



# 制导兵器气动布局 与气动特性

Aerodynamic Configuration  
and Characteristics of Guided Weapons

吴甲生 雷娟棉 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

制导兵器气动布局与气动特性 / 吴甲生, 雷娟棉编著.

北京: 国防工业出版社, 2008.1

ISBN 978-7-118-05350-0

I. 制... II. ①吴... ②雷... III. 制导兵器-气体动力学  
IV. TJO11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 134916 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 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850 × 1168 1/32 印张 15 字数 382 千字

2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 53.00 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

## 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 第五届评审委员会组成人员

- 主任委员 刘成海
- 副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬
- 秘 书 长 程洪彬
- 副 秘 书 长 彭华良 蔡 镛
- 委 员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参  
(按姓氏笔画排序)
- 李德毅 杨星豪 吴有生 何新贵
- 佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元
- 陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明
- 常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民
- 舒长胜
- 本书主审委员 崔尔杰

## 前 言

制导兵器包括反坦克导弹、末制导/末敏弹、制导航空炸弹、炮射导弹、便携式防空导弹、直升机载空地导弹、简易制导火箭等,它们是现代高技术条件下战争中使用量最大的战术武器。由于发动机特性、目标特性、战斗部特性、弹道特性、发射方式、增程方式、制导方式、控制方式不同,使得制导兵器种类繁多,外形五花八门,飞行弹道多种多样,速度范围宽,攻角范围大,因此制导兵器的外形布局和气动特性与其他战术导弹既有相同之处,又有很大差别。编著本书的目的就是为了给从事制导兵器气动设计和气动特性研究的技术人员提供一本参考书。此外,该书对从事制导兵器总体设计、弹道设计、控制系统设计人员,以及主管部门的技术管理人员,高等院校有关专业的教师和研究生也有参考价值。

书稿由于本水院士和杨其德研究员评阅和推荐。于本水院士是我国从事防空导弹总体设计的著名专家,他从总体高度对书稿提出了许多宝贵意见和建议。杨其德研究员从事飞机、战术弹气动设计40余年,有很深的造诣和丰富的经验,他对书稿提出了许多宝贵的建议和具体的修改意见。书稿送交国防科技图书出版基金评审委员会评审之前,兵器行业空气动力学专家苗瑞生教授对书稿进行了仔细的审阅和修改,提出了许多中肯的修改意见。三位专家的审阅对提高书稿的质量起到了重要作用,对于他们的辛勤劳动、热情指导和帮助表示诚挚的感谢!

著作要有作者的研究成果,它们取材于作者及其合作者——苗瑞生教授、居贤铭教授、徐文灿教授、徐文熙副教授、蒋厚洸副教

授及其研究生的研究报告、学位论文和刊物论文,大部分是第一次在专著中出现,因此将面临使用者的检验。作者热切地希望和欢迎使用者就书中某些提法的严谨性、分析问题的合理性、结果和结论的准确性等提出宝贵意见。

本书内容共13章。第一章,绪论,简述了制导兵器气动布局研究中的几个关系问题;第二章,制导兵器气动布局;第三章,制导兵器气动增程技术;第四章,飞行器的旋转空气动力效应;第五章,特种部件的气动特性;第六章,弹箭的气动弹性;第七章,子母弹抛撒分离的气动干扰;第八章,横向喷流对制导兵器气动特性的影响;第九章,制导兵器雷达隐身技术;第十章,鸭式布局导弹滚转控制耦合与解耦;第十一章,尾翼稳定无控旋转弹的运动稳定性;第十二章,兵器空气动力学近似方法;第十三章,制导兵器特种风洞实验技术。第三、四、五、七、十、十三章是本书的重点,作者及合作者的研究成果主要体现在这6章中。

