

大型排土机结构的力学分析

张允真

(大连工学院)

杨鼎春*

(大连重型机器厂)

摘 要

大型排土机是国家重点研制项目——“千万吨级大型露天矿成套设备”之一，其结构部件多，构造复杂。本文以此为例，为其结构建立了各种平面、空间及其组合的有限元模型，并利用相应的有限元法整体地或局部地作了刚度、强度和稳定性分析，以及对排料臂架进行了优化设计。此项计算，为排土机的结构设计提供了可靠的依据。

一、大型排土机的钢结构

此处所述的大型排土机具有三对履带，每一对履带上架设一个支架，呈等边三角形的底架于三个顶点处用球铰与履带支架连接。在三角底架上架设回转平台，回转平台通过平面轴承支持在三角底架上，它们可以作相对运动，以便调动排土机上部结构的方位。在回转平台上设有门架，门架与回转平台近似为固结。在门架顶端横梁上装设有滑轮组，以便用钢缆绳吊挂平衡臂架和通过撑杆吊挂大型排料臂架。撑杆于下端与排料臂架根部用轴销连接在一起，排料臂架与门架的外伸梁用轴销铰接在一起。在排料臂架上设置有三对计六个吊点，通过撑杆把它吊挂在门架上。平衡臂架的外端与门架的上横梁用钢缆绳连系起来，其另一端用轴销铰接在门架的外伸臂上。受料臂架的一端用万向球铰也连接在门架上，其另一端在工作时通过支架车支持在地面上，当调车时悬挂在平衡臂架上。受料臂架和平衡臂架置于门架的同一侧，排料臂架和撑杆置于门架的另一侧，门架居中，如图1所示。

斗轮挖掘机采掘的物料通过受料臂架和排料臂架上的皮带机，运送到百米之外。

大型排土机的排料臂架，撑杆，平衡臂架和受料臂架，通常是对称的铰接在具有变位的门架上（图1）。因此，在竖向荷载（自重，设备重，物料重等均是对称于门架的荷载）作用下，设排料臂架等部件与门架的连接为固定铰链是恰当的。于是，可以单独地分别计算门架两侧的排料臂架等部件，以避免整机结构一体的大型计算。在水平荷载（如风力）作用下，虽然铰接在门架上的支持点变位不同（非对称），致使排料臂架等部件存在一定的偏转，有一定的内力变化，根据受力分析，此变化的内力属于次量级。

* 参加本工作的还有曹富新，赵达壮，王德康，夏元恒等同志。本文1988年10月收到

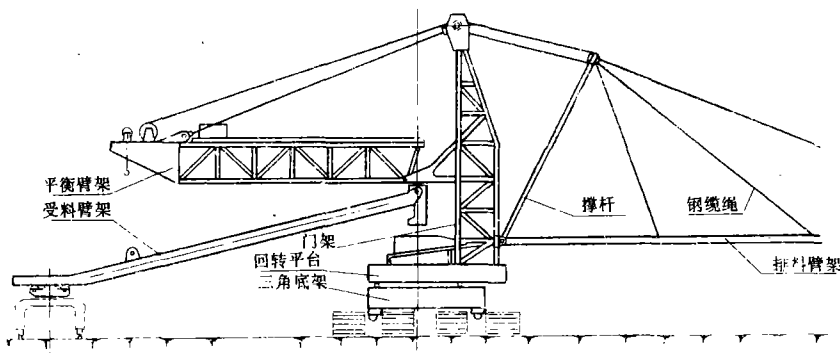


图 1

二、排土机结构的有限元模型及其计算

1. 排料臂架

排料臂架的结构为 18 个节间的 K 字型板架 (荷载垂直板架平面), 或称平面刚架 (荷载作用在平面刚架的平面内), 其有限元模型如图 2 所示。

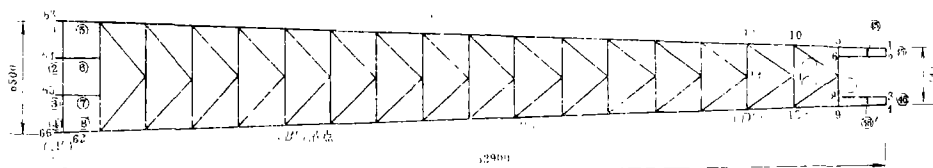


图 2

排料臂架的各杆件是细长的, 设各杆件中线处于同一平面内, 杆件总数为 118, 节点总数为 66。在竖向荷载作用下可按平板架计算, 在水平荷载作用下可按平面刚架计算, 亦可按空间刚架作一次计算。

