

自动控制理论的早期发展历史

(经典控制理论部分)

王庆林

中国科学院自动化研究所
北京理工大学自动控制系

在 1868 年至今的短短一百年中,自动控制理论无论在深度和广度上都得到了令人吃惊的发展,对人类社会产生了巨大的影响。从瓦特的蒸气机、阿波罗登月到海湾战争,无处不现示着控制技术的威力。在哲学领域,反馈理论的建立与成功应用,也使“因果关系”进一步发展为“因果—果因关系”,反馈的概念受到人们的重视。

由于控制理论的发展日新月异,对自动控制的发展历史进行全面的论述是困难的。本文将仅对控制理论中经典部分(这也是大学自动控制理论课程的主要内容)的发展过程及背景进行简要的介绍,并对进行必要的讨论。

1. 自动控制技术的早期发展

以反馈控制为其主要研究内容的自动控制理论的历史,若从目前公认的第一篇理论论文, J.C.Maxwell 在 1868 年发表的“论调节器”算起,至今不过一百多年。然而控制思想与技术的存在至少已有数千年的历史了。“控制”这一概念本身即反映了人们对征服自然与外在的渴望,控制理论与技术也自然而然地在人们认识自然与改造自然的历史中发展起来。

具有反馈控制原理的控制装置在古代就有了。这方面最有代表性的例子当属古代的计时器“水钟”(在中国叫作“刻漏”,也叫“漏壶”)。据古代楔形文字记载和从埃及古墓出土的实物可以看到,巴比伦和埃及在公元前 1500 年以前便已有很长的水钟使用历史了。

约在公元前三世纪中叶,亚历山大里亚城的斯提西比乌斯(Ctesibius)首先在受水壶中使用了浮子(phellostive tympanum)。按迪尔斯(Diels)本世纪初复原的样品,注入的水是由圆锥形的浮子节制的。而这种节制方式即已含有负反馈的思想(尽管当时并不明确)。[1]

中国有着灿烂的古代文明。中国古代的科学家们对水钟十分得重视,并进行了长期的研究。据<<周礼>>记载,约在公元前 500 年,中国的军队中即已用漏壶作为计时的装置。约在公元 120 年,著名的科学家张衡(78-139,东汉)又提出了用补偿壶解决随水头降低计时不准确问题的巧妙方法。在他的“漏水转浑天仪”中,不仅有浮子,漏箭,还有虹吸管和至少一个补偿壶。最有名的中国水钟“铜壶滴漏”由铜匠杜子盛和洗运行建造于公元 1316 年(元代延祐三年),并一直连续使用到 1900 年。现保存在广州市博物馆中,但仍能使用。[2][3]

北宋时期，苏颂等于 1086 年-1090 年在开封建成“水运仪象台”。仪象台上的浑仪附有窥管，能够相当准确地跟踪天体的运行，“使它自动地保持在窥管的视场中”。这种仪象台的动力装置中就利用了“从定水位漏壶中流出的水，并由擒纵器(天关、天锁)加以控制”。苏颂把时钟机械和观测用浑仪结合起来，这比西方罗伯特·胡克早六个世纪。[4]

公元 235(三国时期)的马均及公元 477 年(刘宋时期)祖冲之等还曾制造过具有开环控制特点的指南车。并发明了齿轮及差动齿轮机[5][27][29]。

另外，我国在公元前 350 年已经用在结构上与水轮相似的水臼来碾米；在公元前 50 年用水轮来引水灌溉；在公元前 31 年在锻冶场里使用水动风箱等。大大地减轻了人们的劳动[29]。

十八世纪，随着人们对动力的需求，各种动力装置也成为人们研究的重点。1750 年，安得鲁·米克尔(1719-1811)为风车引入了“扇尾”传动装置，使风车自动地面向风。随后，威廉·丘比特对自动开合的百叶窗式翼板进行改进，使其能够自动地调整风车的传动速度。这种可调整的调节器在 1807 年取的专利权。18 世纪的风车中还成功地使用了离心调速器。托马斯·米德(1787 年)和斯蒂芬·胡泊(1789 年)获得这种装置的专利权。[6][29]

