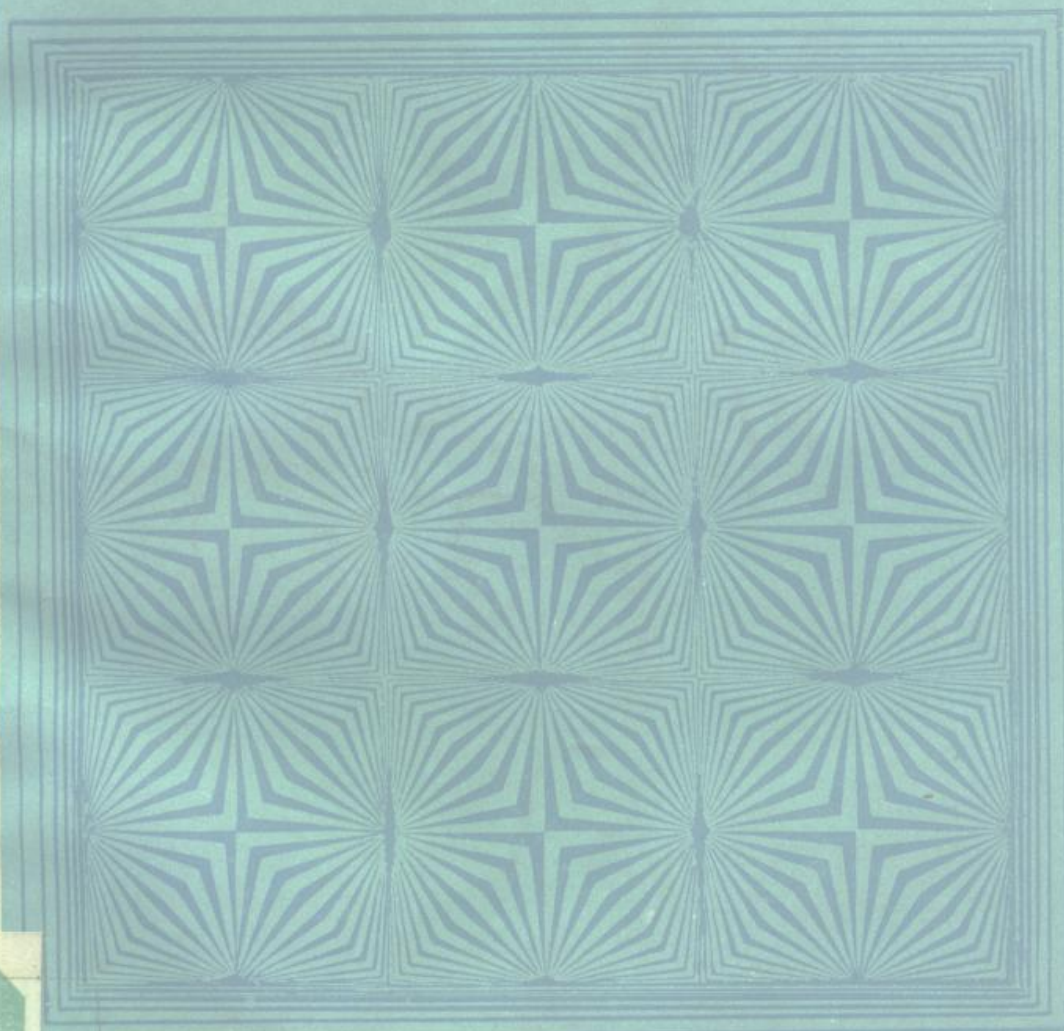


# 近代物理学 (上册)

• 甄长荫



北京师范大学出版社

本书是作者在原子物理的教学过程中，为使教材现代化和加强培养学生能力而编写的一部教材。全书在普通物理范畴内，以狭义相对论和量子论为基础，较详细、系统地讲述了原子、原子核、粒子物理以及分子、激光和固体等内容。全书共十九章，分上、下两册，上册包括前十一章。本书每章都有较多的练习题、典型例题和习题，并附有答案。语言通俗易懂，有启发性，便于自学。

# 近代物理学

JINDAI WULIXUE

(上册)

甄长荫 编

\*

北京师范学院出版社出版

(北京阜外花园村)

