

Б. В. 拉烏申巴赫著

振荡燃烧

科学出版社

72.55
327.1

振 蕩 燃 燒

B. B. 拉烏申巴赫 著

張斌全 龔允怡 譯

宁 槐 范作民 校

科 學 出 版 社

Б. В. Раушенбах
ВИБРАЦИОННОЕ ГОРЕНИЕ
Государственное Издательство
Физико-Математической Литературы
Москва 1961

內 容 簡 介

本书专論有关当液体火箭发动机、空气噴气发动机、高度强化鍋炉等热能动力装置工作时以及按燃燒理論进行一系列物理方面的实验时会遇到的不稳定燃燒过程的問題。书中系統地闡述了供热激起纵向声振的現代理論，討論了这种类型振蕩所特有的規律，在分析中广泛吸收了流体力学、声学、燃燒理論方面的概念，并运用了振動理論和調节原理方面的数学資料。

本书可供燃燒理論与連續介质振動理論的科研工作者、研究生、高等学校师生以及現代发动机制造与热能动力方面的工程技术人员参考。

振 荡 燃 烧

〔苏〕Б. В. 拉烏申巴赫 著

張斌全 龔允怡 譯

宁 楓 范作民 校

*

科学出版社出版

北京朝陽門內大街 117 号

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

上海新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

*

1965 年 5 月 第一版

开本：850×1168 1/32

1965 年 5 月第一次印刷

印張：11

印数：0001—3,400

字数：286,000

統一书号：15031·175

本社书号：3140·15-6

定价：〔科七〕1.80 元

近年来,燃燒气柱內激起声振問題变得极其尖銳。这是因为,若不严格分析振蕩燃燒現象,就不能解决研制高热强燃燒室的一系列实际重要課題。国外出版的大量文献反映出这种情况。

遺憾的是,国外文献主要是討論火箭发动机內激起不稳定性的問題,因而,其应用范围較窄。我們知道,在工业燃燒装置,研究燃燒过程的实验装置,以及許多物理实验(里克管)中等等,也看到类似的現象。因此,很早以前就有需要更广泛研究供热(特别是燃燒)激起声振的問題。本书任务之一就是试图制定振蕩燃燒过程系統理論之基础,使能以統一的观点来研究很多个别情况。但是,在本书范围内研究具体的工程問題是不合适的,这会大大增加本书篇幅,更主要是妨碍对現象实质之研究与普遍方法之制定。因为,对不同的个别問題作細致的分析不可避免地会分散讀者的注意力。此外,不应忘記,今天是迫切的工程問題,过几年之后可能变成沒有价值,而現在无关重要的,則反而变成主要問題。因此,比較正确的作法是給出普遍理論的概括,而把具体問題的分析留給直接从事这方面工作的人。只是为了結束普遍理論,在第十章中讲述了将此理論用到某些实际問題中的例子。

上述目的在很大程度上既决定了本书的內容,也决定了讲解問題的方法。本书主要内容为分析某种理想化过程(圓管內的燃燒),并且,主要的实验材料也是属于学院式試驗(在簡單稳定器之后或者沒有稳定器的小管內的混气燃燒,而不是发动机等实际燃燒装置中的燃燒)。为使广大工程界易于理解,叙述問題采用最简单方法,并且十分詳細;因此,对理解所提出問題來說,在我們高等技术学校中所学的数学与力学的知識是足够的。为力求簡短,作者常牺牲叙述的严格性,但是在可能情况下,力图闡明所研究現象的物理实质。

这本书不是問題現况之全面总结，其中主要叙述作者得出的結果以及不同时期在期刊发表的部分結果。这不可避免地会在問題的提法与研究方法以及书的内容上显出特色。所有引用其他著作的地方，都作了相应的注明；无注明者则表示系作者所得之結果（理論与实验）。除一些早期发表的著作外，本书的基础是作者近年来在莫斯科物理工程学院讲课的讲义。

