



刘昆华 著

被动式气动负载仿真

BEIDONGSHI QIDONG
FUZAI FANGZHEN



航空工业出版社



被动式气动负载仿真

刘昆华 著

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书主要介绍导弹舵面气动负载仿真新技术,探讨强(舵机)弱(负载)二力非平衡力学规律。恪守气动力自然流变属性,从首创专用的PQ液压阀入手,遵循事物发展变化之规律,并以适应飞行动力学函数协调化立论,发现:气动负载动特性奇异地落在频域图正区涨落(与频带无关、忌强行校正)和综合双变量工况(舵偏角、力)控制,是飞行模拟器正常运转的必要条件。全书包括“流变协调与定常自治的交锋”等共14章。权变的协调学给大系统注入控制活力,经试验印证;本书介绍之方法可行,理论实用,使飞行模拟器有序高效运转及其置信度发生质的飞跃。

本书可作为院校师生对比被动式控制系统与主动式自治系统差别的教学参考书,也是从事飞行仿真技术和研究多变量解耦协调理论的工程师的工具书。

图书在版编目(CIP)数据

被动式气动负载仿真/刘昆华著. --北京:航空工业出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-5165-0941-8

I. ①被… II. ①刘… III. ①载荷—飞行模拟器—研究 IV. ①V216.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第285399号

被动式气动负载仿真

Beidongshi Qidong Fuzai Fangzhen

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话: 010-84934379 010-84936343

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2015年12月第1版

2015年12月第1次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 13.75

字数: 331千字

印数: 1—1000

定价: 60.00元

序

导弹飞行模拟器是极为复杂的时空开放大系统，与空间技术和周围大气环境工况有着千丝万缕的关系，控制过程有物质和能量的不断交换。因此，舵面气动负载仿真（被动式非平衡力）与弹体强度试验加载（主动式平衡力）的调节原理有天壤之别。

经典控制论是有前提的：单向作用性、参考基准和稳定性既定。仿真气动力成为难解之“谜”，盖因它是双向作用被动式（舵面主动）受支配的混沌态流变弱者。

舵面负载模拟器成为飞行仿真的“短板”达半世纪之久，其根源是误入“自治调节”，硬要将基于平衡（补偿）机理的通频带当成非平衡气动负载模拟器的衡量指标；而摒弃频带，又找不到其他途径（用弹簧定刚度给舵加载，只能仿真特定点的空中工况）。您是否想过：若负载模拟器独立自治、离开导弹运动方程（半实物仿真总领）的考察，飞行仿真的工况概念将不成立！

《被动式气动负载仿真》的突破性奉献在于：运用非平衡力学机理，首创 PQ（压力/流量）液压阀，综合舵偏角和力控制，实现广延时空；遵循气动力的自然律和负载“量”（毋太过，毋不及）适应高层函数关系协调化；负载模拟器与频带“入股”无关，臆造 PID（比例、积分、微分控制器）加工强行校正错了；发现负载模拟器的动特性在频域图正区（汲取舵机动能）与力梯度呈反比涨落；解耦靠近负载终端；非线性载荷谱随飞行条件而变；弥补导弹数学模型简化假设的缺欠；寻求固定舵面吹风值修正系数的全局 1/4 实物试验法。仿真气动力隶属“全局协调控制原理”之中，它围绕事物发展运动辩证法和工况善变（既注意现有气动力的合法性，更关注它的暂时性和否定性，探寻系统延续生存必要条件）定性立论。这是设计负载模拟器和飞行仿真置信度上档次之阶梯，亦是导弹半实物仿真试验有序高效运转之“秘诀”。

是书令人耳目一新。作者被负载模拟器折腾大半生。如今总结经验，并分析仿真气动力的弊端，以求正反两方面得到启迪。研制负载模拟器者，俾能渐臻佳境，不误入歧途；指出传统控制论僵化“频带秀”的片面性，彰显多变量协调链传动顺畅；所论皆气动负载仿真设计基础，内容新颖，方法实用，论据充分，值得珍藏和推广。

此书从酝酿、构思、修改到竣稿，历时近十年。它见解卓异，结合实践，可读性强，是一把解读气动负载仿真之“利刃”。它引领读者进入流变（非平衡）力学世界，远离平衡（频带秀）的困惑，为飞行仿真大系统内的解耦协调技术提供成功铁论。特写此序向诸位举荐。

