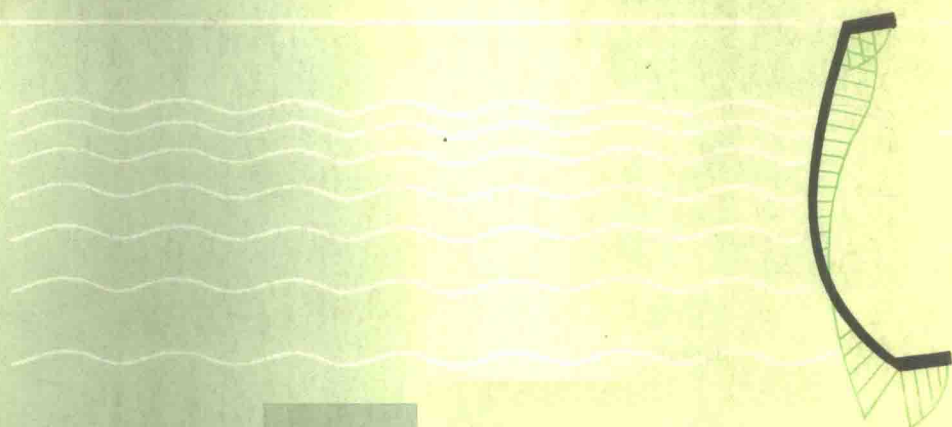


安徽省水利局水利科学研究所
安徽省水利局勘测设计院



薄壳闸门的设计与计算

水利电力出版社

薄壳闸门的设计与计算

安徽省水利局水利科学研究所
安徽省水利局勘测设计院

水利电力出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了薄壳闸门的选型、结构设计与计算,着重讨论了棱柱壳及双曲扁壳的分析。本书中主要用折板理论来近似分析棱柱壳,用薄膜理论加边界干扰来分析双曲扁壳。除了讨论一般分析理论外,还特别研究了三角形荷重作用下的特点。书中列举了计算实例,并附有图表及有关数字电子计算机程序。

本书可供从事水利水电建设的技术干部、有关土建专业的科技人员、大专院校师生参考。

薄壳闸门的设计与计算

安徽省水利局水利科学研究所
安徽省水利局勘测设计院

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京印刷三厂印刷

1976年11月北京第一版

1976年11月北京第一次印刷

印数 00001—14440 册 每册 1.25 元

书号 15143·3199

毛主席语录

水利是农业的命脉

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

前 言

在毛主席的革命路线指引下，在波澜壮阔的“工业学大庆”、“农业学大寨”，普及大寨县的群众运动推动下，特别是无产阶级文化大革命以来，我国的水利水电建设蓬勃发展。广大工人，贫下中农和工程技术人员，在党的一元化领导下，发扬自力更生、艰苦奋斗的革命精神，广泛地开展了“三结合”的技术革新和技术革命，创造了许多适合当地需要的新型水工建筑物。

遵照毛主席关于“认真搞好斗、批、改”的教导，广大设计、科研人员，走出高楼深院，到现场去，向工人和贫下中农学习，接受工农兵的再教育。通过与工人、贫下中农和领导干部的“三结合”，以及施工、设计、科研“三结合”，对适合我省的水工建筑物作了一些摸索。薄壳闸门就是其中的一个项目。

我省中小型水工建筑物中，闸门数量较多，大多采用钢丝网水泥或钢筋混凝土结构，这就迫使我们试图把较轻的薄壳结构引用到水工闸门中来。在学习兄弟单位先进经验的基础上，我们曾与有关单位一起设计并试制了一些薄壳闸门。

薄壳是一种比较复杂的结构。在编写此书时，主要从结构设计的观点出发，力图用结构力学的方法及工程技术人员所习惯的语言来阐明薄壳的近似分析及它在水工闸门中使用的特点。为此目的，我们不仅尽可能地采用较为初等的数学分析，在个别的地方在力学上也作了一些假设，以便使问题简单明了一些。

薄壳闸门目前还处于发展中，不论在布置上或者结构上都还存在一些问题，有待进一步研究。在今后生产实践中，我们希望与兄弟单位共同努力，进一步总结提高。

由于我们政治与业务水平都不高，编写中的缺点及错误一定不少，请同志们批评指正。

安徽省水利局水利科学研究所

安徽省水利局勘测设计院

1975年11月

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 壳体及薄壳闸门的一般概念	4
第三节 近年采用的一些壳体闸门	8
第二章 棱柱壳闸门	19
第一节 概述	20
第二节 折板计算的一般概念	24
第三节 荷重的分解	29
第四节 基本体系和基本未知数及协调方程式	34
第五节 基本体系的纵向分析	39
第六节 基本体系的变位计算	53
第七节 折板结构的应力计算	56
第八节 计算步骤及分析简化	59
第九节 角变位法求解折板结构	64
第十节 薄壳弧形闸门的分析	67
第十一节 薄壳弧形闸门的分析结果及对设计的一些讨论	78
第十二节 计算实例	94
第三章 双曲扁壳闸门	119
第一节 概述	120
第二节 壳面选型	121
第三节 双曲扁壳计算的一般概念和薄膜理论加边界干扰的计算方法	127
第四节 均布荷重作用下壳体内力的计算	138
第五节 三角形荷重作用下壳体内力的计算	142
第六节 边构件侧向刚度对于壳体应力的影响	147
第七节 多联扁壳的计算	155
第八节 扁壳闸门的边缘构件设计	166
第九节 扁壳闸门设计及施工中的若干问题	169
第十节 计算实例	176
附录 I 某些边界条件的特征函数及其各阶导数值	189
附录 II 均匀分布荷重作用下, 矩形域双曲扁壳薄膜内力系数表	212
附录 III 三角形荷重作用下, 矩形域双曲扁壳薄膜内力系数表	224
附录 IV 干扰值系数表	236
附录 V 双悬臂棱柱壳按折板分析的 π -2机及709机源程序全文	237