新华书店首都发行所发行

机械工业出版社印刷厂印装

\*

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{32}$  印张 16.625 字数 365 千字

1987年6月第一版 1988年3月第二次印刷

印数 3201—9200

书号7427·35 定价3.40元

## 序

近代物理学是物理学的一个重要分支。有众多的学科和专业需要有近代物理学的知识作为基础，因此需要既能反映近代物理学的概貌又能适合各个学科和专业要求的教材。可是，由于各种各样的原因，目前国内适合于这样教学要求的教材是不多的，特别是适合于培养中等学校物理教师的教材更感缺乏，而本书的出版，将有助于弥补这方面的不足。

编写教材，不仅需要一定的学识水平，还需要具有比较丰富的教学经验。二者缺一，是难以编写出有一定质量、符合教学需要的教材的。当前，正在进行教学改革，需要许多有学识水平、有教学经验的教师，编写适合各种不同需要的教材。甄长荫同志从事教学工作多年，在实践的基础上，写成了“近代物理学”讲义，多次试用，多次修改，现在定稿成书，并由北京师范学院出版社出版。这是适应时代发展要求的工作，是为四化作出的具体贡献。

本书内容广泛，包括相对论和量子力学基础；原子、分子、原子核和基本粒子；还有激光和固体，共四篇十九章。几乎覆盖了近代物理学的各个方面。各个篇章之间，既连接又区分，可供多种教学需要选用。就其深浅度而言，适合师院、师专、教育学院本科、专科的教学，也可作为其他院校师生或自学者参考。

例题、练习题、习题等，几乎占全书的三分之一的篇

幅，是本书的一大特点。这将给教学带来方便，帮助读者易于掌握所学内容。

愿此书能够在近代物理的教学中发挥应有的作用。

胡瑤光

1985年12月18日

## 引 言

### 一、近代物理学建立的历史背景

十九世纪末叶，科学技术有了很大的发展，工业发展的速度也很快，特别是内燃机、蒸汽机以及电力的采用和推广，提出了大量的理论、技术、工艺方面的问题。所有这些对当时物理学的发展都产生了直接和间接的影响。

当然，物理学的发展还有它本身的客观规律性。当时就物理学本身来讲，也正处于一场大变革的前夜，因为从表面上看，物理学好象已经发展得很完善，其实由于某些新的实验现象的出现，在物理学内部已经开始暴露出尖锐的矛盾。

所谓很完善是指当时的经典物理学（习惯上人们称牛顿力学、热力学及经典统计、麦克斯韦电磁理论等为经典物理学）已趋于完善。当时的物理学家多数认为物理学的重要定律全发现了，理论也完备了，特别是用经典理论解决了当时提出的某些重大疑难以后，使经典物理学简直到了令人崇拜的地步。一个突出的实例就是海王星的发现。还在十九世纪上半叶，天文学家们就发现天王星的运动规律与按牛顿力学从理论上得出的结果有矛盾。当时，人们并不认为牛顿力学有问题，而认为矛盾是由于其它原因造成的。于是，1846年科学家勒威耶(Leverrier)等提出，天王星运动规律与理论的偏离是由于在它的轨道之外尚有一颗行星存在，这颗行星的存在影响了天王星的运动。他们还预言了观测该行星的确切的时间、地点。果然，第二年人们就按他们预言的时间、地点

Ⅰ

观察到了一颗新行星，这颗行星，就是后来命名的海王星。当时对这个问题评价很高，甚至有人认为：不必向天空看一眼，完全凭计算就确定了远在当时所知的太阳系之外的一个星体的位置和大小，这完全是崇拜的语言。另外，麦克斯韦的电磁理论成功地解释了当时波动光学的各种问题，同样也是很惊人的、所有这些都被看成是经典物理学的巨大成就，面对这些成就使绝大部分物理学家更加认为，物质世界的运动规律已经完全掌握了，基本问题都已经解决了，甚至认为今后物理学家的工作只不过是把已有的实验做得更精确一些而已。

然而，物理学的发展，也是不以某些人们的意志为转移的。在物理学的研究进程中却出现了完全和上述观点相矛盾的、一系列的用经典理论所不能解决的问题。1900年，物理学家开尔文（Kelvin）说：“在已经基本建成的科学大厦中，后辈物理学家只要做一些零碎的修补工作就行了”；然而他接着又说：“但是，在物理学晴朗的天空的远处，还有两朵小小的令人不安的乌云”。他的前面的论述代表了当时科学家的一般观点，后面所提到的不安却代表了他的远见卓识。他所说的两朵乌云，指的是当时经典物理学无法解释的两个实验，一个是热辐射实验，另一个是迈克耳逊（A. A. Michelson）-莫雷（E. W. Morley）实验。事实上，正是这两朵乌云，冲破了经典物理的束缚，打破了物理学中沉静的局面，从而建立了近代物理的理论基础——量子论和相对论。

