

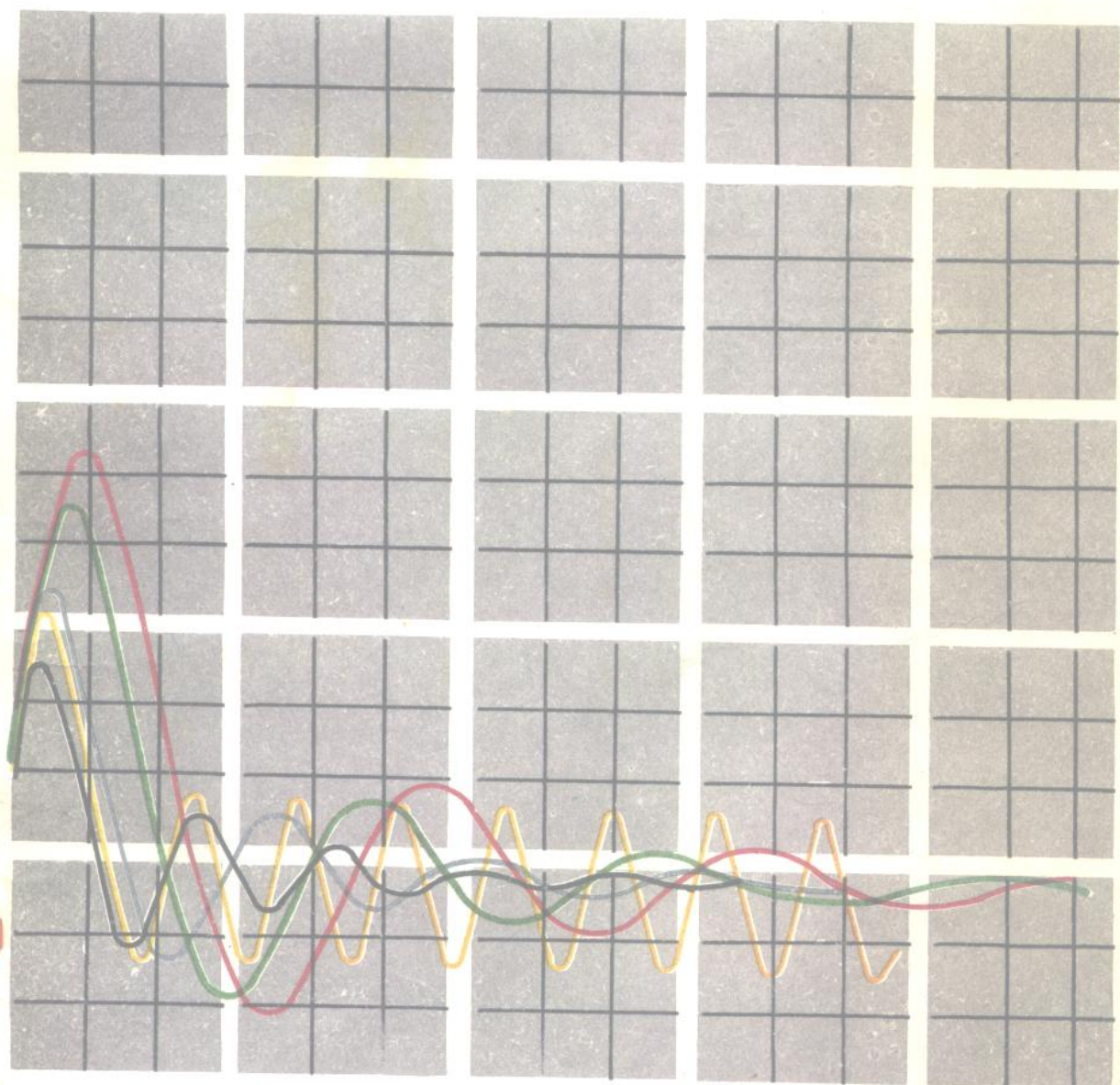
发动机

转速

自动控制

邵家骧 编著

人民交通出版社



发动机转速自动控制

Fadongji Zhuansu Zidong Kongzhi

邵家骧 编著

人民交通出版社

发动机转速自动控制

邵家骧 编著

人民交通出版社出版发行

(北京和平里东街10号)

各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张: 16.75 插页: 1 字数: 397千

1990年1月 第1版

1990年1月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—1700册 定价: 10.30元

序

发动机转速自动控制系统是由转速自动调节器(简称调速器)、被调节对象(发动机)及负载装置(发动机、螺旋桨等)三部分组成,其中调速器是转速自动控制系统的核心部分。

转速自动控制是理论性强、技术难度大、涉及面广的一门学科。国外对调速器及转速自动控制系统的研究极为重视,尤其是美、英、日、苏等国更为突出。早期,世界许多著名科学家和力学权威如杰·瓦特(James, Watt)、威斯涅格拉斯基(Wischegradsky)、罗斯(Routh)等,在转速控制系统的动力学方面作出了重大贡献,为调速器的设计提供了理论依据。现代美国的伍德沃德调速器公司(WOODWARD)、英国的欧罗巴调速器公司(EUROPA)、西德的海因兹曼调速器公司(HEINZMANN)等都有调速器的专业制造厂。其中美国伍德沃德调速器已具有100多年历史,产品系列完整,品种规格繁多,产品销售世界各地。但国外有关研究机构和调速器制造厂,对该技术保密甚严,有价值的技术资料报导极少。

