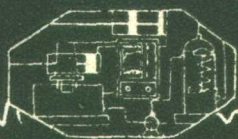


气动调节器

原理与调试维修

朱兴汉 编著



广东科技出版社

前 言

气动调节器是气动仪表之一，它是实现工业生产过程自动化的一种重要装置。通过它可以把生产过程控制在预定的条件下，以确保产品的优质、高效、低耗和安全生产。

气动调节器具有结构简单，精确度、灵敏度高，寿命长，防火、防爆性能好等优点；它的零部件通用性大，容易制造，维修方便，工作安全可靠。因此，这种气动仪表已广泛地应用在石油、化工、电力、冶金、轻纺和机械等工业部门。

随着气动调节器在工业上的广泛应用，不少企业单位的工人、技术人员希望掌握有关气动调节器的结构原理、调试和维修方法的基本知识。为满足读者的需要，编者收集了国内外有关资料，并根据个人多年的工作经验编写成这本书。

本书着重介绍气动位移平衡式调节器、气动力平衡式调节器和气动力矩平衡式调节器中的典型产品，同时也简单地介绍气动调节器的参数整定方法。尽力作到内容从实际出发，语言通俗易懂，并用图表加以说明。主要供从事工业生产过程自动化的工人、技术人员阅读，亦可供从事这方面的管理人员参考。

目 录

第一章 概述.....	(1)
一、气动仪表的发展概况.....	(1)
二、气动调节器在自动调节系统中的作用.....	(3)
三、气动调节器的组成原理.....	(6)
四、气动调节器的调节规律.....	(14)
第二章 气动位移平衡式调节器.....	(39)
一、气动滑板式调节器.....	(39)
(一) 基本结构.....	(39)
(二) 动作原理.....	(45)
(三) 特性分析.....	(51)
(四) 调试和维修方法.....	(57)
二、气动转板式调节器.....	(76)
(一) 基本结构.....	(76)
(二) 动作原理.....	(81)
(三) 调试和维修方法.....	(83)
三、气动遮板式调节器.....	(85)
(一) 特点.....	(85)
(二) 基本结构.....	(85)
(三) 动作原理.....	(88)
(四) 调试和维修方法.....	(95)

第三章 气动力平衡式调节器	(97)
一、气动比例积分调节器	(97)
(一) 基本结构	(97)
(二) 动作原理	(100)
(三) 结构参数分析及计算	(102)
(四) 特性分析	(128)
(五) 调试和维修方法	(129)
二、气动比例积分微分调节器	(170)
(一) 基本结构	(170)
(二) 动作原理	(173)
(三) 特性分析	(175)
(四) 调试和维修方法	(176)
第四章 气动力矩平衡式调节器	(185)
一、气动天平式调节器	(185)
(一) 特点	(185)
(二) 基本结构	(186)
(三) 动作原理	(194)
(四) 调试和维修方法	(212)
二、气动对顶式调节器	(236)
(一) 基本结构	(236)
(二) 动作原理	(237)
(三) 控制点偏差的分析	(239)
(四) 调试和维修方法	(241)
三、气动浮动板式调节器	(246)
(一) 基本结构	(246)
(二) 动作原理	(248)
(三) 特性分析	(250)

(四) 调试和维修方法	(254)
四、气动矢量平衡式调节器	(257)
第五章 气动调节器的参数整定方法	(261)
一、简单调节系统调节器参数的整定方法	(262)
(一) 临界比例度法	(262)
(二) 衰减曲线法	(264)
(三) 经验法	(267)
(四) 各种参数整定方法的比较	(271)
二、串级调节系统调节器参数的整定方法	(273)
(一) 概述	(273)
(二) 整定方法	(277)
(三) 串级调节系统中应注意的一些问题	(279)

第一章 概 述

一、气动仪表的发展概况

气动仪表是工业自动化仪表之一，它的发展至今已经有五十多年的历史。二十年代初期，国外有些工厂就出现了具有喷嘴挡板及放大器的气动调节器，到三十年代，用于调节和控制少数生产设备的大型气动基地式仪表已经进入实用阶段，与此同时，生产流程的单机自动化，也逐步地过渡到局部自动化。四十年代末到五十年代初，随着工业生产规模的日益扩大，气动基地式仪表已经不能适应石油、化工、电力和冶金等部门对实现综合自动化和集中控制的要求，于是，产生了气动单元组合仪表。六十年代中期，生产过程的全盘自动化，对仪表安装密度和集中监视又提出了更高的要求，这时便相继出现了与计算机等联用的气动集装仪表。这种仪表不仅保持了原气动单元组合仪表的优点，而且增加了功能并进一步小型化，因而在工业上获得越来越广泛的应用。

