十二章 非綫性自动調节系統的模拟	(353)
§ 1. 在无慣性元件中存在典型非綫性特性的自动調节系統的模 拟	(354)
§ 2. 在慣性元件中存在典型非綫性特性的自动調节系統的模 拟	(369)
§ 3. 非綫性自动調节問題的求解实例	(384)
附录 I 利用一个运算放大器对复合綫性运算的复制	(394)
附录 II 几种类型的直流电子模拟裝置的簡要技术特性	(403)
参考文献	(445)

緒 論

自动調節系統的发展及其在工业和国防技术上的推广,需要解决一系列的問題。这些問題与系統結構、个别元件的特性的合理选择和各种参数对过渡过程及稳定状态影响的品質評定有关。

同时,摆在研究人員和設計人員面前的任务,不仅要給出这些問題的定性的解答,而且要使解答得到数字的結果。然而甚至对于比較簡單的綫性自动調節系統,获得数字的解答也有一定的困难,并需要耗費很多的时间。随着自动調節系統的复杂化(例如,多环路系統的情况),系統中存在迟延、非綫性特性及变参数元件,以及需要考慮連續变化的随机扰动的情況下,这些困难就更加增大。

飞机运动的稳定系統、帶恆定迟延的工业調節系統(例如,被压延材料厚度自动調節系統),用无綫电定位器自动跟随目标的系統(在信号中除有效信号外还引入了是時間的随机函数的干扰信号),联接成統一的或由一个調節对象(蒸汽鍋炉、造紙机等)結合成的复合的自动調節系統等,都是这些自动調節系統的例子。

另一方面,加速調節对象中的生产过程(強化生产),会使調節器和对象的小参数及非綫性的影响增大。在这些情況下,自动調節系統要用高阶非綫性微分方程式来描述(帶很多非綫性函数)。一般說来,对它們求解的解析方法还未研究出来。对于自动調節系統的分析研究,在一定的阶段,使用模拟方法和工具不仅可以获得上述問題的解答,而且,可以大大的減少需要耗費的时间。

模拟的本質是用能在一定程度上复制原始系統或其各別部分特性的模型来代替全部調節系統或其中一些元件。含有模型的系統中,将产生相似于在实际系統中所发生的过程。这些过程可以觀察、記錄;可以檢驗它們与理論分析的結果是否相符;可以用直

接观察来代替过渡过程的分析计算；以及可以在实验室条件下进行系统的试验和调整。

这样，模拟就能够解决实验研究的一些基本问题。

目前，模拟的方法被划分为主要的两类：

1. 物理模拟；
2. 数学模拟。

物理模拟是在模型上研究与实物的物理性质相同的现象。例如在风洞中对飞机模型鼓风、用小型的同步发电机来代替大型同步发电机等。

由于能保持过程的物理性质，用模型便可以复制表征被研究的过程的全面的现象。其中特别是那些不能用数学描述和不可能考虑为过程方程式的现象和过程。所以物理模拟可加深关于所发生的现象的全面的认识，并使各个过程的数学描述更明确和容易。

物理模拟很早就被应用于技术中，主要是在空气及水力动力学和在建筑技术中；在很多研究调节系统的场合中也得到了应用：

1) 调节系统的特性的复制比之根据对象的理想数学描述的数学模拟，较为完整；

2) 调节装备可以接进模型中，不必使用会引入附加误差及失真的转换装置。

但是，物理模拟也有重大的缺点：

1) 在研究每一新的过程时，需要建立新的模型；

2) 被模拟对象的参数改变，经常使模型作繁难的改装甚至更换；

3) 复杂对象（锅炉，各种动能装置）的模拟通常费用十分昂贵。

在确定物理模拟的地位时，应当指出这种方法的通用性无疑较数学模拟方法为小。但在一系列情况下，例如，在研究调节过程及各种非静止状态时（如在动力系统中、在化学和冶金生产的各别机组中），在研究电力拖动自动学时，在研究气动调节器时以及其

