

82336

机械设计与制造与控制

论文集



1101010

上海交通大学科技交流室

机械设计、制造与控制论文集

目 录

多目标组合最优化问题的探讨及其应用

.....曾宪章、朱训生 (1)

放电加工中不同状态放电的机理及其工艺效果的研究

.....陈湛清、胡德金 (10)

微型轴承滚道表面层残余应力的试验研究

.....庄其昌 (20)

390V柴油机滑油泵噪声及其控制

.....谢咏絮 (32)

用功率谱分析机床传动误差

.....李锦西 (42)

疲劳试验机的电液力伺服系统研究

.....黄明慎、范崇託 (48)

增压式蓄能器型脉冲试验装置的研究

.....严金坤、张永泉、谢志刚 (56)

应用键图理论对先导式溢流阀动态性能的研究

.....任锦堂、吴良宝、陈正航、王显正 (66)

用单个试件验证元件或系统的寿命

.....段长宝、陆元章 (72)

抓斗挖泥船瓢斗角及起升绳计算拉力的确定

.....孙鸿范 (78)

用可靠性设计理论分析与确定安全系数

.....陈健元 (88)

状态空间法在机械振动中的应用	胡宗武、严隽琪 (98)
少齿差绞车的分析与研究	张国瑞 (107)
差动行星齿轮机构在塔吊中应用的分析	丁 怡 (117)
谐波传动柔轮强度的有矩理论计算	叶庆泰 (125)
一个简单而有效的直接优化法	郁永熙、周忠荣 (133)
补偿滑轮式起重机变幅装置优化设计	陆国贤、宋振宁 (139)
非均匀受压筒壳矩形板的后屈曲强度	周国梁、王殿臣 (151)
有限元法在装卸桥结构分析中的应用	黄秉刚 (163)
桥式起重机桥架结构动力特性的分析	黄之涛、范祖尧 (169)
三油楔浮环轴承研究——在旋转动载荷作用下理论分析、计算及试验	董 勋、吕慧瑛、陆红涛、杨佩珍 (177)
家用缝纫机平衡与振动的研究	邹慧君、徐锦康、樊启泰、孙英宝 (189)
“JD”型双圆弧齿轮的齿形研究和承载能力分析	花家寿 (201)
油槽对轴心轨迹的影响	王世佐、周中立、王栋青 (215)
雷诺方程的基本形式与切压流动	马家瑞 (227)

多目标组合最优化问题的探讨及其应用

机械工程系 曾宪章 朱训生

摘 要

本文将组合机床多轴箱传动系统设计中“一带多”方案优化设计问题归结为多目标规划求约束矩阵列向量为正的数目最多这样的优化问题,针对这一具体问题,提出一种方案组合方法,将约束函数当作目标函数来处理,并构造0—1目标,从而可以解目标函数取离散整数值这种优化问题。根据上述算法所研制的有关程序,通过实例设计计算,说明在优化结果、计算时间和程序篇幅几方面,较以往的设计方法均有较大的改进。

一、引 言

在组合机床多轴箱传动系统设计中,不论工作主轴或中间传动轴数目多少和如何分布,都可以根据它们的分布特性,在一定距离范围内,分解为若干单元的传动组合,规则的如园周分布或等腰梯形分布,不规则的则是几根较近的轴形成的“任意”分布。然后就可以设置一根中心轴作为公用轴,通过同排或不同排的若干对齿轮传动,带动同向回传的若干轴(图1)。这些轴的全体就形成一个“轴集”。因此,轴集的设计方法,是传动系统设计中最基本的,应用最多的一种设计方法,它充分体现出“一轴带多轴”(“一带多”)的优化设计目标。本文探讨的就是用数学方法解决传动系统设计中的“一带多”的方案优化设计问题。由于“一带多”的设计中各被带轴互相组合可以形成多种设计方案,因此,需要研究一种组合方法,通过最少次数的试算,就能方便地找出一种被带轴最多的可行设计方案。这里我们在建立约束矩阵的基础上,将约束函数当作目标函数来处理,提出0—1目标函数,并采用组合最优化方法,把问题归结为追求约束矩阵中列向量为正的个数达到最多的一种多目标组合最优化的算法。

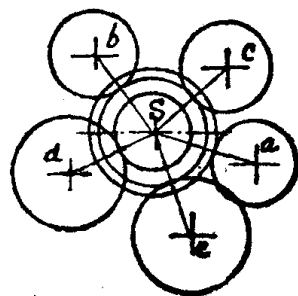


图1 “一带多”轴集

二、实际问题的抽象

1. 系统的自由度

设轴心坐标为 (x_s, y_s) , 转速为 n_s 的中心轴 S , 通过齿轮传动, 同时驱动 $K_i = K$ 根转向相同转速为 n_i 、轴心坐标为 (x_i, y_i) 的被带轴 $i (i = 1, \dots, k)$ 。记 z_{ji} (和 z_{si})为轴 j (和 s)上第 i 排齿轮的齿数。令 $k_0 = 0$, 记安放在第 i 排、模数为 m_i 的齿轮所在轴的序号为 $k_{i-1} + 1, k_{i-1} + 2, \dots, k_i (i = 1, 2, 3, 4, \dots)$ 。则根据啮合条件, 应满足下面的方程组:

$$\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} = \frac{m_i}{2} (z_{ji} + z_{ji}) \quad (1)$$

$$n_j z_{ji} = n_i z_{ji} \quad (2)$$

式中 $i = 1, 2, 3, 4, \quad j = k_{i-1} + 1, k_{i-1} + 2, \dots, k_i$

方程组(1)、(2)中, x_i, y_i 为已知参数, $n_i, n_j, x_i, y_i, z_{ji}, z_{ji}$ 为变量, 共有 $k + 3 + k + 4 = 7 + 2k$ 个, 而方程为 $2k$ 个。假定这些方程相互独立。于是, 对于四排一带多系统, 变量数恒比方程数多 7, 故恒有 7 个自由度。若设计中少用一个排次, 就减少一个变量 (z_{ji}), 故 I ($I = 1, 2, 3, 4$) 排一带多系统的自由度为 $I + 3$ 。但是被带各轴的实际转速 n_i 与理论转速 n_{jo} , 只允许有很小偏差, 在分析系统自由度时, 也可先将 n_i 看成常数 n_{jo} , 此时上述方程组的变量为 $k + 7k$, 当它与方程数 $2k$ 相等时, 即当 $k = 7$ 时, 上述方程组有唯一解 [注 1]。同样, 只用 I 排设计时, 一带 $I + 3$ 有唯一解 ($I = 1, 2, 3, 4$)。被带轴少于这些数目时, 系统的自由度非零。