吴根水

前言

本书所论皆流变（非平衡）力学切实功夫，适合舵面气动负载仿真（飞行环境工况）和研究多变量解耦协调技术的工程师阅读，对没有“频带”跟踪参考基准（没有确定着力点）控制系统的初学者更有启蒙作用。

由于气动力的被动流变性（非定常）和不确知性，基于主动自治的控制论失去了应用前提；因而，我们要打破传统框架，运用流变力学原理和事物发展变化辩证法，从主（主导）客（气动力）体的作用、地位和协同飞行入手，探讨新途径和新方法。

大气被动地受舵（主动）的驱动并汲取舵的动能而衍变成约束舵面的反力（气动负载），它自身没有控制能力，其大小决定于舵偏摆状况和飞行条件（高度、速度等）；仿真被动的非平衡气动力误入平衡加载（或主动加载）是导致飞行模拟器失稳失控之源。

你我为不同功能的子系统奋战，负载模拟器与其他分课题之间的耦合冲突却乏人问津。如何消除风洞试验稳态值（偏大）误差并弥补导弹数学模型简化假设的缺陷？多变量如何整体和谐相融协调控制？这是值得深入研究的课题。

战机动飞行，气动力梯度一分钟内可能改变数十倍甚至数百倍， N 个飞行条件对应 N 种载荷谱。流变协调（以事物发展运动原理为前提）与传统理论的定常自治是两码事。用弹簧或定点力梯度调负载频带给舵面加载，变系数加载的支点随之崩塌。

将各子系统纳入时空功能一体化、特性循规蹈矩协调化进行论证，结果衍生出气动负载严格服从飞行动力学法则、高低层次不矛盾的特征：气动力奇特地在频域图正阈流变（被动汲能，PQ 阈工作在第Ⅱ、第Ⅳ象限）；舵机工作在频域图负阈（主动耗能，Q 阈工作在第Ⅰ、第Ⅲ象限）；唯有负载力与舵机力平衡时才工作在频带上。根据舵机对负载端逆向驱动倒模型，演绎出气动力传递函数的分子大于分母，试验印证了它的动特性具有高通性质。气动力“被动、汲能、流变”属性不可抗拒，只能顺从它，不能强制它。这些最新发现是传统控制论和相关论著中没有涉足的“新大陆”。

其实，负载模拟器与“频带（平衡态）”无关。它被强行电校正（减小幅差相差），是篡改导弹运动方程和违反舵回路技术条件（舵机力必大于气动力）的行为。笔者历尽磨难才顿悟“频带至上”错了。问题很简单：用 PID 校正产生气动力捆绑舵面，使舵面（鸟翅）失去自主能力，还飞什么行？空中何来“电校正”加工？同等条件下，空气阻力约是水中的 8%，柔弱的气动力，怎么会跑去与舵机力平衡？

了解传统控制论的不成熟性（以既定事实为前提）是发人深省的。辩证法认为：子系统与大系统之间是发展变化的对立统一体。气动负载模拟器与导弹数学模型（电脑）中的多变量有不解之缘。

舵面遭遇负载强制流量的堵拥而转不动，造成“血脉不通，百病丛生”，无疑要以疏通负载信息流为突破口。以往“主动系统”控制液压阀的高压油口，而“被动系统”却

控制液压阀的回油口。国内首创的 PQ 液压阀营造了被动流变基因：它的阀芯被动地受舵牵动带来压力反馈而打开回油口广延时空；回油口关闭多少（等效加载量）由载荷指令控制。我们的要务是寻找恰如其分的载荷谱和保持液压油像大气似的流变性状，以促成全局“协调链”顺利传动。试验表明：运用流变力学机理，负载量一旦融入“协调传动链”，大系统将突然出现正常运转状态。

为了物演导弹运动方程，主体（飞行转台）莫不以快速性为指标；但客体（从属的负载模拟器）要的是看到它与主体衔接的协调奇迹。协调者，融洽互动之纲，相生相克之地，搭配得当之道。多变量协调学随处可见，无论是生命或非生命工程。

本书全面系统地介绍了负载模拟器的工作原理、设计理论和工程样机的新成就。解惑释疑，导引正路，俾能渐臻高明。又引申其理，使能触类旁通。仿真气动力受飞行动力学相关性约束，靠近耦合源解耦法和飞行仿真试验果效是此书的三大支柱，重点介绍气动负载仿真（低层）与飞行模拟器（高层）如何协调控制和解耦设计。

