

高等学校教学用书

自动调整理论

K·B·叶格洛夫著

中国工业出版社

高等学校教学用书



自动调整理论

К. В. 叶格洛夫著

謝緒愷譯

苏联高等教育部审定
作为电工和动力院系的教学参考书

中国工业出版社

本书包括下列主要内容：自动调整系统的建造原理；自动调整器的组成元件的典型结构及其基本特性；在各种实际情况下所使用的富有代表性的电气量调整系统和非电量调整系统；惯性调整系统中的过渡过程的计算原理和稳定性及系统品质指标等问题的研究；计算方法以及为说明计算方法而举出的大量例题。

本书是为从事于自动学问题的大专学生和工程技术人员而写的。

• К. В. ЕГОРОВ

ОСНОВЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ МОСКВА 1955

* * *

自动调整理论

謝緒愷譯

（根據水利电力出版社紙型重印）

*

中国工业出版社出版（北京修脚园路西10号）

（北京市书刊出版事业许可出字第110号）

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 850×1168 毫米·印张 $12^8/32$ ·字数347,000

1958年5月北京第一版

1961年7月北京新一版·1961年7月北京第一次印刷

印数0001—530·定价(10)2.00元

统一书号：15145·456 (8)

原 序

本書專門討論关于一个参数的綫性自动調整系統，是作者多年来在榮獲列宁勳章的莫斯科动力学院，榮獲列宁勳章的、以 M.B. 罗蒙諾索夫命名的莫斯科大学以及莫斯科工程物理学院执教时所用的“自动調整”教程的講义之一。

必須指出：这一科学和技术領域在当前的發展是极为蓬勃的。許多理論原則需要在實踐中接受時間的考驗。但是，自动学的基础知識及其最重要的形式——自动調整目前业已变为各种专业的工程师所一致需要的知識。

这本教程是根据高等工业学校的教学大綱编写的，是以普通在高等工业学校所講授的高等教学知識，理論电工基础，电气測量和非电測量，电机及部份有关自动和远动元件的知識为基础的。

因为必須运用某些在高等工业学校所未講授的数学原理，这就是本書之所以对这部份数学原理作簡要介紹的理由。

本書所采用的名詞術語是以其他許多作者所采用的定义为基础的。

本書广泛地涉及到各个方面的問題，缺点在所难免。指出这些缺点就能帮助作者今后提高本書的質量，为此，作者謹向讀者預先致以謝意。

本書受篇幅限制，許多內容不得不大事縮減，某些問題甚至隻字未提。

作者謹向 Д. И. 瑪揚諾夫斯基，A. A. 沃龙諾夫及 B. B. 索罗陀夫尼可夫致謝，他們曾对本書原稿提供了不少有益的意見。

目 录

原序

第一章 自动装置的用途.....	(5)
1-1 自动学的作用.....	(5)
1-2 自动学对社会主义经济意义.....	(6)
第二章 自动控制系统和自动调整系统的基本特性	(7)
2-1 自动化的各种形式.....	(7)
2-2 自动调整系统的主要特性.....	(11)
2-3 闭环自动调整系统的主要特性.....	(17)
2-4 关于调整系统底机能元件和基本动态环节的概念.....	(20)
2-5 方程的算子形式.....	(22)
2-6 有差和无差调整.....	(24)
2-7 自动调整系统的机能图.....	(26)
第三章 自动调整器的典型机能元件.....	(33)
3-1 在自动调整系统的设计过程中的静力学和动力学问题.....	(33)
3-2 概論调整器结构图型的建造和机能元件的选择.....	(35)
3-3 系统元件的方程的线性化.....	(36)
3-4 敏感元件.....	(39)
3-5 放大元件.....	(65)
3-6 动力元件 (伺服发动机, 执行元件)	(88)
3-7 调整元件.....	(101)
3-8 镇定元件.....	(106)
第四章 自动调整器	(119)
4-1 恒定参数调整器, 程序调整器和跟踪调整器.....	(119)
4-2 调整器按被调整参数的形态的分类.....	(122)
4-3 各种形式的辅助能量的特性.....	(122)
4-4 断续和连续作用调整器.....	(124)

