

铁道运输管理的 数学模型及算法

李致中 等著

华中理工大学出版社

铁道运输管理的数学模型及算法

李致中 史 峰 著
孙 焰 胡建华

华中理工大学出版社

(鄂)新登字第 10 号

图书在版编目(CIP)数据

铁路运输管理的数学模型及算法/李致中等著

武汉:华中理工大学出版社,1995 年 11 月

ISBN 7-5609-1204-4

I. 铁…

II. ①李… ②史… ③孙… ④胡…

III. 铁路运输-管理工程-算法-数学模型

IV. U29

铁路运输管理的数学模型及算法

李致中 史 斌 孙 斌 胡建华 著

责任编辑:李立鹏 杨慧敏

华中理工大学出版社出版发行

(武汉·武昌喻家山 430074)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32 印张:8 插页:4 字数:205 000

1995 年 11 月第 1 版 1995 年 11 月第 1 次印刷

印数:1-1 500 ISBN 7-5609 1204-4/U·13

定价:8.50 元

内 容 提 要

本书介绍铁道运输管理中的一些基本问题的数学模型的建立及其有效的求解算法。为便于广大读者阅读,作者尽可能淡化问题的专业性,且将所用的数学知识限于运筹学范围。全书共分4章,主要内容有:列车编组计划的优化;铁路货运组织的优化;铁路通过能力的计算;列车运行图的优化等。

书中内容是作者近年的科研成果,具有先进性和实用性,部分内容曾被评为铁道部科技进步一等奖。本书可供铁道运输管理人员和高等院校铁道运输管理专业的师生参考。

前 言

人类社会有赖于各种生产,在这些活动中必然产生人和物的位移.当社会由自给自足的自然经济发展到商品经济社会时,人和物的运输需求就空前地增大了;同时,蒸汽机、电力机和其他机器的相继问世,促使运输工具(方式)走上了机械化的道路,这样便出现了为社会公用的专门完成人和物的位移的新兴行业——现代运输业.

现代运输业主要有五种:铁道运输、水道(内河与海洋)运输、公路运输、航空运输以及特种(如管道)运输.铁道运输由于运量大、速度快、成本低、安全、准时、便利,已成为现代运输业中最主要的运输方式.特别是在我国大陆,大约60%的货物周转量及60%以上的旅客周转量是经铁道运输完成的,因此,铁路被誉为国民经济的大动脉.

铁路对旅客和货物的运输过程是在分布于广阔的陆地上的铁路网上进行的.我国铁路已有百多年历史,目前,我国拥有5万多公里的铁路,5千多个车站,几十万台机车车辆,300多万职工,配备了大量的技术装备,设置了运输、机车、车辆、工务、电务等业务部门,每天有上万台机车和几十万辆车辆编成数千列各种列车昼夜不停地在铁路网上运行.铁路运输环节多而复杂,要求各部门和各工种间紧密配合、协同运行,像一架庞大的联动机一样环环紧扣,有节奏地工作.面对这个庞大而复杂的运行系统,如何有效地进行管理,这对铁道运输管理工作提出了许多非常困难而有意义的问题.例如,铁路车流组织问题、列车运行时刻表的编排问题、货运中转问题、铁路运输能力的计算问题等等.这些问题伴随着铁路的出现就已存在,由于以往计算和管理手段的限制,对这些问题基本上靠手抄、珠算、凭管理者的经验来解决.随着电子计算机

技术的迅速发展,研究和使用的管理手段和计算方法来快速和科学地解决铁道运输中的这些问题才真正成为可能。

要研究和解决这些问题,首要的任务就是如何描述它们,特别是如何用数学模型来描述。其次,应根据实时性的要求,设计相应的有效算法。对于铁道运输管理中面临的许多问题,完成上述两个任务都不是一件容易的事。《铁道运输管理的数学模型及算法》这本专著收集了作者在这方面的一些研究和实际应用成果,其目的是希望能引起有关专家对铁道运输管理中的问题的数学建模与算法设计的兴趣和关注;同时也为铁道运输管理专业的大学高年级学生、研究生及教师提供一本参考书。