他等等情況下，它是十分有效的。

物理模擬的理論和實踐在國內和國外的¹⁾工作中已研究得足夠完整了。

近年來，在研究自動調節系統中，數學模擬方法得到廣泛的應用。它基於用來描述原物及模型現象的微分方程的一致性，能利用一個裝置完成所有各類問題的求解，能保證很快和容易地由一個問題轉到另一個問題，能引入變參數和不同的初始條件，而幾乎完全消除模型設備的固有參數對解題準確度的影響，能簡單引入不同種類的系統性的以及隨機的擾動，能按環節來模擬自動調節系統。

此外，在數學模擬中，能夠比較簡單地改變被研究系統中各個元件的參數，並能闡明這些變化對整個系統工作質量的影響。

在很多情況下，適當地組合物理與數學模擬裝置為統一的系統，可以兼有兩種方法的優點。

在進行數學模擬時，數學描述可以作為過程的原型，而數學模型則為實現給定數學關係的裝置，也就是計算機。

這些數學機械最大的特點是：問題的原始變數在計算機內是以一定的物理量來表示的。因此這就在很大的程度上預先決定了它能夠以較大的速度進行工作，而所獲得的結果的準確度則被限制在頭三個有效數位內。可是在大多數情況下，準確度的限制並不成為使用這些裝置的障礙。因為自動調節系統一般說來是“粗略”的動態系統。大家知道，這些系統的參量，其準確度一般不超過10~20%。這種類型的數學機械的發展可以作為兩種在最初是獨立發展的技术方向——數學模擬和解算技術——而後匯成體的明顯例子。

對於一個自動調節系統(САР)的動態設計，在設計的最初階段，上述數學機械的利用將加速其計算過程，對於一個作好了的設備，在試驗室的條件下，利用計算技術的工具，將可代替其調節迴

1) 請參閱：М. В. Киричев и М. А. Михеев [1], М. П. Костенко [1], В. А. Веников [1].

路中的各个部分,从而对它进行实验研究和调整。上述两种情况中,是利用这些计算技术的工具作为调节迴路的整个或各个部分的数学模型。正是在这个意义上,这里使用了术语“模拟”。

在很多的文献上曾经提到了数学模拟及解算技术的许多问题。

在各个方面涉及这里所提问题的文献中,应当指出勃鲁克的书(И. С. Брук^[1])。在此书中,描述了勃鲁克领导下制成的机械积分器及阐述了它的使用方法。

在波契尼柯夫(Н. И. Пчельников^[1]),毕尔史金(А. А. Би-рштейн^[1]),斯伐波达(А. Свобода^[1]),多布罗古尔斯基和基多夫(С. О. Доброгурский, В. К. Титов^[1])的一些书中叙述了机械解算装置的工作原理及结构。

在布鲁耶维奇(Н. Г. Бруевич^[1])的书中叙述了解算装置准确度的一般理论问题。

在斯丹尼斯拉夫斯基(Б. И. Станиславский^[1]),诺沃塞里切夫和列别捷夫(Я. В. Новосельчев, А. Н. Лебедев^[1])的书中、考勃林斯基(Н. Е. Кобринский^[1])的论文中,布鲁耶维奇和多斯屠波夫(Н. Г. Бруевич, Б. Г. Доступов^[1])的教科书中及日丹诺夫(Г. М. Жданов^[1,2])的讲义大纲中提出了机械及机电解算装置。这些书籍的作者对机械及机电解算装置给予主要的注意,仅大概地阐述了电子的线性及非线性运算元件的构成问题。

史尼尔曼(Г. Л. Шнирман^[1])在研究振动仪用的微分和积分装置的论文中,首先系统地叙述电的微分和积分线路的分析,并指出使用电子放大器来构成它们的合理性。

