

# 电磁轴承磨床电主轴控制器的研究\*

张庆春 邢 涛 李国栋 姜 军 梁迎春  
(哈尔滨工业大学机电工程学院 哈尔滨 150001)

**摘要:** 为了解决电磁轴承本身的复杂非线性引起电磁轴承磨床系统中同时实现高刚度和高转速的矛盾, 以电磁力为控制输入量, 将电磁力计算公式、电磁铁及功率放大器集成为电磁力构件, 通过电磁力构件反算电磁铁的励磁电流来确定控制器输出信号。该方法可以将电磁力计算与控制器设计分开考虑, 在考虑温度、转速、漏磁及涡流对电磁力的影响以及电磁力与励磁电流、气隙非线性关系基础上, 通过电磁力构件建立励磁电流与控制信号的关系, 控制器设计则不必再考虑电磁力非线性问题的影响。试验表明, 采用电磁力构件的方法设计的  $H_\infty$  控制器能够实现高刚度与高转速两项指标, 并能够克服电磁力扰动对系统性能的影响。

**关键词:** 电磁轴承 励磁电流 非线性 漏磁 涡流  
**中图分类号:** TH133.3

## 0 前言

在高精度机械加工领域, 磨削加工占有举足轻重的地位。电磁轴承磨床系统以其转速高、磨削速度快、无摩擦、轴承寿命长、利用系统内部信号可以对磨削过程进行在线监控、主轴位置在线可控等优点受到了越来越多的重视。国外, 瑞士的 SKF 公司和法国 S2M 公司以及美国、德国、日本等国家都在进行磁轴承的研究, 取得了一定的成果并应用于实际<sup>[1]</sup>。国内, 清华大学对电磁轴承磨床电主轴实现了 5 自由度全悬浮, 转速高达 66 kr/min, 刚度达  $100 \text{ N}/\mu\text{m}$ <sup>[2]</sup>。此外, 南京航空航天大学, 哈尔滨工业大学等多所高校也在进行电磁轴承的研究, 但也只是实验室研究阶段。

电磁轴承系统中存在的电磁力非线性问题, 通常采用 SCHWEITZER 等<sup>[1]</sup>提出的电磁力线性化方法来解决。在这种情况下, 为实现高刚度必须设定较高的工作点电流, 从而在电磁铁中形成较强的磁场, 这使得转子在磁场中高速旋转时, 产生了较大的涡流, 使电磁轴承的承载力下降<sup>[3-4]</sup>; 同时由于电磁铁的铜损、铁损生热降低了硅钢片的导磁性, 使磁感应强度  $B$  与磁场强度  $H$  的线性关系区间变窄。另外, 转子在电磁轴承中高速旋转时相当于转子处于高速交变电磁场中, 在转子表层产生肌肤效应, 使转子表层磁通达到饱和, 磁力线发生畸变, 使电磁力在较大的范围内扰动, 影响了系统的性能, 严重时会使系统失稳。这说明磁悬浮磨床电主轴系统中存在着高刚度与高转速的矛盾。要解决这个矛盾, 必须解

决电磁力非线性问题。文献[5]实现了电磁力的全局线性化, 但该方法需要测量磁通, 这对现有的电磁轴承系统存在较大的困难; 文献[6]采用非线性补偿的方法实现了电磁力的线性化, 但是该方法非线性补偿与控制器之间有耦合, 影响了系统性能。

笔者以电磁力为控制量, 将电磁力计算公式、电磁铁及功率放大器集成为电磁力构件, 通过电磁力构件反算电磁铁的励磁电流, 避开了电磁力非线性问题及温度、漏磁、转速及涡流对系统的影响。解决了电磁轴承磨床电主轴系统高刚度与高转速的矛盾。

## 1 高刚度与高转速矛盾解决方法

以电磁力为控制量设计控制器, 采用电磁力构件方式解决电磁力非线性问题, 此时系统控制简图如图 1 所示。

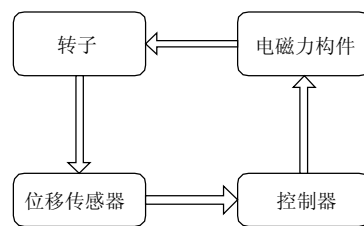


图 1 电磁力为控制量的系统控制简图

设转子系统参数的不确定方程为

$$\ddot{q} + m^{-1}d\dot{q} + m^{-1}kq = (m^{-1}b + \Delta b)F + w(t) \quad (1)$$

