

Jiaotong Gongcheng Suanli

交 通 工 程 算 例

[英] R. J. Salter 著

蔡龙章 王 炜 译

徐吉谦 校

人民交通出版社

目 录

前言	1
例 1 公路交通流速度、时间平均速度和空间平均速度的测定	2
例 2 公路车速分布 (正态分布拟合)	9
例 3 公路行程车速 (流动车观测法)	12
例 4 流动车观测法的理论基础	15
例 5 举例说明汽车跟踪理论	18
例 6 表达公路车头时距的负指数分布	22
例 7 表达交通拥挤公路上车头时距的复合指数分布	26
例 8 公路交通流的流量、速度与密度之间的关系	31
例 9 公路瓶颈路段的流量、速度与密度之间的关系	37
例 10 排队论在公路上的应用	38
例 11 优先权交叉口, 可接受间隙和余隙	42
例 12 举例说明优先权交叉口的延误	49
例 13 举例说明优先权交叉口的通行能力	51
例 14 常规环形交叉口的通行能力	57
例 15 环形交叉口进口流量与环形流量之间的关系	61

例16	举例说明高速公路上的交织	66
例17	用计算机程序说明交织问题的《道路通行 能力手册》方法	70
例18	高速公路上的合流	83
例19	用运输部方法设计合流和分流车道	87
例20	交通信号控制介绍	96
例21	交通信号周期时间	103
例22	举例说明交通信号控制交叉口的右转车流	107
例23	举例说明在交通信号控制交叉口上, 延误 随周期时间的变化	112
例24	举例说明交通信号控制交叉口上的延误	115
例25	交通信号控制交叉口的设计	117
例26	三相位交通信号控制交叉口的设计	120
例27	两信号控制交叉口之间车队的疏散	123
例28	将交通信号控制网中的延误减至最小的组 合方法	126
例29	公路交通流的成本和受益	130
例30	公路改善的经济评价	133
例31	公路营运费用的计算	137
例32	公路车头时距分布的模拟	143
例33	道路优先权交叉口的延误模拟	146
习题		159

前 言

在发达国家的大多数城市地区，最有效地使用现有道路网的需要不断增长，从而导致了交通工程技术的广泛应用。随着道路交通工程与管理的重要性日益增加，许多道路技术人员的课程、大学土木工程方面的课程以及更高级的专业课程中，都列入了道路交通工程研究的内容。

本书旨在通过范围广泛的道路交通问题的一系列算例，来说明道路交通流的原理及道路诸要素的实际交通设计，以此为学习这些课程的学生提供参考。

本书对初学道路交通工程或试图使自己在该学科的知识得到更新的专业工程师们，均有参考价值。

R. J. Salter

例1 公路交通流速度、时间平均速度和空间平均速度的测定

(a) 定义和讨论用以描述公路交通流速度的方法。

(b) 表中公路交通流速度的观测结果是用雷达测速仪得到的。确定速度在时间和空间上的分布、时间平均速度和空间平均速度，并说明时间与空间平均速度之间的关系。

解答：

(a) 沃卓普 (Wardrop) [1] 已证明，当交通流被分成流量为 $q_1, q_2, \dots, q_c$ ，速度为 $v_1, v_2, \dots, v_c$ 的支流时，其总流量为：

$$Q = q_1 + q_2 + \dots + q_c$$

$$= \sum_{i=1}^c q_i$$

如果 $f_1 = q_1/Q, f_2 = q_2/Q, \dots, f_c = q_c/Q$ ，则 $f_1, f_2, \dots, f_c$ 是车速为 $v_1, v_2, \dots, v_c$ 的车辆在时间上的频率，并且

$$\sum_{i=1}^c f_i = 1$$

就速度为 v_i 的支流 q_i 来讲，它的车辆之间平均时间间隔为 $1/q_i$ ，而在这段时间内行驶的距离为 v_i/q_i 。在空间上此车流的密度或集中度，即在任意瞬间每单位长度道路上的车辆数为：

$$d_i = q_i/v_i \quad i = 1, 2, \dots, c \quad (1.1)$$

• 2 •

参数 $d_1, d_2, \dots, d_c$ 表示每一独立车流中车辆的密度, 而总的密度为:

$$D = \sum_{i=1}^c d_i$$

再设 $f'_i = d_i/D$ (1.2)