我国在这方面的研究起步较晚,60年代初从仿制入手,开始液压调速器的研制,70年代着手调速系统的理论研究。近几年,由于电子计算机技术的迅速发展,仿真技术的应用,使调速器及转速自动控制的理论研究取得了突破性的进展。具有较好水平的液压调速器、电子调速器等产品已投产,并进入市场。

本书总结了国内外调速器及转速自动控制方面的研究与发展,系统地论述发动机转速自动控制的基本原理和试验研究方法,建立了发动机与调速器的数学模型。书中阐明了调速系统各时间常数对动态性能的影响,仿真技术的应用及分析方法。同时,书中还介绍了各种机械式调速器、液压式调速器和电子调速器的结构原理与性能,并对调速器选型、调速器与发动机的匹配等作了详尽的阐述。

本书共分四部分。第一部分阐述转速自动控制的基本概念,包括第一、二、三章;第二部分介绍各种类型调速器的结构原理与性能,包括第四、五、六章;第三部分论述转速自动控制原理与设计计算方法,包括第七、八两章;第四部分详细介绍仿真技术应用及配机试验方法,包括第九、十两章。

本书既有理论分析与设计计算方法,又有各种调速器结构原理和试验研究实例。全书系统、完整、内容丰富,是一本很有价值的专业参考书。希望通过本书的发行,对发动机转速自动控制,特别是调速器的进一步发展有一定的促进作用。

熊 琳

1989.8.8

内 容 提 要

本书系统地研究发动机转速自动控制的基本原理与基本试验方法,建立发动机转速控制系统的数学模型及仿真技术,阐述调速器时间常数对动态性能的影响以及动态性能的分析方法。书中还介绍各种机械调速器、液压调速器、电子调速器的结构原理与性能。同时,对调速器的选型、调速器与发动机的配合等作了详尽的论述。

本书既有理论分析与设计计算,又有实际应用与试验方法。全书系统完整、内容丰富,可供专业科技人员、高等院校的师生及其他有关人员参考。

目 录

第一章 发动机转速自动控制的概况	1
§1-1 发动机转速自动控制的发展.....	1
§1-2 国外调速器简介.....	3
一、伍德沃德调速器公司.....	3
二、欧罗巴调速器公司.....	6
三、海因兹曼调速器公司.....	9
四、狄塞尔·开开公司.....	10
§1-3 国内调速器技术状况.....	11
一、仿苏产品.....	11
二、仿美产品.....	11
三、自行研制产品.....	11
第二章 发动机转速自动控制的基本概念	15
§2-1 转速自动控制的基本原理.....	15
§2-2 调速器的基本组成与构造.....	16
一、速度敏感机构（简称速敏机构）.....	17
二、滑阀（或称控制元件）.....	19
三、液压伺服机构（或称液压放大元件）.....	22
四、液压补偿机构（或称补偿元件）.....	24
五、独立供油系统.....	25
§2-3 调速器的分类.....	26
一、按它对供油机构的作用形式分类.....	26
二、按它对速度工况的调整范围分类.....	26
三、按控制机构的构造分类.....	28
第三章 柴油机运行特性及调速器的自动控制功能	29
§3-1 柴油机的运行特性.....	29
一、柴油机工况与特性.....	29
二、负荷特性.....	30
三、速度特性.....	31
四、万有特性.....	32
五、船用主机与螺旋桨配合特性.....	32
§3-2 柴油机工况稳定性及自稳系数.....	34
§3-3 调速器的自动控制功能.....	36
§3-4 调速系统术语与主要技术参数.....	37
一、调速系统术语.....	37

二、调速系统主要技术参数	39
三、调速系统精度等级	39
第四章 机械式调速器	41
§4-1 机械式调速器的结构原理	41
一、机械式双制调速器	42
二、机械式全制调速器	43
§4-2 机械式调速器的主要附加装置	46
一、增压补偿器	46
二、全负荷油量校正装置	46
三、扭矩弹簧装置	47
四、大气压力补偿器	47
五、远距离电动转速控制装置	48
§4-3 几种国外的机械式调速器	49
一、RQR型调速器	49
二、R722调速器	51
三、GCSV调速器	52
第五章 液压式调速器	61
§5-1 液压调速器结构原理	61
一、具有刚性反馈的液压调速器	61
二、具有弹性反馈的液压调速器	64
三、具有双反馈的液压调速器	68
§5-2 液压调速器的主要附加装置	71
一、电磁式停车装置	71
二、进气压力燃油限制装置	72
三、滑油压力过低停车装置	73
四、起动伺服升压器	75
§5-3 几种国外的液压调速器	75
一、伍德沃德 PG 型液压调速器	75
二、欧罗巴 RE1500 型液压调速器	77
三、狄塞尔·开开 RHD35 型液压调速器	81
四、M503 型液压调速器	85
第六章 电子调速器	89
§6-1 电子调速器概述	89
一、电子调速器的分类	89
二、电子调速器的主要组成	89
三、电子调速器的特点	90
§6-2 电磁式转速传感器	91
一、传感器工作原理	91
二、输出电势与波形	92
三、转速传感器的特点	95

