

柴油机 调速新技术

编著 滕万庆

主审 王芝秋



哈尔滨工程大学出版社

柴油机调速新技术

编著 滕万庆

主审 王芝秋

哈尔滨工程大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

柴油机调速新技术 / 滕万庆编著. — 哈尔滨: 哈尔滨
工程大学出版社, 2000.3

ISBN 7-81073-026-6

I. 柴… II. 滕… III. 柴油机-调速-技术

IV. TK42

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 15701 号

内 容 简 介

《柴油机调速新技术》一书共分为六章, 包括: 柴油机调速系统概论; 调速系统静态特性分析; 调速系统动态特性分析; 调速性能指标; 模拟式电子调速器; 数字式电子调速器等内容。

本书可作为高等院校本科生、研究生的专业教学教材, 也可作为从事柴油机调速系统研究的工程技术人员的技术参考书。

哈 尔 滨 工 程 大 学 出 版 社 出 版 发 行

哈尔滨市南通大街 145 号 哈工程大学 11 号楼

发行部电话 (0451) 2519328 邮编: 150001

新 华 书 店 经 销

哈 尔 滨 工 业 大 学 印 刷 厂 印 刷

*

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 7.125 字数 183 千字

2000 年 3 月第 1 版 2000 年 3 月第 1 次印刷

印数: 1~1 000 册

定价: 15.00 元

前 言

在科学技术飞速发展的今天，柴油机作为一种原动力机构，仍然有着广泛的应用。但随着电子和计算机控制技术的发展，以及其应用领域的日益广泛，传统的柴油机技术也有了较大的变化。转速的调节，是柴油机运行调节的一个重要的内容。传统的转速调节采用的是机械或机械液压机构。这种机构由于受惯性质量、摩擦阻力及控制规律简单等因素的制约，调速的精度难以进一步提高。现代柴油机在转速控制方面，电子和计算机控制技术，机、电、液一体化技术在越来越多的代替原有的机械或机械液压机构。柴油机采用电子调速技术不仅能提高调速的精度，而且为柴油机的运行控制的自动化提供了很大的方便。为适应柴油机调速新技术的不断发展，根据作者多年来的工作经验，编写了此书。

本书共分6章，第1章介绍了柴油机调速系统的概论。第2章介绍了调速系统静态特性分析的方法。第3章介绍了调速系统的动态特性分析的方法。第4章介绍了评价调速系统的性能指标，及改进调速性能指标的方法。第5章结合实例介绍了模拟式电子调速器的基本结构和工作原理。第6章结合实例介绍了数字式电子调速器的基本结构和工作原理。

王芝秋教授作为主审，认真阅读了本书，并提出了许多修改意见。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和不妥之处，望读者能给与批评和指正。

目 录

1 柴油机调速系统的概论	1
1.1 柴油机调速系统的功用	1
1.2 柴油机速度调节的类型	2
1.3 调速系统基本工作原理	4
1.4 柴油机对调速器的基本要求	15
1.5 工作能力的计算	15
1.6 调速器性能的提高	16
2 调速系统静态特性分析	19
2.1 调速系统组成元件的静态特性	19
2.2 调速系统静态特性	30
2.3 机组和调速器的静稳性	34
3 调速系统的动态特性分析	42
3.1 调速系统动态分析的目的和方法	42
3.2 调速系统组成元件的运动方程	44
3.3 调速系统的运动方程	66
3.4 环节和系统的频率特性	83
3.5 调速系统动稳性判据	109
3.6 电站用柴油机对调速系统的指标要求	127
4 调速系统的性能指标	129
4.1 调速系统的静态指标	129
4.2 调速系统动态指标及其估算	138

5 模拟式电子调速器	159
5.1 基本结构与工作原理	159
5.2 主要环节	161
5.3 实例	165
6 数字式电子调速器	194
6.1 基本结构与功能	194
6.2. 转速采样方法	195
6.3. 转速控制算法	199
6.4 执行器结构原理	207
6.5 实例	208
参考文献	222