在排土机的实际工作中,要求调整钢缆绳的长度使排料臂架的六个吊点与两个支承点(支承在门架上)处于同一平面内。因此,在计算时首先用竖向刚性支杆来代替钢缆绳的垂直于臂架平面的作用,此时只承受竖向荷载,按平板架计算,用算得的支承反力来换算钢缆绳的内力,其水平分力计入水平荷载之中。然后按平面刚架计算在水平荷载作用下的各节点的变形和各杆件的内力及应力。上述二种情况计算结果的组合,为排料臂架的实际计算结果。

在确定计算模型时, 必须考虑排料臂架向上扬起或向下倾斜, 即非水平状态的工作情况, 因为它直接影响到门架等所有部件的工作。

至于,排料臂架的支点与吊点处于同一平面内的假设,是一种近似处理。实际上,不平度总是存在的,可以分析出它对结构的变形和内力的具体影响,使之在实际工作中对支点与吊点的不平度提出具体要求,加以控制。

2. 门架及其节点

门架是六层四根立柱的塔式杆系结构,其有限元模型如图3所示。门架共44个节点,110个空间杆单元。

门架一侧连系平衡臂架和受料臂架, 另一侧连系撑杆和排料臂架, 另一侧连系撑杆和排料臂架, 门架是主结构, 其余部件为次结构。次结构的自重、设备重、物料重、风荷载以及调车

荷载等, 均通过次结构传递给门架, 门架是主要承重结构之一。门架的结构简单但受载复杂, 要考虑工作、调车、工作风、大风等不同的荷载作用工况。

按空间刚架程序计算门架的变形和内力是精确的。对于节点, 特别对连系平衡臂架、排料臂架的节点, 应该分析其局部最大应力及应力分布规律, 为节点设计提供依据。

节点区的应力及其分布可按平面问题有限元法计算, 不计空间影响。计算时, 板厚取二块腹板的厚度和, 把盖板和肋板视为加强筋杆, 筋杆的横截面积取盖板或肋板的截面积; 其边缘外荷载一部分是作用在该区域的已知外力, 另一部分是根据杆截面的内力 (按杆系结构已算得) 按材料力学公式算得的应力, 这二部分外力组成为平衡力系。

3、回转平台

回转平台由上、下二块盖板和若干块立板组成的格式空间结构。其中, 主要四块立板是沿排土机的纵向设置在门架的立柱之下, 与盖板一起象二根箱形截面梁; 另外, 一块主要立板碾压成圆周形, 置於回转装置的平面轴承轨道槽之上。门架被固定在回转装配一侧的上盖板上。如图4所示。

本排土机的回转平台是通过平面轴承支承在三角底架上, 其平面轴承轨道槽的截面刚度

远大于与回转平台和三角底架连接处的钢板的截面刚度。因此, 在回转平台计算中, 忽略了轴承轨道槽的变形, 认为回转平台支承在刚性基础上。当然, 视回转平台和三角底架为一体, 作整体计算, 利用电子计算机也是可行的, 但其计算工作量之大是显然的。

回转平台的有限元模型是由若干个三角形、任意四边形平面壳体单元和许多根空间梁单元组成的。在计算中取加强板条 (扁钢) 为梁单元。由于板条和立板设置部位的复杂性, 并且平面壳体单元、梁单元和立板上单元不能相互穿过, 给在上、下盖板画分网格带来了困难, 为此不得不加密网格。

回转平台上所受的外荷载是由门架传递过来的立柱的作用力及自重。在计算中用平面壳体和空间梁单元, 不但考虑了膜向、轴向变形, 还考虑了弯曲、扭转和剪切变形, 这是一个复杂计算。