从内容上看，本书可供与振动理論、燃燒理論与气体动力学有关专业高等学校高年級学生、研究生与工程技术人員的参考，也可以作为相应課程之参考书。

作者认为应对下列同志表示感謝：工程师Л. Д. 希托娃（Шитова），她积极地参加了本书所提到的实验建立工作；工程师Г. М. 庫瓦尔金娜（Кувардина），她完成了繁重的数值計算；以及Н. С. 納坦戎（Натанзон），他在閱讀原稿时提出了許多宝贵意見。

目 录

序.....	iii
緒論	1
第一章 供热激起的振蕩的一般特性	3
§1. 一些試驗結果	3
§2. 燃燒引起纵向自激声振的理想过程	7
第二章 气流中小干扰的傳播.....	13
§3. 流体力学方程之綫性化.....	13
§4. 非等熵气流中的声波.....	17
§5. 简单的边值問題举例.....	22
§6. $\bar{p}$ 及 $\bar{v}$ 駐波	26
§7. $\bar{u}$, $\bar{w}$ 及 $\bar{s}$ 行波	34
§8. 气流稳定性.....	36
§9. 气流中纵向自振.....	42
第三章 自振能源.....	44
§10. 热力激振声波之两种能源.....	44
§11. 声能流.....	48
§12. 在供热区内实现基元过程时加入振蕩系統的能量.....	55
§13. 一般情况下加入振蕩系統之能量.....	62
§14. 系統的熵波激振.....	66
第四章 燃燒区内过程計算之理想化.....	70
§15. 干扰经过燃燒区时之改变.....	70
§16. 供热平面 Σ 之特性.....	79
§17. 間断面 Σ 之条件的典型化.....	90
§18. 供热区内任意复杂过程之自振能源.....	92
§19. 一般情况下振蕩系統之激振.....	95
§20. 典型情况之稳定边界图	103
§21. 激振时热能源与机械能源意义的比較	106

第五章 无损失时之供热激振	111
§ 22. 概論	111
§ 23. 特征方程之組成及求解	116
§ 24. 稳定边界之作图	121
§ 25. 激振条件之分析	135
§ 26. 放热延迟对声振激振的影响	139
§ 27. 振蕩頻率	144
§ 28. 振蕩頻率随燃燒区位置改变之分級变化	147
§ 29. 燃燒区位置对振蕩过程影响的試驗	153
第六章 管端有损失时的供热激振	168
§ 30. 輻射損失	168
§ 31. 考虑管端损失时的特征方程	171
§ 32. 某些特殊情况数值研究	174
§ 33. 在管子一端能量的完全吸收	180
第七章 燃燒激发声振时的反饋机理	188
§ 34. 反饋机理的分类	188
§ 35. 以混气形成为基础的反饋机理	194
§ 36. 基于流体力学現象的反饋机理	201
§ 37. 基于燃燒本身規律的反饋机理	212
§ 38. 平面焰峰的稳定性	218
第八章 考虑加热区非綫性特点的自振計算	234
§ 39. 自振的一般特性	234
§ 40. 燃燒区中本质非綫性	236
§ 41. 管端沒有损失时的自振	244
§ 42. 管端有损失时的自振	252
§ 43. 所发展的計算法在其它情况下的适用性	255
第九章 振蕩燃燒	258
§ 44. 振蕩燃燒过程的发展阶段	258
§ 45. 加热区放射最大声能的假設	262
§ 46. 最大声能假設的實驗驗證	270
§ 47. 振蕩燃燒的激发和抑制	275

第十章 自激声振的某些特殊情况	286
§ 48. 里克管中激发声振	286
§ 49. 火焰在静止气体中传播时的振荡燃烧	299
§ 50. 煤粉炉中振荡的发生	315
§ 51. 冲压喷气发动机中的振荡燃烧	320
§ 52. 液体火箭发动机中的纵向振荡	323

