

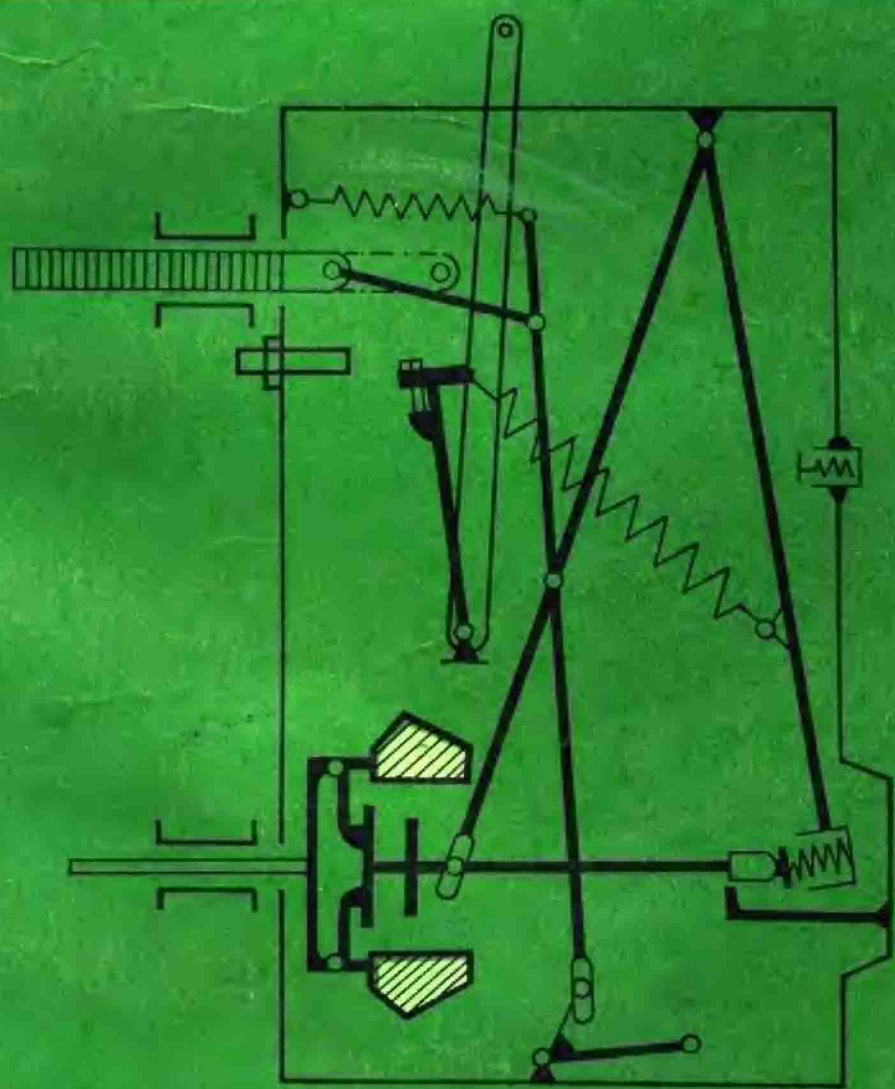
内 燃 机 自 动 调 节

NEIRANJI ZIDONG TIAOJIE

〔苏〕B.И. 克鲁托夫 著

武国成 等译 张振球 等校

新 时 代 出 版 社



内 燃 机 自 动 调 节

〔苏〕B.И.克鲁托夫 著

武国成 等 译

张振球 等 校

新 时

内 容 简 介

本书论述了作为调节对象的增压发动机性能,分析了发动机的工作条件和耗能装置对发动机的各种要求,阐述了现代应用的各种调速器的作用原理和构造,研究了系统中各元件的动态性能和自动调节系统的稳定性及过渡过程品质的分析方法。本书还着重介绍了增压发动机的动态性能,间接作用调速器,计算技术的应用和根据给定的动态性能综合设计自动调节系统的方法。

本书可供高等学校内燃机专业大学生及研究生作参考,对于从事内燃机和调速器专业的工程技术人员和教师也有参考价值。

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

двигателей внутреннего сгорания

В. И. Крутов

Москва "Машиностроение" 1979

*

内燃机自动调节

[苏] В. И. 克鲁托夫 著

武国成 等 译

张振球 等 校

新时代出版社出版 新华书店北京发行所发行

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 27.25印张 622千字

1986年4月第1版 1986年4月北京第1次印刷

印数: 0001—2080册

统一书号: 15241·70

定价: 5.55元

中译本前言

《内燃机自动调节》一书的译出有助于国内同行对内燃机调速系统有更深入的理解。本书详述了多种常用的调速系统，深入分析了调节对象的性能，用比较精确的理论计算来研究调节系统及元件的静、动态特性，评价调节系统的品质。本书是研究、设计、改进该类系统十分有用的资料和教材。乘此机会对使本书出版付出了辛勤劳动的同志们致贺。

