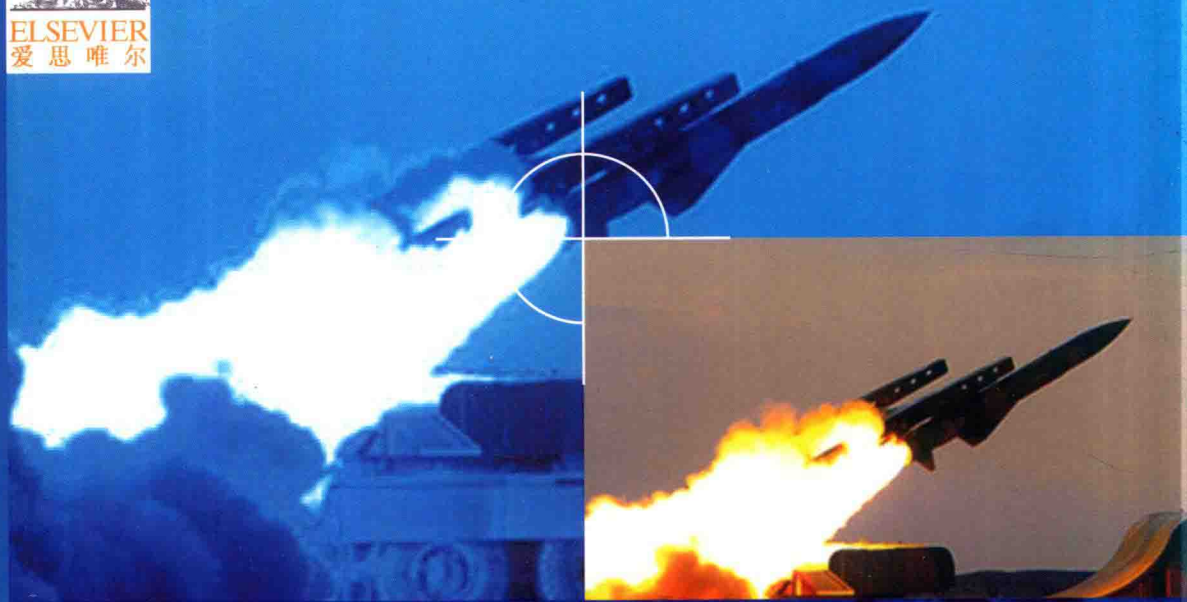




ELSEVIER
爱思唯尔



Missile Guidance and Pursuit:
Kinematics, Dynamics and Control

导弹导引和追踪

——运动学、动力学和控制

[以色列] N.A.Shneydor 著

陈建辉 郭利 许葆华 李辉 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

导弹导引和追踪

——运动学、动力学和控制

Missile Guidance and Pursuit: Kinematics,
Dynamics and Control

[以色列] N. A. Shneydor 著

陈建辉 郭利 许葆华 李辉 译



国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2012-069号

图书在版编目(CIP)数据

导弹导引和追踪:运动学、动力学和控制/(以)

N. A. 施奈德(N. A. Shneydor)著;陈建辉等译. —北京:国防工业出版社,2016. 12

书名原文:Missile Guidance and Pursuit:

Kinematics, Dynamics and Control

ISBN 978-7-118-11218-4

I. ①导… II. ①N… ②陈… III. ①导弹引导装置 ②
导弹跟踪 IV. ①TJ765.2 ②TJ768.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第254240号

Translation from English language edition:

Missile Guidance and Pursuit Kinematics, Dynamics and Control by N. A. Shneydor

Original English language edition published by Woodhead Publishing Ltd.

Copyright © 1998 Woodhead Publishing Limited

All Rights Reserved Woodhead Publishing Limited

本书简体中文版由 Woodhead Publishing Limited 授权国防工业出版社独家出版。

版权所有,侵权必究。

※

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)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 13½ 字数 242 千字

2016年12月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 68.00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