在此还必须计算与门架四根立柱连接处的局部应力大小和分布, 因为排土机的大部分外荷载是通过门架的立柱作用于回转平台, 连接处的结构构造复杂, 实属高应力区。计算时可不计空间影响, 按平面问题有限元法计算。

4、三角底架

三角底架设置在整机的底部, 是承受整机重和荷载的重要部件。

三角底架由二块呈三角形的上、下盖板和沿三角形的边界设置的六块立板及设置在轨道槽

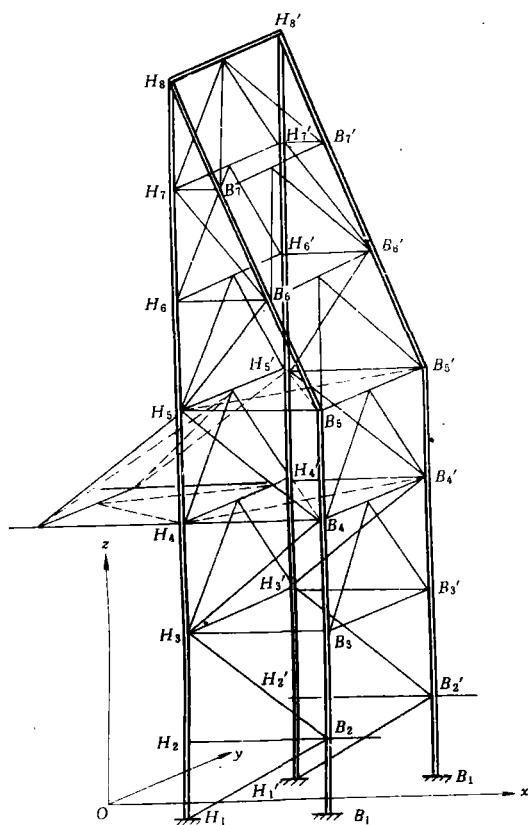


图 3

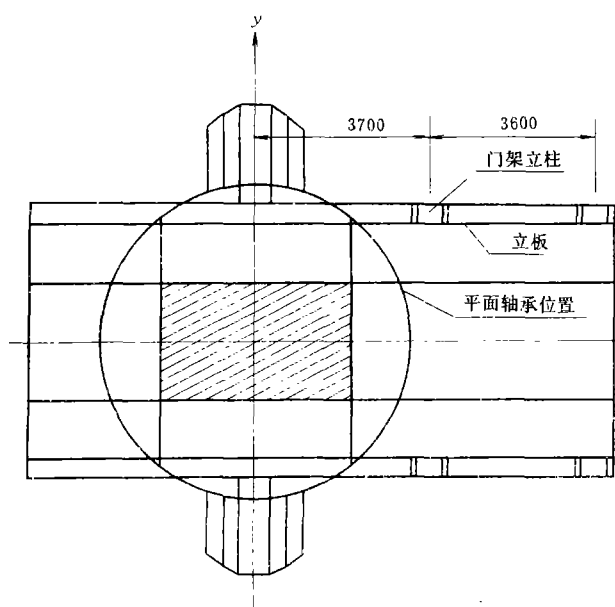


图 4

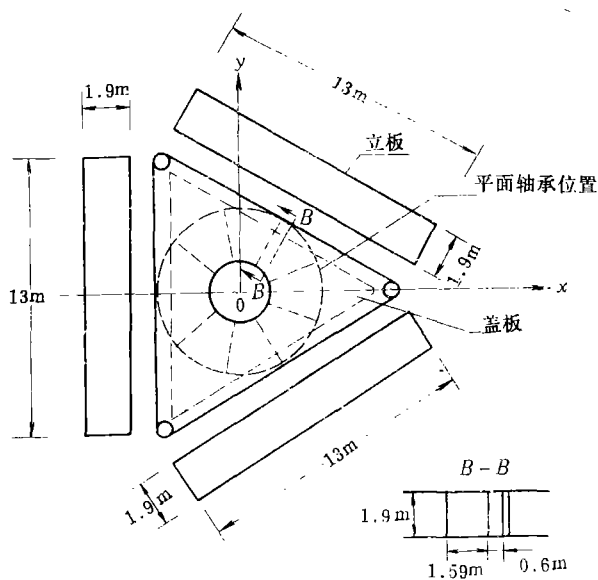


图 5

- (a) 满载: (1) + (2) + (3) + (4);
- (b) 满载加工作风: (1) + (2) + (3) + (4) + (5)
- (c) 空载加非工作风: (1) + (2) + (3) + (6);
- (d) 端部半跨空载, 或根部半跨空载;
- (e) 满载时断缆。

在此, 称前三种荷载作用工况为主要荷载工况, 第一种荷载工况为基本工况。

分析计算结果, 得到如下重要结论:

下的圆周形立板组成。

计算时采用三角形和任意四边形平面壳体单元以及边界单元, 其有限元模型如图 5 所示。

三角底架于三个顶角处由履带支架支承。在此处的局部应力应加以计算。

三角底架承受自重及回转平台传递下来的荷载, 荷载分布在平面轴承轨道槽的圆周上。由于回转平台带动其上部结构及其外荷载相对于三角形底架可以调转方位, 因此作用于三角底架上的外荷载, 将随着回转平台方位角的不同而不同。加之风荷载、工作或调车, 可见三角底架的外荷载是比较复杂的, 荷载工况多。

5. 平衡臂架, 受料臂架及撑杆

平衡臂架是连接在门架上的桁梁, 由二榀平面桁架承受竖向荷载。受料臂架由二榀板梁加以横向连系组成。撑杆是一个 K 字形三个节间的平面刚架。上述三个部件, 相对其余部件, 结构简单, 其有限元模型与原结构一致。

三、刚度和强度计算

1. 排料臂架

作用在该臂架上的外荷载是: (1) 臂架自重; (2) 机架重; (3) 端部设备重; (4) 物料重; (5) 工作风; (6) 非工作风, 即大风。