由于作者的水平有限,书中的缺点和错误在所难免,恳请读者不吝指正。

吴甲生 雷娟棉

2007年2月

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第一章 绪论 .....                    | 1  |
| 1.1 制导兵器气动布局与气动特性的研究内容与意义 ..... | 1  |
| 1.2 制导兵器气动外形设计中的几个关系 .....      | 2  |
| 1.3 制导兵器气动外形设计的步骤 .....         | 5  |
| 1.4 制导兵器对某些气动特性的要求 .....        | 7  |
| 第二章 制导兵器气动布局 .....              | 8  |
| 2.1 概述 .....                    | 8  |
| 2.2 制导兵器气动布局 .....              | 8  |
| 2.2.1 翼面沿弹身周向布置形式 .....         | 9  |
| 2.2.2 翼面沿弹身轴向配置形式与性能特点 .....    | 10 |
| 2.3 制导兵器典型气动布局 .....            | 18 |
| 2.3.1 反坦克导弹的典型气动布局 .....        | 18 |
| 2.3.2 制导航空炸弹的典型气动布局 .....       | 21 |
| 2.3.3 末制导炮弹的典型气动布局 .....        | 24 |
| 2.4 制导兵器新型气动布局 .....            | 30 |
| 2.4.1 反坦克导弹的新型气动布局 .....        | 30 |
| 2.4.2 制导航空炸弹的新型气动布局 .....       | 31 |
| 2.4.3 末制导子弹的新型气动布局 .....        | 32 |
| 2.5 制导兵器气动布局发展趋势及有关的气动力技术 ..... | 33 |
| 第三章 制导兵器气动增程技术 .....            | 36 |
| 3.1 兵器飞行器的外形特点和飞行特点 .....       | 36 |

|            |                                  |            |
|------------|----------------------------------|------------|
| 3.1.1      | 兵器飞行器的外形特点 .....                 | 36         |
| 3.1.2      | 兵器飞行器的飞行特点 .....                 | 36         |
| 3.2        | 气动增程技术 .....                     | 37         |
| 3.2.1      | 增程途径 .....                       | 37         |
| 3.2.2      | 滑翔增程技术 .....                     | 38         |
| 3.2.3      | 减阻增程技术 .....                     | 50         |
| <b>第四章</b> | <b>飞行器的旋转空气动力效应 .....</b>        | <b>58</b>  |
| 4.1        | 概述 .....                         | 58         |
| 4.2        | 旋转空气动力效应机理 .....                 | 60         |
| 4.3        | 弹身旋转空气动力效应的扰动分析方法 .....          | 66         |
| 4.4        | 翼面旋转空气动力效应的工程计算 .....            | 82         |
| 4.5        | 尾翼旋转空气动力效应的工程计算 .....            | 95         |
| 4.6        | 翼身尾组合体旋转空气动力效应的工程计算 .....        | 99         |
| <b>第五章</b> | <b>特种部件的气动特性 .....</b>           | <b>101</b> |
| 5.1        | 多片翼布局弹箭的气动特性 .....               | 101        |
| 5.1.1      | 多片尾翼弹箭气动布局及应用实例 .....            | 101        |
| 5.1.2      | 多片尾翼布局弹箭气动特性实验研究 .....           | 104        |
| 5.1.3      | 气动特性数值计算及与实验结果的比较 .....          | 110        |
| 5.1.4      | 多片弹翼布局及应用实例 .....                | 118        |
| 5.1.5      | 多片弹翼布局导弹的气动特性 .....              | 120        |
| 5.2        | 非圆截面弹身的气动特性 .....                | 123        |
| 5.2.1      | 概述 .....                         | 123        |
| 5.2.2      | 绕旋成体大攻角流动的法向力和<br>俯仰力矩 .....     | 123        |
| 5.2.3      | 沿纵轴截面积不变的非圆截面弹身<br>气动特性表达式 ..... | 128        |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 5.2.4 | 各种横截面形状 $\left(\frac{C_n}{C_{no}}\right)_{SB}$ 、 $\left(\frac{C_n}{C_{no}}\right)_{Nt}$<br>的计算公式 ..... | 129 |
| 5.3   | 卷弧翼的气动特性 .....   | 139 |
| 5.3.1 | 概述 .....   | 139 |
| 5.3.2 | 气动布局与几何特性 .....  | 141 |
| 5.3.3 | 卷弧翼的纵向、滚转气动特性 .....  | 146 |
| 5.3.4 | 减小无控卷弧形尾翼火箭弹锥形<br>运动的措施 .....  | 153 |
| 5.4   | 格栅翼的气动特性 .....   | 155 |
| 5.4.1 | 概述 .....   | 155 |
| 5.4.2 | 格栅翼气动特性数值计算结果 .....  | 158 |
| 5.4.3 | 亚声速 ( $Ma < Ma_{cr1}$ ) 格栅翼升力、阻力的<br>工程计算 .....  | 163 |
| 5.5   | 激光制导航空炸弹风标式导引头失调角 .....  | 169 |
| 5.5.1 | 激光制导航空炸弹风标头结构 .....  | 169 |
| 5.5.2 | 风标头失调角定义 .....   | 170 |
| 5.5.3 | 风标头失调角流场数值模拟结果 .....   | 171 |
| 5.5.4 | 风标头失调角风洞测量 .....   | 172 |
| 第六章   | 弹箭的气动弹性 .....  | 176 |
| 6.1   | 概述 .....   | 176 |
| 6.2   | 尾翼的气动弹性 .....  | 177 |
| 6.2.1 | 尾翼弯曲变形对纵向静稳定性的影响 .....   | 177 |
| 6.2.2 | 尾翼扭转变形对纵向静稳定性的影响 .....   | 178 |
| 6.2.3 | 尾翼的颤振 .....  | 179 |
| 6.3   | 细长旋转弹身的气动弹性 .....  | 186 |
| 6.3.1 | 细长弹身弯曲变形对纵向静<br>稳定性的影响 .....   | 186 |