緒 論

大家知道，研制高放热强度的燃燒裝置有許多困難。防止燃燒室發生高頻振蕩就是其中之一。高頻振蕩能嚴重干擾燃燒過程并損壞爐膛或發動機構件。熱力發電站爐膛中過渡到高放熱強度狀態時所產生的振蕩是熟悉的例子。例如，調整燒煤粉的前爐膛時曾產生振蕩并損壞了爐膛構件。此外，從期刊發表的許多論文中也可看到，在校驗液體火箭發動機時也有類似現象。

另一方面也知道，在工業用爐膛所作的很多試驗表明，以振蕩燃燒為正常工作狀態的爐膛有很大發展前途。實現此種工作狀態有利於提高爐膛放熱強度。此外，最近有些文章指出，在冶金、化學等工業上很可能轉而利用振蕩燃燒。

在所有情況下，不管是有害還是有利的振蕩，總是和燃燒與氣柱聲振相互作用有關。這氣柱包含在發動機、爐膛或其他裝置中。振蕩現象相當複雜，并且研究得還很不夠。因此，在燃燒裝置中如何防止或利用振蕩常常是盲目的。

儘管振蕩燃燒早已為人所知，并進行了較多的研究。但這種現象的所有理論問題還遠遠沒有研究透徹。結果，主要的理論結論僅證明：振蕩頻率決定於燃燒系統之聲學特性；激振條件歸結為瑞利(Rayleigh)准則(第三章將指出這結論的不準確之處)，而在大量可能的反饋机理中，迄今已詳細研究過的只有所謂克羅科(Crocco)机理(適用於液體噴氣發動機)。

探討振蕩燃燒過程的理論必須有系統地研究此種現象，并且要從一般的觀點來研究。這種一般性觀點有利於用一種方法來分析極不同的情況。

此外，當分析具體問題時，方法的普遍性與唯一性允許作出有根據的簡化；并且常可省略為解釋每一個新實驗結果而繁瑣地提出新假說。因為新假說僅說明該具體事實，故其推廣價值不可靠。

为了足够全面的研究振蕩燃燒問題，必須：

1) 研究一維非等熵流中声波干扰傳播的特点(這問題虽經其他作者研究过,但仍宜給出稍不同于习惯的解法);

2) 找出一种通用方法把燃燒区左面和右面的一維流动过程联系起来而不丧失三維燃燒过程之本质;

3) 估計气柱端面能量損失对燃燒系統声振自激趋势的影响;

4) 研究这現象能量方面的問題;特别是要解决維持自振需用能量的能源問題;

5) 将可能的反饋机理分类,并提出解决下述問題之途徑,即振蕩系統自許多可能的反饋机理中如何“选出”某个具体的机理;

6) 举例說明非綫性問題的解答,即求出个别情况下稳定振蕩的振幅及頻率;这个別情况应为对多种类似問題都适用的解法提供明确的概念.

已知一維气流中声波干扰的傳播規律,并能將燃燒区中任何复杂的过程簡化为冷、热气流分界面上的假想过程,則可利用較简单数学研究激振过程. 了解振蕩的能量不仅明确了复杂問題,并可发展为能量法解决一系列問題. 在大多数情况下能量法特別简单而清楚. 至于研究反饋机理时,則不論是为了选定影响振蕩系統的最简单实用方法,还是为了得出全面的理論解釋,都需要能量法.

为結束燃燒系統激振問題的討論,应找出系統的极限循环. 相应的非綫性問題特別复杂. 因此,下文按最简单形式提出問題:假設,非綫性影响集中,即只在气流个别切面上表現非綫性.

全面解决上述問題需用各門学科的知識(流体力学,声学,燃燒理論,調节及振動理論的数学方法). 为解釋气流中的热力激振过程,就需要特殊研究方法以表現理論的普遍性.