郑世同

译 者 的 话

随着我国内燃机工业生产和科研的迅速发展，内燃机广泛应用在国民经济各部门和国防建设中。为了满足内燃机性能和适应特殊使用条件的要求，许多现代内燃机都装备着各种用途的自动调节装置。设计和生产新型的性能优良的内燃机都必须研制性能先进的调节系统。因此，内燃机的自动调节普遍受到人们的关注。从事内燃机研究设计、生产和使用的工程技术人员非常需要进一步掌握自动调节；内燃机专业的大学生及研究生也需要学习和熟悉自动调节。我们认为苏联莫斯科包曼高等工业学校教授克鲁托夫 (В. И. Кротов) 所编的这本专著能够较好地满足目前国内这种需求。

这本书内容丰富，论述系统，而又全面。原书经苏联高等及中等专业教育部批准作为高等学校教学参考书，在苏联已是第四版。作者多年来从事内燃机自动调节的教学与研究，发表过多篇有学术水平的研究论文。

翻译这部书是集体劳动的果实。第一、二、三、四、五章由武国成同志译，第六、十三章由高锦昌同志译，第七、八、九章由高振庚同志译，第十、十一章由许礼熙同志译，第十二章由路嘉运同志译。第一至四章由张振球同志校对，第五至八章由陈永锴同志校对，第九至十三章由吕慎刚同志校对。张振球同志做了统稿。

曹连璧同志为组织该书翻译也做了大量工作，在此表示感谢。

对于已发现的原书中的印刷错误在译文中作了更正，较重要的更正还在页末附有译校注。

由于翻译时间短促，译者水平有限，译文不当之处，谨请读者予以指正。

译 者

原 序

内燃机是在国民经济各部门中作为原动力应用最广的热机之一。内燃机的特殊性能，要求它必须安装各种用途的调速器。

现在许多发动机制造厂依照用户的要求，生产部分或全部自动化的动力装置。随着自动化程度的提高，对调速器将提出更高的要求，这就促使制造厂家要不断地完善调速器的结构和改进调速器的生产工艺。

自动化，其中包括它的一个重要分支——自动调节，在动力部门和其它工业及农业部门中的广泛应用，导致了自动学和自动调节基础理论的全面发展。

技术发展到现代水平，每个工程师不仅应当懂得自动学，掌握自动学，而且还要参加新式自动装置和自动系统的设计。因此，高等学校把这方面的课程纳入了教学计划。

在本教学参考书中，特别重视了作为调节对象的增压发动机的性能，研究了发动机的工作条件和耗能装置对发动机的各种要求；分析了致使发动机必须安装调速器的条件和调节对象——发动机的动态性能。

书中对内燃机各基本类型调速器的工作原理和构造作了分析，列举了计算调速器静态、动态参数和调速器性能的基本方法。

这本参考教材是针对解决发动机速度工况自动调节系统优质工作的问题进行叙述的。但是，这个问题的解决途径和所用的方法，在很大程度上是通用的。用这种方法可以分析象冷却水温度、润滑系统机油温度和压力、增压空气压力等这些发动机参数自动调节系统的工作。

本书适用于高等学校发动机专业的大学生，以及从事于发动机自动调节工作的工程师和科学工作者。

目 录

第一章 发动机自动调节系统发展概述	1
第二章 基本概念和定义	9
§ 1 自动调节系统的概念	9
§ 2 环节和自动调节系统的功能图	9
第三章 调节对象——内燃机	11
§ 3 调节对象——发动机的特点	11
§ 4 增压内燃机的功能图	11
§ 5 内燃机的稳定工况	13
§ 6 内燃机的静态特性	15
§ 7 耗能装置的静态特性	17
§ 8 内燃机工况的稳定性	19
§ 9 内燃机的非稳定工况	21
§ 10 过渡过程的概念	23
§ 11 调节对象——内燃机本体调节转速时的微分方程	24
§ 12 部件传递函数和方框图的概念	32
§ 13 涡轮增压器的微分方程	34
§ 14 进气管的微分方程	39
§ 15 排气管的微分方程	43
§ 16 根据柴油机供油装置静态特性计算循环供油量	47
§ 17 自由涡轮增压柴油机的微分方程	49
§ 18 非增压柴油机的微分方程	51
§ 19 发动机上的调速器与自动装置	52
第四章 内燃机的并联工作	60
§ 20 柴油机并联工作的应用	60
§ 21 动力装置的效率	62
§ 22 负荷的最佳分配条件	63
§ 23 并联发动机的微分方程	72
第五章 直接作用调速器	75
§ 24 直接作用调速器的分类	75
§ 25 机械式直接作用调速器	76
§ 26 气动式直接作用调速器	133
§ 27 液压式直接作用调速器	148
§ 28 内装式调速器	155
第六章 间接作用调速器	165
§ 29 间接作用调速器的分类	165
§ 30 间接作用调速器的功能元件	165
§ 31 刚性反馈间接作用调速器	170

