文章编号：1671 - 6833(2006)01 - 0031 - 05

基于 LMI 的建筑结构与控制系统并行算法设计

吴子燕，胡伟鹏

（西北工业大学力学与土木建筑学院，西安 710072）

摘　要：针对随机激励下的以结构参数为变量、以控制输入力最小化为优化目标的建筑结构和控制系统并行设计问题，设计了一种基于线性矩阵不等式工具的并行优化算法.该算法在以下两个方面突破了现有算法的局限性：将质量矩阵纳入优化变量，拓宽了优化范围；采用凸化势能函数处理将控制引入结构设计导致的非凸约束，大大降低了算法复杂度.算例分析结果显示该算法能有效提高结构设计效能.

关键词：并行设计；线性矩阵不等式(LMI)；结构控制

中图分类号：TP 273　　　文献标识码：A

0　引言

建筑结构控制系统设计是在结构的静力分析和动力学分析的基础上发展起来的，到目前为止大致经历了两个阶段：第一阶段，试图在已有的结构设计上增加控制特征；第二阶段，对于选定的控制目标，并行地进行结构及控制系统设计，这一设计思想改善了建筑结构传统设计中的控制系统与结构的动态特性相互竞争、矛盾对立关系.然而在目前的建筑结构设计过程中，往往出现为了达到预定的动力响应控制目标，结构与控制系统设计相互竞争，其结果是在结构上强加了一些令结构无法承受的控制力.

将建筑结构设计与控制系统设计集成化[1]这一思想在学术界(Onoda and Haftka 1987；Grandhi 1986；Jin and Sepulveda 1995；Yang and Chen 1996)早已提及，但是，将控制系统设计引进结构设计会导致非凸面约束的优化问题，而且这种优化问题的基于计算机的可行算法很复杂，在理论上不能保证具有局部最优解.其中具有代表性的 Grigoriadis(1996)和 Skelton and Kim(1992)两步的重设计方法思想如下[2]：第一步，针对预先给定的闭环控制目标 γ，设计 1 某个给定结构的控制器.第二步，并行地对结构和控制器进行重设计，使主动控制力最小而闭环系统矩阵保持为常数.这样，在第一步到第二步的不断循环中，闭环控制目标 γ 保持不变.使得结构/控制并行设计问题凸化[3]，其特征是使闭环系统的矩阵保持为常数.此后，Lu、Skelton(2000)、Grigoriadis、Skelton(1998)；Grigoriadis、Wu(1997)等引入线性矩阵不等式(LMI)[4]等工具实现以上思想，但是他们提出的方法不能对质量矩阵进行优化，而且收敛速度很慢，其主要原因是：在他们的结构重设计步骤中 Lyapunov 矩阵是确定的.本文也正是为了解决优化质量矩阵和加快收敛速度而提出一种新的并行优化算法.

1　系统动力学模型的建立

对于建筑结构(如多层框架)设计，现行的设计计算中的一般采用集中质量力学模型，其简化的数学模型可用如下的二阶微分方程表示：

$$M\ddot{q} + D\dot{q} + Sq = f(t) \tag{1}$$

假定质量矩阵 M 为对称正定矩阵，即 $M \in R^{n\times n}$，$M = M^{\mathrm{T}}$ 且 $\lambda_i(M) > 0$；由于考虑的是建筑结构设计，因此阻尼矩阵也是对称矩阵，即 $D = D^{\mathrm{T}}$；S 为刚度矩阵，$S \in R^{n\times n}$；$f(t)$为广义荷载，包括控制输入和外部扰动两部分，即 $f(t) = \hat{B}_u \cdot u(t) + \hat{B}_w w(t)$，这里 $u(t)$为待定反馈控制输入信号，$w(t)$为外部扰动，考虑随机系统，则 $w(t)$为有限的能量谱，假定 $w(t)$为白噪声过程；q 为广义坐标向量，$q \in R^n$.至此，式(1)刻画的系统可用图 1 描述.