因此, 当认为 $n_i = n_{jo}$ 、被带轴非规则分布时, 用 I 排最多“一带 $I + 3$ ”。轴集中被带轴超过 $I + 3$, 则要么巧合, 要么为规则分布。若考虑到 n_i 还可以在 n_{jo} 上下作一定范围内的小变动, 则不受上述数目限制。

此外, 也不难看出: 凡利用一个已设计齿轮, 即 z_{ji} 或 z_{ji} 中一个为已知时, 系统就要减少一个自由度。

可以将各种不同的一带多系统所具有的自由度与便于计算的决策变量列成表 1。针对各种情况, 可以编出各种子程序。为使程序设计简便, 任一种“一带多”系统的自由度的个数都可以取为 3。

2. 优化目标

在实际的“一带多”系统方案设计中, 可以提出各种优化目标, 例如:

- (1) 被带轴数最多;
- (2) 齿轮总数最少;
- (3) 变位齿轮个数最少;
- (4) 滚针轴承个数最少;
- (5) 其它参数的优化 (如齿轮总面积最小或传动质量最佳等)。

实现目标(1)、(2)、(3)、(4) 的设计称为方案优化, 实现目标(5)的设计称为参数优化。本文主要讨论如何实现第(1)个目标, 因为它是最主要的优化目标。

实现优化目标(2)的方法是: 首先找出同排带得最多的排次 i_1 与已带起其 k_{i1} 根轴。然后在保持上述条件下, 在余下的排次中与余下轴中找出同排带得最多的 k_{i2} 根轴及所在的排次 i_2 , 如此继续, 并且在上述过程中尽量利用已有的齿轮。这样最后得到的解不仅被带轴数最多, 而且齿轮总数最少。

在实现优化目标(1)、(2)的过程中, 通过齿轮齿数归整, 和首先考虑采用滚珠或滚锥轴承, 就比较容易地实现目标(3)和(4)

实现优化目标(1)、(2)、(3)、(4)的解, 往往是非唯一的。在这些解中只需用通常的优化方

注 1 “一带多”系统除必须满足方程组(1)、(2)外, 还必须满足一系列约束 (见后)。称直接从(1)、(2)得到的解为自由解, 又能满足所有约束的解为可行解。

法,即可找出一个满足优化目标(5)的解。

表 1

自由度数 决策变量 用到排次	3	2	1	0
	n_s, x_s, y_s	x_s, y_s	n_s	唯一自由解
同排	同排带 1	同排带 1, 利用一个已设计齿轮。同排带 2, 若此 2 轴转速相同, 宜取 x_s , n_s 作决策变量; 不同, 仍取 x_s, y_s 。	同排带 1, S 轴位置已定。同排带 2, 利用一个已设计齿轮。同排带 3。	同排带 4。 同排带 3, 利用一个已设计齿轮。 同排带 2, 利用二个已设计齿轮。
双排	双排带 2	双排带 2, 利用一个已设计齿轮。 双排带 3。	二排带 2, 均为已设计齿轮。 二排带 3, 有一个已设计齿轮。二排带 4。	二排带 5。二排带 4, 利用一个已设计齿轮。 二排带 3, 利用二个已设计齿轮。
三排	三排带 3	三排带 3, 利用一个已设计齿轮。 三排带 4。	三排带 3, 利用二个已设计齿轮。三排带 4, 利用一个已设计齿轮。三排带 5。	三排带 3, 利用三个已设计齿轮。三排带 4, 利用二个已设计齿轮。三排带 5, 利用一个已设计齿轮。三排带 6。
四排	四排带 4	四排带 4, 利用一个已设计齿轮。四排带 5。	四排带 4, 利用二个已设计齿轮。四排带 5, 利用一个已设计齿轮。四排带 6。	四排带 4, 利用三个已设计齿轮。四排带 5, 利用二个已设计齿轮。四排带 6, 利用一个已设计齿轮。四排带 7。

[注]:表中若有两个以上同排被带齿轮为已设计好的,若它们要被利用,首先必须满足齿数与转速成反比的条件。

3. 约束及约束矩阵

经过归并与整理,约束函数可以减少。它们主要是:

(1) 主轴的理论转速 n_{j0} 与实际转速 n_{ji} 相对偏差小于 Δ_1

$$b_{1ji} = \Delta_1 - \left| \frac{n_{j0} z_{si}}{n_{ji} z_{ji}} - 1 \right| \geq 0 \quad (3)$$

(2) 被带齿轮与中心齿轮的齿数 z_{ji} 与 z_{si} 须不小于最小齿数 $z_{\min j}$ 或 $z_{\min s}$, 而不大于最大齿数 $z_{\max i}$

$$b_{2ji} = z_{\max i} - z_{si} \geq 0 \quad (4)$$

$$b_{3ji} = b_{2i} = z_{\max i} - z_{si} \geq 0 \quad (5)$$

$$b_{4ji} = z_{ji} - z_{inji} \geq 0 \quad (6)$$

$$b_{5ji} = b_{6ji} = z_{si} - z_{minsi} \geq 0 \quad (7)$$

(3) s轴轴承外径 D_s 与任一已知轴轴承外径 D_r 间应保持一定的间隙 Δ_2

$$b_{8ri} = b_{8r} = \sqrt{(x_s - x_r)^2 + (y_s - y_r)^2} - \frac{1}{2}(D_s + D_r) - \Delta_2 \geq 0 \quad (8)^1$$