作者在写作过程中得到樊会涛、李立名、金先仲、吴根水等先生的鼓励与赐教，以及张文学、李高风、原敬等同仁的支持，在此道谢。还要向给予协助的西北工业大学闫杰教授、河南科技大学马建伟教授和航空液压附件研究院陈镇汉研究员致谢。

Inceery

目 录

绪论	1
第 1 章 气动负载仿真的设想	6
1.1 气动负载与导弹动力性能	6
1.2 古典、现代和协调控制论的比较	7
1.3 导弹半实物仿真系统简介	10
第 2 章 气动负载模拟器的方案比较	15
2.1 加载入门	15
2.2 选择协调者及其序参量	18
2.3 负载模拟器三个方案比较	19
2.4 仿真气动负载涉及的重要技术问题	24
第 3 章 双向作用 PQ 伺服阀	28
3.1 自由流量与强制流量	28
3.2 各类伺服阀结构特征与特性	30
3.3 双向作用 PQ 阀工作机理	37
3.4 PQ 阀在系统中应用效果	41
第 4 章 各级耦合变量约束	45
4.1 耦合类型与支配原理	45
4.2 加载模式级类与差异	47
4.3 舵面负载模拟器内外关联约束	51
第 5 章 带耦合负载模拟器传递函数	57
5.1 多体系统传递环节分析	57
5.2 演绎带耦合负载模拟器传递函数	63
5.3 仿真气动力：定数虽无，大致则有	69
5.4 传递函数有用性评估	73

第 6 章 多余力外搅扰负载序变量	77
6.1 分析多余力矩数学模型	77
6.2 让多余力无碍载荷谱比例控制	79
6.3 耦合带来“高通型”传递函数	84
第 7 章 主从协调与解耦设计规则	88
7.1 耦合扰动与外干扰的区别	88
7.2 耦合回路与耦合通道数	89
7.3 解耦内涵的演变	91
7.4 解耦设计规则	95
第 8 章 带耦合负载模拟器定性设计	97
8.1 参数与时空频域流变曲线族	97
8.2 负载轴与舵机轴弹性对接机理	103
8.3 传递函数系数计算表与分析	105
第 9 章 负载参数协调化稳定性	108
9.1 稳定性分类与分析方法	108
9.2 为时空广延疏泄强制流量	113
9.3 非线性与负载模拟器数学仿真	115
9.4 连接刚度不当引起失稳的数学仿真	117
第 10 章 负载 PID 校正祸害高层有序运行	121
10.1 区别新“旧”理论的控制方式	121
10.2 PQ 阀是造就飞行时空的杰作	124
10.3 破解 PID 校正的困惑	128
10.4 负载引入 ID 使导弹大回路失控	131
第 11 章 负载模拟器调试指南	138
11.1 负载模拟器指标的定性提法	138
11.2 负载模拟器的静态试验	143
11.3 负载模拟器的动态试验	145
第 12 章 求适应协调区间的载荷谱	153
12.1 模型曲线与相似定理	153

12.2 求载荷谱修正系数的试验举例	158
第 13 章 飞行模拟器协调试验研究	162
13.1 大系统协调试验的必要性	162
13.2 飞行仿真协调试验的方法	165
13.3 分析大系统协调试验结果	166
13.4 仿真必须突出一个“真”字	169
第 14 章 流变协调与定常自治的交锋	173
14.1 非等式流变与等式僵化	173
14.2 恪守客体受支配的地位	177
14.3 根立于飞行“协调链”之中	178
14.4 运动时空与大气流变绝对性	181
【附录 A】 演绎多余力矩数学模型	188
【附录 B】 绘频域图技术细节	196
参考文献	202
迫近飞行仿真大境界（跋）	204
本书告诉您	209

绪 论

气动负载（仿真对象）的物理属性：“第一自我”包围地球的自然大气是无形体的气态介质，它无能力独立自主控制，待外力推动而被动地飘拂不定；“第二自我”是靠汲取舵机动能获得能量并反作用于舵面，形成约束舵面的流变气动负载。它的大小依附舵机舵面（飞控系统执行器）的摆动情况，没有固定着力点。其属性简言之：被动、汲能、流变；“电”加工成气动力是没有的。