为将式(1)降阶，做如下参数空间变换：$x = [q^{\mathrm{T}}\dot{q}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$.

代入式(1)后得系统的状态方程为

收稿日期：2005 - 11 - 30；修订日期：2005 - 12 - 26

作者简介：吴子燕(1962 年 -)女，浙江宁波人，西北工业大学教授.主要从事工程项目管理及建筑系统的并行设计研究等.

$$\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix}\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -S & -D \end{bmatrix}x + \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{B}_u \end{bmatrix}u + \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{B}_w \end{bmatrix}w$$

或简写为

$$E\dot{x} = Ax + B_u u + B_w w \tag{2}$$

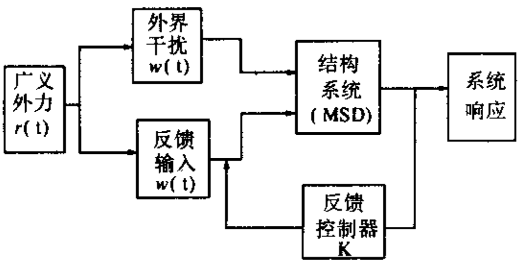

图 1 系统框图

Fig.1 Frame of system

在式(2)中,可优化的结构参数出现在质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵中,可优化的控制系统参数出现在控制输入矩阵 u 中.假定系统方程(1)是这些参数的映射,其具体形式如下:

$$M(\eta) = M_0 + \sum_s \eta_s M_s;$$

$$D(\beta) = D_0 + \sum_j \beta_j D_j;$$

$$S(\gamma) = S_0 + \sum_k \mu_k S_k.$$

上述映射中 M_s、D_j 和 S_k 是预先给定的扰动矩阵.令 $\alpha = (\eta, \beta, \mu)$,而状态方程式(2)中的矩阵 A 是 D 和 S 的函数,矩阵 E 是 M 的函数,故状态方程(2)也可以写成如下形式:

$$E(\alpha)\dot{x} = A(\alpha)x + B_u u + B_w(\alpha)w.$$

其中映射矩阵由下式给出:

$$A(\alpha) = A_0 + \sum_i \alpha_i A_i;$$

$$E(\alpha) = E_0 + \sum_i \alpha_i E_i;$$

$$B_w(\alpha) = B_{w0} + \sum_i \alpha_i B_{wi}.$$

上述映射中 A_i、E_i 和 B_{wi} 是预先给定的扰动矩阵.至此,所有可优化的结构参数都包含在变量 α 中,其中包括了质量参数.在结构与控制系统并行设计中,需要解决的核心问题是如何并行地设计结构参数 α 和控制输入力矩阵 u.

2 结构与控制系统设计集成

本模型中的反馈控制器 K 采用全状态反馈,控制输入信号为:$u(t) = Kx(t)$,式中 K 为反馈增益矩阵.用于衡量控制效果的控制输出为:$z(t) = C_z x(t)$,式中 C_z 为控制输出系数矩阵.

本模型的设计目标是使得作用于系统的控制输入力 $\sqrt{E[u(t)^{\mathrm{T}}u(t)]}$ 最小(本问题中控制输入力指控制外力),同时控制输出满足以下条件:$\lim_{t\to\infty} E[z(t)z(t)^{\mathrm{T}}] < \Omega$,式中 Ω 为给定的控制输出上限.这两个控制目标从本质上是矛盾对立的,依据参考文献[1],利用以下定理将这两个控制目标统一起来,达到并行集成设计的目的.

