

平面钢桁架计算机辅助设计系统的实现

江涛¹, 章青²

(1. 安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002; 2. 河海大学工程力学系, 江苏 南京 210098)

摘要:为满足钢桁架设计经济合理、快速准确的实际需要, 研制了平面钢桁架计算机辅助设计系统。从钢桁架的设计特点出发确定系统的功能和编制依据, 详细论述了前处理数据输入、结构设计计算和图形输出等方面的软件开发技术和主要专业技术条件及在计算机上实现的方法, 并就软件发展方向作了进一步的探讨。系统在江苏沙钢集团 50 万 t 高速线材工程主厂房钢桁架设计中的应用结果表明, 该系统的使用可大大减轻设计人员工作量, 提高设计质量和速度, 降低工程造价。

关键词:钢桁架; 辅助设计; CAD

中图分类号: TU311.41

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2004)04-0040-04

钢桁架结构在工程实际中应用广泛, 如钢屋架、钢托架、钢通廊、钢斜桥、管架等, 人工设计计算工作量大, 特别是一些杆件形式复杂的超静定桁架, 由于作用在其上的各种荷载组合情况复杂, 精确计算难度较大, 人工计算桁架各节点的位移及施工详图绘制也比较麻烦, 因此人工设计钢桁架计算过程一般都比较粗糙, 难以做到经济和合理。为此原冶金工业部 1996 年下达了重点科研项目, 提出开发平面钢桁架计算机辅助设计系统。笔者承接该项目后, 经过两年多的工作, 初步完成了系统设计并在工程实际中试用, 经补充完善后于 2000 年 3 月通过了国家冶金工业局组织的成果鉴定。平面钢桁架计算机辅助设计系统可对任何形式的静定或超静定平面钢桁架(包括多跨连续结构)进行内力分析, 还可进行截面选择或截面验算。计算完成后自动生成图形。其主要特点是从结构形式、荷载及相关设计参数等的输入到内力组合、杆件和节点设计直至最后生成设计文件和施工图, 整个过程都严格遵循相关设计规范和构造要求, 并尽量符合设计人员的设计习惯, 实现了钢桁架设计从数据准备到相关设计计算直至最后出图的自动化。系统在实际工程设计中应用效果较好, 不仅大大减少了设计工作量, 而且提高了设计质量和速度, 在工程建设中发挥了较大的作用。

1 系统编制依据及功能特点

1.1 编制依据

系统以 GB50017-2003《钢结构设计规范》^[1]、

GB50009-2001《建筑结构荷载规范》^[2]、GB50011-2001《建筑抗震设计规范》^[3]、《钢结构设计手册》^[4]、《钢结构连接节点设计手册》^[5]、GBJ105-87《建筑结构设计制图标准》^[6]、JGJ/T90-92《建设领域计算机软件工程技术规范》^[7]为主要编制依据。

1.2 系统组成及功能特点

系统研制过程中充分考虑了设计人员的设计特点, 具有使用方便、高效实用、功能齐全、符合设计习惯和容错性好等特点, 系统包括 3 个主要模块: 前处理图形和参数输入模块、设计计算和截面选择模块、后处理图形输出模块。

a. 前处理图形和参数输入模块。系统采用人机交互以图形方式输入计算数据, 用户通过图形和对话框输入桁架的结构形式、材料和截面特性、荷载及相关设计参数, 对标准形式的桁架可自动生成计算简图, 一般形式的桁架只要画出单线条的图形即可实现计算简图的输入, 荷载输入也直接在屏幕上进行操作, 对于材料和截面形式提供了相关的数据库, 因此不必输入具体数值。

b. 设计计算和截面选择模块。程序根据前处理输入的信息生成计算数据, 并自动进行包括内力和变形计算、荷载效应组合、杆件截面选择、节点连接、焊缝计算设计等在内的计算工作, 内力和变形计算采用传统的杆系结构矩阵位移法, 其他部分则依据现行设计规范和构造要求进行。

c. 后处理图形输出模块。通过对桁架节点设计的精心研究, 系统实现了通过计算机进行施工图设

基金项目: 原冶金工业部重点科研项目(冶科字第 373 号文)