§6-3	频率电压转换器	95
一、	转换器的基本原理	95
二、	转换器的设计	96
§6-4	运算放大器	98
一、	理想运算放大器各个基本电路	99
二、	比例积分器 (PI 控制器)	100
§6-5	功率放大器	101
§6-6	电液执行器	102
一、	动铁式电液执行器	102
二、	动圈式电液执行器	105
§6-7	霍尔测功元件	106
一、	工作原理	106
二、	测功元件的设计	107
§6-8	2301 电液调速器	108
一、	单脉冲电液调速器	109
二、	双脉冲电液调速器	114
第七章	调速系统的静力学	119
§7-1	调速器的静力学	119
一、	恢复力与支持力	119
二、	调速器稳定系数	121
§7-2	调速系统的静态特性	122
一、	调速器静态特性	122
二、	调速系统的调速特性	123
三、	非直线度	124
§7-3	调速系统的稳态调速率	124
一、	调速器的不均匀度 δ_g	125
二、	调速系统的稳态调速率	128
§7-4	调速系统的不灵敏度	129
一、	调速器及调油机构中的摩擦力	129
二、	调速系统的不灵敏度	130
三、	液压调速器的不灵敏度	133
§7-5	调速器的静力计算	134
一、	调速器飞块离心力的确定	134
二、	调速弹簧的计算方法	138
第八章	调速系统的动力学	145
§8-1	柴油机的数学模型	146
§8-2	速敏元件的数学模型	151
一、	飞块离心力 $F_c(\alpha, \omega)$	152
二、	弹簧力 $F_t(s, u)$	152
三、	粘摩擦力 F_n	153

四、滑阀开启时的液动力 F_z	153
五、补偿力 F_c	155
§8-3 液压伺服元件的数学模型	157
一、无反馈双作用液压伺服元件的运动方程	158
二、刚性反馈双作用液压伺服元件的运动方程	159
三、恒速反馈双作用液压伺服元件的运动方程	160
§8-4 调速系统的运动方程	162
一、直接作用调速系统的数学模型	162
二、无反馈间接作用调速系统的数学模型	163
三、刚性反馈间接作用调速系统的数学模型	165
四、恒速反馈间接作用调速系统的数学模型	166
§8-5 传递函数	168
一、传递函数基本规律	168
二、传递函数的耦合规律	169
§8-6 频率特性	171
一、频率特性的概念	171
二、调速系统各环节的频率特性	174
三、开环系统频率特性	178
四、闭环系统频率特性	180
五、对数频率特性(波德图)	181
§8-7 调速系统稳定性分析	185
一、稳定性的基本概念	185
二、代数判据(劳斯-霍尔维茨判据)	186
三、奈魁斯特判据(频率判据)	189
四、对数幅相频率特性判据	190
五、稳定性裕量	190
§8-8 调速系统动态性能分析	193
第九章 调速器与柴油机的配合	196
§9-1 调速器的选型	196
一、柴油机对控制的要求	196
二、柴油机调油机构所需的功	197
§9-2 调速器主要参数对配机性能的影响	198
一、不稳定性 δ 的影响	198
二、伺服器时间常数 T_s 的影响	200
三、恒速器时间常数 T_i 的影响	200
四、补偿度 β 的影响	201
§9-3 仿真应用与配机试验	202
一、调速系统仿真的一般步骤	202
二、由传递函数求时域响应	203
三、连续时间系统的离散化原理	205

四、面向结构图的离散相似法.....	207
§9-4 程序说明与仿真实例.....	214
一、程序说明.....	214
二、仿真实例.....	214
第十章 液压调速器的试验与调整	229
§10-1 调速器试验台及调整 试 验.....	229
一、风动试验台及调整试验.....	229
二、柴油机模拟试验台及调整试验.....	230
§10-2 液压调速器的拆装与 调 整.....	245
一、液压调速器的拆卸.....	245
二、液压调速器的装配.....	247
三、液压调速器的调整.....	250
§10-3 液压调速器常见故障与排除 方 法.....	252
一、转速不稳定.....	252
二、柴油机“飞车”.....	254
三、调速器渗油.....	254
四、摩擦离合器打滑.....	255
参考资料.....	256

第一章 发动机转速自动控制的概况

§1-1 发动机转速自动控制的发展

自动控制是近一百年发展起来的新技术。尤其是在近数十年内获得了突飞猛进的发展。目前差不多各个工业技术部门都使用着这种技术。

船舶动力装置自动化,首先是发动机的转速、温度、压力等参数的自动控制。这些参数原来差不多都是人工随时调整的。但其中不少参数,用人工随时调整,往往还不能令人满意。如发动机负载的瞬时变化,要求用人工来保持其转速不变,这是不容易做并做不好的。况且随着生产的发展,人力愈来愈宝贵,不可能把大批人力放在管理机器设备上。为此要求机器能保持正常工作及按着人的要求自动工作。

发动机上最早出现的自动调节器,是1784年J.瓦特 (James Watt) 发明的离心式机械调速器,揭开了调速器历史的第一页。图1-1所示为珍藏在美国费城佛克林学院的J.瓦特离心式机械调速器复制品。图1-2为最古老的调速器设计图,该调速器用于当年的蒸汽机上^[1]。

