

火炮现代设计理论与方法丛书

中国兵器科学研究院组织编写

# 火炮虚拟样机技术

杨国来 葛建立 陈 强 编著

HUOPAO XUNI YANGJI JISHU

兵器工业出版社

火炮现代设计理论与方法丛书

# 火炮虚拟样机技术

杨国来 葛建立 陈 强 编著

兵器工业出版社

## 内 容 简 介

全书以火炮虚拟样机技术为主线介绍火炮武器设计数字化的相关支撑理论与技术，为火炮武器的研制提供新的理念和技术手段。

本书是作者所在“火炮虚拟样机技术”课题组的研究成果结晶，侧重介绍在火炮武器设计过程中如何运用虚拟样机技术，可作为火炮武器研发部门从事产品设计及信息化的技术人员的参考读物，也可作为高等院校兵器专业研究生或高年级本科生的参考教材。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

火炮虚拟样机技术/杨国来, 葛建立, 陈强编著.

--北京: 兵器工业出版社, 2010.7

(火炮现代设计理论与方法丛书)

ISBN 978 - 7 - 80248 - 410 - 8

I. ①火… II. ①杨… ②葛… ③陈… III. ①火炮—  
设计—计算机仿真 IV. ①TJ302 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 092995 号

出版发行: 兵器工业出版社

发行电话: 010 - 68962596, 68962591

邮 编: 100089

社 址: 北京市海淀区车道沟 10 号

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市银祥福利印刷厂

版 次: 2010 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

责任编辑: 周宜今

封面设计: 李尘工作室

责任校对: 郭 芳

责任印制: 王京华

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 20

字 数: 387 千字

定 价: 50.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

# 序

我国的火炮设计理论教材经历了从无到有、从翻译到自编的漫长道路，目前已经形成了具有自主设计理论和方法的教材编撰体系，为火炮行业的发展提供了丰富的理论基础。随着科学技术的发展，火炮的技术内涵拓展成为集机械、电气、信息、控制等技术于一体的复杂系统。为了适应火炮技术的快速发展，满足火炮专业人才培养要求和从事火炮研究、开发、设计、管理的广大一线人员对火炮新结构、新原理、新方法的迫切需求，亟需出版一套火炮现代设计理论与方法丛书。

为此，中国兵器科学研究院火炮系统处组织国内部分高校、研究所和企业的火炮专家、学者，对火炮现代设计理论与方法丛书的编写内容和指导思想进行了研讨。为保证火炮现代设计理论与方法丛书的编写质量，聘请了一批学术造诣深、德高望重的火炮专家、学者担任设计丛书主审。

本套丛书构成一个整体，适于配套使用，又有各自的独立性；既是火炮专业教材，又可供火炮科研、设计和管理人员参考使用。本套丛书具有以下特色：

1. 全面更新和充实了火炮设计理论和方法，体现了当代火炮设计的水平。编著者深入到研究所、企业，与工程技术人员一起参加火炮的技术革新和攻关活动，广泛地收集资料，把国内外新火炮和主要部件的新原理、新结构和新设计理论与方法融入丛书。

2. 将火炮设计的理论水平推上一个新的高度。编著者把虚拟样机技术、多柔体系统动力学、非线性有限元分析、遗传优化、模糊控制、动态可靠性、现代传感技术等引入火炮研制，将传统的静态设计或类比设计改为基于火炮物理场精确建模分析的虚拟样机设计，有效地提高了火炮设计水平。

3. 火炮设计对象与时俱进。针对我国近几年火炮型号以履带式、轮式、车载式自行火炮为主的特点，重点介绍自行火炮设计的理论与方法，集理论的系统性、体系的科学性和工程的实用性于一体，进一步增强了设计丛书的时代感和先进性。

本套丛书将于2010年陆续出版。我们相信，本套丛书的出版将对我国火炮专业教学质量及火炮设计理论水平的提高产生积极作用，为我国火炮专门人才的培养和火炮武器装备的发展做出贡献。

