

最优化柔性路面的设计

〔苏联〕 А.Я.ТУЛАЕВ 主编

许志鸿 杨家琪 译

人 民 交 通 出 版 社

最优化柔性路面的设计

〔苏联〕 А.Я.Тулаев 主编

许志鸿 杨家琪 译

人 民 交 通 出 版 社

内 容 提 要

本书叙述柔性路面设计法的基本理论。这些理论已经公式化和算法化,以便按电子计算机的要求进行程序设计。书中列出了选择路面结构层合理厚度的算法及其在电子计算机中执行的程序。叙述了按换算费用进行道路结构技术-经济论证的方法。各种情况均以算例加以说明。

本书可供从事道路设计和道路施工规划的工程技术人员和科学工作者参考,也可供公路高等院校的研究生和大学生学习参考。

最优化柔性路面的设计

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ
НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

А. Я. Тулаев

Москва «Транспорт» 1977

本书系根据苏联运输出版社1977年

莫斯科俄文版本译出

许志鸿 杨家琪 译

人民交通出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

北京通县曙光印刷厂印

开本:787×1092 $\frac{1}{32}$ 印张:4.5 字数:100千

1980年3月第1版

1984年2月第1版 第2次印刷

印数:6,851—10,510册 定价:0.37元

序 言

行车密度的逐年增加和汽车载重量的增长要求铺筑比过去更为坚固的路面。在苏联欧洲部分的中部地区，在粉土条件下，即使在Ⅱ级公路上，其路面厚度也不小于70厘米。随着路面厚度及其投资的增加，公路造价有不断提高的趋势。

为了保证提高工程质量并降低实际造价，首先必须提高路基的强度并尽可能广泛地采用当地的筑路材料。但是，大家都知道，当地的材料质量不均匀，因而需要用各种粘结料，其中包括低活性材料(最好也是当地的粘结料)来处理。

技术-经济核算证明为正确的路面设计，仅仅在能有效地调节路基水-温状况的条件下才有可能，因为它能把路面的强度和使用期限提高0.5~1.0倍以上。

关于调节热力状况和设置隔离层问题，在《公路冻胀路段设置隔温层方法的建议》一书中有详细的论述。该书系全苏道路科学研究院、莫斯科公路学院和白俄罗斯道路科学研究所编，并于1976年经苏联运输工程部技术总局批准使用。调节路基(首先是路基的上部)水分状况的基本理论，在苏联运输工程部技术总局批准的《干燥路基和路面基层方法的建议(1974年全苏道路科学研究院编)》以及《柔性路面设计须知(BCH46-72)》(莫斯科“运输出版社”，1972年版)中有所阐述。

因此，本书不着重去分析为调节路基水-温状况而规定的各种措施。如果也简要地研究路面和路基上部排水的各种现代化方法，那只是为了强调指出诸如排水层方案设计的必

要性，并且仅仅是在以适当的技术-经济核算去证明其应用的正确性。不容许模式似地只用外来的砂铺筑排水层。然而这类层次也常常采用当地质量不高的砂来铺筑，以便降低造价。可是，就砂本身而言，由于其弹性模量和渗透系数不大，反而大大缩短路面的使用期限。

目前，在设计路面时必须分析几十种乃至几百种等强度的结构，以便从中选择一种最优的结构。这种选择只有应用电子计算机才有可能去完成，这也是本书所要贡献给读者的。

书中简洁地叙述用强度和容许的严寒冻胀条件进行路面计算的方法，列出了本书作者们就几乎所有设计机关和高等学校都拥有的“Наирп”电子计算机而编制的计算用的数学算法。

本书是设计机关的设计人员和汽车公路及建筑工程学院学生的参考书。它不能代替现行的《柔性路面设计须知（ВСН46-72）》，仅仅是补充并发展该须知的各项方法的理论。为了便于使用所提出的计算方法，每章都用适当的计算实例加以说明。

作者们对莫斯科公路学院А.М.Антонов教授表示感谢，他曾提出许多有益的意见，这些意见在稿件准备出版时已加以考虑。

目 录

第一章 路面按极限状态计算	1
1.1 计算和设计总则	1
1.2 计算图式和计算荷载	5
1.3 路面按弹性弯沉计算	10
1.4 要求的弹性模量	11
1.5 剪应力的计算	13
1.6 整体性层抗弯拉应力的计算	17
1.7 土壤和材料的计算特性	18
第二章 路面按容许的严寒冻胀条件计算	27
2.1 调节路基和路面水温状况的基本理论	27
2.2 根据须知 BCH46-72, 路面厚度按严寒 冻胀的容许值计算	31
2.3 路面隔温层厚度按严寒冻胀容许值计算	37
第三章 路面排水层和排水装置的计算	46
3.1 排水层中水的过剩	46
3.2 排水层中自由水涌水量的计算	49
3.3 排水层排水能力的下降	52
3.4 排水层的计算原理	54
3.5 砂路堤上部层厚的计算	63
3.6 排水层材料的弹性模量	65
3.7 排水层中自由水的排出	67
3.8 修筑纵向排水管所用管子的选择	68
3.9 纵向排水管的结构	71

