模块化设计在工程机械轮胎成型机设计中的应用

牛 荦
（天津赛象科技股份有限公司，天津 300384）

摘要：介绍模块化设计在工程机械轮胎成型机设计中的应用。通过模块划分和模块设计，对任务进行定性分析，建立物理和数学模型，求得定量结果后进一步优化，可以完成工程机械轮胎成型机的设计。采用模块化设计方法，工程机械轮胎成型机设计项目一次成功率较高，实际使用效果良好。

关键词：模块化设计；工程机械轮胎；成型机；模块划分；模块设计

中图分类号：TQ330.4；TQ336.1 **文章编号：**1006-8171(2020)10-0584-04

文献标志码：A **DOI：**10.12135/j.issn.1006-8171.2020.10.0584

模块是半自律性的子系统，通过和其他子系统按照一定的规则相互连接可以构成更加复杂的系统。把复杂的系统分成不同模块，并使模块之间通过标准化接口进行信息沟通的动态整合过程称为模块化。模块化分为狭义和广义两种，狭义模块化是指产品生产和工艺设计的模块化，而广义模块化是指把系统（包括产品、生产组织和过程等）进行模块分解与模块集中的动态整合过程。模块是模块化设计和制造的功能单元。

1 模块化设计

模块化设计是设计组织的一种理念和模式，是技术团队在一个大型工程项目中高效协同工作的组织模式，模块化设计并不是设计技术本身，它们分属两个范畴[1]。模块具有以下特征。

（1）相对独立性。可以对模块单独进行设计、制造、调试、修改和存储，这便于由不同的专业化企业对各模块分别进行生产。

（2）互换性。模块接口部位的结构、尺寸和参数标准化，便于实现模块间的互换，从而使模块满足更大数量的不同产品的需要。

（3）通用性。有利于实现横/纵系列产品间以及跨系列产品间模块的通用。

作者简介：牛荦（1945—），男，天津人，天津赛象科技股份有限公司高级工程师，学士，主要从事橡胶机械设计工作。

E-mail：zscq@tst-group.com

1.1 模块化设计的目的

模块化设计的首要目的是提高设计效率，降低设计成本，缩短设计周期；其次是提高制造效率，缩短外购件采购周期；同时为客户提供使用、维修标准化的产品，从而降低使用和维修成本。

模块化产品设计的目的是以少变应多变，以尽可能少的投入生产尽可能多的产品，以最为经济的方法满足各种要求。由于模块具有不同的组合，可以配置生成多样化的产品来满足不同用户的需求。模块还具有标准的几何连接接口和一致的输入输出接口，如果模块的划分和接口定义符合企业批量化生产中采购、物流、生产和服务的实际情况，则按照模块化模式配置出来的产品符合批量化生产要求，从而使定制化生产与批量化生产的矛盾得以解决。

1.2 模块化设计的方法

模块化设计的流程如下。

（1）总设计师依据项目总体的概念进行模块拆分，给出各模块的逻辑学定义以及明确相关模块之间的接口定义。这是由样本空间确定子集的过程，其子集定义及其界面必须明确，子集之和必须包含整体。

（2）各模块设计师依据总设计师给出的拆分模块逻辑学定义及相关模块之间的接口定义确定自己的设计方案，或确定是否拆分下一级模块。

（3）将设计方案反馈给总设计师批准执行。

若需继续拆分,则进行总设计师拆分的类似工作,在下一层模块分析中重复模块设计工作。

模块设计指依据该模块的工艺要求建立物理模型,依据物理模型建立对应数学模型并进行量化分析。在量化过程中对系统进行优化处理,然后将设计工程化,设计过程中必须依据标准化、系列化、通用化的原则。整个设计结果报总设计师批准,然后进行施工设计。施工设计结束后报标准化工程师批准。