第一章 绪 论

第一节 概 述

在水工建筑物中, 闸门是活动的挡水体, 用以控制水流, 因此是一个重要的部件。闸门的种类很多, 设计一个闸门, 牵涉到的问题是多方面的。本书只介绍和讨论一种正在发展的闸门型式——薄壳闸门。目前这种闸门大多是非钢材料的或混合结构的, 故节约钢材。它的运转条件、零件及启闭设备与普通闸门基本相同, 主要区别在于薄壳闸门是用空间结构的概念来设计的, 因此对材料的使用比较充分, 但闸门门体的构造将会产生许多与传统闸门不相同的地方。

本书将把重点放在分析计算方面, 并从合理结构的角度出发, 对几种非钢材料的壳体闸门进行一些讨论。当然, 对它的分析与计算, 不单适用于非钢材料, 也适用于钢结构薄壳闸门。由于三角形荷重是水工结构的一个特点, 而在低水头中, 三角形荷重又是一个主要因素, 所以在分析或者选型中, 应尽量地考虑到这个特点。

1958年以前, 在水工建筑物中使用的闸门主要是钢闸门。闸门的型式, 从结构上来看, 大都是平面体系的叠加, 即由面板、小梁、次梁及主梁组成, 这些构件是逐渐支承的, 在分析中, 荷重由面板传给小梁, 再传给次梁, 最后由主梁传给支承, 每个部件都独立工作, 并按面板或梁系工作, 实际上水工闸门是一个空间结构, 各个部件相互影响都是作为一个整体来受力的。所以有必要以空间体系来代替平面体系, 使分析更加合理。在制造上, 钢闸门一般要求严格, 需由工厂生产或专业队伍施工。

五十年代末期到六十年代初期, 各地大量采用了钢筋混凝土结构的闸门, 它们大多数是板梁式或叠梁式, 有的闸门尺寸已经做到 12×9 米, 设计水头为9米。与钢闸门相比较, 门体用钢量减少了, 但由于结构型式没有变化, 闸门的自重显著增加。例如上述的闸门, 门重有的达130吨。因而在吊装、检修及启闭等方面都带来不少问题, 结构也显得很笨重。这样就促使人们不得不从材料选择及结构型式两方面去寻求新的改革。

在材料选择方面, 1960年前后, 广东省湛江地区大量采用了钢丝网水泥结构的水工建筑物, 取得了很大的成绩。以后, 全国不少省份都相继积极推广钢丝网水泥这种新型材料。当这种材料应用到闸门上时, 人们又进一步考虑在结构型式上加以改进, 以便利用空间结构来代替平面结构, 并设想如何把薄壳这样的结构型式应用到水工闸门方面来。

六十年代初期及中期, 首先在面板上引入了壳体结构中的折板及棱柱壳, 以安徽省为例, 1964年, 在滁河干渠的节制闸上, 采用了小跨度的圆筒壳闸门。1965年到1966年, 闸门的跨度又逐渐增大, 面板结构也逐渐向空间结构发展。在这个期间, 设计并建成了裕溪口节制闸闸门(V型折板), 五河分洪闸闸门(多联筒壳面板, 多横梁式), 新汴河唐河地

下涵闸门（折板）等等。浙江等省也建成了一些类似的闸门。但这些闸门从整体讲仍是属于板梁式闸门的范畴，只是面板采用了钢丝网水泥的空间结构，虽然钢材有所节约，重量有所减轻，但幅度都不算太大。在设计中，一般仍是按平面结构的等价梁来进行分析。从一些原型试验的结果看来，实际结构与设计还是有出入的，例如折板闸门，它的弱点不在纵向（设计者往往采取这个方向作为计算重点），而在折板的横向及闸门的横梁上。同时，它的施工也比较复杂，需要进一步寻求更好的结构型式。

六十年代中后期，开始出现整体结构为空间的薄壳闸门。这种闸门基本上不按传统闸门的板梁体系进行布置，而把整个结构作为一个整体来处理，荷重直接由面板传给支承。在设计中，构件受力是以轴向力为主的。一般在薄壳闸门中还有梁系或桁架出现，但它的含义与板梁体系有所区别，它或者作为壳体的边构件出现，这时它主要是壳体的联系件（相当于拱中的拉杆）；或者是壳体的加强件，此时，梁就是壳体的一部分。由于闸门中各个部件都有影响，所以布置的问题就比较复杂，例如在壳体弧形闸门中，由于布置不同，在工程量基本不变的情况下，内力相差可达2.6倍。

