

## 袁家骝在无线电定向和导航方面的早期工作

谢力 华北电力大学控制与计算机学院

张奕群 中国航天科工集团二院二部

有理由推断，1943年在美国无线电公司实验室，袁家骝发明了比例导引。

——摘自 N. A. Shneydor 的著作[18, p.103]

本文的主旨是介绍美籍华人科学家袁家骝在无线电定向和导航方面的早期工作。提到袁家骝，我们就不得不先介绍他的夫人吴健雄。

1956年10月，物理学家李政道和杨振宁发表了“弱相互作用中宇称不守恒”理论。1957年的1月，实验物理学家吴健雄及其合作者，实验验证了李、杨提出的理论假设。1957年12月，杨振宁和李政道因为这个理论获得了诺贝尔物理学奖。鉴于吴健雄对物理学的杰出贡献，她获得了许多荣誉和奖项，例如上述实验使她赢得了第一届沃尔夫物理学奖。曾做过美国《今日物理》主编的Gloria B. Lubkin女士，在1971年的一次与吴健雄的访谈中，称吴为“物理学第一夫人”[35, p. 303]<sup>1</sup>。

主张在物理学上学术贡献不分性别的吴健雄，被普遍认为在物理学上她的成就高于她的丈夫袁家骝。在江才健为其撰写的传记里[35]多次提到这点，例如在第328页，江写道：“在科学上，袁家骝的成就是不如吴健

雄的，但是他亦在好些个领域中，有着一些颇具心得的工作。”这里“好些个领域”时常是指高能物理、高能加速器和粒子探测系统、宇宙射线等。袁家骝在这些领域的工作，有若干个第一，例如“首次证明强子共振的存在，并发现了两个新粒子”，这些工作已经有了较为详细的介绍，例如来自同行的评价[31]。但是，有两个非物理学领域，吴健雄从未涉足，这就是无线电定向探测和自动寻的导航（或称为导引）方法的研究。在这两个研究领域里，袁家骝有创新性工作。特别是在导航方面，袁家骝是率先研究比例导引（Proportional Navigation, PN）的第一批人[14, 30]之一。更进一步，他亦被合理地推测为比例导引的发明人[18]。袁家骝的这个工作鲜为人知，更不用说细节了。本文主要目的是介绍作为工程科学家的袁家骝在无线电定向和导航方面的早期工作，特别是对后者。

中国航天事业的奠基人钱学森在其1949年“工程和工程科学”[36]一文中这样定义

一类人：

“纯科学家与从事实用工作的工程师间密切合作的需要，产生了一个新的职业——工程研究者或工程科学家。他们形成纯科学和工程之间的桥梁。他们是将基础科学知识应用于工程问题的那些人。”

1943年二战期间，在美国无线电公司实验室（RCA Laboratories），杰出的实验物理学家袁家骝就是这样一位工程科学家，他成功地将基础科学知识应用于飞行器的拦截问题。

## 1 袁家骝及其在物理学之外的工作

袁家骝生于1912年4月5日，袁世凯的次子——文人袁克文的三子，2003年2月11日去世。1932年袁毕业于燕京大学物理学系，1934年获该校硕士学位<sup>2</sup>，1936年7月或8月赴美<sup>3</sup>，先入加州大学伯克利分校，1937年转入加州理工读博<sup>4</sup>，师从诺贝尔物理学奖获得者实验物理学家R. A. Milliken。1940年，袁获得博士学位，随后以Research Fellow身份留在其师的实验室Norman Bridge Laboratory继续做研究工作。1942年6月或7月起，袁离开加州理工，到美国无线电公司实验室，以研究物理学家（Research Physicist）身份从事国防研究工作。1947年袁离开RCA<sup>5</sup>，进入普林斯顿大学物理系做研究助理（Research Associate），此后研究领域以实验物理学为主。1942年6月袁与吴健雄结婚。

以往在总结袁家骝先生的学术贡献时，对于他在加州理工以及美国无线电公司实验室的研究工作，只是简略地加以介绍，原因是

这些作者基本上是来自（高能）物理专业，他们更看重袁先生在物理学上取得的成就。

例如，文献[32]是这样介绍袁的上述工作：

“早年研究无线电技术和原理，在超高频无线电测向和自动装置的最佳航线诸方面，取得了可喜的成就。”

那么，袁家骝先生到底在“超高频无线电测向和自动装置的最佳航线诸方面”做了什么工作呢？以下我们详细回答这个问题。

## 2 在无线电测向方面的工作

1940年，袁家骝完成了他的博士论文“Radio Direction Finding at 1.67-Meter Waves”（1.67米波无线电测向）[22]。从他发表在Science的工作介绍来看[23]，完成论文的时间大约是在1940年上半年5月份。袁家骝在加州理工期间，在无线电测向方面的工作如下：

1946年与人合作有一项专利[29]，发表了三篇代表性工作，其中两篇[26, 27]1946年发表在Proceedings of I. R. E. and Waves and Electrons（Proceedings of IEEE的前身，在其中的波和电子版面）、另一篇1940年发表在The Review of Scientific Instruments上[24]。此外，还有一个描述博士论文研究内容的详细摘要，发表在1940年Science的通讯讨论版面（Letter Discussion）[23]。这其中[23, 24, 26]是博士论文的工作。

无线电测向就是利用无线电测量设备测定被接收的无线电信号的传输方向[33，第七章]。袁家骝在其博士论文里，经过对多种天线进行测试，采用了H天线和Adcock天线<sup>6</sup>，