作者简介: 江涛(1963—), 男, 河南光山人, 高级工程师, 主要从事结构设计与计算工作。

计并绘制施工图,后处理生成的设计图纸符合设计规范,进一步减轻了设计工作量。图形输出结果包括:计算简图、内力图、杆件断面及几何尺寸图、桁架节点或整体桁架施工图、材料表。

2 系统实现的主要技术

2.1 主要软件开发技术

a. 系统主菜单设计.为使相对独立的各模块成为一个整体并能协同工作,利用 C 语言编制了一个菜单文件,用现有汉字库及其编码技术实现汉字显示,并利用 C 语言的系统调用执行程序实现外部程序的系统调用^[8]。

b. 前处理数据输入.通过对 AutoCAD 的二次开发工具 AutoLisp、对话框开发技术 DCL 和 C 语言开发平台 ADS 的综合应用,系统实现了计算简图的图形输入和荷载及参数输入,可完成前处理模块中的结构模型生成和图形编辑修改,及荷载、支座、截面信息和设计参数等的交互输入^[9],提取相关信息后生成数据供计算模块调用.这与单独另做一个图形输入平台相比,在省去相当编程工作量的同时,也避免了可能产生的涉及外部设备接口和操作系统升级所带来的种种问题。

c. 设计计算和截面选择.鉴于 Fortran 语言在实现计算功能方面具有一定的优势,采用 Fortran 语言编制程序实现有关计算功能,其数据是由前处理模块自动生成的,事实上数据文件可不经前处理而直接用编辑软件人工录入,也可对前处理生成的数据人工修改后再进行计算。

d. 图形输出.由于设计人员广泛采用 AutoCAD 作为设计平台,故系统利用 AutoCAD 的数据交换文件,由计算程序以 DXF 文件格式输出图形文件,再由 AutoCAD 将图形调出,以便于设计人员根据需要做出必要的调整。

e. 鉴于钢结构节点形式复杂多样,用 AutoLisp 语言编制了常用节点图形库以扩大系统程序的适用性,并使图形调用过程中各部分能够按照所需的比例和标注要求来完成。

f. 对于型钢截面数据,系统提供了一个开放的数据文件供设计人员根据需要进行添加和修改,以适应出现新的型钢后的使用要求。

g. 针对设计人员可能出现的错误,系统提供了专家系统对诸如数据录入、参数选择和各部分计算结果等实施监控,对违反规范要求的及时予以警告。

2.2 主要专业技术条件及处理方法

2.2.1 桁架的结构形式和支座类型

对常见的斜杆式三角形桁架、梯形人字式斜腹

杆桁架、平行弦单坡桁架,只要给出屋面坡度、网格数、网格长和高度即可自动生成屋架结构简图,对其其他任意形式也只要画出单线条结构简图即可。

支座类型考虑了与钢柱头连接和与混凝土柱连接两种形式.其他支座类型在绘图时需通过调用节点图形库来完成。

2.2.2 杆件信息和设计参数

程序考虑了以下 9 种截面形式并提供相应的数据库:单等边角钢、双等边角钢 T 形相拼、双等边角钢十字相拼、双不等边角钢短边相拼、双不等边角钢长边相拼、T 形钢、工字形钢横向放置、工字形钢竖向放置、方形钢.其他类型可通过开放的数据文件由用户输入或修改截面信息。

在给出默认值的同时,允许用户修改杆件计算长度、强度设计值折减、截面削弱、结构安全等级、构件许用长细比、地震烈度和钢材型号等设计参数和信息。

2.2.3 荷载分类及荷载效应组合

进行内力计算时考虑的荷载类型有以下 18 种:桁架自重及支撑重、桁架其他恒荷、全跨活荷(或雪)加灰荷、水平荷载、单轨吊车移动荷载、左风水平荷载、右风水平荷载、左风垂直荷载、右风垂直荷载、左半跨活荷(或雪)、右半跨活荷(或雪)、左半跨屋面板重量、右半跨屋面板重量、施工阶段左风水平荷载、施工阶段右风水平荷载、施工阶段左风垂直荷载、施工阶段右风垂直荷载、其他活荷载.以上荷载类型基本上囊括了桁架设计可能出现的所有情形。