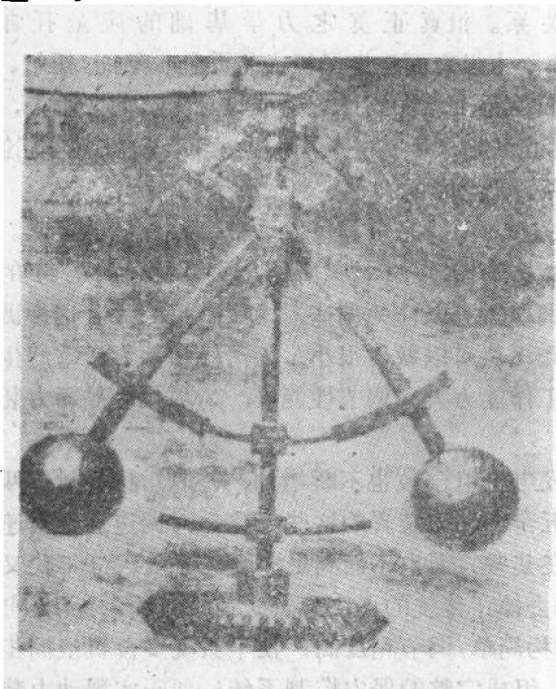


图1-1 藏在美国费城的复制品J.瓦特离心式机械调速器

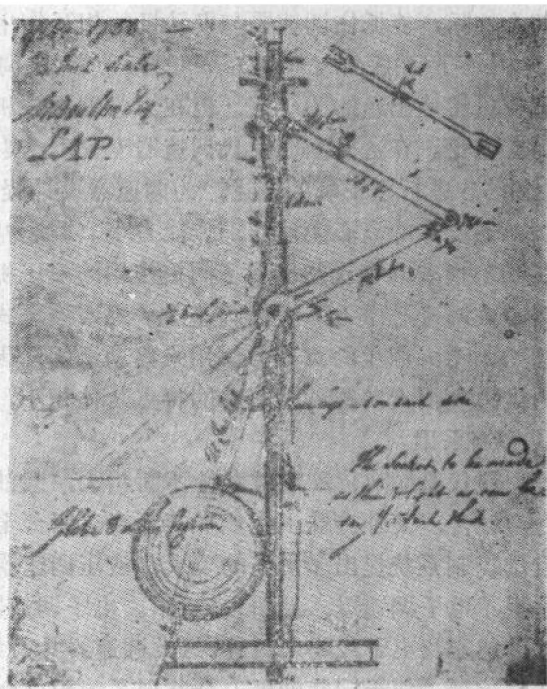


图1-2 J.瓦特和M.蒲尔顿制作的最古老的调速器设计图

它的简单原理如图1-3所示,发动机的轴通过伞齿轮带动离心式机械调速器的立轴2,后者上端用铰链连接着两个飞块3。当发动机转速升高时,飞块3飞出把套筒4提起,使阀

5 关小一点。阀 5 装在进汽管 6 上，阀门关小，进汽量减小，蒸汽机转速随之下降。

第一次工业革命以后，随着发动机的发展，有关调速器的发明创造也愈来愈多。历史上记载的有克利 (kley)，法考特 (Farcot)、黑德 (Head)、波特 (Porter)、普罗尔 (proell) 等许多发明家^[2]，但是

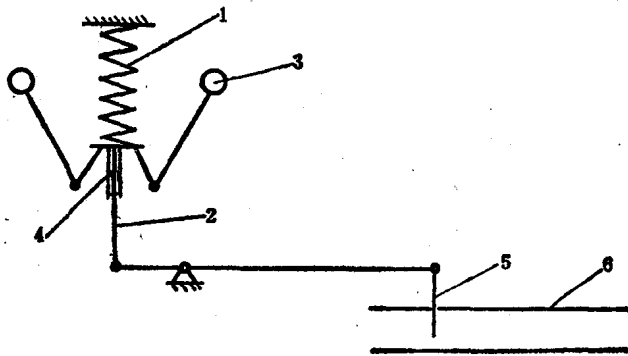


图1-3 离心式调速器工作原理图

1-弹簧；2-立轴；3-飞块；4-套筒；5-阀；6-进汽管

他们并没有理解调速器与发动机的相互关系。按照现在的说法，他们没有理解闭环控制系统的原理。自1880年起，在研究天体望远镜自动控制的影响下，从有名的马克斯韦耳 (Maxwell) 开始^[3]，英国和法国的科学家相继从力学方面对闭环系统的调速问题进行了研究，但成果并不突出。1876年至1877年，俄国的威斯涅格拉斯基 (Wischegradshy) 教授发表了很多有价值的研究论著，第一次正确地在理论上说明了调速系统中发生振荡和不稳定的原因。是近代线性自动控制理论的创始人。但是由于文字的隔阂，未能普及。

由于学识所限，当时的机械工程学未能把调速器与发动机作为闭环系统考虑。1905年，当时的力学权威劳思 (Routh) 发表的《刚体系统动力学》一篇名著中，曾用例题解决了调速器的力学问题^[4]。1919年出版的特林克斯 (Trinks) 所著一文^[2]，内容通俗易懂，切合实际，能抓住调速器与发动机的相互作用关系。但真正奠定力学基础的应是托尔 (Tolle)^[5]和霍特 (Hort)^[6]的振动学，在调速器力学方面作出了极大的贡献。然而，托尔、霍特虽然是出色的力学家，但在力学理论分析的关系上，在满足调速器设计人员的要求上，仍有不足。在这方面，现代调速器专家R·奥尔登波格 (Rofus-oldenlurgen)，在他的论文^[7]进行了正确的论述，为调速器设计提供了理论依据。