若令 $b_{8i} = b_8 = \min_{1 \leq r \leq l} \{ b_{8r} \}$, l 为已知轴数目, 则:

$$b_8 \geq 0 \quad (8)$$

(4) 中心轴轴套外径 d'_s 、中心齿轮齿顶及第 j 轴齿轮齿顶都不被干涉

$$b_{7j} = b_7 = d_{s1} - d'_s \geq 0 \quad (9)$$

$$b_{8j} = b_8 = d_{s2} - d'_s \geq 0 \quad (10)$$

$$b_{9j} = b_9 = d_{s3} - d'_s \geq 0 \quad (11)$$

$$b_{10ji} = d_{ji} - m_i(z_{ji} + 2 + 2c_{ji}) \geq 0 \quad (12)$$

$$b_{11ji} = b_{12ji} = d_{si} - m_i(z_{si} + 2 + 2c_{si}) \geq 0 \quad (13)$$

式中 c_{ji} 、 c_{si} 分别为在 i 排上第 j 轴与 s 轴上齿轮的变位系数。 d_{si} (和 d_{ip} , $p=1, 2, 3$)、 d_{ji} 分别为 (x_s, y_s) 、 (x_i, y_i) 到箱壁、到已知轴轴套以及到 i 排(和 p 排)上已知齿输齿顶的最小距离(包含必要的间隙)。

(5) 轴集内同排齿轮齿顶间保持一定间隙 Δ_3

$$b_{12ij} = b_{12ji} = z_{xi} - z_{mj} \geq 0 \quad (14)$$

其含义如下: 将同在 i 排上的所有被带齿轮通过数组变换重编序号, 记 r_i 、 l_i 分别为起始一个与最后一个齿轮所在轴的新序号, (x_i, y_i) 、 (x_j, y_j) 为第 i 、 j 个被带齿轮轮心坐标, 又记

$$n_{maxi} = \max_{r_i \leq j \leq l_i} \{ n_j \}$$

设转速为 n_{maxi} 的齿轮其齿数为 z_{mi} , 而

$$z_{xi} = \min_{\substack{r_i \leq t, j \leq l_i \\ t \neq j}} \left\{ \frac{2\sqrt{(x_t - x_j)^2 + (y_t - y_j)^2} - \Delta_3 - 2m_i}{m_i \left(\frac{1}{n_k} \right) + \left(\frac{1}{n_j} \right) n_{maxi}} \right\}$$

以上式(3)-(14)中 b_{qji} ($q=1, 2, \dots, 12$; $i=1, 2, 3, 4$; $j=k_{i-1}+1, \dots, k_i$)为第 i 排上第 j 轴齿轮设计时必须满足的第 q 个约束函数。若其值为正, 说明此约束被满足; 若为负, 取绝对值后为约束破坏量。因此设计第 j 轴必须满足12个约束, “一带 k ”必须满足 $12k$ 个约束。

各约束函数 b_{qji} 构成一个 $12 \times k_i$ 阶矩阵 B_i

$$B = \begin{pmatrix} b_{11}, \dots, b_{1j}, \dots, b_{1k} \\ b_{21}, \dots, b_{2j}, \dots, b_{2k} \\ b_{31}, \dots, b_{3j}, \dots, b_{3k} \\ b_{41}, \dots, b_{4j}, \dots, b_{4k} \\ b_{51}, \dots, b_{5j}, \dots, b_{5k} \\ b_{61}, \dots, b_{6j}, \dots, b_{6k} \\ b_{71}, \dots, b_{7j}, \dots, b_{7k} \\ b_{81}, \dots, b_{8j}, \dots, b_{8k} \\ b_{91}, \dots, b_{9j}, \dots, b_{9k} \\ b_{101}, \dots, b_{10j}, \dots, b_{10k} \\ b_{11k1}, \dots, b_{11ki}, \dots, b_{11k4} \\ b_{12k1}, \dots, b_{12kj}, \dots, b_{12k4} \end{pmatrix} \quad (15)$$

或简记为以列向量

$$B_j = (b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{12j}) \quad (16)$$

为元素的 $1 \times k$ 阶矩阵

$$B = (B_1, \dots, B_j, \dots, B_k) \quad (17)$$

我们称 B 为约束函数矩阵, 简称约束矩阵。

三、多目标组合最优化算法的建立

在上节约束矩阵 B 中, $B_j \geq 0$ 表示 j 轴完全满足约束条件, 也即表示该轴已设计成功。本问题的主要优化目标就归结为如何使 B 中列向量 B_j 非负的数目达到最多, 也就是被带轴数目最多。这样, 不同于一般的优化问题, 总目标函数不是连续函数, 而是离散的整数。民一方面, 在符合 $B_j \geq 0$ 的各个被带轴间, 还可以互相组成各种可能的设计方案。对于 k 根被带轴 4 排设计时。至少存在 4^k 个设计方案。因此还要研究一种组合方法, 使能以最少次数的方案试算即可得出某个可行的设计方案来。下面介绍为解决上述问题而建立的本算法的主要思想。

1. 组合最优化

下列事实是显而易见的。

(1) 若 S 轴不能同时驱动 $j_1, j_2, \dots, j_p$ 轴, 则任何包含 $j_1, j_2, \dots, j_p$ 的更多轴也必定不能通过一根 S 轴来驱动。

(2) 若 l ($l \leq k$) 根轴的所有各种组合其设计均无解, 才认为“一带 l ”无解。

于是, 我们可以设计一种组合最优化算法, 以实现被带轴最多的设计方案。以七根被带轴 a, b, c, d, e, f, g 为例(图 2)来说明本算法的设计过程。

(1) 若所给 l 根轴均有 $B_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, l$, 即设计成功, 则沿图中水平方向推进, 增加一根轴试算。若经过搜索, 设计无解。则沿图中垂直方向推进, 即对另外某 l 根轴的一种

组合试算。后一组合中含有的轴数总比前一个已设计成功的组合中含有的轴数多1。因此，当前记录下来的解即为当前被带轴数最多的一个可行解。

(2) 凡某种组合最后一根轴非 g ，则不论设计成功与否，均要沿水平或垂直方向推进。

(3) 若某组合最后一根轴为 g ，且设计成功，仍沿垂直方向推进。

(4) 凡某组合中含有 l 根轴，并且 $l < k$ ，若设计无解，并不意味着“一带 l ”失败，而必须继续沿垂直方向推进，直到 l 根轴的各种可能组合都设计无解，这时就承认上次成功的设计是被带轴最多的设计。