定理:假定扰动 $w(t)$ 为强度为 $W = W^{\mathrm{T}}$,$\lambda_i(W) > 0$ 的随机白噪声;令 $F = KP$;Ω 为一个给定的正定矩阵;考虑(2)中描述的系统.则下面的结论是等价的:

表述 1:存在结构参数 α,和一个稳态反馈控制力 $u(t) = Kx(t)$ 满足以下不等式:(式中为控制输入力上限)

$$\begin{cases} \lim_{t\to\infty} E[z(t)z(t)^{\mathrm{T}}] < \Omega \\ \lim_{t\to\infty} E[u(t)^{\mathrm{T}}u(t)] < \gamma \end{cases} \tag{3}$$

表述 2:存在相容尺寸矩阵 $P = P^{\mathrm{T}}, \lambda_i(P) > 0, U = U^{\mathrm{T}}, \lambda_i(U) > 0$ 和 F 及参数 α,满足下列矩阵不等式(式中:P 为 Lyapunov 矩阵,α 为待优化的结构参数,U 为控制输入表征矩阵)

$$\begin{bmatrix} A(a)PE(a) + E(a) & \\ PA(a)^{\mathrm{T}} + B_u FE(a) & B_w(a) \\ + E(a)F^{\mathrm{T}}B_u^{\mathrm{T}} & \\ B_w(a)^T & -W^{-1} \end{bmatrix} < 0 \tag{4}$$

$$Tr(U) < \gamma, \quad \begin{bmatrix} U & F \\ F^{\mathrm{T}} & P \end{bmatrix} > 0, \quad C_z P C_z^{\mathrm{T}} < \Omega \tag{5}$$

表述 3:对某些常数矩阵 G,存在相容尺寸矩阵 $Q = Q^{\mathrm{T}}, \lambda_i(Q) > 0, U = U^{\mathrm{T}}, \lambda_i(U) > 0$ 和 K 及参数 a,满足下列(LMI)线性矩阵不等式:(式中 G 为凸化势能函数矩阵,$Q = P^{-1}$)

$$\begin{bmatrix} (*) & B_w(a) & A(a) + B_u K & E(a) \\ B_w(a)^{\mathrm{T}} & -W^{-1} & 0 & 0 \\ A(a)^{\mathrm{T}} + K^{\mathrm{T}}B_u^{\mathrm{T}} & 0 & -Q & 0 \\ E(a)^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & -Q \end{bmatrix} < 0 \tag{6}$$

$$Tr(U) < \gamma, \begin{bmatrix} U & K \\ K^{\mathrm{T}} & Q \end{bmatrix} > 0, \begin{bmatrix} \Omega & C_z \\ C_z^{\mathrm{T}} & Q \end{bmatrix} > 0 \tag{7}$$

这里($*$)表示

$$-[A(a) + B_u K - E(a)]G^{\mathrm{T}};$$

$$-G[A(a) + B_u K - E(a)]^{\mathrm{T}} + GQG^{\mathrm{T}}.$$

上述定理中,表述 1 阐明了两个控制目标从本质上是矛盾对立的,表述 2 和表述 3 却将两个控制目标统一在一组矩阵不等式中,从而从理论上完成了结构与控制系统设计的集成化.

3 并行凸化算法设计

上述定理表述二中,如果矩阵 $A(a)$、$E(a)$

与结构优化参数 a 无关，换句话讲，就是结构参数如果完全确定，(4) 式中的各项均是 a 的线性函数，即式(4) 是一个线性矩阵不等式(LMI) 系统，此时的约束集式(5) 中的约束 U、P 和 F 均是凸面约束. 而实际上矩阵 $A(a)$、$E(a)$ 是结构优化参数 a 的映射，即(4) 式中 $A(a)PE(a)+B_uFE(a)$ 对 a、F 和 P 均是非线性的，因而其约束集式(5) 中的约束 U、P 和 F 均是非凸面约束. 为了解决这一难题，首先有必要引入凸化势能函数[2][3]，将约束集凸化，从而解决在已有结构(a 确定) 上设计控制系统这一问题.