式中  $q$  —— 转子状态矢量

$F$  —— 控制力输入矢量

$\Delta b$  —— 输入参数扰动矩阵

$w(t)$  —— 扰动输入矢量

$m$  —— 质量矩阵

$d$  —— 阻尼矩阵

\* 国家自然科学基金资助项目(5880203)。20050704 收到初稿, 20060430 收到修改稿

$k$  ——刚度矩阵

$b$  ——控制输入矩阵

设通过  $H_\infty$  控制理论设计的控制器为  $G(k)$ ，则系统所需要的控制力为

$$F(k) = G(k)y(k) \quad (2)$$

式中  $y(k)$  ——在  $k$  时刻的输出位移

电磁铁工作方式如图 2 所示，则

$$F(k) = F_A(k) - F_B(k) \quad (3)$$

式中  $F_A(k)$  ——电磁铁 A 产生的电磁力

$F_B(k)$  ——电磁铁 B 产生的电磁力

电磁力的计算一般采用式(4)<sup>[1]</sup>

$$F = k_0 \left[ \frac{(I_0 - i_A)^2}{(h_0 + y)^2} - \frac{(I_0 + i_B)^2}{(h_0 - y)^2} \right] \quad (4)$$

式中  $I_0$  ——基础电流

$i_A$  ——电磁铁 A 的控制电流

$i_B$  ——电磁铁 B 的控制电流

$k_0$  ——常数

$$k_0 = \mu_0 n^2 s \cos \theta / 4$$

$h_0$  ——参考点的位移

$y$  —— $y$  方向的位移

$\mu_0$  ——真空磁导率

$\theta$  ——两磁极间夹角

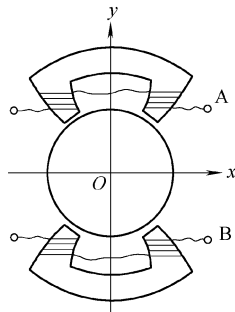


图 2 电磁铁工作方式示意图

考虑漏磁、温度、转速和涡流对电磁力的影响，修正式(2)得

$$F = k_w k_a k_t k_v k_0 \left[ \frac{(I_0 - i_A)^2}{(h_0 + y)^2} - \frac{(I_0 + i_B)^2}{(h_0 - y)^2} \right] \quad (5)$$

式中  $k_w$  ——考虑涡流对电磁力影响的修正系数

$k_a$  ——考虑漏磁对电磁力影响的修正系数

$k_t$  ——考虑温度对电磁力影响的修正系数

$k_v$  ——考虑转速对电磁力影响的修正系数

由式(5)得到励磁电流计算公式有以下两种情况。

(1) 如果控制力方向与电磁铁 A 产生的电磁力方向相同，则有

$$\begin{cases} i_A(k) = I_0 + [h_0 + y(k)] \times \\ \sqrt{[-F(k)/k_w k_a k_t k_v k_0] + I_0^2/[h_0 - y(k)]^2} \\ i_B(k) = I_0 \end{cases} \quad (6)$$

(2) 如果控制力与电磁铁 B 产生的电磁力方向相同，则有

$$\begin{cases} i_B(k) = I_0 + [h_0 - y(k)] \times \\ \sqrt{[F(k)/k_w k_a k_t k_v k_0] + I_0^2/[h_0 + y(k)]^2} \\ i_A(k) = I_0 \end{cases} \quad (7)$$

式(6)、(7)为电磁力构件数学表达式。利用该公式确定 A、B 电磁铁中励磁电流，通过励磁电流再确定控制器输出的控制信号。

为了减小系统功率损耗，降低涡流对电磁力的影响，应该将基础电流设为零，但是基础电流设为零，电磁力响应速度不能够满足要求。

设转子的位移为

$$y(k) = A_0 \sin(\omega k + \varphi) \quad (8)$$

式中  $\omega$  ——角频率

$\varphi$  ——初始相角

$A_0$  ——振动幅值

则力的响应速度为

$$\frac{\partial F(k)}{\partial(\omega k)} = G(k) A_0 \omega \cos(\omega k + \varphi) \quad (9)$$