和风车技术并行，十八世纪也是蒸气机取得突破发展的时期，并成为机械工程最瞩目的成就。托马斯·纽可门和约翰·卡利(又译为考力)是史学界公认的蒸气机之父。到十八世纪中叶，已有好几百台纽可门式蒸气机在英格兰北部和中部地区、康沃尔和其他国家服务，但由于其工作效率太低，难以推广。

1765 年俄国的波尔祖诺夫(И.И.Ползунов)发明了蒸汽机锅炉的水位自动调节器(这在俄国被认为是世界上的第一个自动调节器)[21][23]。1760 年—1800 年，詹姆斯·瓦特对蒸气机进行了彻底得改造，终于使其得到广泛的应用。在瓦特的改良工作中，1788 年，他给蒸气机添加了一个“节流”控制器即节流阀，它由一个离心“调节器”操纵，类似于磨房机工早已用来控制风力面粉机磨石松紧的装置。“调节器”或“飞球调节器”用于调节蒸气流，以便确保引擎工作时速度大致均匀。这是当时反馈调节器最成功的应用。[7]

瓦特是一位实干家，他没有对调节器进行理论分析，后来 J.C.Maxwell 从微分方程角度讨论了调节器系统可能产生的不稳定现象，从而开始了对反馈控制动力学问题的理论研究。[8]

2. 自动控制基本理论（经典部分）的发展简史

2.1 稳定性理论的早期发展

人们很早就开始关注稳定性的问题。牛顿可能是第一个关注动态系统稳定性的人。1687 年，牛顿在他的《数学原理》中对围绕引力中心做圆周运动的质点进行了研究。他假设引力与质点到中心距离的 q 次方成正比。牛顿发现，假设 $q > -3$ ，则在小的扰

动后,质点仍将保留在原来的圆周轨道附近运动。而当 $q \leq -3$ 时,质点将会偏离初始的轨道,或者按螺旋状的轨道离开中心趋向无穷远,或者将落在引力中心上[26]。

在牛顿引力理论建立之后,天文学家曾不断努力以图证明太阳系的稳定性。特别地,拉格朗日和拉普拉斯在这一问题上做了相当的努力。1773年,24岁的拉普拉斯“证明了行星到太阳的距离在一些微小的周期变化之内是不变的”。并因此成为法国科学院副院士[28]。虽然他们的论证今天看来并不严格,但他们的工作对后来李亚普诺夫的稳定性理论有很大的影响[26]。

直到十九世纪中期,稳定性理论仍集中在对保守系统研究上。主要是天文学的问题。在出现控制系统的镇定问题后,科学家们开始考虑非保守系统的稳定性问题。Clerk Maxwell 是第一位利用特征方程的系数来判断系统稳定性的人[26]。

James Clerk Maxwell 是第一个对反馈控制系统的稳定性进行系统分析并发表论文的人[8]。在他 1868 年的论文“论调节器”(Maxwell J C. On Governors. Proc. Royal Society of London, vol. 16: 270-283, 1868) 中,导出了调节器的微分方程,并在平衡点附近进行线性化处理,指出稳定性取决于特征方程的根是否具有负的实部。麦氏在论文中对三阶微分方程描述的 Thomson's governor, Jenkin's governor 以及具有五阶微分方程的 Maxwell's governor 进行了研究,并给出了系统的稳定性条件。Maxwell 的工作开创了控制理论研究的先河。[9][10]

同一时期在俄国,1872 年 И.А. 维什聂格拉斯基(1831-1895)也对蒸汽机的稳定性问题进行了研究。И.А. 维什聂格拉斯基的论文“论调整器的一般原理”1876 年发表在法国科学院院报上。И.А. 维什聂格拉斯基同样利用线性化方法简化问题,用线性微分方程描述由调整对象和调整器组成的系统。这使问题大大简化。1878 年 И.А. 维什聂格拉斯基还对非线性继电器型调整器进行了研究。И.А. 维什聂格拉斯基在苏联被视为自动调整理论的奠基人。[23]