译者序

制导武器的出现和广泛应用,对战争形态和进程产生了巨大的影响。Neryahu A. Shneydor 博士既有在以色列装备发展局从事制导武器研发的经历,又有在大学从事学术研究和教学的经历,本书正是他的心血之作。本书不仅讨论了各种导引方法的运动学和动力学理论,而且深入阐述了相关的控制工程和理论;在理论分析方面,不仅给出了所有问题的解析解,而且都进行了图解分析;在内容选取上,不仅有导引方法的平面分析,而且有三维分析,不仅有制导发展历史的全面介绍,而且有未来导引理论的前瞻分析,因此是一本非常有特色的专著,相信会给国内的学者和工程技术人员以启迪和帮助。本书的翻译工作由陈建辉教授负责和完成主要工作,郭利副教授、许葆华讲师、李辉副教授等分别翻译了部分章节。马立元教授对本书译稿提出了许多宝贵意见,在此谨致感谢。本书为军队“2110 工程”支持项目,在翻译和出版过程中得到了军械工程学院和国防工业出版社有关领导和工作人员的支持,在此表示感谢。本书学术性强,内容广泛,由于译者水平所限,书中难免有不妥之处,敬请读者指正。

译者

2016 年 11 月

作者简介

Neryahu A. Shneydor 博士 1932 年出生于耶路撒冷,16 岁时已是哈加纳组织(一个半合法的军事组织)的青年会员,同时还加入了该城市的一个小的信号团体。他负责控制一个信号站,该信号站使用莫尔斯键控制信号灯,而在白天使用日光反射信号机传递讯息,绝大多数设备都是第一次世界大战时期的老设备。这一经历引起了他对电气工程的兴趣。1950—1954 年间,他在以色列海法市的 Technion 学院——以色列技术学院学习了电气工程,并获得了理学和工学双学士学位。工学学士学位深受德国影响:该学院的首批教授多数是德国移民,一些人摆脱了纳粹主义影响。

之后 Neryahu A. Shneydor 服了四年兵役,主要在海军从事伺服控制和枪炮及鱼雷发射控制。这方面的兴趣促使他学习了控制理论并获得了该领域的硕士学位。1960 年,Shneydor 博士加盟了圣拉斐尔(RAFAEL,以色列装备发展局)。圣拉斐尔的前身是一个被称为 HEMED 的秘密军事单位。HEMED 是科学组织的希伯来语缩写。在 HEMED-RAFAEL 的早期研究成果中,包括 1955 年投入使用的无线电导航船,以及最终发展成为“加布里埃尔”式的舰舰导弹。Shneydor 博士加入了圣拉斐尔的伺服研究小组,该组专门研究天线、万向支架、执行机构及其他控制设备的机械实现。后来,他参加了“蜻蜓”(Shafir)和“怪蛇”(Python)空空导弹的研发。为了表彰他对早期制导系统研发的贡献,以色列授予了 Shneydor 最高荣誉——安全奖。

1972—1975 年,Shneydor 博士在圣拉斐尔的许可下,又在海法市以色列技术学院,师从 George Zames 教授攻读博士学位,其课题为非线性反馈控制理论。其实早在 1970 年,Shneydor 博士就已经作为兼职助理教授开始在以色列技术学院的航空工程系(现在的航空航天工程系)讲授导航与制导,之后他又在电气工程系讲授非线性控制理论,并于 1979 年晋升为兼职副教授。

1975 年后,Shneydor 博士在圣拉斐尔忙于项目研发。在 1982—1987 年和 1992—1994 年间,他担任导弹所的研发副总师。在研发过程中,发表了许多制导方面的报告、论文和讲义。目前虽然已从圣拉斐尔退休,但他仍然继续从事制导和控制方面的讲学,并担任该领域的工程师,还研究了有关武器制导的历史。多篇论文在以色列航空航天科学年会上发表。

前 言

自古以来,人类就一直在探索导航技术。因此,存在大量书籍探讨这门古老的技术。在 20 世纪初,导航技术首次应用于制造军用无人遥控制导船。关于这门技术有大量的文章、会议论文、评论和参考文献。然而,令人惊讶的是,论述导航的书籍却很少。如果不把第二次世界大战后前十年发表的大部分描述性文章算在内,只有不到 6 本的相关英文书籍。在作者作为研发工程师的职业生涯中,曾在一所技术大学任教,并为各行业和军界的听众讲学。在选用现有的文章时,逐渐形成了不同于他们的方法。在同事和学生们的鼓励下,最终将讲义和幻灯片编成此书。

本书在一些方面区别于该领域的其他书籍,主要具有如下特点:

(1) 本书必然会强调导航技术在军事上的应用,例如制导武器,但同样从本质上关注导航,包括一些真实存在的,一些趣闻,还有一些娱乐数学家的发明。

(2) 本书并非是一本历史书,但它确实想向先驱科学家们及早期的进展和发明致以敬意。

(3) 在制导理论中,常常需要求解微分或其他方程。任何情况下,本书都采用解析解,而非数值解:很多时候,解析解可以使人发现一些有趣的性质,这些性质常常隐藏于代码和数值解之后。此外,读者中的工程师和科学家,尤其是年轻人,可以在任何他们想要加深对问题的定量理解的地方,轻松地编写自己的计算机程序。

