



航天科工出版基金资助出版



# 旋转导弹 飞行动力学与控制

高庆丰 编著



中国宇航出版社

航天科工出版基金资助出版

# 旋转导弹飞行动力学与控制

高庆丰 编著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

旋转导弹飞行动力学与控制 / 高庆丰编著. —北京:  
中国宇航出版社, 2016. 6

ISBN 978 - 7 - 5159 - 1112 - 0

I. ①旋… II. ①高… III. ①旋转导弹—飞行力学  
IV. ①TJ761. 9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 100098 号

责任编辑 彭晨光

责任校对 祝延萍

封面设计 宇星文化

出版

发行 **中国宇航出版社**

社址 北京市阜成路 8 号

(010)60286808

邮编 100830

(010)68768548

网址 [www.caphbook.com](http://www.caphbook.com)

经销 新华书店

发行部 (010)60286888

(010)60286887

(010)68371900

(010)60286804(传真)

零售店 读者服务部

(010)68371105

承印 北京画中国画印刷有限公司

版次 2016 年 6 月第 1 版

规格 880 × 1230

印张 7.875

书号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 1112 - 0

定价 98.00 元

2016 年 6 月第 1 次印刷

开本 1/32

字数 212 千字

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

## 序 一

旋转导弹具有组成简单、制造公差影响小和成本低等优点。自旋技术最早应用于炮弹和火箭弹，后来用于反坦克导弹和便携式防空导弹。目前，旋转弹体制已应用到防空反导导弹、制导兵器 and 再入飞行器等多类武器。

旋转导弹经过了几十年的发展，随着其应用范围的不断拓展，关于旋转导弹飞行动力学与控制的理论和方法也得到了新的发展。该书主编一直从事旋转导弹的科研工作，具有深厚的理论基础和丰富的工程经验，带领团队历经十多年的研究，取得了一定的成果。在此基础上参考国内外的文献编写了这本书，以期系统总结和反映这一领域国内外的研究成果。该书的出版对于促进我国旋转导弹飞行动力学与控制的研究很有意义。

由于弹体的旋转导致其飞行动力学模型与传统的倾斜稳定导弹不同。该书系统总结了三类旋转导弹飞行动力学模型，提出了通用旋转导弹弹体动态稳定性判据，推导了旋转导弹弹体的状态方程、传递函数及弹体弹性固有频率，形成了比较完整的旋转导弹飞行动力学理论体系。传统的旋转导弹均不采用过载自动驾驶仪，将过载自动驾驶仪应用于旋转导弹具有重要的创新性，该书提出了两回路和三回路过载自动驾驶仪在旋转导弹上的应用。另外，全捷联导引头和相位干涉仪仅可测得弹目视线角，无法测得弹目视线角速度，该书给出了采用全捷联导引头和相位干涉仪旋转导弹的比例导引制导律。

该书对从事旋转导弹总体设计、制导控制系统设计的科研人员能够提供有实用价值的参考；同时也可作为高等院校教师、研究生和高年级学生的参考资料。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters, likely '陈永' (Chen Yong).

2016年2月

## 序 二

旋转弹是指在飞行过程中弹体以一定的转速绕自身纵轴旋转的一类飞行器。由于旋转弹的诸多优点，旋转弹体制获得广泛应用。而由于弹体旋转会导致旋转导弹的飞行动力学特性、控制理论与方法等方面与倾斜稳定导弹不同，因此，研究和发​​展旋转导弹的飞行动力学和控制理论具有重要的理论价值，对推动旋转导弹的发展具有重要意义。

对于早期指令制导的反坦克旋转导弹，其飞行高度大致恒定，且多具有续航发动机，因此导弹速度变化不大，即被控对象参数变化不大，再加上目标速度不高，制导回路的响应速度不需要很快，这就决定了这类反坦克旋转导弹大部分不需采用过载自动驾驶仪。然而，随着旋转导弹应用范围的不断拓展，为了解决导弹的静稳定度小时马格努斯力矩影响大以及稳定控制回路的增益等问题，有将过载自动驾驶仪应用于旋转导弹的工程需求。该书针对这一需求，对过载自动驾驶仪应用于旋转导弹这一课题开展了全面的研究工作。针对旋转导弹的动不平衡和惯性器件的安装误差，研究了其对速率陀螺和加速度计输出的影响并提出了补偿方法，为过载自动驾驶仪应用于旋转导弹奠定了基础。推导了弹体坐标系下旋转导弹弹体弹性固有频率表达式，为旋转导弹结构陷波滤波器的设计提供了理论依据。通过弹体坐标系和非弹体坐标系之间的旋转变换，设计了两回路和三回路过载自动驾驶仪。与传统的反坦克旋转导弹相比，以上研究工作具有创新性。

该书主编十多年来一直从事旋转导弹的科研工作，书中呈现了他长期的工作积累和创新性成果。希望该书的出版能够为推动旋转导弹飞行动力学与控制理论的进一步研究和发展做出贡献。

Handwritten signature in black ink, reading '魏明英' (Wei Mingying).