## 二、相对论和量子论是近代物理学的理论基础

相对论和量子论是近代物理学的两大支柱，换句话说，近代物理学可定义为需要相对论和量子论来解释的物理学。这两个理论是当经典物理学在说明实验事实遇到越来越大的困难而在本世纪初发展起来的。

狭义相对论是1905年由爱因斯坦(A. Einstein)根据他的狭义相对性原理和光速不变性原理而建立起来的。这一理论不仅把牛顿力学作为低速运动理论的特殊形式包括在自身之内,更重要的是,它揭示了作为物质存在的形式的空间和时间在本质上的统一性,进一步指出了物质和运动的统一性(质量和能量的相当性)。

目前,狭义相对论已成为宏观电动力学、加速器物理学、高能物理学等的理论基础。它的基本原理及其一些推论,特别是质量随速度变化和质量与能量之间的关系,不仅在实验中得到了验证,而且在粒子加速器的设计、原子弹和核反应堆的制造以及原子能的利用等生产实践中,都已得到广泛的应用。

量子论包括旧量子论和量子力学。旧量子论是一种过渡性的理论,而量子力学则是研究有关微观粒子运动规律的比较完善的理论。

量子力学规律的发现,是人们对自然界认识的深化,和相对论一样,它也是把经典力学做为一种特殊形式包括在它自身之内。由于量子力学所涉及的规律极为普遍,它已深入到物理学的各个领域以及化学和生物学的某些领域,象原子分子结构、固体理论、量子化学等等。现在可以说,要在物理学的任何领域进行认真的工作,没有量子力学是不可思议的。

还需指出,狭义相对论与量子力学相结合,在揭示微观高速运动现象的规律方面,也取得了很大的成功。

### 三、教材与教学

1. 从结构上讲,本教材分四大部分,分写成四篇。

第一篇 近代物理学的基础理论 内容包括狭义相对论

基础，旧量子论和量子力学基础三章。应该说明的是旧量子论不仅在历史上起过重要作用，而且从教学的角度看，也有助于初学者从经典物理过渡到现代量子理论。但另一方面，它毕竟是一种过渡性理论，对它也不宜过份强调。基于以上考虑，在本教材中，一方面保留了它的主要内容，但又比一般教材做了较大的删减。另外，关于量子力学我们仅做必要的介绍，使读者了解其基本概念和规律，这主要是为了满足本课程的需要，并不要求在本课程中熟练地运用一些公式做具体的计算，换句话说，有关量子力学和相对论的详细内容尚需在其它课程中进一步学习。

以第一篇为基础理论，展开了本教材的后三篇。

**第二篇 原子物理** 内容包括第四章到第十一章。这部分内容从整体上讲，已基本定型。主要研究与原子的性质、结构有关的问题。第九章到第十一章为基本理论的应用部分，教师可以根据具体情况决定取舍。

**第三篇 原子核物理** 内容包括第十二章到第十六章。这部分同原子物理比较虽然有些内容尚处于发展、研究之中，但它已展现出巨大的生命力。

**第四篇 粒子物理** 内容包括第十七章到第十九章。这部分内容是人类探索物质结构的最前沿科学，它在现阶段的任务是研究基本粒子的结构及其运动规律。这部分不论实验和理论都在飞速发展之中，还未能得到能够概括整个领域的完整理论，这是这部分内容发展到现阶段的特点。

以上各部分之间有区别，但又有内在的联系，在学习过程中注意到这些将是有益的。

2. 由于编写本教材时考虑了自学者以及培养学生自学能力的需要，内容叙述较详细，教师不必对所有内容都一概讲

解，有些内容可留给同学自学。

打\*的章节，及打△章节内的打\*部分为机动内容，学时较少的学校可以删减。

3. 本教材每章之后都有相当数量的例题，大都具有典型性、综合性以及分析处理问题的一些技能技巧，认真学习，深入体会会有助于能力的培养和对主要内容的掌握，这些例题也可做习题课内容。另外，教材正文的不同部分还设置了一些练习题，一般都比较简单，主要是为了及时掌握某些概念和公式，虽有答案，但对初学者亲自做一下也会有收益。教材中所选习题量较大，主要是为了教师布置作业有选择余地，另一方面则是为了学有余力的同学选作，做为一般同学的作业只能选留较少一部分。

