

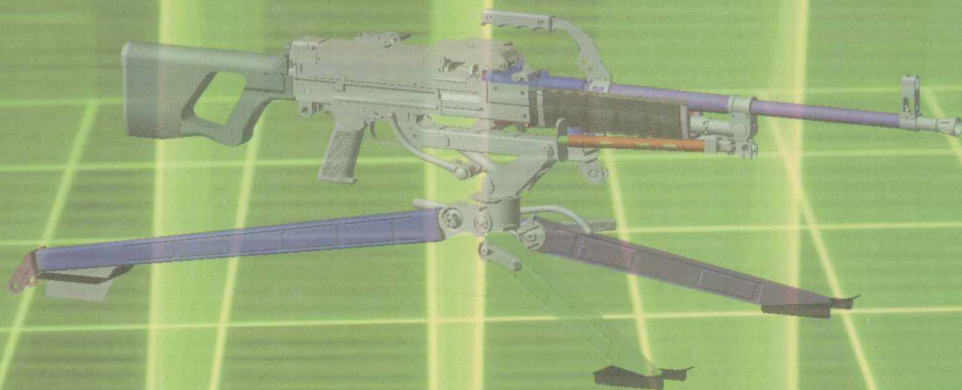


国防科技图书出版基金

Modeling Technology and
Application of Small
Arms Based on Virtual Prototype

基于虚拟样机的轻武器 建模技术及应用

王瑞林 李永建 张军娜 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

基于虚拟样机的轻武器 建模技术及应用

**Modeling Technology and Application of
Small Arms Based on Virtual Prototype**

王瑞林 李永建 张军娜

著

藏书



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

基于虚拟样机的轻武器建模技术及应用/王瑞林,李永建,张军挪著. —北京:国防工业出版社,2014. 1

ISBN 978-7-118-09245-5

I. ①基... II. ①王... ②李... ③张... III. ①轻武器-计算机仿真-研究 IV. ①TJ203-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第002903号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

*

开本710×1000 1/16 印张16 $\frac{1}{4}$ 字数316千字

2014年1月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价76.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜				
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新		
秘书长	杨崇新				
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳			
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书	
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利	
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣	
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力	
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军	
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起	
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南	
	傅惠民	魏炳波			

前 言

任何技术的进步都存在一定的规律性,是随着人们认识的深化而逐步发展起来的,从而为大家所熟悉而得到广泛应用。虚拟样机技术(Virtual Prototyping Technology)的发展也是如此,它是基于计算机技术的不断进步而发展起来的一门应用技术,它的发展分为三个阶段。第一阶段是依托平台渐进发展,它是依托计算机硬件和三维造型软件平台而起步的。第二阶段是依托专业化软件快速发展,专业化软件使人们构造物理样机的数字化模型更加方便。例如,自从将美国 MDI 公司的 ADAMS(Automated Dynamic Analysis of Mechanical System)软件引入我国以后,虚拟样机技术在机械领域的应用得到迅速发展。第三阶段应该是虚拟样机成熟应用的阶段。目前这一阶段并没到来,主要原因是虚拟样机建模与仿真技术是一门综合技术,它在某一专业领域的系统运用离不开深厚的专业基础和力学根底,如何构建各种实用的虚拟样机模型来解决工程实践问题是工程技术人员非常期待的,这需要专业人士来进行推动。作者著作本书的目的就是要适应这一时代的发展需求,推动虚拟样机技术在武器行业的系统应用。

开始接触虚拟样机技术是在 2001 年,当年本院武器仿真实验室引进了美国 MDI 公司的 ADAMS 软件(2005 年进行了用户版本升级),2003 年便开始指导研究生开展虚拟样机在轻武器领域的应用研究。在此之前,南京理工大学的徐诚老师已在该领域开展了一些工作,并有相关论文发表,他们团队的工作重点是构建轻武器虚拟设计平台,构造新型轻武器概念模型和结构方案,研究目标宏大。自那时起,便思考能不能将我国现役轻武器建成虚拟样机群,将所有国内外名枪均构建成虚拟样机,使之既能在计算机上实现动作演示,又能进行运动学和动力学的性能分析,以作为行业分析和借鉴的平台。著作本书就是希望给轻武器及其相关领域的工程技术人员提供一本参考书,指导他们如何构建武器的虚拟样机,并基于虚拟样机来建立各种实用的计算模型,拓展虚拟样机的应用领域和服务对象。

本书以轻武器为应用对象,探讨了轻武器虚拟样机的建模技术与方法,讨论了模型建立过程中的共性问题,构建了若干典型轻武器的系统虚拟样机模型和应用模型,并在轻武器机构运动学、发射动力学、结构动力学、结构参数优化等领