本书由李致中教授主持写作,具体执笔者为李致中、史峰、孙焰、胡建华4人。其中李致中撰写第1章的第§2、4、5节、第2章及第3章第§1节;史峰撰写第1章的第§1、3、6、7、8、9节;孙焰撰写第4章;胡建华撰写第3章的第§2、3、4节。全书由李致中审定。

由于作者才疏学浅,书中的错误与欠妥之处,谨请读者惠予指正。

最后,作者真诚地感谢多年来对我们工作给以支持的同行专家;感谢长沙铁道学院学术委员会和华中理工大学出版社对本书的出版所给予的支持与帮助。

作者

1995年6月

目 录

第 1 章	列车编组计划优化的数学模型	(1)
§ 1.1	列车编组计划优化问题概述	(1)
§ 1.2	铁路车流量预报的数学模型	(2)
§ 1.3	集结耗费的成批随机服务模型	(12)
§ 1.4	直线方向列车编组计划优化的动态规划模型	(22)
§ 1.5	直线方向列车编组计划优化的图论模型	(41)
§ 1.6	直线方向列车编组计划优化的网络模型及算法	(52)
§ 1.7	路网上列车编组计划优化的网络模型及算法	(70)
§ 1.8	铁路车流径路的优选算法	(79)
§ 1.9	路网上多种能力约束下列车编组计划优化的网络模型及算法	(89)
第 2 章	铁路货运管理中的数学模型	(97)
§ 2.1	货运零担中转作业系统分析与设计	(97)
§ 2.2	轻重配装优化的数学模型	(108)
§ 2.3	危普混装处理优化的数学模型	(115)
§ 2.4	A 类车定向优化的数学模型	(127)
§ 2.5	多站整零车搭配优化的数学模型	(132)
§ 2.6	B 类车配车优化的数学模型	(135)
§ 2.7	煤炭调运的数学模型	(139)
§ 2.8	品种间可代用且存在进出口点时煤炭调运的数学模型	(146)
第 3 章	通过能力计算中的数学模型	(153)
§ 3.1	通过能力计算问题概述	(153)
§ 3.2	铁路站场咽喉通过能力计算的数学模型	(155)

§ 3.3	铁路站场咽喉区通过能力计算的随机服务模型·····	(168)
§ 3.4	驼峰解体能力计算的排队模型·····	(176)
第 4 章	列车运行图优化的数学模型 ·····	(182)
§ 4.1	列车运行图优化问题概述·····	(182)
§ 4.2	列车运行图的均衡性标准·····	(185)
§ 4.3	单线区段货物列车运行图优化的数学模型·····	(192)
§ 4.4	单线区段货物列车运行图的优化算法·····	(207)
§ 4.5	最优机车周转图模型及算法·····	(237)
参考文献	·····	(242)

第 1 章 列车编组计划优化的数学模型

§ 1.1 列车编组计划优化问题概述

在铁路运输管理中,列车编组计划起着对铁路货物车流的组织作用,它规定了铁路货物车流的运行径路和技术站编组列车的种类、编组去向、车辆的编挂办法。列车编组计划可使全路各站合理分配列车编组任务,对全路各车站的设备和能力进行统筹规划和综合使用。

抽象地说,可以将列车编组计划优化问题叙述为:已知路网结构、各路段距离、各车站的集结耗费、单位车辆改编中转额外耗费以及车站间的车流量,试确定各车流的运行径路和编组方案,使运行车公里总数和编组车小时总数综合指标达到最小。

上述列车编组计划优化问题是一个非常困难的问题,主要困难在于,集结耗费不随车流量的变化而变化,每开行一个编组去向都耗费这么一个量。另外,车流径路与编组方案的一致性也增加了问题的难度。