1 柴油机调速系统的概论

1.1 柴油机调速系统的功用

调速系统的作用是在柴油机各种工况运转中，当外界负荷发生变化时能够自动地调节喷油泵的供油量，以保证柴油机在规定的转速下稳定地运转。汽车、拖拉机以及船舶柴油机的负荷与转速是经常变化的。汽车爬坡，船舶航行时常受到风力、水流等外界环境的影响，均会导致柴油机负荷的变化。如船舶在海上遇到风浪，可使船舶左右、前后摇摆，有时甚至会使螺旋桨露出水面，柴油机的负荷突然减少，此时，若喷油泵的供油量不能及时得到减少，柴油机转速就会突然升高，甚至会发生“飞车”。反之，当柴油机负荷突然增加时，特别是在低转速运行的情况下，若供油量不能及时增加，可能会造成柴油机停车。此外，在柴油机发电机组中，为保证发电机发出的电压、频率稳定，要求柴油机在规定转速下恒定运转，但电网的负荷是不断变化的，它影响柴油机转速的稳定，因此，要保证柴油机的转速恒定，就必须随着柴油机负荷的大小，调节柴油机的供油量。由于柴油机的负荷变化，经常是大的而且又突然的，要采用人工控制柴油机的供油量，是十分困难的，甚至是不可能的。为了自动控制柴油机的供油量，适应柴油机负荷的变化，保持柴油机稳定运转，则柴油机必须装有调速器。

根据柴油机的用途不同，柴油机对调速器性能的要求也不同。在有些场合，柴油机要求的调速性能较高。比如前面讲到的柴油发电机组，它要求电压、频率稳定，特别是用于精密仪器供电的柴油发电机组，它对柴油机调速系统调速品质的要求更高；

而另一些场合，则对调速器的要求可以低一些。如车用发动机。它一般只要求调速器进行最低稳定转速控制和最高转速限制，而在最低稳定转速和最高转速之间，则由司机的脚踏板控制即可。而用于船用主机的柴油机，其调速器一般要有全程调速功能，因为船舶的航行经常要求稳定在多种航速下。但对于船用主机来讲，柴油机按螺旋桨特性运行，这种特性在一定范围内具有速度的自稳定性，因此对船舶主机一般不要求调速系统的调速精度很高。

1.2 柴油机速度调节的类型

柴油机设置了调速器后，其特性曲线发生了变化。根据发动机的类型及用途，配置不同作用的调速器，以改变其特性曲线，适合于使用的要求。因此按用途的不同，调节方法可分为三种类型：

1.2.1 极限调速

极限调速是限制发动机在一定的转速范围之下运转，以免发动机超过最大允许转速或飞车而损坏。极限调速一般在发动机超过标定转速时就应发生作用。

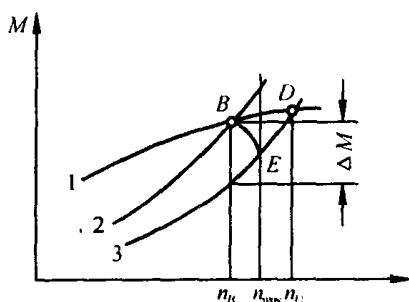


图 1-1 极限调速特性

图 1-1 中曲线 1BE 为装有极限调速器的柴油机的特性曲线，而 1BD 为不带调速器的曲线。从图中可以看出，发动机装用极限调速器后，在超过某一转速时，其特性曲线急剧下降，从 BD 改变为 BE，而 B 点所对应的转速 n_B 为调速器开始作用点。当柴油机与螺旋桨在 B 点稳定运转时，如果螺旋桨由于阻力减少，其特性曲线由 2 改变为 3，则发动机输出扭矩比螺旋桨

的扭矩增加，其转速会进一步升高，直到达到点 D 为止。此时，如果螺旋桨阻力再次增加，特性曲线回到 2，发动机将回到点 B。这种特性使得发动机在螺旋桨特性变化时，能够自动调整转速，保持稳定的运行状态。

所需要的扭矩大 ΔM ，从而使转速升高。若发动机不带调速器，则新的稳定点为 D ，所对应的转速 n_D 已大大超过最大允许转速 $n_{\max}$ ，但装有极限调速器后，发动机特性按 BE 调节，亦即喷油量和扭矩迅速减少，转速的上升控制在允许范围内，其新稳定点为 E 点。

1.2.2 双制调速

如前所述，带动螺旋桨的柴油机在低速运转时，工作是不稳定的，而船用柴油机又常常需要在低转速下运行。因此，为了改善柴油机的低速运行性能而设置低速稳定调速，把低速段的柴油机特性改变，使其斜率变得比螺旋桨特性的斜率大。如图 1-2 所示。