荷载工况是:

(1) 排料臂架具有很好的刚度。它的水平最大位移和竖向最大挠度, 与臂架长度比分别是

$$\frac{19}{52900} = \frac{1}{2800}, \quad \frac{71.4}{52900} = \frac{1}{740}$$

(2) 在主要荷载作用下, 纵梁的应力普遍是 $700\text{kg}/\text{cm}^2$ 左右, 个别梁的应力达 $1500\text{kg}/\text{cm}^2$; 连系杆件的应力较低。

(3) 由荷载工况 (d) 的计算结果, 与工况 (a) 的计算结果比较, 可知两种情况没有明显区别。

(4) 在使用和检修中, 绝对不允许断掉端部二根钢缆绳, 否则吊点左右杆端应力达 $8421\text{kg}/\text{cm}^2$, 端部最大挠度达 303cm 。

2. 门架

门架承受各臂架传递过来的各种作用力, 自重和风荷载。

根据排土机的使用情况, 分以下三种状态:

- (1) 工作状态: 有物料, 平衡小车在平衡臂架端部;
- (2) 不工作状态: 无物料, 小车在平衡臂架根部;
- (3) 调车状态: 无物料, 小车在根部, 受料臂架的另一端吊挂在平衡臂架上。

计算时, 分为以下五种工况:

- (a) 工作状态十无风;
- (b) 调车状态十无风;
- (c) 工作状态十工作风;
- (d) 调车状态十工作风;
- (e) 不工作状态十非工作风。

计算表明, 杆件 H_3H_4 , H_4H_5 , $H_3'H_4'$, $H_4'H_5'$, B_3B_4 , B_4B_5 , $B_3'B_4'$, $B_4'B_5'$ 等的应力, 不论在哪一种工况下, 其应力都是很高的。工况 (d) 的 $\sigma_{\max} = -2856\text{kg}/\text{cm}^2$ 。

某些杆件的弯曲应力很大, 例如工况 (d) 的杆件 $H_4'H_5'$ 的应力,

$$\sigma_{\text{轴}} = -1369.1\text{kg}/\text{cm}^2, \quad \sigma_{\text{弯}} = -1486.9\text{kg}/\text{cm}^2。$$