其中,总设计师的工作如下。

(1)审核签字各模块。模块符合其原始定义,各模块之间的接口有几何接口、力学接口、能量流接口和信息流接口。

(2)依据各模块设计组成征集总图并报上级主管批准。

(3)校核设计是否符合原始设计任务书。

(4)编写整机文件(技术说明书、安装调试说明书及使用、维修说明书)。

经上级主管部门批准后,全部设计文件转到工艺部门进行下一步工艺设计,然后进行标准件和外购件采购。

模块化设计需要注意以下两点。

(1)整个设计过程是一个上下互动、相互反馈的过程,按照P,D,C,A(plan,do,check,action)的工作程序进行。

(2)在整个设计过程中需按照价值分析的原则剔除过剩功能,使系统达到最大优化(满足所有功能条件下成本最低)。

1.3　部套设计和模块设计的区别

部套设计过程也需标准化、系列化和通用化,但是设计目标只为实现该机要求。而模块设计不仅要必备部套设计的所有要求,还必须满足总机的各种变形要求。各模块之间的接口必须标准、可互换。

2　模块化设计在工程机械轮胎成型机设计中的应用

以我公司研制的一次法巨型工程机械子午线轮胎成型机的设计为例,介绍模块化设计的应用。

尽管各轮胎企业的生产工艺存在一定差异,但都必须执行统一的国家标准,这就为轮胎成型机各子模块通用化和标准化提供了一个坚实的技术基础。

首先,应清楚项目总体的逻辑学概念,了解本项目总体目标、工艺方式和工作范围。

项目目标为将二维的轮胎零件组合成一个三维轮胎胎坯。工艺方式为一次法(工艺流程和客户共同研讨确定),应用范围为991,1 143,1 245,1 295,1 448,1 600 mm(39,45,49,51,57,63英寸)系列(以下简称本系列)巨型工程机械子午线轮胎。

2.1　机组分段

本系列轮胎成型机组分为3段。991,1 143 mm(39,45英寸)为第1段,1 245,1 295,1 448 mm(49,51,57英寸)为第2段,1 600 mm(63英寸)为第3段。3段机组的中心高度分别为2 300,2 500和2 800 mm。

2.2　整机主要工艺流程

本工作主要讨论第2段机组的工艺流程设计过程,另2段机组的工艺流程设计与第2段机组类似。

(1)成型鼓工艺流程1。胎侧胶贴合→内衬层胶料贴合→气密层胶料贴合→粘合层胶料缠绕→帘布层贴合→上钢丝圈复合件→钢丝圈定位。

(2)带束鼓工艺流程。在带束层供料架第1工位贴合3层带束层→带束鼓由带束鼓机箱拖动至带束层供料架第2工位贴合3层带束层→带束鼓由带束鼓机箱拖动至带束层组合件传递环位置→带束层组合件传递环接取带束层组合件→带束层组合件传递环携带束层组合件移至成型鼓接取带束层组合件位置(本工序与成型鼓工序同步进行)。

(3)成型鼓工艺流程2。带束层组合件拖动至成型鼓接取带束层组合件位置→交换成型鼓尾支撑(由主机箱随动尾架改换为尾座支撑)充气接取带束层组合件→拖动至接胎冠胶缠绕位置→充气成型→反包胶囊充气反包→缠绕胎冠胶→主机箱拖动成型鼓至卸胎位置→卸胎环接取胎坯→主机箱拖动成型鼓退出→卸胎环携胎坯旋转90°→接取胎坯升起→卸胎环释放卸胎。

2.3　整机组平面布置图

按上述流程做出整机组的平面布置图。由于不同客户厂房布局相异,物流通道不同,平面布置

图也不尽相同。

2.4 整机模块划分

按上述流程及平面布置进行整机模块划分。

(1)成型分10个模块:一次法成型鼓、成型鼓机箱、成型鼓后压辊机构(帘布、内衬层后压辊机构)、液压推盘组件、带束层组合件成型鼓、带束鼓机箱、带束鼓后压辊机构、二维缠绕机(粘合层缠绕)、三维缠绕机(胎冠胶缠绕)和尾座。

(2)基座分3个模块:成型鼓机箱及尾座基座、带束鼓机箱基座、带束层组合件传递环及卸胎环和支架。

(3)物流分9个模块:主供料架、内衬层胶料、气密层胶料、帘布层上成型鼓(供料速度与成型鼓线速度同步);各个胶料供料机构;副供料架、双排工6层、带束层上带束鼓(供料速度与带束鼓线速度同步);带束层胶料供料机构;钢丝圈供给架、供给架供给位置与成型鼓同心(精度保证);粘合层胶料二维缠绕机;胎冠胶三维缠绕机;带束层组合件传递环;卸胎机构(卸胎环、卸胎胎坯托盘)。

