

511521

飞行器的POGO(纵向耦合) 振动专题集

上



《强度与环境》编辑部

1981 北京



前 言

在火箭工程上，POGO振动已日益引起人们的关注，尤其是随着大型液体运载器的研制进展，POGO振动作为一种潜在危险，使运载器的安全性与可靠性受到威胁，因此，凡是搞大型液体运载器的国家，几乎均重视POGO振动。据查到的资料记载，研究POGO振动的国家有：美国、法国、德国、苏联、日本等等。看来，我国也必须进行此项研究。

POGO此词，原意为“踩高跷”运动，转用到火箭工程上，用它来描述液体火箭的一种不稳定的自激振动现象。它早已出现在专业性的技术报告和文献中，并已成为各国通用的一个专业性术语，可译为“纵向耦合”振动，或保持POGO原文。

典型的POGO振动是：当飞行器结构的纵向振动与推进剂输送系统的振动两者的固有频率彼此接近或相等时，就形成一种闭合回路的自激振动。这种自激振动的幅值开始于液体火箭飞行过程中的某一特征秒状态，随后，幅值达到最大，最后，幅值减小以致消失。然而，就在自激振动开始到增大再减小的期间，POGO振动的潜在危险就发生了。

典型的POGO振动所构成的闭合回路，它包括结构系统、管路泵系统、发动机系统、控制系统等几个方面的耦合。它属于系统动力学问题。

当然，也有非典型的POGO振动现象。POGO振动与低频振动密切相关，POGO振动属低频振动，并在低频振动中占有不可忽视的地位。

POGO振动的潜在危险可归纳为三点：

- 1.如果POGO振动严重，就会引起飞行器剧烈的振动不稳定性，导致飞行失败，例如法国早期的钻石-B火箭。

2. POGO振动对载人飞行是严重的威胁，它可能使宇航员发生生理系统失调，如视力模糊等现象。

3. POGO振动会使飞行器上的仪器、设备和卫星等处于恶劣的振动环境中，对它们的可靠性极为不利。

然而，在火箭工程上，若采取预防措施，则对解除飞行器纵向耦合振动是十分有效的。从美国的大力神、土星V—阿波罗、航天飞机以及欧洲的阿里安来看，防止POGO振动的措施，主要是分隔开飞行器的结构纵向的固有频率与推进剂管路系统的固有频率之间的耦合，以阻止闭合回路自激振动的发生。

从统计来看，用得最多、最有效的预防POGO振动的措施就是采用蓄压器（POGO振动抑制器）。它相当于具有一定压力和一定容量的气瓶或气球，旁通在推进剂管路

内，当它起作用时，首先，改变管路内流体的柔性，从而，改变管路内的压力脉动的传播速度。结果，可明显地改变管路系统的固有频率。这样，使管路系统的压力脉动的频率从原来与结构纵向振动频率很接近的状态，下降到明显分离的状态；其次，降低耦合频率时液路压力脉动的幅值，从而可靠地解除了飞行器的POGO振动的不稳定现象。

基于上述情况，又由于POGO振动具有技术内容新、难度大、协作面宽等特点，我们很需要了解国外这方面的资料，并引为借鉴。从而，诞生了这本POGO振动专题集。

本专题集的特点是：紧密结合国外典型的大型液体运载器的POGO振动问题的研究及其解决办法；选择实验与理论相结合的研究方法；从系统动力学观点将POGO振动的各组成部分均有所体现；并从预防POGO振动措施中反映了POGO振动抑制器的原理、效果等。