对于功率放大器的电流摆率<sup>[7]</sup>，必须满足

$$\frac{\partial i}{\partial t} \leq \frac{U_c}{L}$$

式中  $i$  ——输出电流

$t$  ——响应时间

$U_c$  ——电源电压

$L$  ——线圈电感

电磁铁 A、B 为对称结构，因此只需考虑电磁铁 A 工作的情况，则

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial i_A} \frac{\partial i_A}{\partial t} \leq 2k_0 k_a k_c \frac{(I_0 - i_A) i_A}{[h_0 + y(k)]^2} \frac{U_c}{L} \quad (10)$$

对式(10)分析可知，如果基础电流为零，在电流  $i_A$  也为零时，电磁力响应速度也为零，这对电磁轴承系统是一个灾难，为此基础电流的确定一般应该在满足电磁力响应速度前提下，尽量取较小的值以降低功耗，减小涡流对电磁力的影响。

## 2 系统仿真分析及试验

以清华大学设计的第三代磨床电主轴系统做试验，电磁轴承系统转子与电磁铁之间的气隙为 0.25 mm，基础电流选为 0.2 A，最大控制电流输出为 3 A，转子质量为 2.827 kg，赤道转动惯量为 0.010 6 kg/m<sup>2</sup>，极转动惯量为 0.000 88 kg/m<sup>2</sup>，其一阶弹性固有频率为 1 979 kHz，转子工作转速为 30 kr/min。位移传感器采用涡流位移传感器，差动

式安装,传感器的分辨率为  $8 \text{ mV}/\mu\text{m}$ 。功率放大器采用 MPW 型开关功率放大器,其工作电压为  $310 \text{ V}$ ,平均电感为  $20 \text{ mH}$ ,最大电流摆率为  $155 \text{ kA/s}$ 。软件平台选择 RTLinux, A/D 为 PCI 卡, D/A 部分选用了 AD 公司的高速 D/A 芯片 AD7537, 采样频率为  $10 \text{ kHz}$ 。

图 3 是采用作者给出的电磁力构件方法设计的  $H_\infty$  控制器作用下,系统的起浮响应仿真图。从图 3 中可以看出,系统能够稳定起浮,动态响应特性比较好。

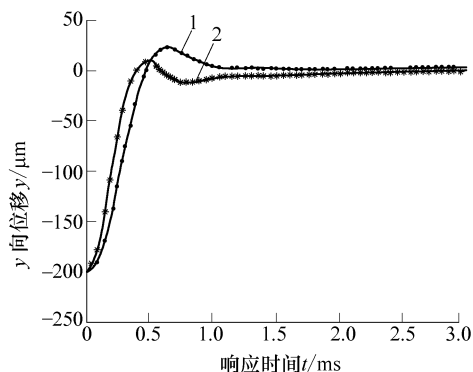


图 3 系统起浮响应仿真图  
1. 后端 2. 前端

图 4 是系统起浮时前端电磁铁和后端电磁铁中通过的励磁电流仿真图,表示前端电磁轴承的电磁铁上 A、B 中的励磁电流和后端电磁轴承的电磁铁 A、B 中励磁电流。从图 4 中可以看出系统在稳定悬浮之后,电磁铁中通过较小的电流,使系统的功耗大幅度降低。

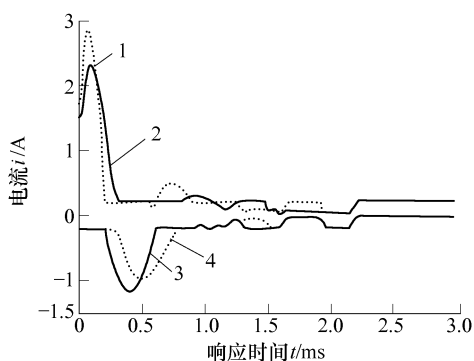
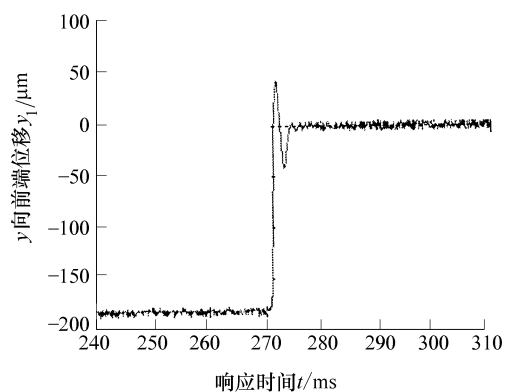
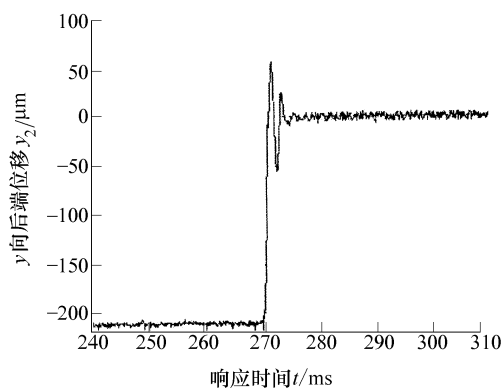