物质能量交换，舵面（固态物质）偏摆耗能推打大气，将能量传递（交换）给大气（气态物质），大气汲取舵面动能随之转化为气动力约束舵面，同时流变不息飘散。耗能—汲能—耗能循环不断，交换不断非常非线性。

导弹攻击机动目标，必须具备良好的机动性能，方能迅速地改变飞行姿态瞄准目标。如果仿真的气动力过大，就是舵面的约束反力过大，舵面受压对飞控系统指令的响应速度将变得缓慢。这给导弹机动性能带来负面效应。

气动力、舵偏角和导弹姿态角三者密切关联，在导弹动力学方程之中有所反映。但简化假设（系数冻结、瞬间平衡等）和固定舵面吹风稳态值给导弹飞行模拟器试验带来的误差是不允许的。仿真气动负载参与飞行模拟器试验，目的不是“努力”跟踪数学仿真值，而是消除它的误差，提高飞行仿真的置信度。

1. “PID 校正”加工与大气自然律不相容

气动力是大气通过与它的对立面（主动舵面）相互“抗击”、“斗争”的产物。导弹空中飞行的总汇是自然，气动力不是通过电校正加工转化形成的，PID 校正与气动力自然物态不相容。大气物质时间是永恒的，空间上是无穷无尽的。舵机力、气动力按其量纲来说是同一的，但其力的大小不相等，运动形式各异。

人们可以利用自然气动力为导弹飞行服务，但不可以用外加 PID 校正产生的力附加在仿真气动力身上，从而否定客观固有的气动力。大气物质是由相同粒子组成的，其物质性不可掺杂任何外来成分。气动力的被动、汲能和流变属性，是大气受舵的驱动引起的多种表现形式。大气“PID 校正”，是人们为了展宽负载模拟器的频带而捏造的工具。“PID 加工气动力”在空中不存在，事实是人们把“非平衡力”（非频带）当成“平衡力”（频带）的大谬。

既然舵机力总是大于（克服）气动力，怎能搬用平衡力学去研究非平衡力行为特性？又何以能用“频带”（平衡态）去衡量负载模拟器的性能？出人意料的是，人们对仿真气动力“频带秀”的推崇，却推出飞行仿真大系统振荡发散的灾难。今天，负载模拟器还在“频带秀”中迷惘……

谁都知道，摇动扇子，加速空气流动，会感到一种力反作用到手上，它与扇子运动方向相反，起阻碍扇子运动的作用（约束反力），但它不可能与手的力平衡。导弹舵面像扇

子,作用在舵面的气动力是舵面摆动的产物。气动力何来“频带”?频带是在负载力与舵机力平衡相等的情况下得到的,不平衡则产生幅差、相差,而不同力的幅差、相差(快慢)自然不同,何必要校正?依据什么校正?试验证明:低层负载模拟器的PID校正,会引起高层大系统失稳失控。

气动力随舵偏转速度的加快而增大。大气物质不依赖于舵,它自身不会获得或产生反作用力的新能量。气动力是自然界大气受挤压、与舵面“斗争”和牵扯而自我更新的物质,与“PID校正”无关,与固定舵面风洞试验值不等效。可是,无人能提供实时在线的变化莫测的气动力原始数据。因此,其仿真是复杂而困难的。

数学仿真的理论曲线用“固定舵面”吹风平衡稳态值计算的误差是不可忽略的。我们宜求出它的修正值,并尽可能弥补之。通过导弹动力学关系找到气动负载定性参考基准,成为飞行仿真中值得重视的关键技术。

导弹飞行中,舵机力与气动力难分难解:①舵机力与气动力都是导弹的控制力,二者有无相生,彼此依存,是矛盾对立统一体的两方面;②舵机(主体)以消耗自身能量驱动舵面做功,大气(客体)以汲取舵面动能作为舵面负载做功;③舵机力通过舵面(固态刚体)拍打大气,气态物质的易流性和易变性,使气动力力学性质与固态刚体内部平衡力有实质性不同,物质能量交换违反了“老”理论定常线性假设;④气动力给舵加载的同时,又受舵面的拍打,这双向作用性不符合传统控制论的单向作用性原理。

2. 气动负载仿真的研究对象与任务

气动力是众多因素(舵偏角及其角速度、飞行速度、高度、舵面尺寸和导弹迎角等)的函数。气动力又是关联控制导弹姿态的非平衡外力,不是工程力学中刚体系内的平衡力。把负载模拟器从飞控系统中分离出去“自治”失去飞行动力学的意义。为了提高飞行模拟器的置信度,不宜弹簧加载,必须实现气动力变系数加载。