计算承载能力极限状态的基本组合时,荷载效应组合的设计值是按《建筑结构荷载规范》第 3.2.3~3.2.6 的规定^[2]确定的,其中 S_{Q1K} 轮次取各可变荷载效应,并对每个杆件选择了其中最不利的荷载效应组合。

计算正常使用极限状态变形时的位移组合,采用荷载标准值,荷载效应组合的设计值按《建筑结构荷载规范》第 3.2.7~3.2.10 的要求^[2]采用。

当抗震设防烈度为 8 度和 9 度时考虑了竖向地震作用。

结构构件的地震作用效应和其他荷载效应的基本组合是按《建筑抗震设计规范》第 5.4 的要求^[3]计算的,其中竖向地震作用系数和竖向地震作用标准值按《建筑抗震设计规范》第 5.3.2 的规定^[3]确定。

2.2.4 内力计算与截面选择

内力计算运用了传统的杆系结构矩阵位移法,有关这方面的理论已很成熟,在此不再赘述.程序考虑荷载组合后,求出了各杆可能的最大内力,各节点可能的最大水平和垂直位移,支座节点可能的最大

水平和垂直支座反力。

系统截面选择的方法是:当求出各杆件最大内力后,分别对其可能的最大拉应力和可能的最大压应力按强度和稳定性选择截面,并保证满足拉杆和压杆对长细比的要求。优化设计是基于满应力优化设计理论的,采用比例满应力法,先选定一个初始方案,然后计算在各种外荷载作用下各杆件的最大应力,再将它与许用应力相比,其比值 k 即代表各杆件截面面积的有余或不足(相应为 $k < 1$ 或 $k \geq 1$),最后将各杆件原来的截面面积乘以各杆件的比值 k 后作为新的面积值,再重新计算应力,如此循环往复,一直延续到各 $k_i \rightarrow 1$ 时结束计算,即得满应力设计方案^[10]。

2.2.5 杆件设计

杆件设计按照规范考虑了强度、稳定性、长细比是否满足设计要求。

a. 强度计算采用《钢结构设计规范》5.1.1-1 中的公式^[1]:

$$N/A_n \leq f$$

式中: N 为杆件所受拉力或压力; A_n 为杆件净截面积; f 为所用钢材强度设计值。

强度设计值对 Q235 钢取值 215 MPa, 对 Q345 钢取值 310 MPa, 对 Q390 钢取值 350 MPa, 对 Q420 钢取值 380 MPa, 并考虑了钢材厚度分组的影响。

对单面连接单角钢按《钢结构设计规范》第 3.2.2 条^[1]进行了强度设计值折减, 特殊要求的折减由设计人员提供折减系数。由于系统选择或验算截面是分别对平面内、平面外和斜平面进行的, 计算单面连接的单角钢压杆稳定性的强度设计值折减系数时需用的长细比分别采用平面内、平面外和斜平面稳定计算中的长细比值进行验算。其中绕对称轴时取《钢结构设计规范》5.1.2-3^[1]确定的换算长细比。

b. 稳定性按《钢结构设计规范》5.1.2-1 中的公式^[1]计算:

$$\frac{N}{\varphi A} \leq f$$

式中: φ 为稳定系数, 按《钢结构设计规范》附录 C 注 1 公式^[1]计算; A 为杆件毛截面面积, 截面类别为 b 类。

c. 长细比。受压构件允许长细比取 150, 受拉构件允许长细比由设计者提供。

2.2.6 节点与垫板设计

节点设计考虑了节点板设计、节点构造与计算、屋脊节点设计、支座节点设计等内容。

焊缝计算包括焊缝高度计算、弦杆及腹杆的焊缝长度计算等内容, 特殊构造要求及计算参考了《钢

结构连接节点设计手册》^[5]的做法, 其中腹杆与弦杆或腹杆与腹杆边缘之间的距离取 $a = 20 \text{ mm}$, 节点板伸出角钢边缘取 15 mm 。