1966年到1967年，江苏省设计与施工了孔口为 4×4.5 米、设计水头为6米的双曲扁壳闸门，并且进行了规模较大的原型试验。此后，安徽、湖南、浙江、山东等省都设计了这种闸门，也进行一些试验。开始的时候，大多数闸门都是与工业和民用建筑相同，是把凸面向上游承受压力的。这种扁壳闸门在重量上较折板闸门又有了降低，同时施工比较简便。但是原型试验表明：这种闸门边缘构件的断面及含钢量虽然都相当大，可是由于受力集中，仍然出现了裂缝，从而导致闸门的破坏。1968年，安徽省曾设计并试验了球壳闸门。试验结果表明，面板安全度较高，但边构件仍是门体的薄弱环节。

在这些试验的基础上，我们对扁壳结构的计算作了一些分析，并研究了扁壳中边构件与壳体的关系，认为问题的主要方面在边构件。为了改善边构件的受力状态，1969年曾在安徽新汴河上采用了钢丝网水泥反向扁壳闸门，即扁壳凹面向上游受力。从力学及建筑结构观点看这是比较合理的。通过闸门的原型试验表明，这种做法使边构件受力大为改善，而壳体经过加强以后，也有相当的安全系数。由于边构件尺寸的减小，闸门重量及用钢量也都有较大降低。但是，因为钢丝网水泥反向薄壳闸门的面板是受拉结构，从而限制了它的水头和使用尺寸。与此同时，正向薄壳闸门也有了很大发展，孔口尺寸及水头都达到了新的高度。

此后，又把扁壳闸门应用到船闸的人字闸门上，材料则由钢丝网水泥扩展到钢壳面板与钢筋混凝土边梁的混合结构，以承受较大水头或满足某些特殊要求。1969年试制了新汴河灵西船闸钢丝网水泥双联扁壳人字闸门（正向扁壳，门高7.7米，水头4.0米），1970年又试制了新汴河宿县船闸反向双联扁壳闸门及团结船闸三联扁壳闸门（都是钢壳、钢筋混凝土边构件的混合结构）。鉴于双曲钢扁壳施工比较困难，在团结船闸上的闸首还试制了双联圆柱壳人字闸门。1971年，安徽省驷马山引江工程乌江船闸上闸首采用了钢筋混凝土边梁、反向钢扁壳的直升门，口门尺寸为 6.3×8.0 米。这种混合结构基本上具备了钢闸门的优点，节省了钢材，相对重量也比较轻。

与此同时，全国不少省份还试制了圆柱壳直升闸门及膜型扁壳闸门。

在直升闸门中采用壳体结构,使闸门自重及用钢量都有了较大的降低。不过还存在着两个问题,一是跨度较小,目前一般都在7.0米以下;另一个是启闭力较大,不论是正向壳或反向壳都有较大的附加水压力。弧形闸门则具有适应于较大跨度而启闭力又较小的优点。因此,从七十年代开始出现了较多的钢筋混凝土或钢丝网水泥弧形闸门。实际上,从六十年代中后期,全国不少省份就出现了一些钢筋混凝土弧形闸门。在布置上,基本上与弧形钢闸门相同,仍属板梁结构,因此显得相当沉重。后来弧形闸门开始向两个方向发展,一个是简化施工,面板以预应力构件来代替;另一个方向则是把整个门叶当作一个薄壳结构来设计。

1971年,湖南省水利电力勘测设计院设计了甘溪水轮泵站薄壳弧形闸门(钢筋混凝土面板,钢支臂)。在设计中取消了原来弧形闸门的板梁体系,把闸门作为一个弹性薄壁杆件来考虑。该闸门跨度达10米,挡水高度及水头均为6.3米,闸门采用圆弧形断面棱柱壳,在分析中,整个闸门是按薄壁杆件处理的。

安徽省黄桥闸薄壳弧形闸门是在1972年设计建造的。在设计中,曾试图从棱柱薄壳的观点来设计弧形闸门,薄壳弧形闸门的设计与扁壳闸门有不同的特点,其受力分析计算相当复杂,后来应用电子计算机才初步得到解决。另外它的形式对应力影响较大,它的边构件就是壳体的一部分。由于壳体受力与平面系统有不同的特点,薄壳弧形闸门与传统的弧形闸门在布置、结构上都有一些变化。薄壳弧形闸门目前还在发展中,它的跨度还可以增加,其重量可望接近传统的钢闸门。这种闸门的缺点是要求较长的支墩,不易检修,本身所占的面积较大,自重绝对值也大,施工较复杂,吊装也比较困难。