4-5 一些典型的調整器.....	(126)
-------------------	-------

第五章 自动調整系統的初等典型动态环节及其微分方程,

算子, 頻率特性和結構綫路	(143)
---------------------	-------

5-1 微分方程, 算子 (傳动函数) 和頻率特性	(143)
5-2 关于单向作用的主要典型动态环节	(148)
5-3 編写調整系統元件方程的例子	(163)
5-4 当环节按各种不同的方式連接时系統的算子	(170)
5-5 复数的基本运算方法	(172)
5-6 开环和閉环系統的方程	(173)
5-7 閉环和开环系統的算子之間的联系	(175)
5-8 調整的差率	(176)
5-9 自动調整系統的动态結構綫路的构成	(176)

第六章 論自动調整系統的稳定性

6-1 有关系統稳定性的概念	(184)
6-2 过渡过程的最简单的形式	(188)
6-3 稳定判据	(195)
6-4 委氏判据	(196)
6-5 茹斯判据	(199)
6-6 古尔維茨判据	(201)
6-7 乃闊斯特判据	(206)
6-8 米哈依洛夫判据	(213)
6-9 对数稳定判据	(217)
6-10 稳定儲备度的概念	(221)
6-11 稳定区域的划分	(222)
6-12 在特征方程的系数空間里的D域分划的概念	(225)
6-13 单复数参数的平面的D域分划	(228)
6-14 双参数平面的D域分划	(233)
6-15 方程的系数存在非綫性关系时按双参数的D域分划	(239)
6-16 多环系統的稳定性的研究	(240)

第七章 自动調整系統的过渡过程品質的研究

7-1 过渡过程品質的指标	(241)
7-2 簡化調整系統的微分方程的問題	(242)

7-3	初具条件的决定	(243)
7-4	研究调整过程品质的运算法 (拉氏变换)	(244)
7-5	根据特征方程的根的分佈研究调整过程的品质 (根分佈法)	(252)
7-6	根据积分特性研究调整过程的品质	(256)
7-7	根据频率特性研究调整过程的品质	(258)
第八章	論建造自动调整系统的某些問題	(282)
8-1	调整系统的结构稳定性	(283)
8-2	根据各环节的特性曲线用几何方法繪制系统的幅相特性曲线, 各环节的特性曲线对系统幅相特性曲线形状的影响	(286)
8-3	决定单环调整系统的放大系数的极限值	(288)
8-4	論某些改善调整系统的动态性质的方法	(294)
8-5	自动调整系统的綜合原理	(298)
8-6	利用D域分划进行系统的綜合	(311)
第九章	自动调整系统的实验研究基础	(314)
9-1	相似原理	(315)
9-2	幅相分析器	(319)
9-3	代数方程分析器	(323)
9-4	微分方程分析器	(329)
第十章	自动调整系统的計算举例	(337)
10-1	溫度調整器的計算	(337)
10-2	电动机轉速調整器的計算	(341)
10-3	小型随踪系統的計算	(352)
10-4	压力調整器的計算	(355)
10-5	电压調整器的計算	(364)
10-6	利用双参数D域分划的方法来决定調整系統中 某些参数所允許变化的范围	(368)
10-7	随踪系統的計算	(371)
10-8	校正裝置的綜合举例	(380)
附录		(383)
参考文献		(387)
譯名对照表		(390)

第一章 自动装置的应用

1-1. 自动学的作用

将人类从工艺过程的直接参与中逐渐解放出来可以说是现代技术的一切发展方向的特征。

我們知道，人类为了满足自己的需要在相当早的时候就曾使用两类机器：机器工具机和机器发动机。现在，第三类机器——机器控制机——日渐开始使上述两类机器在工作中建立有机的联系。

自动学作为一门科学，担负了一项光荣而又艰巨的任务，它要创立理论和实践的先决条件，以期建造和发展较新类型的机器——机器控制机。这些机器能够协调上述两类机器的动作，也能够某种程度上为人类完成一些形态复杂的、对机器进行控制的活动（建造反射自动机）。因此，自动学及其最发达的形式——自动调整和自动控制装置——在现代人类的生活中所起的作用是难以计量的。

我們之所以建造自动调整系统，目的在于：使各式各样装设有这种自动机的技术对象能自动保持所需的工作状态，而无须人们直接的参与。自动调整系统能够使一个乃至若干个物理量保持恒定，或者按所给定的规律进行变化，这些物理量正是表征着在自动调整系统的服务对象中所发生的过程的。