§ 32	匀速式间接作用调速器	174
§ 33	发动机并联工作时调速器的调整	177
§ 34	复合反馈间接作用调速器	181
§ 35	带负荷调节机构的调速器	188
§ 36	间接作用调速器的静态计算	190
§ 37	间接作用调速器的机油系统	191
§ 38	间接作用调速器感应元件的微分方程	193
§ 39	间接作用调速器放大元件的微分方程	197
§ 40	间接作用调速器的微分方程	204
第七章	双脉冲调速器	210
§ 41	调节方法的选择	210
§ 42	速度和加速度双脉冲调速器	212
§ 43	反应角速度和角加速度的机械感应元件的微分方程	213
§ 44	速度和负荷双脉冲调速器	214
§ 45	负荷感应元件的恢复力和支持力	217
§ 46	负荷感应元件的稳定性因数	219
§ 47	负荷感应元件的微分方程	220
第八章	调速器在发动机上的布置及其附加功能	224
§ 48	调速器选型及其在发动机上的布置	224
§ 49	发动机速度工况的控制	226
§ 50	调速器的附加功能	229
第九章	自动调节系统元件的动态特性	234
§ 51	元件动态特性的概念	234
§ 52	元件的过渡过程	235
§ 53	元件的频率特性	245
§ 54	调速器机构和供油装置中的摩擦力	261
§ 55	柴油机供油装置的动态特性	267
第十章	内燃机的自动调节系统	271
§ 56	自动调节系统的分类	271
§ 57	发动机的调速特性	271
§ 58	自动调节动态研究的任务	273
§ 59	直接调节系统的微分方程	274
§ 60	间接调节系统的微分方程	279
§ 61	双脉冲调节系统的微分方程	288
§ 62	自动调节系统微分方程的规范化	292
§ 63	开式自动调节系统的频率特性	296
§ 64	闭式自动调节系统的频率特性	299
§ 65	自动调节系统的扰动作用	303
§ 66	扰动的幅-相频率特性	305
§ 67	闭式自动调节系统的综合频率特性	305
第十一章	自动调节系统的稳定性	307
§ 68	过渡过程的收敛条件	307

§ 69 自动调节系统稳定性的概念	310
§ 70 劳斯-胡尔维茨稳定性准则	311
§ 71 过渡过程的收敛分析	313
§ 72 И. А. 维什涅格拉茨基图	316
§ 73 А. В. 米哈依洛夫稳定性准则	322
§ 74 频率稳定性准则	325
§ 75 按对数频率特性评定稳定性	327
第十二章 自动调节系统中过渡过程的品质	329
§ 76 过渡过程的品质指标	329
§ 77 评价过渡过程品质的间接方法	330
§ 78 用绘图法评价过渡过程的品质	336
§ 79 特征方程根	336
§ 80 积分常数	339
§ 81 拉普拉斯变换	343
§ 82 阶跃扰动时的初始条件	346
§ 83 用拉普拉斯变换求微分方程的通积分	353
§ 84 按通积分公式绘制过渡过程图	355
§ 85 三阶自动调节系统中过渡过程分量的参数	357
§ 86 三阶自动调节系统中过渡过程分量参数图	363
§ 87 三阶自动调节系统中过渡过程的绘制	367
§ 88 用综合频率特性绘制过渡过程图	370
§ 89 评价用线性微分方程所得结果的精度	375
§ 90 自动调节系统元件静态特性的近似算法	376
§ 91 用模拟计算机计算过渡过程	379
§ 92 用数字式电子计算机计算过渡过程	387
§ 93 自动调节系统中的共振现象	389
第十三章 自动调节系统的综合设计	395
§ 94 按稳定性综合设计自动调节系统	395
§ 95 借助品质积分准则确定调速器的参数	404
§ 96 在给定稳定度时确定调速器的参数	405
§ 97 在给定过渡过程和被调对象时确定调速器的参数	408
参考文献	411

第一章 发动机自动调节系统发展概述

热机轴转速的自动调节理论是全部自动调节和自动控制理论发展的科学基础。

自动调节器首次安装在俄国机械师——发明家波尔祖诺夫 (И. И. Ползунов) 1765 年在巴尔瑙尔工厂制造的“火力机”上。这台机器上的自动调节器是浮子式的(图1), 用以保持锅炉内的水位在某一给定限度内。由自动调节器控制的给水量 G 与锅炉内水位 H 之间的关系表示为图 2 中的曲线 $G = f(H)$, 称为调节特性。最大供水量 $G_{\max}$ 出现在进水管 2 上的阀门 3 (见图1) 全开的时候。此时, 浮子 1 正好在最低位置 $H_{\min}$ (图 2 中的 a 点)。随着锅炉内水位逐渐升高, 阀门 3 使进水管 2 的流通截面越来越小, 因此给水量也越来越小, 直到水管 2 全关, 给水停止。这就限制了水位上限 $H_{\max}$ (图 2 中的 b 点)。差值 $\Delta H = H_{\max} - H_{\min}$ 称为调节器工作不均匀度, 它是自动调节系统表征被调节参数 (此处为锅炉内水位) 保持精度的基本参数之一。