|            |                               |            |
|------------|-------------------------------|------------|
| 6.3.2      | 旋转弹身的气动弹性 .....               | 188        |
| <b>第七章</b> | <b>子弹抛撒分离的气动干扰 .....</b>      | <b>207</b> |
| 7.1        | 概述 .....                      | 207        |
| 7.2        | 数值模拟 .....                    | 212        |
| 7.3        | 火箭弹子弹母战斗部抛撒分离多体流场数值模拟 .....   | 214        |
| 7.4        | 子弹气动力—弹道一体化计算 .....           | 230        |
| <b>第八章</b> | <b>横向喷流对制导兵器气动特性的影响 .....</b> | <b>238</b> |
| 8.1        | 横向喷流干扰流场结构 .....              | 238        |
| 8.2        | 横向喷流干扰流场数值模拟 .....            | 239        |
| 8.2.1      | 控制方程和边界条件 .....               | 239        |
| 8.2.2      | 数值方法 .....                    | 243        |
| 8.2.3      | 重叠网格技术 .....                  | 245        |
| 8.3        | 数值模拟结果与分析 .....               | 246        |
| 8.3.1      | 流场结构 .....                    | 246        |
| 8.3.2      | 横向喷流对翼面的影响 .....              | 254        |
| 8.3.3      | 喷流马赫数的影响 .....                | 256        |
| 8.4        | 横向喷流对导弹气动特性的影响 .....          | 257        |
| <b>第九章</b> | <b>制导兵器雷达隐身技术 .....</b>       | <b>260</b> |
| 9.1        | 概述 .....                      | 260        |
| 9.2        | 雷达隐身 .....                    | 262        |
| 9.3        | 高频散射机理 .....                  | 264        |
| 9.4        | 雷达截面计算方法 .....                | 267        |
| 9.5        | 雷达截面测量 .....                  | 275        |
| 9.6        | 雷达截面减缩技术 .....                | 283        |
| <b>第十章</b> | <b>鸭式布局导弹滚转控制耦合与解耦 .....</b>  | <b>288</b> |
| 10.1       | 固定尾翼鸭式布局导弹的气动耦合 .....         | 288        |