第一章

供热激起的振蕩的一般特性

§1. 一些試驗結果

虽然仅在近些年才密切注意燃燒(或其他供热形式)的自激声振現象,这主要是由于与噴气技术发展及工业鍋炉强化密切相关;但利用供热引起自激振蕩的事实在一百多年前就有人发现。

十九世紀物理学家所提供的不同試驗結果說明燃燒或其他供热方法可能激起声振。例如“歌唱的火焰”以及里克(Rijke)管¹⁾的現象,后者系利用灼热网格向空气供热。我們較詳細地来叙述1859年里克所做試驗。里克发现,如果垂直安置且两端开口的管子足够长,而后在管内距下端約四分之一管长的地方安置一个加热到灼热发光的細格金属网,差不多在取走給网格加热的气体火焰以后,即可听到較强的声音延續几秒钟(亦即在网格仍然是灼热的期間)。里克还发现,只有在这种情况下才发生声音,即管内形成过堂风(为了形成过堂风故須将管子垂直安放)并且听到激振的声音相当于管子的基音。后来里克試驗作了修改,即利用电源来加热网格,則产生的声音可无限地延长了。

如果将网格安置在管子的上半端,則得到完全不同的結果。在这种情况下,靠加热网格来产生基音是不可能的,但是,鮑斯沙(Bosscha)及里索(Riess)修改了試驗方法,就又可能激振。将网格移到管子上半端以后,不应加热而应冷却。因此,在管子下端應該安置火炬向空气加热,制造过堂风,网格不是向气流供热,而是从

¹⁾ Стрэтт Дж. В. (лорд Рэлей), Теория звука, том II, Гостехиздат, 1955, 221 頁及其后。英文原著: J. W. Strutt (Lord Rayleigh), The Theory of Sound, v. II, Macmillan and Co., 1926, 227 頁及其后。

中吸热。

从以上所述简单試驗指出，声振的激起与管内气体流动有关，管内气流在某切面处，与正热源（加热）或负热源（冷却）相互作用。

上述现象可认为是热力激起声振的最简单过程。这过程与我们主要感兴趣的振荡燃烧非常近似。因此，毫不奇怪，以后各章討論問題时将引証里克的試驗，而在第十章将闡明这个现象的原理。

随后，在十九世紀末叶，馬拉尔 (Mallard) 及雷·沙特利哀 (Le Chatelier) 观察到管内燃烧时，沿管内火焰自稳定傳播轉变到振荡燃烧的現象。后来，其他研究者也看到类似现象。首次对振荡燃烧作詳細的試驗研究是科瓦尔德 (Coward H. F.) 哈特維尔 (Hartwell F. J.) 及乔治逊 (Georgson E. H. M.)¹⁾ 在 1937 年发表的。試驗主要是在 100 及 200 毫米、直徑 5 米长且充滿甲烷及空气混合气之水平安放的管子内进行的。管一端封閉一端开口。在管内灌滿可燃混气后将开口端掩盖，待管内混气完全平靜后，再将此端小心地打开，而在端口附近点燃混气。

火焰起始沿管内稳定傳播，但当其离开敞口端一定距离后即开始强烈地振荡。这个振荡以压力振荡的形式在閉口端附近記錄出来。此外，同时对火焰进行照相，照片上指出焰峰强烈振动，而且与閉口端压力振荡的頻率相同。

有趣的是压力（或火焰）振动的頻率随焰峰沿管内傳播而跳跃式变化。所测定的頻率是管内气柱的固有頻率級。

作者也曾研究安置在管口外附近不同障碍物对振荡燃烧特性的影响。他們逐步地将擋板向管口移近，确信当擋板距管口 15 毫米或更近的时候（管子内徑 100 毫米），振荡即急剧地減衰。如果在管口附近放置玻璃棉，則振荡燃烧全部停止。

在图 1 上列出閉口端附近的压力示波图。示波图表示为時間的函数，以混气点火瞬間当作起始時間。右端之垂直短綫表示火焰到达封閉端之瞬間，而在压力振荡曲綫上之数字表示振荡頻率。

¹⁾ Coward H. F., Hartwell F. J., Georgson E. H. M., *Journ. of the Chemical Society*, 1482, 1937.