然而，由于篇幅和时间以及水平等所限，本专题集还存在着不足甚至错误之处，望读者指正。

目 录

POGO振动的飞行遥测数据汇编	(1)
一、宇宙神运载器	(1)
二、宇宙神/阿金纳运载器	(3)
三、宇宙神/人马座运载器(AC系列)	(3)
四、大力神Ⅱ运载器	(6)
五、大力神-人马座运载器(TC)	(6)
六、雷神/阿金纳运载器	(9)
七、加大推力雷神/阿金纳运载器	(10)
八、德尔它运载器	(10)
九、钻石运载器	(11)
十、土星V运载器	(12)
参考文献	(14)
土星V的POGO及其解决方法	(16)
摘要	(16)
一、引言	(16)
二、土星V飞行结果	(17)
三、POGO工作组	(17)
四、分析用的数学模型的研究	(17)
五、实验计划	(19)
六、解决POGO的方法	(20)
七、分析结果	(21)
八、AS—503飞行结果	(22)
九、结论	(22)
参考文献	(23)
附录	(23)
飞行器纵向振动的质量—弹簧模型	(36)
摘要	(36)
一、引言	(36)
二、符号	(39)
三、振动振型的等效单弹簧—质量模型	(40)
四、飞行器的典型组合部分的运动方程	(45)

五、具有一个顶部质量的部分充液圆柱壳.....	(51)
六、支撑在弹簧—质量系统上的部分充液圆柱壳.....	(54)
七、结论.....	(56)
附录.....	(58)
参考文献.....	(60)
阿特拉斯—人马座纵向动试验.....	(62)
摘要.....	(62)
一、引言.....	(62)
二、试验步骤.....	(63)
三、使用的仪器.....	(64)
四、试验程序.....	(64)
五、结果和讨论.....	(64)
六、固有频率.....	(65)
七、振型.....	(65)
八、阻尼.....	(66)
九、氧化剂管路压力响应.....	(66)
十、结论.....	(67)
附录.....	(67)
参考文献.....	(85)
1/10 缩尺阿波罗—土星 V 模型的纵向振动特性.....	(86)
摘要.....	(86)
一、引言.....	(86)
二、符号.....	(87)
三、装置和试验程序.....	(89)
四、结果和讨论.....	(99)
五、结论.....	(104)
附录.....	(105)
参考文献.....	(140)
带有模拟推进剂飞行器的纵向振动试验研究.....	(142)
摘要.....	(142)
一、引言.....	(142)
二、符号.....	(143)
三、设备和试验程序.....	(143)
四、试验数据的表示.....	(146)
五、结果和讨论.....	(148)
六、结论.....	(151)

参考文献	(178)
多点正弦与单点随机模态试验结果的比较	(180)
前言	(180)
一、MJS飞船模态试验介绍	(181)
二、多点正弦试验的介绍和结果	(185)
三、单点随机试验的介绍和结果 (SPR)	(193)
四、多点正弦与单点随机结果的比较	(196)
五、对多点正弦与单点随机的评价	(198)
六、结论	(200)
参考文献	(200)
导弹流体系统固有频率的计算	(202)
一、前言	(202)
二、诸环节方程	(202)
三、单管发动机系统	(214)
四、四管发动机系统	(219)
五、例子	(221)
参考文献	(222)
在测脉动流量时超声波流量计的性能	(223)
一、前言	(223)
二、系统的类型	(224)
三、试验装置	(225)
四、传感器	(227)
五、流量装置	(227)
六、试验结果	(229)
七、结论	(230)
参考文献	(230)
大力神 I POGO稳定性分析方法	(232)
引言	(232)
一、方程推导	(232)
二、稳定性分析方法	(246)
三、结果	(247)
四、结论	(251)
附录	(255)
由推进剂系统反馈引起液体火箭的纵向不稳定性 (POGO)	(288)
摘要	(288)
符号	(288)

一、引言	(289)
二、模型公式	(289)
三、稳定性分析	(296)
四、小结	(299)
参考文献	(300)
航天飞机POGO的被动式抑制	(306)
内容提要	(306)
摘要	(306)
引言	(307)
符号	(308)
一、阻力蓄压器的设计准则	(310)
二、供稳定性分析用的分析模型	(314)
三、系统稳定性分析	(317)
四、概要和结论	(341)
五、未来的研究	(343)
附录	(344)
参考文献	(349)
航天飞机POGO的主动式抑制	(350)
摘要	(350)
引言	(351)
一、供稳定性分析用的分析模型	(352)
二、基本系统的稳定性	(357)
三、专用主动式抑制器设计的研制	(361)
四、对专用主动式抑制器设计的评价	(376)
五、概要和结论	(399)
附录	(401)
参考文献	(409)