3.10 排水层计算实例·····	76
第四章 用电子计算机选择路面结构层的合理厚度·····	80
4.1 最优化的标准和问题的一般提法 ·····	80
4.2 各结构层厚度的界限与移动步长的 选择路面各种方案的编制 ·····	84
4.3 用电子计算机执行算法的框图和程序 ·····	86
4.4 准备原始数据 ·····	89
4.5 计算结果 ·····	91
4.6 计算实例 ·····	93
第五章 柔性路面按换算费用进行技术-经济上 的论证·····	103
5.1 路面工程中大量投资的经济效果 ·····	103
5.2 柔性路面要求的弹性模量的技术-经济 论证 ·····	104
5.3 各部分换算费用的计算 ·····	108
5.4 要求的弹性模量用电子计算机的最优化 程序 ·····	112
5.5 计算实例 ·····	114
附录1.用“Напри”电子计算机计算最优化路面·····	124
附录2.工程费用与要求的弹性模量关系的确定·····	130
附录3.根据换算费用论证路面的设计强度·····	132
参考文献·····	135

第一章 路面按极限状态计算

1.1 计算和设计总则

根据莫斯科公路学院和苏联道路科学研究院近年来所完成的研究成果，提出了新的柔性路面计算方法。这种方法是以下列原则为基础的〔5〕：

经正确设计和施工的路面在汽车运输荷载作用下，应仅仅工作于弹性阶段。

路面能保证规定组成和密度的车流的行驶，如果在年度的最不利时期内铺砌层表面在计算汽车车轮作用下的弹性弯沉不超过某个极限值，在路面的整体性结构层中不产生不容许的弯拉应力，在低粘性结构层和路基土壤中不产生不容许的剪应力，而用稳定材料铺筑的路面各层的厚度应该具有这样的尺寸，使铺砌层表面不致产生过大的严寒冻胀变形。

这种计算方法以路面极限状态的概念为基础。极限应理解为路面结构层和路基土这样的极限容许应力或变形状态，在这种状态下计算荷载的作用还不会产生不容许的路面变形以及其结构层不致受到破坏。

路面和路基的设计应满足按两种极限状态（按变形和按应力）计算的要求。

第一种极限状态要在限制路面垂直变形值，即车辆的计算荷载作用所引起的弹性弯沉值方面提出要求。第二种极限状态在对路面结构层和路基土壤应力状态的要求方面，即对低粘性道路结构材料中的最大剪应力值及整体性路面层的弯拉应力值加以限制。

路面和任何工程结构物一样，除了使用要求之外，还应具有足够的可靠性和经济性。这些要求在设计阶段是通过计算并以合理的结构来保证的。本书引用了评定路面应力-变形状态的基本计算原理。在路面结构方面很难给出全面的能预见到可能遇到的各种各样条件的建议。但是有可能提出一系列基本原理和要求，遵守这些原理和要求就能够合理地设计路面。

在开始设计路面之前，必须预先解决两个问题：查明可用于铺筑路面的材料并按相同设计条件把公路分段。这两个问题与结构设计有最直接的关系，路面（公路最昂贵的部分）的造价和这两个问题解决的深入与细致程度有关。

就铺筑路面而言，应当最合理地利用道路设计地区拥有的当地材料，以便在满足要求的强度和耐久性之外，使路面造价最低，施工和以后养护时劳力和能量消耗最少。为此，必须对可以用来铺筑路面结构层的工业废渣和副产品作各种分析。在这种情况下必须注意：当地材料本身的物理力学性质是不均匀的，因此要作补充处治以改善其质量。勘探当地材料时要特别注意寻找结合料，能改善性质或部分代替结合料的掺加料（矿渣、溶胶和燃料灰屑、某些树脂、可用来作为乳化剂的残滓等等）。通常采用公路沿线采石场的材料（碎石、砾石、角砾、砂）作为当地的石料。路基土壤也是当地材料，在适当处治（稳定）之后具有相当好的性能。在寻找适用于路面结构的当地材料的过程中，不能只遵照经济上的考虑，也要根据当地的条件，对路面结构层的材料提出一定的要求，以便保证路面的耐久性和使用质量（例如：抗冻性，水稳性等）。