|             |   |            |
|-------------|---|------------|
| 10.1.1      | 滚转控制耦合 .....                            | 288        |
| 10.1.2      | 交叉耦合 .....                              | 290        |
| 10.2        | 自由旋转尾翼的气动解耦 .....                       | 291        |
| 10.2.1      | 滚转控制解耦 .....                            | 291        |
| 10.2.2      | 交叉解耦 .....                              | 294        |
| <b>第十一章</b> | <b>尾翼稳定无控旋转弹的运动稳定性 .....</b>            | <b>296</b> |
| 11.1        | 实例 .....                                | 296        |
| 11.2        | 李雅谱诺夫稳定性 .....                          | 298        |
| 11.3        | 弹箭飞行稳定性 .....                           | 299        |
| 11.4        | 尾翼稳定低速旋转弹箭运动不稳定的表现形式 .....              | 306        |
| <b>第十二章</b> | <b>兵器空气动力学近似方法 .....</b>                | <b>309</b> |
| 12.1        | 概述 .....                                | 309        |
| 12.2        | 空气动力学的部件组合法 .....                       | 310        |
| 12.3        | 线化理论 .....                              | 312        |
| 12.4        | 细长旋成体超声速绕流的一级近似 .....                   | 316        |
| 12.5        | 范·戴克混合理论 .....                          | 319        |
| 12.6        | 升力面理论 .....                             | 325        |
| 12.7        | 压缩性修正 .....                             | 328        |
| 12.7.1      | 戈泰特法则 (Gothert Rule) .....              | 329        |
| 12.7.2      | 普朗特—葛劳涅法则 (Prandtl-Glauert Rule) .....  | 331        |
| 12.8        | 超声速三维薄翼理论 (TDTWT) .....                 | 332        |
| 12.8.1      | 轴向波阻 .....                              | 332        |
| 12.8.2      | 弹翼载荷、法向力和压心 .....                       | 338        |
| 12.9        | 滚转阻尼力矩 .....                            | 344        |
| 12.9.1      | 亚声速流动 ( $Ma_\infty < Ma_{crit}$ ) ..... | 344        |
| 12.9.2      | 超声速流动 ( $Ma_\infty \geq 1.2$ ) .....    | 345        |

|             |                                     |            |
|-------------|-------------------------------------|------------|
| 12.10       | 俯仰阻尼力矩 .....                        | 348        |
| 12.10.1     | 亚声速流动 ( $Ma_{\infty} < 0.8$ ) ..... | 349        |
| 12.10.2     | 超声速流动 ( $Ma_{\infty} > 1.2$ ) ..... | 351        |
| 12.11       | 气动干扰效应 .....                        | 356        |
| 12.11.1     | 弹翼—弹身干扰 .....                       | 357        |
| 12.11.2     | 弹翼—尾翼干扰 .....                       | 361        |
| 12.12       | 摩擦阻力计算 .....                        | 367        |
| 12.13       | 当地斜率法 .....                         | 370        |
| 12.13.1     | 切楔法 .....                           | 370        |
| 12.13.2     | 切锥法 .....                           | 373        |
| 12.14       | 激波—膨胀波理论 .....                      | 377        |
| 12.15       | 牛顿理论 .....                          | 383        |
| 12.15.1     | 牛顿流理论模型 .....                       | 383        |
| 12.15.2     | 修正牛顿理论 .....                        | 385        |
| 12.16       | 范·戴克混合理论与修正牛顿理论的组合 .....            | 389        |
| 12.17       | 二阶激波—膨胀波理论与修正牛顿理论的组合 .....          | 392        |
| 12.18       | 空气动力学中的某些经验方法 .....                 | 396        |
| 12.18.1     | 跨声速波阻 .....                         | 397        |
| 12.18.2     | 黏性分离及弹带阻力 .....                     | 401        |
| 12.18.3     | $Ma_{\infty} < 1.2$ 时单独弹身的法向力 ..... | 402        |
| 12.18.4     | 跨声速单独弹翼的法向力 .....                   | 405        |
| 12.18.5     | 底部阻力 .....                          | 408        |
| <b>第十三章</b> | <b>制导兵器特种风洞实验技术 .....</b>           | <b>416</b> |
| 13.1        | 飞行器的旋转空气动力效应风洞实验 .....              | 416        |
| 13.1.1      | 实验特点 .....                          | 416        |
| 13.1.2      | 相似条件 .....                          | 416        |
| 13.1.3      | 对风洞流场品质的要求 .....                    | 418        |
| 13.1.4      | 模型结构与设计 .....                       | 420        |