中国兵器科学研究院火炮系统处

# 前 言

现代火炮与传统火炮相比，其技术内涵已发生了根本的变化，火炮已发展为一种机电液集成产品，火炮的结构组成和发射原理非常复杂，传统的火炮设计理论和研制手段已经难以胜任，而以虚拟样机为主体的产品数字化设计技术由于其独特的优点已受到航空航天、船舶、车辆、兵器等行业的广泛重视，在现代火炮设计中也初见端倪，必将成为我国未来先进火炮研发的重要技术手段之一。

利用火炮虚拟样机代替火炮实物样机对火炮进行设计、测试和评估，在缩短火炮研发周期、降低火炮研制成本、提高火炮的设计质量方面有着巨大作用。应用火炮虚拟样机技术，可以使火炮的论证人员、设计者、试验人员、使用者和制造者在火炮研制的早期，通过虚拟环境，直观形象地对虚拟的火炮进行设计优化、性能测试、制造和使用仿真，这对启迪设计创新、减少设计错误有着重要的意义。正由于此，美国、德国、法国、英国等西方先进的国家非常重视武器虚拟样机技术的研究，投入了大量的人力、物力和财力进行武器虚拟样机技术的基础研究和应用开发，在未来作战系统（FCS）、XM777等武器系统研发中得到了重要的应用，而我国在火炮虚拟样机技术方面的研究目前尚处于起步阶段。

本书系统阐述火炮虚拟样机技术的基本理论、建模方法及工程应用。全书共分6章。第1章简要地介绍当前我国火炮武器的设计理论、开发流程和技术手段，在分析其利弊的基础上引出火炮虚拟样机技术的产生背景、技术内涵和体系结构。第2章介绍火炮虚拟现实的基本概念、系统组成、建模技术以及在火炮研制中的应用等。第3章对火炮虚拟样机的数据库技术进行了阐述，包括数据库的设计、客户端数据库、分布式数据库、数据库的安全性等。第4章介绍火炮功能虚拟样机的理论与方法，重点阐述射击稳定性、炮口扰动、密集度、刚强度、瞬态冲击、总体结构参数优化等武器综合性能和功能的建模技术。第5章对常用的火炮虚拟样机建模软件进行了介绍，分别以ADAMS和ABAQUS为例介绍了火炮多体系统动力学和有限元的建模过程。第6章通过工程应用实例说明虚拟样机技术在火炮武器研发过程中的实用性和重要性，并指出真正实现火炮武器虚拟设计与虚拟试验所需解决的基础理论和关键技术。

本书由南京理工大学杨国来、葛建立和南京大学陈强合写。杨国来负责全书的

统稿及审校工作，并编写第1、3、4、5、6章，葛建立负责编写第4、5、6章的部分内容，陈强负责编写第2章以及第3、5、6章的部分内容。

本书由中国兵器工业第202研究所温波研究员主审。本书的编写得到了中国兵器科学研究院王玉林、于子平、马响、杨栋等同志的大力支持和帮助。在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中错误之处在所难免，敬请读者不吝指正。

**编者**

**2010年5月**

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 传统的火炮研制 .....	1
1.2 火炮虚拟样机技术的产生背景 .....	8
1.3 火炮虚拟样机技术的发展历程 .....	18
<b>第 2 章 火炮虚拟现实技术</b> .....	28
2.1 虚拟现实技术的产生背景 .....	28
2.2 虚拟现实的基本概念和特点 .....	31
2.3 虚拟现实系统的组成 .....	32
2.4 火炮虚拟现实的几何建模 .....	38
2.5 火炮虚拟场景建模 .....	49
2.6 火炮物理场可视化技术 .....	74
<b>第 3 章 火炮虚拟样机的数据库技术</b> .....	77
3.1 火炮数据库系统的总体概要设计 .....	77
3.2 火炮数据库的设计 .....	81
3.3 火炮数据库客户端的设计及实现 .....	88
3.4 火炮数据库的安全性 .....	98
3.5 分布式数据库技术在火炮虚拟样机中的应用 .....	104
<b>第 4 章 火炮功能虚拟样机建模技术</b> .....	112
4.1 基于多体系统动力学的火炮虚拟样机建模技术 .....	112
4.2 火炮射击密集度建模技术 .....	141
4.3 火炮总体结构参数灵敏度分析与优化匹配 .....	149
4.4 基于非线性有限元的火炮虚拟样机建模技术 .....	160
<b>第 5 章 火炮虚拟样机建模的典型商业软件</b> .....	195
5.1 引言 .....	195
5.2 ADAMS 简介 .....	212
5.3 Abaqus 软件简介 .....	232