$f'_1, f'_2, \dots, f'_c$ 是速度为 $v_1, v_2, \dots, v_c$ 的车辆在空间上的频率。

两种速度分布中的每一种都有一个平均值。时间平均速度可由下式求得:

$$\bar{v}_t = \sum_{i=1}^c q_i v_i / Q = \sum_{i=1}^c f_i v_i \quad (1.3)$$

空间平均速度可由下式求得:

$$\bar{v}_s = \sum_{i=1}^c d_i v_i / D = \sum_{i=1}^c f'_i v_i \quad (1.4)$$

已知:

$$\bar{v}_s = \sum_{i=1}^c d_i v_i / D$$

且由公式(1.1)可知

$$d_i = q_i / v_i$$

因此

$$\bar{v}_s = \sum_{i=1}^c q_i / D = Q / D$$

这是交通流的基本关系式, 即流量等于空间平均速度乘以密度。

① 原文书为 d_1 , 应为 d_i ——编辑。

求时间平均速度的常用方法是借助雷达测速仪，或者根据测定车辆通过一短路段的时间，按已知短路段基准长度和观测的行驶时间计算出速度。如果观测到的诸速度分别为 $v_1, \dots, v_n$ ，则

$$\bar{v}_t = \sum_{i=1}^n \frac{v_i}{n} \quad (1)$$

如果测出的行驶时间分别为 $t_1, \dots, t_n$ ，那么要求的空间平均速度为：

$$\bar{v}_s = \sum_{i=1}^n \frac{l}{n t_i} \quad (2)$$

式中： l 为平均行驶时间；

l 为已知短路段距离。^③

求空间平均速度的另一种方法是在一短时间间隔 t 内拍摄两张空中照片，并量测每辆车所通过的距离 l 来求算，计算得出：

$$v = \frac{l}{t} \quad \text{则} \quad \bar{v}_s = \sum_{i=1}^n \frac{v}{n}$$

$\bar{v}_t$ 和 $\bar{v}_s$ 之间的一般关系式也已证明^[1]，可用下式表示：

$$\bar{v}_t = \bar{v}_s + \sigma_s^2 / \bar{v}_s \quad (1.5)$$

式中： σ_s 是空间平均速度分布的标准差，可由下式得出：

$$\sigma_s^2 = \sum_{i=1}^n d_i (v_i - \bar{v}_s)^2 / D \quad (1.6)$$

① 原文书为 $\bar{v}_t = \sum_{i=1}^n v_i / n$ ，有误——编辑；

② 原文书为 $\bar{v}_s = \sum_{i=1}^n n / \bar{t}$ ，疑有误——编辑；

③ 原文书没有，特加——编辑。

布雷曼 (Breiman) [2] 也证明了速度的空间分布和时间分布之间的关系可由下式表示:

$$\frac{f(v)_{\text{空间}}}{f(v)_{\text{时间}}} = \frac{\bar{v}_s}{v} \quad (1.7)$$

式中: $\bar{v}_s$ 是空间平均速度; v 是速度分级的中点值; $f(v)$ 是相对频率。

(b) 在表1.1中用表格法解题。第一栏列出速度分级, 将所有速度值都化整到最靠近的 km/h。第二栏列出在 1 小时观测期间内观测到的这些速度的频数 (出现的次数), 因而频数表示每小时车辆数中每个速度分级中出现的车流量。