图 4 系统起浮时励磁电流仿真图  
1. 前端 A 2. 后端 A 3. 前端 B 4. 后端 B

图 5 是采用电磁力构件方法设计的  $H_\infty$  控制器作用下,转子起浮时前后轴承处转子位移试验测试曲线图。图 5a 是前端电磁轴承处转子位移曲线,图 5b 是后端电磁轴承处转子位移曲线。从图 5 可以看出,转子起浮平稳。起浮试验说明,以电磁力为控制输入量设计电磁轴承控制器、通过电磁力构件方式反算励磁电流这种方法是可行的。



(a) 前端电磁轴承起浮响应



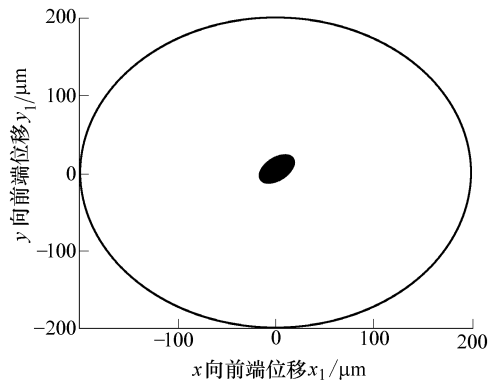
(b) 后端电磁轴承起浮响应

图 5 转子起浮时域响应曲线

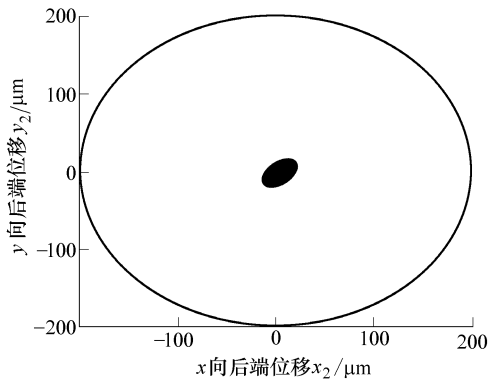
图 6 是以电磁力为控制输入设计的  $H_\infty$  控制器作用下,转子转速为  $33 \text{ kr/min}$  前后轴承处转子轴心轨迹试验测试图。图 6a 是前端电磁轴承处转子轴心轨迹,图 6b 是后端电磁轴承处转子轴心轨迹。从图 6 中可以看出,转子运转平稳。运转试验说明,以电磁力为控制对象设计电磁轴承控制器、通过电磁力构件方式反算励磁电流这种方法克服了温度、涡流、转速和漏磁对电磁力的影响。

电磁轴承系统中的控制力是由控制器给出电压信号经过放大器转换成电流信号通过电磁铁转换为电磁力的。如果在控制器中给出一定频率的正弦信号,那么在电磁铁中就可以产生一定频率的正弦激振力,转子的位移可以通过系统本身的传感器测得。根据这一原理,进行系统的动刚度的测试。

图 7a 是以电磁力为控制输入设计的  $H_\infty$  控制器作用下,激振力大小为  $100 \text{ N}$ , 频率为  $20 \text{ Hz}$  时,转子在前端电磁轴承处的位移输出试验曲线图,图 7b 是激振力大小为  $100 \text{ N}$ , 频率为  $530 \text{ Hz}$  时,转子在前端电磁轴承处的位移输出。根据测量结果估算大端电磁轴承在  $20 \text{ Hz}$  时的动刚度为  $14 \text{ N}/\mu\text{m}$ , 在  $530 \text{ Hz}$  时动刚度为  $20 \text{ N}/\mu\text{m}$ 。试验表明采用作者给出的方法解决了电磁轴承磨床系统中存在的高刚度与高转速矛盾。