<b>第 6 章 火炮虚拟样机技术的工程应用及技术挑战</b> .....	248
6.1 火炮射击稳定性与炮口扰动的建模仿真与设计分析 .....	249
6.2 火炮射击密集度仿真与分析 .....	258
6.3 火炮总体结构参数的优化设计 .....	272
6.4 火炮刚强度的建模仿真与设计分析 .....	284
6.5 火炮非线性有限元建模与分析 .....	291
6.6 火炮虚拟设计存在的问题和技术挑战 .....	301
<b>参考文献</b> .....	310



# 第 1 章 绪 论

传统的火炮设计理论主要以建立在静止、平面、刚性三大假设基础上的静态设计理论为主，但是由于火炮是一种复杂的机电液集成产品，其结构组成和发射原理非常复杂，传统的设计理论难以精确地描述火炮的各种物理场，因此现有的火炮研发本质上还是以试验为主，通过试验来检测火炮是否满足战技指标要求，一般需要经过设计—制造—试验的反复迭代过程，直到满足战技指标要求为止，这种研发模式具有研发周期长、投入成本高、研发效率低等缺点。进入 21 世纪以来，一方面高新技术战争对火炮的性能提出越来越高的要求，火炮系统越来越复杂；另一方面，世界各国普遍削减军费开支，缩短武器研制周期，降低武器研发费用。在这种双重压力下，传统的火炮研制流程和设计理论已经难以胜任，而以虚拟样机为主体的虚拟产品开发技术由于其独特的优点已受到航空航天、船舶、车辆、兵器等行业的广泛重视，在现代火炮设计中也初见端倪，必将成为我国未来先进火炮研发的重要技术手段之一。

本章简要地介绍当前我国火炮的设计理论、研制流程和技术手段，在分析其利弊的基础上引出火炮虚拟样机技术的产生背景、内涵及其发展历程。

## 1.1 传统的火炮研制

### 1.1.1 火炮设计理论与方法

从工程的角度，可以把火炮视为采用特殊能源的超强功率特种动力机械，即通过迅速燃烧火药，在瞬间产生大量高能量的火药气体推动弹丸高速飞行，因此火炮的工作环境比一般机械要恶劣得多，可概述如下：

(1) 高瞬态：弹丸发射过程极短（几毫秒至十几毫秒），因此反映火炮发射过程的膛内压力、温度、弹丸速度、运动件位移、速度、加速度、振动特性和响应、流场特征和声光效应、土壤动态特性等都经历时间短暂，大多在毫秒至微秒的时间段内转瞬即逝，这些高瞬态造成了火炮发射机理的复杂性。

(2) 强冲击：火炮与自动武器发射时产生的最大瞬态载荷可达几百吨，因此火

炮与自动武器发射时伴随着零部件间的剧烈冲击，并且由于撞击零件结构复杂、冲击时间极短、作用载荷极大以及撞击的随机性和间歇性等原因，使得火炮的冲击机理和设计方法研究要比普通机械复杂得多。

(3) 高速：火炮要求弹丸在瞬间被加速到  $200 \sim 2000\text{m/s}$  的高初速，使得弹丸及运动件的加速度非常大，弹丸直线加速度为  $10000 \sim 50000g$  ( $g$  为重力加速度)，火炮与自动武器零件的加速度为  $200 \sim 500g$ ，碰撞件加速度高达  $30000g$  以上。

(4) 高温、高压：火炮与自动武器发射时必须承受高温（发射药燃烧温度高达  $2500 \sim 3600\text{K}$ ）、高压（最大膛内压力高达  $250 \sim 700\text{MPa}$ ）等恶劣条件，因此高温和高压均对身管结构的动态强度和疲劳寿命等造成严重的影响，致使高膛压身管的寿命只有几百发。

(5) 高射频率：火炮的发射过程还以高射频率重复进行（每分钟最高可达  $6000$  次循环），瞬时功率极大。例如，一门  $85\text{mm}$  口径火炮的瞬时功率达  $326\text{MW}$ ，相当于一个小城市发电厂的功率；一门  $152\text{mm}$  口径火炮的瞬时功率约为  $940\text{MW}$ ，相当于一个中等城市发电厂的功率。