|             |                              |     |
|-------------|------------------------------|-----|
| 13.1.5      | 测试设备 .....                   | 427 |
| 13.1.6      | 数据处理及准确度 .....               | 429 |
| 13.2        | 旋转—俯仰阻尼导数风洞实验 .....          | 432 |
| 13.2.1      | 实验原理 .....                   | 432 |
| 13.2.2      | 对模型设计的特殊要求 .....             | 434 |
| 13.2.3      | 典型实验结果 .....                 | 436 |
| 13.3        | 自由滚转及滚转阻尼导数风洞实验 .....        | 437 |
| 13.3.1      | 实验原理 .....                   | 437 |
| 13.3.2      | 典型实验结果 .....                 | 437 |
| 13.4        | 子母弹气动干扰风洞实验 .....            | 438 |
| 13.4.1      | 子弹(束)后向抛入底部流场的<br>风洞实验 ..... | 438 |
| 13.4.2      | 子弹下抛风洞实验 .....               | 444 |
| <b>参考文献</b> | .....                        | 449 |

# Contents

|  |    |
|--|----|
| <b>Chapter 1 Preface</b> .....   | 1  |
| 1.1 Content and Significance of Guided Weapon's<br>Aerodynamic Configuration and Characteristics ..... | 1  |
| 1.2 Some Relations in Guided Weapon's Aerodynamic<br>Configuration Design .....                        | 2  |
| 1.3 Steps of Guided Weapon's Aerodynamic<br>Configuration Design .....                                 | 5  |
| 1.4 Some Aerodynamic Characteristics Demands of<br>Guided Weapon .....                                 | 7  |
| <b>Chapter 2 Aerodynamic Configuration of Guided<br/>Weapons</b> .....                                 | 8  |
| 2.1 Summary .....  | 8  |
| 2.2 Aerodynamic Configuration of Guided Weapons .....  | 8  |
| 2.2.1 Wing Layout along Circumference of<br>Body .....   | 9  |
| 2.2.2 Wing Layout along Axis of Body and the<br>Characteristics .....                                  | 10 |
| 2.3 Typical Aerodynamic Configuration of Guided<br>Weapons .....                                       | 18 |
| 2.3.1 Typical Aerodynamic Configuration of<br>Anti - Tank Missiles .....                               | 18 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 2.3.2 | Typical Aerodynamic Configuration of Guided Aerial Bombs .....   | 21 |
| 2.3.3 | Typical Aerodynamic Configuration of Terminal Guided Projectiles .....                                     | 24 |
| 2.4   | New – Style Aerodynamic Configuration of Guided Weapons .....  | 30 |
| 2.4.1 | New – Style Aerodynamic Configuration of Anti – Tank Missiles .....  | 30 |
| 2.4.2 | New – Style Aerodynamic Configuration of Guided Aerial Bombs .....   | 31 |
| 2.4.3 | New – Style Aerodynamic Configuration of Terminal Guided Submunition .....                                 | 32 |
| 2.5   | Development Trend of Aerodynamic Configuration of Guided Weapons and Relevant Aerodynamic Techniques ..... | 33 |

### **Chapter 3 Aerodynamic Extended Range Technique of Guided Weapons .....**

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.1   | Configuration and Flight Characteristics of Flying Weapons ..... | 36 |
| 3.1.1 | Configuration Characteristics of Flying Weapons .....            | 36 |
| 3.1.2 | Flight Characteristics of Flying Weapons .....                   | 36 |
| 3.2   | Aerodynamic Extended Range Techniques .....                      | 37 |
| 3.2.1 | Range – Extended Methods .....                                   | 37 |
| 3.2.2 | Gliding Extended Range Technique .....                           | 38 |
| 3.2.3 | Drag Reduction Extended Range Technique .....                    | 50 |