POGO 振动的飞行遥测数据汇编

从国外大量的资料来看,许多大型液体燃料运载器都遇到了运载器结构同推进系统动力耦合——POGO振动问题。POGO振动对载人飞船的宇航员构成了危险;对结构产生过大的负载;对推进系统造成了性能下降,甚至造成事故(如提前熄火)。为借鉴国外研制大型液体燃料运载器中解决POGO问题的经验与教训,特编辑了“POGO振动的飞行遥测数据汇编”这份材料。下面按运载器飞行任务分别介绍遥测数据情况。

一、宇宙神运载器^{〔1〕}

这里提供宇宙神运载器运载武器的一些数据。在60年代初,宇宙神洲际弹道导弹进行了E、F系列的21次研制性发射。在文献〔1〕中发表了这些飞行遥测数据。由于当时测试技术的限制,对试飞中一些异常情况不能作出正确判断。现根据文献〔1〕中飞行情况的介绍与宇宙神所运载的飞船、卫星的数据对照,断定宇宙神E、F系列也发生了POGO现象。现举几次典型飞行数据加以说明。

宇宙神18E

1961年5月26日发射的宇宙神18E在起飞后11秒左右,液氧箱调压器底座纵向测得5.3cps一阶纵向模态响应,致使遥测讯号发生巨大零漂。下图标有A7820的遥测数就是

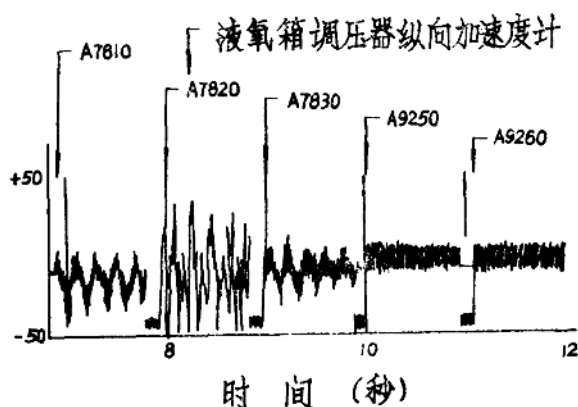


图1 宇宙神18E液氧箱调压器底座遥测数据

这次飞行测到的数据。这种情况在1961年6月31日发射的宇宙神21E中也同样发生。

宇宙神35E

在1961年12月1日发射的35E导弹，发射后10秒左右发生6 cps大振幅振动。据当时分析是导弹贮箱的呼吸振动。导弹箱体的局部纵向振动与推进系统管路动力耦合也是POGO振动现象之一。因此断定：此时发生的大幅度振动就是POGO振动。

下面是这次飞行的燃料检验阀底部测点——“A7890”测得的遥测数据。该数据是根据资料提供的曲线（很不清晰），大致是徒手画出的。由于测试传感器为高频加速度计，这些数据只能定性示意，不能作定量研究。



图2 35E导弹燃料检验阀遥测数据

宇宙神4F

于1961年11月22日发射的4F导弹，巡航发动机燃气发生器燃料检验阀在144秒测得巨大的6~8周纵向振动。这种低周振动一直到巡航发动机关车（即288.9秒）都有响应。这次飞行的燃料检验阀在这段时间的历程图如图3所示。

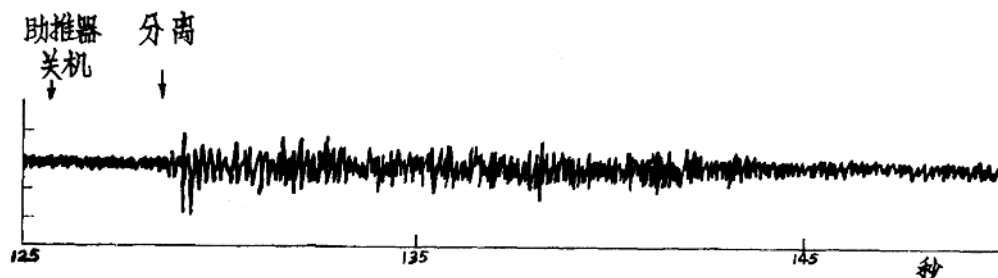


图3 4F导弹燃料检验阀飞行遥测图

二、宇宙神/阿金纳运载器^[2,3,4]