瓦特式的离心调速器工作能力小，调速精度差，不能完全满足发动机自动控制的要求。在40年代末60年代初出现了间接作用的液压机械调速器，见图1-4所示。如果说，把瓦特的离心式调速器作为第一代调速器，那末液压式调速器可以作为调速器发展的第二代。这种调速器，飞块产生的离心力仅用来移动滑阀，因此飞块可以做得很小，而滑阀使动力活塞产生的推力却很大。这种调速器的特点是体积小，工作能力大、调节性能好，为现代船舶动力装置普遍采用。

现代船舶吨位和机组容量不断增大，柴油发电机组台数也不断增加，并联运行台数有两台至三台，某种特殊工程船舶甚至多达四台至五台。动力装置的这些变化，对调速器及转速自动控制系统提出了更高的要求。液压调速器在某些方面也不能满足需要。于是，60年代又出现了电子调速器，见图1-5所示。电子调速器去掉了传统的飞块弹簧式速敏机构，而以电子传感器及电子线路来代替。这类调速器具有结构简单，调节精度高；便于实现多台机组同步并联运行；便于同柴油机安全监视系统相结合，组成完整的保安控制系统；便于实现动力装置全自动化等特点。因此，电子调速器可以认为是第三代调速器。从表1-1可以看出，电子调速器对柴油机转速的控制精度，可以达到国家一级精度的水平。表1-1列出了机械、液压、电子调速器的性能及精度。

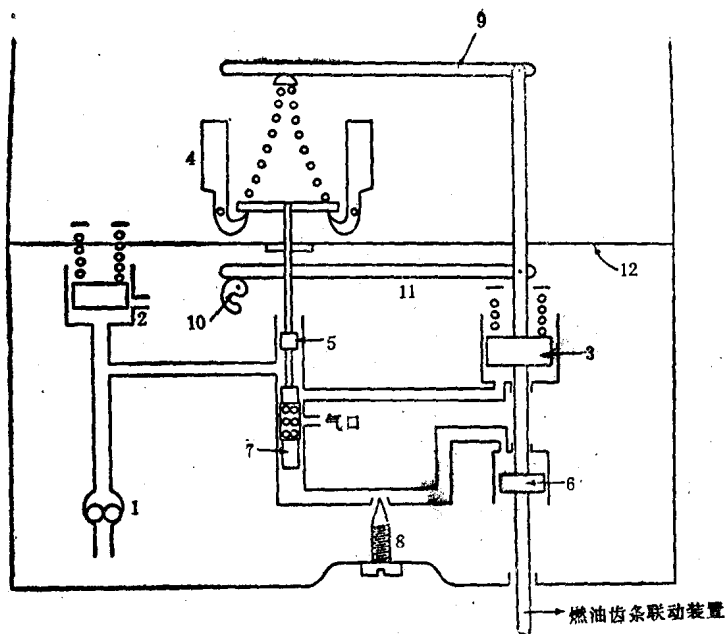


图1-4 液压式调速器工作原理图

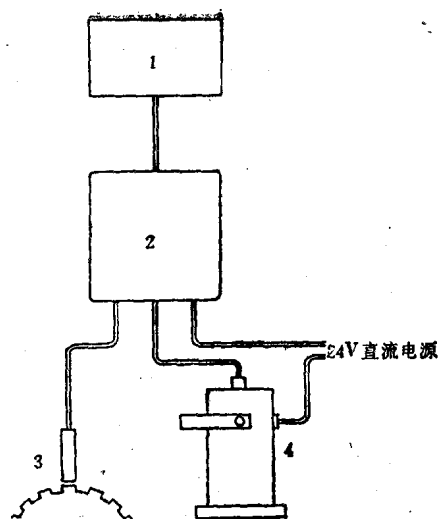


图1-5 电子调速器原理图

机械、液压、电子调速器性能参数比较表

表1-1

调速器类型	机 械 式	液 压 式	电 子 式
性能参数			
转速波动率%	1	0.5	0.25
瞬时速调率%	15	10	3
稳定时间 (s)	15	7	0.5
并机负载分配差度	20	10	5
精度 等级	4	3	1

§1-2 国外调速器简介

目前世界上制造液压调速器的专业工厂和公司只有可数的几家，其中最有名的是美国的伍德沃德（Woodward）调速器公司，此外还有英国的欧罗巴（Regulateurs Europa）调速器公司、日本的狄塞尔·开开（Diesel kiki）公司、法国的波许（Robert Bosch）公司以及西德的海因兹曼（Heinzmann）公司。这些公司除了将产品供应国内需要外，并向国际市场销售。

一、伍德沃德调速器公司

美国伍德沃德调速器公司创建于1870年，至今已有一百多年的历史，也是现在世界上最

大的调速器公司。它生产的调速器可与各种柴油机、煤气机、燃气轮机和汽轮机配用，其产品遍销世界各地。该公司生产的主要调速器规格型号见表1-2。

伍德沃德调速器型号规格

表1-2

型 号	工 作 能 力		输 出 角 度 °(度)	转 速 范 围 r/min
	kgf·cm	N·cm		
SG 型液压调速器	20	196	36	430~2200
PSG 型液压调速器	25	245	36	
UG8 型液压调速器	111	1087.8	42	500~1500
UG40 型液压调速器	555	5439	38	400~1200
PG 型液压调速器	800、150	7840、1470	450	250~1600
2301电子调速器	—	—	—	—
EG3P 电子调速器	60	588	42	—
EG10P 电子调速器	130	1274	42	—
EG-B 型电子调速器	400	3920	45	—