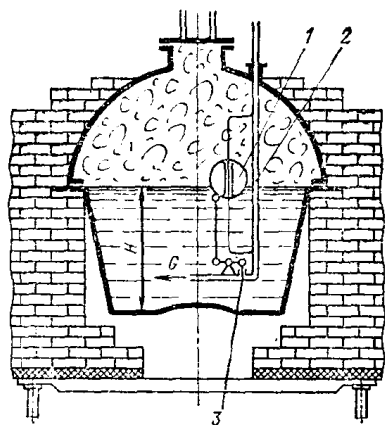


图1 波尔祖诺夫调节器

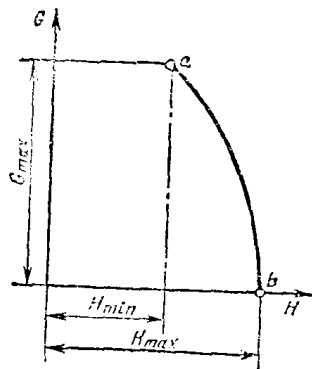


图2 波尔祖诺夫调节器特性

过了二十年, 即在 1786 年, 英国机械师瓦特制造了一台他自己设计的通用蒸汽机, 这台蒸汽机安装了离心式调速器, 以保持蒸汽机曲柄恒定的角速度 (图 3)。当蒸汽机的轴 1 转速增加时, 调速器的轴 2 和飞锤 4 的转速也增加, 滑套 3 上升并带动节流阀 5 向关闭进汽管 6 的方向旋转, 从而使蒸汽机扭矩减小。

当装有调速器时, 蒸汽机扭矩 M 和曲轴转速之间的关系示于图 4。从曲线图中可以看到, 蒸汽机的最大扭矩 $M_{\max}$ (点 a) 是在最小角速度 $\omega_{\min}$ 时发出的。这时飞锤和滑套处在最低位置。蒸汽机在最大容许角速度 $\omega_{\max}$ 时 (点 b), 进汽量应相应于空转位置。同样, 差值 $\Delta\omega = \omega_{\max} - \omega_{\min}$ 称为调速器的工作不均匀度。

比较图 2 和图 4 中的调节特性, 可看出波尔祖诺夫调节器与瓦特调速器工作的相同性。因而这种调节原理 (存在工作不均匀度情况下) 现在称为波尔祖诺夫-瓦特调节原理。

瓦特蒸汽机在很长时间内是主要的工业发动机。

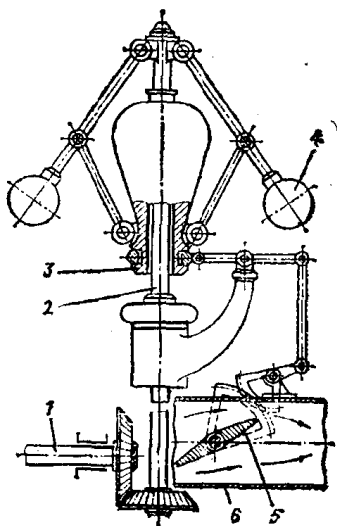


图3 瓦特调速器

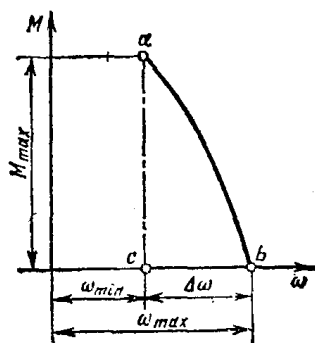


图4 瓦特调速器特性

在十九世纪中叶，工业生产中产生了创造更完善和具有良好经济性发动机的必要性。内燃机，首先煤气机，就是这种发动机。在这些发动机上，象所有蒸汽机那样，大都安装瓦特调速器。可是向较大型的，在技术上更完善的机器提出了更高的要求。其中，包括要求最大限度地降低机器工作的不均匀度，提高其调速器的灵敏性。当时有几种调速器的确解决了这项任务。

可是，从上个世纪六十年代以来，调速器调整中的困难越来越多，装瓦特调速器的机器时常出现不稳定工作的情况，产中了波动的调节过程。因而感到非常有必要科学地分析调节过程，并对出现的问题做出解答。

在1868年出了一部英国物理学家麦克斯韦（Maxwell）专论调速器的著作。他运用动力学问题线性化，建立了微振动方法。借助这种方法调节稳定性问题就简化为对代数方程组的研究。

麦克斯韦的著作，实质上并没有实用意义，因为研究的对象是那时还没采用的静不定（零不均匀度）调速器。

瓦特调速器在使用中遭到越来越多的挫折，使一些学者和工程师对那些按波尔祖诺夫-瓦特原理工作的调速器的实际适用性失去信心，产生了提高调节质量的必要性。例如，极力试图采用负荷调节原理（彭赛列（Poncelet）原理）或采用加速度调节原理（西门子原理）。

然而，实践很快证明，彭赛列调速器和西门子调速器都不能作独立的热机角速度调节器。

这样，在十九世纪六十年代和七十年代前期，调节理论还不能揭示波尔祖诺夫-瓦特调节器的工作和调整的特点。

上个世纪七十年代和八十年代是以契贝谢夫（П. Л. Чебышев）院士为首的彼得堡数学派兴盛时期。这个学派的突出特点是竭力研究有实用价值的具体问题。

1871年契贝谢夫发表了一篇调节方面的著作《论离心式均衡器●》，在这篇著作

● 即调速器。——校者

中论述了降低调速器工作不均匀度的途径。

1877年彼得堡工艺学院教授维什涅格拉茨基(И. А. Вышнеградский)发表了一篇著作《论直接作用调速器》。维什涅格拉茨基是数学家,又是工程师,因而他解决调节问题的办法颇异于他的前辈。