由宇宙神为一级、阿金纳为二级的运载器执行过多次向空间发射的任务。为决定飞行中纵向推进系统耦合振动（即POGO）、助推器关机响应、巡航发动机关机瞬态振动、重要部件的振动环境、刚体加速度、在起飞期间运载器对阵风响应、纵向动载荷因子、液氧箱体、压力传感器、导管等动特性，空军特地在一级宇宙神运载器中安装了24个振动传感器、4个应变计、8个压力传感器。

在1967年11月1日执行“应用技术卫星3”任务中，助推器关机前一点时间，即128.4秒，测得单幅0.7G、15cps的纵向POGO振动，在67年6月14日执行“水手1967”卫星任务中，在起飞时测得单幅0.5G、频率5cps的纵向耦合振动；在发射“轨道地球观察5”卫星时，起飞后154.12秒测得单幅0.6G、14cps的纵向振动。图4为“水手1967”卫星结构上纵向测得的0.1秒POGO响应图。

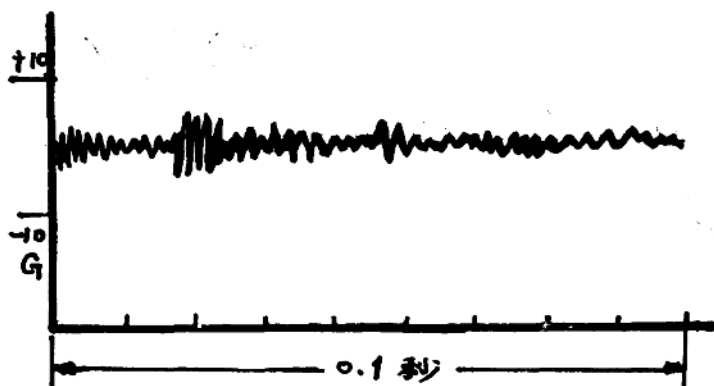


图4 “水手1967” POGO时历图

三、宇宙神/人马座运载器（AC系列）^[5~8]

AC系列运载器是由宇宙神、人马座组成。人马座是康维尔公司通用动力部首次研制的改型宇宙神D导弹。AC—1~AC—6次飞行是定月发射，AC—8、AC—9为不定月发射，均属研制性飞行。AC—7与AC—10属工作性飞行。所谓定月发射是指定季节发射，不定月发射指不受季节限制而且发射窗口也很宽的发射。还有AC—11~AC—20其它飞行任务。

