

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.05.004

基于 iSIGHT 的汽车盘式制动器多学科设计优化*

胡文婕 陈亮

(福州大学机械工程及自动化学院, 福州 350002)

【摘要】 综合考虑汽车盘式制动器的结构、运动学、热力学等问题,在 Matlab 中建立制动器时间模型,在 ANSYS 中建立制动器结构模型和温度场模型,通过数值分析计算进行多学科优化分析和设计。基于 iSIGHT 集成 Matlab 和 ANSYS,构建制动器多学科设计优化仿真流程及平台,通过二次开发实现参数的提取、输出、更新以及各软件间的数据交换。实际运行结果表明,改善了制动器制动效果,缩短了制动时间并减小了制动器质量。

关键词: 车辆 盘式制动器 多学科设计优化 iSIGHT

中图分类号: U463.51⁺²; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)05-0017-04

Multidisciplinary Design Optimization for Automobile Disk Brake Based on iSIGHT

Hu Wenjie Chen Liang

(College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract

With comprehensive consideration of the structure, kinematics, thermodynamics problems of the automotive disc brake, a time model of brake disk in Matlab, a structure model and a temperature field model of brake disk in ANSYS were built, and the multidisciplinary optimization analysis and design could be made by numerical analysis and calculation. Integrating iSIGHT with Matlab and ANSYS, the platform and simulation processes of multidisciplinary design optimization (MDO) of the disk brake were constructed. In order to achieve the parameters extraction, export and update as well as the data exchanges between the software, the customized development of the software has been made. The result from the platform test demonstrated that the braking effect was improved, the braking time was shortened and the weight of the brake was reduced.

Key words Vehicle, Disk brake, Multidisciplinary design optimization, iSIGHT

引言

多学科设计优化(MDO)的主要思想是在复杂系统设计过程中集成各学科的知识、模型及设计过程管理等,充分利用各学科相互作用产生的协调效应获得系统整体最优解^[1]。目前多学科设计优化技术的研究主要集中于飞行器设计领域^[2-4],但随着多学科优化技术的不断发展,其他领域也开始了相应的研究^[5-9]。

汽车制动器在紧急制动时,刹车副在极短的时间内耗散很大的能量,致使摩擦面上产生大量的热,热量分布不均匀,并且其上会出现一个温度峰值。当该峰值过高时,易使制动盘摩擦表面产生热裂及烧蚀,降低其制动效能。此外,制动器还受有效尺寸的限制,如果制动器的尺寸能够减小,将给整车布局留下更大空间。所以在汽车盘式制动器设计中,需要综合考虑制动器的结构、运动学、热力学等问题,若采用常规优化设计方法,其规模和复杂性会相当

收稿日期:2009-06-08 修回日期:2009-07-22

* 国家自然科学基金资助项目(50875049)和福建省教育厅科技资助项目(JB07006)

作者简介:胡文婕,硕士生,主要从事 CAD/CAE 研究, E-mail: bingdian205@126.com

通讯作者:陈亮,教授,主要从事现代设计理论与方法、CAD/CAE 研究, E-mail: clfj2005@tom.com

可观,工作难度也很大;本文应用多学科优化设计方法进行汽车盘式制动器的设计。

1 模型的建立

汽车盘式制动器由制动盘和制动钳体组成,如图1所示。制动时,缸筒中的高压油推动活塞,进而推动摩擦片与制动盘发生摩擦,将汽车动能转化为制动盘的内能,以使汽车减速制动。

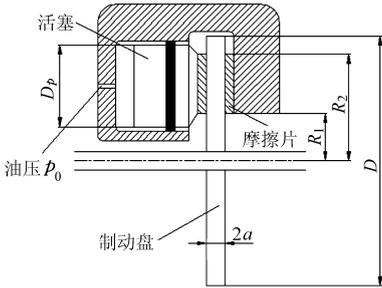


图1 浮钳盘式制动器的结构

Fig.1 Structure of floating clamp disk brake

制动盘与摩擦片的几何模型如图2所示,汽车盘式制动器的优化问题可描述为:设计汽车盘式制动器的制动盘和摩擦片,使得制动器质量最小,制动时间最短以及制动过程中制动盘最高温度最低,同时要满足摩擦片压力不超过许用值、油缸油压不超过许用值以及制动摩擦力矩不超过车轮与地面间附着力矩等约束条件。据此建立盘式制动器多学科设计优化数学模型。