Maxwell 是一位天才的科学家,在许多方面都有极高的造诣。他同时还是物理学中电磁理论的创立人(见其论文“A dynamical theory of the electromagnetic field”, 1864)。目前的研究表明,Maxwell 事实上在 1863 年 9 月即已基本完成了其有关稳定性方面的研究工作。[10]

Maxwell 在他的论文中还催促数学家们尽快地解决多项式的系数同多项式的根的关系的问题。由于五次以上的多项式没有直接的求根公式,这给判断高阶系统的稳定性代来了困难。[9]

约在 1875 年,Maxwell 担任了剑桥 Adams Prize 的评奖委员。这项两年一次的奖授予在该委员会所选科学主题方面竞争的最佳论文。1877 年的 Adams Prize 的主题是“运动的稳定性”。E.J. Routh 在这项竞赛中以其根据多项式的系数决定多项式在右半平面的根的数目的论文夺得桂冠(Routh E J. A Treatise on the Stability of Motion. London, U.K.: Macmillan, 1877)。Routh 的这一成果现在被称为劳斯判据。Routh 工作的意义在于将当时各种有关稳定性的孤立的结论和非系统的结果统一起来,开始建立有关动态稳定性的系统理论。[26]

Edward John Routh 1831 年 1 月 20 日出生在加拿大的魁北克。他父亲是一位在 Waterloo 服役的英国军官。Routh 11 岁那年回到英国，在 de Morgan 指导下学习数学。在剑桥学习的毕业考试中，他获得第一名。并得到了“Senior Wrangler”的荣誉称号。（Clerk Maxwell 排在了第二位。尽管 Clerk Maxwell 当时被称为最聪明的人。）毕业后 Routh 开始从事私人数学教师的工作。从 1855 年到 1888 年 Routh 教了 600 多名学生，其中有 27 位获得“Senior Wrangler”称号。建立了无可匹敌的业绩。Routh 于 1907 年 6 月 7 日去世，享年 76 岁。[25]

Routh 之后大约二十年，1895 年，瑞士数学家 A. Hurwitz 在不了解 Routh 工作的情况下，独立给出了跟据多项式的系数决定多项式的根是否都具有负实部的另一中方法(Hurwitz A. On the conditions under which an equation has only roots with negative real parts. Mathematische Annalen, vol.46:273-284, 1895)。Hurwitz 的条件同 Routh 的条件在本质上是一致的。[9]因此这一稳定性判据现在也被称为 Routh-Hurwitz 稳定性判据[1]。

1892 年，俄罗斯伟大的数学力学家 A.M.Lyapunov (1857.5.25-1918.11.3) 发表了其具有深远历史意义的博士论文“运动稳定性的一般问题”(The General Problem of the Stability of Motion, 1892)。在这一论文中，他提出了为当今学术界广为应用且影响巨大的李亚普诺夫方法，也即李亚普诺夫第二方法或李亚普诺夫直接方法。这一方法不仅可用于线性系统而且可用于非线性时变系统的分析与设计。已成为当今自动控制理论课程讲授的主要内容之一。[11][12]

Lyapunov 在稳定性方面的研究受到 Routh 和 Poincare 等工作的影响。[12,14]

Lyapunov 是一位天才的数学家。他是一位天文学家的儿子。曾从师于大数学家 P. L.Chebyshev(车比晓夫)，和 A.A.Markov(马尔可夫)是同校同学（李比马低两级），并同他们始终保持着良好的关系。他们共同在概率论方面做出过杰出的成绩。在概率论中我们可以看到关于矩的马尔可夫不等式、车比晓夫不等式和李亚普诺夫不等式。李还在相当一般的条件下证明了中心极限定理。[11][13]

和他的硕士论文一样，Lyapunov 的博士论文被译成法文并在 Annales de l'Universite de Toulouse (1907)上发表，1949 年 Princeton University Press 重印了法文版。1992 年在 Lyapunov 博士论文发表 100 周年之际，INT.J.CONTROL 以专集形式发表了 Lyapunov 论文的英译版，以纪念他控制理论领域的卓越贡献。[11][14]