气动仪表的发展过程，如表 1-1 所示。从表中可以看出，先有气动基地式仪表，后有气动单元组合仪表，进而再发展成为气动集装仪表。这些仪表的出现虽然有先后，但它们各有自己的特点和应用范围，所以在工业生产中至今仍然采用。特别是中小型企业，气动基地式仪表的应用更为广泛。

表 1-1 气动仪表发展简明过程

序号	开始制造时间 (年)	1920	30	40	50	55	60	65	70	75	80	用途
	仪表类别											
1	气动基地式仪表					*						→ 实现单参数控制和单回路自动调节
2	气动单元组合仪表						*					→ 实现多参数综合自动化和集中控制
3	气动集装仪表										*	→ 兼有1和2的用途并实现全盘自动化

注：表中*号表示我国开始制造各类气动仪表的时间。

上述气动仪表的发展过程是同整个工业自动化发展历史紧密相联系的。若从技术水平和配套情况来看，它的发展大致可分为四个阶段。

第一个阶段，是生产流程单机自动化的阶段。这个阶段生产的仪表只能测量主要设备的基本参数（如温度、压力、流量等），根据仪表的指示（或记录）来控制整个生产工艺过程。有的仪表还带有简单的报警装置，操作人员可以通过指示（或记录）数据和报警信号了解主要设备的运转情况，从而确保生产安全。此时采用的仪表主要是大型的气动基地式仪表，它的特点是把测量、给定和调节等以不可分离的机械机构相连接装在一个表壳中，然后安装在主要设备的附近，工人就地操作，实现单参数控制和单回路自动调节。

第二个阶段，是生产流程局部自动化的阶段。此时组成自动调节系统的仪表需要集中控制，因此采用了外型尺寸稍

小的气动基地式仪表和气动单元组合仪表，对生产过程作多参数控制和多回路自动调节。

第三个阶段，是生产流程综合自动化的阶段。这个阶段采用的仪表，主要是气动单元组合仪表。它的特点是能够根据生产工艺要求，把几个装置、几台单机或整个车间的主机连接起来，构成生产流程的综合自动化。

第四个阶段，是生产流程全盘自动化的阶段。此时采用的仪表是气动集装仪表，它高密度集中安装在中央控制室内，可以把测得的全部数据再送入计算机，然后通过计算机指令控制各参数，实现自动开机、自动停机、自动报警和处理生产过程中出现的异常情况。这一阶段的仪表特点是人一机联系，因此，它便于监视和操作，可以大大地减轻操作人员的劳动强度，同时也可以保证企业单位在高效率、低消耗、安全可靠的良好条件下生产。

综上所述，可以预计未来的中央控制室，不会象现在这样把盘装仪表统统装在控制盘上，而是把智能调节器和各种变送器全部安装在现场，使整个生产分成若干个子过程，由各个智能调节器在过程控制计算机的统一监督和协调下完成局部控制任务。因此，整个控制系统就象生物的神经系统一样，只要有一个人操作按钮和监视仪表（即席位操作），就可以使整个工厂的生产设备安全运行。这就是所谓的“集散系统”。

二、气动调节器在自动调节系统中的作用

气动调节器在自动调节系统中的作用，好比是一个人的大脑。当被调参数受干扰影响而偏离给定值时，调节器会立

即把接受到的偏差信号，按一定的规律指挥执行机构来排除这种干扰，使被调参数逐渐回到原来的给定值上，从而保证生产过程始终符合生产工艺要求。

要实现上述要求，除了需合理设计和正确安装自动调节系统外，还要做好调节器的调试和参数整定工作。所谓调试，就是在调节器未装上仪表控制盘之前，要先做好测试和检查工作，看它是否达到规定的指标。如果安装前没有做好这件事，那么在生产过程中将会给调节器参数的整定工作造成许多麻烦，甚至可能出现事故，使生产遭受损失。