3. 回转平台

回转平台的结构较为复杂, 在其上划分网格受到了若干限制。本计算取 808 个节点, 板壳单元 (任意四边形和三角形) 1180 个, 梁单元 208 个, 边界单元 59 个, 实属密网格。据统计, 需解 4848 阶代数方程组, 完成计算的 CPU 时间为 2 小时 12 分。一般地说, 作为工程计算其精度是足够的。

回转平台主要承受门架传递来的外荷载及其自重, 在本计算中根据具体工作情况, 概括为下列三种荷载工况:

- (a) 工作状态十无风;
- (b) 工作状态十工作风;
- (c) 调车状态十工作风;

由计算结果查得:

(1) 最大挠度产生在支持门架的平台外伸端 (角节点处), 第三种工况 (c) 的挠度最大, 为 4.98mm 。

(2) 位于门架与回转平台的四个刚性联结点处, 各板壳单元应力较大, 第三种工况下按第四强度理论算得的最大应力 $\sigma_{\max} = 1122 \text{ kg/cm}^2$, 但是, 绝大多数单元的应力在 300 kg/cm^2 之内。

4、三角底架

为了提高计算精度, 在本计算中采用密网格, 节点 575, 平面壳体单元 780, 边界单元 104 个。网格对称于 x 轴, 上、下两层盖板上的网格是对称的, 在立板中间设一排节点。

考虑到排土机在无风或有风, 工作或调车, 以及回转平台与三角底架相对位置 θ 的不同, 如图 11 所示, 在本计算中确定为七种荷载工况:

- (a)、(b)、(c) 工作状态下 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 三种工况;
- (d)、(e)、(f) 工作状态十工作风下 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 三种工况;
- (g) 调车状态十工作风下 $\theta = 0^\circ$ 一种工况。

整理分析各工况的计算结果得到如下结论:

(1) 上、下盖板的大挠度区在三角形区域的中部, 最大挠度 2.94 mm , 属于第一种工况 (a); 有风工作和无风工作的挠度相差无几。

(2) 在各工况的荷载作用下, 上面板的高应力区在三角形边中点附近, 下面板高应力区在三角形顶点附近。最大应力 $\sigma_{\max} = 459 \text{ kg/cm}^2$ (按第四强度理论计), 属于第四种工况 (d)。

(3) 各种工况下的最大应力没有明显差别, 其范围是 $393 \sim 459 \text{ kg/cm}^2$ 。

四、整体稳定性计算

本计算分析了排料臂架、门架、撑杆的稳定性, 给出了它们的临界荷载系数 (特征值) 及其失稳型式。同时, 讨论了排料臂架在断缆时的稳定问题。

1、排料臂架

在满载加工作风的情况下, 排料臂架的临界值为 $\alpha = 10.45$, 即 α 倍于满载加工作风时, 此臂架处于丧失稳定的临界状态, 失稳型式如图 6 所示。

在空载加非工作风的情况下, 其临界值 $\alpha = 10.64$, 相应的失稳型式如图 7 所示。

在满载加工作风的情况下, 如果断掉臂架中间的四根钢缆绳, 断掉根部的二根钢缆绳, 断掉中间二根钢缆绳, 其临界值 α 分别是 1.21、3.59、4.41, 而丧失稳定型式分别如图 8 (a)、(b)、(c) 所示。