2.2 负反馈放大器及频域理论的建立[15]

在控制系统稳定性的代数理论建立之后，1928 年—1945 年以美国 AT&T 公司 Bell 实验室(Bell Labs)的科学家们为核心，又建立了控制系统分析与设计的频域方法。

1928 年 8 月 2 日，Harold Black(1898-1983)，在前往 Manhattan 西街(West Street)的上班途中，在 Hudson 河的渡船 Lackawanna Ferry 上灵光一闪，发明了在当今控制理论中占核心地位的负反馈放大器。由于手头没有合适的纸张，他将其发

明记在了一份纽约时报 (The New York Times) 上, 这份早报已成为一件珍贵的文物诊藏在 AT&T 的档案馆中。

当时的 Black 年仅 29 岁, 从 Worcester Polytechnic Institute 获得电子工程学士毕业刚六年。是西部电子公司工程部 (这个部后来成为 1925 年成立的 Bell Labs 的核心) 的工程师, 正在从事电子管放大器的失真和不稳定问题的研究。Black 首先提出了基于误差补偿的前馈放大器, 在此基础上最终提出了负反馈放大器并对其进行了数学分析。同年 Black 就其发明向专利局提出了长达 52 页 126 项的专利申请, 但只到九年之后, 当 Black 和他在 AT&T 的同事们开发出实用的负反馈放大器和负反馈理论之后, Black 才得到这项专利。

反馈放大器的振荡问题给其实用化带来了难以克服的麻烦。为此 Harry Nyquist (1889-1976) 和其他一些 AT&T 的通讯工程师介入了这一工作。Nyquist 1917 年在耶鲁大学 (Yale) 获物理学博士学位, 有着极高的理论造诣。1932 年 Nyquist 发表了包含著名的“乃奎斯特判据” (Nyquist criterion) 的论文, 并在 1934 年加入了 Bell Labs。Black 关于的负反馈放大器的论文发表在 1934 年, 参考了 Nyquist 的论文和他的稳定性判据。

这一时期, Bell 实验室的另一位理论专家, Hendrik Bode (1905-1982) 也和一些数学家开始对负反馈放大器的设计问题进行研究。Bode 是一位应用数学家, 1926 年在俄亥俄州立大学 (Ohio State) 获硕士; 1935 年在哥伦比亚大学 (Columbia University) 获物理学博士学位。1940 年, Bode 引入了半对数坐标系, 使频率特性的绘制工作更加适用于工程设计。

1942 年, H. Harris 引入了传递函数的概念。用方框图、环节、输入和输出等信息传输的概念来描述系统的性能和关系。这样就把原来由研究反馈放大器稳定性而建立起来的频率法, 更加抽象化了, 因而也更有普遍意义, 可以把对具体物理系统, 如力学、电学、等的描述, 统一用传递函数、频率响应等抽象的概念来研究 [22]。1925 年英国电器工程师 O. 亥维赛把拉普拉斯变换应用到求解电网络的问题上, 提出了运算微积。不久拉普拉斯变换就被应用到分析自动调节系统问题上, 并取得了显著成效。传递函数就是在拉普拉斯变换的基础上引入的。 [27]

至 1945 年, 控制系统设计的频域方法, “波德图” (Bode plots) 方法, 已基本建立了。

在这同一时期, 苏联科学家也在控制系统稳定性的频域分析方面取得了进展。1938 年和 1939 年, 全苏电工研究所的米哈依洛夫以柯西幅角原理为基础, 发表论文给出了闭环控制系统稳定性的频域判别法。 [21-23] 米哈依洛夫还提出了把自动调整系统环节按动态特性加以典型化来进行结构分析的问题。