依据参考文献[1,2]，令 x,η 属于凸集 Φ，$F(x)$ 是非凸矩阵函数. 凸化势能函数取为微分函数 $G(x,\eta)$，且函数 $F(x)+G(x,\eta)$ 对所有 x，$\eta\in\Phi$ 是关于 x 的凸函数. 如果 $F(x)$ 满足一定条件，则非凸面优化问题：

$$\bar{x}=\arg\min_{x\in\Omega}f(x),\ \Omega=\{x\in\Phi \mid F(x)<0\} \tag{8}$$

能够在下列凸面子问题之间进行迭代而得

$$x_{k+1}=\arg\min_{x\in\Omega_k}f(x),$$
$$\Omega_k=\{x\in\Phi \mid F(x)+G(x,x_k)<0\} \tag{9}$$

为了使优化问题(8) 和(9) 的优化条件等价，势能函数矩阵 G 应具有一些附加的特征：非负性和有限性；当且仅当 $x=\eta$ 时，$G(x,\eta)=0$.

为了将以上理论应用于本问题，将系统的状态方程(2) 做如下变形，令

$$\boldsymbol{\Delta}=\begin{bmatrix} a_1\boldsymbol{I} & & & \\ & \ddots & & \\ & & a_i\boldsymbol{I} & \\ & & & \ddots \end{bmatrix},\quad \boldsymbol{I}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}\\ \vdots\\ \boldsymbol{I}\\ \vdots\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_1\\ \vdots\\ \boldsymbol{A}_i\\ \vdots\end{bmatrix},\ \boldsymbol{B}_w=\begin{bmatrix}\boldsymbol{B}_{w1}\\ \vdots\\ \boldsymbol{B}_{wi}\\ \vdots\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{E}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{E}_1\\ \vdots\\ \boldsymbol{E}_i\\ \vdots\end{bmatrix}.$$

则矩阵 $A(a)$、$B_w(a)$ 和 $E(a)$ 可以写为：

$$A(a)=A_0+I\Delta A、B_w(a)=B_{w0}+I\Delta B_w,$$
$$E(a)=E_0+I\Delta E$$

这样，可优化的结构参数只包含在对角阵 Δ 中，代入状态方程式(2)，得

$$(E_0+I\Delta E)\dot{x}=(A_0+I\Delta A)x+B_uKx+(B_{w0}+I\Delta B_w)w.$$

移项整理得

$$E_0\dot{x}=(A_0+B_uK)x+I\tilde{u}+B_{w0}w.$$

式中：$\tilde{u}=u_2+u_3-u_1$；$u_1=\Delta y_1$，$y_1=E\dot{x}$；$u_2=\Delta y_2$，$y_2=Ax$；$u_3=\Delta y_3$，$y_3=B_ww$

以下就是应用凸化势能函数理论来解决这一问题，首先我们来定义非凸函数 $F(x)$. 将 $F=KP$ 代入非线性约束(4) 式，则(4) 式可以写成：

$$\begin{bmatrix} A_{cl}PA_{cl}^{\mathrm T}+EPE^{\mathrm T}-(A_{cl}-E)P(A_{cl}-E)^{\mathrm T} & B_w\\ B_w^{\mathrm T} & -W^{-1}\end{bmatrix}<0.$$

式中：$A_{cl}(a,K)=A(a)+B_uK$，此时矩阵 A_{cl}，B_w 和 E 均是 K 和 a 的函数，令 $x=(p,a,K)$，且 $Q=P^{-1}$，应用 Schur 补性质[4]，并定义其左边为 $F(x)$，上述不等式可以写成：

$$F(x)=\begin{bmatrix} -(A_{cl}-E)P(A_{cl}-E)^{\mathrm T} & B_w & A_{cl} & E\\ B_w^{T} & -W^{-1} & 0 & 0\\ A_{cl}^{\mathrm T} & 0 & -Q & 0\\ E^{T} & 0 & 0 & -Q\end{bmatrix}<0 \tag{10}$$