域进行了广泛的实践应用研究,应用示例涉及轻武器论证、研制、型号改进、训练使用、维修保障的各个方面。

本书共分9章:第1章介绍虚拟样机技术方面的理论基础和软/硬件知识,作为本书阅读的基础;第2章将虚拟样机技术和典型轻武器结合起来,讨论了虚拟样机建模的方法步骤及其共性问题,建立针对手枪、自动步枪、通用机枪、重机枪、高射机枪、榴弹发射器等各种典型轻武器的虚拟样机,作为后续各章的基础;第3章~第6章是本书的应用篇,分别讨论了虚拟样机技术在轻武器自动机动力学、人枪系统发射动力学、机枪系统结构动力学、轻武器结构参数优化等领域中的应用,深入讨论了虚拟样机与SIMULINK、LIFEMOD软件、有限元方法、优化设计方法等如何有效结合的诸多问题,并给出了大量的应用实例;第7章讨论了基于虚拟样机平台的维修保障分析,为使用和保障轻武器的部队官兵和技术人员提供借鉴参考;第8章是虚拟样机技术应用前景展望,基于本书尚未实现的目标,讨论了拓展和深化虚拟样机应用领域的若干问题。

本书第1章、第3章、第8章由王瑞林执笔,第2章、第6章由张军挪执笔,第4章、第5章、第7章由李永建执笔。全书由王瑞林统稿。

本书是作者多年科研成果的积淀,作者在完成科研任务的同时,依托项目指导了若干博士和硕士研究生毕业,书中除了李永建、张军挪两位参著者的研究成果以外,还引用了张本军、陈明、陈锦喜、李鹏博士论文和王宇建、张本军、张高明、储俊、杨晓玉硕士论文中的一些算例和论述。他们的出色工作丰富了本书的内容,为此对他们表示感谢。北京理工大学朵英贤院士审核了本书的部分初稿,并提出了很有益的指导意见,特此致谢。

虚拟样机技术是近年来在国防科技领域得到充分重视和广泛应用的技术领域,处在方兴未艾的阶段,限于笔者学识水平,书中难免存在不完善的地方,恳请广大读者批评指正。

王瑞林

2013年12月

目 录

第 1 章 虚拟样机技术概述	1
1.1 虚拟样机技术的概念	1
1.2 虚拟样机技术的形成和发展	2
1.3 虚拟样机技术的特点及相关软件	3
1.3.1 虚拟样机技术的特点	3
1.3.2 虚拟样机技术的相关软件	4
1.4 虚拟样机技术的工程应用	6
1.5 虚拟样机技术的理论基础	7
1.5.1 基本概念	8
1.5.2 ADAMS 多刚体动力学方程	9
1.5.3 ADAMS 柔性多体系统动力学方程	11
参考文献	12
第 2 章 典型轻武器虚拟样机模型的构建	13
2.1 建立虚拟样机模型的一般步骤	13
2.1.1 三维实体建模	14
2.1.2 子系统关联模型	14
2.1.3 CAD 三维模型导入 ADAMS	15
2.2 建立虚拟样机模型的共性问题	16
2.2.1 约束关系的处理	16
2.2.2 作用力的处理	16
2.2.3 约束副和载荷的添加	17
2.2.4 模型的验证	19
2.3 典型轻武器装备虚拟样机模型的建立	20
2.3.1 某型手枪虚拟样机模型的建立	20
2.3.2 某型步枪虚拟样机模型的建立	24
2.3.3 某型狙击步枪虚拟样机模型的建立	29
2.3.4 某型通用机枪虚拟样机模型的建立	32
2.3.5 某型重机枪虚拟样机模型的建立	37
2.3.6 某型高射机枪虚拟样机模型的建立	39