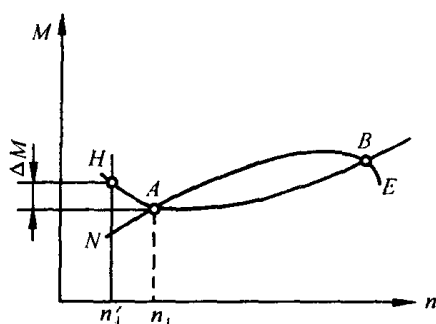


图 1-2 双制式调速特性

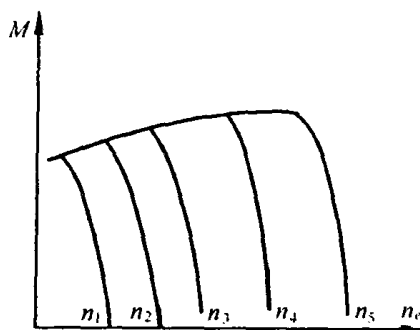


图 1-3 全制式调速特性

图中低速段特性从 NA 改变为 HA 。这样，当发动机在 A 点以转速 n_A 稳定运行时，如转速偶然下降至 n'_A ，则调速器使供油量增加，发动机发出的扭矩比螺旋桨所需的大 ΔM ，在这过剩的扭矩作用下使转速回复至原有数值 n_A ，从而在低速时能保持相对稳定的运转。其中 n_A 为发动机最低稳定转速。 A 点为调速开始作用点。如果把这种调速装置与极限调速合并，则既可限制最高转速，又能起低速稳定作用。就成为双制调速。其特性曲线如图中 $HABE$ 所示。在曲线的 AB 段所对应的转速下，不起调速作用。此时，如需调速，则采用手动调速供油量。

1.2.3 全制调速

全制调速是在柴油机的整个工作转速范围内均能起调节作用。并可根据运转的需要，通过调速器的操纵杆，使发动机稳定在某一转速下运行。同时在运行中亦很方便地从一个稳定转速改变为另一稳定转速。采用全制调速方法的柴油机，其特性曲线如图 1-3 所示。其中 $n_1, n_2, \dots$ 为稳定在不同转速下的特性曲线。

对于需要恒速运转的发动机，则调速器是预先调定在一个转速下工作，而转速可调范围较窄，称定速调速。

1.3 调速系统基本工作原理

各种柴油机调速系统在调速功能上，一般主要包含：转速反馈输入，控制调节和执行机构输出这几个环节，（有些调速器，如一些用于发电的柴油机，在调速时附加上负荷输入，做为转速反馈的补偿）。其转速反馈环节的主要作用是，感知发动机的实际转速，如机械调速器的飞铁，电子调速器的磁电式传感器等。控制调节环节的作用是，将反馈转速的输入，根据调速器自身的结构（机械式调速器）或调速算法（数字式电子调速器），转换成控制输出。而执行机构的作用是将控制输出转换成油泵的齿条位移。对于电子调速器一般这几个环节在结构上比较清楚，而对另一些调速器，如机械式调速器或机械液压调速器，则往往是将其其中的一些环节组合在一起。这样就形成了直接作用调速器和间接作用调速器等等。

1.3.1 直接作用式调速器

这种调速器是由转速感应元件通过杠杆等机械连接来直接带动调油机构，故亦称机械式调速器，其驱动系统只不过起单纯的力的传递以及变更位移方向和大小的作用，因此这类调速器的驱动力直接取决于飞铁的离心力，其大小是很有限的，只能用于中