借助电磁波在天线上的感应电压，分别测量来波的所谓垂直角和方位角，同时设计了超高频超外差式无线电接收机[26]。测量角度所使用的方法是感应电压的最小化方法，即通过转动天线，找到感应电压为零的与天线相关的角度，从而得到来波的传播方向。1946年袁发表的文章[26]反映了其博士论文的基本思想，同时也做了更进一步的工作，表现在理论上同时考虑了地面反射对天线接收无线电波的影响，并且对实验结果和理论计算进行了比较，二者很好地保持一致。

随后，袁在[27]里，保留了Adcock天线测量方位角，同时为了减弱地面反射波的影响，用一个附有角型反射器的单一偶极天线（a single-dipole antenna）代替了[26]中使用的H天线，以测量来波的垂直角（或仰角）。袁为这个模型申请了专利[29]。此模型在方位角上，精度为0.25度；在仰角上，当目标发射机放在远在7英里外的威尔逊山顶时，精度为0.5度，但发射机放在升空的气球里，存在较大的观测误差。

袁家骝在无线电测向方面的工作得到二战期间美国政府的资助，是国防科研项目；见文章[27]题目的注释<sup>7</sup>。与模仿雷达的早期测向仪、以及要求固定站点、多站点测向方法相比较，袁的测向模型之所以力求简单是因为要满足军方容易安装、便于携带的实用性要求。对于弹道武器，其精确性和射程很大程度和风速相关，实际上袁家骝的工作正是为快速测量风速提供了一种可能的方法。二战后，美国军方相关部门<sup>8</sup>发表了一篇针对用来测量高空风速的气象无线电测向仪器的

综述文献[9, pp. 29-30]，其中详细报道了袁的模型，并引用了实物图。袁的模型与军方对高空风测向仪小型化、轻便、更为准确的要求契合。他为军方提供的工作（模型）得到认可，被视为这个方向上的早期工作与进一步实用性工作的过渡。

### 3 在导航方面的工作

与袁家骝在无线电测向方面的技术性工作不同，他在导航方面的工作属于原理性工作。他也由此被更多的人记住。技术不断更新，原理永存。袁家骝在导航方面的工作是在RCA做出的。

#### 3.1 1943年的工作

大约是在1942年的7月，与吴健雄新婚，袁家骝离开加州理工，来到位于新泽西州普林斯顿的美国RCA实验室，在导航研究方面，为美国海军工作。在1943年的12月，袁家骝完成了一篇，从他的论文发表目录来看[31, p. 485]，也是他唯一一篇导航方面的工作：“自动目标寻的器的自寻的和导航航线的研究”。该工作先是以保密报告的形式提交到RCA实验室[25]，二战结束后，它被解密，袁家骝将其正式发表在1948年12月的美国物理学会《应用物理期刊》[28]<sup>9</sup>上。

从此文的题目“Homing and Navigational Courses of Automatic Target Seeking Devices”很容易看出，它或许与军事相关。科普作家、新罕布什尔大学电气与计算机工程学院荣休教授Paul J. Nahin在他的书[13, p. 237]中“调侃”到：看到题目中有趣的委婉用语，

大多数读者一定会想到它一定就是导弹。的确，袁家骝的这项工作有国防背景，是为美国海军部舰船局而做<sup>10</sup>。

### 3.2 导航与制导背景

一般而言，导航 (Navigation) 是指将一个对象的路径引导到一个固定或给定点的过程，而对制导<sup>11</sup> (Guidance) 来说，这个点是可以是固定、给定、未知或机动的 [18]。由于历史原因，导航和制导往往混用。对于导弹制导而言，“对象”是导弹，“点”是目标，导弹制导（下面也称为导引）就是引导导弹击中目标。

考虑二维情况，假定导弹和目标是在一个平面内的两个质点。经典导弹制导方法（文献 [18] 称为几何规则）简单地分为如图 1 所示的三大类（见 [10, Chapter 12] 及 [18]）。

所谓的三点法。

2. 追踪 (Pursuit) 法：让导弹的速度矢量始终指向目标，即速度的方向为  $\overline{MT}$ 。

3. 平行 (Parallel) 法：让导弹和目标的连线，即视线  $\overline{MT}$  一直保持平行。

理论上说，以上方法只要导弹速度和角度合适，都可以击中目标。这些方法产生的导弹路径被称为航线 (course)。

以色列学者 Shneydor 在其书 [18, p. 6] 中提到：在 1950 年代早期之前，自寻的“homing”意味着导弹使用追踪法制导，所以自寻的航线 (homing course) 就是指追踪法制导产生的航线，也被称为“猎犬和野兔”航线 (hound-and-hare course)。此外，航海时代，水手们知道依据平行法驾驶会导致