表 1.1

1 速度分级 (km/h)	2 流量 (辆/小时)	3 时间分布 百分率	4 密度 (辆/公里)	5 空间分布 百分率	6 $\bar{v}_s$
4-11	2	0.2208	0.2667	1.7875	60.72
12-19	8	0.8830	0.5161	3.4590	60.72
20-27	2	0.2208	0.0851	0.5704	60.71
28-35	14	1.5453	0.4444	2.9785	60.71
36-43	40	4.4150	1.0127	6.7874	60.73
44-51	89	9.8234	1.8737	12.5581	60.72
52-59	160	17.6600	2.8829	19.3220	60.72
60-67	164	18.1015	2.5827	17.3100	60.72
68-75	159	17.5497	2.2238	14.9045	60.72
76-83	100	11.0375	1.2579	8.4308	60.72
84-91	72	7.9470	0.8229	5.5153	60.73
92-99	53	5.8499	0.5550	3.7198	60.73
100-107	20	2.2075	0.1932	1.2949	60.71
108-115	18	1.9868	0.1614	1.0817	60.71
116-123	5	0.5519	0.0418	0.2804	60.72
Σ906			Σ14.9203		60.73

第三栏是计算出的频数分布百分率，它是用第二栏中单个数值除以第二栏的总和得到的。

第四栏是各速度分级中计算出的车辆密度。用每公里车辆数来表示。这个值是根据公式 1.1，用第二栏的数值除以第一栏中各速度分级的中点值得到的。

第五栏是速度的空间分布，由公式 1.2 得出，即用第四栏中单项数值除以第四栏的总和而得的。

第六栏是各速度分级的空间平均速度的计算值 $\bar{v}_s$ ，它由公式 1.3 计算得到的，即用第五栏的数值除以第三栏的数值，并乘以第一栏速度分级中值而得。由此可见，除了舍入误差外，布雷曼 (Breiman) 得到的关系式是正确的，并可与第二栏的总和除以第四栏总和所得的速度/流量/密度关系式计算的 $\bar{v}_s$ 进行比较。

图1.1绘出了速度的时间和空间分布，正如预料的那样，由此图可清楚地看出，较低的速度分级间隔中观测到的空间速度频率较高。

时间平均速度 $\bar{v}_t$ 可由公式1.3来计算，式中 f_i 是每档速度分级中车辆所占的比例（第三栏除以100）， v_i 是速度分级中值（第七栏）。表1.2中用表格法进行计算，得出

$$\bar{v}_t = \sum q_i v_i / Q = 67.4 \text{ km/h. } \textcircled{1}$$

空间平均速度可由公式1.4来计算，式中 f'_i 是每档速度分级中车辆所占的比例（第五栏除以 100）， v_i 是速度分级的中值（第七栏）。在表1.2中，用表格法进行计算，得出：

$$\bar{v}_s = \sum d_i v_i / D = 60.7 \text{ km/h}$$

空间平均速度也可以用公式 1.7 来计算，这已列于第六

① 原文书为 $\bar{v}_t = \sum q_i v_i / D$ ，有误——编辑。

表 1.2

7 速度分级 中 值 (km/h)	8 $\frac{\text{栏3} \times \text{栏7}}{100}$	9 $\frac{\text{栏5} \times \text{栏7}}{100}$	10 栏7 - $\bar{v}_s$	11 (栏5 $\times$ 栏10) ²
7.5	0.01656	0.13406	-53.225	50.638
15.5	0.13687	0.53615	-45.225	70.747
23.5	0.05189	0.13404	-37.225	7.904
31.5	0.48677	0.93823	-29.225	25.439
39.5	1.74393	2.68102	-21.225	30.577
47.5	4.66612	5.96510	-13.225	21.964
55.5	9.90130	10.72371	-5.225	5.275
63.5	11.49445	10.99185	2.775	1.333
71.5	12.54804	10.65672	10.775	17.304
79.5	8.77481	6.70249	18.775	29.719
87.5	6.95363	4.82589	26.775	39.539
95.5	5.58665	3.55241	34.775	44.984
103.5	2.28476	1.34022	42.775	23.693
111.5	2.21528	1.20610	50.775	27.887
119.5	0.65952	0.33508	58.775	9.686
	$\Sigma 67.42058$	$\Sigma 60.72507$		$\Sigma 406.689$