(6) 其他复杂环境：火炮发射过程还伴随发生许多复杂的物理化学现象，如内膛表面的烧蚀和磨损、膛口冲击波、膛口噪声、膛口焰等；火炮在使用中，还要能适应严寒酷暑、风沙淋雨环境，满足长期储存的要求。

火炮的上述特殊性决定了其设计理论与方法的研究要比普通机械产品复杂得多，主要包括：①火炮系统的组成与性能评价；②各种火炮发射原理、伴随现象及其物理规律；③火炮构成原理与方法；④火炮主要零部件的设计理论和设计方法。

火炮设计理论与方法的发展与人们对火炮发射机理的认识水平和掌握程度有着直接的关系，也取决于力学（含固体力学、流体力学、热力学、电磁力学）、数学、计算机技术、测试技术、系统论等的发展水平，总的发展趋势是由简单到复杂，由局部到整体，由以静态设计和类比设计为主的经典火炮设计理论与方法向逐步重视动态设计和系统设计的现代火炮设计理论与方法发展，而基于虚拟样机技术的火炮虚拟设计则是未来火炮设计理论与方法的发展趋势。

经典的火炮设计理论建立在刚性、平面、静止假设条件下对火炮发射过程进行运动和受力分析，在此基础上利用材料力学进行火炮主要零部件的设计。例如在进行全炮受力分析时，在射击平面内建立全炮的受力平衡方程，求出地面对驻锄、座钣或车轮的作用力；进行身管设计时，利用经典内弹道理论计算膛压，将身管简化为静压作用下的轴对称厚壁圆筒，用材料力学的方法分析其强度、应力疲劳等；在进行反后坐装置设计时，借助一维不可压稳态流理论和单自由度后坐运动微分方程求解后坐阻力（含驻退机和复进机力），利用材料力学对驻退机、复进机进行设计分析；在进行耳轴、摇架、齿弧、上架（炮塔）、下架与大架（车体或其他运动体）

设计时,利用受力平衡方程求解作用在这些零部件上的力(力矩),再利用材料力学进行设计;在进行自动机设计时,借助由传速比、传动效率构成的质量替换法,可以将问题转化为单自由度问题求解;在利用膛内燃气剩余能量时,燃气的流动和流出问题都是按一维准定常流处理的。经典的设计理论难以描述火炮发射时复杂的物理现象,因此在设计时需要引入符合系数(修正系数),并且相当程度上依赖于设计人员的工程经验,更需要大量的火炮试验来进行修改设计,需要通过反复的摸索,才能使火炮满足战术技术指标要求。

经典火炮设计理论和方法在20世纪60年代已趋于成熟,在我国火炮研制中已得到广泛的应用,积累了大量成功和失败的研制经验,形成了规范的火炮设计、制造和试验流程。然而,随着现代战场对火炮的射击精度、射程、机动性等性能指标的要求越来越高,火炮系统的功能、组成和发射原理日趋复杂,经典火炮设计理论受到了许多挑战,火炮设计逐步重视多体系统动力学、有限元、弹塑性力学、断裂力学、流体动力学、优化设计、计算机仿真、系统论等现代设计理论与方法的应用。例如,以多体系统动力学和有限元为基础的火炮发射动力学已成为火炮动态设计的支撑理论,通过建立考虑火炮空间运动、弹性变形、发射载荷、瞬态冲击等复杂因素的火炮发射动力学模型,借助高速度大容量的计算机求解火炮的动态特性,从火炮的结构特点和物理属性出发分析影响火炮射击精度、刚强度、射击稳定性等的主要因素,提出了许多火炮动力分析和动态设计的新理论、新方法;对身管的液压和机械挤扩等预应力强化过程进行弹塑性分析,改进了身管的自紧理论;用断裂力学理论研究身管材料强度和裂纹形成、扩展规律,预测它的低周疲劳寿命;在反后坐装置研究中,提出了轴对称二维定常和非定常湍流模型,用有限差分法详细分析了流液孔附近的流场并对各种情况下的阻力系数进行了理论探讨;火炮多体系统动力学与优化设计理论相融合的火炮总体结构参数优化与匹配也在火炮总体设计中得到初步应用。火炮动态设计理论与其他任何理论一样都需要经过大量的工程实践检验后才能落实到火炮设计准则与规范中,美国和苏联在这方面非常重视,设计专门的试验装置,结合具体的火炮工程研制,利用大量的试验来验证火炮发射动力学模型的正确性和可靠性,在此基础上将火炮发射动力学贯穿于火炮设计中,实现真正意义上的火炮动态设计,形成了现代火炮设计理论与方法。相比而言,我国的火炮设计与现代火炮设计理论与方法是相脱节的,主要原因有二:一是我国的火炮发射动力学研究主要集中在院校和研究所,火炮设计人员普遍不具备火炮发射动力学的知识背景,目前广为采用的还是经典火炮设计理论与方法;二是我国在火炮发射动力学模型的试验验证研究方面不够重视,缺乏大量的基础研究数据,使得火炮发射动力学难以在火炮设计中得到真正的工程应用。正是由于我国与世界先进国家在现代火炮设计理论与方法方面存在较大的差距,使得我国的火炮研发水平不高,