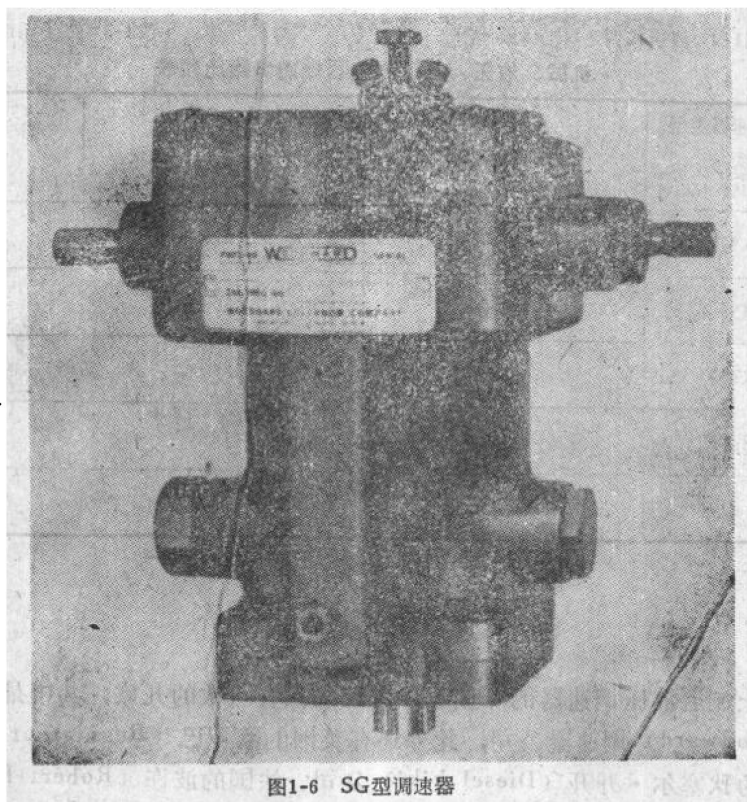


图1-6 SG型调速器

1. SG型调速器

SG型调速器为液压式的具有调速率可调机构，用于控制36.75~110.25kW的小型柴油机和汽轮机，图1-6为该调速器的外形图。由于它并不依靠飞块离心力来移动供油机构，所以它的调节性能便不受杆件摩擦的不良影响，这在全机械式调速器是不同的。