米哈依洛夫有关稳定性频域判据的论文虽然正式发表较晚。但他的研究成果在 1936 年由苏联列宁共产主义青年团中央召开的青年学者科学家工作成果竞赛会上曾荣膺奖金。 [23] 米哈依洛夫的方法现被称为“米哈依洛夫稳定判据”。 [22-23] 有些学者又将“乃奎斯特判据”称为“乃奎斯特-米哈依洛夫判据” [23-24] 客观地讲, 在频域稳定性

判别研究中，乃奎斯特不仅在时间上领先，其工作也更完备。现在我们所使用的也主要是乃奎斯特的开环稳定判据。

除了偏差负反馈控制，扰动控制是另一种重要控制策略。第一个试图制造一个不反映被调量偏差，而反应扰动作用的调节器的人是庞赛来（Понселе）。他在 1829 年曾提出一种有关蒸汽机轴转速自动调节器的线路，利用的就是扰动控制的原理。可是由于当时蒸汽机本身不稳定，他的建议遭到了失败。采用扰动调节原理且在实际上能够工作的第一个自动调节器是 1869 年由契可列夫所发明的弧光灯光度调节器。这种调节器同庞赛来（В.Н.Чиколев）应用纯扰动的调节不同，它实际上建立了闭环，所以调节器在这里也影响系统的稳定（纯扰动补偿控制不影响系统稳定性）[21]。

2.3 根轨迹法的建立

在经典控制理论中，根轨迹法占有十分重要的地位。它同时域法，频域法可称是三分天下。美国电信工程师 W.R.Evans 在这里包打天下，他的两篇论文“Graphical Analysis of Control System, AIEE Trans. Part II, 67(1948), pp.547-551.”和“Control System Synthesis by Root Locus Method, AIEE Trans. Part II, 69(1950), pp.66-69”即已基本上建立起根轨迹法的完整理论。[18,19, 27]

Evans 所从事的是飞机导航和控制，其中涉及许多动态系统的稳定问题，因此其已经又回到 70 多年前 Maxwell 和 Routh 曾做过的特征方程的研究工作。但 Evans 用系统参数变化时特征方程的根变化轨迹来研究，开创了新的思维和研究方法。Evans 方法一提出即受到人们的广泛重视，1954 年，钱学森即在他的名著“工程控制论”中专用两节介绍这一方法，并将其成为 Evans 方法。[8,19]

2.4 脉冲控制理论的建立与发展

随着计算机技术的诞生和发展，脉冲控制理论也迅速发展起来。

在这方面首先作出重要贡献的是乃奎斯特和香农(Shannon)。乃氏首先证明把正弦信号从它的采样值复现出来，每周期至少必须进行两次采样。香农于 1949 年完全解决了这个问题。香农由此被成为信息论的创始人。

线性脉冲控制理论以线性差分方程为基础，线性差分方程理论在三、四十年代中已逐步发展起来。随着拉氏变换在微分方程中的应用，在差分方程中也开始加以应用。利用连续系统拉氏变换同离散系统拉氏变换的对应关系，奥尔登伯格(R.C.Oldenbourg)和萨托里厄斯(H.Sartorius)于 1944 年，崔普金(Tsytkin)于 1948 年分别提出了脉冲系统的稳定判据，即线性差分方程的所有特征根应位于单位圆内。由于离散拉氏变换式是超越函数，又提出了用保角变换将 Z 平面的单位圆内部转换到新的平面的左半面的方法，这样即可以使用 Routh-Hurwitz 判据，又可将连续系统分析的频域方法引入离散系统分析。

求得离散型频率特性后，乃氏稳定判据和其他一切研究线性系统的频率法都可应用，但由于 Bode 图的应用大受限制，频率法在离散系统研究中也受到限制。（库津(1961)曾试图用 Bode 图来表示离散型频率特性，但过于繁复而无法应用。）

在变换理论的研究方面，霍尔维兹(W.Hurewicz)于 1947 年迈出了第一步，他首先引进了一个变换用于对离散序列的处理。在此基础上，崔普金于 1949 年，拉格兹尼和扎德(J.R.Ragazzini 和 L.A. Zadeh)于 1952 年分别提出了和定义了 Z 变换方法，大大简化了运算步骤，并在此基础上发展起脉冲控制系统理论。