(4)辅助机构分5个模块:成型鼓操作平台(帘布贴合位和气密层贴合位)、带束鼓操作平台(对应每个供料架位置)、成型鼓示位灯标、带束鼓示位灯标和三维缠绕机示位灯标。

以上模块均为独立模块,任一模块与其连接模块之间的链接(含几何链接、力学链接、能量流链接、信息流链接)都是确定的。对于不同客户则由客户自身物流设计方案确定机组的布局,机组模块仅仅改变连接方位即可,各模块内部无结构改变。

2.5 模块设计

以第2段机组成型鼓机箱的设计为例,讨论模块设计方法。

2.5.1 模块划分

对于左供料与右供料方式,第2段机组的一次法成型鼓均有完全相同的成型鼓机箱。其中的设计要素包括:成型鼓和机箱的几何链接(接口方式及连接公差)、力学链接(鼓自身质量加在主轴上荷载的支反力、对主轴倾覆力矩的支反力矩)、能量流链接(外轴和芯轴的输出转矩、角速度、角加速度、旋转方向、伺服控制精度)、信息流链接(气控系统各个气路的压力和流量、电力拖动及其控制)。

成型鼓机箱和基座的链接中,几何链接(连接及固定方式)、力学链接(机箱及成型鼓对基座的压力分布,机箱沿基座运行拖动及控制)等要素均为固化要素(其设计来自各专业自身而不属于模块化设计内容)。当整机组改变布局时仅需调整基座的组合方式(基座有不同的模块组成),然后调整各模块布置。成型鼓机箱已经是固化的,无需再投入设计力量。

按照专业将成型鼓机箱划分为机械模块、液压模块、气控模块、电力拖动模块以及控制模块(包含硬件及其软件系统)。

2.5.2 工艺流程

成型鼓所需完成的工艺流程如下。

胎侧胶贴合(部分客户此流程在三维缠绕机上完成)→内衬层贴合→气密层贴合→内衬层贴合→粘合层缠绕→帘布层贴合(每层贴合后均需辊压)→上钢丝圈复合件→充气定型→反包→接取带束层组合件(此时有一个成型鼓随动尾支架与尾座尾支架的交换过程)并辊压→胎冠胶三维缠绕→卸胎。

在胎侧胶、内衬层和帘布层的粘合过程中,为使胶料按质量要求粘合在一起,对于贴合速度有精确要求(各轮胎企业由于胶料配方的差别略有不同,但差异不大)。胎侧胶等供料系统的供料速度按此要求设定,是一个常数。但第2段机组成型鼓直径是不同的,所以成型鼓旋转角速度可调,以保证成型鼓旋转线速度与供料系统的供料速度同步。

在粘合层缠绕过程中,缠绕机机头在成型鼓主轴线方向位置固定,成型鼓沿主轴线方向运行。缠绕机供给胶料的线速度为常数,此时,成型鼓旋转线速度与缠绕机供给胶料的线速度同步。缠绕螺旋线导程由成型鼓沿主轴线运行速度控制,这是一个伺服控制系统。

在上钢丝圈复合件工艺流程中,上钢丝圈机构夹持钢丝圈复合件(此时钢丝圈复合件与成型鼓同心并有一定公差规定)以鼓中心线对称拉平宽(不同型号轮胎平宽不同)。此项工艺流程由基座上钢丝圈机构完成。但此时成型鼓外轴静止,

芯轴旋转调节成型鼓钢丝圈撑块机构平宽对应钢丝圈复合件平宽尺寸。成型鼓钢丝圈撑块撑起钢丝圈复合件在成型鼓定位。成型鼓外轴静止、芯轴旋转等运行则由成型鼓机箱的伺服系统驱动和控制。