最简单的列车编组计划优化问题是考虑一种特殊的路网结构——线状结构,各站都串联在一条线上。此时车流径路是唯一的,不必考虑车流径路与编组方案的吻合问题,它称之为直线方向列车编组计划优化问题。

一般形式的路网结构的列车编组计划优化问题又分为两种情形。一是无约束情形,二是有约束情形。它们分别研究是否考虑各种能力约束的形式。

本章对研究问题的许多方面进行了简化,如将集结耗费和单位车辆改编中转额外耗费作为常数来处理。然而,从本章给出

的集结耗费的计算公式可以看出,集结耗费的值是随编组计划的变化而变化的.另外,单位车辆改编中转额外耗费也随车站改编车流强度变化而变化.制定列车编组计划时所用的车流量,应是未来该编组计划使用期间的车流量,这些车流量只能是未来车流量的预测值.本章给出了一种车流量预报的预测方法.在路网上研究编组计划时,所采用的是先车流径路,后编组方案的分阶段优化.

列车编组计划优化问题的研究虽然已取得许多成果,但远非完善.从研究趋势来看,首先趋向于研究运行径路与编组方案的一致性,简单地先确定径路,再确定编组方案、或各车流独立选取径路而不考虑其合并的事实,都是不尽合理的.对它们应综合协调,综合优化.另外,还趋向于采用直接的经济指标作为目标函数,以及采用多目标手段进行优化.

§ 1.2 铁路车流量预报的数学模型

1.2.1 铁路车流量预报问题

铁路运输的全过程是十分复杂的,环节很多,需要铁路内部和外部许多单位的密切配合、协同合作才能安全、有效地完成.因此,铁路运输管理具有很强的计划性,需要编制全路网、各铁路局、各站段的各种各样的工作计划(例如货物列车编组计划等),而铁路车流量则是编制所有这些计划的最重要且颇为敏感的参数.铁路车流量预报就是为了获得未来计划时期的车流量的估计值.显然,对于铁路车流量预报方法的研究是铁路上一个重要的很有实用价值的研究课题.

影响铁路车流量的因素相当复杂.迄今,铁路上所使用的车流量预报方法是不能反映诸影响因素的,其预报结果也不能令人满意.然而铁路部门对既往车流数据有极为详尽的精确统计.如

何利用这些统计资料,建立铁路车流量的数学模型,从而为铁路车流预报提供一个简洁而准确的预报方法,正是所要研究的内容。为方便起见,以Z站1972年至1985年间的月车流统计资料(见表1.2.1)为例进行研究,并给出车流预报的数学模型。一般说来,下面给出的方法对铁路的各种车流量及客、货运量的预报问题具有普遍的适用性。

表 1.2.1

Z 站月车流量

序号	实际值	序号	实际值	序号	实际值
1	12 906	29	12 592	57	11 026
2	10 941	30	12 833	58	11 837
3	12 296	31	10 840	59	10 684
4	9 843	32	12 144	60	10 880
5	11 297	33	12 526	61	13 831
6	11 432	34	12 758	62	14 017
7	8 822	35	12 210	63	11 622
8	10 222	36	12 667	64	11 609
9	11 109	37	16 090	65	13 127
10	11 966	38	12 302	66	13 097
11	8 597	39	12 021	67	11 398
12	10 945	40	11 409	68	11 375
13	12 340	41	13 345	69	11 020
14	13 899	42	12 577	70	13 732
15	12 505	43	10 389	71	11 843
16	10 697	44	11 735	72	12 538
17	12 701	45	11 638	73	16 878
18	12 276	46	12 450	74	12 109
19	9 775	47	12 086	75	15 262
20	10 900	48	12 346	76	12 389
21	10 921	49	13 246	77	14 552
22	13 209	50	15 458	78	13 874
23	10 904	51	13 522	79	11 978
24	12 462	52	12 422	80	12 594
25	15 068	53	13 645	81	12 720
26	14 883	54	13 311	82	13 099