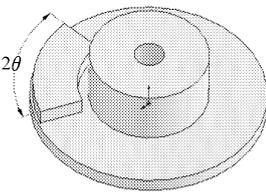


图2 制动盘与摩擦片几何模型

Fig.2 Geometry model of brake disc and brake pads

1.1 设计变量

确定盘式制动器设计变量为7个,即

$$X = (R_1, R_2, D_p, a, \theta, p_0, D) = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7)$$

式中 R_1 ——摩擦片内径,mm

R_2 ——摩擦片外径,mm

D_p ——活塞直径,mm

a ——制动盘的1/2厚度,mm

θ ——摩擦片半角, ($^\circ$) p_0 ——油压,MPa

D ——制动盘直径,mm

1.2 制动器各学科优化分析模型

1.2.1 运动学优化模型

运动学优化目标为制动时间最短,约束条件包括:制动力矩 T_f 不应大于车轮与路面的附着力矩;制动片的压力 q 不应超过规定值 q_{\max} ;以及油缸内的油压 p_0 不得超过规定的范围 p_{\max} 。运动学优化问题描述为

$$\min f_1(X_1) = t_{\text{brake}}$$

$$\text{s. t. } x_6 \leq p_{\max}$$

$$q_{\max} - \frac{45x_3^2x_6}{(x_2^2 - x_1^2)x_5} \geq 0$$

$$W_1\varphi r - \frac{\pi f q x_5 (x_2^3 - x_1^3)}{135} \geq 0$$

$$X_1 = (x_1, x_2, x_3, x_5, x_6)$$

式中 W_1 ——单个车轮承受的总重,N

φ ——附着系数,给定 $\varphi = 1$

r ——轮胎滚动半径,mm

f ——制动盘与摩擦片间的摩擦因数,取 $f =$

0.38

1.2.2 结构优化模型

结构优化目标为制动盘和制动片总质量最小,并满足结构上的设计约束要求:摩擦片不应与轮毂发生干涉;摩擦片的安装位置不应超出制动盘的范围之外;油缸不应与轮毂发生干涉,设油缸的中心在摩擦片的平均半径处;制动盘的外径不能大于规定的最大值。结构优化问题描述为

$$\min f_2(X_2) = m_{\text{mass}}$$

$$\text{s. t. } x_1 - \frac{D_h}{2} \geq 0$$

$$\frac{x_7}{2} - x_2 \geq 0$$

$$\frac{x_1 + x_2}{2} - \frac{x_3}{2} - t_c - \frac{D_h}{2} \geq 0$$

$$D_{\max} - x_7 \geq 0$$

$$X_2 = (x_1, x_2, x_3, x_7)$$

式中 D_h ——轮毂直径, $D_h = 65$ mm

t_c ——油缸壁厚, $t_c = 5$ mm

D_{\max} ——制动盘最大直径

1.2.3 热力学优化模型

热力学优化目标为制动过程中制动盘的最高温度最小,约束条件为最高温度不能超过制动盘的许用最高温度 T_{\max} 。即热学科优化问题描述为

$$\min f_3(X_3) = T_{\text{tem}}$$

$$\text{s. t. } T_{\text{tem}} \leq T_{\max}$$

$$X_3 = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7)$$

1.3 MDO 优化模型

在上述各学科分析基础上,通过一个 MDO 框架将各学科集成(图3),其实施模型见图4所示。

其中各子系统学科分析模型见前,MDO模型的目标函数为(推导略)