$F(x)$ 在结构参数 a 确定时是一线性矩阵不等式，但是它对 F、K 是非凸的，因此有必要引入凸化势能函数对其进行凸化. 定义凸化势能函数：

$$G(x)=(A_{cl}-E)P$$

使得函数 $F+G$ 是 x 的凸函数，同时定义凸化势能方程 $G(x,\eta)$：

$$0\leqslant G(x,\eta)=[A_{cl}-E-G(\eta)^{-1}]P.$$
$$[A_{cl}-E-G(\eta)P^{-1}]^{\mathrm T} \tag{11}$$

$G(x,\eta)$ 满足凸化理论中的非负性和有限性条件；而且当且仅当 $x=\eta$ 时，$G(x,\eta)=0$. 将(11) 式加到(10) 式的第一项上，得

$$F+G=\begin{bmatrix} \Lambda & B_w & A_{cl} & E\\ B_w^{\mathrm T} & -W^{-1} & 0 & 0\\ A_{cl}^{\mathrm T} & 0 & -Q & 0\\ E^{\mathrm T} & 0 & 0 & -Q\end{bmatrix}<0.$$

式中：$\Lambda=-(A_{cl}-E)G^{\mathrm T}-G(A_{cl}-E)^{\mathrm T}+GQG^{\mathrm T}$. 将 $A_{cl}=A(\alpha)+B_uK$ 代回上式得定理中的(6) 式，在这个矩阵不等式中，Lyapunov 矩阵 $P=Q^{-1}$ 和系统矩阵 $A(a)$、$E(a)$ 不再出现线性组合项，其组合关系被引入的凸化势能函数 $G(\eta)$ 所取代，这样就达到了凸化的目的了.

定义目标函数为使控制力协方差的上限最小，即：$f=\min\gamma>E[u(t)^{\mathrm T}u(t)]$，在一步迭代过程中，$\eta$ 保持为常数，待解的凸面子问题(9) 中 $\eta=x_k$. 这一并行凸化算法步骤如下：

(1) 定义目标函数：$f=\min\gamma$；

(2) 输入 a_0、η_0 和 E_0 的初始值，在式(4)、(5) 约束下，通过求解其可行解来计算反馈增益矩阵 K，Lyapunov 矩阵 P 的初始值 K_0，P_0

(3) 给定误差限 ε，令 $k=0$.

(4) 定义循环体:

① 赋值 $G_k = [A_{cl}^k(a_k) - E(a_k)]P_k$. ② 对于给定的 $G = G_k$,在约束集(6)、(7)约束下,求解 $f_k = \min\gamma$ 得到 a、U,将 a,$\gamma = f_k$ 代回式(4)、(5)重新计算可行解 P、K,$Q = P^{-1}$,将 P、a、K 代入 G_k. 并把当前解依次分别记作:a^*、K^*、Q^*、U^*. ③ 赋值 $k = k + 1$,$P_k = Q^{*-1}$,$a_k = a^*$,$K_k = K^*$,④ 判断 $\| f_k - f_{k-1} \| < \varepsilon$ 是否成立,若成立则结束循环,并输出结果;若不成立,转到第(1)步.

4 算例分析

考虑一个三层土木结构的抗震问题,采用集中质量力学计算模型如图 2 所示,控制输入独立作用于每个楼层,因此,在系统的状态方程(2)中:$\hat{B}_u = I$,$\hat{B}_w = (m_1 \quad m_2 \quad m_3)^{\mathrm{T}}$. 并假设扰动 w 为白噪声过程,其强度为 $w = 16\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{s}^{-4}$,它代表图 2 中的地面的地震加速度 $\ddot{x}_g$. 各层的初始结构参数如表 1 所示.