续表 1.2.1

序号	实际值	序号	实际值	序号	实际值
27	13 557	55	11 622	83	11 877
28	11 193	56	11 244	84	12 394
85	14 561	113	13 126	141	14 739
86	17 759	114	13 370	142	15 463
87	13 256	115	12 855	143	14 663
88	12 796	116	15 017	144	15 817
89	13 460	117	15 234	145	16 984
90	12 733	118	15 625	146	21 089
91	10 848	119	14 438	147	17 917
92	12 161	120	16 229	148	16 029
93	12 067	121	18 529	149	16 317
94	12 958	122	17 570	150	15 711
95	12 307	123	14 145	151	14 528
96	12 799	124	13 323	152	17 701
97	15 844	125	14 235	153	16 075
98	14 259	126	14 322	154	15 537
99	12 914	127	13 260	155	15 992
100	12 021	128	14 835	156	16 945
101	12 607	129	15 129	157	19 391
102	11 399	130	15 400	158	21 182
103	11 157	131	14 509	159	16 861
104	11 604	132	16 013	160	15 894
105	12 308	133	20 295	161	16 874
106	13 166	134	16 870	162	16 103
107	12 007	135	15 482	163	16 227
108	13 112	136	15 072	164	19 736
109	13 051	137	15 533	165	18 773
110	17 667	138	14 237	166	18 759
111	13 587	139	13 380	167	18 634
112	12 343	140	14 189	168	19 339

1.2.2 回归分析

随着国民经济的日益发展,统计资料表明我国铁路车流量呈现不断增长的趋势. 为了克服统计资料中样本数据的倾向性,本文采用线性回归法.

由于历史的原因,决定舍弃表 1.2.1 中第 1 号至第 84 号共 84 个数据,并将最后 24 个数据用作模型检验,只取出第 85 号至 144 号等 60 个数据作为样本数据. 然后用一条直线拟合这组数据,并假设其误差是“不相关”的,即用下列模型拟合

$$x_t = \beta_0 + \beta_1 t + y_t, \quad t=1, 2, \dots, 60. \quad (1.2.1)$$

运用线性回归公式可得(1.2.1)式中的两个参数 $\beta_0 = 12\ 605$, $\beta_1 = 51$. 利用(1.2.1)式可求得回归余量 y_t , 见表 1.2.2.

表 1.2.2 回归余量 y_t

序号	y_t	序号	y_t	序号	y_t
85	12 656.35	95	13 166.37	105	13 676.39
86	12 707.35	96	13 217.37	106	13 727.39
87	12 758.35	97	13 268.37	107	13 778.4
88	12 809.35	98	13 319.38	108	13 829.4
89	12 860.36	99	13 370.38	109	13 880.4
90	12 911.36	100	13 421.38	110	13 931.4
91	12 962.36	101	13 472.38	111	13 982.4
92	13 013.36	102	13 523.38	112	14 033.41
93	13 064.36	103	13 574.39	113	14 084.41
94	13 115.37	104	13 625.39	114	14 135.41
115	14 186.41	125	14 696.43	135	15 206.46
116	14 237.41	126	14 747.44	136	15 257.46
117	14 288.42	127	14 798.44	137	15 308.46
118	14 339.42	128	14 849.44	138	15 359.46

续表 1.2.2

序号	y_t	序号	y_t	序号	y_t
119	14 390.42	129	14 900.44	139	15 410.47
120	14 441.42	130	14 951.45	140	15 461.47
121	14 492.43	131	15 002.45	141	15 512.47
122	14 543.43	132	15 053.45	142	15 563.47
123	14 594.43	133	15 104.45	143	15 614.47
124	14 645.43	134	15 155.45	144	15 665.48