(4) 几何关系和导引律将同时在三维和平面空间阐述。一些实例将涉及三维导引的情况。

(5) 对于轨迹、发射区、拦截区,还有机动加速度和其他重要变量的时间关系给出了图解分析。这对很多读者而言具有一定的实用价值。

本书适用于对导引系统的各方面(涉及使用、开发、设计、制造、营销、分析及运筹学)有所涉及或感兴趣的读者,包括学生、工程师、分析师、物理学家和程序员。阅读本书需具备大学一年级数学水平。同时,若读者熟悉反馈控制理论将更有益于理解本书。

致 谢

感谢法国巴黎矿业学院的院长 Jacques B. Levy 博士,他为我在学院提供了一个假期,在此期间我完成了本书的大部分工作;还有自动化与系统中心的 Jean Levine 教授,他对我各个阶段的工作给予了非常宝贵的帮助。感谢以色列技术学院航空工程系的系主任 Aviv Rosen 教授,在那里我度过了最后一学期的休假。同时很幸运有几位同事帮我审查了手稿。在这里对圣拉斐尔的 Oded Golan 和 Ilan Rusnak 提出的意见和建议表示感谢。我特别感谢圣拉斐尔的 Uri Reychav,他在美国休假期间花费大量时间审查了这份书稿。我还要特别感谢莱谢姆市圣拉斐尔图书馆的 Rachel Weissbrod 和 Sarah Segev 以及以色列技术学院的 Guy Shaviv 博士不厌其烦的帮助。最后,我要对我的妻子 Na'ama 表达感激和爱意,如果没有她的支持和鼓励,这一任务将不可能圆满完成。

N. A. Shneydor

以色列海法市

1998年2月4日

目 录

引言	1
参考文献	3
第1章 术语和定义	4
1.1 导引过程的三个层次	4
1.1.1 定义	4
1.1.2 一个例子	5
1.1.3 本书所涉及的内容	5
1.2 有关术语	6
1.2.1 定义	6
1.2.2 示例	7
1.3 几何学与运动学	8
1.3.1 基本定义和符号	8
1.3.2 平面运动的运动学	9
参考文献	10
第2章 视线导引	11
2.1 背景和定义	11
2.2 相关历史	11
2.3 运动学	13
2.3.1 平面情况分析	13
2.3.2 平面情况示例	15
2.3.3 关于实际应用的说明	22
2.3.4 用三维向量描述的运动学	22
2.3.5 改进视线导引的运动学	26
2.4 导引律	28
2.4.1 时域法	29

2.4.2	经典控制法	31
2.4.3	最优控制法	33
2.5	视线导引的实现	34
2.5.1	视线指令导引与驾束导引的比较	34
2.5.2	跟踪与导引头	35
2.5.3	实际应用中的其他问题	37
	参考文献	38
第3章	纯追踪	40
3.1	背景及定义	40
3.2	相关历史	40
3.3	运动学	42
3.3.1	平面情况,非机动目标	42
3.3.2	平面情况,机动目标	48
3.3.3	其他趣味平面追踪	50
3.3.4	前置纯追踪法	51
3.3.5	示例	57
3.4	纯追踪法导引律	58
3.4.1	速度追踪与位置追踪的比较	59
3.4.2	一种简单的速度追踪导引律	60
3.4.3	一种简单的位置追踪导引律	62
3.5	追踪导引的实现	62
	参考文献	62
第4章	平行导引	65
4.1	背景及定义	65
4.2	平面交会运动学	65
4.2.1	非机动目标	66
4.2.2	机动目标	68
4.2.3	变速度	72
4.3	非平面交会	73
4.3.1	定义	73
4.3.2	三个特性	73
4.3.3	示例	74