同样，如果在生产中对调节器参数整定得不好，就会降低自动调节的质量，使自动化设备不能充分发挥作用，影响正常生产和产品质量。因此，正确地整定调节器的参数，是保证优质高产的一项重要工作，要切实做好。

下面举例说明气态调节器在自动调节系统中的作用。

图 1-1 是一个常见的使用人工调节的恒温反应器的示意图。这种恒温器的主体是容器，化学反应（放热反应）在器内进行，器内装有搅拌器和冷却蛇形管。当投料在容器内开始起反应时，蛇形管中要注入适当的水把它冷却，使反应温度得以稳定在规定的范围内。

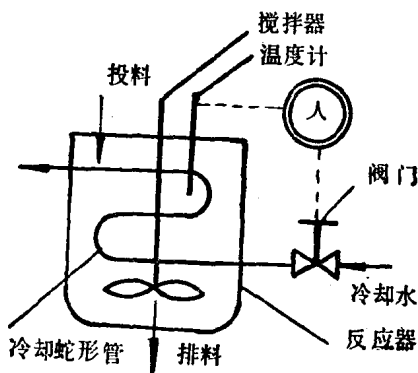


图 1-1 用人工调节的恒温反应器

图 1-1 表明，当用人工手动调节时，人眼首先注视温度计的指示值（也叫做测量值），然后经过大脑把所读到的温度值与生产工艺要求的温度值（常称给定值）相比较。若无偏差，表明工艺情况正常，可以不调节冷却水的流量；若有偏差，人的大脑会根据一定的调节规律发出指令，用手操作调节阀来调节冷却水的流量，使反应温度重新回到给定值上。这就是人工调节时，人眼、大脑和手相互配合工作的情况。

假如把上述的人工调节的全过程用仪表来代替，就构成了最简单的自动调节系统。一般地说，这种系统是用气动温度变送器代替人眼对温度的观察，并通过气动显示仪表自动地把它记录下来或指示出来；用气动调节器来模拟大脑的功能处理温度偏差；用气动执行机构代替人手调节阀门位置（即它会接受调节器的指令调节冷却水的流量）。系统的结构见图 1-2。

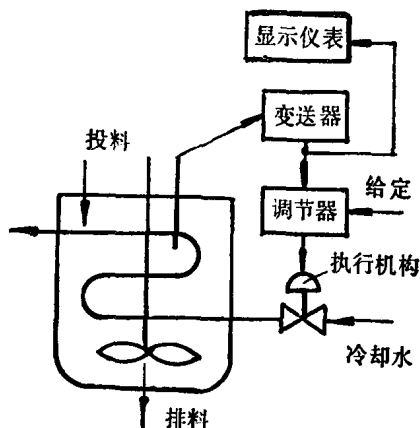


图 1-2 最简单的自动调节系统

由图 1-2 可知，这种自动调节系统由调节对象、参数变送器、显示仪表、调节器、执行机构等组成。它们的相互关系常用方块图来表示，见图 1-3。

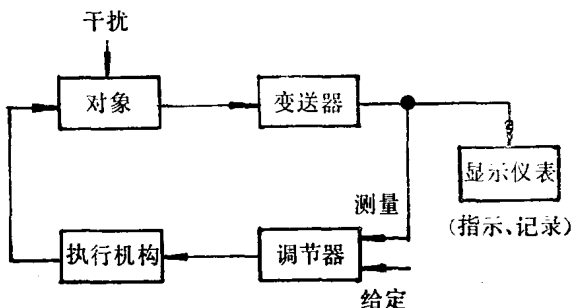


图 1-3 最简单的自动调节系统方块图

三、气动调节器的组成原理

根据平衡原理，气动调节器可分为位移平衡式调节器、力平衡式调节器和力矩平衡式调节器等三种。不管是哪种形式的平衡式调节器，它们都是由许多具体结构组成，这些具体结构构成了调节器的各组成部件，并担负着各自的任

(一) 气动调节器的平衡原理

1. 位移平衡原理

由位移平衡原理构成的调节器，它的测量信号、给定信号、反馈量都是通过一定的装置将信号转换成接近比例关系的位移量。这些位移量在比较机构上经过比较后，输出某一位移量。这一位移量，再通过气动装置转换成压力输出信号（ $0.2-1$ 公斤力/厘米²）送至执行机构。