这在火炮工程研制中已得到了有力的证明。

进入 21 世纪以来,出现了一种基于虚拟样机的数字化设计方法——虚拟样机技术。采用虚拟样机可以代替物理样机对产品进行创新设计、测试和评估,缩短开发周期,降低开发成本,改进产品设计质量,提高面向客户和市场的的市场需求能力。虚拟样机技术已成为航空、航天、车辆、兵器等行业进行产品研发的重要技术手段,在火炮系统的研发中有着广阔的应用空间。

## 1.1.2 火炮研制流程

### 1.1.2.1 我国的火炮研制流程

我国的火炮研制,一般分为 5 个阶段:

#### 1. 论证阶段

论证阶段的主要工作是对战术技术指标进行论证,论证由使用部门组织有关部门论证。论证结束后,向相关领导机关上报附有论证报告的战术技术指标。战术技术指标经批准后,将作为型号研制立项的依据。

#### 2. 方案阶段

方案阶段的主要工作是论证功能组成、原理方案、方案设计、结构与布局等。方案论证,除理论计算和初步设计外,对关键技术或部件乃至整机,需要设计制造原理样机进行试验验证。从方案阶段开始,主要由工业部门负责。方案论证结果,落实到研制任务书的编制,上报主管领导机关,并经批准后,研制任务书即为设计、试制、试验、定型工作的依据。

#### 3. 工程研制阶段

工程研制阶段的主要工作是设计、试制、试验、鉴定等。工程研制阶段设计并制造出样机。通过工厂鉴定试验后,把遗留的问题逐一解决,并落实到设计定型样机的图纸资料上,并按定型要求制造出若干设计定型样机。

#### 4. 设计定型阶段

设计定型阶段的主要工作是通过试验和部队热区、寒区试用,全面考核新设计的火炮性能,确认所设计的新火炮样机是否达到研制任务书的要求。设计定型阶段包括设计定型试验及设计定型(鉴定)。

#### 5. 生产定型阶段

生产定型阶段的主要工作是对生产工艺、生产条件的考核和鉴定,以及试生产产品的试验鉴定和部队试用。生产定型阶段包括生产定型试验、试用及生产定型。

### 1.1.2.2 美国的火炮研制流程

美国的火炮研制过程,与我国的火炮研制阶段划分略有不同。美国的火炮研制过程一般分为以下 9 个阶段:

### 1. 基本概念、原理、技术研究阶段

为新型火炮研制或改造现役和旧式火炮而进行的新思想、新概念、新原理的探索研究，一般称为基础研究，目的是为火炮研制提供新的技术理论基础，通常以科学研究报告、论文或科技论著的形式提供给决策部门。

### 2. 通过开发，进入探索性发展阶段

进一步探索基础研究成果在火炮技术上应用的可行性、实用性的科学研究活动，从而为火炮研制提供专用技术基础，一般也叫应用研究，通常有可行性报告、试验报告、试验样品、原理样机等成果形式，为决策机关提供可采用的成熟技术信息。