除了当地材料之外，还要利用外来的材料（沥青、水泥、合乎标准的石料及其他材料等）；许多筑路材料（沥青

混凝土，水泥混凝土等等）可由当地的企业制造。

在查明具体条件下可以用来铺筑路面的当地和外来材料之后，要合理地编制运输方案，划分某种材料产地的合理供应范围，保证所设计道路筑路材料的供应。运输方案不仅使调查过程中所获得的资料系统化，而且也是技术-经济论证时确定材料费用的重要文件。

为使公路全线的路面没有过大的强度储备并且能同样地满足对它提出的全部要求，公路要按相同（或近似的）设计条件分段。全线每个路段应具有同样的计算荷载、行车组成和密度，足够均匀的土壤条件和潮湿条件以及近似的筑路材料供应条件。对每个道路路段，路面的结构设计要分别加以完成，但是这时应尽可能地力求使相邻路段上的路面结构统一，这在选择施工工艺时具有重要的意义。利用这样的路面结构可达到如下目的：从一个路段过渡到另一路段时，结构设计方案原则上不变，而改变路面各层的厚度或这些层次的材料，用质量接近的其他材料代替。

对于每个具有相同设计条件的公路路段，要规定若干路面结构方案。在设计实践中广泛应用电子计算机就有可能对所审核的路面结构方案的数量不加限制并据根技术-经济比较更仔细地选择最好的方案。

路面结构要根据筑路材料供应情况按照标准设计确定。除了标准设计之外，在利用当地材料或考虑当地具体条件时要详细编出路面结构的单独设计。无论是标准设计还是单独设计，都必须规定施工过程最大限度的机械化和工业化并考虑设计地区公路施工和养护的经验。为俄罗斯苏维埃联邦社会主义共和国、乌克兰、白俄罗斯、中亚细亚、远东等许多地区编制的地区性路面结构一览表，对确定路面结构具有重要作用。这种一览表与标准设计不同，它在很大程度上考虑

了自然条件和当地材料，并且设计、施工和养护经验已经证明应用所推荐的这些结构的合理性。

路面设计过程要与路基设计密切联系起来，因此在确定路基土的计算特性时也必须考虑调节水-温状况的措施。路基土的性质随着所采用的调节水-温状况的方案而变化并且可把它看成路面的单独结构层。

路面结构层材料的弹性模量要逐渐减少，即规定上层刚度大些，而下卧层的刚度则小些。对于用低粘性材料铺成的相邻层次，其弹性模量比不应超过 5 ~ 6。

路面结构层的最小厚度（表 1-1）根据施工工艺上的考虑加以确定，并且应保证适当的材料结构组成及其在使用期间的正常工作。在确定路面结构层的厚度时，必须预见到材料充分压实的可能性。

表1-1

材 料	路面各层的最小厚度 (厘米)
热铺或温铺的沥青混凝土	
单层的	5
双层的	7
冷铺细粒沥青混凝土或焦油混凝土	3
厂拌用有机结合料处治的碎石(砾石)材料和土壤	8
贯入法处治的碎石	8
用半贯入法处治的碎石	4
用有机结合料按路拌法处治的碎石(砾石)材料	8
在石料基层或用结合料加固的土壤上，用水泥稳定的碎石(砾石)材料	8
用有机或无机结合料处治的土壤或软石料未经结合料处治的碎石(砾石)料：	10
在砂垫层上	15
在坚固的基层上（用石料或稳定土铺筑）	8
碎石	8
砾石材料	10

1.2 计算图式和计算荷载

路面按极限状态计算规定要用三项标准：按容许弹性弯沉；按路基垫层土壤和路面结构层低粘性材料的剪切；按整体性材料层的弯拉应力。

路面以线变形层状半无限体表示，其中每层以厚度 h 、确定应力-变形状态的若干计算参数（见1.3, 1.5, 1.6节）以及能从经济观点来评定路面的价值指标来表征。路面结构层的层数不受限制，并且在计算中形式上作为 n 层路面模型来研究。这从编制计算机的算法观点来看是方便的，虽然从施工工艺上考虑，希望路面的层数定得最少，实际上不多于五层。全部路面结构层要编上顺序号码。层次的编号从下向上，由1编到 n ，即路面最上层编为 n 号。