2016年2月

# 前 言

旋转导弹体制最早应用于炮弹和火箭弹，后来用于反坦克导弹和便携式防空导弹，其应用范围越来越广泛。目前，旋转导弹体制已发展出防空反导导弹、坦克炮射制导导弹、末制导炮弹、动能反坦克导弹、简易制导火箭和再入飞行器等多种制导武器。

军事需求的不断变化以及旋转导弹应用范围的不断拓展，要求旋转导弹具备远射程、高精度等特点，但上述要求会给旋转导弹的设计带来一些新的问题。本书专门针对旋转导弹，系统地归纳总结了国内外旋转导弹飞行动力学与控制的相关理论。同时，本书紧密结合旋转导弹的发展及工程实践，对旋转导弹弹体弹性特性、惯性器件的应用、自动驾驶仪的设计和制导规律的实现等相关专题进行了系统而深入的阐述，具有针对性强、特色鲜明、内容自成体系等特点，以及很强的工程实用性。

本书作者从硕士研究生时期开始，十多年来一直研究和跟踪旋转导弹飞行动力学与控制技术的发展，并取得了一定的成果。本书是作者在多年从事旋转导弹研究工作，并吸纳国内外同行优秀成果的基础上完成的。

全书共分 11 章。第 1 章为绪论。第 2 章至第 5 章为旋转导弹飞行动力学相关内容：第 2 章为旋转导弹飞行动力学模型，第 3 章为旋转导弹弹体的动态稳定性，第 4 章为旋转导弹弹体的状态方程和传递函数，第 5 章为旋转导弹弹体的弹性特性。第 6 章至第 11 章为旋转导弹控制的相关内容：第 6 章为旋转导弹动不平衡和安装误差对惯性器件输出的影响及补偿，第 7 章为空气舵控制旋转导弹两回路过载自动驾驶仪的旋转变换，第 8 章为单通道空气舵控制旋转导



弹两回路过载自动驾驶仪设计，第9章为双通道空气舵控制旋转导弹三回路过载自动驾驶仪设计，第10章为旋转导弹全捷联导引头比例导引制导律，第11章为旋转导弹相位于涉仪比例导引制导律。

本书由高庆丰编著，第1章、第3章、第4章、第6章、第8章和第10章由高庆丰撰写，第2章由高庆丰、袁耀撰写，第5章由李衡撰写，第7章由陈罗婧撰写，第9章由许超撰写，第11章由高庆丰、郭涛撰写。全书由高庆丰统稿，袁耀、许超校对。

中国工程院于本水院士和航天科工集团二院首席专家魏明英研究员在百忙之中抽出宝贵时间为本书作序，在此致以诚挚的谢意。

在本书撰写过程中，阅读和参考了大量的文献资料，在此对所有参考文献的作者表示诚挚的谢意。

感谢北京理工大学青年教师王辉博士后在本书完成过程中的帮助，感谢航天科工集团二院二部王晓东高工、姜虹高工、陈晓岚高工和刘艳高工在本书完成过程中的帮助。

感谢航天科工出版基金和航天科工集团二院二部资助本书出版。

感谢本书责任编辑在本书出版过程中付出的辛勤劳动。

由于作者水平所限，书中难免存在错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

高庆丰

2015年9月6日于北京

# 目 录

第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 旋转导弹的发展 .....	1
1.2 旋转导弹的应用现状 .....	2
1.2.1 在防空反导导弹领域的应用现状 .....	2
1.2.2 在制导兵器领域的应用现状 .....	7
1.2.3 在再入飞行器领域的应用现状 .....	13
1.3 本书的主要内容 .....	15
参考文献 .....	18
第 2 章 旋转导弹飞行动力学模型 .....	19
2.1 引言 .....	19
2.2 三类模型中通用坐标系及通用角度的定义 .....	19
2.2.1 通用坐标系的定义 .....	20
2.2.2 通用角度的定义 .....	20
2.3 坐标系之间的旋转变换及矢量导数关系 .....	21
2.3.1 坐标系之间的旋转变换 .....	21
2.3.2 坐标系之间的矢量导数关系 .....	22
2.4 基于弹体坐标系的飞行动力学模型 .....	23
2.4.1 引入新的坐标系定义 .....	23
2.4.2 引入新的角度定义 .....	24
2.4.3 坐标系之间的关系 .....	24
2.4.4 角度的计算公式 .....	24