总的来讲,薄壳闸门具有不少优点,首先,它以薄壳这样的空间结构代替原来重叠的板梁结构。因此每个部件的作用都得到一定的发挥,重叠较少,并且由于构件中以轴向力为主,所以受力比较合理,自重较轻,用钢量也较节省。现以 4.0×4.5 米,设计水头为4.5米的直升闸门为例,当采用钢筋混凝土叠梁闸门时,门重达8吨以上,采用折板闸门时,门重约为6.5吨,用钢量约800公斤。但采用钢丝网水泥反向薄壳闸门时,门重仅5吨左右,用钢量约500公斤。如采用钢闸门,用钢量一般不少于3吨。另以船闸闸门为例,宿县船闸钢板薄壳闸门为 4.4×9.3 米,设计水头为7米,用钢量约为4吨。如果采用钢闸门,用钢量大约为8~10吨。再以薄壳弧形闸门为例,黄桥薄壳弧形闸门口门为 10×4.5 米,设计水头为4.5米,活动部分门重约18吨,门体用钢量约3.5吨。当采用钢闸门时,用钢量大约需要10~12吨。但采用 7.0×3.5 米的预应力板梁式钢丝网水泥弧形闸门时,在设计水头为6.5米的情况下,门重即达14.5吨。其次,在低水头闸门中,采用非钢材料或混合结构时,由于运转条件较简单,一般就地即可施工,造价也较钢闸门低得多,钢丝网水泥结构的造价约为钢结构的 $1/5 \sim 1/8$ 。当然,门体本身的造价及用钢量只是闸门经济指标的一部分,还要和启闭机等配合考虑,否则即使门体造价较省,而整体的造价不一定节约,要根据具体情况进行选择。此外,钢丝网水泥结构的耐久性还有待通过实践进一步探索,根据调查,施工质量对耐久性有很大的影响,有的施工质量较好的钢丝网水泥闸门,已运转8年,整个闸门还是完好的。目前,薄壳闸门主要还是钢筋混凝土结构及混合结构,但它的观点及方法在钢结构闸门中同样是可以采用的。

第二节 壳体及薄壳闸门的一般概念

本节将从物理概念上来介绍壳体的一般概念及壳体的内力。壳体很容易给人难以理解与难以分析的感觉。实际上,壳体只是平面应力状态及平板的一个合乎逻辑的发展,就好象拱是梁的一个发展一样。至于分析,壳体的分析的确比较复杂,但对于某些特殊的常用壳体,有了表格的帮助,作一些工程实用的近似分析,概念还是简单的(虽然有时比较复杂)。例如在本书中将要介绍的矩形双曲扁壳及棱柱壳就是如此。当采用了电子数字计算机以后,工程上分析的问题就比较容易解决了。

所谓壳体,是指由两个曲面所限定的物体。当这两个曲面之间的距离与壳体其它尺度比较要小得多的时候,就是薄壳。

在阐述壳体内力之前,首先研究几种应力状态:

(1) 薄膜应力状态: 对于一张非常柔软的薄膜(如橡皮膜),当它承受垂直于膜平面的荷重时,它将不能维持其几何的稳定性,膜面将发生变形,并形成与荷重相适应的曲面,这时在膜内将产生各点相等的法向应力 N , 而剪应力为零。对于平面问题,它就是一根绳索。

(2) 平面应力状态: 如果有一片很薄的板,在本身平面内的荷重作用下,将只产生薄板平面内的线应变(伸长或缩短)和角应变(剪切即平错)。由此引起的内力将为法向力 N_x , N_y 和剪力 S 如图(1-1), 这就是所谓平面应力状态。平面应力状态的一个特殊情况,就是一根直杆承受拉压的情况。

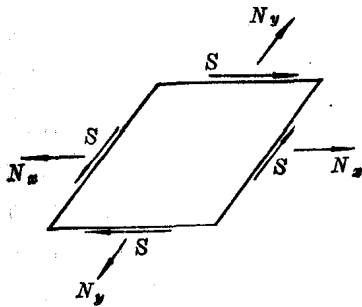


图 1-1

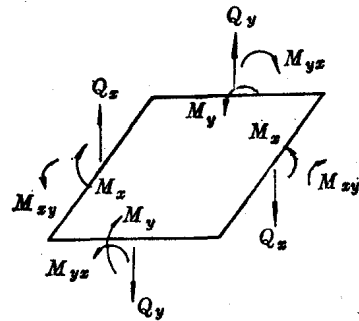


图 1-2

(3) 板应力状态: 如果有片薄板,具有一定的抗弯刚度,那末当它承受垂直于板平面的荷重时,在一定限度内板的形状将能维持大致不变,板面的变形将主要是挠曲与扭曲。相应的内力为弯矩 M_x 和 M_y , 扭矩 M_{xy} , 横切力 Q_x 和 Q_y 等, 如图(1-2)。它的特殊情况是梁,这时只有单向弯曲及剪切。

首先研究一下平面拱的情况。当荷重的分布与拱的形状一致时,如果不计拱轴的压缩所受到的限制,则在拱内只产生轴向力。这时拱的工作与索一样。当荷重形式与拱的形式

不一致时，在拱内就要产生弯曲。但由于曲率的存在，这个弯曲与直梁不同，即荷重除了受到弯曲的抵抗外，还要受到轴向力的抵抗。因此，拱的作用可以认为是梁与索共同工作的结果。

对于壳的受力状态，可以把壳理解为形状呈曲面的板，其所承受的荷重可与曲面相垂直（法向荷重），也可以不垂直（切向荷重）。

一般说来，壳体曲面形状与荷重的形式不会是一致的。因此，当荷重作用在壳体上时，壳体就如同薄膜一样，将会产生改变壳面形状的趋势以便与荷重形式相一致。但是，由于壳体具有一定的抗弯刚度以及平面内的抗剪刚度，这种形状的改变趋势必然要引起垂直于平面的挠曲和切线平面内的线应变与角应变的抵抗。在壳体中，这种抵抗是双向的，并且通过扭矩及剪力来互相配合与传递。然而不论是垂直壳曲面的变位或在壳面中的变位都不是自由的，离开壳面的挠曲要与膜变位相协调，这个协调决定了它们所承担的荷重的分配。对于板来讲，就好象处于弹性地基上一样，故壳体内的内力状态可以理解为二种应力状态的叠合：即平面应力状态和板应力状态。不过这个平面应力状态是有曲率的薄膜状态下的内力，即第1种应力状态与第2种应力状态的叠合。由于薄膜应力是由能承受剪力的平面应力所组成，所以我们就简称这种壳面内的内力状态为膜应力状态。