本书的研究对象与任务是:在实验室人工“制造”气动力给舵面加载,实现流变气动力行为特性,研究飞行转台上的导弹姿态与气动负载模拟器之间相互作用变化的规律,使仿真气动负载符合宏观技术战术的使用要求。

根据气动力作用原理,由一些电液部件有机地组合成力控系统,仿真各种飞行条件作用在舵面的气动负载力装置,称之为被动式气动负载模拟器,有时简称舵面负载模拟器,是飞行器半实物仿真试验不可缺少的设备。

工程力学中已阐释主动力或平衡力。随着飞行仿真技术的发展,舵面负载模拟器遇到新问题——被动的流变(非平衡)力学。

具体说来,本书的解决任务包括:

(1) 控制问题。气动负载模拟器是双变量(负载力和舵偏角)耦合控制系统。一方面要反映气动力被动流变特性,另一方面要探讨飞行转台(主)与负载模拟器(客)的差别和互动变化规律的密切关系,避免二者发生矛盾冲突。这里的控制概念是广义的。导弹半实物仿真试验前,要研究多变量之间协调控制,要寻找合适负载量。大系统试验能否成功决定于导弹动力学方程是否有解。

(2) 信息能通性。低层信息的流畅为高层信息协调链畅通无阻打下基础。任何控制系

统都是信息系统,其控制过程是信息获取、传递、变换、处理、利用的过程。因此,控制系统的信息结构必须拥有足够的信息通道,提供方程组中全部变量伴随的信息载体,保证信息链不断开及其合适量。这是任何控制系统能正常运行的前提。能通性主要是指电路连接、油路结构通畅、协调链紧扣。防止原本空中不存在的“电校正”强加给负载模拟器,造成液压油不连续不自由流动,引起大系统错动,结果导致高层不能正常运转。

(3) 全局关联。舵偏角是飞行转台姿态角的输入量,又是处在舵系统反馈回路中负载模拟器的输入量。因此,负载模拟器与飞行转台运行规律之间存在直接信息关联。当飞行转台不能正常工作(失稳失控)时,最主要的原因有可能是负载模拟器输出力不在动力学函数协调区间造成的。这点不经过大系统数学仿真论证或不经过飞行模拟器试验是不易看清楚。飞行转台或是负载模拟器各自在单独调试试验时是稳定的,但大系统却出现失稳失控,这就要我们研究大系统的关联稳定性。

本书还研究了下列问题:指导设计负载模拟器的理论基础是传统的经典控制论,还是大系统协调控制论?作用力平衡(补偿)机理与非平衡(流变协调)力学原理有何区别?仿真气动负载应遵循什么自然律之规定性?负载模拟器的数学模型有何特征?负载模拟器“点点跟踪”的频带研究方向为什么错了?导弹运动方程简化假设和风洞试验值如何修正?如何分析定刚度弹簧板给舵面加载的失真度?多余力与负载力同在系统输出端,消除前者同时保留后者能做到吗?飞行转台与负载模拟器的作用和地位有何不同……

3. 气动负载仿真的研究方法

本书以流变非平衡力学为基础,涉及飞行力学、导弹的制导与控制、空气动力学和大系统协调控制等多方面知识。它们之间充满内在联系。

在设计和调试负载模拟器时,建议用多变量、多层次研究法。

(1) 黑箱与白箱相结合的方法。在大系统中,对某个层面内部流固(体)耦合结构不清楚的地方(黑箱),可通过宏观的、外部的和已知参数及功能现象(白箱),进行适当精度和适当维度的综合分析。先求出以风洞试验值为基准的修正系数(粗粒度)。在保证系统稳定工作前提下,再从“粗粒度”探讨“细粒度”,即适应导弹运动方程的协调范围,做出半经验性判断,将不确知的气动力(模糊)结合导弹运动方程中其他已知参数(确定)求解脱靶量。这称为综合多变量求解未知量(气动力)的试探法。

(2) 保证舵回路的技术要求是负载模拟器的研究方向,即:①二力不平衡(气动负载力必小于舵机力);②负载模拟器应提供舵偏角“到位”值所需的空间;③负载信息具有全局协调性和流变的能通性,不可因加载妨碍舵回路技术条件的发挥。仿真气动力与舵机力二者“你中有我,我中有你”,“你”的错引起“我”的错,导致全局(飞行仿真)错;结果: $1+1=0$ 或 <0 。