2.3.7 某型自动榴弹发射器虚拟样机模型的建立	43
参考文献	45
第3章 基于虚拟样机模型的自动机运动分析	46
3.1 概述	46
3.2 自动机运动虚拟样机模型求解	47
3.2.1 自动原理和自动机工作循环图	47
3.2.2 自动机约束关系模型	49
3.2.3 自动机系统虚拟样机建模	51
3.2.4 自动机运动仿真分析	57
3.2.5 仿真计算结果精度分析	61
3.3 自动机运动 Simulink 模型求解	62
3.3.1 Simulink 简介	62
3.3.2 自动机模型的 Simulink 描述	63
3.3.3 自动机 Simulink 模型的求解	69
参考文献	73
第4章 基于虚拟样机模型的人枪发射动力学分析	74
4.1 人体模型的建立	75
4.1.1 概述	75
4.1.2 LifeMod 软件简介	76
4.1.3 人体环节的建立	77
4.1.4 关节模型的建立	79
4.1.5 肌肉模型的建立	81
4.2 人枪系统发射动力学模型的建立	82
4.2.1 人体各关节角度的求解	82
4.2.2 人枪之间相互关系的处理	85
4.2.3 人枪模型与地面之间相互关系的处理	86
4.3 人枪系统虚拟样机的建立	86
4.3.1 手枪系统人枪模型的建立	86
4.3.2 步枪多刚体人枪系统模型的建立	87
4.3.3 机枪系统人枪模型的建立	90
4.4 发射过程中人体的动力学响应	91
4.4.1 人枪接触位置处受力响应	91
4.4.2 身体关节受力响应	91
4.5 人体对射击精度的影响	92
4.5.1 跪姿单手无依托人枪系统的建立	92
4.5.2 立姿双手无依托人枪系统的建立	93

4.5.3 不同射击姿态对射击稳定性的影响·····	94
4.6 人机工效分析·····	95
4.6.1 人体肌肉模型·····	95
4.6.2 卧姿首发装填时人枪系统模型·····	96
4.6.3 拨弹滑板受力的求解·····	96
4.6.4 仿真结果与分析·····	104
参考文献·····	105
第5章 基于虚拟样机的结构动力学分析·····	107
5.1 动态稳定性原理·····	108
5.1.1 动态稳定性分析模型·····	108
5.1.2 动态稳定性影响因素分析·····	111
5.1.3 机枪动力学设计原则·····	112
5.2 结构动力学分析基本理论·····	113
5.2.1 有限元基本理论·····	113
5.2.2 试验模态分析基本理论·····	117
5.3 结构动力学试验研究·····	120
5.3.1 试验模态分析·····	120
5.3.2 动态响应测量·····	123
5.4 基于有限元的机枪结构动力学分析·····	125
5.4.1 机枪支撑系统分析模型·····	125
5.4.2 有限元分析一般流程·····	138
5.4.3 某型通用机枪动力学仿真分析·····	142
5.4.4 某型重机枪动力学仿真分析·····	147
5.4.5 某型高射机枪动力学仿真分析·····	151
5.5 刚柔耦合虚拟样机的动力学分析·····	152
5.5.1 ADAMS 中使用柔性体的过程·····	152
5.5.2 架腿柔性化·····	153
5.5.3 几种典型轻武器刚柔耦合模型的建立·····	154
5.5.4 动态响应分析·····	155
参考文献·····	157
第6章 基于虚拟样机技术的结构参数优化·····	158
6.1 基于 ADAMS 的结构参数优化方法和步骤·····	158
6.1.1 基于 ADAMS 的结构参数优化简介·····	158
6.1.2 参数优化分析的一般步骤·····	160
6.2 全局参数优化方法及其应用·····	162
6.2.1 全局参数优化方法简介·····	162

6.2.2	某型自动手枪减后坐模型全局参数优化	168
6.2.3	某型大口径狙击步枪精度模型全局参数优化	172
6.3	部件结构参数优化	175
6.3.1	自动机结构参数优化	176
6.3.2	液压缓冲器结构参数优化	183
6.3.3	枪架结构参数优化	188
	参考文献	205
第7章	基于虚拟样机平台的维修保障分析	206
7.1	基于虚拟样机的故障仿真研究	207
7.1.1	基于虚拟样机的故障仿真过程及功能	207
7.1.2	故障注入技术	209
7.1.3	某型 5.8mm 通用机枪常见故障仿真	211
7.2	基于虚拟样机的极限尺寸确定方法	215
7.2.1	正确确定修理规格的意义	215
7.2.2	极限尺寸与修理规格的关系	216
7.2.3	极限尺寸确定的依据	216
7.2.4	极限尺寸确定的方法	217
7.2.5	基于虚拟样机的极限尺寸确定方法	217
7.2.6	某型 5.8mm 通用机枪极限尺寸的分析	218
7.3	虚拟样机在维修训练中的应用	219
7.3.1	虚拟现实与维修	220
7.3.2	虚拟维修样机	222
7.3.3	虚拟维修平台规划	222
7.3.4	基于虚拟样机的轻武器虚拟维修系统	225
	参考文献	229
第8章	虚拟样机技术应用前景展望	230
8.1	构建完备的轻武器虚拟样机群	230
8.2	建立轻武器协同建模与仿真平台	232
8.3	拓展和深化虚拟样机的应用领域	235
8.4	虚拟样机技术发展展望	238
	参考文献	239