维什涅格拉茨基精心分析了机器和调速器之后,建立了无量纲三阶二常系数代数方程,系数值取决于系统的参数。根据这两个系数可以绘制发动机-调速器系统稳定工作域平面图,尔后称之为维什涅格拉茨基图。解决问题的正确工程方法,使他能透彻地阐述装瓦特调速器的机器工作动力学,并指出机器与调速器在工作过程中构成一个统一系统。

维什涅格拉茨基的著作对全世界,首先对俄国调节领域中进一步开展工作具有巨大的影响。因此,有理由认为他是经典自动调节理论的奠基者。

在十九世纪七十年代,用微振动方法并且只用线性化特性解决调节稳定性问题,其正确性还没得到科学的证实。

1892年发表了天才学者利亚普诺夫(А. М. Ляпунов)的著作《关于运动稳定性的一般问题》。书中对那些用微振动法解微分方程能以得到系统稳定性正确概念的场合作了严谨论证,同时也对用上述方法不能得出正确答案的场合作了分析。利亚普诺夫的著作在力学和物理学的许多领域有很大意义。在自动调节理论方面,他为许多著作奠定了基础。

在上世纪八十年代,对活塞式蒸汽机调节的兴趣逐渐减弱,而主要注意力转向了广泛应用的水轮机自动调节。

直接作用于控制机构的普通直接作用式调速器,在水轮机上不能使用,因为要使其工作需要相当大的作用力。水轮机上开始装一种带伺服器的调速器(图5)。这种调速器叫做间接作用调速器。

维什涅格拉茨基和利亚普诺夫的著作为斯托多拉(А. Стодола)在1893年和1894年发表的著作打下了基础。

斯托多拉在研究了包括感应元件、伺服器、管路等在内的调节系统之后,把调节问题归结为一个高阶(到六阶)的线性微分方程。

利用这个方程斯托多拉在保证自动调节系统工作稳定性方面提出了有实用意义的建议。他通过在实际装置上的试验完全证明了理论上的结论。

斯托多拉的著作把维什涅格拉茨基的思想推广到了间接调节的整个领域,从而完成了经典自动调节理论的发展。

1905年在柏林出版了多列(М. Толле)编著的《发动机调节》一书,这本书很快译成了俄文。书中主要叙述了线性自动调节理论。

茹科夫斯基(Н. Е. Жуковский)从1903年开始从事发动机调节问题的研究。1909年出版了他于1908~1909年在莫斯科包曼高等工业学校讲授的《机器运行调节理论》课程的讲义,这本书不久就在全俄广为传播。