导弹操纵舵面是为控制和稳定导弹的飞行。舵回路(含气动负载)行为特性直接与弹体关联,影响到导弹制导准确度(飞行转台姿态)。

(3) 摸清“协调链”中的疑难点。飞行仿真技术的复杂性和综合性,需要多功能与多技术相结合的集成方法,进行不同学科渗入和不同技术的转换和衔接,用非平衡(流变)力学和其他相关专业知识共同来解决。变量恰当是相互同步协调前行的保证,低层行

为特性以服从高层性能需求为原则。

(4) “人与机”、“机与机”相结合的方法。多个子系统连接成大系统，机器本身不会自动调节其稳定性和协调性。为了合理、现实地解决大系统内在的有序控制和寻找决策措施，需要人机协调和智能分析相结合的方法。例如，严密演绎的数学模型已定性，而定量细化试验靠人为调节。

(5) 理论与实际相结合。了解数学模型“固化原理”的物理概念，推导公式的前提条件和公式的适用范围。理论上的简化假设引起的误差，在试验中是不允许的。双向作用的负载模拟器不具有单向作用的前提条件；把大系统分解为若干个无关联的子系统并分别求得各自的稳定性和快速性，它们加起来并不等效大系统的关联稳定性和综合快速性。

(6) 恪守天然大气的自然律，疏导信息流变能通性。除了使电路信息和伺服阀油路信息能通顺流畅外，还要注意不要把平衡（补偿）机理误用于非平衡的被动式气动负载仿真。被动加载与主动加载是完全不同的力学行为概念。

(7) 贯彻事物发展运动辩证法。人们依本照方“校正”气动负载模拟器的幅差和相差，其实气动力（弱者）与“频带秀”（平衡态）无关。事物发展运动原理不仅注意仿真平衡加载的合法性，更注意飞行工况的否定性和暂时性，即探讨系统全过程生存延续的非平衡加载和事物发展变化的必然性。

(8) 客体（气动负载模拟器）与主体（飞行转台）是配角与主角关系，地位高低与作用强弱不可颠倒。设计负载模拟器要延伸到它周围的相关系统，考虑彼此之间的关联影响和耦合冲突。例如，解决负载模拟器的强制流量应做到内通外达，内：实现流变负载；外：给舵面偏转提供空间。

总之，要拓展负载模拟器与全局的合作意识，引领它进入导弹动力学协调区间，把它放到大系统舞台上设计、调试、考察和评估，凸显它的灵活多变和适应 N 个飞行条件协调加载的能力，实现飞行仿真大系统的良性循环和高效运转，而不要在定常自治的小圈子里打转。如，有的用户甚至把负载输出端固定起来“优化”（强行校正）频带，连舵面摆动（气动力之源）也靠边站，更别提考虑多变量的关联影响和全局协调和谐共融。

对气动负载模拟器和飞行仿真大系统而言，看到系统论控制论的不成熟性（违反事物发展运动辩证法），走多变量解耦协调之路比崇拜教科书、僵化在“频带至上”的自治调节之路上更具有重要的现实意义和应用价值。

不同功能的子系统连接成大系统，不是无序的一团乱麻，而是具有全局的目的性、时变性和有序性三大特征。合适的负载“量”是飞行模拟器由无序到有序正常运转的协调构件。超载突变将导致全局失稳失控（无解）。如果负载力在协调区间内涨落，弹道的时空、功能结构将形成有序世界。组分后（解体）的子系统不可能实现整体意义上所需的行为特性和效能，这就是整体大于部分之和。不谋全局，何谋一域？多个子系统相互作用，都服从仿真机里导弹运动方程求解。

此书为仿真导弹气动负载（不确定、不确知）提供定性设计方法。它批判“频带至上论”，摆脱传统控制论定常自治的束缚，恪守气动力的被动从属性和随机自然律。

流变的开放系统，不断地与环境（周围大气）交换物质和能量，且存在非线性。为

了演绎数学模型，假设小扰动线性化，但被动加载原理不可误入主动平衡加载模式，“PID 加工”带来超载。应尽可能找到“协同作战”的负载特性，实用的合乎逻辑规律的负载模拟器必有容身之地，为提高飞行仿真置信度做奉献，“被撂到一边”的悲剧不再重演！