带有交流放大器工作在人为重复过程的原始的电子积分器、以及电气网络组成的解偏微分方程式的电积分器,在古金马赫(Л. И. Гутенмахер^[1,2])的书中叙述了他们的理论及研究结果。

除考勃林斯基(Н. Е. Кобринский)的论文和上述古金马赫的书外,在慕尔莱依(Ф. Ж. Муррей^[1])和莱蒙(Ф. Г. Рэймон^[1])的书中也发展了连续作用的电气和电子机器的理论问题。在最后一

本书中,对采用直流线性电子积分器进行阐述,同时根据上述古金馬赫 (Л. И. Гутенмахер^[2]) 书中所发表的结果作了一些理论贡献。在萊蒙的书叙述法国的 SEA 公司的经验。

在索洛开 (В. В. Сорока^[1]) 的书中间完全地研究了数学模拟问题。此书中叙述了机械的、机电的、电气和电子运算元件,解代数线性及非线性方程的装置的工作原理,叙述了机械积分器和构成电子积分器的原理。在书中也阐明了基于相似的模拟及复制微分和有限差分方程的装置的构成原理。此书提到古金馬赫 (Л. И. Гутенмахер^[2]) 的很多的工作。在捷捷里巴姆 (И. М. Тетельбаум^[1]) 的讲义大纲中,简短清楚的叙述了基于相似由无源元件构成模拟的原理和在模拟中应用相似理论的问题。

在柯恩和柯恩 (Г. А. Корн, Т. М. Корн^[1]) 的书中间,极详细地叙述了直流电子模拟装置¹⁾。书中叙述了求解问题的方法、各个运算元件的构成原理,并描述了在美国生产的一些类型的电子模型。

数学模拟的问题在涉及自动调节理论与实践的一些书中也都被提到,如索柯洛夫 (Т. Н. Соколов^[1]), 费列巴姆 (А. А. Фельдбаум^[1]), 尼克松 (Ф. Е. Никсон^[1])。

分析上述文献,表明对数学模拟和解算技术的一般问题已得到了足够完整的叙述。

现在特别感到在已有的一些仔细地研究各类模拟装置和用它们来求解各种技术问题的书中还存在着一些缺点。

由于这样,本书的目的是给出直流电子模拟装置及其主要运算元件十分详细和完整的概念,在总结苏联和国外所累积的经验的基础上,阐述在自动调节系统研究中应用这些装置的方法及特点。

在国外,美、英、法、瑞典、挪威、日本及其他国家,对直流电子模拟装置进行着大量的研究。仅在美国在构造电子模型方面工作的就超过 25 家公司,其中有很多飞机制造公司。空军及海军在大

1) 或另称为解微分方程的电子装置。

学及研究所中資助进行这些工作。 根据 1954 年在美国及加拿大进行的极不完全的調查 (Л. Б. Вейдел, А. В. Вортем^[4]), 第一台电子模拟装置在 1946 年动工; 現有的全部装置中的 50% 都是在最近两年半以內投入运轉的。 装置的生产在不断地增加, 而在 1954 年就生产了 20 台各有 90 个运算放大器的装置。

在苏联, 在古金馬赫和柯罗里柯夫 (Н. В. Корольков)、特拉彼茨尼科夫 (В. А. Трапезников)、費列巴姆、烏沙柯夫 (В. Б. Ушаков)、彼得洛夫 (Г. М. Петров)、斐茨涅尔 (Л. Н. Фицнер)、維金別尔克 (И. М. Виттенберг)、勃魯克 (И. С. Брук)、列諾夫 (Н. Н. Ленов)、列別捷夫 (С. А. Лебедев)、索柯洛夫 (Т. Н. Соколов)、米哈依洛夫 (А. В. Мехайлов)、索洛多夫尼科夫 (В. В. Солодовников)、卡捷里尼科夫 (В. А. Котельников)、波利沙尔 (Г. Л. Полисар)、史士肯 (А. В. Шишкин) 等领导下所做成的机械和机电积分器的、以及各种类型的电子积分器的模拟装置的独特的設計, 已成功地用来解自动調节的各种問題。

第一編

电子模拟装置及其元件

第一章

数学模拟方法

§ 1. 以相似为基础的模拟

近年来,数学模拟向两个方向发展:根据已知的相似系统构成模型及由一些单个的解算装置构成模型.