对于双向曲率的薄壳，由于它的厚度很小，与壳面内的拉伸压缩相比，抗弯刚度较小。如果把壳体理解成置于膜变形为“弹性地基”上的板，则这个地基是很刚硬的。所以占主要地位的是膜应力状态，板应力状态则只占从属的地位。板应力状态只有在壳体的边界附近，荷重发生突然变化处以及曲面比较平缓时（例如曲率为零），才显示出它的重要性。膜内力包括法向力 N_x 和 N_y ，剪力 S ；板内力包括弯矩 M_x 、 M_y 和扭矩 M_{xy} ，横切力 Q_x 及 Q_y 。薄板承受膜内力的能力远大于承受板弯曲内力的能力，所以，使壳体尽可能多地发挥薄膜内力的作用，也是结构设计的一个目的。

由上述可以看出，壳体实际上是拱的一个发展，由拱的单向作用扩展到双向作用，并且由于剪力与扭矩的存在，对两个方向的内力起了调整作用。

壳体的种类很多，最常见的是按壳体的曲面形状分类，并且按表征曲面形状的特性——高斯曲率——而定。

对于曲面上任一点 c ，存在着切平面，通过 c 点作此平面的法线，并通过此法线的任一平面切割曲面，其割线为一曲线。此曲线具有曲率 k ，曲率半径为 R 。当围绕此法线旋转切割平面时，就得到一组曲率，可以证明，这组曲率在有些地方将取得极值：最大值 k_1 及最小值 k_2 ，这两个曲率称为曲面在该点的主曲率。这两个主曲率的乘积即称为曲面在该点的高斯曲率。

由于高斯曲率是两个主曲率的乘积，所以它可能是正值、负值或零值。实用壳体的曲面在每一点的高斯曲率符号都是一致的，因此按高斯曲率可把壳体分为三大类：

1) 正号高斯曲率壳体——这种壳体的特点是壳体每一点各个方向都是凸形的（或是凹形的），如球壳、穹形屋盖等。这种壳体的弯矩最小如图（1-3甲）所示。

2) 零号高斯曲率壳体——这种壳体的特点是有一个主曲率为零，即有一个主方向是直线，另一个与之垂直的主方向则为曲线。如圆柱壳、锥形壳等等。这种壳体的弯矩次

之,如图(1-3乙)所示。

3) 负号高斯曲率壳体——这种壳体的每一点,在一个主方向是凸形的,而在另一个主方向是凹形的。如马鞍形壳就是如此。这种壳体的弯矩相对最大,如图(1-3丙)所示。

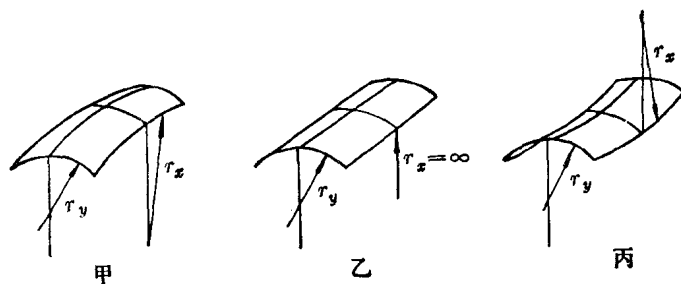


图 1-3

在这三大类下面还可以分得细一些,如按照壳体截面的曲线形状来分类等等,此处不拟详述。

此外,还经常按照曲面成型的方法来区分壳体,若曲面是由一根曲线按一定轨迹移动而成,则称为移动壳。若曲线是由一根曲线围绕一根轴转动而成,则称为旋转壳等等。由于成型及模板制作方便,这两种壳体在土建上都是经常使用的。

到目前为止,在水工闸门中用得最多的是两种壳体,一种是正号高斯曲率双曲扁壳,另一种是棱柱壳。

在闸门中常用的正号高斯曲率双曲扁壳是由一条凸曲线沿另一条与之垂直的凸曲线上移动而成,因此,它属于移动壳,并且每一点在各个方向都是凸形的。对于矩形域来讲,有一点象球面上切下一个方块一样(不过球面是旋转壳)。所谓扁壳,就是它的矢高相对于它的覆盖面积及曲率半径而言是很小的,以致可以近似地忽略它的高斯曲率。这样在力学上及几何上的处理都简单得多。

所谓棱柱壳是指一条开口的曲线或折线沿一条直线移动所形成的曲面,它是曲线形柱面或折线形柱面的一部分。棱柱壳是属于零号高斯曲率,它在母线方向的曲率为零。

门叶采用薄壳结构时可分为两部分,一部分是壳体,一部分是联系壳体的边构件。以图(1-4)的透视图为例,这个薄壳闸门是一个反向钢板与钢筋混凝土混合结构的薄壳人字门。薄壳面板的主要功能是挡水,它可以是光面的,也可以带有某些加强肋件。但这些加强肋件并不是板梁体系中的次梁或小梁,而只是为了加强壳体某个方向的刚度。如图(1-4)中角点的小肋,主要是为了加强该方向的刚度,以防止局部失去稳定。在对角线方向的加强件,由于该方向是主拉应力方向,设置加强角钢以降低面板的主拉应力。边构件的功能在结构上是作为薄壳的联系构件或支承构件,在运用上则作为闸门支承行走,起吊或活动部分及封水的埋设部位。以图(1-4)的船闸人字闸门为例,在两根边柱的一侧要设置对缝柱,另一侧则要安装支枕垫座及封水。在顶梁及中梁上要安置推杆。在薄壳弧