4. 通过本课程的学习，应该对物理学，特别是对近代物理学的发展、理论与实践的关系等有一个较全面的、正确的认识；对所学主要内容要求很好掌握，这是今后进一步学习和工作所必须的；从整体来讲近代物理的研究方法与物理学其它部分是相同的，但由于研究对象（由宏观到微观）的变化，致使在研究和处理问题的方法、手段和观点上都有其特点，通过本课程的学习，逐渐地了解并学会运用它们，也是一个重要方面；近代物理，特别是粒子物理已进入当前物理学的前沿，通过这部分内容的学习，不但要获得许多有用的知识，并要求进一步体会科学实验在发展基本理论中的重要作用，以及理论与实验工作的相互结合怎样成为推动这门学科发展的重要手段。

# 目 录

|    |     |
|----|-----|
| 序言 | VII |
| 引言 | IX  |

## 第一篇 基础理论

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第一章 狭义相对论基础              | 1   |
| * § 1.1 经典力学的伽利略变换和相对性原理 | 1   |
| △ § 1.2 迈克耳逊-莫雷实验        | 9   |
| § 1.3 洛伦兹变换              | 19  |
| § 1.4 相对论运动学效应           | 25  |
| △ § 1.5 相对论中的速度变换        | 36  |
| § 1.6 相对论中的质量与动量         | 41  |
| § 1.7 相对论中的能量 质能关系       | 47  |
| 例题                       | 56  |
| 习题                       | 64  |
| 第二章 旧量子论                 | 69  |
| § 2.1 普朗克量子论——能量量子化      | 69  |
| § 2.2 光辐射的二象性            | 83  |
| § 2.3 原子的核式结构            | 96  |
| § 2.4 氢原子光谱的实验规律         | 104 |
| △ § 2.5 玻尔理论             | 109 |
| * § 2.6 夫兰克-赫兹实验         | 128 |
| 例题                       | 132 |
| 习题                       | 144 |

注：标\*号章节为机动内容；标△号章节内有部分机动内容。

### 第三章 量子力学基础 .....153

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| § 3.1 量子力学的实验基础 .....            | 153 |
| § 3.2 波函数及其统计解释 .....            | 156 |
| § 3.3 薛定谔方程 .....                | 161 |
| * § 3.4 量子力学的两个典型问题 .....        | 167 |
| § 3.5 测不准关系 .....                | 175 |
| * § 3.6 量子力学中的波和粒子 .....         | 182 |
| § 3.7 氢原子 .....                  | 186 |
| § 3.8 量子力学与玻尔理论对氢原子处理的分析比较 ..... | 201 |
| * § 3.9 量子力学的体系和发展 .....         | 206 |
| 例题 .....                         | 210 |
| 习题 .....                         | 215 |

## 第二篇 原子物理

### 第四章 原子的激发与辐射 .....219

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| § 4.1 光谱概述 .....      | 219 |
| § 4.2 原子的激发与辐射 .....  | 223 |
| * § 4.3 光的辐射与吸收 ..... | 232 |
| △ § 4.4 光谱线的宽度 .....  | 238 |
| 例题 .....              | 245 |
| 习题 .....              | 249 |

### 第五章 单价原子 .....251

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| § 5.1 碱金属原子光谱的一般结构 .....          | 251 |
| § 5.2 角动量的空间取向量子化和斯特恩-革拉赫实验 ..... | 261 |
| § 5.3 碱金属原子光谱的精细结构和电子自旋 .....     | 268 |
| § 5.4 碱金属原子的状态符号和能级的简并度 .....     | 285 |
| △ § 5.5 氢原子光谱的精细结构 .....          | 291 |
| 例题 .....                          | 298 |