自动调整器是自动装置的一种基本而又最重要的形式，借助于它就可以显著提高工艺过程的效率，可以创造使用超高和超低参数（电压，电流，速度，压力，温度，频率等等）的条件，可以把工作人员从繁重的体力工作中解放出来，把工作人员的数量减少，可以提高产品的质量，保证工艺过程的高度精确，末了还可以在人所不能适应的条件下或人所不能到达的地区使所需的过程具有发生的可能。

举例来说，在苏联的许多动力系统中就有好多小型和中型水电站是没有一个站内工作人员而自行运转的，只有值班的基层电站负责照顾一组这样的电站。在这些电站里，各个发电机的启动停车，转速调整，电压调整以及许多其他的操作全部是自动化的。

就热电站而論，其中像鍋炉里的燃燒过程和透平发电机的工作状态等等最复杂的工艺过程都是自动調整的。把一个功率为5万千瓦的热电站自动化就能每年节省10 000吨理想燃料，並且大大減少工作人員的数量。

連續冷軋机在自动化之后，其軋制速度可以高到1600米/分，而在手动控制时其軋制速度仅为600米/分。

在許多生产中，諸如制造电子器件，在光学透鏡上敷鍍金屬，制造盘尼西林，定性和定量分析气体等等經常需要不仅造成而且自动調整像 10^{-4} — 10^{-6} 毫米水銀柱这样极低的气压(高度真空)。这些設備，要求其中进行的过程有很高的精确度，是只能利用自动調整器才能做成的。

关于供和平利用的原子生产的工艺問題，大家知道，也是只能应用自动学的方法才能获得解决的。

1-2. 自动学对社会主义經濟的意义

计划性是实现社会主义經濟的基础之一，而自动化就能在国民經济按计划实现时产生最好的效果。

在社会主义經濟中运用自动学就会促进国家公共福利的增长，因而提高勞動者的物質待遇。借助自动学方法能够把工作人員从繁重的体力工作中解放出来。

要控制各式各样的自动机，工作人員就必须具有很熟練的技术。

由此可見，自动学为消灭体力勞動和脑力勞動間的本質差別創造了现实的条件，这正是一个加速建設共产主义社会的前提。

因此，无怪乎在苏联每一次发展国民經濟的計劃中老是对自动学問題給以无上的注意。关于这一点，在苏联共产党第十九次代表大会的決議中曾經指出：

“加紧进行冶金过程的强化，冶金机組和黑色冶金企业中的繁重工作的自动化和机械化。”

“在电站的生产过程中广泛采用自动化。完成区域水电站的全部自动化，以及进而在动力系統中推行远动技術。”

“在五年中提高……控制和檢示儀器，自動和遠動儀器的產量約2.7倍。”

“大大擴充現有的並動用新的關於……精確測量儀器和工藝過程的自動控制儀器的生產能力。”

“在生產食品和工業品的生產過程中廣泛採用自動化和機械化。”

從蘇聯共產黨第十九次代表大會的指令中摘錄的這段引文以及各主管機關的其他相關的決議，令人信服地說明了我國（指蘇聯，以下同——譯者）在各種國民經濟部門中發展自動化的工作是一日千里的。

目前，在已有的生產規模和科學水平的基礎上，從事於自動學工作的工人和專家所面臨的迫切任務乃在於更廣泛地推行關於一個車間或整個企業的全部生產過程的綜合自動化。

生產的全盤自動化必須規定自己的主要目標在於提高勞動生產率，在於減少參加工藝過程的工人的數目。因此，綜合自動化將在生產最繁重的部門和對於國民經濟有決定意義的企業中優先發展，換句話說，主要是在重工業中優先發展。

第二章 自動控制系統和自動調整系統的基本特性

2-1. 自動化的各種形式

從各種技術部門摘引出來的實際例子一概表明，採用自動化具有許多最重要的優點。其中的主要優點有如下述：

1. 能夠從自動化後的對象得到較高的生產率並提高其經濟性。
2. 能夠保證工藝過程的正常進行和產品的優良質量。
3. 能夠完全避免工作人員直接參與工藝過程。

現代自動學的技术工具武庫真是包羅萬象，它是長時期來為了滿足人類最不同的需要而豐富起來的。

圖2-1所示，是關於自動化主要形式的總括圖。

圖2-1, a所示，是直接（當地的）自動管理被控對象底參數狀態的總括圖。在這些裝置中，所謂管理可以泛指記錄、訊號、分類等

等。作为这类管理装置的例子，可以举出：炉温变化的自动化记录装置，过程的正常运转遭受破坏时的自动讯号设备，以及诸如此类。

图 2-1, б 所示乃为针对被控对象的工艺过程进行直接（当地的）自动控制的总括图。在这种情况下，人们只对自动装置底主控元件施加作用，自动装置则通过动力元件对被控对象发生作用。在这种自动化控制方式下，人们在控制过程上花费的气力真是微不足道。