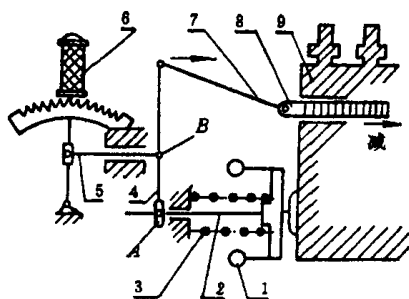


图 1-4 机械式极限调速器原理

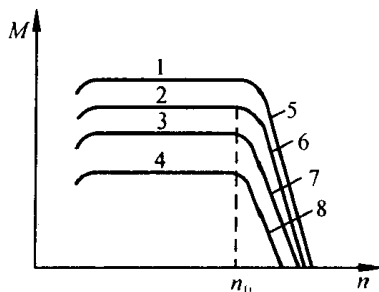


图 1-5 极限调速器特性

小马力的柴油机上。其灵敏度和精度亦较差，但结构简单，维修方便。

1.3.1.1 机械式极限调速器

一般用于直接带动螺旋桨的中小型船用柴油机上，它的作用是限制发动机的最大转速。其作用原理如图 1-4 所示。

当调速器转速超过极限值时（一般为发动机标定工况转速的 115%），飞铁的离心力克服弹簧的预紧力，推动滑块 A，并以 B 为支点使油泵齿条朝减油方向移动，从而限制转速的上升。理论上说，弹簧的预紧力应等于极限转速时飞铁的离心力，使低于极限转速时调速器不起作用，这时，滑块 A 是不动的，此时若移动调速手柄使杠杆 4 以 A 为支点改变油泵齿条位置，可得到相应的部分特性工况，如图 1-5 所示。在不同的部分特性工况下，由于手

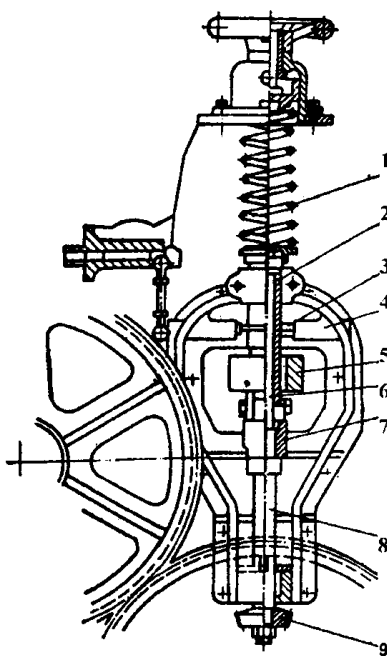


图 1-6 机械式极限调速器

1-调速器弹簧；2-套筒；3-滚轮；4-摇臂；5-飞铁；6-飞铁角；7-飞铁盘；8-主轴；9-伞齿轮。

柄及 B 点位置不同, 极限调速器的特性曲线将稍有差异。但是, 起作用时的极限转速只决定于弹簧的预紧力, 故在不同的扭矩下, 起作用的转速点仍旧不变。如图中的 n_0 。

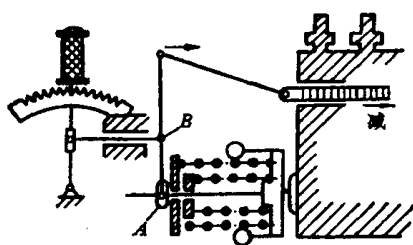


图 1-7 双制式调速器工作原理

图 1-6 为 350 柴油机的机械式极限调速器结构图。发动机通过伞齿轮 9 带动飞铁 5 转动, 当转速超过极限值时, 飞铁所产生的离心力通过飞铁脚 6 推动套筒 2, 套筒克服压在其上的弹簧预紧力后, 通过摇臂 4 驱动调油机构。手轮是用来调整主弹簧预紧力的, 预先按极限转速调整。

1.3.1.2 直接作用式双制调速器

双制调速器一般用于带有离合器的中小型发动机上。当离合器脱开的瞬时, 相当于发动机突然卸载, 调速器就能防止发动机飞车。在低转速时接上离合器, 又能避免发动机转速急剧下降。图 1-7 为调速器的工作原理。它装有两根弹簧, 外面一圈是弱弹