由表 1.2.2 中数据可见,回归余量中存在着明显的季节性及随机性.季节性是一种周期性,它也是一种确定性的变化因素.为了找出周期性变化的优势频率及其相应的振幅与相位,采用以下弱 P 线性模型拟合表 1.2.2 中数据

$$y_t = \sum_{j=1}^P A_j \cos(\omega_j t + \phi_j) + z_t, \quad t=1, 2, \dots, 60. \quad (1.2.2)$$

式中 $A_j > 0$ 为振幅; ω_j 为频率; ϕ_j 为相位; z_t 为提取周期成分后的余量,构成一个随机序列.

为了求出式(1.2.2)中的未知参数 A_j 、 ω_j 、 ϕ_j ,并估计其阶数 p ,将其改写为

$$y_t = \sum_{j=1}^{2p} \alpha_j e^{i\lambda_j t} + z_t,$$

$$\text{式中 } \lambda_j = \begin{cases} \omega_j, & j=1, 2, \dots, p, \\ -\omega_j, & j=p+1, \dots, 2p; \end{cases}$$

$$\alpha_j = \begin{cases} \frac{1}{2} A_j e^{i\phi_j}, & j=1, 2, \dots, p, \\ -\frac{1}{2} A_{j-p} e^{-i\phi_{j-p}}, & j=p+1, \dots, 2p. \end{cases}$$

故只需计算值 p 、 λ_j 、 α_j . 令

$$J_{y,60}(\lambda) = 60^{-\frac{31}{16}} \left| \sum_{j=1}^{60} y_j e^{-i\lambda_j} \right|,$$

再将 $[-\pi, \pi]$ 分成 120 等分,在各分点上计算

$$D(k) = J_{y,60} \left(\frac{k\pi}{60} - \pi \right), \quad k=0,1,\dots,120,$$

取
$$E = 60 \frac{1}{16} - \frac{1}{120} \sum_{k=1}^{120} D(k).$$

为估计阶数 p , 在 $D(k) (k=1, 2, \dots, 120)$ 中选取 $D(k) > E$ 的 k , 设其总个数为 q , 记其全体为

$$k_1, k_2, \dots, k_q,$$

令
$$A_j = k_{j+1} - k_j - \left[\frac{\sqrt{60}}{\pi} \right] - 1, \quad j=1, 2, \dots, q-1,$$

$$A_q = 120 + k_1 - k_q - \left[\frac{\sqrt{60}}{\pi} \right] - 1.$$

则 p 的估计值 $\hat{p}$ 为 $A_j (j=1, 2, \dots, q)$ 中大于 0 的总数. 记 $A_j (j=1, 2, \dots, q)$ 中满足 $A_j > 0$ 的全体足标为 $j_1 < j_2 < \dots < j_p$, 则 λ_j 的估计值为

$$\hat{\lambda}_j = \frac{\pi}{60} j_{k, \max}, \quad j=1, 2, \dots, \hat{p}.$$

式中, $j_{k, \max}$ 是 $[j_{k-1}, j_k] (k=1, 2, \dots, \hat{p})$ 中使 $D(k)$ 取极大值的足标, 且设 $j_0=0$.

α_j 的估计值为

$$\hat{\alpha}_j = \frac{1}{60} \sum_{l=1}^{60} y_l e^{-il\hat{\lambda}_j}, \quad j=1, 2, \dots, \hat{p}.$$

最后得到 A_j, ω_j, ϕ_j 的估计值为

$$\hat{\omega}_j = \hat{\lambda}_j, \hat{A}_j = 2 |\hat{\alpha}_j|, \hat{\phi}_j = \arg \hat{\alpha}_j, \quad j=1, 2, \dots, \hat{p}.$$

表 1.2.3

根据表 1.2.2 的数据, 得计算结果

j	$\hat{\omega}_j$	$\hat{A}_j$	$\hat{\phi}_j$
1	0.524	1.429	-0.609
2	0.571	965	-2.198
3	0.157	921	0.032
4	1.047	705	-1.813

如表 1.2.3 所示.