AC一系列POGO效应出现的时间、振幅、频率可从以下三个图看出。

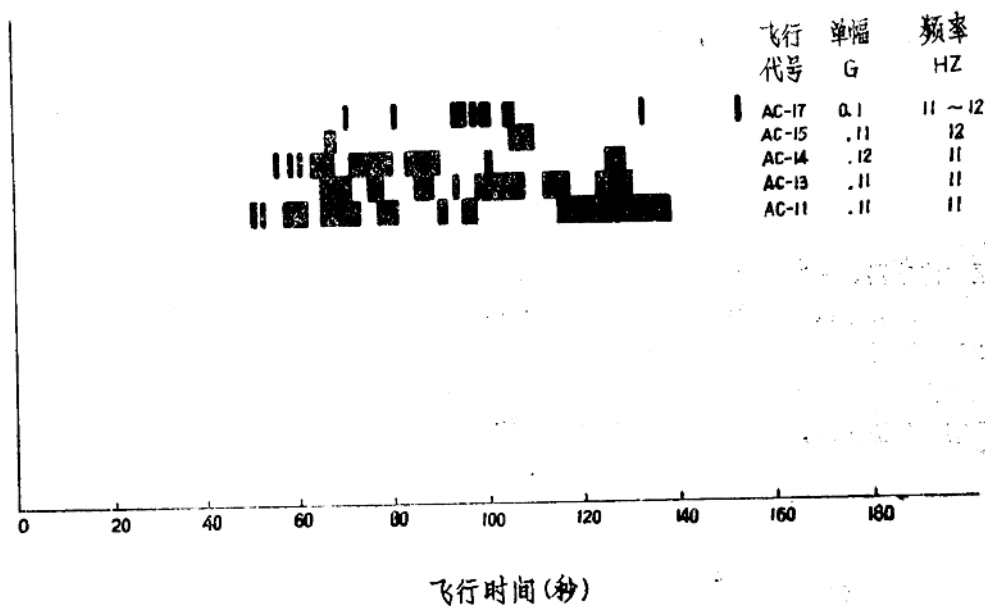


图5 AC 系列 POGO时历图

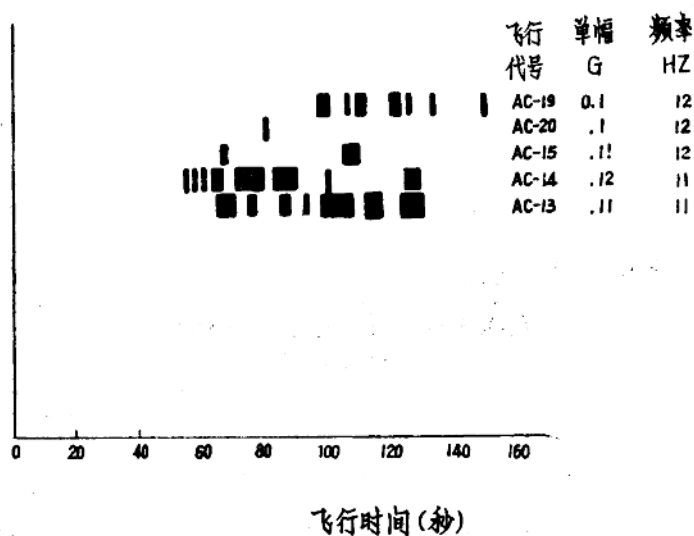


图6 AC 系列 POGO时历图

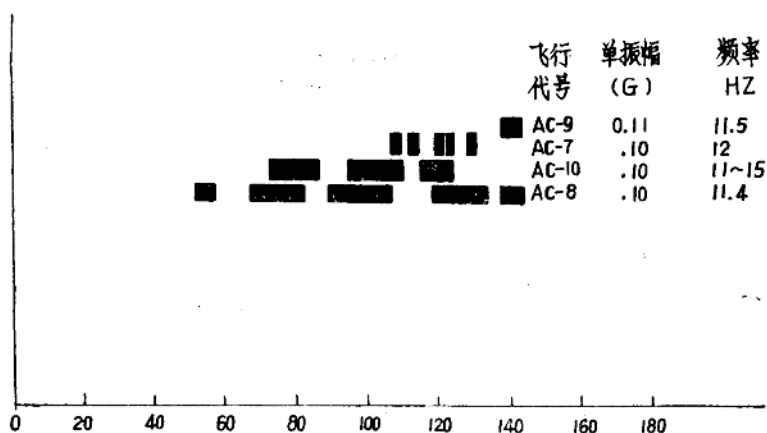


图7 AC 系列POGO时历图

现取几次AC飞行说明POGO遥测情况。

AC—3

在这次飞行任务中，出现两次POGO振动。第一次发生在飞行后80~90秒，振级最大为0.12G（单幅）、频率11.5cps。第二次发生在135秒，振级、频率与第一次同。

AC—7

这次飞行是执行“发现者2”卫星的发射。1966年9月22日发射。飞行后107秒~130秒之间测得5次间断性12cps、0.1G（单幅）的POGO振动。

AC—9

这次飞行的POGO振动发生在发射后130—143秒，其频率为11.5cps，振幅为0.1¹G（单幅）。

AC—17

于1968年8月10日发射的“应用技术卫星—D”（飞行代号AC—17）任务中，从宇宙神燃料箱壳体上测得0.1G（单幅）、11~12cps 8次间断性POGO振动。时间发生在70~150秒之间。