构成第一类模型是利用各种不同物理性质的现象间的相似的系统;例如,机械的与电的现象间的相似,电的与声的现象间的相似,电的与热的现象间的相似.这可以将原型中现象的研究转移到与原型物理性质不同的模型上.同时,从一种物理现象的领域转到另一种领域,目的是简化模型的制造和降低其价格,使方法便利并提高未知量的测量准确度.例如,在有粘滞摩擦时,在扰动作用 $F(t)$ 的影响下,在平衡位置附近的机械摆(图 1)的运动可用以下形式的微分方程式来描写:

$$J_{\Sigma} \frac{d^2\varphi}{dt^2} + h \frac{d\varphi}{dt} + mgl\varphi = F(t). \quad (1.1)$$

在带集中参数 (L , R 和 C) 的电路(图 2)中,接上电动势 ($\mathfrak{A}. \mathfrak{D}. \mathfrak{C}.$) $E(t)$, 其电荷运动可写成形式上与 (1.1) 式相似的方程式:

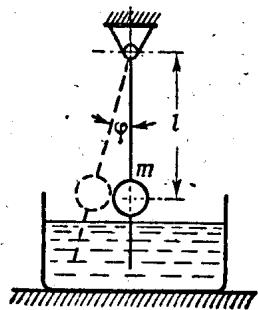


图1 物理摆

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = E(t). \quad (1.2)$$

其中 q ——电荷。

微分方程式(1.1), (1.2)的相同性允許在适当选择常数的情形下, 在电的模型上进行机械振盪的研究, 反之亦可。

电的动态装置¹⁾ 可以作为应用相似来研究自动調节系统的例子。

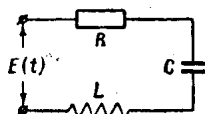


图2. 振盪迴路

把电的动态相似作为装置的基础(图3), 装置是5个电磁鉄和5个小框子的系统, 这些小框子位在电磁鉄鉄心的气隙中。

最初的小框子放在电磁鉄的輻射形間隙中, 第5个小框子放在均匀的磁場中, 这个磁場是在最后一个电磁鉄鉄心的平行板极間所形成。在相似装置的小方框中不存在电流时, 第5个小框子的平面是垂直于磁通量的方向。每一个小框子的出头都在中点接出。在仪器中規定了小框子旋轉角度的指示(最大角度为 $\pm 45^\circ$), 并裝有小方框中电流的限制器, 它在轉动部分轉到最大角度时工作。在可动系统的底部的鉄軸上加上負重, 以便設置所需的轉动慣量值。

相似装置的可动部分的运动方程式可写为下式:

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \sum_1^n M_i, \quad (1.3)$$

其中 J ——可动部分的轉动慣量, φ ——以原始位置計算的可动部分轉动角度, $\sum_1^n M_i$ ——作用于可动系统的全部力矩之和。

作用于可动系统的全部力矩的总和可以分为两个部分: 机械力矩和电磁力矩。若忽略干摩擦力矩, 則机械力矩可归結为由悬挂鈎的弹力引起的力矩及对空气的摩擦力矩之和:

1) 解二阶方程式的这类装置是米諾尔斯基 (Н. Ф. Милорский^[1]) 所提出(参阅 К. А. Людке^[1, 2])。1939 年索洛多夫尼科夫 (В. В. Солодовников^[1]) 应用它来研究水輪机的自动調节系统。卡兰巴諾夫 (В. А. Карабанов^[1]) 敘述了电的动态相似的进一步的研究結果。