2.4.5	导弹质心运动的微分方程 .....	27
2.4.6	导弹绕质心转动的微分方程 .....	32
2.5	基于准弹体坐标系的飞行动力学模型 .....	35
2.5.1	引入新的坐标系定义 .....	35
2.5.2	引入新的角度定义 .....	36
2.5.3	坐标系之间的关系 .....	37
2.5.4	角度的计算公式 .....	37
2.5.5	导弹质心运动的微分方程 .....	39
2.5.6	导弹绕质心转动的微分方程 .....	44
2.6	基于非旋弹体坐标系的飞行动力学模型 .....	47
2.6.1	引入新的坐标系定义 .....	47
2.6.2	引入新的角度定义 .....	50
2.6.3	坐标系之间的关系 .....	50
2.6.4	角度的计算公式 .....	51
2.6.5	导弹质心运动的微分方程 .....	53
2.6.6	导弹绕质心转动的微分方程 .....	58
2.7	三类模型的对比 .....	61
2.7.1	在使用上的对比 .....	61
2.7.2	在形式上的对比 .....	61
2.8	MATLAB 在坐标转换矩阵与几何关系方程推导中的 应用 .....	61
2.8.1	在坐标转换矩阵推导中的应用 .....	62
2.8.2	在几何关系方程推导中的应用 .....	63
2.9	本章小结 .....	69
参考文献 .....		71
<b>第3章 旋转导弹弹体的动态稳定性 .....</b>		<b>73</b>
3.1	引言 .....	73

3.2 面对称旋转导弹弹体角运动模型 .....	73
3.3 轴对称旋转导弹弹体角运动模型 .....	81
3.4 旋转导弹弹体动态稳定性判据 .....	82
3.5 本章小结 .....	84
参考文献 .....	86
<b>第4章 旋转导弹弹体的状态方程和传递函数 .....</b>	<b>87</b>
4.1 引言 .....	87
4.2 旋转导弹在弹体坐标系下弹体的状态方程 .....	87
4.3 旋转导弹在弹体坐标系下弹体的传递函数 .....	89
4.3.1 双通道空气舵控制旋转导弹 .....	89
4.3.2 单通道空气舵控制旋转导弹 .....	93
4.3.3 姿控发动机控制旋转导弹 .....	97
4.4 旋转导弹在非旋弹体坐标系下弹体的状态方程 .....	99
4.4.1 双通道空气舵控制旋转导弹 .....	99
4.4.2 单通道空气舵控制旋转导弹 .....	100
4.4.3 姿控发动机控制旋转导弹 .....	102
4.5 旋转导弹在非旋弹体坐标系下弹体的传递函数 .....	103
4.5.1 双通道空气舵控制旋转导弹 .....	103
4.5.2 单通道空气舵控制旋转导弹 .....	105
4.5.3 姿控发动机控制旋转导弹 .....	107
4.6 旋转导弹弹体角运动辨识理论 .....	110
4.7 本章小结 .....	112
参考文献 .....	113
<b>第5章 旋转导弹弹体的弹性特性 .....</b>	<b>114</b>
5.1 引言 .....	114
5.2 旋转导弹挠性变形方程 .....	114
5.3 旋转导弹弹体弹性固有频率 .....	119

5.4 本章小结 .....	121
参考文献 .....	122
<b>第 6 章 旋转导弹动不平衡和安装误差对惯性器件输出的影响及补偿 .....</b>	<b>123</b>
6.1 引言 .....	123
6.2 坐标系和角度的定义 .....	123
6.3 弹体动不平衡和安装误差对惯性器件测量结果的影响 .....	124
6.3.1 弹体动不平衡和安装误差对速率陀螺仪测量结果的影响 .....	125
6.3.2 弹体动不平衡和安装误差对加速度计测量结果的影响 .....	126
6.4 数学仿真与分析 .....	131
6.5 补偿方法 .....	132
6.6 本章小结 .....	137
参考文献 .....	138
<b>第 7 章 空气舵控制旋转导弹两回路过载自动驾驶仪的旋转变换 .....</b>	<b>139</b>
7.1 引言 .....	139
7.2 双通道空气舵控制旋转导弹两回路过载自动驾驶仪的旋转变换 .....	139
7.2.1 自动驾驶仪的结构 .....	139
7.2.2 自动驾驶仪回路的旋转变换 .....	140
7.2.3 与倾斜稳定导弹两回路过载自动驾驶仪的对比 .....	146
7.2.4 数学仿真验证 .....	148
7.3 单通道空气舵控制旋转导弹两回路过载自动驾驶仪的旋转变换 .....	150
7.3.1 自动驾驶仪的结构 .....	150