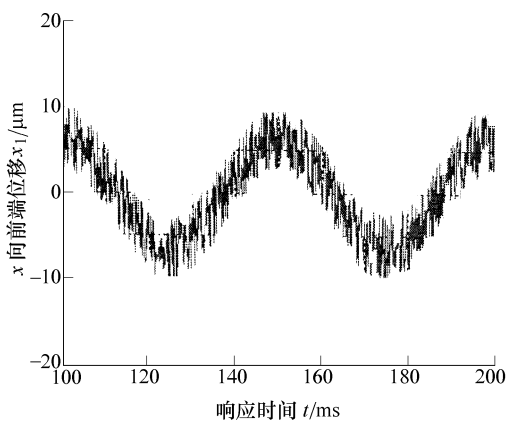


(a) 转子前端轴承轴心迹

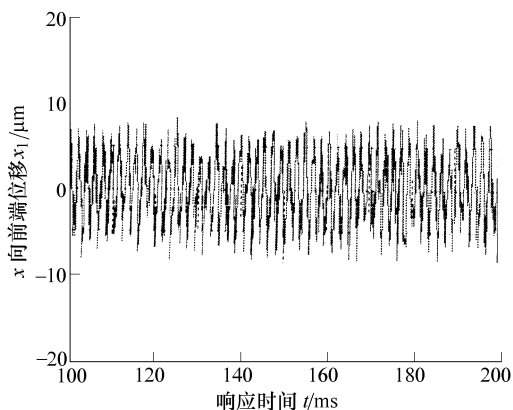


(b) 转子后端轴承轴心迹

图6 转速为33kr/min时转子轴心轨迹



(a) 20 Hz时转子前端轴承位移输出



(b) 530 Hz时转子前端轴承位移输出

图7 刚度测试试验图

### 3 结论

(1) 在电磁轴承系统中,以电磁力为控制量,通过电磁力构件将控制器与电磁力非线性问题分开考虑,而不必再考虑电磁力线性化问题的方法,简便有效地解决了高刚度与高转速的矛盾。

(2) 在控制器设计过程中,通过电磁力构件考虑温度、转速、漏磁及涡流对电磁力的影响及电磁力与励磁电流及气隙本质上的非线性关系,提高了电磁力计算精度,解决了电磁力受各种因素而引起电磁力计算精度下降问题。

(3) 仿真和试验表明,采用电磁力构件的方法设计的 $H_{\infty}$ 控制器,在保证刚度的前提下,以较小的励磁电流将转子稳定地悬浮在中心位置,降低了系统的功率损耗,减小了涡流及转速对电磁力的影响,使电磁力在较小的范围内摄动。

### 参 考 文 献

- [1] SCHWEITZER G, BLEULER H, TRAXLER A. Active magnetic bearings-basics, properties and application of active magnetic bearings[M]. Switzerland: Hochschulverlag, 1994.
- [2] 张德魁. 亦速电磁轴水磨床电主轴的研究[D]. 北京: 清华大学, 2000.
- [3] ROCKWELL R D, ALLAIRE P E, HEINRICH J C, et al. Magnetic field finite element modeling of magnetic bearings including rotor motion effects and eddy currents[C]//Proc. of fifth Int. Symp. On Magnetic Bearings, Kanazawa university, Japan. 1996: 132-137.
- [4] ROCKWELL R D, ALLARE P E, KASARDA M E F. Radial planar magnetic bearing analysis with finite elements including rotor motion and power losses[C]//Proc. of the 1977 Int. Gas Turbine & Aeroengine, Congress & Exposition, June, 1977, Orlando, USA. New York: ASME, 1977: 1-8.
- [5] 李新生, 杨作兴, 赵雷, 等. 磁轴承磨床电主轴全局线性化研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(10): 122-126.
- [6] LI L, MAO J. Feedback linearisation of magnetic bearing actuators for a uniform upper bound of force slew rate[J]. IEE Proc. Electro. Power. Appl., 1999, 146 (7): 378-382.
- [7] 张德魁, 赵雷, 赵鸿宾. 电流响应速度及力响应速度对电磁轴承性能的影响[J]. 清华大学学报, 2001, 41(6): 23-26.