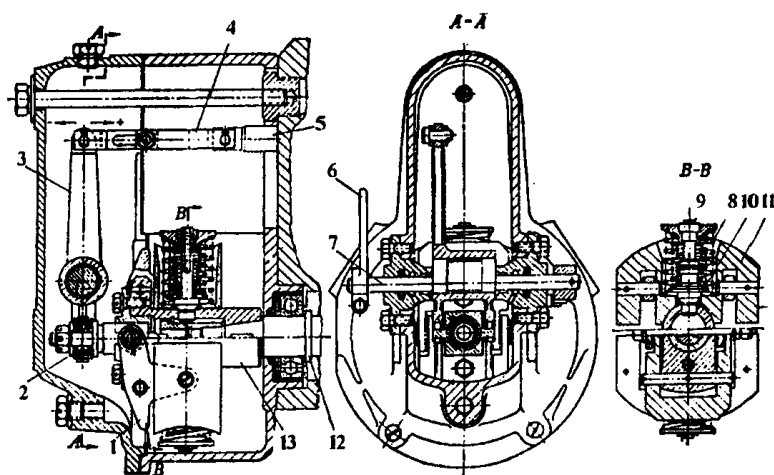


图 1-8 机械式双制调速器

簧，里面是强弹簧。飞铁未张开时油泵处在最大油量位置。在低速运转时，飞铁只受弱弹簧作用，因此，飞铁的离心力用来克服弱弹簧就能驱动调油机构，此时，调速器起低速稳定作用。当发动机转速逐渐提高后，强弹簧开始加入工作。由于强弹簧受预紧力作用，所以尽管转速继续增加，但调速器并不起作用。直至转速超过标定值后，飞铁的离心力克服强弹簧的预紧力和弱弹簧弹力后，调速器就起极限调速的作用，具体结构如图 1-8 所示。

喷油泵凸轮轴 12 带动装在其上的套筒 13，套筒上装有两个作为调速器径向支架的杆子 9，其上套有可滑动的重块 11，重块被外弹簧 8 压在最内位置。套筒 10 用以支承预紧力很大的内弹簧和中弹簧。杆子顶上的蝶形螺母用来调整弹簧预紧力。发动机在低转速 n_1 运转时，重块的离心力只克服外弹簧力而张开，并通过角形摇臂 1、滑环 2 和摇杆 3 带动油泵齿条 5。当转速升至 n_2 后，重块碰到套筒 10 并压在内面的两个弹簧上。此时由于离心力远小于弹簧力而使重块停止移动，直至转速超过 n_3 时，重块离心力大于三个弹簧力的总和，重块再次移动，此时相应最大转速 n_4 的平衡位置。在 n_2 至 n_3 一段转速范围，调速器不起作用，此时是借助手柄 6 转动偏心轮 7 使摇杆 3 摆动进行人工调节油量。当手柄处在不同位置时，得出的特性曲线如图 1-9 所示。

1.3.1.3 直接作用机械全制式调速器

这种调速器在运输用发动机上得到广泛采用。它在

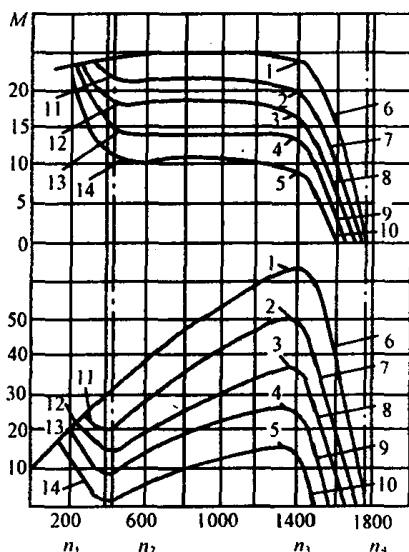


图 1-9 双制调速器特性

整个转速范围内部起调速作用。图 1-10 是调速器工作原理图。

调速器的重物造成圆球。圆锥形圆盘 1 与调速器轴刚性连接。带有平面圆盘 3 的套管 2 由圆球的摩擦力带动，使之与轴一起转动，并能沿轴向移动。套管通过止推滚动轴承 5 和端点 6 支撑在杠杆 4 上。杠杆 4 与调油机构连接，同时受弹簧 7 的拉力作用，经常压紧在端点上，当转速升高时，钢球由于离心力作用，沿着圆盘 1 的锥面张开，在克服弹簧力后，推动套管及杠杆并减少供油量，使发动机转速下降回复至原来的状态。如要改变发动机转速，则可通过变速杆 8 来改变弹簧 7 的预紧力。