位移平衡式比较环节的结构原理如图 1-4 所示。它由波纹管和比较连杆机构组成。波纹管的作用是将测量和反馈信号转换成比例关系的位移，而比较连杆机构则起位移比较

的作用。

由图 1-4 可知, 当测量信号增加 Δp_F 时, 测量波纹管 F 伸长, 使连杆的 A 端产生一向右的位移量 ΔS , 并把连杆上的圆轴 C 推向右; 而挡板由于拉簧作用而拉近喷嘴时, 则使喷嘴背压升高 Δp_D 。

同理, 当此信号经过放大器引入负反

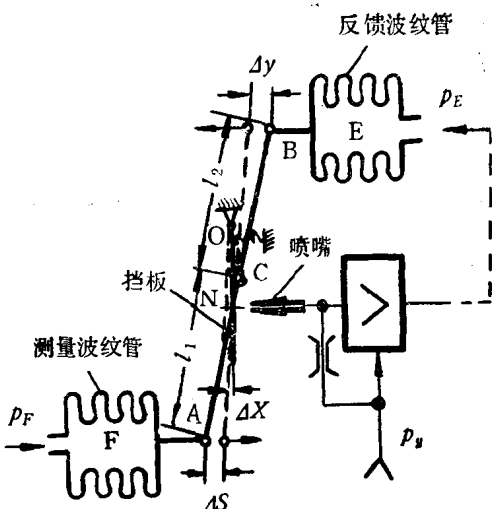


图 1-4 位移平衡式比较环节的结构原理

馈波纹管 E 内时, 也会使它伸长, 结果连杆的 B 端产生一个与 A 端相反的位移量 Δy , 这一反馈位移量又使连杆上的圆轴推动挡板离开喷嘴, 因而使挡板处于一平衡位置。显然, 位移量 ΔS 和 Δy 在连杆 AB 上是成比例的, 所以可由下式算出挡板产生的位移量 Δx :

$$\Delta x = m \left(\Delta S \cdot \frac{l_2}{l_1 + l_2} - \Delta y \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_2} \right) \quad (1-1)$$

式中 $m = \frac{ON}{OC}$ 。

由波纹管的特性可知

$$\Delta S = \frac{\Delta p_F F_F}{C_F},$$

$$\Delta y = \frac{\Delta p_E F_E}{C_E}.$$

将此结果代入 Δx 的计算式（因为是全负反馈，所以 $\Delta p_F = \Delta p_E$ ），即得

$$\Delta x = m \left(\Delta p_F \frac{F_F}{C_F} \cdot \frac{l_2}{l_1 + l_2} - \Delta p_E \frac{F_E}{C_E} \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_2} \right). \quad (1-2)$$

由此可以画出如下的位移平衡式比较环节的传递方块图（见图1-5）。

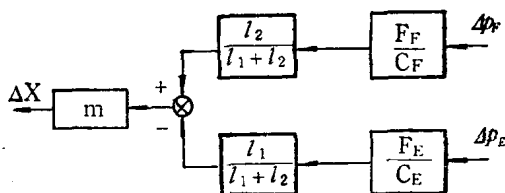


图1-5 位移平衡式比较环节的传递方块图

当测量信号增加 Δp_F 时，反馈信号也增加 Δp_E ，此信号通过比较机构，使挡板产生方向相反的位移。而在 Δp_F 、 Δp_E 产生的挡板位移量互相平衡时，可以近似地认为 $\Delta x = 0$ ，于是

$$\Delta p_F \frac{F_F}{C_F} \cdot \frac{l_2}{l_1 + l_2} = \Delta p_E \cdot \frac{F_E}{C_E} \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_2}. \quad (1-3)$$

整理后得

$$\Delta p_E = \frac{F_F}{F_E} \cdot \frac{C_E}{C_F} \cdot \frac{l_2}{l_1} \cdot \Delta p_F. \quad (1-4)$$

式（1-4）就是通常所说的位移平衡原理。它说明在位移平衡式比较环节中，测量信号与反馈信号之间有一个固定的比例系数。这个系数的大小由波纹管的有效面积比和刚度比，以及连杆长度比所决定，所以，这种仪表多数采用改变连杆长度比的方法，来调整比例系数的大小。