垫板个数由垫板间距决定, 连接垫板最大间距计算及构造按《钢结构设计手册》^[4]的要求进行。

2.2.7 施工图绘制

计算简图、内力图、杆件断面及几何尺寸图、材料表的绘制相对比较容易一些, 但桁架节点或整体桁架施工图比较复杂。由于节点形式的多样性, 因而可能出现对某些类型和某些比例的节点绘出的详图是满意的, 而对另一些情形的节点绘出的详图却不尽如人意, 往往需要设计人员进入 AutoCAD 系统进行较多的修改。

系统对梯形桁架和平行弦桁架进行了重点研究, 节点设计绘图通过区分弦杆与腹杆, 根据杆件内力和构造要求计算焊缝高度和焊缝长度, 分别考虑 1 个腹杆、2 个腹杆和 3 个腹杆情形的计算和构造要求, 确定节点板形状和尺寸, 出图效果较好, 但对交叉腹杆和三角形屋架的端节点的详图绘制效果不佳。考虑到不同的设计习惯, 施工图可整体绘出, 也可分节点绘出。

3 设计实例——江苏沙钢集团 50 万 t 高速线材工程主厂房钢桁架设计

江苏沙钢集团是江苏省著名民营钢铁企业, 出于企业发展的需要, 公司决定新上高速线材生产项目, 该项目关键设备从美国进口, 其中包括步进式加热炉 1 台, 美国摩根公司精轧机 1 套及相关配套设施, 总投资约 2 亿元人民币。

土建部分主厂房长 284 m, 宽 54 m, 檐口标高 19.8 m, 结构形式为两跨排架, 主跨 30 m, 副跨 24 m, 排架柱距 12 m, 局部抽柱为 24 m, 每隔 6 m 设有墙架柱, 屋架间距 12 m, 设有 2 台 5 t 重级工作制吊车, 轨顶标高 14.4 m, 屋面采用 12 m 跨桁架式檩条, 基本风压 0.50 kPa, 基本雪压 0.35 kPa, 抗震设防烈度 6 度。屋架形式为梯形桁架, 托架形式为平行弦桁架, 采用的截面形式为拼接角钢, 钢材为 Q235 钢。

出于市场形势和投资效益的考虑, 集团公司提出当年设计施工当年投产的目标, 要求设计方用 4 个月的时间完成施工图设计, 其中部分项目采用边设计边施工的方法以缩短工期。笔者应用平面钢桁架计算机辅助设计系统对其中的钢屋架、托架、抗风桁架和辅助桁架进行了计算机辅助设计, 收到了明显的成效。

a. 缩短了设计周期。该工程不同类型的大小桁架共有 90 多榀, 桁架部分出图折合 A1 图纸 42.5

张,人工设计从计算到完成施工图至少需 50 d,而应用平面钢桁架计算机辅助设计系统后从确定方案到完成仅用了 16 d,为后续设计工作按期完成奠定了基础。

b. 大大提高了设计质量.平面钢桁架计算机辅助设计系统设计计算是严格按照规范要求进行的,包括计算简图在内的各种设计文件齐备,便于校对审核和修改,而且设计计算的准确性和精度大大提高,是人工计算无法比拟的。

c. 因为设计精度和准确性的提高,经济上更趋合理.与以往同类设计的经济指标相比较,该项目屋盖部分按厂房面积用钢量为 33.7 kg/m^2 ,节约钢材 12%,经济效益明显提高。

平面钢桁架计算机辅助设计系统在该工程上的应用结果表明:系统操作简单实用,功能齐全,大大减轻了设计人员工作量,在缩短设计周期、提高设计质量和降低工程造价方面充分显示了其使用价值。