## CONTROLLER RESEARCH ON EMB SYSTEM OF GRINDING MACHINE SPINDLE

ZHANG Qingchun XING Tao LI Guodong  
JIANG Jun LIANG Yingchun

(School of Mechanical and Electrical Engineering,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract:** In order to solve the difficult that achieves the high stiffness and high rotational speed of grinding machine system supported by electromagnetic bearing (EMB) at the same time because of the EMB's nonlinearity, electromagnetic force as the input and electromagnetic force formula, electromagnet and power amplifier are integrated to electromagnetic force components. On the basis of thinking of relationship and effects

above, the excited current is calculated inversely in order to ensure controller output signal. The advantages of this method are that the calculation of electromagnetic force and the controller design can be considered separately without considering the nonlinearity. The experimental results show that the two indexes can be achieved at the same time and the effects come from electromagnetic force perturbation can be overcome by means of being adopted  $H_\infty$  controller with electromagnetic force components.

**Key words:** Electromagnetic bearing (EMB) Excited current  
Nonlinearity Leak magnetic Eddy current

作者简介: 张庆春, 男, 1959 年出生, 副教授。主要从事大型非标设备和磁悬浮轴承的研究。

E-mail: zqc@hit.edu.cn



## 国家自然科学基金重点资助项目成果简介

项目名称: 应急设计的关键理论与方法及其应用研究

项目负责人: 滕弘飞

项目批准号: 50275019

所在单位: 大连理工大学

**研究成果:** 本项目以卫星总体方案应急设计为背景, 采用理论分析和仿真相结合方法, 给出应急设计理论和关键技术。研制了该原型系统, 以及模拟仿真和相关实际应用验证, 并经专家组验收。主要取得了如下研究成果。在理论上: ① 给出了应急设计的定义、分析了应急设计的内涵, 以及应急设计系统定义。② 给出实现应急设计基本方法: 仿蚁群社会应急行为, 为此研究了新的演化算法, 构造功能强大的基于人与计算智能相结合的人机结合 Agent(Human-computer cooperation Agent, HC-Agent)和基于人智—知识—计算智能的 HC-Agent, 作为应急设计的“蚂蚁”, 使人的经验、创造能力与算法强大的科学计算能力相结合。③ 进而给出基于仿蚁群社会组织的弱中央控制的混合 P2P 网络模型和 HC-Agent 的快速应急协同设计系统, 以使该应急设计系统具有抗干扰、自适应、快速反应的设计能力。④ 研究了总体方案应急设计的评价决策方法及其系统。⑤ 研究应急设计相关的配套技术, 包括布局拓扑模式、干涉计算、装配自动定位、布线设计等。⑥ 本项目应急设计理论方法经模拟地震、海啸和太阳黑子爆发的自然灾害情况下的卫星总体方案设计(配置、布局和方案评价)的模拟实例验证。在实践上: ① 建立了正常卫星布局设计与仿真系统, 进而是在此基础上再实现其应急设计。② 结合某部委托的相关项目, 研制了基于 Pro/Engineer 的卫星布局设计与仿真系统。该布局设计与仿真系统, 能实现自动化定位和安装, 能进行基于 Pro/Engineer 平台的模拟装配和动态演示, 并经专家组验收, 认为“经过布局优化设计, 全星质量分布特性得到明显改善, 实现了全星优化布局方案设计与 CAD 模装, 对推进系统管路装配设计、全星构型和装配工艺提出合理化的改进建议; 完成了航天器布局设计模型、约束条件、优化目标的研究, 并给出了该复杂布局优化复合模型和人机结合的演化计算的求解方法; 突破了若干关键技术, 完成了基于 Pro/E 的航天器布局优化设计平台的开发与初步考核, 圆满完成了该项目技术服务合同书的研究内容和技术指标”。

**研究内容:** 本项目以卫星总体方案设计(包括配置设计、布局设计和方案评价)为背景, 研究在自然灾害致使设计系统或设计资源受损非正常情况下, 急需的非现成的机械产品或装备的应急设计方法。它与目前的快速响应设计相关, 主要不同之处在于同时考虑了设计系统内外部环境变化, 尤其是系统内部受损情况。重点给出应急设计定义、内涵和框架, 人机结合演化设计, 弱中央控制的仿蚁群的基于网络混合 P2P 的分布式协同演化设计。研究成果用于研制卫星总体方案应急设计系统原型, 并经模拟实例验证和相关应用验证。期望有助于应急设计理论与应用研究开拓, 以满足抗灾减灾实践需要。