AC—19、20

AC—19、20分别执行“水手Ⅵ、Ⅶ”卫星发射任务。发射时间分别为1969年2月24日、3月27日。一级助推80—82秒之间，燃料箱壳体测得0.19G、12cps间断性纵向振动。飞行数据分析者确认：这些是结构、发动机、推进剂管路动态耦合（俗称POGO）振动。

四、大力神Ⅱ运载器〔9〕

据文献〔9〕介绍：在大力神Ⅱ飞行试验初期，助推期间导弹出现一阶纵向模态振动。这种振动同时在燃料与液氧泵的抽吸压力、出口压力、推力室压力中测得响应。典型的飞行情况是：在飞行后95秒左右一直很平稳，到102—103秒左右振动增大，并迅速发散，到135—140秒又减小到零。下表是典型的振动值与压力值：

发动机舱加速度	5.0	G
液氧泵入口压力	250	磅/时 ²
液氧泵出口压力	160	〃
燃料泵入口压力	20	〃
燃料泵出口压力	100	〃
燃烧室压力	75	〃
推 力	46,000	磅

五、大力神—人马座运载器（TC）〔10,11〕

下面提供大力神—人马座运载器运载海盗、太阳神飞船的五次飞行数据。这五次飞行的第一级助推器用大力神ⅢC，二级助推器为人马座D—ITR，分别运载“海盗动力模拟器”（TC—1）、“太阳神A”飞船（TC—2）、“海盗A”飞船（TC—4）、“海盗B”飞船（TC—3）、“太阳神B”飞船（TC—5）。发射时间在1975~1976年。

TC—1 数据

在这次飞行中，大力神推进系统安装了两个过热器，没有安装氧化剂蓄压器。测点设在海盗飞船支座上。从遥测数据分析表明：POGO发生在点火后242秒。最大纵向加速度为0.7G，频率为11.8和13.8cps。明显的POGO振动历程图见图8。

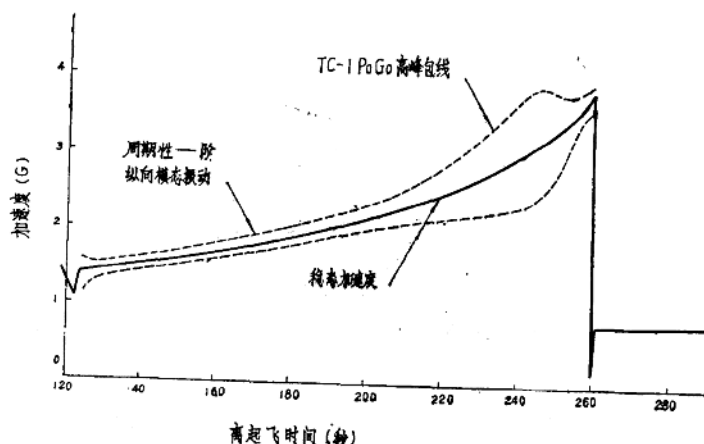


图8 TC—1 POGO时历图

TC—2 数据

在这次飞行中只装了一个过热器，蓄压器也没有装。测点同TC—1。POGO发生在229与254秒，振级分别为0.35与0.9G，频率为12.5与16cps。图9为这次飞行的POGO效应时历图。