4.4	平行导引的导引律	78
4.4.1	比例导引	78
4.4.2	一种无反馈导引律	78
4.5	平行导引相关规则	80
4.5.1	固定方位导引	80
4.5.2	固定投影线导引	82
	参考文献	83
第5章	比例导引	85
5.1	背景及定义	85
5.2	相关历史	86
5.3	特殊情形下的运动学	87
5.3.1	两个特殊 N 值	87
5.3.2	静止目标, N 为任意值	87
5.3.3	$N=2$, 非静止、非机动目标	88
5.4	比例导引法的运动学, 近似法	89
5.4.1	真比例导引法	89
5.4.2	距离变化率在真比例导引中的应用	91
5.4.3	纯比例导引法	91
5.4.4	结论	94
5.5	比例导引法的运动学, 精确法	96
5.5.1	真比例导引	96
5.5.2	纯比例导引	97
5.5.3	TPN 与 PPN 的比较	98
5.6	三维向量空间下的 PPN 和 TPN	98
5.6.1	定义及性质	98
5.6.2	示例	99
5.7	实现平行导引的其他导引律	102
5.7.1	理想比例导引	102
5.7.2	预估导引律	102
5.7.3	苏恩导引律	103
	参考文献	104
第6章	比例导引的实现	107
6.1	背景	107

6.2	比例导引系统的结构	107
6.3	动态特性的影响	109
6.3.1	单时滞动态系统	109
6.3.2	双时滞动态系统	111
6.3.3	高阶动态系统	113
6.3.4	稳定性问题	113
6.3.5	结论	116
6.4	制导回路中的非线性影响	116
6.4.1	变化的导弹速度	117
6.4.2	横向加速度的饱和	119
6.4.3	导引头的饱和	120
6.4.4	雷达天线罩折射误差	124
6.4.5	导引头的不完全稳定性	128
6.5	噪声	129
6.5.1	角噪声	130
6.5.2	起伏噪声	130
6.5.3	目标机动	131
6.5.4	结论	131
6.5.5	备注	132
	参考文献	132

第7章 比例导引的导引律

7.1	背景	135
7.2	偏置修正 PN	135
7.2.1	扩展比例导引律	136
7.2.2	碰撞导引律	137
7.3	低视线角速率的导引律	139
7.3.1	偏置比例导引律	139
7.3.2	死区比例导引律	140
7.4	比例超前导引律	140
7.5	具有捷联导引头的制导武器	141
7.5.1	积分型比例导引律	141
7.5.2	动态超前导引律	142
7.6	混合导引律	143

7.6.1	混合导引:纯追踪和平行导引(或 PN)	143
7.6.2	混合导引:视线导引律和其他导引律	144
7.6.3	中段导引和 PN 的结合	145
	参考文献	145
第 8 章	现代导引律	147
8.1	背景	147
8.2	方法	147
8.3	OCG 的原理及基本例子	148
8.3.1	导引和最优控制	148
8.3.2	机动目标的 OCG	150
8.3.3	一阶动态系统的导引律	152
8.3.4	二阶动态系统的导引律	153
8.3.5	高阶动态系统的导引律	155
8.3.6	小结	156
8.4	OCG 的一般求解方法	157
8.4.1	定义和问题描述	158
8.4.2	线性二次型问题	159
8.4.3	线性二次型问题的求解	159
8.4.4	两个例子	160
8.5	基于线性二次高斯理论的导引律	162
8.5.1	背景	162
8.5.2	线性二次高斯问题	163
8.6	OCG 导引律的实现	165
8.6.1	加速度控制	165
8.6.2	动态控制	166
8.6.3	天线罩折射误差	167
8.6.4	剩余飞行时间估计	167
8.6.5	系统状态估计	167
8.7	与其他导引律的比较	169
8.7.1	OCG 与 PN	169
8.7.2	OCG 和其他现代导引律	171
	参考文献	171

附录 A 运动方程	175
A.1 概述	175
A.2 旋转坐标系	176
A.3 共面向量	177
A.4 示例	179
参考文献	181
附录 B 角变换	182
参考文献	184
附录 C 关于空气动力学的几个概念	185
C.1 侧滑转弯布局	185
C.2 倾斜转弯布局	186
C.3 攻角和侧滑角	187
C.4 注意	188
参考文献	189
附录 D 几个方程的推导	190
D.1 Kh 平面图, 2.3.2 节	190
D.2 式(2.21)的推导	191
D.3 式(3.8)和式(3.9)的证明	192
D.4 3.3.1 节(3)中的 t_f -等时线	193
D.5 DPP(3.3.4 节)的向量形式定义	194
D.6 式(4.11)的证明	194
D.7 不等式(4.13)的证明	195
D.8 式(4.15)的推导	195
D.9 式(4.34)和式(4.35)的推导	196
D.10 5.4.1 节的向量表示	197
D.11 等效噪声带宽	198
D.12 APN 导引规律的向量形式	198
D.13 式(8.14)的推导	199
参考文献	199
符号和缩写列表	200