### 3. 通过技术集成，进入先期技术演示阶段

开发供试验用的新技术项目多为火炮部件或分系统，并通过实物试验或演示，验证新技术项目在火炮武器系统研制中的可行性和经济性，这类研究一般属近期项目或可能具有型号研制背景的项目，但尚未进入型号研制阶段，是从“技术基础”通向武器型号研制的桥梁。

先期技术演示是先期技术发展阶段的核心任务，其目的是验证预研成果的成熟性、可行性和经济承受能力，保证向武器研制部门输送合格的产品。

### 4. 通过项目论证，进入型号研制阶段

依据火炮武器装备规划计划确定的研制项目或按计划程序批准的项目，由火炮使用部门组织有关单位，对火炮的作战使用性能和战术、技术指标进行论证，形成《战术技术指标》和论证报告，经上级主管部门审批后的《战术技术指标》是火炮型号研制的主要依据。

美国在火炮等武器装备研制中非常重视型号研制的论证工作，并认为，虽然型号论证工作的花费只占全寿命费用的2%，但是却影响着全寿命费用的70%以上，而且在论证中大量采用系统集成、虚拟样机技术和预实践等先进的技术和方法，通过综合权衡各种相关因素，从多种备选方案中选择最优匹配方案，并制定相应的规避研制风险的有效措施，对火炮的勤务使用和技术保障也有充分的考虑。

### 5. 通过工程化研究，进入先期发展样机研制阶段

研制部门依据批准的《战术技术指标》进行总体方案论证、方案设计、先期发展样机研制及相应的研究实验工作，对火炮武器系统的军事效益、全寿命费用、环境影响、安全性、适应能力和技术、后勤保障能力等进行全面评估。

### 6. 研制产品及设备

对火炮武器系统进行全面设计、试制和试验，包括火炮初样、试样的研制和试验；小批量和批量生产之前的准备工作；研制可供技术鉴定和考核用的试制火炮，提供逼近最终产品的火炮样机系统；编写与火炮实物相符的完整、准确的全套文件和资料，绘出全套图纸，为技术鉴定提高档案资料；制订技术、后勤保障计划。具

备设计定型条件后，由研制单位向定型管理机构提出设计定型试验申请报告。

### 7. 经产品试生产，进行定型试验鉴定

定型试验包括设计定型试验和生产定型试验。设计定型试验是对新研制产品和经过改进后战术技术性能有重大改变的已定型产品所进行的试验，以考核其性能和功能是否达到预定的战术技术指标。生产定型试验是对按设计定型图纸试生产的产品和引进图纸、资料仿制的产品所进行的试验，以考核其性能是否符合原设计定型的要求。

### 8. 批量生产，投放市场

批量生产在生产定型之后进行，依据生产定型文件、所选定的技术和工艺及完整的图纸资料组织生产，一般可分为制订生产计划、进行生产准备、零部件加工制造、总装、检验、交付部队或投放市场等过程。

### 9. 售后服务

售后服务主要包括技术培训、维修服务、技术质量跟踪和质量问题处理等内容。

#### 1.1.2.3 火炮设计流程

火炮设计工作一般可以分为设计阶段和试制试验阶段。设计阶段和试制试验阶段是人为划分的，两个阶段是相互联系、相互渗透的，不能绝对分开。设计阶段主要是提出生产所需的技术资料，主要包括方案设计、技术设计、产品图设计、工艺设计等。

火炮设计工作，可以具体分为：

#### 1. 设计准备

设计准备包括资料收集与整理、使用条件调查、生产条件调查等。

#### 2. 草图设计（方案设计）

草图设计是具体设计工作的开始，这个阶段的主要任务是根据战术技术指标要求，通过总体布置草图和性能计算（或预估），提出能够全面实现战术技术指标要求的切实可行的方案。草图设计的工作内容包括：对战术技术指标进行分析；弹道设计计算和试验；总体布置；重要零部件的设计计算和试验等。

#### 3. 技术设计

草图设计只解决了方案问题，也就是初步探讨了实现战术技术要求的可能性问题。要把可能变为现实，还必须进行更具体的设计、试制和试验工作。技术设计就是使方案进一步具体化。技术设计是在草图设计的基础上进行的，其主要任务是通过强度和工作性能计算，进一步决定各部件的结构尺寸和装配关系，精确估计各部分的质量，提出具体的措施。