Contents

Chapter 1 Overview of Virtual Prototype Technology	1
1.1 The concept of virtual prototype technology	1
1.2 The formation and development of virtual prototype technology	2
1.3 The characteristics of the virtual prototype technology and related software	3
1.3.1 The characteristics of the virtual prototype technology	3
1.3.2 Related software of the virtual prototype technology	4
1.4 The engineering application of virtual prototype technology	6
1.5 The theoretical foundation of the virtual prototype technology	7
1.5.1 The basic concept	8
1.5.2 Multi-rigid-body dynamics equation of ADAMS	9
1.5.3 Flexible multi-body system dynamics equation of ADAMS	11
Reference	12
Chapter 2 Model construction of virtual prototype of typical small arms ...	13
2.1 General steps of modeling virtual prototype	13
2.1.1 Three-dimensional solid modeling	14
2.1.2 Subsystem relationship modeling	14
2.1.3 Importing 3-D CAD model into ADAMS	15
2.2 Common problems of virtual prototype modeling	16
2.2.1 The processing of constraint relations	16
2.2.2 The processing of force	16
2.2.3 Adding of constraint and load	17
2.2.4 The validation of model	19
2.3 Virtual prototype modeling of typical small arms equipment	20
2.3.1 Virtual prototype modeling of a certain pistol	20
2.3.2 Virtual prototype modeling of a certain rifle	24
2.3.3 Virtual prototype modeling of a certain sniper rifle	29
2.3.4 Virtual prototype modeling of a certain general-purpose machine gun	32

2.3.5	Virtual prototype modeling of a certain heavy machine gun	37
2.3.6	Virtual prototype modeling of a certain antiaircraft machine gun	39
2.3.7	Virtual prototype modeling of a certain automatic grenade launcher	43
	Reference	45
Chapter 3 Analysis of automaton movement based on virtual prototype model		
3.1	Overview	46
3.2	Automaton movement solving with virtual prototype model	47
3.2.1	Automaton principle and automatic working cycle diagram	47
3.2.2	Automata constraint relation model	49
3.2.3	Virtual prototype modeling of automation system	51
3.2.4	Simulation analysis of automaton movement	57
3.2.5	Accuracy analysis of simulation calculating results	61
3.3	Automaton movement solving with Simulink	62
3.3.1	Brief introduction to Simulink	62
3.3.2	Description of automata model with Simulink	63
3.3.3	Solution of automata Simulink model	69
	Reference	73
Chapter 4 Man-Gun launch dynamics analysis based on virtual prototype model		
4.1	Establishment of the human body model	75
4.1.1	Overview	75
4.1.2	Brief introduction to software LifeMod	76
4.1.3	Establishment of the human body part	77
4.1.4	Establishment of the joint model	79
4.1.5	Establishment of the muscle model	81
4.2	Establishment of Man-Gun system launch dynamic model	82
4.2.1	Solution of human body joint angle	82
4.2.2	Dealing with contact between man and gun	85
4.2.3	Dealing with relationship between Man-Gun model and ground	86
4.3	Establishment of Man-Gun system virtual prototype	86
4.3.1	Man-Gun modeling of pistol system	86

4.3.2	Multi-rigid-body Man-Gun system modeling of rifle	87
4.3.3	Man-Gun modeling of machine gun system	90
4.4	Body dynamic response in the firing process	91
4.4.1	Stress response on the contacting position of man and gun ...	91
4.4.2	Stress response of body joint	91
4.5	Influence of human body on firing accuracy	92
4.5.1	Establishment of Man-Gun system of one-hand kneeling fire without rest	92
4.5.2	Establishment of Man-Gun system of two-hand standing fire without rest	93
4.5.3	Influence of different firing postures on shooting stability	94
4.6	Analysis of man-Machine efficacy	95
4.6.1	Human body muscle model	95
4.6.2	Man-Gun system model of first-round loading in prone position	96
4.6.3	Stress solution of belt feed slide	96
4.6.4	Simulation result and analysis	104
	Reference	105
Chapter 5	Structural dynamics analysis based on virtual prototype	107
5.1	The principle of dynamic stability	108
5.1.1	Dynamic stability analysis model	108
5.1.2	Analysis of dynamic stability influencing factors	111
5.1.3	Dynamics design criteria of machine gun	112
5.2	Basic theories of structural dynamics analysis	113
5.2.1	The basic theory of finite element	113
5.2.2	The basic theory of experimental modal analysis	117
5.3	Experimental study of structural dynamics	120
5.3.1	Experimental modal analysis	120
5.3.2	Dynamic response measurement	123
5.4	Structural dynamics analysis of machine gun based on finite element	125
5.4.1	Analysis model of machine gun supporting system	125
5.4.2	The general process of finite element analysis	138
5.4.3	Dynamic simulation analysis of a certain general-purpose machine gun	142