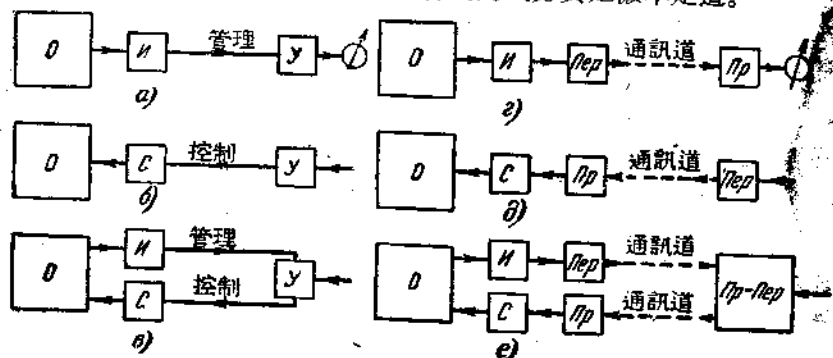


图 2-1 自动化的主要形式的总括图

O—被控对象；H—测量元件；Y—主控元件；C—动力元件；
ПР—接收器；ПЕР—发送器。

作为这种自动控制装置的例子，不难举出：工作人员在控制台控制透平发电机或者蒸汽锅炉的工作，控制热炉或者轧机的状态以及控制飞机的飞行等等。

图 2-1, в 是自动调整的总括图，自动调整兼有管理元件和控制元件，实为自动化最完善的形式。在此情形下，把工艺过程保持在给定水平上完全是自动实现的。

作为这种装置的例子，可以举出：发电机电压的自动调整器，液体容器内液面的自动调整器，飞机的空间坐标位置的自动调整器等。这些调整器不论被调整参数底大小发生变化的原因何在，都能保持被调整参数恒定不变。有时，调整器能使若干在工艺上互有联系的参数同时保持各自所需的数值，但是，调整器只使一个参数保持驻定的（Автономный）给定数值却是屡见不鲜的情况。

在这类自动装置里也包括所谓的“跟踪系统”，它所保持的参数

多半是被控对象的机械位移。这时，所需保持的参数底大小可以随许多条件而发生变化。

用来控制船舵的装置可以看做是随踪系统的例子。在此情况下，舵手只需要把轻便灵活的駕駛盘轉到所需的方向。駕駛盘的位置一有变化，那个異常笨重的船舵就被迫向着适当方向移动，好像在“随踪”駕駛盘一样。

自动調整是一門新的、蓬勃发展的技术部門，它在所有各方面应用的远景是难以預計的。

如果管理对象、控制对象或者調整对象跟被管理量的传送地方（或者发佈控制命令的地方）相距很远，那末为了征服距离就必须使用特殊的技术工具。这类问题是属于运动学的范畴的。

保护自动机（极限值管理自动机）可以视为自动控制机的特款，其用途不外是在由它保护的装备一旦发生故障时，把該装备即时切除，而当对象在正常工作时，此自动机是並不动作的。

各种繼电器和各种只在被保护对象过载时或发生其他故障时才开始动作的器具都是保护自动机的例子。像最大电流繼电器和离心繼电器等就可作为这类自动学装置的代表。前者在电路过载时能把对象按时切除，后者在透平轉子的轉速超过允許值时能使透平按时停轉。

图 2-1, 4 所示为参数的遙测的总括图，該参数表征着被管理对象的状态。在这种装置中，被管理参数是用跟对象相距甚远的儀表进行测量的。这时往往把测量結果交換为便于用通訊道来传送的形式，最常见的是把被管理量变为电量（电流，电压，頻率）的形式。完成这种直接变换所用的装置称为发送器。訊号到达通訊道（在需要通訊道的情形下）的接收端时可能再变换为便于测量和记录的形式。完成这种反变换所用的装置称为接收器。