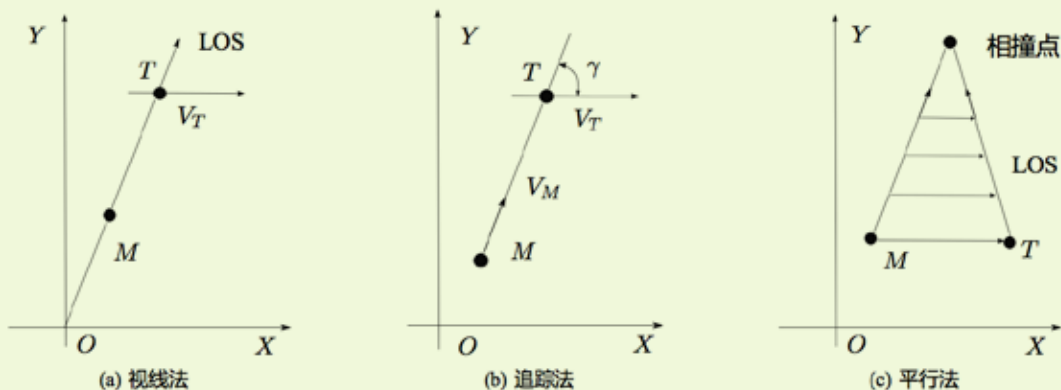


图1：经典导航法示例，其中  $O, T, M$  分别是参考点、目标、导弹， $V_T, V_M$  分别是目标速度、导弹速度

1. 视线 (Line-of-Sight LOS) 法：让导弹始终位于参考点和目标的连线  $\overline{OT}$  上，

船只互撞或者交会，平行法被称为平行导航 (parallel navigation)，其航线被称为导

航航线 (navigational courses), 也被称为撞击航线 (collision courses)、常方位航线 (constant bearing course)。导航一词完全可能来自水手[18, p. 77; 21, p. 2]。由此, 从题目来看, 我们立刻就知道了, 袁家骝的文章就是研究平面情况下, “自动寻的装置”的追踪和平行制导法的, 即图1中的(b)和(c)所示的方法。

### 3.3 袁家骝的工作

我们总结的袁家骝在文献[28]中的主要贡献如下:

1. 对于追踪法, 通过一个简单例子(目标匀速直线运动)和解析求解二阶非线性常微分方程<sup>12</sup>及近似求极限<sup>13</sup>, 袁家骝认识到当寻的器的速度大于目标速度两倍时, 寻的器逼近目标时, 追踪航线的曲率半径逼近零<sup>14</sup>, 这导致与曲率半径成反比的向心力增大, 因此寻的器做快速转弯有困难, 这使得对目标拦截问题, 追踪法可能不实用。

2. 提出了比例导引法来近似, 实现平行导引法。

下面, 我们使用袁文章中的图5, 即本文图2, 来阐述袁家骝提出的比例导引法。假定目标和寻的器的速度幅值是常量, 前者沿着纵向坐标向上运动, 后者速度角度可调。

袁家骝的比例导引原理原文[28, p. 1126]的中文如下:

寻的器和视线装置同时顺时针旋转, 但是分别转过不同角度(3.1),

$$(1/\alpha)\Delta\theta \text{ 和 } \Delta\theta \quad (3.1)$$

这里常数  $\alpha$  小于1

注意简单地视寻的器为导弹<sup>15</sup>, 方程式号(3.1)为本文所加。我们用图2来解释(3.1), 其中  $\Delta\theta$  代表目标—寻的器视线在时间  $\Delta t$  内, 在点  $S_2$  和  $S_1$  的角度变化, 即  $\overline{S_1T_1}$  和  $\overline{S_2T_2}$  角度之变化。(3.1)要求寻的器在同一时间  $\Delta t$  内, 在  $S_2$  点速度向量与  $S_1$  点速度向量的角度变化定义为  $(1/\alpha)\Delta\theta$ 。正是因为比例因子  $\alpha$  的引入, 这个导航方法后来被称为比例导引或导航 (proportional navigation, PN)。

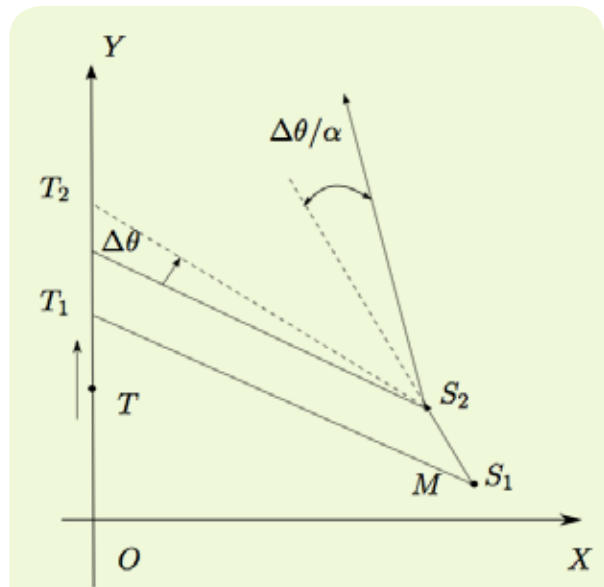


图2: 袁家骝用于定义比例导引的原理图

对袁家骝提出的导航方法, 可以用物理直觉来解释其工作原理。在图2中, 在  $t_1$  时刻 ( $S_1$  位置), 假定目标速度大于寻的器速度

在纵向的分量，于是在 $t_2$ 时刻（ $S_2$ 位置），寻的器—目标视线相对于 $X$ 轴的角度顺时针方向会比 $t_1$ 时刻增加 $\Delta\theta$ 。为了使视线在前后时刻保持平行，直觉上，如果增加寻的器相对于 $X$ 轴的速度角度（增加 $\Delta\theta/\alpha$ ），既然 $\sin$ 函数在第一象限是增函数，那么寻的器在 $t_3$ 时刻，由于其纵向速度分量的增加，可能使得视线逆时针方向转动，于是视线被校正，可能保持与 $t_1$ 时刻平行。一旦视线不再转动，寻的器速度向量的角度不再变化，此时寻的器航线是平行航线，由此可见，袁家骝的导航航线逼近平行航线，所以比例导引就是要使视线角度变化率为零。这个直觉解释类似于负反馈原理。下面用角度变化率（角度对时间的导数）来描述比例导引原理(3.1)。

$$\dot{\psi} = N\dot{\theta} \quad (3.2)$$

这里 $N=1/\alpha$ ， $N$ 在文献里被称为导航比率，典型地取3与5之间的数， $\psi$ 为速度与（惯性坐标） $X$ 轴形成的角度， $\theta$ 为相应的视线角；袁称比例常数 $\alpha$ 为“导航校正”。这里(3.2)就是著名的比例导引原理公式，它已成为标准的教科书内容。