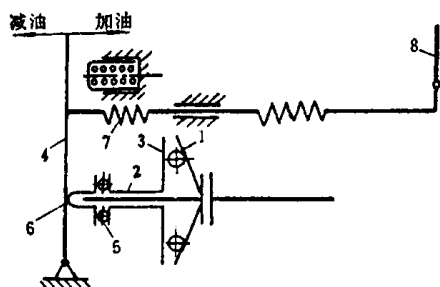


图 1-10 机械式全制式调速器工作原理

图 1-11 为一种机械式全制调速器结构图。该调速器共用六个

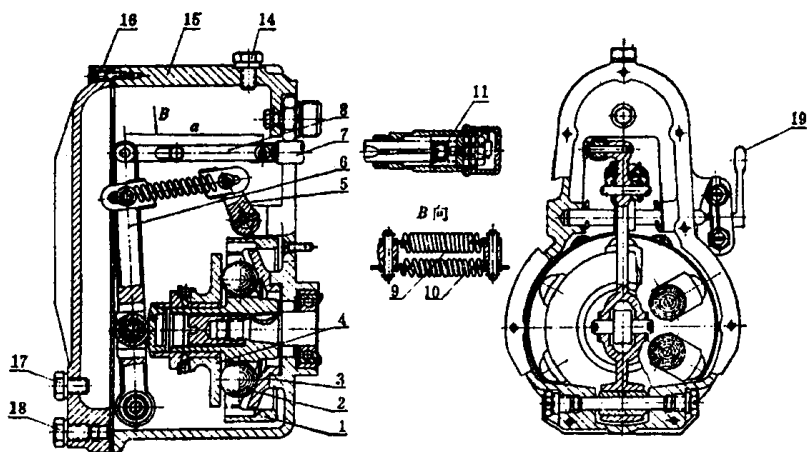


图 1-11 机械式全制调速器

1-十字盘；2-钢球；3-调速器托盘；4-衬套；5-弹簧杆；6-调速杠杆；7-齿杆；8-拉杆；9-第一弹簧；10-第二弹簧；11-供油调节；14-加油螺塞；15-调速器体；16-调速器盖；17-检查螺塞；18-放油螺塞；19-外杠杆。

重球 2，均匀排列在有导向槽的锥形圆盘 3 上，调速器弹簧是由两根具有不同刚度的弹簧加以组合。转速的操纵是通过外杠杆 19 和弹簧杠杆 5 来改变弹簧的拉伸弹力来实现。整个调速器是利用封闭在调速器体 15 内的滑油飞溅润滑。

1.3.2 间接作用式液压调速器

在液压调速器中，转速感应元件把转速信号转换后输给驱动机构，用以控制液压放大机构，使得到所需的调节力来驱动调油机构。由于它是通过油的压力起作用的，故称为间接式。同时，为了改善调节性能，在感应元件与驱动机构之间设有反馈装置。因此，与直接式相比，这种调速器具有较好的调节性能和大得多的驱动力。在近代大中型柴油机中都得到应用。液压式调速器都是全制调速器。

1.3.2.1 液压调速器作用原理

其工作原理如图 1-12 所示。

当发动机转速升高时，调速器离心式感受元件的滑套向上移动，使节点 B 带着杠杆及滑阀亦向上移动，打开了下进油孔，压力油便进入伺服器油缸的下部，推动动力活塞向上移，同时油缸上部与出油孔接通，进行排油。动力活塞的移动推动油泵齿条朝减油方向移动；使发动机转速回降。最后滑套和滑阀亦随转速回至原来平衡位置，切断油缸的工作油通道，此时，动力活塞则停止在新的位置上。但是，在调整过程中，由于包括发动机在内的整个调速系统的惯性、滑阀和动力活塞的运动总是滞后于发动机转速的变化，因而造成转速的波动，使调节过程不稳定。在某些情况下，波动幅度

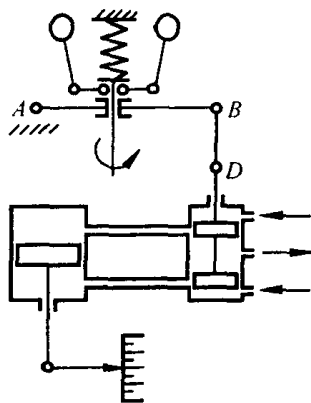


图 1-12 液压调速器工作原理图

甚至越来越大，根本不能工作。在实际应用中，液压调速器都加上反馈环节，使转速波动减少并逐渐收敛。

从这种调速器中可以看出，只要选择适当的动力油缸直径和油压，就可以得到所需的推动力来带动调油机构。

1.3.2.2 刚性反馈液压调速器

把图 11-12 的 A 点从固定改为用销轴同伺服器的动力活塞连接，如图 1-13 所示。这样，动力活塞的位移通过一组杠杆反馈至滑阀 M 上。由于反馈环节是用机械连接，故称为刚性反馈。