在这个时期,国内[●]外许多工厂组织了内燃机的生产。

内燃机曲轴转速的调节,基本上采取四种方式。

● 书中国内指苏联或者俄国,下同。——译校

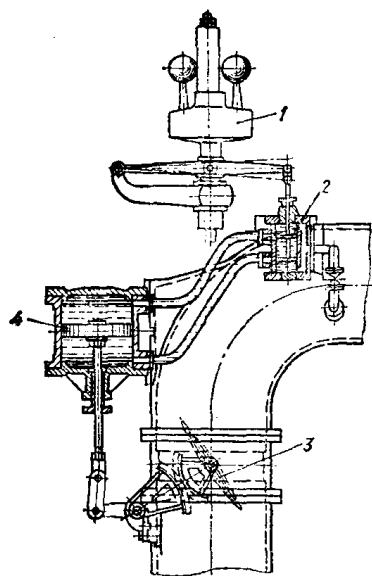


图5 间接作用调速器

1—感应元件；2—滑阀；3—机器的
控制机构（节气阀）；4—伺服器。

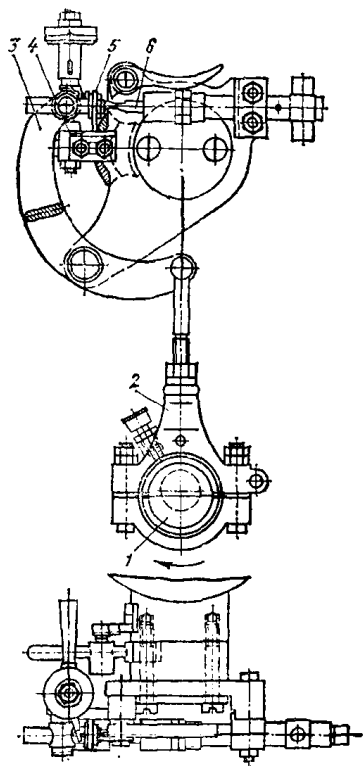


图6 HD12.5/14发动机摆式调速器

中断供油的调节 主要用在小功率发动机上，这类发动机工作的经济性和均匀性问题并不特别重要。按照这个原理工作的调速器结构最简单，不要求零件有高的制造精度和很宽的调整范围。它们在结构上作成摆式，或者是零件作往复运动。调速器推杆5（图6）借助耳钩3和连杆2作往复运动。偏心轮1的转速与曲轴转速成正比，并驱动推杆5，通过推杆5带动喷油泵柱塞6。推杆5在左边位置时不与柱塞6接触，只是在其行程的右半部时才能推动柱塞。推杆5在与柱塞接触前，由于凸轮撞到有凸肩的固定挡铁4上，使它偏离运动方向某个角度。推杆在重力作用下返回挡铁。当发动机曲轴转速增加时，推杆5的运动速度和偏离的角度都将增加，因而在一定的最大速度工况下，推杆5将来不及回到原始运动方向，而从柱塞6旁边绕过，以致发动机的供油和气缸爆发，中断一次（见图7中的循环Ⅱ第3冲程）。

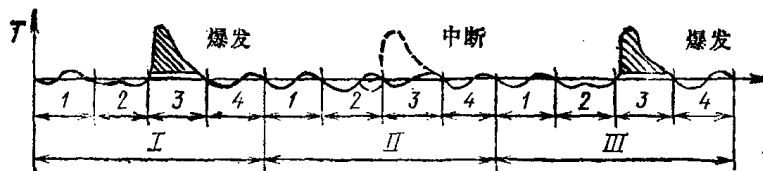


图7 以中断供油调节的单缸发动机切向力的波形图

Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ——循环；1、2、3和4——循环的冲程。

改变混合物成分的调节 通过改变相应阀门的升程或者开启延续期，从而改变供油量或空气量来实现。

改变供油量的调节 通过把已经充入气缸的可燃混合气再送回进气管或者在整个进气冲程节流混合气来实现。

改变混合物成分及其数量的调节 是前面两种方法的组合。在高负荷时，用改变混合物成分进行调节；在低负荷时，用改变混合物的数量进行调节。

上述后三种调节方法是用瓦特式直接作用调速器实现的。

由于十九世纪六十年代制造工作可靠的调速器产生了困难，在十九世纪末和二十世纪初许多生产内燃机的工厂都愿意从经验丰富的调速器专业生产厂得到现成的调速器，而且希望这种调速器价格低廉、工作更可靠。

例如：德国扬斯工厂（Jahns-Regulatoren-Gesellschaft m. b. H.）就是这样的专业厂，它生产带垂直轴、飞锤水平飞散的离心式调速器（图8）。

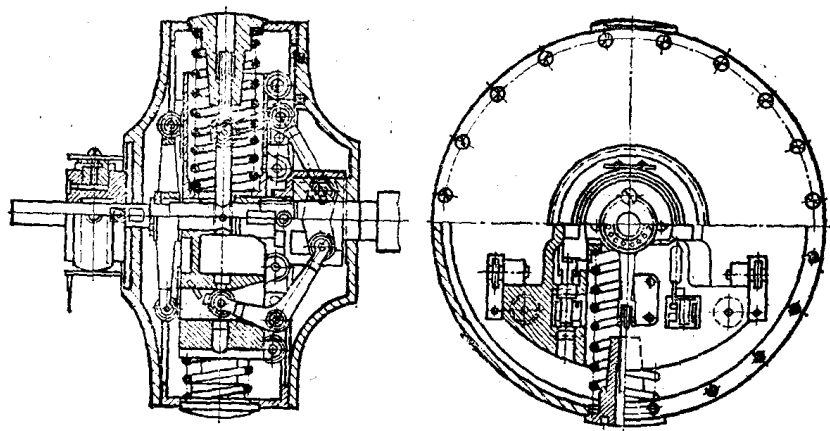


图8 扬斯（Янс）工厂的调速器

内燃机在某些工作条件下（如带动水泵和发电机）工作时，需要用手调整一下调速器，以便在小范围内改变曲轴转速。在上述调速器上，这种操作借助一个附加外弹簧就能实现（图9）。操作者在发动机运转时能够少量地改变弹簧张紧度。

于1898年，在彼得堡诺贝尔（Нобель）兄弟发动机厂（现在的俄罗斯柴油机厂）设计，并在1899年制造出了在工业得到应用的压燃式发动机。这台发动机的喷油泵和调速器简图示于图10。

这种供油调节系统在使用中工作得很好，并且在各种发动机上使用了相当长的时间。

二十世纪二十年代，国内外一些工厂都企图创制轻结构的柴油机，以便安装在包括拖拉机和汽车在内的运输车辆上。

把柴油机用到车辆上，调速器至少应在两个工况上发生作用：在标定速度工况和最低空转工况；在前一种工况，当负荷减小时，调速器保证曲轴转速不得过度提高。自然这需要在发动机上安装两个调速器，它们分别在上述规定的工况起作用（МАН 100/110柴油机）。