将上述结果代入式(1.2.2), 得

$$\begin{aligned} y_t = & 1.429 \cos(0.524t - 0.609) \\ & + 965 \cos(1.571t - 2.198) \\ & + 921 \cos(0.157t + 0.032) \\ & + 705 \cos(1.047t - 1.813) + z_t, \end{aligned}$$

则其周期依次为 $T_1=12$ 个月, $T_2=4$ 个月, $T_3=40$ 个月, $T_4=6$ 个月.

上述潜周期分析表明, Z 站月车流量受年度周期变化的影响最大, 这正是国民经济和人民生活以年度为周期进行安排给铁路运输带来影响的反映. 第四个周期成分可作类似的解释. 至于第三个周期成分, 其周期为 40 个月, 大约三年半, 这是否可以解释为我们经济建设与社会发展的马鞍形变化趋势对铁路运输的影响?

从回归余量中提取周期成分之后, 得到最终余量 Z_i 如表 1.2.4.

表 1.2.4

最终余量 Z_i

序号	z_i	序号	z_i	序号	z_i
85	-1714.26	95	166.73	105	-595.81
86	1 646.15	96	-542.16	106	369.62
87	-515.54	97	306.03	107	-111.40
88	211.38	98	-1 034.06	108	-426.15
89	471.59	99	9.54	109	-2 913.07
90	79.06	100	314.36	110	1 714.15
91	-808.94	101	470.77	111	-481.52
92	74.77	102	-464.64	112	-209.76
93	-1 244.61	103	193.95	113	-341.26
94	-63.52	104	83.13	114	-20.12
115	192.57	125	-864.1	135	242.57
116	1 650.61	126	-517.33	136	1 079.56
117	368.88	127	-648.37	137	1 171.16
118	784.74	128	441.57	138	217.47

续表 1.2.4

序号	z_t	序号	z_t	序号	z_t
119	228.45	129	-534.06	139	338.73
120	588.85	130	-4.55	140	673.56
121	488.73	131	-32.33	141	-71.88
122	-397.22	132	266.69	142	848.75
123	-1 569.74	133	2 361.72	143	815.58
124	-1 290.92	134	-794.82	144	636.06

1.2.3 时间序列分析

原始的 60 个数据经去倾及提取周期成分之后,确定性成分已不复存在. 经验证明,最终余量 z_t (见表 1.2.4) 是一个平稳随机时间序列样本. 依据时间序列分析理论,可用自回归模型 $AR(p)$ 拟合表 1.2.4 的数据. 自回归模型为

$$z_t + \phi_1 z_{t-1} + \phi_2 z_{t-2} + \cdots + \phi_p z_{t-p} = \sigma_0 \varepsilon_t, \quad (1.2.3)$$

$$\phi(x) = 1 + \phi_1 x + \phi_2 x^2 + \cdots + \phi_p x^p.$$

为实系数多项式,它的根均在单位圆外, $\sigma_0 > 0$, $\{\varepsilon_t\}$ 为白噪声, p 为模型阶数,是待估计的参数.

为了估计 (1.2.3) 式的参数 p , 采用 Akaike 的 AIC 准则,其步骤为

1) 计算样本协方差函数 $\hat{\gamma}_k (k=0, 1, \dots, 59)$ 与样本自相关函数 $\hat{\rho}_k (k=1, 2, \dots, 59)$;

2) 按 Yule-Walker 方程

$$\begin{bmatrix} \hat{\phi}_1 \\ \hat{\phi}_2 \\ \vdots \\ \hat{\phi}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \cdots & \rho_{p-1} \\ \rho_1 & 1 & \cdots & \rho_{p-2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \rho_{p-1} & \rho_{p-2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \vdots \\ \rho_p \end{bmatrix}.$$