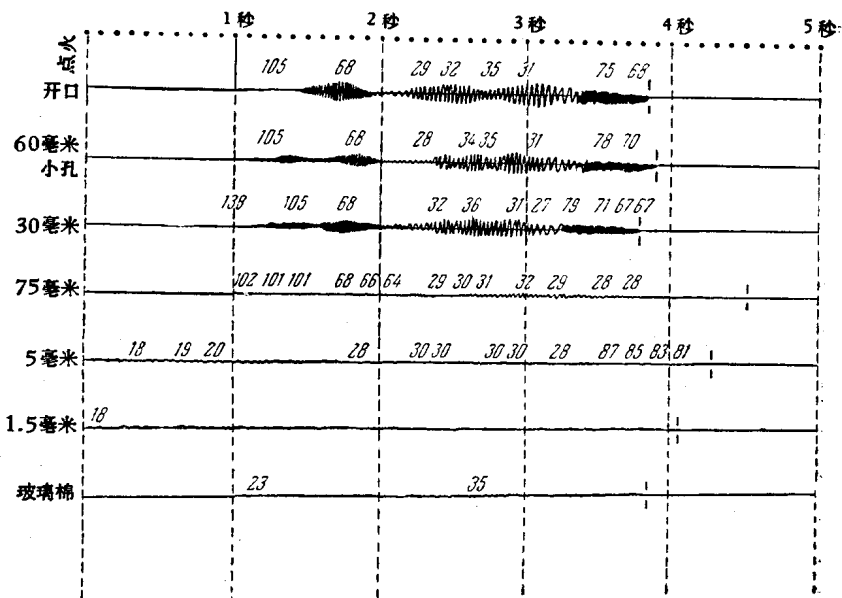


图1. 科瓦尔德等人试验所得在管子封闭端附近之压力示波图

之赫芝数。

如果比较里克与科瓦尔德等人的试验，则会发现它们之间有許多联系。主要是在两种情况下都是激起长管的固有谐波，并且都是由于供热的结果而激起振荡的。

最近十到十五年，不仅仅在学院式试验中，如前面列举的，可以观察到振荡燃烧，在发动机及锅炉中亦可看到。应该指出，在类似的设备中可能产生不同型式的声振。现举液体喷气发动机作为例子来说明如下。

在期刊中有許多有关液体喷气发动机中自激声振现象的研究报导。它们指出，随具体条件不同而可能激起两种型式的振荡——横向及纵向，横向振荡又可分为切向及径向两种。这三种形式声振按燃烧室内发生之驻波形式而区分。

在图2提出相应简图。图2a表示纵向声振，无箭头的直线表示瞬时等压线，有箭头的表示气体质点运动，自左向右箭头表示质

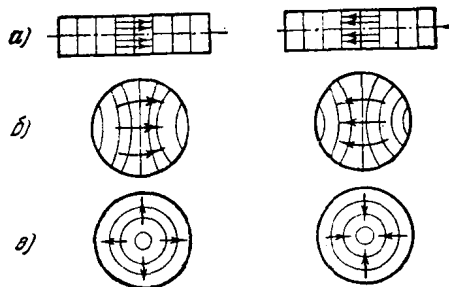


图 2. 液体喷气发动机内气体分子声振之可能形式

点运动向右,自右向左表示經半个周期后质点运动方向(在图中仅为振荡质点沿軸綫分速)。振荡时空气质点沿燃燒室对称軸运动,这就是說振荡分速与质点沿燃燒室平均流速一致。图 2б 表示切向振荡,它与纵向振荡相似,但是发生在燃燒室横切面內。由于燃燒室横切面是圓形,因此等压綫不再是直綫。图 2в 表示徑向振荡。它具有軸对称的形式,其对称軸即是燃燒室軸綫。