由于 Z 变换只能反应脉冲系统在采样点的运动规律，崔普金、巴克尔(R.H.Barke r)和朱利(E.I.Jury)又分别于 1950 年、1951 年和 1956 年提出了广义 Z 变换或修正 Z 变换(modified Z-transform)的方法。对同一问题，林威尔(W.K.Linvill)也于 19 51 年用描述函数的方法进行了有效的研究，不过这一方法目前已较少使用。

回顾脉冲控制理论的发展，尽管俄国的崔普金及英国的巴克尔等都做出了不可磨灭的贡献，但建立脉冲理论的许多工作都是由美国哥伦比亚大学的拉格兹尼和他的博士生们完成的。他们包括朱里（离散系统稳定的朱里判具，能观测性与能达性，分析与设计工具等），卡尔曼（离散状态方法，能控性与能观性等。是自控界第二位获 IEEE Model of Honor 者(1974)），扎德（Z 变换定义等。是自控界第五位获 IEEE Model of Honor 者(1995)）。五十年代末，脉冲系统的 Z 变换法已臻成熟，好几本教科书同时出版。[16,17]

2.5 历史上的三本重要著作[27]

在控制理论发展的历史上有三部著作特别值得一提，即

目前被作为信息论开端的香农(Claude Elwood Shannon,1916-)的论文：

《通讯的数学理论》（A Mathematical Theory of Communication）

1948 年发表在《贝尔系统技术杂志》第 27 卷。这篇论文同其 1949 年发表的论文《噪声中的通讯》（Communication in Presence of Noise.Proc.IRE,37,10-21）奠定了信息论的基础。

控制论创立者维纳（Norbert Wiener,1894-1964）的经典论著：

《控制论，或关于在动物和机器中控制和通讯的科学》（Cybernetics or Control and Communication in the animal and the machines. 1948）

钱学森(Tsien H S,1911-)的著作

《工程控制论》（Engineering Cybernetics. 1954）

这三部著作对人类社会有着巨大的影响，产生了新型的综合性基础理论：控制论，信息论和工程控制论。

在中国，1954 年出版了由刘豹编写的第一本《自动控制原理》专著（上海：中国科学图书仪器公司.1954）。

3. 历史的思考

回顾控制技术和控制理论几千年的发展历史，我们可以总结出科学发展的几个特点：

1) 社会发展的需要是科学发展的动力。

控制技术的存在与发展已有数千年的历史，但只有在工业的发展对动力产生巨大的需求，蒸气机稳定性问题出现并具有至关重要的意义时，人们才集中智力来解决这一难题，并由此产生了稳定性理论。频域方法和离散（脉冲）系统理论同样如此，也是在通讯技术和计算机技术的发展过程中为解决关键问题而发展起来的。

钱三强先生就曾指出：“科学来源于生产和对自然现象的观察，它的发展取决于生产和社会的需求。”[20]

2) 科学的进步是集体努力的结果，在这一点上往往显示出科学家的群体效应。

同早期科学理论的发展不同，现代高新技术的发展要依赖于集体的智慧。稳定性理论、频域理论及脉冲理论的建立与发展很好地说明了这一点。

3) 科学的发明与科学理论的建立有赖于科学家坚实的知识基础。杰出的科学家大多是多面发展的。

要现代科学理论的建立有赖于有坚实与深厚的知识基础。**Black** 虽然最早提出了负反馈放大器的思想，但由于他本人理论基础较差（学士学位，只有六、七年的工作经验），频域理论却是在 **Nyquist** 博士和 **Bode** 博士等的努力下建立的。**Black** 本人的论文也是在参考了 **Nyquist** 的论文之后才完成，他的专利申请也是在 **Nyquist** 等工作完成后才被认可并获准的。同样，在控制理论发展史上做出巨大贡献的科学家如 **Maxwell**、**Lyapunov**、**Zadeh**、**July** 等无不在多个方面均有建树。