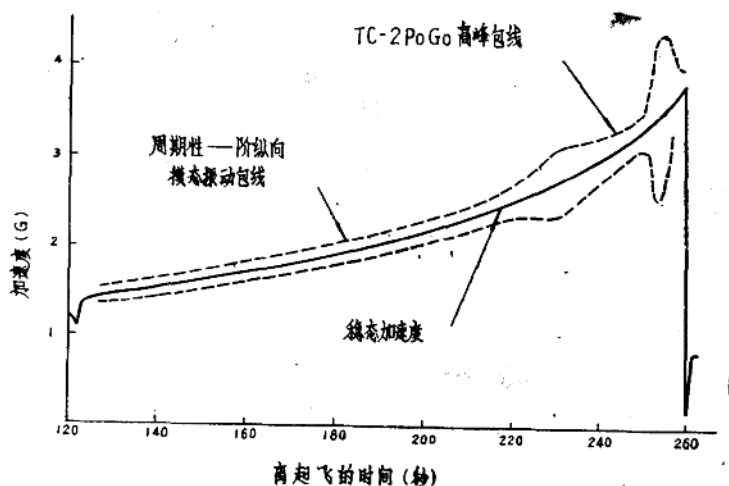


图9 TC—2 POGO时历图

TC—3 数据

这次飞行不仅安装了两个过热器,而且还安装了两个氧化剂蓄压器。遥测结果表明:POGO发生时间在起飞后241秒,最大纵向振级降为0.27G,频率为14cps,时历图见图10。

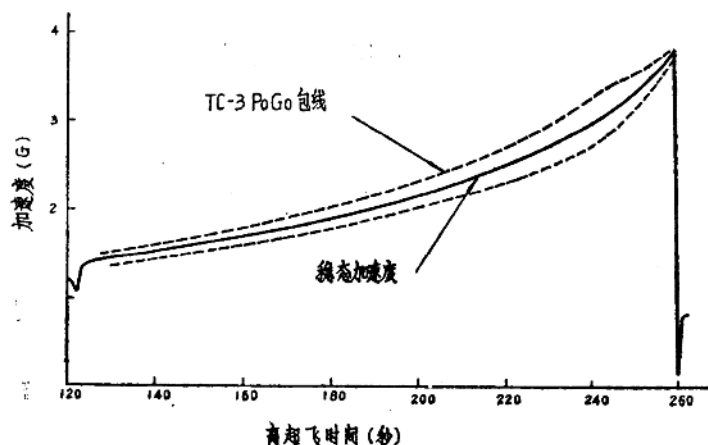


图10 TC—3 POGO时历图

TC—4 数据

安装过热器与蓄压器的情况与TC—3 相同。这次飞行POGO发生在243秒。最大纵向振动为0.22G, 频率为12.5cps。时历图见图11。

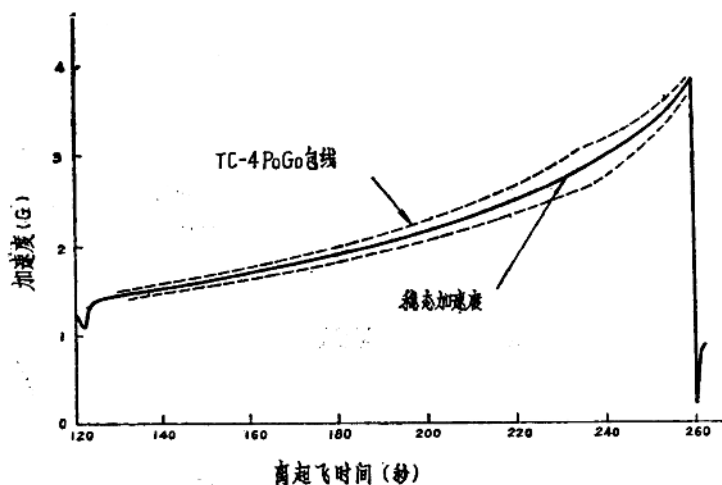


图11 TC—4 POGO时历图

TC—5 数据

这次飞行和TC—3、TC—4一样也装了蓄压器。飞行结果表明：POGO不再出现。

五次飞行的几点结论

- ①分析频率与飞行遥测数据比较接近（见图12）。
- ②飞行数据与海盗轨机的正弦试验规范相比，5—10cps的纵向振动没被考验。
- ③氧化剂蓄压器抑制POGO作用是有效的。与TC—1、TC—2没装蓄压器相比，振动级下降3~4倍。