下面是这类装置的一个例子，即关于测量动力系统里許多电站內的电压，頻率和其他参数的装置，这些电站跟接收儀表所在之处是相距很远的。此間的联系即可借助特殊导綫求其实现，也可利用高压輸电綫求其实现。

我們还可以列举另外一些关于这类装置的例子，如擇取某些对象

的溫度、壓力、稀薄度、水平綫、消耗量以及其他参数的測量示數並把这些示數傳送給化學工業，石油工業或其他工業的中心管理站。在這些場合下的通訊道可能是電綫，也可能是非電通訊綫。

目前，以無線電作為通訊道的系統已日漸開始應用，這就是所謂的無線電遙測裝置。

關於無線電遙測裝置的例子可以舉出一些如下：把大氣狀態（壓力、溫度等）的示數傳送給地上接收站所用的無線電探測器，把試飛飛機狀態参数沿無線電波道傳送給地上接收站所用的裝置等等。

圖 2-1, a 所示，是對被控對象中所發生過程實行遙控的總括圖。被控對象跟控制台相距遠到幾百公里。這時是人們（調度員）直接對遙控系統施加作用而對過程進行控制的。

以下是一些關於這類裝置的例子。譬如，為開閉城市街道照明設備而用的遠動系統；為控制和原子生產有關的過程而用的系統；用無線電對機器實行遙控的系統；用於水中和大氣中的裝置等等。這類裝置有個共同特點，都是用一兩根導綫（通訊道）控制好幾個對象。

圖 2-1, b 所示為既能遙測又能遙控的遠動裝置的總圖。這種裝置比單是遙控的系統更為常見。因為人們在控制任何過程時，如不能檢視過程情態，那照例是有困難的。為了說明這類裝置，舉一些例子如下：動力系統中工藝過程的遙控裝置，供氣和供水系統中工藝過程的遙控裝置，以及諸如此類。

表 2-1 滿可以說明各種儀表製造部門最富有特色的發展趨勢。

表 2-1

儀 表 類 型	儀表的生產量和銷售量，%			
	1923年	1935年	1945年	1950年
指示儀表	28.6	21.7	20	17
記錄儀表	63.7	45.1	35	35
自動調整儀表	7.7	33.2	45	48
	100	100	100	100

這張表上轉載的数据对于許多技术先进的国家來說，是有代表性的。

2-2. 自动調整系統的主要特性

a) 关于調整系統的概念

某种工艺設備（如机器或发动机）中发生的任何物理过程，或者換句話說，在各式各样的控制对象中所发生的任何物理过程，它們总是可为一个或者几个参数所表征的。至于这些参数，它們不过是种种的物理量而已。举例來說，像发电机的端电压，电动机的电流，炉內的溫度，容器里的液面，机器軸的轉速，飞机的坐标，瓦斯管路中的气压等等。这些参数根据具体条件或者必須按某种規律而变化，或者相反，它們不受外界条件和工作状态变动的影響而永远保持恒定的数值。这些参数通称为被調整参数，含有被調整参数的对象叫做調整对象。

自动調整器是这样的裝置，它或者使各种調整对象中的被調整参数自动保持恒定的数值，不受任何形式的、能引起被調整参数发生变化的扰动的影響，或者使被調整参数按一定的規律而变化不息。

調整对象同自动調整器的組合就称为自动調整系統。任何調整系統都可以分解成若干的結構元件。这些元件，如其輸入量的变化能引起輸出量的变化，而輸出量的变化反过来卻不能引起輸入量的变化，那就称为单向元件或檢波元件。电子管就是这种元件的例子，其柵极的輸入訊号会影响阳极电流的大小，而方向相反的影响却是沒有的。檢波原件的另一个例子是他激发电机，它的輸入参数理应为激磁电流，輸出参数理应为輸出端上的电压。