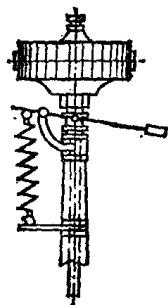


图9 带附加外弹簧的调速器

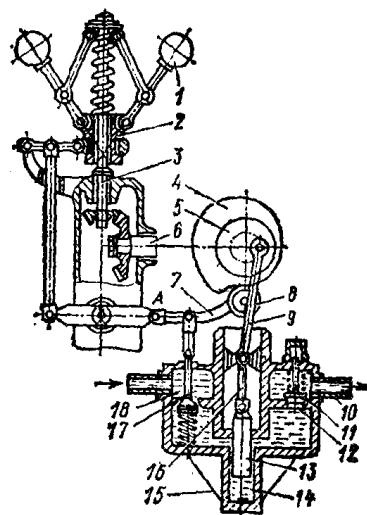


图10 诺贝尔工厂制造的发动机调节系统

1—飞锤；2—滑套；3—调速器轴；4—凸轮；
5—凸轮轴；6—主动轴；7—杠杆；8—滚轮；
9—小连杆；10—出油腔；11—断油阀；12—
断油孔；13—柱塞；14—压缩腔；15—泵体；
16—柱塞杆；17—输油阀；18—进油腔。

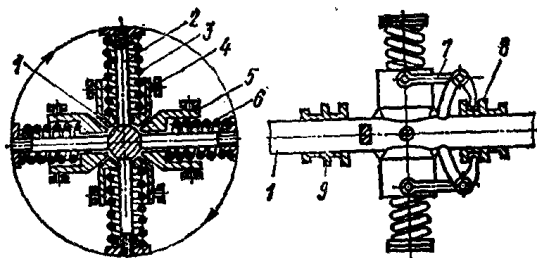


图11 MAH80/90柴油机调速器简图

1—小轴；2—双头螺柱；4、5——飞锤；3、6—弹簧；7—杠杆；8、9—滑套。

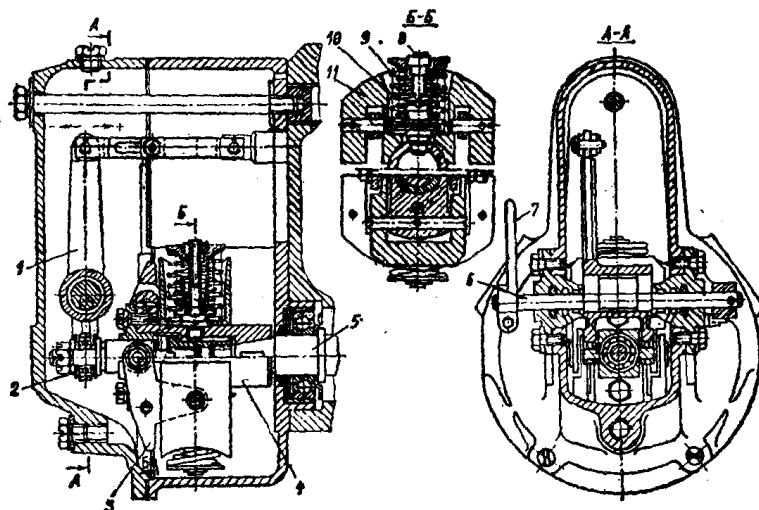


图12 两极式调速器

1—杠杆；2—滑套；3—双臂杠杆；4—轴套；5—喷油泵轴；6—小轴；
7—操纵杠杆；8—心杆；9—外弹簧；10—中弹簧和内弹簧座；11—飞锤。

可是在一台发动机上安装两个调速器并不能令人满意。因而开始把两个调速器组合在一起，例如 МАН 80/90 发动机上的调速器（图 11）就是这样。

图 12 所示的调速器在结构上更为简单紧凑。这种调速器称为两极式调速器，用在 ЯАЗ-204 等汽车柴油机上。

在两极调节时，发动机在最高和最低转速之间的工况全由驾驶员来操纵。在这种情况下，为了保持给定的中间速度工况，驾驶员往往不得不用手动调节（直接移动喷油泵齿杆）。在本世纪三十年代初，出现了没有上述缺点的全程式调速器。装在“容克斯”（Юнкерс）发动机上的调速器（图 13）就是早期的程式调速器中的一种。这种调速器的使用性能很好，到现在还在采用（В-2，Д-6 柴油机等）；它扩大了调节工况的范围，结构相当紧凑，又不太复杂。