引言

按照字典的定义,“制导”意为“引导一个物体朝向给定点(一般为可移动点)运动的过程”。如果给定的点(称其为目标)是固定的,如港口,或者其未来的运动轨迹能被精确预知的,如火星,那么通常称这个过程为导航。如果目标的运动是不可预知的,例如正在逃生的猎物、躲避地空导弹的飞机,那么这个过程在狭义上称为制导,这也正是本书将要讨论的问题。

被引导的物体可以是运载工具(如车、船、导弹、航天器)、机器人,甚至可以是一个生命体。制导过程基于目标与被引导物体的相对位置和速度。在文献中,制导过程的参与者也分别代指逃逸者和追踪者。在自然界中,食肉动物捕获猎物以及昆虫寻找配偶的过程也是制导过程。在人类历史上,海员,尤其是海盗,已经实践了我们现在称为“平行导引”(“导航”一词在此处有些用词不当)或“碰撞航线”的规则。水手们一般都知道这些规则的逆规则,以避免在海上相撞。

制导问题的现代解决方案,例如采用解析的方法,可以追溯到18世纪,那时几个数学家研究了现在称为“纯追踪”或“犬兔追踪”的案例。这种追踪方式遵循一个非常简单的几何规则:跑(或飞,或航行,视情况而定)到看见目标的位置。这个简单的规则和之前提到的平行导引都属于两点导引法。之所以这样讲,是因为在它们各自的定义中只包括追踪者和目标。

同样存在一系列三点导引法的几何规则,三点导引法的命名源于这样一个事实:该规则的提出需要引入第三个点,即参考点。在最基本的三点几何规则中,追踪者需位于参考点和目标之间的连线上。显而易见,这种导引方式称为“视线导引”。

制导理论主要应用于武器领域。其应用历史始于1870年,当时维尔纳·冯·西门子向普鲁士的作战部提交了一份“采用制导鱼雷摧毁敌舰”的提案。尽管西门子没有明确说明,但他所提出的鱼雷所采用的制导方式应该属于视线制导。后面本书将简要介绍这个提案。需要说明的是,1916年,制导鱼雷成为历史上首个可使用的制导武器系统。

20世纪40年代早期,在第二次世界大战期间,纯追踪法首次应用于武器系统。当时,绝大多数相关基础理论早在两个世纪前即已知晓,而且目标探测的技术方法和制导装置的控制方法也已经研究出来了。由于历史原因,直到战争即

将结束时,才研究出一种称为“比例导引”的更加复杂的两点导引法。1943年,由美国首次提出了比例导引(Proportional Navigation, PN)的基本理论。1944年或1945年,德国科学家开展了比例导引在导弹系统中的一系列应用研究,他们当时大概不知道这个理论已经在别处趋于成熟。当今绝大多数两点制导的武器系统都是利用了比例导引的变形形式。比例导引同样应用于非军事领域,例如太空旅行、外星登陆和机器人技术。

尽管如此,比例导引也有其局限性。尤其是当追踪者靠近目标时,必须注意其对干扰和逃逸者机动运行的敏感度(“机动运行”是指运动方向的突然变化,例如高速转弯,在飞行上称为闪避,在航海上称为“Z”字形机动)。20世纪60年代早期,一系列“现代导引律”逐渐得到发展,该导引律不受上述局限性的限制或者说受限很少。这些导引律基于一些当时最新发展的理论,尤其是最优控制理论和最优估计理论,因此后来人们常称这些导引律为“最优控制导引”或“最优导引”。

这些导引律可以视为自西门子提案以来,导引理论发展的最新进展。尽管具有了成熟的理论和必要的技术,如微电子和计算机科学,但是其实际应用仍然是比较少见。这可能要归咎于经济原因。然而,军事保密的原因,使得要想获得最新的、可靠的信息是非常困难的。因此,也就难以对该领域的最新进展进行描述了。

以上即是本书所涉及的内容。下一个革命性进步很可能是基于微分博弈论的导引律。尽管自20世纪70年代以来就出现了关于这种导引方法的相关文献,但是它还没有成熟到可以纳入像本书这样的介绍性书籍。