形闸门的边构件上则可设置吊耳，并与支臂相联结。在直升闸门中，则可安装封水、吊头及支承行走装置。边构件是薄壳闸门很重要的一部分，它占闸门的较大工程量，所以设计中是应该仔细考虑的。

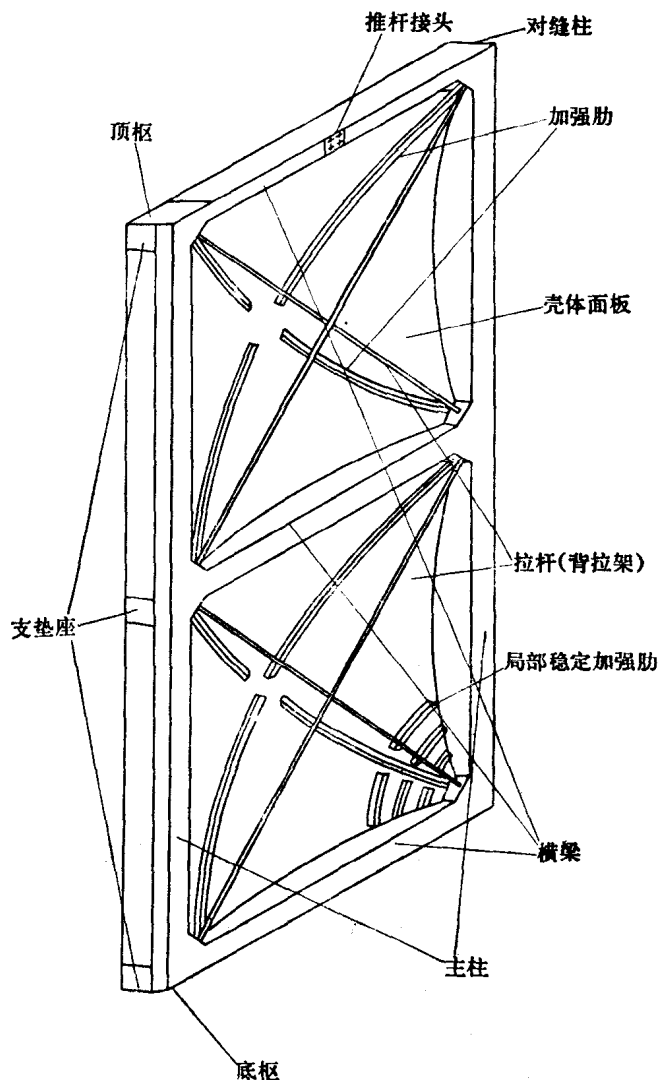


图 1-4

薄壳闸门可以用于直升闸门、人字闸门或弧形闸门。一般来说，它仍保留原来闸门的运行方式，其零件、预埋件也大体相同。但是，在零件的布置上要考虑到薄壳的特点，有些地方将有一些区别。

为了分析方便，把薄壳闸门按面板的壳体形式分成两类：一类面板由棱柱壳组成，称为棱柱壳闸门；另一类面板由双曲扁壳组成，称为双曲扁壳闸门。这些闸门面板的壳体，可以用钢材、钢丝网水泥或其它材料（如塑料）制造。在分析中，我们假设材料都是弹性的，各向同性的及均匀的。

根据实用壳体理论,这两种壳体属于同一类型,它们的基本微分方程是一致的。但就近似理论而言,双曲扁壳较棱柱壳简单得多。这是因为棱柱壳有一个方向的曲率为零。所以在这个方向的法线方向,弯矩就会起重要的作用,当弯矩一旦起主要作用,则方程阶数就大大提高。在双曲扁壳中,由于两个方向都有曲率,在常用的荷重作用下,只有在边缘邻近才考虑弯矩的作用,这样整个壳体中就以膜应力为主,而膜应力的方程阶数比较低。

在建筑上对这两种壳体已有相当的研究,并制有不少实用的表格。但在水工闸门中,由于边界条件及荷重与建筑中都有较大的出入,壳体的形式也有变化,所以对于这些壳体的近似计算讨论还是不充分的。我们将在第二章中专门讨论棱柱壳的近似计算,在第三章中讨论正号高斯曲率的近似计算,并且计算出一些表格供设计参考。

第三节 近年采用的一些壳体闸门

自从无产阶级文化大革命以来,涌现出许多不同类型的壳体闸门。按闸门结构的工作状态来看,它们基本上可以分为两大类:就整体而言一类仍属梁式结构,只是面板部分采用了壳体形式;一类属于空间结构的壳体形式。对比两类闸门,前者没有脱离旧的布置形式,因此壳体的空间作用发挥得不够充分,门体显得比较笨重;后者比较充分发挥了壳体的作用和建筑材料的特性,门体比较轻巧。