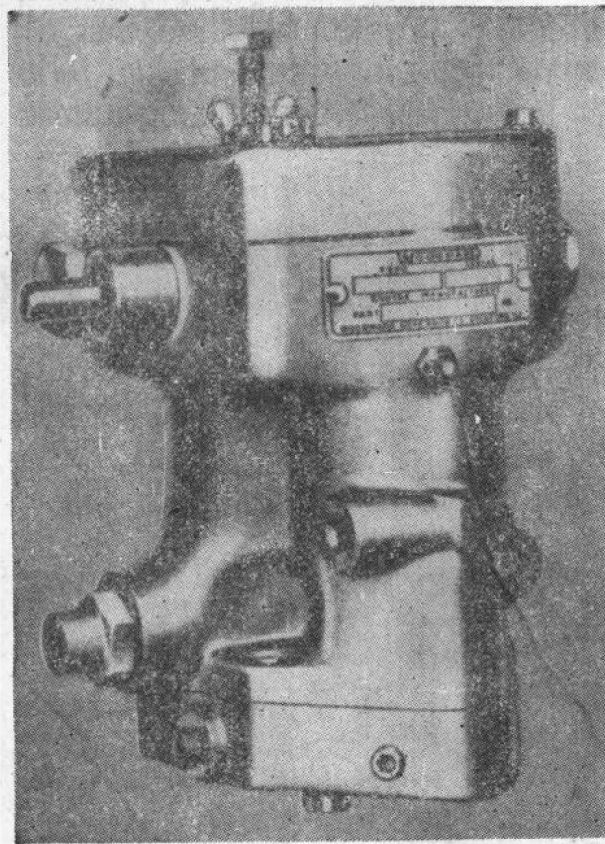


图1-7 PSG型调速器

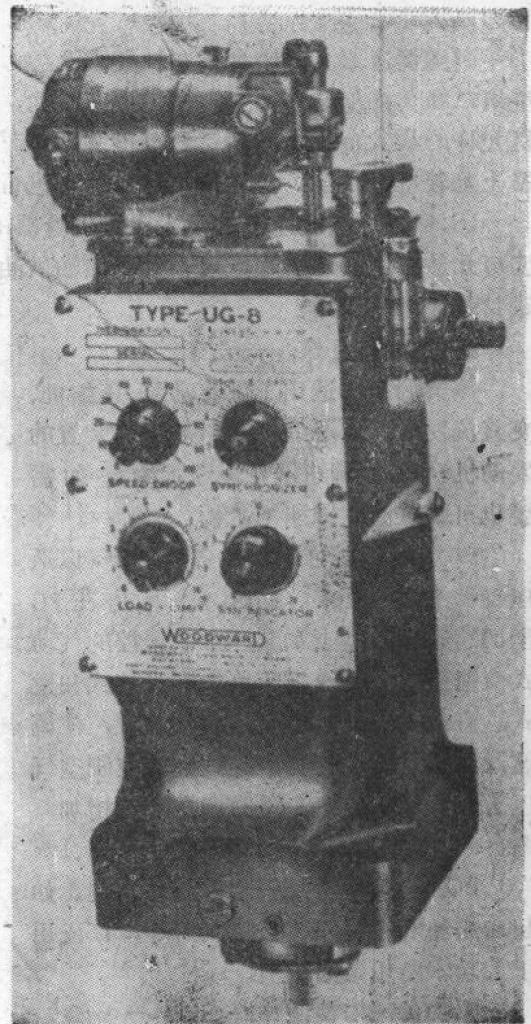


图1-8 UG 8型表盘式调速器

一般都使用操纵轴来调节转速，在其外部加装电机或气动式接收器后，便可进行远距离操纵。在此同时，还提供了手动操纵的装置。

SG型调速器本身使用的工作油需由发动机的润滑系统来提供。有些型号在调速器内装有朝断油方向作用的复位弹簧，有的型号则由发动机制造厂在调油机构上安装复位弹簧。

2. PSG型调速器

该调速器略大于SG调速器，工作能力也较大。它既有恒速调节特性，又有稳定调速率的可调机构，输出轴转角为 36° 时，可调范围为 $0 \sim 7\%$ ，图1-7为该型调速器外形图。

PSG型调速器在加装电机或气动式接收器后，便可进行远距离操纵，在此同时，还提供了手动操纵的装置。

和SG型调速器一样，PSG调速器所使用的工作油也来自发动机润滑系统。调速器本身不带复位弹簧，而由发动机外部提供复位弹簧。

3. UG型调速器

该调速器适用于柴油发电机组、泵、压缩机、船用柴油机、煤气机以及汽轮机等，故又称万能调速器。

该类调速器又分表盘式和杠杆式两种。表盘式调速器为恒速调速器，通常用于柴油发电机组，在其外部装有稳定调速率调节机构，以便并联运行。调节负载限制旋钮，可确定发动机允许的最大负载，此旋钮还可供手动停车之用。另一旋钮供手动调节转速之用。如在调速器上加装电机传动的速度调节后，便可进行远距离调节，图1-8为UG8型调速器外形图。

UG型杠杆式调速器较之表盘式调速器的转速调节范围更宽，故适用于船舶主机，如需要可加装扭矩限制装置，用于限制燃油供油量，使发动机在所有转速下的扭矩均能限制在推进特性曲线范围内。

4. PG型调速器

该类调速器适用于供驱动泵、压缩机、交直流发电机、造纸机和船舶推进装置的发动机。PG型调速器是恒速式的，如需要也可加装稳定调速率机构。

PG型调速器可以加装各种附件，以适应各种不同的要求。如PGA型就是在PG型调速器基本型上加装一个供遥控的气动式变速装置。转速调节机构有直接式和逆式。直接式在控制空气压力增加时，使调速器的调定转速增加；逆式则在控制空气压力降低时，使调速器的调定转速增加，图1-9为PGA型调速器外形图。

PGA型调速器加装若干辅助装置、如起动燃油限制器、扭矩限制器等，广泛用于大功率船用柴油机上。

5. 2301-EG型调速器

2301/EG型调速器为电子液压调速器。它由电子控制箱和电液执行器两部分组成，见图1-10。

该类调速器便于组成单脉冲或双脉冲调速系统，能实现调频调载。一个电子控制的速度控制器，能在较宽的速度范围内把转速控制在0.25%之内。

电液执行器可作为恒速或差速使用。它包括一个电液转换器和一个液压执行器，控制精度高、工作能力大，在柴油发电机组、管道和泵站以及船舶推进得到广泛的使用，并将获得进一步发展。