#### 4. 产品图设计

技术设计提出的各种资料可以说明所设计产品的工作性能、结构和保证实现它们的技术措施，但不能满足产品试制的需要，这就需要进行产品图设计。产品图设

计是在技术设计的基础上,进一步充实、完善各种技术措施,对全部零件的制造和装配提出具体的要求,从而保证产品的性能。产品图设计所要提出的主要资料是全套产品图(包括零件图、组合件装配图、部件装配图和总装配图)以及试制所需的技术条件等。具体工作是根据技术设计提出的部件装配图绘制零件图,决定各零件的结构尺寸,对零件的强度进行补充计算或校核,决定零件的公差和表面粗糙度,对有互换性装配要求的零件进行公差分析,提出各种制造条件。

试制图纸不同于定型图纸。由于条件的限制,产品图纸设计完成的仅是试制图纸,不够全面和完善,还需经过历次试制和试验,发现问题,不断修改,同时补充生产所需的各种技术条件,达到基本完善后方能成为定型图纸。

### 5. 绘制火炮总装配图

当各部件的零件图和装配图全部完成,并经过设计和工艺审查后,总体设计人员即可绘制火炮总装配图。

#### 1.1.2.4 火炮试验流程

由于影响火炮工作性能的因素很复杂,因此完全采用理论计算的方法不可能设计出能全面满足战术技术要求的产品,故需要配合试验进行,以检验火炮的实际工作状态和性能指标。

火炮试验的主要目的是:检验火炮总体方案,考核所采用的关键技术,验证设计的技术和战术指标,鉴定火炮的作战性能,确定火炮的技术状态,规范火炮的相关标准,为决定是否可以批量生产提供基本结论,也是改进火炮结构、研究设计计算方法和取得设计数据等的主要方法。在整个火炮设计、试制和生产过程中,为了保证火炮的质量,往往要经过多次试验,对于新研制的火炮,由设计到定型,一般需要进行原理样炮试验、初样炮试验、正样炮试验、设计定型试验、生产定型试验和部队试验等。

### 1.1.3 火炮研制中的瓶颈问题

我国火炮的研制经历了仿制、改进、自主开发三个主要阶段,在火炮的基础研究、开发应用研究以及装备化方面已经取得了令人瞩目的成就,但是同国际先进水平相比,还存在很大差距,主要包括:①火炮设计理论与开发技术手段相对落后,火炮设计水平和研发效率难以提高;②火炮制造工艺和技术装备陈旧落后,优质高效低耗工艺的普及率不及20%,精密设备不足15%,严重影响了火炮企业的生产效率和火炮质量的提高;③管理水平相对落后。

尽管制约我国火炮研制水平提高的因素有很多,但火炮设计环节已成为一致公认的瓶颈问题,主要不足表现如下:

(1) 上游研制环节很难考虑下游研制环节中的技术问题,例如设计阶段对火炮

的可制造性、可维修性考虑不足；

(2) 火炮设计以静态设计和类比设计为主，设计质量的优劣取决于工程人员的设计经验；

(3) 火炮不同领域设计人员之间交流的信息因跨学科、不直观等原因难以沟通；

(4) 难以做到火炮总体设计方案的优化与匹配，难以从全系统的角度出发进行火炮总体设计与评估，火炮设计方案的评定难以定性定量；

(5) 设计人员的创造性设计或新原理、新结构、新方法需要实物样机验证，研制风险大；

(6) 在排查火炮试验中暴露的问题时普遍具有盲目性，有时候即使解决了试验中出现的问题，但对问题产生的机理及实质并没有正确的认识，需要反复的“试错”，造成研制周期长；

(7) 设计阶段难以考虑人机工程学因素，如操作空间、操作强度、舒适性等；

(8) 现有的火炮性能仿真模型主要对火炮的某项性能或功能进行仿真，难以模拟人与真实物理样机之间的自然交互，并且现有的火炮性能仿真主要是火炮设计方案确定后进行的，未能达到通过仿真模型的演变来推动火炮设计的演变。