2. 力平衡原理

前面叙述的位移平衡式调节器是由波纹管和比较连杆机构组成，如果测量波纹管的顶端直接带动挡板，而输出压力通入反馈波纹管后，该管的顶端又直接带动挡板，那么就可以节省一套连杆传动机构，见图1-6(a)。为使体积缩小，一般采用膜片来代替波纹管，这样，就构成了力平衡原理的调节器，见图1-6(b)。这种调节器是利用膜片组合而成的力平衡机构。输入和输出压力从膜片的两边作用于膜片上。当这种作用力达到平衡时，膜片处于某一平衡位置，这时，挡板与喷嘴之间保持一定的距离，从而控制了喷嘴的泄气量，并产生相应的输出压力。此机构的输出压力，与作用于膜片上力的大小有一定的函数关系。在这种力平衡原理机构中，膜片的位移量一般是0.05毫米。

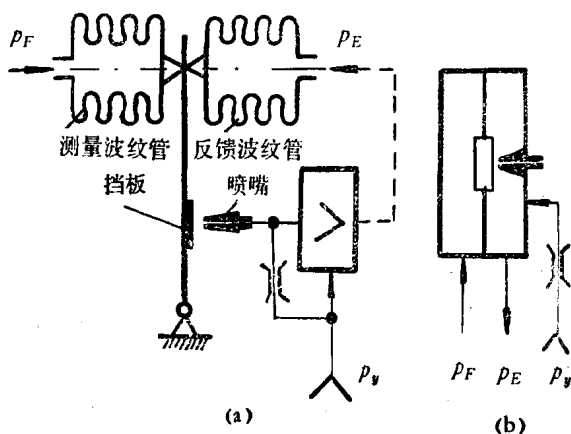


图1-6 力平衡式比较环节的结构原理

如果把单一膜片换成多层膜片迭加组成比较环节，并用适当方式把它们加以连接，就可以构成具有多种调节规律的

气动力平衡式调节器，如比例调节器、比例积分调节器、比例积分微分调节器、比例微分调节器，通常分别用字母P、PI、PID和PD表示这几种调节器。

下面谈谈气动力平衡式调节器中最简单的比例调节器原理，其结构见图1-7。

当测量信号 p_F 与给定信号 p_G 在比较部分内进行比较后，一方面是挡板产生位移，使喷嘴背压改变；另一方面，在正反馈信号 p_H 和负反馈信号 p_E 的同时作用下，挡板又达到新的平衡位置。此时，挡板产生的位移就是比较部分的输出信号。

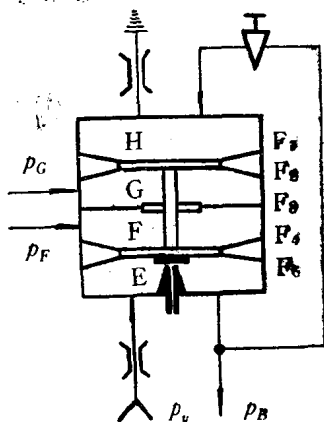


图1-7 气动力平衡式比例调节器的结构原理

比较部分有四个推力作用，即测量推力 $p_F(F_4 - F_3)$ 、给定推力 $p_G(F_2 - F_3)$ 、正反馈推力 $p_H F_1$ 和负反馈推力 $p_E F_5$ 等。如果作用在比较部分的这四个推力处于平衡状态，则比较部分的力平衡方程式为 $p_H F_1 - p_G(F_2 - F_3) + p_F(F_4 - F_3) - p_E F_5 = 0$ 。(1-5) 如果四个推力处于不平衡状态，则比较部分的不平衡推力 ΔM 为