图3给出了依据两种导航方法所得出的导航航线，其中(b)中导航比率 $\alpha=1/4$ ，目标和导弹速度为常数已知，满足 $V_M/V_T=2$ ，它们被用来计算视线变化角度。从(b)可看出由比例导引原理产生的航线逼近平行法航线。比例导航被用来实现平行导航，后者需要目标速度信息，前者只需要视线角度信息。文献[19]也称比例导航航线为“部分导航（平行）航线”（partial navigation

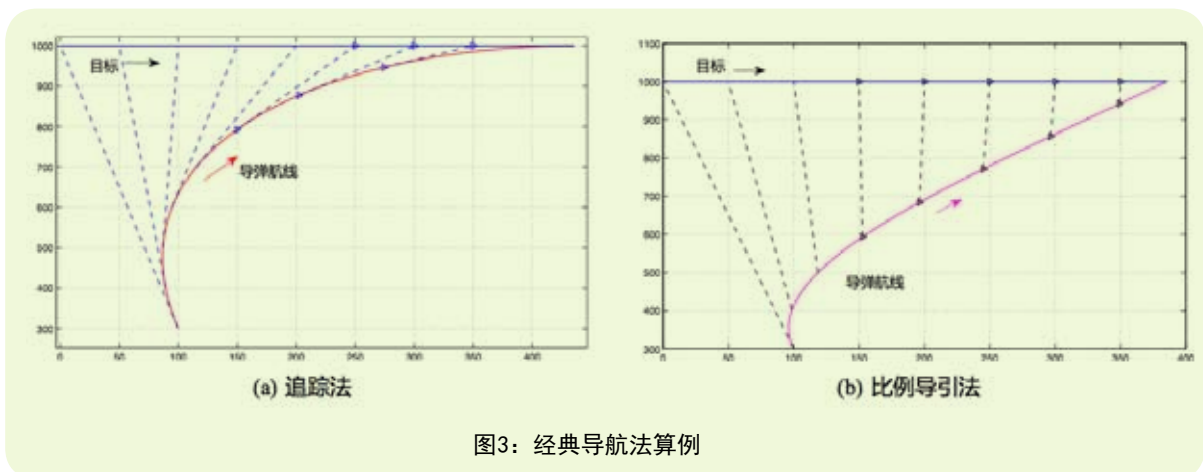


图3：经典导航法算例

比例导引原理：相对于固定参考坐标系，寻的器速度的角度变化率比例于寻的器—目标视线的角度变化率

course)。比例法航线所逼近的平行法航线也被称为导航航线。袁家骝称比例导航航线为实际导航航线，“比例导航”这一称呼可能始于1945年<sup>16</sup>。由(3.1)或(3.2)，考虑

$\dot{\theta} = \alpha \dot{\psi}$ ，比例导引法介于追踪法和平行法之间，我们有

$$\text{比例导引法} = \begin{cases} \text{最终法, 如果 } \alpha = 1; \\ \text{平行法, 如果 } \alpha = 0. \end{cases} \quad (3.3)$$

导航方法（几何规则）提供了寻的器为拦截目标所要走过的航线，我们将实现导航方法的算法称为导引律或制导律（Guidance Law），见[18, p. 2]。对于导弹拦截问题，制导律就是确定导弹加速度的算法，见[21, p. 1]。由质点运动学和(3.1)，得到一个简单的比例导引律

$$a_m = v_m \frac{d\psi}{dt} = N v_m \dot{\theta} \quad (3.4)$$

这里  $a_m$  是垂直于导弹速度方向的法向加速度（也称为侧向加速度）， $v_m$  是导弹速度。

在工业界，通常导航比率  $N$  用“接近速度”  $V_c$  表示的“有效导航比”  $N'$  来定义，

$$N = N' V_c / v_m, \text{ 于是有}$$

$$a_m = N' V_c \dot{\theta} \quad (3.5)$$

其中  $V_c = -\dot{R}$ ， $R$  为弹目的距离，其理由参见[6, pp. 644-645]。当  $a_m$  被定义为垂直于弹目视线的法向加速度，称(3.5)为真比例导引律（True PN, TPN）；相对而言，(3.4)被称为纯比例导引律（Pure PN, PPN）。PPN和TPN的比较，参见[18, Chapters 5-7]以及那里的文献。

### 3.4 同期其他人的工作

二战期间，接受政府和军方的资助，在不同国家、不同机构，都有研究人员同时从事导弹制导理论的研究，这使得一些理论和算法几乎同时被不同研究人员得出，例如追踪法的特性和比例导引方法。下面介绍20世纪40年代，与袁家骝工作有关联的其他人在比例导引方面的工作。

1. 美国人的工作。除了1943年12月袁家骝在RCA研究导航原理以外，文献[16, p. 100]提到：1945年5月，在海军研究室，数学专业出身，后来成为NASA第三号人物的H. E. Newell在关于导弹运动学的报告[15]<sup>17</sup>中引入质点运动学，研究了经典导航的三种方法：视线法、追踪法、比例导引法。