为了从数量上评定上述极限状态标准，利用层状半无限体的弹性理论解制定了可用来评定路面应力和变形状态的方法。从实用考虑，没有必要确定层状半无限体所有各点的应力或变形，因为重要的仅仅是其最大值。研究结果表明：在平面图上的应力和变形采取直接靠近作用于路面的荷载垂直轴线区域内的最大值。沿层厚的弯拉应力在整体层的底面达最大值，而压应力则产生在低粘性层或路基的上表面。垂直变形在荷载作用处的路面表面达最大值。毫无疑问，如果预先知道应力和变形具有最大值的点，就会大大减少和简化计算工作，并且仅对层状半无限体的这些点评定路面的应力-变形状态。

路面的应力-变形状态决定于沿公路行驶的运输工具的荷载对它作用的结果。荷载由车轮直接传至路面，并且显而易见：车轮对面层的压力与轮胎的气压实际上是相同的。

车轮对路面的作用以施加于直径为 D 的圆形刚性承载板

表1-2

运 输 工 具	轴上最大静 载, 公斤	面上的平均 计算压力, 公 斤/厘米 ²	车轮印迹计算 直径, 厘米
载货汽车			
ГАЗ-51А	4000	4.0	25.0
ГАЗ-53А	5600	4.8	27.0
Урал-355М	5200	4.8	26.5
ЗИЛ-130	7000	5.5	28.0
ЗИЛ-164А	6200	5.0	28.0
МАЗ-500, 200	10000	6.0	33.0
Урал-377	5500 × 2	4.3	28.5
МАЗ-516	9000 × 2	6.0	31.0
КРАЗ-257	9350 × 2	6.0	32.0
自卸汽车			
ГАЗ-93А	4000	4.0	25.0
ГАЗ-53Б	5600	4.7	27.5
ЗИЛ-ММЗ-585	5700	5.0	26.5
ЗИЛ-ММЗ-555	6500	6.0	26.0
КАЗ-600	5700	4.7	28.0
МАЗ-503	9400	6.0	31.5
МАЗ-205	9300	5.5	33.0
КРАЗ-256Б	9000 × 2	6.0	31.0
公共汽车			
КАРЗ-651А	4000	4.0	25.0
МАЗ-652Б	4900	5.0	25.0
МАЗ-672	5500	5.0	26.5
ЛАЗ-695Е	6900	5.5	28.5
ЛАЗ-697Е	6700	5.5	28.0
ЛИАЗ-677	9800	7.0	30.0
ЗИЛ-158В	7200	4.0	34.0
牵 引 车			
ЗИЛ-ММЗ-164АН	5600	5.0	27.0
ЗИЛ-157-КВ	4000 × 2	4.0	25.0
ЗИЛ-130-В1	6000	5.5	26.5
КАЗ-608	6000	4.7	28.5
МАЗ-200В	10200	6.0	33.0

续上表

运 输 工 具	轴上最大静 载, 公斤	面层上的平均 计算压力, 公 斤/厘米 ²	车轮印迹计算 直径, 厘米
МАЗ-504	10000	6.0	33.0
Урал-375С	5500×2	4.3	28.5
Урал-375С	4600×2	3.5	29.0
КРАЗ-258	8800×2	6.0	30.5
挂 车			
МАЗ-886	6000	5.5	26.5
МАЗ-5243	5000	5.5	24.0
半挂车			
ММЗ-548Б	5700	5.0	27.0
ОДАЗ-885和ОДАЗ-857Б	6000	5.0	27.5
无轨电车			
МТБ-82和ЗИУ-7	8700	5.7	31.0
ЗИУ-5和ЗИУ-9	10600	5.7	34.0

上的荷载强度为 p 的均布荷载表示。虽然采用的荷载模型有某些不精确性, 但是这实际上对计算结果不会产生任何重大的影响。

公路上的车辆极为复杂 (表1-2)。在公路上行驶的具有各种技术性能的汽车型式的多样性无论在选择路面的计算荷载方面, 还是把实际荷载换算为计算荷载方面都会造成一定的困难。

计算普通公路网的道路路面时, 采用的计算荷载分为两组。A 组运输工具的荷载用于计算 I 和 II 级道路的路面。在其他情况下采用 B 组荷载。表 1-3 列出了计算荷载的主要特性值, 而公共汽车的荷载仅当其数量超过行车组成的 5% 时才采用。在同一张表里列出了荷载 H-30 和 H-10 的主要参数, 这两种荷载都是用来作为城市道路和街道路面的计算荷载。

为了以计算荷载代替实际的行车组成和密度, 可根据单

表1-3

运 输 工 具	轴荷载, 公斤	面层上的压力 公斤/厘米 ²	车轮印迹的 直径, 厘米
汽车:			
• A组	10000	6	33
B组	6000	5	28
公共汽车			
A组	11500	6	35
B组	7000	5	30
H-1	9500	5.5	33
H-30	12000	6	36