## N

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 习题 .....                         | 307        |
| <b>第六章 多价原子 .....</b>            | <b>314</b> |
| § 6.1 氦及碱土金属原子的光谱实验规律 .....      | 315        |
| * § 6.2 量子力学对氦原子的描述 .....        | 318        |
| § 6.3 具有两个价电子的原子态 泡利原理 .....     | 327        |
| § 6.4 复杂原子规律概述 .....             | 340        |
| 例题 .....                         | 344        |
| 习题 .....                         | 347        |
| <b>第七章 原子的壳层结构和伦琴光谱 .....</b>    | <b>350</b> |
| § 7.1 元素周期表 .....                | 350        |
| § 7.2 原子的电子壳层结构 .....            | 353        |
| § 7.3 原子的电子壳层的建造——元素周期表的形成 ..... | 358        |
| * § 7.4 同科电子及其规律性 .....          | 368        |
| § 7.5 伦琴光谱 .....                 | 373        |
| △ § 7.6 原子内层电子的跃迁 .....          | 379        |
| 例题 .....                         | 386        |
| 习题 .....                         | 394        |
| <b>第八章 在外磁场中的原子 .....</b>        | <b>399</b> |
| § 8.1 原子光谱在外磁场中的变化 .....         | 399        |
| § 8.2 外磁场对原子的作用 .....            | 402        |
| △ § 8.3 磁场中谱线分裂的理论解释 .....       | 408        |
| 例题 .....                         | 419        |
| 习题 .....                         | 425        |
| <b>*第九章 分子 .....</b>             | <b>428</b> |
| § 9.1 分子与分子光谱 .....              | 428        |
| § 9.2 分子的转动能级 .....              | 436        |
| § 9.3 分子的振动能级 .....              | 440        |
| △ § 9.4 分子的振转光谱 .....            | 444        |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| § 9.5 分子中的电子跃迁 .....        | 448        |
| 例题 .....                    | 452        |
| 习题 .....                    | 457        |
| <b>*第十章 激光</b> .....        | <b>460</b> |
| § 10.1 激光的特点 .....          | 460        |
| § 10.2 粒子数反转 .....          | 463        |
| § 10.3 谐振腔 .....            | 470        |
| § 10.4 典型激光器举例——氦氖激光器 ..... | 475        |
| 例题 .....                    | 478        |
| 习题 .....                    | 479        |
| <b>*第十一章 固体</b> .....       | <b>482</b> |
| § 11.1 固体的类型 .....          | 482        |
| § 11.2 晶体的结合与原子结构的关系 .....  | 488        |
| § 11.3 固体理论发展概述 .....       | 490        |
| § 11.4 固体的能带理论 .....        | 493        |
| § 11.5 导体、绝缘体和半导体 .....     | 498        |
| 例题 .....                    | 507        |
| 习题 .....                    | 509        |
| <b>上册单数习题答案</b> .....       | <b>510</b> |

# 第一篇 基础理论

## 第一章 狭义相对论基础

经典力学对解决宏观物体的低速运动是卓有成效的（低速是指其速度比光速小得多）。但当物体作与光速可以比拟的高速运动时，经典力学的概念和结论就不适用了，解决高速运动问题必须用相对论。本章将简单介绍狭义相对论的基本观点和由它得出的若干结论。

所谓狭义相对论，就是仅仅讨论在不同惯性系中的观察者对各种事件的描述。

### • § 1.1 经典力学的伽利略变换和相对性原理

伽利略变换和力学相对性原理是在牛顿的绝对时空观的思想指导下所产生的必然结果。

#### 一、伽利略变换

这里讨论在相对速度为  $v$  的两个惯性系  $S$  和  $S'$  上的观察者，对某运动的物体所作的运动学和动力学描述有何异同，以及怎样从一个惯性系对某一运动的描述得到另一惯性系对同一运动的描述。

如图 1.1 所示， $S'$  相对于  $S$  以速度  $v$  沿  $x$  轴方向作匀速直线运动。设  $S$  和  $S'$  坐标原点重合时，两个系统的时钟开始计时（ $t = t' = 0$ ）。 $S$  和  $S'$  系中的观察者分别用静止于

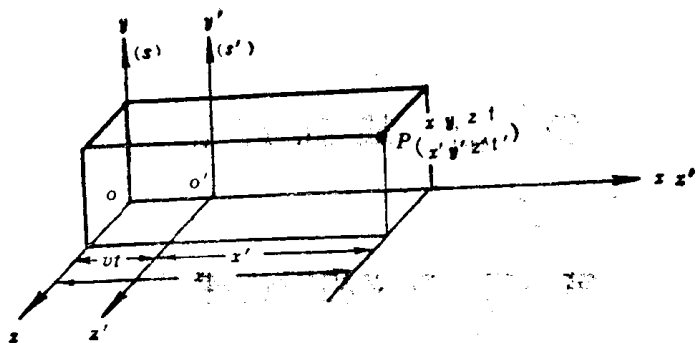


图1.1 伽利略变换式的推导

各系的尺和钟测量事件  $P$  得  $(x, y, z, t)$  和  $(x', y', z', t')$ 。

### 1. 伽利略变换

若  $S$  和  $S'$  中的尺和钟完全相同,  $(x, y, z, t)$  与  $(x', y', z', t')$  关系如何? 由图 1.1 可知