2. 约束函数当作目标函数处理

上面的组合最优化算法对“一带多”每一种推进到的组合方案都要进行求解或判断其无解。也就是要设法使该轴集的每根被带轴满足关于它的向量约束函数 $B_j \geq 0$ 或判断 B_j 恒负。为了使通常的优化方法能用来完成上述任务，可以进行如下变换：令

$$b_{q'j} = |b_{qj}| - b_{qj} = \begin{cases} 0, & b_{qj} \geq 0, q=1, 2, \dots, 12 \\ 2|b_{qj}|, & b_{qj} < 0, j=1, 2, \dots, k \end{cases} \quad (18)$$

则 $b_{q'j}$ 恒非负，于是我们只要极小化 $b_{q'j}$ ，在极小化过程中，若已发现 $b_{q'j} = 0$ ，则已求得 $b_{qj} \geq 0$ ，若 $b_{q'j}$ 极小化到最后还非 0，则 b_{qj} 恒负，即第 j 轴设计恒无解。但一个 $b_{q'j} = 0$ ，并不是第 j 轴设计成功。而必须 12 个 $b_{q'j}$ 均为 0 ($q=1, 2, \dots, 12$)，才表示该 j 轴设计成功。可将 12 个约束函数 $b_{qj}(x)$ 看作 12 个单元目标函数，于是，一根被带轴的设计也成为多个目标问题。由于 $b_{q'j}$ 为非负函数，如果取向量 $(b_{q'j}, b_{2'j}, \dots, b_{12'j})$ 在下述意义下的范数

$$B'_j = \sum_{q=1}^{12} |b_{q'j}| = \sum_{q=1}^{12} b_{q'j}, \quad (19)$$

那么 $B'_j = 0$ 等价于 12 个 $b_{q'j} = 0$ ，这样，求取向量函数 $B_j \geq 0$ 或判断 B_j 恒负的问题，就转化为普通优化方法可以解决的数量函数 B'_j 的单目标最优化问题。由于里我们将约束函数当作目标函数来处理，可使程序设计大为简化。

若引入等价符号“ $\Leftrightarrow$ ”，上述论证可用简明的数学语言表达。事实上

$$\begin{aligned} \text{第 } j \text{ 轴设计成功} &\Leftrightarrow B_j \geq 0 \Leftrightarrow \forall b_{qj} \geq 0 \quad (q=1, 2, \dots, 12) \\ &\Leftrightarrow \forall b_{q'j} = 0 \Leftrightarrow B'_j = 0 \end{aligned}$$

3. 0—1目标的提出

首先估计 B'_j 的大致范围，设其不超过 10^5 。若超过，可除以 10 的某次方作为中间函数，总可使 $B'_j(x) \leq 10^5$ 。我们令

$$A_j(\vec{x}) = \begin{cases} B'_j(\vec{x}), & B'_j(\vec{x}) \neq 0 \\ -10^5, & B'_j(\vec{x}) = 0, j=1, 2, \dots, k \end{cases} \quad (20)$$

就可用直接比较法求解本课题。其主要思想是：

从所给初值 $\vec{x}$ 。出发搜索，①若任何 $\vec{x}$ 总使 $B_1'(\vec{x}) \neq 0$ ，则将 B_2' 替换 B_1' 。②若搜索到 $B_1'(\vec{x}) = 0$ ，则据(20)式， $A_1(\vec{x}_1) = -10^8$ ，③再以 $\vec{x}_1$ 为初值极小化 $A_1(\vec{x}) + A_2(\vec{x})$ 。这过程中要比较 $A_1(\vec{x}_1) + A_2(\vec{x}_1)$ 与 $A_1(\vec{x}) + A_2(\vec{x})$ ，若 $B_1'(\vec{x})$ 与 $B_2'(\vec{x})$ 均非0，则 $A_1(\vec{x})$ 与 $A_2(\vec{x})$ 均大于0，于是

$$A_1(\vec{x}) + A_2(\vec{x}) > 0 > A_1(\vec{x}_1) + A_2(\vec{x}_1) = -10^8 + A_2(\vec{x}_1)。$$

根据直接比较法规则 $\vec{x}_1$ 被保留。仅当

$$A_1(\vec{x}) + A_2(\vec{x}) < A_1(\vec{x}_1) + A_2(\vec{x}_1) = -10^8 + A_2(\vec{x}_1)，$$

于是 $A_1(\vec{x})$ 与 $A_2(\vec{x})$ 中至少有一个为 -10^8 ，而另一个小于 $A_2(\vec{x}_1)$ 。继续调优， $\vec{x}$ 变动时， $A_1(\vec{x})$ 、 $A_2(\vec{x})$ 中为 -10^8 的那个继续保持，另一个逐渐减小。④经过搜索，若它总不能等于 -10^8 。于是将它舍弃，代以 $A_3(\vec{x})$ 转③。反之若它减小，达到 -10^8 ，即 $A_1(\vec{x}) + A_2(\vec{x}) = -2 \times 10^8$ ，意味着第1、第2轴均设计成功，则极小化 $A_1(\vec{x}) + A_2(\vec{x}) + A_3(\vec{x})$ ，如此类推。

有可能出现如下情况：已搜索到 $\vec{x}_1$ 点，满足 $A_1(\vec{x}_1) = -10^8$ 以 $\vec{x}_1$ 为初值再搜索到 $\vec{x}$ 点时，满足 $A_2(\vec{x}) = -10^8$ 与 $A_1(\vec{x}) \neq -10^8$ ，但又满足

$$A_1(\vec{x}) + A_2(\vec{x}) < A_1(\vec{x}_1) + A_2(\vec{x}_1)，$$

按直接比较法规则，将丢弃 $\vec{x}_1$ ，保留 $\vec{x}$ ，再继续调优。但保留的 $\vec{x}$ 使得 $A_1(\vec{x}) \neq -10^8$ ，意味着放弃已设计成功的第1轴。故将式(20)改为：

$$A_j(\vec{x}) = \begin{cases} B_j'(\vec{x}), & B_j'(\vec{x}) \neq 0 \\ -(10^8 + (k-j) \times 10^6), & B_j'(\vec{x}) = 0, j=1, 2, \dots, k \end{cases} \quad (21)$$