以下按此二大类分别介绍一些典型的闸门。限于掌握的资料,将主要以安徽省现有的闸门为例,介绍一些设计与试验的情况。

一、壳体面板的梁式闸门

这些闸门大都采用钢筋混凝土主梁和钢丝网水泥的壳体面板。

1. 折板闸门

折板闸门是指面板为棱柱形折板的闸门。安徽省裕溪口节制闸、新汴河、唐河地下涵和东流节制闸等都采用了这种闸门。前者采用V形折板,后二者采用∩形(梯形)折板。浙江等省也做了很多这样的闸门,折板支承在横梁上,横梁则以受弯工作方式将荷重传给端部支承。

折板一般采用4网1筋的钢丝网水泥,板厚2.2~2.5厘米。

下面介绍新汴河唐河地下涵及东流闸折板闸门和它们的试验情况。

唐河地下涵孔口 4.0×4.7 米,设计水头为5.0米,闸门尺寸为 4.36×4.7 米。利用3根主横梁及1根纵梁以解决起吊问题。上部折板横向放置,下部折板纵向放置,如图(1-5)。

由于上部水头较小,故起控制作用的是下部折板。下部折板跨度为1.7米,由5个单元组成,原设计为6网1筋,试验后改为4网1筋,每个单元的断面尺寸如图(1-6)。

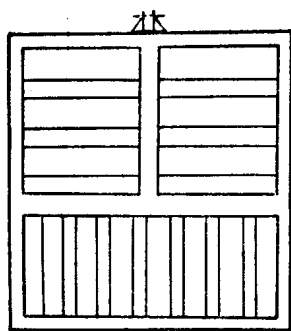


图 1-5

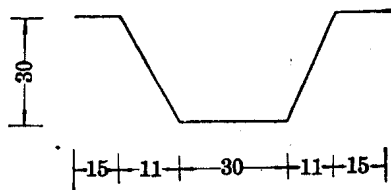


图 1-6

我们曾对此折板进行了数次试验。试验中取了两个单元，用特制的橡皮袋充水加压，示意如图（1-7）。橡皮袋放在支梁模板与试件之间，橡皮袋充水时象车轮内胎一样对门体加压，这种加压与水压力是一致的。

用电阻应变仪量测应变。试验结果表明，面板有足够的强度。当水头超过设计水头一倍左右时才出现裂缝。原设计中折板按等价工字梁验算了纵向强度，但破坏时，裂缝沿纵向出现，主要由横向应力所控制，裂缝如图（1-8）。

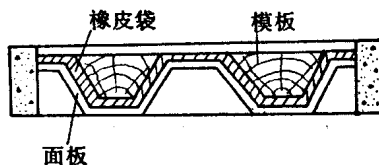


图 1-7

可见这种折板在承受水压力时，不仅要核算其

纵向强度，而且要核算横向强度。此外，上游模板拆开以后，在上游转折处发现一条裂缝，从上到下全部贯穿，因处于上游面，对出现时的水头没有搞清楚。估计是由于横向弯曲而引起的应力集中所致。同时，从试验中可以看出，钢丝网水泥的质量与施工有很大关系，其强度，尤其是裂缝出现时的极限拉伸值都与施工质量有关。

随后，我们又在东至县东流闸做了另一个试验。原设计折板以纵向放置，共6根横梁，分五跨。取出一跨进行了原体试验。

梁跨为5.3米，折板纵向跨度为90厘米，梁的截面为40×15厘米，折板单元如图（1-9）。荷重分五级即3.9米、5.9米、7.2米、9米及10米进行试验。

3.9米时，折板完好，但梁开始出现裂缝。对处于跨中的折板单元进行了应变测量，测得折板中心最大应力仅10公斤/厘米²左右，但下游面距梁5厘米处的拉应变已达 260×10^{-6} ，处于临界状态，C处已发生裂缝，如图（1-10）。

5.9米时，中断面的拉应力只有17公斤/厘米²左右，但A点由于C点裂缝开展而被拉开，拉应变达 475×10^{-6} 。

7.2米时，最大拉应力约为25公斤/厘米²左右，但A点已有明显的可见裂缝。

加压到10米时折板完好，但上游面B点转折处的拉应变由7.2米的 $210 \sim 240 \times 10^{-6}$ ，突然跳到 $1000 \sim 1500 \times 10^{-6}$ ，实际上已形成裂缝。