正是由于过去50多年来技术的进步,制导武器才得到了迅速的发展。提到这些技术,我们可能会想到内燃发动机、火箭发动机、惯性仪表(尤其是陀螺仪)、航空学、电子(特别是微电子学和雷达)、光电和计算机工程。这些和其他一些与制导相关的技术学科不在本书的讨论范围,除非其对所讨论的问题具有直接影响。排除这些内容有两点原因:第一,即使引入小部分的相关技术,也会使得本书比作者预想的篇幅更长;第二,绝大多数的相关技术都有丰富的文献可供查阅。

本书从追踪者的角度探讨导引问题,例如,如何到达目标,或者拦截目标。该问题的逆问题,即规避,本书将不作讨论。将从运动学、动力学和控制的观点讨论导引。也就是说,本书将研究轨迹、拦截区、所需的机动能力、发射区、制导过程中的稳定性,以及相关的问题。除此之外,在理论设计和实现中的技术问题如果可能影响到精度、能源消耗、结构限制及经济成本,那么本书也会做相应讨论。

本书第1章将介绍基本定义和专业术语,第2~7章将介绍经典导引律,具

体如下:

- (1) 第2章, 视线导引;
- (2) 第3章, 纯追踪;
- (3) 第4章, 平行导引;
- (4) 第5、6章, 比例导引;
- (5) 第7章, 比例导引的导引律;
- (6) 第8章专门介绍最优控制导引。

参考文献

- Ross Jr. , Frank, *Guided Missiles; Rockets and Torpedos*, New York, Lathrop, Lee & Shepard, 1951.
- Weyl, A. R. , *Engins téléguidés*, Paris, Dunod, 1952; a translation of *Guided Missiles*, London, Temple Press, 1949.
- Gatland, Kenneth W. , *Development of the guided missile*, 2nd ed. , London, Iliffe, 1954.
- Benecke, Th. and A. W. Quick (eds.) , *History of German Guided Missile Development*, AGARD First Guided Missile Seminar, Munich, April 1956.
- Ordway, Frederick and Ronald C. Wakeford, *International Missile and Spacecraft Guide*, McGraw – Hill, 1960.
- Clemow, J. , *Missile Guidance*, London, Temple Press, 1962.
- Smith, J. R. and A. L. Kay, *German Aircraft of the Second World War*, Putnam, 1972, pp. 645 – 712.
- Spearman, M. Leroy, *Historical Development of Worldwide Guided Missiles*, NASA Technical Memorandum 85658, June 1983.
- Benecke, Theodor et al. , *Die Deutsche Luftfahrt – Flugkörper und Lenkkraketen*, Koblenz, Bernard und Graefe, 1987.
- Trenkle, Fritz, *Die Deutschen Funklenkverfahren bis 1945*, Heidelberg, Alfred Hüthig, 1987.

第 1 章 术语和定义

本章主要介绍导引的有关概念和术语。这些概念、术语的定义,在英国、美国以及不同学者之中存有差异。本书将采用公认的定义,同时在相关地方给出其他可供选择的定义。

1.1 导引过程的三个层次

“导引”是引导一个物体向一个给定点运动的过程,这个给定点通常是移动的。如果给定点固定,并且被引导的物体是“有人操纵的”(或者是一只候鸟),那么这个过程只是导航^①。因此,可以说导航是导引的一个子类,但在本书中只给“导引”一个狭义的涵义,它不包括导航。下面将对这个特定的涵义进行解释。

1.1.1 定义

导引是一个有层次的过程,可以说其由三层组成,具体如下:

(1) 在最高层,从指向目标的视线的角度,描述了一种几何关系。将这个目标记为 T , 将被导引物体记为 M (本书中符号“ T ”“ M ”既代表物体本身,也代表它们在空间的点,因此均用斜体表示)。这个定义有助于将本书中的导引与海上导航或惯性导航区分开来。

在这一层,主要研究目标和被导引物体交会的运动学问题,包括轨迹的形状、曲率以及所需的横向加速度。当然,时间 t 也是一个重要的参数,通常称导引过程的总时间(从 $t=0$ 时开始直到 $t=t_f$ 时拦截)为飞行时间,虽然 M 未必是飞机或飞船。

(2) 在第二层,出现了导引律。导引律是一种算法,通过这种算法可实现所希望的几何关系。这是通过闭合一个制导回路来实现的(见图 1.1)。反馈回路中的“误差” e 是所测得的 M 在空间中的状态与根据几何关系所期望的状态之间的偏差的直接函数。根据导引律,“误差” e 可用来产生一个给 M 的转向指令。

^① 有时对导航给出一种较狭义的定义,根据这种定义,导航只是一种发现观察者相对于地球的确切位置的技术和科学。