栏中, 平均值也是60.7km/h。

空间速度分布标准差可由公式1.6来计算, d_i/D 的值是由第五栏除以100得出的, $v_i - \bar{v}_s$ 是由第七栏减去 $\bar{v}_s$ 得到的, 这个值已列于表中第十栏。第十一栏的总和是 σ^2 , 它等于406.689 (km/h)²。

然后根据公式1.5得:

$$\bar{v}_t = 60.725 + 406.689/60.725 = 67.4(\text{km/h})$$

此值可与前面的计算值进行比较。

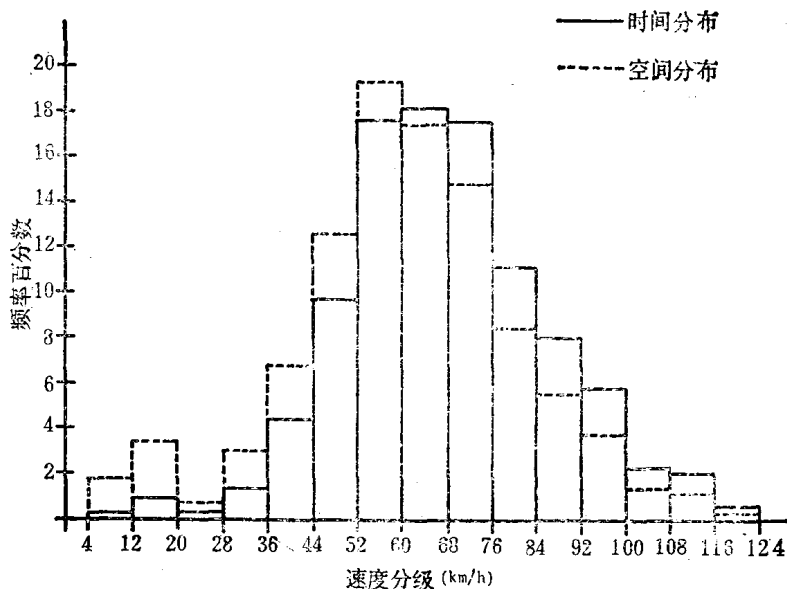


图 1.1

速度分级(km/h)	4-11	12-19	20-27	28-35	36-43	44-51	52-59
频数/小时	2	8	2	14	40	89	160

60-67	68-75	76-83	84-91	92-99	100-107	108-115	116-123
164	159	100	72	53	20	18	5

参 考 文 献

〔1〕 J.G.Wardrop, Some theoretical aspects of road traffic research, Proc. Institution of Civil Engineers 1, Part II 325-362, 1952

〔2〕 L.Breiman, Space time relationships in oneway traffic flow, Transportation Research, 3[3], 365-376, 1969

例2 公路车速分布（正态分布拟合）

观测数据是用雷达测速仪观测通过公路上某一点的各车辆的速度获得的。试计算其平均车速、观测车速的标准离差和85%位速度，并说明速度的分布是否可用正态分布来表示。观测值以速度分级（第一栏）和每档分级中测到的速度数目（第二栏）的表格形式列于表2.1。

解答：

在第三栏中填写累计频数分布。这一栏是第二栏的累计算术和，表示车速等于或小于各速度分级中上限的车辆数。例如车速为54.9km/h或小于54.9km/h的车辆有79辆，在第四栏中的这项累计频数以累计频率的百分率表示。例如累计频数269，可用269除以394的累计频率百分率表示。

平均速度和速度的标准离差可用具有这些功能的计算器进行计算。如果没有这类计算器，那么可利用编码来消除一些冗长的算术计算。如第五栏所示，选定一个可以视为平均值的速度分级，并规定为零，比它低和高的速度分级分别规定为逐渐递增的负值和正值。