很明显， $B_j' \geq 0$ 不一定限于第 j 轴设计成功的条件， B_j' 也可是一般的向量函数，若令

$$\delta_j(\vec{x}) = \begin{cases} 1, & B_j'(\vec{x}) = 0 \\ 0, & B_j'(\vec{x}) \neq 0 \end{cases} \quad (22)$$

由于目标函数 $\delta_j(\vec{x})$ 只取0和1两个值，故称为0—1目标函数，简称0—1目标。

一般凡可归结为求

$$\max \sum_{j=1}^k \delta_j(\vec{x}) \quad (23)$$

或求

$$\min \sum_{j=1}^k [-\delta_j(\vec{x})] \quad (24)$$

的问题均可使用本算法。

四、结 论

利用多目标组合最优化的上述算法,我们研制了有关程序,并对一批组合机床多轴箱传动系统中的“一带多”轴集进行了设计,获得了较好的效果。其中的两个设计实例如图3和图4所示。

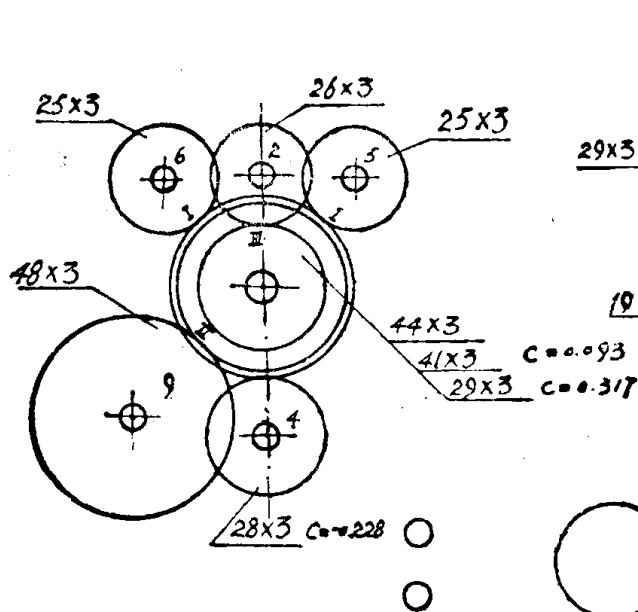


图3 “一带多”设计例

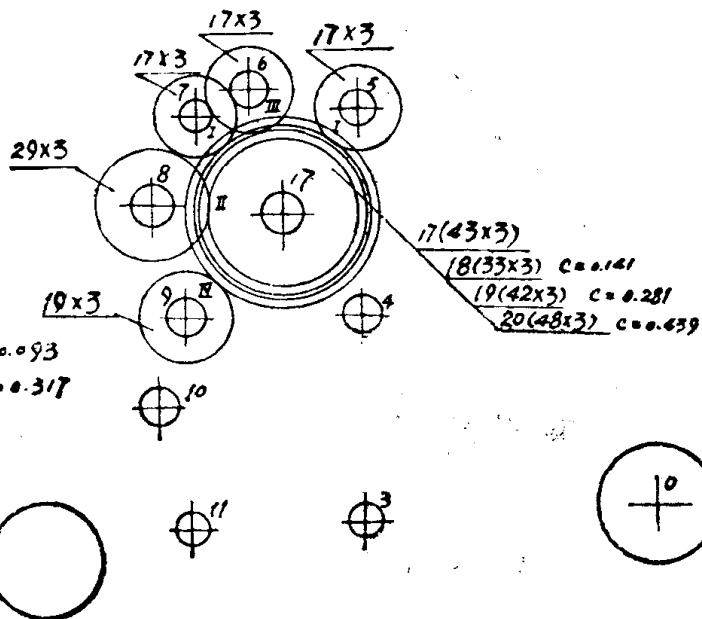


图4 “一带多”设计例2

值得提出的是:通常对齿轮齿数归整问题,一般是采取先设计再归整。而现在采用的方法是边设计边归整,因而保证了设计的实用性。

由本算法的设计结果,与文献[1]所介绍的“定二、逼三、找四、带五”方法比较,原来对“一带四”、“一带五”设计失败的可能性较大,设计时间也较长。而采用本算法对同一实例不实现起来较为容易,而且设计时间也可以缩短好几倍。程序数量也有所减少。本算法可但以直接用单纯形法、随机方向法等实现优化,简便易行。对于一般求 $B_i \geq 0$ 的数目最多的类似问题,均可推广应用,具有一定的普遍指导意义。

参 考 文 献

- [1] 曾宪章、孙中凯等: 《组合机床多轴箱传动系统计算机辅助设计》, 1981, 9
- [2] D.C. Wilde, C.S. Beightler: 《Foundation of Optimization》, 1967.

放电加工中不同状态放电的机理 及其工艺效果的研究

机械工程系 陈湛清 胡德金

摘 要

本文初步试用声技术研究放电加工机理。为此直接测量了伴随放电过程的声压，並將录制的声波形，对照其相应的极间电压信号及试样工艺效果同时进行分 析 研究。通过大量单发脉冲和重复脉冲放电实验，根据所得资料，进一步探讨了放电加工中火花放电、过渡放电、电弧放电三种主要形式放电的机理，形成条件和工艺效果。並由此引伸出用强化等离子放电通道的振荡，可以提高生产率、改善加工表面质量的理由。