4 结论与展望

平面钢桁架计算机辅助设计系统可大大减轻设计人员的计算和绘图工作量,提高工作效率和准确性,使桁架设计趋于经济和合理.该系统获原冶金工业部优秀工程设计软件二等奖,安徽省科学技术研究成果,并已通过部级鉴定,一直在实际工程中使用,效果良好,取得了较好的社会效益和经济效益.但同时也应看到,一个工业厂房的设计包括柱子系统(含柱基础)、墙皮系统、吊车梁系统、屋面系统等,桁架设计只是工业厂房设计中的一个部分,如何将桁架设计软件与上述厂房各局部设计软件有机结合

起来,走向局部向整体的发展道路,还有很多的工作要做.譬如当屋架与排架柱刚接时,需将屋架化成相当的实腹式梁,计算排架的内力,再根据排架分析的结果,将屋架端弯矩化为水平力偶作用于屋架端部的上下弦节点上来计算屋架内力,其中仅屋架端弯矩及剪力的组合就达 8 种之多,计算工作量非常大.因此将桁架设计计算与排架设计计算结合起来作为一个整体来计算应该是当前首先需要解决的问题.平面钢桁架计算机辅助设计系统的实现及其由局部向整体的融合发展将更好地减轻设计人员工作量,提高设计质量和速度,必将在工程设计中发挥巨大的作用,具有良好的发展前景。

参考文献:

- [1] GB50017-2003,钢结构设计规范[S].
- [2] GB50009-2001,建筑结构荷载规范[S].
- [3] GB50011-2001,建筑抗震设计规范[S].
- [4] 钢结构设计手册编制组.钢结构设计手册[Z].北京:中国建筑业出版社,1991.811~812.
- [5] 李和华,李星荣,李连生,等.钢结构连接节点设计手册[Z].北京:中国建筑业出版社,1992.40~57.
- [6] GBJ105-87,建筑结构制图标准[S].
- [7] JGJ/T90-92,建设领域计算机软件开发技术规范[S].
- [8] 李论,姚远.C语言设计界面大全[M].北京:机械工业出版社,1997.179~246.
- [9] 石教英,蔡文立.科学计算可视化算法与系统[M].北京:科学出版社,1996.37~71.
- [10] 李炳威.结构的优化设计[M].北京:科学出版社,1989.46~51.

(收稿日期:2003-12-25 编辑:熊水斌)

(上接第 16 页)

6 结 语

a. 通过本文所做的工作,可以认为有限元法是进行流场计算的一种较好的方法.这种方法能够提供一个清晰、直观、形象的流场状况;能够确定翼型表面的速度分布,这对分析转轮的能量和空化特性十分有用;可以定性或定量地了解流动参数的变化对叶栅绕流的影响。

b. 本文的工作也存在一些不足:第一,对于轴流式机组轴向水推力的计算,采用了理想化的模型,并进行了一系列假设,这与实际情况存在一定差距,在偏离最优工况较远时,就体现在误差的增大上;第二,从有限元法角度来讲,相对于其他一些数值计算方法而言,它是在全流场上的近似计算.另外,笔者使用的 3 结点三角形单元,虽然处理起来比较简单,但其插

值函数的导数在单元上为常数,不能反映待求函数导数的变化,因此求解结果的精度受到影响。

c. 研究表明,基于全三维的湍流计算模型,由于更加符合实际情况,成为一种更能反映转轮内流动特征的数值模拟方法,可作为今后进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 沈祖诒,田树棠,支培法.水力机械优化设计和计算机辅助分析[M].南京:河海大学出版社,1995.
- [2] 张世雄,许协庆.水力机械转轮内部流动的三维有限元计算[A].中国水利水电科学研究院.许协庆水动力学论文集[C].北京:中国水利水电出版社,1997.191~199.
- [3] 高建铭,姚志民.水轮机的水力计算[M].北京:电力工业出版社,1982.
- [4] 王煦时,严亚芳,李树荣.轴流式水轮机轴向力的试验研究[J].河海大学学报,1994,22(2):1~3.

(收稿日期:2003-10-14 编辑:熊水斌)