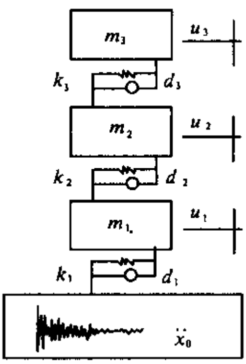

图 2 计算模型

Fig.2 Calculation model

表 1 给定的初始结构参数

Tab.1 Initial parameters of structure

	楼层质量 m_i/kg	刚度系数 k_i/(kN·m^{-1})	阻尼系数 d_i/(kN·s·m^{-1})
底层	5.897	33.732	67
中间层	5.897	29.093	58
第三层	5.897	28.621	57

在系统的状态方程(2)中,质量矩阵 $M = \mathrm{diag}(m_1 \quad m_2 \quad m_3)$,刚度矩阵 S 和阻尼矩阵 D 分别为

$$S = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix};$$

$$D = \begin{bmatrix} d_1 + d_2 & -d_2 & 0 \\ -d_2 & d_2 + d_3 & -d_3 \\ 0 & -d_3 & d_3 \end{bmatrix}.$$

系统的状态变量为:每个楼层相对于地面的位移和加速度,即 q_i 表示为 m_i 的位移,$\dot{q}_i$ 表示 m_i 的速度. 我们的目的是要寻求能够限制层间位移 $z_1 = q_1$,$z_{i+1} = q_{i+1} - q_i$,$i = 1,2$,和层间相对速度 $z_{i+3} = \dot{z}_i$ 的最小方差的设计,因此,控制输出系数矩阵 C_z 为

$$C_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}.$$

假定控制输出的方差上限分别为

$$E[z_i^2] \leqslant 0.000\,2(\mathrm{m}),\ i = 1,2,3;$$

$$E[\dot{z}_i^2] \leqslant 0.3(\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}),\ i = 1,2,3.$$

即:$\Omega = \mathrm{diag}(2 \times 10^{-4}, 2 \times 10^{-4}, 2 \times 10^{-4}, 0.3, 0.3, 0.3)$. 首先选取控制输入力 $\sqrt{E[u(t)^{\mathrm{T}} u(t)]}$ 初值 $\gamma_0 = 1.0 \times 10^{12}\mathrm{N}$,经过 31 次迭代,得到反馈增益矩阵 K、Lyapunov 矩阵 P 的可行解 K_0、P_0 为

$$P_0 = \begin{bmatrix} 0.0001 & 0.0001 & 0.0001 & -0.0018 & -0.0017 & -0.0018 \\ 0.0001 & 0.0002 & 0.0002 & -0.0016 & -0.0034 & -0.0027 \\ 0.0001 & 0.0002 & 0.0003 & -0.0015 & -0.0038 & -0.0050 \\ -0.0018 & -0.0016 & -0.0015 & 0.1716 & 0.1696 & 0.1695 \\ -0.0017 & -0.0034 & -0.0038 & 0.1696 & 0.3329 & 0.3216 \\ -0.0018 & -0.0027 & -0.0050 & 0.1695 & 0.3216 & 0.3605 \end{bmatrix}$$

$$K_0 = 1.0 \times 10^5 \times \begin{bmatrix} -7.5782 & 1.4181 & 1.7505 & -0.3869 & 0.0971 & 0.0449 \\ 3.0783 & -2.5241 & -1.9022 & -0.0831 & -0.1918 & -0.1554 \\ 2.3679 & -2.0068 & -2.8370 & 0.1235 & -0.1507 & -0.0983 \end{bmatrix}$$

此时的控制输入力为:$\gamma = 8.529\,1 \times 10^8$ N. 然后以 K_0、P_0 为初始值,选取迭代误差上限为 $\varepsilon = 0.000\,5$,迭代计算得到在结构优化参数 $a = [0.000\,1 \quad 0.000\,3 \quad 0.000\,5 \quad -2.603\,1 \quad -1.948\,5 \quad -1.191\,3]^{\mathrm{T}}$ 时,得到输入控制力的最小值:$f = \min\sqrt{E[u(t)^{\mathrm{T}} u(t)]} = \min\gamma = 2.124\,6 \times 10^6\,\mathrm{N}$,此时的结构参数如表 2.