然后，编码数乘以相应的频数（第二栏）示于第六栏中，并累加起来。则平均值可由

规定为零分级的中间值 + $\frac{\text{分级间隔} \times \sum 6 \text{ 栏}}{\sum 2 \text{ 栏}}$ 得出^①，即

① 原文为“..... + $\frac{\text{分级间隔} + \sum 6 \text{ 栏}}{\sum 2 \text{ 栏}}$ ”，有误——编辑。

表 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
速分 度级 (km/h)	观 测 频 数	累 计 频 数	累 计 频 率	编 码	栏 2 × 栏 5	栏 2 × (栏5) ²	栏8 标准差	正 态 面 积	概 率	理 论 频 率	(栏12-栏2) ² 栏12	
30-34.9	3	3	0.76	-7	-21	147	-2.21	.0136				
35-39.9	9	12	3.05	-6	-54	324	-1.88	.0301	.0185	6.5)		
40-44.9	14	26	6.60	-5	-70	350	-1.54	.0618	.0317	12.5)	0.84	
45-49.9	21	47	11.93	-4	-84	336	-1.21	.1131	.0513	20.2	0.03	
50-54.9	32	79	20.05	-3	-96	288	-0.87	.1922	.0791	31.2	0.02	
55-59.9	40	119	30.20	-2	-80	160	-0.54	.2946	.1024	40.3	0.02	
60-64.9	48	167	42.39	-1	-48	48	-0.20	.4207	.1261	49.7	0.06	
65-69.9	55	222	56.35	0	0	0	0.13	.5517	.1310	51.6	0.22	
70-74.9	47	269	68.27	1	47	47	0.47	.6803	.1291	50.9	0.30	
75-79.9	39	308	78.17	2	78	156	1.2	.7910	.1102	43.4	0.45	
80-84.9	33	341	86.55	3	99	297	1.14	.8729	.0819	32.3	0.02	
85-89.9	23	364	92.39	4	92	368	1.48	.9306	.0577	22.7	0	
90-94.9	15	379	96.19	5	75	375	1.81	.9649	.0343	13.5	0.17	
95-99.9	10	389	98.73	6	60	360	2.15	.9842	.0193	7.6	1.29	
100-104.9	5	394	100	7	35	245	2.48	.9934	.0092	3.6		
	Σ 394				Σ 33	Σ 3501					Σ 3.42	

$$\text{平均速度} = 67.5 + \frac{5 \times 33}{394} = 67.9 \text{ km/h}$$

标准离差可由

$$\text{分级间隔} \left[\frac{\sum (\text{频数} \times \text{离差}^2)}{\sum 2 \text{ 栏}} - \left(\frac{\text{频数} \times \text{离差}}{\sum 2 \text{ 栏}} \right)^2 \right]^{1/2} \text{ 得出。}$$

在计算此值之前，必须先计算频数 $\times$ 离差²，这个值已列在表格的第七栏中。

$$\text{标准离差} = 5 \left[\frac{3501}{394} - \frac{33^2}{394^2} \right]^{1/2} = 14.90 \text{ km/h} \text{①}$$

假定速度是正态分布，则理论频率可用大多数统计教科书中能找到的正态面积表来计算。首先从速度分级上限减去平均车速，并填入第八栏中，其次用第八栏中这些对平均值的离差除以标准离差，并填入第九栏中。

然后，可从统计表得到分级界限与平均值之间相应的面积，并把这面积填入第十栏。此栏两相邻数之间的差值是相应速度分级界限之间观测到的车速概率，把这些值列在第十一栏中。当这些值乘以理论频数时，则得到每档速度分级中观测车速的理论频数值(第十二栏)。然后在第十三栏中应用 χ^2 检验(chi-squared test)。本例有8个自由度，它等于合并后的分级数12减去约束数再加1(观测的总数，平均值和标准离差)， χ^2 值为3.42，它表明，观测的样本与在10%显著水平下正态分布的总体之间不存在显著差别，但是在5%显著水平时有显著差别。