$$\Delta M = p_F(F_4 - F_3) - p_G(F_2 - F_3) + p_H F_1 - p_E F_5. \quad (1-6)$$

上式的推力 ΔM 克服比较部分的总刚度 C_A ，并带动挡板位移。挡板产生的位移量 ΔS ，可由下式算出：

$$\Delta S = \frac{\Delta M}{C_A}. \quad (1-7)$$

由此可以画出如下的力平衡式比较环节的传递方块图，见图 1-8。

3. 力矩平衡原理

在叙述力矩平衡原理之前，先要弄懂力矩和力臂的概念。所谓力矩就是作用在杠杆上的力和力臂的乘积。力臂是指作用力到转轴（支点）间的垂直距离。

由力矩平衡原理构成的气动调节器，如图

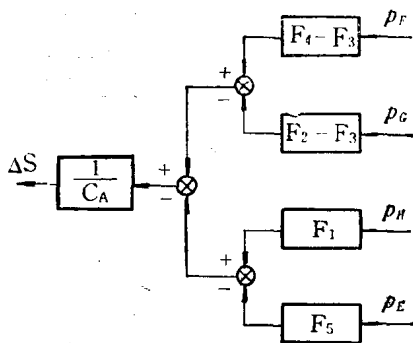


图 1-8 力平衡原理比较环节的传递方块图

1-9 所示。由图可见，当测量、给定、正反馈、负反馈的压

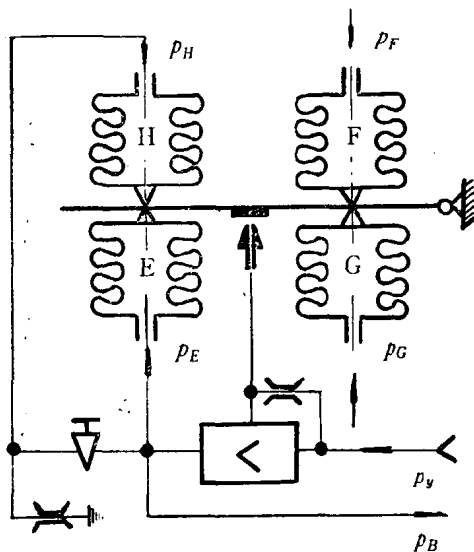


图 1-9 气动力矩平衡式比例调节器的结构原理

力信号分别进入各波纹管后，便转换成相应方向的推力，这些推力作用在平衡杠杆上，可使杠杆支点产生相应的力矩。

在平衡杠杆上有四个推力，见图 1-10。因而，杠杆支点上产生四个力矩，即测量力矩 $p_F F l_1$ 、给定力矩 $p_G G l_2$ 、正反馈力

矩 $p_H F_H l_3$ 和负反馈力矩 $p_E F_E l_4$ 等。这四个力矩在杠杆系统的所有弹性元件变形所产生的弹性力矩影响下，它们的总和（在杠杆平衡时）并不等于零，故不平衡力矩 ΔM_n 为

$$\Delta M_n = (p_F F_F l_1 - p_G F_G l_2) + (p_H F_H l_3 - p_E F_E l_4) \quad (1-8)$$

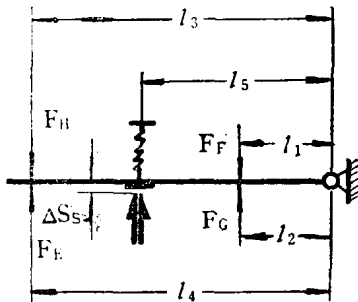


图 1-10 平衡杠杆受力情况

ΔM_n 克服杠杆系统弹性力矩的反作用，使杠杆偏转，从而带动挡板产生位移。弹性力矩是由弹性元件（包括簧片转动支承和四个波纹管等）综合产生的。它的作用力矩，可以看作是弹性元件总刚度 C_B 与喷嘴挡板轴线到簧片支承的距离 l_s 的乘

积。因此挡板产生的位移量 ΔS_s ，可由下式计算：

$$\Delta S_s = \frac{\Delta M_n}{C_B l_s} \quad (1-9)$$

根据上述可以画出力矩平衡式比较环节的传递方块图，见图 1-11。

实际上，挡板位移和杠杆系统的总刚度很小，故可认为 $\Delta M_n = 0$ ，即

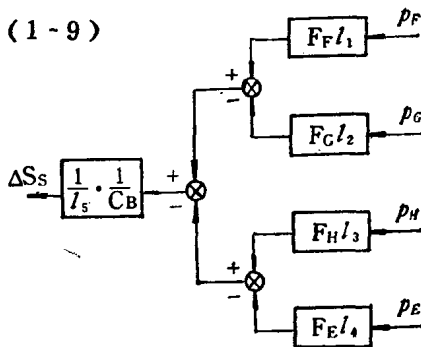


图1-11 力矩平衡式比较环节的传递方块图

$$(p_F F_F l_1 - p_G F_G l_2) - (p_H F_H l_3 - p_E F_E l_4) = 0 \quad (1-10)$$