如果記得声振頻率与声波脉冲应该經歷的路程¹⁾有关,而且燃燒室长度通常比其直径大得多,則易于理解纵向振荡是最低頻振荡,切向振荡居中,徑向振荡頻率最高。

比較上述三种形式声振与科瓦尔德等人的試驗及里克管,即易看到仅仅是液体喷气发动机中的纵向振荡与这些試驗有共同点。在燒煤粉的鍋炉,冲压喷气发动机,以及研究燃燒过程理論的試驗装置等設備中也发现产生压力脉动的纵向声振。因此,纵向声振是一个广泛感兴趣的問題。

本书仅提出纵向声振之研究,而着重于与液体喷气发动机工作过程无关的振荡問題上。这样做主要是因为液体喷气发动机燃燒室內的振荡問題(包括纵向的在內),不久以前在苏联出版的克罗科(Crocco)和陈新益²⁾所著专著譯本中已經討論过。

¹⁾ 此处指声波波长之意——譯者注。

²⁾ Крокко Луиджи и Чжен Синь-и, Теория неустойчивости горения в жидкостных реактивных двигателях, ИЛ, Москва, 1958.

关于横向声振，直到现在对它的研究还不充分。最好是从期刊论文中去进行了解。本书讨论的许多情况也可用于拟定横向振荡理论，因为两种情况下现象的本质可以归结为利用供热来自激起声振。

§ 2. 燃烧引起纵向自激声振的理想过程

为了理论上研究在试验设备、发动机、及锅炉内之纵向声振，应给出简化的理想方案。当理论分析振荡现象时，我们将认为所有前述设备都是圆柱形长管，由许多薄片供热区将圆管分成许多段，在没有振荡时通过这些段的气流（空气或燃烧产物）不发生任何变化。通常考虑这样两个区段就够了，一个是相应于进气导管，而另一个相应于燃烧室。在前段中不考虑通道切面变化、流动阻力之存在、以及燃气中气体成分之变化等等。在后段内不考虑尾喷管附近的燃烧室中燃气之补燃及掺合、流动阻力、以及通过燃烧室壁传热的热损失等等。

此处所说的燃烧过程是在管内很短的一段或几段进行的，应了解这些小段燃烧区与纵向振荡波长、也即是与全部管长（设备）比较才显得短小。为了简化问题，我们忽略燃烧区的长度，而以强烈间断面来代表这些区域。

因此，理论计算简图相应于圆管内一维气流。在一般情况下气柱被一个或几个强烈间断面分成几段。间断面 Σ 的性质与其代表的燃烧过程密切相关。而且只有否定将燃烧过程看成简化一维流时，才能表达这些重要性质。

所以在讨论间断面间干扰之传播过程时利用一维流，而表达间断面之特性时则用三维流。在表征供热区之特性时，照例忽略流动阻力以及燃烧时燃料成分之改变（在下面第十章中列出不能这样忽略的过程例子）。引用间断面不仅为了描述燃烧过程，还有在气流参数在很短地区内发生急剧变化的情况下也可以引用。

除了将整个流动分为两区段之间断面 Σ 的性质以外，还应该确定管子两端之流动特性。随研究的问题不同，边值条件亦不同。

在某一种情况下,它是普通声学的条件。而在另一种情况下,则是拉瓦尔喷管或类似设备理想特性的条件。

由于下章主要内容是研究具有声学性质的振荡过程,故将采用小干扰法。主要研究问题照例是小干扰对管内气体流动之稳定性研究。如果理想过程不稳定,那末自然可以推论,这不稳定会导致自振。

大家知道,全部解决自振问题需要考虑非线性关系,这类问题将在第八章讨论。主要的假设是全部重要的非线性关系都包括在间断面 Σ 的特性里面。而关于间断面与管子两端之间干扰传播过程,则认为定型振荡下用线性方程已经能完满地来描述它了。