轴荷载的大小采用一定的换算系数。把各种轴荷载的汽车换算为计算荷载时所用的系数列于表 1-4。把具体车型的行车密度 N_j 乘上适当的换算系数 k_j , 结果得出换算的计算荷载的行车密度。对所有 m 种运输工具完成这种换算手续并汇总其结果。在确定计算荷载的行车密度时, 轻车和轴荷载不到 4 吨的卡车的影响略而不计。

表1-4

计 算 荷 载	换 算 汽 车 的 轴 荷 载 , 吨							
	4	6	7	8	9.5	10	11.5	12
	换 算 成 计 算 荷 载 的 系 数 k_j							
A组								
卡车	0.02	0.10	0.36	0.43	0.68	1.0	—	—
公共汽车	0.01	0.05	0.18	0.21	0.34	0.5	1.0	—
B组								
卡车	0.20	1.00	—	—	—	—	—	—
公共汽车	0.06	0.50	1.00	—	—	—	—	—
H-30	0.01	0.05	0.18	0.22	0.35	0.5	3.8	1.0
H-10	0.03	0.15	0.55	0.65	1.00	—	—	—

计算行车密度时, 换算成计算荷载的系数 (见 表 1-4)

仅适用于没有挂车的双轴汽车。三轴汽车取为具有相应轴荷载的两部汽车。带有半挂车的汽车也作类似地处理。汽车列车用相应于该车轴数的汽车数来代替。

路面一般是按照到大修期结束时所预计的行车密度计算的。对于高级路面，预计行车密度的期限取为15~18年，对于次高级路面取为10年，过渡式路面——8年。

行 车 部 分 的 特 性	k_n
单车道	1
双或三车道	0.7
有分车带的四车道	0.35

远景行车密度和行车组成是在技术-经济调查过程中，根据所设计道路所在地区国民经济远景发展规划的分析结果而确定的。对国内许多经济地区，建议采用经验关系式。根据这个关系式按照已知的预计期限计算行车密度的增长量。

双向昼夜行车总密度随公路行车部分车道数的不同而按下列系数值 k_n 减少：

用系数 k_n 确定在一个车道上通过的行车总密度的一部分，这时获得的行车密度值不应超过车道的通过能力。因此，计算荷载的行车密度计算值要考虑行车道的数量，按照远景的行车组成和行车密度确定并按下式计算：

$$N_p = k_n \sum_{j=1}^m N_j k_j \quad (1-1)$$

式中： N_p ——换算为一个车道的计算荷载行车密度计算值，辆/昼夜；

N_i ——第 i 种运输工具的远景行车总密度，辆/昼夜；

k_n ——行车密度随车道数减少的系数；

k_i ——把第 i 种运输工具换算为计算荷载的系数。

1.3 路面按弹性弯沉计算

按第一种极限状态计算时，规定要评定路面由于计算荷载作用所引起的弹性弯沉值并把这个数值同某一个标准值比较。弹性弯沉值的确定以层状半无限体弹性理论课题的解为基础。这时，若不计算层状半无限体的弹性弯沉值，而以具有那样一种弹性模量的均匀半无限体来代替它是合理的（在那样一种弹性模量时，均匀半无限体表面的垂直变形值等于层状半无限体表面的垂直变形）这样获得的新路面模型用当量弹性模量表征。这种当量弹性模量与弹性弯沉值成比例，就是说它可用来评定路面的变形性能。在一般情况下，路面由具有不同弹性模量的几层组成，因此要依次对每一层进行层状半无限体换算为均匀半无限体的工作。

路面按弹性弯沉计算包括下列运算：由下向上逐层计算各路面结构层表面的当量弹性模量；把算出的路面表面的当量模量值同要求的弹性模量比较，即刚度条件以下式表示：

$$E_{n+1}^{(0)} \geq E_{TP} \quad (1-2)$$

式中： E_{TP} ——路面要求的弹性模量；

$E_{n+1}^{(0)}$ ——路面表面的当量弹性模量。

当量弹性模量要根据须知 BCH46-72 借助于诺模图用图解分析法确定。进行手工计算时，按诺模图计算是方便的，但是在利用电子计算机计算时会引起很大的困难。从这个观点出发，就希望有评定变形的分析性方法，以便计算弹性弯沉。这时可以利用 П.И.Теляев 借以绘制诺模图的理论运算，但是为了计算路面各层表面的当量弹性模量，必须用电子计算机进行大量复杂的计算。这就需要：一方面要用大量