2. 二战期间德国人的工作。曾做过美国雷声公司（Raytheon Co.）导弹系统部首席工程师、参与上世纪50年代鹰型（Hawk）和麻雀（Sparrow）型号导弹设计的Mike W. Fossier在回顾雷声公司雷达自寻的导弹的发展时提到：二战时，在目标未知的导弹制导问题上，德国科学家也在做大量的理论研究，见[6, p. 641]。他们发展了基本方程和比例导航原理。他也指出德国人的比例导引律使用的导航比  $N$  不是合适的增益项，应该用以“接近速度”表示的“有效导航比”代替，见[6, pp. 644-645]；比较(3.4)和(3.5)。

3. 战后瑞典人的工作。瑞典著名控制理论家Åström在文献[2, pp. 12-13]中肯定了袁家骝的文章[28]是目前已知的第一个工作，并指出：瑞典皇家理工学院工程物理研

究生Lars Erik Zachrisson在导弹制导方面做出了原创性贡献。1946年至1947年,他独立发现了比例导引,并且他解析地研究了追踪导引法。

其它工作还有<sup>18</sup>:在1946年,Spitz在美国海军实验室的一篇内部保密报告里,利用比例导引原理(3.4)和质点运动学,推出了 $N=2$ 情况下的比例导引律(实现比例导引的算法),即实现比例导引的导弹法向加速度的解析表示[19, eq36.2],该文首次提到了袁家骝在RCA的内部报告,主要参考了Newell [15]的工作。同年,Watkins在NASA前身美国国家航空咨询委员会(NACA)的内部保密报告[20]里推导了包括比例制导的四种制导方法理论上的追踪路径,指出当使用弹载寻的器时,比例导引方法是最好的。

直到1965年[30, p.14],对于由“接近速度”和“有效导航比”定义的比例导引律(3.5),Bryson[4, eq.32]、何毓琦等[8, eq.38]应用现代控制理论,为其赋予了某种最优意义<sup>19</sup>。一直以来,比例导引原理之比例思想几乎出现在绝大多数战术导弹的制导算法里,例如1950年,美国海军的“百灵”试验导弹(Lark)[21, p.3],以及不久后的“麻雀”导弹[6]。

### 3.5 一篇睡美人式文献

二战以后文献[11, p.143]表明,1943年在研究电视制导的HS293D导弹时,德国的研究人员对追踪法的研究,得到了和袁家骝相同的结果(见本文3.3小节贡献之一)。他们也定义了一个新的组合导航算法,使用

这种算法的系统称为“逆旋转系统”。类似的比例想法出现在那里的图9[11, p.146]中,同时他们也得到了这个算法和其它算法的关系如(3.3)。尽管没有看到德国人引入角度的变化率来描述比例导引(3.2),但可以推断德国人知道比例导引方法。尽管如此,没有确切来源表明德国人有类似于(3.1)袁家骝的定义及(3.2)-(3.4)那样的公式[18, p.103]。

对袁家骝的原创性贡献,美国学者Zarchan在1979年递交的文章和以后的书[14, 30, p.78, pp.13-14]中如此评价袁的工作:“明显地,在美国海军资助下,在二战期间,袁和美国无线电公司实验室其他人最早研究了比例导引。”<sup>20</sup> Shneydor在其1997年的书中比例导引的历史部分[18, p.103]是这样评价的:“因此,有理由推断,在美国无线电公司实验室,袁家骝发明了(invented)比例导引。”<sup>21</sup>

历史上有些文献,自从它发表后很少得到引用,但突然一天有人发现了它和某个研究方向有关,引用开始非线性地增加,于是它们被唤醒,例如19世纪50-60年代遗传学家孟德尔的工作。在科学计量学里,人们将这样的文章形象地比喻为睡美人。这种现象被称为“延迟承认”。

与物理、生物一些研究方向相比,导弹制导方法的研究不算是非常活跃的研究领域,其文献引用率不能说是高,但依据google scholar对袁家骝文章[28]引用情况,我们发



现它具有睡美人式文献的特征。图4给出了自1940年代到现在的引用数<sup>22</sup>。自从它在1981年被Nesline and Zarchan的文章[14]唤醒后，它的引用次数大幅度增加。目前总共被引用57次，1980年代以后被引用53次。