可见, 该排料臂架具有很好的稳定性能。但是, 若断掉中间的四根钢缆绳, 即使强度校核能够通过, 而临界荷载系数没有较大的储备也是通不过的。

2、门架和撑杆

由计算得知, 门架在各种工况的荷载作用下均有很高的临界荷载系数, 例如, 在空载加非工作风的荷载作用下, 临界荷载系数为 $\alpha = 20.12$ 。

撑杆是单榀平面刚架, 属于出平面失稳。在满载时其临界荷载系数为 $\alpha = 3.96$ 。

五、排料臂架的优化

排料臂架是排土机的主要部件, 其长度是排土机的重要指标, 排土机的整机重与它有直接关系。至于, 如何把它设计得更合理是设计者关心的问题。

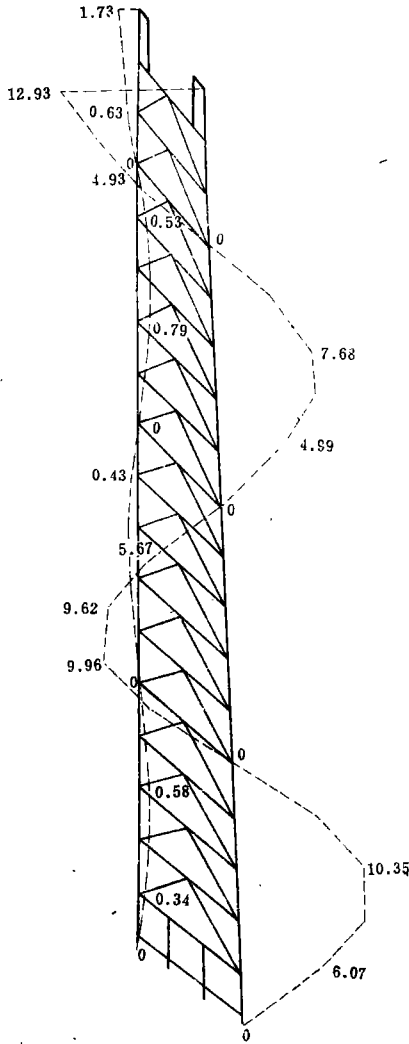


图 6

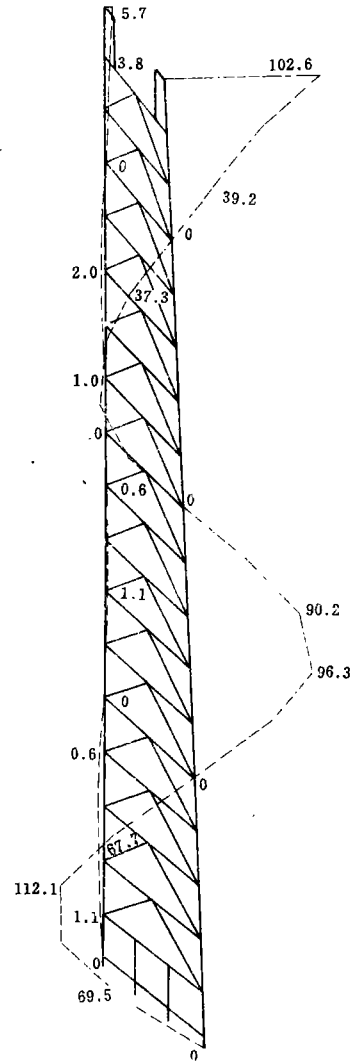


图 7

本优化是优化臂架纵梁的工字形截面，其

设计变量 (向量): $x = [H_1, T_1, H_2, T_2, \dots, H_6, T_6]^T$

目标函数: $\min_{x \in R^{12}} SW(x), SW(x) = \sum H_i T_i (1 + 2k_1 k_2)$

约束条件: $|\sigma| \leq 2000 \text{ kg/cm}^2$

$|w| \leq 10.0 \text{ cm}$

$1.0 \leq T \leq 2.4 \text{ cm}$

$30.0 \leq H \leq 50.0 \text{ cm}$

$|\sigma_N| \leq \alpha \frac{\pi^2}{FL^2} EI_y$

$|\sigma_N| \leq \alpha \frac{\pi^2}{FL^2} EI_z$

(应力条件)

(挠度条件)

(板厚条件)

(高度条件)

(稳定条件)

(稳定条件)

而优化方法为改进的 HOOKE-JEEVES 法, 此法计算可靠, 应用广泛。

优化设计结果:

(1) 优化重为 26^t , 可见原设计多用钢材 15%。

(2) 原设计的纵梁截面, 自根部向端部逐次减弱, 而优化截面则相反, 纵梁从根部向端部逐次加强。

(3) 优化计算提高了最大应力和挠度; 各杆件应力普遍有所提高, 平联各斜杆提高的较大, 这样会更好的发挥材料的作用。

(4) 从优化数据看, 本优化由挠度约束条件

控制, 若放松此项约束, 必将继续降低结构重量。

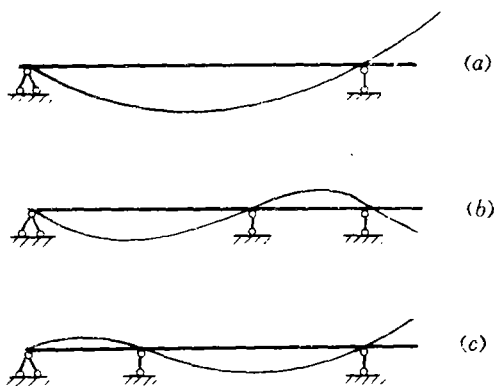


图 8

六、结 语

通过大量的数字计算, 对该大型钢结构的承载能力, 作如下主要评价。

(1) 通过对排料臂架的优化设计得知, 如果按优化结果确定杆件截面, 将使结构重由 30^t 减为 26^t 。虽然, 它只减轻 4^t 但相应的其它部件重可减轻 20^t 以上。

(2) 计算表明, 排料臂架吊点位置依次向端部移动一个节间, 将使各杆件受力均匀, 降低端节点的挠度。

(3) 三角底架的盖板和立板若减薄 1.0^{mm} , 将减轻该钢结构重 30^t , 使原结构重降低三分之一, 此时应力达 $1350\text{kg}/\text{cm}^2$, 挠度不超过 5^{mm} 。

(4) 回转平台的应力亦很低, 若减薄钢板厚度, 据估算可节省钢材 40^t 。

(5) 门架的四根立柱, 门架与回转平台连接节点, 以及门架与平衡臂架连接节点处的最大应力都很高, 应修改设计。

(6) 原设计具有足够的刚度和整体稳定性。

参 考 文 献

- (1) 钟万勰, 丁殿明, 程耿东: 《计算杆系结构力学》, 水利电力出版社, 1982年。
- (2) 张允真, 曹富新: 《弹性力学及其有限元法》, 中国铁道出版社, 1983年。
- (3) 邓可顺, 葛增杰, 钟万勰, 组合结构的屈曲分析, 《大连工学院学报》, No.1, 1984年。
- (4) J.S.普齐米尼斯基, 王德荣等译校: 《矩阵结构分析理论》, 国际工业出版社, 1974年。
- (5) M.S.Bazaraa and C.M.Shetty, Nonlinear programming Theory and Algorithms, 1979, 270-289。
- (6) 滕弘飞, 冯恩民, 邢玉生: 轴承系统动力优化设计, 《大连工学院学报》23卷2期, 1984年。

STRUCTURAL ANALYSIS OF A LARGE SCALE SPREADER

Yang Ding Chun

(Dalian Heavy Machinery Plant)

Zhang Yun Zhen

(Dalian University of Technology)

Abstract

In this paper, structural rigidity, strength, stability of large scale spreaders are analyzed and their optimization procedure is presented. It is found that the spreader analyzed possesses enough strength and entirety stability to spare. The optimization procedure of the spreader shows that its design is reasonable and safe. This paper provides basis for design of spreaders and its improvement.

《网架结构简化计算手册》征订通知

本书由唐瑞森教授主编、中国建筑工业出版社出版（今年9月出版），内容包括：网架结构的设计概要及其计算方法，两向正交正放网架的简化计算图表、两向正交斜放网架的简化计算图表，三向网架的简化计算图表，正放四角锥网架的简化计算图表、斜放四角锥网架的简化计算图表，网架计算例题。此书可以供采用手算和直接查表选用，设计方便。这是一书有重要实用价值的参考书。

本书定价：14.85 元（16 开，546 页），欢迎订购。

联系人：北京市阜成路 11 号，100037，中国力学学会《工程力学》编辑部发行处

(本刊记者：常彭景)