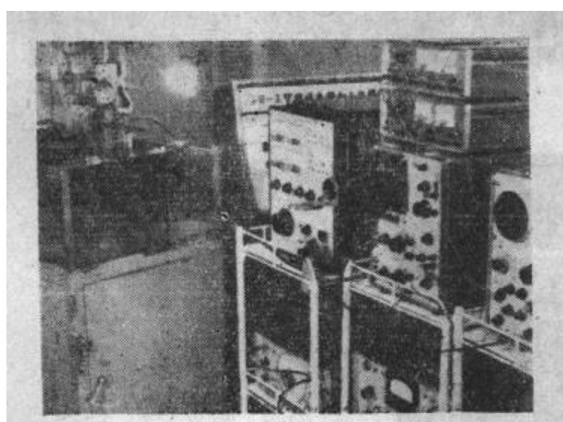
一、引 言

近年来由于低损耗及适控方面研究工作的进展，使放电加工技术达到了一个崭新的水平。同时也越来越使人们认识到放电状态机理的研究是当前迫切的关键问题之一。否则，无论对供能系统或适控系统的进一步改善，都将失去明确的依据。但是电加工中放电状态的区分及其形成条件的研究，本身却是相当困难的任务，所以目前尚处于百家争鸣的阶段，远没有达到趋于统一一致的认识。其原因，一是这种放电是在极小极间间隙之间发生的局部瞬态历程，这给观察和测量带来严重障碍。二是极间介电液在加工区污染情况下，经历着极为复杂的演变，这就使在单发脉冲实验中所得的规律，不能简单地引用于实际生产中的重复脉冲加工过程。第三是按“加工”这一特定范畴为对象的研究，对于复杂的各种放电状态的特征及其区分，不能直接搬用物理学或绝缘技术学科中现成的结论，而必须紧密联系加工工艺效果。本实验研究方案，试图竭力兼顾上述三方面特点，对放电过程的检测采集其声信号，这样比直接观察法，如高速照像等方式，所遇的障碍较少；且高速照像只便于研究单发脉冲，本研究既从单发脉冲取工艺试样，又同时进行更接近生产实际的重复脉冲加工实验以比较；並最后将工艺试样对照其相应的极间电压信号，声信号综合予以评定和分析。

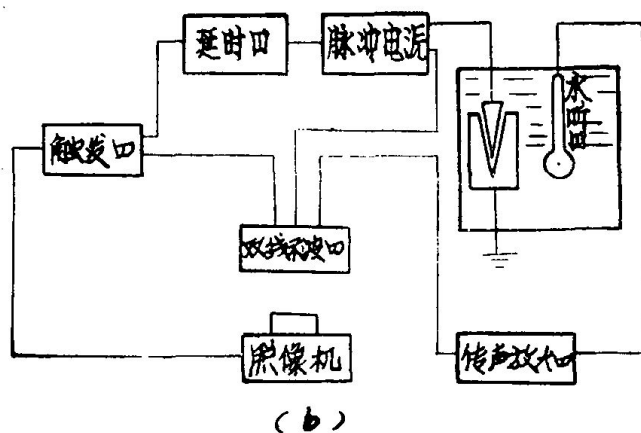
二、实 验 装 置

实验布置及框图如图 7 所示。带有手动和与照相机联动的触发装置，发出一负脉冲触发 SBR-1 双线示波器，同时也发出一负脉冲，经延时后到脉冲电源，延时触发脉冲电源的目的，是使电压波形和声波形均在示波器屏幕上合适的位置出现。在负脉冲的触发下，如系单发脉

冲实验, 则脉冲电源依照事先确定的电参数, 发出一个加工脉冲; 如系重复脉冲实验, 则脉冲电源依照事先确定的脉冲参数及脉冲个数, 发送一系列重复加工脉冲。另一方面, 以一标准水听器 SMH—101 作传感器, 置于距电极适当位置处, 当放电间隙有声能辐射时, 水听器把接收到的信号转换成电信号, 送入 FDC—2 传声放大器中, 经传声放大器线性放大后, 再输入双线示波器中。



(a)



(b)

图 1 实验布置及框图

在双线示波器的屏幕前, 放置一照相机, 当照相机快门按下时, 脉冲电压波形和声波形就可以同时记录下来了。

三、实验结果及其分析

从拍摄的大量照片来看, 不论单发脉冲放电或重复脉冲放电, 除了空载与短路外, 还都存在着如图 2 所示三种典型的放电形式, 即火花放电 2a, 过渡放电 2b, 电弧放电 2c。照片中, 火花放电时, 极间电压剧烈波动, 伴随着强烈的声压振荡; 电弧放电只有微弱的声辐射; 过渡放电的声辐射强度在火花放电与电弧放电之间, 但过渡放电是一种独立放电状态, 而不是介于火花与电弧放电之间连续渐变的放电状态。因为非但重复脉冲多次扫描时, 萤光屏上的电压波形可以区分出三种痕迹, 并不是在火花与电弧波形之间连续一片; 而且在重复脉冲单次扫描时, 所拍摄的大量照片, 无论就声波形或电压波形来看, 此三种放电形式的转换, 也都是阶跃式发生的。产生三种放电状态的极间间隙情况不同, 因而击穿过程不同, 放电通道的物理状态互有差异, 故其工艺效果也存在明显区别。

1. 火花放电机理及其工艺效果

放电加工中所指的火花放电, 其每个脉冲的等离子放电通道都必须是重新击穿液体介质而形成的。这称为通道在工作液中的正常转移, 它是避免在同一处重复放电以致烧伤工件表面等现象的先决条件。火花放电等离子通道能量的高度集中及剧烈的振荡是这种放电形式的基本特征。

放电通道重新建立所需要的时间, 反映为击穿延时。通道中绝大多数载流子, 是在分子、离子、电子发生大规模碰撞电离过程中重新产生的, 因而反映为强烈的声、光辐射^[1], 电磁波辐射^[2]。这种碰撞运动使这些离子和电子所携带的能量是一阵阵地送往阳极和阴极表面的