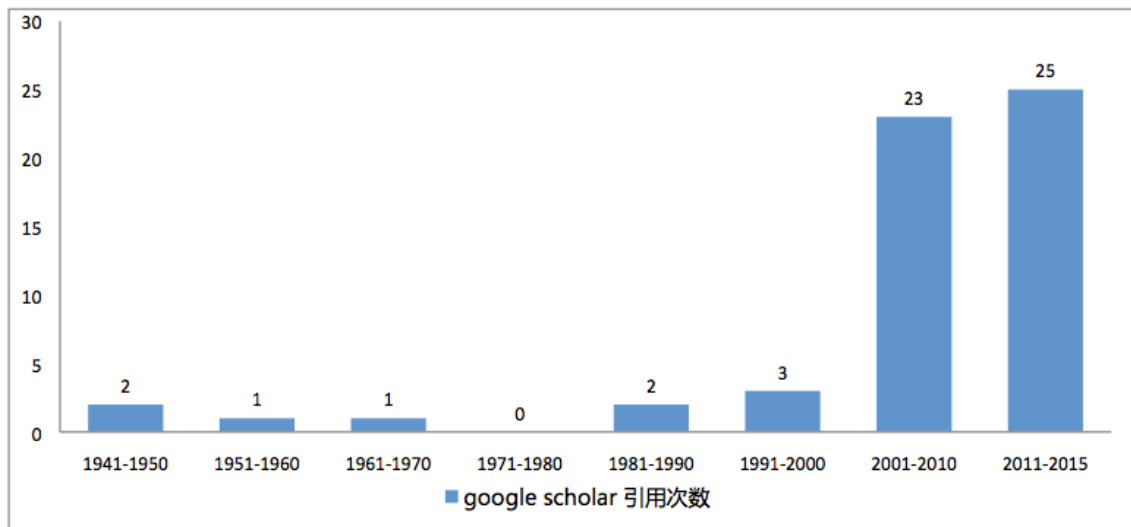


图4: 袁家骝文章[28]google scholar引用情况

#### 4 结语

本文介绍了已故华人实验物理学家袁家骝在无线电定向和导航方面的早期工作。其中，在导航方面，现有资料表明：他发明了著名的比例导引原理，尽管这个原理在同期也被很多人认识到。由比例导引原理推得比例导引律(3.4)是显而易见的，而(3.5)是工程界的进一步实用化的发展。战后几十年来，比例导引律在文献中有多种变形和种类，出于物理直觉、朴素的“比例”思想直接或间接地贯穿在它们之中。这里“直接”是指利

用(3.1)，“间接”是指利用类似(3.5)的关系，而(3.5)是(3.4)在工程实践中的自然发展。直接的例子是：Adler将二维比例制导推广到三维情况，刻划速度方位角和视线方位角的关系使用了“比例导引原理”见[1, eq.12]；

间接的例子是：1966年在文献[12, p.79]出现的、使用垂直于弹目视线法向加速度的真比例导引律(True PN)，其中加速度采用(3.5)的形式： $a_m = N'V_c \dot{\theta}$ ， $\lambda = N'$ 。可以说，凡是属于“比例导引”一类的制导方法，都直接或间接地使用了“比例导引原理”之比例思想。

#### 袁家骝研究工作的特点如下：

1. 科研是问题驱动。他在两个方面的工作都是面向国防实际问题，其一是测向和风

速，其二是为导弹的拦截问题提供可行算法。

2. 善于利用物理直觉和数学分析。这表现在袁能够用微积分知识求解天线感应电压、利用前人关于二阶非线性方程的解析解和计算曲率半径的极限，研究导航问题，而比例导引原理显然是来自于物理直觉，见本文3.3节的分析。

3. 原理一定是来自于简单的实例或算例。在袁家骝的文章[28]里，有很多个具体算例，袁一方面能够用简单的数学来分析，也善于用简单的图解来解决问题。

4. 善于和人交流。在袁导航的论文里，致谢部分提到了三个人，说明他的工作得益于他人的鼓励和讨论。例如袁在追踪法里关于曲率半径的结论，先由Dr. Rajchman<sup>23</sup>指出，可见讨论有益。

5. 尽可能快速发表。如果战后，袁家骝不及时正式发表他的战时保密工作，他的工作可能不会在37年后被唤醒。

总之，创新来自于解决实际问题的需求，面向实际问题的科研更有活力。这或许是袁家骝的工作给我们的启示。

**致谢** 感谢航天科工集团二院二部徐俊艳等其他成员为完成相关课题组织的讨论，以及他们的各种建议和帮助。第一作者也感谢国家自然科学基金61374084的资助。

## 注释

1 Gloria Lubkin, "Chien-Shiung Wu, The First Lady of Physics Research", Smithsonian, Vol. I (January 1971), 52-57.

2 燕京大学1952年文、理并入北京大学，它的学位

论文得到了很好的收藏。根据北大燕京学位论文库，袁的硕士论文为“Thermal Insulation Efficiency of Textiles Manufactured in Ching Ho”，1934年5月，导师是威廉·班(William Band 1906-1993)。袁的学士论文导师是谢玉铭(1893-1986)，题目是“The Determination of the Frequency and of the Effect of Temperature on the Frequency of a Tuning Fork by the Stroboscopic Method”，1932年5月。袁在研究生毕业后，在和袁氏家族有关的开滦煤矿，工作了一年，见[35, p. 82]。

3 赴美时，袁身带仅40美金。在伯克利学习期间，经燕大校长司徒雷登的推荐，得到一笔国际宿舍奖学金，可以免学费，并且管吃管住。以上参见[35, pp. 81-82]。其赴美的费用也得到了和其家族有关的启新洋灰公司的资助，见[34]。

4 促使袁转学的原因和奖学金有关，伯克利资助的是较少的助读金，而加州理工的是奖学金，见[35, p. 60]。

5 根据Proceedings of I.R.E. 1946, vol-34, October, p.762, 袁的自我介绍，至少从1946年10月份后，袁家骝同时也受雇于普林斯顿大学物理系。

6 Adcock天线由英国人F. Adcock在1919年发明，H天线是Adcock天线简单的变型，见[17]。

7 袁的工作部分地得到二战期间美国政府为军事目的设立的“美国科学研究局”(OSRD, Office of Scientific Research and Development)的资助。

8 此文作者单位是通讯兵工程研究室(Signal Corps Engineering Laboratories)。

9 很遗憾，笔者未能找到这篇报告原文。袁家骝在正式发表的论文中提到，他的这项工作是在RCA做的。

10 见[28]题目注释。

11 钱学森在1956年《导弹概论》讲义里, 159页, 将“控制和导向”简记为制导。

12 这样的方程至少在1732年已经由法国几何学家Bouguer求得解析解, 见[18, pp. 48-49]。

13 文章[3]对极限有完整的推导。

14 袁家骝在文中脚注提到, 这个事实已经被同事Jan A. Rajchman指出。

15 实际上寻的器, 也被称为导引头, 是一物理器件, 例如雷达或者红外装置, 一般固定在导弹上, 为导弹提供可测的物理量, 例如这里视线的角速率。

16 Åström在文献[2, p. 13]提到“比例导航”这个名字(正式)出现在1956年文献[1]之后。实际上, 在[19]之文献b的题目里已经出现“比例导航”, 它来源于美国海军[18, p. 102]。