一个調整系統，即使只包含一个檢波元件，也称为单向动作的系統。嗣后，我們將只限于討論这些单向动作的調整系統。

6) 閉路調整器和开路調整器

单向动作的自动調整系統可以根据調整器和調整对象之間的相互作用的性質而进行分类。

1. 帶开环作用回路而工作的調整裝置（开环系統）。在所論情况

或者保持恆定，以达到保証工艺过程能够正常进行的目的。

所需的調整参数随時間而变的特性是由工艺过程的給定形式决定的，由有适当形状的凸凹盘 2 予以保証的。凸凹盘 2 固定在公共軸上，由同步电动机 3 經过減速器 4 带着旋轉；減速器 4 能够保証輸出軸有所需的轉速。凸凹盘的每个位置各对应于气門 5 的一个完全肯定的位置，而气門 5 的位置又决定着通向膜片 6 的备用空气的压力。空气在作用于相应膜片 6 的同时，使后者发生一定程度的弯曲，各个膜片分别是跟各个閥門 7 紧紧相連的，各个閥門 7 时开时閉，从而按照为凸凹盘 2 所預定的程序而对工艺过程的特性产生适当的影响。

依靠这些装置就可以控制象化学，冶金，紡織，石油加工，食品等工业部門以及其他工业部門中的复杂工艺过程。

不难看出，在这种情况下所进行的調整是属于开环作用回路的。而一个最简单的具有閉环作用回路的調整系統（閉环系統）則如图 2-4 所示。

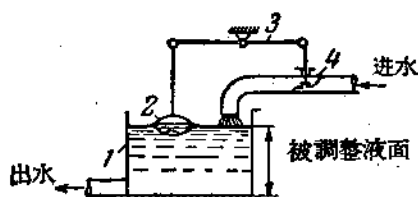


图 2-4 具有閉环作用回路的調整器

在此一情形下，調整器所面临的任務就在于不管扰动如何而永远保持水槽 1 內的液面恆定不变。最常見的扰动是負載的变化，亦即出水量的变化。液面的变化由浮子 2 和鉸連拉桿 3 傳遞給水門 4，水門 4 跟着改变开度，使水槽的进水量发生变化，从而使被調整液面相当于給定的数值。

不难看出，在系統中，决定着調整对象底状态（就所論情况說是液面的变化）的輸出量是在調整器底輸入端上发生作用的。应该把浮子的位置視作調整器的輸入，把調整水門的位置視作調整器的輸出。十分明显，調整器的輸出是在調整对象的輸入端上发生作用的，因为水門使調整对象的进水量所产生的变化实际就是后者的輸入量。

应该把調整对象的出水量变化看成是引起过渡調整过程的外界扰动因素（負載）。

图 2-5 所示的装置是另一个闭环调整系统的实例。转动手柄 1 就会使电桥 2 失去平衡。进到电桥去的讯号由放大器 3 放大，放大器 3 对电动机 4 供电。后者使调整器对象 5（无线电定位器的天线）停放在所需的角度上。横杆連結 6 这时转动电位计上的滑标，使得电桥的失衡电压趋向于零，而系统到达一个新的平衡状态。

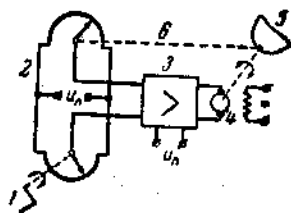


图 2-5 具有闭环作用回路的调整器的第二个实例

由此可见，在后两种情况下所发生的调整是跟图 2-2 所示的调整方式相符的。只在第一情况下被调整参数的数值才必须保持恒定不变，而在第二情况下被调整参数就将跟踪手柄 1 的转动而随时变化。

今后，我们将只限于研究具有闭环作用回路的调整器。

б) 镇定器和调整器

使某种调整对象底被调整参数自动保持给定数值，可以有两种实现方式。

1) 第一种方式是利用某些像镇定器那样的元件所具有的特殊内在性质，把它们接在自动系统中。镇定器能反应被调整参数离开给定值的偏差，而且感受这些偏差，如果它们只是由某一种形式的扰动所引起的話。

2) 第二种方式是利用由以上讲过的装置，即所谓的自动调整器，它能反应被调整参数离开给定值的偏差，而这些偏差事实上是可以由任何形式的扰动引起的。

姑无论是镇定器，也无论是调整器，它们的任务同样在于把这些偏差减小到为我们所允许的数值。

以下是一种能够作为电压镇定器的装置，其中所用的镇定元件是辉光放电管，它是一个充有某些惰性气体的玻璃管子，包含两个电极，一为阳极，一为阴极。图 2-6, a 所示，是这种镇定器底线路和特性曲线。研究这条特性曲线就可以看到，输入电压 U_{BX} 在某一范围内的变化并不致于显著影响接到用户去的输出电压 U_{BUX} 。这些镇定器是