① 原文为“……=5 $\left[\frac{3501}{394} - \frac{33^2}{394^2}\right]^{1/2}$ =……”，有误——编辑。

例3 公路行程车速（流动 车观测法）

(a)描述交通流行程速度如何量测。

(b)在史密司 (Smith) 大街到吉恩 (Ginn) 广场之间双向公路上, 沿每个方向行驶 6 次, 量测与流动车同向和对向行驶的交通流量, 得到如下资料:

汽车从史密司大街驶往吉恩广场

行程		车辆数目		
开始	结束	超车	被超车	会车
16.05	16.16	2	1	401
16.34	16.44	3	2	360
17.05	17.17	4	1	419
17.35	17.44	5	3	397
18.05	18.18	2	1	406
18.35	18.45	2	3	412

汽车从吉恩广场驶往史密司大街

16.19	16.31	3	2	320
16.50	17.03	7	3	319
17.20	17.32	4	2	307
17.50	17.59	4	3	331
18.20	18.33	5	2	317
18.50	19.01	7	1	305

从史密司大街到吉恩广场为6.4km。

计算每一方向的流量和流速。

解答:

(a) 在交通工程实践中, 常常需要用到车辆通过一段公路的行程车速或平均车速。这种车速不能在公路上的某一点取平均点速度得到, 而往往是通过行驶的汽车或流动观测员方法获得。沃卓普 (Wardrop) 和查尔斯沃斯 (Charlesworth) 已叙述过这种方法^[1], 它可求得车流的流量和流速。

一个观测员驶过一段已知长度的公路, 并记下顺车流方向 (t_w) 和逆车流方向 (t_a) 行驶的时间。在沿公路与交通流同向行驶进行调查时, 观测员记下超过他的车辆数目减去被他超过的车辆数目 (y)。然后, 观测员逆交通流方向进行调查, 并记下遇到的车辆数目 (x)。

则流量由下式得出:

$$q = \frac{x + y}{t_a + t_w} \quad (3.1)$$

车流平均行程时间由下式得出:

$$\bar{t} = t_w - y/q \quad (3.2)$$

通常在双向公路上需要测量两个方向上车速和流量, 那么行程次数可由两个观测员分别记录, 其中一个记录与观测车辆同向行进车流中的流量, 另一个观测员记录逆向流动的流量。

为了提高观测值的精确度, 通常在每条路线上要行驶若干次。

(b) 在表 3.1 中计算了从史密司大街驶往吉恩广场的交通流量和行程时间。根据公式 3.1 和 3.2 计算流量 q 和平均行程时间 $\bar{t}$ 。然后用给定的试验行驶长度计算平均流速。对于从吉恩广场驶往史密司大街的交通流, 在表 3.2 中进行了类似的列表计算。

从史密司大街到吉恩广场和从吉恩广场到史密司大街交

通流计算值分别为859.9辆/小时和35.7km/h; 1085.9辆/小时和33.4km/h。

表3.1 从史密司大街到吉恩广场的车流

行 程 时间开始	x (辆)	y (辆)	t _a (min)	t _w (min)	q (辆)	$\bar{t}$ (min)
16.05 16.19	320	1	12	11	837.39	10.93
16.34 16.50	319	1	13	10	834.78	9.93
17.05 17.20	307	3	12	12	775.00	11.77
17.35 17.50	331	2	9	9	1110.00	8.89
18.05 18.20	317	1	13	13	733.85	12.92
18.35 18.50	305	-1	11	10	868.57	10.07
平均值					859.93	10.75

表3.2 从史密司大街到吉恩广场的车流

16.05 16.19	401	1	11	12	1048.70	11.94
16.34 16.50	360	4	10	13	949.57	12.75
17.05 17.20	419	2	12	12	1052.50	11.89
17.35 17.50	397	1	9	9	1326.67	8.93
18.05 18.20	406	3	13	13	948.35	12.81
18.35 18.50	412	6	10	11	1194.29	10.70
平均值					1085.93	11.51