第1章 气动负载仿真的设想

以往气动负载仿真的有关资料几乎都搬用“老”控制理论。但大气是不确定的“软量”，时空开放和非定常非线性，使设计气动负载模拟器复杂化。它是飞行仿真技术中的难点和焦点，涉及的问题是多方面、多层次的，离开多变量协调控制的视角去考察研究，“自治”加载肯定是不可能成功的。

人们把导弹运动方程中的气动力用风洞吹风试验值来计算，但它把气动力（柔弱的客体）与舵机力（刚硬的主体）当成平衡力，而不平衡又不能作理论计算，便美其名曰假设“瞬间平衡”。调试负载模拟器特性时只能以风洞吹风稳态值为衡量基准。然而，把这些数值作为气动负载模拟器输出信号“跟踪”的依据却严重失实，最终导致飞行仿真大系统无法正常运行。

由于实时在线气动力无法提供（工况环境变化莫测），因此负载模拟器输出力的参考基准是未知数（黑箱），但气动力的产生原理和风洞吹风稳态值已知（灰箱），导弹设计参数以及“老”型号产品靶试遥测数据曲线是确定的（白箱）。所以，试探仿真气动力的协调区间，通过飞行模拟器试验获得定性弹道和脱靶量是可以做到的。从负载量与脱靶量的关联影响，通过半经验的分析判断，它的置信度大大超过数学仿真。

注意：当三轴转台（导弹制导舱）、目标模拟器和负载模拟器代行导弹动力学函数方程中的有关变量进行半实物仿真时，对那些理论上的简化假设和固定舵面吹风值造成的误差不修正是无法试验的。因数学仿真的脱靶量虽然是理想的0.01m，但那不过是“纸上谈兵”。

1.1 气动负载与导弹动力性能

导弹运动方程是根据牛顿力学、导弹（自由刚体）运动规律的动量定理和动量矩定理来描述的。将导弹动量（动量矩）与外力（外力矩）等式方程向弹道固连坐标系投影，经坐标变换……可得到16个微分方程，对应未知16个运动变量，应有唯一解，可决定导弹质心运动轨迹。但是，要联立求解16个非线性微分方程组异常冗杂，便引入小扰动线性化法和系数冻结法等假设，忽略二阶以上微量，并用固定舵面吹风的稳态值代替变系数气动力。导弹三维运动方程最终分解为三个通道（俯仰、偏航、滚动）作为三轴飞行转台的输入信号进行研究。方程中的系数代表弹体动力性能，其中除导弹重量外，气动力（舵机力）、推力、飞行速度等是可控的。

三轴飞行转台的输入信号是操纵机构的舵面偏转角，输出信号是转台（制导控制舱安装在三轴转台内环上）的姿态角。问题在于舵面偏转角和气动力是不是反映了空中实时在线值。显然，舵面不断摆动的动态气动力与固定舵面吹风的稳态气动力是不等效的。初步估计二者误差百分之几十，越是高空飞行条件，其误差越大，但精准数值无人能回答。研

究表明：飞行仿真试验曲线与数学仿真实理论计算结果有出入，甚至出现由量变到质变的情况也是有的。例如，理论计算脱靶量不到1m，空中现场靶试所向披靡100%中靶，但飞行模拟器试验却脱靶。气动负载模拟器输出信号“点点跟踪”输入信号的频带越宽，飞行模拟器振荡发散（失稳失控）现象越严重，即飞控系统无法正常工作，试验所得脱靶量几十米甚至上千米。这说明舵面受过大气动力（超载）压制而转不动，飞行转台姿态角错动是必然的。但从总控制台记录的试验曲线看出“负载模拟器输出信号对输入信号跟踪得很好”，表明用“频带”衡量负载模拟器的性能说不通，理论计算所得的气动力曲线误差在飞行仿真动态试验中是不允许存在的。如果认为理论曲线是绝对正确的，也就没有必要研制负载模拟器和进行飞行仿真试验了，或者说，气动负载的行为特性错了，飞行仿真试验结果是不可信的，因空中飞行环境工况（气动力）不对头。