拆模以后，在上游面B点的裂缝已经闭合，但在距边梁最近的折板边跨单元上，与B

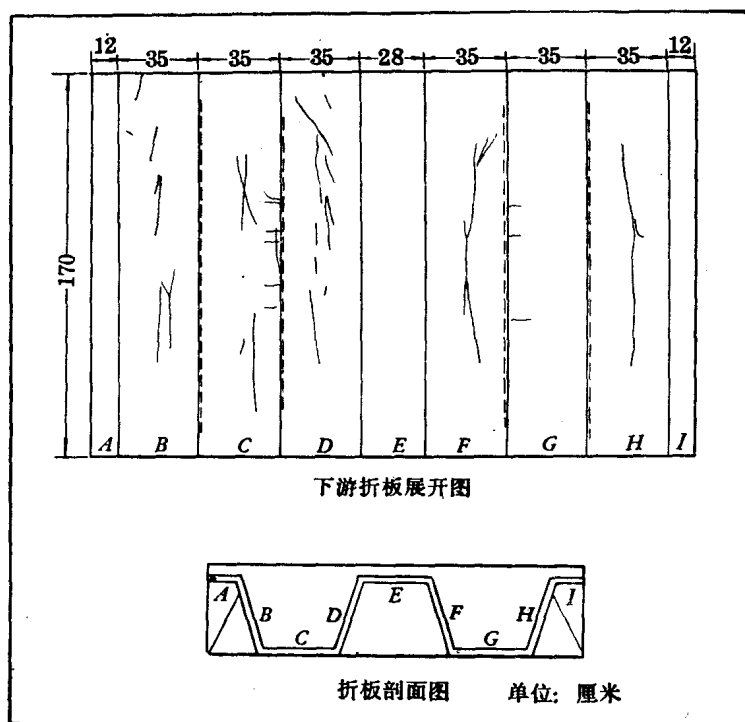


图 1-8

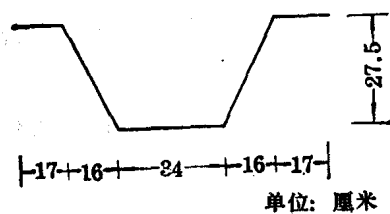


图 1-9

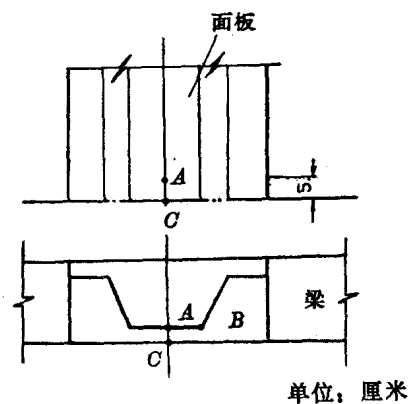


图 1-10

点相对应的地方却发现宽0.1毫米以上的裂缝，出现的水头还没有搞清。

2. 面板为连续多联圆柱壳的梁式闸门

1967年五河分洪闸采用了这种闸门。孔口为 6.0×6.5 米，设计水头为4米，主横梁5根，中间用纵向的多联圆柱壳作为面板。主梁间距（即圆柱壳跨长）为1.29米，圆柱壳横断面如图（1-11）。

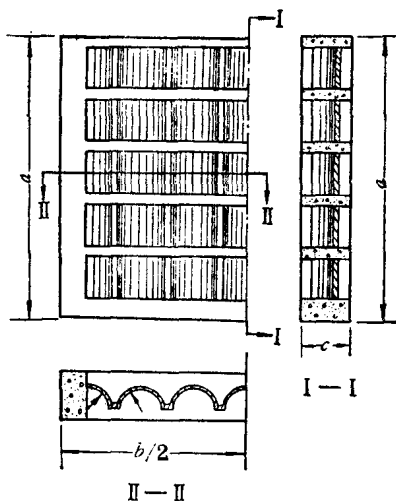


图 1-11

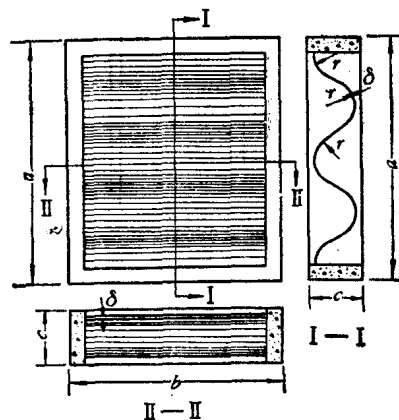


图 1-12

曾对此闸门作过局部的原体试验。试件是取两主横梁中间两个整壳和两个半壳。限于当时设备，只加压到设计水头（瞬时超过设计水头1.5倍即6米水头），面板曾出现45°的裂缝。

3. 波浪型板闸门

波浪型板闸门的梁系构造与折板闸门相同，只是把折板用波浪型板来代替。波浪型板一般由正反两个圆弧组成，在江苏省这种闸门做得较多。这种型式的闸门使横向应力得到改善，如图（1-12）。

我们对波浪型板闸门进行了原体试验。纵向跨度1.68米，单元波浪型板宽70厘米，小波半径18厘米，设计水头为5米，试验闸门面为6层钢丝网，厚2.8厘米，由两个单元波浪型板组成，试验水头最大到8.7米。

从这个闸门的试验来看，应力是比较均匀的，但有两个特点：一是裂缝出现较早，另一个是裂缝主要为横向的及倾向于45°方向。这与折板闸门裂缝主要为纵向是不同的，所以把折板改成波浪型板以后，横向应力转好，纵向转坏，这一点从理论上也是容易理解的。

闸门所以较早出现裂缝，可能是由于保护层过厚。我们感到波浪型板的制作，由于钢丝网具有弹性，保护层控制及钢丝网成型都比较困难，不如折板简单。

4. 多联薄壳

对于双曲薄壳闸门，如果采用多联薄壳而又具有不直接与支承联结的纵向梁时，对于闸门整体来说，它仍属于梁式闸门。

新汴河团结闸门采用田字形四联薄壳，孔径为6.0×6.6米，闸门为6.4×6.6米。门体由3根主横梁及3根纵柱组成田字形梁格。中间是4个双曲扁壳，壳体基本呈正方形，为