当负荷减少而转速增加时，滑套 M 上升使杠杆 AB 以 A 点为支点转动，把滑阀向上提，高压油便通至油缸下部空间，向上推动动力活塞使发动机减少供油。此时，活塞亦使杠杆 A 点向上移。与此同时，由于发动机减油而转速下降，亦即滑阀 M 向下移动。杠杆在这两个力的共同作用下，其 B 点以及滑阀就能迅速回复至原来位置。这样，调节过程的波动很快衰减，使调速器得到稳定的工作特性。

但是当 B 点回复到原来位置，调速过程结束后，由于反馈是通过刚性连接来实现的，故 A 点以及滑套 M 亦稳定在新的位置，

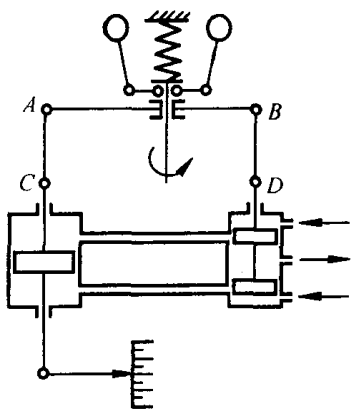


图 1-13 刚性反馈液压调速器原理

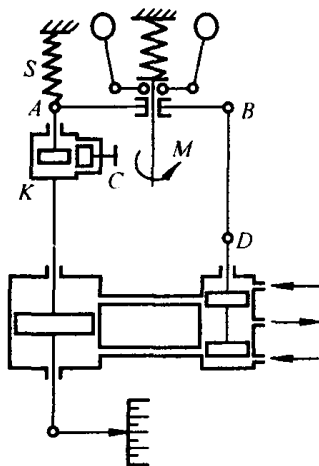


图 1-14 弹性反馈液压调速器原理图

亦即发动机不能回复至原有的转速。因而调速器的稳定调速率不为零。这是刚性反馈调速器的特性。对图中的调速器的动作进一步分析，就可以知道这种调速器随着负荷减少，新的稳定转速将增加。反之，负荷增加时转速将下降。此外，这种调速器的稳定调速率，可以通过改变杠杆 AB 两臂的比例，得到不同的数值。

1.3.2.3 弹性反馈液压调速器

如果把上述调速器的刚性反馈杆 AC 改用缓冲器 K ，并增加一弹簧组 S ，如图 1-14，则反馈环节变为弹性的。缓冲器是由充满工作油的油缸及活塞组成。油缸两空间通过一管道及针阀 C 而接通，当活塞受力后，缸内液体从一空间流向另一空间。由于针阀的节流

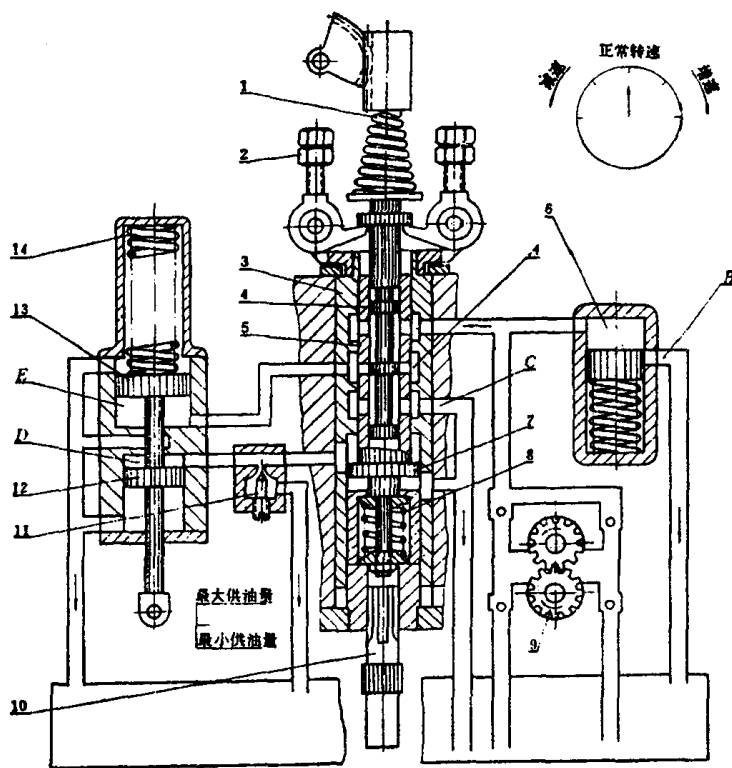


图 1-15 弹性反馈液压调速器