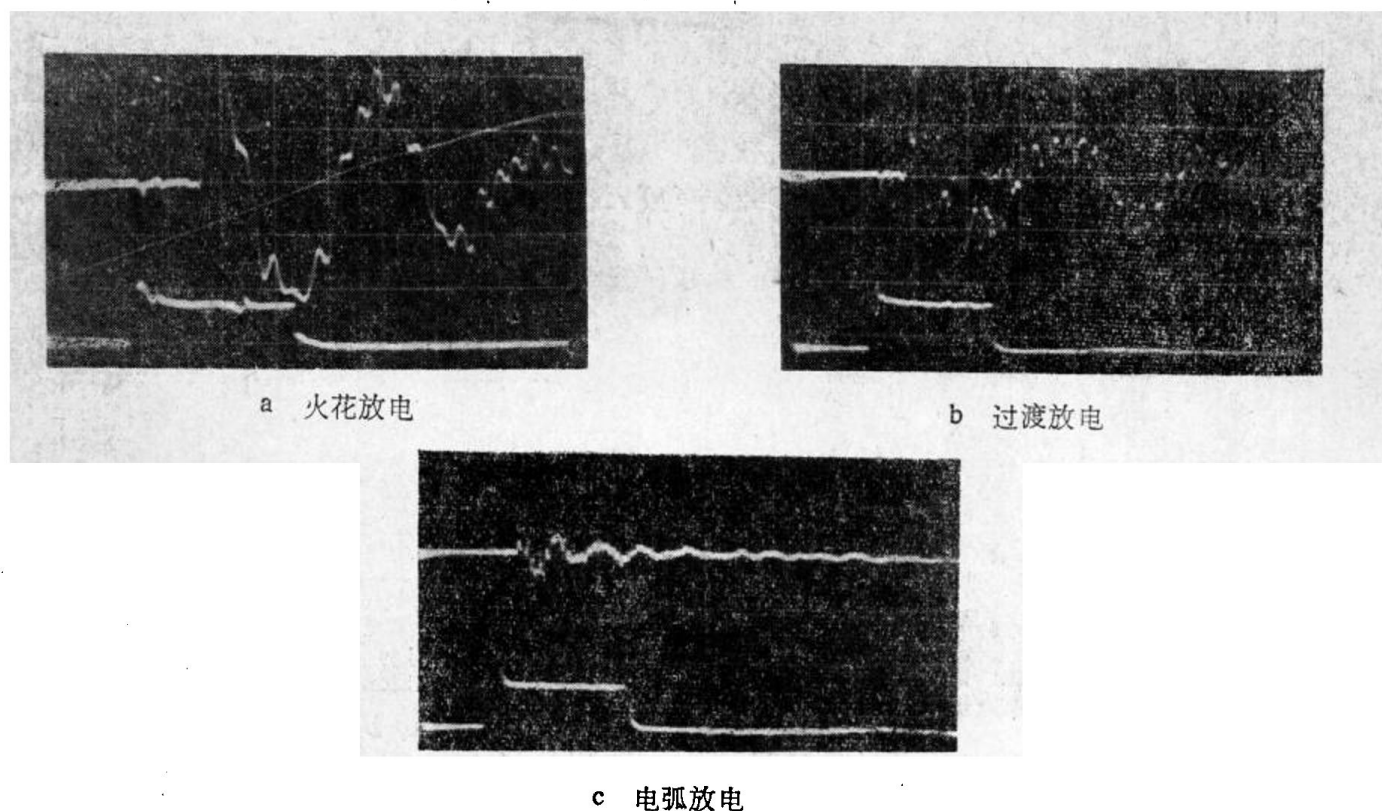


图2 几种典型放电状态声信号及极间电压信号比较

^{3]}。因为在通道初始形成的一瞬间，电流密度尽管很大，而总的电流强度仍然很低，因此，通常所称的电流强度起伏的“弹丸”效应，在此时就尤为显著。相当的统计学计算证明，电流强度的均方偏差 $\overline{\delta_i I^2}$ 与观察时间间隔 Δt 中电流的平均强度 $\overline{I \Delta t}$ 及载流子电荷 e 成正比。这也是这种放电形式通道振荡的一个因素。

$$\overline{\delta_i I^2} = \frac{\overline{I \Delta t} \cdot e}{\Delta t} \quad (1)$$

根据 Williams^[4] 和 Eckman 的理论研究，在等离子放电通道形成的初始阶段，通道内初始压强达到上兆个大气压。由于高压和几乎是瞬间形成的蒸气以冲击波的形式朝着放电通道的外面传播；初，气泡的边界和等离子放电通道的界面一致^[5]，接着放电通道、气泡、冲击波波阵面相分离。由等离子放电通道内部碰撞电离而产生的高温高压使通道迅速扩展。但此种扩展受到各种箍缩效应的作用使火花放电通道电流密度高度集中而振荡更为加剧。这些箍缩效应是：①通道及气泡形成及开始扩展初排挤工作液而受到工作液惯性反力的“液动力箍缩”。此力 $P(t)$ 与工作液密度 ρ 成正比，与气泡半径 R 的变化速度密切相关，如忽略工作液粘性

$$P(t) = P_0 + \frac{\rho}{2} \left[3 \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 + 2R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} \right] \quad (2)$$

②当电流密度很大情况下，由于洛伦磁力产生的磁箍缩效应相应增强。磁箍缩力 f 等于电流密度 j 与磁场强度 H 的向量积

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{H} \quad (3)$$

当通道中电流为 I ，通道半径为 r 时，从通道周边向内的箍缩力

$$P_m = \mu I^2 / 2\pi r^2 \quad (4)$$

③既然火花放电通道是在工作液中新的位置重新建立，故液体介质在开始一瞬间的低温对通道所形成的低温箍缩效应也尤为显著。上述箍缩作用加剧火花通道振荡的原因是：由于箍缩作用使通道收缩，电流密度加大，通道内温度及压力升高，因此收缩孕育着再度膨胀，而伴随着膨胀初的冲击，箍缩力的反作用增强，通道内温度及压力下降，又孕育着再度被压缩。

火花放电等离子通道的电流密度高，压强剧烈波动，使放电通道电阻，阴极区及阳极区电压降相应变化，反映在极间电压波形上是放电维持电压比另外两种放电形式（即过渡放电及电弧放电）为高，波动为大，如图3所示。

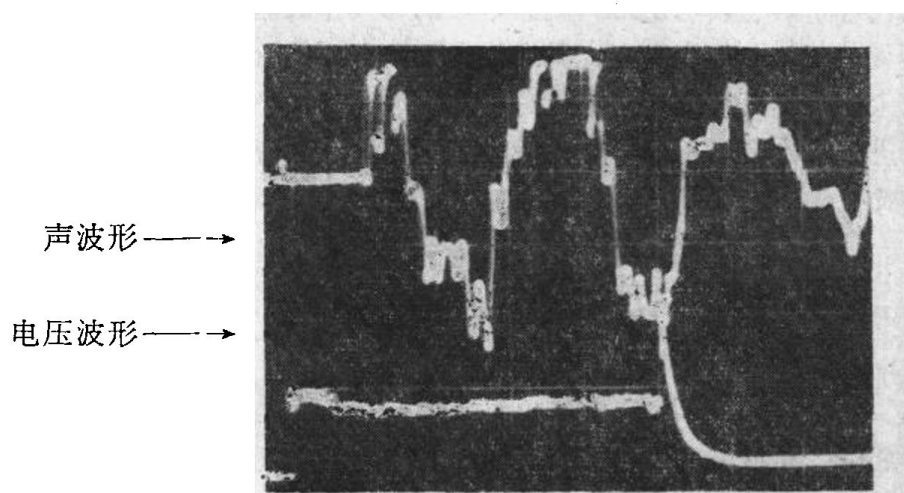


图3 火花放电时等离子放电通道振荡在声波形及电压波形上的反映

图中，声波形的低频部分是由气泡振动引起的^[7]，高频振动部分是由放电通道振荡所激励的，其频率在100KHZ左右，这与Eoin W. Gray用其它方法所测得的等离子通道振荡频率相近。^[8]