17 首先, 我们不得不说, 由于大量与导弹制导相关的最初工作完成于二战期间, 很多文献当时是保密的, 例如袁家骝的内部报告[28], 再加上时间久远, 即使战后解密, 如果这些工作没有正式发表, 我们在国内得不到这些工作的原始报告, 例如报告[15]。但幸运地是根据目前可见的、提到这些工作的间接文献, 我们足以能够简略地回顾与袁家骝工作同期其他人的工作。

18 英国人1950年代的早期内部报告, 以关键词“proportional navigation”, 可在英国政府国家档案馆网站查到1949年以后的内部报告。1977出版的[7, 9.4节]介绍了英国人1950年代在比例导航方面的工作。译自苏联的一本书《导弹的红外线自动导引装置》, 1963年俄文出版, 从中文版第一章介绍比例导引法看, 其参考的最早文献是[10]1957年的俄文版。

19 也见Arthur E. Bryson, Jr. 和何毓琦(Ho Yu-Chi)的书[5, p. 154, p. 287]。

20 Zarchan的原文如下: Apparently, proportional navigation was first studied by C. Yuan and others at the RCA Laboratories during World War II under the auspices of the U.S. Navy [4]. Zarchan 和同事的文章[14]是第一个提出从文献可考的角度看, 袁家骝是第一个研究了比例导引的人。从我们看到的其书的不同版本: 1994年第二版、1997年第三版、2012年第六版, 都一直保留这个说法。

21 Shneydor 原文如下: Thus, it is reasonable to assume that PN was invented by C. L. Yuan at the RCA Laboratories in the USA.

22 注意google scholar给出的1941-1950年对袁家骝工作的引用没有包含内部报告[19]。正是1946年的这篇报告引用了袁家骝1943年RCA的研究报告, 使得我们知道袁报告是存在的。引用文献里有两篇分别是日语和阿拉伯语, 其余皆是英文文献。

23 根据维基, Jan A. Rajchman后来成为计算机先驱, 只读存储器(ROM)就是他构思的。

## 参考文献

- [1] Fred P Adler. Missile guidance by three dimensional proportional navigation. *Journal of Applied Physics*, 1956, 27(5):500-507.
- [2] Åström K J. Early control development in Sweden. *European Journal of Control*, 2007, 13:7-19.
- [3] Ralph H Bacon. The pursuit course. *Journal of Applied Physics*, 21:1065-1066, October 1950.
- [4] Arthur E Bryson, Jr. Linear feedback solution for minimum effort interception, rendezvous, and soft landing. *AIAA Journal*, 1965, 3(8):1542-1544.
- [5] Arthur E Bryson, Jr. and Yu-Chi Ho. *Applied Optimal Control*. Taylor & Francis, 1975.
- [6] Mike W Fossier. The development of radar homing missiles. *Journal of Guidance, Control, and*

- Dynamics, 1984, 7(6):641–651.
- [7] Garnell P and East D J. Guided Weapon Control Systems. Pergamon Press, first edition, 1977.
- [8] Yu-Chi Ho, Arthur E. Bryson Jr., and S. Baron. Differential games and optimal pursuit–evasion strategies. IEEE Transactions on Automatic Control, 1965, 10(4): 585–589.
- [9] Robert A Kirkman and John M Lebedda. Meteorological radio direction finding for measurement of upper winds. Journal of Atmospheric Sciences, 1948, 5(1):28–37.
- [10] Arthur S Locke. Guidance. Series in Principles of Guided Missiles Design. Van Nostrand, 1955.
- [11] Fritz Münster. A guiding system using television. In Th. Benecke and A. W. Quick, editors, History of German Guided Missiles Development, AGARD First Guided Missile Seminar, pages 135–161, 1956.
- [12] Stephen A. Murtaugh and Harry E. Criel. Fundamentals of proportional navigation. IEEE Spectrum, 1966, 3(12):75–85.
- [13] Paul J Nahin. Chases and escapes: the mathematics of pursuit and evasion. Princeton University Press, 2007.
- [14] William F Nesline and Paul Zarchan. A new look at classical vs modern homing missile guidance. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1981, 4(1):78–85.
- [15] Homer E Newell. Guided missile kinematics. Report No. R–2538, Naval Research Laboratory, 1945.
- [16] Pastrick H L, Seltzer S M, and Warren M E. Guidance laws for short–range tactical missiles. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1981, 4(2):98–108.
- [17] William Read. Review of conventional tactical radio direction finding systems. Technical note 89–12, Defense research establishment OTTAWA, May 1989.
- [18] Shneydor N A. Missile Guidance and Pursuit–Kinematics, Dynamics and Control. Series in Engineering Science. Horwood Publishing Limited, Chichester, U.K., 1998.
- [19] Hillel Spitz. Partial navigation courses for a guided missile attacking a constant velocity target. Rept. R–2790, Naval Research Laboratory, Washington, D.C., March 1946.
- [20] Charles E Watkins. Path target–seeking missiles in two dimensions. Technical Report NACA ACR No.L6B06, 1946.
- [21] Rafael Yanushevsky. Modern Missile Guidance. CRC Presss, 2007.
- [22] Chia-Liu Yuan. Radio direction finding at 1.67–meter waves. PhD thesis, California Institute of Technology, 1940.
- [23] Luke Chia-Liu Yuan. Direction finding at 1.67–meter waves. Science, 1940, 91(2370):524.
- [24] Luke Chia-Liu Yuan. An ultra–high frequency superheterodyne receiver for direction finding. The Review of Scientific Instruments, 1940, 11(9):276.
- [25] Luke Chia-Liu Yuan. Homing and navigational courses of automatic target seeking devices. Technical Report PTR–12C, RCA Laboratories, Princeton, N.J., December 1943.
- [26] Luke Chia-Liu Yuan. Radio direction finding at 1.67–meter wavelengths. Proceedings of the I.R.E., 1946, 34(10):752–757.
- [27] Luke Chia-Liu Yuan. Ultra–high–frequency radiosonde direction finding. Proceedings of the I.R.E., 1946, 34(11):852–857.
- [28] Luke Chia-Liu Yuan. Homing and navigational courses of automatic target–seeking devices. Journal of Applied Physics, 1948, 19:1122–128.
- [29] Luke Chia-Liu Yuan and Glendale Miller. Short wave direction finding. U.S. Patent No. 2,410,917, Nov.12, 1946. (1941.10.31 申请)
- [30] Paul Zarchan. Tactical and Strategic Missile Guidance, volume 239 of Progress in Astronautics and Aeronautics. AIAA, Inc., Reston, VA, sixth edition, 2012.
- [31] 冯端, 陆埭, 主编. 半个世纪的科学生涯——吴健雄袁家骝文集. 南京大学出版社, 1992.
- [32] 吴水清. 袁家骝和他的科学贡献. 物理通报, 5:42–44, 2003.
- [33] 宋铮. 天线与电波传播, 第二版. 西安电子科技大学