$$f(X) = 24t_{\text{brake}} + 4m_{\text{mass}} + 0.3T_{\text{tem}} =$$

$$\frac{24W_1v^2}{\omega_0 T_{fg}} + 4m_{\text{mass}} + 0.3T_{\text{tem}}$$

式中 v ——开始制动时车辆的初始行驶速度, m/s
 ω_0 ——开始制动时制动盘的角速度, rad/s
 g ——重力加速度, m/s^2



图3 盘式制动器 MDO 集成框架

Fig.3 Integration framework of MDO for disc brake

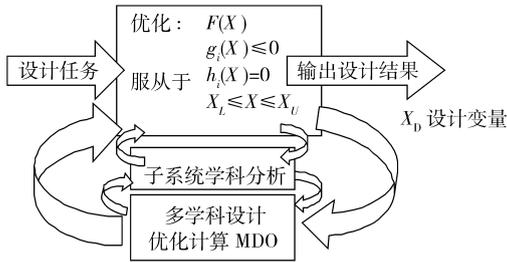


图4 盘式制动器 MDO 实施模型

Fig.4 Implementation model of MDO for disc brake

2 多学科优化设计实现

采用 iSIGHT 作为 MDO 集成框架环境, 基于上节的分析制定如图 5 所示的汽车盘式制动器多学科设计优化的仿真流程, 相应的多学科设计优化集成框架如图 6 所示, 该优化框架大致可分为两个部分: 一个部分为前述 3 个子学科的优化分析, 利用 ANSYS 进行盘式制动器温度场数值模拟, 通过 APDL 语言进行二次开发计算出制动过程中制动盘摩擦表面温度场的变化情况、最高温度值和制动器质量; 而在 Matlab 中建立时间分析模型, 计算制动时间。另一部分是系统级多学科设计优化, 通过在 iSIGHT 框架环境下集成 ANSYS 与 Matlab 来实现。

iSIGHT 与 Matlab 间的交互主要通过以下 3 个文件: Matlab_brakein.txt 用于输入 m 文件所需的优化设计变量, iSIGHT 的输出写在此文件中; brakedisk.m 中包含制动时间的计算公式及约束表达式, 用于计算制动时间与约束值; Matlab_