7.3.2 自动驾驶仪回路的旋转变换 .....	151
7.3.3 与倾斜稳定导弹两回路过载自动驾驶仪的对比 .....	158
7.3.4 自动驾驶仪回路的简化 .....	160
7.3.5 数学仿真验证 .....	160
7.4 双通道和单通道空气舵控制旋转导弹两回路自动驾驶仪 的快速性对比 .....	163
7.5 本章小结 .....	163
参考文献 .....	164
<b>第 8 章 单通道空气舵控制旋转导弹两回路过载自动驾驶仪设计</b> .....	165
8.1 引言 .....	165
8.2 单通道空气舵控制旋转导弹采用两回路过载自动驾驶仪 的必要性 .....	165
8.3 单通道空气舵控制旋转导弹两回路过载自动驾驶仪的耦 合性分析 .....	169
8.4 单通道空气舵控制旋转导弹两回路过载自动驾驶仪的初 步设计 .....	169
8.5 单通道空气舵控制旋转导弹两回路过载自动驾驶仪的解 耦设计 .....	171
8.5.1 串联补偿法解耦 .....	171
8.5.2 前馈补偿法解耦 .....	176
8.5.3 两种解耦方法对比 .....	180
8.6 本章小结 .....	181
参考文献 .....	182
<b>第 9 章 双通道空气舵控制旋转导弹三回路过载自动驾驶仪设计</b> .....	183
9.1 引言 .....	183

9.2	双通道控制方式的优势分析 .....	183
9.3	三回路过载自动驾驶仪的实现 .....	186
9.4	三回路过载自动驾驶仪参数的确定方法 .....	190
9.4.1	自动驾驶仪结构的简化 .....	190
9.4.2	频域解析法 .....	192
9.4.3	极点配置法 .....	196
9.4.4	设计结果 .....	198
9.5	本章小结 .....	200
<b>参考文献</b> .....		201
<b>第 10 章 旋转导弹全捷联导引头比例导引制导律</b> .....		202
10.1	引言 .....	202
10.2	坐标系的定义 .....	203
10.3	各坐标系之间的关系 .....	203
10.4	视线角的计算公式 .....	205
10.5	比例导引制导律的实现 .....	206
10.6	本章小结 .....	209
<b>参考文献</b> .....		210
<b>第 11 章 旋转导弹相位干涉仪比例导引制导律</b> .....		211
11.1	引言 .....	211
11.2	相位干涉仪实现比例导引制导律原理 .....	211
11.3	坐标系的定义 .....	212
11.4	各坐标系之间的关系 .....	213
11.5	相位干涉仪的测角原理 .....	215
11.5.1	单平面下相位干涉仪的角度测量 .....	215
11.5.2	导弹旋转条件下相位干涉仪的角度测量 .....	216
11.6	动力陀螺导引头的原理及组成 .....	220
11.7	相位干涉仪实现比例导引制导律方法 .....	221

---

11.7.1 动力陀螺外框架角的确定 .....	221
11.7.2 弹目视线与动力陀螺转子轴的误差角 .....	223
11.7.3 数学仿真与分析 .....	224
11.8 本章小结 .....	229
参考文献 .....	230
附录 多项式矩阵的通用旋转变换方法 .....	231



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 旋转导弹的发展

在飞行器中，有一类称为旋转导弹，其在飞行过程中一边前进一边绕自身纵轴旋转。最早出现的旋转弹是枪弹和炮弹，其通过高速旋转（万转/分钟）产生的陀螺效应获得飞行稳定性。第二次世界大战后，许多尾翼式火箭弹也采用旋转飞行方式，通过低速旋转（千转/分钟）减小推力偏心等引起的散布。

从 20 世纪 50 年代开始，美、苏、英、法等国家相继研制了第一代和第二代反坦克导弹，共有 20 多个型号，其中大约 70% 采用旋转导弹体制，这表明该体制既能满足作战使用要求，又能满足成本限制条件。后续发展的反坦克导弹，除了受个别制导方式的限制以外，如电视和成像制导，旋转导弹仍然是一种优先使用的方案。

旋转导弹由于其系统组成简单、执行机构单一、对导弹的小型化有利，因此对体积与质量要求十分严格的便携式防空导弹来讲，是一种有利的方案。第一代红外寻的便携式防空导弹，美国的红眼睛和苏联的箭-2，都采用了旋转导弹体制。后来国外开发的第二代和第三代红外寻的便携式防空导弹也都采用了旋转弹体制，如尾刺、尾刺 Post、尾刺 RMP、箭-3、针-1、针和针-S。

对于旋转导弹，由于导弹绕其纵轴低速旋转，基于弹体的低通滤波特性，可使用单一的控制通道和执行机构同时控制导弹在俯仰与偏航两个方向的运动，省掉了滚转稳定所需要的滚转控制通道，这样可使导弹的结构更加简化、成本更低。另外，旋转导弹在飞行过程中绕其纵轴旋转，可减小诸如推力偏心、气动不对称、质量分