再晚些时候，又出现了所谓气动式全程调速器（图 14）。这种调速器利用发动机进气管内的真空度来调节。

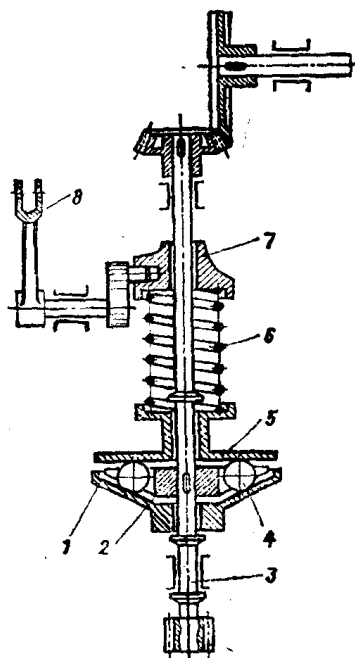


图13 “容克斯”发动机程式调速器简图

1—锥形盘；2—花盘；3—轴；4—飞球；5—支撑盘；
6—弹簧；7—活动支座；8—操纵杠杆。

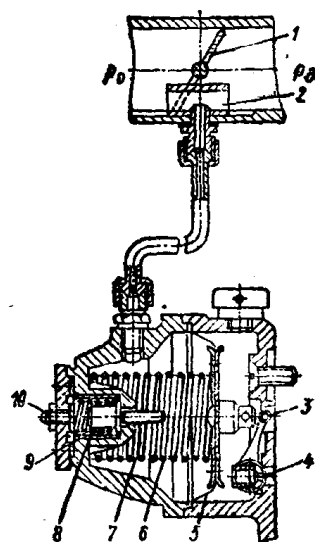


图14 气动式全程调速器简图

1—节气阀；2—喉管；3—滑套；4—断油杠杆；5—隔膜；6、8—弹簧；7—限制头；9—套筒；10—止头螺钉。

大功率固定式内燃机上的调节系统也发生着变化。二十年代末期科洛姆纳市的古比雪夫工厂和“俄罗斯柴油机”厂开始生产间接作用调速器，而在三十年代末期有些公司，主要是美国公司如，伍德沃德（Woodward）公司等，开始专门生产更紧凑的间接作用调速器。

尽管新式调速器结构较以前复杂了些，但却保证了高得多的调节精度，它们能方便容易地被调整到所需要的速度工况。

现在内燃机（柴油机）广泛用于驱动交流发电机。发电机要求在所有负荷下，高度精确地保持给定频率。进一步提高调节过程品质的必要性，要求调速器制造者，需要不

新寻求解决这个问题新途径。依靠把至少两种调节原理统一到一个调速器上,取得了显著成效:把波尔祖诺夫-瓦特原理同西门子兄弟原理结合起来,或者把波尔祖诺夫-瓦特原理同庞谢列原理结合起来。这种调速器叫作双脉冲调速器。采用双脉冲调速器的发动机试验,为我们展示了这个方面的发展前景。

许多调速器增设了可以远距离操纵发动机的机构。把尽可能多的各种自动装置集中在发动机调速器上的趋势也有增无减。例如有些调速器除了有保持给定速度工况的装置外,还装有限制负荷,校正发动机外特性,控制润滑系统机油压力,随曲轴转速而改变喷油提前角以及控制其它参数的装置。看来,把多种自动器件集中到一个装置上的过程还得继续向前发展。

在发展自动调节和自动控制理论方面,苏联学者取得了辉煌成就。在1938-1939年发表了全苏电气研究所研究员米哈依洛夫(А. В. Михайлов)的著作,这是在自动调节中应用极广泛的新方法——频率法的开端。自动调节和自动控制理论在彼得罗夫(Б. Н. Петров)、特拉佩兹尼科夫(В. А. Трапезников)、索洛多夫尼科夫(В. В. Солодовников)、齐普金(Я. З. Цыпкин)、艾泽曼(М. А. Айзерман)及其他人的著作中得到了更全面更深入的研究。

在波尔祖诺夫中央锅炉-透平研究所(ЦКТИ),在沃兹涅先斯基(И. Н. Вознесенский)领导下,深入地研究了有关直接调节和间接调节的理论,找到了自动控制的办法。

苏联学者极大地丰富了各类非线性自动调节系统的稳定性和品质方面的科学。值得提到的是安德罗诺夫(А. А. Андронов)、布尔加科夫(Б. В. Булгаков)、包京(Н. Н. Баутин)、迈尔(А. Г. Майер)、卢里耶(А. И. Лурье)和其它人的著作。根据自动调节和自动控制的理论,在综合各工程领域人们积累的经验基础上,发展了自动学的一般理论,这种理论被称为“工程控制论”。控制论是工程领域、自然界和社会中关于控制的一门科学,是新兴的基础学科之一。

自动学一般理论的研究促进了内燃机自动调节理论中具体问题的研究和分析。在加利什(Г. Г. Калиш)教授的参加和领导下,由汽车发动机科学研究所(НАМИ)完成的许多研究工作,专为解决运输式高速柴油机自动调节系统的工作稳定性和工作品质的问题。这些研究工作对发动机制造业有着巨大的影响。在纳斯坚科(Н. Н. Настенко)教授领导下研制的全程式机械调速器获得了广泛的应用。

目前在中央柴油机科学研究所、中央燃油装置科学研究所、许多发动机制造厂和高等院校,进行着研制更完善的调速器。

在发动机自动调节领域里特别应提到下列教授的工作:卡茨(А. М. Кац)、莱温(М. И. Левин)、托尔申(В. И. Толшин)、克里涅茨基(И. И. Кринецкий)、格鲁瑞埃尔(А. А. Грунауэр)、莫罗佐夫(Д. Х. Морозов)和纳斯坚科;在双脉冲调节领域里特别应提到科瓦列夫斯基等教授的工作。