5.4.4	Dynamic simulation analysis of a certain heavy machine gun	147
5.4.5	Dynamic simulation analysis of a certain antiaircraft machine gun	151
5.5	Dynamics analysis of rigid-flexible coupling virtual prototype	152
5.5.1	Process of using flexible body in ADAMS	152
5.5.2	Softening of frame leg	153
5.5.3	Construction of rigid-flexible coupling model of several typical small arms	154
5.5.4	Dynamic response analysis	155
Reference		157
Chapter 6	Structural parameters optimization based on virtual prototype technology	158
6.1	Methods and steps of structural parameters optimization based on ADAMS	158
6.1.1	Brief introduction to structural parameters optimization based on ADAMS	158
6.1.2	General steps of parameters optimization analysis	160
6.2	Method and application of global parameters optimization	162
6.2.1	Brief introduction to global parameters optimization method	162
6.2.2	Global parameters optimization of a certain automatic pistol reducing recoil model	168
6.2.3	Global parameters optimization of a certain large caliber sniper rifle accuracy model	172
6.3	Parameters optimization of part structure	175
6.3.1	Parameters optimization of automata structure	176
6.3.2	Parameters optimization of hydraulic buffer structure	183
6.3.3	Parameters optimization of frame structure	188
Reference		205
Chapter 7	Maintenance support analysis based on virtual prototype platform	206
7.1	Fault simulation study based on virtual prototype	207
7.1.1	Fault simulation process and function based on virtual prototype	207

7.1.2	Fault injection technique	209
7.1.3	Common fault simulation of a certain 5.8mm general-purpose machine gun	211
7.2	Method for determining the limit size based on virtual prototype ...	215
7.2.1	The significance of determining the appropriate repair specifications	215
7.2.2	Relationship between limit size and repair specifications ...	216
7.2.3	Basis of determining limit size	216
7.2.4	Method of determining limit size	217
7.2.5	Method of determining limit size based on virtual prototype	217
7.2.6	Analysis of limit size of a certain 5.8mm general-purpose machine gun	218
7.3	Application of virtual prototype in maintenance training	219
7.3.1	Virtual reality and maintenance	220
7.3.2	Virtualization of maintenance prototype	222
7.3.3	Planning of virtual maintenance platform	222
7.3.4	Virtual maintenance system of small arms based on virtual prototype	225
Reference		229
Chapter 8	Application prospect of virtual prototype technology	230
8.1	Building a complete virtual prototype fleet of small arms	230
8.2	Building the collaborative modeling and simulation platform for small arms	232
8.3	Expanding and deepening the application of virtual prototype	235
8.4	Development prospect of virtual prototype technology	238
Reference		239

第 1 章 虚拟样机技术概述

虚拟样机技术(Virtual Prototype Technology)是当前设计制造领域的一门新技术,涉及多体系统动力学、计算方法与软件工程等学科。它通过计算机软件建立机械系统的三维实体模型和力学模型,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合理的参数依据。

1.1 虚拟样机技术的概念

虚拟样机技术又称机械系统动态仿真技术,它是通过在计算机上建立虚拟样机模型进行动态仿真,得到其工作过程中的相关特性,依此来评价和改进设计方案的新技术。在传统的产品开发过程中,一般需要制造物理样机来验证设计方案的正确与否,往往花费大量的时间和成本,而虚拟样机技术摒弃了传统的设计方法,利用虚拟样机来代替真实的物理模型,它能像真实物理模型一样,对产品的全寿命周期,如设计、制造、服务、循环利用等,进行展示、分析、测试等一系列的研究,实现人机交互^[1]。

虚拟样机有两种说法:Virtual Prototype 和 Virtual Prototyping。前者是相对于物理样机而言,是利用计算机仿真技术建立的存在于计算机中的参数化模型,用来取代物理样机进行评估和测试,以候选设计方案特性的等效数字模型,它能反映最终产品的外观、结构、动力学和运动学等相关特性;后者是指利用虚拟样机技术对一个系统方案设计进行测试和评估的过程。目前所指的虚拟样机技术包含上面两种提法,简称 VP^[2]。

虚拟样机技术是机械工程领域内的一门新兴技术,围绕产品的概念设计、定型生产到整个产品的研发周期,再从设计师、决策层、制造商、销售商到用户群等全方位的观察和研究产品,虚拟样机技术都显示出强大的优势和发展潜力,尤其在重点机械投资领域、样机引进项目方面和国民经济的骨干行业等都有很大的发展应用空间。