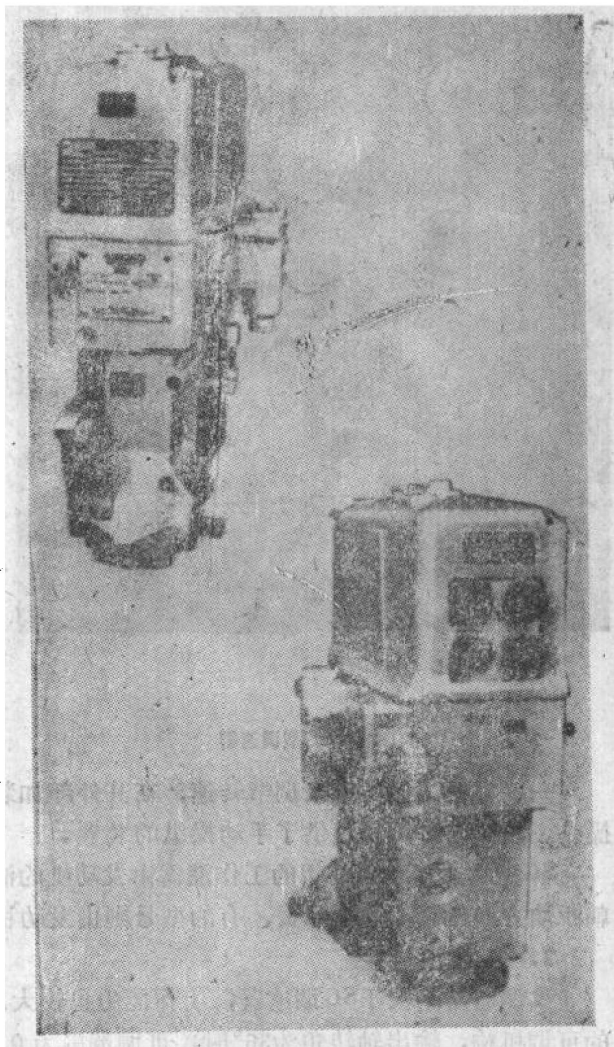
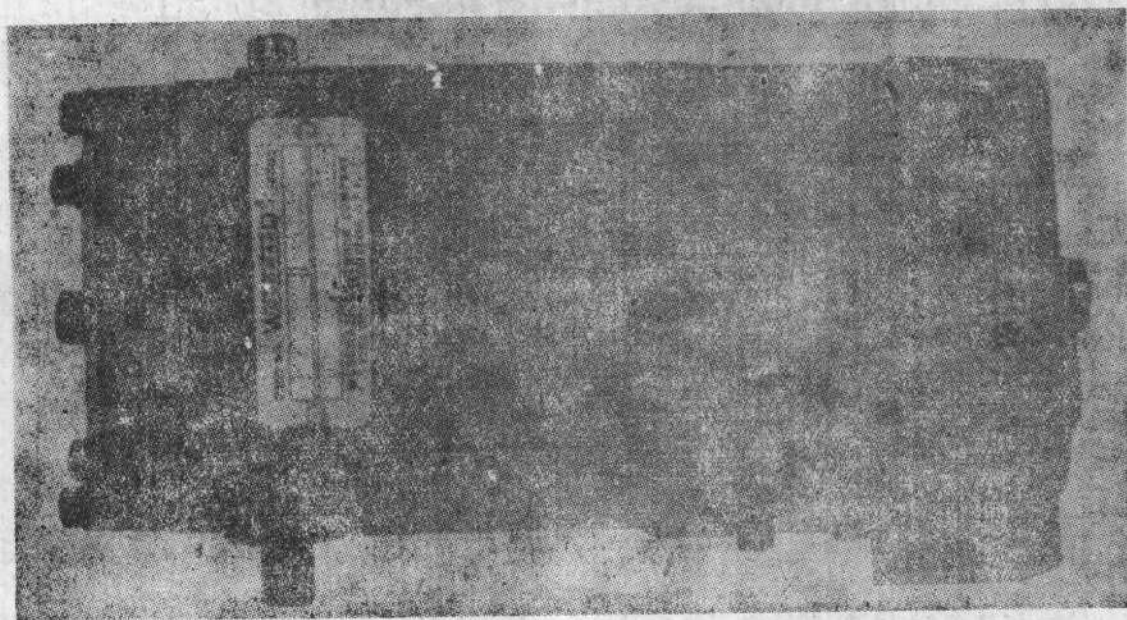


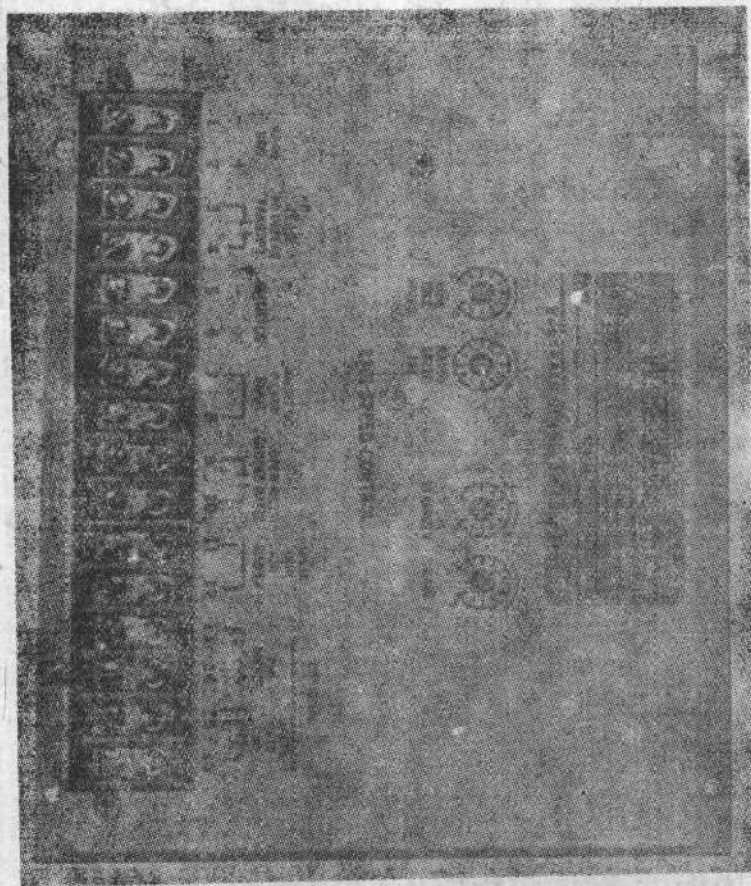
图1-9 PGA型调速器

二、欧罗巴调速器公司

英国欧罗巴调速器公司创建于1954年，是目前世界上仅次于美国伍德沃德调速器公司的



a)



b)

图1-10 2801/BG型电子调速器