为了飞行仿真试验求得可信脱靶量，首先飞行转台应能正常工作，这与它的输入指令（舵偏角）到不到位有关，也与负载特性工作点是不是在全局协调区间内有关。为了全局众多变量有序互动，必须共同遵循“适应导弹动力学函数协调链顺利传动”为最高准则；对负载模拟器而言，要注意它的输出量变化范围不能超出全局“协调区间”；为了反映气动力的流动变化特性，负载模拟器应设计成“液压”控制系统，而不是设计成“电动”控制系统。研制负载模拟器的目的不在于追求独立自治的“快速性和高精度”，而应把它与全局有机地融为一体，探讨实现多变量协调控制的新途径，让受舵支配的负载模拟器行为特性始终工作在导弹动力学需求的协调区间之内，创造导弹运动方程求解的条件，避免给飞行仿真大系统添乱。仿真的气动力过大或过小，影响到舵偏角的过小或过大，危害着导弹动力系数。

1.2 古典、现代和协调控制论的比较

由于古典控制论或现代控制论不能准确反映仿真气动力的本质属性（不确定性和非线性流变等），便产生协调控制理论。

对非平衡（流变弱者）的气动负载模拟器，在设计的前期阶段，就必须放弃不切合被动式加载的“定量”频带指标，要纳入全局协调的“定性”设计技术规范。不同的加载模式（主动式、平衡式和被动式），性能指标是不同的。从设计方法到调试试验一系列技术，被动加载模式没有成熟资料可查，有的只是关于主动式加载或平衡式加载方面的图书文献。有关被动加载的论文，基本上是盲目照搬主动加载（或平衡加载）的理论在误导。

特别要强调：①建立广延时空环境，飞行高度的变化主要是通过改变力矩系数来体现的；②考虑舵偏角主动逆向动作对气动负载模拟器的耦合影响；③ N 个工况（分域）对应 N 种负载动特性，没有唯一守恒的“最佳”参数。

经典控制论认为：在频率响应法（系统对输入的稳态响应）中，只要我们在某一频率范围内改变输入信号的频率，并研究系统产生的频率响应，那么绝大多数惯用的方法（校正）对于工程师分析和设计控制系统是有效的。但是，它有前提条件：①既定系统稳定；②参考基准已知；③主动单向自治。舵面气动负载模拟器不具备这三个前提条件，因此，

照搬书本错了。

古典、现代和协调控制论三者比较，如表 1-1 所示。

表 1-1 古典、现代和协调控制论三者比较

理论名称	古典控制论	现代控制论	协调控制论
研究对象	单输入—单输出自治系统	多输入—多输出自治系统	若干性质不同的子系统组成大系统
分析重点	传递函数、校正补偿、平衡原理	传递矩阵，状态变量，跟踪精度	多变量协调关系式，解耦设计，流变
适用范围	线性定常、单向作用，主动提供功率，典型环节，无耦合	线性定常或非线性时变，单向作用，状态空间，快速响应	分域线性或非线性，时变不确定，逆向作用，多体强耦合，主体支配客体
系统性质	自治调节，封闭式，稳态系统	自治调节，半封闭式，稳态条件	宏观协调，时空开放，非稳态大系统
用途方法	绘制频域图，复频域法，求频带宽（试探法），PID 校正法	计算矩阵方程，时域法，求最佳指标，PID 校正法等	N 个工况有相应动态特性，多体“协调化”法，不可电校正
工作模式	输出跟踪输入指令为衡量基准	达到性能指标期望的最佳	遵循整体共同规律互动，非平衡力学
注意事项	典型环节确定，定量频带指标	状态变量确定，定量指标	在线气动力不确定，定性流变指标

三种（古典、现代、协调）控制理论都可以用小扰动线性化法，根据传递方块图和数学模型，进行定性分析和数值设计计算。不过，多关联强耦合负载模拟器的特殊要求是：其视角应从适应导弹动力学函数的协调区间范围内考虑。因为它与多个子系统之间是不可分割的整体。但气动力参数事先不确定，只能做小分域线性化定性论证，不同分域有不同的负载特性曲线。

协调控制论要回答的问题是：如何找到大系统支配各子系统行为特性并共同恪守适应总体性能要求的动力学函数协调关系，使这些子系统特性从宏观角度上形成统一的时间结构、空间结构和功能结构同步控制，在函数协调化区间内互动，实现大系统的总目标和总任务。这里，实质上是把不确定的流变气动力转化为全局数学模型协调关系来求解。因此，不允许负载模拟器“单干”，防止它的行为特性超出协调区间，导致动力学函数关系式无解。

现将表 1-1 提到的有关协调控制的基本概念进一步陈述。