下面讨论的自激声振可认为由反馈引起。因燃烧激起振荡(振荡燃烧)反馈关系导致声振对燃烧过程的影响。因此将在专门一章来讨论引起反馈还原的一切物理现象。但在大多数理论计算中,这个反馈关系不很具体,而是形式地提出燃烧区(间断面 Σ)中主要参数与振荡分速或振荡压力的关系。

在系统叙述问题以前,宜对下章将要采用的方法预先提出一些意见。

下面,将区分振荡为振幅随时间 t 而增加微量 δ 、等振幅、以及减振幅三种工作状态,这在图3中(a, b及c)已经表示出来。第一种状态是不稳定的、最后的是稳定的、而居中的是过渡状态。

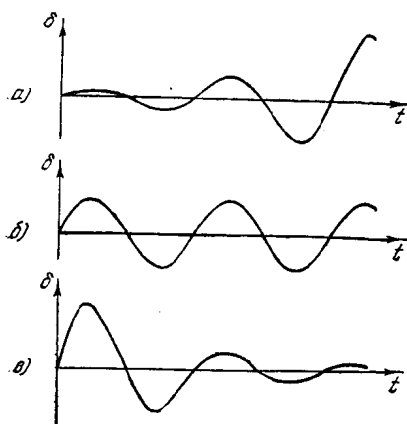


图3. 不稳定、过渡及衰减振荡

当改变任一重要参数时,振荡系统可以从稳定转变到不稳定状态,或相反转变。任何地方都假设在这些转变过程(如果它们连续地出现)中,振荡系统必须经过过渡状态,通常叫做稳定

边界。

通常理論分析的任务即是找稳定边界,已知这个边界后,系統的稳定条件可以表示为不等式的形式。这在实用上很方便。过渡过程之研究即研究工作状态与振幅的变化。此时,参数的变化是正弦波。

应该指出,不是任一等振幅振荡的工作状态都是过渡的且相应于稳定边界。已經建立起来的自振工作状态也具有同样特性,但却属于不稳定范围。因此为了区别于过渡振荡状态,自振以非綫性方程来描述,而非綫性系統之分析将在以后特別說明。

大家知道,在比較試驗結果与理論計算結果时即产生某种困难。問題是如果在試驗中已經建立起某种振荡之振幅及頻率,那末,实际上总是意味着在系統中发生自振、也即是要用非綫性方程来描述的现象。同时,試驗測得的頻率与相对振幅常与綫性理論計算的数值相近。这种簡化是因为下面所討論的自振形式性质上接近綫性方程所描述的小振荡。

有了各种参数随時間变化的函数曲綫,就可以表示振荡过程的全部情况。如图4即是这种例子。图中 δv , δp , δQ 表示相应之干扰速度,干扰压力以及供热干扰。有了这种图綫,就可以判定振荡周期 T ,振幅 δv_0 , δp_0 , δQ_0 以及这些参数之間相位关系。因此,如果将干扰压力 δp 之相位与其他干扰之相位比較,則 δv 与 δp 之相位差为 φ_1 ,而 δQ 与 δp 之相位差为 φ_2 。

有时,对振荡頻率(或者振荡周期)不感兴趣,重要的是振荡各

参数相对振幅及其相位关系(换言之,仅仅需要振幅相位关系),則可以用更明显的作图法表示振荡状态。如图5即是表示与图4相

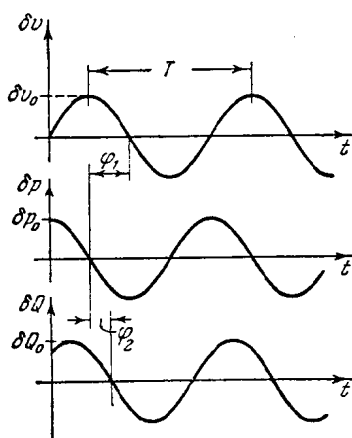


图4. 振荡参数随时间的变化关系