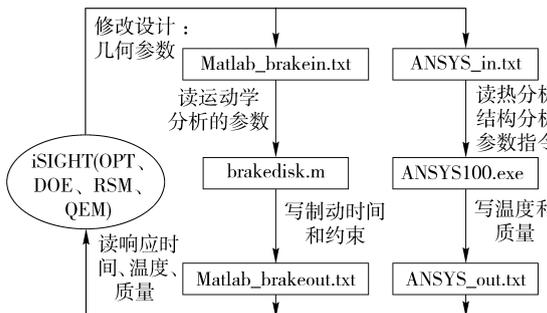


图5 汽车盘式制动器多学科设计优化的仿真流程图

Fig.5 Simulation flow of MDO for disc brake

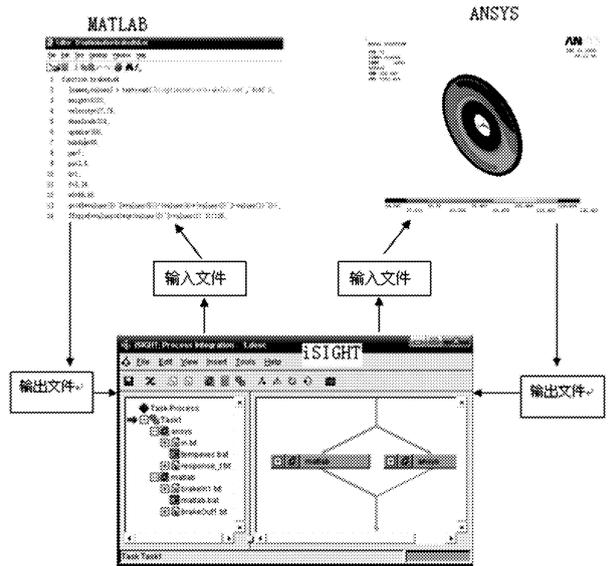


图6 汽车盘式制动器多学科设计优化集成平台

Fig.6 Integrated platform of MDO for automobile disc brake

brakeout.txt 用于向 iSIGHT 输出计算所得的制动时间和约束。

iSIGHT 与 ANSYS 间的交互主要通过以下 3 个文件: ANSYS_in.txt 用于将设计变量参数化, 建立盘式制动器的模型, 计算并输出盘式制动器制动过程中的最高温度以及盘式制动器的质量, iSIGHT 的输出写入此文件中; couple_so22.mac 是用于计算盘式制动器每个时间步长上制动盘和制动片的温度分布状况的宏文件; ANSYS_out.txt 用于向 iSIGHT 输出计算所得的盘式制动器制动过程中的最高温度以及盘式制动器的质量。

系统级优化参数的设置如图 7 所示, 图中 padinrad, padoutrad 为摩擦片的内径和外径, pisrad 为活塞的直径, diskthick 为制动盘的 1/2 厚度, padhalfang 为制动片的 1/2 扇形角, oilpress 为活塞油压, diskdia 为盘直径。约束有结构约束和压力约束等, 在图中用 yueshu1 ~ yueshu 7 这 7 个约束变量

| Start Counter | Parameter Name | Unit | Type | Initial Value | Lower Bound | Upper Bound |
|---------------|----------------|------|------|---------------|-------------|-------------|
| 1 | padinrad | mm | REAL | 70.0 | 17.0 | 100.0 |
| 2 | padoutrad | mm | REAL | 120.0 | 120.0 | 120.0 |
| 3 | pisrad | mm | REAL | 40.0 | 0.0 | 10.0 |
| 4 | diskthick | mm | REAL | 10.0 | 0.0 | 10.0 |
| 5 | padhalfang | deg | REAL | 25.0 | 0.0 | 25.0 |
| 6 | oilpress | MPa | REAL | 4.0 | 0.0 | 10.0 |
| 7 | diskdia | mm | REAL | 200.0 | 0.0 | 200.0 |
| 8 | yueshu1 | mm | REAL | 0.0 | 0.0 | 1.0E+100000 |
| 9 | yueshu2 | mm | REAL | 0.0 | 0.0 | 1.0E+100000 |
| 10 | yueshu3 | mm | REAL | 0.0 | 0.0 | 1.0E+100000 |
| 11 | yueshu4 | mm | REAL | 0.0 | 0.0 | 1.0E+100000 |
| 12 | yueshu5 | mm | REAL | 0.0 | 0.0 | 1.0E+100000 |
| 13 | yueshu6 | mm | REAL | 0.0 | 0.0 | 1.0E+100000 |
| 14 | yueshu7 | mm | REAL | 0.0 | 0.0 | 1.0E+100000 |
| 15 | yueshu8 | mm | REAL | 0.0 | 0.0 | 1.0E+100000 |
| 16 | yueshu9 | mm | REAL | 0.0 | 0.0 | 1.0E+100000 |
| 17 | yueshu10 | mm | REAL | 0.0 | 0.0 | 1.0E+100000 |
| 18 | yueshu11 | mm | REAL | 0.0 | 0.0 | 1.0E+100000 |
| 19 | yueshu12 | mm | REAL | 0.0 | 0.0 | 1.0E+100000 |
| 20 | yueshu13 | mm | REAL | 0.0 | 0.0 | 1.0E+100000 |

图7 盘式制动器优化参数设置

Fig.7 Parameters setting of MDO for disk brake

来表示。优化目标是 minimized 制动盘的最高温度、制动时间和制动器的质量,根据各个目标函数的重要程度,对应地选择一组权重系数 Obj Wgt。由于3个目标的量纲大小不同,可以在 Obj Sel Factor 中输入比例因子,做统一量纲处理。这样各个子目标函数的贡献就成为 $\text{Weight} * \text{subobjective} / \text{Scalar}$,最后具体运算时 iSIGHT 的目标函数变为 $\text{objective} = \frac{0.3 \times \text{UTMAX1}}{1} + \frac{0.1 \times \text{MASS}}{0.025} + \frac{0.6 \times \text{braketime}}{0.025} = 0.3 \times \text{UTMAX1} + 4 \times \text{MASS} + 24 \times \text{braketime}$