5 结 论

(1) 从表 1 和表 2 的对比中可以看出,对与本文采用的三层建筑模型,底层的结构参数变化对控制输入力较其他层敏感,要想减小控制输入力,

就必须减小底层的质量,同时增大底层的刚度和阻尼.这正好适应建筑材料的轻质高强发展趋势.

(2) 利用上述设计的算法成功的解决了在随机激励作用下、以结构参数为优化变量、以控制输入力最小为优化目标的建筑结构与控制系统的并行设计问题,在优化设计结构参数的同时,将控制输入力由 $\gamma = 8.529\,1 \times 10^8$ N 降低到 $\gamma = 2.124\,6 \times 10^6$ N,这在实际中对减少结构控制系统造价意义重大.

表 2　优化后的结构参数

Tab.2　Optimized parameters of structure

	楼层质量 m_i/kg	刚度系数 k_i/(kN · m^{-1})	阻尼系数 d_i/(kN · s · m^{-1})
底层	3.293 9	38.928 2	71.551 6
中间层	3.948 5	27.144 5	56.051 5
第三层	4.705 7	27.429 7	55.051 5

(3) 从算法迭代过程看,该算法收敛性较好,收敛速度快,能有效的完成建筑结构与控制系统的协同设计,取得较好的设计效果.只是本设计算例没有充分考虑设计裕度,在实际工程中这些参数可能要作一些调整.例如,算例的优化结果中底层的质量减少近 50%,这在实际工程中很难实现,除了采用轻质高强的建筑材料之外,设计时还得作一定调整,这样相应的控制输入力就要增加.

参考文献:

[1] CAMINO J F , DE OLIVEIRA M C ,SKELTON R E. Convexifying linear matrix inequality methods for integrating structure and control design[J]. Structural Engineering @ ASCE 2003,129(7):978 ~ 988.

[2] JIANBO L, ROBERT E, SKELTON R E. Integrating structure and control design to achieve mixed performance [J]. INT J Control,2000, 73(16):1449 ~ 1462.

[3] DE OLIVEIRA M C, CAMINO J F, SKELTON R E. A convexifying algorithm for the design of structured linear controller[C].IEEE Conf. on Decision and Control, New Yoru:IEEE Pvess,2000.2781 ~ 2786.

[4] 俞　立. 鲁棒控制 – 线性矩阵不等式处理方法[M].北京:清华大学出版社. 2002.

[5] 许　波,刘　征. Matlab 工程数学应用[M].北京:清华大学出版社. 2000.

[6] 薛定宇. 反馈控制系统设计与分析 – MATLAB 语言应用[M]. 北京:清华大学出版社. 2000.

[7] 马书磊,冯冬青,陈铁军,等. 基于 Matlab 的线性最优控制系统鲁棒性分析[J]. 郑州大学学报(工学版).2002,23(4):57 ~ 59.

Study on the Method of the Collateral Design between Structure and Control System of Architecture Based on LMI

WU Zi – yan, HU Wei – peng

(School of Mechanics, Civil Engineering & Architecture,Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072,China)

Abstract: Based on linear matrix inequality (LMI), a parallel algorithm, which is used to solve the optimal problem under stochastic activation to get the minimum of control energy by changing the value of structure parameters, is presented to combine the structure and control of architecture to design simultaneously. This algorithm overcomes the deficiency of present methods in two aspects: (1) by introducing the mass matrix into optimal variable, the method broad the range of the optimization; (2) to solve the optimal problem with nonconvex constraint induced by control in structure, convexifying potential function is used to make the nonconvex constraint part to be convex, that reduce the complex of the algorithm greatly. The computation results prove that the parallel algorithm can improve the efficiency of the structure design.

Key words: collateral design; linear matrix inequality (LMI); control of structure