出版社, 2013.

[34] 柏均和口述. 袁家旧事, 张冠生整理. 山东画报出版社《老照片》, 第49辑, 2010.

[35] 江才健. 吴健雄——物理科学的第一夫人. 复旦大学出版社, 1997.

[36] 钱学森. 工程和工程科学. 力学进展, 2009, 39(6): 643-649. (原文发表在J. of the Chinese Institution of Engineers, 6, 1-14, 1948)

【作者简介】谢力, 博士, 华北电力大学控计学院教师, 研究领域: 随机系统估计与控制。

【作者简介】张奕群, 博士, 中国航天科工集团二院二部, 研究员, 研究领域: 飞行器导航、制导和控制。



# 系统科学与数学

**编委会** (按姓氏汉语拼音排序)

名誉主编: 吴文俊  
 顾问: 陈翰馥 郭雷 黄琳 林群 马志明 汪寿阳 王跃飞 方智先 袁亚湘 张恭庆 张景中  
 主编: 张纪峰  
 副主编: 唐勇 李明 孙福东 贺国华

**编委:**  
 艾明爽 曹礼群 曹永林 卓树根 陈豹明 陈旭瑾 程龙 邓建松 邓婉璐 董宏福 董纪静 方浩 方勇锐 高友友 郭嗣德 侯增广 倪志生 黄海军 纪志坚 贾庆山 贾志伟 康宇 寇刚 李建斌 李建平 李刚 李雷 李娟 梁斌 林华珍 刘琳琴 刘秀梅 刘志新 孟斌 彭怡 乔松 沈晓静 孙书利 谭民 唐锡晋 汪小我 王光亚 王建东 王金亭 王珏 文凤华 吴立刚 席在荣 夏元清 肖峰 谢国超 熊鹰 许阳超 杨新民 杨莹 游科友 余乐安 席文武 宣春明 曹广兴 张波 张海涛 张利军 张新雨 张颖伟 赵文斌 支丽红 周彬 朱利平 邹长范

**投稿:**  
 欢迎从事系统科学与数学研究的广大科研工作者向《系统科学与数学》投稿。

请通过本刊网站www.sysmath.com进行在线注册投稿。

**订户:**  
 欢迎国内外大中专院校、科研院所图书馆和院系及热衷于了解系统科学与数学前沿研究和最新动态的科研和教学人员及各界人士订阅本刊。  
 国内邮发代号: 2-563  
 国外发行刊号: Q 611  
 或直接通过编辑部订阅

**广告:**  
 本刊在国内外有良好的发行成绩并已开展彩色和黑白页面的广告业务。欢迎欲加强宣传扩大影响的国内外大学、科研院所等单位刊登广告信息、会议信息, 产品或书刊介绍、杂志征文等。有意者请与编辑部联系。

**期刊简介 (ISSN 1000-0577 CN 11-2019/O1)**  
 《系统科学与数学》是由中国科学院数学与系统科学研究院主办的国内外公开发行的学报类月刊, 是国内核心期刊之一。主要刊登系统科学以及与系统科学有关的数学、交叉科学、工程应用等方面在理论和方法上具有创造性的学术论文, 创造性地解决实际问题的科学技术报告, 以及重要学术动态的报道。读者对象是国内系统科学及其交叉科学的科学技术与教学工作。

本刊刊登内容包括: 系统理论与控制、系统工程与管理、统计方法及应用、信息处理和计算机数学等领域的学术论文及技术报告、重要学术动态和学术活动信息等等。

本刊为国内核心期刊, 中国期刊方阵期刊, 被国内外多个检索机构收录, 如美国数学评论、德国数学评论、中国科学引文数据库等。

**编辑部联系方式**  
 地址: 北京市中关村东路55号  
 中国科学院数学与系统科学研究院  
 邮编: 100190  
 Email: jssms@iss.ac.cn  
 xlix@amss.ac.cn  
 xlix2@amss.ac.cn

[www.sysmath.com](http://www.sysmath.com)