解决上述瓶颈问题的有效技术途径之一就是在火炮研制中尽快引入虚拟样机。

## 1.2 火炮虚拟样机技术的产生背景

虚拟样机技术 (Virtual Prototyping, VP) 是近十几年来产生的一种新型的产品设计和过程开发的方法。利用虚拟样机技术建立的虚拟样机模型包含了产品全寿命周期设计的信息，主要包括物理样机的几何信息、材料信息和供仿真分析的数学模型信息，这种模型实际上是一种设计—分析一体化的模型，可分析和评估系统的性能，从而为物理样机的设计和制造提供参考依据，实现产品设计的优化，最大限度地降低研制成本。

近年来，虚拟样机技术及其应用已获得重大进展，已具备处理日益复杂的工程问题的能力，被广泛地应用在汽车、工程机械、航空航天等不同领域中。虚拟样机技术在武器装备的研制过程中同样也得到了应用，例如美国 TACOM (Army Tank - automotive & Armaments Command) 提出利用虚拟样机技术支持 3200 多种武器系统的研制，认为虚拟样机技术使武器系统的设计更具有灵活性，设计人员和使用方根据武器系统的虚拟样机可以在物理样机制造之前全面掌握武器系统的各种综合性能和潜在的各种问题，提出设计变更和设计反馈，减少设计失误和大量的实物试验验证，从而大大缩短研制周期和节约经费投入，有效提高研制质量。



## 1.2.1 军事背景

### 1.2.1.1 火炮在武器装备中的重要性

现代火炮是指利用火药在身管内膛燃烧形成高压气体来推动弹丸运动的一种武器。作为传统的作战武器，火炮具有射程远、威力大、精度好、效费比高、持续战斗力强、抗干扰性能强、全天候作战等特点，因而火炮是当今世界各国军队装备数量最多、使用最频繁的武器系统之一。在历史上的诸多战役中，尤其是第二次世界大战中，火炮武器在战争中发挥了决定性的作用。在高新技术兵器迅猛发展的今天，火炮武器仍将协同其他武器系统，成为战场上消灭敌人的主要火力之一。21世纪以来，高新技术兵器的大量应用改变了战争的模式，高新技术战争的初期大量使用飞机、电子装备和精确制导武器，使战争成果显著，但是在战争后期的直接对抗中，火炮与自动武器不仅是战斗行动的保障，而且仍将是最终占领阵地和夺取战斗胜利的主要武器。未来战争在空中、海上、地面、水下共同组成的装备体制中，火炮仍然是不可替代的。第一，地面战仍将是不可避免的，火炮、火箭炮、枪械在几十米到几万米的距离内构成地空配套、梯次衔接、大小互补、点面结合的火力网，很少出现火力盲区，而且可能发展成为未来战争中拦截中低空入侵导弹和近程反导的有效手段之一；第二，火炮武器是部队装备的重要武器之一，占兵力60%~70%的陆军，更是以火炮为主要的武器装备，这种格局今后仍将继续下去；第三，火炮武器机动性良好，进入、撤出和转移阵地快捷，火力转移灵活，生存能力和抗干扰能力强，能够伴随其他兵种作战，实施不间断的火力支援；第四，火炮武器的经济性良好，无论是火炮武器的研究、工程开发、生产装备，还是后勤保障，其全寿命周期总费用都永远低于其他技术兵器。由此可见，火炮武器仍是今后继续大力发展的重要武器装备。

### 1.2.1.2 未来火炮的发展趋势以及对研制方法的要求

20世纪90年代中后期，以美国为代表的欧美发达国家提出了数字化战场的概念，以实现所谓智能化、快速部署的透明战争为目标，进行了一系列包括指挥控制、武器装备、部队结构等方面的全面调整，近年来，更进一步提出了遥控作战、无人作战以及机器人武器平台等概念。美军在阿富汗、伊拉克等地的作战行动中，已经大量使用了遥控武器系统，并试验性地开展了遥控武器的实战行动。可以预见的将来，在战场上可能根本看不到一个人影，而作战的实施，将主要依靠高度智能化的武器。在未来的战场上，火炮武器将仍然是主要的武器装备之一，在提高动能、精度和操作控制自动化程度的基础上，需要进一步改善机动能力、增强自身防护能力、提高生存能力、实现数字化和自主作战功能，并向智能化方向发展。未来的火炮远非传统意义上的“身管+架体”的概念，而是以机械化、自动化、信息化和智能化