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$$

又因为开始  $t = t' = 0$ , 以后因钟相同则有

$$t = t'$$

故有

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 称为伽利略变换(式)。式 (1) 也可以写成,

$$\begin{cases} x = x' + vt' \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{cases} \quad (2)$$

分析可知，在导出伽利略变换时，实际上已隐含了牛顿力学对时空的两个基本假设：时间间隔是绝对的， $\Delta t = \Delta t'$ ，与观察者的速度无关；长度是绝对的，

$$\begin{aligned} & \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \\ &= \sqrt{(x'_2 - x'_1)^2 + (y'_2 - y'_1)^2 + (z'_2 - z'_1)^2} \end{aligned}$$

同样与观察者的速度无关。

## 2. 速度合成定理

因为  $t = t'$ ，将式 (2) 对  $t$  求导得

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \frac{dx'}{dt} + v = \frac{dx'}{dt'} + v \\ \frac{dy}{dt} = \frac{dy'}{dt} = \frac{dy'}{dt'} \\ \frac{dz}{dt} = \frac{dz'}{dt} = \frac{dz'}{dt'} \end{cases} \quad \text{即} \begin{cases} u_x = u'_x + v \\ u_y = u'_y \\ u_z = u'_z \end{cases}$$

将其写成矢量式即为

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}' + \mathbf{v} \quad (3)$$

式 (3) 称为速度合成定理，它表明：当  $S'$  系相对于  $S$  系以速度  $\mathbf{v}$  做匀速直线运动时，物体相对于  $S$  系的速度  $\mathbf{u}$  等于物体相对于  $S'$  系的速度  $\mathbf{u}'$  与  $\mathbf{v}$  的矢量和。

**练习 1** 静止于地面上的人看到雨点竖直下落，其速度  $u = 10$  米/秒，若火车以速度  $v = 8$  米/秒前进，求雨点相对于火车的速度  $u'$ 。

**解** 分别在地面上和火车上建立  $S$  系和  $S'$  系 如图 1.2 所示。根据速度合成定理雨点相对于火车的速度为

$$u' = u - v = u + (-v)$$

其中  $u$  为雨点相对于地面(即  $S$  系)的速度矢量,  $v$  为火车相对于地面(即  $S'$  系相对于  $S$  系)的速度矢量, 由图可看出

$$u' = \sqrt{u^2 + (-v)^2} = \sqrt{10^2 + 8^2} = 12.8 \text{ (米/秒)}$$

$u'$  与竖直方向所成角度为  $\alpha$ , 则

$$\tan \alpha = \frac{|v|}{u} = \frac{8}{10} = 0.8, \text{ 故 } \alpha = 38^\circ 40'$$

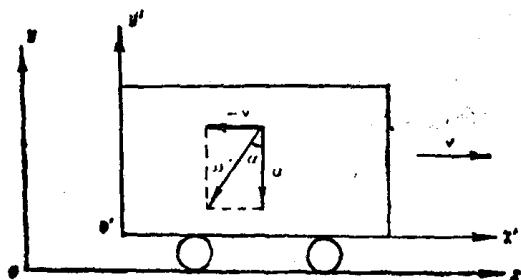


图1.2 速度合成图

**练习 2** 有一条河, 宽度为  $L$ , 河水对河岸流速为  $v$ , 今有两条同样的船  $A$  和  $B$ , 分别沿图 1.3 所示路线往返一次, 已知船  $A$  和  $B$  对流动河水的速率都为  $u$ , 求船  $A$  和  $B$  沿图示路线往返一次各需多少时间? 并问哪条路线所需时间较长?

**解** 路程已知, 关键是确定船对河岸的速度, 因为找出该速度就可以求时间, 水流对河岸的速度及船对流动河水的速率均为已知。若确立两个坐标系  $S'$  系(与河岸相连的参照坐标系)和  $S$  系(与流动河水相连的坐标系), 显然, 它们之间的相对速度为  $v$ , 利用伽利略速度变换便能求得船相对于河岸的速度  $u'$ 。