在充气成型工艺流程中，成型鼓充气、两钢丝圈向中心滑移胎坯逐渐成型。成型鼓充气压力和流量是一个常数。由变分原理的分析可知成型鼓充气胎坯母线是一个二次圆弧曲线，充气体积是由此圆弧曲线和一条割线（成型鼓母线）组成的区域绕成型鼓中心线旋转一周的环体。成型鼓芯轴旋转的角速度取决于充气体积、充气压力和流量。也就是说，鼓芯轴旋转的角速度是充气体积的函数（这个数学模型的建立需用级数法求解一个超越方程组）。这也是一个伺服控制系统，其伺服控制过程由主控计算机完成，主机箱的主驱动伺服电机及其控制机构实施。

在反包工艺流程中有3个步骤，成型鼓两侧反包胶囊充气、助推胶囊充气、主机箱和尾座箱液压推盘同时推出使得钢丝圈外侧胶料反包在胎侧。

在接取带束层组合件并辊压工艺流程中，成型鼓插入带束层组合件传递环（带束层组合件的随动尾支撑与尾座需做一次交叉）继续充气接取带束层组合件，然后退至缠绕位置辊压。

在胎冠胶三维缠绕工艺流程中，胎冠胶三维缠绕可以实现冠包侧结构。缠绕机供给胶料的线速度为常数，缠绕半径变化，所以成型鼓的旋转角速度是变化的。这个变化依据缠绕轨迹，此轨迹母线两侧是二次圆弧曲线（数学模型的建立需用级数法求解一个超越方程组），中间位置（由于有带束层组合件）为直线。此时，成型鼓的旋转角速度是缠绕机中心线在成型鼓轴线上坐标的函数。缠绕头的位置及角度也是缠绕机中心线在成型鼓轴线上坐标的函数。该伺服控制过程由主控计算机和缠绕系统计算机共同完成，主控计算机控制主轴角速度，缠绕系统计算机控制缠绕头的位置及角度，以保证缠绕头垂直于胎坯面，胎坯该点处线速度与缠绕机供料速度同步。

在卸胎工艺流程中，成型鼓插入带束层组合件卸胎环（带束层组合件的随动尾支撑与尾座需做一次交叉），卸胎环接取胎坯，成型鼓退出，卸胎环旋转90°，液压平台升起经胎坯托盘接取胎坯。

以上是对成型鼓所需完成工艺流程的分析。主机箱设计必须满足以上工艺流程。

2.5.3　力学分析

主机箱设计的静/动力学分析的基础要求如下。

第3段机组一次法成型鼓自身质量为16 000 kg，转动惯量为21 000 kg·m^2。主轴及其支撑机构要支撑鼓自身质量加在主轴上荷载的支反力和对主轴的倾覆力矩的支反力矩。伺服驱动系统输出力矩须满足转动角加速度要求。芯轴需约束成型工艺钢丝圈作用于成型鼓芯轴的反力。反包工艺时主机箱与尾机箱的液压推盘、反包胶囊及主机箱下方的连杆机构构成一个封闭力系。出现意外事故即某个反包胶囊破裂，封闭力系断裂，主轴承承受单向轴向冲击荷载。由于液压推盘推力高达100 t，因此主轴承机构设计为径向和轴向组合的轴承组。

以上为主机箱设计的简略定性分析。可以看出，设计过程按照价值工程观点只保留必要功能，没有过剩功能，通过大量的数学分析可得出最后设计结果。

主机箱设计划分为机械、液压、气控、电力拖动、控制（含硬件与软件）几个子模块，均按照标准化和通用化原则完成设计。

对整个机组的每个模块均按照上述类似方法进行设计，首先定性分析，建立物理模型，然后抽象成数学模型，再求得定量结果完成设计（这里各专业均需进行大量的数学分析）。可采用优化设计方法对各模块进行结构优化。

3　结语

采用模块化设计方法，工程机械轮胎成型机设计项目一次成功率较高，使得我公司在不到3年的时间内向国内外客户提供了7台套一次法巨型工程机械轮胎成型机组，实际使用效果良好。

参考文献：

[1] 张宽. 模块化设计方法在机械设计中的应用探讨[J]. 世界有色金属，2019(15)：213-214.

收稿日期：2020-04-23