以上所论述的火花放电通道形成及其本质特征反映在工艺效果方面主要有：①在放电初期，金属蚀除主要是在电场力作用下被加速的载流子对电极表面的轰击^[9]。这种轰击在单位面积上压力F正比于电流密度，如对阳极工件而言

$$F = \frac{j_e}{c} (2mev)^{1/2} \quad (5)$$

式中 j_e 为通道中电子流的电流密度， e 为电子电荷， m 是电子质量， v 是阳极压降。火花放电所特有的强大冲击波及高度集中的电流密度，可能对脆性大或强度低的某些电极材料产生剥离作用。P.C.T.Willey 的实验^[10]，也观察到蚀除物中有未被熔化而直接从电极表面碎裂的金属微粒。近年来国内外对放电加工中电流脉冲前沿陡度工艺关系的研究，颇为人们所重视。此种关系按上面的分析在火花放电时，比其它放电形式应尤为显著。②火花放电等离子通道的振荡提高了已熔金属在蚀除凹坑中热爆炸抛出的效率。关于已熔金属在蚀除凹坑中的体积，可以由 Snoeys 和 F. Van Dyck 的熔化等温线公式(6)所确定^[11]。

$$T_m(r, z', t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_n}{2\lambda_n} J_0(\lambda_n r) \left\{ e^{\lambda_n z} \left[\operatorname{erf} \left(\lambda_n \sqrt{at} + \frac{Z}{2\sqrt{at}} \right) - 1 \right] + e^{-\lambda_n Z} \left[\operatorname{erf} \left(\lambda_n \sqrt{at} - \frac{Z}{2\sqrt{at}} \right) + 1 \right] \right\} \quad (6)$$

式中 $a = k/c'$ 修正的导热系数, k 热传导率, $c' = c + m/T_m$ 修正的比热, c 比热, m 熔解热, T_m 熔点温度, r_1 热源半径, r_2 零件半径, $c_n = 2qr_1 J_1(\lambda_n r_1) / k\lambda_n r_2^2 J_1^2(\lambda_n r_2)$, q 热功率密度, $\lambda_n r_2$ 是零阶贝塞尔函数 $J_0(\lambda_n r_2)$ 的零点。公式(6)将热功率密度及热源半径都作为常数, 且忽略了气化潜热, 因此比较接近于其它较稳定形式的放电, 而与火花放电实际情况偏差较大。然而一般讲已熔金属并不能由凹坑中彻底抛出, 抛出效率与放电区能否获得足够强大的爆炸力有关, 这已由日本东京大学科学研究所增泽隆久的实验所论述^[12], 在上海交通大学曾作过的另一研究工作中, 更进一步论证了所谓爆炸力对抛出作用的实质密切联系着放电通道振荡的压力波动而产生的沸腾性抛出^[13]。由于熔化金属液面压力变化对其沸点的影响可表示为:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\lambda}{T(V_1 - V_2)} \quad (7)$$

式中 T 是金属的沸点, λ 气化热, V_1 单位重量的气体体积, V_2 单位重量的液态体积。当通道压力波动突然由高降低时, 在高压下仍然处于液态的过热金属, 由于内能本已蓄积, 因此可以迅猛地即时转为局部爆沸, 激起剧烈的热爆炸冲击波, 使金属蒸气联同凹坑内液态金属一并喷出。著者也曾根据自己的实验, 观察到声波形幅值越大, 金属蚀除量越大的现象, 并就某类特定情况归结出近似的经验公式^[7]。③火花放电通道强烈振荡有利于提高加工表面质量。由于局部爆沸产生的热爆炸冲击波, 常使放电通道破裂, 断裂、阻滞以及金属微粒造成的偶然瞬时短路等。从大量拍摄的照片观察, 往往仅在一次脉冲内的火花放电过程中, 即可能发生多次重复击穿, 如图4所示。爆沸与通道振荡相互增强, 因而通道位置不停徙动, 电极表面热源不稳定在一处, 致使蚀除凹坑不规则扩大, 如图5a与5b即成鲜明的对比。声波形频率越高, 金属表面被腐蚀的面积越大。强烈的通道徙动, 使蚀除凹坑平均深度与凹坑面积之比减小, 通道固定在同一位置时间短促, 以及凹坑内已熔金属抛出彻底的结果, 使加工表面组织的热破坏层较其它放电形式为浅, 从而有利于提高表面加工质量。

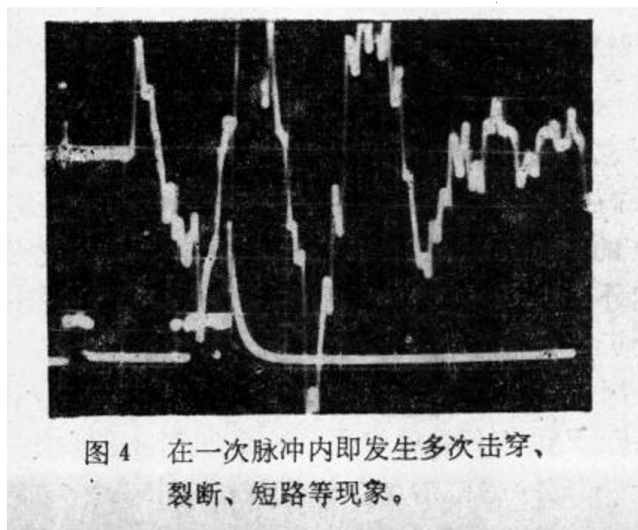


图4 在一次脉冲内即发生多次击穿、
裂断、短路等现象。