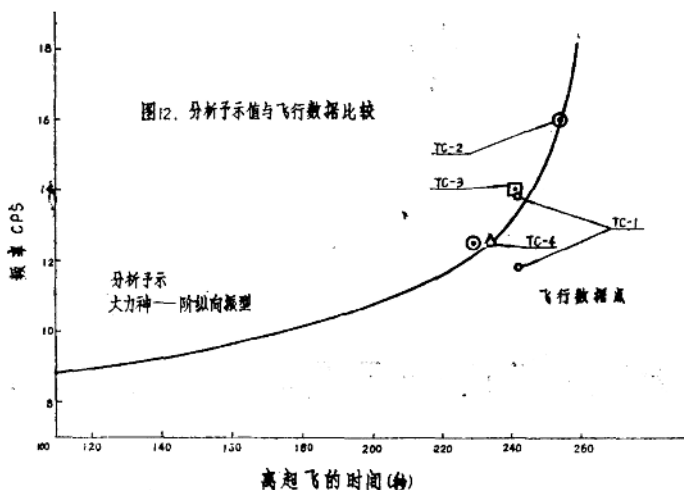


图12

六、雷神/阿金纳运载器^[12,13]

雷神/阿金纳运载器的POGO振动很大。遥测数据表明：轴向载荷几乎增加一倍（90%）。POGO振动多半发生在30~40秒之间。振动是突然出现的，频率为20cps，振动级在关车前8秒达到最大，然后很快衰减，到主级关东前完全消失。由于载荷超载太大，试验规范作了变动。新的试验规范是根据39次阿金纳B与50次阿金纳D的数据统计决定的。

文献[13]介绍：雷神/阿金纳运载器的纵向动环境在起飞时为1.5G（单幅）、10—17

Hz,持续时间为2~5秒;在210秒时,4.5G(单幅)、17~23Hz,持续时间为5~7秒。这两种环境都是由POGO引起的。

雷神运载器的POGO飞行数据可从文献[14]中查到。由于图象不清(但在阅读机上可看到)而未被引用。

七、加大推力雷神/阿金纳运载器^[13]

现提供69年6月5日发射OGOⅣ飞船的加大推力雷神/阿金纳运载器数据。在这次飞行中,POGO振动发生在主机关车前一点时间,即205.3秒。在阿金纳结构处测得一阶纵向系统响应与一阶纵向压力振荡动力耦合,即POGO效应。在耦合状态下,主发动机燃烧室压力脉动在201—215秒之间达到60磅/时²,频率为17.5cps。在110~119秒之间发生二阶纵向振动。从飞行数据看出:燃烧室压力在110秒有一个23.5cps的脉动,到119秒振动达到最大。这些脉动是飞行器对二阶纵向压缩型振型的响应。阿金纳飞船对此振动响应不大。

下图为飞行器247秒处纵向测得的POGO效应0.1秒的振动历程图。

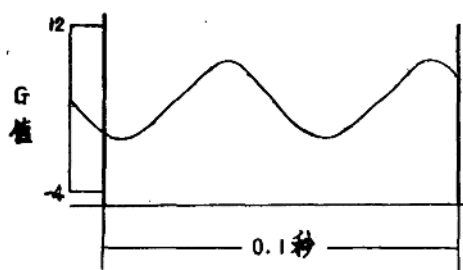


图13 OGOⅣ 飞船 POGO历时图

八、德尔它运载器^[13,16]

德尔它运载器是以雷神为一级、改型先锋号火箭为二级的运载器。它在发射应用技术卫星时,飞行后20秒,雷神运载器发生20Hz POGO振动,此时构成±4.5G(单幅)的纵向振动。稳态振级达到6.8G。二级德尔它的最大振动达到7.7G;三级德尔它,若是500磅重飞船,振动为23G,重1500磅飞船为10G。它在1975年8月8日发射“COSB”卫星时使用的是三级长贮箱德尔它运载器。在主发动机关车前一点点时间,由速度陀螺测得POGO振动。在滚动方向测到的峰一峰响应值为2度/秒;在偏航与俯仰方向测到1.5度/秒的响应。这三个方向的时间历程图见图14。POGO共振频率为19cps。在飞行