4) 没有理论，社会实践就不能成为系统的科学，实践也就难以深入和系统地发展。

控制技术和理论的发展还表明了这样一个道理：任何社会实践没有理论就不能成为科学，也就难以发展。控制技术在中国和巴比伦已有数千年的历史，但由于没有上升为理论，只能在低级的水平上发展。**1868** 年以来，随着控制理论的建立，控制理论和控制技术同时开始飞速发展，控制技术终于成为人们征服自然与改造自然的有力武器。不仅如此，由于我们中国几千年来只重技术不重理论，我们现在的历史就是十六、十七世纪前“灿烂辉煌的古代文明”，而在十六、十七世纪西方科学理论体系开始建立之后，就开始相对日趋末落，终于到了“落后”的近代，挨打受欺，以至于“丧权辱国”了。

参考文献

- [1][英]李约瑟. 中国科学技术史. 第四卷天学第二分册. 北京：科学出版社,336-341,1975
- [2]同上,340-377.
- [3]同上,439-446.
- [4]同上,446-459.

- [5]钱伟长. 我国历史上的科学发明,48-50. 北京: 中国青年出版社, 1953
- [6][英]亚.沃尔夫. 十八世纪科学、技术和哲学史,707-714. 北京: 商务印书馆,1991
- [7]同上,730-753.
- [8]杨位钦,谢锡祺. 自动控制理论基础,3-5. 北京: 北京理工大学出版社,1991
- [9]Clark Robert N. The Routh-Hurwitz Stability Criterion, Revisited. IE EE Control System Magazine, Vol.12(3):119-120,1992
- [10]Fuller A T. James Clerk Maxwell's Glasgow manuscripts: extracts relating to control and stability. INT. J. CONTROL. VOL.43(5):1593-1612.
- [11]Smirnov V I. Biography of A.M. Lyapunov. INT. J. CONTROL, Vol.55 (3),775-784,1992
- [12]黄琳,于年才,王龙. 李亚普诺夫方法的发展与历史成就. 自动化学报, vol.19(5): 587-595,1993
- [13]周概容. 概率论与数理统计,274-278,410. 北京: 高等教育出版社,1987
- [14]Fuller A T. Guest Editorial Lyapunov Centenary Issue. INT. J. CONTROL, Vol.55(3):521-527,1992
- [15]Kline Ronald. Harold Black and the Negative-Feedback Amplifier. IEEE Control System Vol.13(4):82-85
- [16]Astrom K J, Wittenmark B. COMPUTER CONTROLLED SYSTEMS. Printice-Hall, Inc.,1984
- [17]王新民等. 自动化技术进展(1),52-74. 北京: 科学出版社, 1963
- [18]Ogata K. Modern Control Engineering. second edition. Prentice Hall,1990
- [19]Tsien H S. Engineering Cybernetics,42-49. 1954 国内影印本: 工程控制论. 英 2-3/2
- [20]钱三强. 科学技术发展的简况. 北京: 知识出版社, 1980
- [21]波波夫. 自动调节(基本概念). 陈以一, 王朝馥译. 北京: 国防出版社, 1962
- [22]项国波. ITAE 最佳控制. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [23]索洛多夫尼柯夫主编. 自动调整原理. 王重托译. 北京: 电力工业出版社, 1957
- [24]刘豹. 自动控制原理. 上海: 中国科学图书仪器公司. 1954
- [25]Fuller A T. Edward John Routh. Int. J. Control, 1977, Vol.26, No.2, 169-173
- [26]MacFarlane A G J, Fuller A T. Routh Centenary Issue. Int. J. Control, 1977, Vol.26, No.2, 167-168
- [27]《中国大百科全书. 自动控制与系统工程》. 北京: 中国大百科全书出版社, 1991
- [28]贝尔 E T. 数学精英. 徐源译. 宋蜀碧校. 北京: 商务印书馆, 1991
- [29]布斯 A D [英]. 自动化与计算技术. 吴怡, 莫莎译. 北京: 国防工业出版社, 1965