3 盘式制动器优化设计结果及分析

采用数值优化算法-序列二次规划法 NLPQL 作为优化方案,启动并运行集成平台,通过多次迭代运行直至收敛,得到运行结果如表1所示。

从表1可以看出运用集成平台执行优化之后目标值由原来的 144.089 727 92 下降为 122.865 340 24,最优设计改善了 21.224 387 68 (14.73%),制动盘表面最高温度 UTMAX1 下降了 18.834 19 °C,表面温度明显降低,刹车时间 braketime 减少了 0.788 329 s,制动性能明显提高。

表1 运行结果

Tab.1 Comparative analysis

| 参数 | 初始值 | 优化结果 |
|---------------------|----------------|----------------|
| R_1/mm | 77 | 76 |
| R_2/mm | 125 | 125 |
| D_p/mm | 50 | 54 |
| a/mm | 12.5 | 14.6 |
| $\theta/(\text{°})$ | 32.25 | 37.85 |
| p_0/MPa | 6.5 | 7.0 |
| D/mm | 256 | 275 |
| UTMAX1/°C | 156.074 344 | 137.240 154 |
| MASS/kg | 2.373 632 18 | 3.210 073 51 |
| braketime/s | 3.657 204 | 2.868 875 |
| objective | 144.089 727 92 | 122.865 340 24 |

4 结束语

通过 iSIGHT 优化平台集成 Matlab 和 ANSYS 等工程软件,开发了盘式制动器多学科优化集成平台,考虑多领域协同实现设计参数的确定,改善制动效果,缩短制动时间和减小制动器质量。该平台可大大减少人们的干预和重复工作,提高设计效率、质量以及自动化程度,并具有收敛速度快,稳定性和可靠性好的特点。

参 考 文 献

- 1 马明旭,王承恩,张嘉易,等. 复杂产品多学科设计优化技术[J]. 机械工程学报,2008,44(6):15~26.
Ma Mingxu, Wang Chengen, Zhang Jiayi, et al. Multidisciplinary design optimization for complex product review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(6):15~26. (in Chinese)
- 2 Sobieski J S, Haftka R T. Multidisciplinary aerospace design optimization: survey of recent developments[J]. Structure Optimization, 1997, 14(1):1~23.
- 3 王书河,何麟书,张玉珠. 飞行器多学科设计优化软件系统[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(1):51~55.
Wang Shuhe, He Linshu, Zhang Yuzhu. Flight vehicles multidisciplinary design optimization software system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(1):51~55. (in Chinese)
- 4 陈琪锋. 飞行器分布式协同进化多学科优化方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2003.
Chen Qifeng. Distributed coevolutionary multidisciplinary design optimization methods for flying vehicles[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003. (in Chinese)
- 5 赵良玉,杨树兴. 火箭弹推力方案的优化设计[J]. 弹箭与制导学报,2006,26(2):83~85.
Zhao Liangyu, Yang Shuxing. Optimization design for thrust project of MLRS[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(2):83~85. (in Chinese)
- 6 Rajesh K, Ravi P, Ramana G. Multidisciplinary optimization of a lightweight torpedo structure subjected to an underwater explosion[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2006, 43(2):103~111.
- 7 Abbott E A, Murray L S. The case for multidisciplinary design approaches for smart fibre composite structures[J]. Composite Structures, 2002, 58(3):349~362.
- 8 Kodiyalam S, Yang R J, Gu L, et al. Multidisciplinary design optimization of a vehicle system in a scalable, high performance computing environment[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2004, 26(3~4):256~263.
- 9 赵健冬,邱清盈,冯培恩. 基于 Nash 均衡的多学科设计优化求解方法[J]. 农业机械学报,2008,39(1):126~128,141.
Zhao Jiandong, Qiu Qingying, Feng Peien. Solving method of multi-disciplinary design optimization based on nash equilibrium [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1):126~128,141. (in Chinese)